



Salvatore Califano  
Vincenzo Schettino

# L'atomo: una storia millenaria



FIRENZE  
UNIVERSITY  
PRESS

SEMINE

- 2 -

SEMINE

*Editor-in-Chief*

Pierandrea Lo Nostro, University of Florence, Italy

*Scientific Board*

Ferdinando Abbri, University of Siena, Italy

Nicola Armaroli, CNR, Italy

Vincenzo Balzani, University of Bologna, Italy

Ugo Bardi, University of Florence, Italy

Marco Benvenuti, University of Florence, Italy

Marco Beretta, University of Bologna, Italy

Fabio Calascibetta, Sapienza University of Rome, Italy

Luigi Campanella, Sapienza University of Rome, Italy

Ernesto Di Mauro, Tuscia University, Italy

Sara Falsini, University of Florence, Italy

Debora Giorgi, University of Florence, Italy

Luca Nicotra, Associazione Arte e Scienza, Italy

Duccio Tatini, University of Siena, Italy

Salvatore Califano e Vincenzo Schettino

# L'atomo: una storia millenaria

FIRENZE UNIVERSITY PRESS

2024

L'atomo: una storia millenaria / Salvatore Califano, Vincenzo Schettino. –  
Firenze : Firenze University Press, 2024.  
(Semine ; 2)

<https://books.fupress.com/isbn/9791221503869>

ISBN 979-12-215-0385-2 (Print)

ISBN 979-12-215-0386-9 (PDF)

ISBN 979-12-215-0387-6 (XML)

DOI 10.36253/979-12-215-0386-9

Progetto grafico di: Alberto Pizarro Fernández, Lettera Meccanica SRLs  
Immagine di copertina: © pikepicture|123rf.com

Volume sottoposto a referaggio con modello doppio cieco.

© 2024 Firenze University Press

Università degli Studi di Firenze

via Cittadella, 7

50144 Firenze, Italy

[www.fupress.com](http://www.fupress.com)

Semine, 2

Prima Edizione: luglio 2024

Tutti i diritti riservati.

*Stampato in Italia da Logo S.r.l. Borgoricco (PD)  
su carta ecologica certificata FSC.*

Se tutta la conoscenza scientifica andasse perduta in un cataclisma, quale singola affermazione potrebbe preservare più informazione per la successiva generazione di uomini? Come potremmo meglio trasmettere la nostra comprensione del mondo? Io proporrei: tutte le cose son fatte di atomi – piccole particelle che si muovono in giro in moto perpetuo, attraendosi tra loro quando sono a distanze piccole, ma respingendosi quando sono schiacciate una contro l'altra. In questa singola frase, come potete vedere, c'è una enorme massa di informazioni sul mondo, se si applica un po' di immaginazione e di riflessione.

Richard P. Feynman



# INDICE

Prefazione	11
Introduzione	17
Ringraziamenti	19

## CAPITOLO 1

L'atomo prima dei Greci	21
1.1 Mochus, il fenicio	21
1.2 Kanada, il mangiatore di atomi	24

## CAPITOLO 2

I filosofi ionici	29
2.1 Talete di Mileto	33
2.2 Anassimandro	36
2.3 Anassimene	42
2.4 Eraclito	43
2.5 Anassagora	46

## CAPITOLO 3

Scienza e filosofia nella Magna Grecia	51
3.1 Pitagora: la matematica in scena	52
3.2 Parmenide e la scuola eleatica	71
3.3 Empedocle e i quattro elementi	76

## CAPITOLO 4

L'atomismo greco	83
4.1 Leucippo e Democrito	83
4.2 Epicuro e la scuola del <i>Giardino</i>	90

## CAPITOLO 5

Antiatomismo	107
5.1 Platone e il mondo delle idee	108
5.2 Aristotele	114

## CAPITOLO 6

Sopravvivenza sottotraccia dell'atomismo	119
6.1 La rivelazione cristiana e l'atomismo	124
6.2 L'Islam e l'atomismo	129

## CAPITOLO 7

La rinascita dell'atomismo	133
7.1 Caccia agli antichi manoscritti	133
7.2 La rivoluzione galileiana	135
7.3 Il vuoto esiste	144
7.4 Gassendi e il ritorno dell'atomismo	145
7.5 L'atomismo di Galileo	148
7.6 L'atomo si affaccia nel laboratorio	150
7.7 Newton e le interazioni tra atomi	160

## CAPITOLO 8

L'atomo dei chimici	165
8.1 Robert Boyle e l'alba della chimica	165
8.2 Il flogisto: teoria con le gambe corte	170
8.3 L'affinità chimica	173
8.4 La chimica pneumatica	175
8.5 Lavoisier e il trattato elementare di chimica	178
8.6 Dalton e il nuovo sistema della chimica	188
8.7 Materia ed elettricità	198
8.8 Avogadro: atomi e molecole	200
8.9 Mendeleev e il sistema periodico	208

## CAPITOLO 9

La fine dell'atomo indivisibile	217
9.1 L'atomo in cerca di un'identità	217
9.2 Gli atomi e la termodinamica statistica	219
9.3 La chimica organica e la struttura spaziale delle molecole	222

## INDICE

9.4 L'inizio della spettroscopia	224
9.5 La scoperta dell'elettrone	227
9.6 La radioattività	230
9.7 Modelli atomici e atomo planetario	237
9.8 La meccanica quantistica	241
9.9 Una storia senza fine	254
Riferimenti bibliografici	263
Indice dei nomi	269



## PREFAZIONE

I dibattiti intorno al concetto di atomo hanno attraversato l'intera storia del pensiero scientifico e filosofico. La domanda fondamentale che è stata discussa in epoche diverse, con atteggiamenti diversi, può essere così riassunta: il mondo che chiamiamo «materiale» è divisibile, all'infinito, in parti sempre più piccole o è invece costituito da combinazioni di *oggetti ultimi*, che sono indivisibili, e che i filosofi greci chiamarono appunto «atomi»?

In realtà, questa domanda sorge non solo a proposito del mondo fisico, ma anche nella matematica. Pensiamo, per esempio, ad una retta. Come dobbiamo concepire questo fondamentale ente geometrico? Come un oggetto ideale, che è potenzialmente suddivisibile all'infinito, o invece come un insieme di elementi indivisibili, rappresentati dai punti? Su questa questione si sono scontrate concezioni diverse dell'infinito, che hanno dovuto fare i conti anche con alcuni intriganti paradossi logici. I più antichi sono i celebri paradossi di Zenone di Elea, che hanno rappresentato un rompicapo in tutta la storia della matematica e sono ancora oggi oggetto di discussioni importanti. Secondo Zenone, è impossibile per il piè veloce Achille raggiungere una tartaruga. Infatti, per percorrere la distanza che lo separa dalla tartaruga, Achille dovrebbe prima percorrere la metà di quella distanza, e prima ancora la metà di quella metà, e così via all'infinito. Non ci sarebbe dunque il tempo necessario per raggiungere la tartaruga. Molti secoli dopo, i paradossi dell'infinito turbarono anche il pensiero di Galileo. Il suo ragionamento intorno alle «stranezze» dell'infinità dei numeri naturali (1, 2, 3, ...) può essere così riassunto: ad ogni numero naturale è possibile associare in modo biunivoco il suo doppio (che è un numero pari). Dunque, sembra giusto concludere che *i numeri naturali sono tanti quanti i numeri pari*. Nello stesso tempo si deve ammettere

che *i numeri naturali sono di più dei numeri pari*, perché esistono infiniti numeri dispari. Questo sembra dar luogo ad una contraddizione che Galileo non riuscì a risolvere.

Una soluzione rigorosa per le *antinomie dell'infinito* fu trovata solo nella seconda metà del Novecento, nel contesto della *teoria degli insiemi*, creata dal matematico Georg Cantor. L'idea «rivoluzionaria» di Cantor è stata quella di proporre come definizione di *infinito* proprio quelle proprietà che erano apparse contraddittorie: diversamente dagli insiemi finiti, *gli insiemi infiniti sono quegli insiemi che possono essere messi in corrispondenza biunivoca con una loro parte propria*. Su questa base Cantor elaborò una nuova teoria dei *numeri transfiniti*, che permetteva di spiegare le «stranezze» dell'infinito, messe in luce da Zenone e da Galileo. In realtà, anche la teoria originaria di Cantor non era immune da contraddizioni, che furono scoperte e poi corrette da Bertrand Russell all'inizio del Novecento. Oggi abbiamo a disposizione una varietà di teorie assiomatiche degli insiemi che costituiscono un buon *fondamento* per le più importanti teorie matematiche conosciute, che hanno un ruolo importante anche nel linguaggio della fisica. Le teorie degli insiemi di ispirazione cantoriana sono caratterizzate da una concezione *attuale* dell'infinito, che potremmo chiamare «atomistica». Il *continuo geometrico* viene rappresentato come un insieme di elementi indivisibili che coesistono: i *punti*, a cui corrispondono i *numeri reali*. Nelle discussioni moderne sui fondamenti della matematica è stata proposta anche una visione alternativa (difesa, per esempio dai matematici *intuizionisti*) secondo cui il *continuo* deve essere rappresentato come un *oggetto ideale olistico*, che è suddivisibile all'infinito solo potenzialmente.

*L'atomo: una storia millenaria* di Salvatore Califano e Vincenzo Schettino è un libro molto bello, che ricostruisce una storia affascinante di idee e di teorie, dove i dibattiti filosofici si sono intrecciati con ipotesi e scoperte scientifiche. In questo viaggio, che è insieme storico e teorico, il lettore incontra molte tappe importanti: dalle concezioni atomistiche e da quelle anti-atomistiche proposte dai filosofi greci, alla rinascita dell'atomismo realizzata dalla rivoluzione scientifica galileiana e dagli sviluppi della chimica moderna, fino alle più recenti conquiste della fisica contemporanea. Si tratta di problemi complessi che gli Autori sono riusciti ad illustrare con un linguaggio intuitivo, con l'aiuto anche di alcune bellissime immagini. Accanto alle scoperte e alle discussioni scientifiche e filosofiche, il libro racconta anche episodi delle vicende umane di alcuni grandi protagonisti. Sono

molto interessanti, per esempio, le pagine dedicate alle figure affascinanti di Marie e Pierre Curie, che hanno vissuto una collaborazione scientifica straordinaria ed anche una grande storia d'amore, interrotta bruscamente da un assurdo incidente stradale che provocò la morte prematura di Pierre.

Come sono mutate nella fisica del Novecento le idee tradizionali intorno al concetto di atomo? L'ultimo capitolo del libro è dedicato alla meccanica quantistica, la teoria che ha determinato un'importante «rivoluzione» concettuale sia dal punto di vista scientifico sia dal punto di vista filosofico. Una delle idee più innovative della teoria quantistica, inizialmente apparsa «strana e misteriosa», è la scoperta della *dualità onda-corpuscolo*. Scrivono i nostri Autori:

Le ipotesi di Planck e di Einstein introdussero un concetto fondamentalmente nuovo nella fisica e cioè che la radiazione elettromagnetica ha una duplice natura di onda e di corpuscolo. L'aspetto rivoluzionario di questo sta nel fatto che questa duplice natura si manifesta alternativamente a seconda dell'esperimento che si esegue. Negli esperimenti di diffrazione e di interferenza la radiazione si comporta come un'onda .... Negli esperimenti del corpo nero e dell'effetto fotoelettrico, invece, l'interpretazione deve essere fatta in termini di una costituzione corpuscolare. Questo fatto comporta una nuova profonda riflessione sulla natura stessa della nostra conoscenza del mondo che ci circonda. Dobbiamo infatti porci la domanda se il mondo materiale che noi studiamo abbia una sua struttura ed evoluzione di cui lo scienziato è semplice osservatore ed interprete o se lo sperimentatore, decidendo l'esperimento da eseguire, costringe la natura a comportarsi in un modo o in un altro. Lo sperimentatore, quindi, non è un semplice osservatore ma un protagonista.

Il principio che ha sancito nel modo più chiaro il ruolo di protagonista dell'osservatore nel mondo dei quanti è il *principio di indeterminazione* scoperto da Werner Heisenberg nel 1927. Come spiegano i nostri Autori, il punto di partenza di Heisenberg era che in un esperimento ideale per osservare sia la posizione sia la velocità di un elettrone bisognava illuminarlo con una radiazione di lunghezza inferiore al suo raggio ed osservare la luce diffusa con un adatto microscopio. I fotoni colpendo l'elettrone lo fanno spostare dalla sua posizione e gli fanno cambiare velocità. Con quanta più precisione cerchiamo di misurare la posizione dell'elettrone tanto più altereremo la sua velocità, e viceversa. Il principio di indeterminazione stabilisce che il prodotto degli

*errori* su posizione e velocità non può essere inferiore a un certo limite. Si potrebbe pensare che l'incertezza messa in luce dal principio di Heisenberg sia dovuta ai limiti delle capacità umane nelle osservazioni e nelle misurazioni eseguite. Ma, in realtà, non è così. Si tratta di una indeterminazione *oggettiva*, e non puramente *epistemica*, che vale anche per una ipotetica «mente onnisciente». Secondo il formalismo matematico della teoria quantistica può accadere che un fisico-osservatore abbia intorno all'oggetto che sta studiando (per esempio un elettrone) un *massimo di informazione*, ossia un'informazione che non può essere estesa in modo coerente ad una conoscenza più ricca. In questo caso si usa dire che il nostro fisico ha associato all'oggetto studiato uno *stato puro*. Ma, proprio in virtù del principio di indeterminazione, questo stato puro non può *decidere* tutte le proprietà rilevanti dell'oggetto descritto: molte proprietà importanti restano indeterminate e viene assegnato ad esse soltanto un valore di probabilità. Inoltre, l'insieme delle *proprietà indeterminate* non è stabilito in assoluto, ma dipende dal contesto sperimentale: una proprietà che era *indeterminata* può diventare *determinata* per effetto di una misura. Tutto questo ha creato naturalmente una «rivoluzione» in campo logico, mettendo in crisi il classico principio del *terzo escluso*, secondo cui ogni proposizione deve essere *vera* oppure *falsa* (*tertium non datur!*). La meccanica quantistica ha ispirato così la creazione di nuove teorie logiche che sono state chiamate «quantistiche».

Nel loro libro Califano e Schettino hanno raccontato anche i dubbi e le perplessità dei padri fondatori della meccanica quantistica sulle «stranezze e gli enigmi» della nuova teoria che stavano via via elaborando. Discutevano animatamente fra loro e spesso erano in disaccordo sia dal punto di vista tecnico sia dal punto di vista filosofico. I dibattiti più celebri sono quelli che hanno coinvolto due importanti protagonisti: Niels Bohr e Albert Einstein. Erano due grandi amici che lavoravano vicini presso l'*Institute for Advanced Study* di Princeton, ma sulla meccanica quantistica avevano posizioni antitetiche. Einstein riteneva che la meccanica quantistica fosse una teoria statisticamente corretta, ma *incompleta* e destinata ad essere superata da una nuova teoria deterministica «dove Dio non gioca a dadi».

Ai nostri giorni l'atteggiamento di molti fisici è cambiato profondamente. Di solito, le stranezze e gli enigmi della meccanica quantistica non fanno più paura, anche perché si sono moltiplicate le conferme sperimentali della teoria, contraddicendo eventuali ipotesi alternative. Nello stesso tempo, una linea di pensiero interessante, che si sta dif-

fondendo, ha messo in luce l'*universalità* del formalismo quantistico, che può essere applicato con successo a campi diversi (anche lontani dalla microfisica), dove fenomeni semantici di *ambiguità*, *contestualità* ed *olismo* hanno un ruolo importante. Tutto questo può creare un ponte significativo fra ricerche scientifiche e discipline umanistiche.

*Maria Luisa Dalla Chiara*



## INTRODUZIONE

Dare alle stampe questo volume sulla storia dell'atomo non è per me la semplice conclusione di un lungo lavoro ma è, soprattutto, un omaggio e un ricordo del mio indimenticabile maestro e grande amico Salvatore Califano, insieme al quale questo libro è stato concepito e scritto.

In genere, quando si scrive un libro in collaborazione si procede ad una ripartizione del lavoro in modo che, concordato uno schema dei contenuti e dell'approccio al problema, ciascun autore scriva una parte secondo le proprie preferenze e competenze specifiche per giungere poi ad una omogeneizzazione finale dei contenuti. La storia di questo libro è stata alquanto diversa. Ognuno dei due autori ha scritto autonomamente una sua storia dell'atomismo e questo volume è la fusione di due opere costruite indipendentemente. La cosa sarebbe stata impossibile se con Salvatore non avessimo tante volte parlato delle storie contenute in questo volume e non avessimo condiviso una interpretazione dello sviluppo dell'atomismo nel corso del tempo. Comunque, questa inusuale procedura mi è parsa molto gratificante come manifestazione della nostra collaborazione scientifica e culturale nel corso di oltre cinquant'anni.

Dopo che Salvatore ci ha lasciato all'inizio di questo anno, ho continuato e completato la fusione dei due scritti, anche secondo quello che era stato un suo mandato e continuo incoraggiamento. Essere giunto alla pubblicazione di questo libro costituisce per me un omaggio a un personaggio straordinario ed è un modo per mantenere vivo il suo ricordo.

La storia dell'atomismo è una storia affascinante sotto molti punti di vista e inizia nel modo più semplice possibile come risposta alla osservazione quotidiana della divisibilità degli oggetti materiali e alla domanda riguardo al limite estremo fino al quale questa divisibilità si possa realmente spingere.

Pensare che l'universo che ci circonda, dai corpi macroscopici che popolano i cieli agli oggetti della quotidianità e ai meccanismi degli organismi viventi, fossero costituiti da oggetti invisibili era una sfida per gli antichi filosofi naturali che cercavano di sfuggire al dominio dei vecchi miti e di forze soprannaturali che determinavano il destino dell'uomo e ogni evento naturale. Partendo da una concezione materialistica, l'atomismo ha combattuto una straordinaria e lunga battaglia per andare oltre le convenzioni radicate dell'etica privata, pubblica, politica e religiosa e oltre concezioni filosofiche ostili.

È un fatto alquanto straordinario che alla storia dell'atomismo abbiano concorso filosofi, filosofi naturali, tecnologi, matematici, medici, alchimisti, biologi e poi, quando si è andata formando una moderna cultura scientifica, fisici, chimici, biologi, farmacisti, medici. Questo rende conto del fatto che la storia dell'atomismo è una storia estremamente complessa e articolata ma non è stata un campo coltivato da specialisti. Il volume che presentiamo vuole rintracciare un filo conduttore in un percorso storico tortuoso e contrastato. A tal fine, abbiamo rimandato il lettore desideroso di approfondimenti su tematiche fondamentali o specifiche ad una bibliografia di tipo secondario ma facilmente accessibile, rinunciando alla indicazione delle fonti primarie.

Questo volume si propone una divulgazione dello sviluppo, o della sopravvivenza, dell'atomismo nel corso dei secoli, una lunga vicenda della quale spesso sono noti solo singoli episodi o singoli protagonisti, cercando di rendere lineare quello che lineare non è. Gli autori indulgono un po' sulle implicazioni chimiche dell'atomismo ma questo discende semplicemente dalla loro formazione scientifica.

*Vincenzo Schettino*  
30 ottobre 2022

## RINGRAZIAMENTI

La pubblicazione di questo libro è stata resa possibile dall'interesse e dal contributo delle tre istituzioni dell'Ateneo fiorentino con le quali Salvatore Califano ha interagito più intensamente: il Laboratorio Europeo di Spettroscopie Non Lineari (LENS), il Dipartimento di Chimica Ugo Schiff e il Dipartimento di Fisica e Astronomia. Gli autori desiderano ringraziare per il loro contributo i Direttori di queste tre prestigiose istituzioni, in ordine la Prof.ssa Elisabetta Cerbai, il Prof. Stefano Menichetti e il Prof. Duccio Fanelli.

Un ringraziamento particolare è dovuto ad Anna Maria Papini che, con il suo tradizionale entusiasmo, ha sempre dimostrato un grande interesse nella storia raccontata in questo volume e si è fattivamente adoperata per la sua pubblicazione. Desideriamo anche ringraziare Pier Remigio Salvi per avere letto il testo in itinere e per i suoi suggerimenti e Gianfranco Lattes Bettin per aver letto e apprezzato una parte del libro.



## CAPITOLO 1

### L'ATOMO PRIMA DEI GRECI

Il pensiero scientifico occidentale, nell'accezione di filosofia naturale intesa, sulla base di osservazioni empiriche o di teorie generali, ad una interpretazione dell'origine, della struttura e delle continue trasformazioni del mondo materiale, ha avuto origine, secondo una tradizione generalmente condivisa, nella Ionia, una stretta regione dell'Anatolia occidentale che si affaccia sul mar Egeo e che è parte di una più vasta regione abitata, oltre che da colonizzatori greci, da una varietà di altre popolazioni autoctone o di varia provenienza. Sono stati presi in considerazione svariati elementi come possibili cause della fioritura della prima filosofia occidentale in questa precisa area geografica. Tra queste motivazioni, particolare rilevanza è stata attribuita al fatto che la Ionia era esposta, attraverso viaggiatori, scambi commerciali e rapporti di carattere sociale, diplomatico e politico, alle influenze delle più avanzate civiltà egiziana e mesopotamica (Pichot 1993; Butterfield 1962; Koyré 1973; Neugebauer 1974). In effetti, in queste aree esisteva una radicata e più antica tradizione culturale che, per quanto riguarda gli aspetti scientifici di nostro particolare interesse, riguardava l'astronomia, la matematica, la geometria e tentativi di definire una cosmogonia e una origine del mondo materiale. In questa ottica è interessante indagare se la filosofia e l'originario pensiero scientifico sviluppati nella Ionia abbiano, almeno in parte, una derivazione dalle grandi civiltà egiziana e mesopotamica. Si tratta di una questione affascinante anche se può trovare solo una risposta indiziaria in assenza di fonti documentarie o scritte esplicite e noi la prenderemo in considerazione esclusivamente per quanto riguarda l'atomismo o quanto ad esso collegato in qualche modo.

#### 1.1 *Mochus, il fenicio*

La questione delle influenze esterne sulla filosofia greca era già stata sollevata da Diogene Laerzio (180-240 a.C.) che nel proemio della

sua *Vite e dottrine dei filosofi illustri* (Diogene 1987), pur rivendicando il primato dei Greci, pone il problema: «v'ha chi dice primi i barbari aver dato opera alla filosofia», intendendo per barbari, esplicitamente, persiani, babilonesi, assiri, indiani, egiziani. Nel prosieguo Diogene rammenta vari protofilosofi e tra questi riporta di Oco che fu fenicio, senza altre specificazioni. Lo stesso protofilosofo è ricordato da altri dossografi con il nome di Mochus il Fenicio o Mochus di Sidone o Moschus. In particolare Strabone in *Geografia* 7 scrive: «Se uno crede a Posidonio, l'antico dogma sugli atomi ebbe origine con Mochus, uno di Sidone, nato prima dei tempi di Troia», accreditando Mochus come il primo filosofo a introdurre il concetto di atomo e collocando la sua nascita prima della guerra di Troia e quindi intorno al 1300-1200 a.C. Nel prosieguo i riferimenti ai filosofi presocratici saranno tratti dalle seguenti fonti: Reale 2006; Lami 1991; Barnes 1982; Curd 2011; Gigante 2016.

Anche se nulla sappiamo nel dettaglio dell'atomismo di Mochus (Lucas 2015), è interessante notare che la memoria di questo protofilosofo continua fino all'inizio della chimica moderna tanto da essere citato da Robert Boyle (1627-1691), uno degli iniziatori della nuova chimica, anche se in una forma un po' dubitativa: «I sapienti attribuiscono l'invenzione dell'ipotesi atomica a un certo Moschus, un fenicio».

Più puntuale e articolata è la menzione di Mochus che si trova nella corrispondenza di Isaac Newton (Turner 1960):

Questo è stato l'insegnamento di filosofi che vennero prima di Aristotele, e cioè Epicuro, Democrito, Ecphantus, Empedocle, Eraclito, Asclepiade, Diodoro, Metrodoro di Chio, Pitagora, e prima di questi Moschus il fenicio che Strabone dichiara essere più vecchio della guerra di Troia. Perché io penso che quella stessa opinione si trovi in quella filosofia mistica che è stata trasmessa ai greci dall'Egitto e dalla Fenicia, perché si trova che talora gli atomi sono indicati dai mistici come monadi. Perché i misteri dei numeri come pure quelli dei geroglifici sono connessi con la filosofia mistica. Che tutta la materia consista di atomi è opinione molto antica.

Newton, quindi, collega l'antica idea di atomo con quella di monade nelle filosofie mistiche egiziana e fenicia dando all'idea di atomo una connotazione non solo materiale e fisica ma anche spirituale, in sintonia con la concezione generale di Newton di una unitarietà della natura e dei processi conoscitivi.

Accreditare la formulazione di una originaria ipotesi atomica nell'ambito del pensiero ebraico può sembrare cosa priva di fondamento storico. Un tale tentativo può, tuttavia, trovare una qualche giustificazione nella concezione newtoniana della natura (Sailor 1964). Dopo avere descritto i fenomeni del mondo macroscopico con la legge di gravitazione, Newton era alla ricerca di una visione unitaria delle forze che agivano nel mondo macroscopico e in quello microscopico degli atomi. Per questo dedicò decenni della sua attività ad un assiduo ed esclusivo studio dell'alchimia (Dobbs 1975; White 1997; Schettino 2017):

Finora io ho spiegato il sistema di questo mondo visibile, per quanto riguarda i più grandi movimenti che possiamo facilmente osservare. Ma qualsiasi ragionamento è valido per i moti più grandi deve essere valido anche per quelli minori. I primi dipendono da più grandi forze di attrazione di corpi maggiori, e io penso che i secondi dipendano da forze più piccole, per ora non osservate, di particelle microscopiche.

In questo tentativo Newton riteneva l'alchimia non un volgare metodo di trasmutazione dei metalli ma come una grande scienza, una filosofia speculativa che si richiamava ad una antica saggezza, una *prisca sapientia*, che rivelata una volta, in origine, all'uomo, era andata perduta e bisognava riscoprire ritornando agli antichi:

Questa filosofia speculativa e pratica non va trovata solo nel libro della natura ma anche nelle sacre scritture, come nella Genesi, in Giobbe, nei Salmi, in Isaia ed altri. Nella conoscenza di questa filosofia Dio ha reso Salomone il più grande filosofo del mondo.

È verosimile che l'idea di retrodatare l'origine dell'atomismo fin quasi ai primordi dell'umanità sia stata suggerita a Newton da analoghe idee dei filosofi platonici di Cambridge ed in particolare di Henry More (1614-1687) e Ralph Cudworth (1617-1688), convinti atomisti che avevano il proposito di riscattare l'idea atomica dalle ricorrenti accuse di ateismo (Rowett 2011; Rodney 1970). Nel volume III del *The True Intellectual System of the Universe* (1671) Cudworth scrive:

Pertanto abbiamo reso evidente che quella filosofia molto meccanica o atomica, che è stata recentemente restaurata da Cartesio e Gassendi, per quanto riguarda la sostanza principale di essa, non era solo più vecchia di Epicuro, ma anche di Platone e Aristotele, anzi, di Democrito

e Leucippo, i padri comunemente reputati della stessa. E quindi non abbiamo motivo di screditare il rapporto di Posidonio lo stoico, che, come ci dice Strabone, affermava che questa filosofia atomica era stata più antica dei tempi della guerra di Troia e che prima era stata portata in Grecia dalla Fenicia. [...] E siccome è certo da ciò che abbiamo dimostrato, che né Epicuro né Democrito furono i primi inventori di questa fisiologia, questa testimonianza di Posidonio lo Stoico dovrebbe essere ammessa da noi. Ora, quello che è più probabile è che questo Moschus il Fenicio, di cui parla Posidonio, sia la stessa persona di quel Moschus il fisiologo, che Jamblichus menziona nella Vita di Pitagora dove afferma, che Pitagora, vivendo un po' di tempo a Sidone in Fenicia, conversò con i profeti che furono i successori di Mochus il fisiologo, e fu istruito da loro: [...] «Conversò con i profeti che furono i successori di Moco e di altri sacerdoti fenici». E cosa può essere più sicuro che Mochus e Moschus, il fenicio e il filosofo, non erano altro che Mosè, il legislatore ebreo, come giustamente afferma Arverius [Johannes Arverius: «Sembra che debba essere letto Moschus a meno che non si legga Mochus o Mosè. Pertanto, secondo l'antica tradizione, Mosco o Mosè, essendo il fenicio primo autore della filosofia atomica, questa non dovrebbe chiamarsi né epicurea né democritea, ma moschica o mosiacale».]

È piuttosto interessante quello che Cudworth afferma in un altro punto e cioè che, a parte l'eventuale derivazione da Mochus o da Mosè, l'atomismo greco ha avuto in realtà una elaborazione graduale a cominciare da Pitagora attraverso tutta la filosofia presocratica:

L'atomismo non è nuovo con Leucippo e Democrito, ma derivato originariamente da Mosè ed è stato poi approvato da Pitagora e dai filosofi Pitagorici. Questi includono Parmenide e Empedocle, e in effetti tutti i presocratici a parte i Milesi.

## 1.2 *Kanada, il mangiatore di atomi*

Nelle antiche civiltà, e specialmente in quella egizia, c'era una consuetudine con i concetti della geometria che venivano usati anche per motivi pratici (Boyer 1998; Pichot 1993). L'elaborazione di questi concetti comportava processi logici elementari che assumono l'esistenza di uno spazio virtuale, l'insieme di tutti i punti possibili di uno spazio a tre dimensioni, in cui gli oggetti geometrici vengono inseriti. In tale spazio la distanza tra due punti contiene sempre infiniti punti. Analogamente, tutti gli oggetti geometrici, linee, poligoni, po-

liedri, sono quindi divisibili all'infinito. Il concetto di infinito, come concetto essenzialmente geometrico, era ben presente anche nella filosofia indiana. Negli *Isha Upanishad*, poemi vedici e testi sacri che si fanno risalire tra 500 e 1000 a.C., troviamo la seguente affermazione riguardo all'infinito:

Ciò che è tutto è tutto  
 Dal tutto deriva il tutto  
 Quando dal tutto si estrae il tutto  
 Ciò che resta è sempre il tutto.

La speculazione sull'infinito e sui limiti della divisibilità degli oggetti geometrici, all'infinito o meno, è stata alla base della formulazione di ipotesi atomiche nella filosofia indiana e in particolare nelle filosofie Vaisheshika e Nyaya (Gangopadhyaya 1981; Katz 2017). Intorno al VI secolo a.C. il filosofo e saggio indiano Kanada aveva fondato, o formalizzato, la filosofia Vaisheshika nella quale l'ipotesi atomica aveva un ruolo molto importante.

Secondo una leggenda *Kashyapa*, nome originario di *Kanada*, era figlio del filosofo *Ulka* e fin da giovane era dotato di grande spirito di osservazione. Mentre accompagnava il padre in un pellegrinaggio a *Prayaga*, osservava che la moltitudine di pellegrini gettava lungo la strada fiori e granelli di riso come offerta ai templi. Tra la meraviglia generale il giovane *Kashyapa* si mise a raccogliere i granelli di riso tanto che i pellegrini si raccolsero intorno al ragazzo per capire il perché di quello strano comportamento. Il famoso saggio *Muni Somasharma*, vista la folla intorno al ragazzo, si avvicinò e incuriosito dalla cosa chiese a *Kashyapa* il significato del suo atto. *Kashyapa* rispose che per quanto minuscolo sia un oggetto esso fa sempre parte dell'universo. Così, i singoli granelli di riso, anche se di per sé insignificanti, una volta raccolti in qualche centinaio potevano essere il cibo per una persona e, continuando la raccolta, il cibo per una famiglia e per l'intera umanità. Impressionato dalla risposta, *Muni Somasharma* predisse che *Kashyapa* sarebbe diventato un grande filosofo e che per la sua capacità di osservazione di oggetti minuscoli si sarebbe chiamato *Kanada* (da *Kana* che significa granello) o *Kana-bhuk*, mangiatore di atomi, nome appropriato in seguito anche per la sua vita estremamente ascetica.

Secondo la leggenda Kanada era interessato solo alla conoscenza e passava tutto il suo tempo a pensare solo alle particelle ultime della materia e mangiava una sola volta al giorno. Il punto di partenza del-

la riflessione di Kanada riguardava il problema della divisibilità della materia. Il seguente paradosso lo portava alla conclusione che la materia non poteva essere divisibile all'infinito ma solo fino al raggiungimento di particelle ultime:

Assumiamo che la materia non sia composta di atomi indivisibili e che sia un continuo divisibile all'infinito. Prendiamo una pietra. Uno può dividerla in un numero infinito di parti. Anche la catena dell'Himalaya è composta da un numero infinito di parti. Quindi si può costruire un'altra catena dell'Himalaya partendo dall'infinito numero di parti di cui è composta la pietra. Uno comincia con una pietra e finisce con la catena dell'Himalaya, il che è ovviamente ridicolo. Quindi l'ipotesi iniziale che la materia sia continua deve essere falsa e tutti gli oggetti devono essere composti di un numero finito di paramānus.

La filosofia Vaisheshika sarebbe stata comunicata a Kanada dal grande *Deva* che aveva assunto le sembianze di un gufo, tanto che questa filosofia è detta anche *Filosofia del Gufo*. I punti fondamentali dell'atomismo Vaisheshika sono i seguenti. Le cose del mondo naturale esistono indipendentemente dalla nostra percezione sensoriale e sono la combinazione degli atomi. La materia è composta da nove elementi di cui cinque sostanze (*butha*) costituite da quattro elementi sensibili, terra (*Prithvi*), fuoco (*Agni*), aria (*Maya*) e acqua (*Apa*), e dall'etere (*Akasha*). Queste cinque sostanze sono associate ai sensi umani di percezione e, nell'ordine, a odore, visione, sensazione, sapore e suono. Ci sono poi quattro elementi esterni costituiti da tempo (*Kala*), spazio o direzione (*Dik*), mente (*Manas*) e l'Io (*Atman*). La materia è divisibile fino ad un limite estremo in cui si hanno i *paramanu*, gli atomi, entità eterne, indistruttibili e ulteriormente indivisibili. I *paramanu* non possono essere percepiti dai sensi umani. Ci sono più varietà di *paramanu*, una per ognuna della quattro sostanze materiali. I *paramanu* hanno una forza interna che li costringe a combinarsi tra loro: due *paramanu* della stessa varietà si uniscono tra loro a formare una diade (*dwinuka*), mentre tre *dwinukas* si uniscono a formare una triade (*tryanuka*) e così via. È suggestivo pensare che le *dwinuka* corrispondano alle nostre molecole biatomiche e le *tryanuka* a molecole più complesse.

Gli atomi, quindi, non sono tutti uguali ma hanno le loro caratteristiche peculiari e, infatti, il termine Vaisheshika significa differenza. Le differenze specifiche tra gli oggetti del mondo materiale derivano

dalla specificità degli atomi che li costituiscono; per questo motivo il titolo dell'opera che illustra la filosofia di Kanada, *Vaisheshikasutra*, significa *Aforismi delle peculiarità*. Le particelle di polvere che si vedono fluttuare nell'aria quando un raggio di sole filtra da una finestra sono le più piccole particelle materiali visibili a occhio nudo e si chiamano *trasarenu*. I *trasarenu* corrispondono a *tryanuka*. Riguardo alle trasformazioni delle sostanze che osserviamo nel mondo materiale, e quindi riguardo alle reazioni chimiche, la filosofia di Kanada afferma che queste sono causate dal calore, portando degli esempi di questo.

Se Kanada si colloca nel VI secolo a.C., il suo atomismo è antecedente a quello di Democrito anche se non possiamo affermare che, attraverso scambi culturali, qualche traccia della filosofia indiana sia giunta fino in Grecia. Certamente, come risulterà dal seguito, l'atomismo di Kanada appare significativamente più elaborato di quello di Democrito. Poiché la filosofia *Vaisheshika* è una derivazione della molto più antica tradizione *Vedica*, una questione che rimane aperta è se una originaria concezione atomistica indiana non possa essere stata tramandata fino a Kanada per via orale. Quello che invece è certo è che nella cultura indiana una idea atomistica continua ad essere presente molto dopo Kanada fino a testi che risalgono al 800-1000 d.C., come nel *Bhagavata-purana* (che qualcuno vorrebbe addirittura attribuire al grande saggio *Sri Sukadeva Goswami* che sarebbe vissuto nel 3000 a.C.). Riportiamo alcuni versi del *Paramahansa Samhita* (III-IX):

Verso 1: (Il grande saggio) Maitreya disse: la particella ultima della manifestazione materiale, la quale non è stata combinata con nessuna altra simile particella, è chiamata *paramanu*. *Paramanu* esiste sempre sia negli stati sopiti che in quelli manifesti dell'esistenza materiale. È la combinazione di più di un *paramanu* che dà origine al concetto illusorio di unità materiale.

Verso 5: La combinazione di due *paramanu* costituisce un *Anu* (atomo), e tre *anu* formano un *trasarenu*. I *trasarenu* sono visibili ad occhio nudo se visti fluttuare in aria verso l'alto mentre si guarda attraverso i raggi di sole che entrano in una stanza attraverso una finestra.

Quello che in questo testo è interessante, oltre al richiamo a una antica tradizione, è che, mentre in Kanada *anu* e *paramanu* sono sinonimi per atomo, qui *anu* è strettamente l'atomo che sarebbe costituito da due *paramanu*; il *paramanu* sarebbe allora una particella subatomica (Pradhan 2015). Questo appare in sintonia con l'interpretazione della parola *paramanu* come composta da *param* (oltre) e *anu* (atomo). In

questo stesso testo in discussione sono anche interessanti i versi 3 e 4 che definiscono una unità, un atomo, di tempo come il tempo necessario al sole per percorrere la dimensione occupata da un paramanu:

Verso 3: Possiamo comprendere le corte e lunghe dimensioni del tempo materiale, come una potenzialità del Supremo onnipresente trascendentale Signore che, nella forma del Sole, attraversa le piccole e grandi dimensioni delle cose materiali.

Verso 4: Il tempo che impiega il Sole per attraversare la più piccola particella di materia si chiama paramanu e questa è la più piccola misura del tempo.

L'altra scuola filosofica indiana in cui l'atomismo ha una particolare rilevanza è la scuola Jainista. A differenza che nell'atomismo di Kanada, per i Jainisti gli atomi sono tutti omogenei e non differiscono per le quattro sostanze materiali. Tuttavia, gli atomi possono differenziarsi per qualità come colore, odore etc., qualità che non sono comunque permanenti. L'aggregazione degli atomi per dare origine alle sostanze avviene a causa del loro movimento. Per questo gli atomi si differenziano per viscosità (umidità) e secchezza e l'aggregazione avviene solo tra atomi che differiscono per queste proprietà. Quanto più grande è la differenza di umidità tanto più probabile è l'aggregazione. Quindi nell'atomismo jainista si ha una aggregazione di opposti.

## CAPITOLO 2

### I FILOSOFI IONICI

In questo capitolo e nei due successivi illustreremo, per quello che attiene particolarmente alla filosofia naturale, il pensiero dei filosofi presocratici. Vogliamo premettere un breve sommario in versi della filosofia dei Presocratici scritto da *Catherine Joanna Rowett* che fino al 2011 ha firmato le sue opere come *Catherine Osborne*. Catherine Joanna Rowett è professore di filosofia alla University of East Anglia ed esperta di filosofia greca (Osborne 2004). È stata anche membro del parlamento europeo. L'ispirazione per questo poema, quasi un breve indice di questo e dei due capitoli che seguono, deriva all'autrice dalla convinzione che la poesia fosse per i Presocratici la forma più naturale per esprimere i concetti della filosofia.

#### *A history of Presocratic Philosophy in verse*

Talete era un uomo saggio, tanto saggio quanto si può essere.  
Pensava che la terra galleggiasse come una zattera sul mare,  
e tutto è acqua (anche se non quella che puoi vedere).  
Quindi Talete era un uomo saggio, il più saggio possibile.  
Il prossimo, Anassimandro, aveva quasi ragione!  
Concepiva il mondo come qualcosa di vago e infinito.  
Un alto tamburo di terra era circondato da tubi che emettono luce,  
E tutto deriva da cose che sono sia vaghe che infinite.  
Il terzo degli uomini milesi era Anassimene.  
Diceva che la terra riposa su una brezza che soffia in alto  
e tutto è fatto d'aria: le nuvole, le rocce, gli alberi,  
le stelle e la luna, che sfrecciano nel cielo battuto dal vento.  
Pitagora il saggio, che disapprovava il consumo di fave,  
aveva una teoria dei numeri che poteva dire il significato di ognuno.  
E dopo la morte le nostre anime migrano in tacchini e sardine,

quindi per essere Pitagorico devi limitarti a mangiare verdure.  
 Senofane ha pensato molto alla nostra sorte mortale.  
 Si chiedeva se le cose che l'uomo pensa siano proprio chiare o no.  
 E se non sanno, sanno, beh, lo sanno o cosa?  
 Non sono come dio, che non ha bisogno di occhi, non dimenticarlo!  
 Mi hanno detto, Eraclito, mi hanno detto che hai detto  
 che gli opposti non sono mai due ma in realtà uno invece  
 il buono e il cattivo, il sopra e il sotto, il vivo e il morto,  
 e tutto è flusso: non possiamo entrare due volte nello stesso fiume.  
 Parmenide, Nobile Giovinezza, la tua dea ti ha detto  
 che niente cambia mai e niente è mai nuovo  
 anche se il «nulla» in realtà non può esistere, e tutto è illusorio,  
 l'andare, il venire, il rosso, il verde, il blu.  
 Potreste pensare, disse il vecchio Zenone, che corpi in moto si muovano,  
 ma è tutto sbagliato: non si muovono mai, come andrò a provare.  
 Per catturare la tartaruga che arranca, da qualsiasi posto si muova,  
 Achille non potrebbe mai raggiungere lo scopo, per quanto si sforzi.  
 Le cose sembrano cambiare, diminuire e crescere, disse Anassagora,  
 ma non è reale, non è come sono le cose, solo come sembra a noi.  
 Perché ogni frammento contiene un po' di tutto il resto; e così  
 i capelli e il latte crescono se tu mangi patate e le mucche erba.  
 Leucippo e Democrito per gli atomi erano i più famosi:  
 Il mondo è fatto di minimi frammenti, hanno notoriamente proclamato.  
 Eppure non solo gli atomi hanno senso, poiché il vuoto esiste  
 non è il «nulla», ma non dobbiamo vergognarci.  
 E così i Presocratici, come dicono tutte le storie,  
 sono chiamati i primi filosofi. Perché hanno scoperto come  
 porre e rispondere a domande che il buon senso non permetterebbe.  
 Lo hanno poi trasmesso a Socrate, che lo ha trasmesso a noi.

La Ionia è stata la culla della scienza occidentale (o della filosofia naturale, se vogliamo chiamarla così) non tanto per le scoperte fatte dai filosofi ionici quanto per il nuovo atteggiamento che essi hanno avuto verso il mondo fisico che ci circonda, la sua struttura e le sue trasformazioni (Mondolfo 1967; Colli 1980). Sin dall'inizio della storia dell'umanità gli uomini hanno cercato di scoprire i meccanismi nascosti con cui le stelle e i pianeti brillavano la sera nel cielo stellato mentre sulla terra tante specie diverse, di oggetti, di animali e di piccoli insetti, si trasformavano e si muovevano vorticosamente, secondo regole precise e costanti che sfuggivano all'umana comprensione. Quei puntini luminosi nello spazio sidero erano solo una decorazione che gli Dei avevano attaccato alla volta celeste come candeline accese o erano veri

e propri oggetti materiali, fatti della stessa pasta di cui era fatta la terra in cui vivevano? Anche se non avevano risposte concrete a questa questione, molti pensatori cinesi e soprattutto sumeri, babilonesi ed egiziani, erano convinti che in cielo ci fossero molte più cose di quelle che vedevano intorno. Quello che sacerdoti e pensatori sapevano era che durante i temporali scendeva sulla terra una grande quantità di acqua che doveva essere contenuta in recipienti molto più grandi della porzione di terra che riuscivano a vedere. Nel cielo, quindi, dovevano esistere oggetti molto grandi capaci di contenere tutta quell'acqua, dovevano cioè esistere contenitori infinitamente grandi. In realtà, i tentativi di interpretare il mondo fisico erano mescolati e confusi con tanti altri aspetti dello scibile umano, dallo studio del movimento degli astri e dei pianeti alle concezioni mistiche e religiose che affidavano il futuro a divinità arcane, perfino a miti che richiamaavano le cose sia del mondo vegetale sia di quello animale o geologico e perfino del tempo atmosferico.

Le conoscenze tecniche presso queste antiche civiltà erano progredite significativamente, particolarmente nel campo della metallurgia, della ceramica, della filatura e della preparazione di pigmenti e coloranti, oltreché nel campo delle costruzioni architettoniche (Desmond 1969; Geymonat 1970; Rossi 1997b; Mondolfo 1967; Russo 2013). Tuttavia, queste conoscenze avevano carattere eminentemente pratico ed empirico e la loro concretizzazione era associata a considerazioni magiche o a interventi sovranaturali senza ancorarsi a spiegazioni razionali o logiche. Possiamo renderci conto di questo stato di fatto leggendo, per rimanere nel campo della metallurgia, da una tavoletta della biblioteca di Assurbanipal, risalente al VII secolo a.C. e forse copia di un documento più antico:

Se tu vuoi mettere le fondamenta di un forno da pietra scegli un giorno appropriato in un mese favorevole [...] Non appena si è orientato il forno [...] metti gli embrioni divini nella camera del forno, – [...] nessuna cosa impura deve essere posta davanti ad essi – cospargi davanti ad essi il sacrificio consueto. Se tu vuoi mettere la pietra nel forno, offri un sacrificio davanti agli embrioni divini, metti un bruciaprofumi con del cipresso, cospargi la bevanda fermentata, accendi il fuoco sotto il forno, e poi metti la pietra nel forno. Le persone che ammetterai vicino al forno devono prima purificarsi [...] Il legno che brucerai nel forno [...] sia stato tagliato nel mese di ab.

La procedura descritta per estrarre il metallo dal minerale (*dalla pietra*) ha una chiara componente magica e alchemica (Califano 2015;

Pereira 2006; Eliade 1980, 2001; Guarneri 2007). Del resto, è ben noto che in origine l'arte della metallurgia aveva un carattere rituale e la figura del fabbro era circondata da un'atmosfera di magia. Mircea Eliade riporta un proverbio che dice: *fabbri e sciamani sono dello stesso nido*. Le abilità tecniche degli artigiani dei metalli erano tramandate, come tutte le procedure protochimiche e alchemiche, da padre a figlio, o da maestro a discepolo, con una iniziazione e attraverso un linguaggio segreto, comprensibile solo dagli adepti.

Considerazioni non dissimili si possono fare per altre branche dei saperi nell'antichità (matematica, astronomia) (Boyer 1998; Pichot 1993). Si può assumere che l'interesse iniziale nell'astronomia si originasse dalla necessità di definire le stagioni e un calendario indispensabile per l'agricoltura e per la programmazione di tutte le attività umane. Sia in Mesopotamia che in Egitto la massa di informazioni e predizioni astronomiche era straordinariamente ampia, sia pure condizionata da due fondamentali limitazioni. Da un lato tutte le osservazioni si basavano su una concezione che vedeva la terra, e quindi il punto di osservazione, al centro dell'universo. Comunque, si trattava di osservazioni accumulate empiricamente in assenza di un qualsiasi modello (quantitativo o matematico) del movimento dei corpi celesti. Da un altro lato, alla mancanza di un saldo riferimento metodologico per questa moltitudine di dati astronomici suppliva il mito in modo che l'astronomia sconfinava o si sovrapponeva all'astrologia. Gli eventi celesti diventavano così premonitori, in senso positivo o negativo, dei destini individuali o politici e sociali.

Nel campo dell'aritmetica, il contare ha origine da esigenze eminentemente pratiche come la ripartizione di derrate o di altri beni come pure dalle transazioni commerciali o dalla riscossione delle tasse (Boyer 1998). Secondo Aristotele, invece, il contare si origina dalla definizione delle procedure nelle pratiche rituali. Comunque sia, tutte le susseguenti antiche elaborazioni sui numeri possono apparirci estremamente ingegnose ma rimangono empiriche in mancanza di una base di riferimento da cui possano essere derivate logicamente. Esse ci appaiono come esercizi di procedure numeriche applicate a problemi specifici. Le conoscenze di geometria avevano una origine pratica ancora più palese nella loro applicazione per la suddivisione e la definizione dei confini dei terreni. Questa era una pressante necessità nell'antico Egitto dove, a causa delle periodiche inondazioni del Nilo, una ridefinizione dei confini doveva essere fatta di continuo. Tanto che in Egitto i geometri erano chiamati *tenditori di corde*.

## 2.1 *Talete di Mileto*

È in questo contesto storico-culturale che Talete di Mileto (ca 624-ca 548 a.C.) compie un'autentica rivoluzione nella interpretazione dei fenomeni naturali basandosi solo sulle osservazioni e sul ragionamento, abbandonando del tutto i riferimenti al mito e a interventi sovranaturali. L'epocale cambiamento di attitudine di Talete è stato certamente agevolato dalle condizioni culturali e socioeconomiche della Ionia greca. La mitologia e la cosmogonia greche non erano appannaggio di una casta sacerdotale e di personaggi al potere, depositari e custodi di verità non discutibili in alcun modo, ma erano affidati alla trasmissione di poeti fuori dai circuiti del potere. Inoltre, gli dei della *Teogonia* di Esiodo o dei poemi omerici appaiono in qualche modo umani con le loro passioni e le loro lotte feroci attraverso le quali sembrano infine giungere ad un qualche tipo di ordine dominato dal dio Zeus. Infine, nelle città greche della Ionia vigeva un ordinamento politico di tipo democratico in cui le decisioni sulla cosa pubblica erano determinate sulla base della discussione e condivisione tra i cittadini. Ci si trovava, quindi, in un sistema in cui varietà di opinioni erano ammesse e non c'era un pensiero dominante da cui fosse impossibile deviare.

Aristotele nella *Metafisica* (Aristotele 2005) definisce Talete il primo scienziato (o filosofo naturale) delineando l'essenza del suo pensiero:

La maggior parte di coloro che primi filosofarono pensarono che principi di tutte le cose fossero solo quelli materiali. Infatti essi affermano che ciò di cui tutti gli esseri sono costituiti e ciò da cui derivano originariamente e in cui si risolvono da ultimo è elemento ed è principio degli esseri, in quanto è una realtà che permane identica pur nel trasmutarsi delle sue affezioni [...] Tuttavia, questi filosofi non sono tutti d'accordo circa il numero e la specie di un tale principio. Talete, iniziatore di questo tipo di filosofia, dice che quel principio è l'acqua (per questo afferma anche che la Terra galleggia sull'acqua), desumendo indubbiamente questa sua convinzione dalla constatazione che il nutrimento di tutte le cose è umido, e che perfino il caldo si genera dall'umido e vive nell'umido. Ora, ciò da cui tutte le cose si generano è, appunto, il principio di tutto. Egli desunse dunque questa convinzione da questo fatto e dal fatto che i semi di tutte le cose hanno una natura umida e l'acqua è il principio della natura delle cose umide.

Talete sembra che non abbia scritto nulla come, secondo la testimonianza di Diogene Laerzio (Diogene 1987), lui stesso afferma nella sua lettera a Ferecide: «Noi che nulla scriviamo giriamo l'Elade e l'Asia».

Quello che sappiamo del pensiero di Talete e degli altri filosofi precocratici deriva da Aristotele e dai dossografi posteriori (Biondi 2013).

Per Talete l'acqua è l'*archè*, il principio di tutte le cose. Secondo Aristotele questo è suggerito dal fatto che l'acqua è elemento essenziale per lo sviluppo degli organismi viventi che con la morte si disseccano. Ma altri fenomeni naturali possono averlo suggerito, come il polimorfismo dell'acqua tra liquido, solido e vapore e i depositi alluvionali (come trasformazione dell'acqua in terra). Ma sul pensiero di Talete hanno influito le più antiche concezioni mitiche e religiose che vedevano nell'acqua un elemento o una risorsa fondamentale. Questo è presente anche nella mitologia greca, come troviamo in Omero (Iliade XIV): «l'acqua di Oceano, del fiume ch'è origine a tutte le cose» e del resto gli dei giurano sulle acque dello Stige: «Orsù, giurami adesso per l'acqua di Stige funesto».

Dal nostro punto di vista è interessante una citazione attribuita, non si sa in base a quali elementi, a Talete nella quale si legge: «il suo [dell'acqua] continuo fluire allude ai mutamenti delle cose stesse», che significa che il movimento, che avrà un ruolo fondamentale nelle teorie degli atomisti, è già un elemento implicito nel pensiero di Talete come riferisce Aezio<sup>1</sup>: «Per Talete la mente del mondo è il dio e il tutto è animato e pieno di demoni, e la potenza divina, penetrando l'umido elementare, lo muove».

Esiste, quindi, una forza interna, uno spirito organizzatore, insiti nel mondo naturale, che producono le trasformazioni che osserviamo. Talete riconosce una psichicità della materia anche nel magnete che attira il ferro o nell'ambra.

Con Talete inizia una nuova visione del mondo che ci circonda, le cui trasformazioni vengono spiegate in base ad osservazioni e a cause naturali (Marcacci 2000). Allontanandosi dal pensiero dominante legato al mito, Talete diventa subito il prototipo dello scienziato che esplora un mondo fuori del pensiero corrente e, forse, lontano dalla

<sup>1</sup> Aezio (I-II sec d.C.), filosofo e dossografo, è autore di un *Placita Philosophorum*, rifacendosi, forse, a un precedente compendio anonimo (*Vetusta Placita*) e attraverso questo alle *Dottrine dei Fisici* di Teofrasto.

comprensione di tutti, come ci è narrato con un aneddoto da Platone nel *Teeteto* (Platone 2019):

[Talete], mentre studiava gli astri e guardava in alto, cadde in un pozzo. Una graziosa e intelligente servetta trace lo prese in giro, dicendogli che si preoccupava tanto di conoscere le cose che stanno in cielo, ma non vedeva quelle che gli stavano davanti, tra i piedi. La stessa ironia è riservata a chi passa il tempo a filosofare.

Ma in realtà Talete era un uomo molto pratico, come ci ricorda Aristotele nella *Politica* (Aristotele 2004):

Siccome gli rinfacciavano per via della sua povertà l'inutilità della filosofia, affermano che avendo egli capito che vi sarebbe stata una grande produzione di olive in base allo studio degli astri, quand'era ancora inverno provvistosi di poche sostanze riuscì a dar caparre per i frantoi di Mileto e di Chio, tutti quanti, prendendoli a nolo per poco visto che nessuno offriva di più. Quando poi venne il momento che erano in molti a ricercare i frantoi tutti insieme e all'improvviso, dandoli in affitto al modo che voleva lui, radunate molte sostanze, giunse a mostrare che per i filosofi è facile arricchire se lo vogliono, ma non è questo ciò di cui si preoccupano.

Tutti gli autori antichi accreditano Talete di ampie conoscenze astronomiche apprese durante i suoi viaggi, particolarmente in Egitto, viaggi di cui Talete parla nella già ricordata lettera a Ferecide riportata da Diogene Laerzio (Diogene 1987): «Non saremmo certo uomini di senno [...] se noi che abbiamo navigato verso Creta per amore della sapienza e in Egitto per incontrarci con i sacerdoti e gli astronomi, non navigassimo per venire anche da te».

Plutarco, ne *Il convito dei sette sapienti* (Plutarco 1997), racconta che Talete, quando era in Egitto alla ricerca dei sacerdoti della valle del Nilo da cui apprendere le conoscenze astronomiche che questi si tramandavano da secoli, risalendo il fiume si sarebbe fermato ad ammirare la Piramide di Cheope nella piana di Giza. Lì Talete fu sfidato dal faraone Amasis, giunto a conoscenza dell'opinione comune che lo presentava come uno dei sette saggi, a dargli la misura corretta dell'altezza della piramide. Talete sapeva che a una determinata ora del giorno la nostra ombra eguaglia esattamente la nostra altezza e quindi, per compiere l'apparentemente ardua impresa di rispondere al faraone, non dovette far altro che attendere l'ora propizia per dimostrare le sue

doti, sbalordendo lo stesso faraone che si disse colpito del modo in cui aveva misurato la piramide senza il minimo imbarazzo e senza strumenti. Piantata un'asta al limite dell'ombra proiettata dalla piramide, poiché i raggi del sole, investendo l'asta e la piramide, formavano due triangoli, dimostrò che l'altezza dell'asta e quella della piramide stavano nella stessa proporzione in cui stanno le loro ombre.

Si racconta, ma forse è una leggenda, che Talete in base alle sue conoscenze astronomiche avrebbe previsto una eclissi di sole, avvenuta nel 585 a.C., e visibile in Lidia. L'eclissi sarebbe avvenuta in coincidenza di una battaglia tra Lidi e Medi che sarebbero così stati indotti ad un accordo di pace dopo cinque anni di guerra.

Dall'Egitto Talete avrebbe poi portato in Grecia le conoscenze di geometria e nella tradizione egli è accreditato di molte dimostrazioni e soprattutto del cosiddetto *teorema di Talete* che afferma che prese delle rette parallele  $a, b, c$  tagliate da due rette trasversali  $r$  e  $r'$  il rapporto tra segmenti trasversali è sempre costante (vedi Figura 1):

$$AB/A'B' = BC/B'C'$$

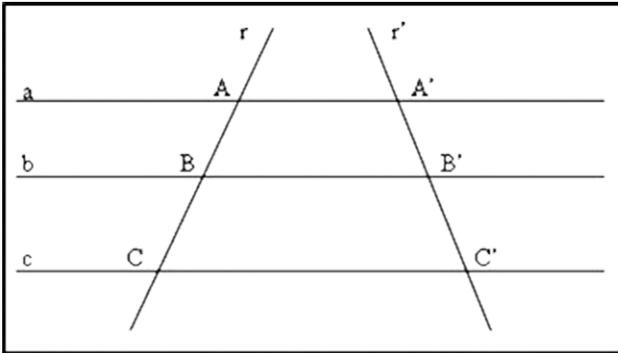


Figura 1 – Il teorema di Talete.

## 2.2 Anassimandro

Secondo la tradizione Talete avrebbe fondato a Mileto una scuola filosofica. Non sappiamo se si trattasse di una vera e propria scuola. Tuttavia, Anassimandro (ca. 610-546 a.C.) sarebbe stato il suo primo allievo e il suo successore a capo della scuola (Laurenti 1997; Pozzon 2009). Anassimandro scrisse un'opera in prosa, *Sulla Natura*, con la

quale la poesia cessava di essere il veicolo unico o, comunque, il sistema per eccellenza per trasmettere le conoscenze sull'universo e sugli uomini, come pensavano poeti e filosofi greci di allora. Questo non impediva che lo stile della prosa concedesse ampi margini ad un linguaggio immaginifico e poetico inteso ad accattivarsi l'attenzione dei lettori (Diogene 1987): «Diodoro di Efeso, scrivendo di Anassimandro, afferma che <Empedocle> pretendesse imitarlo assumendo un atteggiamento teatrale e adottando un abbigliamento solenne».

C'è un aneddoto, raccontato ancora da Diogene Laerzio (Diogene 1987), che è stato riferito al desiderio di Anassimandro di rendere la filosofia naturale più comprensibile. Un giorno il filosofo, mentre cantava fuori della sua casa, veniva deriso da bambini che giocavano. Anassimandro avrebbe reagito dicendo: *Bisogna cantare meglio almeno per i bambini*. La frase è stata interpretata metaforicamente come necessità di spiegare la scienza in un modo più accessibile alla gente comune inesperta (i bambini).

Di tutta l'opera di Anassimandro ci resta un solo frammento, peraltro difficile da contestualizzare:

Il principio delle cose che sono è l'illimitato [...] donde le cose che sono hanno la generazione, e hanno anche il dissolvimento secondo la necessità. Infatti esse pagano l'una all'altra la pena e l'espiazione dell'ingiustizia secondo l'ordine del tempo.

Anassimandro si interessava di molte cose e la sua opera doveva spaziare nei campi più vasti. *Sulla natura* iniziava con una cosmogonia nella quale il filosofo cercava di dare una spiegazione dell'origine dell'universo e proseguiva con una cosmologia per spiegare la struttura dell'universo (Rovelli 2004). Queste rappresentavano senz'altro le parti più filosofiche dell'opera che toccava anche altri argomenti. Anassimandro viene tra l'altro considerato il primo ad aver concepito l'*ecumene*, poi perfezionato da Ecateo<sup>2</sup>, la mappa geografica del mondo allora abitato (vedi Figura 2), e l'inventore dello gnomone, l'orologio solare (Diogene 1987):

Anassimandro di Mileto, figlio di Prassiade [...] escogitò per primo lo gnomone e lo pose presso le meridiane a Sparta, secondo quanto afferma Favorino nella [Storia varia], a indicare solstizi ed equinozi. Costruì anche strumenti per determinare l'ora. Tracciò pure per primo il perimetro di terra e mare, e ancora costruì una sfera (celeste.)

<sup>2</sup> Ecateo di Mileto (550-456 a.C.) è stato un geografo e storico, autore anche di un *Giro della Terra* corredato da una tavola geografica.

In tal modo spazio e tempo diventarono entità descrivibili e misurabili: l'universo e il tempo, in cui si scandiva la sua vicenda, uscirono dall'anonimato e furono sistemati in una prospettiva unitaria.

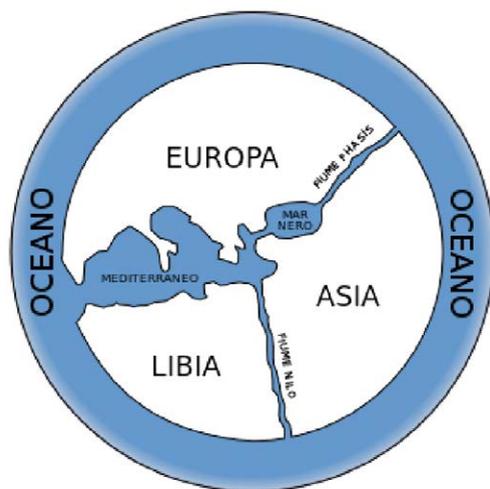


Figura 2 – Forma possibile dell'ecumene di Anassimandro.

La grande innovazione di Anassimandro risiede nell'aver individuato l'*archè* non già in un qualcosa di materiale ed empiricamente misurabile, come l'acqua di Talete, bensì in una realtà sovrasensibile, forse in base al ragionamento che l'*archè* non può essere la sola origine delle entità visibili, ma piuttosto un qualcosa da cui tutte scaturiscano. Per questa via, Anassimandro passava dal visibile all'invisibile. Tale *archè* invisibile è da lui ravvisata nell'*apeiron*, illimitato e infinito, ovvero – letteralmente – in ciò che non ha «limiti». Questo «illimitato» trova una sua sistemazione fisica alla periferia di un universo sferico al cui centro è posta la Terra, dotata di forma cilindrica ed equidistante dalla periferia e dunque in perfetto equilibrio nella sua immobilità, senza bisogno di alcun sostegno, nemmeno dell'acqua, come supposto da Talete. Dall'*apeiron* si generano in primis le «qualità contrarie» (caldo e freddo, secco e umido, ecc.), ossia gli elementi, giacché alla natura di ciascun elemento corrisponde una data qualità per cui al fuoco corrisponde il caldo, all'acqua il freddo, ecc. In questo senso, allora, l'*apeiron* manca, oltre che di limiti, anche di qualità specifiche: proprio da questo substrato indefinito nascono i quattro elementi che costituiscono la realtà.

Non è un caso che, nell'universo, ogni cosa sia dotata di limiti precisi: dalla realtà illimitata nascono tutte le cose e ciascuna di esse diventa col nascere il limite di tutte le altre, tant'è che nel definirla non facciamo che distinguerla dalle altre. In quell'unico frammento di Anassimandro conservatosi fino a noi, il limite è descritto in termini di «ingiustizia», ossia di violenza e di prevaricazione delle cose o, per meglio dire, degli opposti fra loro, una sorta di ingiustizia di cui le cose pagano il fio con la distruzione. Sulla scia di Talete, Anassimandro fa leva sul senso comune, spiegando l'ingiustizia cosmica come esaltazione delle ingiustizie sociali, politiche o personali che possono insidiarci quotidianamente.

In realtà la parola *apeiron* è intraducibile a causa della sua poliseimia; in essa ci sono troppi sottintesi e significati per cui scegliendone uno, che può benissimo essere corretto, se ne tagliano automaticamente fuori altri altrettanto corretti. I due significati principali della parola sono «infinito» e «indefinito», il primo nel senso quantitativo, il secondo in quello qualitativo. Per Anassimandro, però, entrambi i significati erano allo stesso modo contenuti nel termine *apeiron* ed è difficile capire perché Anassimandro abbia scelto come principio proprio l'*apeiron*: il principio è quel qualcosa da cui deriva tutta la realtà, quel qualcosa dove tutta la realtà va a finire e in cui tutta la realtà permane. Se il principio è quindi ciò da cui deriva tutto il resto, per il pensiero di Anassimandro il principio era la fonte inesauribile del tutto, un tutto senza fine. Già per Talete l'acqua era il principio di tutto. Non avendo caratteristiche, poteva assumerle tutte. L'*apeiron* rappresenta il passo fondamentale nella filosofia ionica verso l'astrazione e non era solo infinito, ma anche indeterminato.

Mentre per Talete era implicito che la materia fosse dotata di movimento, per Anassimandro questo diviene esplicito. Per Simplicio<sup>3</sup>,

<sup>3</sup> Simplicio, filosofo neoplatonico (VI sec. d.C.) nato in Cilicia, fu scolaro, ad Alessandria, di Ammonio e poi, ad Atene, del filosofo bizantino Damascio. Chiusa nel 529 d.C., per il decreto di Giustiniano, la scuola filosofica di Atene, accettò di recarsi negli anni 531 e 532 presso il re di Persia donde però ritornò presto in Grecia. Non potendo più esercitare l'attività didattica, si dedicò a una vasta opera di commento, soprattutto ad Aristotele, attività che si è rivelata di grande importanza come fonte di conoscenza dell'antico pensiero greco; nei suoi commenti, infatti, soprattutto in quello sulla *Physica*, Simplicio, interpretando il pensiero di Aristotele, illustrava anche quello dei filosofi che Aristotele combatteva, citando spesso brani originali delle loro opere. Dal punto di vista speculativo il pensiero di Simplicio si ricollega a quello di Damascio, e insiste sulla tesi della fondamentale concordia di Aristotele con Platone.

Anassimandro sarebbe stato il primo ad introdurre il fattore movimento: «[Anassimandro] ha detto che il movimento è eterno, e entro questo è accaduto che i cieli si sono formati» e anche il primo ad usare la parola *archè* in senso filosofico, con il significato di principio. Con l'espressione «secondo l'ordine del tempo», che compare nel frammento, Anassimandro cercava di spiegare come tutto cambiasse con il tempo.

Contrariamente a quello che avrebbe poi sostenuto Aristotele, per Anassimandro il mondo non era sempre esistito ma era nato e, prima o poi, sarebbe morto. Per Anassimandro il nostro mondo non era il solo nell'universo: l'intera realtà universale era cosparsa di mondi come quello in cui viviamo. Egli concepiva l'universo come un oceano di *apeiron* con sparsi qua e là infiniti mondi. Questi mondi erano per lui realtà definite e tra l'uno e l'altro c'era l'*apeiron* ed era il movimento che consentiva la separazione dei mondi dall'*apeiron*. Infatti, l'*apeiron* è tale proprio perché tutto è mescolato (caldo-freddo, secco-umido etc.) e finisce per essere indistinto. È il movimento che produce una separazione. Ma non è un movimento qualunque: quello dell'*apeiron* è un movimento capace di generare e di separare. Di per sé, nell'*apeiron* i contrari non esistono ancora ma sono generati dai vortici. Anassimandro non parlava ancora di caldo e di freddo in modo astratto, ma li identificava nell'acqua e nel fuoco, ossia in sostanze concretamente esistenti. Secondo Anassimandro, il rapporto tra i contrari è conflittuale: al centro del mondo c'è l'acqua fredda, in periferia il fuoco caldo e questi tendono a scontrarsi costantemente. In una periferia ancora più vasta c'è una corona di proprietà fisiche in cui aria e fuoco si mescolano. La luna ed il sole non erano nient'altro che «buchi» in cui è possibile scorgere questa corona di periferia. Nel frammento che ci rimane, Anassimandro parlava di ingiustizia che consisteva sia nel distacco del mondo dall'*apeiron* sia nel conflitto che oppone un contrario all'altro.

Nella concezione dinamica di Anassimandro il fuoco fa evaporare l'acqua marina con una duplice conseguenza: la formazione di sale e di vapore acqueo. Il sale rappresenta la terra mentre il vapore acqueo rappresenta l'aria. Il fuoco attacca l'acqua causandone l'evaporazione, ma essa si «vendica» attaccando la corona periferica e smantellandola. Questa sua strana idea del fuoco che agisce a discapito dell'acqua deve essergli derivata dal fatto che egli scorgeva spesso fossili marini a chilometri di distanza dal mare o addirittura sui colli: significava quindi che vi era un'evaporazione costante e che il fuoco «rosicchia-

va» sempre più terreno all'acqua facendola evaporare. Oltre a notare l'interesse di Anassimandro per gli aspetti comuni della vita, gli va senz'altro riconosciuto il merito di aver capito che cosa fossero i fossili. Quindi, per lui il nostro mondo sarebbe finito quando il fuoco sarebbe riuscito a far evaporare tutta l'acqua che, come aveva notato Talete, è davvero fondamentale per la vita. Per Anassimandro un contrario non può vivere da solo, quindi la scomparsa dell'acqua decreterebbe anche quella del fuoco e del mondo intero. Il mondo, una volta finito, sarebbe ritornato nell'*apeiron* e lì ne sarebbe poi nato uno nuovo. È chiaro che quando diceva: «da dove hanno origine hanno fine» alludeva all'*apeiron*: il mondo, una volta finito, tornava nell'*apeiron*.

Sempre a riguardo della cosmologia, va ricordato che Anassimandro non pensava che la terra fosse rotonda né che fosse in movimento: la immaginava come il tamburo di una colonna. Per lui la terra sarebbe ferma semplicemente per il fatto che non avrebbe nessun motivo di muoversi: è al centro di tutto e, quindi, perché mai dovrebbe spostarsi?

Anassimandro nella sua opera, oltre a dedicarsi alla cosmologia e alla cosmogonia, si dedicava anche alla biologia e alle prime forme di vita e dalle citazioni che ci restano sembrerebbe quasi che abbia avuto una intuizione della evoluzione. Una testimonianza di Aezio racconta che Anassimandro sosteneva che i primi viventi furono generati dall'umido, avvolti in membrane spinose e che col passare del tempo approdarono all'asciutto e, spezzatasi la membrana, mutarono in fretta il loro genere di vita. Riguardo all'origine dell'uomo, Censorino <sup>4</sup> riporta che secondo Anassimandro dalla terra e dall'acqua riscaldate nacquero o dei pesci o comunque degli animali molto simili ai pesci; da questi nacquero gli uomini e i feti vi rimasero rinchiusi fino alla pubertà. Quando questi si spezzarono, allora finalmente ne uscirono uomini e donne che potevano già nutrirsi [Censorino DK 12 A30]:

Anassimandro di Mileto riteneva che dall'acqua e dalla terra riscaldata fossero nati sia i pesci sia altri animali molto simili ai pesci, e che dentro questi si formassero gli uomini, e che i feti fossero trattenuti all'interno fino alla pubertà, allora, una volta che quelli si furono spezzati, ne sarebbero usciti uomini e donne già in grado di nutrirsi da sé.

<sup>4</sup> Di Censorino (III sec. d.C.) ci è pervenuta, incompleta, un'opera intitolata *De Die Natali* che nella prima parte discute questioni di biologia.

### 2.3 *Anassimene*

Anassimene (586-525 a.C.) è stato il terzo filosofo della scuola di Mileto, probabilmente allievo di Anassimandro e poi suo successore a capo della scuola (Marcucci 2017; Laurenti 1997; Pozzon 2009). Da molti autori antichi era stato ritenuto l'esponente principale della scuola di Mileto forse anche a causa del linguaggio semplice, chiaro e comprensibile della sua opera perduta (che naturalmente aveva il titolo *Sulla Natura*), cosa di cui gli fa credito Diogene Laerzio (Diogene 1987):

Usò l'idioma ionico schietto e senza superficialità.

Come per gli altri filosofi di Mileto, scopo principale dell'indagine di Anassimene è la ricerca di un'archè, di un principio e origine di tutte le cose del mondo naturale. Per Anassimene l'archè è l'aria, quindi una sostanza materiale anche se evanescente e impalpabile. A prima vista, la concezione di Anassimene costituisce una regressione rispetto al livello di astrazione che troviamo in Anassimandro e un ritorno a un'archè di tipo materiale come in Talete. Ma la cosa è più complessa. Infatti, per Anassimene l'aria è associata con l'*apeiron*, cioè è illimitata, infinita, anche se non indeterminata. Siamo, quindi, di fronte a un'archè che ci appare qualcosa di intermedio tra quella indeterminata di Anassimandro e quella molto fisica e materiale di Talete. Quello che appare innovativo nella concezione di Anassimene è la definizione delle cause che determinano le trasformazioni dell'archè nelle cose del mondo materiale. Una descrizione del suo pensiero si trova in una testimonianza di Ippolito<sup>5</sup>:

Anassimene anch'egli di Mileto, figlio di Euristrato, disse che il principio è l'aria infinita e che da essa vengono le cose che si producono, quelle che sono prodotte e quelle che si produrranno, gli dei e le cose divine, mentre le altre cose vengono da ciò che è suo prodotto. L'aspetto dell'aria è questo: quand'è tutta uniforme, sfugge alla vista, mentre si mostra col freddo e col caldo, con l'umido e il movimento. E si muove sempre perché, se non si muovesse, tutto quel che si trasforma non si trasformerebbe. Condensata e rarefatta appare in forme differenti: quando si dilata fino ad essere molto leggera diventa fuoco, mentre poi condensandosi diviene vento; dall'aria si producono

<sup>5</sup> Ippolito di Roma (170-250) è stato un filosofo e scrittore romano autore di una *Refutatio omnium Heresium. Philosophumena*, in cui dà notizie degli antichi filosofi greci.

le nuvole per condensazione e se la condensazione cresce, l'acqua, se cresce ancora, la terra e all'ultimo grado le pietre. Sicché i contrari fondamentali per la generazione sono il caldo e il freddo. Anch'egli suppone eterno il movimento mediante il quale si ha la trasformazione.

Come per gli altri filosofi di Mileto, anche per Anassimene il movimento eterno dell'*archè* è elemento essenziale per il divenire del mondo naturale. Quello che è originale nel pensiero di Anassimene è una definizione fisica della causa delle trasformazioni, causa che egli identifica nella rarefazione e nella condensazione mediante le quali l'aria assume forme alternative. Ma nel pensiero di Anassimene troviamo ancora il concetto dei contrari che sono il caldo e il freddo. L'associazione dei contrari con i processi di rarefazione e condensazione può essere stata suggerita ad Anassimene da una osservazione pratica descritta in una testimonianza di Plutarco nel *Principio del Freddo* (un saggio di Plutarco che fa parte dei *Moralia*):

Di conseguenza affermò che non è irragionevole che una persona rilasci sia caldo che freddo dalla sua bocca. Perché il respiro diventa freddo quando viene compresso e condensato dalle labbra, e quando la bocca è rilassata, il fiato emesso diventa caldo a causa della rarefazione.

Anche nel pensiero di Anassimene c'è una forma di panpsichismo o di ilozoismo, come è evidente dall'unico frammento delle sue opere che ci è pervenuto da Plutarco: «Come l'anima nostra, che è aria, ci sostiene, così il soffio e l'aria circondano il mondo intero».

#### 2.4 Eraclito

Anche se il centro più importante della filosofia ionica è stata Mileto, anche altre città della Ionia hanno espresso filosofi importanti che possiamo considerare naturalisti, cioè che si sono interessati della cosmologia e più in generale di filosofia naturale. Uno di questi è stato certamente Eraclito (535-475 a.C.), nato e vissuto a Efeso, solo poco più a nord di Mileto (Eraclito 2012). Come al solito, non sappiamo quasi nulla della vita di Eraclito eccetto che era primogenito di famiglia ricca ma rinunciò ai suoi diritti di primogenitura in favore del fratello per dedicarsi alla riflessione e alla conoscenza. Secondo tutti i resoconti antichi, Eraclito aveva un carattere melanconico ed aveva in disprezzo il volgo per la sua incapacità di comprendere la complessità della natura (Saudelli 2004). Questo suo carattere è stato

immortalato nel luogo letterario di Eraclito come filosofo che piange in contrasto con Democrito, il filosofo che ride. Il luogo letterario, che è rappresentato anche in un quadro di Donato Bramante, si è prestato alle più varie interpretazioni.

Non sappiamo con certezza se Eraclito abbia scritto un libro. Quello che ci resta del suo pensiero è un complesso di oltre cento frammenti che sono in forma di aforisma o in forma oracolare, di non semplice interpretazione. La predilezione di Eraclito per questa forma di comunicazione traspare forse da un frammento che si riferisce appunto agli oracoli: «Il signore, di cui è l'oracolo che si trova a Delfi, non dice né nasconde, ma allude».

Già Platone, secondo quanto riporta Diogene Laerzio (Diogene 1987), aveva trovato il pensiero di Eraclito non sempre di facile comprensione: «Euripide diede a Socrate una copia del libro di Eraclito e gli chiese cosa ne pensasse; Socrate rispose: Quello che capisco è buono; e penso che anche quello che non capisco sia buono, ma ci vorrebbe un tuffatore di Delo per arrivare fino in fondo» e, successivamente, Aristotele definì Eraclito *l'oscuro*.

Ancora più esplicito su questo punto è un altro passaggio di Diogene Laerzio:

Il libro che ci è tramandato di lui è intitolato dal suo contenuto *Sulla natura*, ma si divide in tre trattazioni, che sono quelle intorno all'universo, quella politica e quella teologica. Lo depose (come offerta) nel tempio di Artemide, avendo cura, secondo quello che dicono alcuni, di scriverlo in stile oscuro, affinché solamente i capaci si accostassero ad esso e non fosse oggetto di facile spregio da parte del volgo.

Il pensiero di Eraclito per quanto riguarda il mondo naturale si richiama, sia pure con una diversa complessità, a due canoni fondamentali della filosofia di Mileto, il movimento e il continuo divenire da un lato e la ricerca di un'unica sostanza generatrice dall'altro. Per Eraclito il mondo è sempre esistito:

Quest'ordine del mondo, che è lo stesso per tutti, non lo fece né uno degli dei, né uno degli uomini, ma è sempre stato ed è e sarà fuoco vivo in eterno, che al tempo dovuto si accende e al tempo dovuto si spegne.

Le cose del mondo sono in continuo divenire e in perenne trasformazione, come ci racconta Platone nel *Cratilo*: «Dice Eraclito che tutto si muove e nulla sta fermo».

Questo continuo divenire è figurativamente rappresentato dal fiume che continuamente fluisce e nelle cui acque non possiamo immergerci due volte perché la seconda volta saremo bagnati da acque diverse. Tradizionalmente, il concetto fondamentale del pensiero di Eraclito è espresso dall'aforisma *panta rhei* (tutto scorre), anche se lo specifico aforisma deve forse essere attribuito a Cratilo, il discepolo di Eraclito, che porterà all'estremo il concetto di divenire affermando che nello stesso fiume non possiamo immergerci nemmeno una volta perché l'acqua che bagna il nostro piede non è la stessa che bagnerà il resto del nostro corpo.

Naturalmente, si pone il problema del modo in cui questo continuo divenire si realizzi. Secondo Eraclito il divenire avviene attraverso la giustapposizione degli opposti. Mentre Anassimandro sosteneva che ci fosse una lotta tra opposti e che le cose si materializzassero come prevaricazione di un opposto sull'altro, una ingiustizia che sarebbe poi riparata secondo *l'ordine del tempo*, in Eraclito il gioco degli opposti si sviluppa secondo un'alternanza o una successione. Trasformandosi continuamente l'uno nell'altro gli opposti finiscono per essere la stessa cosa:

La stessa cosa sono il vivente e il morto, lo sveglio e il dormiente, il giovane e il vecchio: questi infatti mutando son quelli e quelli mutando son questi.

Ciò che è opposto si concilia, dalle cose in contrasto nasce l'armonia più bella, e tutto si genera per via di contesa.

Nell'esperienza comune la realtà può apparirci in una configurazione statica, ma questa è solo una apparenza superficiale dei nostri sensi. Guidati dalla ragione (*il logos*) possiamo scoprire l'armonia nascosta della lotta e dell'equilibrio degli opposti. Il *logos* costituisce, oltre che la ragione umana che consente di penetrare ed esprimere la natura del mondo, la legge universale, il principio razionale che regola l'armonia della realtà sensibile.

Coerentemente con questa visione dinamica della realtà, Eraclito identifica l'*archè* nel fuoco, come sintetizza Simplicio:

Eraclito [...] ha preso il fuoco come principio e ricava le cose che esistono dal fuoco per condensazione e rarefazione, e le risolve di nuovo nel fuoco, considerandolo come la singola natura sottostante; perché Eraclito dice che tutto è uno scambio col fuoco.

Infatti, il fuoco, anche se ci appare sempre uguale, è realmente in continua trasformazione perché sempre nuova legna o combustibile si

consumano e nuovo vapore e cenere si formano: «Il fuoco vive della morte della terra e l'aria vive della morte del fuoco; l'acqua vive della morte dell'aria, la terra della morte dell'acqua».

## 2.5 Anassagora

Possiamo considerare Anassagora (496-428 a.C.) l'ultimo erede della filosofia ionica anche se il suo pensiero si discosta da quello dei filosofi di Mileto.

Occasionalmente si trova l'affermazione che Anassagora sia stato allievo di Anassimene, cosa realmente impossibile ma che indica un qualche legame ancora con quella tradizione filosofica. Anassagora nato a Clazomene, non lontano da Efeso, era di famiglia aristocratica ma rinunciò al suo retaggio in favore dei parenti per dedicarsi alla contemplazione e allo studio del mondo naturale fin dall'età di venti anni. Anassagora si trasferì ad Atene dove trasportò il pensiero filosofico ionico e dove fu maestro e legato a Pericle suo protettore. Caratteristica della filosofia di Anassagora (Lanza 1966) è il *nous*, (la mente), l'intelligenza ordinatrice del mondo naturale, tanto che era soprannominato la *Mente*, come riporta Diogene Laerzio in una breve poesia:

Dove è fama Anassagora si stia,  
il forte eroe, la Mente; ché la mente  
è sua, che tosto insieme unendo tutto  
ciò che dianzi confuso era, compose.

Anassagora fu matematico e astronomo. Come raccontato da *Plinio il Vecchio* (cap. LX delle *Storie naturali*), da Aristotele e altri, Anassagora avrebbe osservato o, addirittura, predetto la caduta di una meteorite a Egospotami, nel Chersoneso, nel 457 a.C. Forse questo sarebbe stato di ispirazione per l'idea che il sole fosse una pietra, grande come il Peloponneso, resa incandescente dal movimento, una concezione contro il pensiero corrente nella Atene del tempo che gli astri fossero degli dei. Per questo fu condannato per eresia, non sappiamo se a morte o all'esilio, e per intercessione di Pericle riuscì ad abbandonare Atene per terminare la sua vita a Lampsaco, nuovamente nella Ionia.

Secondo Anassagora gli oggetti fisici del mondo naturale sono costituiti da *spérmata*, semi di tutte le cose che osserviamo nel mondo. I semi sono illimitati in numero e non generati ma eterni. Aristotele chiamerà i semi *omeomerie*, cioè parti simili, per corrispondere alla conce-

zione di Anassagora di un'infinita divisibilità degli oggetti in particelle sempre più piccole che mantengono le proprietà dell'oggetto originario.

Per quanto riguarda la natura dei semi di Anassagora, dai frammenti che ci rimangono risulta una certa ambiguità. Da un lato troviamo che i semi sono associati a qualità attraverso i loro opposti (caldo-freddo, secco-umido, scuro-luminoso, ecc.), dall'altro sono associati a sostanze materiali di tipo semplice (oro, metalli) o di tipo più complesso (carne, capelli, ossa ecc.). In origine, gli infiniti semi di tutte le cose erano indistinti in una mescolanza primordiale ed è stato l'intervento del *nous*, la mente, a risolvere questo caos, come dice sinteticamente Diogene Laerzio: «Tutte le cose erano insieme, di poi venuta la mente, quelle dispose».

Il *nous* è una intelligenza superiore, separata dal resto, che pone in movimento la materia iniziale indistinta, separando e ricomponendo i semi originari in nuove aggregazioni che danno origine al mondo sensibile. Il *nous* è quindi una entità indipendente dal mondo materiale e dai semi, un semplice spirito separato dalla materia. Questa intelligenza cosmica, una forza meccanica, governa tutti i processi naturali determinando la loro armonia e bellezza. È una intelligenza ordinatrice che non ha una istanza finalistica e che quindi possiamo in qualche modo vedere come una entità che funziona come una regola interna alla materia. In effetti, Aristotele, che apprezzava questa idea come progressiva rispetto alla filosofia ionica, lamentava questa mancanza di finalità nel *nous* interpretandolo come un *deus ex machina*.

Per Anassagora tutte le trasformazioni, incluse la nascita e la morte, sono solo mescolanze e divisioni di materia esistente e nulla può nascere dal nulla, come riportato da Simplicio:

I Greci non pensano correttamente riguardo al nascere e morire; perché niente nasce o muore, ma è semplicemente mescolato o dissociato dalle cose che sono. E perciò sarebbero nel giusto se chiamassero il nascere mescolare insieme e il morire dissociare.

Gli oggetti sensibili del mondo materiale ci appaiono come sono perché vengono determinati dai semi che sono prevalenti nella loro composizione ma in essi sono presenti i semi di tutti i tipi. Un oggetto di oro ci appare tale per la sovrabbondanza dei semi di oro. La conoscenza del mondo materiale come ci deriva dai nostri sensi è quindi parziale.

Abbiamo descritto brevemente il pensiero di Anassagora collocando il filosofo di Clazomene tra i filosofi ionici privilegiando, in modo

forse non troppo appropriato, un criterio geografico. Questa scelta è, tuttavia, opportuna per mettere in evidenza il cambio di paradigma nella definizione di quello che nella natura si considera primordiale. Rispetto ai precedenti filosofi milesii tramonta l'idea che il divenire e la molteplicità del mondo naturale si originino da un singolo elemento primordiale: c'è nella concezione di Anassagora una molteplicità, anzi una infinità di *spérmata* dotati di qualità e divisibili all'infinito. Sarebbe improprio dire che in questo modo si apra uno spiraglio verso una forma di atomismo. In effetti le proprietà delle particelle microscopiche di Anassagora sono, come vedremo, molto diverse dalle particelle degli atomisti. Questo sarà messo in evidenza molto chiaramente da Maxwell (2001):

A un altro eminente filosofo, Anassagora [...] siamo debitori per il più importante contributo per la teoria atomica, che, dopo la formulazione di Democrito, resta da fare. Anassagora, infatti, affermava una teoria che così chiaramente contraddice la teoria atomica di Democrito che la verità o la falsità dell'una implica la falsità o la verità dell'altra. La questione dell'esistenza o non esistenza degli atomi non può oggi essere presentata con maggiore chiarezza che nelle teorie alternative di questi due filosofi.

La differenza che Maxwell mette in evidenza riguarda la divisibilità della materia: mentre Anassagora ammette una divisibilità all'infinito della materia, un punto centrale degli atomisti, come vedremo, è che la divisibilità si deve ovviamente fermare a livello atomico. A parte questo punto centrale, ed altri aspetti importanti come il fatto che gli *spérmata* di Anassagora hanno qualità che gli atomi non avranno, è possibile trovare in Anassagora suggestioni che rimandano al successivo atomismo. In uno dei frammenti che ci sono rimasti si legge: «Le parvenze fenomeniche sono l'aspetto visibile delle cose non appariscenti», un'affermazione che richiama a una questione che rimarrà centrale nell'atomismo fino ai tempi moderni: se gli atomi esistono non li vediamo con i nostri sensi, questione che, quasi preliminarmente, Lucrezio (1969) porrà nel suo poema:

E affinché tuttavia dei miei detti non dubiti  
per il fatto che gli atomi sfuggono agli occhi,  
apprendi che esistono corpi oltre gli atomi  
che nemmeno si posson vedere e dei quali  
devi tu stesso ammettere l'essere.

Queste considerazioni riguardo al vedere l'invisibile si allacciano al problema della conoscenza scientifica in generale. Aristotele (*De part anim.* IV) riporta che: «Anassagora dice che l'uomo è il più sapiente dei viventi perché ha le mani». Questo si riferisce a un frammento che recita:

Per debolezza dei sensi non siamo capaci di discernere il vero: ma possiamo valerci dell'esperienza, delle memorie e dell'arte (*tékhnē*) nostre proprie perché ciò che appare è un fenomeno di ciò che non si vede con gli occhi.

Il processo conoscitivo, come concepito da Anassagora, inizia con l'osservazione dei fenomeni che si accumula nella nostra memoria come saggezza (*sophia*) ma al punto più alto troviamo la *tékhnē*, tecnica che, nel nostro linguaggio moderno, potremmo tradurre come esperimento.



## CAPITOLO 3

### SCIENZA E FILOSOFIA NELLA MAGNA GRECIA

Con la conquista persiana, iniziata molto prima ma che simbolicamente possiamo rappresentare con la distruzione di Mileto avvenuta nel 494 a.C., la Ionia cessa definitivamente di essere il centro del pensiero scientifico e della filosofia occidentale. Si sviluppano così le migrazioni, già in essere da molto tempo, dalla Ionia e dalla Grecia verso l'Italia meridionale peninsulare e la Sicilia dove sorgono importanti scuole filosofiche che, raccogliendo l'eredità della filosofia ionica, anticipano la fioritura delle scuole ateniesi di Platone e di Aristotele. Anche se Platone, nel *Sofista*, sembra accomunare le filosofie sviluppate nelle due aree quando parla di: *le muse della Ionia e della Sicilia*, il quadro concettuale della nuova filosofia cambia sostanzialmente rispetto alla tradizione quasi puramente naturalistica milesia e rispetto alla sua ricerca di un'unica *archè* originaria come, anticipando una presentazione rigorosamente storica, abbiamo già visto in Anassagora. Per spiegare l'estrema varietà degli oggetti del mondo naturale e delle sue continue trasformazioni sorge e gradualmente si afferma il concetto di una pluralità della materia originaria che, infine, porterà all'atomismo greco. È questo il senso dell'affermazione di Newton e di Cudworth, e di altri ancora, come abbiamo visto in un capitolo precedente, che una qualche forma primordiale di atomismo fosse già presente nei filosofi presocratici, a parte i filosofi di Mileto.

In questo capitolo discuteremo delle scuole filosofiche che si svilupparono in Magna Grecia (vedi Figura 3), comprendendo in tale denominazione anche la Sicilia e seguendo in questo la classificazione di Strabone e degli storici romani, per semplificare la nostra presentazione, anche se la denominazione così intesa può essere considerata non del tutto ortodossa.



Figura 3 – Le colonie greche nella Magna Grecia.

### 3.1 Pitagora: la matematica in scena

Tra le scuole filosofiche che si svilupparono in Magna Grecia la scuola pitagorica ha avuto una particolare importanza per la storia della scienza nel mondo occidentale, perché per la prima volta ha portato in evidenza la potenza fondamentale del pensiero matematico per la descrizione e comprensione della struttura e della dinamica del mondo fisico naturale. In estrema sintesi potremmo dire che il celebre credo pitagorico *tutto è numero* sia stato una prodigiosa anticipazione di quello che Galileo, ne *Il Saggiatore* (Galilei 2015), avrebbe stabilito duemila anni dopo Pitagora:

La filosofia naturale è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi, io dico l'universo, ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua e conoscere i caratteri nei quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto.

### 3.1.1 Pitagora nella leggenda

Pitagora (570-495 a.C.) è un personaggio leggendario come risulta dalla vita scritta da Giamblico <sup>1</sup> o da Porfirio <sup>2</sup> e dai racconti di Diogene Laerzio (Diogene 1987) e di tutti gli altri dossografi e storici <sup>3</sup>, tutti comunque posteriori a Pitagora. Secondo la maggior parte delle testimonianze (Giangiulio 2000; Kahn 1993), Pitagora sarebbe nato a Samo, figlio di Mnesarco, e sarebbe stato discepolo di Anassimandro. Secondo il racconto di Diogene Laerzio, Pitagora avrebbe viaggiato per molti anni, prima in Mesopotamia e poi in Egitto, e durante questi viaggi avrebbe appreso l'astronomia dai Caldei e le matematiche dagli Egizi e dai Fenici. Ritornato a Samo, come figura del grande saggio, per primo si sarebbe chiamato *filosofo*, come amante e alla ricerca della sapienza, non *sapiente* perché sapiente può essere solo uno spirito superiore. Secondo la leggenda, Pitagora sarebbe stato il primo a ritornare dall'aldilà, dove Apollo gli avrebbe promesso di concedergli qualsiasi cosa chiedesse a parte l'immortalità. Pitagora avrebbe chiesto e ottenuto di ricordare tutto anche delle sue vite precedenti. Ma un'altra leggenda identifica Pitagora direttamente con Apollo Iperboreo.

A un certo punto della sua vita Pitagora lasciò Samo dirigendosi a Crotona dove per il suo straordinario portamento (il *Chiamato di Samo*), la sua capacità di esprimersi e la sua saggezza avrebbe grandemente impressionato la élite di Crotona e successivamente i giovani, fondando una scuola che era da un lato una scuola filosofica e dall'altro una setta allo stesso tempo religiosa e politica, nella quale erano confluite influenze orfiche. La consistenza della scuola pitagorica può essere evidenziata ricordando che Giamblico riporta un elenco di 187 pitagorici vissuti anche posteriormente a Pitagora. È notevole che alla scuola fossero ammesse anche le donne e Giamblico riporta i nomi di 17 donne pitagoriche tra le quali *Teano*, moglie e discepolo di Pitagora.

Le regole della scuola pitagorica erano rigide. I beni erano messi a comune e i membri della scuola erano tenuti al segreto assoluto e, del resto, viveva un principio di autorità verso il fondatore della scuola

<sup>1</sup> [www.gianfrancobertagni.it/materiali/filosofiaantica/vita-di-pitagora.pdf](http://www.gianfrancobertagni.it/materiali/filosofiaantica/vita-di-pitagora.pdf)

<sup>2</sup> <https://archive.org/details/montoneri-vita-pitagora-it>

<sup>3</sup> Una *Vita di Pitagora* (non pervenutaci) sarebbe stata scritta anche da Aristotele, che resta comunque un testimone importantissimo della filosofia di Pitagora.

espresso nel famoso detto *ipse dixit*. I discepoli accettati nella scuola erano distinti in due categorie: gli *acusmatici* che potevano ascoltare le parole di Pitagora ma senza vederlo e solo dopo cinque anni potevano essere eventualmente ammessi nella categoria dei *matematici* che erano introdotti ai più completi segreti della filosofia pitagorica. Come vedremo, essere ammessi alla scuola non era semplice.

Tutti i membri della scuola erano tenuti alla rigorosa osservanza di una serie di prescrizioni che comportavano uno stile di vita, anche da un punto di vista alimentare. Queste prescrizioni sono contenute nei cosiddetti *I versi aurei* di Pitagora che sono complessivamente ispirati a un principio di moderazione, (*metriòtes*):

Venera innanzitutto gli Dei immortali e serba il giuramento; onora poi i radiosi eroi divinificati e ai demoni sotterranei offri secondo il rito; onora anche i genitori e a te chi per sangue sia più vicino; degli altri, fatti amico chi per virtù è il migliore, imitandolo nel parlare con calma e nelle azioni utili. Non adirarti con un amico per una sua colpa lieve, sinché tu lo possa; approfondisci lo studio di queste cose e queste altre domina: il ventre anzitutto e così pure sonno, sesso e collera; non far cosa che sia turpe in faccia ad altri o a te stesso, ma, soprattutto, rispetta te stesso; poi, esercita la giustizia con le opere e la parola; in ogni cosa, di agir senza riflettere perdi l'abitudine; considera che per tutti è destino morire; delle ricchezze e degli onori accetta ora il venire, ora il dipartirsi; di quei mali, che per demoniaco destino toccano ai mortali, con animo calmo, senz'ira sopporta la tua parte pur alleviandoli, per quanto ti è dato: e ricordati che non estremi sono quelli riservati dalla Moira al saggio; il parlare degli uomini può essere buono o cattivo; che esso non ti turbi, non permettere che ti distolga. E se mai venisse detta falsità, ad essa calmo opponiti.

A parte la dieta vegetariana, è famosa la prescrizione di astenersi dalle fave. Una leggenda racconta che Pitagora vedendo in un prato molto rigoglioso un bue che mangiava le fave avrebbe detto al contadino che lo accudiva di dire al bue di smettere. Avendo il pastore risposto di non conoscere il linguaggio dei buoi, Pitagora avrebbe parlato all'orecchio del bue per varie ore ottenendo il risultato che in seguito il bue si sarebbe sempre astenuto dalle fave. L'astensione dalle fave è rammentata anche in due versi di Callimaco: «E le mani lungi dalle fave di tenere, vivanda che contrista, anch'io, come Pitagora invitava, dico».

L'aneddoto riportato sopra ci permette di introdurci ai poteri sovrannaturali di Pitagora. Ad esempio, in una occasione sarebbe stato

presente simultaneamente in due luoghi diversi, a Crotone e a Metaponto. In un'altra occasione, scostatasi la veste, avrebbe mostrato una gamba d'oro. Un'altra leggenda racconta che essendo stato morso da un serpente, Pitagora lo avrebbe morso a sua volta uccidendolo.

Un credo fondamentale della scuola pitagorica riguardava la metempsicosi. L'anima era immortale e dopo la morte passava in un'altra creatura umana o animale. Pitagora, in particolare, ricordava tutte le sue incarnazioni precedenti, avvenute ognuna ogni  $216 = 6^3$  anni<sup>4</sup>. Un aneddoto racconta che Pitagora vedendo un uomo che batteva un cane gli avrebbe chiesto (o ordinato) di smettere perché nel lamento del cane aveva riconosciuto la voce di un suo amico. Il passaggio da un corpo all'altro corrispondeva, nella filosofia pitagorica, ad un processo successivo di purificazione che avrebbe consentito all'anima immortale di ricongiungersi alla divinità. Questo processo di purificazione si poteva raggiungere attraverso la conoscenza. Il sapere, quindi, secondo la concezione pitagorica ha una valenza etica che si aggiunge alle componenti esoteriche e magiche di origine orfica.

La scuola pitagorica si interessava anche attivamente della politica di Crotone con un orientamento di carattere aristocratico. Questo si era inizialmente realizzato in occasione della guerra di Crotone contro Sibari che era stata approvata da Pitagora. Come abbiamo detto, l'accettazione nella scuola doveva essere approvata direttamente da Pitagora.

Cilone, un uomo influente di Crotone, non era stato ammesso alla scuola per il suo carattere arrogante e prepotente. La cosa non era stata gradita da Cilone, intorno al quale si era coagulata una fazione a carattere democratico che contrastava il governo della città e la scuola pitagorica che ne era l'espressione. In seguito a questi contrasti Pitagora aveva abbandonato Crotone trasferendosi a Metaponto, dove sarebbe morto. Mentre i pitagorici era riuniti a Crotone nella casa di Milone (un famoso atleta), Cilone e la sua fazione avevano dato fuoco alla casa e tutti i pitagorici sarebbero morti, a parte Archippo e Liside. Ma, in realtà, la filosofia e la tradizione pitagorica non si estinsero in questo modo ma si diffusero in vari luoghi, in Grecia e in Magna Grecia, durando per molti secoli successivi. Del resto, e come abbiamo visto, il lungo elenco di pitagorici lasciatici da Giamblico include personaggi vissuti ben dopo Pitagora.

<sup>4</sup> Secondo Giamblico il numero  $6^3$  era un numero magico e generatore di vita.

### 3.1.2 *Il numero come principio*

Per il nostro discorso sull'atomismo quello che interessa è la concezione pitagorica riguardo al numero e, in particolare, quella che possiamo chiamare la geometrizzazione dell'aritmetica. A proposito del contributo pitagorico alla matematica così scrive Proclo:

Pitagora, venuto dopo di lui [Talete], trasformò questa scienza in una forma di educazione liberale, riducendone i principi a idee ultime e dimostrandone i teoremi in maniera astratta e puramente intellettuale. Fu lui a scoprire la teoria delle proporzioni e la costruzione delle figure cosmiche.

Analogamente e più in dettaglio, Aristotele, nella *Metafisica*, scrive:

I cosiddetti pitagorici avendo cominciato ad occuparsi di ricerche matematiche ed essendo grandemente progrediti in esse, furono condotti da questi loro studi ad assumere come principi di tutte le cose esistenti quelli di cui fanno uso le scienze matematiche. E poiché i primi che qui s'incontrano sono, per natura, i numeri, sembrò loro di ravvisare in questi molte più analogie con ciò che esiste e avviene nel mondo, di quante se ne possono trovare nel fuoco, nella terra e nell'acqua [...]. Avendo poi riconosciuto che le proprietà e le relazioni delle armonie musicali corrispondono a rapporti numerici, e che in altri fenomeni naturali si riscontrano analoghe corrispondenze coi numeri, furono tanto più indotti ad ammettere che i numeri siano gli elementi di tutte le cose esistenti e che tutto il cielo sia proporzione ed armonia.

Quello che sappiamo del contributo pitagorico al progresso delle matematiche ha origine indiretta in quanto il sapere che circolava nella scuola era secretato e non poteva essere divulgato. In tale situazione, mentre tutto il sapere era attribuito al maestro, era chiaro che non potevano esserci testi scritti ed eventuali testi possono solo essere posteriori a Pitagora. Diogene Laerzio scrive: «Fino a Filolao non fu possibile conoscere il pensiero di Pitagora; fu Filolao che divulgò i tre famosi libri, che Platone si fece comprare al prezzo di cento mine».

In tale contesto non possiamo dire con esattezza quanto del pensiero pitagorico sia dovuto realmente a Pitagora e quanto ai suoi discepoli e seguaci posteriori. Del resto, è sintomatico che il titolo esatto della vita di Giamblico sia *Storia della vita pitagorica* e che Aristotele, nel testo riportato sopra, parli in termini generali di «pitagorici».

Prima di andare oltre, è opportuno precisare che le teorie pitagoriche dell'aritmetica e della geometria contengono significative componenti di carattere esoterico tanto che si può parlare di una *mistica dei numeri* in Pitagora. In questo contesto, la trattazione della sezione precedente costituisce un substrato di riferimento storico e culturale per le teorie pitagoriche.

Pitagora è soprattutto noto per il teorema che porta il suo nome, teorema che rappresenta una delle prime applicazioni del pensiero astratto e che testimonia la sua fiducia nel metodo deduttivo per la comprensione del mondo fisico:

La geometria ha due grandi tesori: uno è il teorema di Pitagora; l'altro è la divisione di un segmento secondo il rapporto medio ed estremo. Possiamo paragonare il primo a una certa quantità d'oro, e definire il secondo una pietra preziosa (Keplero).

Non sappiamo con certezza se Pitagora abbia veramente dimostrato il suo teorema, nel senso che non ne abbiamo una prova documentata. La dimostrazione del teorema è, con ogni probabilità, successiva a Pitagora e certamente la troviamo in Euclide. Una leggenda racconta che Pitagora sarebbe giunto alla formulazione del suo teorema mentre stava aspettando un'udienza di Policrate, il tiranno che governava Samo. Seduto in un grande salone del palazzo di Samo, Pitagora si mise ad osservare le piastrelle quadrate del pavimento. Si pensa che ne abbia vista una rotta perfettamente lungo una diagonale, così da formare due triangoli rettangoli uguali, e anche isosceli, avendo i due cateti uguali. Pitagora immaginò un quadrato costruito sulla diagonale di rottura della piastrella, un quadrato avente come lati le diagonali delle piastrelle circostanti come mostrato nella Figura 4.

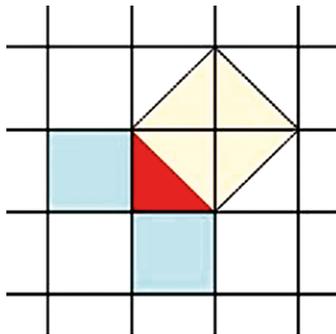


Figura 4 – Intuizione del teorema di Pitagora.

Racconta Diogene Laerzio che dopo avere scoperto il suo teorema Pitagora avrebbe, per ringraziare gli dei, sacrificato una ecatombe di buoi, leggenda alla quale il poeta mugellano *Filippo Pananti* (1766-1837) ha dedicato uno scherzoso epigramma:

Allorquando Pitagora trovò  
 Il suo gran teorema,  
 Cento bovi immolò.  
 Dopo quel giorno trema  
 De' buoi la razza, se si fa  
 Strada al giorno una nuova verità.

Il teorema di Pitagora, se non come dimostrazione, come applicazione pratica per il calcolo della diagonale di un quadrato o, equivalentemente, per raddoppiare l'area di un quadrato, era certamente già noto in Mesopotamia. La tavoletta babilonese YBC 7289 risalente al 1800-1600 a.C. che è mostrata in Figura 5



Figura 5 – La tavoletta YBC 7289.

riporta un quadrato di lato 30 e, al centro, due numeri in cuneiforme e numerazione sessagesimale: il primo è una buona approssimazione di  $\sqrt{2}$ , 1.4142128, e il secondo è la diagonale del quadrato, 42.426388. Analogamente, la tavoletta babilonese Plimpton 322, scritta nel 1800 a.C., riporta una serie di terne pitagoriche a, b, c nella relazione del teorema di Pitagora  $a^2 + b^2 = c^2$ .

La tavoletta VAT 6598 risalente ancora più indietro nel tempo, al 2000 a.C., riporta il calcolo della diagonale di un rettangolo. Il teorema di Pitagora era già noto anche in Egitto, in India e anche in Cina.

La scuola pitagorica procede nella ricerca, caratteristica della scuola di Mileto, di un principio primo, di un'archè. Del resto, Pitagora era stato allievo di Anassimandro. Il principio primo è identificato nel numero e il pensiero pitagorico è riassunto nella affermazione che *tutte le cose sono numeri* o nel frammento di Filolao: «invero tutto quello che si conosce ha un numero: senza il numero non sarebbe possibile né pensare né conoscere alcunché».

Questa concezione può avere avuto origine dalla osservazione della ricorrenza di eventi della vita quotidiana quale noi vediamo nella ripetitività del ciclo circadiano che scandisce l'alternanza del giorno e della notte e che i pitagorici potevano scoprire nel ricorrere delle stagioni, nei tempi dell'incubazione degli animali, nella rivoluzione dei pianeti, degli astri e della volta celeste, negli accordi musicali. Tutti i fenomeni del mondo naturale sembravano obbedire a rapporti numerici calcolabili che sembravano implicare una dipendenza da un qualche principio numerico che doveva essere insito nella natura.

L'idea del numero come principio delle cose si esplicita allora in una 'classificazione' dei numeri stessi che si articola da un lato in proprietà matematiche vere e proprie e dall'altro in proprietà magiche o esoteriche che discendono dalla tentazione di attribuire ad ogni numero qualche caratteristica comunque ben definita. Una articolazione primaria consisteva nella distinzione tra numeri *pari* e numeri *dispari*, distinzione in cui il pari rappresenta l'illimitato, l'indistinto, mentre il dispari rappresenta il limitato. Questa specificazione può risultare evidente se ricorriamo a una rappresentazione geometrica dei numeri per mezzo di punti, o di quadratini, dalla quale emerge come il pari è perfettamente divisibile in due parti uguali, con un margine indistinto tra le due metà, mentre lo stesso non accade per il dispari (Figura 6).



Figura 6 – Divisibilità di numeri pari e dispari.

Questa primaria suddivisione introduce nella filosofia pitagorica il concetto dei contrari che sono, per motivi che vedremo, in numero

di 10 coppie, entro le quali possiamo distinguere alcune di carattere matematico o geometrico e altre di carattere più generale:

limitato – illimitato  
 dispari – pari  
 uno – molteplice  
 destro – sinistro  
 maschile – femminile  
 fermo – mosso  
 diritto – curvo  
 luce – tenebra  
 buono – cattivo  
 quadrato – oblungo

Il significato dei contrari nella filosofia pitagorica non è quello di una semplice opposizione o contrasto. In tutte le cose del mondo naturale i contrari sono sempre entrambi presenti ma in una condizione di equilibrio, o di armonia secondo il linguaggio pitagorico: «L'armonia è infatti unificazione di molti termini mescolati e consenso di cose dissenzienti».

La classificazione geometrica dei numeri prosegue in maniera articolata e un significato particolare viene attribuito all'uno, o *monade*, definito *parimpari* in quanto capace di trasformare il pari in dispari e il dispari in pari ed è il generatore di tutti i numeri.

I primi quattro numeri identificano, in successione, l'uno il punto, il due la linea, il tre il piano e il quattro lo spazio o il volume, come si vede dalla Figura 7:

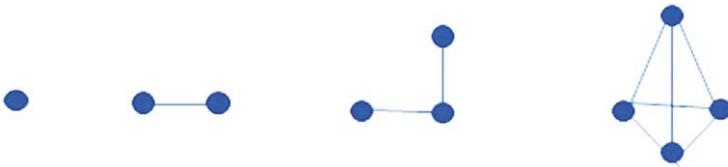


Figura 7 – Significato geometrico dei primi quattro numeri.

La classificazione dei numeri va molto oltre e abbiamo numeri triangolari, come il tre visto sopra, numeri quadrati, rettangolari, pentagonali, cubici, tetraedrici e così via. La rappresentazione geometrica permette di stabilire proprietà razionali dei numeri, quasi una loro dimostrazione. Come si vede dalla Figura 8, la somma dei primi  $n$  numeri

dispari è uguale al numero quadrato  $n^2$  (ad esempio  $1+3+5 = 9 = 3^2$ ). Analogamente, la somma dei primi  $n$  numeri pari è uguale al numero rettangolare  $n(n + 1)$  (ad esempio  $2+4+6 = 12 = 3 \times (3 + 1)$ ) e può essere scomposto in vari modi. Si trova anche che un numero quadrato può essere scomposto nella somma di due diversi numeri triangolari (ad esempio  $9 = 3 + 6$ ).

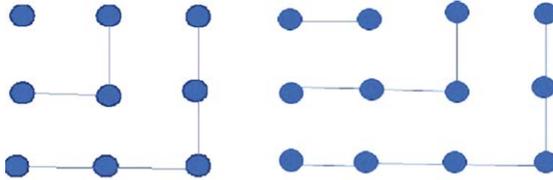


Figura 8 – Somma di numeri dispari e di numeri pari.

Sono poi definiti come numeri perfetti i numeri che sono uguali alla somma dei loro divisori. Ad esempio:

$$6 = 1 + 2 + 3$$

$$28 = 1 + 2 + 4 + 7 + 14$$

La regola per ottenere un numero perfetto era la seguente: prendere i numeri duplicati successivi (1, 2, 4, 8, 16...) e sommarli in ordine fino ad ottenere un numero primo e moltiplicare questo per l'ultimo numero addizionato. Ad esempio,  $1 + 2 + 4 = 7$ ;  $7 \times 4 = 28$ . I pitagorici conoscevano 3 numeri perfetti, 6, 28 e 496.

I numeri amici, a loro volta, sono coppie di numeri tali che ognuno è uguale alla somma dei divisori dell'altro; un caso del genere si ha per la coppia 220 e 284<sup>5</sup>.

Oltre a queste proprietà di natura aritmetica, ai numeri sono associate altre proprietà che non hanno alcun carattere aritmetico.

I numeri 4 e 9, i primi due numeri quadrati, sono associati alla giustizia cioè alla condizione di uguaglianza. Mentre il numero cinque, come somma dei primi due numeri pari e dispari  $2 + 3$ , è associato al matrimonio essendo i numeri pari femminili e i numeri dispari maschili. Il numero 7 è un numero particolare come primo numero non

<sup>5</sup> 220 divisibile per 1, 2, 4, 5, 10, 11, 20, 22, 44, 55 e 110 la cui somma dà 284; 284 divisibile per 1, 2, 4, 71, 142 la cui somma dà 220.

divisore della base (1, 2, 3, 4) ed è considerato rappresentare il «tempo critico» in riferimento a ricorrenze come il parto settimano, il cambio dei denti nel bambino, la pubertà (14) e la maturità (21). Ma per il numero 7 c'è una lunga lista nella numerologia, della quale ricordiamo solo i sette sapienti, le sette meraviglie, i sette pianeti, i sette giorni della settimana, i sette colori dell'arcobaleno, le sette note musicali, per non parlare della ricorrenza in molte religioni. Un numero in viso ai pitagorici era invece il numero 17 come numero intermedio tra il 16 e il 18, due numeri per i quali, nella rappresentazione geometrica, l'area è uguale al perimetro:

I pitagorici hanno in odio il diciassette più di ogni altro numero e lo chiamano ostacolo. Esso, infatti, cade tra il sedici che è un quadrato e il diciotto che è un rettangolo, i soli tra i numeri a formare figure piane che abbiano il perimetro uguale all'area; il diciassette si pone come un ostacolo tra di loro, e li separa uno dall'altro, e spezza la proporzione di uno e un ottavo in intervalli disuguali.

Ma il numero forse più importante nella concezione pitagorica è il numero dieci, un numero perfettamente triangolare costituito dalla successione aritmetica dei primi quattro numeri naturali arrangiati in una struttura piramidale che dà, appunto, la *somma teosofica di 10*. È la famosa *tetraktys* pitagorica (Figura 9) la cui valenza simbolica si evince dal fatto che i discepoli della scuola giuravano su di essa.

Scendendo lungo i quattro livelli della piramide della *tetraktys*, a ciascun livello era assegnato un valore simbolico, come viene mostrato nella Tabella 1 e come abbiamo in parte già visto.

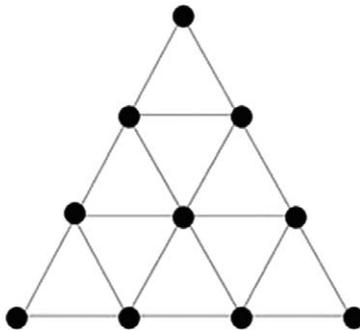


Figura 9 – La *tetraktys* pitagorica.

Tabella 1 – Valori simbolici della *tetraktys*.

Livello				
I	Monade	Fuoco	Punto	Unisono
II	Diade	Aria	Linea	Octava
III	Spazio	Acqua	Superficie	Quinta
IV	Materia	Terra	Tetraedro	Quarta

Come abbiamo visto nella citazione di Keplero, riportata in precedenza, l'altra grande scoperta di Pitagora ha riguardato le proporzioni che possono essere riferite ai numeri o alla geometria. Ci sono dieci diverse proporzioni e di queste tre erano sicuramente note già ai primi pitagorici, la proporzione *aritmetica*, *geometrica* e *armonica*. Con riferimento al segmento a riportato in Figura 10 e suddiviso in due parti b e c:

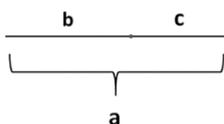


Figura 10 – Suddivisione di un segmento in parti proporzionali.

la proporzione *aritmetica* corrisponde alla relazione  $a - b = b - c$  che implica la relazione

$$b = \frac{a + c}{2}$$

Nella proporzione *geometrica* abbiamo la suddivisione del segmento a nella seguente proporzione:

$$\frac{a}{b} = \frac{b}{c}$$

che comporta la relazione  $b = \sqrt{ac}$

Dalla risoluzione di una semplice equazione di secondo grado si ottiene che nella proporzione geometrica il rapporto  $x = a/b$  è dato dalla cosiddetta *sezione aurea*:

$$x = 1.618\dots = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$$

chiamata anche *rapporto aureo* o *numero aureo* o *costante di Fidia* o *proporzione divina* (Cardolin 2013). La sezione aurea riveste una particolare rilevanza nella concezione pitagorica che possiamo indagare attraverso la costruzione e le proprietà del pentagono regolare (Figura 11).

Nel pentagono si trova che il rapporto tra una diagonale e il lato è uguale alla sezione aurea e così il rapporto tra la parte lunga e la parte corta in cui le diagonali, intersecandosi, si suddividono. La cosa sorprendente è che la sezione aurea finisce col ricorrere indefinitamente guardando come dalla intersezione delle diagonali si forma un nuovo pentagono in cui il gioco di lati e diagonali, oltre che di altre proprietà, si ripete sempre secondo la sezione aurea. Questa ripetizione si può riconoscere anche in processi successivi di suddivisione di un segmento oppure nella suddivisione di un *rettangolo aureo*, cioè di un rettangolo i cui lati sono nel rapporto della sezione aurea. In questo caso, costruendo nel rettangolo aureo un quadrato sul lato minore rimane un rettangolo ancora aureo, una procedura che può essere ripetuta indefinitamente ed entro cui può essere inserita una *spirale aurea* o *spirale di Fibonacci* come si vede nella Figura 12.

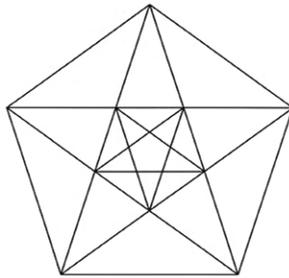


Figura 11 – Pentagono regolare e pentagono stellato.

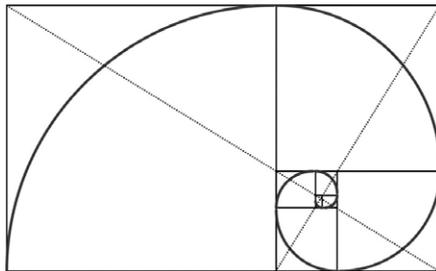


Figura 12 – Rettangolo e spirale aurea.

È evidente che queste proprietà e la loro ricorrenza in natura conferiscono alla sezione aurea un carattere magico e, appunto, quasi divino: «Sono convinto che questa proporzione geometrica servì da idea al Creatore, quando Egli introdusse la generazione continua di forme simili da forme simili tra loro» (Keplero).

A questo si aggiunge il fatto che il rettangolo aureo, per motivi misteriosi, ha un aspetto particolarmente gradevole da un punto di vista estetico, tanto che nel corso del tempo è stato assunto dagli artisti come canone di proporzione nelle loro opere, a cominciare dal Partenone.

Di particolare interesse è la cosiddetta proporzione *armonica* a cui esplicitamente si riferisce la già menzionata citazione di Keplero. La proporzione armonica si ha quando tre numeri  $a$ ,  $b$  e  $c$  sono nel rapporto

$$\frac{b-c}{a-b} = \frac{c}{a}$$

o, in maniera equivalente, quando i loro inversi sono in proporzione aritmetica:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = \frac{1}{b} - \frac{1}{c}$$

Ad esempio, i numeri 12, 8 e 6 sono in proporzione armonica. La cosa notevole è che in questa successione il rapporto  $12/6 = 2$  corrisponde all'ottava, cioè a una frequenza doppia, il rapporto  $8/6 = 4/3$  corrisponde alla quarta e il rapporto  $12/8 = 3/2$  corrisponde alla quinta. Si può notare che questi rapporti corrispondono, rispettivamente, ai rapporti tra la quarta e la seconda riga, tra la quarta e la terza riga e tra la terza e la seconda riga della *tetraktys*, simbolo universale di pitagorici.

È notevole che i pitagorici siano riusciti nello studio della musica (Figura 13) in termini di rapporti numerici senza conoscere la natura del suono. Pitagora, secondo il racconto di Giamblico,

mentre passava dinanzi all'officina di un fabbro, per sorte divina udì dei martelli che, battendo il ferro sopra l'incudine, producevano echi in perfetto accordo armonico tra loro, eccettuata una sola coppia. Egli riconobbe in quei suoni gli accordi di ottava, di quinta e di quarta e notò che l'intervallo tra quarta e quinta era in sé stesso dissonante ma tuttavia atto a colmare la differenza di grandezza tra i due. Rallegrato che con l'aiuto di un dio il suo proposito fosse giunto a compimento, entrò nell'officina e dopo molte prove scoperte che la differenza nell'altezza dei suoni dipendeva dalla massa dei martelli.



Figura 13 – Incisione con Pitagora e Filolao che studiano gli accordi musicali.

Incoraggiato da questa scoperta Pitagora avrebbe poi sperimentato come il suono di una corda dipenda dalla lunghezza della corda ancora secondo rapporti numerici semplici. L'elemento fondamentale, per la visione pitagorica della natura, è che mentre il suono in generale ha una sua natura illimitata o indefinita, ed eventualmente sgradevole per l'uomo, la sua regolazione secondo rapporti numerici semplici è capace di generare una *armonia*, un ordine che è sinonimo di bellezza. Nella musica si trova un caso particolare dell'ordine, dell'armonia generale che governa l'equilibrio tra opposti nel cosmo: «Pitagora per primo denominò la globalità di tutte quante le cose assetto cosmico in base all'ordine che è in esso» (Aezio).

Nella concezione pitagorica anche l'astronomia è regolata da un principio di ordine e armonia e dal numero perfetto, 10. La costituzione dell'universo è così descritta da Filolao, secondo una testimonianza di Teofrasto (vedi Figura 14):

Primo poi sarebbe di natura il fuoco mediano, ed intorno ad esso farebbero le loro evoluzioni dieci corpi divini: [cielo] <dopo la sfera degli astri fissi>, i cinque erranti (pianeti), dopo i quali il sole, sotto il quale la luna, sotto la quale la terra, sotto la quale l'antiterra; dopo tutti quanti i quali, il fuoco del focolare, che tiene la posizione nella zona centrale.

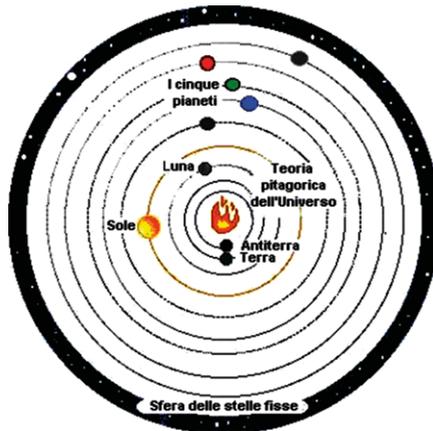


Figura 14 – La struttura dell'universo secondo i pitagorici.

Si vede che la centralità del numero dieci induce i pitagorici a concepire un'antiterra che si interpone tra un fuoco centrale (il focolare) e la terra. Da un lato, quindi, vediamo che la terra non è posta al centro dell'universo ma ruota intorno al fuoco centrale in modo che l'antiterra non sia mai visibile. Non solo, ma in questa concezione la terra ruota anche intorno a un proprio asse:

Per tutti gli altri la terra resterebbe al suo posto, ma per Filolao il Pitagorico si sposterebbe essa in giro intorno al fuoco secondo un giro obliquo in modo uguale al sole e alla luna. Eraclide Pontico ed Ecfanto Pitagorico suscitano il movimento della Terra; comunque, esso avviene non per traslazione, bensì per torsione [rotazione], infilata in un asse a guisa di ruota, intorno al suo proprio centro da occidente a levante. (Aezio)

Durante il loro movimento gli astri, come i corpi in movimento sulla terra, emettono un suono che per i rapporti numerici sottintesi al loro movimento costituisce una armonia divina, musica o armonia

delle sfere. Un aforisma attribuito a Pitagora recita: «C'è geometria nel suono delle corde, c'è musica nella spaziatura delle sfere».

È una musica che non riusciamo a sentire perché ad essa assuefatti fin dalla nascita. Solo Pitagora era in grado di sentire la musica delle sfere.

Questa idea di una musica divina che accompagna il moto delle sfere celesti ha affascinato l'uomo per sempre. Ad esempio, essa viene ripresa nel *Sonno di Scipione*, l'ultima parte del VI libro del *De Republica* di Cicerone. Scipione Emiliano, mentre è in visita da Massinissa, fa un sogno in cui Scipione l'Africano gli mostra la struttura del cosmo. Scipione Emiliano ode un suono intenso e armonioso e lo zio gli spiega:

È il suono che sull'accordo di intervalli regolari, eppure distinti da una razionale proporzione, risulta dalla spinta e dal movimento delle orbite stesse e, equilibrando i toni acuti con i gravi, crea accordi uniformemente variati; del resto, movimenti così grandiosi non potrebbero svolgersi in silenzio e la natura richiede che le due estremità risuonino, di toni gravi l'una, acuti l'altra.

Il *Sonno di Scipione* ritorna in un libretto di *Metastasio* musicato da *Predieri* in cui il sogno viene così spiegato in riferimento a Pitagora:

SCIPIONE: E chi mai tra le sfere, o dèe, produce  
Un concerto sì armonico e sonoro?

COSTANZA: L'istessa, ch'è fra loro,  
Di moto e di misura  
Proporzionata ineguaglianza. Insieme  
Urtansi nel girar: rende ciascuna  
Suon dall'altro distinto;  
E si forma di tutti un suon concorde.  
Varie così le corde  
Son d'una cetra; e pur ne tempra in guisa  
E l'orecchio, e la man l'acuto e 'l grave,  
Che dan, percosse, un'armonia soave.  
Questo mirabil nodo,  
Che gli ineguali unisce  
Questa ragione arcana  
Che i dissimili accorda,  
Proporzion s'appella, ordine e norma  
Universal delle create cose.  
Questa è quel che nascose,

D'alto saper misterioso raggio,  
Entro i numeri suoi di Samo il saggio.

L'immaginazione di Pitagora non poteva non colpire l'immaginazione dei poeti a cominciare da *Dante* (Par. I 75-84):

Quando la rota che tu sempiterni  
Desiderato, a sé mi fece atteso  
Con l'armonia che temperi e discerni,  
Parvemi tanto allor del cielo acceso  
della fiamma del sol, che pioggia o fiume  
Lago non fece mai tanto disteso  
La novità del suono e 'l grande lume  
Di lor cagion m'accesero un disio  
Mai non sentito di cotanto acume,

da *Goethe* nel *Faust*:

Intonando l'antica melodia, a gara con gli astri fratelli, percorre il  
corso prescritto il Sole con passo di tuono,

e da *Shakespeare* nel V atto del *Mercante di Venezia*:

Siedi, Gessica; guarda come il fondo del cielo  
è intarsiato fitto fitto di paténe d'oro lucente;  
non c'è astro, il più piccolo che vedi,  
che non canti, nel suo moto, come un angelo,  
nel coro eterno dei cherubini dal giovane sguardo:  
tale armonia è nelle anime immortali,  
ma fino a che questa fangosa veste che si corrompe  
le rinserra rozzamente, noi non possiamo udirla.

Keplero nel trattato *Harmonices mundi* (L'armonia del mondo) del 1619, al termine del quale enuncia la sua terza legge del moto dei pianeti, rifonda la concezione metafisica di Pitagora dell'armonia delle sfere sulle leggi del moto dei pianeti. Ad esempio, trova che la massima e la minima velocità della terra intorno al sole sono nel rapporto 16:15, cioè variano di un semitono come tra le note Mi e Fa: «La terra canta Mi, Fa, Mi: potete dedurre persino dalle sillabe che in questo mondo non vi è che Fame e Miseria», e che tra pianeti vicini i rapporti tra le velocità angolari approssimano intervalli musicali con un errore minimo (inferiore a un semitono).

Abbiamo visto che la grande innovazione della filosofia pitagorica è consistita nell'affrancare il numero dalle cose contate, trasformandolo in un ente astratto, in qualche modo autonomo, riguardo al quale si possono scoprire e dimostrare delle caratteristiche e proprietà astratte del tutto generali. Tuttavia, nel pensiero pitagorico, ci sono altre proprietà che riconducono i numeri in una dimensione concreta. Per prima cosa, la associazione dei numeri con il punto, la linea, la superficie e lo spazio tridimensionale permette di definire i contorni, attraverso le superfici limitanti, degli oggetti del mondo naturale che osserviamo. In tal modo, con i pitagorici entrano in gioco i solidi regolari classici, il cubo, il tetraedro, l'ottaedro, l'icosaedro e il dodecaedro, solidi perfetti che tanta fortuna avranno nella filosofia successiva e particolarmente in Platone. Non sono solo solidi regolari o perfetti ma hanno una concretezza che deriva loro dall'associazione con i quattro elementi, in ordine con la terra, il fuoco, l'aria, l'acqua, e con l'etere.

In seconda istanza, la rappresentazione geometrica dei numeri avviene attraverso punti, o quadrati o cubi che non sono proprio immateriali o infinitesimi ma hanno comunque una dimensione o un volume e, quindi, una loro corporeità. Non si può certo parlare di atomismo in senso stretto ma di qualcosa che è in *nuce*. In effetti, il pitagorico Ecfanto identificherà infine la monade con l'atomo:

Ecfanto siracusano, uno dei Pitagorici, [diceva principi] di tutte quante le cose i corpi indivisibili e il vuoto; ecco, questi per primo professò che le monadi dei Pitagorici sono corporee. (Aezio)

Qualcuno, Ecfanto siracusano, professò che non è possibile assumere conoscenza non-latente [verace] riguardo agli essenti; si definisce invece nel modo in cui s'opina. Ebbene, enunciava che i corpi primi sono indivisibili e che sussistono tre alterazioni di essi: magnitudine, schema, potenza, dalle quali si generano le esistenze sensibili. Ordunque, la pluralità di essi sarebbe discontinua, e questa stessa sarebbe di portata infinita. I corpi, dunque, sarebbero mossi non sollecitati dalla gravezza né piegati da urto, tutt'altro: sotto l'azione d'una divina potenza, la quale appella nous e psiche. Ebbene, di questa il cosmo sarebbe idea [immagine], e anche per questo si sarebbe generato sferico sollecitato da divina potenza.

È questo che giustificherà, dopo molti secoli, le affermazioni che abbiamo visto nel primo capitolo da parte di Newton e di Cudworth che accreditano Pitagora come uno dei fondatori o anticipatori dell'atomismo.

### 3.2 *Parmenide e la scuola eleatica*

Elea (originariamente Hyele e poi chiamata Velia dai Romani) è una città fondata dai Focesi in quello che oggi è il Parco Nazionale del Cilento (Figura 15).



Figura 15 – Veduta degli scavi di Elea (Velia).

Elea è stata sede di una importante scuola filosofica. Fondatore della scuola eleatica è stato a lungo considerato Senofane di Colofone (570-475 a.C.), originario, quindi, della Ionia, aedo e filosofo-poeta itinerante. A Senofane si attribuisce la critica dell'antropomorfismo delle divinità greche quale ci è stato tramandato dai poemi di Omero ed Esiodo:

Omero ed Esiodo hanno attribuito agli dei tutto quello che per gli uomini è oggetto di vergogna e di biasimo: rubare, fare adulterio e ingannarsi... i mortali credono che gli dei siano nati e che abbiano abito, linguaggio e aspetto come loro... gli Etiopi credono che (gli dei) siano camusi e neri, i Traci, che abbiano occhi azzurri e capelli rossi ...ma se buoi, cavalli e leoni avessero le mani e sapessero disegnare... i cavalli disegnerebbero gli dei simili a cavalli e i buoi gli dei simili a buoi.... In realtà, uno, dio, tra gli dei e tra gli uomini il più grande, non simile agli uomini né per aspetto né per intelligenza... tutto intero vede, tutto intero pensa, tutto intero sente... senza fatica tutto scuote con la forza del pensiero... sempre nell'identico luogo permane senza muoversi, né gli si addice recarsi qui o là,

una premessa fondamentale, come il rifiuto della mitologia, per una interpretazione razionale dei fenomeni naturali. È di un certo interesse il seguente frammento di Senofane: «Non è che da principio gli dei abbiano rivelato tutte le cose ai mortali, ma col tempo essi cercando ritrovano il meglio» che prefigura l'idea di un processo conoscitivo del mondo naturale non per rivelazione ma per acquisizioni progressive.

Molto più verosimilmente, fondatore della scuola di Elea è stato Parmenide (515-450 a.C.), il più illustre dei filosofi eleati (Cerri 2018). Parmenide si interessò anche della politica della sua città fornendo i cittadini di buone leggi. Il pensiero di Parmenide era contenuto in un poema intitolato (e non poteva essere altrimenti) *Sulla natura*<sup>6</sup>. Il poema era diviso in due parti, la *via della verità (aletheia)* e la *via dell'opinione (doxa)*, un percorso lungo il quale il filosofo viene condotto dalla dea con sagge cavalle, che rappresentano la tensione verso la vera conoscenza (Figura 16):

Le cavalle che mi portano fin dove il mio desiderio vuol giungere,  
mi accompagnarono, dopo che mi ebbero condotto  
e posto sulla via che dice molte cose,  
che appartiene alla divinità e che porta per tutti i luoghi l'uomo che sa.  
Là fui portato. Infatti, là mi portarono accorte cavalle  
tirando il mio carro, e fanciulle indicavano la via.



Figura 16 – Le accorte cavalle di Parmenide.

<sup>6</sup> Tutti gli scritti degli antichi portavano il titolo *Sulla natura*: quelli di Melisso, Parmenide, Empedocle, Alcmeone, Gorgia, Prodicò e di tutti gli altri. (Galeno)

Nella prima parte del poema Parmenide stabilisce gli elementi fondamentali della sua ontologia fissando i caratteri dell'essere:

Orbene io ti dirò, e tu ascolta accuratamente il discorso,  
 quali sono le vie di ricerca che sole sono da pensare:  
 l'una che «è» e che non è possibile che non sia,  
 e questo è il sentiero della Persuasione (infatti segue la Verità);  
 l'altra che «non è» e che è necessario che non sia,  
 e io ti dico che questo è un sentiero del tutto inaccessibile:  
 né potresti aver cognizione di ciò che non è (ché impossibile),  
 né potresti esprimerlo.  
 Infatti lo stesso è pensare ed essere.

L'essere di Parmenide è ciò che esiste oltre la qualità sensibile, l'essere come l'intelligibile, la razionalità dell'animo umano: «infatti il pensare implica l'esistenza».

L'essere di Parmenide è unico, ingenerato, eterno e immutabile. Dal punto di vista della nostra indagine, caratteristica fondamentale dell'essere è di essere immoto; questo corrisponde alla negazione del movimento, movimento che sarà un elemento fondamentale dell'atomismo. Per essere perfetto e sempre uguale a sé stesso l'essere viene assimilato a una sfera, il solido geometrico perfetto, sempre uguale a sé stesso da qualunque parte si guardi.

Platone nel *Teeteto* esprimerà ammirazione per il rigore logico che si trova nella visione filosofica di Parmenide definendolo venerando e *insieme terribile*. Così, nel dialogo, si esprime Socrate:

Lo incontrai quando lui era molto vecchio e io molto giovane, e mi è parso che avesse una profondità di pensiero davvero straordinaria. Io temo dunque che noi non riusciamo a capire le sue parole, e ancor più che ci sfugga il senso di ciò che egli disse.

Ma il viaggio di esplorazione di Parmenide non si ferma nel dominio della *aletheia* perché la dea lo porta ad esplorare il regno della *doxa* che ugualmente il filosofo deve conoscere nella sua articolazione, anche se l'opinione è altro dalla verità:

Bisogna che tu tutto apprenda:  
 e il solido cuore della Verità ben rotonda  
 e le opinioni dei mortali, nelle quali non c'è una vera certezza.  
 Eppure, anche questo imparerai:  
 come le cose che appaiono bisognava che veramente fossero,  
 essendo tutte in ogni senso.

Il divenire nel mondo delle apparenze nasce dalla compenetrazione di due entità, luce (fuoco) e tenebra (terra):

Poiché tutte le cose si dicono luce e notte e poiché luce e notte sono presenti a questa o a quella cosa, secondo le loro possibilità, il tutto è pieno di luce e insieme di invisibile tenebra e luce e tenebra sono eguali perché nessuna prevale sull'altra.

In base a questo Parmenide costruisce una cosmogonia:

Parmenide intorno alle cose sensibili afferma di aver intenzione di dire come Terra e Sole e Luna, l'etere comune e la Via Lattea e l'Olimpo estremo e degli astri l'ardente forza ebbero impulso a generarsi e descrive l'origine delle cose che si generano e si corrompono, fino alle parti degli animali. (Simplicio)

Egli ha concepito un ordinamento, e mischiando gli elementi luce e oscurità, da questi e per mezzo di questi produce tutti i fenomeni. Infatti, molto ha detto intorno alla terra, al cielo, al sole, alla luna e alle stelle; ha raccontato la genesi degli uomini, e, da antico esperto di scienza, nulla ha tralasciato delle cose importanti, mettendo insieme uno scritto suo, non plagiandone uno altrui. (Plutarco)

Il primo allievo di Parmenide è stato Zenone di Elea (489-431 a.C.) del quale si hanno scarse notizie biografiche. Zenone, con Parmenide, è protagonista del dialogo *Parmenide* di Platone, dialogo che si sarebbe svolto durante una ipotetica visita dei due eleati ad Atene. Argomentando sul dialogo è stata ipotizzata la nascita di Zenone nel 490 a.C. Secondo il racconto di Plutarco, Zenone avrebbe fallito il tentativo di uccidere il tiranno di Elea e per non rivelare i nomi dei complici si sarebbe strappata la lingua gettandola ai piedi del tiranno. Nel dialogo di Platone, e in generale, Zenone appare come un difensore della ontologia del maestro sfruttando argomentazioni basate sul principio di non contraddizione o *reductio ad absurdum*. In effetti, Aristotele accredita Zenone come fondatore della dialettica e la sua abilità dialettica è così descritta da Diogene Laerzio: «era abile a sostenere entrambi i lati di un discorso».

Famosi sono i paradossi di Zenone, il cui scopo era di dimostrare l'impossibilità del movimento, e tra questi il paradosso della freccia e quello di Achille e della tartaruga ai quali fa riferimento *Paul Valéry* in una strofa del poemetto *Le Cimetière marin*:

Zenone, Crudele Zenone, Zenone eleata!  
 M'hai trafitto con questa freccia alata  
 Che vibra, vola, e che non vola affatto!  
 Al suo scoccar son nato, e già m'uccide!  
 Ombra di tartaruga, il sole irride  
 L'anima, Achille, fermo nello scatto!

Discepolo di Parmenide è stato anche Melisso (470 a.C.-...) (Volpe 2017). Originario di Samo, Melisso prima di dedicarsi alla filosofia era stato comandante della flotta di Samo che aveva sconfitto la flotta ateniese nel 441 a.C. Come Zenone anche Melisso è stato apologeta delle idee del maestro introducendo però delle innovazioni. Per Parmenide, come abbiamo visto, l'essere è simboleggiato da una sfera, il solido perfetto (Figura 17), come descrive in questi versi:

Dunque, se c'è un limite estremo, è circoscritto  
 da tutte le parti, simile a curva di sfera perfetta,  
 ovunque d'identico peso dal centro: perch'è necessario  
 ch'esso non sia maggiore o minore in questo o quel punto.

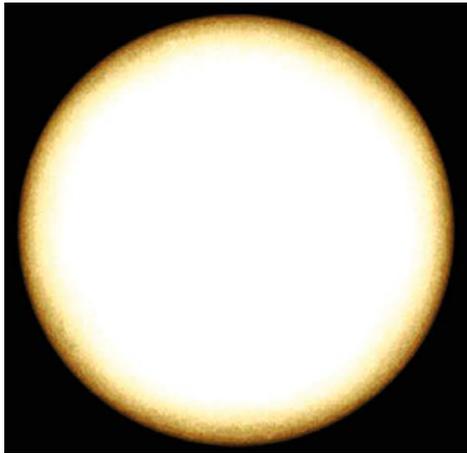


Figura 17 – La sfera perfetta: immagine dell'essere di Parmenide.

Per Melisso c'è una incongruenza in questo in quanto la sfera presupporrebbe comunque un limite che non si addice all'essere. Per ovviare a questo Melisso attribuisce all'essere un'estensione infinita sia nello spazio che nel tempo. Una interessante discussione è stata avviata ri-

guardo alle motivazioni alla base di questo argomento di Melisso e cioè che esso sia funzionale a una critica preventiva o a posteriori all'atomismo. Ricordiamo, infatti, che Leucippo sarebbe stato allievo di Zenone.

Mentre, come si è visto sopra, Platone esprime ammirazione per il metodo filosofico di Parmenide e Zenone, Aristotele invece è molto critico nei riguardi di Parmenide e in particolare di Melisso:

Entrambi, infatti, tanto Melisso quanto Parmenide, ragionano in modo euristico: le loro argomentazioni sia contengono assunzioni false sia sono invalide. Quelle di Melisso sono più grossolane.

Le considerazioni di Aristotele sono forse alla base dei giudizi di Dante che mentre pone Zenone tra gli antichi saggi che fanno corona ad Aristotele, *il maestro di color che sanno* (Inf. IV 130138):

vidi 'l maestro di color che sanno  
seder tra filosofica famiglia.  
Tutti lo miran, tutti onor li fanno:  
quivi vid'io Socrate e Platone,  
che 'nnanzi a li altri più presso li stanno;  
Democrito che 'l mondo a caso pone,  
Diogenès, Anassagora e Tale,  
Empedoclès, Eraclito e Zenone;

è invece assai critico su Parmenide e Melisso prima nel *De Monarchia* e poi nella *Commedia* (Par. XIII 121-126):

Vie più che 'ndarno da riva si parte,  
perché non torna tal qual e' si move,  
chi pesca per lo vero e non ha l'arte.  
E di ciò sono al mondo aperte prove  
Parmenide, Melisso e Brisso e molti,  
Li quali andaro e non sapean dove.

### 3.3 *Empedocle e i quattro elementi*

Empedocle nato in Akragas è vissuto, ipoteticamente, tra il 484 e il 424 ma le notizie biografiche sono scarse. Empedocle è stato uomo politico, filosofo, scienziato, poeta, profeta, mago, medico, taumaturgo e, in sostanza, un personaggio quasi mitico. Le sue doti di poeta, mostrate nel poema *Sulla natura* (Gallavotti 2013), furono apprezzate da Cicerone: «Siano pure detti poeti anche coloro che i greci chiamano fisici, dal momento che il fisico

Empedocle scrisse un poema egregio» (Cicerone, *De oratore*) e ancora di più da Lucrezio (Lucrezio 1969) anche se ne critica la filosofia della natura:

Questa grande regione [la Sicilia] suscita per molti aspetti la meraviglia degli uomini, e si sa che è ben degna di essere vista, ricca di beni e di grande forza di uomini; eppure, non sembra che abbia mai avuto niente più illustre, caro, sacro, meraviglioso di Empedocle. I canti usciti dal suo petto divino proclamano e spiegano scoperte illustri, al punto che non sembra nato da stirpe mortale.

Si racconta che essendo la città di Selinunte afflitta da una malattia originata da acque stagnanti di un fiume, Empedocle avrebbe deviato in quell'alveo le acque di altri due fiumi salvando la città dalla malattia e guadagnando la fama di taumaturgo:

Scoppiata una pestilenza fra gli abitanti di Selinunte per il fetore derivante dal vicino fiume, sì che essi stessi perivano e le donne soffrivano nel partorire, Empedocle pensò allora di portare in quel luogo a proprie spese (le acque di) altri due fiumi di quelli vicini: con questa mistione le acque divennero dolci. Così cessò la pestilenza e mentre i Selinuntini banchettavano presso il fiume, apparve Empedocle; essi balzarono, gli si prostrarono e lo pregarono come un dio. Volle poi confermare quest'opinione di sé e si lanciò nel fuoco. (Diogene Laerzio)

Empedocle lui stesso si dichiarava un dio. Dalle notizie che abbiamo Empedocle sarebbe morto in Peloponneso dove era stato esiliato per le vicende politiche di Akragas. Ma la leggenda racconta che sarebbe morto gettandosi volutamente nell'Etna (Figura 18):



Figura 18 – La morte di Empedocle che si getta nel vulcano.

Ippoboto riferisce che egli, levatosi, si diresse all'Etna e, giunto ai crateri di fuoco, vi si lanciò e scomparve, volendo confermare la fama che correva intorno a lui, che era diventato dio. Successivamente fu riconosciuta la verità, poiché uno dei suoi calzari fu rilanciato in alto; infatti, egli era solito usare calzari di bronzo (Diogene Laerzio)

Il rilancio del calzare è interpretato come negazione del carattere divino di Empedocle.

Secondo Diogene Laerzio, Empedocle s'iscrisse alla Scuola pitagorica, divenendo allievo di Telauges, il figlio di Pitagora. Questa appartenenza pitagorica, o orfica, è alla base di pratiche o credenze predicate da Empedocle come quella di astenersi dalla carne per una dieta vegetariana o come la fede nella metempsicosi: Empedocle stesso sarebbe arrivato dopo un numero, forse illimitato, di vite precedenti:

Ché già un tempo io fui giovinetto e giovinetta,  
arbusto ed uccello e pesce muto che di tra' flutti guizza.

La complessità, la molteplicità e il divenire dei fenomeni naturali potevano trovare una spiegazione in una varietà di principi originari. Campione di questo approccio è stato certamente Empedocle. L'idea di diversi elementi fondanti della materia è essenziale nella sua filosofia che considerava la variabilità delle sostanze naturali come dovuta alla miscelazione in diverse proporzioni di quattro elementi primordiali, *aria, acqua, terra e fuoco*. La miscelazione presupponeva che ogni elemento potesse essere diviso in minuscole parti, un'idea ripresa in seguito nel pensiero degli atomisti. Insiti nei principi fondamentali ci sono forze che danno origine alla mescolanza degli elementi: l'*amicizia* che collega e la *discordia* che separa gli elementi, secondo un procedimento puramente meccanico, cioè senza una dichiarata finalità. I quattro elementi erano sostanzialmente già presenti nella filosofia di Anassimandro ma in Empedocle condividono un carattere più materialistico. L'idea dei quattro elementi era, come già visto, implicita nella tetraktys dei pitagorici.

I quattro elementi di Empedocle sono ingenerati, eterni e indistruttibili e quindi condividono, in una visione pluralista, le caratteristiche dell'essere parmenideo. Empedocle chiama i quattro elementi *radici di tutte le cose*. Questo implica che quello che chiamiamo *nascita e morte*, nel senso di formarsi o dissolversi nel nulla, sono illusioni o modi di esprimersi: sono in realtà solo mescolanza o dissociazione delle radici delle cose:

Ma un'altra cosa ti dirò: non vi è nascita  
di nessuna delle cose mortali, né fine alcuna di morte funesta,  
ma solo c'è mescolanza e separazione  
di cose mescolate, ma il nome di nascita, per queste cose,  
è usato dagli uomini.

L'articolazione secondo cui agiscono le forze primordiali della discordia e dell'amore porta ad una cosmogonia in continuo divenire o piuttosto periodica. Quando l'amore domina incontrastato c'è perfetta armonia e i quattro elementi sono completamente uniti nello Sfero, dove non c'è vita. La vita e il mondo non esistono nemmeno quando l'odio domina incontrastato e i quattro principi sono completamente separati nel caos. C'è vita solo quando amore e discordia sono entrambi in gioco secondo una alternanza sommariamente illustrata nella Figura 19:

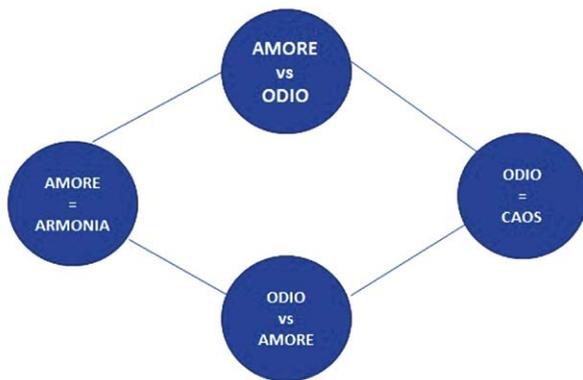


Figura 19 – Ciclicità del cosmo di Empedocle.

Questa alternanza, o periodicità, cosmica è applicata da Empedocle anche nella descrizione della formazione degli esseri viventi secondo uno schema che sembra vagamente alludere a una evoluzione 'darwiniana'. Inizialmente, dall'aggregazione degli elementi si sarebbero formate, a seconda delle proporzioni degli elementi, parti dei corpi, come ossa, sangue, carne, che vagavano per il mondo; dalla aggregazione in armonia di queste parti si sarebbero formati i primi esseri animali e vegetali. Il criterio informatore del successivo sviluppo sarebbe che esseri viventi con elementi in armonia progrediscono più agevolmente (Lami 1991):

Per Empedocle, le prime generazioni degli animali e delle piante non sarebbero affatto avvenute con organismi integrali completi, ma nella disgiunzione, con le varie parti senza la loro naturale connessione; le seconde, poi, con aspetti di figure immaginarie; le terze ancora sarebbero state quelle degli esseri della natura integrale; [...] di tutti gli esseri viventi i generi si sarebbero distinti per le specifiche mescolanze [degli elementi costitutivi]: gli uni avrebbero l'impulso più appropriato per andare verso l'acqua, altri se ne sarebbero volati su in aria, quanti abbiano cioè igneo in savorràpiù, altri ancora, più pesanti, sarebbero andati per la terra, altri infine con parti pari nella loro mescolanza sarebbero in accordo con tutti i luoghi.

La natura interna dei quattro elementi fondamentali di Empedocle non è forse solo strettamente materiale. Infatti, egli associa le quattro radici a divinità con la seguente plausibile individuazione:

Aria	Zeus
Fuoco	Aidoneo
Terra	Hera
Acqua	Nesti

Delle quattro radici di tutte le cose ascolta dapprima:  
Zeus brillante ed Hera datrice di vita e Aidoneo e Nesti,  
che con le lacrime bagna la sorgente mortale.

Questa valenza multipla della natura delle quattro radici risulterà palese nella fortuna che la teoria dei quattro elementi avrà nei secoli successivi, a cominciare da Platone e Aristotele, per entrare nell'immaginario popolare. Del resto, un'idea di questi quattro elementi può essere già trovata, anche prima di Empedocle, nel pensiero filosofico indiano o cinese in varie forme.

A parte quello che diremo nel seguito di questo volume, possiamo, a titolo esplicativo, rammentare come il grande medico Ippocrate (460-477 a.C.) abbia adattato la teoria dei quattro elementi naturali alla natura umana, associando agli elementi i quattro umori di base: bile gialla (fegato) associata al fuoco; sangue (cuore) all'aria; flegma (testa) all'acqua; e bile nera (milza) alla terra. L'equilibrio di questi elementi porterebbe al buon funzionamento dell'organismo, mentre il dominare dell'uno o dell'altro determinerebbe la malattia. A questi elementi corrisponderebbero anche quattro tipi di temperamenti/personalità: il malinconico, nel quale predomina la bile nera, è magro, debole, pallido, avaro e triste; il collerico, che ha un eccesso di

bile gialla, è magro, irascibile, permaloso, furbo, generoso e superbo; il flemmatico, con eccesso di flegma, è robusto, pigro, lento e sciocco; il tipo sanguigno, nel quale predomina il sangue, è robusto, allegro, goloso, socievole, dedito ad una sessualità giocosa.

Le quattro radici di tutte le cose entrano anche nella concezione di Empedocle della conoscenza attraverso il principio che *il simile conosce il simile*. La conoscenza avviene quando gli elementi che ci sono nel mondo percepibile trovano corrispondenza nello stesso elemento presente nell'uomo: «Noi conosciamo la terra con la terra, l'acqua con l'acqua, l'etere divino con l'etere, il fuoco distruttore con il fuoco, l'amore con l'amore e l'odio funesto con l'odio».



## L'ATOMISMO GRECO

4.1 *Leucippo e Democrito*

L'atomismo greco, basato su concetti che sono alla base di tutto lo sviluppo della chimica moderna e dai quali si sono poi sviluppate le idee della fisica delle particelle elementari, risale a Leucippo e Democrito (Bailey 1964) anche se, come abbiamo visto, una idea primigenia di questa filosofia della natura si potrebbe ritrovare nei pitagorici se alla *monade* si attribuisse un carattere materiale oppure in Empedocle se ai quattro elementi (terra, acqua, fuoco, aria) si volesse attribuire una suddivisione particellare.

Di Leucippo non abbiamo notizie biografiche di nessun genere e addirittura Epicuro avrebbe affermato che un filosofo Leucippo non sarebbe mai esistito. Ma di Leucippo parlano tutti i dossografi. Leucippo sarebbe nato a Mileto o ad Abdera o ad Elea. Viene riportato che sarebbe stato allievo di Zenone di Elea e che poi avrebbe fondato una sua scuola in Abdera dove Democrito sarebbe stato suo discepolo. Diogene Laerzio (Diogene 1987) riporta che Leucippo scrisse un'opera dal titolo *Macrocosmos*; ma Aezio riporta un unico frammento di Leucippo che recita: «Niente accade per caso ma tutte le cose accadono come risultato di una causa o per necessità».

Tutto quello che sappiamo dell'atomismo greco viene attribuito a Democrito (460-370 o 350? a.C.), o congiuntamente a Democrito e a Leucippo. Democrito è nato in Abdera e sarebbe vissuto 109 anni. Già in Abdera avrebbe appreso l'antica sapienza da magi e Caldei. Secondo il racconto di Diogene Laerzio, ottenuta l'eredità paterna in denaro, Democrito avrebbe viaggiato in Egitto e forse anche in India ed Etiopia. Si dice anche che sia stato in Atene dove non si sarebbe preoccupato di farsi riconoscere per una sua naturale riservatezza e volontà di una vita ritirata per dedicarsi ai suoi studi. Rientrato in Abdera, dove avrebbe

tenuto una sua scuola, sarebbe stato ammirato dai suoi concittadini per la sua sapienza e per la sua capacità di rivelare il futuro, tanto da essere stimato degno di onori divini. Diogene Laerzio riporta i titoli di un numero straordinario di opere di Democrito su ogni argomento e tra questi vogliamo solo riportare il titolo di *Microcosmos*, titolo che evidentemente si richiama all'opera del suo maestro Leucippo, citata in precedenza.

Un *topos* associato alla figura di Democrito (e del quale abbiamo già parlato) è durato nei secoli e si ritrova nell'arte e nella letteratura: il *topos* del filosofo che ride. Ma quale è il motivo del ridere di Democrito? Ride degli uomini che invece di cercare la felicità nella moderazione e nella conoscenza della natura e di noi stessi si affannano alla ricerca di piaceri, ricchezze e altre cose dannose. Il mondo e la vita sono realtà complesse dietro le quali è inutile affannarsi. Il riso di Democrito nasce, quindi, dalla compassione per i suoi simili che nella loro stupidità non riescono a capire l'inutilità di affannarsi dietro a cose secondarie o dannose. Il riso del filosofo ha quindi una motivazione etica che diventerà più palese nell'atomismo di Epicuro. Anche Velazquez, in uno dei suoi dipinti, rappresenta Democrito con un riso beffardo che indica la futilità del nostro mondo.

Gli abderiti che avevano attribuito poteri divini al loro sapiente concittadino pensano, non comprendendo il motivo del riso, che Democrito sia diventato folle. Nella tradizione gli abderiti non erano considerati molto intelligenti tanto che gli ateniesi dicevano che l'aria di Abdera induceva stupidità. Preoccupati, gli abderiti chiamano il grande medico Ippocrate per curare la follia di Democrito. La storia è raccontata nella favola in versi *Democrito e gli Abderiti* di La Fontaine (1869, Libro ottavo, XXVI):

Vieni e vedrai –  
 dicean gli stolti – vaneggiar la mente  
 di sì grand'uomo dalla nebbia involta  
 dei libri, che saria certo men danno  
 s'ei non sapesse decifrar dei libri  
 manco i cartoni. Udrai com'egli sogna  
 di un infinito numero di mondi,  
 ch'ei forse vede d'altri pazzerelli  
 come lui popolati. E ancor discorre  
 d'atomi erranti, poveri fantasmi  
 del suo cervel che danza, e senza il piede  
 metter fuori dell'uscio, egli pretende  
 i cieli misurar, descriver fondo  
 a tutto l'universo e non conosce  
 il poveretto il mal che lo consuma.

La storia è raccontata nella *Lettera a Democrito* di Ippocrate (Rosselli 1995). Ippocrate trova Democrito in un giardino intento ai suoi studi e a dissezionare animali e cerca di capire le origini della follia. Democrito spiega al medico i motivi del suo ridere:

Tu ritieni che due siano le cause del mio riso, il bene e il male. Ma io rido solo dell'uomo, pieno di stoltezza, vuoto di azioni rette, infantile in tutte le sue aspirazioni, che dura le peggiori fatiche per non ricavarne alcun vantaggio, che con i suoi desideri smisurati percorre la terra fino ai suoi confini e penetra nelle sue smisurate cavità, fonde l'argento e l'oro e non smette di accumularne, si affanna ad avere sempre di più per essere sempre più piccolo.

E Ippocrate conclude:

Sono venuto da te, Democrito, per somministrare elleboro a un folle... ma non appena ti ho incontrato, ho riconosciuto non l'opera della follia, ma di una capacità di comprendere pressoché totale, ed ho biasimato come folli coloro che mi hanno portato da te.

Nella letteratura latina troviamo un riferimento a questo *topos* in Orazio (*Epistole*, II, 194): «Si foret in terris, rideret Democritus» (Se fosse sulla terra, Democrito riderebbe). E in Giovenale (*Satira decima*, vv 33-34): «perpetuo risu pulmonem agitare solebat Democritus» (Per un perpetuo riso solleva Democrito scuotere il petto).

Ricordando che Leucippo era forse stato discepolo di Zenone, potremmo considerare che l'atomismo prenda le mosse dal pensiero di Parmenide per sovvertirne però completamente i connotati. Infatti, anche per gli atomisti l'essere, «quello che è», ha la caratteristica di essere ingenerato, incorruttibile, impenetrabile ed eterno. Ma mentre per Parmenide l'essere è unico, per Leucippo e Democrito (Chinnici 2020) l'essere è plurale, costituito dagli atomi in numero infinito. La materia, se così possiamo chiamarla, degli atomi indivisibili è sempre la stessa e gli atomi differiscono tra loro per tre proprietà: forma, ordine e posizione, oltre che per grandezza. Aristotele, commentando la filosofia degli atomisti, rappresenterà simbolicamente le proprietà degli atomi con un'analogia con le lettere dell'alfabeto nel seguente modo:

Tabella 2 – Le proprietà degli atomi in analogia con le lettere dell'alfabeto.

FORMA	ORDINE	POSIZIONE
A ≠ N	AN ≠ NA	N ≠ Z

È una analogia che in seguito sarà spesso richiamata.

Gli atomi, secondo Leucippo e Democrito, sono di dimensioni infinite e non sono accessibili ai nostri sensi; tuttavia, costituiscono il substrato di tutte le cose e del divenire che osserviamo nella realtà che ci circonda. La motivazione che sottintende alla concezione atomistica è l'elaborazione di una filosofia capace di rendere conto del divenire che si origina dalla aggregazione e dalla separazione degli atomi indivisibili. La spiegazione di come questo avvenga richiede a Leucippo e Democrito un altro scostamento ancora più sostanziale dalla concezione parmenidea. Il «non è» di Parmenide assume per gli atomisti una sua realtà che si identifica con il vuoto che è l'infinito e che da un lato separa gli atomi e dall'altro consente il loro movimento e gli urti attraverso i quali essi potranno aggregarsi per formare gli oggetti del mondo sensibile. Per gli atomisti esistono quindi due principi, il vuoto e il pieno degli atomi.

La concezione atomistica pone così due problemi che saranno oggetto di discussione filosofica per molti secoli:

- l'esistenza del vuoto e la possibilità del movimento solo attraverso il vuoto;
- l'impossibilità di divisione all'infinito della materia, costituendo gli atomi il limite estremo della divisibilità.

Gli atomi si muovono incessantemente nel vuoto di un moto vorticoso. La ragione o la legge del moto è intrinseca alla natura stessa degli atomi e non viene identificata altrimenti. La *ragione* o *necessità* di cui parla Leucippo nel frammento che abbiamo riportato sopra non deve essere intesa come una causa esterna ordinatrice ma come una dimensione interna alla natura stessa degli atomi. A tale proposito, Aezio riporta: «[Riguardo alla necessità] Democrito dice che è l'urto reciproco e il moto e il vortice della materia».

A proposito della natura dell'aggregazione degli atomi essa è così illustrata da *Filopono* (Sorabji 1987) nel suo commento ad Aristotele:

Quando Democrito diceva che gli atomi sono in contatto l'uno con l'altro, non intendeva il contatto, in senso stretto, che si verifica quando le superfici delle cose a contatto si incastrano perfettamente tra loro, ma la condizione in cui gli atomi sono vicini l'uno all'altro e non lontano; questo è quello che viene chiamato contatto. In ogni caso, sono separati dal vuoto.

Del resto, se ci fosse una qualunque forza di attrazione che unisce gli atomi, come accade nella moderna teoria del legame chimico, gli

atomi verrebbero in qualche modo modificati e questo non può essere possibile per gli atomisti

All'assenza di una causa ordinatrice esterna farà riferimento Dante quando scrive di *Democrito che a caso il mondo pone*. Muovendosi incessantemente e in tutte le direzioni gli atomi si urtano e, in conseguenza, o deviano in direzioni casuali o possono aggregarsi per formare l'infinita varietà delle cose sensibili. Secondo Democrito, la forma degli atomi può essere liscia, ruvida, uncinata, convessa o di innumerevoli altre varietà. Ed è proprio la forma che consente l'aggregazione degli atomi secondo il principio del 'simile con il simile'. Commentando il principio atomistico della formazione di infiniti oggetti dalla aggregazione degli atomi, Aristotele ricorre ancora alla analogia con le lettere dell'alfabeto scrivendo che con le stesse lettere si forma la tragedia e la commedia<sup>1</sup>.

Se la vera realtà è negli atomi, la conoscenza sensibile è illusoria: Diogene Laerzio sintetizza il pensiero di Democrito in proposito così: «In realtà non sappiamo nulla di nulla, perché la verità è nel profondo» come più esplicitamente riportato da Strobeo: «Per convenzione il dolce, l'amaro, il caldo, il freddo, il colore; ma in realtà ci sono atomi e vuoto».

Vi sono quindi due tipi di conoscenza possibili secondo quanto si trova in un frammento di Democrito:

Di conoscenza (gnômê) esistono due forme, quella legittima e quella oscura; e a quella oscura appartengono tutti questi oggetti: vista, udito, olfatto, gusto, tatto. L'altra forma (genuina) differisce da quella e i suoi oggetti sono nascosti. Quando la conoscenza oscura non può più arrivare a niente di più piccolo, col sentire, o annusare, assaggiare o percepire al tatto, bisogna continuare la ricerca verso il più sottile.

Secondo questa concezione quello che sfugge alla osservazione diretta dei sensi è nel dominio dell'intelletto. Potremmo interpretare questa concezione semplicemente come una forma di scetticismo. Ma se valutiamo con il bagaglio delle nostre conoscenze di oggi, dopo che la struttura atomica della materia è stata studiata sperimentalmente e sofisticati strumenti ci hanno permesso di *vedere l'invisibile*, la situa-

<sup>1</sup> Come esempio della possibilità di combinazione delle lettere dell'alfabeto possiamo considerare che da A, M, O e R si possono formare le parole AMOR, RAMO, ROMA, MORA, ORMA.

zione è forse più complessa. L'atomismo greco aveva natura filosofica, senza un fondamento sperimentale e *vedere l'invisibile* non poteva che essere affidato alla intuizione, alla immaginazione e a tentativi di razionalizzazione delle osservazioni empiriche. A questo si appellerà Lucrezio (Lucrezio 1969) rivolgendosi al forse incredulo Memmio:

E affinché tuttavia dei miei detti non dubiti  
per il fatto che gli atomi sfuggono agli occhi,  
apprendi che esistono corpi oltre gli atomi  
che nemmeno si possono vedere e dei quali  
devi tu stesso ammettere l'essere.

È a questa intuizione che dobbiamo risalire quando leggiamo Teofrasto riportare la spiegazione di Democrito della diversa durezza e densità dei metalli:

Il ferro è più duro e il piombo più compatto, perché il ferro ha gli atomi disposti più irregolarmente e ha maggiori quantità di vuoto in molti posti e il piombo ha meno vuoto ma i suoi atomi sono sistemati regolarmente dappertutto. Per questo è più pesante del ferro ma più soffice.

In generale, le proprietà sensibili della nostra percezione dipendono dalla disposizione degli atomi e dalla loro forma, come descritto qui di seguito:

Gli elementi sono privi di qualità, ... e i loro composti sono colorati dall'ordine, dalla forma e dalla posizione [degli atomi] (Aezio).  
Il bianco e il nero, dice, sono ruvidi e lisci; e riduce i sapori alle forme [atomiche] (Aristotele, Sens.).

O ancora più esplicitamente:

Il sapore aspro deriva da forme che sono grandi e multiangolari e hanno pochissima rotondità; poiché queste, quando entrano nel corpo, intasano e accecano le vene e ne impediscono il fluire: ecco perché anche le viscere si arrestano. Il gusto amaro deriva da forme piccole, lisce e arrotondate la cui periferia ha giunture; questo è il motivo per cui è viscoso e adesivo. Il gusto salino proviene da forme grandi che non sono arrotondate o scalene ma spigolose e articolate (intende per scalene quelle che si incastrano e si combinano tra loro) – grandi, perché la salsedine rimane in superficie (perché se fossero

piccole e colpite da coloro che li circondano si mescolerebbero con l'universo); non arrotondate, perché ciò che è salino è ruvido e ciò che è arrotondato è liscio; non scalene, perché non si incastrano, ecco perché è friabile.

Ma ancora più interessante è la descrizione in termini atomici del meccanismo di formazione delle nostre sensazioni. Dagli oggetti della percezione si distaccano atomi che colpiscono i nostri organi generando le sensazioni. Gli atomi si distaccano nella forma di *eidola* o *simulacra*; cioè non sotto forma di generici effluvi atomici ma si distaccano nella forma di pellicole sottilissime e invisibili ed estremamente veloci che hanno la stessa forma degli oggetti da cui provengono.

L'immagine è particolarmente palese nel caso della visione: in tal caso gli *eidola* penetrano nel profondo attraverso gli occhi generando la visione. Poiché non tutti vediamo allo stesso modo o, in altri casi, si può avere una visione deformata di un oggetto, possiamo ipotizzare che gli *eidola* attraversando l'aria, che è comunque un mezzo materiale, possano subire, a causa degli urti una qualche deformazione.

Ci siamo soffermati sulla visione perché questa interpretazione corpuscolare del meccanismo della visione si presta ad una tenue forma di analogia con la visione indotta da altre particelle di ben altra natura, i fotoni che attraverso la loro frequenza portano anch'essi una traccia dell'oggetto. Ma gli stessi criteri si applicano agli altri organi di senso.

Diogene Laerzio riporta che Democrito si sarebbe attivamente interessato di matematiche e di geometria e a lui è attribuito il teorema secondo il quale due solidi aventi una base con la stessa area hanno volumi uguali se a tutte le altezze le sezioni hanno la stessa area. Per la nostra discussione può essere di particolare interesse il seguente paradosso, legato al suddetto teorema, che Plutarco attribuisce a Democrito:

Se un cono viene tagliato da un piano parallelo alla base, come si dovranno immaginare le due superfici di sezione? Saranno uguali o disuguali? Perché, se saranno disuguali renderanno irregolare il cono che verrà ad avere tante incisioni e scabrosità a gradini; ma se saranno uguali le superfici saranno uguali anche le sezioni e il cono verrà ad assumere l'aspetto del cilindro, in quanto risultante della sovrapposizione di cerchi uguali e non disuguali, il che è sommamente assurdo.

La discussione del paradosso, che coinvolge i concetti di infinitesimo, va oltre gli intenti della nostra discussione. Ma può essere pertinente notare che se si intendono linee e superfici non come astratti

oggetti della geometria ma come aventi natura corpuscolare il paradosso può essere semplicemente risolto. Confinando la discussione, per semplicità, al caso bidimensionale di un triangolo, la soluzione è apparente dalla Figura 20:

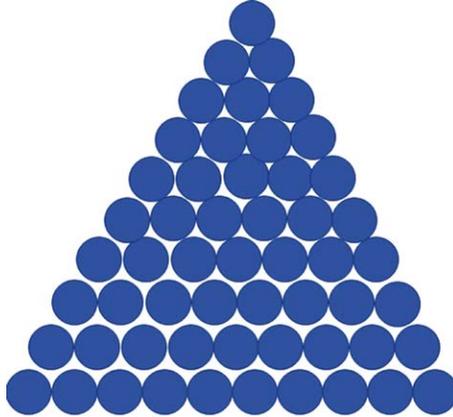


Figura 20 – Il triangolo a scalini del paradosso di Democrito.

#### 4.2 Epicuro e la scuola del Giardino

La teoria atomistica ha ripreso forza un secolo dopo Democrito e ha avuto una nuova rielaborazione da parte di Epicuro (341-270 a.C.) dopo che la teoria atomica aveva avuto commenti e critiche da parte di Platone e, soprattutto, di Aristotele (Bailey 1964; Morel 2019; Pyle 1997).

Epicuro, il cui nome significava *soccorritore*, in onore di Apollo, era nato nell'isola di Samo e, all'età di 32 anni, aveva fondato una sua scuola filosofica prima a Mitilene e poi in Atene. Qui aveva comprato una casa, dotata di un giardino, in cui aveva sede la scuola che fu denominata *Scuola del Giardino*. La scuola era aperta anche alle donne, tra le quali Leonzio ricordata da Diogene Laerzio, e agli schiavi, o almeno a uno schiavo di Epicuro.

Cicerone (*Sulla natura degli dei*) afferma che Epicuro avrebbe ripreso più o meno interamente l'atomismo di Democrito:

Cosa c'è nella fisica di Epicuro che non venga da Democrito? A parte pochi cambiamenti, come quello che ho detto prima riguardo alla deviazione degli atomi, ripete in generale le stesse cose: gli

atomi, il vuoto, le immagini, l'infinito degli spazi e la moltitudine innumerevole dei mondi, le loro nascita e morte; quasi tutto quello che contiene la spiegazione razionale della natura.

In realtà, la filosofia di Epicuro presenta caratteristiche importanti che differiscono da quella di Democrito. Soprattutto, Epicuro attribuisce agli atomi il peso come proprietà. Abbiamo detto che il peso degli atomi manca in Democrito. Alcuni commentatori e dossografi si esprimono diversamente in proposito:

Democrito dice che ciascuno degli indivisibili è più pesante secondo il suo eccesso. (Aristotele)

I Democritei, e più tardi Epicuro, affermano che gli atomi hanno un peso. (Simplicio)

Democrito distingue gli atomi pesanti e leggeri in base alla grandezza. (Teofrasto)

[Leucippo e Democrito] non dicono da dove viene il peso degli atomi. (Alessandro di Afrodisia)

Il punto fondamentale è che in Democrito l'eventuale peso degli atomi non gioca nessun ruolo nel loro movimento mentre per Epicuro gli atomi si muovono verso il basso proprio in virtù del loro peso. Verosimilmente, questa importante variante dell'atomismo può essere stata suggerita a Epicuro dalla necessità di trovare una causa fisica apparente del moto degli atomi. Il moto degli atomi ha quindi la sua causa nella gravità. Poiché nella loro caduta verso il basso gli atomi hanno tutti la stessa velocità, indipendentemente dal loro peso, mai si urterebbero e nulla accadrebbe. Ma nel modello di Epicuro, in tempi e luoghi indefiniti, gli atomi hanno deviazioni impercettibili (*parenklisis*) dalle loro traiettorie rettilinee e queste deviazioni producono urti tra gli atomi che portano alla associazione degli atomi come causa del perenne divenire che osserviamo nel mondo naturale. Queste deviazioni saranno chiamate *clinamen* da Lucrezio nel *De rerum natura*.

Sorgono domande sull'origine e sulle implicazioni delle deviazioni atomiche. Nella filosofia di Epicuro le deviazioni non avvengono proprio per caso ma sono, in qualche modo, una proprietà intrinseca degli atomi. Come per Democrito, il pensiero materialista di Epicuro nasceva dalla necessità di esaminare i fenomeni naturali abbandonando l'idea di forze sovranaturali. L'atomismo era la realizzazione fisica di un'etica laica, libera dai legami della religione e della paura dell'ignoto. Il movimento degli atomi nel vuoto era soggetto solo al

caso e alla necessità. Il caso era il risultato delle leggi meccaniche che regolavano le traiettorie degli atomi. La necessità era la conseguenza della loro tendenza naturale a compiere bruschi scarti nel procedere in linea retta, scarti che rendevano caotico il movimento e che erano la causa della loro unione nei composti. La casualità deterministica del moto atomico era controbilanciata dalla *parenklisis*.

Nella concezione di Epicuro anche l'anima ha costituzione corpuscolare di atomi sottilissimi, distribuiti in tutto il corpo, anch'essi soggetti alla possibilità di deviazioni. Quindi, quella sorta di libero arbitrio degli atomi individuali si traduce in un libero arbitrio dell'uomo attraverso le deviazioni degli atomi costituenti l'anima.

Anche in Epicuro struttura e dinamica atomica hanno un ruolo fondamentale nella formazione delle sensazioni attraverso gli organi di senso. Immagini (*eidola*) si distaccano continuamente dagli oggetti del mondo materiale simulando la loro forma esterna. Gli *eidola* si diffondono nello spazio e raggiungono gli organi di senso penetrando attraverso canali di vuoto in essi contenuti. Ma nel loro percorso gli *eidola* urtano tra loro o con altri oggetti atomici modificandosi in modo che la percezione degli oggetti può essere diversa in diversi soggetti. In questo modo si possono generare anche simulacri di oggetti fantastici. Ad esempio, *simulacra* di un uomo e di un cavallo possono, urtandosi, generare l'immagine di un centauro. Attraverso questo meccanismo di fusione e trasformazione si generano gli *eidola* dei sogni: «I sogni non hanno natura divina né potenza divinatoria, ma succedono a causa di immagini che ci hanno impressionati».

Le implicazioni più generali, filosofiche ed etiche, dell'atomismo che erano già evidenti in Democrito diventano più esplicite in Epicuro. Se il divenire consiste semplicemente nella aggregazione e separazione degli atomi non esistono fatti imprevedibili o forze occulte che ci possano terrorizzare. Anche la morte che crea più paura di tutto non è nulla per noi: «Il male, dunque, che più ci spaventa, la morte, non è nulla per noi, perché quando ci siamo noi non c'è lei, e quando c'è lei non ci siamo più noi».

Un mondo ultraterreno, e in particolare gli dei, esistono per Epicuro e sono eterni e perfettamente felici e privi di qualsiasi possibile trasformazione; come tali nulla possono sul destino degli uomini. La religione, come intesa nel mondo classico con dei che hanno carattere antropomorfo e determinano il destino dell'uomo, è rinnegata da Epicuro. Questo avrà grande importanza nella futura accettazione dell'atomismo di Epicuro che troverà oppositori anche nei politici che usano la religione come strumento di potere. Tanto più che, come vedremo, l'etica predicata da Epicuro prevedeva una vita semplice e ritirata, priva di interesse nella politica.

Scopo dell'uomo è il raggiungimento della felicità, obiettivo che è nelle mani dell'uomo stesso attraverso la comprensione del mondo naturale (Epicuro 2001). Ma ci sono una vera e una falsa felicità: quella vera consiste nell'accontentarsi di quello che è essenziale. La felicità si raggiunge ricercando il piacere ma ci sono piaceri stabili che corrispondono a esigenze fondamentali di cui bisogna accontentarsi: «Il corpo chiede di non avere fame, non avere sete, non avere freddo. Chi soddisfa questi bisogni, o pensa di poterli soddisfare, può considerarsi felice come Zeus».

Al contrario, la ricerca del superfluo non genera la felicità:

Perché non sono di per sé stessi i banchetti, le feste, il godersi fanciulli e donne, i buoni pesci e tutto quanto può offrire una ricca tavola che fanno la dolcezza della vita felice, ma il lucido esame delle cause di ogni scelta o rifiuto, al fine di respingere i falsi condizionamenti che sono per l'animo causa di immensa sofferenza.

La raccomandazione è quindi di accontentarsi dell'essenziale:

Niente basta a quell'uomo per il quale ciò che basta sembra poco, e la filosofia è lo strumento per raggiungere questo obiettivo: Chi dice che è troppo presto o troppo tardi per dedicarsi alla filosofia, è come se dicesse che non ha ancora o non ha più l'età per essere felice. Non è possibile vivere felicemente senza vivere con saggezza, virtù e giustizia, né vivere con saggezza, virtù e giustizia, senza vivere felicemente. A chi manchi la saggezza, la virtù e la giustizia, manca anche la possibilità di una vita felice.

Epicuro fornisce quasi una ricetta per il raggiungimento della felicità identificando quattro mali o paure che ci allontanano dalla felicità e indicando nel *Tetrafarmaco del saggio* le quattro medicine che ci liberano da questi mali come indicato nella Tabella 3:

Tabella 3 – Il *Tetrafarmaco* di Epicuro.

MALE	FARMACO
Paura degli dei	Gli dei non si curano di noi
Paura della morte	La morte solo disgregazione di atomi
Non raggiungere la felicità	Accontentarsi di cose necessarie
Dolore fisico	Se leggero sopportabile, se acuto dura poco

L'etica predicata direttamente da Epicuro ha, quindi, un carattere sostanzialmente ascetico. Nel seguente frammento:

Siamo nati una sola volta, e non potremo essere nati una seconda volta; dovremo non essere più per l'eternità. Ma tu, benché non abbia padronanza del domani, stai rinviando la tua felicità. La vita si perde nei rinvii, ed ognuno di noi muore senza aver goduto una sola giornata.

sembra riecheggiare il *carpe diem* che Orazio rivolge alla giovane Leuconoe come invito ad apprezzare quello che la vita oggi ci offre senza pensare a un futuro imprevedibile:

Non domandare, Leuconoe – non è dato sapere – che destino gli dei hanno assegnato a me e a te, né consulta gli oroscopi. [...] Mentre parliamo, se ne va il tempo geloso: godi il presente, quanto meno fiduciosa nel futuro.

Questa citazione va letta nella assunzione di una qualche adesione del poeta alla filosofia di Epicuro a cui lui stesso ironicamente si riferisce nella lettera all'amico Albio: «Se vuoi farti buon sangue, vieni a visitarmi, e mi troverai grasso e netto, con la pelle ben tirata, come un porcello del gregge di Epicuro».

La *Scuola del Giardino* ha avuto un grande successo ma con due connotazioni diverse che sono associate al nome di epicureismo o di epicureo. Epicureismo può indicare semplicemente la filosofia e la scuola di Epicuro con le prescrizioni etiche e morali che abbiamo sinteticamente illustrato sopra. Alternativamente, in base a una interpretazione libertina della ricerca della felicità attraverso il piacere di qualsiasi genere, anche sfrenato, epicureismo diventa sinonimo di una filosofia di vita dissoluta e tesa alla ricerca della ricchezza e del potere. In questo contesto l'aggettivo: «epicureo» viene ad indicare comunemente un amante dei beni materiali, un seguace del piacere, un ateo. Una immagine diametralmente opposta a quella che emerge dalla lettura delle regole di Epicuro che possiamo trovare nelle *Sentenze Vaticane*. Tuttavia, come vedremo, questa falsa interpretazione della dottrina del filosofo di Samo comporterà un rifiuto dell'atomismo per molti secoli. Per illustrare il punto possiamo anticipare la condanna di Epicuro, sia pure per altre ragioni, che troviamo in Dante che pone Epicuro nel girone degli eretici (Inf. X 13-15):

Suo cimitero da questa parte hanno  
con Epicuro tutti suoi seguaci,  
che l'anima col corpo morta fanno.

È una condanna di Epicuro che Dante aveva già espresso nel *Convivio*, riprendendo da Cicerone:

Altri filosofi furono, che videro e credettero altro che costoro; e di questi fu primo e prencipe uno filosofo che fu chiamato Epicuro; ché, veggendo che ciascuno animale, tosto che nato è, quasi da natura dirizzato nel debito fine, che fugge dolore e domanda allegrezza, quelli disse questo nostro fine essere voluptate [...], cioè diletto senza dolore. E però [che] tra 'l diletto e lo dolore non ponea mezzo alcuno.

Anche delle opere di Epicuro abbiamo solo frammenti, in particolare quelli contenuti nei papiri della *Villa dei Papiri* di Ercolano (Figura 21) dove aveva istituito un circolo l'epicureo Filodemo di Gadara (110-135)<sup>2</sup>, e citazioni oltre alle tre lettere, riportate da Diogene Laerzio, a Erodoto, a Meneceo e a Pitocle riguardanti, rispettivamente, la fisica, l'etica e l'astronomia.

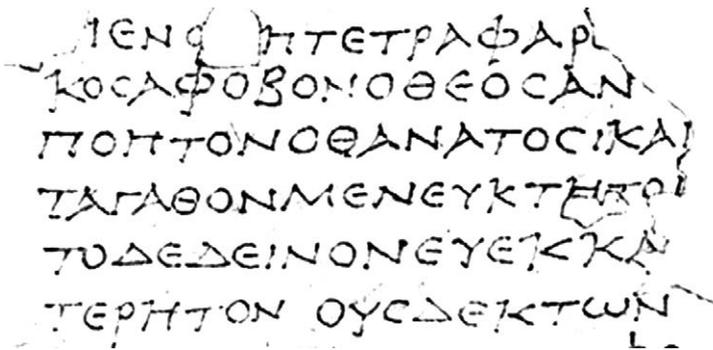


Figura 21 – Papiro di Ercolano che riporta il tetrafarmaco.

Tuttavia, nel caso di Epicuro, forse un segno della straordinarietà del personaggio, abbiamo un dettagliato resoconto della sua filosofia,

<sup>2</sup> Filodemo ebbe come discepolo Sirone che a sua volta ebbe come discepoli Orazio e Virgilio. Cicerone menziona Filodemo come epicureo, nella sua connotazione negativa, definendolo «greco lascivo, suo [di Pisone] compagno di bagordi» (*Ad Pisonem*).

arricchito dal fascino della poesia, nel sublime poema *De rerum natura* (Figura 22) del poeta latino Tito Lucrezio Caro (98/95- 50/55) (Lucrezio 1969). Le notizie biografiche su Lucrezio sono quasi inesistenti tanto che persino le date e i luoghi di nascita e morte del poeta non sono certe. San Girolamo (347-418) scrive nel *Chronicon*:

Nasce il poeta Tito Lucrezio poi indotto alla pazzia da un filtro d'amore, dopo aver scritto negli intervalli della follia alcuni libri che in seguito Cicerone pubblicò, si suicidò nel quarantaquattresimo anno di vita.

Sul filtro d'amore, sui disturbi mentali e sul suicidio di Lucrezio non c'è alcuna certezza. Anche i riferimenti a Lucrezio nella letteratura latina sono assai scarsi. Cornelio Nepote (100-27 a.C.) lo ricorda, insieme a Catullo, come grande poeta.



Figura 22 – *De rerum natura*, manoscritto del 1483.

Possiamo chiederci perché Lucrezio abbia scelto di scrivere un *trattato* di filosofia in versi in un periodo in cui, comunemente, la filosofia veniva scritta in prosa. Naturalmente, Lucrezio aveva illustri predecessori come Parmenide, Senofane, Empedocle. Il proposito di Lucrezio era quello di scrivere un'opera di divulgazione di concetti di per sé complessi:

Ti dirò l'essenza suprema del cielo e di Numi  
 E i principi del mondo,  
 Onde crea la natura le cose e le accresce  
 E le nutre e nei quali la stessa natura  
 Poi le riporta distrutte: principi  
 Che noi discorrendo diremo [...]
 [...] elementi primi  
 Giacché sono i primordi di tutto.

per esporre i quali la poesia gli appare uno strumento più comunicativo e adatto:

[...] perché  
 Troppo arida appare questa dottrina  
 A quelli che poco la trattano  
 E indietro la gente da lei si ritrae  
 Esporla ho voluto per carmi di dolci parole  
 E aspergerla quasi del dolce miele poetico,  
 Tenerti l'animo avvinto ai miei carmi,  
 Perché tutta tu veda di quale  
 Ornata figura si ammanti l'essere  
 Dell'universo.

Tanto più che il poeta vuole esprimersi nella lingua latina non ancora adatta del tutto alle sottigliezze della filosofia:

Esporre le ardue dottrine dei Greci  
 È difficile in versi latini, ben vedo;  
 E dovrò spesso formare nuove parole,  
 Che scarsa è la lingua per nuovi pensieri; eppure  
 La tua virtù è tale, tale è il piacere  
 Sperato della tua dolce amicizia  
 Da farmi piegare lo spirito ad ogni fatica  
 E da indurmi a vegliare le notti serene;  
 E tento per te di comporre parole,  
 Un canto che sia come una chiara luce  
 Da spandere nella tua mente,  
 Sì che tu possa a fondo vedere le cose nascoste.

Il poeta si sente un orgoglioso precursore nel percorrere l'aspro sentiero della sapienza con versi latini:

Ma niente è più bello dei templi sereni  
 Dei saggi, delle altezze ben munite  
 Della sapienza e dominarle,  
 Vado per l'aspra strada delle Pieridi  
 E passo per un sentiero dove  
 Non vedo chi mi precorse.

Possiamo solo commentare come Lucrezio sia mirabilmente riuscito nel suo poema a coniugare scienza e poesia dimostrando come una teoria meccanica possa essere argomento di versi sublimi<sup>3</sup>. L'intuizione del poeta riesce, sorprendentemente, ad anticipare comportamenti di fenomeni del mondo microscopico che la scienza moderna riuscirà a illuminare completamente solo dopo molti secoli<sup>4</sup>.

Lo scopo dichiarato del poema è di illustrare la filosofia di Epicuro al quale il poeta dedica tre elogi:

O tu che da tenebre fonde luce sì chiara  
 hai saputo per primo far sorgere  
 versando splendori sui beni del vivere,  
 tu gloria dei greci; seguo le tracce  
 dai tuoi passi segnate e non bramo  
 pareggiare con te, ma soltanto  
 amore mi spinge a imitarti godendo  
 A noi tu sei padre, scopritore del vero;  
 tu ci provvedi di norme paterne  
 e noi dai tuoi libri, come nei boschi

<sup>3</sup> Gli stessi concetti sulla potenza della poesia per rappresentare il 'vero' saranno espressi da Torquato Tasso nel proemio della *Gerusalemme Liberata*: Sai che là corre il mondo ove più versi/di sue dolcezze il lusinghier Parnaso,/e che 'l vero, condito in molli versi,/i più schivi allettando ha persuaso./Così a l'egro fanciul porgiamo aspersi/di soavi licor gli orli del vaso:/succhi amari ingannato intanto ei beve,/e da l'inganno suo vita riceve.

<sup>4</sup> Nei versi riportati sopra Lucrezio pone due problemi che restano ancora attuali. Il primo, che sarà posto esplicitamente da Lavoisier agli inizi della chimica moderna (Califano, Schettino 2017), è l'inscindibilità tra la scienza e la lingua che la esprime. Il secondo, particolarmente sentito nella nostra epoca di tecnologia diffusa, è la necessità di una appropriata divulgazione dei contenuti della scienza presso il pubblico degli utilizzatori e dei non addetti ai lavori.

fioriti vanno per tutto succhiando le api,  
 attingiamo parole dorate che vivono eterne.  
 Allora un'ebbrezza quasi divina e un tremore  
 mi prende al pensiero che nuda in ogni sua parte  
 si sia la natura per opera tua rivelata.

Questo, come gli altri, più che elogi di un maestro appaiono come inni a un taumaturgo, a un *soccorritore* (come dice il nome di Epicuro) che con la sua sapienza ha saputo affrancare l'uomo dall'ignoranza e dalla superstizione, raccontando la costituzione della materia e le sue trasformazioni:

[...] E se la paura stringe i mortali  
 È perché vedono in terra e nel cielo  
 Accadere fenomeni senza poterne  
 Scoprire le cause, e pensano quindi  
 Che a produrli intervenga una forza divina.  
 E come i fanciulli vedon di notte atterriti  
 Nel vuoto dell'ombra fantasmi di gelide ali  
 E ne fingono altri in cammino per l'aria,  
 Così nella luce tremano gli uomini  
 Di cose più esigue dell'ombra. Né valgono  
 I raggi del sole a sperdere le tenebre  
 E questo terrore dell'uomo, ma solo  
 Lo studio del vero, ma solo la luce della ragione.

Il problema posto dal poeta è ancora di grande attualità e importanza nel mondo moderno, pervaso dalla scienza e dalla tecnologia: la divulgazione della scienza presso il pubblico più vasto degli utilizzatori e dei non addetti ai lavori è una problematica che troviamo in modo ricorrente tutte le volte che si parla delle interazioni tra scienza e letteratura.

Nella filosofia di Lucrezio i corpi sono costituiti da atomi, primordi indistruttibili delle cose:

I corpi del mondo parte son atomi,  
 Parte aggregati di atomi;  
 Ma questi, eterni primordi dell'essere,  
 Forza non c'è che li possa distruggere:  
 Compatta materia li forma, invincibile,  
 Benché sia difficile credere  
 Che esista qualcosa duramente compatta.

Dopo avere definito gli atomi Lucrezio descrive il loro movimento incessante e la loro aggregazione dalla quale si formano tutte le cose. In una prima fase il poeta, seguendo l'ispirazione della musa, sembra descrivere il movimento in un modo che ricorda Democrito:

Nel profondo spazio quiete non c'è che tu pensi  
Meravigliosa: ma un perenne  
Disguido di atomi che sfaldano il vuoto  
E in lunghi rimbalzi si lanciano.  
Lentamente alcuni vanno in disciolte correnti  
E la sparsa distanza è causa dell'aria  
E di ogni cosa sottile; altri  
Turbati da urti più rapidi a gruppi  
Di enormi figure si attraggono e fanno  
La dura materia del ferro,  
La nuda solidità delle rocce  
E i corpi che gravi nel tempo resistono;  
Altri vagando in solitarie contese  
Tentano forme indecise.

Ma presto Lucrezio si rimette in riga descrivendo come gli atomi si muovano nel vuoto verso il basso tutti con la stessa velocità indipendente dal peso:

Se poi supponesse qualcuno che i corpi più gravi,  
giacché più veloci nel vuoto precipitano,  
cadano addosso dall'alto su quelli più lievi  
e nascano gli urti, così quei rimbalzi  
che i moti vitali del mondo producono,  
erra lontano vagando discosto dal vero,

finché impercettibili declinazioni li fanno scontrare:

A questo riguardo desidero poi che tu sappia  
che gli atomi, al basso portati dal peso  
Dritti nel vuoto, a un incerto momento e in un punto  
Incerto si flettono un poco, quel tanto  
Che un moto può dirsi oscillante: giacché  
Se non declinassero, cadrebbero tutti nel basso  
Né urto né cozzo mai ci sarebbero  
E nulla mai la natura avrebbe creato.

Non è opportuno descrivere ulteriormente in questo contesto come Lucrezio esprima i concetti della filosofia di Epicuro. Piuttosto, può essere interessante mostrare come l'ispirazione e l'immaginazione abbiano consentito al poeta di presagire frammenti e immagini del mondo microscopico che assumeranno una concreta valenza nella scienza moderna. Ad esempio, il poeta nella descrizione delle sostanze come una mistione variabile di pieni e vuoti allude a una spiegazione della densità e della comprimibilità delle sostanze che sarà chiarita sperimentalmente solo molti secoli dopo:

Infine, perché alcuni corpi ne vincono altri  
 Nel peso, sia pure d'uguale volume?  
 Se tanta materia di lana avesse un gomito  
 Quanta ce n'è in una palla di piombo  
 Della stessa grandezza,  
 Anche il lor peso dovrebbe essere uguale.  
 Il peso fa tendere i corpi nel basso,  
 Ma la natura del vuoto è senza peso:  
 E dunque tra corpi di pari volume  
 Quello che appare più lieve contiene di vuoto  
 Parte maggiore e quello più grave  
 Indica in sé di materia una parte maggiore  
 E dentro minore di vuoto. È dunque sicuro  
 Che misto alle cose si trova ciò che indaghiamo  
 Con mente sagace e che ha nome di vuoto.

Uno dei più noti passaggi del poema è quello in cui Lucrezio, parlando del movimento incessante degli atomi, fa una analogia con il movimento caotico delle particelle del pulviscolo atmosferico rivelato da un raggio di sole che, attraverso lo spiraglio di una finestra, penetra in una stanza buia, quasi un presagio del moto Browniano in un gas o in una soluzione<sup>5</sup>:

<sup>5</sup> Il moto browniano è il moto caotico di particelle microscopiche sospese in aria o in un solvente. Fu osservato per la prima volta nel 1827 da Robert Brown studiando al microscopio particelle di polline sospese in acqua. Brown stabilì anche che il moto è indipendente dalla natura delle particelle, purché microscopiche. Albert Einstein, in uno dei famosi tre articoli pubblicati nel 1905, dette una spiegazione quantitativa del fenomeno, originato dagli urti con le molecole del solvente in continuo movimento per effetto dell'agitazione termica.

Nel profondo spazio quiete non c'è che tu pensi  
Meravigliosa: ma un perenne  
Disguido di atomi che sfaldano il vuoto  
E in lunghi rimbalzi si lanciano.

[...]

Di questa vicenda è assidua l'immagine:  
Come nelle nostre case opache  
Se un raggio di sole per le chiuse finestre  
Fende l'oscurità della stanza  
Minuscoli corpi si mischiano in ridde moleste:  
Così nell'immenso una eterna inquietudine  
Tormenta i germi del mondo.

[...]

[...] E molti corpuscoli  
Dentro quel fascio di luce vedrai  
Battuti da colpi invisibili mutar direzione,  
Indietro tornare respinti, vagare  
Or di qua or di là, d'ogni parte: un vagare  
Che prende principio appunto dagli atomi.

In un passaggio in cui Lucrezio parla del sapore dolce o amaro delle sostanze liquide descrive la filtrazione dell'acqua marina con un processo che potrebbe ricordare, oltre la filtrazione, anche il processo della distillazione:

E perché ti persuada che gli atomi scabri  
sono coi lisci mischiati nell'acqua marina  
– ed è amara per questo – li puoi separare, vedere  
attraverso uno strato di terra  
denso fluire e raccogliersi in fossa la parte  
dolce dell'acqua e l'amara restare di sopra  
perché gli atomi scabri  
possono meglio imbrigliarsi e attaccarsi alla terra.

In altri mirabili versi il poeta sembra volerci dire che è vero che gli atomi non si vedono ma spesso quello che ci appare continuo (o macroscopico) può in realtà essere discontinuo:

[...] sfuggono gli atomi lungi  
nascosti al senso degli uomini;  
e se scorgerli dunque non puoi, anche i lor moti  
dovranno occultarsi alla vista: [...]  
Spesso in un colle il gregge lanuto s'inerpica

brucando pascoli lieti dovunque l'erba l'invita  
splendente di fresca rugiada,  
e corrono agnelli saziati in placidi scherzi:  
ma sembra da vista lontana un intreccio confuso,  
un candore adagiato sul verde dei colli.

Altrove Lucrezio riprende l'immagine delle lettere dell'alfabeto che si uniscono a comporre parole diverse, una immagine che molti secoli dopo Lavoisier userà come analogia della combinazione degli atomi a formare le molecole:

Così nei miei versi è pure importante  
quale ordine abbiano lettere e parole e a  
quale altra si unisca ciascuna: giacché  
sempre le stesse designano  
il cielo, il mare, le terra, i fiumi, il sole  
e ancora le stesse le biade, le piante le fiere; simili  
tutte o in massima parte,  
ma varia il lor senso col loro disporsi.  
È quello che accade degli atomi; quand'essi mutano  
incontri, ordine, moti, figura, anche i corpi  
si devon mutare.

La teoria atomistica che Lucrezio ci racconta fornisce una visione globale e unitaria dell'universo, in cui c'è una corrispondenza tra il mondo dell'uomo e quello microscopico degli atomi invisibili. Con esplicito riferimento agli antichi atomisti e a Lucrezio, questo è messo in evidenza in una poesia, *Sum*, di *Nadya Aisenberg* (1928-1999), poetessa e critica americana:

#### SOMMA

I primi atomisti come Lucrezio credevano nell'unità  
Cercando di non sezionare il mondo ma di immaginarlo.  
Per spiegare le differenze credevano nella teoria  
Che la materia era composta, a vari livelli, di  
Miscugli di elementi – polvere, pioggia, vento, fiamma –  
Che si combinano e ricombinano, ma in modo da conservarsi  
Eterni come noi non siamo.

Forse, il più semplice richiamo alla corrispondenza tra microcosmo e il macrocosmo può essere riconosciuto nella terza legge di Newton che ci dice che quando la mela cade, sotto l'attrazione della terra, anche la terra

sente una impercettibile attrazione. La storia è così raccontata nei versi del poeta inglese *Francis Thompson* (1859-1907) tratti da *Mistress of vision*:

Quando al tuo nuovo sguardo  
Tutte le cose per una potenza immortale  
Vicine o lontane,  
In modo nascosto  
L'una all'altra sono legate  
Così che non puoi cogliere un fiore  
Senza disturbare una stella.

Oltre a Lucrezio c'è stato un altro seguace di Epicuro che ha voluto lasciare una documentazione della filosofia del maestro ma in una maniera del tutto inusuale e molto più spettacolare. Diogene di Enoanda è un filosofo nel I o II secolo d.C. del quale non sappiamo praticamente nulla. Ma Diogene doveva essere un uomo facoltoso. Giunto ormai alla vecchiaia acquista un'area nella città di Enoanda, in Licia, e fa costruire una piazza quadrata circondata da un portico. Sulle pareti del portico, per una lunghezza di 80 metri, un'altezza di circa 3 metri e una superficie totale di 260 metri quadri, fece incidere un resoconto della filosofia di Epicuro. L'iscrizione era inizialmente costituita da 25000 parole e, a iniziare dalla fine del 1700, successivi scavi hanno recuperato numerosi frammenti dell'iscrizione (Figura 23) (Casanova 1984)

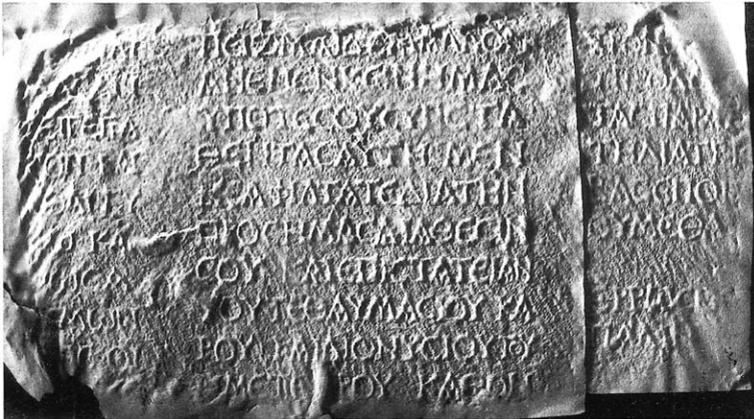


Figura 23 – Frammento della iscrizione di Diogene di Enoanda che rammenta il filosofo epicureo Caro.

La scopo di Diogene, come il poeta esplicitamente dichiara nella iscrizione, è quello di *mettere a disposizione i rimedi della salvezza* illustrando i precetti di Epicuro:

Essendo già arrivato al tramonto della mia vita ho voluto, prima di essere sopraffatto dalla morte, comporre un bel inno per celebrare la pienezza del piacere e così aiutare coloro che ora sono ben costituiti. La maggior parte delle persone soffre di una malattia comune, come in una peste, con le loro false nozioni sulle cose, e il loro numero è in aumento perché nell'emulazione reciproca prendono la malattia l'una dall'altra, come le pecore. È giusto aiutare le generazioni a venire perché anche loro ci appartengono, sebbene non siano ancora nate, e, inoltre, l'amore per l'umanità ci spinge ad aiutare anche gli stranieri che vengono qui. Ora, poiché i rimedi dell'iscrizione raggiungano un numero maggiore di persone, ho voluto usare questo portico per pubblicizzare pubblicamente le medicine che portano la salvezza. Questi farmaci li abbiamo [completamente] messi alla prova; poiché abbiamo dissipato le paure che ci afferrano senza giustificazione, e, quanto ai dolori, quelli che sono infondati li abbiamo completamente asportati, mentre quelli che sono naturali li abbiamo ridotti al minimo assoluto, rendendo minuscola la loro grandezza.

Si vede, quindi, che l'ispirazione di Diogene di Enoanda è la stessa di Lucrezio. In un frammento dell'iscrizione Diogene (Figura 23) rammenta un filosofo epicureo *Caro* che, forse, potremmo identificare con Lucrezio:

E sono persuaso che mi sono ripreso di più perché sono stato raccomandato a lei da te, carissimo Mennea, per la tua benevolenza e costanza verso di me, e dallo straordinario Caro e dal nostro Dionisio al tempo in cui facevamo a Rodi le nostre discussioni presso di lei. Addio di nuovo.



## CAPITOLO 5

### ANTIATOMISMO

Fondamento della filosofia degli atomisti è stata la geniale intuizione degli atomi come principi primi che, unendosi e separandosi, danno origine non solo alle sostanze materiali e alle loro trasformazioni ma entrano anche nella costituzione dell'anima e sono anche responsabili del processo della sensazione. La grandezza di questa intuizione può essere pienamente apprezzata considerando che ci sono voluti più di duemila anni per giungere ad una verifica sperimentale che gli atomi esistono e si possono combinare tra loro, con precise regole, a formare le infinite sostanze del mondo materiale, rendendo reale la antica analogia con le lettere dell'alfabeto che si uniscono a formare le parole più varie di significato. Naturalmente, è vero che la concezione degli atomisti aveva carattere filosofico e intuitivo mentre l'atomismo moderno non solo ha un fondamento sperimentale ma si basa anche su atomi non più indivisibili ma con una struttura interna capace di rendere pienamente conto dei meccanismi di interazione tra gli atomi a formare aggregati molecolari come strutture costitutive delle sostanze materiali. A parte questo, l'originalità del concetto atomistico consiste nell'aver ridotto la costituzione del mondo materiale ad una dimensione particellare per altro non direttamente osservabile con i nostri strumenti sensoriali. In ambito filosofico la teoria atomistica non è stata accettata fin dalla sua formulazione. In termini generali, la conseguente avversione o confutazione dell'atomismo può essere ascritta al fatto che, come in tutta la filosofia presocratica, l'attenzione era rivolta alla comprensione del mondo naturale, della sua molteplicità e delle sue trasformazioni (*divenire*), tanto che molte delle opere dei primi filosofi avevano titolo *Sulla natura* (*Perí physeos*). Nel periodo in cui sorge l'atomismo di Leucippo e Democrito, il luogo della riflessione filosofica si stabilisce in Atene, dove il centro dell'attenzione

si focalizza sull'uomo e sulla sua condizione e la scienza della natura (o *fisica*) si riduce ad un versante della filosofia (Ferraris 2019). A tal proposito può essere illuminante l'affermazione che Platone nel *Timeo* (Platone 1962) attribuisce a *Protagora*: «L'uomo è la misura di tutte le cose: di quelle che sono in quanto sono e di quelle che non sono in quanto non sono».

La condizione dell'uomo, di cui si parla, si riferisce all'individuo pensante o, in un ambito più generale, all'uomo come parte integrante e partecipe dei valori della società o della *polis* in cui vive. In questo contesto, c'erano molti aspetti dell'atomismo che risultavano inaccettabili alle grandi scuole filosofiche dei sofisti, o dell'*Accademia* (Platone) o del *Liceo* (Aristotele).

Nasce così quello che, nel titolo di questo capitolo, abbiamo sinteticamente designato *antiatomismo*, una confutazione che, grazie all'autorità di Platone e di Aristotele, durerà sotto svariate forme per molti secoli ma alla quale il messaggio dell'atomismo riuscirà a sopravvivere.

Non è scopo di questo lavoro discutere, sia pure in forma sommaria, la filosofia platonica e aristotelica e ci limiteremo solo agli aspetti che si riferiscono strettamente all'atomismo e ai motivi della sua confutazione.

### 5.1 Platone e il mondo delle idee

Il primo aspetto della filosofia di Platone che appare incompatibile con l'atomismo è la concezione che esista un mondo delle *idee* che è l'unica realtà sostanziale della quale il mondo delle sensazioni è solo una sbiadita immagine. Un'affermazione come *quest'uomo è giusto* sottintende una *idea* primigenia di giustizia alla quale l'affermazione si riferisce in maniera approssimativa nel senso che la stessa affermazione può avere una diversa connotazione da parte di un altro osservatore.

Tuttavia, la percezione o osservazione della struttura e del divenire del mondo naturale ha una grande importanza nel pensiero di Platone. Un'azione congiunta della percezione e dell'intelletto può servire a scoprire le leggi dell'universo in cui viviamo. Questo è possibile perché l'anima dell'uomo è immortale e trasmigrando da un essere all'altro trasporta un ricordo, un'immagine del mondo delle idee in cui pure ha già vissuto.

Il profilo che abbiamo sommariamente delineato pone il pensiero di Platone su un piano che non trova alcuna corrispondenza nella concezione puramente materialistica di Democrito. Una tale disparità diviene ancora più evidente se consideriamo il principio teleologico di

Platone secondo il quale la struttura del mondo naturale è opera di un *demiurgo*, (una divinità), che lo ha organizzato in modo da realizzare il mondo migliore possibile. Al contrario, gli atomi di Democrito e il loro movimento a costituire l'universo sono retti da loro proprietà intrinseche che non agiscono per una qualche finalità.

Altri aspetti ancora del pensiero platonico appaiono diametralmente opposti all'atomismo. Per Democrito l'anima, essendo costituita da atomi, sia pure particolarmente sottili, è mortale in contrasto con Platone. Analogamente, per gli atomisti il nostro universo è infinito ed esistono infiniti altri mondi in contrasto con il mondo finito di Platone.

Le considerazioni appena delineate attengono in qualche modo al mondo naturale, alla fisica, e sono appropriate come argomenti di confutazione dell'atomismo da parte di Platone. Ma considerazioni di carattere più generale, come quelle che riguardano la religione, hanno profondamente inciso sulla ricezione dell'atomismo nei secoli successivi. Gli dei degli atomisti, se esistono, sono dei *ipoumani* che vivono in un mondo perfetto e sono del tutto impassibili di fronte alle vicende umane e non possono punire, premiare o giudicare i comportamenti dell'uomo, né determinarne i destini (Piergiacomi 2013-15). È una concezione della divinità opposta all'idea tradizionale, omerica e greca, che era una acquisizione certa della *polis* in cui viveva Platone e che aveva una valenza strumentale anche politica. Abbiamo già visto, ad esempio, che per motivazioni attinenti alla religione Anassagora era stato condannato all'esilio per empietà e per lo stesso motivo Socrate, il maestro di Platone, era stato condannato più dolorosamente a morte. Per illustrare ancora il punto, possiamo ricordare che idee come: «Riguardo agli dei non ho alcuna possibilità né che sono né che non sono» erano parimenti valse a procurare una condanna all'esilio per Protagora. La concezione della religione è stata, prima nella *polis* e successivamente lungo tutto il medioevo, motivo sufficiente per una confutazione dell'atomismo in toto.

Abbiamo visto che Democrito, il prototipo dell'atomista, era dipinto come un sapiente interamente dedito allo studio della natura e che rifuggiva dalla politica, palestra di passioni. Sulla stessa lunghezza d'onda si porrà in seguito Epicuro. La partecipazione attiva alla vita della *polis* e alla politica era ritenuta un obbligo per tutti e particolarmente per il filosofo a tal punto che Platone sognava, o riteneva, il *governo dei filosofi* come il migliore possibile. Questa divergenza riguardo alla politica può bene essere stata tra i motivi del rifiuto dell'atomismo da parte di Platone.

Anche se tutti questi elementi spiegano l'avversione di Platone per l'atomismo, è stato osservato che il nome di Democrito non compare mai nelle opere di Platone, nemmeno per contestarne la filosofia. L'avversione, se non l'odio, di Platone per Democrito e per la sua filosofia trova espressione in un aneddoto riportato da Diogene Laerzio (Diogene 1987):

Aristosseno nelle sue Memorie sparse afferma che Platone ebbe l'intenzione di bruciare tutte le opere di Democrito che poté raccogliere, ma che i pitagorici Amicla e Clinia lo distolsero dal suo proposito, in quanto non ne avrebbe tratto utilità alcuna, perché ormai i libri erano ampiamente diffusi nel pubblico. Infatti, Platone, che pure menziona quasi tutti i filosofi arcaici, non accenna mai a Democrito neppure là dove avrebbe dovuto contraddirlo, evidentemente perché era consapevole che avrebbe dovuto gareggiare col migliore dei filosofi.

Un riferimento esplicito di Platone alla filosofia di Democrito si trova forse solo in questo passaggio delle *Leggi*:

Dicono alcuni che tutto ciò che è, che è stato e che sarà dipende in parte dalla natura, in parte dall'arte, in parte dal caso. [...] Le cose più grandi e importanti, dicono, fra quelle sopra elencate e le più belle, sembra le facciano la natura e il caso, [...] Essi dicono che ciascuno di questi [gli elementi 'primi'] essendo mosso e spostato a caso dalla forza propria a ciascuno di loro, [...] si fusero insieme, ivi, proprio per questa stessa causa, in tal modo essi hanno dato origine all'intero cielo e a tutto ciò che è nel cielo e a tutti gli animali e a tutte le piante, una volta che tutte le stagioni per la causa di cui si è detto vennero ad esserci, e tutto ciò, non per l'azione, dicono, di una mente, né di un dio o di un'arte, ma, come stiamo riferendo noi, si fonda sulla natura e sul caso.

Gli aspetti più attinenti alla nostra trattazione dell'atomismo li troviamo nella cosmogonia di Platone. Per configurare il nostro mondo il demiurgo opera su una materia preesistente che si trova in uno stato indistinto e caotico al quale cerca di dare un ordine per ottenere l'universo più funzionale e, soprattutto, esteticamente più bello. Per questo la materia viene separata in quattro elementi primordiali, in ordine *fuoco, aria, acqua e terra*. Platone, quindi, riprende la pluralità di elementi primordiali già di Empedocle. Nell'universo gli elementi sono ordinati dall'alto verso il basso secondo il loro peso crescente, dal

fuoco alla terra. Dalla mescolanza dei quattro elementi primordiali si origina la molteplicità e il divenire del mondo naturale.

Rispetto ad Empedocle la teoria dei quattro elementi è considerevolmente rielaborata da Platone in termini geometrici, una rielaborazione che trova ispirazione nella conoscenza della filosofia pitagorica. La predilezione di Platone per la geometria era chiaramente sancita dall'avvertimento che aveva fatto porre all'ingresso dell'Accademia: «Non entri nessuno che non conosca la geometria».

Questo concetto platonico sarà poi rielaborato da Plutarco nella massima: «ἀεί ὁ θεός μέγας γεωμετρῆϊ τὸ σύμπαν» (Il grande Dio geometrizza sempre tutto), che quasi magicamente, per la successione della lunghezza delle parole, si associa al numero  $\pi = 3.1415926$ , come si vede nella Figura 24:

ἀεί	ὁ	θεός	ὁ	μέγας	γεωμετρῆϊ	τὸ	σύμπαν
3	1	4	1	5	9	2	6

Figura 24 – La geometrizzazione del mondo materiale secondo Plutarco.

Platone associa o identifica ciascuno degli elementi con uno dei solidi geometrici perfetti o più belli, costituiti da facce tutte uguali, secondo lo schema mostrato in Figura 25.

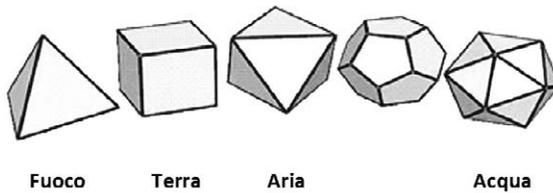


Figura 25 – Associazione di elementi con solidi platonici.

Il significato della associazione degli elementi con solidi platonici può essere esplorato in vari modi e ponendo alcune domande. Da un lato questa associazione è logica conseguenza del fine del demiurgo di organizzare l'universo nel modo esteticamente migliore e quindi attraverso solidi perfetti:

Ciò che io intendo per bellezza delle forme non è come intenderebbe il volgo, ad esempio, la bellezza dei corpi viventi, o la loro riproduzione a mezzo del disegno. Io intendo le linee rette e curve, le superfici e i solidi, che derivano dalla retta e dal cerchio, con l'ausilio del compasso, della riga e della squadra. Poiché queste forme non sono belle come altre, a certe condizioni, ma sempre belle in sé, per natura e sono fonte di particolarissimi piaceri. (Filebo)

Naturalmente, i solidi hanno una dimensione, un volume, e pur rimanendo perfetti possono essere sempre più microscopici. Se accettiamo la possibilità di una dimensione corpuscolare minima, sarà la aggregazione dei corpuscoli a dare origine alla varietà delle sostanze materiali. Avventurandoci in questa dimensione potremmo riconoscere nel pensiero di Platone una inclinazione di tipo «atomistico» ma non certo nel senso democriteo. Tuttavia, Bernard Pullman (Pullman 1998) è arrivato a definire Platone *A very particular atomist* (Un atomista molto particolare).

Procedendo nella geometrizzazione dei quattro elementi, Platone immagina una struttura interna degli elementi basata su due triangoli fondamentali mostrati in Figura 26: un triangolo rettangolo isoscele (a) e un triangolo (b) con l'ipotenusa di lunghezza doppia di un cateto.

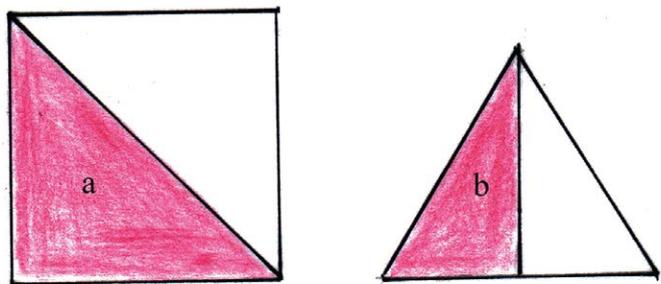


Figura 26 – Triangoli primordiali nella cosmogonia di Platone.

Raddoppiando il triangolo (a) si genera un quadrato che andrà a costituire le facce del cubo. Raddoppiando il triangolo (b) in un triangolo isoscele si definiscono le facce del tetraedro, dell'ottaedro e dell'icosaedro. Nella Tabella 4 viene riportato per i solidi platonici che abbiamo considerato il numero di facce e il numero di triangoli primordiali costitutivi.

Tabella 4 – Il numero di facce e il numero di triangoli primordiali costitutivi dei solidi platonici.

ELEMENTO	SOLIDO	FACCE	TRIANGOLI(a)(b)
Fuoco	Tetraedro	4	8
Aria	Ottaedro	8	16
Acqua	Icosaedro	20	40
Terra	Cubo	6	12

Scomponendo le facce di tetraedro, ottaedro e dodecaedro nei triangoli primordiali (b) e ricomponendoli è possibile trasformare tra loro questi tre solidi e i corrispondenti elementi secondo lo schema:

$$2 \text{ Aria}[16] + 1 \text{ Fuoco}[8] = 1 \text{ Acqua}[40]$$

dove in parentesi quadra è riportato il numero di triangoli primordiali che definiscono le superfici dei solidi elementari. La formula riportata (una fantasiosa anticipazione di una reazione chimica?) stabilisce una sorta di trasmutazione degli elementi che sarà il sogno degli alchimisti. Siamo, in tale interpretazione, lontanissimi dalla immutabilità degli atomi di Democrito. Questo tipo di trasmutazione non potrà coinvolgere il cubo e quindi la terra.

Il quinto solido platonico, il dodecaedro costituito da dodici facce pentagonali regolari (Figura 25), è il più vicino alla forma sferica ed è considerato da Platone come immagine della perfezione dell'Universo: «La vera terra a chi la guardi dall'alto presenta la figura di quelle palle di cuoio da dodici spicchi, variegata, distinta a colori».

Assunti i solidi platonici come immagini degli elementi, ci si potrebbe chiedere quale sia la composizione materiale delle facce delimitanti e se ci sia una sostanza materiale nel volume racchiuso. Forse si tratta di una domanda impropria se il proposito platonico è di attribuire a questi solidi un puro valore simbolico come espressione della bellezza estetica verso la quale la natura tende per opera del demiurgo. I solidi platonici, quindi, sono concepiti come pura matematizzazione della idea del mondo materiale, matematizzazione e simbologia che hanno affascinato gli artisti nel corso dei secoli. Queste stesse caratteristiche hanno affascinato *Werner Heisenberg* mentre rifletteva sulle particelle elementari (Heisenberg 1984). Leggendo il *Timeo*, per rinfrescare un po' il suo greco, Heisenberg trova che: «In quest'opera si affronta il problema filosofico delle particelle elementari [...] Mi affascinava

l'idea che le particelle elementari si dovessero ricondurre a una forma geometrica, cioè matematica».

Partendo dalla considerazione che la conoscenza degli atomi, o delle particelle elementari, può essere solo indiretta come se non fossero oggetti materiali, Heisenberg ritorna sul *Timeo* di Platone:

Questo era, probabilmente, quanto Platone voleva dire nel *Timeo* e [...] le sue speculazioni sui solidi regolari cominciavano ad apparirmi più ragionevoli. Allo stesso modo, quando gli scienziati contemporanei parlano della 'forma' degli atomi, indubbiamente impiegavano il termine nella sua accezione più ampia per indicare la struttura, nel tempo e nello spazio, degli atomi, o le proprietà simmetriche delle forze che li reggono, o la propensione a unirsi con atomi di altri elementi.

per concludere: «non facciamo che ritornare a Platone: le nostre particelle elementari sono analoghe ai corpi regolari di cui si parla nel *Timeo*. Sono i modelli originali, le idee della materia».

## 5.2 Aristotele

L'influenza di Aristotele, che Dante definisce *il maestro di color che sanno*, sul pensiero filosofico e scientifico successivo è stata enorme. Nel caso dell'atomismo la sua influenza si è esplicitata in due sensi quasi opposti. Da un lato, Aristotele è stato il filosofo temporalmente più vicino a Democrito che abbia parlato nelle sue opere dell'atomismo sia pure in maniera critica. È verosimile che Aristotele abbia avuto modo di leggere gli scritti di Leucippo e di Democrito prima che scomparissero dalla circolazione e che, quindi, sia stato il testimone più diretto delle loro teorie contribuendo a trasmetterne la conoscenza. Su un opposto versante, per i motivi che vedremo, Aristotele è stato assai critico riguardo all'atomismo e ha tramandato ai posteri un completo rifiuto delle teorie di Leucippo e Democrito.

Con Aristotele la riflessione filosofica si differenzia in vari aspetti o sottoinsiemi e lo studio della natura (la *fisica*) diviene solo una delle discipline nella articolazione del suo pensiero e della filosofia anche se rimane sempre strettamente collegata al contesto generale. Schematizzando al massimo le cose, possiamo considerare che i seguenti aspetti del pensiero aristotelico siano alla base della sua esplicita confutazione dell'atomismo:

- cosmogonia e struttura dell'universo;
- distinzione tra forma e materia,
- divisibilità della materia;
- il movimento e il vuoto;
- il principio di causalità.

Aristotele suddivide l'universo in due sfere, i corpi celesti e il mondo sublunare. Questo secondo è costituito da una materia primordiale (*πρώτη ὕλη*) che una intelligenza cosmogonica ha realizzato nei quattro elementi di Empedocle: fuoco, aria, acqua e terra. I quattro elementi si stratificano ognuno in un suo luogo naturale secondo il peso e, pertanto, dall'alto verso il basso in ordine: fuoco, aria, acqua e terra. La formazione e la trasformazione degli oggetti del mondo naturale si originano dalla mescolanza degli elementi, una mescolanza che non è una semplice giustapposizione. Infatti, i quattro elementi sono caratterizzati ognuno da due qualità secondo lo schema seguente:

Tabella 5 – La mescolanza degli elementi.

ELEMENTO	QUALITA'
Fuoco	caldo secco
Aria	caldo umido
Acqua	freddo umido
Terra	freddo secco

Questa associazione tra elementi e qualità è stata rappresentata graficamente in molti modi come, ad esempio, è mostrato in Figura 27:



Figura 27 – I quattro elementi e le qualità associate.

La formazione e la trasformazione degli oggetti del mondo naturale avviene attraverso una mescolanza degli elementi e delle qualità loro associate con un appropriato dosaggio capace di produrre qualcosa che è qualitativamente caratteristico dell'oggetto con peculiarità in cui, a prima vista, gli elementi primigeni non sono riconoscibili. Nondimeno, gli elementi sono indistruttibili e nel continuo divenire, quando la sostanza si corrompe, gli elementi con le loro qualità riemergono e nuovamente tendono verso il loro luogo naturale.

Il tipo di aggregazione degli elementi descritto da Aristotele differisce sostanzialmente dalla aggregazione degli atomi di Democrito e, volendo cercare una tenue analogia nella chimica di oggi, potremmo riconoscervi una reazione chimica nella quale gli atomi permangono nel composto che si forma ma quest'ultimo ha qualità nettamente distinte e individuali rispetto agli atomi costituenti. Ma questi ultimi si riottengono dalla decomposizione del composto. Tuttavia, c'è una differenza più profonda tra gli elementi di Aristotele e gli elementi degli atomisti. Gli elementi di Aristotele possono trasformarsi l'uno nell'altro scambiando le qualità loro associate. Riferendosi allo schema della Figura 27, se l'aria, che è associata con l'umido e il caldo, scambia il caldo con il freddo si trasforma in acqua. È una trasmutazione di elemento che può sembrare naturale se la pensiamo come la condensazione del vapor acqueo (e viceversa per la trasformazione opposta di acqua in vapore). La trasmutazione può avvenire anche tra elementi opposti nello schema della Figura 27 anche se con maggiore difficoltà, con lo scambio di due qualità.

A parte il numero degli elementi nelle due filosofie, la visione di Aristotele si differenzia profondamente da quella degli atomisti, caratterizzata dalla materialità degli elementi: in Aristotele il carattere più precipuo degli elementi viene associato piuttosto alle loro qualità. Inoltre, in Aristotele gli elementi non sono più immutabili ma soggetti alla possibile trasmutazione degli uni negli altri.

Nella cosmologia di Aristotele esiste un quinto elemento, l'*etere*, elemento perfetto e incorruttibile, privo di pesantezza e leggerezza. L'*etere* è l'elemento costitutivo della sfera celeste. I sette pianeti, Mercurio, Venere, Marte, Giove, Saturno, includendo la Luna e il Sole, sono sfere perfette costituite di *etere*. Essendo elemento perfetto, l'*etere* non può avere un luogo di tendenza e, quindi, il suo movimento non può che avere una direzione circolare che si ripete con inizio e fine coincidenti. Nella cosmologia di Aristotele la successione delle sfere successive termina con la sfera delle stelle fisse.

A parte la differenziazione tra sfera celeste e mondo sublunare, il cosmo di Aristotele è unico e finito e, quindi, chiuso con la terra immobile al centro. Anche in questo caso siamo in una concezione opposta a quella di Democrito di un mondo infinito e della esistenza di infiniti altri mondi.

La motivazione fondamentale in Aristotele per la confutazione dell'atomismo deriva dalla concezione del movimento e dalla questione dell'esistenza del vuoto. Secondo Aristotele esistono due tipi di movimento, un movimento *naturale* e un movimento per *costrizione*. Limitandoci al mondo sublunare, gli elementi hanno un movimento naturale rettilineo, verso l'alto o verso il basso, secondo il quale ogni elemento si dirige verso il suo luogo naturale di origine o di riferimento. Aristotele trova irragionevole che gli atomi di Democrito, se sono costituiti dalla stessa materia, non abbiano un identico movimento di tipo naturale e che quindi non sappiano in realtà dove andare:

Se, d'altra parte, l'universo non è continuo, bensì composto di parti separate dal vuoto, come sostengono Democrito e Leucippo, il movimento di tutte le sue parti deve essere unico. (De Caelo)

Non solo. Aristotele nota anche che il fatto che non sia specificato quale sia il movimento naturale degli atomi implica che non viene definita la natura vera degli atomi. Inoltre, se il movimento non è quello naturale, non viene nemmeno specificato quale sia la causa motrice del movimento per costrizione. Infine, gli atomisti riducono tutto il problema del divenire a un puro aspetto quantitativo:

Per tale motivo, Leucippo e Democrito, i quali affermano che i corpi primi si muovono perennemente nel vuoto e nell'infinito, dovrebbero precisare di quale movimento si tratti, e quale sia il movimento secondo natura di questi corpi. (De Caelo)

Ma neppure la teoria sostenuta da alcuni altri, quali Leucippo e Democrito di Abdera, conduce a conseguenze ragionevoli. Costoro affermano che le grandezze prime sono infinite di numero e indivisibili in estensione, e negano che i molti nascano dall'uno o l'uno dai molti; invece, tutte le cose sono generate dalla connessione e dalla collisione di quelle grandezze. (De Caelo)

A parte l'origine e la natura del movimento, per Aristotele il moto di un corpo dipende dal mezzo in cui avviene, che in qualche modo

sostiene movimento e velocità. Nel vuoto, un corpo messo in moto per qualsiasi causa non avrebbe alcuna direzione prestabilita di riferimento e, in assenza di qualsiasi resistenza, acquisterebbe una velocità infinita, cosa palesemente assurda. Il vuoto, quindi, non poteva esistere per Aristotele che concepiva un universo pieno. Se il vuoto non esiste non possono esistere nemmeno gli atomi.

Riguardo alla casualità, o necessità intrinseca, del movimento degli atomi, Aristotele trova la tesi di Democrito contraddittoria perché da un lato ipotizza che ci sia una causalità nella nascita degli organismi viventi e dall'altro nega una qualsiasi causalità nel resto del mondo naturale:

Vi sono poi di quelli che attribuiscono al caso la causa dell'esistenza di questo nostro cielo e di tutti i mondi: dal caso deriva il vortice e il movimento che separò gli elementi e ordinò nella sua forma presente l'universo [...]. E quel che fa veramente meraviglia è che, mentre dicono che gli animali e le piante né esistono né nascono fortuitamente, sibbene hanno una causa, sia poi questa la materia o la mente o qualcosa di simile (giacché da ogni singolo seme non viene fuori ciò che capita, ma da questo qui viene l'olivo, da quell'altro l'uomo. ecc.), affermano per contro che il cielo e tutto quanto vi è di più divino tra i fenomeni derivano dal caso e che non vi è punto per essi una causa analoga a quella che c'è per gli animali e per le piante. (Fisica)

Un'altra rilevante differenza tra il pensiero di Aristotele e quello degli atomisti riguarda la divisibilità della materia che per Leucippo e Democrito può proseguire fino al livello degli atomi indivisibili. Secondo Aristotele la materia è continuamente divisibile fino a un certo punto senza che le proprietà del materiale cambino. Oltre questo limite le parti minime ottenute sono ulteriormente divisibili ma con la perdita delle proprietà originarie e la formazione di un'altra natura sostanziale.

Questa breve descrizione ha evidenziato una serie di argomenti filosofico-scientifici che portano Aristotele a un totale rifiuto della teoria di Leucippo e Democrito. Inoltre, come abbiamo già visto nel caso di Platone, ci sono altri elementi che parimenti peseranno sulla fortuna successiva dell'atomismo. Un punto importante riguarda l'esistenza di una divinità che per Aristotele gioca un ruolo chiave come motore primo e causa finale di un mondo che tende verso uno stato di perfezione dell'universo, concezione che è ancora in netta contrapposizione con il puro meccanicismo dell'atomismo.

## CAPITOLO 6

### SOPRAVVIVENZA SOTTOTRACCIA DELL'ATOMISMO

L'autorità di Platone e di Aristotele è stata tale che le loro critiche e il loro rifiuto dell'atomismo sono stati condivisi per molti secoli dagli ambienti culturali fino all'inizio della scienza moderna. Dopo che la filosofia di Democrito era stata rivisitata da Epicuro, l'ostilità all'atomismo diventa un tratto importante nella cultura romana della repubblica e dell'impero. Abbiamo già riportato della posizione negativa di Cicerone nei riguardi dell'epicureismo, una opposizione che trova motivazione in elementi che si ripeteranno quasi sistematicamente nei secoli successivi. C'era in Roma una sotterranea, e anche esplicita, avversione per la filosofia greca, alla quale l'ambiente romano era impreparato anche per una inadeguatezza di linguaggio<sup>1</sup>. A proposito così si esprime Cicerone (Tusc. IV 3, 6-7):

Mentre quelli tacevano, prese la parola Amafinio, e la gente sotto l'influsso dei libri da lui pubblicati si rivolse soprattutto a quella dottrina, sia perché era molto facile da capire, sia perché le dolci attrattive del piacere erano invitanti, sia anche perché, non essendosi prodotto nulla di meglio, si attenevano a quel che c'era. Dopo Amafinio molti seguaci della medesima dottrina lo imitarono scrivendo molte opere, e invasero tutta l'Italia. E mentre la miglior prova della grossolanità di quelle idee sta nel fatto che sono così facilmente apprese e approvate dagli ignoranti, essi credono che questo confermi la verità della loro dottrina.

In questo passaggio Cicerone si riferisce all'epicureismo che era stato divulgato a Roma dal filosofo Amafinio, vissuto tra la fine del secondo

<sup>1</sup> Abbiamo già visto come questa inadeguatezza della lingua latina fosse stata messa in evidenza da Lucrezio.

e l'inizio del primo secolo, ma la sua diffidenza può essere estesa alla filosofia in generale. Una testimonianza di questa generale diffidenza romana verso la filosofia può essere trovata nelle varie espulsioni di filosofi da Roma, la più famosa delle quali è quella di Carneade, di Diogene di Babilonia e di Crisippo che erano stati inviati nel 155 a.C. in delegazione a Roma per perorare una causa ateniese. I discorsi di Carneade avevano vivamente impressionato Catone per un loro possibile effetto negativo sui giovani e lo avevano spinto a convincere il Senato ad espellere i tre filosofi da Roma.

Ma prima ancora, nel 173 a.C., due epicurei, Alceo e Filisco, erano stati espulsi da Roma con un decreto per aver indotto i giovani a piaceri innaturali. Similmente, nel 161 a.C. il console Gaio Fannio Strabone aveva fatto emettere un decreto di espulsione di tutti i retori e filosofi greci nel timore che il loro insegnamento potesse minare le fondamenta della *res pubblica*.

Questo clima ostile che si manifesta verso l'epicureismo, e per converso verso l'atomismo in generale, ha varie motivazioni che, sommariamente, possono essere così riassunte:

- la capacità della filosofia di distogliere i giovani dall'impegno politico;
- la negazione sostanziale della religione e del connesso ruolo degli dei che i romani consideravano un importante strumento della politica;
- l'inclinazione della filosofia a indurre i giovani alla ricerca del piacere per sé o di piaceri innaturali;
- la mancanza di un demiurgo o di un'intelligenza ordinatrice a cui ascrivere la bellezza dell'universo;
- la questione della mortalità dell'anima.

Si tratta di motivazioni che si riferiscono alla sfera della politica, della religione e dell'etica piuttosto che discendere da argomenti scientifici sulla struttura particellare della materia (Partington 1939; Robertson 2010; Pyle 1997; Grellard, Robert 2009). Un segno della generale attitudine culturale romana può essere trovato in quella che è stata chiamata la *congiura del silenzio* nei riguardi di Lucrezio e del suo poema. A parte i riferimenti diretti o indiretti a Lucrezio e all'epicureismo che abbiamo già visto in Cicerone e in Orazio, nella letteratura romana si trovano solo altri rari richiami come in *Ovidio* (43 a.C.-18 d.C.) che in *Tristia* e in *Amores* esalta la grandezza del poeta: «La poesia del sublime Lucrezio cesserà solo quando in un solo giorno il mondo sarà finito»

o in Cornelio Nepote (100 a.C.-27 a.C.) che accomuna Catullo e Lucrezio come grandi poeti. Oltre questo, Lucrezio e la filosofia che espone nel suo grande poema sembrano dimenticati.

Per quanto riguarda la nostra trattazione, risulta più significativo che una traccia del dimenticato atomismo si trovi piuttosto, anche se sporadicamente, in ambito della medicina, dell'architettura, dell'idraulica e dello studio del movimento, ambiti in cui l'aggancio con considerazioni di tipo scientifico è più diretto. Così Vitruvio (80 a.C.-15 a.C.) nel *De Architectura* aderisce all'atomismo partendo dalla analogia tra la composizione degli atomi per costituire la struttura delle sostanze materiali e la composizione dei materiali nella costruzione architettonica. Notevole, nel contesto della medicina, è la vicenda di Asclepiade di Bitinia (129-40 a.C.) (Vallance 1995). Nato a Frusa, nella moderna Turchia, Asclepiade aveva studiato retorica in Atene e in altre città prima di trasferirsi a Roma durante il consolato di Pompeo Magno. A causa degli scarsi guadagni come retore, secondo la testimonianza di Plinio, si era convertito come autodidatta alla medicina acquistando una fama notevole come risulta dal racconto di un episodio nell'*Asino d'oro* di Apuleio (Apuleio 1955):

Un giorno, passeggiando per la Via Sacra, s'imbatté in un corteo funebre. I portatori, stanchi, avevano deposto il feretro sul ciglio della strada, proprio nel momento in cui passava Asclepiade. Questi, fermatosi incuriosito, guardò il cadavere, interrogò i parenti e poco soddisfatto delle risposte, cominciò tra sé a dubitare della morte del soggetto. Persuasi i parenti e gli amici a sospendere le cerimonie funebri, Asclepiade fece portare il supposto cadavere in una casa vicina dove, accertatosi dello stato di morte apparente, poté in breve richiamare segni evidenti di vita in colui che tutti avevano pianto per morto.

Asclepiade importa a Roma la medicina ellenistica discostandosi dalla teoria degli umori di Ippocrate e aderendo all'atomismo. Come tutti gli oggetti del mondo naturale, anche il corpo umano è costituito da atomi in movimento e da pori attraverso i quali possono circolare altri atomi di dimensioni opportune. Lo stato di salute si ha in corrispondenza della giusta proporzione tra atomi e pori. La alterazione di questa giusta proporzione è la causa della malattia. In questa visione materialistica, la cura delle malattie va ricercata anch'essa in mezzi meccanici che ristabiliscano la corretta proporzione di atomi e pori. La cura, secondo Asclepiade, va quindi ricercata nell'esercizio fisico in generale (passeggiate, massaggi, idroterapia) oltre che in una vita sana e morigerata. Sulla base di questi

principi Asclepiade aveva fondato una scuola medica che il suo allievo Temisone poi trasformò nella scuola di medicina *metodica*, razionalizzando gli interventi curativi proposti dal maestro. Un motto attribuito ad Asclepiade diceva che la cura della malattia doveva avvenire: *cito, tuto, iucunde* (rapidamente, sicuramente, serenamente).

Uno dei principali argomenti aristotelici contro l'atomismo di Democrito riguardava il vuoto che secondo Aristotele non poteva esistere, smontando in questo modo uno dei capisaldi della filosofia democritea. Il rifiuto del vuoto da parte della natura, *horror vacui*, sarà argomento base della filosofia della natura per lungo tempo ma già nel mondo ellenistico, dove era in sviluppo una lunga tradizione tecnica e meccanica, erano sorti in proposito dei distinguo. I personaggi importanti in questo contesto sono stati Ctesibio (285-222 a.C.), Filone di Bisanzio, contemporaneo e forse allievo di Ctesibio, e Erone di Alessandria (I sec d.C.). Possiamo considerarli tutti ingegneri *ante litteram* che hanno inventato varie macchine e dispositivi per applicazioni pratiche o per scopi ludici. Per la nostra discussione sono di interesse le invenzioni nel campo della pneumatica che si basano sulla comprimibilità dell'aria e dell'acqua. La leggenda racconta che Ctesibio, da bambino, avrebbe fatto cadere una palla di metallo in un tubo provocando un suono acuto. Da questo Ctesibio avrebbe compreso che l'aria è un mezzo materiale e che è comprimibile. Questi ingegneri-filosofi spiegano la comprimibilità dell'aria e dell'acqua, e più in generale la densità dei materiali, ammettendo che gli atomi che costituiscono i materiali siano separati da spazi vuoti che possono essere ridotti applicando una forza o una pressione. Per questi filosofi, quindi, il vuoto esiste però non è il vuoto assoluto ed esteso degli atomisti ma un vuoto a separare le particelle elementari che sarà chiamato *vacuum intermixtum*. L'idea di un vuoto così concepito risale più indietro nel tempo a Stritone di Lampsaco (335-274 a.C.), discepolo di Teofrasto e direttore della scuola aristotelica.

La rinascita dell'atomismo, che considereremo nei prossimi capitoli, sarà invariabilmente associata a una critica o a una revisione di aspetti della filosofia aristotelica dominante. È ancora molto lontano il tempo in cui un ignoto poeta del 1600 potrà polemicamente scagliarsi contro lo Stagirita e i suoi seguaci:

Taccia e s'acqueti il Barbon di Stagira  
 Quando questo volume si dispiega,  
 E taccia il gregge che dietro ei si tira,

ma questi primi esempi considerati sono una anticipazione che indica un precoce inizio di critiche che possiamo considerare favorevoli all'atomismo, anche se non strettamente a questo correlate.

Ai fini della nostra trattazione sono di interesse particolare le critiche alla concezione aristotelica del movimento e della dinamica dei corpi in quanto queste coinvolgono l'accettazione del vuoto come mezzo in cui il movimento può avvenire. Queste critiche si possono far risalire a Giovanni Filopono (490-570), filosofo bizantino della scuola neoplatonica convertito al cristianesimo e capo della Biblioteca di Alessandria (Sorabji 1987). Filopono è stato un importante commentatore di Aristotele. Platone e Aristotele pensavano che solo alcuni corpi, che poi sarebbero stati chiamati *gravi*, fossero soggetti alla gravità. Aristotele era inoltre convinto che oggetti di peso diverso cadessero con velocità diverse. In contrasto con le idee di Aristotele, Filopono sostenne che corpi di massa differente cadendo insieme arrivavano al suolo insieme. La verifica sperimentale di questo fatto è attribuita a Galileo Galilei e al suo precursore, il fiammingo Simon Stevin (Stevino) nel suo trattato *Oeuvres mathematiques* del 1634.

Secondo la concezione di Aristotele il mezzo svolge un ruolo attivo nel movimento dei corpi tanto che il moto nel vuoto avverrebbe con velocità infinita, cosa palesemente assurda. Filopono si pose il problema del perché una freccia continua nel suo moto dopo essere stata scoccata dall'arco con l'applicazione di una forza e spiegò il fenomeno (vedi Figura 28) individuando la causa del movimento in una *vis cinetica* acquistata dalla freccia al momento del lancio. Possiamo oggi interpretare la *vis cinetica* come quantità di moto, grandezza che si conserva in assenza di altre forze. L'idea di Filopono sarà all'origine della teoria medievale dell'*impetus*.

Filopono era un geometra classico che seguiva le regole della geometria di Euclide (poi sviluppate da Galileo e Newton) utilizzando la definizione concettuale di uno spazio vuoto nel quale inserire gli oggetti geometrici. Questo spazio è un continuo a tre dimensioni, cioè l'insieme di tutti i possibili punti dello spazio euclideo. Questo insieme di punti può essere diviso *ad infinitum* perché tra due punti di un continuo esistono sempre infiniti altri punti. Tutti gli oggetti rappresentabili in termini di geometria euclidea, linee, poligoni e poliedri, sono quindi divisibili all'infinito.



Figura 28 – Il movimento e la *vis cinetica* secondo Filopono.

### 6.1 *La rivelazione cristiana e l'atomismo*

Alcuni capisaldi della cristianità o, se vogliamo, della filosofia cristiana sono i seguenti:

- la fede in un Dio creatore dell'universo materiale e degli esseri viventi, fede che esclude l'idea di una eternità dell'universo e di una infinità di mondi come il nostro;
- la partecipazione attiva del Dio creatore al destino dell'uomo;
- l'immortalità dell'anima e l'esistenza di un aldilà nel quale l'uomo potrà essere premiato o punito in base al suo comportamento sulla terra nel rispettare o agire contro le regole dettate dalla divinità;
- il miracolo dell'eucarestia e la transustanziazione.

Fermandoci a queste enunciazioni, è evidente che la filosofia cristiana è assolutamente incompatibile con i principi dell'atomismo. Tanto più quando l'atomismo, secondo i cristiani, viene identificato con l'epicureismo interpretato in maniera riduttiva come portatore di un'etica che ispira semplicemente la ricerca del piacere.

In effetti, fin dai primi secoli dopo Cristo e per tutto il medioevo, si sono susseguiti da parte di esegeti e apologisti cristiani, di padri della chiesa e di scolastici, prese di posizione contro l'atomismo nei suoi vari aspetti ed esplicite condanne, anche con una certa violenza polemica (Partington 1939; Robertson 2010; Pyle 1997; Grellard, Robert 2009). Già Lattanzio (250-317), apologeta cristiano, si scaglia contro l'epicureismo per propugnare il ruolo della divina provvidenza e della giustizia divina contro i nemici della religione cristiana, definendo Epicuro *capo pirata e capitano di banditi* e attribuendogli un famoso paradosso<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Dio, dice Epicuro, o vuole togliere i mali, ma non può; oppure può, ma non vuole; oppure non vuole e non può; oppure vuole e può. Se vuole, ma non può, è impotente; il che è inammissibile in Dio. Se può, ma non vuole, è invidioso; il che pure

In sostanza, la critica cristiana all'atomismo si basa sulla opposizione tra la verità rivelata dalle sacre scritture e ogni filosofia materialistica. Sant'Agostino (354-430), fondatore indiscusso di una filosofia cristiana, così si esprime nella *Città di Dio*:

Scompaiano i filosofi che attribuiscono origine naturale corporea all'intelligenza che caratterizza la materia (Talete, Anassimandro, gli Stoici), Epicuro agli atomi, oggetti infinitamente piccoli che non possono essere divisi o osservati. E lo stesso destino tocchi agli altri filosofi che sostengono di aver identificato in sostanze semplici o composte, materiali, la causa e il principio delle cose

accusando in particolare gli epicurei di non essere capaci di andare oltre i loro sensi. Un'argomentazione generale contro i filosofi viene trovata nel fatto che ognuno di essi ha una sua teoria in contrasto con quelle degli altri, contrasto che deriva dalla loro incapacità di esplorare la verità, cioè il contenuto della rivelazione divina. Un simile argomento si trova già in Sant'Agostino anche in riferimento a Democrito ed Epicuro:

Come possiamo giudicare il disaccordo tra Democrito e gli antichi fisici riguardo all'esistenza di un unico o di una molteplicità di mondi quando troviamo una mancanza di armonia tra Democrito e il suo allievo Epicuro?

Sant'Agostino critica poi esplicitamente Epicuro, filosofo del piacere, che permette agli atomi di muoversi disordinatamente e sperpera tutto il suo patrimonio in litigi.

Anche se, da quanto abbiamo appena visto, sembra esserci nella cristianità una opposizione verso tutta la filosofia, in realtà c'è una ricerca di riferimenti filosofici come possibili supporti per la teologia e i dogmi della fede e l'avversione viene confinata all'atomismo epicureo. Possiamo vedere questo analizzando il caso dell'eucarestia e la sua interpretazione in termini di consustanziazione. Questa può trovare una spiegazione con riferimento alla distinzione aristotelica tra sostanza e forma, in base alla quale si può pensare che per effetto della

è alieno da Dio. Se non vuole e non può, allora è invidioso e impotente; e anche questo non può attribuirsi a Dio. Se vuole e può, il che soltanto conviene a Dio, allora da dove vengono i mali? o perché non li toglie? (Lattanzio, *De Ira Dei*)

benedizione sacerdotale la sostanza, l'essere, del pane e del vino si trasformi in quella del corpo e del sangue di Cristo mentre l'apparenza esteriore, gli accidenti (come aspetto, colore e sapore) restano quelli originari. Una interpretazione di questo genere è impossibile in termini dell'atomismo secondo il quale l'unica sostanza, o essere, è quella degli atomi indivisibili che non possono trasformarsi gli uni negli altri.

Per i fini della nostra trattazione l'avversione cristiana nei riguardi dell'atomismo deve essere vista sotto un'altra luce che collima con l'aforisma che *Oscar Wilde* mette in bocca a Dorian Gray: «C'è una sola cosa al mondo peggiore del far parlare di sé, ed è il non farne parlare».

Le aspre critiche all'atomismo da parte dei cristiani hanno involontariamente avuto l'effetto di tenerne viva la memoria nel corso dei primi secoli della cristianità.

Ma c'è un altro importante canale attraverso il quale la cristianità ha conservato la conoscenza dell'atomismo come strumento culturale, indipendentemente da critiche filosofiche. Questo è avvenuto attraverso l'opera di vari dottori della chiesa che nelle loro opere enciclopediche hanno parlato anche di scienza e di atomismo. In particolare, ciò è stato facilitato da menzioni di Lucrezio in quanto l'espressione della filosofia in termini poetici ha reso la presentazione delle teorie degli atomisti più indolore.

A tale proposito, e andando in ordine temporale, possiamo menzionare per primo Dionisio di Alessandria (190-265) che parlò dell'atomismo per criticarlo per la sua mancanza di un principio di ordine e, successivamente, Isidoro di Siviglia (560-636), scienziato spagnolo e padre della chiesa. Secondo una leggenda, quando Isidoro aveva solo un mese uno sciame di api si sarebbe posato sul bambino lasciando sulla sua bocca del miele come simbolo della sapienza che, in seguito, Isidoro sarebbe stato capace di diffondere. Nelle sue opere *Etimologiae* e *De Rerum Natura* cita ripetutamente Lucrezio, in particolare in riferimento ai fenomeni metereologici. È, del resto, notevole che l'opera cosmologica di Isidoro abbia lo stesso titolo del poema lucreziano.

Considerazioni simili si applicano a Beda il Venerabile (673 – 735), uno storico anglosassone e padre della chiesa, autore di opere enciclopediche, che aveva scelto come motto *aut docere aut scribere*. Beda è il santo patrono degli studiosi ed è stato il primo a fare uso delle annotazioni a piè di pagina. Anche tra gli scritti scientifici di Beda compare un *De Natura Rerum* di chiara ispirazione lucreziana.

Il quarto erudito cristiano che è necessario menzionare è Rabano Mauro (780-856). Rabano è autore di opere compilatorie, tra le quali

la più notevole per i nostri fini è un *De Rerum Naturis*, altrimenti intitolato *De Universo*, in cui vengono trattati anche argomenti scientifici che si richiamano in modo indiretto all'atomismo o, per lo meno, a echi lucreziani.

L'importanza di questi enciclopedisti nell'epoca medievale è testimoniata dal fatto che Dante pone i primi due nel cielo del Sole, tra i beati della prima corona, quando Tommaso presenta gli spiriti sapienti (Par X 130-131):

Vedi oltre fiammeggiar l'ardente  
 spiro d'Isidoro, di Beda e di Riccardo,  
 che a considerar fu più che viro

e menziona Rabano, in un passo successivo, nella seconda corona di spiriti sapienti (Par XII 139-141):

Rabano è qui, e lucemi dallato  
 il calavrese abate Giovacchino  
 di spirito profetico dotato.

Nella seconda parte di quello che chiamiamo medioevo il quadro di riferimento culturale cambia per l'acquisizione in traduzione dall'arabo sia della filosofia e della scienza dell'Islam che di una rinnovata conoscenza delle opere degli antichi filosofi greci. Il punto di interesse per la nostra discussione è che inizia una certa separazione della scienza, o filosofia della natura, dalla teologia e dalla rivelazione divina nel senso che si fa strada il principio che mentre si continua ad essere convinti delle prerogative divine di aver creato l'universo determinando le regole del suo sviluppo, è concesso all'uomo di indagare le regole che presiedono alla struttura e ai mutamenti del mondo naturale. Questa concezione non ha peraltro sottratto alcuni dei nuovi filosofi naturali agli strali e alle condanne delle istituzioni cristiane, nonostante essi ritengano che la scienza sia sempre al servizio della fede.

I personaggi più noti di questa filosofia naturale in rinnovamento sono Adelardo di Bath (1080-1152), Guglielmo di Conches (1090-1155) (Gregory 1955), Thierry di Chartres (?-1150), Nicholas d'Autrecourt (1295-1369) e Guglielmo di Ockham (1287-1347) (Dutton 1996). Thierry di Chartres adotta la teoria dei quattro elementi ma ritiene che essi, una volta creati da Dio, evolvano secondo regole fissate dal creatore che l'uomo può liberamente indagare. Analogamente, Adelardo di Bath, filosofo, scienziato, astronomo e «primo scienzia-

to inglese», ritiene che tutto sia stato creato da Dio secondo ordine e ragione e che la scienza che studia questo ordine non sia in contraddizione con la fede.

Un'esplicita adesione all'atomismo si ritrova in Guglielmo di Conches e in Nicholas d'Autrecourt. Guglielmo, che apprende dalla filosofia e dalla scienza islamica, nel *De Philosophia Mundi* tratta di fisica, astronomia e meteorologia con la concezione che la scienza sia al servizio della fede e che la volontà di Dio si manifesti nelle leggi della natura. Nel *Dragmaticon Philosophiae* egli sostiene che indagando sulla natura si debba andare oltre il visibile dei quattro elementi, i quali sono costituiti da un aggregato di atomi singoli e omogenei. Gli atomi sono i primi principi, particelle indivisibili e infinite nel senso che non sono numerabili: «Si dice, infatti, infinito ciò che non si mantiene mai nello stesso numero [...] Poiché, infatti, sono soggetti a generazione e corruzione, ora sono di più, ora sono di meno».

Secondo Guglielmo gli atomi esistevano all'atto della creazione in un unico corpo indistinto e Dio li separò nei quattro elementi secondo il loro carattere umido, secco, caldo o freddo. Guglielmo cerca quindi di conciliare una concezione atomistica con la fede in un Dio creatore e ordinatore:

Ora, quanto all'aver detto che il mondo è formato di atomi, gli epicurei hanno detto il vero; ma, quanto a ciò che hanno sostenuto, e cioè che quegli atomi sono sempre esistiti senza aver avuto un inizio, e che andavano volando qua e là per il grande mare, e che successivamente furono ammassati in quattro grandi corpi: tutto ciò è soltanto favola. È, infatti, impossibile che una realtà, ad eccezione di Dio, sia senza principio e senza luogo.

Anche secondo Nicholas d'Autrecourt ogni cambiamento in natura deve essere ascritto al movimento di atomi indivisibili. Un aspetto interessante del suo atomismo è la ricerca di una forza responsabile dell'aggregazione degli atomi. A tal fine ricorre ad una analogia con il magnete che attira il ferro e concepisce due tipi di atomi uno dei quali funzionerebbe come il magnete:

È possibile che vi sia qualche ente che, proprio come fa il magnete con il ferro, attragga e unisca gli indivisibili in questo legame. Più intensa è la sua forza, maggiore sarà la durata del singolo composto in quanto tale. Un simile ente può essere chiamato il principio quasi-formale della sostanza.

Secondo Nicholas questa capacità di alcuni atomi di agire come substrato aggregatore sarebbe fornita dal movimento dei corpi celesti.

## 6.2 *L'Islam e l'atomismo*

L'atomismo, sia pure con sue caratteristiche peculiari, ha avuto un buon seguito nel mondo arabo. Anche in questo ambito, un problema basilare è stato di conciliare una filosofia della natura, qualunque essa sia, con i dogmi della fede e la corretta interpretazione delle scritture. Nel mondo arabo si ha perlomeno un buon punto di partenza, per quanto riguarda l'atomismo, e cioè che la parola atomo è menzionata in un passo del Corano (Corano, 34, 3):

Per Colui che conosce l'invisibile  
 Per Colui al quale non  
 Sfugge il peso di un ATOMO  
 Nei cieli e nella terra!  
 E non c'è nulla di più grande  
 O di più piccolo  
 Che non sia in un libro chiarissimo.

In maniera forse inusuale, ma per motivi che saranno subito chiariti, conviene premettere alla discussione dell'atomismo islamico una breve nota sulla posizione giudaica riguardo alla teoria atomica (Zonta 2014). I giudei sono stati tutti decisamente contrari all'atomismo, a parte la setta minore dei Caraiti (turchi di religione ebraica o ebrei di lingua turca?) che erano sostenitori della interpretazione letterale e diretta della Bibbia piuttosto che di una lettura mediata dai rabbini. Per una circostanza forse paradossale, le informazioni più dettagliate sull'atomismo islamico sono state tramandate da fonti ebraiche e in particolare da Mosè Maimonide (1155-1205). Mosè Maimonide è stato un fisico, teologo, filosofo e medico, il più noto pensatore ebraico conosciuto come *aquila della sinagoga*. Grande e convinto aristotelico, Mosè Maimonide aderisce alla teoria dei quattro elementi, terra, acqua, aria, fuoco (ai quali è forse da aggiungere un quinto elemento, etere, per la costituzione dei corpi celesti) dei quali trova esplicita menzione nella descrizione della creazione divina nella Genesi.

Una delle opere più note di Mosè Maimonide è la *Guida dei perplessi*, scritta originariamente in arabo, articolata come un dialogo con il suo studente Giuseppe e che, come suggerisce il titolo, si propone una esegesi delle scritture a vantaggio di chi avesse dubbi sulla loro inter-

pretazione. Scopo generale della *Guida* è di proporre una conciliazione della filosofia aristotelica con l'insegnamento Mosaico e, quindi, tra ragione e rivelazione. Con tale prospettiva, un proposito di Mosè Maimonide è la confutazione dell'atomismo. Ma egli non si riferisce che occasionalmente all'atomismo greco e in particolare a Epicuro:

Riguardo a quelli che non riconoscevano l'esistenza di Dio, ma che credevano che le cose nascono e periscono per aggregazione e separazione, secondo il caso, e che non c'è un essere che regola e organizza l'universo – mi riferisco a Epicuro, alla sua setta e ai suoi simili – non serve nemmeno parlare di queste sette; perché l'esistenza di Dio è stata stabilita, e sarebbe inutile menzionare l'opinione di individui che hanno costruito il loro sistema su una base che è stata già dimostrata errata dalle prove.

Gli strali di Maimonide si rivolgono allora contro i filosofi del Kalam (parola di Dio, verbo) (Baffioni 1982; Dhanani 1994), gli scolastici islamici, dei quali descrive il pensiero in un capitolo della *Guida* in dodici proposizioni.

Per i Mutakallim, che sono i teologi del Kalam, (loquentes in lege Maurorum, che parlano della legge dell'Islam), l'universo è costituito da particelle indivisibili (atomi) prive di grandezza, tutte uguali e omogenee. Dalla giustapposizione di atomi (*generazione*) si formano i corpi che poi vengono distrutti dalla loro separazione (*dissoluzione*). Ci sono vari modi dell'essere dei corpi a seconda di qualità, accidenti, che accompagnano l'aggregazione degli atomi. A differenza che nell'atomismo greco, gli atomi del Kalam non hanno peso, forma o dimensione e non sono determinati in numero. Come i corpi materiali anche il tempo è costituito da atomi o particelle indivisibili. Allo stesso modo, anche lo spazio è atomizzato.

I corpi sono creati da Dio come giustapposizione di atomi e dotati di uno o più accidenti e *in primis* dell'accidente della durata. Ma l'aggregazione e i connessi accidenti non possono durare più di un istante di tempo; la permanenza dei corpi deriva da un processo divino di continua distruzione e creazione (Fakhry 1958). All'atto della distruzione, Dio distrugge l'accidente della durata sostituendolo con quello dell'estinzione. L'accidente è comunque elemento essenziale per l'esistenza e per accidenti in opposizione reciproca (come vita e morte o moto e resto) uno esclude l'altro. Mentre alcuni accidenti sono essenziali, altri hanno carattere ausiliario. Ad esempio, l'accidente della vita comporta necessariamente accidenti come la conoscenza, la volontà e così via.

Gli accidenti non sono una proprietà generale di un corpo ma sono condivisi da ogni singolo atomo del corpo. Quando diciamo che la neve è bianca questo significa che ogni singolo atomo della neve ha l'accidente del bianco. In linguaggio moderno potremmo dire che ogni atomo della neve è bianco; ma questo non sarebbe esatto perché è decisione di Dio attribuire questo specifico accidente che potrebbe levare (congiuntamente all'atomo) secondo la sua volontà o potrebbe sostituire con l'accidente del giallo. Se questo non avviene, è decisione di Dio secondo una consuetudine che dipende dalla sua volontà. Analogamente, quando coloriamo un tessuto bianco in blu, immergendolo in un colorante blu, quello che in realtà avviene è che Dio decide di dotare ogni singolo atomo dell'accidente del blu, sempre per un istante rinnovabile. Potrebbe dotare gli atomi con un accidente di altro colore; non vediamo questo accadere per una consuetudine di decisione divina. Questo implica che tutto quello che noi immaginiamo è possibile per l'onnipotenza divina. Questa concezione teorica comporta una prerogativa di azione di Dio nel mondo naturale esclusiva e diretta che implica, sostanzialmente, la negazione di una causalità nell'azione dell'uomo.

Secondo la concezione dei Mutakallim, il moto è visto come uno spostamento degli atomi di un corpo da un punto all'altro di uno spazio anch'esso atomizzato. Nel moto, secondo i Mutakallim, tutte le velocità sono uguali. Quando due corpi A e B traversano due distanze diverse nello stesso tempo, quello che realmente accade è che quello che ai nostri sensi appare più lento ha avuto elementi (accidenti) di fermo più numerosi ma gli atti fondamentali di movimento da un atomo all'altro dello spazio sono tutti alla stessa velocità. Analogamente, quando vediamo un disco in rotazione, ci sembra che durante un ciclo di rotazione un punto esterno abbia una velocità superiore. Ma i nostri sensi ci ingannano. Anche se non ce ne accorgiamo, durante il movimento è come se il disco si disintegrasse e ricostituisse ad ogni istante, in modo che alla fine le velocità risultano uguali.

Questa breve descrizione potrebbe dare l'impressione di una struttura monolitica dell'atomismo islamico; al contrario, ci sono varianti di ogni genere che non necessitano di essere riportate in questo contesto che intende porre in evidenza principalmente l'elaborazione di una teoria particellare capace di conciliarsi con una divinità perennemente attiva nella creazione della materia. La descrizione riportata sopra riflette il pensiero sull'atomismo di Al Ashari (874-936), teologo e filosofo, che parte da una aspra critica ad Aristotele, come lascia

chiaramente intendere il titolo della sua opera: *De aeternitate mundi contra Aristotelem*. Una tale critica è anche il punto di partenza di Al Razi (865-925) per il quale la critica ad Aristotele è meno marcata e, comunque, articolata nel tempo. Tra l'altro, Al-Razi accetta la presenza dei quattro elementi, terra, acqua, aria, fuoco, ai quali attribuisce una struttura atomica spiegandone la diversa densità in termini di una differente proporzione di atomi e vuoto.

È necessario precisare che, in generale, nel mondo islamico c'è una convinta e diffusa adesione alla fisica aristotelica e quindi un netto rifiuto dell'atomismo. Questa è stata la posizione dei due più importanti filosofi dell'Islam medioevale. ibn-Sina [Avicenna] (980-1037) (Dhanani 2015), medico, filosofo e matematico, è considerato il padre della medicina moderna. Avicenna è stato un oppositore dell'atomismo, e così pure ibn-Rusd [Averroè] (1126-1198), famoso per i suoi commenti ad Aristotele (Inf. IV 144): «Averrois, che 'l gran comento feo», che contribuirono alla conoscenza di Aristotele in occidente. Tuttavia, anche se contrario all'atomismo Averroè fu sostenitore di una struttura particellare della materia nella forma dei *minima naturalia* (Glasner 2001), sempre di origine aristotelica.

## CAPITOLO 7

### LA RINASCITA DELL'ATOMISMO

Dopo la sopravvivenza nel corso del Medioevo, descritta nel capitolo precedente, l'atomismo vive una nuova stagione che inizia durante il Rinascimento e l'Illuminismo. Siamo ancora in una fase preliminare nel senso che l'interpretazione dei fenomeni naturali in termini di atomismo ha sempre un carattere filosofico, cioè è ancora lontano per le teorie atomistiche un approccio sperimentale definito. Parlando dell'atomismo nel periodo che stiamo considerando in questo capitolo, *Walther Nernst* (1864-1941) ha scritto: «[la teoria atomica] venne su, per uno sforzo della scienza moderna, come una fenice dalle ceneri della vecchia filosofia greca».

È una affermazione certamente semplificatoria perché nel corso di tutto il Rinascimento e l'Illuminismo la teoria atomica ha avuto una lunga gestazione e diversificazione. Quello che è più importante è che, a iniziare dal Rinascimento, si verificano le condizioni culturali necessarie perché la filosofia naturale, e l'atomismo in specie, trovino una udienza più ampia e convinta. Permane lungo tutto il periodo una sostanziale ostilità di carattere teologico ma, nondimeno, è possibile semplificare alquanto la nostra descrizione identificando le nuove più favorevoli condizioni culturali attraverso alcuni punti di svolta.

#### 7.1 *Caccia agli antichi manoscritti*

Uno di questi punti di svolta può essere emblematicamente localizzato nel 1417 quando Poggio Bracciolini (1380-1459) (Figura 29) ritrova nella Abbazia di San Gallo in Svizzera un manoscritto del *De Rerum Natura* di Lucrezio.



Figura 29 – Poggio Bracciolini.

Bracciolini, per i suoi incarichi presso la curia romana, aveva avuto un'ampia possibilità di viaggiare per tutta l'Europa ed era stato un autentico scopritore di manoscritti antichi in conventi e abbazie. L'originale del manoscritto lucreziano trovato dal Bracciolini andò perduto ma, fortunatamente, era stato copiato da Niccoló Niccoli e fu dato alle stampe una prima volta nel 1473 e poi nel 1483. In questo modo la filosofia e l'atomismo di Epicuro (e di Democrito) furono conosciuti direttamente invece che attraverso la mediazione di Aristotele e poi dei filosofi arabi (Beretta, Citti 2008).

La riscoperta del *De Rerum Natura* (vedi Figura 22) e, in successione, di tante altre opere antiche, tra le quali l'opera *Pneumatica* di Erone di Alessandria e le *Vite e dottrine dei più celebri filosofi* di Diogene Laerzio (con la prima edizione a stampa di Enrico Stefano nel 1570), costituì l'occasione per un accesso più diretto all'atomismo dei filosofi greci. Sebbene i manoscritti di queste opere fossero stati a lungo in qualche biblioteca, fu la loro diffusione tra i saggi a fungere da riscoperta, suscitando grande interesse tra filosofi e scienziati naturali. Un grande interesse era già presente prima della riscoperta del poema di Lucrezio, come dimostrato, ad esempio, dall'opera di Nicola di

Cusa (1401-1464), filosofo dell'Università di Padova, che, all'interno di un pensiero sempre ortodosso, si esprime in favore dell'atomismo.

D'altra parte, la riscoperta e la diffusione dei classici si accoppiava con una crescente insoddisfazione e inadeguatezza per il cappello oppressivo dell'aristotelismo e della scolastica. Inoltre, la riscoperta dei testi antichi sarà resa molto più significativa dall'avvento in Europa della stampa a caratteri mobili (la stampa del primo libro, la Bibbia, fu completata nel 1455).

## 7.2 *La rivoluzione galileiana*

Il secondo evento fondamentale per il nostro studio dell'atomismo nel Rinascimento può essere identificato con la nascita della scienza moderna con Galileo Galilei (1564-1642). Il pensiero specifico di Galileo sull'atomismo verrà esaminato in seguito. È necessario considerare preliminarmente il ruolo fondamentale di Galileo nel definire le caratteristiche essenziali del metodo sperimentale per lo studio dei fenomeni naturali (Shea 1974; Rossi 1997a; Geymonat 1991; Clericuzio 2000).

### 7.2.1 *Il mondo celeste*

La nuova scienza inizia quando Galileo punta il cannocchiale verso il cielo (vedi Figura 30).



Figura 30 – Cannocchiali di Galileo Galilei © Museo Galileo, Firenze.

Il cannocchiale era stato inventato nei Paesi Bassi nel 1608 da *Johannes Lippershey*, un ottico olandese, con un ingrandimento 4x. Galileo, dopo avere perfezionato in successive fasi l'ingrandimento dello strumento lavorando personalmente le lenti, aveva fatto le seguenti osservazioni sperimentali:

- la nube che sembrava costituire la via lattea era in realtà costituita da innumerevoli stelle;
- la luna non era una sfera perfetta ma aveva una struttura rocciosa come la terra (Figura 31) ed era in rotazione intorno alla terra:

Hanno sin qui la maggior parte dei filosofi creduto che la superficie [della Luna] fosse pulita tersa e assolutamente sferica, e se qualcuno disse di credere, che ella fusse aspra e muntuosa fu reputato parlare più presto favolosamente, che filosoficamente. Ora io questo istesso corpo lunare [...] asserisco il primo, non più per immaginazione, ma per sensata esperienza e necessaria dimostrazione, che egli è di superficie piena di innumerevoli cavità ed eminenze, tanto rilevate che di gran lunga superano le terrene montuosità. (Lettera a Gallanzone Gallanzoni 1611)

- quattro satelliti, *Medicea Sidera*, ruotavano intorno al pianeta Giove;
- si osservava intorno al pianeta Saturno una struttura che in seguito sarebbe stata identificata come gli anelli del pianeta.

Ai fini della nostra discussione l'importanza di queste osservazioni, alle quali vanno aggiunte quella delle macchie solari e quella delle fasi di Mercurio e di Marte, implica che lo studio del mondo naturale deve essere perseguito attraverso osservazioni sperimentali e non affidato al pensiero e all'autorità di antichi maestri o a teorie e principi che non abbiano un chiaro riscontro in *sensate esperienze*.

Ma la definizione galileiana del metodo sperimentale è ancora più stringente nel senso che i risultati o le deduzioni tratte dalle *sensate esperienze* non possono tradursi in affermazioni o principi generali ma devono essere espressi nel linguaggio proprio della natura stessa, cioè, in linguaggio matematico:

La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscere i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto. (Il Saggiatore, Cap. VI)



Figura 31 – La luna disegnata da Galileo (sopra) e fotografata oggi (sotto).

Questa precisazione fa scendere la filosofia naturale dal piedistallo di ogni verità assoluta, rivelata o immutabile:

Nelle dispute di problemi naturali non si dovrebbe cominciare dalla autorità di luoghi delle Scritture, ma dalle sensate esperienze e dalle dimostrazioni necessarie: perché, procedendo di pari dal Verbo divino la Scrittura Sacra e la natura, quella come dettatura dello Spirito Santo, e questa come osservantissima esecutrice de gli ordini di Dio (Lettera a Madama Cristina di Lorena granduchessa di Toscana).

Se la realtà del mondo naturale deve discendere da osservazioni quantificabili per mezzo di appropriati strumenti di misura, quando gli strumenti vengono perfezionati o nuovi strumenti vengono messi a punto (come accaduto nel caso del cannocchiale di Galileo) la scienza può cambiare e, comunque, resta sempre una conoscenza in potenzia-

le divenire. Nella sua *Vita di Galileo* Bertold Brecht (Brecht 1998) ha messo in bocca al grande scienziato la frase: «Quello che oggi scriviamo sulla lavagna, domani lo cancelleremo».

Le osservazioni di Galileo della volta celeste vanno molto oltre la definizione del metodo scientifico, cancellando la tesi aristotelica di una dicotomia tra un mondo sublunare imperfetto e una sfera celeste perfetta e immutabile. Le leggi della fisica del mondo naturale sono le stesse per tutto l'universo e in questo modo Galileo pone le basi per le leggi della meccanica e della gravitazione di Newton, come recitano i versi di Ugo Foscolo (*I sepolcri*):

[...] vide  
sotto l'eterno padiglion rotarsi  
più mondi, e il sole irradiarli immoto,  
onde all'Anglo che tanta ala vi stese  
sgombrò primo le vie del firmamento.

Le osservazioni della volta celeste fatte da Galileo costituirono una rivoluzione anche come prova sperimentale della visione copernicana di un sistema eliocentrico e Keplero scrisse conseguentemente: *Vicisti Galilae*. Ma le grandi innovazioni scientifiche hanno spesso difficoltà ad affermarsi sostituendo convinzioni consolidate come, nel caso di Galileo, la concezione geocentrica aristotelica e del mondo ecclesiastico. La storia del processo a Galileo e della sua abiura e condanna è ben nota e non la ripercorreremo in questa sede (Redondi 1980). Sulla difficoltà di accettazione di nuove idee o teorie scientifiche si soffermerà molto tempo dopo *Antoine Laurent Lavoisier*, iniziatore della chimica moderna, con un certo pessimismo ma con la speranza che i nuovi scienziati non siano condizionati dalle teorie consolidate (Califano, Schettino 2017):

La mente umana tende ad adattarsi a un certo punto di vista, e quelli che hanno guardato alla natura da una certa visuale, durante un periodo della loro vita, possono adottare nuove idee solo con difficoltà. È quindi giunto il momento di confermare o respingere le opinioni che ho presentato. Nel frattempo, vedo con grande soddisfazione che i giovani che iniziano a governare la scienza senza pregiudizi, che i matematici e i fisici che arrivano freschi alle verità chimiche, non credono più nel flogisto nel modo in cui Stahl lo ha presentato, e considerano l'intera dottrina come un'impalcatura più imbarazzante che utile per la continuazione della struttura della scienza chimica.

A parte ogni dettaglio della storia dei contributi galileiani alla nuova scienza, l'aspetto più importante ai fini della nostra discussione è il progetto di Galileo di porre tutti gli aspetti dei fenomeni del mondo naturale in una rappresentazione matematica o geometrica. Questo viene applicato da Galileo a tutti i problemi del moto, allo studio della gravità, alla determinazione dell'accelerazione di gravità, allo studio del cosiddetto moto locale.

### 7.2.2 *Moto naturale e moto locale*

Nel 1589 un giovane Galileo avrebbe lanciato dalla Torre di Pisa due corpi di peso diverso per verificare, contrariamente alle tesi aristoteliche, che essi arrivavano al suolo contemporaneamente. Anche se a questo episodio farà riferimento in seguito l'ultimo discepolo di Galileo, Vincenzo Viviani (1622-1703), non sappiamo se si tratta di una storia vera o di una leggenda o di un esperimento mentale. Certamente un esperimento simile sarà condotto nel 1586 a Delft, nei Paesi Bassi, da Simon Stevin (1548-1620), fisico e matematico. Naturalmente, questi esperimenti, se reali, erano condizionati dalla resistenza dell'aria ma nel 1971 l'esperimento sarà ripetuto sulla luna dall'astronauta *David Randolph Scott* durante la missione Apollo 15 lasciando cadere dalle mani un martello e una piuma di falco<sup>1</sup>. L'astronauta concluderà l'esperimento dicendo: «Il signor Galileo aveva ragione riguardo alla sua scoperta».

Così, comunque, Galileo riassume l'esito dell'esperimento (reale o pensato):

Ma io, signor Simplicio, che vi ho fatto prova, vi assicuro che una palla di artiglieria, che pesi cento, dugento e anco più libbre, non anticiperà di un palmo solamente l'arrivo in terra della palla di un moschetto, che ne pesi una mezza, venendo anco dall'altezza di dugento braccia [...] la maggiore anticipa due dita la minore, cioè che quando la grande percuote la terra, l'altra ne è lontana due dita.

Le differenze tra corpi di diverso peso dipendono solo dalla resistenza dell'aria (che è nulla sulla luna) e sono comunque minime.

<sup>1</sup> [https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo\\_15\\_feather\\_drop.html](https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo_15_feather_drop.html) (data ultima consultazione 27/04/2024).

Esperimenti reali furono condotti da Galileo per determinare l'accelerazione di gravità  $g$ . A tal fine Galileo studiò la caduta di gravi lungo piani inclinati, perfettamente lisci, di palle perfettamente levigate. Se il piano ha l'inclinazione di un angolo  $\alpha$  l'accelerazione è data da  $G = g \cdot \sin \alpha$  e quindi la velocità acquisita dal corpo è molto minore di quella in caduta libera e può essere misurata molto più accuratamente. Il *sensato* esperimento di Galileo consentì di stabilire che:

- piani di uguale altezza ma di diversa inclinazione sono percorsi da sfere uguali in tempi diversi ma le velocità finali acquisite sono uguali;
- se due piani inclinati sono combinati, uno in discesa e l'altro in salita, la sfera risale il secondo piano fino all'altezza dalla quale era partita. Questo corrisponde alla conservazione dell'energia.

A proposito del moto uniformemente accelerato dei gravi così Galileo scrive in una lettera a Paolo Sarpi:

gli spazii passati dal moto naturale essere in proporzione doppia dei tempi, et per conseguenza gli spazii passati in tempi uguali esser come i numeri impari ab unitate.

La formalizzazione in termini matematici delle leggi del mondo fisico è stata applicata da Galileo per lo studio del cosiddetto *moto locale* degli oggetti e, in particolare, del moto di un corpo lanciato con una certa velocità iniziale in una certa direzione, ad esempio orizzontalmente. Come abbiamo visto nel capitolo precedente, il problema era già stato considerato da Filopono nella sua contestazione della teoria del moto di Aristotele. Gli argomenti di Filopono erano poi stati ripresi da Avicenna che sosteneva che la velocità di un oggetto era determinata dall'eccesso della forza sulla resistenza del mezzo.

Nei suoi studi sulla cinematica dei corpi Galileo era stato in qualche modo anticipato dai filosofi e matematici del Merton College di Londra (fondato nel 1260) e in particolare dai cosiddetti *Oxford Calculators*, studiosi di fisica, matematica e astronomia. Tra questi, il più importante è stato Thomas Bradwardine (1290-1349) che sostanzialmente definì il teorema della velocità media: un corpo in moto uniformemente accelerato percorre in un dato tempo lo stesso spazio di un corpo con velocità costante uguale alla media delle velocità iniziale e finale del corpo accelerato. Questo anticipa l'approccio galileiano nella direzione di una rappresentazione di osservazioni fisiche con quantità numeriche.

Lo studio della cinematica si sviluppò in Francia quasi nello stesso periodo che in Oxford. Sembra che il francescano Pietro Giovanni Olivi (1248-1298) sia stato il primo a interessarsi dei problemi della cinematica discutendo del moto dei proiettili. Una scuola di filosofia e fisica era diretta da Nicholas Oresme (1320-1382) che, dopo aver studiato al Collegio di Navarra a Bayeux, era andato a Parigi per studiare teologia e conseguire la laurea come *Maestro delle Arti* presso il Collegio di Navarra. A Parigi Oresme incontrò i filosofi e naturalisti Jean Buridan, Alberto di Sassonia e Marsilio di Inghen, che erano interessati alla cinematica degli oggetti in movimento. Dopo essere diventato il capo della cattedrale di Rouen, Oresme fu il primo filosofo coinvolto nello studio della cinematica dei corpi a ricorrere alla rappresentazione grafica per rendere conto delle variazioni delle grandezze fisiche in funzione di parametri di riferimento. L'approccio grafico di Oresme ricorre a una *longitudo*, che possiamo considerare come una variabile indipendente che nella rappresentazione grafica identifichiamo con l'ascissa, e una *latitudo*, che descrive la variazione di una qualità da riportare in ordinata. In questo modo Oresme diede una dimostrazione geometrica della legge della cinematica trovata a Oxford.

L'amico e collega di Oresme Jean Buridan (1300-1358), filosofo naturalista, logico e filosofo, fu Maestro delle Arti a Parigi e poi Rettore dell'Università di Parigi. Allievo di *Guglielmo di Ockham* (1285-1347), aderì a una logica *nominalista* in cui gli universali, tanto cari ai platonici, erano considerati concetti astratti che servivano semplicemente come nomi, mentre solo le entità fisiche esistenti nel mondo naturale erano reali e dovevano essere considerate. Questo implicava una semplificazione nella descrizione e interpretazione dei fenomeni del mondo naturale. Il contributo più importante di Buridan alle teorie cinetiche è stato il pieno sviluppo, sia pure nel contesto di un completo aristotelismo concettuale semplicemente da aggiornare, della teoria dell'*impetus* (il termine *impetus* è probabilmente suo). Riprendendo le tesi di Filopono, Buridan interpreta l'*impetus* come una forza incorporea che al momento del lancio viene impressa al corpo in movimento come proprietà intrinseca. Così Buridan scrive in proposito:

Possiamo dunque e dobbiamo dire che al sasso o a un altro proietto viene impressa una tale cosa, la quale è la virtù motrice di quel proietto, e ciò pare meglio che ricorrere all'azione dell'aria per far muovere il proietto. Pare infatti piuttosto che l'aria resista al moto. Mi sembra perciò che si debba dire che il motore, muovendo il mobile, gli imprime un impeto o una certa virtù motrice (vis mo-

tiva) di quel mobile nella direzione nella quale il motore lo muoveva, sia verso l'alto sia verso il basso sia lateralmente sia in cerchio, e quanto più velocemente il motore muove quel mobile, tanto più forte impeto gli imprimerà. E da quell'impeto è mosso il sasso dopo che il motore ha cessato di muovere. Ma a causa della resistenza dell'aria e della gravità del sasso, che inclina in una direzione contraria a quella verso cui l'impeto muove, quell'impeto si indebolisce continuamente. Perciò il moto di quella pietra diventa sempre più lento, e infine quell'impeto si consuma e corrompe a tal punto che la gravità della pietra ne ha ragione e muove la pietra in basso verso il suo luogo naturale.

Galileo razionalizza questi presupposti. Il teorema della velocità media è graficamente rappresentato nella Figura 32 in cui la curva *a* riporta la variazione della velocità di un corpo uniformemente accelerato e la curva *b* la velocità media. Le aree sottese alle due curve sono uguali e danno lo spazio percorso nei due casi. Analogamente, la Figura 33 è la rappresentazione geometrica dell'evoluzione del moto di un corpo lanciato orizzontalmente. La retta *a* riporta la velocità costante impressa al corpo in assenza di gravità e di resistenza dell'aria, mentre la curva *b* riporta la progressiva diminuzione della velocità e l'inclinazione della traiettoria provocate dalla resistenza del mezzo, dalla gravità e da eventuali altre forze. Il grafico contiene sostanzialmente il principio di inerzia: in assenza di disturbi esterni il corpo una volta lanciato si muoverà indefinitamente nella stessa direzione con velocità costante. Inoltre, l'impeto (la forza) iniziale imprimerà al corpo una velocità iniziale che dipende dalla quantità di materia. L'interpretazione del moto del proiettile è in sostanza definita dalla quantità di moto, prodotto della massa del corpo per la velocità, quantità che si conserva.

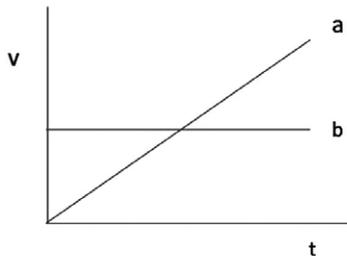


Figura 32 – Grafico del teorema della velocità media.

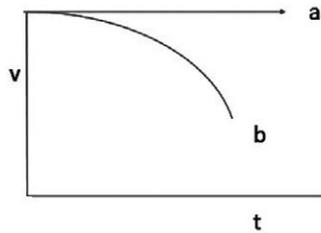


Figura 33 – Moto di un corpo lanciato con velocità iniziale in assenza (a) e in presenza (b) di resistenza e di gravità.

### 7.2.3 Il moto del pendolo

Un elemento importante per gli studi galileiani sul moto era una precisa misura del tempo. Galileo affrontò questo problema attraverso gli esperimenti sul pendolo. La storia racconta che Galileo in giovane età, forse nel 1581, si avvicinò al problema osservando le oscillazioni di una lampada nel Duomo di Pisa, forse una lampada ora conservata nel Camposanto Monumentale.

Così la cosa è raccontata da Vincenzo Viviani:

Con la sagacità del suo ingegno inventò quella semplicissima e regolata misura del tempo per mezzo del pendolo, non prima da alcuno altro avvertita, pigliando occasione d'osservarla dal moto d'una lampada, mentre era un giorno nel Duomo di Pisa; e facendone esperienze esattissime, si accertò dell'egualità delle sue vibrazioni, e per allora sovvenegli di addattarla all'uso della medicina per la misura della frequenza de' polsi, con stupore e diletto de' medici di que' tempi e come pure si pratica volgarmente: della quale invenzione si valse poi in varie esperienze e misure di tempi e moti, e fu il primo che l'applicasse alle osservazioni celesti con incredibile acquisto nell'astronomia e geografia.

In seguito alle sue *esperienze esattissime* Galileo stabilì che le oscillazioni di un pendolo sospeso con un filo inestensibile hanno un periodo  $T$  che non dipende dal peso del corpo sospeso ma solo dalla lunghezza del pendolo (isocronismo), almeno per piccole ampiezze non superiori a 10 gradi, secondo la legge:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

dove  $l$  è la lunghezza del pendolo e  $g$  l'accelerazione di gravità.

### 7.3 *Il vuoto esiste*

Come abbiamo visto, un punto essenziale nelle critiche alle teorie atomistiche riguardava l'esistenza del vuoto, negata da Aristotele e da tutti gli antiatomisti. Evangelista Torricelli (1608-1647), uno dei due ultimi allievi di Galileo, eseguì un esperimento che dimostrò l'esistenza del vuoto. Un tubo di vetro chiuso a un'estremità viene riempito completamente di mercurio facendone uscire tutta l'aria. Chiusa con un dito l'estremità aperta, il tubo viene capovolto in un recipiente anch'esso pieno di mercurio. Si osserva che la colonna di mercurio scende per stabilizzarsi a un'altezza di 760 mm. Nella parte superiore del tubo sopra la colonna di mercurio c'è il vuoto (*vuoto torricelliano*) mentre l'altezza della colonna è determinata dalla pressione dell'aria. Lo strumento ideato da Torricelli (*tubo torricelliano*) sarà poi chiamato *barometro* da Boyle.

Per le finalità della nostra discussione l'esperimento di Torricelli mette fine alla lunga diatriba sull'*horror vacui*, cioè sulla pretesa aristotelica che la natura aborre il vuoto e tende a riempire tutto lo spazio (*Natura abhorret a vacuo*). Nonostante la nuova evidenza sperimentale, l'idea dell'esistenza del vuoto continuerà a non essere unanimemente accettata in varie forme, eventualmente con la concezione che il vuoto esista ma sia riempito da una sostanza immateriale come l'*etere*. Ma l'*horror vacui* sarà definitivamente spazzato via dal famoso esperimento degli emisferi di Magdeburgo. Otto von Guericke (1602-1686) è stato un fisico tedesco studioso di pneumatica e inventore della prima pompa pneumatica. L'esperimento, descritto in *Experimenta nova, ut vocantur, Magdeburgica, de vacuo spatio*, fu eseguito a Magdeburgo nel 1654. Due emisferi di ottone di 60 cm di diametro furono fatti aderire perfettamente l'uno all'altro e dentro di essi fu fatto il vuoto con la pompa. Una volta fatto il vuoto, risultò impossibile separare gli emisferi anche con la forza di due gruppi di otto cavalli che tiravano in direzioni opposte. Eliminando il vuoto e facendo rientrare l'aria i due emisferi si separavano spontaneamente.

#### 7.4 Gassendi e il ritorno dell'atomismo

Pierre Gassendi (1592-1655), professore di filosofia a Aix e di matematica al Collège Royal di Parigi, è generalmente ritenuto il principale e più importante sostenitore della filosofia empirista e della riscoperta di Epicuro (Breit 1908). In realtà, il rinnovato interesse per l'atomismo non sorse dal nulla, come un fiore nel deserto, ma in un clima culturale più favorevole all'empirismo sia pure in una cornice generale sempre prevalentemente di carattere filosofico piuttosto che propriamente scientifico.

Una concezione corpuscolare della materia era sempre stata presente, ereditata dalla filosofia aristotelica dei *minima naturalia*, concepiti come la più piccola parte di una sostanza capace di esibirne tutte le proprietà (Glasner 2001). I *minima* non erano semplicemente delle particelle ma, oltre a essere costituiti da una appropriata composizione dei quattro elementi (terra, acqua, aria, fuoco), avevano la *forma* che assicurava le proprietà della sostanza che andavano a costituire. I *minima*, quindi, erano una idea sostanzialmente filosofica della costituzione degli oggetti del mondo naturale. A differenza degli atomi, i *minima naturalia* non erano corpuscoli indivisibili ma la loro scomposizione faceva perdere le proprietà caratterizzanti della sostanza originaria, producendo *minima* di materiali con proprietà diverse. Un problema comunque presente era la mancanza di una qualche evidenza che la scomposizione della materia oltre il limite dei *minima naturalia* potesse portare al recupero dei quattro elementi fondamentali di Empedocle, i quali rimanevano essi stessi una realtà filosofica, anche se supportata da una semplice o ingenua osservazione sensoriale.

La concezione iniziale dei *minima naturalia* di Aristotele è stata continuamente rivisitata nel corso del tempo, in particolare da parte di Averroé che ne ha trasmesso la conoscenza in occidente. Uno degli aspetti principali di discussione e approfondimento è stata la conciliazione dell'esistenza dei *minima* con la divisibilità della materia. Una possibile alternativa è consistita nel considerare la divisibilità all'infinito come proprietà degli enti matematici e geometrici mentre ai *minima* delle sostanze naturali potevano essere attribuite dimensioni fisiche peculiari per ogni sostanza, [Agostino Nifo (1473-1538); Giulio Cesare Scaligero (1484-1558)], caratteristica che tendeva ad avvicinare i *minima naturalia* agli atomi (o alle molecole?) da un lato e dall'altro era, come vedremo, consona ai primi cultori della alchimia-chimica (i *chimisti*) e agli *iatrochimici*.

Incline a una forma di atomismo è stato *Nicola di Cusa* che dopo aver studiato a Denveter e Heidelberg si era laureato in legge a Padova. Nicola di Cusa è stato un matematico e fisico e pioniere del metodo sperimentale. In una sua opera (*De Mente idiotae*) si chiede esplicitamente cosa si debba intendere per atomo:

concettualmente ciò che è continuo si divide in parti sempre divisibili, e la moltitudine delle parti può procedere all'infinito. Ma con una divisione effettiva arriviamo a una parte attualmente indivisibile che io chiamo atomo. Perché un atomo è una quantità, che a causa della sua piccolezza è in realtà indivisibile. La divisibilità all'infinito e quindi solo una possibilità teorica per il filosofo.

Una forma di atomismo si ritrova anche in Girolamo Fracastoro (1478-1553), medico, matematico e filosofo nell'Università di Padova. Come medico, Fracastoro era sostenitore della *seminaria hypothesis*, la teoria secondo la quale le infezioni erano portate da piccole particelle indivisibili che si potevano propagare anche a distanza, come vapori o odori, insediandosi nei pori delle sostanze (*De Contagionibus* e *De Simpathia et antipathia*). È una teoria corpuscolare che sarà condivisa dagli iatrochimici e che suggerisce azioni di tipo chimico per contrastare le malattie:

Gli antichi, come Democrito e Epicuro, che furono poi seguiti da Lucrezio, pensavano che l'origine di queste attrazioni fosse nella effusione di corpi che chiamavano Atomi; queste effusioni non possono essere negate, come vedremo, ma la maniera in cui le vedevano gli antichi filosofi era rude e impropria.[...] Tuttavia, una volta accettata la dottrina dell'effusione degli atomi, mi sembra che si possa descrivere un altro modo in cui avviene l'attrazione di sostanze simili, ma è necessario ricordare quanto detto sopra sull'armonia e il movimento delle parti in un insieme.

Una marcata corrispondenza tra la concezione dei *minima naturalia* e l'atomismo viene assunta nella cosmologia di Giordano Bruno (1548-1600) (Rossi 1997b; Gatti 2002; Matteoli 2019). Domenicano nel Monastero di San Domenico Maggiore in Napoli, Bruno ebbe ben presto con l'Inquisizione rapporti problematici che lo costrinsero a trasferirsi in Svizzera e poi in Inghilterra e in Germania, prima dell'infelice ritorno in Italia che portò, dopo un processo durato sette anni, alla sua condanna ad essere bruciato vivo in Campo dei Fiori.

L'atomismo di Giordano Bruno diviene esplicito nella cosiddetta trilogia di Francoforte ed in particolare nel *De triplici minimo et men-*

ura. In Giordano Bruno i *minima* sono unità indivisibili che costituiscono tutto. Ma ci sono tre tipi di *minima*:

- *monade*: unità base dell'esistenza che agisce come principio di quantità;
- minimo fisico: che possiamo identificare con l'atomo e che definisce la dimensione minima dei corpi;
- minimo geometrico: corrispondente al punto, che comporta una divisibilità all'infinito dello spazio.

Nel complesso i *minima* di Giordano Bruno sono caratterizzati da un forte animismo e sono dotati di una forza primordiale nel senso che sono tutti della stessa forma sferica e dimensione ma si differenziano per il tipo di forza che li anima:

Quindi guardando i corpi apparirà come sostanza di tutte le cose un corpo minimo, ovvero un atomo, mentre se noi guardiamo alla linea e al piano questo minimo è il punto...il numero è variazione della monade e la monade è essenza del numero; allo stesso modo la composizione è variazione dell'atomo e l'atomo è l'essenza della composizione. (De Minimi Existentia Liber)

È questo il contesto storico-culturale in cui si inserisce da parte di Gassendi (Breit 1908) una decisa rivalutazione dell'atomismo di Epicuro conseguente alla rilettura del *De rerum natura* e della parte della storia della filosofia di Diogene Laerzio che riguarda Epicuro. Un contesto caratterizzato dal sempre vivo ricordo dell'antica filosofia greca e, simultaneamente, da una palese ostilità della cultura ufficiale. Nel 1624 il parlamento di Parigi aveva emanato un decreto che stabiliva che chi sosteneva pubblicamente o insegnava posizioni antiaristoteliche era passibile della pena di morte.

Gassendi parte da una decisa contestazione della filosofia naturale di Aristotele pur rimanendo sempre nell'ambito di una adesione ai dogmi del cristianesimo e cercando di conciliare l'atomismo con la fede. Gassendi era convinto che tutta la conoscenza, a parte quella teologica, dovesse essere ottenuta dai sensi. Le conoscenze ottenute dall'esperienza rappresentano direttamente gli oggetti e i fatti del mondo naturale mentre le elaborazioni fatte dal ragionamento sono analogie ipotetiche delle conoscenze sperimentali.

Gassendi considerava lo spazio come un vuoto assoluto e infinito, *vacuum separatum*, che esiste indipendentemente dagli oggetti che lo occupano. Forse questa convinzione dell'esistenza del vuoto derivava anche da una conoscenza dell'esperienza di Torricelli. Gli atomi, le loro

combinazioni e i loro movimenti sono stati creati o regolamentati da Dio e occupano lo spazio in un mondo di dimensioni finite. Una tendenza verso l'esistenza di atomi derivava a Gassendi anche dai primi esperimenti con il microscopio che, rivelando particelle microscopiche non visibili all'occhio, suggerivano l'esistenza di particelle ancora più piccole. Gli atomi di Gassendi sono solidi e indivisibili e sono dotati di dimensioni e forma ma anche di peso che è l'origine del loro movimento. La forma degli atomi è molto varia in modo da spiegare la possibilità della loro unione meccanica. Per unione di atomi si formano strutture secondarie che Gassendi chiama corpuscoli o *molecolae*, termine coniato per primo da Gassendi. Oltre al vuoto assoluto Gassendi credeva che esistesse anche un *vacuum disseminatum*, cioè un insieme di vuoti distribuiti tra gli atomi. Dalla osservazione delle proprietà e interazioni elettriche e magnetiche Gassendi riteneva che esistessero effluvi materiali generati dalle forze della natura nel mondo fisico.

### 7.5 *L'atomismo di Galileo*

Una adesione di Galileo all'atomismo può essere considerata certa (Grand 1978; Shea 1970; Favino 1997; Galluzzi 2011; Redondi 1980) anche se nelle sue opere non se ne trova una specifica e dedicata discussione. Possiamo, in proposito, considerare la testimonianza diretta lasciata da *Tommaso Campanella* (1568-1639) in una lettera a Nicolas Fabri de Peiresc:

Quanto alla sua dimanda rispondo ch'io son certissimo ch' il S.r Galileo in molte cose, massime nei principii, è con Democrito e dal discorrer ch'ha fatto meco in Roma, e da quel che ne scrive nell'opuscolo De Natantibus e nel Saggiatore, e' l padre Castelli et monsignor Ciampoli e condiscepoli [per] tal lo difendono.

Possiamo inoltre ricordare, anche se è questione controversa, che Piero Redondi (Redondi 1980) ha sostenuto, sulla base di una lettera anonima di denuncia al Sant'Uffizio, che Galileo sarebbe stato condannato proprio, o anche, per la sua adesione all'atomismo di Democrito.

Nelle sue considerazioni sull'idrostatica (posizione e movimento dei corpi in acqua) Galileo si rifà alle idee di Archimede. Contrariamente alla teoria aristotelica che attribuisce primaria importanza alla forma degli oggetti, Galileo ascrive il galleggiamento o meno dei corpi solo alla *gravità specifica* dei corpi, cioè al loro peso specifico rispetto

all'acqua. La penetrazione di un corpo in acqua viene interpretata da Galileo assumendo che l'acqua abbia una struttura particellare ricca di vuoti. A tal proposito ricorre alla analogia di un bastone che affonda facilmente nella sabbia per la composizione particellare di quest'ultima o all'analogia di una persona che si fa strada attraverso una folla.

In termini particellari Galileo interpreta anche l'osservazione che un corpo più denso dell'acqua può galleggiare se in strato sottile, come ad esempio una sottile lamina di oro. L'esperimento, ideale o pratico, di Galileo a tal proposito è che la sottile lamina di oro, una volta messa sul fondo di un recipiente pieno di acqua, non mostra nessuna tendenza a riemergere verso la superficie. Non avendo idea dell'esistenza di una tensione superficiale, Galileo attribuisce il galleggiamento della lamina sottile ad atomi di fuoco che, risalendo per la loro leggerezza, possono sostenere la lamina sottile.

Riguardo all'osservazione che il ghiaccio galleggia sull'acqua, Galileo contrasta l'idea scolastica che il ghiaccio, come acqua solidificata, sia in realtà più denso del liquido e galleggi a causa della sua forma. Galileo sostiene, al contrario, che il ghiaccio sia *acqua rarefatta*, cioè acqua più ricca di vuoti del liquido, e quindi meno densa, una felice intuizione considerando le nostre moderne conoscenze sulla struttura dell'acqua nei suoi vari stati di aggregazione.

Galileo nel *Saggiatore* ricorre ancora a una concezione atomistica quando discute dell'origine delle sensazioni, caldo, sapori, odori, udito etc. In particolare, discutendo del caldo sostiene che la causa è dovuta al movimento e che non si tratta di un accidente o di una affezione del corpo caldo ma del movimento di particelle che muovono dal corpo caldo per arrivare ai nostri sensi di percezione. Si tratta di particelle di fuoco minutissime che penetrano nel nostro corpo, particelle che Galileo nomina in vario modo come *ignicoli*, *minimi ignei*, *minimi del fuoco*, *minimi sottilissimi e volanti*. In tal modo Galileo è quasi un anti-capotatore di una teoria cinetica del calore:

inclino assai a credere che il calore sia di questo genere, e che quelle materie che in noi producono e fanno sentire il caldo, le quali noi chiamiamo con il nome generale fuoco, siano una moltitudine di corpicelli minimi, in tal e tal modo figurati, mossi con tanta e tanta velocità; li quali, incontrando il nostro corpo, lo penetrino con la lor somma sottilità, e che il lor toccamento, fatto nel lor passaggio nella nostra sostanza e sentito da noi, sia l'affezione che noi chiamiamo caldo, grato o molesto secondo la moltitudine e velocità minore o maggiore di essi minimi che ci vanno pungendo e penetrando.

La stessa interpretazione è applicata da Galileo alle altre sensazioni che, fuori del ricevente, sarebbero solo nomi. Per chiarire il concetto, ricorre alla immagine di una piuma che strofinando una parte sensibile del nostro corpo può produrre la sensazione del solletico: questa non può essere una qualità della piuma ma si crea solo dentro di noi.

## 7.6 *L'atomo si affaccia nel laboratorio*

Anche durante questi primi accenni di rinascita che stiamo discutendo, l'atomismo permaneva in una dimensione sostanzialmente filosofica nel senso che le conseguenti proprietà della materia o le sue trasformazioni mancavano di riscontri sperimentali quantitativamente documentati, oltre le semplici osservazioni qualitative. In particolare, la chimica era ancora da venire come scienza autonoma con un suo quadro teorico e sperimentale comunque definito. Tra il XV, XVI e XVII secolo qualcosa comincia a muoversi in questa direzione.

Anche prima che Anthony van Leeuwenhoek (1632-1723), un venditore di tessuti di Delft e abile ottico autodidatta, usasse il microscopio da lui stesso costruito per esplorare il mondo microscopico scoprendo batteri, cellule, vasi sanguigni, etc., c'era stata un'intensa attività di ottici che erano riusciti ad ottenere ingrandimenti significativi di oggetti microscopici. La scoperta di un mondo invisibile ad occhio nudo aumentava la curiosità, o l'illusione, di accedere a quel mondo degli atomi indivisibili che Lucrezio aveva definito irraggiungibile (vedi la citazione in par. 4.1). van Leeuwenhoek era riuscito ad ottenere ingrandimenti fino a 200x che erano molto lontani da quello che richiede l'osservazione di oggetti della dimensione atomica, come si può vedere dalla Figura 34 in cui sono mostrate le dimensioni degli oggetti microscopici fino a quelli di una molecola (van Leeuwenhoek era arrivato alle dimensioni dei batteri).

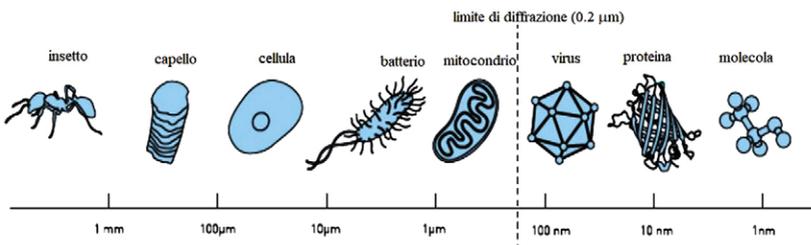


Figura 34 – Le dimensioni degli oggetti microscopici.

Questi primi esperimenti di microscopia, oltre a dischiudere un mondo sconosciuto di fondamentale importanza biomedica, suscitano un giustificato interesse riguardo alla reale, osservabile esistenza delle particelle elementari. Un aspetto importante, dal punto di vista metodologico, degli studi di micrografia di van Leeuwenhoek era la sua assoluta adesione al metodo sperimentale, come ribadisce in una lettera alla Royal Society che pubblicava i suoi articoli:

Io so bene che le relazioni che compongo e che vi mando di tanto in tanto non sono sempre in accordo tra loro, e che vi si ritrovano delle contraddizioni; per questo voglio dire ancora una volta che è mia abitudine tenermi ai dati in mio possesso finché non sono meglio informato o finché le mie informazioni non mi facciano rivolgere altrove: e non me ne vergognerò mai al punto di cambiare il mio metodo.

Anche se la chimica non era una disciplina con una sua base di riferimento, nelle pieghe dell'alchimia erano stati fatti molti progressi nella definizione e nell'affinamento delle pratiche di laboratorio e della connessa strumentazione come pure nella scoperta di nuovi composti chimici e delle loro reazioni. Per citare un singolo esempio dell'accumulazione, nel corso del tempo, di nuove conoscenze chimiche, l'alchimista arabo Jabir ibn Hayyam (721-815), latinizzato Geber, aveva messo a punto varie nuove tecniche di laboratorio e sintetizzato sostanze o reagenti chimici, tra cui possiamo menzionare purificazione dell'acqua per distillazione, numerosi alcali, acidi e sali inclusi acido solforico, soda caustica, cloruro di ammonio, acido acetico per distillazione dell'aceto, acido nitrico diluito, acqua regia, caratteristiche del mercurio. Geber aveva anche definito le sette operazioni della grande opera alchemica: sublimazione, distillazione, calcinazione, soluzione, coagulazione, fissazione, incerazione (fluidificazione). Tutte queste nuove reazioni e questi nuovi prodotti ponevano problemi interpretativi che rimanevano insoluti.

Nella Figura 35 è mostrata quella che potremmo chiamare la tavola periodica degli antichi, cioè la tavola degli elementi chimici conosciuti dagli antichi, tra cui i sette metalli classici che erano associati ai corpi celesti. Nella figura abbiamo incluso anche il carbonio, che era conosciuto come carbone, o anche come diamante (*αδάμας*, invincibile) ma, naturalmente, gli antichi non consideravano questi come elementi. Del resto, gli antichi pensavano che la formazione di rocce e minerali avvenisse all'interno delle viscere terrestri e che si formas-



come manuali di istruzione per gli apprendisti; erano scritti in volgare e sfuggivano alla attenzione delle classi colte. Con la scoperta della stampa, libri di tecnologia cominciarono ad essere pubblicati con sempre maggiore frequenza ed essendo libri di istruzione pratica l'accuratezza anche quantitativa era molto elevata. Un esempio di questi nuovi volumi è stato il *Liber de arte distillandi* pubblicato nel 1500 da Hieronymus Brunschwig (1450-1512) e dedicato alla preparazione di oli essenziali per scopi medici. Si trattava, in qualche modo, del primo testo di chimica farmaceutica e, oltre a contenere la descrizione dei metodi di distillazione in corrente di vapore, era un compendio di testi di erbari, piante e medicine estratte da piante medicinali. La distillazione era stata studiata anche da Giambattista Della Porta (1545-1615) per descrivere la preparazione di oli essenziali e cosmetici e l'accuratezza delle descrizioni è evidente anche dal fatto che per la preparazione di questi prodotti vengono riportate anche le rese.

Nei paesi, come la Germania, che avevano una lunga tradizione di carattere minerario cominciarono ad apparire veri trattati che descrivevano in maniera accurata tecniche di estrazione di minerali e tecniche di analisi di minerali e metalli. Il primo vero trattato di metallurgia sarà il *De la Pirotechnia* di Vannuccio Biringuccio (1480-1539) pubblicato nel 1540 (vedi Figura 37) (Cipriani 1993). Biringuccio lavorò a lungo per la potente famiglia Petrucci di Siena seguendone le vicende di espulsione e ritorno in Siena e poi fu preposto alla fonderia pontificia. Le descrizioni quantitative e accurate della *Pirotechnia* riguardavano estrazione e raffinazione di metalli classici e altri metalli o non metalli come zolfo, antimonio, manganese, salnitro, blu cobalto (menzionato per la prima volta da Biringuccio). Sono anche trattati l'assaggio di oro e argento e, inoltre, di gemme, cristalli, polvere da sparo, come dice il titolo dell'opera.

Un testo dedicato più propriamente ai metodi analitici importanti in metallurgia è il *Trattato che describe i principali tipi di minerali e minerali metallici* di Lazarus Ercker (1530-1594), sovrintendente delle miniere per l'imperatore del Sacro Romano Impero, che aveva reso Ercker nobile con un blasone con la scritta *Erst pro's dan lob's* (prima prova, poi apprezza). Il libro illustrato con xilografie, come gli altri testi che stiamo considerando, ma in questo caso colorate a mano, è un testo tecnico accurato sugli aspetti quantitativi della metallurgia e dell'analisi dei minerali. Il testo descrive per la prima volta un minerale denominato *wolfram* che risulterà poi essere il tungsteno.

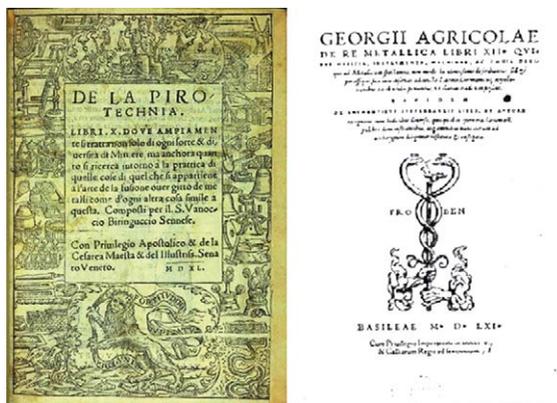


Figura 37 – Frontespizio del *De la pirotechnia* e del *De re metallica*.

Il più importante e colto autore di questo periodo è stato Georg Bauer (1490-1559), più noto come Georgius Agricola, che aveva studiato medicina a Bologna, Ferrara e Padova. Agricola era originario della zona dei monti metalliferi (in cui si trovano Joachimsthal e Chemnitz) dove aveva esercitato la sua professione di medico ed aveva una conoscenza diretta delle miniere e dei processi metallurgici ai quali si era, in un secondo tempo, dedicato esclusivamente pubblicando vari libri anche di carattere storico. Agricola è stato reso famoso dal *De re metallica* (vedi Figura 37) che può essere considerato il primo trattato organico di mineralogia e metallurgia (Cipriani 1993). In questo libro vengono descritti i giacimenti minerari, l'identificazione e il trattamento dei minerali, le tecniche di estrazione, arricchimento e raffinazione dei metalli. Secondo le parole di Agricola, nel libro si tratta di *succhi, sale, soda, nitro, allume, vetriolo, salnitro, zolfo, bitume* e viene anche definita la terminologia tecnica in tedesco e in latino. Il *De re metallica* è stato a lungo considerato come testo di riferimento per lo studio della chimica.

### 7.6.2 Paracelso e la iatrochimica

La medicina medievale era sostanzialmente la medicina di Ippocrate e Galeno basata sulla teoria dei quattro umori (sangue, flegma, bile gialla e bile nera) associati, rispettivamente, alle qualità del caldo, secco, freddo e umido. Una alterazione dell'equilibrio degli umo-

ri portava allo stato di malattia che poteva essere curato ricorrendo a farmaci di varia origine (vegetale, animale o minerale) capaci di contrastare la malattia secondo il principio di *contraria contrariis curentur*.

L'orientamento dell'alchimia in una direzione sempre più mistica aveva impoverito l'attenzione verso le pratiche di laboratorio per la preparazione, sia pure non fondata su basi teoriche, di rimedi terapeutici da sostanze minerali (borato, allume, solfato di ferro, mercurio e suoi derivati, oro in polvere, etc.) o vegetali (anice, sandalo, noce moscata, artemisia, mandragora). Erano, comunque, molto diffusi i ricettari medici che riportavano composizione e preparazione di farmaci e presunti tali. Tra questi possiamo citare un rimedio, la *teriaca* o *triacca*, rimasto in uso fino all'inizio del 1900. La teriaca era un rimedio contro gli avvelenamenti preparato per Mitridate (132-63 a.C.), re del Ponto, terrorizzato dall'idea di essere avvelenato. Mitridate, quando il Ponto fu conquistato dai romani, dovendo suicidarsi ed essendo ormai immunizzato dai veleni dalla sua dose giornaliera di teriaca, fu costretto a farlo con la spada di uno schiavo. La teriaca si diffuse nel mondo romano (dove fu usata anche da Nerone) divenendo infine una medicina universale, una panacea. C'erano numerosissime ricette della teriaca contenenti, oltre la necessaria carne di serpente, anche fino a cento ingredienti diversi. Spesso veniva preparata in sedute aperte seguite dal popolo, come racconta l'incipit dell'opera buffa *Crispino e la comare* (1850) dei fratelli Ricci su libretto di Francesco Maria Piave:

Batti, batti, pesta, pesta la Teriaca qui si fa.  
 Più d'un morbo che molesta  
 per tal farmaco sen va.

La necessità di una preparazione accurata dei rimedi era sempre più sentita dai medici che presero a farsi carico direttamente, a tale scopo, delle procedure laboratoriali tradizionalmente in mano agli alchimisti. Sorse così, ad opera principalmente di Paracelso, *Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim* (1493-1541) (Abbri 1980), la *iatrochimica*, una sorta di fusione tra medicina e chimica. Paracelso, soprannome scelto per paragonarsi al famoso medico *Aulo Cornelio Celso* del I secolo, aveva appreso medicina e alchimia dal padre e aveva frequentato le miniere e imprese metallurgiche, apprendendo le tecniche di lavorazione dei metalli preziosi. Come molti alchimisti, Paracelso aveva viaggiato per tutta l'Europa ed era stato anche in Italia dove, a Ferrara, si era laureato in medicina e filosofia. La straordi-

naria mobilità di Paracelso era anche dovuta al suo carattere difficile, superbo e arrogante per il quale si faceva molti nemici, anche se la sua abilità di medico era indiscussa. Era riuscito a scoprire rimedi (a base di mercurio) per la cura di scabbia, lebbra, ulcere, gotta, sifilide (morbo francese o morbo napoletano).

Paracelso era ancora un alchimista e credeva ancora nella trasmutazione degli elementi. Si vantava, dopo aver bruciato una rosa, di poterla rigenerare dalle sue ceneri. A questo è dedicato un breve racconto (*La rosa di Paracelso*) di Jorge Luis Borges in cui un aspirante allievo si presenta da Paracelso sperando di vedere questo prodigio; ma il maestro si rifiuta perché non vuole che la trasformazione sia interpretata come un miracolo; la rosa sarà poi da Paracelso rigenerata come Borges ci dirà in una sua poesia:

La rosa,  
l'immarcescibile rosa che non canto,  
quella del nero giardino nella notte profonda,  
quella di qualunque giardino e di qualunque sera,  
quella che risorge dalla tenue  
cenere per arte di alchimia.

Tuttavia, Paracelso è stato un innovatore e sosteneva che il compito dell'alchimia fosse quello di dedicarsi alla preparazione di sostanze medicamentose, soprattutto di origine minerale, partendo dalla purificazione delle sostanze e dall'eliminazione dei veleni presenti attraverso calcinazione, distillazione, sublimazione. Secondo Paracelso la materia era sempre costituita dai quattro elementi aristotelici ma a questi aveva aggiunto tre qualità, i *tria prima*, zolfo, mercurio e sale. Questi non erano tre elementi ma tre fattori primari del cosmo corrispondenti ai tre principi astratti dell'anima, dello spirito e del corpo (o del combustibile, del liquido e del solido).

Il metodo di cura delle malattie consisteva nella somministrazione, attraverso preparati minerali, degli elementi chimici in difetto negli stati patologici, dosandoli con estrema precisione per ricostruire l'equilibrio dei *tria prima*. In ogni organismo vivente agiva un *archaeus*, uno spirito regolatore di tutte le funzioni.

Il termine spagirico (dal greco *σπάω*, separare, e *ἀγείρω*, riunire) è stato coniato da Paracelso per indicare l'isolamento, la eventuale trasmutazione e la riunione di componenti di piante e di minerali per ottenere medicinali più efficaci. La chimica (o medicina) spagirica si sviluppò rapidamente e maturò una tendenza ad attenersi con rigore

alle pratiche sperimentali di laboratorio. Furono scoperti molti composti importanti per la farmacopea come la tintura di ferro, il laudano estratto dall'oppio con il vino, il tartaro emetico (per azione dell'ossido di antimonio sul tartrato di potassio), l'etere solforico, il colchino, l'acetato d'ammonio, l'acido acetico forte, e molti preparati di antimonio.

A seguito di queste pratiche la chimica cominciò ad affrancarsi gradualmente dall'alchimia e a proporre una propria indipendenza disciplinare. Molti nuovi personaggi contribuirono all'affermazione di questa nuova chimica seguendo le orme di Paracelso a cominciare da una figura alquanto misteriosa, Basilius Valentinus. Non è in realtà sicuro che un Basilius Valentinus sia realmente esistito o se qualcuno, forse il suo editore, si sia appropriato di questo nome per pubblicare opere di iatrochimica propagando le idee di Paracelso. La opera più famosa a nome di Basilius Valentinus è *Il carro trionfale dell'antimonio* che può essere definito il primo trattato chimico o iatrochimico su un singolo elemento e sui suoi composti.

Andreas Libavius (1540-1615), un medico tedesco, è stato ancora un alchimista ma con un senso pratico dell'alchimia come *arte per produrre magisteri e per estrarre essenze pure separando i corpi dalle miscele*, distinguendo i metodi di laboratorio dai processi di combinazione chimica delle sostanze. Nelle sue opere ha descritto la preparazione dell'acqua regia, dell'acido solforico (dallo zolfo in aria o dal vetriolo), dell'acido cloridrico e del tetracloruro di stagno. Importante è stata anche l'opera di Jean Beguin (1550-1620), famoso per aver preparato l'acetone (spirito ardente di Saturno) per distillazione secca dell'acetato di piombo (sale di Saturno). Nel suo *Tyrocinium chymicum* Beguin rivendicò l'autonomia della chimica come disciplina scientifica e fu direttore della scuola di chimica e farmacia aperta a Parigi nel 1604 nella quale il suo trattato fu adottato come manuale di chimica. Angelo Sala (1576-1637), figlio di un filatore di tessuti, era divenuto chimico e medico senza aver studiato ed aveva esercitato la sua professione in Germania. Le sue osservazioni che i sali di argento (nitrato di argento) esposti alla luce si anneriscono sono stati una anticipazione dei processi fotografici. Sala aveva studiato in dettaglio reazioni chimiche e aveva compreso che alcune sostanze sono combinazioni di altre e che la fermentazione era un processo di raggruppamento di particelle elementari per produrre nuove sostanze.

Johann Rudolph Glauber (1604-1670) è stato un chimico autodidatta che nei suoi libri ha riportato la descrizione di apparati chimici e di reazioni chimiche con attenzione alle possibili applicazioni indu-

striali. Per reazione del sale ordinario con acido solforico ottenne un sale che chiamò *Salis mirabilis* per le sue proprietà straordinarie, un sale noto come sale di Glauber (è il solfato di sodio decaidrato). Studiò per primo reazioni di doppio scambio e per primo studiò la forza degli acidi avendo intuizioni dell'affinità chimica, se i sentimenti di odio e amore si interpretano nel senso di forze:

Poichè ogni metallo ha natura diversa dagli altri, in modo che quelli simili si amano e quelli diversi si aborriscono e respingono tra loro; e quando ci sono diversi metalli in una massa e vorresti separarli è necessario per fare questo aggiungere qualcosa che sia affine con la parte più imperfetta e sia contraria alla parte perfetta. Per esempio, lo Zolfo è amico di tutti i Metalli, eccetto l'Oro che invece odia; eppure, ama anche tra i Metalli imperfetti uno più dell'altro.

Daniel Sennert (1572-1637), figlio di un calzolaio, studiò prima a Wittenberg e poi a Berlino ottenendo la laurea in medicina e fu in seguito nominato professore all'università di Wittenberg. Sennert sosteneva che i *minima naturalia* avessero una realtà fisica e li assimilava agli atomi di Democrito. Sennert cercò di conciliare le teorie di Paracelso con quelle di Galeno e Aristotele basandosi nelle argomentazioni su elementi concreti. Nella sua classificazione distingueva *minima* di primo e secondo ordine, che ricordano atomi e molecole, dei quali solo i primi non erano ulteriormente scomponibili. Anche Sebastien Basson (1579-1625), medico francese, era un atomista che utilizzava il concetto di molecola. Basson insegnò retorica all'accademia calvinista di Dieen-Dauphiné. Basson proponeva l'idea che la materia producesse i suoi stessi *minima naturalia* attraverso la combinazione di atomi omogenei e incorruttibili che, una volta congiunti tra di loro, conservavano le loro differenze strutturali. Basson si distingueva dagli altri atomisti per l'introduzione dello *pneuma*, definito anche etere, anima del mondo o spirito dell'Universo. Tutti i mutamenti naturali potevano essere spiegati in termini di organizzazione degli atomi nell'etere. L'etere agiva in ogni caso in base a una forza motrice costantemente infusa da Dio:

Attraverso questo spirito Dio muove i singoli elementi non diversamente da come essi si muoverebbero se questa forza motrice fosse innata in loro.

Convinto sostenitore di una teoria particellare è stato anche Isaac Beekman (1588-1634), filosofo, chimico e medico olandese calvini-

sta (Kubbinga 1988). Dopo aver esercitato professioni di tipo tecnico-pratico, Beeckman si dedicò a studi di medicina e di filosofia naturale fino a divenire rettore della scuola latina di Dordrecht. Secondo la concezione di Beeckman la materia è costituita da particelle fisiche omogenee, *homogenea physica*, che hanno le caratteristiche delle varie sostanze materiali e sono formate dall'aggregazione di numeri definiti di atomi dei quattro elementi aristotelici. Gli *homogenea physica*, che potremmo chiamare molecole, hanno una duplice variabilità sia nel numero degli atomi componenti intorno a un valore medio ottimale sia nella disposizione spaziale degli atomi (una anticipazione dell'isomeria). Questa variabilità vuole rendere conto delle differenze delle sostanze della stessa tipologia. Gli atomi sono costituiti dalla stessa materia primordiale e sono stati creati da Dio dal nulla con una forma e una grandezza e con definite leggi di movimento. L'aggregazione degli atomi avviene per il loro moto incessante nel vuoto e aderiscono gli uni agli altri per contatto delle superfici e la forza di interazione è tanto maggiore quanto più grande è la superficie di contatto. Beeckman applicò la sua concezione atomistica anche all'interpretazione della luce e del suono e alla loro propagazione.

Jean Baptist Van Helmont (1570-1644), erede della tradizione iatrochimica e discepolo di Paracelso, contribuì in maniera significativa alla transizione dall'alchimia alla chimica dimostrando particolare interesse e predisposizione per la verifica sperimentale. Rifiutando la teoria dei *tria prima* di Paracelso, Van Helmont considerava elementi primi solo l'aria e l'acqua, ritenendo l'aria un elemento inerte che non si trasformava durante le reazioni chimiche. Il fuoco era solo uno strumento creato da Dio per consentire di effettuare reazioni chimiche e Van Helmont si autodefiniva *medicus per ignem*. Van Helmont ideò un ingegnoso esperimento per dimostrare che l'acqua era l'elemento alla base di tutte le sostanze. Piantò un albero in una quantità pesata di terra in un vaso. Annaffiò il vaso regolarmente con acqua per vari anni e trovò che, dopo tutto questo tempo, il peso della terra era rimasto identico mentre l'albero era aumentato di 77 chili. Poiché aveva aggiunto solo acqua, ne dedusse che l'albero e tutte le sostanze del mondo naturale erano costituite da acqua, appunto l'unico elemento. A parte la conclusione assurda, l'aspetto importante della chimica di Van Helmont è stato l'uso preciso e continuo della bilancia nei suoi esperimenti, procedura che lo portò a riconoscere che nelle reazioni chimiche la massa si conserva, anche se non giunse ad enunciare esplicitamente questo principio. Una scoperta importante di Van Helmont è stata l'osservazione che in molte reazioni chimiche si sviluppavano altre

arie permanenti, diverse dall'aria vera e propria, che chiamò gas, un nome derivato dal greco *cháos*. Van Helmont identificò vari di questi nuovi gas tra cui l'anidride carbonica, alcuni ossidi di azoto, l'anidride solforosa, l'idrogeno ed è stato l'iniziatore della chimica pneumatica.

### 7.7 Newton e le interazioni tra atomi

Isaac Newton (1643-1727), quasi per un gioco del destino, nacque lo stesso anno della morte di Galileo come se fosse predestinato a raccogliere il bastone da Galileo per completare la rivoluzione scientifica, determinando le leggi della gravitazione e della meccanica, le leggi dell'ottica e inventando il calcolo differenziale e integrale. Quello che è sorprendente è che l'uomo paladino del rigore scientifico, l'uomo che aveva assunto come motto del suo metodo di lavoro *hypotheses non fingo* si sia dedicato intensamente all'alchimia (Dobbs 1975; White 1997; Schettino 2017). E non era certo uno che si accontentasse facilmente; parlando di sé stesso ha scritto:

Non so cosa io possa sembrare al mondo, ma a me stesso sembra di essere stato solo come un ragazzo, che gioca sulla riva del mare e che si diverte a trovare di quando in quando un ciottolo più liscio o una conchiglia più bella del solito, mentre il grande oceano della verità si stende tutto sconosciuto davanti a me.

Eppure, anche se può apparire sorprendente, in *Praxis* di Isaac Newton, il fondatore della scienza moderna, troviamo questo passaggio in cui si parla di alchimia e della cosiddetta *materia prima*, l'embrione cosmico della generazione dei metalli:

Conosciuta infine questa materia è necessario in principio convertire in acqua questa materia con un artificio singolare e occulto e dopo che sarà evaporata naturalmente mutarla in terra con un lieve e naturale mezzo occulto: fatto ciò, sarai in possesso della terra verginea dei sapienti. Da questa terra i sapienti preparano il loro mercurio semplice e il loro mercurio doppio, e ne traggono l'acqua secca che chiamano fuoco acquoso e acqua ignea perché dissolve tutti i corpi radicalmente.

Newton si è dedicato quasi esclusivamente all'alchimia per quasi 25 anni, dalla metà degli anni 1560 fino al 1590, quindi nel periodo durante il quale completò i suoi *Principia*. Inizialmente, per vari anni, studiò con grande accuratezza tutto quanto era stato pubblicato

sull'alchimia, facendo annotazioni e riassunti, per poi attrezzare un suo laboratorio alchemico e passare agli esperimenti diretti. Alla morte di Newton, nella sua biblioteca furono trovati, tra gli altri, 169 libri di cui 138 di alchimia e 31 di chimica (due aspetti che Newton teneva sempre a tenere distinti), e ha lasciato scritti e note sull'alchimia per circa 1 milione di parole. Ma molti altri libri di alchimia devono essere andati perduti quando Newton si trasferì a Londra. Qui di seguito (Figura 38) vediamo un manoscritto alchemico di Newton:

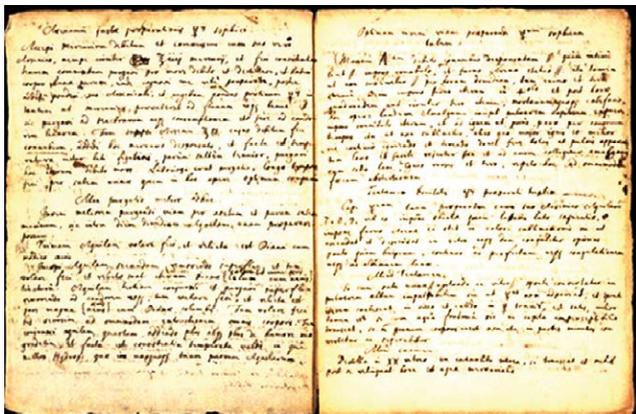


Figura 38 – Pagine da un manoscritto alchemico di Newton.

Il suo assistente Humphrey Newton così descrive la dedizione di Newton all'alchimia e all'attività di laboratorio:

[Era] così intento ai suoi studi che mangiava pochissimo e spesso si dimenticava completamente di mangiare. Andava a letto tardi dopo le 2 o le 3 e talora dopo le 5-6, dormendo solo 4 o 5 ore specie in primavera e autunno, quando spendeva 6 settimane in laboratorio con il fuoco della fornace che non cessava giorno e notte, con lui seduto lì una notte, come ho fatto io un'altra notte, finché non aveva terminato i suoi esperimenti chimici, nei quali era accuratissimo, meticoloso, preciso. Quale fosse il suo scopo non ero in grado di capire. Ma i suoi sforzi, la sua diligenza in questi periodi mi facevano pensare che egli cercava qualcosa al di là delle possibilità delle capacità umane.

Naturalmente nei laboratori degli alchimisti gli incidenti non erano infrequenti, se non addirittura all'ordine del giorno. E in un'occasione il laboratorio di Newton andò in fiamme, forse per colpa di Diamond,

il cane prediletto da Newton, incendio che avrebbe provocato la perdita di molti suoi documenti anche alchemici.

Alla fine degli anni 1570 e poi nuovamente negli anni 1590 Newton entrò in una profonda crisi da esaurimento nervoso e da depressione sfiorando la pazzia, come dimostrano varie sue lettere scritte in questi periodi. Le motivazioni di queste crisi non sono chiare. Certamente Newton era un uomo geniale ma le sue vicende familiari e affettive sono state piuttosto tristi e possono essere state causa della sua crisi.

In tempi recenti sono state eseguite delle analisi su una ciocca di capelli di Newton dalle quali sono risultate concentrazioni molto alte di mercurio e di piombo, interpretate come prova che la malattia di Newton fosse dovuta ad un avvelenamento da mercurio. La cosa non è certa e, comunque, considerata la sua lunga frequenza con il laboratorio chimico un'alta concentrazione di mercurio non poteva essere una sorpresa (Schettino 2017). La cosa dimostra ancora quanto tempo Newton abbia dedicato all'alchimia. Alla morte di Newton la Royal Society decise di tenere segreti gli scritti alchemici di Newton senza darli alla stampa, forse per timore di deteriorare la sua immagine di grande scienziato. Nel 1936 buona parte di questi manoscritti ritornò in circolazione grazie a una famosa asta di Sotheby e un lotto fu acquistato da John Maynard Keynes, una delle più importanti figure della storia dell'economia. In seguito, Keynes avrebbe scritto:

Newton non fu il primo scienziato dell'età della ragione. Piuttosto fu l'ultimo dei maghi, l'ultimo dei babilonesi e dei sumeri, l'ultima grande mente soffermatasi sul mondo del pensiero e del visibile con gli stessi occhi di coloro che cominciarono a costruire il nostro patrimonio intellettuale poco meno di diecimila anni fa.

David Brewster, uno dei primi biografi di Newton, esaminò accuratamente tutti i suoi scritti alchemici e, con sua grande delusione, dovette osservare che queste indagini non sembravano avere alcuna relazione con il quadro idealizzato di Newton come un grande scienziato:

Nella misura in cui le indagini di Newton erano limitate alla trasmutazione e moltiplicazione dei metalli, e persino alla scoperta della tintura universale, possiamo trovare alcune scuse per le sue ricerche; ma non possiamo capire come una mente di tale potere, e così nobilmente occupata dalle astrazioni della geometria, e lo studio del mondo materiale, possa chinarsi per essere anche il copista della più spregevole poesia alchemica e l'annotatore di un'opera, che è l'ovvia produzione di un pazzo e di un cialtrone.

Brewster era convinto che lo scopo di Newton, e dei suoi altri grandi contemporanei interessati all'alchimia, fosse quello di salvare l'alchimia dalla condizione di un processo che iniziava con la frode e terminava con il misticismo:

L'alchimia di Boyle, Newton e Locke non può essere così caratterizzata. L'ambizione né di ricchezza né di lode ha spinto il loro studio, e possiamo tranquillamente dire che l'amore della verità da solo, il desiderio di fare nuove scoperte in chimica, e il desiderio di testare le straordinarie pretese dei loro predecessori e artisti sono stati gli unici motivi con cui sono stati attuati.

Ma cosa cercava veramente Newton nell'alchimia? Ce lo dice esplicitamente Newton stesso:

Finora io ho spiegato il sistema di questo mondo visibile, per quanto riguarda i più grandi movimenti che possiamo facilmente osservare. Ma qualsiasi ragionamento è valido per i moti più grandi deve essere valido anche per quelli minori. I primi dipendono da più grandi forze di attrazione di corpi maggiori, e io penso che i secondi dipendano da forze più piccole, per ora non osservate, di particelle microscopiche.

Dopo aver scoperto le leggi di gravità che governano il moto dei corpi celesti, Newton doveva aver concepito l'idea che i principi operanti nel macrocosmo potessero avere un corrispettivo nel microcosmo, corrispettivi che egli cercava di scrutare nel crogiolo dell'alchimista. Newton era interessato ad una sintesi di tutta la conoscenza e per questo, attraverso l'alchimia, si dedicò alla ricerca di una teoria unificata dei principi che regolano l'universo. E pensava che questa sintesi, la favolosa *prisca sapientia*, era stata una volta nel possesso dell'umanità e che, dissipata nella filosofia arcana, dovesse essere cercata nella sapienza degli antichi. E doveva essere cercata anche nelle sacre scritture, al cui studio Newton si dedicò pure intensamente, tanto fa fare una cronologia sulla base dell'interpretazione delle sacre scritture. L'idea di una rivelazione primigenia, di una saggezza universale, era radicata nell'alchimia.

Secondo Newton la materia era formata da particelle primordiali, dette di prima complessità, dure indivisibili e impenetrabili che, unendosi tra di loro grazie alla presenza di forze di attrazione, formavano particelle di seconda complessità che a loro volta si associavano per formare sistemi sempre più complessi fino alle sostanze chimiche.

Nelle strutture di ultima complessità esistevano pori vuoti nei quali si potevano introdurre solventi o reattivi. Per esempio, il mercurio poteva penetrare nei pori dell'oro per dissolverlo sotto forma di amalgama.

Il contributo fondamentale di Newton alla teoria dell'atomismo è stata l'introduzione delle forze di attrazione tra gli atomi che saranno poi alla base della teoria dell'affinità chimica. Le forze attrattive tra particelle agivano solo a piccola distanza e variavano di intensità da una specie chimica all'altra. Le forze agenti tra le particelle erano responsabili anche di altri fenomeni come la bagnabilità, i fenomeni capillari, la solubilità, l'evaporazione, la cristallizzazione:

Le parti di tutti i corpi solidi omogenei che si toccano uno con l'altro, si attaccano fortemente. [...] Le loro particelle sono attratte l'una dall'altra da una certa forza che al contatto immediato è estremamente forte, a piccole distanze dà origine alle operazioni chimiche sopra menzionate e si estende non lontano dalle particelle senza effetto apprezzabile.

Il problema delle forze di interazione tra atomi diventerà un problema centrale dell'atomismo dopo Newton. Di grande originalità saranno le idee sulle interazioni a distanza del matematico e astronomo dalmata Ruggiero Giuseppe Boscovich (1711-1787). Boscovich insegnò matematica nel Collegium Romanum, fu membro della Royal Society, matematico nell'Università di Pavia, fondatore dell'Osservatorio astronomico di Brera.

Boscovich, fautore di una teoria della materia di derivazione atomistica, condivideva l'idea di Newton di una legge generale dei fenomeni fisici. Riteneva che la materia fosse costituita da particelle puntiformi ed indivisibili tra le quali si esercitava una forza di tipo attrattivo a grandi distanze e di tipo repulsivo a piccolissime distanze. Questa forza aveva un andamento di tipo oscillante in funzione della distanza. A una certa distanza passava per zero, diveniva repulsiva al diminuire della distanza, diveniva poi di nuovo zero e poi attrattiva finché diveniva di nuovo repulsiva fino all'infinito per rendere impossibile il contatto diretto tra due particelle. L'equilibrio tra forze attrattive e repulsive rendeva possibile l'esistenza di particelle non infinitesimali. L'idea di forze attrattive e repulsive era estesa anche alle particelle di luce.

## L'ATOMO DEI CHIMICI

8.1 *Robert Boyle e l'alba della chimica*

Come abbiamo già visto nel capitolo precedente, nel XVI e nella prima parte del XVII secolo si è verificato un notevole sviluppo di pratiche chimiche di laboratorio, sviluppo che ha dato l'avvio a un graduale affrancamento della chimica dall'alchimia (Holmes, Levere 2000; Abbri 1980 2000a). Erano pratiche del tipo che, con linguaggio moderno, potremmo dire di analisi e preparazione per via umida, cioè di pratiche di laboratorio che agivano su materiali visibili e facilmente caratterizzabili per aspetto, odore, colore, densità. Altrettanto si poteva dire per i prodotti delle trasformazioni chimiche. Nella pratica iatrochimica, intesa principalmente per l'ottenimento di rimedi terapeutici, si era già affermata la necessità di una conduzione in termini quantitativi delle reazioni di estrazione e trasformazione per assicurare una riproducibilità dei farmaci risultanti e della loro efficacia terapeutica. Ma rimanevano due elementi di fondo che rallentavano il decollo di una vera dimensione quantitativa della nascente chimica. Da un lato, le nuove conoscenze sperimentali sembravano poter avere una solida base interpretativa solo in termini di teorie atomiche o corpuscolari. Ma questo era reso complesso dalla mole enorme di dati che si andavano accumulando. D'altra parte, era sempre vivo un ricorso ai concetti di qualità, aristotelici o paracelsiani, che apparivano più semplici sfuggendo a precise verifiche sperimentali di un qualche genere.

Una crescente attenzione era nel frattempo stata rivolta all'aria, uno dei quattro elementi aristotelici. Alcuni esperimenti, come quelli di Van Helmont, avevano cominciato a mettere in dubbio la natura dell'aria come elemento, dubbi che erano aumentati con l'osservazione di altre arie, o gas. Ma si trattava di osservazioni preliminari qualitative a cui si

aggiungevano le osservazioni che l'aria era indispensabile per la respirazione e la combustione. C'era anche la percezione che l'aria avesse una natura composita nel senso che solo una parte, o una componente, dell'aria era in realtà necessaria in questi processi. Queste osservazioni qualitative ponevano nuovi problemi in quanto i protochimici, o chimisti, non avevano a disposizione le tecniche necessarie per raccogliere e manipolare le arie in recipienti chiusi. Si avevano addirittura dubbi sulla possibilità di raccogliere i gas a causa della loro natura caotica.

In questo contesto (Clericuzio 2000; Califano 2010; Leicester 1971; Partington 1939) si inserisce l'opera innovatrice di Robert Boyle (1627-1691) (Boas 1952 1958; Kuhn 1952). Dopo una educazione iniziale e in forma privata, Boyle viaggiò per l'Europa, inclusa l'Italia. Nel 1649 Boyle si costruì un laboratorio scientifico proprio iniziando il suo interesse nella ricerca sperimentale alla quale si dedicherà tutta la vita, anche dopo il suo trasferimento a Londra e poi a Oxford, dove si unì a un gruppo di filosofi naturali con i quali contribuì a fondare la Royal Society.

Boyle è considerato l'iniziatore della chimica moderna per le sue ricerche e per il suo approccio metodologico, ma i progressi saranno lenti e Boyle rimane pur sempre un uomo del suo tempo. Boyle era ancora un alchimista che credeva nella trasmutazione e riteneva che i metalli fossero dei composti e non degli elementi. Boyle era in contatto con Isaac Newton che era informato sui suoi esperimenti. In una lettera al Presidente della Royal Academy, Henry Oldenburg, Newton raccomandava che Boyle non rendesse noti i risultati delle sue ricerche alchemiche alla gente perché:

Possono essere un'apertura su qualcosa di più nobile, da non comunicare senza immensi danni al volgo se ci dovesse essere qualche verità negli scrittori ermetici, quindi non ho dubbi che la grande saggezza del nobile autore lo spingerà al silenzio fino a quando non abbia chiaro su quali conseguenze la cosa possa avere per sua esperienza, o per giudizio di qualche altro (cioè di qualche vero filosofo ermetico), infatti ci sono altre cose oltre alla trasmutazione dei metalli (a meno che questi grandi simulatori non si vantino di cose che nessuno a parte loro capisce).

Al contrario di tutto questo, Boyle era convinto non solo della necessità di un approccio sperimentale alla chimica, e quindi alla scienza in generale, ma anche della necessità che i risultati di laboratorio fossero resi pubblici in ogni dettaglio quantitativo, in modo da poter essere verificati. Nella concezione di Boyle prima venivano gli esperimenti, i quali potevano poi essere interpretati o razionalizzati in termini di teo-

rie generali, in contrasto con la procedura comune degli iatrochimici i quali cercavano una eventuale convalida delle loro esperienze in termini dei principi certi definiti dai *tria prima*, che non erano in discussione.

Una espressione dell'approccio scientifico di Boyle possiamo ritrovare interpretando il titolo della sua opera più importante e più famosa, *The Sceptical Chymist* che porta il sottotitolo *Chymico-Physical Doubts and Paradoxes* (Figura 39). Lo scetticismo che viene menzionato nel sottotitolo non è uno scetticismo filosofico generale riguardo ai processi cognitivi ma si riferisce al rifiuto di ipotesi o teorie che non siano supportate da dati sperimentali precisi. Boyle fu infatti il primo a presentare indagini chimiche basate su esperimenti attentamente controllati e descritti in ogni dettaglio e interpretati in termini particellari.

La teoria atomistica di Boyle era già stata delineata in altre opere, tra cui *New Experiments Physico-mechanical, Touching the spring of air and its effects*. Boyle è stato tra i primi a trovare il modo di manipolare e studiare i gas, in particolare l'aria, come precursore della chimica pneumatica.

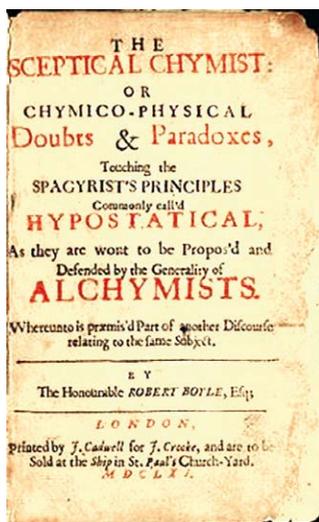


Figura 39 – *The Sceptical Chymist* di Robert Boyle, 1661.

Come abbiamo visto, la pompa pneumatica era stata inventata da Otto von Guericke. La pompa ad aria fu perfezionata da Boyle rendendola, con l'aiuto di Robert Hooke (1635-1703), suo assistente e abile sperimentatore, maneggevole ed efficiente. Con questa nuova versione della pompa Boyle riuscì a misurare il volume dell'aria a pressioni più alte e

più basse della pressione atmosferica, dimostrando la proporzionalità inversa tra pressione  $P$  e volume  $V$ . L'andamento ( $PV = costante$ ) è noto come *legge di Boyle e Mariotte*, in quanto fu ulteriormente studiato da Edme Mariotte (1620-1684) con la specificazione che la costanza del prodotto pressione-volume è valida a temperatura costante (Figura 40).

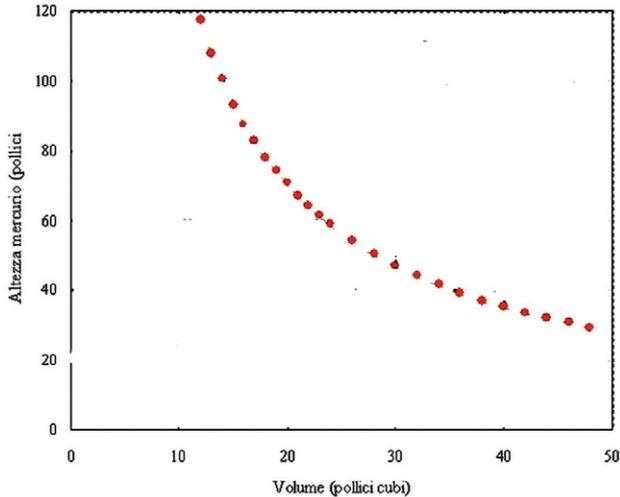


Figura 40 – Rappresentazione grafica di pressione e volume dagli esperimenti di Boyle.

Riprendendo le vecchie idee di Erone di Alessandria, la legge venne semplicemente interpretata da Boyle assumendo che il gas fosse costituito da particelle che si respingono reciprocamente (elasticità dell'aria). Più tardi, Newton dimostrerà che la legge poteva essere dedotta matematicamente partendo dall'ipotesi atomica e assumendo che la pressione fosse dovuta alla repulsione tra le particelle del gas.

Nella concezione di Boyle esiste una materia primordiale divisibile in corpuscoli impenetrabili, *prima naturalia*. I corpuscoli di Boyle sono in principio ancora divisibili ma in pratica questo non accade per la loro dimensione estremamente ridotta. I corpuscoli sono caratterizzati da forma, dimensione e moto. Il moto dei corpuscoli non è considerato come una proprietà innata ma è assegnato da Dio al momento della creazione. I corpuscoli si aggregano in concrezioni di primo tipo (i corrispettivi delle molecole) che si uniscono poi a formare i corpi visibili le cui proprietà sensibili sono determinate dalla disposizione reciproca dei corpuscoli

(una anticipazione dell'isomeria?), oltre che dalla forma e dal movimento. Le concrezioni di corpuscoli mantengono una loro individualità che permane nelle reazioni chimiche. Una dimostrazione sperimentale di questa permanenza era trovata da Boyle nell'osservazione che, ad esempio, dopo le trasformazioni del salnitro (nitrato di potassio) con vari reagenti lo stesso salnitro poteva essere recuperato tal quale attraverso altre reazioni.

Sulla base del suo approccio sperimentale, Boyle riteneva la nascente chimica non più come un semplice, seppur utilissimo, strumento per la preparazione di farmaci o di altre sostanze utili ma come una chiave primaria per la comprensione della natura del mondo fisico. La fiducia nel metodo sperimentale porta Boyle a considerare l'elemento come una sostanza non ulteriormente decomponibile con mezzi chimici. Il numero degli elementi era limitato ma non necessariamente piccolo.

Negli esperimenti di calcinazione dei metalli Boyle osservò che si verifica un aumento di peso del metallo, aumento che egli attribuì all'assorbimento di particelle di fuoco. In base a questi esperimenti, Boyle si rese conto che nella combustione veniva assorbita una frazione dell'aria. Secondo Boyle l'aria era costituita da una parte di vapore acqueo, una parte che veniva assorbita nella combustione e una terza parte di particelle responsabili dell'elasticità dell'aria. La natura composita dell'aria risultava oltre che dagli studi sulla combustione e sulla calcinazione anche dagli esperimenti sulla respirazione e sulla propagazione del suono.

Gli studi di Boyle sulla solubilità dei gas in acqua furono molto importanti in quanto consentirono una chiara distinzione tra miscele e composti. Boyle dimostrò che, aumentando la pressione, un gas poteva essere disciolto in acqua ma manteneva la sua identità nella soluzione e poteva, infatti, essere recuperato diminuendo la pressione.

Anche se le innovazioni di Boyle sono state fondamentali per la chimica e l'atomismo, i progressi della disciplina saranno gradualmente per la mancanza di un quadro teorico condiviso dalla comunità chimica, nella quale ognuno sembrava avere un proprio linguaggio e un particolare sistema di interpretazione. Le tecniche di laboratorio erano in fase di perfezionamento ma solo nel 1700 si assisterà a un'esplosione di nuove scoperte di laboratorio. Da un lato le tecniche sperimentali di analisi qualitativa e quantitativa diventeranno sempre più accurate, con estensione anche alle reazioni per via umida, e dall'altro lato, e di conseguenza, verranno continuamente scoperti nuovi composti, nuovi elementi e nuove reazioni. Tra i nuovi metalli che vengono scoperti tra il 1735 e il 1798 ricordiamo cobalto, piombo, bismuto, platino, zinco, nichel, manganese, molibdeno, cromo. Nel frattempo, le

esperienze di G. F. Rouelle (1703-1770) sulle reazioni tra acidi e basi con la formazione di sali acidi, sali basici e sali neutri smantelleranno il vecchio concetto alchemico di sale. Di particolare rilevanza sarà la scoperta di nuovi gas come azoto, cloro, idrogeno, ossigeno perché questo porterà al concetto di gas come veri e propri individui chimici, con proprietà specifiche, e all'attribuzione anche all'aria di una funzione chimica. Il grande sviluppo, soprattutto in Inghilterra, della chimica pneumatica costituirà un passo fondamentale.

## 8.2 *Il flogisto: teoria con le gambe corte*

Gli sviluppi della chimica nei secoli XVII e XVIII, a cui si accennava sopra, erano collegati allo sviluppo economico connesso con l'industria tessile, dei metalli, del vetro e della ceramica, dei minerali e dei mezzi di trasporto. Un segnale di questi sviluppi possiamo trovare nella sempre più pressante richiesta di competenze tecniche e, a questo fine, la chimica cominciava ad essere insegnata nelle università, particolarmente nelle facoltà di medicina, e il termine chimica era ormai entrato nel linguaggio dei *dottori*. Questo stato di fatto richiedeva anche la formulazione di un modello teorico interpretativo della enorme quantità di dati sperimentali o empirici che si andava accumulando. Per oltre un secolo la teoria dominante fu la teoria del flogisto (Leicester 1971; Califano 2010; Abbri 1980; Metzger 1926, 1927).

La storia del flogisto ha avuto inizio con Johann Joachim Becher (1635-1682), un personaggio dai molteplici interessi, alchimista, medico e chimico, che si interessò anche attivamente della pubblica amministrazione e di economia politica in una visione di dirigismo dello stato (*cameralismo*). In una seconda fase della sua attività Becher si dedicò attivamente alla chimica e fu seguace di Paracelso e vitalista. Becher fu uno dei primi professori ufficiali di chimica in Germania.

In Becher, come nei successivi sviluppi della teoria del flogisto, troviamo l'accettazione di una struttura particellare della materia, simile a quella di Boyle. Le particelle elementari, o atomi, si uniscono in primi aggregati (*prima mixta*) dai quali non possono essere separati e le loro proprietà si evincono solo indirettamente da quelle dei composti finali. I *prima mixta* si aggregano ulteriormente nelle strutture dei composti con proprietà percepibili. Riguardo alla natura e al numero degli elementi primi, Becher era in disaccordo con il suo maestro Paracelso e sviluppò una forma di alchimia da cui nacque in breve la teoria del flogisto. Secondo Becher aria e acqua non erano elementi. L'aria era solo

un mezzo, un ambiente, in cui avvenivano le reazioni senza una sua partecipazione diretta alle stesse. L'acqua, invece, era una sostanza con sue specifiche proprietà. Nella concezione di Becher i *tria prima* di Paracelso (*zolfo*, *mercurio* e *sale*, che erano i corrispondenti di anima, spirito e corpo) vengono sostituiti da tre tipi di terra: *terra fluida* o mercuriale, *terra pinguis* o grassa e *terra lapidea* o vitrescibile. La terra mercuriale impartiva la fluidità, volatilità e metallicità alle sostanze, la terra grassa o infiammabile produceva gli oli e i combustibili e la terra vitrescibile, ossia riducibile in vetro, rappresentava il principio della fusibilità.

Il testo più noto di Becher, *Physica subterranea* del 1669, nel quale per la prima volta si parlava di un principio materiale incombustibile, fu pubblicato dal suo allievo Georg Ernst Stahl (1659-1734), medico, fisico e chimico, che trasformò la *terra pinguis* di Becher nel *flogisto* (dal greco *phlogistos* cioè 'che è dato a fuoco'). La teoria del flogisto permetteva di razionalizzare, sia pure con le incongruenze che vedremo, i processi di combustione e di calcinazione. Nella combustione il carbone (o la legna), ricco in flogisto, quando viene scaldato e bruciato emette flogisto nell'aria lasciando un residuo di ceneri. La perdita di flogisto corrisponde, in questo caso correttamente, ad una perdita di peso. Secondo questa visione bruciare corrisponde, quindi, a emettere flogisto.

Più complessa era la questione della calcinazione. La teoria del flogisto dava anche una spiegazione del processo di calcinazione in cui una calce (un ossido metallico) veniva trasformata in metallo. Il carbone bruciando cedeva il suo flogisto alla calce che si trasformava in metallo. Però la calce acquisendo il flogisto avrebbe dovuto aumentare di peso contrariamente a quello che si osservava sperimentalmente. Il processo inverso, cioè la trasformazione di un metallo in calce per arrostitimento, è rappresentato, secondo la teoria del flogisto, dallo schema (a) mentre la visione attuale del processo di ossidazione corrisponde allo schema (b):

- a) metallo  $\Rightarrow$  calce + flogisto
- b) metallo + ossigeno  $\Rightarrow$  calce

Per spiegare questa contraddizione si ammise che talora il flogisto potesse avere peso negativo. Jean-Pierre Chardenon (1714-1769), un chimico di Digione, aveva infatti sostenuto che il peso del flogisto fosse diverso da quello degli altri corpi e potesse essere anche negativo. Louis-Bernard Guyton de Morveau (1737-1816) riprese le idee di Chardenon e decise di dimostrare sperimentalmente che la diminuzione di peso, passando dalla calce al metallo, fosse dovuta al peso negativo del flogisto

emesso. In un articolo intitolato *Dissertation sur le Phlogistique considéré comme corp grave*, presentato all'Accademia di Digione nel 1770 e pubblicato nel 1772, propose l'esperimento seguente: due pezzi di piombo dello stesso peso posti nei due piatti di una bilancia si trovano in perfetto equilibrio. Se a uno dei due piatti si attacca un tappo di sughero il piatto si abbassa. Ma se il tutto viene immerso in acqua, allora il piatto con il sughero si innalza mentre l'altro si abbassa. Ecco quindi, concludeva Guyton, come una aggiunta di materia può far diminuire il peso!

Indipendentemente da queste spericolate dimostrazioni e assunzioni, la teoria del flogisto fu generalmente accettata dalla comunità scientifica per oltre un secolo perché rispondeva ad una osservazione qualitativa assai intuitiva e semplice, cioè che durante una reazione chimica il reagente acquista o perde qualcosa, qualcosa che si trasferisce o viene sottratto al prodotto. Anche se il bilancio ponderale non sempre poteva essere rispettato correttamente, la cosa poteva non avere importanza perché, nella sostanza, il flogisto era elemento *sui generis* nel senso che poteva essere considerato, piuttosto che un elemento vero e proprio, un principio generale astratto con proprietà che si adattavano caso per caso, cioè a tipologie di reazioni diverse da combustione e calcinazione. Del resto, non era ancora acquisito il concetto che una sostanza chimica, o un elemento, dovesse essere una entità fisica con sue caratteristiche materiali come il peso.

La teoria del flogisto si concentrava sul mondo inorganico come nella tradizione metallurgica a cui Stahl era legato. La semplice osservazione che la fiamma tende a salire durante una combustione rendeva intuitivo ammettere che il flogisto si accumulasse nell'aria. Poiché le piante (e.g. il legno) sono combustibili, e quindi ricche di flogisto, ne conseguiva che le piante assorbivano flogisto dall'aria e poi lo distribuivano in tutti gli esseri viventi. Per il resto, il mondo organico tendeva a sottrarsi alle analisi della teoria del flogisto ritenendo che esso fosse soggetto a una *vis vitalis* che presiedeva alle trasformazioni (chimiche) negli organismi viventi.

Anche se, come detto sopra, la teoria del flogisto fu dominante in tutto il XVIII secolo, non mancarono voci di dissenso, tra le quali quella di Herman Boerhaave (1668-1738), medico e chimico e botanico olandese, strenuo sostenitore del metodo sperimentale e contrario all'ipotesi che il flogisto, o un qualsiasi elemento, potesse avere peso negativo. Ancora più esplicita fu l'opposizione alla teoria del flogisto di Michail Vasilevic Lomonosov (1711-1765), scrittore, astronomo e chimico nella Russia zarista. Lomonosov aveva intuito che le sostanze bruciando

si combinavano con una parte dell'aria e aveva anticipato la legge della conservazione della massa di Lavoisier come legge universale:

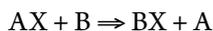
Tutti i mutamenti in natura sono tali che tutto ciò che viene tolto ad un oggetto viene aggiunto ad un altro. Quindi, se la quantità di materia diminuisce in un luogo, aumenta in un altro,

una legge che rendeva impossibile concepire un elemento come una sostanza con peso negativo.

### 8.3 *L'affinità chimica*

Il problema del meccanismo secondo il quale le sostanze del mondo fisico si trasformano nel modo che osserviamo era già stato posto fin dagli inizi della filosofia naturale. In particolare, i primi atomisti avevano attribuito la unione degli atomi alla diversa forma degli atomi stessi che potevano, alternativamente, incastrarsi l'uno con l'altro o scivolare uno sull'altro. Era, quindi, la forma degli atomi che determinava una affinità ad unirsi tra di loro. Il concetto di affinità veniva, in generale, ad assumere una valenza antropomorfa nella forma di amore o odio nelle formule *il simile cerca il simile* o, all'opposto, della unione degli opposti. L'affinità tra elementi o sostanze chimiche rimase una questione sempre intesa qualitativamente, o in forma animistica, per tutta la storia della filosofia naturale e dell'alchimia.

Nel periodo storico che stiamo ora considerando un nuovo termine di riferimento nella discussione dell'affinità (Kim 2003) tra particelle elementari e tra sostanze in generale è il concetto di forze di attrazione tra particelle introdotto da Newton. Secondo Newton, quando un metallo B sposta un altro metallo A da un composto AX secondo lo schema



la trasformazione è dovuta al fatto che la forza di attrazione tra il residuo X e il metallo B è più forte di quella con il metallo A. In questo modo il concetto di affinità perde completamente il suo carattere animistico di simpatia e antipatia. Tuttavia, non essendo nota la natura delle forze di attrazione tra atomi e molecole, lo studio sperimentale delle reazioni chimiche, per quanto riguardava le affinità, poteva essere condotto solo in termini classificatori. Ad esempio, considerando una serie di reazioni di una sostanza con reagenti di una certa tipologia (come di un metallo con una serie di acidi) si potevano classifica-

re i vari reagenti secondo una affinità decrescente definita in termini della velocità di reazione o del calore sviluppato.

Etienne Francois Geoffroy (1673-1731), maestro farmacista e chimico, in base a questi criteri costruì la prima tabella di affinità (*Tabula affinitatum*), presentata nel 1717 alla Académie di Parigi. La tabella consisteva di 16 colonne, ognuna contrassegnata in alto dal simbolo di un acido, di un alcali o di un metallo, e riportava i simboli delle sostanze che con essi si potevano combinare in ordine decrescente di facilità di combinazione. I simboli e la nomenclatura (di sapore alchemico) erano, naturalmente, quelli dell'epoca e Geoffroy non usava i termini di attrazione o affinità ma il termine *rapporti di combinazione*. Scopo dichiarato della tabella era di essere uno strumento per far ordine nelle informazioni chimiche disponibili e per stimolare ulteriori esperimenti.

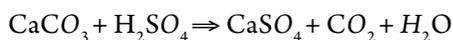
Le *Tabulae affinitatum* si moltiplicarono e si estesero nel corso del tempo ad imitazione di quella di Geoffroy. Nella *Tabula affinitatum* ordinata nel 1766 dal farmacista *Franz Hubert Hoefer* per la Spezieria granducale di Firenze (vedi Figura 41), vi è una diciassettesima colonna rispetto a quella di Geoffroy.



Figura 41 – *Tabula affinitatum* © Museo Galileo, Firenze.

Torbern Olof Bergman (1735-1784), professore di matematica e fisica e poi di chimica all'Università di Uppsala e studioso di mineralogia, è considerato il fondatore della chimica analitica. Bergman si interessò anche di affinità chimica e sulla base di un gran numero di esperimenti pubblicò nel 1775 delle *Tabulae affinitatum* per 58 sostanze. Secondo Bergman, l'interazione tra gli atomi era una forma modificata e selettiva dell'attrazione universale di Newton e dipendeva da forma e dimensioni delle particelle. Secondo Bergman l'interazione tra le particelle dipendeva anche dallo stato di aggregazione (in soluzione o nel solido) e dalla temperatura.

Il trattato di Bergman, *Disquisitio de attractionibus electivis*, è stato di ispirazione per il titolo del famoso romanzo di Wolfgang Goethe, *Le affinità elettive* (Goethe 2010). Il trattato di Bergman discute in particolare la reazione di doppia sostituzione



in cui, avendo il calcio (Ca) maggiore affinità con lo ione solfato che con lo ione carbonato, avviene la trasformazione da carbonato di calcio a solfato di calcio. Nel romanzo di Goethe l'affinità chimica diviene una parabola dei destini dei protagonisti del romanzo e, più in generale, dei destini umani (Schettino 2014):

Non è tanto difficile ravvisare in queste forme semplici le persone che abbiamo conosciuto. Ma soprattutto, pensando a tali fenomeni, vengono in mente diversi ambienti in cui si è vissuto. La somiglianza più vistosa con le materie inanimate ce l'hanno però le masse che si contrappongono in seno alla società, le classi, le professioni, la nobiltà e il terzo stato, i militari e i civili.

L'animismo che Goethe vede nell'affinità chimica ci mostra come, con il suo processo di maturazione, la nuova chimica entri nelle fonti di ispirazione degli artisti e, quindi, anche nell'immaginario popolare.

#### 8.4 *La chimica pneumatica*

L'inizio della tecnologia dei gas, e più specificamente dell'aria, può essere considerata come una ripresa della *Pneumatica* di Erone di Alessandria e della tradizione tecnica e meccanica del periodo alessandrino. Ma l'aria rimarrà per molti secoli un *elemento* chimicamente indefinito, una sostanza che ospita le reazioni alchemiche e chimiche senza partecipare direttamente. Le proprietà dell'aria, e successivamente delle arie, sembravano sfuggi-

re all'osservazione e allo studio diretto fino a quando Boyle non troverà il modo per raccogliere in modo separato. È solo da quel momento in poi che lo studio scientifico delle sostanze gassose inizierà in maniera sistematica portando allo smantellamento di due capisaldi della filosofia naturale aristotelica, cioè quelli dell'aria e dell'acqua come elementi.

La cosiddetta chimica pneumatica si svilupperà principalmente in Inghilterra e l'iniziatore può essere considerato Stephen Hales (1677-1761), fisiologo e patologo. Hales studiò in particolare la traspirazione delle piante, dimostrando che l'aria entra nelle piante anche attraverso le foglie, e anticipò anche una prima idea della fotosintesi, cioè che le piante usassero la luce come fonte di energia per le trasformazioni biochimiche. A Hales si deve anche l'invenzione del bagno idropneumatico, un dispositivo per la raccolta dei gas, che fu importante per i successivi sviluppi della chimica pneumatica. Studiò anche la reazione nitrato di potassio  $\Rightarrow$  nitrito di potassio + ossigeno scoprendo che nella reazione si sviluppava un'aria (un gas), ma non riuscì a identificarne la natura come ossigeno.

Joseph Black (1728-1799), professore di chimica, anatomia e medicina a Edinburgo e poi a Glasgow, può essere considerato l'iniziatore della termodinamica per tre scoperte importanti: l'invenzione del calorimetro, la definizione del calore specifico e del calore latente. Lavorando per la ricerca di rimedi contro la gotta, Black scoprì che, per riscaldamento ad alta temperatura, il carbonato di calcio si trasformava in ossido di calcio sviluppando un gas che chiamò *aria fissa* (anidride carbonica), un'aria che era prodotta anche nella respirazione. In questa aria una candela non bruciava e in essa piccoli animali morivano. Black incaricò il suo allievo Daniel Rutherford (1749-1819) di studiare le proprietà di questa aria. Rutherford purificò l'aria atmosferica facendo prima bruciare una candela, poi facendo respirare un topo finché non morì e facendo, infine, bruciare del fosforo. Fece passare l'aria rimanente attraverso una soluzione alcalina che assorbiva l'*aria fissa* e trovò che nell'aria così purificata la candela non bruciava e un topo non respirava. Questo risultato fu interpretato in termini della teoria del flogisto come saturazione da flogisto e l'aria risultante fu chiamata *aria flogisticata*. Questo gas sarà poi identificato come il nostro azoto. Da queste esperienze e dall'osservazione che nella trasformazione del carbonato di calcio in ossido e *aria fissa* il peso totale si conservava e che era possibile anche la reazione inversa, Rutherford dedusse che l'aria non era un elemento ma una miscela di più arie. Questa conclusione fu poi confermata da analoghi esperimenti sulla magnesia alba (carbonato basico di magnesio).

Un approfondito studio dell'aria fu eseguito da Henri Cavendish (1731-1810). Cavendish osservò che facendo reagire un metallo, come il ferro o lo zinco, con un acido si sviluppava un gas che chiamò *aria infiammabile* e per primo realizzò che doveva trattarsi di un nuovo elemento (l'idrogeno). Cavendish eseguì misure molto accurate sull'aria atmosferica e determinò il peso di uguali volumi di varie arie trovando che l'*aria flogisticata* (azoto) e l'*aria deflogisticata* (ossigeno) erano in un rapporto di peso 4:1. Nel 1784 Cavendish ripeté un esperimento eseguito in precedenza da John Wortire (1725-1810), dal francese Pierre Joseph Macquer (1718-1784) e successivamente da Joseph Priestley. Facendo esplodere con una scintilla elettrica una miscela di *aria deflogisticata* e di *aria infiammabile* in un recipiente chiuso si formavano goccioline di acqua la quale non era, quindi, un elemento ma un composto.

Un importante contributo alla chimica pneumatica si deve a Joseph Priestley (1733-1804), pastore calvinista, filosofo e, dopo la sua conoscenza e amicizia con *Benjamin Franklin*, appassionato cultore di scienza (Beretta 1993). Durante la visita a una fabbrica di birra Priestley notò una gran quantità di aria che sembrava galleggiare e che identificò come *aria fissa*. Questa risultò di densità superiore a quella dell'aria. Mise a punto un metodo per ottenere *aria fissa* e notò che sciolta in acqua dava un'effervescenza uguale a quella delle acque minerali.

Priestley perfezionò le tecniche di preparazione, raccolta e conservazione dei gas e isolò due nuovi gas, l'*aria salina* (acido cloridrico) e l'*aria alcalina volatile* (ammoniaca); dalla mescolanza di queste due arie ottenne una polvere bianca di cloruro di ammonio. Facendo reagire l'acido nitrico diluito ottenne un nuovo gas, l'*aria salnitrosa* (ossido di azoto NO) che a contatto con l'aria assumeva una colorazione rossa trasformandosi in biossido di azoto (NO<sub>2</sub>). Successivamente, per riscaldamento di fili di ferro in acido nitrico ottenne un'*aria nitrosa deflogisticata* (il protossido di azoto N<sub>2</sub>O) che diventerà famoso come *gas esilarante* per lo stato di ebbrezza che procurava e che sarà il primo anestetico usato in chirurgia.

La scoperta più importante di Priestley risale al 1774 quando, focalizzando con una lente ustoria la luce solare sulla *calce rossa di mercurio* (ossido di mercurio, HgO), ottenne un gas che raccolse in varie riprese. Nella nuova aria la fiamma si alimentava in maniera molto più brillante che nell'aria normale e la respirazione di un topo era molto più agevole. Priestley chiamò il nuovo gas *aria deflogisticata* credendo che si trattasse di aria separata dal flogisto. Così Priestley descrive le proprietà della nuova aria:

La sensazione prodotta sulla mia lingua non era molto diversa da quella dell'aria comune, ma ebbi l'impressione che il mio torace fosse particolarmente leggero e piacevole per qualche tempo dopo. Chi può dirlo, col tempo quest'aria pura potrebbe divenire un articolo di lusso, alla moda. Finora solo due topi e io stesso abbiamo avuto il privilegio di respirarla [...] ho scoperto un'aria cinque o sei volte migliore dell'aria comune.

La chimica pneumatica non si sviluppò solo in Inghilterra. Carl Wilhelm Scheele (1744-1786), farmacista e abile sperimentatore svedese, produsse la stessa *aria deflogisticata* di Priestley, che chiamò *aria di fuoco*, per decomposizione a caldo dell'ossido di mercurio (HgO), del biossido di manganese e del carbonato di argento (Salvi 2021). L'ottenimento dell'ossigeno da parte di Scheele ha preceduto quello di Priestley e di Lavoisier ma i risultati ottenuti da Scheele sono stati pubblicati in ritardo ed è rimasta aperta la questione della priorità della scoperta tra questi tre scienziati, questione sulla quale ritorneremo in seguito.

### 8.5 Lavoisier e il trattato elementare di chimica

Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794), parigino, studiò chimica, botanica, geologia, astronomia e matematica conseguendo il baccalaureato in legge. Ben presto si rese conto del suo reale interesse per la scienza a cui si dedicò con passione. Le lezioni di Rouelle al Jardin du Roi gli fecero scoprire i grandi problemi della chimica del XVIII secolo: natura degli elementi, l'acidità, i gas e soprattutto la combustione (Califano, Schettino 2017; Bensarde-Vincent 1993; Beretta 1993). Da allora in poi la chimica diventò l'attività centrale della sua ricerca. Nel 1768 divenne assistente chimico all'Académie. Nello stesso anno acquistò una quota della Ferme Générale, corporazione che riscuoteva le tasse doganali. A causa degli abusi, i membri della Ferme erano malvisti dalla popolazione e molti, e tra questi anche Lavoisier, ne pagarono le conseguenze durante la rivoluzione.

Nel 1771 Lavoisier sposò *Marie-Anne-Pierrette Paulze*, figlia tredicenne di uno dei dirigenti della corporazione, che si rivelò una collaboratrice preziosa. Per aiutare il marito studiò chimica, disegno, pittura e inglese, per tradurre testi di chimica. Svolsse un lavoro costante di appoggio e di stimolo e fu di enorme aiuto alla carriera di Lavoisier. Realizzò per lui e per i collaboratori un gran numero di disegni e di incisioni di strumenti di laboratorio. Il suo salotto, aperto due gior-

ni alla settimana, ospitava scienziati che venivano a discutere le nuove teorie chimiche e lei stessa fu editrice delle memorie di Lavoisier.

Il primo grande contributo di Lavoisier alla chimica è stata l'affermazione, come principio generale, della legge di conservazione della massa. A ciò era arrivato attraverso accurate misure ponderali di reazioni chimiche confinate in recipienti chiusi, in modo che anche le arie sviluppate durante la reazione fossero soggette alla pesata. La legge di conservazione della massa, generalmente attribuita a Lavoisier, era nota già da moltissimo tempo e già Empedocle, Anassagora e Democrito avevano sostenuto che niente si crea e niente si distrugge. Lo stesso principio era in seguito stato riaffermato da diversi filosofi e scienziati nel corso del XVII e XVIII secolo e tra questi si possono menzionare Bacon nel 1620, Jean Rey nel 1630, l'abate Edme Mariotte nel 1668, Isaac Newton nel 1704 e Jean Pierre Chardenon nel 1764. La legge di conservazione della massa era stata esplicitamente formulata dal grande scienziato russo *Lomonosov* in una lettera del 1748<sup>1</sup>:

Tutti i mutamenti in natura sono tali che tutto ciò che viene tolto ad un oggetto viene aggiunto ad un altro. Quindi, se la quantità di materia diminuisce in un luogo, aumenta in un altro. Questa legge universale della natura comprende anche le leggi del movimento, perché un oggetto che ne muova altri mediante la sua forza, in realtà impartisce ad un altro oggetto la forza che esso perde.

*Giacomo Leopardi*, che si era interessato alla chimica e che ben conosceva i lavori di Lavoisier, così descrive il principio nel *Frammento apocrifo di Stratone di Lampsaco*:

Ora noi veggiamo che la materia non si accresce mai di una eziandio menoma quantità, niuna anco menoma parte della materia si perde, in guisa che essa materia non è sottoposta a perire. [...] La materia universale [...] ha in sé per natura una o più forze sue proprie, che l'agitano e muovono in diversissime guise continuamente. [...] Questa forza [...] della materia, muovendola, come abbiam detto, e agitandola di continuo forma di essa materia innumerevoli creature.

L'attribuzione della legge a Lavoisier, come viene generalmente riconosciuto, è dipesa solo dalla sua abilità nel valorizzare le proprie ricerche sperimentali.

<sup>1</sup> Parte di questa citazione è già stata riportata in precedenza.

All'inizio degli anni 1770 Lavoisier si interessò dell'analisi delle acque di Parigi. All'epoca c'era ancora chi credeva che fosse possibile trasformare un elemento in un altro, in particolare acqua in terra. Anche se pochi erano disposti a credere realmente alla trasmutazione, era pur sempre necessario che qualcuno ne dimostrasse definitivamente l'impossibilità.

Lavoisier fece costruire un distillatore di vetro, un pellicano, così detto per via dei due bracci laterali simili ad ali di uccello sagomati in modo tale che durante la distillazione l'acqua rifluisse di nuovo nel bollitore senza perderne sotto forma di vapore (Figura 42).

L'apparecchio fu riempito di acqua piovana, accuratamente pesata, che fu distillata per 101 giorni. Con una bilancia molto sensibile Lavoisier pesò l'apparecchio e l'acqua in esso contenuta prima e dopo l'esperimento, trovando che il peso era rimasto costante. Al termine dell'esperimento, nel distillatore si era formato un piccolo residuo solido. Evaporata l'acqua, Lavoisier trovò una piccolissima differenza di 0,1590 grammi tra il peso del residuo solido e quello perso dall'apparecchio durante l'esperimento. Anche se la differenza non era esattamente zero, Lavoisier non ebbe dubbi nel sostenere che il residuo era materiale estratto dal vetro durante l'ebollizione e che, quindi, l'idea che l'acqua si trasformasse in terra era errata.

Nel 1770 Lavoisier riferì all'Académie i risultati delle sue misure e, nello stesso periodo, presentò le sue idee sulla trasformazione dell'acqua liquida in vapore arrivando alla conclusione generale che il calore, combinandosi con i liquidi, li faceva espandere, trasformandoli in vapore.

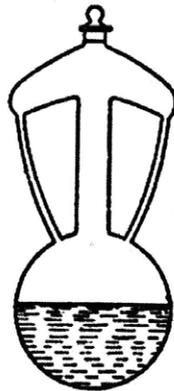


Figura 42 – Il pellicano di Lavoisier.

Lavoisier osservò che i corpi solidi, come il vetro o i metalli, si dilatano uniformemente quando si passa dalla temperatura del ghiaccio fondente fino a quella dell'acqua bollente. La dilatabilità aumenta in generale e in grandissima proporzione quando si passa dallo stato solido allo stato liquido; sembrerebbe quindi che esista una specie di relazione tra l'aumento del contenuto di calore che ha luogo nel cambiamento di stato e l'aumento della dilatabilità. All'inverso, quando si sottraeva calore il vapore perdeva il suo stato espanso e collassava nel liquido o nel solido.

Da giovane anche Lavoisier aveva aderito alla teoria del flogisto, senza prestare attenzione alle contraddizioni della teoria. Nel 1772, leggendo un articolo di Guyton de Morveau sul peso negativo del flogisto, si rese conto che la spiegazione fornita per l'aumento di peso con la calcinazione dei metalli era assurda e che era molto più semplice pensare che fosse l'aria ad attaccarsi al metallo facendone aumentare il peso. La critica di Lavoisier alla teoria del flogisto non partiva da esperimenti eclatanti e spettacolari ma dal collegamento logico di fatti sperimentali diversi, che permetteva una semplice spiegazione comune. Alla fine del 1772 Lavoisier dimostrò che lo zolfo bruciando aumentava di peso e che anche il fosforo si comportava allo stesso modo. Nello stesso periodo scopri, utilizzando una grande lente ustoria, che il litargirio (ossido di piombo,  $PbO$ ) se riscaldato con carbone produceva una grande quantità di *aria*.

Nel XVIII secolo i chimici francesi non si interessavano allo studio della chimica dei gas e continuavano a considerare l'aria come un gas inerte. Per questa ragione Lavoisier era all'oscuro dello sviluppo della chimica pneumatica in Inghilterra e pensava ancora che fosse l'aria nel suo insieme a reagire con i metalli nel processo di calcinazione. Lavoisier non poteva nemmeno sapere che circa vent'anni prima il chimico russo Lomonosov aveva mostrato che riscaldando un metallo in un recipiente chiuso non si notava alcun aumento di peso. Rendendosi conto che l'ignoranza degli sviluppi recenti sui gas rendeva impossibile evitare errori concettuali nel formulare una nuova teoria, Lavoisier dedicò l'intero anno 1773 a studiare i lavori dei chimici pneumatici inglesi che, in buona parte, erano stati tradotti in francese dalla moglie Marie-Anne.

Dopo aver letto i testi dei chimici pneumatici, partendo dall'idea che la calcinazione corrispondesse al fissaggio dell'aria nei metalli, concluse inizialmente che l'*aria fissa* di Black ( $CO_2$ ) fosse responsabile dell'aumento di peso dei metalli nella calcinazione. Questa svista era giustificata dal fatto che, poiché gli ossidi reagendo con carbone producevano *aria fissa* e metallo, era possibile immaginare la reazione

ne inversa, cioè che l'*aria fissa*, reagendo con un metallo, producesse l'ossido e carbone. Nel settembre 1772 Lavoisier venne a conoscenza che a Londra Priestley aveva riferito alla Royal Society che si poteva guarire lo scorbuto facendo bere al paziente acqua impregnata di aria fissa, per cui l'aria fissa sembrava avere proprietà particolari. Questo errore porterà alla scoperta dell'ossigeno.

Nell'ottobre del 1774 Joseph Priestley visitò Parigi e fu invitato a cena a casa Lavoisier, come d'abitudine quando arrivava a Parigi qualche scienziato straniero. Durante la cena Priestley parlò dell'aria di fuoco, scoperta riscaldando l'ossido di mercurio senza aggiunta di carbone, molto più adatta alla combustione dell'aria normale. L'ossido di mercurio si forma facilmente per riscaldamento all'aria del mercurio a 350 gradi, ma se riscaldato oltre i 400 gradi si decompone spontaneamente di nuovo in mercurio e aria di fuoco. Nel XVIII secolo era pratica comune per i chimici ridurre le calci (ossidi) riscaldandole ad alta temperatura con polvere di carbone, mentre Priestley era riuscito ad ottenere lo stesso risultato senza aggiunta di carbone. Priestley non sapeva che, in un angolo remoto della Svezia, il farmacista *Carl Wilhelm Scheele* aveva già isolato l'aria di fuoco per riscaldamento di ossidi, carbonati e nitrati. Resosi conto dell'importanza del racconto di Priestley, nel marzo 1775 Lavoisier rifece in pochi giorni l'esperimento producendo l'ossido dal mercurio metallico che decompose poi ad alta temperatura raccogliendo il gas sviluppato in un bagno idropneumatico e chiamò il gas che si svolgeva dall'ossido di mercurio come *aria pura*.

Lavoisier descrisse l'analisi quantitativa dell'aria e cominciò a mettere in discussione la teoria del flogisto, senza negarne l'esistenza ma facendo solo presente che era possibile spiegare la combustione e la calcinazione in maniera diversa. Nel testo utilizzò ripetutamente l'espressione *aria deflogisticata* spesso alternandola con *aria pura*. In una nuova seduta del 12 novembre chiari con estrema cautela che non presentava una teoria rigorosa ma solo una ipotesi più probabile, meno densa di contraddizioni di quella del flogisto. La teoria presentata da Lavoisier in forma completa nel 1783 non rappresentò pertanto un salto improvviso a un nuovo paradigma della scienza, ma piuttosto una lenta opera di evoluzione concettuale, con continui passi esitanti verso la conclusione finale. Alla fine del 1775 anche Priestley, che aveva letto l'articolo di Lavoisier, pubblicò un libro in cui descriveva il proprio esperimento. Leggendo i lavori di Priestley, Lavoisier si rese conto che la sua *aria pura* aveva la straordinaria qualità di attivare la combustione e facilitare la respirazione animale.

Nel 1781 Lavoisier eseguì l'analisi dell'aria fissa dimostrando che era formata dal 28 per cento di carbonio e dal 72 per cento di ossigeno, valori molto simili a quelli attuali (rispettivamente 27,27 e 72,73).

Durante questo periodo Lavoisier ebbe tempo per riflettere sul nuovo gas che chiamava anche *aria vitale*, giungendo a una formulazione completa della teoria della combustione che espone nella nota *Sur la combustion en général* del 1777. In questo scritto sostenne che i corpi bruciano solo nell'aria vitale e che il peso di aria vitale consumata nella combustione è uguale all'aumento di peso del corpo bruciato. Poiché bruciando nell'aria il carbone si formava l'aria fissa di Black (un debole acido), bruciando il fosforo si formava acido fosforico e bruciando lo zolfo anidride solforosa, che sciolta in acqua dà origine all'acido solforoso, Lavoisier arrivò anche alla conclusione che l'aria vitale fosse generatrice di acidi. Partendo da queste idee nel 1778 pubblicò le *Considerations générales sur la nature des acides*, una teoria degli acidi nella quale sosteneva che l'ossigeno, essendo presente in tutti gli acidi, era la causa dell'acidità (Grand 1972). Per quanto non corretta, questa teoria rappresentava non di meno la prima teoria chimica degli acidi e per lungo tempo restò l'unica accettabile e capace di prevedere la reattività di molti composti chimici. Il punto più debole della teoria degli acidi di Lavoisier era l'impossibilità di spiegare correttamente perché gli acidi sviluppassero idrogeno quando reagivano con i metalli ma non reagendo con gli ossidi. Nel 1790 Lavoisier decise finalmente i nomi per l'aria vitale e per l'aria fissa. Chiamò la prima ossigeno, in greco generatore di acidi, e l'aria flogisticata di Rutherford azoto dal greco *privo di vita*.

La polemica contro il flogisto, iniziata sottovoce e in maniera molto blanda nel 1775, fu portata a termine da Lavoisier nel 1783 quando ormai era sicuro delle sue idee. Nella memoria intitolata *Réflexions sur le phlogistique*, presentata all'Académie il 28 giugno 1777, ma pubblicata solo nel 1783, prese posizione in maniera definitiva contro la teoria del flogisto, con l'obiettivo di dimostrare che si trattava di una sostanza immaginaria, aggiunta da Stahl ai metalli e a tutti i corpi combustibili senza alcuna evidenza sperimentale:

Ma se tutto si spiega in chimica in modo soddisfacente senza ricorrere al flogisto, è infinitamente possibile che questo principio non esista, che sia un ente ipotetico, una supposizione gratuita e in effetti è nei principi di una buona logica di non moltiplicare gli enti senza necessità. Forse avrei potuto fermarmi a queste prove negative e contentarmi di aver provato che ci si rende meglio conto dei fenomeni

senza flogisto che con; ma è giunto il momento che io mi spieghi in maniera più precisa e formale su una opinione che considero un errore funesto per la chimica e che mi sembra ne abbia ritardato il progresso per la cattiva maniera di filosofare che ha introdotto.

Lavoisier insistette sul fatto che il flogisto non era mai stato definito chiaramente, che a volte faceva crescere e a volte diminuire il peso dei corpi, a volte era liberato dal fuoco e a volte era esso stesso fuoco combinato con altri elementi, a volte passava attraverso le pareti dei recipienti e a volte no, spiegava allo stesso tempo la causticità e il suo contrario, era una chimera che non aveva il diritto di inserirsi tra i principi di base della chimica. Lavoisier non si aspettava di veder subito accolte le proprie idee, convinto però che con il tempo la forza degli argomenti avrebbe trionfato.

Per completare la teoria della combustione Lavoisier aveva però bisogno di capire bene che cosa fosse il calore o, come si diceva allora, la materia *igneae*, anche perché i sostenitori della teoria del flogisto non avevano mai chiarito cosa intendessero con questa espressione. Per questa ragione iniziò nel 1777 una serie di esperimenti in collaborazione con il matematico e fisico Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) giungendo a una visione completamente nuova del problema. Gli esperimenti mostravano che quando un liquido evaporava, il recipiente in cui era contenuto si raffreddava. Lavoisier realizzò subito che questo effetto si spiegava ammettendo che il liquido aveva assorbito calore trasformandosi in gas. In questo modo cambiò anche la sua teoria della natura dei gas. A scuola gli era stato insegnato che solo alcuni materiali potevano divenire gassosi. Lavoisier, invece, mostrò che tutte le sostanze possono esistere in ognuna delle tre fasi della materia, solida, liquida o gassosa. Secondo la teoria del flogisto la 'base' di una sostanza si combinava con la materia ignea per dar luogo al cambiamento di fase. Lavoisier si rese conto dell'incongruenza di questa posizione. Se la materia ignea poteva solo cambiare le sostanze da uno stato all'altro non si poteva combinare con l'aria pura (ossigeno) per creare aria fissa. Lavoisier sostenne invece che non era il flogisto a essere rilasciato quando l'ossigeno reagiva con un metallo, ma il *calorico*, un fluido impalpabile contenuto nei corpi:

Noi abbiamo di conseguenza designato la causa del calore, il fluido eminentemente elastico che lo produce, con il nome di calorico. Indipendentemente dal fatto che questa espressione corrisponda al

nostro obiettivo nel sistema che abbiamo adottato, essa ha un altro vantaggio, quello di potersi adattare a tutte le possibili opinioni; visto che, rigorosamente parlando, non siamo nemmeno obbligati a supporre che il calorico sia una materia reale, è sufficiente, come si capirà meglio da quanto segue, che si tratta di una qualsiasi causa repulsiva che allontana le molecole della materia, e se ne possono anche immaginare gli effetti in modo astratto e matematico.

Secondo Lavoisier l'ossigeno era gassoso perché conteneva calorico, che rilasciava reagendo con i metalli – dando ossidi – o con i non metalli – dando acidi. Nel 1783, sempre in collaborazione con Laplace, Lavoisier condusse una serie di esperimenti su sistemi viventi. Utilizzando un calorimetro a ghiaccio di loro invenzione, dimostrarono senza difficoltà che i processi di respirazione degli animali e delle piante sono una forma di lenta combustione.

Con la scoperta dell'ossigeno e dell'azoto, con l'eliminazione del fuoco dall'elenco delle sostanze chimiche e con la dimostrazione che l'aria non era un elemento ma un miscuglio di gas, le teorie dei quattro elementi di Aristotele e dei tre principi primi di Paracelso tramontarono per sempre. Restava ancora il problema dell'acqua. I primi lavori che portarono alla sintesi dell'acqua e poi alla definitiva comprensione del fatto che non fosse un elemento erano venuti dall'Inghilterra. Nel 1781 Joseph Priestley aveva notato che nell'esplosione di miscela di aria e idrogeno si ottenevano goccioline finissime di liquido sulle pareti del recipiente di reazione. Henry Cavendish ottenne un risultato analogo con miscele di ossigeno e idrogeno e concluse che le goccioline formatesi erano di acqua. Nell'interpretazione dei risultati fu coinvolto anche James Watt (1736-1819), che suggerì che l'acqua fosse un composto di aria deflogisticata (ossigeno) e di aria infiammabile (idrogeno). Il 15 gennaio 1784 Cavendish concluse i suoi esperimenti e presentò alla Royal Society la sua teoria della composizione dell'acqua. Lavoisier però l'aveva preceduto e il 25 giugno del 1783 aveva comunicato all'Académie di aver sintetizzato l'acqua da idrogeno e ossigeno. Il lavoro fu pubblicato nel 1784 nel volume delle memorie del 1781, che fu stampato con tre anni di ritardo e nel quale Lavoisier riuscì quindi ad inserire la sua pubblicazione.

Ne nacque ovviamente una lunga disputa che coinvolse Lavoisier e i tre scienziati inglesi. Lavoisier ottenne sia la sintesi che l'analisi dell'acqua in un unico esperimento durato tre giorni nel febbraio 1783. Il francese realizzò l'analisi quantitativa collaborando con Jean-Bapti-

ste Meusnier de la Place (1754-1793), matematico e geometra, uno dei futuri generali della rivoluzione. Insieme scomposero l'acqua facendo passare il vapor d'acqua in una canna di fucile riscaldata al rosso. In questo modo l'acqua si decompose in idrogeno e ossigeno, l'ossigeno reagì con il ferro della canna e venne bloccato, mentre l'idrogeno veniva raccolto in un eudiometro. La sintesi fu realizzata con l'aiuto di Meusnier, bruciando idrogeno in un ambiente di ossigeno. I due gas contenuti in due gasometri separati furono mescolati in un pallone di vetro e fatti reagire con una scintilla elettrica. Come risultato furono ottenuti 2,385 grammi di acqua pura.

Nel 1786, convinto dagli argomenti di Lavoisier a cambiare idea, Guyton de Morveau (1737-1816) si aggiunse all'armata dei moschettieri lavoisieriani, ripudiando tutto quello che aveva scritto precedentemente in favore del flogisto. L'amicizia e la collaborazione che si stabilirono tra i due portarono a una profonda riforma della nomenclatura chimica (Laszlo 1993). Guyton aveva affrontato questo problema con un articolo del 1782 in cui aveva per primo impostato una nuova nomenclatura, basata sul principio che ogni sostanza dovesse avere un nome univoco che richiamasse direttamente la sua composizione. Lavoisier comprese subito che i principi elencati da Guyton rappresentavano un metodo rigoroso per denominare i composti chimici e nell'arco di circa un anno, dal 1786 al 1787, con la collaborazione dei suoi fedelissimi Claude Louis Berthollet (1748-1822) e Antoine Francois Fourcroy (1755-1809) e dello stesso Guyton, portò a termine la riforma della nomenclatura chimica, nomenclatura ancora in uso oggi. La nuova nomenclatura era basata sull'eliminazione dei nomi di origine alchemica e sulla creazione dei nomi dei nuovi elementi scoperti a seguito dei risultati delle ricerche sui gas. Un aspetto importante della nuova nomenclatura era la definizione di elementi come sostanze che non potevano essere scomposte in sostanze più semplici e l'utilizzazione dei loro nomi per formare quelli dei composti. L'introduzione di Lavoisier al testo è un pezzo di rara bravura stilistica che con logica stringente descrive in maniera perfetta il rapporto inscindibile tra i fatti sperimentali, le teorie che ad essi si rifanno e il linguaggio che le esprime:

Ci sono tre cose che dobbiamo distinguere in tutta la scienza fisica: la serie dei fatti che costituisce la scienza; le idee che i fatti richiamano; le parole che le esprimono. La parola deve dare origine all'idea; l'idea deve dipingere il fatto; sono tre impronte dello stesso cachet,

e poiché sono le parole che conservano le idee e le trasmettono, ne consegue che sarebbe impossibile perfezionare la scienza se non perfezionassimo il suo linguaggio....

La nomenclatura chimica di Lavoisier era innanzitutto una rivoluzione linguistica. Riformare il linguaggio della chimica corrispondeva a riformarne il metodo. Lavoisier vedeva un parallelismo stretto tra un linguaggio come il francese e la nuova lingua della chimica. I nomi degli elementi corrispondevano alle lettere; queste venivano associate per formare le parole cioè i nomi dei composti chimici. Le reazioni chimiche rappresentavano poi le frasi della nuova lingua chimica, la cui grammatica era l'algebra. Nella nuova nomenclatura tra gli elementi semplici Lavoisier incluse anche la luce e il calorico. Il calorico, ipotetico fluido impalpabile e senza massa, rimpiazzava il flogisto e assumeva il significato di componente essenziale della materia, al pari degli elementi; era un fluido elastico composto di particelle indistruttibili che si respingevano tra di loro ma che erano attratte dalle particelle di materia.

Perfino Lavoisier, uomo di fine cultura e sottile pensatore, considerava il discorso sul numero e la natura degli elementi di tipo puramente metafisico o comunque completamente da costruire:

Secondo me, tutto ciò che si può dire sul numero e sulla natura degli elementi è limitato a discussioni puramente metafisiche: si tratta di problemi indeterminati che ci proponiamo di risolvere, che sono suscettibili di un'infinità di soluzioni, ma di cui è molto probabile che nessuna in particolare sia d'accordo con la natura..

In riferimento alla scoperta quasi simultanea dell'ossigeno da parte di Scheele, Priestley e Lavoisier sono sorte domande riguardo alle scoperte scientifiche. Quale è il significato di una scoperta scientifica? Perché è importante arrivare primi? È importante scoprire qualcosa o è più importante capirne il significato e le implicazioni? Sulla scoperta dell'ossigeno così si esprime Alberto Cavaliere nel suo *La chimica in versi* (Cavaliere 1987), sia pure dimenticandosi di Scheele (Salvi 2021):

Il primo chimico che l'isolò  
era il britannico Priestley;  
però farsene interprete, spiegar cos'è  
fu tutto merito  
di Lavoisier

Questo e le domande poste sopra vengono dibattute nella commedia *Oxygen* pubblicata da Carl Djerassi, professore a Berkeley e inventore della famosa pillola per il controllo delle nascite e dal premio Nobel per la chimica Roald Hoffmann (Djerassi, Hoffmann 2003). Nella commedia vengono descritte le incomprensioni e le rivalità che nacquero tra questi tre grandi personaggi, in occasione di una ipotetica riunione a Stoccolma per l'assegnazione di un premio Nobel postumo per la più grande scoperta nella chimica del XIX secolo. Nella commedia le tre mogli di Lavoisier, di Scheele e di Priestley discutono in una sauna sulle ricerche dei mariti, ognuna convinta dell'importanza delle rispettive ricerche, sostenendo la tesi che un nuovo premio Nobel dovesse essere assegnato al proprio marito.

### 8.6 Dalton e il nuovo sistema della chimica

Lavoisier aveva solo tracciato la strada che la chimica doveva seguire per diventare una scienza autonoma con principi completi suoi propri. La strada era lunga ma ben presto furono fatti progressi che sarebbero stati fondamentali per la teoria atomistica di John Dalton e per portare la chimica e gli atomi (e le molecole) oltre un contesto ancora filosofico in un impianto di qualche natura matematica precisa.

Un primo passo in questa direzione fu realizzato con la nascita della stechiometria (dal greco *stoichéion*, elemento, e *métron*, misura) che si propone di determinare le relazioni ponderali delle sostanze nelle reazioni chimiche. In questa direzione si mosse Benjamin Richter (1762-1807) nello studio delle reazioni di neutralizzazione acido-base. I suoi esperimenti mostrarono che per neutralizzare una certa quantità di una base era necessario sempre lo stesso peso di un certo acido e che per la neutralizzazione le quantità di acidi diversi per una stessa base erano in un rapporto definito. Ad esempio, 1000 gr di acido solforico erano in grado di neutralizzare 755 gr di idrossido di calcio. La stessa neutralizzazione poteva essere realizzata con 723 gr di acido cloridrico. Inoltre, 1000 gr di acido solforico potevano poi neutralizzare 816 gr di idrossido di sodio. Il concetto di rapporti ponderali definiti venne poi esteso oltre le reazioni di neutralizzazione acido-base, aprendo la strada a procedimenti matematici semplici nella descrizione delle reazioni chimiche.

In questa direzione, la ricerca dei rapporti ponderali nei composti chimici proseguì con Louis-Joseph Proust (1754-1826) (Kapoor 1965) che dallo studio di ossidi metallici e di altri composti (in particolare

ossido di rame, ossidi di ferro e carbonato basico di rame) giunse alla *legge delle proporzioni definite* che stabilisce che:

- la costanza della composizione ponderale degli elementi nei composti chimici è sempre rispettata;
- gli elementi chimici possono, in condizioni diverse, dare un numero limitato di composti, ognuno con diversa e fissa composizione ponderale.

Questa legge può essere facilmente spiegata come conseguenza di una struttura atomica della materia con atomi aventi peso atomico definito e costante che si combinano in rapporti numerici definiti semplici. Tuttavia, Proust, stabilita la sua legge, non si avventurò in una spiegazione in questi termini atomici.

La legge di Proust fu avversata duramente da Claude Louis Berthollet (Kapoor 1965), allievo di Lavoisier, che sosteneva che nei composti chimici i componenti si potevano associare in proporzioni diverse, variabili in maniera continua a seconda delle condizioni. A questo Berthollet era, verosimilmente, indotto dalla osservazione che in effetti esistevano composti, o piuttosto miscele, di composizione variabile come amalgami o vetri che, in verità, non sono composti chimici in senso stretto.

Anche se la legge di Proust delle proporzioni definite poteva richiamare, come a noi oggi sembra naturale, una spiegazione in termini di atomi e molecole, bisogna considerare che ai tempi di Proust il concetto di molecola non era ancora chiaro e la discussione filosofica rimaneva ancorata alla esistenza di particelle *tout court*. Per quanto riguarda più specificamente i chimici, un concetto più semplice e onnicomprensivo era quello di elemento. Un chimico sicuramente atomista come Berthollet sosteneva, come abbiamo visto, che la materia fosse costituita da atomi che si riunivano in proporzioni variabili in modo continuo, vanificando così il valore della legge delle proporzioni definite.

Al contrario, Bryan Higgins (1737-1818) è stato un chimico atomista che, seguendo Newton, assumeva che i composti chimici si formassero per unione di atomi a causa dell'esistenza di forze di attrazione dipendenti dal quadrato delle distanze. Più esplicito è stato William Higgins (1762-1825), nipote di Bryan, che sosteneva di avere collegato l'insieme della chimica riducendola a un sistema e aveva inserito la teoria atomica come una parte del suo corso di lezioni (Califano 2010). W. Higgins riteneva che nelle molecole, o atomi composti, gli atomi si unissero in coppie o triplette e così via. Ad esempio, secondo William

Higgins i composti di azoto e ossigeno avevano la struttura mostrata in Figura 43, in perfetto accordo con la legge delle proporzioni definite. Tuttavia, riguardo agli elementi, Higgins riteneva che gli atomi di tutti gli elementi fossero uguali cioè formati da una stessa materia primordiale e che, quindi, tutti gli atomi avessero lo stesso peso.

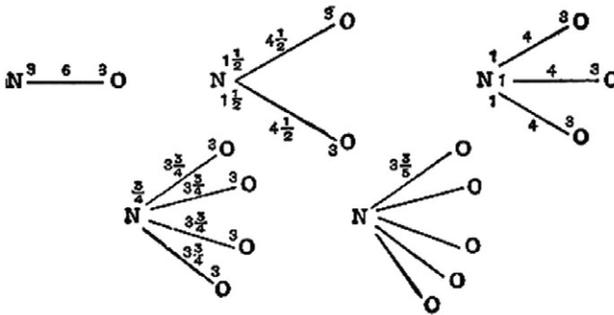


Figura 43 – Struttura degli ossidi di azoto secondo William Higgins.

In questo contesto storico si inserisce l'opera innovatrice di John Dalton (1766-1844), padre dell'atomistica chimica (Califano 2010), che eliminò definitivamente gli aspetti metafisici che i filosofi attribuivano all'atomo e fu il primo a introdurre il concetto di peso atomico e a pubblicare una tabella di pesi atomici, dando origine a una teoria che era basata su dati sperimentali, anche se ancora imprecisi. Dalton fu insegnante di matematica e chimica a Manchester e presidente della Philosophical Society. Inizialmente si interessò di problemi meteorologici e, a seguito di questo, iniziò studi sul comportamento dell'aria con punti di vista che si rifacevano alla interpretazione newtoniana della legge di Boyle e Mariotte, che era stata successivamente ripresa da Daniel Bernoulli (1700-1782). Dalton assumeva che i vari componenti dell'aria, ossigeno, azoto, anidride carbonica e vapor d'acqua, si comportassero come se gli altri non esistessero. Gli atomi di ciascun componente si respingevano solo tra loro e si espandevano fino ad occupare tutto il volume disponibile. Da questo derivava la legge delle pressioni parziali. La repulsione tra le particelle di un certo tipo era prodotta da una atmosfera di calorico che le circondava:

Oltre alla forza di attrazione, che in un modo o nell'altro appartiene universalmente ai corpi dotati di peso, noi troviamo un'altra forza che è anch'essa universale, o che agisce su tutta la materia a noi nota, cioè

la forza di repulsione. Questa è in generale, e io penso correttamente, ascritta all'azione del calore. Un'atmosfera di questo fluido sottile circonda gli atomi di tutti i corpi ed evita che essi possano venire a contatto diretto.

Dalton riteneva che le particelle di gas diversi avessero dimensioni diverse e poiché le densità di gas diversi differivano ne conseguiva che anche i pesi delle particelle di gas diversi dovevano differire. Queste considerazioni portavano alla definizione della teoria atomica di Dalton che può essere così riassunta:

- gli elementi sono formati da piccolissime particelle chiamate atomi;
- tutti gli atomi dello stesso elemento sono identici tra loro;
- gli atomi di ciascun elemento sono diversi da quelli di qualsiasi altro elemento;
- gli atomi di un elemento si combinano con gli atomi di altri elementi per formare composti. Un composto sarà sempre formato dallo stesso numero relativo di atomi di tipi diversi;
- gli atomi non possono essere né creati né distrutti in una reazione. In una reazione chimica tutto ciò che accade è che gli atomi si riorganizzano in modo diverso tra i componenti.

Con questi principi semplici Dalton è stato in grado di fornire una spiegazione completa in termini atomici delle leggi sperimentali delle proporzioni definite e di prevedere anche la possibilità delle proporzioni multiple nei composti chimici. L'atomismo di Dalton introdusse una concezione completamente nuova della massa chimica, basata sul concetto di peso atomico. Il peso di un atomo composto, cioè di una molecola, può essere ottenuto automaticamente come la somma dei pesi atomici dei semplici atomi che lo compongono. Per la prima volta, sono stati pesati gli atomi e le molecole, sia pure come pesi relativi. Ma c'erano ancora molti problemi da risolvere. Dalton, nell'esaminare la composizione dei composti chimici, partì dalla più semplice ipotesi. Se da due elementi si formava un solo composto i relativi atomi si combinavano nel rapporto 1:1. Prevedendo la possibilità di combinazione di atomi secondo la legge delle proporzioni multiple assunse che i composti formati con due atomi diversi potessero essere nei rapporti 1:1, 1:2 e 1:3, come implicito nelle formule della Figura 43. Ovviamente, la possibilità che un composto binario degli atomi A e B potesse effettivamente avere la formula  $A_2B_2$  non era considerato possibile. Il criterio adottato da Dalton per la formula delle molecole

obbediva sostanzialmente alla regola della massima semplicità. Inoltre, mancava ancora il concetto che due atomi dello stesso elemento si potessero unire in una molecola.

Sulla base dei risultati sperimentali disponibili al tempo, Dalton fu in grado di ottenere una tabella dei pesi atomici relativi di vari elementi, pubblicata nel 1803, assumendo per il più leggero degli elementi, l'idrogeno, il peso atomico 1. A causa della scarsa accuratezza dei dati disponibili, questi pesi atomici vennero in seguito più volte corretti.

Dalton definì anche nuovi simboli per gli elementi scegliendo il cerchio per l'ossigeno, cerchio al quale venivano aggiunti punti o altri cerchi o lineette per gli altri elementi. Talora, nel cerchio veniva aggiunta una lettera che indicava l'iniziale del nome dell'elemento. I simboli così formati servivano anche per scrivere le formule dei composti. I simboli di Dalton non avevano alcuna attinenza specifica con la realtà fisica dell'elemento anche se potevano costituire una semplificazione e il cerchio poteva richiamare l'idea di atomi di forma sferica. La simbologia di Dalton non ebbe una lunga fortuna e fu presto dimenticata e sostituita da una nomenclatura e simbologia chimica molto più pratica e potente ideata, come vedremo in seguito, da Berzelius.

### 8.6.1 *La chimica dopo Dalton*

Nella prima metà del diciannovesimo secolo, la teoria di Dalton trovò grande consenso e grande opposizione, come sempre accade con le idee rivoluzionarie. Tra i principali sostenitori della teoria si possono menzionare *Thomas Thomson*, *William Henri*, *Thomas Graham* e, soprattutto, *Jöns Jacob Berzelius* e *Amedeo Avogadro* che non solo sostennero la teoria ma la svilupparono da un punto di vista sperimentale e teorico. Uno strenuo e polemico oppositore fu invece *Humphry Davy*, sul quale ritorneremo in seguito, che, in particolare, sosteneva la variabilità delle proporzioni degli elementi nei composti chimici e non credeva che passando da un composto all'altro gli atomi fossero indistruttibili ma che semplicemente si riorganizzassero.

La causa fondamentale all'origine dell'opposizione alla teoria di Dalton era che per i chimici era difficile capacitarsi che fosse realmente necessario utilizzare i pesi atomici invece di risultati sperimentali diretti, come i pesi di combinazione o le analisi volumetriche nel caso di reazioni in fase gassosa. Questa perplessità era accentuata dalle ambi-

guità nella determinazione dei pesi atomici dovuta al fatto che la struttura delle molecole non era chiaramente definita oltre che alla scarsa precisione dei metodi sperimentali. Ad esempio, nel caso dell'acqua, pur assumendo per l'idrogeno il peso atomico di riferimento 1, il risultante peso atomico dell'ossigeno risultava 8 o 16 a seconda che si scegliesse per la formula dell'acqua HO o H<sub>2</sub>O (quest'ultima ipotesi era al momento stata esclusa da Dalton). Queste perplessità sorgevano, inoltre, in un ambiente scientifico ancora dominato dalle teorie del continuo dell'elettricità e dell'elettromagnetismo e abituato, nel caso degli atomisti, a credere nell'esistenza di un solo tipo di atomo. L'ipotesi di Dalton che ci fossero tanti tipi di atomi quanti erano gli elementi, invece, improvvisamente portò a circa cinquanta i mattoni di base con cui Dio avrebbe costruito il mondo. Questa mancanza di semplicità progettuale sembrava molto improbabile. A questo si aggiungeva il fatto che la definizione dei pesi atomici differiva per diversi chimici sia per la scarsa precisione dei dati sperimentali sia, appunto, per la diversa scelta della formula dei composti chimici. Ad accrescere le perplessità contribuiva il fatto che sia Lavoisier che Dalton avevano incluso tra gli elementi sostanze che esperimenti successivi avrebbero mostrato essere in realtà dei composti.

### 8.6.2 Prout e la materia primigenia

La Tabella 6 riporta i valori (approssimati) di alcuni pesi atomici di Dalton. Si vede che, con la precisione dei dati sperimentali di allora, i pesi atomici sembravano essere quasi sistematicamente multipli del peso atomico dell'idrogeno.

Tabella 6 – Pesi atomici di Dalton, 1810.

Elemento	P. atomico	Elemento	P. atomico
Idrogeno	1	Zolfo	13
Azoto	5	Ferro	50
Carbonio	5,4	Zinco	56
Ossigeno	7	Rame	56
Fosforo	9	Piombo	93

In base a questi dati, e in base alla determinazione del peso di uguali volumi di elementi gassosi diversi, William Prout (1785-1850)

(Brooke 1968; Kapoor 1965) giunse alla conclusione che, ad esempio, il peso atomico 9 del fosforo derivasse dal fatto che 9 volumi di idrogeno si erano condensati in 1 volume di fosforo. L'idrogeno era quindi una materia primigenia che andava a costituire tutti gli atomi. Questo rispondeva anche alla constatazione che erano noti vari radicali, come  $-CN$ ,  $-COOH$  e altri, che si trasferivano da un composto all'altro come se avessero una loro individualità. Analogamente, condensando atomi di idrogeno si formavano nuovi elementi con loro caratteristiche.

L'ipotesi di Prout non era in grado di spiegare come mai i pesi atomici variassero per salti e non come multipli successivi del peso atomico dell'idrogeno. La teoria di Prout non resistette a lungo alla determinazione più precisa dei pesi atomici da parte di Berzelius che mostrò che alcuni pesi atomici non erano multipli di quello dell'idrogeno.

### 8.6.3 Gay-Lussac e la legge dei volumi

Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850), professore di fisica e chimica all'*École Polytechnique* di Parigi, era stato allievo di *Tenard* e di *Berthollet* e divenne un abile sperimentatore delle proprietà dei gas. A lui si devono le leggi di variazione del volume e della pressione dei gas in funzione della temperatura. Una serie di esperimenti precisi condotti all'inizio del XIX secolo da Gay-Lussac offrì la prova definitiva della teoria di Dalton delle proporzioni definite. Il 31 dicembre 1808, Gay-Lussac presentò i suoi esperimenti sui volumi dei gas alla *Société Philomatique* di Parigi con il titolo *Mémoire sur la combinaison des substances gazeuses, les unes avec les autres*. Dai suoi dati Gay-Lussac dedusse la sua famosa legge che afferma che i gas si combinano sempre in rapporti volumetrici semplici espressi da numeri interi. Con le sue misure sugli ossidi di azoto dimostrò che le proporzioni in volume tra azoto e ossigeno erano nei rapporti 2:1, 1:1 e 1:2, secondo quanto richiesto dalla teoria di Dalton. Analogamente, dalla decomposizione della molecola di ammoniaca trovò che azoto e idrogeno era nel rapporto volumetrico di 1:3.

L'importanza della legge dei volumi non fu subito riconosciuta dalla comunità dei chimici. In particolare, Dalton rimase sempre scettico nei confronti dei dati di Gay-Lussac che considerava errati. Ciò derivava dalla convinzione di Dalton di ragionare sempre in termini di atomi indivisibili.

#### 8.6.4 Berzelius e la nomenclatura chimica

Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) fu professore di chimica e farmacia nel collegio medico di Stoccolma che diventerà poi il *Karolinska Institutet*. Considerato il padre dell'analisi chimica gravimetrica, Berzelius analizzò con grande accuratezza migliaia di composti chimici determinando con precisione il peso atomico di 50 elementi. Le sue analisi portarono a una solida riproposizione delle leggi delle proporzioni definite e multiple in termini atomici (Melhado 1981).

In base alle sue conoscenze delle proprietà elettriche stabilì una scala di elettronegatività che andava dall'ossigeno, l'elemento più elettronegativo, al potassio, l'elemento più elettropositivo. L'affinità chimica era determinata dalla differenza di elettronegatività. Questa sua visione dualistica si applicava anche ai composti. Ad esempio, un residuo acido, elettronegativo, si combinava con un residuo basico, elettropositivo, per dare un sale. Era per questa natura dualistica che i composti potevano essere scissi dalla corrente elettrica. Comunque, l'elettricità era l'unica responsabile delle reazioni chimiche ma c'erano alcune incongruenze in questa visione. Ad esempio, era difficile comprendere come mai l'ossigeno non si combinava con un elemento elettropositivo come l'oro mentre si combinava facilmente con un elemento elettronegativo come lo zolfo. Comunque, le interazioni elettriche davano un significato concreto alle forze di attrazione e repulsione tra atomi e molecole.

L'intensa attività sperimentale consentì a Berzelius di scoprire nuovi elementi come il cerio, il selenio, il torio, il tantalio, il silicio, lo zirconio, il titanio e varie terre rare. In base ad accurati esperimenti determinò che i pesi atomici di molti elementi erano lontani da multipli interi di quello dell'idrogeno, contrariamente alla teoria di Prout. Per la determinazione accurata dei pesi atomici si avvalse anche della legge di Dulong e Petit (Pierre-Louis Dulong (1785-1838), Alexis-Thérèse Petit (1791-1820)) che stabilisce che il prodotto del peso atomico e del calore specifico di un elemento solido è una costante. Utilizzò anche, quando necessario, la legge dell'isomorfismo di Eilhard Mitscherlich (1794-1863) che stabilisce che sostanze simili per forma cristallina e proprietà chimiche hanno la stessa formula di struttura. Questa legge fu usata per la determinazione del peso atomico del selenio in base all'isomorfismo di seleniati e solfati. Nel 1818 Berzelius pubblicò una tabella dei pesi atomici di ben 45 elementi.

Come abbiamo visto, il problema del linguaggio della chimica era già stato affrontato da Lavoisier come questione centrale per lo sviluppo della disciplina come scienza autonoma. Era necessario uscire dall'oscurantismo e dall'ermetismo ereditato dall'alchimia affinché i risultati delle nuove metodologie sperimentali fossero noti in maniera chiara e fossero condivisi da tutti i chimici. Un progresso in questa direzione era in realtà iniziato con lo sviluppo della metallurgia che, come branca tecnologica, aveva sentito la necessità di manuali, testi tecnici che, in quanto destinati anche ad apprendisti e neofiti del campo, non potevano esimersi da contenuti di estrema chiarezza. In parte questa tendenza si era estesa anche alla iatrochimica in quanto l'efficacia dei rimedi terapeutici non poteva fare a meno di una precisione e chiarezza dei metodi di preparazione.

Nella descrizione della nuova proposta di nomenclatura chimica Lavoisier aveva fatto ricorso alla analogia, già utilizzata da Lucrezio (Lucrezio 1969) e da Aristotele, tra le lettere dell'alfabeto per costruire parole e frasi;

lettere  $\Rightarrow$  parole  $\Rightarrow$  frasi;

e il linguaggio della chimica che da atomi costruisce molecole e da queste reazioni:

atomi  $\Rightarrow$  molecole  $\Rightarrow$  reazioni.

Lo schema del nuovo linguaggio della chimica era però ancora tutto da costruire. Innanzitutto, la definizione delle parole (molecole) e delle lettere (atomi) non era del tutto chiara. Lavoisier aveva classificato i 33 elementi in quattro classi (Figura 44). La prima conteneva, oltre a idrogeno, ossigeno e azoto, anche la luce e il calorico mentre la seconda, oltre ai non metalli generatori di acidi, includeva anche residui acidi. Analogamente, mentre la terza classe includeva i metalli noti all'epoca, la quarta comprendeva le terre, cioè gli ossidi.

I simboli degli elementi di Lavoisier (vedi Figura 45) non erano più i simboli degli alchimisti ma, anche se erano semplificati (lineette verticali, orizzontali o oblique, semicerchi, triangoli, etc.), non sembravano avere attinenza con la natura o il nome dell'elemento.

Un'ulteriore semplificazione delle lettere dell'alfabeto chimico si ebbe con Dalton. In casi semplici il nuovo alfabeto chimico di Dalton permetteva anche di scrivere schemi di reazioni chimiche. Ad esem-

**TABIEAU DES SUBSTANCES SIMPLES.**

Noms françois.	Noms anciens correspondans.
Lumiere.....	Lumiere.
Calorique.....	Chaleur. Principe de la chaleur. Froid igne.
<i>Substances simples qui appartiennent aux acides et qui sont susceptibles de se combiner avec l'oxygene.</i>	Acide. Matiere du feu & de la chaleur. Air degloutissable. Air simple. Air vital. Eau de lait vital. Gas phlogistique. Matiere. Eau de la vieuse. Gas inflammable. Eau de gas inflammable.
<i>Substances simples qui sont susceptibles de se combiner avec l'oxygene.</i>	Soufre. Phosphore. Charbon pur. Impur. Iodure. Iodure. Antimoine.
<i>Substances simples qui sont susceptibles de se combiner avec l'oxygene.</i>	Argent. Arsenic. Bismuth. Cobalt. Cuivre. Etain. Fer. Magnesie. Mercure. Molybdene. Nickel. Or. Platine. Plomb. Tungstene. Zinc.
<i>Substances simples qui sont susceptibles de se combiner avec l'oxygene.</i>	Terre calcare, chaux. Magnesie, base du nit d'Epou. Bauxe, terre potasse. Argile, terre de l'Alen, base de l'Alen. Terre silicee, terre vitreable.
Silice.....	

Figura 44 – Classificazione degli elementi di Lavoisier.

Ψ	☾	☉	☽	☿	♃	♄	♅	♆	♁
silver	silver	silver	silver	silver	silver	silver	silver	silver	silver
☉	☾	☉	☽	♃	♄	♅	♆	♁	♁
silver10	silver11	silver12	silver13	silver14	silver15	silver16	silver17	silver18	silver19
☉	☾	☉	☽	♃	♄	♅	♆	♁	♁
spirit	spiritmercury	spirit							
☉	☾	☉	☽	♃	♄	♅	♆	♁	♁
sulphur1	sulphur2	sulphur3	sulphur4	sulphur5	sulphur6	sulphur7	sulphur8	sulphur9	sulphur10
☉	☾	☉	☽	♃	♄	♅	♆	♁	♁
sulphur11	summer	late	tard						
☉	☾	☉	☽	♃	♄	♅	♆	♁	♁
tin1	tin2	tin3	tin4	tin5	tin6	tin7	tin8	tin9	tin10
☉	☾	☉	☽	♃	♄	♅	♆	♁	♁
vinol1	vinol2	vinol3	vinol4	vinol5	vinol6	vinol7	vinol8	vinol9	vinol10
☉	☾	☉	☽	♃	♄	♅	♆	♁	♁
vine	wood	year							

Figura 45 – I simboli degli elementi di Lavoisier.

pio, nel caso della formazione dell'acqua, che secondo Dalton era  $H + O = HO$ , con i nuovi simboli la reazione poteva essere rappresentata come in Figura 46:



Figura 46 – Reazione di formazione dell'acqua secondo Dalton.

Anche Berzelius si rese conto che il linguaggio chimico non era più adatto a rappresentare con chiarezza le migliaia di composti che venivano continuamente preparati e a esprimerne la composizione. Egli pensava che il nome di una molecola dovesse indicare in modo chiaro e privo di equivoci da quali atomi la molecola era composta e indicare il numero di ciascun atomo componente. L'idea base di Berzelius fu di usare le lettere dell'alfabeto indicando ogni atomo con la prima lettera maiuscola del nome (latino) dell'elemento stesso e un numero (inizialmente come apice e poi come pedice) per indicare il numero degli atomi nella formula del composto. Nel caso di più elementi con la stessa iniziale del nome potevano essere usate due lettere, una maiuscola e una minuscola. Per i composti, i vari atomi componenti venivano indicati partendo da quello più elettropositivo al più elettronegativo.

La nuova nomenclatura di Berzelius risultò subito molto conveniente e, con le varie modifiche fatte nel corso del tempo, è nella sostanza quella ancora in uso oggi. Con il nuovo linguaggio le trasformazioni chimiche potevano essere comodamente rappresentate sulla carta. Esso si prestava anche a riconoscere gruppi o radicali che eventualmente si trasferivano inalterati da un composto all'altro. Inoltre, questa nomenclatura risulterà efficace nella chimica organica per la rappresentazione spaziale della distribuzione degli atomi nelle molecole (stereoisomeria).

### 8.7 *Materia ed elettricità*

Alessandro Volta (1745-1827) è stato il personaggio più importante della chimica italiana tra il XVIII e XIX secolo. Professore di chimica prima nel liceo di Como e poi nell'Università di Pavia, attraverso i suoi studi sull'elettricità ha contribuito in maniera fondamentale allo sviluppo dell'elettrochimica (Abbri 2000b). Si è anche attivamente interessato alla chimica pneumatica e a lui si deve la scoperta del gas

metano (*aria infiammabile di palude*) prima in un'ansa stagnante del fiume Lambro e poi negli stagni di Angera. Volta continuò ad aderire alla teoria del flogisto.

Giovanni Galvani (1737-1798) pubblicò nel 1791 i suoi esperimenti di elettricità animale (*De viribus electricitatis in motu musculari commentarius*): una scintilla rilasciata da un conduttore di una macchina elettrostatica provocava la contrazione degli arti di una rana usata come cavia. Galvani attribuì il fenomeno all'esistenza di una intrinseca elettricità animale. Volta si pose il problema se nell'esperimento la corrente elettrica che si generava quando il muscolo della rana era in contatto con due metalli diversi fosse generata dal muscolo o dai metalli, giungendo alla conclusione che per la generazione dell'elettricità i muscoli non erano necessari. Per dimostrarlo costruì una pila di dischi alternati di rame e di zinco separati da dischi di cartone o stoffa imbevuti di un acido, dimostrando che in questo modo si otteneva una corrente elettrica duratura e non una scarica elettrica istantanea. Era il primo generatore di corrente elettrica che segnava la transizione dalla concezione statica a quella dinamica dell'elettricità.

Il 20 marzo 1800 il presidente della Royal Society, Joseph Bank, ricevette una lettera nella quale Volta gli comunicava di aver costruito una sorgente generatrice di corrente continua da una pila di metalli diversi, chiedendo di darne comunicazione all'assemblea dei soci. L'esperimento di Volta fu subito ripetuto da William Nicholson (1753-1813), esperto di strumentazioni elettriche. Per un miglior contatto tra i poli della pila e l'elettroscopio aggiunse acqua al disco superiore della pila e osservò prima lo sviluppo di gas idrogeno e infine realizzò l'elettrolisi dell'acqua con formazione di ossigeno e idrogeno ai poli opposti.

La notizia della scoperta di Volta si diffuse rapidamente e suscitò un grande interesse tra i chimici di tutta Europa che avevano ora a disposizione una nuova tecnica per decomporre la materia negli elementi costituenti. Inoltre, la scoperta dell'azione dell'elettricità sulla materia offriva una nuova visione dell'origine delle interazioni di attrazione e repulsione tra le particelle, atomi e molecole. Abbiamo già visto che Berzelius aveva classificato gli elementi secondo una scala di elettronegatività come misura dell'affinità chimica. Queste interazioni potevano essere considerate come una prima avvisaglia di una teoria del legame chimico.

Humphry Davy (1778-1829) attraverso i suoi studi elettrochimici ha dato grandi contributi alla teoria atomica. Iniziò a lavorare come apprendista presso un medico e farmacista e in seguito cominciò a in-

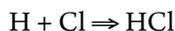
teressarsi attivamente alla chimica dopo la lettura del *Traité élémentaire* di Lavoisier e diventerà un importante esponente della Royal Society. È stato famoso per i suoi studi sugli ossidi di azoto, e in particolare sul protossido di azoto (*gas esilarante*), per i quali trovò rapporti in peso tra azoto e ossigeno in perfetto accordo con la legge delle proporzioni multiple, anche se non concordava pienamente con la teoria di Dalton.

Le ricerche più importanti di Davy riguardarono l'elettrochimica comprendendo pienamente che la produzione di elettricità nelle celle elettrolitiche era conseguenza di reazioni chimiche. Per mezzo dell'elettrolisi isolò il sodio, il potassio e i metalli alcalino-terrosi (magnesio, calcio, stronzio, bario). Riuscì anche a isolare il boro e identificò l'acido cloridrico, HCl, dimostrando che gli acidi non dovevano necessariamente contenere ossigeno, come sosteneva Lavoisier. A seguito delle sue scoperte, del suo carattere brillante ed esuberante e della molteplicità dei suoi interessi guadagnò una fama di grande scienziato in tutta l'Europa.

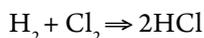
### 8.8 Avogadro: atomi e molecole

Nonostante i progressi fatti dalla chimica nel periodo discusso in questo capitolo sia dal punto di vista sperimentale (tecniche di laboratorio per analisi, isolamento e preparazione di nuovi elementi e composti) che da un punto di visto interpretativo in termini di teorie atomiche, rimanevano questioni fondamentali irrisolte. Tra queste c'era la ancora non chiara distinzione tra atomo e molecola. A livello macroscopico le esperienze gravimetriche, che fornivano con crescente accuratezza gli equivalenti ponderali delle reazioni chimiche, e le esperienze volumetriche, basate sulla misura dei volumi dei gas che partecipavano alle reazioni chimiche, avevano per i chimici un significato empirico diretto, erano realtà oggettive. Al contrario, i concetti di atomo e molecola non erano condivisi dalla comunità chimica. Un indizio di questo si può trovare nell'uso di una nomenclatura variabile che oltre ai due termini citati sopra (atomo, molecola) vedeva termini misti come *molecola costituente*, *molecola elementare*, *atomo composto*. Inoltre, la possibilità di molecole costituite da due o più atomi identici era stata esclusa da Dalton. Infine, il concetto di atomo indivisibile lasciava perplessi, apparendo una affermazione di principio non essendo verificabile con esperimenti diretti. Anche a questo possiamo forse riferire l'affermazione di Lord Kelvin che: «Quando puoi misurare quello di cui stai parlando e lo puoi esprimere in numeri, allora ne sai qualcosa».

La legge di Gay Lussac mostrava che, ad esempio, 100 volumi di idrogeno reagivano con 100 volumi di cloro per dare 200 volumi di acido cloridrico. Questa legge era incompatibile con la teoria di Dalton che assumeva che gli elementi fossero in forma di atomi singoli. Quindi, per Dalton la reazione di formazione dell'acido cloridrico era:



mentre secondo la legge di Gay Lussac la reazione era:



Secondo Dalton i dati di Gay-Lussac erano certamente sbagliati. A causa dell'autorevolezza di Dalton la legge di Gay-Lussac non ebbe seguito.

La legge ebbe invece pieno credito da parte di Avogadro. Amedeo Carlo Avogadro (1776-1856), conte di Quaregna e Cerreto, fu avviato alla carriera di giurisprudenza, secondo la tradizione familiare, laureandosi in diritto canonico e solo in un secondo tempo si dedicò alla attività scientifica con studi sull'elettricità. L'attenzione della scienza piemontese per le ricerche di Avogadro fu complessivamente modesta forse perché il suo atteggiamento teorico non era in piena sintonia con una scienza avente orizzonti prevalentemente tecnici e applicativi. Tuttavia, Avogadro fu uno scienziato di fama internazionale per le sue ricerche in elettrologia e chimica (Ciardi 2003, 2006, 2007).

Nel luglio 1811 Avogadro pubblicò sul *Journal de Physique* un articolo, dal titolo *Essais d'une manière de déterminer les masses relative des molécules élémentaires des corps, e les proportions selon les quelles elles entrent dans ses combinaisons*, in cui stabiliva che volumi uguali di gas diversi, nelle stesse condizioni di temperatura e pressione, contengono lo stesso numero di molecole. Così Avogadro commenta il lavoro di Gay-Lussac:

M. Gay-Lussac ha mostrato in un'interessante memoria (Mémoires de la Société D'Arqueil) che le combinazioni dei gas tra di loro si fanno sempre con rapporti molto semplici in volume, e che quando il risultato della combinazione è gassoso il suo volume è anche in rapporto molto semplice con i volumi dei suoi componenti; ma i rapporti di quantità di sostanze nelle combinazioni non sembrano poter dipendere che dal numero relativo di molecole che si combinano e da quello delle molecole composte che si formano.

Avogadro si rese conto che la sua ipotesi forniva gli elementi per correggere la teoria di Dalton in modo da includere le esperienze di Gay-Lussac. Le teorie vigenti della chimica erano troppo recenti e forse non erano ancora state ben digerite dalla comunità chimica per accogliere le idee di Gay-Lussac e di Avogadro. Nonostante nel 1814 Ampère avesse scritto una lunga lettera, non pubblicata, a Berzelius in cui sosteneva le stesse idee di Avogadro, per circa 50 anni non accadde molto.

Una diretta conseguenza dell'ipotesi di Avogadro è stata che il rapporto tra il peso molecolare di un gas e quello di un gas di riferimento è uguale al rapporto delle densità corrispondenti. Soprattutto, l'ipotesi di Avogadro ha stabilito una chiara differenza tra le molecole elementari (i nostri atomi) e le molecole integrali, le vere molecole formate da aggregati atomici che potrebbero separarsi nei componenti. Inoltre, l'osservazione che l'acqua si formava o veniva decomposta in un volume di idrogeno e mezzo volume di ossigeno è stata interpretata da Avogadro in termini di idrogeno e ossigeno entrambi costituiti da molecole biatomiche.

La ricezione dell'ipotesi di Avogadro fu scarsa e il suo lavoro fu sostanzialmente trascurato. Molto probabilmente, ciò fu dovuto anche alla mancanza di metodi sperimentali accurati per verificare la sua teoria. Seguendo il formidabile lavoro di Berzelius molti chimici preferirono adottare il sistema di pesi equivalenti che corrispondeva più direttamente ai rapporti di combinazione in peso nelle reazioni chimiche.

### 8.8.1 *Il congresso di Karlsruhe*

Il continuo accumulo di nuovi dati sperimentali e la mancanza di una teoria di riferimento condivisa da tutti i chimici portarono nella prima metà del XIX secolo ad una insostenibile situazione di confusione in cui ogni chimico, o ogni laboratorio, adottava il proprio metodo di interpretazione dei risultati, di scrittura delle formule e di adozione dei pesi atomici. Ad esempio, in uno dei suoi libri, *Friedrich August Kekulé von Stradonitz* aveva riportato l'elenco (che viene mostrato nella Figura 47) di 19 diverse formule della struttura dell'acido acetico, un composto di per sé ben caratterizzato in laboratorio.

Anche riguardo ai pesi atomici c'era una grande confusione. La Figura 48 mostra i diversi sistemi di pesi atomici adottati dai vari laboratori.

Per uscire da questo stato di cose, Kekulé ebbe l'idea di organizzare un convegno di chimici per risolvere i punti controversi e nel 1859 contattò *Weltzien* e *Wurtz* per sondare la possibilità di organizzarlo. Il primo *Congresso Internazionale di Chimica* si tenne a Karlsruhe dal 3 al 5 settembre

1860 (Laing 1995). Tutti i più importanti chimici europei parteciparono al Congresso per discutere i problemi controversi riguardanti le formule strutturali, la nomenclatura, la notazione chimica e i pesi atomici.

Al congresso parteciparono anche due chimici italiani, Stanislao Cannizzaro (1826-1910) (Cerruti 1982) e Angelo Pavesi (1830-1896); quest'ultimo era un chimico italiano che in quel periodo era a Heidelberg per perfezionarsi alla scuola di Liebig.

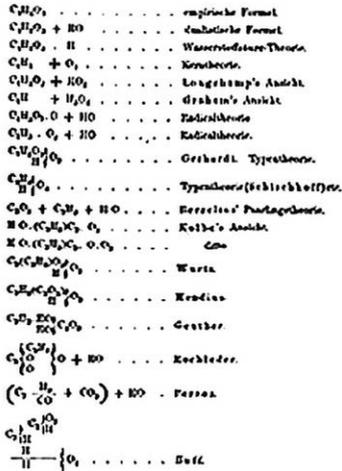


Figura 47 – 19 diverse formule chimiche dell'acido acetico.

A	B	C	D	E	F
Sauerstoff	O	8	100	8,01	100
Wasserstoff	H	1	12,5	0,50	6,2398
Kohlenstoff	C	6	75	6,13	76,44
Boron	B	10,5	131,25	10,91	136,20
Phosphor	P	31,4	392,5	15,72	196,14
Schwefel	S	16	200	16,12	201,17
Selen	Se	40	500	39,63	494,58
Iod	I	126	1575	63,28	789,75
Brom	Br	78,4	980	39,20	489,75
Chlor	Cl	35,4	442,5	17,74	221,33
Fluor	F	18,7	233,75	9,37	116,90
Sickstoff	N	14	175	7,09	88,52
Kalium	K	39,2	490	39,26	489,92
Natrium	Na	23,2	290	23,31	290,90
Lithium	L	6,4	80	6,44	80,33
Baryum	Ba	68,6	857,5	68,66	856,88
Strontium	Sr	44	550	43,85	547,29
Calcium	Ca	20,5	256,25	20,52	256,02
Magnium	Mg	12,7	158,75	12,69	158,35
Cerium	Ce	46	575	46,05	574,70
Yttrium	Y	32,2	402,5	32,25	402,51
Glycium	G	17,7	221,25	17,54	221,26
Aluminium	Al	13,7	171,25	13,72	171,17

Figura 48 – I diversi sistemi di pesi atomici.

Il Congresso fu inconcludente, ma l'ultimo giorno Cannizzaro, che nel 1858 aveva pubblicato un *Sunto di un corso di filosofia chimica*, si espresse vigorosamente a favore dell'ipotesi di Avogadro che egli adottava completamente nel suo corso:

Si propone di adottare concetti diversi per molecola e atomo, considerando molecola la quantità più piccola di sostanza che entra in reazione e che ne conserva le caratteristiche fisiche, e intendendo per atomo la più piccola quantità di un corpo che entra nella molecola dei suoi composti.

Al termine della riunione Pavesi distribuì alcune ristampe del *Sunto* di Cannizzaro ai congressisti. La presentazione di Cannizzaro del suo *Sunto* fu un grande successo, suscitando anche l'entusiasmo di Lothar Meyer (1830-1895) che scrisse: «avevo anche un campione e me lo misi in tasca per leggerlo lungo la via del ritorno. L'ho riletto più e più volte a casa e sono rimasto stupito dalla chiarezza che la breve sceneggiatura ha infuso» e in seguito commentò ulteriormente che: «era come se le squame cadessero dai miei occhi, il dubbio svanisse e fosse sostituito da una sensazione di pacifica certezza».

Anche grazie alla partecipazione e al prestigio di Lothar Meyer le idee di Cannizzaro entrarono rapidamente in campo. In breve tempo tra i chimici la distinzione tra atomi e molecole divenne chiara, così come l'adozione di un sistema di corretti pesi atomici, anche grazie alle accurate determinazioni di Berzelius.

### 8.8.2 *Contare e misurare le molecole*

Una volta condiviso il principio di Avogadro che, determinate le condizioni di temperatura e pressione, un dato volume di gas contiene un ben definito numero di molecole, la sfida diventava determinare questo numero di molecole. A tal fine era necessario definire preliminarmente delle opportune condizioni standard riguardanti il peso atomico, e quindi molecolare se necessario, e un volume di riferimento. Per quanto riguarda il peso atomico le scelte adottate nel corso del tempo hanno riguardato l'idrogeno, perché il più leggero degli elementi e quindi ideale unità di riferimento, e l'ossigeno, come elemento che più facilmente si combina con gli altri elementi. Con la scoperta della radioattività e della esistenza degli isotopi si rese necessario scegliere non solo un elemento di riferimento ma anche un suo specifico isotopo. Infine, in tempi relativamente recenti, la scelta dell'elemento di riferimento per i pesi atomici è caduta sull'isotopo 12 del carbonio,

$^{12}\text{C}$ , come isotopo più abbondante del carbonio, elemento che entra nella composizione di moltissime sostanze chimiche. L'unità di massa atomica è stata di conseguenza definita come la dodicesima parte della massa del  $^{12}\text{C}$ : *u.m.a.* =  $1.6605 \times 10^{-27}$  g. Il volume di riferimento diventa allora quello che, in condizioni standard, contiene un peso di gas uguale al peso molecolare del gas. Nel 1900 *Ostwald* ha proposto di chiamare *mole* questa quantità: «il peso molecolare di una sostanza, espresso in grammi, dovrebbe da ora in poi essere chiamato mole».

Il numero di molecole contenuto in mole è stato definito, agli inizi del 1900, *Numero di Avogadro*:  $N = 6.02214 \times 10^{23}$ . Si tratta di un numero enorme che non ha mancato di colpire l'immaginazione dei poeti. Una poesiola scherza sul numero di Avogadro:

Avogadro ha concepito un numero  
 Usato per rendere gli studenti di Chim pazzi  
 Egli ha proiettato atomi e moli  
 In codici matematici  
 Che ci danno tanta sofferenza a ricordarli.

È un'altra poesia racconta di Avogadro all'inseguimento delle 'sue' molecole:

O VENITE TUTTI I GAS  
 O venite tutti i gas  
 Diatomiche meraviglie  
 O venite tutti, venite tutti  
 Chiama Avogadro  
 O venite così in moli  
 $6 \times 10$  alla 23ma  
 O massa molecolare e molecole  
 O volume, pressione e temperatura  
 O volume molare dei gas a S.T.P.

In modo più diffuso e concreto, la scoperta di Avogadro e la grandezza del suo numero sono celebrate in una poesia di S. R. Scholes (Scholes 1965) *On Avogadro's number (As Shakespeare's Prospero may write)*:

*Sul numero di avogadro*  
*(Come Prospero di Shakespeare potrebbe scrivere)*

Una volta facevo meraviglie con la mia stregoneria  
 Ma quando ho visto quello che la Chimica può fare  
 Ho rotto la mia bacchetta, dimenticato le parole segrete

E buttato a mare i miei libri di magia.  
 Il grande Chimico Italiano, Avogadro,  
 Visti tutti i gas essere uguali  
 In contrazione sotto pressione e dilatazione, a caldo,  
 Dichiarò che uguali volumi contengono  
 (A temperatura e pressione uguali)  
 Un ugual numero di molecole  
 Indipendentemente dal tipo di gas.  
 Questa idea, prima una pura ipotesi,  
 Divenne cosa accertata. La porta  
 D'ingresso della moderna Chimica.  
 E ora, quanto grande è il numero di Avogadro?  
 Cent'anni passarono prima che l'uomo sapesse.  
 Si prende il volume grammo-molecolare,  
 In litri ventidue virgola quattro, temperatura del ghiaccio,  
 A pressione atmosferica standard  
 Il numero trovato è enorme, un po' più  
 Che sei volte dieci alla potenza di ventitre.  
 Un numero troppo grande da capire  
 Ed è proprio così vago in potenze di dieci  
 Come scrivere sei con ventitre zeri  
 O in parole: «sei cento milioni di milioni di miliardi».  
 Se tutte le terre di tutto il mondo fossero un prato  
 (Senza deserti, montagne, foreste o campi arati)  
 Dove crescessero fili d'erba, cento per piede,  
 Per piede quadrato dieci mila, tutta la terra  
 Avrebbe spazio per due per dieci alla diciannove.  
 Così, trentamila terre di prato potrebbero far crescere  
 Tanti fili d'erba da raggiungere il Numero di Avogadro.

Con i moderni metodi sperimentali la determinazione del numero di Avogadro può essere semplice. Con la diffrazione dei raggi X possiamo determinare le dimensioni della cella elementare di un metallo e riportando questo dato alla mole del metallo possiamo arrivare direttamente al numero di Avogadro. Oppure, potremmo usare la legge di Faraday che ci dice quale è la carica di una mole di ioni, ad esempio dello ione idrogeno: dividendo questa carica per la carica dello ione idrogeno otteniamo il numero di Avogadro. Per gli scopi del nostro racconto può essere interessante vedere come si sono nel tempo sviluppati i tentativi di ricavare indirettamente il numero di Avogadro o la dimensione molecolare prima degli approcci più quantitativi di *Loschmidt* e di *Perrin* (Massa, Mana 2016; French 1967; Hawthorne 1970).

Uno stimolo a tentativi di ricerca delle dimensioni delle particelle elementari può essere derivato dalla scoperta del microscopio che sarà perfezionato da Leeuwenhock nel 1663 e dalla accessibilità alla visione diretta di oggetti di dimensioni inferiori al micron. Il limite di diffrazione sarà stabilito a  $0.2\text{micron}$  e certamente dovevano esistere oggetti più piccoli di questa dimensione. La prima determinazione della dimensione atomica si deve a Johann Chrysostomos Magnenus (1590-1679) nel 1646 (Massa, Mana 2016). Magnenus considerò un grano di incenso (64.8 grammi di peso) che si diffonde in una chiesa avente un volume 700 milioni di volte superiore al volume del grano. Assumendo che sia necessario  $1/1000$  di grano di incenso per percepirne l'odore, Magnenus giunse alla stima che un grano di incenso conteneva  $7.776 \times 10^{18}$  atomi o molecole. Lo stesso esperimento fu in seguito riportato nel 1654 da Walther Charleton (1620-1707), un allievo e seguace di Gassendi (Porto 1997). Una interessante stima delle dimensioni atomiche si deve a Thomas Young (1773-1829) dallo studio della tensione superficiale nei liquidi (Scott, MacDonald 1965; Fera 2016). Nel 1815 Young stimò la dimensione atomica nell'intervallo  $0.5-5 \times 10^{-8}\text{cm}$ , cioè tra uno e cinque volte il raggio di Bohr dell'atomo di idrogeno.

Johann Josef Loschmidt (1821-1895), del quale riparleremo in seguito a proposito della termodinamica statistica, riuscì a determinare le dimensioni atomiche sulla base della teoria cinetica dei gas che stabilisce una relazione tra il libero percorso medio delle particelle e le loro dimensioni, usando il coefficiente di condensazione (Loschmidt 1995; Hawthorne 1970). Il valore ottenuto da Loschmidt per il diametro molecolare era dell'ordine di 0.97 nm in ottimo accordo con i valori reali attuali. Il numero di Loschmidt, che attualmente è diventato sinonimo di numero di Avogadro, era inizialmente inteso come numero di molecole in un centimetro cubo. Il numero ottenuto da Loschmidt era di  $1.9 \times 10^{19}$  che corrisponde al 79 per cento del valore attuale di  $2.7 \times 10^{19}$ .

La prima determinazione accurata del numero di Avogadro si deve a Jean Baptiste Perrin (1870-1942), fisico francese e premio Nobel per la fisica nel 1926. Perrin per primo indicò la denominazione di numero di Avogadro per il numero di molecole in una grammomolecola di una sostanza. Per la determinazione del numero di Avogadro Perrin usò vari metodi ma, in primis, si basò sulla teoria di Einstein del moto browniano, cioè del movimento caotico di particelle microscopiche in un liquido o in un gas (Perrin 2014).

La determinazione di Perrin fu di particolare importanza in quanto pose definitivamente termine ai dubbi ancora esistenti sulla reale esistenza degli atomi.

### 8.9 Mendeleev e il sistema periodico

A questo punto i tempi erano maturi per una sistematizzazione delle vaste conoscenze chimiche. Il tentativo di riduzione della molteplicità del mondo naturale ad un numero finito di elementi e di regole fondamentali risale ai filosofi greci. Nella cosmogonia di Platone ci sono quattro elementi fondamentali (aria, acqua, fuoco e terra) che sono associati a forme geometriche semplici, i solidi platonici, simbolo di bellezza e perfezione, dalle cui combinazioni si formano tutti gli oggetti del mondo naturale. Nella concezione di Aristotele sono le qualità piuttosto che le forme geometriche degli elementi ad avere un ruolo fondamentale. Come è stato accennato nel capitolo precedente (vedi Figura 35), un presagio della moderna tavola periodica è stato visto nei sette metalli degli alchimisti (oro, argento, ferro, mercurio, piombo, stagno, rame), ognuno associato ad un corpo celeste. È la magia del numero sette che, come vedremo ritornerà in tempi più recenti nella regola delle ottave di Newlands, il vero antecedente della tavola periodica di Mendeleev. In effetti, per menzionare solo alcune delle ricorrenze di questo numero, sette sono le meraviglie del mondo antico, i saggi, le porte di Tebe, i colori dell'arcobaleno, i giorni della settimana, le zone celesti dell'antichità, le stelle dell'orsa.

La sistematizzazione di cui ora si sentiva il bisogno era di ben altra natura e doveva fare riferimento a dati numerici o matematici perfettamente definiti. Questa sistematizzazione è stata realizzata da Dmitri Ivanovich Mendeleev, che aveva partecipato al Congresso di Karlsruhe (Scerri 2011, 2006; Ciardi 2019; Gordin 2019). Ma prima di Mendeleev c'erano stati altri tentativi, sia pure parziali, di una organizzazione logica degli elementi, tentativi che costituiscono una anticipazione della tavola periodica.

L'esistenza di peculiari caratteristiche simili tra elementi chimici cominciò a sembrare evidente già all'inizio della prima metà del XIX secolo, che vide man mano arricchirsi il numero degli elementi semplici noti, tanto che nel 1869 erano già conosciuti 63 elementi con pesi atomici ormai sicuri e proprietà chimiche ben studiate. Il primo a rendersi conto dell'esistenza di regolarità nelle proprietà

chimiche di alcuni elementi fu il tedesco Johann Wolfgang Döbereiner (1780-1849), professore all'Università di Jena, che nel 1829 notò che alcuni gruppi di tre elementi, che chiamava *triadi* (Figura 49), avevano proprietà simili. Döbereiner si rese conto del fatto che in un gruppo di tre elementi che formavano una triade particolare, le proprietà fisiche erano abbastanza paragonabili e tali che, in ogni caso, la massa di uno degli elementi era intermedia tra quella degli altri due con molte proprietà chimiche e fisiche simili. Per esempio, la massa atomica e la densità del sodio erano intermedie tra quelle del litio e quelle del potassio e lo stesso comportamento si notava per la triade calcio, stronzio e bario, per quella zolfo, selenio e tellurio e per quella cloro, bromo e iodio.

Nel periodo 1862-1863, il geologo francese Alexandre Émile Béguyer de Chancourtois (1820-1886) aveva sistemato gli elementi in ordine di peso atomico crescente, in forma di una spirale avvolta attorno a un cilindro di un apposito diametro, constatando che gli elementi che si trovavano lungo una verticale avevano proprietà chimiche simili (vedi Figura 50), e chiamò il grafico risultante *vis tellurique* (spirale tellurica) in quanto il tellurio occupava il centro della figura.

H						He	
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

Figura 49 – Le triadi di Dobereiner.

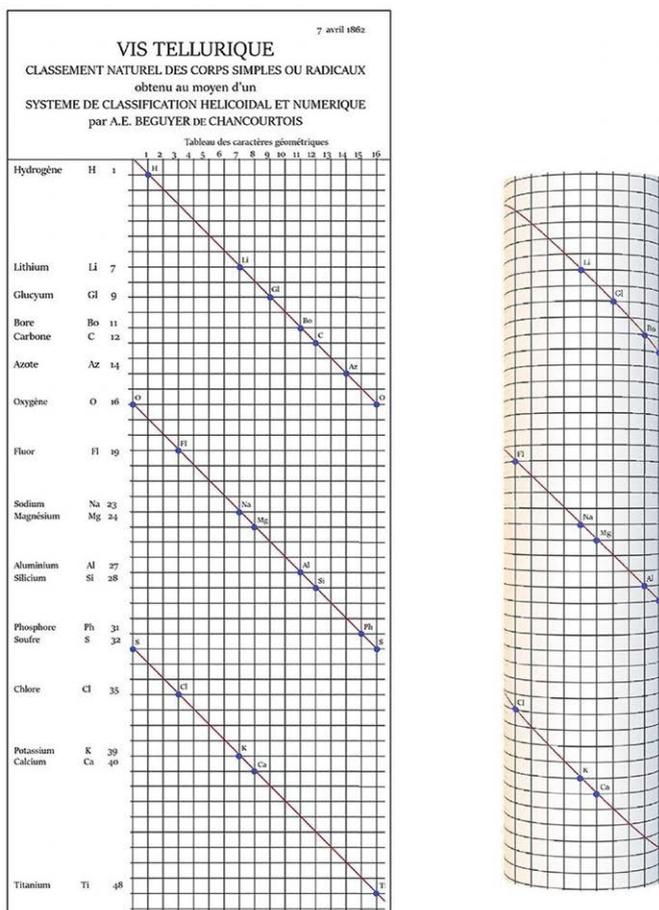


Figura 50 – Vis Tellurique: la tavola periodica a spirale.

Nel 1865, l'inglese John Alexander Reina Newlands (1838-1898) in un articolo su *Chemical News* (vedi Figura 51) riportò quella che chiamò *legge delle ottave*, secondo la quale aveva riorganizzato di nuovo gli elementi secondo il peso atomico crescente, osservando che le loro proprietà chimiche sembravano ripetersi nella sequenza a gruppi di otto elementi alla volta, commentando che:

in altre parole, membri dello stesso gruppo stanno l'uno all'altro nella stessa relazione delle estremità di una o più ottave nella musica.

From the 'Chemical News,' vol. xii. p. 83, Aug. 18, 1865.

## ON THE LAW OF OCTAVES.

TO THE EDITOR.

SIR,—With your permission, I would again call attention to a fact pointed out in a communication of mine, inserted in the *Chemical News* for August 20, 1864. If the elements are arranged in the order of their equivalents, with a few slight transpositions, as in the accompanying table, it will be observed that elements belonging to the same group usually appear on the same horizontal line.

No.	No.	No.	No.	No.	No.	No.	No.	No.	No.
H 1	F 8	Cl 15	Co & Ni 22	Br 29	Pd 36	I 42	Pt & Ir 50		
Li 2	Na 9	K 16	Cu 23	Rb 30	Ag 37	Cs 44	Tl 53		
G 3	Mg 10	Ca 17	Zn 25	Sr 31	Cd 38	Ba & V 45	Pb 54		
Bo 4	Al 11	Cr 19	Y 24	Ce & La 33	U 40	Ta 46	Th 56		
C 5	Si 12	Ti 18	In 26	Zr 32	Sn 39	W 47	Hg 52		
N 6	P 13	Mn 20	As 27	Di & Mo 34	Sb 41	Nb 48	Bi 55		
O 7	S 14	Fe 21	Se 28	Ro & Ru 35	Te 43	Au 49	Os 51		

NOTE.—Where two elements happen to have the same equivalent, both are designated by the same number.

It will also be seen that the numbers of analogous elements generally differ either by 7 or by some multiple of seven; in other words, members of the same group stand to each other in the same relation as the extremities of one or more octaves in music. Thus, in the nitrogen group, between nitrogen and phosphorus there are 7 elements; between phosphorus and arsenic, 14; between arsenic and antimony, 14; and lastly, between antimony and bismuth, 14 also.

This peculiar relationship I propose to provisionally term the "Law of Octaves."

I am, &amp;c.,

August 8, 1865.

JOHN A. R. NEWLANDS.

Figura 51 – L'articolo di Newlands sulla legge delle ottave.

L'esistenza di queste regolarità sembrava però non interessare nessuno e appariva una pura attività accademica, ben lontana dal rappresentare una legge importante per la comprensione delle proprietà degli elementi. Anzi, il riferimento alle ottave musicali aveva piuttosto suscitato ilarità.

Il salto concettuale importante che permise però di trasformare un'operazione puramente classificatoria in una vera e propria legge

della natura fu realizzato dal chimico russo *Dmitrij Ivanovic Mendeleev* (1834-1907) nel periodo 1869-1871. Con Mendeleev la ricerca di una tavola periodica degli elementi (o come lui preferiva dire di un sistema periodico) divenne non la ricerca di una regolarità nei comportamenti chimici e fisici ma la ricerca di una legge universale che si manifesta anche nei fenomeni chimici:

È funzione della scienza quella di scoprire l'esistenza di un regno di ordine generale nella natura e di trovare le cause che disciplinano questo ordine. E questo si riferisce in misura uguale alle relazioni dell'uomo – in campo sociale e politico – e all'intero universo nel suo insieme.

Un progetto molto ambizioso che non poteva prescindere, se vogliamo giudicare la genialità del sistema periodico a posteriori, dall'immaginazione dello scienziato alla quale Mendeleev assegna un ruolo fondamentale:

Come nell'immaginazione di Dante l'aria invisibile si affolla di esseri spirituali, così, davanti agli occhi del più attento ricercatore, e specialmente davanti agli occhi di Clerk Maxwell, la massa invisibile dei gas si popola di particelle.

La scoperta della tavola periodica da parte di Mendeleev è avvolta nella leggenda (Strathern 2000; Phillpoff et al. 2015), come avvalorato dallo stesso chimico russo. Si racconta che nella notte del 16 febbraio 1869 Mendeleev abbia fatto un sogno durante il quale gli elementi chimici gli sarebbero apparsi ordinati nella sua tavola periodica: al mattino, svegliatosi, si sarebbe alacremenente messo al tavolo per trascrivere su carta l'oggetto del sogno.

Ho visto in un sogno una tavola in cui tutti gli elementi erano al loro posto come richiesto. Appena mi sono svegliato, l'ho immediatamente trascritto su un pezzo di carta.

La rivelazione nel sogno è motivo ricorrente in tutta la storia dell'uomo ma è più frequentemente associata con le intuizioni degli artisti: la leggenda della tavola periodica ci vuole mostrare che l'intuizione, l'eureka, non fa distinzione tra arte e scienza, anche se la realtà della scoperta scientifica è assai più complessa. Un'altra leggenda del sistema periodico è quella del *solitario chimico* (Phillpoff et al. 2015). Si racconta

che Mendeleev aveva predisposto una tavola, una scheda, per ognuno degli elementi chimici noti riportando peso atomico, volume, valenza e altre proprietà chimiche. Per tre giorni avrebbe giocato, come in un solitario, con le sue schede, cercando di portarle a un qualche ordine, ascendente o discendente, senza giungere a una conclusione. Al termine, sfinito, si sarebbe addormentato per il sogno rivelatore che abbiamo raccontato sopra.

Lasciando da parte la leggenda e venendo ad aspetti più sostanziali, l'intento più propriamente programmatico che Mendeleev si pose era non semplicemente quello della ricerca di criteri di correlazione tra le proprietà degli elementi chimici ma della ricerca di un principio fondamentale:

Avevo l'intenzione di stabilire qualche forma del sistema degli elementi in cui la loro distribuzione non fosse guidata dal caso [...] ma da qualche forma di definito ed esatto principio.

È questo il proposito che proietta la legge periodica in una dimensione che va oltre la chimica.

La data ufficiale di nascita del sistema periodico di Mendeleev può essere fissata al 6 marzo 1869 quando nella prima riunione della *Società Chimica Russa*, alla cui fondazione aveva contribuito lo stesso Mendeleev, venne presentata da *V.A. Menshutkin*, segretario della Società, una relazione di Mendeleev dal titolo *La correlazione delle proprietà e del peso atomico degli elementi*. Nell'occasione Mendeleev era assente perché impegnato in una missione presso aziende casearie. La relazione sarà poi pubblicata nel primo volume degli atti della Società. Quella, rappresentata nella Figura 52, è stata solo la formulazione iniziale della tavola di Mendeleev.

Mendeleev aveva compreso che il peso atomico non bastava a regolare le proprietà chimiche degli elementi, ma che solo dando importanza alla periodicità della valenza e del volume atomico era possibile ottenere una sistematizzazione corretta. Su questa base Mendeleev dispose gli elementi in funzione del peso atomico in una successione di elementi con valenza crescente, che organizzò in una tabella in cui lasciò tre posti vuoti, assumendo che essi dovessero corrispondere ad elementi ancora non noti che chiamò *eka-boro*, *eka-alluminio* ed *eka-silicio*, predicandone molte proprietà chimiche e fisiche. Inoltre invertì la posizione del tellurio con quella dello iodio affinché il primo cadesse nella colonna degli elementi bivalenti e il secondo in

quella dei monovalenti. Solo tre anni dopo, nel 1874, *Lecoq de Boisbaudran* (1838-1912) scoprì il gallio che Mendeleev dimostrò essere il suo *eka-alluminio*.

### ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ВѢСЪ АТОМНОЕ ВѢСЪ И ХИМИЧЕСКОЕ СХОДСТВО.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4.
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198.
			Ni = 59	Pd = 106,8	Os = 199.
			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.
H = 1	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	U = 116	Au = 197?
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?	
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127	
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204.
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207.
		? = 45	Ce = 92		
		?Er = 56	La = 94		
		?Yt = 60	Di = 95		
		?In = 75,6	Th = 118?		

Д. Менделѣевъ

Figura 52 – Il sistema periodico originario di Mendeleev.

Il sistema periodico degli elementi, nella forma completa datagli da Mendeleev nel 1871, non era soltanto una classificazione di proprietà chimiche e fisiche, ma aveva in sé tutto il potere di previsione di una teoria, che permetteva non solo di stabilire che altri elementi non noti dovevano esistere ma, anche, che il numero di elementi doveva necessariamente essere limitato (Figura 53). Riuscire a ridurre l'enorme varietà della materia a un centinaio di elementi o poco più, rappresenta il risultato più impressionante di quella mentalità riduzionistica che tanta importanza ha avuto nello sviluppo della scienza. Come vedremo in seguito, il sistema periodico di Mendeleev ha rappresentato il necessario supporto chimico alle teorie quantistiche della struttura dell'atomo.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

Figura 53 – La tavola periodica degli elementi.

Oggi sappiamo che l'ordinamento degli elementi nella tavola periodica non dipende dal peso atomico ma dal numero atomico (il numero di protoni nel nucleo atomico) e che le proprietà chimiche e fisiche degli elementi dipendono dalla struttura elettronica dell'atomo. Mendeleev ovviamente non sapeva nulla di tutto questo. Tuttavia, la struttura della tavola periodica degli elementi è rimasta invariata (a parte i numerosi completamenti) rispetto a quella di Mendeleev superando, quasi indenne, la rivoluzione della meccanica quantistica e della struttura interna dell'atomo.

Questo rende l'intuizione e il lavoro del chimico russo ancora più straordinari (Emsley 1998):

Finché si studierà la chimica ci sarà una tavola periodica. E anche se un giorno comunicheremo con un'altra parte dell'universo, possiamo essere sicuri che una cosa che entrambe le culture avranno in comune sarà un sistema ordinato di elementi che sarà immediatamente riconoscibile da entrambe le forme di vita intelligenti.



## LA FINE DELL'ATOMO INDIVISIBILE

9.1 *L'atomo in cerca di un'identità*

La descrizione riportata nel capitolo precedente degli sviluppi e dell'evoluzione della chimica tra il XVII e XIX secolo in termini di interpretazione atomistica di risultati sperimentali sempre più estesi ed accurati ha mostrato un percorso accidentato ed anche contrastato ma nel complesso sempre più convinto. Eppure, l'atomo continuava ad essere un oggetto invisibile che si manifestava come strumento utile, o forse indispensabile, di interpretazione e anche di previsione di dati macroscopici. Questa duplice natura dell'atomo nel modo di pensare dei chimici si può chiaramente riconoscere nella concezione atomistica di Mendeleev (Scerri 2007; Kaji 2002; Schettino 2022).

La concezione della struttura atomica di Mendeleev è ambigua. Il problema che egli si poneva era quello della struttura di sostanze con proprietà definite ma di composizione variabile, problema che rimarrà aperto per molto tempo e che lo portava a dubitare della struttura atomica della materia, almeno per quanto riguardava le leggi delle proporzioni definite e multiple:

Composti con proporzioni indefinite [...] parlano contro la dottrina atomica allo stesso modo che composti chimici di proporzioni definite parlano in suo favore.

Esistevano, infatti, composti come il solfuro di rame con composizione variabile tra  $Cu_{1,37}S$  e  $CuS$ . Oggi sappiamo che, trattandosi di un composto solido, la deviazione dalla legge delle proporzioni definite dipende da irregolarità della struttura cristallina, una particolarità sconosciuta a Mendeleev. I sostenitori della legge delle proporzioni

definite attribuivano l'anomalia ad errori sperimentali. Mendeleev distingueva tra corpi semplici ed elementi:

Un elemento è un concetto astratto; è il materiale contenuto in un corpo semplice e che può, senza alcun cambiamento in peso, essere convertito in tutti i corpi che possono essere ottenuti da questo corpo semplice.

La concezione di Mendeleev sembra, quindi, prescindere dalla ipotesi atomica e il peso atomico, che egli tende a chiamare piuttosto *peso dell'elemento*, è una proprietà numerica che caratterizza l'elemento indipendentemente dai composti in cui il relativo corpo semplice si trova in combinazione chimica:

Comunque le proprietà dei corpi semplici cambino nello stato libero, qualcosa rimane costante [...]. Il valore del peso atomico, per natura essenziale della materia, è comune ai corpi semplici e a tutti i loro composti. Il peso atomico appartiene non al carbone o al diamante, ma appartiene al carbonio.

Secondo Mendeleev il peso atomico è la quantità minima di un elemento presente nelle molecole composte dell'elemento stesso; una proprietà essenziale che prescinde dalla esistenza degli atomi. Questa concezione conferisce al peso atomico di Mendeleev un valore di proprietà assoluta di carattere generale dell'elemento inteso come ente astratto.

L'eccezionalità del sistema periodico di Mendeleev consiste da un lato nel suo carattere euristico e, come abbiamo visto, nella sua capacità di prevedere l'esistenza e le proprietà di nuovi sconosciuti elementi e, dall'altro, nella straordinaria adattabilità a nuove conoscenze della struttura atomica. Già Mendeleev, scambiando nella tavola la posizione del tellurio e dello iodio, trascurandone l'ordine di peso atomico, si era reso conto che il peso non poteva essere l'unico criterio ordinatore. Lo sviluppo delle conoscenze della struttura atomica mostreranno che l'ordinamento degli elementi nel sistema periodico è determinato dal numero atomico (o carica nucleare) ma il sistema periodico inventato da Mendeleev si adatterà a questo nuovo principio di ordinamento e potrà essere adattato, anche se non nella sostanza [ripetizione delle proprietà ogni otto termini], sia all'insieme delle terre rare sia alla scoperta degli elementi zero-valenti dei gas nobili, a cominciare dall'argon la cui presenza nell'aria era stata sospettata da *Henri Cavendish* già nel 1785 e che fu isolato solo nel 1902 da *Lord Rayleigh* e *Sir William Ramsay*.

## 9.2 *Gli atomi e la termodinamica statistica*

Il contrasto tra convinti sostenitori e oppositori dell'atomismo può essere illustrato considerando lo sviluppo della termodinamica statistica (Sen 2021). La termodinamica classica è una teoria fenomenologica che studia le trasformazioni dell'energia (lavoro, calore) in sistemi macroscopici nel loro insieme a prescindere dalla natura e dai meccanismi dello scambio energetico. La termodinamica classica si fonda su due principi. Il primo afferma che l'energia di un sistema isolato è costante e, quindi, possiamo osservare solo le trasformazioni tra le varie forme di energia. Il secondo principio riguarda le trasformazioni dell'energia e stabilisce che in una trasformazione irreversibile di un sistema isolato l'entropia  $S$  aumenta. Semplificando le cose al massimo, il secondo principio è la generalizzazione dell'osservazione che il calore spontaneamente fluisce da un corpo più caldo a uno più freddo fino al raggiungimento di una condizione di equilibrio con i due corpi alla stessa temperatura. Alla definizione della entropia come funzione di stato si è giunti attraverso lo studio quantitativo delle macchine termiche che tanta importanza hanno avuto nella rivoluzione industriale (Salvi, Schettino 2019).

Nella seconda metà del XIX secolo Ludwig Boltzmann (1844-1906) e Josiah Willard Gibbs (1839-1903) svilupparono la termodinamica statistica che riformula le leggi della termodinamica partendo dalla conoscenza microscopica dei sistemi, cioè sulla base della conoscenza della posizione e del movimento delle particelle elementari costituenti il sistema (Sen 2021). Quindi, la termodinamica statistica parte sulla base di una teoria atomistica, o comunque particellare, della materia. Le particelle elementari si muovono secondo le leggi newtoniane della meccanica classica che sono leggi reversibili temporalmente nel senso che, se si inverte la direzione del tempo, la traiettoria della particella ritorna indietro <sup>1</sup>. In un gas il numero delle particelle è estremamente elevato e le particelle hanno individualmente velocità (ed energia) variabili fino a valori molto alti. In tale situazione, conoscere velocità e posizione di ogni singola particella ad ogni istante è impossibile ed è quindi utile solo conoscere la velocità o l'energia media delle particelle o la distribuzione delle energie delle particelle. La Figura 54 mostra la distribuzione delle velocità delle particelle di un gas (*distribuzione di*

<sup>1</sup> Nel caso più semplice si assume di trattare particelle sferiche con il solo moto rettilineo nelle tre direzioni con urti elastici tra le particelle.

*Maxwell-Boltzmann*) a tre diverse temperature ( $T_3 > T_2 > T_1$ ). In questo modo Boltzmann riuscì a stabilire una correlazione tra grandezze macroscopiche, come la temperatura assoluta  $T$ , e grandezze microscopiche come l'energia media di una particella che è data da  $E = kT$ , dove  $k$ , la costante che collega mondo microscopico e macroscopico, è la costante di Maxwell-Boltzmann:  $k = 1.3810^{-23} JK^{-1}$ .

Secondo la teoria di Boltzmann, l'evoluzione spontanea di un sistema fisico, che classicamente comporta un aumento dell'entropia, da un punto di vista microscopico e atomistico avviene nella direzione degli stati di distribuzione (di posizioni e velocità) più probabili. Se indichiamo con  $W$  la probabilità del sistema microscopico, l'entropia è definita in termini del logaritmo naturale della probabilità da  $S = k \ln W$ . È questa la famosa formula di Boltzmann incisa sulla sua tomba (Figura 55).

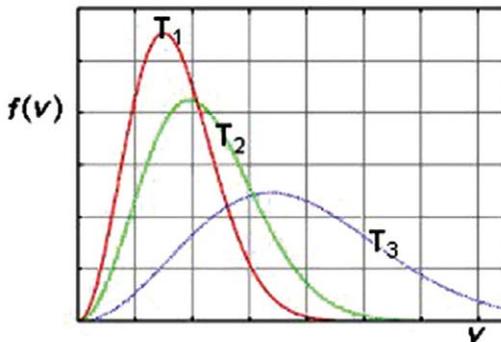


Figura 54 – La distribuzione di Maxwell-Boltzmann.

I lavori di Boltzmann, che si basavano su una esplicita assunzione di una ipotesi atomica, erano scritti in uno stile oscuro per molti degli scienziati suoi contemporanei e questo, insieme all'estrema matematizzazione della sua trattazione, rese impossibile per molti l'accettazione delle sue teorie. Uno strenuo oppositore delle teorie di Boltzmann fu Friedrich Wilhelm Ostwald (1853-1932), uno dei fondatori della chimica fisica, contrario alla introduzione del concetto microscopico di atomo in una teoria macroscopica come la termodinamica. Nonostante questa sua opposizione alla teoria atomica, per lo meno per quanto riguarda la termodinamica, a Ostwald si deve poi la definizione del concetto di mole.

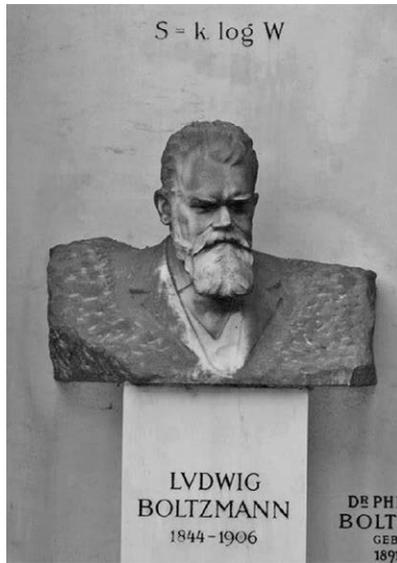


Figura 55 – La tomba di Boltzmann con la sua formula.

Tuttavia, ci fu anche una opposizione di carattere più sostanziale all'approccio statistico e atomistico di Boltzmann da parte di Johann Joseph Loschmidt (1821-1895)<sup>2</sup>, grande chimico e fisico e amico ed estimatore di Boltzmann. La critica è nota come *paradosso di Loschmidt* o *paradosso di reversibilità*. Se le particelle elementari si muovono secondo le leggi reversibili della meccanica classica verso lo stato più disordinato possibile, e quindi più probabile, dovrebbe essere possibile ritornare indietro verso uno stato ordinato. La risposta di Boltzmann al paradosso è semplice: il ritorno indietro non è concettualmente impossibile ma è semplicemente improbabile. Una analogia del problema è la seguente. Se una persona che non conosce la lingua italiana si mettesse davanti a una macchina da scrivere battendo i tasti a caso potrebbe alla fine riuscire scrivere il primo verso dell'*Infinito* di Leopardi (*Sempre caro mi fu quest'ermo colle*): potrebbe accadere ma la cosa è semplicemente estremamente improbabile.

<sup>2</sup> Nel 1865, come abbiamo visto, Loschmidt aveva determinato sperimentalmente le dimensioni di una molecola di acqua attraverso misure di libero cammino medio, come descritto in (W. W. Portefield, 1995), ottenendo un valore solo due volte superiore al valore reale.

### 9.3 La chimica organica e la struttura spaziale delle molecole

La discussione del capitolo precedente è stata confinata al campo della chimica inorganica che ha seguito un diverso percorso rispetto alla chimica organica, essendo quest'ultima stata condizionata per lungo tempo dal concetto di vitalismo, secondo il quale i composti del mondo organico, vegetale e animale, si producevano solo grazie a una *vis vitalis* e potevano, quindi, solo essere estratti ma non prodotti artificialmente in laboratorio. Un punto di svolta in questo ambito è stata la sintesi dell'urea, tipico composto organico, per trasformazione del cianato di ammonio secondo la reazione riportata nella Figura 56:



Figura 56 – Sintesi dell'urea dal cianato di ammonio.

Questa reazione fu realizzata per la prima volta nel 1828 da Friedrich Wöhler (1800-1882) che con questa sintesi spazzò via la antica divaricazione tra mondo minerale e mondo animale e tra sostanze organiche e inorganiche. Nel periodo dal 1844 al 1870 il numero di composti organici sintetizzati in laboratorio passò da 720 a 10700. Questo enorme sviluppo pose nuovi problemi di interpretazione chimica in termini atomistici.

Jacobus Van't Hoff (1852-1911), grande innovatore nella chimica e fondatore della chimica fisica, ha ricevuto il primo premio Nobel per la chimica nel 1901 per i suoi studi sulle soluzioni e sulla pressione osmotica. Il primo grande risultato scientifico di Van't Hoff è contenuto in un breve articolo pubblicato prima della sua tesi di dottorato: *Proposta per l'estensione delle attuali formule di struttura chimiche nello spazio*, in cui ha immaginato che l'atomo di carbonio formi quattro legami diretti verso i vertici di un tetraedro dando origine alla stereochimica. Questa idea rivoluzionaria fu inizialmente giudicata una pura fantasia e sembrava forse tale anche a Van't Hoff che costruì modelli di cartone di molecole tetraedriche che inviava ai colleghi increduli:

potrebbe esserci qualche difficoltà nel seguire il mio ragionamento. L'ho sentito io stesso e ho fatto uso di figure di cartone per facilitare la rappresentazione. Non volendo richiedere troppo al lettore gli manderò volentieri la collezione completa di tutti questi oggetti.

L'idea di molecole con legami precisamente orientati nello spazio tridimensionale non nasceva dal nulla. La rappresentazione delle formule chimiche nel piano era insoddisfacente, particolarmente in molecole complesse in cui c'era la possibilità di isomeria, cioè di composti con la stessa formula di struttura ma con differenti proprietà forse dovute a una diversa disposizione spaziale dei legami. Fu in questo scenario delle conoscenze di struttura chimica che Van't Hoff intuì che la disposizione tetraedrica dei legami intorno all'atomo di carbonio poteva chiarire una molteplicità di fatti in cerca di una spiegazione che non poteva forse prescindere da una qualche struttura interna dell'atomo.

Friedrich August Kekulé (1829-1896) è generalmente considerato il padre fondatore della chimica organica che lui, per primo, definì come la chimica dei composti del carbonio. Il nome di Kekulé è legato soprattutto alla teoria della struttura che permise di superare la classificazione delle sostanze sulla base dei tipi o dei radicali. Nel 1890 fu organizzato un festival in onore di Kekulé (*Benzolfest*) nella City Hall di Berlino e in quella occasione Kekulé tenne una conferenza (poi pubblicata nel *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*) in cui spiegò l'origine delle sue idee sulla tetravalenza (o sulla *tetratomicità*, secondo il suo linguaggio) del carbonio, sulla capacità degli atomi di carbonio di legarsi tra loro in catene e sulla struttura del benzene e delle molecole aromatiche. Secondo la leggenda, avvalorata dallo stesso Kekulé, l'idea della struttura ciclica del benzene e delle catene di atomi di carbonio gli sarebbe venuta durante un sogno in cui gli apparve un uroboro, il serpente che si morde la coda (Figura 57).

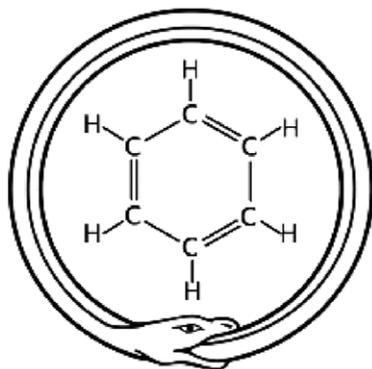


Figura 57 – Il serpente che si morde la coda e la struttura ciclica del benzene.

## 9.4 L'inizio della spettroscopia

Molti altri aspetti dello sviluppo scientifico del 1800 ponevano quesiti riguardo alla reale esistenza degli atomi e alla loro eventuale struttura. Una questione rilevante concerneva il meccanismo di interazione della luce (radiazione) con la materia e in particolare i meccanismi di assorbimento ed emissione della luce. La storia moderna di questo problema era iniziata con Isaac Newton che, dopo aver scomposto la luce bianca solare nei colori dell'arcobaleno nel suo classico *Optiks*, aveva interpretato i suoi esperimenti in termini di una struttura corpuscolare della luce, ipotesi che appariva sufficiente a spiegare i fenomeni di riflessione e rifrazione. Tuttavia, c'erano altri fenomeni e, in particolare, quelli di diffrazione e interferenza che potevano essere spiegati solo sulla base di una natura ondulatoria della luce caratterizzata da una specifica lunghezza d'onda associata ad ogni colore. Esperimenti che dimostravano la natura ondulatoria della luce furono condotti prima da Christian Huygens (1629-1695) nel 1678 e poi, a cominciare dal 1801, da Thomas Young (1773-1829) e infine da Augustin Fresnel (1788-1827). La luce era in definitiva considerata come una oscillazione del campo elettrico e magnetico, perpendicolari tra loro, che si propagava in linea retta (vedi Figura 58).

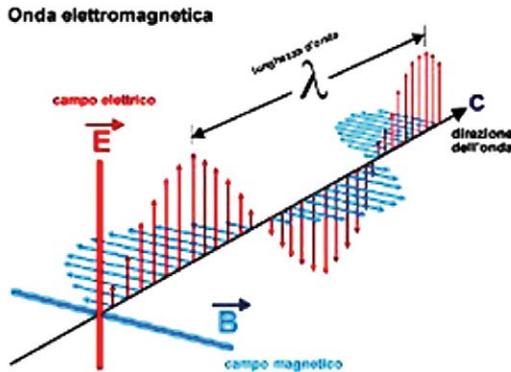


Figura 58 – Rappresentazione di un'onda elettromagnetica.

La qualità della luce (il colore) è definita dalla lunghezza d'onda  $\lambda$  o alternativamente dalla frequenza  $\nu$ , che sono tra loro legate attraverso la velocità della luce  $c$ :

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

mentre l'intensità è determinata dall'ampiezza dell'oscillazione del campo (altezza dell'onda). La variazione del colore della luce in funzione della lunghezza d'onda è mostrata schematicamente nella Figura 59).

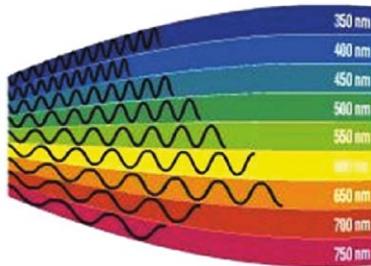


Figura 59 – Variazione del colore con la lunghezza d'onda.

La luce per eccellenza è la luce bianca del sole ma l'esame dell'emissione solare aveva mostrato che lo spettro solare conteneva, oltre la componente visibile, anche radiazioni di lunghezza d'onda minore (ultravioletto, raggi X) e di lunghezza d'onda maggiore (infrarosso, microonde, radioonde) con una distribuzione d'intensità che dipendeva dalla temperatura del sole.

William Hyde Wollaston (1766-1828) si interessò di chimica, cristallografia, metallurgia e fisica. Nel 1804, studiando lo spettro di emissione del sole, scoprì la presenza di alcune righe scure di cui non comprese appieno il significato. Osservazioni più sistematiche dello spettro solare furono eseguite alcuni anni dopo, a cominciare dal 1814, da Joseph von Fraunhofer (1787-1826). Fraunhofer è stato un fisico e un abile ottico che costruì il primo spettroscopio e in studi successivi, grazie alla risoluzione del suo strumento, scoprì nello spettro solare 574 righe nere di assorbimento delle quali misurò la lunghezza d'onda e che classificò con lettere dell'alfabeto, una classificazione ancora valida di quelle che sono chiamate *righe di Fraunhofer*.

Esperimenti successivi eseguiti nel corso del tempo soprattutto da *Gustav Kirchoff* (1824-1887) e da *Robert Bunsen* (1811-1899) mostrarono

no che elementi portati ad alta temperatura in una fiamma emettevano radiazione a lunghezze d'onda ben definite (*spettroscopia di emissione di fiamma*). Il confronto dimostrò che le lunghezze d'onda delle righe di Fraunhofer, e di altre righe di assorbimento osservate negli spettri solari e delle stelle, coincidevano con le lunghezze d'onda delle righe di emissione di elementi ad alta temperatura.

Questi esperimenti mostravano una straordinaria regolarità nelle lunghezze d'onda delle righe di emissione e assorbimento caratteristiche di ogni elemento, quasi una *carta d'identità* dell'elemento. Questo poneva la questione dell'origine di questa regolarità, tanto più che studi successivi mostrarono una precisa relazione matematica tra le lunghezze d'onda delle righe di ogni elemento. Ad esempio, nel caso dell'idrogeno atomico, le lunghezze d'onda della successione di un gruppo di righe (la *serie di Balmer* mostrata nella Figura 60) sono regolate dalla relazione dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda, B una costante (costante di Balmer),  $m = 2$  e  $n = 3, 4, 5$ .

$$\lambda = B \frac{m^2}{m^2 - n^2}$$

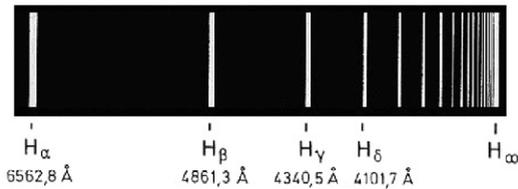


Figura 60 – La serie di Balmer.

La straordinaria regolarità degli spettri atomici doveva avere una causa e l'idea che le righe si originassero dalle vibrazioni di una particella compatta come un atomo sembrava improbabile. Nel 1868 ci fu un'eclisse solare totale che fu osservata, tra i molti, da Joseph Norman Lockyer (1836-1920) che, analizzando l'emissione della corona solare, osservò una riga non osservata in precedenza, che attribuì a un nuovo elemento che in seguito Lord Kelvin proporrà di chiamare *elio*. Solo nel 1895 l'elio sarà osservato anche sulla terra. Lockyer era certamente convinto che le righe solari in emissione o assorbimento fossero dovute a vibrazioni:

In tutto questo lavoro è stato preso come certo che nello spettro prodotto in laboratorio si abbia a che fare con la vibrazione di una cosa sola, si chiami atomo, molecola o in qualsiasi altro modo.

Lockyer, per spiegare la complessità degli spettri, assunse che l'atomo fosse composto da una pluralità di microparticelle, tutte uguali, in vibrazione ognuna rispetto alle altre. Abbiamo, quindi, l'ipotesi di un atomo con una sua struttura interna. Ritorna in gioco, con Lockyer, l'ipotesi già formulata da Prout che gli atomi siano costituiti da una molteplicità di atomi di idrogeno.

### 9.5 *La scoperta dell'elettrone*

Per buona parte del XIX secolo la visione dell'elettricità da parte dei fisici e dei chimici è stata alquanto diversa. I chimici erano abituati, in senso positivo o negativo, a fare i conti con una visione particellare della materia. L'avvento della pila di Volta e le conseguenti esperienze di elettrolisi di soluzioni e di sali li avevano familiarizzati con una visione dell'elettricità come costituita da cariche discrete, indissolubilmente legate alla materia e responsabili dell'affinità che teneva insieme atomi e molecole. La teoria della dissociazione elettrolitica di *Svante Arrhenius* (1859-1927) aveva chiaramente indicato che le cariche elettriche portate dagli ioni in soluzione si presentavano in maniera discreta e discontinua. Gli ioni positivi e negativi trasportavano una carica elettrica sempre multipla della stessa quantità elementare:

È quindi chiaro che la legge di Faraday ci dice che attraverso ogni sezione di un conduttore elettrolitico abbiamo sempre un equivalente passaggio di elettricità e di sostanza chimica. La stessa definita quantità di elettricità sia positiva che negativa si muove sempre con ogni ione monovalente o con ogni unità di affinità di uno ione polivalente e lo accompagna durante tutti i suoi movimenti all'interno del fluido elettrolitico. Questa quantità possiamo chiamarla la carica elettrica dell'atomo.

I fisici, invece, erano abituati a discutere i fenomeni elettrici in termini di fluidi continui e con i concetti astratti di onde, campi e potenziali. Ma gli esperimenti su scariche elettriche in gas rarefatti cambiarono la situazione. Già nel 1838 Michael Faraday (1791-1867) (Thomas 2006) aveva trovato che applicando una differenza di potenziale di migliaia di volt agli elettrodi di un tubo di vetro in cui era sta-

to fatto il vuoto si generava una luminescenza, un *arco* di luce, che si propagava dal catodo dirigendosi verso l'anodo. La forma schematica del cosiddetto *tubo di Crookes* è mostrata in Figura 61.

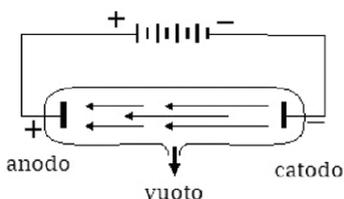


Figura 61 – Schema del tubo di Crookes.

Questa luminescenza, che inizialmente era considerata una curiosità da esibire come prodigio dell'elettricità, fu in seguito studiata più approfonditamente dopo che era stato possibile realizzare nei tubi un vuoto più spinto, in modo da impedire alle molecole residue presenti nel tubo di funzionare da schermo alla luminescenza. Nel 1869 William Hittorf (1824-1914) giunse alla conclusione che durante la scarica il catodo emetteva raggi di natura ignota, che chiamò *raggi catodici*, che si propagavano in linea retta verso l'anodo generando una fluorescenza sul vetro del tubo. William Crookes (1832-1919), chimico e spettroscopista inglese, nel 1879 condusse esperimenti deviando i raggi con campi magnetici e dimostrando così che i raggi catodici erano formati da particelle di carica negativa, che chiamò *atomi di elettricità*.

L'idea di una unità fondamentale di elettricità (*atomo di elettricità*) si deve per primo a George Johnston Stoney (1826-1911), fisico molecolare, che studiando la teoria cinetica dei gas aveva ottenuto stime della separazione media delle molecole di un gas e del numero di molecole in un  $mm^3$ ,  $[10^{20}]$ . Stoney si era anche interessato dei movimenti delle molecole, distinguendo tra il moto traslazionale e un moto interno che era all'origine di emissione di radiazione (una anticipazione della spettroscopia vibrazionale). Stoney si era proposto di definire tre unità fondamentali per velocità della luce, gravitazione universale ed elettricità. Per quest'ultima unità, che inizialmente aveva chiamato *elettrino*, già nel 1874 aveva determinato il valore di  $10^{-18}$  ampere, circa 1/16 del valore attuale. Stoney chiamava ancora Ampere l'unità di carica elettrica. Il suo valore corrispondeva a  $3 \cdot 10^{-11}$  unità C.G.S. Nel 1891 Stoney propose la denominazione definitiva di elettrone (Stoney 1894). Questa quantità, secondo Stoney, deter-

minava il legame chimico nella molecola di acido cloridrico, HCl, e si manifestava durante l'elettrolisi:

Per ogni legame chimico che si rompe all'interno di un elettrolita una certa quantità di elettricità attraversa l'elettrolita che è la stessa in tutti i casi. Questa quantità definita di elettricità la chiamerò E. Se facciamo di questa la nostra quantità unitaria di elettricità, probabilmente avremo fatto un passo molto importante nel nostro studio dei fenomeni molecolari.

Stoney aveva anche intuito che il movimento orbitale dell'elettrone nell'atomo era generatore di onde elettromagnetiche.

Lo studio dei raggi catodici fu ripreso nel 1897 da Joseph John Thomson (1856-1940), professore di fisica al Cavendish Laboratory. Spingendo il vuoto al massimo, Thomson dimostrò che i raggi catodici erano deviati da un campo elettrico. Studiando la deviazione dei raggi in campo elettrico e in campo magnetico, Thomson riuscì a determinare il rapporto carica-massa  $e/m$  di quelli che chiamava *corpuscoli* e nel 1899 ne determinò un valore più accurato ottenendo infine il valore della carica dell'elettrone di  $6 \times 10^{-10}$  e.s.u. Thomson dimostrò poi che la carica negativa fondamentale prodotta in un filamento incandescente o per effetto fotoelettrico o nei raggi catodici era sempre la stessa di quella coinvolta nell'elettrolisi dello ione idrogeno  $H^+$ . Thomson considerò gli elettroni come elementi primordiali che andavano a comporre tutti gli elementi noti.

Nel 1876 e poi nel 1886 Eugen Goldstein (1850-1930), un fisico tedesco, eseguì esperimenti in un tubo di Crookes in cui il catodo era stato perforato e osservò che da ogni foro del catodo uscivano raggi, *raggi canale*, che si propagavano in direzione opposta ai raggi catodici. La natura di questi raggi dipendeva dal gas residuo presente nel tubo. Gli elettroni, i *raggi catodici*, urtando gli atomi o le molecole presenti nel tubo strappavano uno o più elettroni trasformandoli in ioni positivi che avevano comunque una carica uguale o multipla di quella dell'elettrone. Gli esperimenti sui raggi canale furono proseguiti da Goldstein e da Wilhelm Wien (1864-1928) che misurarono il rapporto  $e/m$  dello ione  $H^+$ . Era così stato scoperto il *protone* come particella minima con carica positiva. Gli altri ioni positivi, associati a elementi diversi dall'idrogeno, risultarono avere un rapporto carica-massa sottomultiplo di quello dello ione idrogeno. Esperimenti più raffinati eseguiti da Thomson all'inizio del 1900 fornirono un rapporto carica-massa

per lo ione idrogeno più accurato, oltre al rapporto carica-massa per la molecola ione idrogeno .

### 9.6 La radioattività

Nel novembre 1895 Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), mentre studiava i fenomeni di passaggio di corrente in gas a bassa pressione in un tubo di scarica ricoperto di cartone nero, osservò che un foglio lontano, ricoperto di una sostanza chimica (platinocianuro di bario), diventava fluorescente. Proseguendo, osservò che questi strani raggi sconosciuti emessi, che chiamò *raggi X*, attraversavano spessi strati di cartone o di legno: con l'aiuto della mano della moglie scoprì che questi raggi misteriosi permettevano addirittura di vedere l'invisibile, ottenendo la prima radiografia della storia.

La scoperta dei raggi X ebbe una straordinaria risonanza mondiale anche per le potenziali applicazioni mediche. La lunghezza d'onda dei raggi X, dell'ordine di grandezza degli Angstrom, dipendeva dal metallo che li generava nel tubo dopo che era stato colpito dai raggi catodici. Per la sua scoperta Röntgen riceverà nel 1901 il primo premio Nobel per la fisica. La diagnostica medica per diffrazione X avrà una grande importanza nella successiva attività di Marie Curie durante la prima guerra mondiale.

Quasi contemporaneamente, all'inizio del 1896, Antoine Henri Becquerel (1852-1908) aveva in corso studi sulla fosforescenza di sali di uranio, in particolare del solfato di potassio e uranile  $K_2UO_2(SO_4)_2$ . L'esperimento era semplice: il sale veniva illuminato, ad esempio dalla luce solare, e la sua capacità di riemettere radiazione veniva misurata attraverso la capacità di impressionare una lastra fotografica o misurando con un elettrometro la carica generata nell'aria circostante. Purtroppo, nel fine settimana in cui l'esperimento era programmato, a Parigi c'era solo pochissimo sole intermittente e poi, per vari giorni, il tempo fu molto nuvoloso. Becquerel, allora, ripose il sale di uranio, la lastra fotografica e tutto il resto in un cassetto chiuso, rimandando l'esperimento a tempi migliori. Dopo alcuni giorni, per caso, per fortuna o per un oscuro presentimento, Becquerel sviluppò comunque la lastra fotografica e trovò che la lastra era stata impressionata. La cosa era sorprendente: l'emissione del sale di uranio non era una normale fosforescenza, cioè riemissione di una radiazione assorbita, ma si trattava di raggi misteriosi, chiamati *raggi uranici*, emessi direttamente dal sale di uranio. Si trattava quindi di una proprietà intrinseca dell'ura-

nio o dei suoi composti. Questa scoperta, che si rivelerà di importanza fondamentale, non ricevette inizialmente il rilievo che avrebbe meritato ma affascinerà Marie Curie che deciderà di scegliere lo studio di questo fenomeno come argomento della sua tesi di dottorato.

Marya Salomea Sklodowska (1867-1934) era nata nella parte della Polonia occupata dai russi, l'ultima di cinque figli (Curie 1938, 2017; Castellarnu 2019).

Dopo avere ottenuto la licenza ginnasiale nel 1883, come la più brava della classe, Marya avrebbe voluto continuare gli studi ma, nella Polonia, l'accesso all'Università non era permesso alle donne e le condizioni della famiglia non consentivano il sogno della Sorbona di Parigi. Marya propose un patto alla sorella maggiore Bronia: Marya sarebbe andata a lavorare come istitutrice per accumulare la somma necessaria per mantenere Bronia agli studi a Parigi (per diventare medico). Una volta diventata medico, Bronia avrebbe finanziato a sua volta gli studi di Marya a Parigi. Per Marya iniziò un periodo durissimo della vita durante il quale si rese però conto della sua passione per la scienza:

La letteratura mi interessava quanto la sociologia e le scienze. Tuttavia, durante quegli anni di lavoro, cercando a poco a poco di scoprire le mie vere preferenze, mi rivolsi finalmente alle matematiche e alla fisica.

Nel 1891 il sogno si avvera: Marya, che cambia il suo nome in Marie, è a Parigi dove, dopo quattro anni di vita durissima per le sue precarie condizioni economiche, conseguirà le licenze in fisica e in matematiche. A seguito, Marie venne incaricata dalla Società per l'incoraggiamento dell'Industria Nazionale di uno studio sulle proprietà magnetiche di diversi acciai.

Queste ricerche richiedevano installazioni troppo ingombranti per il laboratorio di cui era ospite. Un amico polacco in visita a Parigi le fece conoscere Pierre Curie (1859-1906), uno scienziato di grande valore che lavorava alla Scuola di Fisica e Chimica e che avrebbe potuto avere lo spazio per ospitare le sue ricerche. Pierre Curie era un notissimo studioso del magnetismo. L'incontro avvenne all'inizio del 1894 e Marie fu subito favorevolmente impressionata dalla semplicità di Pierre, capace di ispirare fiducia, iniziando una conversazione amichevole anche su alcuni problemi di carattere scientifico. Tra il fisico francese e la fisica polacca si generò subito una spontanea simpatia. Questo incontro cambierà la vita in generale e la parabola scientifica dei due personag-

gi. Pierre Curie era noto internazionalmente per i suoi studi sull'effetto piezoelettrico, sulla simmetria dei cristalli e sul magnetismo dei metalli. Pierre accettò di ospitare Marie nel suo pur modesto laboratorio per lo svolgimento delle sue ricerche. Ma la simpatia tra i due presto si trasformerà in amore e si uniranno in matrimonio con una cerimonia in tutta semplicità, senza pranzo di nozze e regali. Nell'occasione Marie vestiva un abito scuro che aveva raccomandato fosse il più semplice e pratico possibile in modo da poterlo usare anche in laboratorio. C'era un solo regalo per gli sposi: due biciclette con le quali i due novelli sposi faranno il loro viaggio di nozze attraverso la campagna francese. L'uso disinvoltato della bicicletta assurgerà a simbolo della emancipazione femminile.

Marie comincerà a pensare a scegliere l'argomento per la sua tesi di dottorato: sarà la prima donna in Francia ad ottenere il dottorato in fisica. Marie, affascinata dalla scoperta di Becquerel, decise di proseguire gli studi sui raggi uranici.

Per svolgere questo lavoro Marie rimase sempre ospite, anche se non con una ufficialità, del laboratorio del marito che coinvolse nelle sue ricerche. Naturalmente si poté giovare dell'elettrometro molto sofisticato messo a punto da Pierre per i suoi esperimenti. Inizialmente analizzò una serie di minerali, composti dell'uranio e di altri metalli, constatando due cose di notevole importanza:

- Nei sali di uranio l'emissione dei raggi dipendeva esclusivamente dal contenuto di uranio, non dal tipo di composto o dal modo in cui l'uranio era legato ad altri atomi nel composto; sembrava quindi una proprietà atomica, non molecolare.
- Scopri poi che anche i composti di un altro metallo, il torio, avevano lo stesso comportamento di quelli dell'uranio ma i raggi emessi avevano una intensità maggiore di quella dei sali di uranio.

Da questa prima fase del lavoro emerse quindi l'importantissima conclusione che l'emissione dei raggi uranici, per la quale Marie coniò per la prima volta il nome di radioattività, era una proprietà intrinseca dell'atomo, o per lo meno degli atomi pesanti. Proseguendo nel suo studio Marie analizzò un campione di pechblenda, un minerale complesso contenente uranio, minerale di aspetto scuro come una pece e terroso, usato per l'estrazione dell'uranio, e trovò che in alcuni campioni di pechblenda la radioattività era centinaia di volte superiore a quella attesa in base al contenuto di uranio. Accertato che non si trattava di un errore di misura, venne formulata l'ipotesi che la pechblenda contenesse, oltre l'uranio, un altro elemento chimico non co-

nosciuto molto più attivo dell'uranio. Era un'ipotesi affascinante ma da dimostrare; e questo poteva essere fatto solo riuscendo ad estrarre ed isolare questo metallo sconosciuto. Il problema era: quanto di questo misterioso metallo era contenuto nella pechblenda? La valutazione di Marie, senza elementi concreti, fu che ne potesse essere contenuto qualcosa come l'uno per cento; in realtà la presenza di questo elemento risulterà essere dell'ordine di una parte su 1 milione. Marie era convinta della sua ipotesi ma bisognava dimostrarlo:

la radiazione che non potevo spiegarmi viene da un elemento chimico ignoto. L'elemento è lì, non c'è che da scoprirlo. Ne siamo sicuri, io sono persuasa di non ingannarmi.

Ma per realizzare questo c'erano due grossi problemi. Il primo problema era che gli esperimenti non potevano certo essere condotti nell'angusto laboratorio di Pierre Curie. Non c'era soluzione a questo problema eccetto che un capannone dismesso in un cortile di fronte alla Scuola. Era un ambiente in condizioni veramente precarie che non sarebbe certo stato negato ai Curie in quanto nessuno lo avrebbe voluto. In questo capannone Marie e Pierre lavoreranno per 8 anni. La descrizione che Marie ne farà appare terrificante:

La Scuola di Fisica non poteva darci locali adeguati ma, in mancanza di qualcosa di meglio, il Direttore ci ha permesso di utilizzare un capannone abbandonato che era stato in servizio come aula di dissezione della Scuola di Medicina. Il suo tetto di vetro non offriva un riparo completo dalla pioggia; il caldo d'estate era soffocante e il freddo pungente dell'inverno era solo un po' attenuato dalla stufa di ferro, tranne che nelle immediate vicinanze. Non si trattava di ottenere l'apparato appropriato necessario di uso comune da parte dei chimici. Avevamo semplicemente dei vecchi tavoli in legno di pino con fornaci e fornelli a gas. Abbiamo dovuto utilizzare il cortile adiacente per quelle delle nostre operazioni chimiche che prevedevano la produzione di gas irritanti; anche allora il gas riempiva spesso il nostro capannone. Con questa attrezzatura siamo entrati nel nostro lavoro estenuante.

Il secondo problema era l'acquisto di enormi quantità di pechblenda da trattare chimicamente per estrarre l'elemento sconosciuto. Allora la pechblenda veniva estratta da miniere di Jáchymov, in Boemia. Acquistare questo materiale e farlo trasportare a Parigi era impresa impossibile per i Curie che non avevano fondi di ricerca e vivevano stentatamente.

Ritenevano che le tracce degli elementi che cercavano rimanessero inalterate nei materiali di scarto della pechblenda dopo l'estrazione dell'uranio. Grazie ai buoni uffici dell'Accademia delle Scienze di Vienna, il governo austriaco, proprietario della miniera, concesse tonnellate di residui abbandonati al solo costo del trasporto. Infine, acquisiranno 10 tonnellate di residui di pechblenda. Il lavoro che li attendeva era titanico: da dieci tonnellate infine estrarranno 1 grammo di radio cioè una parte su 10.000.000!!! Ma nulla poteva fermare Marie: dopo affermerà che in quella baracca cadente aveva vissuto gioie meravigliose. In tutti questi anni Marie ha fatto il lavoro del fisico, del chimico, dell'operaio specializzato, dell'ingegnere, del facchino.

In quel capannone Marie e Pierre Curie spenderanno 8 anni durissimi anche se per loro meravigliosi. Infine, riusciranno a identificare due nuovi metalli radioattivi: il *polonio* (della famiglia del bismuto), così chiamato in onore della patria di origine di Marie, e il *radio* (della famiglia del bario). Quattro anni dopo avere annunciato o ipotizzato l'esistenza probabile del radio, Marie finalmente nel 1902 riuscirà a preparare un decigrammo di radio e a fare una determinazione del suo peso atomico: 225.

Fu una vittoria che costò cara ai nostri protagonisti. In quattro anni che, oltre al lavoro incessante in laboratorio, comportarono per Marie anche la cura della casa e della prima figlia Irène, nata un anno dopo le nozze, Marie ha perso sette chili di peso. Si rese conto solo parzialmente di questo; dopo una gravidanza interrotta scriverà alla sorella Bronia: «debbo confessare di non aver risparmiato le mie forze. Avevo fiducia nel mio organismo, e ora lo rimpiango amaramente perché l'ho pagata cara».

Anche le condizioni di salute di Pierre erano intanto peggiorate con continui dolori muscolari. Ma niente li può fermare. In un'occasione in cui si confidano i loro problemi per il futuro, Pierre dice: «Ti sbagli. Qualunque cosa succeda, e si dovesse anche essere un corpo senz'anima, bisognerebbe lavorare ugualmente».

I Curie attribuivano questi problemi di salute inizialmente solo alla enorme fatica fisica ma c'era un altro nemico insidioso. Già nel 1900 Pierre aveva osservato che le radiazioni avevano un effetto distruttivo sui tessuti di organismi viventi. Le condizioni di salute erano peggiorate appunto anche per l'esposizione, senza protezione, alle radiazioni. Gli effetti si vedevano particolarmente sulle mani dei due scienziati. Gli esperimenti fatti da Pierre Curie, anche in collaborazione con medici, misero in evidenza che la loro scoperta non era solo un grande successo scientifico ma apriva nuove prospettive per la cura del cancro.

L'amore per la scienza e per la ricerca non fece capire ai due coniugi il pericolo delle esposizioni alle radiazioni. Addirittura, Pierre fece un esperimento su stesso mandando delle radiazioni su un braccio e seguendo per 60 giorni l'evoluzione della ferita che si è autoprocurata.

Questi effetti della radiazione fanno nascere grandi speranze in campo terapeutico e immediatamente nascono industrie in Francia e altrove per la estrazione e disponibilità medica del radio. Ma i Curie sono i soli a conoscere la procedura per ottenere il radio e chiunque desideri procedere deve chiedere a loro le istruzioni sul processo di estrazione. Si pone allora il problema per i Curie se difendere la proprietà intellettuale del processo stabilendo un brevetto. Questo risolverebbe tutti i problemi economici per loro e per i loro figli. Ma Pierre e Marie sono degli idealisti disinteressati a questi aspetti e di comune accordo decidono di rendere completamente pubblici i processi che hanno inventato con sforzi enormi: il procedimento di isolamento del radio è un patrimonio della comunità scientifica: «Il radio non deve far arricchire la gente; esso è un elemento, e appartiene a tutti. Chiedere il brevetto sarebbe contrario allo spirito scientifico».

Le notizie sulle ipotesi e sul lavoro dei Curie si spargono nel mondo scientifico ma un riconoscimento nell'ambiente accademico francese tarderà.

Le spiegazioni e i risultati ottenuti dai Curie hanno rivoluzionato il mondo della fisica e della chimica aprendo prospettive impensabili prima. In particolare, l'idea dell'atomo indivisibile è definitivamente tramontata: nella Figura 62 viene mostrata la successione di elementi e isotopi che si formano nel processo di decadimento dell'uranio.

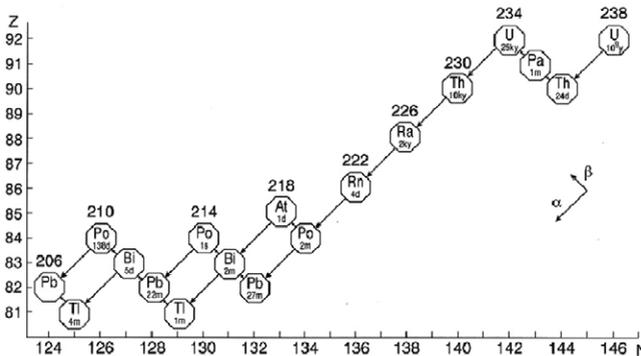


Figura 62 – Il decadimento dell'uranio: fine dell'atomo indivisibile.

La natura della radiazione emessa dagli elementi radioattivi era ancora sconosciuta, a parte gli effetti che i raggi erano capaci di produrre. Bisognerà attendere gli esperimenti di Rutherford per giungere alla formulazione di un atomo planetario e al chiarimento delle radiazioni emesse come radiazioni di varia natura, raggi alfa, raggi beta e raggi gamma. Ma qualcosa della struttura planetaria degli atomi era già stata intuita da Marie Curie che in un lavoro con uno dei suoi più fedeli collaboratori, *Jean-Louis Debierne*, scriverà:

Si può tuttavia concludere che la particella che identifichiamo con il nome di atomo è un sistema estremamente complesso [...]. L'atomo deve comprendere due parti abbastanza distinte l'una dall'altra, la prima regione costituisce la parte esterna dell'atomo e si rivela attraverso manifestazioni diverse: irraggiamento elettromagnetico e legame molecolare [...] La seconda regione è inaccessibile [...] ed è concepibile come la sede del fenomeno di gravitazione. Il volume occupato da questo nucleo interno è forse molto piccola in rapporto al volume totale dell'atomo [...]. Questa immagine dell'atomo è simile a quella di un pianeta in cui l'atmosfera occupa un volume considerevole in rapporto a quello occupato dalla massa solido-liquida. [...] la massa interna si manifesta solo al momento di un cataclisma o di un'eruzione vulcanica.

Marie Curie non poteva sicuramente immaginare allora la complessità del nucleo atomico ma quel che è certo è che con le sue scoperte aveva finalmente realizzato il vecchio sogno degli alchimisti della trasmutazione degli atomi (vedi Figura 62): un pezzo di questa catena di decadimento (trasmutazione di un atomo nell'altro) è quello che Marie Curie aveva studiato e osservato.

Il 1903 riserverà grandi sorprese. L'Accademia di Svezia comunica la decisione di assegnare il premio Nobel per la fisica per metà a Henri Becquerel e per l'altra metà a Pierre e Marie Curie per la scoperta della radioattività. È un trionfo straordinario: è la prima donna che riceve un premio Nobel per la fisica, per una disciplina scientifica. Passeranno 32 anni prima che un'altra donna ottenga un premio Nobel in una disciplina scientifica (e sarà ancora una Curie: la figlia Irène Joliot Curie che otterrà il premio Nobel in chimica) e passeranno 60 anni prima che il premio Nobel per la fisica sia assegnato nuovamente a una donna (1963, Maria Goeppert Mayer). Per questo Marie Curie è come un simbolo dell'emancipazione femminile, tanto più che Marie Curie è stata l'unica persona ad ottenere un secondo premio No-

bel in un'altra disciplina scientifica: premio Nobel per la chimica per aver isolato il radio.

### 9.7 *Modelli atomici e atomo planetario*

La scoperta dell'elettrone e della natura dei raggi anodici e i risultati degli esperimenti di radioattività avevano in gran parte cancellato le controversie sulla reale natura dell'atomo che non sembrava più l'atomo indivisibile di 2000 anni di storia. La struttura particellare dell'elettricità e l'attrazione tra cariche opposte diveniva l'interazione fondamentale per comprendere la struttura atomica e molecolare. Sulla base di queste nuove conoscenze furono proposti vari modelli della struttura interna dell'atomo ma i problemi fondamentali da affrontare per comprenderne la stabilità erano molti. Abbiamo già visto che modelli atomici erano stati proposti da Prout e da Lockyer prima ancora della scoperta dell'elettrone e del protone.

Un modello di atomo costituito da cariche positive e negative fu proposto da J.J. Thomson (1856-1940). Il modello era costituito da una sfera uniforme di carica positiva avente la dimensione dell'atomo. In questa sfera erano immersi gli elettroni come semi in un cocomero: era il modello detto *plum-pudding*, dal nome di un tradizionale dolce inglese. Gli elettroni erano stabilizzati dalla repulsione reciproca e dalla attrazione con la sfera positiva ed erano disposti su cerchi in un piano o in strutture ad anello, in cortecce o cortecce concentriche, a seconda del loro numero. Sulla base di calcoli, Thomson stabilì che gli elettroni oscillando intorno alla loro posizione emettevano o assorbivano le frequenze delle righe caratteristiche osservate negli spettri.

Il modello atomico di Thomson non ebbe vita lunga. Ormai quasi tutti erano convinti della natura particellare dell'elettricità. Nel modello di Thomson, mentre le cariche negative erano concentrate in particelle, gli elettroni, la carica positiva era distribuita in maniera uniforme su tutto l'atomo. Era una dissimmetria che non convinceva.

Un differente modello atomico era stato proposto da Hantaro Nagaoaka (1865-1961), professore di fisica all'Università di Tokio, che si ispirava al pianeta Saturno proponendo un nucleo centrale pesante e carico positivamente circondato da un anello di elettroni che giravano intorno al nucleo. L'anello di elettroni era stabilizzato dalla massa del nucleo atomico. Le particelle dell'anello, spaziate regolarmente, si respingevano con forze inversamente proporzionali al quadrato delle distanze ed erano attratte dalla massa centrale. Molti aspetti del mo-

dello non erano giustificabili e lo stesso Nagaoka, che lo aveva proposto nel 1904, lo abbandonò nel 1908.

Ernest Rutherford (1871-1937), scozzese, aveva lavorato nel laboratorio di Thomson a Cambridge dimostrandosi abile sperimentatore. Dopo la scoperta di Becquerel si dedicò allo studio della radioattività e dimostrò che i raggi uranici di Becquerel emessi da atomi radioattivi consistevano di particelle  $\alpha$ , nuclei di elio ionizzato, e di raggi  $\beta$ , elettroni molto veloci:

Questi esperimenti mostrano che la radiazione dell'uranio è complessa e che sono presenti almeno due distinti tipi di radiazione – una facilmente assorbita e che per convenienza chiameremo la radiazione  $\beta$  e un'altra di carattere più penetrante che chiameremo la radiazione  $\alpha$ .

Nel 1907 un giovane fisico tedesco, Johannes Wilhelm Geiger (1882-1945), andò a lavorare con Rutherford. La collaborazione portò nel 1908 alla identificazione delle particelle  $\alpha$  come nuclei di elio. Insieme costruirono uno strumento, *contatore di Geiger*, capace di contare il numero delle particelle  $\alpha$  attraverso le scintillazioni prodotte su uno schermo coperto di solfuro di zinco e provocate dall'urto delle particelle.

Successivamente, Geiger e Rutherford eseguirono esperimenti per contare il numero di particelle  $\alpha$  diffuse dopo l'attraversamento di sottili lamine di metallo (alluminio, ferro, oro, piombo) in funzione dell'angolo, dello spessore delle lamine, della carica del nucleo e della velocità delle particelle. L'esperimento mostrò che, mentre la maggior parte delle particelle attraversava il foglio metallico senza subire deviazioni apprezzabili, alcune di esse erano deviate più sostanzialmente e pochissime, circa 1/8000, ritornavano addirittura indietro (vedi Figura 63).

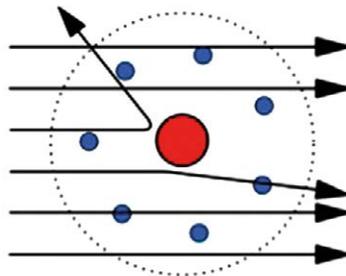


Figura 63 – Deviazione delle particelle nel modello di Rutherford.

Il risultato appariva incomprensibile in base al modello atomico di Thomson. Ripetuto l'esperimento, Rutherford interpretò il risultato assumendo che tutta la carica positiva e quasi tutta la massa dell'atomo fossero concentrate in un nucleo, uno spazio piccolissimo dell'atomo che valutò essere dell'ordine di  $10^{-13}$  cm di diametro, intorno al quale ruotavano gli elettroni. Solo le particelle  $\alpha$  che colpivano direttamente il nucleo erano rimandate indietro, come mostrato in Figura 63:

Paragonando la teoria descritta in questo lavoro con i risultati sperimentali, si è supposto che l'atomo consista di una carica centrale supposta concentrata in un punto, e che le deflessioni di grande scala delle particelle  $\alpha$  e  $\beta$  siano soprattutto dovute al loro passaggio attraverso il forte campo centrale.

Gli esperimenti con le particelle  $\alpha$  usate come proiettili contribuirono in maniera determinante alla definizione del modello planetario e alla struttura interna dell'atomo. Nel 1919 Rutherford bombardando atomi di azoto N con particelle  $\alpha$  realizzò la trasformazione dell'azoto in atomi di ossigeno (O) secondo lo schema della Figura 64:

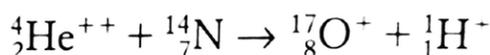


Figura 64 – Produzione di protoni per bombardamento di azoto.

realizzando la trasmutazione degli elementi, il vecchio sogno degli alchimisti. Nella trasformazione Rutherford ottenne anche la emissione di atomi di idrogeno ionizzati che chiamò *protoni* rendendosi conto che erano parte della struttura dei nuclei atomici:

Dobbiamo concludere che l'atomo di azoto si disintegra a causa delle intense forze sviluppate nella collisione diretta con una particella  $\alpha$  veloce, e che l'atomo di idrogeno che si è liberato era parte costituente del nucleo di azoto.

### 9.7.1 *Il neutrone*

A questo punto Rutherford conosceva solo due particelle, protoni ed elettroni, e con queste due sole particelle era problematico costruire una struttura coerente del nucleo atomico in quanto la massa del nucleo non corrispondeva alla massa del numero di protoni presenti

(numero atomico) ma era circa il doppio. Inoltre, gli elettroni, i raggi  $\beta$ , emessi durante i bombardamenti  $\alpha$ , chiaramente provenivano dal nucleo. Si poteva supporre che nel nucleo, oltre ai protoni corrispondenti al numero atomico, ci fossero altri protoni neutralizzati da elettroni ma la cosa sembrava improbabile. Infine, c'erano diverse specie atomiche caratterizzate dallo stesso numero atomico, e quindi con uguali proprietà chimiche (isotopi).

Solo dopo vari anni una nuova serie di esperimenti portò alla scoperta del neutrone, una particella con la stessa massa del protone ma priva di carica. Nel 1930 Walther Bothe (1891-1957) e Herbert Becker scoprirono che bombardando il berillio Be con particelle  $\alpha$  veniva emessa una radiazione estremamente penetrante, capace di attraversare strati fino a 20 cm di piombo, e considerarono questa radiazione come raggi  $\gamma$  di altissima energia. Nel 1932 Irène Joliot-Curie (1897-1956) e Frédéric Joliot (1900-1958) trovarono che bombardando con i raggi  $\gamma$  emessi dal berillio la paraffina (o altre sostanze contenenti idrogeno) si osservava l'emissione di nuclei di idrogeno estremamente veloci. Successivamente James Chadwick (1891-1974), che lavorava nel laboratorio di Rutherford, mostrò che bombardando berillio e boro con particelle  $\alpha$  si aveva emissione non di raggi  $\gamma$  ma particelle neutre aventi massa uguale al protone, *neutroni*, secondo le reazioni di Figura 65.

Con la scoperta dei neutroni la costituzione dell'atomo si chiarisce in termini di un nucleo costituito da Z protoni (numero atomico) e N neutroni, (con Z+N definito come numero di massa), circondato da Z elettroni. La variabilità del numero di neutroni rendeva conto dell'esistenza di isotopi, elementi con lo stesso numero di protoni ed elettroni (e quindi con le stesse proprietà chimiche) ma con diversa massa atomica. Il simbolo completo di un atomo A poteva allora essere specificato facendolo precedere da Z come sottoscritto e da Z+N come sovrascritto<sup>3</sup>.

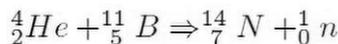
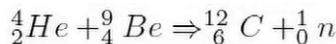


Figura 65 – Produzione di neutroni per bombardamento di berillio e boro con particelle  $\alpha$ .

<sup>3</sup> Per alcuni dettagli storici vedi L. Bandinelli, *La scoperta del neutrone*, Tesi di laurea in Fisica, Università di Bologna, 2016-17.

## 9.8 *La meccanica quantistica*

Il modello planetario dell'atomo proposto da Rutherford era affascinante perché proponeva una visione unitaria del mondo celeste macroscopico, con i pianeti che ruotano intorno al sole sotto l'azione della forza di gravità, e del mondo microscopico dell'atomo, con gli elettroni che ruotano intorno al nucleo carico positivamente. Ma, aldilà di questa straordinaria suggestione, c'era la differenza sostanziale che le forze in azione nell'atomo erano forze elettriche. Se gli elettroni carichi negativamente ruotano intorno al nucleo, sono soggetti a un'accelerazione e dovrebbero, secondo l'elettrodinamica classica, emettere radiazione ed energia in maniera continua e, quindi, gradualmente avvicinarsi e poi cadere sul nucleo positivo. Il sistema, di conseguenza, sarebbe stato intrinsecamente instabile. Era necessario andare oltre quello che prevedeva la fisica classica (Califano, Schettino 2018). A parte questo, un problema sostanziale consisteva nello spiegare come  $Z$  cariche positive potessero stare confinate nello spazio minimo del nucleo senza respingersi.

### 9.8.1 *L'ipotesi dei quanti*

All'inizio del XX secolo un problema irrisolto della fisica classica riguardava il cosiddetto *corpo nero*, un emettitore perfetto di radiazione, per il quale era nota sperimentalmente l'energia emessa in funzione della lunghezza d'onda a varie temperature, mostrata nella Figura 66.

Il corpo nero, termine coniato da Kirckhoff nel 1860, è un oggetto che emette e assorbe tutte le frequenze dello spettro elettromagnetico senza rifletterle. Un corpo nero può essere immaginato come un forno, una cavità, mantenuto a temperatura costante, in cui le oscillazioni delle particelle che costituiscono le pareti della cavità sono responsabili dell'assorbimento e della emissione della radiazione. L'emissione del sole corrisponde molto precisamente all'emissione di un corpo nero a circa 5200 gradi centigradi. Nella Figura 66 la curva rossa rappresenta l'emissione teorica del corpo nero a 5000°C secondo le previsioni dell'elettrodinamica classica. Come si vede dalla figura, applicando la teoria classica dell'elettromagnetismo l'andamento della emissione del corpo nero era riprodotto a lunghezze d'onda grandi ma a lunghezze d'onda minori (cioè a frequenze alte) la curva teorica divergeva dall'esperimento, seguendo la cosiddetta *legge di Rayleigh-Jeans*, portando a una emissione infinita. Nel 1911 *Paul Ehrenfest* chiamerà questa anomalia della previsione teorica *catastrofe ultravioletta*.

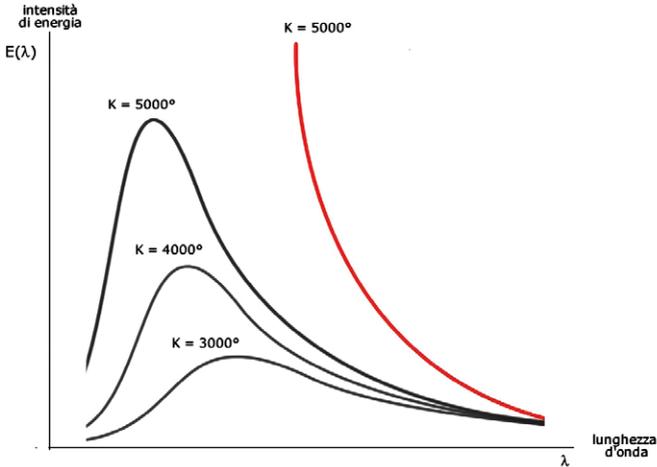


Figura 66 – Andamento dell'emissione del corpo nero.

Nel 1900 l'emissione del corpo nero fu studiata teoricamente da Max Planck (1858-1947), fisico tedesco iniziatore della meccanica quantistica. Per trovare un accordo con l'andamento sperimentale Planck formulò un'ipotesi che lui stesso definì senza senso: «un'ipotesi puramente formale [...] in realtà non ci avevo pensato molto» intraprendendo una strada sconosciuta lungo la quale non gli mancò il coraggio di avventurarsi: «un atto di disperazione [...]. Ero pronto a sacrificare le mie precedenti convinzioni sulla fisica».

Affrontando il problema della emissione del corpo nero nel 1900 Max Planck ricorre a quello che lui stesso chiama un trucco, un artificio matematico, assumendo che ad ogni frequenza gli oscillatori atomici ed elettronici che costituiscono il corpo nero emettano energia  $E$  non in modo continuo ma in modo discontinuo per multipli  $n$  di un *quanto* di energia proporzionale alla frequenza  $\nu$  dell'oscillatore attraverso una costante  $h$ , la costante di Planck:  $E = nh\nu$ .

Certamente Planck non aveva una teoria in proposito, ma il suo artificio introdusse il concetto fondamentale che la luce, la radiazione, attraverso l'emissione di quanti, di quantità minime di energia, sembra comportarsi come se avesse natura corpuscolare e non una natura ondulatoria.

Il concetto di quantizzazione si approfondisce nel 1905 nello studio di Albert Einstein (1879-1955) dell'effetto fotoelettrico. L'irraggiamento di un metallo produce, in certe condizioni, l'emissione di

elettroni. Gli elettroni sono legati al metallo da una certa energia; la radiazione assorbita permette di strappare l'elettrone al metallo facendolo fuoriuscire con una velocità ed un'energia cinetica che corrisponde all'eccesso di energia della radiazione rispetto all'energia di legame dell'elettrone. Una caratteristica fondamentale dell'effetto fotoelettrico è che per una radiazione di frequenza al di sotto di un certo limite, la *soglia fotoelettrica*, qualunque sia l'intensità e l'energia, secondo l'interpretazione classica, della radiazione, l'emissione di elettroni non avviene. Si ha emissione fotoelettrica solo se la frequenza è superiore alla soglia fotoelettrica caratteristica di ogni metallo. Einstein interpretò i dati sperimentali assumendo che l'energia della radiazione sia proporzionale alla frequenza e non alla ampiezza dei campi elettrico e magnetico e quindi sia costituita da quanti di energia:  $E = h\nu$ .

Solo nel 1926 questi quanti di energia verranno chiamati *fotoni* per la prima volta dal fisico ottico Frithiof Wolfers (1890-1971) e poi dal chimico Gilbert Newton Lewis (1875-1946) e infine da tutti universalmente.

Le ipotesi di Planck e di Einstein introdussero un concetto fondamentalmente nuovo nella fisica e cioè che la radiazione elettromagnetica ha una duplice natura di onda e di particella. L'aspetto rivoluzionario di questo sta nel fatto che questa duplice natura si manifesta alternativamente a seconda dell'esperimento che si esegue. Negli esperimenti di diffrazione e interferenza la radiazione si comporta come un'onda, o almeno questi esperimenti possono essere più semplicemente interpretati in termini di onde. Negli esperimenti del corpo nero e nell'effetto fotoelettrico, invece, l'interpretazione deve essere fatta in termini di una costituzione corpuscolare. Questo fatto comporta una nuova profonda riflessione sulla natura stessa della nostra conoscenza del mondo che ci circonda. Dobbiamo, infatti, porci la domanda se il mondo materiale che noi studiamo abbia una sua struttura ed evoluzione di cui lo scienziato è semplice osservatore ed interprete o se lo sperimentatore, decidendo l'esperimento da eseguire, costringe la natura a comportarsi in un modo o in un altro. Lo sperimentatore, quindi, non è un semplice osservatore ma un protagonista. Ma su questo ritorneremo in seguito.

### 9.8.2 *L'atomo di Bohr-Sommerfeld*

Niels Bohr (1885-1962), dopo essersi laureato a Copenaghen con una tesi sulla teoria elettronica dei metalli, trascorse un periodo di stu-

dio in Inghilterra dove ebbe modo di interagire con Thomson e soprattutto con Rutherford. Di ritorno in Danimarca, cercò di interpretare in termini di meccanica classica il modello di Rutherford dell'atomo planetario assumendo che gli elettroni ruotassero intorno al nucleo in orbite stazionarie. In un primo lavoro del 1913 Bohr affrontò il problema dell'atomo di idrogeno, costituito da un protone e da un solo elettrone, assumendo che l'elettrone ruotasse in orbite circolari caratterizzate da energia costante definita da condizioni di quantizzazione. A questa ipotesi Bohr doveva essere giunto essendo venuto a conoscenza della formula di Balmer (vedi pagina 9.1) e si propose di interpretare la regolarità della struttura degli spettri atomici. Ogni riga veniva emessa o assorbita per transizione dell'elettrone da un'orbita all'altra. La stabilità dell'elettrone in un'orbita circolare era assicurata dall'equilibrio tra la forza di attrazione del nucleo e la forza centripeta della rotazione. Inoltre Bohr, accettando l'idea di quantizzazione di Planck, impose che il momento angolare dell'elettrone,  $mvr$ , fosse multiplo di  $\frac{h}{2\pi}$ , dove  $h$  è la costante di Planck.

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

L'idea di Bohr era, quindi, di imporre due quantizzazioni, quella del momento angolare e quella conseguente dell'energia. Le righe spettrali emesse o assorbite dagli atomi si generavano per passaggio da un'orbita all'altra:

Qualsiasi sia l'alterazione nella legge del moto degli elettroni, sembra necessario introdurre nella legge in questione una quantità estranea alla elettrodinamica classica, cioè la costante di Planck, o come spesso è chiamata il quanto elementare di azione. Introducendo questa quantità la questione della configurazione stabile degli elettroni negli atomi è essenzialmente cambiata in quanto questa costante è di tali dimensioni e grandezza che insieme alla massa e alla carica delle particelle determina una lunghezza dell'ordine di grandezza richiesta.

In questo modo Bohr calcolò che l'energia dell'elettrone era quantificata da un numero quantico principale  $n$  che poteva assumere i valori  $n = 1, 2, 3...$ . L'orbita più vicina al nucleo, corrispondente al numero quantico  $n = 1$  e all'energia minima, si trova ad una distanza

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 m e^4}$$

In riferimento a questa quantità, l'energia dell'elettrone nell'atomo di idrogeno è data da:

$$E_n = \frac{1}{n^2} \frac{1}{2a_0}$$

Assumendo che le frequenze delle righe spettrali derivino dalla transizione tra due orbite con diversi numeri quantici, il modello di Bohr fornì uno stupefacente accordo con i dati sperimentali dello spettro dell'idrogeno (Figura 67) e dello ione elio  $He^+$ , cioè di sistemi con un solo elettrone, ma non era in grado di interpretare adeguatamente gli spettri di atomi polielettronici.

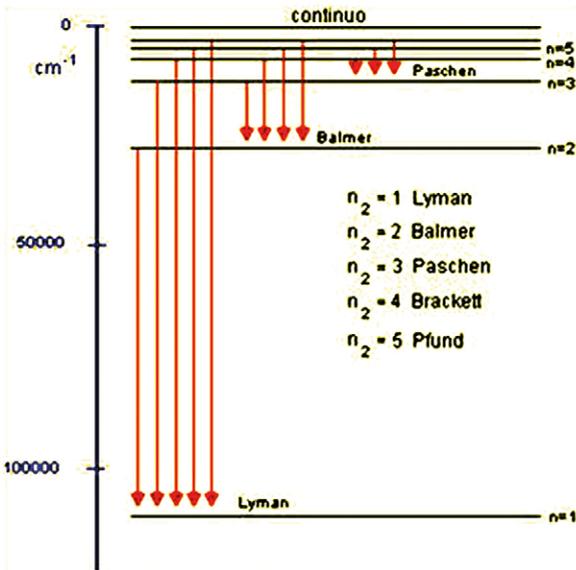


Figura 67 – Origine dello spettro dell'atomo di idrogeno secondo il modello di Bohr.

Un'estensione del modello di Bohr fu formulata da Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951) che introdusse il concetto che

le orbite elettroniche potessero essere di tipo ellittico, ampliando così l'analogia con i moti planetari. Nell'approccio di Sommerfeld diventava necessario introdurre, oltre al numero quantico principale, anche un numero quantico secondario  $l$  che definiva l'ellitticità dell'orbita. Il numero quantico  $l$  può, per ogni  $n$ , assumere i valori  $0, 1 \dots n-1$ . Un terzo numero quantico, il numero quantico magnetico  $m$ , fissava poi l'orientazione dell'orbita e poteva assumere valori tra  $+l$  e  $-l$ . Ad esempio, nel caso di  $l = 1$  i possibili valori di  $m$  sono  $1, 0$  e  $-1$ . Il numero di stati quantici possibili per gli elettroni negli atomi al variare dei numeri quantici è riassunto nella Figura 68, dove sono indicati anche gli stati di spin di cui parleremo in seguito

n	Numeri quantici		Spin $m_s$	Numero di stati	
	l	m		strato	totale
1	0	0	-1/2, +1/2	2	2
2	0	0	-1/2, +1/2	2	8
	1	-1, 0, +1	-1/2, +1/2	6	
3	0	0	-1/2, +1/2	2	18
	1	-1, 0, +1	-1/2, +1/2	6	
	2	-2, -1, 0, +1, +2	-1/2, +1/2	10	
4	0	0	-1/2, +1/2	2	32
	1	-1, 0, +1	-1/2, +1/2	6	
	2	-2, -1, 0, +1, +2	-1/2, +1/2	10	
	3	-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3	-1/2, +1/2	14	

Figura 68 – Stati quantici dell'elettrone negli atomi.

L'introduzione delle quantizzazioni di Sommerfeld permetteva, per quanto riguarda gli spettri atomici, di rendere conto sia del fatto che alcune righe degli spettri atomici avevano una struttura fine di più linee sia degli effetti del campo magnetico sugli spettri e in particolare dell'effetto Zeeman. Tuttavia, il modello di Sommerfeld deviava sempre di più dai dati sperimentali man mano che il numero di elettroni aumentava e mostrava i suoi limiti nonostante vari tentativi di miglioramento.

Il modello di Bohr-Sommerfeld, anche se incompleto, ebbe un grande impatto per lo sviluppo di una prima teoria del legame chimico. Il punto di partenza era la osservata stabilità chimica dei gas nobili come neon e argo che nel guscio esterno avevano 8 elettroni. All'inizio del XX secolo Gilbert Newton Lewis (1875-1946) aveva rappresentato gli elettroni negli atomi degli elementi del secondo periodo della tavo-

la periodica come punti ai vertici di un cubo centrato sul nucleo (vedi Figura 69). Il completamento del cubo corrispondeva alla stabilità del gas nobile. La proprietà di stabilizzazione dell'ottetto di elettroni permetteva a Lewis di ipotizzare la formazione di un legame covalente come condivisione di elettroni per raggiungere la configurazione dell'ottetto, come mostrato in Figura 70 per la molecola di ossigeno  $O_2$ .

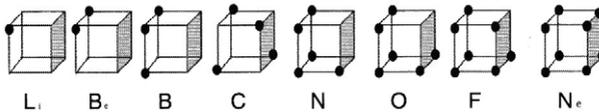


Figura 69 – La struttura elettronica degli atomi secondo Lewis.

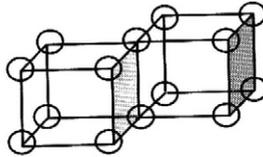


Figura 70 – Struttura elettronica della molecola di ossigeno secondo Lewis.

Il modello di Bohr-Sommerfeld era solo un modello preliminare che coniugava una descrizione classica del moto elettronico in termini di orbite con condizioni di quantizzazione. Pur assumendo che gli elettroni, in assenza di perturbazioni, andassero preferenzialmente ad occupare le orbite di energia più bassa, rimanevano aperte le questioni fondamentali del numero di elettroni che potevano occupare un'orbita, della repulsione elettrone-elettrone e della struttura del nucleo che rendesse conto sia della carica che della massa nucleare.

### 9.8.3 *Lo spin e il principio di esclusione di Pauli*

Un problema che rimaneva insoluto era la spiegazione dell'effetto Zeeman anomalo, cioè l'osservazione che in presenza di un campo magnetico le righe emesse da alcuni elementi si strutturavano in più righe di quelle che erano prevedibili in base ai soli numeri quantici magnetici che abbiamo visto. Questo faceva sospettare l'esistenza di un ulteriore numero quantico 'nascosto'. Il primo a suggerire che questo nuovo numero quantico fosse associato alla rotazione dell'elettrone intorno a un

suo asse fu Ralph de Lear Kronig (1904-1995). Infatti, la rotazione di una particella carica induce un momento magnetico di *spin*: l'elettrone ruota solo in due sensi (orario e antiorario, volendo ricorrere a una descrizione classica (vedi Figura 71) e il numero quantico di spin ha valori seminteri

$$m_s = +\frac{1}{2} \text{ e } m_s = -\frac{1}{2}$$

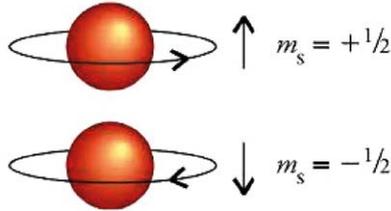


Figura 71 – Lo spin dell'elettrone.

Lo stato energetico dell'elettrone è allora definito da quattro numeri quantici:  $(n, l, m \text{ e } m_s)$ . Tuttavia, il *principio di esclusione* di Pauli stabilirà che non è possibile che due elettroni si trovino nello stesso stato quantico, cioè che due elettroni abbiano gli stessi quattro numeri quantici. Il principio di esclusione si applica solo a particelle con spin semintero (fermioni per i quali vale la statistica di Fermi-Dirac). Più esattamente, e anticipando la discussione della prossima sezione, il principio di esclusione impone che se due elettroni (1 e 2) sono in due stati quantici a e b (con a e b che designano i quattro numeri quantici) la funzione totale che descrive lo stato dei due elettroni deve essere antisimmetrica per lo scambio degli elettroni, cioè:

$$\psi(1,2) = \psi_1(a)\psi_2(b) - \psi_1(b)\psi_2(a) = 0$$

#### 9.8.4 La meccanica ondulatoria e l'interpretazione di Copenhagen

Nel 1924 Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie (1892-1987), un giovane matematico e fisico francese, presentò la sua tesi di dottorato su *Recherches sur la théorie des quanta* (Ricerche sulla teoria dei quanti) in cui sostenne che, analogamente alla duplice natura della radiazione, anche l'elettrone, tipicamente una particella, si comportava anche come un'onda con una lunghezza d'onda

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

L'ipotesi di de Broglie era più generale nel senso che ogni particella o corpo in movimento ha una onda associata: è l'origine della cosiddetta meccanica ondulatoria e può essere sintetizzata nelle parole dello stesso de Broglie:

L'idea fondamentale della [mia tesi del 1924] era la seguente: il fatto che, in seguito all'introduzione dei fotoni di Einstein nelle onde luminose, si sapesse che la luce contiene particelle che sono concentrazioni di energia incorporate nell'onda, suggerisce che tutte le particelle, come l'elettrone, devono essere trasportate da un'onda in cui sono incorporate ... La mia idea essenziale era di estendere a tutte le particelle la coesistenza di onde e particelle scoperte da Einstein nel 1905 nel caso di luce e fotoni.

La duplice natura onda-particella dell'elettrone teorizzata da de Broglie fu verificata sperimentalmente nel 1927 da Clinton Joseph Davisson (1881-1958) e Lester Germer (1896-1971) con un famoso esperimento in cui un fascio di elettroni accelerati veniva inviato su un cristallo e veniva misurata la traiettoria degli elettroni in funzione dell'angolo di deviazione. I risultati dell'esperimento potevano essere interpretati esattamente nello stesso modo che per la diffrazione dei raggi X secondo la legge di Bragg. Questo confermava sperimentalmente il comportamento ondulatorio degli elettroni.

Se l'elettrone ha la natura di un'onda, l'esistenza di solo alcune orbite stazionarie nell'atomo acquista un significato più semplice e intuitivo perché la lunghezza dell'orbita deve coincidere con un multiplo esatto della lunghezza d'onda dell'elettrone, come si vede, per il caso bidimensionale, dalla Figura 72:

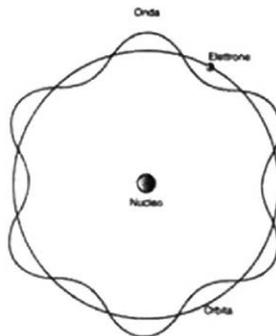


Figura 72 – L'orbita di un'onda stazionaria.

Frattanto ci si rendeva conto che il concetto classico di orbita era forse alla base delle difficoltà incontrate nell'applicazione del modello di Bohr-Sommerfeld al moto degli elettroni nell'atomo. In questa direzione si mosse Erwin Schrödinger (1887-1961) che era un esperto di tecniche matematiche e, in particolare, di equazioni ad autovalori e autofunzioni. Partendo da queste sue competenze, Schrödinger sviluppò l'idea di inserire nell'equazione delle onde per l'elettrone la lunghezza d'onda di de Broglie. La dinamica dell'elettrone era allora definita da un insieme di funzioni d'onda  $\Psi(xyz)$  la cui evoluzione è determinata dalle soluzioni dell'equazione di Schrödinger che, per la parte indipendente dal tempo, ha la forma:

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2} \right) + V(xyz) \right] \Psi(xyz) = E\Psi(xyz) \quad (9.11)$$

L'equazione di Schrödinger è un'equazione agli autovalori in cui un operatore (la parte tra parentesi quadra) agisce su una funzione  $\psi$  dando la funzione stessa moltiplicata per una costante, l'autovalore (in questo caso l'energia  $E$  del sistema). Le soluzioni dell'equazione sono le autofunzioni che descrivono il comportamento del sistema. Risolvendo questa equazione si ottengono soluzioni che automaticamente contengono i numeri quantici  $n$ ,  $l$  ed  $m$  di Sommerfeld. La funzione d'onda (l'autofunzione) fornisce una descrizione del comportamento delle onde della materia, nel nostro caso delle onde associate all'elettrone, senza far apparire vere onde fisiche.

La formulazione di Schrödinger della meccanica quantistica usava una matematica nota a molti fisici ma una interpretazione del significato della funzione d'onda si deve principalmente a Max Born (1882-1970) secondo il quale il quadrato della funzione d'onda moltiplicato per un elemento di volume  $d\tau$ ,  $|\Psi|^2 d\tau$ , rappresenta la probabilità di trovare l'elettrone in quell'elemento di volume. Secondo questa visione possiamo avere solo una conoscenza probabilistica di un sistema microscopico. L'elettrone nell'atomo può allora essere visto come una distribuzione di densità (una nube) di carica negativa nello spazio, una distribuzione diversa per le varie autofunzioni  $\Psi_{nlm}$ .

Ma le implicazioni per il nostro processo conoscitivo dei sistemi microscopici sono più profonde. Nel 1927, dopo una prolungata serie di discussioni con Bohr, Werner Karl Heisenberg (1901-1976) enunciò il *principio di indeterminazione*. Il punto di partenza di Heisenberg era che in un esperimento ideale per osservare posizione  $q$  e

momento  $p$  ( $p=mv$ ) di un elettrone bisogna illuminarlo con radiazioni di lunghezza d'onda inferiore al suo raggio, ad esempio con raggi  $\gamma$ , ed osservare la luce diffusa con un adatto microscopio. Il fotone  $\gamma$  colpendo l'elettrone lo fa spostare dalla sua posizione e gli fa cambiare velocità e quindi momento. Con quanta più precisione cerchiamo di misurare la posizione dell'elettrone (aumentando la frequenza dei raggi  $\gamma$ ) tanto più alteriamo il momento dell'elettrone. Il principio di indeterminazione stabilisce che il prodotto degli errori su posizione e momento non può essere inferiore a un certo limite:

$$\Delta q \cdot \Delta p \geq h$$

Lo stesso problema si pone per tutte le coppie di variabili coniugate come, ad esempio, energia e tempo:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

In sostanza il principio di indeterminazione afferma che è impossibile misurare con la precisione voluta due variabili coniugate in successione o simultaneamente perché il processo di misura stesso altera le condizioni del sistema e, quindi, quando misuriamo una variabile inevitabilmente alteriamo la variabile coniugata. Se così stanno le cose, è concettualmente impossibile misurare tutte le proprietà di un sistema fisico microscopico ad un certo istante (condizioni iniziali) e se le condizioni iniziali non sono perfettamente note la evoluzione del sistema non può essere prevista se non in termini probabilistici. Viene quindi messo in discussione il determinismo e il principio di causalità nella evoluzione dei sistemi fisici. Su questo aspetto così si esprime Heisenberg:

Nell'ambito della realtà le cui condizioni sono formulate dalla teoria quantistica, le leggi naturali non conducono quindi a una completa determinazione di ciò che accade nello spazio e nel tempo; l'accadere (all'interno delle frequenze determinate per mezzo delle connessioni) è piuttosto rimesso al gioco del caso.

Questa è nella sostanza la cosiddetta interpretazione di Copenhagen della meccanica quantistica, generalmente attribuita a Bohr e Heisenberg. Ma non tutti erano d'accordo con questo punto di vista e tra questi soprattutto Einstein, il quale riteneva che la meccanica quantistica, in questa forma, fosse una teoria incompleta e che ci fosse una

teoria più completa, ancora non conosciuta, che avrebbe restituito alle particelle elementari una connotazione deterministica piuttosto che semplicemente probabilistica.

### 9.8.5 *La meccanica delle matrici*

Una diversa formulazione della meccanica quantistica è stata la meccanica delle matrici. L'idea di partenza di Heisenberg era che, anche ammettendo che l'elettrone si comporti come un'onda, nello studio di quello che avviene in un atomo o nelle varie interazioni dobbiamo usare solo quantità che possiamo misurare sperimentalmente. Ora, un'onda elettronica non la possiamo certamente osservare fisicamente, mentre possiamo osservare frequenze della luce che un atomo emette, associate alle transizioni tra vari stati energetici, o altri dati misurabili. Nel caso di un'orbita possiamo misurare posizione e momento.

Usando questo approccio Heisenberg elaborò il suo modello e scrisse un articolo che dette a Born, di cui era assistente, perché lo revisionasse e gli dicesse se era adatto per la pubblicazione, non sentendosi proprio del tutto sicuro di quello che aveva scritto. Born non riguardò subito l'articolo ma quando lo prese in mano osservò che Heisenberg aveva usato strane regole di moltiplicazione per calcolare le probabilità di transizione tra i vari stati energetici dell'elettrone. Born all'inizio non capiva di cosa si trattasse, ma poi si rese conto che Heisenberg, senza saper cosa fosse una matrice, aveva in pratica usato regole di moltiplicazioni di matrici, argomento che Born invece conosceva molto bene. Dopo aver licenziato il lavoro di Heisenberg per la pubblicazione, Born si mise alacremente al lavoro per capire e chiarire alcuni punti importanti con il suo collaboratore Jordan. Ad un congresso incontrò Wolfgang Pauli (1900-1958), un grande fisico quantistico e suo assistente, chiedendogli di collaborare al lavoro. Ma Pauli si rifiutò categoricamente dicendo con sarcasmo:

So che ti piacciono tanto i formalismi noiosi e complicati. Alla fine, riuscirai solo a impoverire le idee fisiche di Heisenberg con le tue futili matematiche.

Ma Born non si impressionò; tornato a Gottingen si rimise al lavoro con Jordan pubblicando un articolo in cui si giungeva alla famosa equazione della legge di non commutazione della posizione  $q$  e della quantità di moto  $p$  della meccanica quantistica:

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i}$$

cosa di cui era molto orgoglioso: «Sono stato la prima persona a scrivere una legge fisica in termini di simboli che non commutano».

Nella formula di non commutazione le grandezze devono essere considerate come grandezze matriciali. Quando il lavoro fu pubblicato e Heisenberg lo vide non poté fare a meno di dire: «Ho un lavoro di Born che non riesco proprio a capire. È pieno di matrici e non so quello che sono».

Ma si mise a studiare e ben presto fu pubblicato un famoso lavoro a tre nomi (Born, Jordan, Heisenberg) che chiariva tutto del formalismo della meccanica delle matrici.

Heisenberg in seguito dimostrò che i due formalismi, ondulatorio e delle matrici, erano in realtà equivalenti.

I protagonisti della meccanica quantistica vivevano e lavoravano in uno strano mondo (Gamow 1966; Born 2005; Greenspan 2005; Faus 2019; Heisenberg 1984). Scoprivano continuamente qualcosa di nuovo, anzi di rivoluzionario, nel comportamento degli atomi. Le teorie, le loro formule, funzionavano, ma a loro stessi sembravano strane, quasi senza senso, perché erano controintuitive, cioè non si inquadravano né nel senso comune (come ad esempio il dualismo onda-particella) né negli schemi consolidati della fisica classica in cui credevano ciecamente. Ma non solo ognuno aveva dubbi o perplessità su quello che lui stesso stava facendo ma ancora di più si rifiutavano di credere o di considerare significativo quello che facevano gli altri. C'erano, è vero, grandi amicizie e stima reciproca in molti casi, ma anche perplessità sulla ragionevolezza di quello che facevano gli altri, dal momento che c'erano punti di vista e formalismi diversi che, almeno inizialmente, sembravano inconciliabili. In questa situazione generale i protagonisti della meccanica quantistica ci sembrano un po' strani o almeno particolari. Ad esempio, Heisenberg accusò Born di essere un traditore della meccanica delle matrici, scagliandosi contro: «Più penso all'aspetto fisico della teoria di Schrödinger, più disgusto io provo». Ma a sua volta anche Schrödinger non ci andava di mano leggera:

Non c'è nessuna relazione genetica con Heisenberg che io conosca. Conosco naturalmente la sua teoria ma mi sento scoraggiato, per non dire ripugnato, di metodi dell'algebra trascendentale, che sono per me difficili.

### 9.9 Una storia senza fine

In questo capitolo abbiamo visto che una serie di esperimenti ha permesso di definire una struttura dell'atomo che è costituito da un nucleo interno, che contiene protoni e neutroni, intorno al quale ruotano gli elettroni. Protoni ed elettroni in numero uguale assicurano la neutralità elettrica dell'atomo. Le caratteristiche (carica elettrica, massa, dimensione e spin) di queste particelle elementari sono riassunte nella tabella che segue dove le unità di misura sono:  $1.621 \times 10^{-19}$  Coulomb per la carica (cioè la carica del protone),  $u.m.a. = 1.6605 \times 10^{-27}$  Kg per la massa (cioè la massa del protone) e il fermi  $f = 10^{-15}m$  come unità di lunghezza.

Tabella 7 – Protone, neutrone, elettrone.

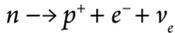
PART.	CARICA	MASSA	DIMENS.	SPIN
Protone	1	1.007	0.833	1/2
Neutrone	0	1.009	0.86416	0
Elettrone	1	$5.486 \times 10^{-4}$	10-3	1/2

Dalla tabella si vede che la massa del neutrone è maggiore della somma delle masse del protone e dell'elettrone e questa è la dimostrazione che il neutrone è una particella elementare e non semplicemente una aggregazione protone-elettrone.

Così stando le cose, la trattazione della struttura, della dinamica e delle interazioni degli atomi e, per estensione, delle molecole, in termini della meccanica quantistica prende in considerazione, come visto, le forze di interazione di tipo elettromagnetico e gravitazionale, quest'ultime peraltro molto minori. Queste sono le forze di interazione note e ben documentate nella fisica del XIX secolo. Sono forze che ci sono familiari perché sono forze a lungo raggio, anche se diminuiscono con il quadrato della distanza, della cui esistenza ci rendiamo conto facilmente anche in base a osservazioni empiriche.

Se protoni, neutroni ed elettroni fossero realmente i costituenti ultimi della materia ci troveremmo di fronte a quella che possiamo chiamare una dissimmetria. Infatti, mentre protoni ed elettroni, come particelle isolate, sono stabili nel senso che hanno tempi di vita lunghissimi, dell'ordine dell'età dell'universo, il neutrone libero ha un tempo di vita di soli 800 secondi. A parte questo, ci sono due problemi più fondamentali. Nel 1930 Wolfgang Pauli nello studio del deca-

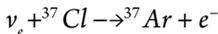
dimento beta ipotizzò l'esistenza di una nuova particella, il *neutrino*. Il neutrino elettronico fu poi studiato da Fermi nel 1934 e realmente scoperto molti anni dopo. La reazione importante che si produce durante i processi radioattivi è il decadimento di neutroni per produrre protoni, elettroni e antineutrini elettronici secondo:



Il neutrino è una particella con carica nulla e massa piccolissima (minore di un milionesimo della massa dell'elettrone). Questi esperimenti dimostrano che:

- esistono altre particelle elementari oltre al protone, al neutrone e all'elettrone;
- generalizzando, come per il neutrino, ad ogni particella elementare può essere associata una antiparticella corrispondente.

I neutrini possono essere rivelati, ad esempio, in esperimenti in cui convertono cloro ( $^{37}\text{Cl}$ ) in argon ( $^{37}\text{Ar}$ ), un gas radioattivo con un tempo di vita di 35 giorni, secondo la reazione:



Una questione più fondamentale è relativa alla interazione capace di tenere insieme i protoni carichi positivamente nello spazio minimo del nucleo atomico vincendo la forza di repulsione elettrostatica, enorme a quelle distanze. Il *modello standard* (Maiani 1998; Castellani 2001; Berra 2013; Casalbuoni 2013) assume che, oltre alle forze elettrostatiche e gravitazionali, siano attive anche una *interazione debole*, responsabile dei processi di decadimento radioattivo, e una *interazione nucleare forte* responsabile della stabilità del nucleo atomico. Alla distanza di 1 fermi, se poniamo uguale a 1 l'intensità della interazione forte, l'interazione elettromagnetica è 100 volte più piccola e l'interazione debole è 100.000 volte minore, mentre la forza gravitazionale è trascurabile. Descriveremo alcuni punti essenziali del modello standard per quanto riguarda la struttura subatomica e le particelle elementari che costituiscono gli atomi.

Il modello standard, oltre a introdurre due nuove forze attive a livello atomico, generalizza il concetto di mediatore di forze. Nel caso della interazione elettromagnetica il mediatore della forza è il fotone, una particella priva di massa e di spin zero (quindi un *bosone* che segue

la statistica di Bose-Einstein). Quando due elettroni interagiscono tra di loro, ad esempio si urtano (vedi Figura 73) l'interazione è mediata da un fotone. Lo schema di Figura 71 rappresenta l'interazione di due elettroni che urtandosi (sotto) si respingono (sopra): l'interazione è mediata dal fotone  $\gamma$ :

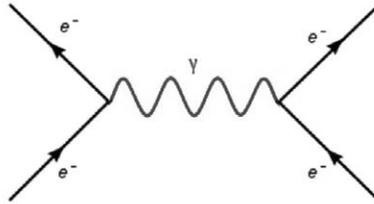


Figura 73 – Interazione tra due elettroni mediata dal fotone  $\gamma$ .

Nel modello standard si possono distinguere due categorie di particelle subatomiche: particelle elementari e particelle composte. Semplificando per i fini della nostra discussione, nelle Figure 74 e 75 sono elencate le varie particelle elementari e composte.

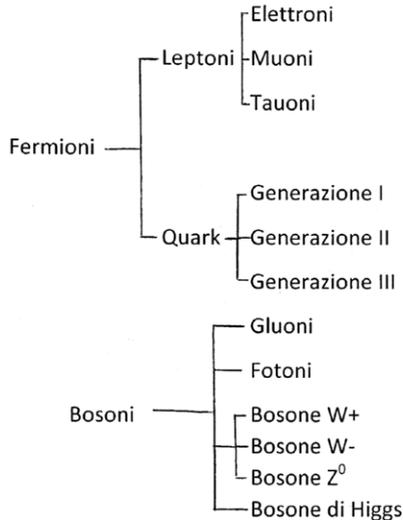


Figura 74 – Particelle subatomiche elementari.



Figura 75 – Particelle subatomiche composte.

Secondo il modello standard l'elettrone è una particella elementare che fa parte di una serie di particelle elementari denominate *leptoni* [dal greco *λεπτον* = leggero] mentre protoni e neutroni, nella categoria degli *adroni*, hanno natura composta e sono costituiti da particelle ultime chiamate *quark*. Il nome di fantasia di queste particelle è stato ispirato da un passo (una filastrocca) di James Joyce in *Finnegans wake*:

Three quarks for muster Mark!  
 Sure he hasn't much of bark

Quark, nel linguaggio 'sperimentale' di Joyce è locuzione di probabile origine tedesca, forse sinonimo di *quatsch* (sciocchezza banale). Ma è interessante anche la sua associazione con il numero tre sia perché inizialmente era stata ipotizzata la presenza di tre soli quark (u, d, s) sia in relazione ai processi di aggregazione dei quark, come vedremo.

Esistono sei tipi di quark che possono essere classificati in tre generazioni (I, II e III) in ordine, più o meno, della loro introduzione nella teoria. I quark, come riassunto in Figura 76, sono particella con masse molto diverse tra loro<sup>4</sup> e con carica frazionaria in termini della carica elettronica. I quark hanno spin semintero e quindi sono fermioni che possono aggregarsi rispettando il principio di esclusione di Pauli. A tal fine ai quark è stata attribuita la cosiddetta *carica di colore*, una proprietà che non ha nulla a che fare con il colore delle nostre sensazioni visive. Tutti i quark possono avere una carica del colore dei tre colori primari, rosso, verde e blu. Quindi, abbiamo complessivamente 18 tipi di quark. I quark possono aggregarsi secondo la regola che la carica complessiva sia nulla o un multiplo intero della carica fondamentale ma, per rispettare il principio di esclusione di Pauli, il colore risultante deve essere neutro o bianco, come nella sovrapposizione dei colori primari mostrata nella 75.

<sup>4</sup> Nella figura le masse sono espresse in unità dalla relazione di Einstein  $E = mc^2$ .

Famiglia I			Famiglia II			Famiglia III		
	carica	massa		carica	massa		carica	massa
<i>up</i> (u)	2/3	0.03	<i>charm</i> (c)	2/3	1.3	<i>top</i> (t)	2/3	174
<i>down</i> (d)	-1/3	0.06	<i>strange</i> (s)	-1/3	0.14	<i>bottom</i> (b)	-1/3	4.3

Figura 76 – Sapori e proprietà dei quark.

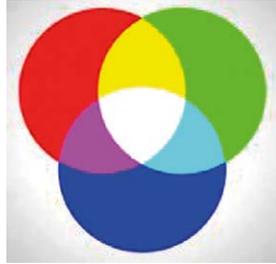


Figura 77 – Sovrapposizione dei colori primari rosso, verde e blu.

Protoni e neutroni risultano dalla aggregazione di tre quark di tipo u e d, secondo lo schema della Figura 78. Mentre protoni e neutroni isolati sono stabili, anche se i neutroni con tempo di vita breve, i quark non possono esistere da soli ma solo nella aggregazione di terne, come abbiamo visto, o in aggregazioni più complesse. Per ogni quark esiste un antiquark corrispondente con carica opposta e colore complementare, in ordine ciano, magenta e giallo. Nel rispetto del principio di esclusione, è possibile l'aggregazione di un quark e del corrispondente antiquark del corrispettivo anticoloro: si possono in questo modo formare mesoni di otto tipi diversi, mesoni che sono particelle con spin intero e quindi bosoni. La struttura di un mesone, il pione  $\pi^+$ , è mostrata in Figura 79.

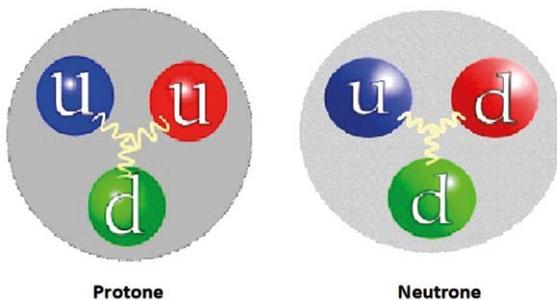


Figura 78 – Struttura del protone e del neutrone.

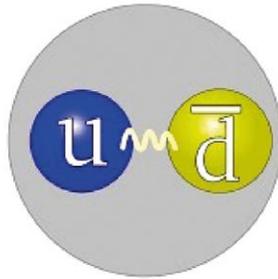


Figura 79 – Struttura del mesone  $\pi^+$ .

I *gluoni*, (da *glue* = colla) sono i mediatori dell'interazione forte tra quark e tra nucleoni. I gluoni non hanno carica elettrica e non hanno massa e sono particelle con spin 1. I gluoni sono costituiti da un colore e da un anticoloro: da queste combinazioni si forma un ottetto di gluoni indipendenti. I gluoni non possono essere osservati da soli e, analogamente ai quarks, esistono solo in combinazione.

I mesoni sono bosoni che si formano dall'associazione di un quark e di un antiquark e agiscono come mediatori della interazione forte, in particolare, tra nucleoni. I bosoni  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ , mediatori dell'interazione debole, sono particelle massive. Il bosone  $Z^0$  non ha carica mentre i primi due hanno carica +1 e -1, rispettivamente. Il bosone di Higgs (Casalbuoni 2013) è un mediatore che attribuisce massa alle particelle.

Questi brevi cenni hanno mostrato che a livello subatomico abbiamo una molteplicità di particelle elementari con caratteristiche e funzioni diversificate. Molte di esse non sono isolabili in quanto di vita breve ma sono state rivelate in esperimenti con acceleratori di alta energia. La situazione è resa più complessa dal fatto che ad ogni particella è associata una antiparticella. Inoltre, esiste una prospettiva di unificazione generale delle interazioni che per ora ha riguardato le interazioni elettromagnetica e l'interazione debole.

In tale situazione, comunque ancora in evoluzione, ci si potrebbe chiedere se resta qualcosa della intuizione democritea di atomi come costituenti ultimi della materia. La risposta dipende dalla prospettiva di osservazione. Se consideriamo l'immagine di diffrazione elettronica di un cristallo di silicio, mostrata in Figura 80, possiamo riconoscere la organizzazione nel materiale solido di unità microscopiche che sembrano proprio gli atomi di Democrito. Da esperimenti di questo

genere possiamo ricavare peso e dimensione degli atomi, anche se quest'ultima va presa con cautela una volta che la meccanica quantistica ci dice che gli elettroni e tutte le particelle hanno una duplice natura onda-particella. Comunque, grazie a una straordinaria varietà di tecniche sperimentali siamo in grado di manipolare direttamente gli atomi, anche atomi singoli.

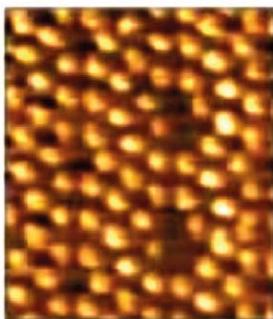


Figura 80 – Diffrazione elettronica di un cristallo di silicio.

Le nostre conoscenze attuali ci mostrano che se per ‘atomi’, come definiti da Democrito, intendiamo i componenti ultimi della materia siamo in una situazione che potremmo definire fluida. L’elettrone, una delle particelle elementari, anche se perfettamente definito può già apparirci sfuggente per la sua duplice manifestazione di onda e particella<sup>5</sup>:

Credon poi con fè profonda  
 Cui s’inchina la ragion  
 Che la luce è corpo e onda  
 Onda e corpo è l’elettron.

Le altre particelle elementari sono ancora più sfuggenti in quanto, non possono esistere da sole e possono essere osservate solo indirettamente come i quark, che inoltre hanno un nome di per sé misterioso. Del resto, il modello standard delle particelle elementari e delle loro interazioni è una teoria ancora in fase di completamento in attesa di una unificazione delle forze di interazione, inclusa la forza gravitazionale.

<sup>5</sup> I versi riportati di seguito, da una poesia di Persico, uno dei ragazzi di Via Panisperna, esprimono il credo dei fisici quantistici

La teoria atomistica degli antichi si basava su due principi, gli atomi e il vuoto. Se la concezione degli atomi, come costituenti primi della materia, è cambiata profondamente ancora più sostanziale è stato il cambiamento della concezione del vuoto, dello spazio in cui le particelle elementari si muovono e interagiscono. Lo spazio vuoto non esiste più ma abbiamo uno spazio riempito di campi di diverso genere, campi i cui quanti possono essere in definitiva particelle elementari che osserviamo.



## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Abbi, Ferdinando. 1980. *Elementi, principi e particelle. Le teorie chimiche da Paracelso a Stahl*. Torino: Loescher.
- Abbi, Ferdinando. 2000a. "L'atomismo chimico." In P. Rossi (a cura di), *Storia della scienza moderna e contemporanea*. Torino: UTET.
- Abbi, Ferdinando. 2000b. "Volta's chemical theories. the first two phases." In F. Bevilacqua, L. Fregonese (a cura di), *Nuova Voltiana. Studies on Volta and His Times*. Milano: Hoepli.
- Apuleio. 1955. *L'asino d'oro*. Milano: Rizzoli.
- Aristotele. 2004. *Politica*. Roma-Bari: Laterza.
- Aristotele. 2005. *Metafisica*. Roma-Bari: Laterza.
- Baffioni, Carmela. 1982. *Atomismo e antiatomismo nel pensiero islamico*. Napoli: Istituto Universitario Orientale.
- Bailey, Cyril. 1964. *The Greek Atomists and Epicurus*. New York: Russel and Russel.
- Barnes, Jonathan. 1982. *The Presocratic Philosophers*. New York: Routledge.
- Bensarde-Vincent, Bernadette. 1993. *Lavoisier. Memoire d'une revolution*. Paris: Flammarion.
- Beretta, Marco, e Francesco Citti. 2008. *Lucrezio, la natura e la scienza*. Firenze: Olschki.
- Beretta, Marco. 1993. "Chemists in the storm. Lavoisier, Priestley and the french revolution." *Nuncius* VIII: 75-104.
- Berra, Paolo. 2013. *Simmetrie dell'universo. Dalla scoperta dell'antimateria a LHC*. Bari: Dedalo.
- Biondi, Ennio. 2013. "L'immagine di Talete nelle fonti letterarie greche." *Gerion. Revista de Historia Antigua* 31: 179-200.
- Boas, Marie. 1952. "The Establishment of the Mechanical Philosophy." *Osiris* 10: 412-541.
- Boas, Marie. 1958. *Robert Boyle and Seventeenth Century Chemistry*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Born, Max. 2005. *Autobiografia di un fisico*. Roma: Editori Riuniti.
- Boyer, Carl Benjamin. 1998. *Storia della matematica*. Milano: Mondadori.
- Brecht, Bertolt. 1998. *Vita di Galileo*. Torino: Einaudi.
- Brett, George S. 2008. *The Philosophy of Gassendi*. Stoccarda: McMillan.
- Brooke, John H. 1968. "Woelher's Urea and Its Vital Force? A Virdict from the Chemists." *Ambix* XV: 84-114.

- Butterfield, Herbert. 1962. *Le origini della scienza moderna*. Bologna: Il Mulino.
- Califano, Salvatore, e Vincenzo Schettino. 2017. "A. L. Lavoisier: Trait   élémentaire de chimie." In A. Neri (a cura di), *La dove il pensiero incontra l'esperienza*. Pisa: ETS.
- Califano, Salvatore, e Vincenzo Schettino. 2018. *La nascita della meccanica quantistica*. Firenze: Firenze University Press.
- Califano, Salvatore. 2010. *Storia della chimica. I. Dall'alchimia alla chimica del XIX secolo*. Torino: Bollati Boringhieri.
- Califano, Salvatore. 2015. *Storia dell'alchimia. Misticismo ed esoterismo all'origine della chimica moderna*. Firenze: Firenze University Press.
- Casalbuoni, Roberto. 2013. *La ricerca del bosone di Higgs*. Firenze: Firenze University Press.
- Castellani, Elena (a cura di). 2001. *Simmetria e realt  *. Milano: Le Scienze.
- Castellarnau Arfelis, Ariadna. 2019. *Marie Curie*. Milano: RBA.
- Cavaliere, Alberto. 1987. *La chimica in versi. Rime distillate*. Milano: Mursia.
- Cerri, Giovanni et al. 2018. "Dall'universo-blocco all'atomo nella scuola di Elea." In M. Pulpito, S. Ranzato (a cura di), *Dall'universo-blocco all'atomo nella scuola di Elea: Parmenide, Zenone, Leucippo*. Sankt Augustin: Academia Verlag.
- Cerruti, Luigi. 1982. "Stanislao Cannizzaro, didatta e riformatore. impegno didattico e riflessione teorica." *Chimica e Industria* LXVI: 667-73.
- Chinnici, Giorgio. 2020. *Il sogno di Democrito. L'atomo dall'antichit   alla meccanica quantistica*. Milano: Hoepli.
- Ciardi, Marco. 2003. *Breve storia delle teorie della materia*. Roma: Carocci.
- Ciardi, Marco. 2006. *Amedeo Avogadro. Una politica per la scienza*. Roma: Carocci.
- Ciardi, Marco. 2007. *Il fisico sublime. Amedeo Avogadro e la cultura scientifica del primo Ottocento*. Bologna: Il Mulino.
- Ciardi, Marco. 2019. *Il segreto degli elementi. Mendeleev e l'invenzione del sistema periodico*. Milano: Hoepli.
- Cipriani, Curzio. 1993. "De re metallica e De la pirotecnia. Agricola e Biringuccio." *Atti e memorie dell'Accademia Toscana di scienze e lettere* LX: 11-30.
- Clericuzio, Antonio. 2000. *Elements, Principles and Corpuscles: A Study of Atomism and Chemistry in the XVII Century*. London: Kluwer.
- Colli, Giorgio. 1977-1980. *La sapienza greca*. Milano: Adelphi.
- Corbalan, Fernando. 2013. *La sezione aurea. Il linguaggio matematico della bellezza*. Milano: Mondo Matematico.
- Curd, Patricia. 2011. *A Presocratic Reader. Selected Fragments and Testimonia*. Indianapolis: Hackett Publishing.
- Curie, Eva. 1938. *Vita della signora Curie*. Milano: Mondadori.
- Curie, Marie. 2017. *Autobiografia*. Roma: Castelvecchi.
- Desmond, John D. 1969. *Storia della scienza*. Roma: Editori Riuniti.
- Dhanani, Alnoor. 1994. *The Physical Theory of Kalam*. Leiden: Brill.
- Dhanani, Alnoor. 2015. "The Impact of Ibn-Sina's Critique of Atomism on Subsequent Kalam Discussion of Atomism." *Arabic Science and Philosophy* 25: 70-104.
- Diogene, Laerzio. 1987. *Vite dei filosofi*. Bari. Laterza.
- Djerassi, Carl, e Roald Hoffmann. 2003. *Ossigeno*. Bologna: CLUEB.
- Dobbs, B.J.T. 1975. *The Foundations of Newton's alchemy*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Dutton, Blake D. 1996. "Nicholas d'Autrecourt and William of Ockham on atomism, nominalism and ontology of motion." *Mediev. Phil. and Theol.* 5: 63-85.
- Eliade, Mircea. 2001. *Il mito dell'alchimia*. Torino: Bollati Boringhieri.
- Eliade, Mircea. 1980. *Forgerons et Alchimistes*. Paris: Flammarion.
- Emsley, John. 1998. *The Elements*. Oxford: Clarendon Press.
- Epicuro. 2001. *La felicità*. Roma: Newton Compton.
- Eraclito. 2012. *Dell'origine*. Milano: Feltrinelli.
- Fakhry, Majid. 1958. *Islam Occasionalism and Its Critique By Averroes and Aquinas*. London: George Allen.
- Faus, Jesus N. 2019. *Heisenberg. Il principio di indeterminazione. Il mondo esiste se non lo si guarda?*. Milano: RBA.
- Favino, Federica. 1887. "A proposito dell'atomismo di Galileo: da una lettera di Tommaso Campanella ad uno scritto di Giovanni Ciampoli." *Bruniana e Campanelliana* 3: 265-82.
- Fera, Giuseppe. 2016. "Thomas Young: una stima delle dimensioni atomiche nel primo '800." In S. Esposito (a cura di), *Atti XXV convegno annuale SISFA*. Pavia: Pavia University Press.
- Ferraris, Maurizio. 2019. *Socrate, Platone Aristotele e la scuola di Atene*. Milano: Gedi.
- French, A. P. 1967. "Earlier estimates of molecular sizes." *Am. J. Phys.* 35: 162-63.
- Galilei, Galileo. 2015. *Il saggiatore*. Milano: Feltrinelli.
- Gallavotti, Carlo. 2013. *Empedocle. Poema fisico e lustrale*. Milano: Mondadori.
- Galluzzi, Paolo. 2011. *Tra atomi e indivisibili: la materia ambigua di Galileo*. Firenze: Olschki.
- Gamow, George. 1966. *Thirty Years That Shook the World. The Story of Quantum Theory*. New York: Dover.
- Gangopadhyaya, Mrinalkanti. 1981. *Indian Atomism: History and Sources*. New Jersey: Humanities Press.
- Gatti, Hilary. 2002. *Giordano Bruno and Renaissance Science*. Cornell: Cornell University Press.
- Geymonat, Ludovico. 1970. *Storia del pensiero filosofico e scientifico*. Milano: Garzanti.
- Geymonat, Ludovico. 1991. *Galileo Galilei*. Torino: Einaudi.
- Giangiulio, Maurizio. 2000. *Pitagora. Le opere e le testimonianze*. Milano: Mondadori.
- Gigante, Marcello. 2016. *Biografia e dossografia in Diogene Laerzio*. Daphnet Digital Library.
- Glasner, Ruth. 2001. "Ibn Rushd's theory of minima naturalia." *Arabic Science and Philosophy* 11: 9-26.
- Goethe, Johann Wolfgang. 2010. *Le affinità elettive*. Milano: Garzanti.
- Gordin, Michael D. 2019. *A Well-ordered Thing*. Princeton: Princeton University Press.
- Grand, H. L. 1972. "Lavoisier's oxygen theory of acidity." *Annals of Science* XXIX: 1-18.
- Grand, H. L. 1978. "Galileo's matter theory." In R. E. Butts, J. Pitt (eds), *New Perspectives on Galileo*. Dordrecht: Reidel.
- Greenspan, Nancy T. 2005. *The End of A Certain World. The Life and Science of Max Born*. Cambridge: Perseus Books Group.

- Gregory, Tullio. 1955. *Anima mundi: la filosofia di Guglielmo di Conches e la scuola di Chartres*. Firenze: Sansoni.
- Grellard, Christophe, e Aurélien Robert. 2009. *Atomism in the Late Medieval Philosophy and Theology*. Leiden: Brill.
- Guarneri, Vincenzo. 2007. *Maghi e reazioni misteriose. L'alchimia e la chimica a spasso nel tempo*. Roma: Lapsi.
- Hawthorne, R. M. 1970. "Avogadro's number: early values by Loschmidt and others." *J. Chem. Ed.* 47: 752-55.
- Heisenberg, Werner. 1984. *Fisica e oltre*. Torino: Bollati Boringhieri.
- Holmes, Frederic L., e Trevor H. Lever. 2000. *Instruments and Experimentation in the History of Chemistry*. Cambridge: MIT Press.
- Kahn, Charles H. 1993. *Pitagora e i pitagorici*. Roma: Istituto Enciclopedia Italiana.
- Kaji, Masanori. 2002. "D. I. Mendeleev's concept of chemical elements and the principles of chemistry." *Bull. Hist. Chem.* 27: 4-16.
- Kapoor, S. C. 1965. "Berthollet, Proust and proportions." *Chymia X*: 53-110.
- Katz, Miguel. 2017. *Historia del atomismo*. Buenos Aires: Asociacion Quimica Argentina.
- Kim, Mi Gyung. 2003. *Affinity. That Elusive Dream. A Genealogy of Chemical Revolution*. Boston: MIT Press.
- Koyré, Alexandre. 1973. *Études d'histoire de la pensée scientifique*. Paris: Gallimard.
- Kubbinga, H. H. 1988. "The first molecular theory (1620): Isaac Beeckman." *J. Mol. Struct. Theochem* 181: 205-18.
- Kuhn, Thomas H. 1952. "Robert Boyle and structural chemistry in the seventeenth century." *Isis* 43: 12-36.
- Laing, Michael. 1995. "The Karlsruhe congress 1860." *Education in Chemistry XXII*: 151-53.
- Lami, Alessandro. 1991. *I presocratici. Testimonianze e frammenti da Talete a Empedocle*. Milano: Rizzoli.
- Lanza, D. 1966. *Anassagora. Testi e frammenti*. Firenze: La Nuova Italia.
- Laszlo, Pierre. 1993. *La parole des choses, ou le langage de la chimie*. Paris: Hermann.
- Laurenti, Renato. 1997. *Introduzione a Talete, Anassimandro e Anassimene*. Roma-Bari: Laterza.
- Leicester, Henry Marshall. 1971. *The Historical Background of Chemistry*. New York: Dover.
- Loschmidt, Johann. 1995. "On the size of the air molecules." *J. Chem. Ed.* 72: 870-75.
- Lucas, Charles. 2015. "Mochus the protophilosopher. author of the ancient theory of atomism." *Common Sense Science* 18: 1-13.
- Lucrezio. 1969. *De rerum natura*. Firenze: Sansoni.
- Maiani, Luciano. 1998. *La fisica delle particelle*. Milano: Le Scienze.
- Marcacci, Flavia. 2000. *Talete di Mileto tra filosofia e scienza*, Tesi di laurea. Perugia: Università di Perugia.
- Marcucci, Mirco. 2017. *Il sapere degli antichi greci. Da Talete ad Aristotele*. Milano: StretLab.
- Massa, Enrico, e Giovanni Mana. 2016. "Counting atoms." *Nature Physics* 12: 522.
- Matteoli, Marco. 2010. "Materia, minimo e misura: la genesi dell'atomismo 'geometrico' in Giordano Bruno." *Rinascimento L*: 425-50.
- Maxwell, James C. 2001. *The Theory of Heat*. Mineola: Dover.

- Melhado, Evan M. 1981. *Jacob Berzelius, The Emergence of His Chemical System*. Stockholm: Almqvist and Wiksell.
- Metzger, Helene. 1926. "La philosophie de la matière chez Stahl et ses disciples." *Isis* VIII: 427-64.
- Metzger, Helene. 1927. "La théorie de la composition des sels et la théorie de la combustion chez Stahl et ses disciples." *Isis* IX: 294-325.
- Mondolfo, Rodolfo. 1967. *Il pensiero antico*. Firenze: La Nuova Italia.
- Morel, Pierre-Marie. 2019. "Atomismo, elementi, movimento. sulla critica degli atomisti nel De Caelo di Aristotele." *Fogli di Filosofia* 2: 1-15.
- Neugebauer, Otto. 1974. *Le scienze esatte nell'antichità*. Milano: Feltrinelli.
- Osborne, Catherine. 2004. *Presocratic Philosophy. A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press.
- Partington, J. R. 1939. "The origin of atomic theory." *Annals of science* 4: 245-82.
- Pereira, Michela. 2006. *Alchimia. I testi della tradizione occidentale*. Milano: Mondadori.
- Perrin, Jean. 2014. *Gli atomi*. Roma: Editori Riuniti.
- Philippoff, Joanna et al. 2015. "Chemical solitaire: stepping through history to build an organizational system of the elements." *The Science Teacher* 82: 43-51.
- Pichot, André. 1993. *La nascita della scienza*. Bari: Dedalo.
- Piergiacomi, Enrico. 2013-15. *Il dio 'ipoumano'. Storia delle teologie degli atomisti antichi*, Tesi di laurea. Trento: Università di Trento.
- Platone. 1962. *Timeo*. Milano: Principato.
- Platone. 2019. *Teeteto*. Roma-Bari, Laterza.
- Plutarco. 1997. *Il convito dei sette sapienti*. Napoli: M. D'Auria.
- Portefield, William. 1995. "Loschmidt and the discovery of the small." *J. Chem. Ed.* 72: 870-75.
- Porto, Paulo Alves. 1997. "The atomic theory of Walter Charleton 1620-1707." *Quimica Nova* 20: 335-38.
- Pozzon, I. 2009. *I milesii. Filosofia tra oriente e occidente*. Monza: Limina Mentis.
- Pradhan, Rajat K. 2015. "Vaisheshika Darshana and Particle Physics: A Comparative Analysis." DOI: 10.13140/RG.2.2.20387.91682
- Pullman, Bernard. 1998. *The Atom In The History of Human Thought*. New York: Oxford University Press.
- Pyle, Andrew. 1997. *Atomism and Its Critics: From Democritus to Newton*. Bristol: Toemmes Press.
- Reale, Giovanni. 2006. *I presocratici. Prima traduzione integrale con testi originali a fronte delle testimonianze e dei frammenti di H. Herman Diels e Walther Kranz*. Milano: Bompiani.
- Redondi, Pietro. 1980. *Galileo eretico*. Torino: Einaudi.
- Robertson, Kellie. 2010. "Medieval materialism: a manifesto." *Exemplaria* 22: 99-118.
- Rodney, Joel. 1970. "A godly atomist in seventeenth century England: Ralph Cudworth." *The Historian* 32: 243-49.
- Roselli, Amneris. 1995. *Lettere sulla follia di Democrito*. Napoli: Liguori.
- Rossi, Paolo. 1997b. *La nascita della scienza moderna in Europa*. Bari: Laterza.
- Rossi, Paolo. 1997a. *Galileo Galilei*. Roma: Istituto Poligrafico dello Stato.
- Rovelli, Carlo. 2004. *Che cos'è la scienza. La rivoluzione di Anassimandro*. Milano: Mondadori.

- Rowett, Catherine. 2011. "Ralph Cudworth's the true intellectual system of the universe." In O. Primavesi, K. Luchner (eds), *The Presocratics From The Later Middle Ages to Herman Diels*. Stuttgart: Steiner Verlag.
- Russo, Luigi. 2013. *La rivoluzione dimenticata. Il pensiero scientifico greco e la scienza moderna*. Milano: Feltrinelli.
- Sailor, Danton B. 1964. "Moses and atomism." *J. History Ideas* 25: 3-16.
- Salvi, Pier Remigio, e Vincenzo Schettino. 2019. "Sadi Carnot's Reflections and the foundation of thermodynamics." *Substantia* 3: 73-96.
- Salvi, Pier Remigio. 2021. "Discovering oxygen: Experimental techniques and logic of a great chemist: Carl Wilhelm Scheele." *Bull. Hist. Chem.* 46: 30-41.
- Saudelli, Lucia. 2004. "Ippolito Romano e la Refutatio di Eraclito." *Isonomia. Rivista di filosofia*, 1-33.
- Scerri, Eric R. 2006. *The Periodic Table: Its Story and Its Significance*. Oxford: Oxford University Press.
- Scerri, Eric R. 2007. *The Periodic Table. Its Story and Its Significance*. Oxford: Oxford University Press.
- Scerri, Eric R. 2011. *The Periodic Table. A Very Short History*. Oxford: Oxford University Press.
- Schettino, Vincenzo. 2017. "Isaac newton and alchemy." *Substantia* 1: 69-76.
- Schettino, Vincenzo. 2022. "Il sistema periodico come icona universale." *Atti Accademia dei Lincei* 1: 1-20.
- Schettino, Vincenzo. 2014. *Scienza e arte. Chimica, arti figurative e letteratura*. Firenze: Firenze University Press.
- Scholes, S. 1965. "On Avogadro's number." *J. Chem. Ed.* 42: 126.
- Scott, G. D., e J. P. MacDonald. 1965. "Young's estimate of the size of molecules." *Am. J. Phys.* 33: 163-64.
- Sen, Paul. 2021. *Il frigorifero di Einstein. Come la differenza tra caldo e freddo spiega l'universo*. Torino: Bollati Boringhieri.
- Shea, William R. 1970. "Galileo's atomic hypothesis." *Ambix* 17: 13-27.
- Shea, William R. 1974. *La rivoluzione intellettuale di Galilei*. Firenze: Olschki.
- Sorabji, Richard. 1987. *Philoponus and the Rejection of Aristotelian Science*. London: Duckworth.
- Stoney, G. Johnstone. 1894. "Of the electron or atom of electricity." *Phil Mag.* 38: 418-20.
- Strathern, Paul. 2000. *Mendeleev's Dream. The Quest for the Elements*. New York: St. Martin's Press.
- Thomas, John. 2006. *Michael Faraday. La storia romantica di un genio*. Firenze: Firenze University Press.
- Turner, H. 1960. *The Correspondence of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Vallance, J. 1995. *The Lost Theory of Asclepiades of Bithinia*. Oxford: Clarendon Press.
- Volpe, Enrico. 2017. "Melisso e il problema del vuoto: apologia e/o fraintendimento del monismo parmenideo?" *Peitho/Examina Antiqua*, 91-906.
- White, Michael. 1997. *Isaac Newton. The Last Sorcerer*. Reading: Perseus Books.
- Zonta, Mauro. 2014. *La filosofia ebraica medievale*. Roma-Bari, Laterza.

## INDICE DEI NOMI

- Abdera , 83-84, 117  
Achille , 11, 30, 74-75  
Adelardo, 127  
Aezio, 34, 41, 66-67, 70, 83, 86, 88  
Agostino, 125, 145  
Agricola, 154  
Al Ashari, 131  
Albio, 94  
Alceo, 120  
Alchimia, 23, 145, 151, 155-163, 165  
Alcmeone, 72  
Alessandro di Afrodizia, 91  
Al Razi, 132  
Amafinio, 119  
Amasis, 35  
Amicla, 110  
Anassagora, 30, 46-49, 51, 76, 109, 179  
Anassimandro, 29, 36-42, 45, 53, 59, 78, 125  
Anassimene, 29, 42-43, 46  
Anatolia, 21  
Apollo, 53, 90, 139  
Apuleio, 121  
Archimede, 148  
Aristosseno, 110  
Aristotele, 22-23, 32-35, 39-40, 44, 46-47, 49, 51, 53, 56, 74, 76, 80, 85-88, 90-91, 108, 114-119, 122-123, 131-132, 134, 140, 144-145, 147, 158, 185, 196, 208  
Arrhenius, 227  
Arverius, 24  
Asclepiade, 22, 121-122  
Assurbanipal, 31  
Atene, 39, 46, 74, 83, 90, 107, 121  
Averroè, 132, 145  
Avicenna, 132, 140  
Avogadro, 192, 200-202, 204-207  
Bacon, 179  
Balmer, 226, 244  
Bank, 199  
Basson, 158  
Becker, 240  
Becquerel, 230, 232, 236, 238  
Beda, 126-127  
Beekman, 158-159  
Beguìn, 157  
Bergman, 175  
Bernoulli, 190  
Berthollet, 186, 189, 194  
Berzelius, 192, 194-195, 198-199, 202, 204  
Biringuccio, 153  
Black, 176, 181, 183  
Boerhaave, 172  
Bohr, 14, 207, 243-247, 250-251  
Boltzmann, 219-221  
Borges, 156  
Born, 250, 252-253  
Boscovich, 164  
Boyle, 22, 144, 163, 165-170, 176, 190  
Bracciolini, 133-134  
Bradwardine, 140  
Bragg, 249  
Brecht, 138  
Brewster, 162-163  
Brown, 101

- Bruno, 146-147  
 Brunswick, 153  
 Buridan, 141  
 Callimaco, 54  
 Campanella, 148  
 Cannizzaro, 203-204  
 Caraiti, 129  
 Carneade, 120  
 Caro, 96, 104-105  
 Cartesio, 23  
 Catone, 120  
 Catullo, 96, 121  
 Cavaliere, 187  
 Cavendish, 177, 185, 218, 229  
 Censorino, 41  
 Chancourtois, 209  
 Chardenon, 171, 179  
 Charleton, 207  
 Chersoneso, 46  
 Cicerone, 68, 76-77, 90, 95-96, 119-120  
 Cilento, 71  
 Cilone, 55  
 Cina, 58  
 Clazomene, 46-47  
 Clinia, 110  
 Cornelio N., 96, 121, 155  
 Cratilo, 44-45  
 Creta, 35  
 Crisippo, 120  
 Cristina M., 137  
 Crookes, 228-229  
 Crotone, 53, 55  
 Ctesibio, 122  
 Cudworth, 23-24, 51, 70  
 Curie M., 13, 230-231, 233-236  
 Curie P., 13, 231-236  
 Dalton, 188, 190-194, 196, 198, 200-202  
 Dante, 69, 76, 87, 94-95, 114, 127, 212  
 Davisson, 249  
 Davy, 192, 199-200  
 Debieerne, 236  
 De Broglie, 248-250  
 Della Porta, 153  
 Democrito, 22-24, 27, 30, 44, 48, 76, 83-92, 100, 107-110, 113-114, 116-119, 122, 125, 134, 146, 148, 158, 179, 259-260  
 Diodoro, 22, 37  
 Diogene, 21-22, 34-35, 37, 42, 44, 46-47, 53, 56, 58, 74, 77-78, 83-84, 87, 89-90, 95, 104-105, 110, 120, 134, 147  
 Dionisio, 105, 126  
 Dirac, 248  
 Djerassi, 188  
 Dobereiner, 209  
 Dulong, 195  
 Ecateo, 37  
 Ecfanto, 67, 70  
 Efeso, 37, 43, 46  
 Egeo, 21  
 Egitto, 22, 32, 35-36, 53, 58, 83  
 Egospotami, 46  
 Ehrenfest, 241  
 Einstein, 13-14, 101, 207, 242-243, 249, 251, 256-257  
 Elea, 11, 71-72, 74, 83  
 Empedocle, 22, 24, 37, 72, 76-81, 83, 97, 110-111, 115, 145, 179  
 Epicuro, 22-24, 83-84, 90-95, 98-99, 101, 104-105, 109, 119, 124-125, 130, 134, 145-147  
 Eraclide, 67  
 Eraclito, 22, 30, 43-45, 76  
 Ercker, 153  
 Ercolano, 95  
 Erodoto, 95  
 Erone, 122, 134, 168, 175  
 Esiodo, 33, 71  
 Euclide, 57, 123  
 Euripide, 44  
 Fabri de P., 148  
 Faraday, 206, 227  
 Fenicia, 22, 24  
 Fermi, 248, 255  
 Fidia, 64  
 Filisco, 120  
 Filodemo, 95  
 Filolao, 56, 59, 66-67  
 Filopono, 86, 123-124, 140-141  
 Foscolo, 138  
 Fourcroy, 186  
 Fracastoro, 146  
 Francoforte, 146  
 Franklin, 177

- Fraunhofer, 225-226  
 Fresnel, 224  
 Frusa, 121  
 Gaio Ippolito Isidoro, 126-127  
 Galeno, 72, 154, 158  
 Galileo, 11-12, 52, 123, 135-140, 142-144, 148-150, 160, 174  
 Gallanzoni, 136  
 Galvani, 199  
 Gassendi, 23, 145, 147-148, 207  
 Gay, 194, 201-202  
 Geber, 151  
 Geiger, 238  
 Genesi, 23, 129  
 Geoffroy, 174  
 Geber, 151  
 Germania, 146, 153, 157, 170  
 Giamblico, 53, 55-56, 65  
 Gibbs, 219  
 Giobbe, 23  
 Giovacchino, 127  
 Giove, 116, 136  
 Giovenale, 85  
 Girolamo, 96, 146  
 Glauber, 157-158  
 Goeppert, 236  
 Goethe, 69, 175  
 Goldstein, 229  
 Gorgia, 72  
 Graham, 192  
 Grecia, 24, 27, 36, 39, 51-52, 55  
 Guglielmo di C., 127-128,  
 Guglielmo di O., 127, 141  
 Guyton, 171-172, 181, 186  
 Hales, 176  
 Heisenberg, 13-14, 113-114, 250-253  
 Henri, 177, 192, 218, 230, 236  
 Higgins B., 189  
 Higgins W., 189-190  
 Higgs, 259  
 Himalaya, 26  
 Hittorf, 228  
 Hoffmann, 188  
 Hooke, 167  
 Huygens, 224  
 Ibn-Rusd, 132  
 Ibn-Sina, 132  
 Illuminismo, 133  
 India, 58, 83  
 Inghilterra, 146, 170, 176, 178, 181, 185, 244  
 Ionia, 21, 30, 33, 43, 46, 51, 71  
 Ippocrate, 80, 84-85, 121, 154  
 Isaia, 23  
 Italia, 51, 119, 146, 155, 166  
 Jeans, 241  
 Joliot, 236, 240  
 Joliot Curie, 236  
 Joyce, 257  
 Kalam, 130  
 Kanada, 24-28  
 Kashyapa, 25  
 Kekulé, 202, 223  
 Kelvin, 200, 226  
 Keplero, 57, 63, 65, 69, 138  
 Keynes, 162  
 Kirchoff, 225  
 Kronig, 248  
 La Fontaine, 84  
 Laplace, 184-185  
 Lattanzio, 124-125  
 Lavoisier, 98, 103, 138, 173, 178-189, 193, 196-197, 200  
 Leeuwenhoek, 150-151  
 Leonzio, 90  
 Leopardi, 179, 221  
 Leucippo, 24, 30, 76, 83-86, 91, 107, 114, 117-118  
 Leuconoe, 94  
 Lewis, 243, 246-247  
 Libavius, 157  
 Liebig, 203  
 Lippenshey, 136  
 Liside, 55  
 Locke, 163  
 Lockyer, 226-227, 237  
 Lomonosov, 172, 179, 181  
 Loschmidt, 206-207, 221  
 Lucrezio, 48, 77, 88, 91, 96-105, 119-121, 126, 133-134, 146, 150, 196  
 Lussac, 194, 201-202  
 Macquer, 177  
 Magna Grecia, 51-52, 55  
 Magnenus, 207

- Mariotte, 168, 179, 190  
 Marte, 116, 136  
 Massinissa, 68  
 Maxwell, 48, 212, 220  
 Medioevo, 133  
 Melisso, 72, 75-76  
 Mendeleev, 208, 212-215, 217-218  
 Meneceo, 95  
 Menshutkin, 213  
 Mercurio, 116, 136  
 Mesopotamia, 32, 53, 58  
 Metaponto, 55  
 Metastasio, 68  
 Metrodoro, 22  
 Meusnier, 186  
 Meyer, 204  
 Mileto, 33, 35-37, 41-44, 46, 51, 59, 83  
 Milone, 55  
 Mitilene, 90  
 Mitridate, 155  
 Mitscherlich, 195  
 Mochus, 21-22, 24  
 More, 23  
 Mosè, 24  
 Mosè Maimonide, 129-130  
 Muni, 25  
 Nagaoka, 237-238  
 Nernst, 133  
 Nerone, 155  
 Newlands, 208, 210-211  
 Newton, 22-23, 51, 70, 103, 123, 138,  
 160-164, 166, 168, 173, 175, 179,  
 189, 224, 243, 246  
 Niccoli, 134  
 Nicholson, 199  
 Nicola di Cusa, 134, 146  
 Nifo, 145  
 Nilo, 32, 35  
 Nyaya, 25  
 Oldenburg, 166  
 Omero, 34, 71  
 Orazio, 85, 94-95, 120  
 Oresme, 141  
 Ostwald, 205, 220  
 Ovidio, 120  
 Pananti, 58  
 Paracelso, 154-159, 170-171, 185  
 Paramanu, 27  
 Parigi, 141, 145, 147, 157, 174, 180, 182,  
 194, 230-231, 233  
 Parmenide, 24, 30, 71-76, 85-86, 97  
 Partenone, 65  
 Pauli, 247-248, 252, 254, 257  
 Paulze, 178  
 Pavesi, 203-204  
 Pericle Piave, 155  
 Perrin, 206-208  
 Persico, 260  
 Petit, 195  
 Pisa, 139, 143  
 Pisone, 95  
 Pitagora, 22, 24, 29, 52-59, 63, 65-66,  
 68-70, 78  
 Planck, 13, 242-244  
 Platone, 23, 35, 39, 44, 51, 56, 70, 73-  
 74, 76, 80, 90, 108-114, 118-119,  
 123, 208  
 Plinio, 46, 121  
 Plutarco, 35, 43, 74, 89, 111  
 Policrate, 57  
 Pompeo Magno, 121  
 Porfirio, 53  
 Posidonio, 22, 24  
 Predieri, 68  
 Priestley, 177-178, 182, 185, 187-188  
 Proclo, 56  
 Protagora, 108-109  
 Proust, 188-189  
 Prout, 193-195, 227, 237  
 Pullman, 112  
 Rabano, 126-127  
 Ramsay, 218  
 Rayleigh, 218, 241  
 Rey, 179  
 Ricci, 155  
 Richter, 188  
 Rinascimento, 133, 135, 152  
 Röntgen, 230  
 Roma, 42, 119-121, 148  
 Rouelle, 170, 178  
 Rutherford D., 176, 183, 236  
 Rutherford E., 238-241, 244  
 Sala, 157  
 Salomone, 23

- Samo, 53, 57, 69, 75, 90, 94  
 Sarpi, 140  
 Saturno, 116, 136, 157, 237  
 Scheele, 178, 182, 187-188  
 Scholes, 205  
 Schrödinger, 250, 253  
 Scipione, 68  
 Scott, 139, 207  
 Sennert, 158  
 Senofane, 30, 71-72, 97  
 Shakespeare, 69, 205  
 Sibari, 55  
 Sicilia, 51, 77  
 Sidone, 22, 24  
 Simplicio, 39, 45, 47, 74, 91, 139  
 Sirone, 95  
 Sklodowska, 231  
 Socrate, 30, 44, 73, 76, 109  
 Sommerfeld, 243, 245-247, 250  
 Stahl, 138, 171-172, 183  
 Stefano, 19, 134  
 Stevino, 123  
 Stige, 34  
 Stoney, 228-229  
 Strabone, 22, 24, 51, 120  
 Stratone, 122, 179  
 Strobeo, 87  
 Svizzera, 133, 146  
 Talete, 29, 33-36, 38-39, 41-42, 56, 125  
 Tasso, 98  
 Teano, 53  
 Temisone, 122  
 Teofrasto, 34, 66, 88, 91, 122  
 Thierry, 127  
 Thompson, 104  
 Thomson, 229, 237-239, 244  
 Tommaso, 127, 148  
 Torricelli, 144, 147  
 Troia, 22, 24  
 Turchia, 121  
 Ulka, 25  
 Vaisheshika, 25-27  
 Valentinus, 157  
 Valéry, 74  
 Van Helmont, 159-160, 165  
 Van't Hoff, 222-223  
 Velazquez, 84  
 Virgilio, 95  
 Vitruvio, 121  
 Viviani, 139, 143  
 Volta, 198-199, 227  
 Von Guericke, 144, 167  
 Weltzien, 202  
 Wien, 229  
 Wilde, 126  
 Wölher, 222  
 Wolfers, 243  
 Wollaston, 225  
 Worltire, 177  
 Young, 207, 224  
 Watt, 185  
 Zenone, 11-12, 30, 74-76, 83, 85



SEMINE  
TITOLI PUBBLICATI

1. Fabrizio Mani, *La storia dell'energia nell'avventura umana. Il costo del progresso e l'illusione dell'energia pulita*, 2024
2. Salvatore Califano, Vincenzo Schettino, *L'atomo: una storia millenaria*, 2024



# Semine

L'idea dell'esistenza degli atomi inizia con la filosofia naturale nel modo più semplice: come risposta all'osservazione quotidiana della divisibilità degli oggetti materiali e alla domanda riguardo al limite estremo fino al quale questa divisibilità si possa realmente spingere. Ripercorrere la storia dell'idea di atomismo è un'avventura affascinante perché permette, lungo un arco temporale lunghissimo, di rivisitare gli ambienti culturali, filosofici, artistici, socioeconomici e scientifici in cui le varie idee riguardo agli atomi sono state discusse, contrastate e maturate. La storia dell'atomismo, che peraltro non è ancora terminata, offre anche un quadro del modo di progredire della scienza attraverso tentativi e acquisizioni sempre nuove e imprevedibili.

**Salvatore Califano** è stato professore emerito di Chimica fisica all'Università di Firenze e fondatore del Laboratorio Europeo di Spettroscopia non Lineare. È stato socio dell'Accademia dei Lincei. I suoi interessi hanno incluso la dinamica molecolare, le spettroscopie risolte nel tempo e la storia della scienza.

**Vincenzo Schettino** è professore emerito di Chimica fisica all'Università di Firenze e socio dell'Accademia dei Lincei. Nel 2005 ha ricevuto il premio del Presidente della Repubblica per la ricerca scientifica. Si è interessato di chimica fisica dei solidi, di chimica in condizioni estreme e di interazioni tra scienza e arte.

ISBN 979-12-215-0385-2 (Print)  
ISBN 979-12-215-0386-9 (PDF)  
ISBN 979-12-215-0387-6 (XML)  
DOI 10.36253/979-12-215-0386-9

[www.fupress.com](http://www.fupress.com)