

CENTRO STUDI MOLISANO – CE.SM

---

$$E = mc^2$$

L'ENERGIA RACCHIUSA NELLA MATERIA

---



*I quattro elementi*

Opera di Maria Elena Francalancia  
(Toro/Campobasso)

---

LUIZ ROBERTO EVANGELISTA  
Campobasso, 28 giugno 2016

---

# Indice

Prefazione	3
<b>1 L'Annus Mirabilis</b>	<b>7</b>
1.1 I <i>quanta</i> di luce . . . . .	8
1.2 L'atomo e il moto browniano . . . . .	12
1.3 La teoria della relatività speciale . . . . .	19
1.4 Inerzia e energia . . . . .	31
<b>2 Le Leggi di Conservazione della Massa e dell'Energia</b>	<b>37</b>
2.1 La Legge di Conservazione della Massa . . . . .	37
2.1.1 La teoria del flogisto . . . . .	39
2.1.2 La massa si conserva? . . . . .	42
2.2 La Scoperta della Conservazione dell'Energia . . . . .	43
2.2.1 Il teorema del lavoro – forza viva . . . . .	46
2.2.2 Mayer e la conservazione dell'energia . . . . .	50
2.2.3 L'opera di Joule . . . . .	56
2.2.4 Helmholtz e la conservazione della "Kraft". . . . .	63
2.2.5 Calore e lavoro . . . . .	68
<b>3 L'equivalenza Massa-Energia</b>	<b>71</b>
3.1 Massa inerziale . . . . .	71
3.2 La velocità della luce . . . . .	76
3.3 $E = mc^2$ : Il contenuto energetico dell'Universo . . . . .	81
3.3.1 La fissione nucleare . . . . .	85
3.3.2 La fusione nucleare . . . . .	90
3.4 L'equazione che ha cambiato il mondo? . . . . .	93
<b>Conclusioni</b>	<b>97</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>100</b>
<b>Indice Analitico</b>	<b>101</b>

---

Questo libro è dedicato alla memoria di  
Irma Trassi Evangelista (1929-2014).

---

...physis kryptsthoi philei.

*Eraclito, DK 22 B 123*

Qual è 'l geometra che tutto s'afflige  
per misurar lo cerchio, e non ritrova,  
pensando, quel principio ond'elli indige,  
tal ero io a quella vista nova...

*Dante, Par. 133-136.*

# Prefazione

Questo testo è dedicato a uno sguardo generale sulle opere pubblicate da Albert Einstein nel suo *annus mirabilis* di 1905, con un'attenzione concentrata un po' di più sul lavoro nel quale compare l'equazione  $E = mc^2$ . La famosa equazione dell'equivalenza massa-energia faceva parte del quinto lavoro scritto da Einstein in quell'anno (uno dei lavori sarebbe pubblicato nel 1906) e veniva presentata come  $L = mV^2$ , dove  $L$  stava per energia,  $m$  per la massa e  $V$  per la velocità della luce nel vuoto.

Il punto di partenza di queste riflessioni è stato per me l'invito del direttore del Centro Studi Molisano di Campobasso, Professore Giuseppe Reale, che mi ha proposto un intervento su Albert Einstein e "l'equazione che ha cambiato il mondo", da essere presentato come una conversazione con i soci del Centro e con tutti gli interessati. La tematica proposta si è ispirata nel titolo in italiano del libro di David Bodanis – uno scrittore di divulgazione scientifica nordamericano – che tratta di una "biografia" di questa famosissima formula della fisica, e che io non conoscevo<sup>1</sup>. Dopo aver letto il libro, mi è venuto il dubbio se avrei potuto dire qualcosa che non fosse stata già trattata nel competente libro di Bodanis.

Prendendo l'invito come una sfida, ho deciso di seguire una linea di presentazione che puntava di più su quell'anno straordinario, che vide la formulazione da parte di Albert Einstein di tre dei suoi più rilevanti lavori, tra i quali il più conosciuto è la teoria della relatività. E la scelta mi permette di continuare una discussione iniziata nella fine dell'anno precedente quando, sempre a Campobasso, ho parlato agli studenti del Liceo Classico Mario Pagano sui cent'anni

---

<sup>1</sup>D. Bodanis, *E = mc<sup>2</sup>: A Biography of the World's Most Famous Equation* (Walker Publishing Company, New York, 2000). In italiano: *E = mc<sup>2</sup>: Biografia dell'equazione che ha cambiato il mondo* (Oscar Mondadori, Milano, 2011).

della relatività generale. Ho pensato allora che, tornando a Campobasso, avrei l'opportunità di approfondire la tematica dedicata all'opera di Einstein, anche se mi rimaneva il dubbio circa quali parole potrei aggiungere su Einstein che non siano già scritte nell'ultimo secolo.

Non ho più riguardato il libro di Bodanis, dal quale ho preso soltanto l'ispirazione di discutere con un certo dettaglio, ma al modo mio, le idee che sono alla base dei termini che compaiono nell'equazione, cioè, l'energia, la massa e la velocità della luce. Per completare l'analisi dei concetti coinvolti nell'equazione, ho usato uno studio pubblicato di recente in portoghese sulla legge di conservazione della massa e sulla scoperta della legge di conservazione dell'energia, che sono parti di un'opera più generale dedicata alla storia della fisica<sup>2</sup>.

Il risultato finale è quello che ora presento ai lettori di queste pagine.

Inizialmente, i lavori dell'anno ammirevole di Einstein vengono discussi con un certo dettaglio tecnico, ma di modo riassunto e tenendo sempre presente un'udienza più generale, di formazione non scientifica; ne segue una breve incursione storica nelle leggi di conservazione della massa e dell'energia, che prepara il terreno per la presentazione dell'equazione che stabilisce l'equivalenza massa-energia, trattata nell'ultima parte del testo. In questa parte finale, un richiamo del concetto classico di massa inerziale e qualche idea sulla natura della luce e le misure della sua velocità precedono una discussione più dettagliata dedicata al "contenuto energetico dell'Universo", svelato dalla formula di Einstein.

L'equazione di Einstein permette di calcolare l'energia che può essere rilasciata nei processi chimici e nucleare, come la fissione e la fusione, e così anche l'energia rilasciata da una bomba – come da testimonia la catastrofe nucleare di Horishima e Nagasaki nell'agosto di 1945, che brucia ancora nella coscienza del mondo. Per questo è solito pensarla come l'equazione che ha cambiato il mondo.

Ma l'equazione ha cambiato anche il nostro modo di capire il significato più profondo delle parole energia e massa. L'equivalenza massa-energia da essa esplicitata ci permette di, o meglio ancora, ci autorizza ad affrontare i due

---

<sup>2</sup>L. R. Evangelista, *Perspectivas em História da Física – Vol. 2 – Da Física dos Gases à Mecânica Estatística* (Livraria da Física, São Paulo, 2014).

principi – quello della conservazione della massa e quello della conservazione dell'energia – come un singolo principio di conservazione, quello della massa-energia, poiché queste due quantità sono ormai convertibili l'una nell'altra, e il fattore di conversione è la velocità della luce nel vuoto.

Campobasso, 28 giugno 2016.

# Capitolo 1

## *L'Annus Mirabilis*

L'anno di 1905 viene chiamato di *annus mirabilis* di Albert Einstein (1879–1955). In un *tour de force* difficilmente pareggiabile nella storia della scienza, egli pubblicò diversi lavori scientifici che hanno cambiato radicalmente il panorama del pensiero in alcune aree della fisica, con notevoli conseguenze anche su altri settori della conoscenza umana.

Tutti i lavori furono pubblicati sul periodico tedesco *Annalen der Physik*, uno dei più antichi giornali specializzati nel campo della fisica, pubblicato sotto diverse nomi dal 1799 (*Annalen der Physik*, *Annalen der Physik und der physikalischen Chemie*, *Annalen der Physik und Chemie*, *Poggendorf's Annalen*, *Wiedemann's Annalen der Physik und Chemie*, etc.), e, in quel tempo, una rivista di riferimento nel campo scientifico. Comunque, questa stessa rivista ha subito un incremento notevole nel suo prestigio, proprio dopo l'anno di 1905, a causa di questi lavori di Einstein.

Una lettera di grande valore storico, che Einstein scrisse al suo amico Conrad Habicht (1876–1958) nella fine del mese di maggio, anticipa quali sarebbero i suoi contributi in gestazione in quel periodo<sup>1</sup>:

*Io ti prometto quattro articoli, il primo ... dedicato alla radiazione e alle proprietà energetica della luce ed è molto rivoluzionario; come vedi, ... Il secondo articolo è una determinazione della vera*

---

<sup>1</sup>C. Seelig, *Albert Einstein: A Documentary Biography* (Staples Press, London, 1956), translated by Mervyn Savill.



*dimensione degli atomi per conto della diffusione e della frizione interna di soluzioni liquide diluite di sostanza neutre. Il terzo prova che, in base alla teoria molecolare del calore, particelle di ordine di magnitudine di 1/1000 di millimetri sospese in liquidi devono realizzare un movimento disordinato osservabile, causato dal moto termico. Movimenti di corpi piccoli inanimati sospesi sono stati osservati dai fisiologici e sono chiamati da loro "moto browniano molecolare". Il quarto articolo è sotto stesura e è dedicato all'elettrodinamica dei corpi in movimento, applicando una modificazione della teoria dello spazio e del tempo; la parte puramente cinematica di questo articolo è certamente del tuo interesse.*

Il primo lavoro stabilisce la realtà dei quanta di luce (che noi adesso conosciamo come i fotoni); il secondo lavoro forma la base della tesi dottorale di Einstein; il terzo prova la realtà definitiva degli atomi; il quarto, alla fine, presenta la base della teoria della relatività, cambiando drasticamente i nostri concetti di spazio e tempo.

Di conseguenza, l'insieme di questi quattro lavori ha riformulato i principi della meccanica e dell'elettromagnetismo, ha ridefinito la natura della luce e esplorato la dinamica atomica e molecolare. I lavori sono alla base della teoria della relatività, della meccanica quantistica, della teoria quantistica dei campi e della meccanica statistica, che sono i fondamenti della fisica contemporanea.

Prima di esplorare qui le conseguenze del suo quinto articolo del 1905 – un piccolo lavoro che sembra un addendo al primo dedicato alla relatività – nel quale compare l'equazione  $E = mc^2$  (non scritta in questa forma), guarderemo più da vicino, anche se in maniera riassunta, il contenuto e il senso generale di ognuno di questi lavori fondamentali per la storia della scienza.

## 1.1 I quanta di luce

Il primo di questi articoli – il cosiddetto articolo di marzo – si intitola *Su un punto de vista euristico relativo alla produzione e trasformazione*

della luce<sup>2</sup> e propone che la luce sia formata da particelle molto piccole che sono i *quanta*. È luogo comune identificare il lavoro come quello dell'effetto fotoelettrico, avendosi l'impressione che il suo scopo principale fosse spiegare, appunto, l'effetto. Invece, il lavoro è dedicato al problema della radiazione di corpo nero. Soltanto alla fine dell'articolo, dopo aver discusso la radiazione di corpo nero, essa viene usata come possibile spiegazione di tre esperimenti, uno dei quali è l'effetto fotoelettrico. Ma l'articolo è anche una sintesi di alcune teorie e idee correnti in quel momento, tale l'elettromagnetismo e il concetto di etere, e usa dei nuovi concetti provenienti dalla termodinamica e dalla meccanica statistica.

Secondo Einstein, l'energia (della luce) non è distribuita continuamente negli spazi, ma consiste di un certo numero finito di quanta di energia, che sono localizzati nei punti dello spazio, che si muovono e non si dividono, e che possono essere assorbiti o generati per intero: il processo di assorbimento o emissione accade con un numero intero di quanta per volta.

L'analisi della radiazione di corpo nero conduce Einstein a considerare come naturale che la radiazione sia composta da un certo numero di quanta di energia  $E = h\nu$ , dove  $h$  è la costante di Planck e  $\nu$  la frequenza della radiazione. La radiazione di corpo nero non ha una singola componente di frequenza (un singolo colore) ma, invece, è una mistura di differenti frequenze o lunghezze d'onda. Così, ad una certa temperatura, può esserci più energia radiata in un certo gruppo di lunghezze d'onde che nell'altro.

L'effetto fotoelettrico fu scoperto originalmente da Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894), nel 1887, quando la sua attenzione si è rivolta ad un effetto periferico che osservò mentre investigava la natura delle onde elettromagnetiche; allora, scoprì che la luce può produrre delle scintille elettriche. Illuminando la superficie di un metallo con la luce di un arco voltaico – usato nei suoi esperimenti con le onde elettromagnetiche –, Hertz osservò delle scintille.

William Hallwachs (1859–1922), a Dresda, nel 1887, dimostrò che l'irraggiamento con la luce ultravioletta fa sì che i corpi non carichi acquistino una carica positiva. Nel 1889, fu suggerito che la luce ultravioletta poteva far sor-

---

<sup>2</sup>A. Einstein, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, *Annalen der Physik* **17**, 132-148 (1905).

gere dei granuli metallici dai metalli illuminati. Diversi autori, fra i quali il bolognese Augusto Righi (1850–1920), hanno chiarito che il fenomeno aveva a che fare con l'emissione di corpuscoli carichi negativamente<sup>3</sup>. Dieci anni dopo, Joseph John Thomson (1856–1940) affermò che l'effetto fotoelettrico indotto dalla luce ultravioletta consisteva nell'emissione di elettroni: sono i cosiddetti *raggi catodici*. Nel 1902, Phillip Lennard (1862-1947) scoprì che l'energia dell'elettrone che veniva emesso dalla superficie del metallo non dipendeva dalla intensità della radiazione incidente.

Così, quando Einstein affrontò il problema nel 1905, si conoscevano diverse cose sull'effetto fotoelettrico. Alcune di esse sono:

1. quando la luce incide sul metallo, elettroni sono emessi qualche volta sì, qualche volta non;
2. luce intensa (brillante) incidendo sul metallo fa espellere più elettroni che la luce meno brillante;
3. l'intensità della luce non affetta l'energia degli elettroni che sono emessi;
4. per un dato metallo illuminato da una particolare luce, l'energia cinetica degli elettroni non è mai maggiore di un certo valore massimo.

Il fatto che l'energia degli elettroni dipenda dalla frequenza della luce e non dall'intensità è uno dei più strani per la teoria ondulatoria classica. Ci si aspettava in effetti che quanto più intensa fosse la luce incidente, più energetici fossero gli elettroni emessi dal metallo. Invece, l'intensità della luce affetta soltanto il numero degli elettroni emessi, ma non la loro energia.

La soluzione proposta da Einstein fu tale che l'energia massima degli elettroni che lasciano il metallo è data dalla semplice equazione:

$$E_{\max} = h\nu - P,$$

dove  $P$  viene chiamata *funzione di lavoro* del metallo. Il *quantum* di luce, di energia  $h\nu$ , assorbito dall'elettrone nel metallo viene diminuito del lavoro  $P$ , quantità necessaria per farlo scappare dalla superficie del metallo. La differenza

---

<sup>3</sup>S. Bergia, *Einstein - Quanti e relatività, una svolta nella fisica teorica* (Le Scienze, Roma, 2013), p. 50.

nell'energia è quella trovata nella forma di energia cinetica. L'energia cinetica degli elettroni cresce linearmente con la frequenza della radiazione incidente, fatto che non dipende dalla sostanza utilizzata.

In questo lavoro, Einstein enfatizzò l'entropia della radiazione di corpo nero, e con i suoi ragionamenti ha mostrato l'indipendenza dei quanta di radiazione<sup>4</sup>. Si considera molto giustamente che il lavoro abbia contribuito in maniera decisa anche allo sviluppo della branca della fisica chiamata di meccanica statistica.

La reazione della comunità scientifica non fu la migliore. Fra gli oppositori di questa idea del *quantum* di luce si nominano Max von Laue (1879-1960), Premio Nobel per la fisica del 1914, per la scoperta della diffrazione dei raggi X, che sosteneva che la radiazione doveva essere di natura continua, e lo stesso Max Planck (1858-1947), il cui lavoro sulla la radiazione di corpo nero è stato il punto di partenza del lavoro di Einstein (e che era anche l'editore degli *Annalen der Physik* quando il lavoro di Einstein fu sottomesso), fra altri.

Nel 1907, Planck scrisse a Einstein manifestando le sue riserve sui quanta<sup>5</sup>:

*Non cerco il significato del quantum di azione (quanto di luce) nel vuoto, ma bensì nei luoghi dove l'assorbimento e l'emissione accadono, e assumo che quello che accade nel vuoto sia rigorosamente descritto dalle equazioni di Maxwell.*

Più tarde, nel 1913, quando Planck ha nominato Einstein all'Accademia Prussiana delle Scienze, scrisse anche a riguardo del *quantum* di luce<sup>6</sup>:

*Insomma, si può dire che difficilmente ci sarà uno tra i grandi problemi nei quali la fisica moderna è così ricca per i quali Einstein non abbia dato un contributo notevole. Il fatto di, qualche volta, aver sbagliato il bersaglio nelle sue speculazioni, come, ad esempio, nella sua ipotesi dei quanta di luce, non può essere usato troppo contro di lui poiché non è possibile introdurre idee realmente nuove, anche nelle scienze esatte, senza correre dei rischi alcune volte.*

<sup>4</sup>R. E. Kennedy, *A Student's Guide to Einstein's Major Papers* (Oxford University Press, Oxford, 2012), p. 33.

<sup>5</sup>Lettera di Max Planck a Einstein, del 06 luglio 1907, cf. R. E. Kennedy, *op. cit.*, p. 48.

<sup>6</sup>G. Kirsten and H. Körber, *Physiker über Physiker* (Akademie Verlag, Berlin, 1975), citato da A. Pais, *Subtle is the Lord* (Oxford University Press, Oxford, 1982).

Queste opposizioni dureranno ancora fino a che nel 1923 il lavoro di Arthur Holly Compton (1892 – 1962), sull'effetto che è conosciuto dal suo nome, ha portato chiare evidenze sulla realtà dei quanta di radiazione. Nel 1926, Gilbert Newton Lewis (1875 – 1946) ha introdotto il termine “fotone” per il *quantum* di luce e così esso viene denominato da allora.

Nel 1922, Einstein ricevette il premio Nobel per la fisica del 1921 “... per i contributi alla fisica teorica, in particolare per la scoperta della legge dell'effetto fotoelettrico”.

Durante la consegna del Premio, nel dicembre 1922, il chimico Svante Arrhenius (1859–1957), Premio Nobel per la Chimica nel 1903, che era il presidente del Comitato Nobel per la Fisica dell'Accademia Reale Svedese per le Scienze, ha così riassunto questo contributo di Einstein<sup>7</sup>:

*La legge di Einstein dell'effetto fotoelettrico è stata testata con estremo rigore dall'americano Millikan e i suoi discepoli e ha superato brillantemente il teste. Grazie agli studi di Einstein, la teoria quantistica è stata perfezionata fino a un alto grado, e una letteratura estensiva è cresciuta in questo campo dove il valore straordinario di questa teoria fu provato. La legge di Einstein è diventata la base quantitativa della fotochimica così come la legge di Faraday è la base dell'elettrochimica.*

Il lavoro di Einstein fu ricevuto dalla rivista il 18 marzo e uscì il 09 giugno.

## 1.2 L'atomo e il moto browniano

Il 30 aprile, Einstein sottomette la sua tesi di dottorato all'Università di Zurigo, con il titolo “Una nuova determinazione delle dimensioni molecolari”. Pochi giorni dopo, nell'11 maggio, invia agli *Annalen der Physik* il suo lavoro sul moto browniano, il cui titolo era “Sul movimento di piccole particelle sospese

---

<sup>7</sup>Nobel Lectures, *Physics 1901-1921* (Elsevier, Amsterdam, 1967).

in un liquido stazionario secondo la teoria cinetica molecolare del calore”. Il lavoro verrà pubblicato il 18 luglio<sup>8</sup>.

Uno dei primi scienziati a osservare e a scrivere sul moto caotico delle particelle in sospensione fu il botanico inglese Robert Brown (1773–1858), mentre studiava una sospensione acquosa del pollen dell'erba *Clarkia pulchella*. In sospensione c'erano particelle microscopiche in un moto continuo, casuale, nella forma di un moto in zig-zag. Il lavoro di Brown fu preceduto dalle osservazioni fatte da John T. Needham (1713–1781) e Wilhelm Friedrich von Gleichen (1717–1783), ma fu proprio lui il primo a sviluppare un'investigazione più dettagliata del fenomeno, provando che esso è una caratteristica di tutte le particelle microscopiche, e che non è dovuto al fatto che le particelle siano eventualmente vive, come ha pensato inizialmente.

La prima osservazione documentata di questo fenomeno è però molto più antica, e fu riportata dal poeta romano Tito Lucrezio Caro (94 a.C. – 50 a. C.), in un bellissimo brano del suo magnifico poema *De rerum natura*. Nel Libro II, Lucrezio anticipa una descrizione quasi moderna di questo movimento caotico che sarebbe studiato sperimentalmente circa venti secoli dopo, e che è denominato appunto di “moto browniano”. Il brano è un po' lungo ma molto eloquente<sup>9</sup>:

*Osserva ogni volta che un raggio di sole s'introduce spandendo il suo fascio di luce nell'oscurità delle nostre dimore: vedrai una moltitudine di corpi minuti mescolarsi in mille maniere nel fascio dei raggi di luce e, come impegnati in una lotta interna, darsi a combattimenti, battaglie, guerreggiare in squadroni, senza prendere tregua, agitati da incontri e da separazioni innumerevoli: ti potrai subito figurare che cos'è l'eterna agitazione dei corpi primi nel vuoto immenso; pure, un piccolo fatto può fornirci un modello dei più grandi e metterci sulla traccia della loro comprensione. Un'altra*

---

<sup>8</sup>A. Einstein, *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*, Annalen der Physik 17, 549 (1905).

<sup>9</sup>Titus Lucretius Carus, *De rerum natura, Liber II, 125-140*. Testo latino disponibile in <http://www.thelatinlibrary.com/lucretius.html>. La traduzione italiana utilizzata qui è disponibile in <http://www.atuttascuola.it/scuola/latino/b.htm>.

*ragione per osservare con più attenzione questi corpi che vedi agitarsi in disordine nei raggi del sole è che tali agitazioni ci rivelano i movimenti segreti, invisibili, dissimulati al fondo della materia. Spesso vedrai molti di questi granellini di polvere, sotto l'impulso di urti invisibili, cambiare strada e respinti invertire la marcia, qui, là, dappertutto, in ogni direzione. Questa marcia errabonda proviene tutta dagli atomi. I principi sono i primi a muoversi, poi i più piccoli dei corpi composti, ma per la loro forza i più prossimi agli atomi, sotto gli urti invisibili di questi, si muovono mettendosi in marcia; a loro volta ne spostano d'un poco più grandi. Dagli atomi il movimento si eleva giungendo a poco a poco fino a nostri sensi, e finisce per raggiungere quelle particelle che percepiamo nei raggi del sole: ma anche allora gli urti che lo producono restano per noi invisibili.*

È chiaro che in questa “fisica” degli atomisti, il fuoco è l'esistenza degli atomi, di una struttura granulare della materia. L'Universo, la totalità di tutto quello che esiste, secondo questo punto di vista, è un insieme infinito di materia discontinua, eterna e imperitura nello spazio vuoto.

Nella fine dell'ottocento, nonostante la teoria atomica dei greci fosse diventata quantitativa dopo il lavoro di John Dalton (1766 – 1844), la realtà materiale degli atomi era ancora molto discussa, come testimonia il dibattito fra la concezione “atomistica”, difesa in maniera contundente da Ludwig Boltzmann (1844 – 1906), da una parte, e la concezione degli “energetici” dall'altra, difesa dal chimico William Ostwald (1853 – 1932) e dal fisico Ernst Mach (1838–1916). Gli ultimi combattevano l'uso dei modelli atomici in fisica, sostenendo che il proposito fondamentale della scienza era la cosiddetta “economia di pensiero” nella descrizione dei fenomeni fisici, e non il tentativo di spiegarli in termini di atomi e etere<sup>10</sup>.

È proprio dopo l'effervescenza di questo dibattito che sorgono le prime teorie quantitative sul moto browniano. La prima fu sviluppata indipendentemente da Einstein, nel 1905, come vedremo rapidamente adesso, inseguita da

<sup>10</sup>S. G. Brush, in L. Boltzmann, *Lectures on Gas Theory*, (Dover Publishing Company, New York, 1995), p. 13.



quella dal polacco Marian von Smoluchowski (1872-1917) e di un altro tipo di proposta, presentata dal francese Paul Langevin (1872-1946), entrambi nel 1906.

Nei pochi anni del secolo XX che precedono il suo *annus mirabilis*, Einstein si occupò di meccanica statistica, inseguendo i lavori di Maxwell e Boltzmann. C'è una serie di tre lavori dedicati alla meccanica statistica che Einstein scrisse fra gli anni di 1902 e 1904, nei quali presenta un cambiamento di prospettive sul lavoro di Boltzmann.

Questi lavori trattano dello studio dei fondamenti della meccanica statistica e il primo è *Kinetische Theorie des Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik* (Teoria cinetica dell'equilibrio termico e la seconda legge della termodinamica)<sup>11</sup> nel quale tratta delle definizioni di temperatura e entropia in condizioni di equilibrio termico e del teorema dell'equipartizione. Il secondo lavoro ha per titolo *Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik* (Una teoria dei fondamenti della termodinamica)<sup>12</sup> nel quale si occupa dei problemi di irreversibilità. Il terzo lavoro è *Zu allgemeinen moleculares Theorie der Wärme* (Per una teoria molecolare generale del calore)<sup>13</sup> nel quale tratta delle fluttuazioni e dei nuovi processi per determinare la costante di Boltzmann.

Einstein desiderava usare la meccanica statistica per provare la struttura molecolare della materia. Per questo ha centrato sua attenzione nelle fluttuazioni attorno all'equilibrio (trascurate da Boltzmann e ignorate da Planck). Lui ha anche ripreso la primitiva interpretazione di Boltzmann della probabilità in termini di tempo di permanenza del sistema in quelli stati, collegandola adesso alla frequenza temporale delle fluttuazioni. La costante  $k$  (che fu chiamata durante un certo tempo di costante di Planck ma, dopo, fu giustamente chiamata di costante di Boltzmann, come la conosciamo tuttora) gioca un ruolo fondamentale e la sua determinazione sarà uno degli obiettivi di Einstein.

Con queste preoccupazioni, lui proporrà un'interpretazione nuova e rivoluzionaria del moto browniano, nel 1905, e mostrerà che queste fluttuazioni

<sup>11</sup>A. Einstein, *Annalen der Physik* **9**, 417 (1902).

<sup>12</sup>A. Einstein, *Annalen der Physik* **11**, 170 (1903).

<sup>13</sup>A. Einstein, *Annalen der Physik* **14**, 354 (1904).



possono essere osservate nei sistemi mesoscopici<sup>14</sup>. La sequenza degli avvenimenti collegati a questa interpretazione conduce alla possibilità di misurare il coefficiente di diffusione,  $D$ , e, di conseguenza, di determinare sperimentalmente la costante di Boltzmann,  $k$ . Siccome  $k = R/N$ , questa determinazione equivale a trovare il numero di Avogadro,  $N$ , giacché  $R$  è la costante universale dei gas, una vecchia conosciuta dalla teoria dei gas.

Anche questo lavoro sul moto browniano è stato menzionato da Einstein nella sua lettera all'amico Habicht, quando parla di quelle particelle "sospese in liquidi" che "devono realizzare un movimento disordinato osservabile, causato dal moto termico". La proposta generale del lavoro è delineata subito nella concisa introduzione, riprodotta qui nella traduzione italiana di S. Bergia<sup>15</sup>:

*In questo lavoro si mostrerà che, secondo la teoria cinetico-molecolare del calore, corpi di dimensione microscopicamente visibile in sospensione in liquidi devono compiere, in conseguenza dell'agitazione termica molecolare, moti di ampiezza tale da poter essere facilmente osservabili al microscopio. È possibile che i moti in discussione siano identici al cosiddetto "moto molecolare browniano"; tuttavia, le informazioni a mia disposizione concernenti quest'ultimo sono così carenti in precisione che non ho potuto formarmi un'opinione in materia. Se il moto discusso qui può essere di fatto osservato (insieme con le regolarità che per esso che ci si aspetterebbe di trovare), allora la termodinamica classica non si può più riguardare come esattamente valida già per spazi di dimensioni risolubili al microscopio ed è allora possibile una determinazione esatta delle dimensioni atomiche effettive.*

Nel lavoro si perseguono due finalità, due obiettivi strettamente connessi, cioè la rivelazione effettiva di fluttuazioni statistiche e la ricerca di fatti che rendessero il più possibile certa l'esistenza di atomi di definite dimensioni finite<sup>16</sup>.

<sup>14</sup>Cf. O. Darrigol and J. Renn, *The Emergence of Statistical Mechanics*, in *The Oxford Handbook of The History of Physics*, eds. J. Z. Buchwald and R. Fox, (Oxford University Press, Oxford, 2014), p. 785.

<sup>15</sup>S. Bergia, *op. cit.*, p. 54.

<sup>16</sup>*Ibidem*, p. 55.

Un primo risultato impressionante riportato nel lavoro si riferisce al calcolo del coefficiente di diffusione,  $D$ , della sostanza sospesa, nella forma:

$$D = \frac{RT}{N} \frac{1}{6\pi\eta P}, \quad (1.1)$$

nella quale  $P$  è il raggio della particella sferica,  $\eta$  è il coefficiente di viscosità del liquido che la circonda,  $R$  la già menzionata costante dei gas,  $T$  la temperatura assoluta e  $N$  rappresenta, secondo lo stesso Einstein, “il numero reale di molecole contenute in una molecola-grama”, cioè, il numero di Avogadro.

In un'altra sezione dell'articolo, Einstein considera la relazione fra il moto irregolare delle particelle e il processo di diffusione. Da questa relazione, Einstein ricavò un'espressione dello spostamento quadratico medio, in una data direzione, di una singola particella sospesa durante un certo tempo  $t$ , nella forma:

$$\langle x^2 \rangle = \frac{RT}{N} \frac{1}{3\pi k P} t, \quad (1.2)$$

che è un'espressione che può essere usata per determinare il numero di Avogadro, perché, una volta risolta per  $N$ , acquista la forma

$$N = \frac{RT}{\langle x^2 \rangle} \frac{1}{3\pi k P} t. \quad (1.3)$$

I valori delle quantità  $\langle x^2 \rangle$ ,  $t$ ,  $P$ , e  $k$  possono essere determinati dalle misure e, allora, l'espressione fornisce il valore sperimentale di  $N$ .

Il fisico francese, Jean Baptiste Perrin (1870–1942), Premio Nobel per la fisica nel 1926, “per il suo lavoro sulla struttura discontinua della materia, e specialmente per la sua scoperta dell'equilibrio della sedimentazione”, ha riconosciuto il ruolo cruciale giocato dal moto browniano nella determinazione della struttura atomica della materia<sup>17</sup>:

*È dovuto a Einstein e a Smoluchowski che abbiamo una teoria cinetica per il moto browniano che può essere verificata.*

---

<sup>17</sup>J. B. Perrin, *Discontinuous Structure of Matter*, Nobel Lectures, Physics 1922–1941 (Elsevier, Amsterdam, 1965).

Il lavoro di Perrin fu infatti un marchio nello stabilimento della esistenza di atomi e molecole dal punto di vista sperimentale<sup>18</sup>:

*In poche parole, se molecole e atomi esistono, i loro pesi relativi sono noti a noi, e i loro pesi assoluti possono essere noti nello stesso tempo che il numero di Avogadro.*

In una serie di esperimenti, Perrin riuscì a misurare il numero di Avogadro in accordo con le predizioni di Einstein e, secondo lui, una “cruda stima” dei suoi risultati fornisce  $N \simeq 64 \times 10^{22}$  molecole/mole. Il numero usato nei nostri giorni è  $N = 6.022 \times 10^{23}$ /mole – un numero colossalmente grande!

Per averne un'idea, immaginiamo di dissolvere un bicchiere d'acqua di 0.5 l nell'oceano e, per un mezzo impensabile, di riuscire a mescolare molto bene l'acqua del bicchiere a quella dell'oceano (o, alternativamente, immaginiamo di aspettare un tempo sufficientemente lungo perché la mistura avvenga). Dopodiché, possiamo viaggiare all'altro lato della Terra e prelevare un nuovo bicchiere d'acqua dall'oceano. Quante molecole del bicchiere originale si troveranno nel nuovo bicchiere?

Una stima ragionevole indica che questo numero sarà di circa diecimila molecole!

Questa non fu la prima determinazione sperimentale del numero di Avogadro (e non sarebbe, evidentemente, l'ultima). Nel 1865, Joseph Loschmidt (1821–1895), grande amico di Boltzmann, fu il primo a stimare le dimensioni delle molecole dell'aria<sup>19</sup>.

Einstein conclude l'articolo dicendo: “Speriamo che un ricercatore riesca a risolvere brevemente il problema trattato qui, che è di grande importanza per la teoria del calore”. Di fatto, anche la forma di affrontare questo problema rappresenta una svolta nella fisica teorica del ventesimo secolo, con una profonda conseguenza sulla fisica statistica sperimentale.

Nel 27 luglio, la sua tesi di dottorato fu approvata all'unanimità dall'Università di Zurigo (Facoltà di Filosofia II) – il grado di dottore li fu formalmente

---

<sup>18</sup>*Ibidem.*

<sup>19</sup>J. Loschmidt, *Zur Grösse der Luftmoleküle (sulle dimensioni delle molecole dell'aria)*, Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften Wien **52**, 395-413 (1865). Si veda anche la traduzione all'inglese nel *Journal of Chemical Education* **72**, 870-875 (1995).

concesso il 15 gennaio del 1906. Ad agosto, invia agli *Annaler der Physik* il lavoro della sua tesi di dottorato sulle dimensioni molecolare<sup>20</sup>; il lavoro fu ricevuto il 19 agosto, ma verrà pubblicato soltanto l'8 febbraio del 1906. Questo è uno dei lavori più citati di Einstein.

Nel frattempo, però, lui lavorava sulla teoria della relatività speciale. La svolta, adesso, la troveremo nei concetti di spazio e tempo!

### 1.3 La teoria della relatività speciale

Verso la metà del mese di maggio, Einstein concepì la teoria della relatività speciale (più tarde dirà che ha sottomesso il lavoro cinque o sei settimane dopo che l'idea gli era venuta). Il lavoro è stato inviato agli *Annalen der Physik* con il titolo "Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento"<sup>21</sup>. Ricevuto il 30 giugno, il lavoro verrà pubblicato il 26 settembre.

Questo lavoro è quello che ha lanciato la base della teoria della relatività dello spazio e del tempo. Einstein ha descritto la teoria come destinata a risolvere un problema specifico, rappresentato dall'apparente conflitto tra il principio di relatività e la teoria trasformazioni di Galileo-Lorentz. Il conflitto appare quando si confronta il principio di relatività classico, che sostiene l'equivalenza fisica di tutti i sistemi inerziali di riferimento, e l'elettrodinamica, che implicava l'esistenza di un referenziale inerziale privilegiato, quello collegato all'etere.

Il principio di relatività classico, o il principio di relatività galileiana, stabilisce che il moto di un sistema di corpi che si muovono in relazione tra loro non muta se l'intero sistema venga sottoposto a un movimento comune. I fenomeni di movimento che si svolgono in una stanza non subiscono alcun mutamento se alla stanza viene conferito un moto rettilineo uniforme, ma muteranno certamente se questo moto è accelerato o curvilineo, o se la stanza viene fatta ruotare intorno al proprio asse<sup>22</sup>. Il principio di relatività ha a che fare con il

---

<sup>20</sup>A. Einstein, *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionem*, *Annalen der Physik* **19**, 289 (1906).

<sup>21</sup>A. Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, *Annalen der Physik* **17**, 891 (1905).

<sup>22</sup>E. Dijksterhuis, *Il meccanicismo e l'immagine del mondo* (Feltrinelli, Milano, 1980), trad. italiana di Adriano Carrugo, pp. 474-475.

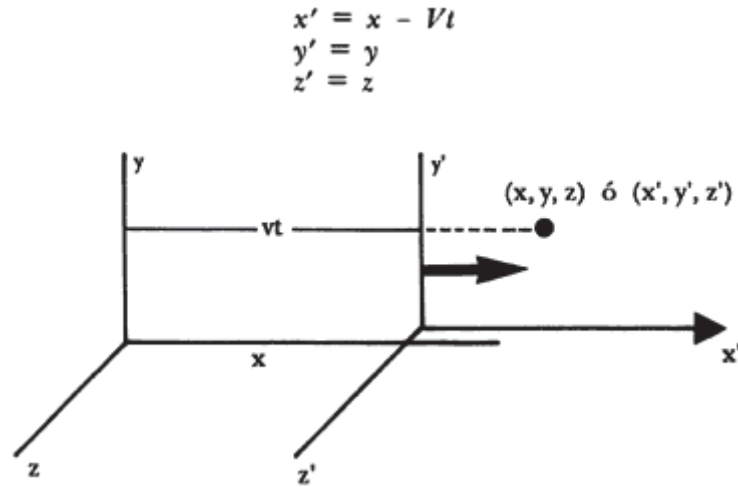


Figura 1.1: Sistemi di riferimento inerziali in coordinate cartesiane:  $(x, y, z)$  sono le coordinate in  $S$  e  $(x', y', z')$  sono le coordinate in  $S'$ . Il sistema  $S'$  si muove lungo la direzione  $x$  con velocità  $v$  relativamente al sistema  $S$ .

moto rettilineo uniforme.

Nello sviluppo ulteriore della meccanica classica, la “prima legge” o il primo principio di Newton definirà i sistemi di riferimento inerziali. Il principio stabilisce che, in assenza di forze esterne, un corpo permane nel suo stato di quiete o di moto a velocità costante, sempre se osservato da un sistema di riferimento inerziale.

Le leggi di Newton del moto sono valide in un sistema di riferimento inerziale oppure si può dire che un sistema di riferimento inerziale è quello in cui valgono le leggi di Newton. Si può dire anche, in termini abbastanza generali, che le leggi della meccanica sono le stesse nei sistemi di riferimento inerziali. Qualunque sistema di riferimento che si muova con velocità costante relativamente ad un sistema di riferimento inerziale è pure un sistema inerziale; questo è anche un altro modo di enunciare il *Principio di Relatività di Galileo*.

Per illustrare queste idee, consideriamo un oggetto localizzato nel punto  $P$  come nella Fig. 1.1. Se il punto  $P$  è in quiete relativamente al sistema di riferimento  $S'$ , esso sarà visto muoversi con velocità  $v$  nel sistema di riferimento  $S$ . Vice-versa, se il punto è in quiete (stazionario) rispetto al sistema  $S$ , allora sarà visto muoversi con velocità  $-v$  dal sistema  $S'$ .

Supponiamo adesso che la localizzazione del punto  $P$  sia specificata dalle

coordinate  $(x, y, z)$ , misurate nel sistema  $S$ , e dalle coordinate  $(x', y', z')$ , misurate nel sistema  $S'$ . Ammettiamo che gli orologi segnalino  $t = t' = 0$  quando l'origine  $O$ , del sistema  $S$ , coincide con l'origine  $O'$ , del sistema  $S'$ . Le coordinate  $(x, y, z)$  e  $(x', y', z')$  sono allora collegate per mezzo di una *trasformazione di Galileo*, nella forma

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t. \quad (1.4)$$

Per quanto riguarda le velocità, se il punto  $P$  ha una velocità  $v_x$  lungo la direzione  $x$ , quando misurata in  $S$ , allora avrà una velocità  $v'_x$ , quando misurata in  $S'$ , di modo tale che

$$v'_x = v_x - v. \quad (1.5)$$

In questa particolare situazione illustrativa in cui la velocità relativa è diretta lungo  $x$ , le componenti lungo  $y$  e  $z$  rimangono le stesse:  $v'_y = v_y$  e  $v'_z = v_z$ . Si osserva che la velocità relativa tra i due sistemi di riferimento è responsabile della differenza che si trova tra le velocità misurate in  $S$  e in  $S'$ .

Questo principio di relatività classico è valido nella meccanica. Einstein, però, era convinto che un principio di relatività deve valere anche per i fenomeni elettromagnetici, e non solo per quelli meccanici<sup>23</sup>.

Le leggi fondamentali dell'elettromagnetismo sono basate sulle equazioni di Maxwell, che governano la distribuzione spazio-temporale dei campi elettrici e magnetici. Esse possono essere scritte come equazioni differenziali in cui intervengono il tempo, le coordinate e la velocità della luce nel vuoto. Se scriviamo le equazioni nel sistema di riferimento in  $S$  e nel sistema in  $S'$ , applicando le trasformazioni di Galileo, queste equazioni non hanno la stessa forma come richiesto per i sistemi di riferimento inerziali. Allora, il principio di relatività classico non vale per le leggi fondamentali dell'elettromagnetismo. In parole molto generali, si potrebbe dire che le leggi dell'elettromagnetismo non sono le stesse nei due sistemi di riferimento.

Per discutere in maniera semplificata la soluzione proposta da Einstein, ci scosteremo un poco della presentazione che lui fa nel suo lavoro originale e

---

<sup>23</sup>S. Bergia, *op. cit.*, p. 60.

useremo una presentazione più comunemente impiegata nei libri didattici di fisica<sup>24</sup>.

Nel lavoro di 1905, dopo discutere l'azione elettrodinamica tra un magnete e un conduttore – cercando di sottolineare che il fenomeno osservato deve dipendere soltanto dal moto relativo del conduttore e del magnete, Einstein scrive nella introduzione:

*Esempi di tipo analogo, come pure i tentativi andati a vuoto di constatare un moto della Terra relativamente al 'mezzo luminoso' portano alla supposizione che il concetto di quiete assoluta non solo in meccanica, ma anche in elettrodinamica non corrisponda ad alcuna proprietà dell'esperienza, e che inoltre per tutti i sistemi di coordinate per i quali valgono le equazioni meccaniche debbono valere anche le stesse leggi elettrodinamiche e ottiche, come già dimostrato per le quantità del prim'ordine. Assumeremo questa congettura (il contenuto della quale nel seguito sarà chiamato "principio di relatività"), come postulato, e oltre a questo introdurremo il postulato con questo solo apparentemente incompatibile che la luce nello spazio vuoto si propaghi sempre con una velocità determinata  $V$ , indipendente dallo stato di moto dei corpi emittenti. Questi due postulati bastano a pervenire ad un'elettrodinamica dei corpi in movimento semplice ed esente da contraddizioni, costruita sulla base della teoria di Maxwell per i corpi in quiete.*

Prima di enunciare i postulati, Einstein discute il concetto di *simultaneità*. In questa discussione, compare un'idea radicalmente nuova: se si definisce una coppia di eventi A e B come simultanei in un dato sistema inerziale, non si può dedurre che gli eventi siano simultanei rispetto a un altro sistema di riferimento inerziale! Se nel punto A dello spazio si trova un orologio, un osservatore che si trovi in A misurerà un tempo  $t_A$  dell'evento; se, analogamente, nel punto B dello spazio si trova un altro orologio (con le stesse proprietà di quello che si

---

<sup>24</sup>Si veda, ad esempio: R. Resnick, *Introduction to Special Relativity* (John Wiley & Sons, New York, 1968) e C. Kittel, W. D. Knight, and M. A. Ruderman, *Mechanics – Berkeley Physics Course*, Vol. 1 (McGraw-Hill, New York, 1972), second edition.

trova in A), un osservatore in B misurerà un tempo  $t_B$ . Il problema rimanente sarà quello di definire un “tempo” per A e B complessivamente.

Secondo Einstein, “quest’ultimo tempo può essere definito soltanto quando si assuma per definizione che il ‘tempo’ che la luce impiega per andare di A a B sia uguale al ‘tempo’ che essa impiega per andare di B a A”<sup>25</sup>. Questo fatto empirico è utilizzato per sincronizzare i due orologi. Si considera che il raggio di luce che lascia il punto A nell’istante  $t_A$  arrivi al punto B nel tempo  $t_B$ ; questo raggio viene riflesso da B verso A e ritorna al tempo  $t_A^*$ . In questo scenario, i due orologi camminano sincroni quando

$$t_B - t_A = t_A^* - t_B.$$

Di seguito, Einstein definisce il “tempo” di un evento come l’indicazione simultanea con l’evento di un orologio a riposo che si trova nella posizione dell’evento, che cammina sincrono con un determinato orologio a riposo.

Basato sull’esperienza, Einstein postula che la quantità

$$\frac{2\overline{AB}}{t_A^* - t_A} = V = c,$$

dove  $\overline{AB}$  è la distanza fra i punti A e B e  $V = c$  è una costante universale, che è la velocità della luce nel vuoto<sup>26</sup>. Avendo preparato questo concetto, nella sezione 2 del lavoro, Einstein introduce i due principi (postulati) della relatività:

1. *Le leggi secondo le quali evolvono gli stati dei sistemi fisici sono indipendenti da quale di due sistemi di coordinate che si trovino uno rispetto all’altro in moto traslatorio uniforme queste evoluzioni di stato siano osservate.*

2. *Ogni raggio di luce si muove nel sistema di coordinate “a riposo” con la velocità fissa  $c$ , indipendentemente dal fatto che questo raggio di luce*

<sup>25</sup>A. Einstein, op. cit., sezione 1.

<sup>26</sup>D’ora in poi useremo per la velocità della luce nel vuoto il simbolo  $c$  (dal latino “celeritas”), come nei libri, anziché  $V$ , come usato da Einstein.



sia emesso da un corpo a riposo o in moto. Si ha

$$\text{Velocità} = \frac{\text{Cammino della luce}}{\text{Durata}}, \quad (1.6)$$

dove la "durata" va intesa nel senso delle definizioni nel paragrafo 1.

Il primo postulato è il *Principio di Relatività di Einstein*trasformazioni di Lorentz: le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali. Non esiste un sistema di riferimento preferenziale, come potrebbe accadere se l'esistenza dell'etere predetta dall'elettrodinamica classica fosse necessaria. Questo principio va oltre la relatività di Galileo e Newton, che si riferisce alle leggi della meccanica, e include tutte le leggi della fisica. Ne segue che si può soltanto parlare di moto relativi di due sistemi.

Il secondo principio stabilisce che la velocità della luce deve essere la stessa in tutti i sistemi di riferimento inerziali. In questo caso, la legge di addizione di velocità di Galileo, come quella dell'esempio nell'equazione (1.5), non vale più.

La teoria della relatività speciale è derivata da questi due principi, che sono semplici e generali, e sono anche profondamente collegati all'unità della fisica. Ecco quando dice a riguardo il fisico Herman Bondi<sup>27</sup>:

*La teoria della relatività speciale è una conseguenza necessaria di qualsiasi asserzione di che l'unità della fisica è essenziale, perché sarebbe intollerabile che tutti i sistemi inerziali fossero equivalenti sotto tutti i punti di vista della dinamica, anche se distinguibili per misure ottiche. Ci sembra adesso quasi incredibile che la possibilità di tale discriminazione sia stata accettata come vera nel diciannovesimo secolo, però in quel tempo (o allora) non era facile vedere quello che era il più importante – la validità universale del principio di relatività di Newton o la natura assoluta del tempo.*

Per proseguire, conviene stabilire le trasformazioni delle coordinate e del tempo dal sistema di riposo ad uno che si trovi relativamente a questo in moto di

<sup>27</sup>H. Bondi, *Endeavour* **20**, 121 (1961). Si veda anche A. P. French, *Special Relativity* (Thomas Nelson & Sons Ltd, Nashville, 1968).

traslazione uniforme. Più precisamente, cerchiamo una trasformazione fra i due sistemi di modo tale che la velocità della luce sia indipendente del moto della sorgente e del ricevitore.

Quando un raggio di luce è emesso dall'origine  $O$  del sistema  $S$ , nel tempo  $t = 0$ , l'equazione del fronte d'onda è una sfera, nella forma:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R(t)^2 = c^2 t^2. \quad (1.7)$$

L'equazione (1.7) descrive una superficie sferica il cui raggio aumenta linearmente nel tempo con velocità  $c$ :  $R(t) = ct$ . Nel sistema di riferimento  $S'$ , ammettendo che  $O$  e  $O'$  coincidono al tempo  $t = t' = 0$ , l'equazione si scrive come:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = R(t)^2 = c^2 t'^2. \quad (1.8)$$

Se, adesso, usiamo l'equazione (1.4), che rappresenta matematicamente le trasformazioni di Galileo, rendiamoci subito conto che (1.8) diventa

$$x^2 - 2xvt + v^2 t^2 + y^2 + z^2 = R(t)^2 = c^2 t^2 \quad (1.9)$$

e perciò non coincide con (1.7). Se, invece, usiamo in (1.8) le trasformazioni

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (1.10)$$

allora troviamo (1.7). Queste sono le *trasformazioni di Lorentz*, conosciute prima dell'avvento della relatività speciale. Le trasformazioni inverse si ottengono facilmente, nella forma:

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + (v/c^2)x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (1.11)$$

Da queste trasformazioni possiamo ricavare rapidamente la legge di trasformazione per la velocità. Una particella che in  $S'$  abbia una velocità di componenti  $v'_x$ ,  $v'_y$  e  $v'_z$ , avrà una velocità relativamente a  $S$  con le componenti  $v_x$ ,  $v_y$  e  $v_z$  data da:

$$\begin{aligned}
 v_x &= \frac{v'_x + v}{1 + v'_x v / c^2} \\
 v_y &= \frac{v'_y}{1 + v'_x v / c^2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \\
 v_z &= \frac{v'_z}{1 + v'_x v / c^2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.
 \end{aligned} \tag{1.12}$$

Se, ad esempio, la particella è un fotone muovendosi lungo l'asse  $x$  con velocità  $v'_x = c$ , allora la sua velocità, misurata in  $S$  sarà:

$$v_x = \frac{c + v}{1 + v/c} = c. \tag{1.13}$$

Supponiamo ora, nello stesso esempio, che il sistema  $S'$  si muova relativamente a  $S$  con velocità  $v = c$ . La velocità della particella relativamente al sistema  $S$  sarà

$$v_x = \frac{c + c}{1 + c^2/c^2} = c. \tag{1.14}$$

La velocità del fotone sarà comunque  $v_x = c$ ! Se usassimo la legge di addizione di velocità di Galileo (1.5) troveremmo  $v_x = 2c$ , cioè, un moto con velocità superiore a quella della luce.

Osserviamo, inoltre, che se le velocità sono piccole rispetto a quella della luce nel vuoto ( $c = 300.000 \text{ km/s}$ ), allora i termini  $1 + v'_x v / c^2 \approx 1$  e  $\sqrt{1 - v^2/c^2} \approx 1$ . In questo limite, valgono le trasformazioni di Galileo (1.4) e la regola di addizione classica della velocità.

Questo semplice esempio ci permette di apprezzare un'altra conseguenza importante della teoria della relatività: l'esistenza di una *velocità limite*. La velocità della luce nel vuoto costituisce un limite insuperabile per i moti dei corpi materiali e dei segnali fisici e, come abbiamo visto, il suo valore deve essere lo stesso rispetto a tutti i sistemi di riferimento inerziali. E le trasformazioni di Lorentz garantiscono questa invarianza delle leggi fisica in tutti i sistemi di riferimento.

### Contrazione delle lunghezze

Altra conseguenza della relatività speciale, associata alle trasformazioni di Lorentz, è la contrazione della lunghezza di un oggetto che si muove a velocità molto alta.

Immaginiamo un bastone lungo l'asse  $x$  a riposo nel sistema di riferimento  $S$ . Come il bastone è a riposo, le posizioni delle coordinate delle sue estremità  $x_1$  e  $x_2$  non dipendono dal tempo. La lunghezza del bastone a riposo in  $S$  può essere definita da

$$L_0 = x_2 - x_1.$$

Adesso, possiamo osservare il bastone nel sistema di riferimento in  $S'$  che, come sappiamo dalla Fig. 1.1, si muove relativamente a  $S$  con velocità  $v$  lungo l'asse  $x$ . La lunghezza del bastone è determinata in  $S'$  misurandosi, in un tempo  $t'$ , le posizioni  $x'_1$  e  $x'_2$  che coincidono con le estremità del bastone in questo sistema di riferimento. La distanza tra le posizioni  $x'_1$  e  $x'_2$  in  $S'$ , che coincidono *simultaneamente* con le estremità del bastone, è la lunghezza  $L$  del bastone nel sistema mobile  $S'$ , data da  $L = x'_2 - x'_1$ . Usando le trasformazioni di Lorentz (1.11), avremo:

$$x_2 - x_1 = L_0 = \frac{x'_2 - x'_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \longrightarrow \quad L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}. \quad (1.15)$$

Questa è la *contrazione di Lorentz-Fitzgerald*. La lunghezza di un corpo è massima quando viene misurata a riposo rispetto all'osservatore. Quando lo stesso corpo si muove con la velocità  $v$  relativamente all'osservatore che continua a riposo in  $S$ , la sua lunghezza è contratta nella direzione del suo moto di una quantità  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ . Le sue dimensioni perpendicolari alla direzione del moto non cambiano poiché, dalle trasformazioni di Lorentz (1.10), viene che  $y' = y$  e  $z' = z$ .

### Dilatazione del tempo

Se le lunghezze cambiano, anche l'intervallo (la durata) di tempo tra due eventi non sono gli stessi se misurati nel sistema a riposo  $S$  o nel sistema che

si muove,  $S'$ .

Consideriamo un orologio a riposo nel sistema  $S$ . Per semplicità, immaginiamo che l'orologio sia localizzato nell'origine  $x = 0$  del sistema  $S$ . Se l'intervallo di tempo è misurato, si trova un valore  $\Delta t$  (noto come *tempo proprio* dell'evento). Un altro orologio (identico al primo), localizzato nell'origine del sistema  $S'$ , misura un intervallo di tempo  $\Delta t'$  tra i due eventi. Per mezzo delle trasformazioni di Lorentz, si dimostra che

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (1.16)$$

L'intervallo di tempo misurato nel sistema mobile  $S'$  è più lungo di quello misurato nel sistema a riposo. Gli orologi che viaggiano a una velocità costante molto alta si ritardano. Possiamo perciò concludere che, quando un orologio è a riposo, avanza con la massima velocità rispetto a un osservatore anch'esso a riposo nello stesso sistema. Quando l'orologio si muove con velocità  $v$  relativamente all'osservatore, la sua velocità è ridotta di una quantità  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ .

### L'intervallo spazio-temporale

Per finire questa breve esposizione sull'articolo di Einstein e le sue conseguenze più immediate, dobbiamo menzionare l'esistenza di una quantità invariabile (un assoluto!) nella teoria della relatività. Trattasi della quantità denominata di "intervallo", semplicemente, e che è definita nella forma:

$$(\Delta s)^2 = (c\Delta t)^2 + (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2,$$

quando misurato in  $S$ . La stessa quantità, quando misurata in  $S'$ , ha una forma somigliante:

$$(\Delta s')^2 = (c\Delta t')^2 + (\Delta x')^2 + (\Delta y')^2 + (\Delta z')^2,$$

dove  $\Delta x$  e  $\Delta t$  (e le altre quantità simili) sono le differenze nelle coordinate spaziali e temporali di due eventi misurate in  $S$ ;  $\Delta x'$  e  $\Delta t'$  (e le altre quantità

simili) sono le stesse cose, ma misurate in  $S'$ . Le trasformazioni di Lorentz garantiscono che

$$(\Delta s')^2 = (\Delta s)^2. \quad (1.17)$$

La matematica della relatività può essere formulata come quella di uno spazio a quattro dimensioni dove, oltre alle coordinate spaziali  $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$ ,  $x_3 = z$ , si considera una quarta “coordinata”  $x_4 = ict$ , con  $i^2 = -1$  essendo l'unità immaginaria. Questa formulazione permette di generalizzare la teoria e di darli un'interpretazione molto più approfondita. Fu Hermann Minkowski (1864 - 1909) a introdurre questo trattamento più formale, nel 1908, e lo presentò dicendo<sup>28</sup>:

*I concetti di spazio e tempo che desidero presentarvi hanno germogliato dal suolo della fisica sperimentale, e in questo risiede la loro forza. D'ora in poi lo spazio di per se stesso o il tempo di per se stesso sono condannati a svanire in pure ombre, e solo una specie di unione tra i due concetti conserverà una realtà indipendente.*

La formulazione di Minkowski propone l'unione spazio-tempo come se spazio e tempo fossero proiezioni di un'entità spazio-temporale invariante; le proiezioni cambiano quando si cambia il sistema di riferimento, ma l'intervallo  $(\Delta s)^2$  tra due eventi è sempre lo stesso e non cambia con il cambiare il sistema di riferimento.

La parte centrale dell'articolo di Einstein è dedicata – come indicato dal titolo – alla teoria elettrodinamica. Ci sono altri aspetti da considerare in una completa discussione del suo lavoro. Ma questo non è l'obbiettivo principale di queste pagine e noi ci fermeremo qui, considerando, però, un aspetto generale del significato del suo lavoro.

Vogliamo riconsiderare che il punto di partenza generale di Einstein è collegato all'esistenza di un assoluto nel senno della teoria elettromagnetica di Maxwell, come menzionato all'inizio. Come abbiamo visto, in questa teoria ci

<sup>28</sup>H. Minkowski, *Space and Time in Minkowski's Papers on Relativity* (Minkowski Institute Press, Montreal, 2012), p. 37.

sono diverse equazioni differenziali che connettano, in maniera molto elegante e compatta, i campi elettrici e magnetici con le densità di carica e corrente.

Una importante domanda si pone allora: quali coordinate  $x, y, z$  e  $t$  compaiono in queste equazioni, cioè, a quale sistema di riferimento le equazioni di Maxwell si riferiscono?

Sembra che per Maxwell questa questione non si ponesse poiché lui era convinto che le equazioni facessero riferimento a un sistema inerziale assoluto<sup>29</sup>.

Una delle predizioni di questo insieme notevole di equazioni è l'esistenza delle onde elettromagnetiche che si propagano nel vuoto con una velocità  $c$ . Ma, di nuovo, uno si domanda: quale sistema di riferimento abbiamo in mente quando parliamo di questa velocità? Dal punto di vista della meccanica, le equazioni non sono valide in tutti i sistemi; allora, deve esistere un sistema privilegiato, come quello dell'etere, cioè un sistema assoluto. L'esperimento di Michelson, il più famoso a riguardo, ha dimostrato che questo sistema non esiste! La soluzione, perciò, è quella di Einstein: vale il suo principio di relatività e si opera con le trasformazioni di Lorentz per garantire la validità delle equazioni in tutti i sistemi di riferimento inerziali. Queste trasformazioni garantiscono che la velocità della luce è indipendente del moto sia della sorgente che del ricettore e possono essere anche considerate come avendo risolto un paradosso.

La teoria elettromagnetica di Maxwell è nata in un periodo nel quale tutta la fisica parlava della relatività del moto, ma conteneva un assoluto; invece, la fisica newtoniana parlava di spazio assoluto e tempo assoluto, ma era una teoria basata sul Principio di Relatività di Galileo. La teoria della relatività di Einstein risolve il problema e indica la via da essere seguita dalla fisica contemporanea. Una specie di paradosso nel nome però rimane perché la teoria non è una teoria della relatività ma bensì una teoria dell'assoluto, come sottolineato da Felix Klein (1849–1925) e come se evince dalla discussione fatta prima, che riguarda l'esistenza di un intervallo che è lo stesso in tutti i sistemi di riferimento.

---

<sup>29</sup>G. Temple, *From Relativity to the Absolute in Turning Points in Physics* (North-Holland, Amsterdam, 1959), p. 74.

## 1.4 Inerzia e energia

Nel settembre del suo anno ammirevole, Einstein manda agli *Annalen der Physik* il suo articolo sull'equivalenza massa-energia intitolato *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* (L'inerzia di un corpo è dipendente dal suo contenuto di energia?)<sup>30</sup>. Il lavoro fu ricevuto il 27 settembre e pubblicato il 21 novembre. È questo l'articolo che contiene il concetto che porterebbe alla famosa equazione  $E = mc^2$ , l'obiettivo centrale di queste pagine.

Questo corto lavoro si pone come naturale prosecuzione del lavoro discusso in precedenza. Einstein usa un risultato già trovato prima quando discuteva la pressione di radiazione e l'effetto Doppler relativistico.

L'idea di base può essere presentata come segue.

Consideriamo un insieme di onde piane con energia  $E$  in un sistema di riferimento  $S$ . La normale all'onda, la direzione del raggio di luce della Fig. 1.2, fa un angolo  $\phi$  con l'asse  $x$  del sistema. Nel sistema  $S'$  (che si muove con velocità  $v$  lungo la direzione  $x$  del sistema  $S$ ) queste onde hanno energia  $E'$ . Nel lavoro di prima (sezione 8 del testo originale), Einstein aveva mostrato che  $E$  e  $E'$  si connettono tramite la relazione:

$$E' = E \frac{1 - v/c \cos \phi}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (1.18)$$

Un corpo stazionario nel sistema  $S$  ha un'energia a riposo  $E_0$ . Relativamente al sistema di riferimento  $S'$ , il corpo ha un'energia  $H_0$ . Supponiamo che questo corpo emetta, lungo una direzione che faccia un angolo  $\phi$  rispetto all'asse  $x$ , delle onde piane di luce con energia  $L/2$  misurata in  $S$ ; e che emetta, contemporaneamente, una uguale quantità di luce nella direzione opposta. Dopo l'emissione delle onde piane di luce, l'energia del corpo è  $E_1$ . Usando la conservazione dell'energia possiamo scrivere:

$$E_0 = E_1 + \frac{L}{2} + \frac{L}{2} = E_1 + L. \quad (1.19)$$

<sup>30</sup>A. Einstein, *Annalen der Physik* 18, 639 (1905).



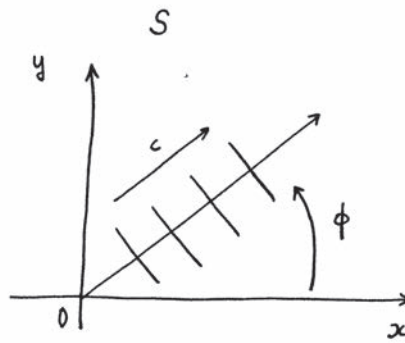


Figura 1.2: Un corpo a riposo nell'origine del sistema  $S$  emette onde piane di luce.

Nel sistema  $S'$ , l'energia dopo l'emissione delle onde piane di luce è  $H_1$ . Il principio di relatività richiede che l'energia sia conservata anche nel sistema  $S'$ . Tenendo conto di questo principio, possiamo scrivere:

$$\begin{aligned} H_0 &= H_1 + \left[ \frac{L}{2} \frac{1 - v/c \cos \phi}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} + \frac{L}{2} \frac{1 + v/c \cos \phi}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right] \\ &= H_1 + \frac{L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \end{aligned} \quad (1.20)$$

Dalle equazioni (1.19) e (1.20), per sottrazione, otteniamo:

$$H_0 - E_0 - (H_1 - E_1) = L \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right]. \quad (1.21)$$

Le quantità  $H$  e  $E$  sono i valori dell'energia dello stesso corpo riferiti a due sistemi di coordinate che sono in moto l'uno relativamente all'altro, mentre il corpo in questione è in quiete in uno dei due sistemi, il sistema  $S$ . Allora, la quantità  $H_0 - E_0$  differisce dall'energia cinetica del corpo,  $K_0$ , prima dell'emissione, solo per una costante additiva,  $C$  e, ugualmente, la quantità  $H_1 - E_1$  rappresenta l'energia cinetica del corpo dopo l'emissione,  $K_1$ , a meno della stessa costante. L'equazione (1.21) diventa:

$$K_0 - K_1 = L \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right].$$

L'energia cinetica del corpo, quando misurata in  $S'$  diminuisce come risultato dell'emissione della luce e la quantità della diminuzione è indipendente dalle proprietà del corpo. Inoltre, la differenza  $K_0 - K_1$  dipende dalla velocità. Siccome tipicamente la velocità  $v$  è piccola rispetto a  $c$ , possiamo trascurare grandezze del quarto ordine nel termine  $v/c$  per scrivere:

$$K_0 - K_1 \approx L \left[ 1 + \left( \frac{v}{c} \right)^2 + \dots - 1 \right] \approx \frac{L v^2}{2 c^2}. \quad (1.22)$$

Da questa equazione, Einstein fa seguire direttamente che:

1. *Se un corpo emette energia  $L$  sotto forma di radiazione, allora la sua massa diminuisce di  $L/c^2$ . Il fatto che l'energia estratta dal corpo divenga energia di radiazione non cambia le cose, ragion per cui siamo condotti alla conclusione più generale, secondo cui:*

2. *La massa di un corpo è una misura del suo contenuto di energia; se l'energia cambia di una quantità  $L$ , allora la massa cambia nello stesso senso di una quantità  $L/9 \times 10^{20}$ , dove l'energia si misura in erg e la massa in grammi<sup>31</sup>. E, per concludere, Einstein aggiunge che non è impossibile che la teoria possa essere messa alla prova con successo nel caso di corpi il cui contenuto di energia è molto variabile (per esempio, i sali di uranio). Se la teoria corrisponde ai fatti, allora la radiazione trasporta energia tra il corpo emittente e quello assorbente.*

L'equazione (1.22) ci mostra che, senza variazione della velocità  $v$ , si ha una variazione  $K_0 - K_1$  dell'energia cinetica. Possiamo concludere che dovrà essere la massa del corpo a variare di una quantità  $\Delta m$ , cioè

$$K_0 - K_1 = \frac{1}{2}(\Delta m)v^2. \quad (1.23)$$

Confrontando (1.22) con (1.23), otteniamo:

$$L = (\Delta m)c^2.$$

Se ricordiamo che  $L$  è l'energia emessa dal corpo e la chiamiamo di  $E$ , allora possiamo riscrivere l'equazione precedente nella forma che l'ha resa famosa:

$$\Delta E = (\Delta m)c^2 \quad \longrightarrow \quad E = mc^2. \quad (1.24)$$

Quest'articolo di Einstein insieme al precedente formano la base della teoria della relatività. Tantissimi lavori sono stati pubblicati dopo, sia da Einstein che da altri autori, ampliando e approfondendo la fisica descritta in questa teoria. In particolare, lo stesso Einstein ha formulato i fondamenti della teoria

---

<sup>31</sup>Il sistema utilizzato da Einstein è in *cgs* (centimetro-gramma-secondo). In questo sistema, la velocità della luce nel vuoto vale (circa)  $c = 3 \times 10^{10}$  cm/s.

della relatività generale verso la fine del 1915, e questa teoria forma la base dell'odierna descrizione fisica dell'Universo.

Per quanto riguarda il senso generale di questa scoperta, lo stesso Einstein, anni dopo, ha lasciato registrata una sua presentazione della formula con le parole seguenti<sup>32</sup>:

*It followed from the special theory of relativity that mass and energy are both but different manifestations of the same thing – a somewhat unfamiliar conception for the average mind. Furthermore, the equation  $E$  is equal to  $m c$ -squared, in which energy is put equal to mass, multiplied by the square of the velocity of light, showed that very small amounts of mass may be converted into a very large amount of energy and vice versa. The mass and energy were in fact equivalent, according to the formula mentioned before. This was demonstrated by Cockcroft and Walton in 1932, experimentally.*

La dimostrazione menzionata da Einstein si riferisce al primo apparecchio usato per accelerare artificialmente particelle atomiche fino ad alte energie, conosciuto come acceleratore di Cockcroft-Walton. Circa un mese dopo l'annuncio della sua costruzione, nel 1932, fasci di protoni ad alte energie prodotti da questa macchina furono usati per iniziare la disintegrazione del nucleo del litio, confermando così l'equivalenza massa-energia enunciata da Einstein<sup>33</sup>.

In queste pagine, nostro obiettivo è quello di approfondire il senso fisico e le implicazioni dell'equazione (1.24). Il riassunto che abbiamo presentato finora dei lavori dell'*annus mirabilis* di Einstein ci è servito per darci un'idea complessiva di come questa scoperta apparentemente molto semplice si inserisce nel panorama generale dei contributi di Einstein alla storia della fisica. Nel farlo, abbiamo usato dei concetti e un linguaggio che sono comune nei mezzi

---

<sup>32</sup>A. Einstein: "Ne segue dalla teoria della relatività speciale che massa e energia sono entrambi ma diverse manifestazioni della stessa cosa - un concetto poco familiare alla mente mediana. Inoltre, l'equazione  $E$  uguale a  $m$  per  $c$  quadro, nella quale energia è uguagliata alla massa moltiplicata per il quadrato della velocità della luce, ha mostrato che piccole quantità di massa possono essere convertite in larghe quantità di energia e vice versa. La massa e l'energia sono infatti equivalenti, d'accordo con la formula menzionata prima. Questo è stato dimostrato sperimentalmente da Cockcroft e Walton nel 1932.

<sup>33</sup>J. D. Cockcroft & E. T. S. Walton, *Nature* **129**, 242 (1932).

scientifici, come quello di energia, energia cinetica, massa, velocità, velocità della luce, conservazione dell'energia, ecc.

Prima di proseguire, presentiamo una discussione storica riassunta dello stabilimento della legge di conservazione della massa e, di seguito, della legge di conservazione dell'energia, con il conseguente stabilimento anche del concetto di energia nel senso più generale<sup>34</sup>. Il lettore interessato soltanto nella discussione che riguarda le conseguenze dell'equazione (1.24) può saltare il prossimo capitolo e andare direttamente al Cap. 3, dove discuteremo più nel dettaglio l'equivalenza massa-energia.

---

<sup>34</sup>Il prossimo capitolo riproduce, con qualche cambiamento, delle idee già discusse nel mio libro pubblicato in Portoghese: *Perspectivas em História da Física* (Livraria da Física, São Paulo, 2014). Ringrazio l'editore per il permesso di usare parte di quel testo modificato in una versione italiana.

## Capitolo 2

# Le Leggi di Conservazione della Massa e dell'Energia

### 2.1 La Legge di Conservazione della Massa

Circa cent'anni sono passati tra la pubblicazione dei *Principia*, di Isaac Newton, nel 1687, e la pubblicazione del *Traité Élémentaire de Chimie*, di Lavoisier, nel 1789. La prima delle definizioni introdotte da Newton nei *Principia* tratta, giustamente, del concetto di massa: “in seguito, indicherò questa quantità indifferentemente con i nomi di corpo o massa. Tale quantità diviene nota attraverso il peso di ciascun corpo. Per mezzo di esperimenti molto accurati sui pendoli, trovai che è proporzionale al peso, come in seguito mostrerò”<sup>1</sup>. Dall'altra parte, una delle affermazioni più celebri del *Traité* è indissolubilmente associata al cosiddetto principio di conservazione della massa. Nel capitolo XIII, Parte I, del libro di Lavoisier, troviamo l'affermazione<sup>2</sup>:

*Dobbiamo considerare come assioma incontestabile che niente si crea, nelle operazioni dell'arte ne' in quelle della natura; e si può porre come principio che in ogni operazione vi è una quantità uguale*

---

<sup>1</sup>I. Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Joseph Streater, London, 1687), p. 1.

<sup>2</sup>A. L. Lavoisier, *Elements of Chemistry* (Great Books of the Western World) (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), trad. Robert Kerr, p. 41. Cf. A. Lavoisier, *Traité Élémentaire de Chimie* (Cuchet, Paris, 1789), pp. 140–141.

*di materia prima e dopo l'operazione, che la qualità e la quantità dei principi (elementi) è la stessa e che si verificano solo cambiamenti e modificazioni. Su questo principio si fonda tutta l'arte della sperimentazione in chimica. È inoltre indispensabile ammettere l'esistenza di una vera uguaglianza o identità tra i principi componenti dei corpi studiati e i principi estratti da essi mediante l'analisi.*

La menzione ai due libri non è casuale. È comune considerare che il trattato di Lavoisier rappresenti, per la chimica, quello che i *Principia* rappresentano per la fisica: entrambi sono opere simbolo di una nuova scienza, una nuova chimica e una nuova fisica; entrambi sorgono, anche, alla fine di un periodo fertile, pieno di nuove idee e di nuovi contributi all'investigazione scientifica. Se vogliamo usare una citazione che è da molto diventata luogo comune, possiamo affermare che entrambi le opere "riposano sulle spalle da giganti", cioè, sintetizzano e fanno avanzare, di un modo rivoluzionario e totalmente nuovo, l'opera dei suoi predecessori.

Oltre a questa somiglianza fondamentale, conviene enfatizzare che l'enunciato fatto da Lavoisier fu possibile soltanto a partire dall'introduzione, nella fisica per primo, del concetto di sistema isolato. Questa idea-chiave per il processo chimico risulta, in parte, dal lavoro di Galileo sul moto dei corpi ed è esplicitamente ammessa nella prima legge di Newton, il principio d'inerzia. Fu proprio l'introduzione dell'idea di un sistema fisico isolato, senza connessioni causali con il mondo esterno, alleata alla prova sperimentale della costanza del peso, enunciata da Newton nella sua prima definizione riprodotta sopra, che ha permesso la considerazione empirica di un sistema isolato nella chimica.

Sarà Lavoisier il primo ad ottenere la prova che la quantità di materia in un sistema determinato o il peso di un certo materiale in un recipiente chiuso non cambia quando subisce delle trasformazioni chimiche. A questa importante conclusione, Lavoisier arrivò dopo realizzare una serie di esperimenti coinvolgendo i tipi di reazioni note, a partire dai risultati quantitativi e da misure accuratamente realizzate. Ci basta invocare qua un esempio per illustrare la cura con la quale questi risultati sono stati ottenuti<sup>3</sup>:

<sup>3</sup>A. L. Lavoisier, op. cit., p. 20. Cf. *Traité*, op. cit., pp. 46-47.

*Se si dona a questo esperimento tutta l'attenzione che esso merita, l'aria si trova diminuita di una quantità in peso esattamente uguale a quella con la quale il ferro è aumentato. Se dunque uno fa bruciare 100 grani (5,3 g) di ferro, che richiede un peso addizionale di 35 grani, la diminuzione del volume dell'aria è di esattamente 70 pollici cubici, a ragione di mezzo grano per pollice cubico; si troverà, nella sequenza di questa Memoria, che il peso dell'aria vitale (ossigeno) è quasi che esattamente di mezzo grano per ogni pollice cubico.*

Come risultato di questi esperimenti, Lavoisier ha dimostrato che le reazioni che avvengono all'interno di un recipiente chiuso sono tali che il guadagno sperimentato da una parte qualsiasi del sistema verrà compensato da una perdita nella sua parte restante, cioè, *la quantità totale di materia dentro il sistema rimane costante.*

Nel concludere per la conservazione della massa nelle reazioni chimiche di sistemi chiusi, Lavoisier risolveva un altro problema, aperto da anni: il cosiddetto problema della combustione. È merito suo aver dimostrato che la combustione della materia è, normalmente, un processo di ossidazione: la combinazione della sostanza con quella parte dell'aria ambiente alla quale lui diede il nome di ossigeno. Il gas preso dall'atmosfera dovrebbe essere considerato nel calcolo complessivo del processo di combustione. La soluzione trovata da Lavoisier ha messo fine nella teoria del *flogisto*, proposta molto tempo prima per spiegare il problema.

### 2.1.1 La teoria del flogisto

Secondo Johann Joachim Becher (1635 – 1682), medico e alchimista tedesco, le cui principali idee e esperimenti sulla natura dei minerali e altre sostanze furono pubblicate nel suo libro *Physica subterranea* (1669), la terra e l'acqua erano i principali costituenti di tutti i corpi. La terra, però, era di tre tipi: la *terra lapida* (o vetrificabile), la *terra fluida* (terra mercuriale) e la *terra pinguis* (terra grassa o terra combustibile). Lui considerava che la *terra pinguis* stesse presente nei materiali combustibili, essendo liberata quando questi



bruciavano. Questa concezione fu la base sulla quale George Ernst Stahl (1660 – 1734) ha sviluppato la sua teoria del flogisto (ou flogistico).

In questa teoria, i corpi combustibili possiedono questo flogisto (dal greco *Phogiston*: “passato dal fuoco”, “bruciato”) che è liberato nell’aria durante il processo di combustione. Quanto più combustibile è il materiale, tanto più flogisto esso libera durante la combustione. Così, ad esempio, combustibili come il carbone e l’oleo sarebbero molto ricchi di flogisto e, per questo, lo libererebbero in grande quantità durante il bruciamento. D’altra parte, il flogisto potrebbe essere trasferito da un corpo all’altro, secondo l’ordine che un corpo più ricco di flogisto rilascia al più povero.

Nel contesto di queste idee, alcune spiegazioni potrebbero essere ottenute per diversi fenomeni osservati sperimentalmente. Per esempio, il cambiamento di struttura fisica e di natura chimica dell’oggetto che brucia potrebbe essere attribuito alla perdita o al guadagno di flogisto. Nello stesso modo, la presenza di calore e delle fiamme nel processo di combustione e i cambiamenti qualitativi dell’aria ambiente si potrebbero attribuire anche al flogisto. Infine, l’importante cambiamento nel peso dei materiali in reazione trovava una spiegazione ragionevole con l’introduzione di questa sostanza. L’idea era fertile, e permetteva di affrontare sia il problema della combustione (involviendo materiali organici) che il problema della calcinazione (involviendo i metalli).

Secondo Stahl, il processo di ruggine in un metallo era dovuto ad una combustione lenta, per mezzo della quale il metallo perdeva lentamente il suo flogisto. Nel processo di fondere un minerale con il carbone per ottenerne un metallo, accadrebbe il trasferimento di flogisto dal carbone (molto ricco) alla *calx* (o calce) e, di conseguenza, si produceva il metallo. Sarebbe, così, possibile ottenerne un metallo facendo reagire la *calx* con il flogisto:  $calx + \text{flogisto} \rightarrow \text{metallo}$ .

La teoria, modificata negli anni successivi e arricchita di esperimenti e interpretazioni alternative, ha prodotto i suoi frutti e fu importante per lo sviluppo della storia della chimica. Prima o poi, però, doveva conoscere il fallimento, poiché cercava di spiegare un numero molto grande di fenomeni e finiva per generare contraddizioni. È notevole che, in alcune processi, il flogisto dovesse essere rilasciato e, in altri, assorbito. In certi esperimenti, esso doveva pesare;

in altri, doveva tornarsi inessenziale, imponderabile. Con Lavoisier, tuttavia, si dimostrò che il concetto non era necessario.

Nel suo trattato, in un primo momento, Lavoisier spiega la scoperta di quella parte dell'aria che era responsabile della combustione. Nel Capitolo, della Parte I, dove analizza l'aria atmosferica e la sua divisione in due fluidi elastici, uno appropriato alla respirazione e l'altro non, lui parla del primo nei seguenti termini<sup>4</sup>:

*Quest'aria che abbiamo scoperto quasi allo stesso tempo Priestley, Scheele e io, è stata chiamata dal primo aria desflogisticata, dal secondo aria empirea (aria di fuoco). In un primo momento, io l'ho chiamata di ARIA ALTAMENTE RESPIRABILE, che fu sostituita dopo con ARIA VITALE (le maiuscole sono per l'enfasi dell'originale).*

Un po' più avanti, egli lo battezza definitivamente con il nome classico di ossigeno<sup>5</sup>:

*Abbiamo dato alla base della porzione respirabile dell'aria il nome di ossigeno, dalle parole greche oxis (acidum) ... perché, in effetti, una delle proprietà più generali di questa base è quella di formare degli acidi, per mezzo della combinazione con molte diverse sostanze. L'unione di questa base con il calorico noi la denominiamo di gas ossigeno...*

Lavoisier spiega, dunque, i processi di combustione, calcinazione e respirazione invocando il consumo di una parte dell'aria atmosferica: l'ossigeno. La teoria del flogisto, che avrebbe ancora molti addetti, aveva i giorni contati. Ma gli studi di Lavoisier sul calore l'hanno portato a introdurre un importante concetto nella storia della scienza: il calorico, che compare nel brano citato prima e che sarà oggetto di analisi più avanti. Il rapido bilancio del suo contributo, qui, si riferisce al principio di conservazione della massa.

---

<sup>4</sup>*Ibid.*, p. 18. Cf. *Traité*, op. cit., p. 38.

<sup>5</sup>*Ibid.*, p. 22. Cf. *Traité*, op. cit., pp. 54-55.

### 2.1.2 La massa si conserva?

Negli anni successivi, in conseguenza dell'aumento gradativo nella precisione delle bilance, l'idea di conservazione diventò gradualmente sempre più bene stabilita, anche se dei dubbi rimanessero circa la validità della legge.

Il chimico tedesco Lothar Meyer (1830 – 1895) ha suggerito che la combinazione degli atomi durante le reazioni chimiche potrebbe essere accompagnata dall'assorbimento o dall'emissione di particelle dell'etere; la massa del sistema potrebbe cambiare di una quantità piccola; ma l'esistenza di queste particelle era una questione aperta e questa possibile obiezione non ha fatto strada.

Un altro chimico del periodo, Hans Landolt (1831 – 1910), ha realizzato una serie di esperimenti, con delle misure molto esatte delle masse dei sistemi che partecipavano alle reazioni chimiche, e ha concluso che *nessun cambiamento nel peso totale in qualsiasi reazione chimica potrebbe essere misurato*. Di conseguenza, lui considerò come bene stabilita la prova sperimentale della legge di conservazione della massa. Se ci fosse qualche deviazione, d'accordo con la precisione dei suoi esperimenti, essa dovrebbe essere minore di un millesimo di gramo, il che non era misurabile con i mezzi disponibili all'epoca.

Ma, allora, la massa si conserva?

Come abbiamo visto in precedenza, con l'avvento della teoria della relatività, sappiamo che esistono dei sistemi nei quali la massa cambia; i casi più importanti sono quelli che includono reazioni nucleari e particelle elementari, come nella disintegrazione radioattiva, nella fissione e nella fusione, come vedremo nel dettaglio più avanti. Nell'annichilazione di coppia (elettrone-positrone, protone-anti-protone) la massa a riposo scompare completamente! Ancora d'accordo con la teoria della relatività, la massa di una particella può aumentare con l'aumento della velocità! In tutti questi casi – che verranno discussi nel Capitolo 3 – il cambiamento nella massa è equilibrato da un corrispondente cambiamento nell'energia! E qui tocchiamo nel principio di equivalenza tra la massa e l'energia – una delle grandi scoperte della fisica contemporanea –, che è espressa simbolicamente per mezzo della famosa equazione di Einstein che stiamo esplorando in questo libro:  $E = mc^2$ .

Possiamo anticipare un semplice esempio di questa equivalenza che accompagna la non conservazione della massa considerando quello che accade con

il primo atomo della Tabella Periodica: l'idrogeno. L'atomo, di massa  $m_h$ , è formato da un elettrone, di massa  $m_e$ , e da un protone, di massa  $m_p$ . L'insieme forma un sistema legato, somigliante al sistema formato dalla Terra e dalla Luna, o dal Sole e da uno dei pianeti. Sperimentalmente, si verifica che  $m_h < m_p + m_e$ , cioè, la massa dell'atomo d'elettroneidrogeno è minore della somma delle masse dei suoi costituenti! Questa differenza è associata all'energia di legame dello stato fondamentale dell'atomo, che è di  $E = 13.6 \text{ eV}$ <sup>6</sup>. Si conclude allora che  $m_p + m_e - m_h = E/c^2 \approx 2.2 \times 10^{-32} \text{ g}$ . La differenza nella massa è così piccola, però, che non può essere misurata per mezzo di qualsiasi bilancia esistente o immaginabile.

## 2.2 La Scoperta della Conservazione dell'Energia

La conservazione dell'energia è stata trattata come un caso di scoperta simultanea in un famoso articolo del famoso Thomas Kuhn<sup>7</sup>. Nell'ultimo mezzo secolo, molti storici e studiosi di quel periodo della storia della scienza si sono mostrati in disaccordo con questa interpretazione. In effetti, investigare lo stabilimento di un principio di conservazione che si è fermato come uno dei pilastri di tutto l'edificio scientifico è uno dei compiti più delicati. Molta gente competente e bene preparata per il compito gli ha dedicato uno sforzo considerevole, la maggior parte delle volte senza il successo immaginato all'inizio.

Ad ogni modo, in questo testo di scopo modesto e limitato, concentriamoci in alcuni contributi più o meno consensuali per la comprensione di questo importante principio, che ci servirà per capire un po' meglio il significato dei termini che compaiono nell'equazione di Einstein. Per questo, tratteremo con un certo dettaglio l'opera di alcune ricercatori che si occuparono del problema, nel periodo storico compreso fra gli anni 1840 e 1860. L'obbiettivo è più quello di promuovere un breve bilancio delle principali idee coinvolte nel processo senza però soffermarci, con un interesse più preciso, sulle precedenze e priorità.

---

<sup>6</sup>Nella sezione 3.1 si trova una discussione più dettagliata di queste unità di misura per l'energia.

<sup>7</sup>T. Khun, *Energy conservation as an example of simultaneous discovery*, in M. Clagett (ed.), *Critical Problems in the History of Science* (University of Wisconsin Press, Madison, 1959).

Il periodo scelto sembra godere di un consenso attorno al seguente fatto: nel 1840 non si conosceva un principio di conservazione dell'energia nel suo senso più ampio; nel 1860, il principio era una conquista vittoriosa della nuova scienza, e ha avuto un notevole effetto sulla scienza pura, sulla filosofia, sulla letteratura e sulla vista della società, in generale<sup>8</sup>.

Trattasi perciò di un periodo storico che testimonierà un fatto ammirevole, frutto del lavoro collettivo di molte generazioni di pensatori, scienziati e persone di cultura in generale. Questo è diventato vero ad un punto tale, che è tentatore sottoscrivere l'affermazione di un famoso storico della scienza sull'importanza di questa scoperta<sup>9</sup>:

*Per conto del suo valore pratico e del suo interesse intrinseco, il principio di conservazione dell'energia può essere considerato come una delle più grandi conquiste della mente umana.*

Non si può separare la storia della formulazione di un principio di conservazione della storia dello sviluppo del concetto di energia. La formulazione di un principio di conservazione della *vis viva* fu un passo importante per lo stabilimento di un principio di conservazione dell'energia meccanica. Le idee di base per questa formulazione si trovano nell'uso dell'assioma di Torricelli, fatto soprattutto da Huygens<sup>10</sup>.

Il concetto fisico di lavoro - perfezionato dagli ingegneri francesi - ha conosciuto la sua formulazione più chiara in connessione alla necessità di comprenderci il funzionamento delle macchine durante la Rivoluzione Industriale.

Uguualmente, i concetti di lavoro considerati in questo contesto trasformarono la meccanica in un sistema teorico con una solida base sperimentale nel senno del quale la conservazione emergeva quasi che naturalmente, almeno in relazione ad alcune condizioni speciali (come, ad esempio, nei sistemi operando nell'assenza di attrito).

---

<sup>8</sup>Y. Elkana, *The Discovery of the Conservation of Energy* (Hutchinson Educational, London, 1974). Usiamo la traduzione italiana di Libero Sosio: *La scoperta della conservazione dell'energia* (Feltrinelli, Milano, 1977), p. 223.

<sup>9</sup>W. Dampier, *A History of Science and its Relation with Philosophy and Religion* (Cambridge University Press, Cambridge, 1949), p. 228.

<sup>10</sup>Una discussione più dettagliata si trova nel libro di E. Dijksterhuis, op. cit., pp. 495-500.

Tuttavia, il concetto di lavoro era stato trattato da Johann Bernoulli (1667–1748) nelle sue analisi dell'opera di Leibniz. È necessario registrare che fu giustamente lo stesso Bernoulli il primo ad associare la parola energia ad un'equazione, in una lettera a Pierre Varignon, nel 1717, molto tempo prima dei fatti che stiamo considerando qui. Il contenuto di questa lettera fu incluso da Varignon nel suo libro *Nouvelle mécanique ou statique, dont le projet fut donné en M. DC. LXXXVII* (Nuova meccanica o statica, il cui progetto fu determinato nel 1687), pubblicato postumamente nel 1725. Ecco quello che dice Varignon<sup>11</sup>:

*Per mezzo di una lettera scritta da Basilea il 26 gennaio 1717, il Sig. Johann Bernoulli, dopo aver definito quello che lui intende con la parola ENERGIA, nel modo che si vedrà nella definizione che segue, mi ha detto che in TUTTO L'EQUILIBRIO DI FORZE QUALSIASI, QUALUNQUE MANIERA ESSE SIANO APPLICATE LE UNE SULLE ALTRE, O MEDIATAMENTE O IMEDIATAMENTE, LA SOMMA DELLE ENERGIE AFFERMATIVE SARÀ UGUALE ALLA SOMMA DELLE ENERGIE NEGATIVE, PRESE AFFERMATIVAMENTE (enfasi nell'originale).*

Un po' più avanti, Varignon cerca di tornar quantitativamente più chiaro il concetto introdotto da Bernoulli e associa la parola esplicitamente ad una definizione<sup>12</sup>:

*[...] Considera, pertanto, PC perpendicolare a fp e avrai CP per la VELOCITÀ VIRTUALE della forza F, cosicché  $F \times Cp$  è quello che chiamo di ENERGIA (enfasi nell'originale).*

Nella sequenza del libro, Varignon chiarisce quello che si intende per energie affermative e energie negative di modo a, infine, enunziare la proposizione generale (accennata sopra) di Bernoulli. È curioso osservare che quest'uso del termine "energia" (ancora associato ad una potenza) compare più di un secolo prima dell'enunciato generale della conservazione dell'energia, che dovrebbe ancora aspettare lo stabilimento dell'esistenza di un equivalente meccanico per il calore. Qui entra in scena, ancora una volta, il concetto di lavoro.

<sup>11</sup>P. Varignon, *Nouvelle mécanique ou statique, dont le projet fut donné en M. DC. LXXXVII* (Jombert, Paris, 1725), p. 174.

<sup>12</sup>P. Varignon, op. cit., pp. 175–176.

### 2.2.1 Il teorema del lavoro – forza viva

Nell'opera di Lazare-Nicolas-Marguerite Carnot (1753 – 1823), ingegnere militare<sup>13</sup>, allievo di d'Alembert e padre di Sadi Carnot – figura centrale nella storia della termodinamica –, è possibile trovare un'espressione matematica per il principio di conservazione della forza viva, in una forma che più tarde sarebbe nota come il teorema del lavoro-energia cinetica (o, semplicemente, come teorema dell'energia cinetica).

Questa formulazione fu presentata nell'opera *Essai sur les machines en général* (Saggio sulle macchine in generale), del 1783, in seguito riconosciuto come il primo testo di ingegneria meccanica e di meccanica applicata alle macchine, che è il risultato di un'altra opera, proposta da Carnot come risposta ad una sfida dell'Accademia di Scienze di Parigi, per mezzo di un concorso che premiava lo studio del tema della macchine semplici e dell'attrito. Il testo sottoposto da Carnot non è stato il vincitore (ha ricevuto la menzione d'onore; il vincitore è stato Coulomb, con una dissertazione sull'attrito<sup>14</sup>). L'altro testo che avrebbe ricevuto soltanto una menzione d'onore, adesso come risposta ad una sfida dell'Accademia di Berlino, fu la base del lavoro, pubblicato nel 1797: *Réflexions sur la métaphysique du calcul infinitesimal* (Riflessioni sulla metafisica del calcolo infinitesimale). La formulazione del principio di continuità del principio della forza viva affermava che una condizione di massima efficienza di una macchina accadeva quando la potenza fosse trasmessa senza percussione o turbolenza.

Carnot chiama di *momento di attività* quella quantità che, più tarde, nel 1829, Coriolis chiamerà di *lavoro*, dopo aver introdotto il fattore  $1/2$  nella forza viva. La definizione di Carnot stabilisce che<sup>15</sup>:

*Se una forza  $P$  si applica con la velocità  $u$ , e se l'angolo formato tra  $u$  e  $P$  è  $z$ , la quantità  $P \cos z u dt$ , nella quale  $dt$  designa l'elemen-*

<sup>13</sup>E importante figura nella storia della Francia. Egli ha rimodellato gli eserciti rivoluzionari francesi, trasformandoli in una forza di combattente efficiente. Era l'unico generale di Napoleone che non aveva subito una sconfitta. Per le sue prestazioni importanti, fu chiamato di "organizzatore della vittoria".

<sup>14</sup>C. C. Gillespie, LAZARE CARNOT, in *Dictionary of Scientific Biography* (Charles Scribner's Sons, New York, 1970-1980).

<sup>15</sup>L. Carnot, *Essai sur les machines en général* in *Ouvres mathématiques du citoyen Carnot* (J. Decker, Paris, 1797), p. 69.



*to di tempo, sarà chiamata di MOMENTO DI ATTIVITÀ consumato dalla forza  $P$  durante  $dt$  (enfasi nell'originale).*

Un po' più avanti, trattando dell'equilibrio di una macchina, Carnot afferma che "è sufficiente provare che se si abbandona questa macchina a se stessa, il centro di gravità non scende più nell'equilibrio". È chiaro in queste riflessioni l'uso dell'assioma di Torricelli, legato al moto del centro di gravità nella caduta libera dei corpi formati da altri corpi di massa minore.

In diversi punti dell'opera, Carnot identifica il lavoro (il momento di attività) con l'energia cinetica (senza però usare questi termini, ancora riferendosi all'antico termine *vis viva*). Un brano rappresentativo dell'opera è molto esplicito a riguardo<sup>16</sup>:

*Siccome  $1/2MW^2$  o  $MgH$  è il momento di attività, prodotto da una carica  $Mg$ , sollevata ad un'altezza  $H$ , ne segue evidentemente che COMUNQUE SIA LA MANIERA USATA PER SOLLEVARE UNA CERTA CARICA AD UN'ALTEZZA ASSEGNATA, LE FORZE IMPIEGATE PER PRODURRE L'EFFETTO CONSUMANO UN MOMENTO DI ATTIVITÀ CHE È UGUALE AL PRODOTTO DI QUESTI PESI PER L'ALTEZZA ALLA QUALE FU SOLLEVATA LA CARICA (enfasi nell'originale).*

In questo brano,  $M$  denota la massa e  $g$  l'accelerazione della gravità (il prodotto  $Mg$  rappresenta una carica o un peso che funziona come carica o forza motrice), mentre  $W$  è la velocità istantanea. L'identificazione dei due termini di un'uguaglianza è immediata: egli definisce la metà della forza viva come il momento di attività (per noi, adesso, il lavoro). In generale, Carnot introduce questi concetti in un contesto di analisi delle prestazioni di queste macchine, per la cui comprensione contribuì in maniera inegabile. Nel 1803 pubblicò un'altra grande opera, i *Principles généraux de l'équilibre et du mouvement* (Principi generali dell'equilibrio e del moto), nel quale ha introdotto un concetto che, nella meccanica che si sviluppò dopo, verrebbe identificato allo spostamento virtuale.

Alcune anni dopo, Gaspard-Gustave Coriolis (1792 – 1843), nato a Parigi, che è entrato nel 1808 nell'École Polytechnique, passò in quella di Ponti e

<sup>16</sup>*Ibid.*, pp. 85-86.



Strade e nel 1815 ne uscì ingegnere, pubblicò nel 1829 un'opera intitolata *Du calcul de l'effet des machines* (Sul calcolo dell'effetto delle macchine), che fu ristampato postumo nel 1844 col titolo *Traité de la mécanique des corps solides* (Trattato della meccanica dei corpi solidi). Quest'opera rappresentò una contribuzione rilevante per consolidare e per usare, soprattutto in maniera applicata, il concetto di lavoro. Nelle prime righe dell'opera la sua intenzione è già chiaramente manifesta<sup>17</sup>:

*Io mi son proposto di presentare in quest'opera tutte le considerazioni generali che tendono a chiarire le questioni riguardanti all'economia di quello che è comunemente chiamato di FORZA o POTENZA MECCANICA, e di fornire i mezzi per riconoscere facilmente quali sono i vantaggi e gli inconvenienti di certi procedure durante la costruzione di una macchina (enfasi nell'originale)..*

Di seguito, lui introduce una terminologia di grande utilità, menzionando le nuove denominazioni – il che, di per se, rappresenta un avanzo nel chiarimento del concetto – delle quantità che lui userà nell'opera. Dice lui<sup>18</sup>:

*Ho impiegato in quest'opera alcune denominazioni nuove: io designo con il nome di LAVORO la quantità che uno chiama assai comunemente di POTENZA MECCANICA, QUANTITÀ DI AZIONE o EFFETTO DINAMICO, ed io propongo il nome di DYNAMODE per l'unione di queste quantità [...]. Io mi son permesso, ancora, una piccola innovazione nel chiamare di forza viva FORZA VIVA il prodotto del peso per l'altezza dovuta alla velocità. Questa forza viva non è altro se non la metà del prodotto che è designato finora con questo nome, ossia, (il prodotto) della massa per il quadrato della velocità (enfasi nell'originale).*

Coriolis considera che se la forza è  $F$  e  $P$  è la componente della forza lungo l'arco definito da  $ds$ , essendo  $\delta$  l'angolo formato tra la forza e l'elemento d'arco  $ds$ , allora  $P = F \cos \delta$ . Quindi  $Pds = F \cos \delta ds$ . D'altra parte, se  $df$  è la

<sup>17</sup>G. G. Coriolis, *Du calcul de l'effet des machines* (Carlian-Goeury, Paris, 1829), p. I.

<sup>18</sup>*Ibid.*, p. III.

proiezione dell'arco  $ds$  lungo la direzione della forza  $F$ , allora  $Pds = Fdf$  e, di conseguenza,  $\int Pd = \int Fdf$ . Ora, dice egli, l'espressione *quantità di azione* che alcuni geometri usano per designare la quantità  $\int Pds$  ha l'inconveniente di involvere la parola azione. Questo, a sua volta, ci fa pensare all'accezione di forza (per conto dei termini azione e reazione). Similmente, il termine *potenza meccanica* è inconveniente perché la parola potenza si troverebbe destituita del suo significato ordinario. Allora, lui propone una nuova denominazione<sup>19</sup>:

*Noi proponiamo la denominazione di LAVORO DINAMICO, o semplicemente di LAVORO, per la quantità  $\int Pds$  definita come abbiamo detto (enfasi nell'originale).*

Egli, ugualmente, ha bisogno di chiarire quello che comprende, di fatto, per il termine forza viva<sup>20</sup>:

*Per quanto riguarda la denominazione di forza viva, data finora alle quantità nella forma  $pv^2/g$ , cioè, al prodotto della massa per il quadrato della velocità – noi la conserveremo soltanto per non introdurre nuovi termini –, noi applicheremo questa denominazione alla metà di questo prodotto, di modo che la forza viva sarà il prodotto della massa per la metà del quadrato della velocità. Questa piccola modificazione nell'uso antico introdurrà maggiore semplicità negli enunciati dei principi che dovremo presentare.*

Dopo questi chiarimenti, troveremo un enunciato del teorema del lavoro – energia cinetica<sup>21</sup>, rappresentato dall'equazione

$$\sum \int Pds - \sum \int P'ds' = \sum \frac{pv^2}{2g} - \sum \frac{pv_0^2}{2g},$$

nella quale  $v_0$  designa la velocità di un punto qualsiasi del sistema negli istanti iniziali e  $v$ , la velocità finale di questo stesso punto. Il lato sinistro dell'equa-

<sup>19</sup>*Ibid.*, p. 17.

<sup>20</sup>*Ibid.*

<sup>21</sup>La denominazione più adatta, qui, dovrebbe essere teorema del lavoro – forza viva, giacché Coriolis impiega ancora l'espressione forza viva per designare quello che oggi conosciamo come energia cinetica. Il termine *energia cinetica* sarà impiegato da Lord Kelvin, in sostituzione alla designazione di "energia attuale o sensibile", proposta da Rankine, nel 1853.

zione rappresenta la somma dei lavori elementari delle forze che sono applicate ai differenti punti del sistema. Prosegue Coriolis<sup>22</sup>:

*Utilizzando le denominazioni che abbiamo appena stabilito, possiamo enunciare come segue: IN QUALSIASI SISTEMA DI CORPI IN MOTO, LA DIFFERENZA TRA LA SOMMA DELLE QUANTITÀ DI LAVORO DOVUTE ALLE FORZE MOTRICI E LA SOMMA DELLE QUANTITÀ DI LAVORO DOVUTE ALLE FORZE RESISTENTI, DURANTE UN CERTO TEMPO, È UGUALE ALLA VARIAZIONE DELLA SOMA DELLE FORZE VIVE DE TUTTE LE MASSE DEL SISTEMA DURANTE LO STESSO TEMPO (enfasi nell'originale).*

Le principali idee considerate fin qui attestano la preoccupazione degli ingegneri francesi, tra i quali dobbiamo menzionare ancora Claude Louis-Marie-Henri Navier (1785 – 1836) e Jean-Victor Poncelet (1788 – 1867), con la performance delle macchine. Ma, perché questa performance fosse veramente compresa e, soprattutto, migliorata, il punto di vista della meccanica razionale e tutto il suo formalismo si mostrerebbero non soddisfacenti. La termodinamica si consoliderà a partire dallo studio dei problemi reali coinvolgendo il rendimento e la performance delle macchine termiche, sulle quali fu costruita la cosiddetta prima Rivoluzione Industriale. In questo scenario, diventano molto importanti le idee pionieri che suggeriscono una inter-conversione tra calore e lavoro. Questa inter-conversione (o equivalenza) è quella che tornerà possibile l'enunciato di una conservazione generalizzata di tutte le forme di energia, che sarà l'oggetto di questa parte finale del capitolo.

### 2.2.2 Mayer e la conservazione dell'energia

Secondo lo storico Y. Elkana, il primo autore a interessarsi alla storia della scoperta del principio di conservazione dell'energia, nel secolo XX, fu l'inglese George Sarton. Egli attribuisce la scoperta del principio al lavoro di "due geni", il tedesco Julius Robert Mayer (1814 – 1878) e l'inglese James Prescott Joule (1818 – 1889)<sup>23</sup>:

---

<sup>22</sup>G. G. Coriolis, op. cit., p. 18.

<sup>23</sup>G. Sarton, *The Discovery of the Law of Conservation of Energy*, Isis, 13 (1929), p. 19.

*La scoperta dell'esistenza di una relazione invariabile tra calore e lavoro fu fatta indipendentemente e quasi che allo stesso tempo da due uomini che erano l'opposto l'uno dell'altro e i cui processi di pensiero erano tanto diversi quanto la loro personalità.*

Il ruolo del primo, più filosofo secondo Sarton, fu deciso per mezzo di un'intuizione molto forte e repentina che lui ha avuto mentre esercitava la professione di medico in una nave. Questa scoperta, paragonabile a una conversione religiosa, ha determinato il corso posteriore della sua vita, che passerebbe a essere dedicata alla migliore comprensione e sviluppo di questa idea. Il brano è celebre e merita di essere riprodotto<sup>24</sup>:

*J. R. Mayer era un medico tedesco con scarse conoscenze di fisica e di matematica. Durante il suo servizio come medico di bordo su una nave olandese scoprì, per un'intuizione improvvisa, la legge della conservazione dell'energia. Questa grande scoperta, paragonabile per la sua subitanità a una conversione religiosa, ebbe luogo mentre egli si trovava nel porto di Surabaja (Giava nord-orientale) nel luglio del 1840..*

Mayer avrebbe osservato che nei tropici il sangue venoso dei marinai europei si presentava con un colore rosso più vivo. Questo sarebbe il segno della presenza di più ossigeno nel sangue. E questo accadrebbe perché la temperatura nei tropici è più alta che nel continente europeo. Così, una minore produzione di calore sarebbe sufficiente per mantenere il corpo a una temperatura costante, e esso rallenterebbe il suo ritmo, richiedendo meno ossigeno per realizzare la combustione chimica degli alimenti. Di conseguenza, più ossigeno rimarrebbe e il sangue diverrebbe più brillante.

Ma cosa infatti quest'osservazione ha a che vedere con la conservazione dell'energia?

È solito affermare che essa avrebbe condotto Mayer alla speculazione circa una possibile relazione fra il calore animale e le reazioni chimiche<sup>25</sup>. Questo è particolarmente curioso perché sembra che il sangue venoso non sia di un rosso

---

<sup>24</sup> *Ibid.*

<sup>25</sup> Cf. G. Holton and S. G. Brush, op. cit., p. 269.

più brillante nei tropici<sup>26</sup>! Ad ogni modo, la stretta veracità di questa osservazione forse non è molto importante, perché quello che in effetti importa è che essa sarebbe stata la motivazione che condusse Meyer a pensare nel problema, a intuire il ruolo del calore animale e a proporsi ad affrontare il problema dell'equivalenza tra le diverse forme dell'energia. Fu questo probabilmente il punto di partenza di un'opera che l'ha condotto ad alcune conclusioni decisive per lo stabilimento del principio di conservazione dell'energia nella sua forma più generale.

Riassumendo, sembra avere un certo consenso fra gli storici nell'ammettere che la costruzione concettuale del principio di conservazione dell'energia, nell'opera di Meyer, incomincia con l'analisi di un fenomeno fisiologico: l'osservazione del colore del sangue nei paesi tropicali.

Nel 1841, anno del suo ritorno dal viaggio, Mayer inviò al periodico *Annalen der Physik und Chemie* un articolo contenendo le idee di base sulla inter-conversione (equivalenza) tra calore e lavoro, suggerendo l'equivalenza e conservazione generale di tutte le forme dell'energia.

L'articolo *Über die quantitative und qualitative Bestimmung der Kräfte* (Sulla determinazione quantitativa e qualitativa delle forze) contiene l'argomento che propone una *Erhaltungssatz der Kraft*, cioè, una specie di legge di conservazione per l'energia. Mayer, però, non aveva una formazione più rigorosa in fisica; il lavoro mancava di un migliore fondamento e non fu pubblicato (non è stato nemmeno restituito all'autore!)<sup>27</sup>.

Mayer, tuttavia, continuò a perseguire l'idea con fermezza e l'ha discusso con il professore di fisica Johann Gottlieb Nörrenberg (1787 – 1862), dell'Università di Tubingen. Anche se rigettasse l'ipotesi di Mayer, questo professore li ha fatto dei suggerimenti preziosi, indicandogli anche come la questione potrebbe essere affrontata sperimentalmente. Questo è un aspetto cruciale del problema e verrà considerato da Mayer in una versione più corta di quel testo.

La nuova versione fu inviata, nel 1842, al chimico Justus von Liebig (1803-1873) che, insieme a Friedrich Wöhler(1800-1882), era l'editore della rivista

---

<sup>26</sup> *Ibid.*

<sup>27</sup> L'assenza di un migliore fondamento può essere stata in effetti il motivo principale perché l'editore della rivista, il noto fisico Johann Christian Poggendorff (1796 – 1877), lo bocciasse. L'articolo sarà trovato tra gli oggetti di Poggendorff trentasei anni dopo.

*Annalen der Chemie und Pharmacie*. L'articolo viene accettato e ha per titolo: *Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur* (Osservazioni sulle forze della natura inanimata). Le prime parole dell'articolo sono<sup>28</sup>:

*Il fine delle righe seguenti è quello di tentare di rispondere alla domanda su che cosa dobbiamo intendere con il vocabolo "forze" (Kräfte) e in che modo esse si comportino fra loro. Mentre designando un oggetto come materiale gli si attribuiscono già determinate proprietà, come il peso e l'estensione spaziale, alla denominazione di forza (Kraft) si associa di preferenza il concetto dell'ignoto, del non indagabile, dell'ipotetico.*

Nel brano più citato di quest'articolo di Mayer, che è quello in cui lui usa un ragionamento qualitativo, fortemente basato nelle sue intuizioni di "filosofo", come gli ha chiamato G. Sarton, si trova uno sforzo per definire cosa sono queste forze (Kräfte)<sup>29</sup>:

*Le forze (Kräfte) sono cause; di conseguenza trova piena applicazione in esse il principio: causa aequat effectum (la causa è uguale all'effetto). Se la causa  $c$  ha l'effetto  $e$ , allora  $c=e$ ; se  $e$  è a sua volta la causa di un altro effetto  $f$ , abbiamo che  $e=f$  e così via:  $c=e=f=...=c$ . In una catena di cause e di effetti, nessun membro o nessuna parte di membro può diventare nullo, come appare chiaro dalla natura di un'equazione. Designiamo come indistruttibilità questa prima proprietà di tutte le cause. [...] se, dopo aver prodotto (l'effetto)  $e$ , ancora permane la (causa)  $c$  nel tutto o in parte, ci devono essere altri effetti ( $f, g, \dots$ ) corrispondenti alla causa che ancora rimane. Di conseguenza, una volta che  $c$  si ha convertito in  $e$ , e  $e$  in  $f$ , ecc. dobbiamo considerare queste grandezze come forme differenti con le quali una medesima entità si manifesta. Questa capacità di assumere forme distinte è la seconda proprietà essenziale di tutte le cause. Considerando insieme entrambi le proprietà,*

---

<sup>28</sup>J. R. Mayer, *Annalen der Chemie und Pharmacie*, **43**, 233 (1842). Usiamo in parte la traduzione di Y. Elkana, op. cit. p. 161. Si veda anche la versione inglese di G. C. Foster: *Remarks on the Forces of Inorganic Nature*, *Philosophical Magazine* 4 24, 371 (1862).

<sup>29</sup>*Ibid.*

*possiamo dire che le cause sono oggetti (quantitativamente) indistruttibili e (qualitativamente) convertibili... Le forze sono, perciò, oggetti imponderabili, indistruttibile e convertibili (in italico nell'originale).*

Il fatto che queste forze (energie) siano o non cause è molto discutibile, così come è discutibile la logica impiegata da Mayer. Tuttavia, questa è chiaramente una affermazione dell'equivalenza di tutte queste "cause" e, implicitamente (diventando più esplicita nella continuazione dell'articolo) una equivalenza tra le diverse forme di energia. Più specificamente, c'è una equivalenza stabilita fra la forma di energia nota come forza di caduta e moto (diciamo oggi: potenziale e cinetica, ma questi termini, come abbiamo detto sopra, saranno introdotti più tardi, nelle opere di Rankine e Kelvin) e il calore.

*In innumerevoli casi vediamo che il moto cessa senza avere causato altro moto o senza il sollevamento di un peso; però, la forza, una volta che esista non può essere annichilata, essa può soltanto cambiare la sua forma; e, perciò, sorge la questione: che altra forma la forza può assumere, oltre a quelle con le quali siamo familiarizzati, come la forza di caduta e moto? Soltanto l'esperienza può condurci ad una soluzione su questo punto. [...] Se, ad esempio, strofiniamo due placche di metallo, vedremo che il moto scompare e il calore, d'altra parte, compare; e dobbiamo adesso domandare soltanto se il moto è la causa del calore; il moto non ha altro effetto se non quello di produrre il calore, e il calore (non ha) alcuna altra causa che non il moto.*

Avendo stabilito, pertanto, questa equivalenza tra le forme di energie note e il calore, Mayer arriva alla parte conclusiva del lavoro con una domanda di grande importanza, ossia, "che quantità di calore corrisponde a una determinata quantità di energia di moto o di forza di caduta (cinetica e potenziale)?"

La risposta sarà data da lui nei lavori successivi. In particolare, nell'articolo *Die organische Bewegung im Zusammenhang mit dem Stoffwechsel* (Il moto organico in connessione al metabolismo), del 1845, lui ottiene il valore (riportato qui in unità più recenti) di 365 kgf.m/kcal, per quello che più tardi



sarebbe denominato di equivalente meccanico. Dopo, lui otterrà anche il valore di 425 kgf.m/kcal. Il valore più accettato attualmente é di 4.184 kJ/kcal (o 426.6 kgf.m/kcal).

In linee generali, l'equivalenza tra le forme di energie che erano note stava stabilita e, oltre a questo, tenendo presente il forte argomento di Mayer circa l'indistruttibilità di quelle "cause" e della loro interconversione, stava stabilito anche il principio di conservazione di queste forze (Kräfte), o il principio di conservazione dell'energia. L'uso di questo termine (Kraft) con il senso di "energia" non era ancora chiaro, evidentemente. Se ci riportiamo alla prima delle citazioni di Mayer che abbiamo riprodotto, potremo vedere che lui opta per affermare che il termine "forza", diversamente dal termine "materia", era molto più ambiguo. Torneremo a questo punto più avanti.

Mayer ha continuato a lavorare intensamente nella difesa dei suoi punti di vista, che furono lapidati nei lavori successivi e estesi ad altri contesti scientifici, nella biologia, nella chimica e anche nell'astronomia. Comunque, poca attenzione fu rivolta al suo lavoro nei primi anni. Questo è particolarmente curioso perché altri scienziati si occupavano di problemi simili in quell'epoca. Il riconoscimento verrebbe più tardi, stimolato soprattutto dagli sviluppi stessi nella scienza e da una maggiore comprensione dei problemi relativi al calore. Si deve aggiungere a questa mancanza di riconoscimento la perdita di due dei suoi figli, in un corto periodo di tempo, durante l'anno di 1848.

Dopo tutto questo, lui ha tentato il suicidio e è finito per essere ricoverato in una istituzione per malati mentali, dove ha speso più di un anno, uscendo nel 1854. Più tardi, testimoniò il riconoscimento gradativo in diversi circoli importanti<sup>30</sup>. Ricevette un dottorato onorario dalla Università di Tubingen, nel 1859. Il valore della sua opera fu sottolineato in maniera decisa soprattutto da John Tyndall (1820 – 1893), dopo le conferenze nella *Royal Institution*, di Londra<sup>31</sup>.

Mayer morì di tubercolose il 20 marzo 1878, in Heilbronn, la stessa città in

---

<sup>30</sup>Cf. K. L. Caneva, *Robert Mayer and the Conservation of Energy* (Princeton University Press, Princeton, 1993).

<sup>31</sup>Cf. J. Tyndall, *Heat considered as a mode of motion* (D. Appleton and Company, New York, 1862). Trattasi di un corso basato su dodici lezioni tenute alla *Royal Institution* nell'anno di 1862.



cui è nato nella Germania.

### 2.2.3 L'opera di Joule

James Prescott Joule nacque a Salford, vicino a Manchester, in Inghilterra, nella vigilia di Natale del 1818. Era figlio di un prospero birraio della regione e fu educato a casa fino a sedici anni. A diciassette, insieme al fratello, è andato a studiare sotto la supervisione del grande chimico John Dalton (che è dovuto andare in pensione, due anni dopo, perché ha subito un accidente vascolare celebrale!). A dispetto di questo poco tempo insieme, sembra che il periodo abbia avuto una certa importanza per risvegliarli l'interesse per la scienza. Si aggiunga a questo il fatto che Joule era indipendente dal punto di vista economico. Così, occuparsi di scienza rappresentava per lui, in quelli anni iniziali, più una specie di divertimento.

Nel 1838, a vent'anni, lui ha trasformato una delle camere della casa paterna in un laboratorio, dove ha incominciato le sue investigazioni sperimentali. Ancora in quell'anno ha pubblicato il suo primo (e corto) articolo scientifico, anche se il primo articolo importante pubblicato da lui sia stato presentato alla *Royal Society* soltanto nel 1842<sup>32</sup>. In questo lavoro, lui ha mostrato che il tasso con il quale il calore è generato da una corrente elettrica in un conduttore è proporzionale al quadrato della corrente, essendo la costante di proporzionalità nientemeno che la resistenza del conduttore<sup>33</sup>. A ventidue anni, incominciò sul serio le investigazioni che occuperebbero la maggior parte della sua vita!

Negli anni successivi, Joule continuerà a realizzare una serie di esperimenti legati al calore e agli effetti termici. La motivazione per questo lavoro veniva dettata da convinzione che quando il lavoro meccanico si converte in calore, comunque siano le circostanze, il rapporto fra il lavoro compiuto e il calore sviluppato (prodotto) ha un valore costante e misurabile. Alla fine di questo periodo, lui pubblicò dei valori più precisi per l'equivalente meccanico di questa

---

<sup>32</sup>Cf. M. H. Shamos (ed), *Great Experiments in Physics* (Dover Publications, New York, 1959), p. 168.

<sup>33</sup>J. P. Joule, *On the heat evolved by metallic conductors of electricity in the cells of a battery during electrolysis*, *Philosophical Magazine* XIX, 260 (1841). Il lavoro si trova riprodotto nei *Scientific Papers of James Prescott Joule*, pubblicati dalla *Physical Society of London*, 1884, p. 65. D'ora in poi, le citazioni dei lavori di Joule si riferiscono a quest'edizione.

conversione. Nel frattempo, ci sono dei risultati importanti, comunicati con una certa frequenza alla *Royal Society*.

Nel 1843 annunciò i primi risultati trovati per il rapporto tra il lavoro meccanico necessario per far funzionare un generatore elettrico e il calore prodotto dalla corrente elettrica. Scrisse lui<sup>34</sup>:

*La quantità di calore capace di aumentare la temperatura di una libbra di acqua di un grado nella scala di Fahrenheit è uguale a, e può essere convertita in, una forza meccanica capace di sollevare 838 libbre ad un'altezza verticale di un piede.*

Questa prima stima fornisce, in unità attualmente impiegate, un equivalente meccanico tale che ad una caloria devono corrispondere 4.51 joules<sup>35</sup>. In un post scriptum a questo stesso articolo, lui diceva<sup>36</sup>:

*Saremo obbligati ad ammettere che il conte Rumford stava certo quando ha attribuito il calore prodotto nella perforazione dei cannoni alla frizione e non (in ogni grado considerevole) a qualsiasi cambiamento nella capacità del metallo. Recentemente, ho provato sperimentalmente che il calore è prodotto dal passaggio dell'acqua attraverso tubi stretti. [...] Io, così, ho ottenuto un grado di calore per ogni libbra da una forza meccanica capace di sollevare circa 770 libbre all'altezza di un piede, un risultato che permette una forte conferma delle nostre deduzioni precedenti.*

<sup>34</sup>No trabalho *On the calorific effect of Magneto-Electricity, and the Mechanical Value of Heat* (Sull'effetto calorifico della magneto-elettricità, e il valore meccanico del calore), *Philosophical Magazine XIX*, pp. 263, 347 e 435 (1843). Cf. *Scientific Papers of James Prescott Joule*, op. cit., p. 156.

<sup>35</sup>L'anacronismo qui è voluto, perché usiamo una unità di energia che, ovviamente, non esisteva al tempo di Joule. Inoltre, il suo nome fu associato all'unità di energia (nel Sistema Internazionale) come un omaggio meritato per i suoi sforzi nel misurarla in maniera precisa. Per una comprensione più dettagliata di questi numeri, facciamo valere l'anacronismo già commesso e usiamo i valori e le espressioni attualmente accettati per le grandezze che compaiono nel lavoro di Joule. Prenderemo allora i seguenti numeri: 1 lb = 0.4536 kg, 1 piede = 0.3048 m, 1 F = 5/9 K e  $g = 9.8067 \text{ m/s}^2$ . Considerando il calore specifico dell'acqua alla pressione di 1 atm come  $c = 1 \text{ cal/gK}$ , avremo  $Q = 453.6 \text{ g} \times 1 \text{ cal/gK} \times 5/9 \text{ K} \approx 252 \text{ cal}$ . D'altra parte, la "forza meccanica" necessaria per sollevare la massa all'altezza di 1 piede sarebbe data da  $E_p = 838 \times 0.4536 \text{ kg} \times 9.8067 \text{ m/s}^2 \times 0.3048 \text{ m} \approx 1136 \text{ J}$ . Il rapporto fra queste due quantità fornisce il valore approssimato di 4.51 J/cal.

<sup>36</sup>*Scientific Papers of James Prescott Joule*, op. cit., p. 157.

Questa nuova stima corrisponde, nelle nostre unità attuali, ad un equivalente di 4.14 joules/cal. A questo punto, curiosamente, irrompi il cosiddetto spirito di “metrologista”, che lo storico George Sarton attribuisce a Joule, quanto contrappone il suo carattere a quello di Mayer. Lui si riferisce a Joule affermando che il “il suo interesse principale risiedeva nelle misure esatte e il suo genio speciale si è rivelato principalmente nell’invenzione dei metodi che permettevano di ottenere una precisione sempre maggiore negli esperimenti quantitativi”<sup>37</sup>.

Nell’articolo che stiamo analizzando, Joule non sembra preoccupato nel pronunciarsi sulla natura del calore o di continuare i suoi esperimenti nella linea di ricerca sviluppata da Rumford. Lui accetta l’equivalenza e va avanti, cercando di stabilirla in basi quantitative<sup>38</sup>:

*Non perderò tempo ripetendo e estendendo questi esperimenti, perché sono soddisfatto che gli agenti della natura siano, per volontà del Creatore, INDISTRUTTIBILI; e che quanto la forza meccanica si consuma, si ottiene SEMPRE una quantità equivalente di calore (enfasi nell’originale).*

La sua ricerca va avanti. Nel 1847, lui ottiene il valore di 4.20 joules/caloria; nel 1850, lui pubblica una memoria nelle *Philosophical Transactions* che contiene il suo valore più preciso per l’equivalente meccanico del calore, che è di 4.15 joules/caloria, includendo il famoso esperimento con le palette, il “mulinello di Joule” (si veda la Fig. 2.1)<sup>39</sup>.

*Io considero che 772.692, l’equivalente derivato dalla frizione dell’acqua, è il più corretto, tanto per il numero degli esperimenti analizzati quanto per la grande capacità dell’apparato per il calore [...] concluderò, così, considerando come dimostrato dagli esperimenti contenuti nell’articolo 1) CHE LA QUANTITÀ DI CALORE PRODOTTA DALLA FRIZIONE DEI CORPI, SIANO SOLIDI O LIQUIDI, È SEMPRE PROPORZIONALE ALLA QUANTITÀ DI FORZA IMPIEGATA E 2) CHE LA QUANTITÀ DI CALORE PRODOTTA CAPACE DI AUMENTARE LA*

<sup>37</sup>G. Sarton, op. cit., p. 21.

<sup>38</sup>*Scientific Papers of James Prescott Joule*, op. cit., pp. 159–160.

<sup>39</sup>*Ibid.*, p. 328.

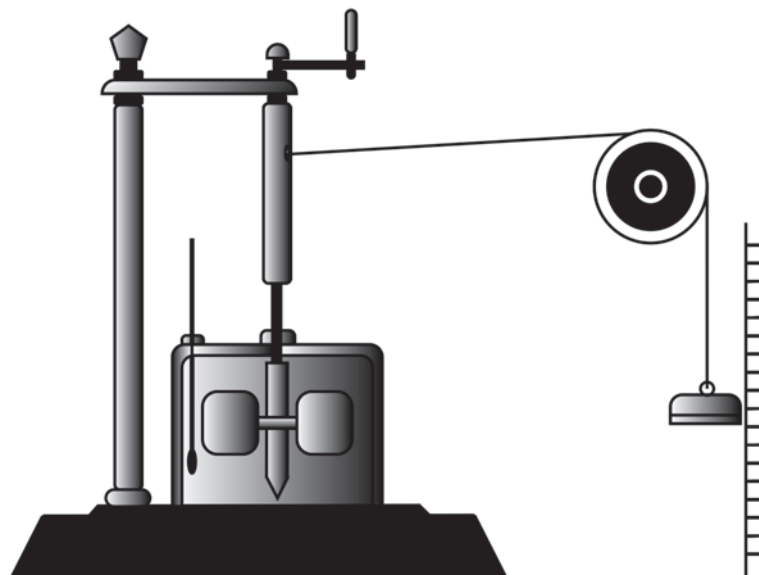


Figura 2.1: Riproduzione libera dell'apparato di Joule per la misura dell'equivalente meccanico del calore.

TEMPERATURA DI UNA LIBBRA DI ACQUA (PESATA NEL VUOTO, E PRESA TRA  $55^{\circ}$  E  $60^{\circ}$ ) DI  $1^{\circ}$  F, RICHIEDE PER IL SUO SOLLEVAMENTO IL CONSUMO DI UNA FORZA MECCANICA RAPPRESENTATA DALLA CADUTA DI 772 LIBBRE DA UN'ALTEZZA DI 1 PIEDE (*enfasi nell'originale*).

Nel 1850, dopo dieci anni di attività, Joule ha visto i suoi lavori essendo presi più a serio, ma l'accettazione iniziale, a esempio di quello accaduto con Mayer Mayer, non fu entusiasmante. Un episodio particolare illustra bene questa mancanza iniziale di interesse per i suoi risultati.

Nel 1847, mentre faceva una comunicazione orale dei suoi esperimenti durante una riunione della *British Association*, a Oxford, il presidente della sessione li ha chiesti una "breve descrizione orale" perché le sue comunicazioni precedenti "non avevano destato l'attenzione generale"... "Io ho proceduto in quella maniera, e siccome la discussione non avveniva, (la mia presentazione) avrebbe passato senza commenti se non si fosse alzato un giovane e creato, con

le sue intelligenti osservazioni, un vivo interesse per la nostra teoria. Questo giovane era William Thomson” (più tardi, Lord Kelvin).

Questo memorabile incontro fu registrato anche da Lord Kelvin, che lo racconta nella maniera seguente<sup>40</sup>:

*Non dimenticherò mai la British Association a Oxford nel 1847, quando, in una delle sezioni, udii leggere una memoria da un giovane dall'aspetto molto modesto, il quale non tradiva nelle sue maniere alcuna coscienza del fatto che stava spiegando una grande idea. Fui enormemente colpito da quella comunicazione. Pensai dapprima che non potesse esser vera, essendo diversa dalla teoria di Carnot, e immediatamente dopo la lettura della memoria scambiai con l'autore James Joule alcune parole che furono l'inizio della nostra quarantennale conoscenza e amicizia. La sera dello stesso giorno quella inestimabile istituzione della British Association che è la “conversazione” ci dette l'opportunità di una buona ora di colloquio e discussione su tutto ciò che ciascuno di noi sapeva di termodinamica. Acquisii idee che non mi erano mai passate prima per la mente e pensavo di avergli suggerito qualcosa di meritevole della sua considerazione quando gli parlai della teoria di Carnot.*

Dopo il 1850, Joule ha condotto una serie di altri esperimenti per determinare l'equivalente meccanico del calore. Tutti questi lavori hanno avuto un ruolo decisivo per l'accettazione di un principio generale di conservazione dell'energia, che incominciava a trovare dei grandi difensori. In quel periodo, ancora, Joule ha realizzato un famoso esperimento in collaborazione con Lord Kelvin che è noto come l'effetto Joule-Thomson. In questo esperimento, si mostra il raffreddamento di un gas dovuto alla separazione delle molecole, nell'espansione, per mezzo di una membrana porosa.

Nel 1878, lui ha determinato, ancora una volta, il peso, in libbre, che può essere sollevato ad un'altezza di un piede da una quantità di calore necessaria per riscaldare, di un grado, una libbra di acqua. È questo numero (772.55)

---

<sup>40</sup>E. C. Watson, *Joule: Only General Exposition of the Principle of Conservation of Energy*, American Journal of Physics 15, (1947), pp. 383-384. Si veda anche Y. Elkana, op. cit., p. 155.

che si trova sopra la pietra tombale di Joule nel Cimitero *Brooklands*, nella città di Sale, vicino a Manchester. La sopra si può leggere anche l'iscrizione dal Vangelo di San Giovanni: "Dobbiamo compiere le opere di colui che mi ha mandato finché è giorno; poi viene la notte, quando nessuno può più operare" (Gv 9, 4).

Nella fine della sua vita, Joule ha avuto dei problemi economici e non ha potuto più svolgere le attività di ricerca per conto suo, come ha sempre fatto. Tuttavia, egli ha potuto testimoniare il riconoscimento al suo lavoro. E anche le generazioni successive l'hanno fatto. La Risoluzione di numero 3, della XX Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (1948), ha stabilito che "l'unità di calore è il joule"<sup>41</sup>.

Molti altri scienziati hanno il loro nomi legati diretta o indirettamente al principio di conservazione dell'energia o, almeno, sono arrivati vicini allo stabilimento in basi solide dei concetti e sperimenti necessari per enunciarlo. Il filosofo Thomas Khun, nell'articolo già citato<sup>42</sup>, menziona dodici di questi nomi come, in qualche modo, conoscitori dell'equivalenza tra calore e lavoro, o come conoscitori della possibilità che queste forme di energia fossero convertibili tra di loro.

L'argomento di Kunh può essere riassunto nella maniera seguente. Tra 1842 e 1847, l'ipotesi di conservazione dell'energia fu pubblicamente enunciata da quattro scienziati in Europa, ossia Julius Robert Mayer (1814 – 1878) e Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821 – 1894), nella Germania; James Prescott Joule (1818 – 1889), in Inghilterra, e Ludwig August Colding (1815 – 1888), in Danimarca.

D'altro lato, Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796 – 1832), prima del 1832, Marc Séguin (1786 – 1875), nel 1839, Gustave-Adolphe Hirn (1815 – 1890), nel 1854 – tutti i tre in Francia – e Karl Holtzmann (1811 – 1865), nel 1845, nella Germania, hanno registrato la loro convinzioni indipendenti che calore e lavoro sono quantitativamente equivalenti. In più, questi hanno fornito un valore numerico per l'equivalente meccanico.

<sup>41</sup> *Comptes rendus de la 9a. CGPM 1949*, 55 (1948).

<sup>42</sup> T. Khun, *Energy conservation as an example of simultaneous discovery*, in M. Clagett (ed.), *Critical Problems in the History of Science* (University of Wisconsin Press, Madison, 1959), p. 321.

Tra 1837 e 1844, Karl Friedrich Mohr (1806 – 1879) e Justus von Liebig (1803 – 1873), nella Germania, William Robert Grove (1811 – 1896) e Michael Faraday (1791 – 1867), in Inghilterra, tutti loro hanno descritto il mondo dei fenomeni come manifestando un'unica “forza” che non poteva essere creata e nemmeno distrutta.

L'ambiente era maturo per il risultato. Si conferma dunque che il periodo che va dal 1840 al 1860 è quello che testimonierà l'avvento del principio di conservazione dell'energia (nella prima decade) e il suo consolidamento e accettazione da un'ampia comunità scientifica in tutto il mondo, da allora in poi.

Nei primi anni dopo i lavori di Mayer e Joule, c'è stata una divisione netta tra le comunità di origine tedesca e inglese rispetto alla priorità dell'idea di conservazione generalizzata dell'energia. All'inizio, il principale partner di Joule era egli stesso, che affermò<sup>43</sup>:

*Né negli scritti di Séguin (1839) né in quelli di Mayer, del 1842, si trovano le prove che fossero sufficienti per la sua ammissione, senza un'investigazione ulteriore. [...] Sembra che Mayer se sia affrettato nel pubblicare le sue teorie con il proposito espresso di assicurarsi la priorità. Non ha aspettato fino a poter appoggiarla con i fatti. Mia marcia, al contrario, fu pubblicare soltanto le teorie che avevo comprovato sperimentalmente prima di presentarle al pubblico scientifico, convinto che ero della veracità dell'osservazione di Sir J. Herschel, quando diceva: “le generalizzazioni affrettate sono la rovina della scienza”.*

Ma Joule non rimane senza una specie di “risposta” dalla parte dei tedeschi. È Helmholtz chi risponderà, invocando le grandi linee del suo pensiero circa quello che credeva fosse l'obiettivo finale di tutta la scienza naturale, ovvero, “la scoperta delle cause ultime imutabili di tutti i fenomeni naturali”. Anche se Helmholtz, nel suo lavoro, parli sempre di una postura empirica, la sua posizione infatti riflette l'importanza della ricerca dei principi generali, che lui

---

<sup>43</sup>Cf. G. Holton and S. G. Brush, op. cit., pp. 274-275.

ha ereditato dalla tradizione tedesca di pensiero, da Leibniz, Kant e Fichte. Afferma Helmholtz<sup>44</sup>:

*Il progresso della scienza naturale dipende da che le nuove idee (teorie) possano dedursi continuamente dai fatti di cui si dispone; e che le conseguenze di queste idee, per quanto riguarda i nuovi fatti, possano comprovarsi sperimentalmente.[...] Però, la fama dello scoprimento appartiene a colui che ha trovato la nuova idea; la parte sperimentale rappresenta un tipo di conquista molto meccanico. Neanche si può richiedere che l'inventore di un'idea sia obbligato ad effettuare la seconda parte dell'impresa. Se fosse così, dovremmo dimettere la maggior parte dei fisici e matematici.*

Per capire meglio i termini che compaiono nella disputa, noi ci occuperemo, nella prossima sezione, dell'opera di Helmholtz dedicata alla conservazione dell'energia. In effetti, secondo Y. Elkana, c'è un consenso che sia stato Helmholtz il primo a formulare matematicamente, in tutta la sua generalità, il principio di conservazione dell'energia. È a lui che si deve il concetto di energia come oggi lo conosciamo<sup>45</sup>.

#### 2.2.4 Helmholtz e la conservazione della “Kraft”.

Il fisiologista, fisico e matematico tedesco, Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821 – 1894) ha fatto quello che né Mayer, né Joule nemmeno hanno provato: dimostrare, matematicamente, la validità del principio di conservazione dell'energia nei distinti campi (meccanica, calore, elettricità, magnetismo, fisica-chimica e astronomia).

Helmholtz nacque a Potsdam, vicino a Berlino, il 31 agosto del 1821. Ottiene un master nel 1842 e diventa professore a Königsberg (terra di Kant), Bonn, Heidelberg e, finalmente, a Berlino, dove è andato quando fu chiamato ad occupare il posto rifiutato da Gustav Kirchhoff. Nei suoi anni finali, a Berlino, ha assunto un importante ruolo nella scienza tedesca. Le sue più grande

---

<sup>44</sup>*Ibid.*

<sup>45</sup>Y. Elkana, op. cit., p. 26.



contribuzioni alla scienza si trovano nella medicina, fisiologia, ottica, acustica, matematica, meccanica e elettricità.

Dal suo padre, ammiratore dei filosofi Kant e Fichte, ha ereditato l'interesse per i problemi epistemologici e filosofici che erano discussi a casa sua. Questa esposizione alle idee filosofiche negli anni della giovinezza ha segnalato tutta la sua opera. Egli si è dedicato a cercare i grandi principi unificatori soggiacenti alla natura. La sua carriera incomincia da uno di questi principi, quello appunto della conservazione dell'energia, e si conclude con un altro, il principio di minima azione. I suoi interessi in scienza si uniscono agli interessi in arte, dimostrato dal suo grande apprezzamento della pittura, della poesia e della musica - quest'ultima usata anche quando cercava sollievo per le costanti emicranie di cui soffriva<sup>46</sup>.

A ventisei anni presentò, davanti alla *Physikalische Gesellschaft* (Società di Fisica) di Berlino, il 23 luglio del 1847, la sua memoria intitolata *Über die Erhaltung der Kraft* (Sulla conservazione della forza) che conteneva i principi matematici della conservazione dell'energia. La dissertazione è divisa in sei parti, precedute da una introduzione di natura più generale e filosofica: Introduzione; I. Il principio della conservazione della forza viva; II. Il principio della conservazione della forza; III. Applicazione del principio ai teoremi meccanici; IV. L'equivalente meccanico del calore; V. L'equivalente meccanico dei processi elettrici; VI. L'equivalente meccanico del magnetismo e dell'elettromagnetismo.

Nell'introduzione, Helmholtz chiarisce l'esistenza di due idee che guideranno la sua intera esposizione. Dice lui<sup>47</sup>:

*Due idee possono essere presi come punti di partenza di questi principi: la prima è l'impossibilità di accumulare lavoro indefinitamente a partire da effetti di una combinazione qualsiasi di corpi. La seconda è la possibilità di ricondurre tutte le azioni della natura alla azione di forze attrattive e repulsive la cui intensità non dipende se non dalle distanze dei punti che interagiscono gli uni con gli altri.*

<sup>46</sup>R. S. Turner, nella voce HELMHOLTZ, HERMANN VON, del *Dictionary of Scientific Biography* (Charles Scribner's Sons, New York, 1970-1980).

<sup>47</sup>H. Helmholtz, *Mémoire sur la conservation de la force, précédé d'un exposé élémentaire de la transformation des forces naturelles*; Trad. de l'allemand par Louis Pérard (V. Masson et fils, Paris, 1869), pp. 57-58.

Le due idee rappresentano, in verità, la stessa cosa, come egli mostrerà all'inizio del lavoro.

Nella prima parte, dopo affermare tacitamente, nelle prime righe, l'impossibilità di produrre forza motrice a partire dal nulla, egli enunzierà il cosiddetto principio di conservazione delle forze vive. A esempio di quello che ha fatto Coriolis, Helmholtz designerà come forza viva la stessa quantità che oggi conosciamo come energia cinetica (i.e., includendo, come ha fatto Coriolis, il fattore di  $1/2$  nella *vis viva* di Leibniz e altri).

Quando enuncia il principio di conservazione delle forze vive, egli considera che se un sistema di masse puntiformi si muove sotto l'azione di forze mutuamente esercitate, o sotto l'azione di forze che hanno origine in un centro fisso, allora la somma delle forze vive di tutte le particelle è sempre la stessa in qualsiasi istante, indipendentemente dalle velocità e dalle traiettorie inseguite nell'intervallo considerato. Reciprocamente, nei sistemi che obbediscono alla legge di conservazione delle forze vive, le forze semplici esercitate dai punti materiali sono forze centrali. La quantità di lavoro legata al passaggio del sistema da una data configurazione ad altra è sempre la stessa, cioè, quando i punti materiali passano da una posizione iniziale ad una finale, il valore del lavoro eseguito è lo stesso di quando fanno l'inverso.

Nella seconda parte della memoria, dedicata alla conservazione della forza, Helmholtz stabilisce una espressione matematica che può essere comparata a quella di Coriolis (Sec. 2.2) come una forma di enunciare il teorema del lavoro – forza viva. Considerando una forza di intensità  $\varphi$  attuando nella direzione di  $r$ , egli scrive<sup>48</sup>:

*Chiamiamo  $Q$  e  $q$  le velocità tangenziali in due posizioni qualsiasi;  $R$  e  $r$  le distanze corrispondenti, e integrando, viene:*

$$\frac{1}{2}mQ^2 - \frac{1}{2}mq^2 = - \int_r^R \varphi dr.$$

*Il primo membro di quest'equazione rappresenta la differenza delle forze vive che il punto materiale  $m$  possiede a due distanze differenti.*

---

<sup>48</sup> *Ibid.*, p. 72.

L'integrale del lato destro viene chiamata di quantità delle tensioni (*Quantität der Spannkraft*). La conclusione è che l'equazione sopra può essere interpretata come indicando che "l'incremento della forza viva di una massa puntiforme, nel suo moto sotto l'influenza di una forza centrale, è uguale alla somma delle quantità di tensione corrispondente alla variazione relativa della sua distanza al centro dell'azione"<sup>49</sup>. Generalizzando questa idea di modo a includere un numero qualsiasi di punti materiali, cioè, sommando su tutto il sistema di corpi, egli potrà enunciare che<sup>50</sup>:

*In tutti i casi di punti materiali liberi sotto l'influenza delle loro forze attrattive e repulsive, le cui intensità non dipenda se non dalle distanze, la diminuzione della quantità di tensione (QUANTITÄT DER SPANNKRAFT) è sempre uguale all'incremento della forza viva (LEBENDIGER KRAFT); e l'incremento della quantità di tensione (energia potenziale) è uguale alla diminuzione della forza viva. In altri termini: la somma delle forze vive e delle quantità di tensione è sempre costante. In questa forma generale possiamo designare nostra legge con il nome di Principio di Conservazione della Forza (PRINCIP VON DER ERHALTUNG DER KRAFT) (enfasi dell'autore).*

Questo è quindi il Principio della Conservazione dell'Energia enunciato in un contesto meccanico nel quale compaiono forze centrali.

Nella sequenza della memoria, Helmholtz tratta di applicare il principio a vari fenomeni fisici; nella terza sezione, esso viene applicato ai teoremi meccanici, in particolare, ai fenomeni che coinvolgono "la forza di gravitazione universale", la "trasmissione dei moti ai corpi solidi e fluidi incompressibili" e ai "corpi solidi e liquidi perfettamente elastici".

<sup>49</sup>*Ibid.*, p. 73.

<sup>50</sup>*Ibid.*, p. 77. Nel originale tedesco si legge: *In allen Fällen der Bewegung freier materieller Punkte unter dem Einfluss ihrer anziehenden und abstossenden Kräfte, deren Intensitäten nur von der Entfernung abhängig sind, ist der Verlust an Quantität der Spannkraft stets gleich dem Gewinn an lebendiger Kraft, und der Gewinn der ersteren dem Verlust der letzteren. Es ist also stets die Summe der vorhandenen lebendigen und Spannkraft constant. In dieser allgemeinsten Form können wir unser Gesetz als das Princip von der Erhaltung der Kraft bezeichnen.* H. Helmholtz, *Über die Erhaltung der Kraft - eine physikalische Abhandlung* (G. Reimer, Berlin, 1847), p. 17.

La quarta sezione si occupa dell'equivalente meccanico del calore. Qui, Helmholtz decisamente rifiuta la teoria del calorico e dimostra una certa preferenza per il punto di vista dinamico circa la natura del calore, anche se i suoi risultati non dipendano da una presa di posizione definitiva al riguardo<sup>51</sup>:

*Risulta da questi fatti che la quantità di calore può essere aumentata in maniera assoluta dalle forze meccaniche, e che l'apparizione del calore non può essere dovuta a una sostanza esistente previamente; ma che esso è generato dalle modificazioni, dai moti, sia di una sostanza particolare, sia dei corpi ponderabili o imponderabili già noti, ad esempio l'elettricità o la luce (l'etere luminifero).*

L'analisi include i problemi del calore radiante. Helmholtz argomenta che il calore libero, sensibile, di un corpo deve essere compreso a partire da un'analisi dei moti microscopici delle particelle e che il calore latente deve essere cercato nelle forze elastiche tra gli atomici del corpo.

La quinta sezione è dedicata all'equivalente meccanico dei fenomeni elettrici, dove le opere di Joule e Lenz sono invocate. Secondo Helmholtz, se si considera la corrente  $J$  fluendo attraverso un conduttore metallico la cui resistenza è  $w$ , allora il calore sviluppato per unità di tempo è (a partire dalla legge di Lenz),

$$\theta = J^2 wt.$$

In questa sezione, Helmholtz si occupa anche delle pile e delle correnti termoelettriche.

Infine, la sezione sesta è dedicata all'equivalente meccanico del magnetismo e dell'elettromagnetismo. In essa si afferma, ad esempio, "che nel movimento reciproco dei corpi magnetici si deve verificare la conservazione della forza".

Dobbiamo riconoscere che, anche se il lavoro di Helmholtz non esaurisce tutti i problemi relativi al principio di conservazione dell'energia, questa importante dissertazione del 1847 rappresenta una contribuzione decisiva per il suo stabilimento.

Nello sviluppo di queste idee, il pensatore Helmholtz fu guidato da due convinzioni fondamentali: la prima, quella che tutti i fenomeni fisici siano

---

<sup>51</sup> *Ibid.*, p. 92.

riducibili ai processi meccanici; la seconda, la stessa convinzione di Leibniz che nella natura ci deve essere una quantità fondamentale che si conserva. È chiaro che questo punto di vista è riduzionista, perché propone, infatti, che tutti i processi organici siano riconducibili alla fisica.

La struttura del saggio potrebbe essere schematicamente compendiata come segue:<sup>52</sup> la “forza” newtoniana è un concetto fondamentale in meccanica; la fisica è riducibile alla meccanica; il concetto fondamentale in fisiologia è quello di “forza vitale”. Ma la fisiologia è riducibile alla fisica, ossia alla meccanica; d'altra parte, in natura c'è un'entità fondamentale che si conserva: l'entità fondamentale che si conserva dev'essere la *Kraft*. Ora, la formulazione lagrangiana della meccanica è equivalente, dal punto di vista matematico e concettuale, alla formulazione newtoniana, sulla quale si può costruire tutta la meccanica. Siccome la formulazione lagrangiana ha come entità fondamentale la lagrangiana, che ha dimensione di energia, la quantità che si conserva è una energia.

In parole più adatte al contesto, la quantità che si conserva è la *Kraft*, che, per dimensione e forma, dev'essere l'energia. Così si stabilivano le basi perché la parola tedesca *Kraft* passasse a significare semplicemente energia.

### 2.2.5 Calore e lavoro

La storia dello stabilimento del principio di conservazione dell'energia è un capitolo che ancora presenta delle sfide allo storico e a tutti quelli che si avventurano, come noi, ad un approccio dei suoi principali aspetti. Trattasi comunque di uno dei periodi più ricchi della storia della scienza.

In questa rapida incursione nel problema che abbiamo fatto qui, diversi contributi alla sua soluzione furono menzionati, con particolare enfasi nelle opere di Mayer, Joule e Helmholtz. Per coincidenza, ma neanche tanto, questi tre scienziati hanno ricevuto la Medaglia Copley, della *Royal Society* di Londra. La medaglia era (e lo è tuttora), indiscutibilmente, il più importante premio scientifico della Gran-Bretagna. Anche con l'avvento del Premio Nobel, nel 1901, questa medaglia rappresenta ancora uno dei più prestigiosi premi nel

<sup>52</sup>Cf. Y. Elkana, op. cit., pp. 170–171.

mondo<sup>53</sup>. La concessione del premio fu uno dei fattori che contribuirono ad amenizzare il tono polemico tra le parti coinvolte nella “disputa”. Le frequenti visite di Helmholtz all’Inghilterra (prima di andare a lavorare a Berlino fu invitato verbalmente a lavorare a Cambridge) furono accompagnate da un clima di crescente collaborazione fra le due comunità.

Tra gli anni 1853 e 1854, Helmholtz si incontrò con i più importanti uomini di scienza della Gran Bretagna (tranne Darwin) e visitò numerose istituzioni scientifiche. Il vecchio Faraday, leader incontestabile dei chimici e fisici britannici della sua generazione, gli aveva servito il caffè mentre Helmholtz preparava i suoi appunti per le lezioni di fisica. Egli fu invitato anche alle case di e Maxwell.

Studi recenti suggeriscono che la costruzione di queste relazioni sociali contribuirono a creare un sentimento di fiducia tra Helmholtz e l’élite britannica<sup>54</sup>.

Questi buoni rapporti inoltre facilitarono la revisione dell’intendimento della legge di conservazione della forza: essa passa a essere interpretata come legge di conservazione dell’energia e viene sempre di più accettata. L’accoglienza di Helmholtz in questi mezzi potrebbe aver lanciato le basi per la futura promozione della teoria elettromagnetica di Maxwell nella Germania di Helmholtz, e per lo stabilimento di certi accordi anglo-germanici nel campo della metrologia elettrica.

Il principio di conservazione dell’energia nella sua forma generalizzata diventò evidente quando il punto di vista dinamico sulla natura del calore prevalse sull’antica immagine del calorico.

In questo contesto generale, dobbiamo sottolineare il contributo dello scozzese William John Macquorn Rankine (1820 – 1872), ingegnere e fisico, uno dei fondatori della termodinamica sopra le basi proposte da Carnot e Joule.

Nella memoria che presentò nel 1853, davanti alla *Philosophical Society of Glasgow*, intitolata *On the General Law of the Transformation of Energy* (Sulla legge generale di trasformazione dell’energia), si trova una formulazione

---

<sup>53</sup>D. Cahan, *The awarding of the Copley Medal and the ‘discovery’ of the law of conservation of energy: Joule, Mayer and Helmholtz revisited*, Notes & Records of the Royal Society **66**, 125–139 (2012).

<sup>54</sup>D. Cahan, *Helmholtz and the British scientific elite: from force conservation to energy conservation*, Notes & Records of the Royal Society **66**, 55–68, (2012).

ben definita e abbastanza attuale del principio di conservazione dell'energia. Nel 1855, la legge di trasformazione dell'energia fu incorporata da Rankine ad una teoria generale chiamata di "scienza dell'energetica". In quell'anno, Rankine pubblicò un articolo intitolato *Outlines of the Science of Energetics* (Lineamenti di una scienza dell'energetica), nel quale, oltre a proporre l'uso del termine "energia potenziale", presentò una formulazione in cui i risultati più generali includevano quelli di Joule.

Questi risultati possono essere sintetizzati negli assiomi<sup>55</sup>: tutti i tipi di energia sono omogenei. Ogni tipo di energia può essere utilizzato per eseguire qualsiasi tipo di lavoro. L'energia è trasformabile e trasferibile.

Infine, anche sotto la forma di un assioma, un risultato implicito nell'analisi di Helmholtz che abbiamo considerato sopra può fu stabilito da Rankine, cioè: l'energia totale di una sostanza non può essere alterata dalla reciproca azione delle sue parti. Così, il lavoro consiste sempre nel trasferimento e nella trasformazione di sola energia.

La migliore comprensione del concetto di calore e l'espressivo successo delle predizioni della termodinamica contribuirono decisamente affinché il principio della conservazione dell'energia fosse bene accettato da allora.

A partire dalla fine della decade di 1850, il principio della conservazione dell'energia si trovava stabilito, avendo per base anche una bene stabilita teoria dinamica del calore. L'unione di queste due acquisizioni scientifiche implicava, a sua volta, la convertibilità di tutti i tipi di energia. Poche decadi dopo, all'inizio del ventesimo secolo, la formulazione einsteiniana della teoria della relatività ci porterebbe a uno sguardo diverso sul principio. Con l'equivalenza massa-energia che discuteremo nel dettaglio la prossima sezione, il principio di conservazione dell'energia, da poco formulato, di nuovo si generalizzerà: avremo a che fare con un principio di conservazione della massa-energia.

---

<sup>55</sup>Y. Elkana, op. cit., p. 248.

# Capitolo 3

## L'equivalenza Massa-Energia

### 3.1 Massa inerziale

Ritorniamo al concetto classico di massa conforme definito da Newton nei *Principia* (Cap. 2), usando un linguaggio d'oggi per cercare più chiarezza nell'esposizione. La *massa inerziale* è definita nella meccanica non relativistica come il coefficiente scalare della velocità nell'espressione

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}, \quad (3.1)$$

dove  $\mathbf{p}$  rappresenta il momento o la quantità di moto, e è una misura dell'inerzia del corpo (punto materiale, infatti). Tecnicamente, se uno determina i valori di  $p$  e  $v$ , può determinare anche la massa del corpo. Questa determinazione può essere fatta usando un spettrometro di massa, nel quale un filtro formato da campi elettrici e magnetici incrociati permette di determinare la velocità senza cambiarla, e un'ulteriore deflessione permette di determinare il momento.

Nei *Principia*, la definizione di massa la considera come una grandezza fondamentale, non derivata. Come abbiamo accennato nel capitolo precedente, la prima definizione del libro è proprio quella di massa<sup>1</sup>:

Definizione I. *La quantità di materia è la misura della medesima, ricavata dal prodotto della sua densità per il volume.*

---

<sup>1</sup>F. Costa, *I Principia di Newton - La base della dinamica classica* (Tesi di Laurea, Università di Padova, 2014)



[...] *In seguito indicherò questa quantità indifferentemente con i nomi di corpo o massa. Tale quantità diviene nota attraverso il peso di ciascun corpo. Per mezzo di esperimenti molto accurati sui pendoli, trovai che è proporzionale al peso, come in seguito mostrerò.*

Più avanti, Newton definirà l'inerzia nei termini seguenti<sup>2</sup>:

*Definizione III. La vis insita, o forza innata della materia, è una capacità di resistere in virtù della quale ogni corpo, per quanto è in lui, persiste nel suo stato presente, sia esso di quiete o di moto uniforme in linea retta. Questa forza non differisce in nulla dall'inattività della materia, se non nel nostro modo di concepirla.*

Newton intendeva con il termine inerzia una forma di rimanere nello stesso stato, sia esso di quiete o il moto. Per Keplero – che aveva introdotto il termine – l'inerzia era semplicemente l'assenza di attività, il desiderio di rimanere in quiete<sup>3</sup>. Il successivo sviluppo della meccanica ha consolidato l'idea che la massa sta associata a questa capacità di resistere menzionata sopra, cioè funziona come una quantificazione di questa inerzia. Da ciò deriva la nostra concezione di base per il termine massa inerziale.

La definizione di massa in termine della densità e del volume ci dice che se tagliamo due corpi di un materiale omogeneo, le loro masse saranno proporzionali ai loro volumi; se un dato materiale viene schiacciato e il suo volume diminuisce, cambia la sua densità ma non cambia la sua massa. Infine, se due corpi si mettono insieme per formare un terzo corpo, la massa finale è semplicemente la soma delle masse di ognuno. Abbiamo accennato nella Sezione 2.1.2 che non è così quando teniamo conto degli effetti relativistici, cioè quando invociamo l'equazione (1.24), introdotta nella Sezione 1.4, come discuteremo più avanti.

La *massa gravitazionale* (o massa gravitazionale passiva) di un corpo è una misura della risposta del corpo al campo gravitazionale. La massa gravitazionale dei corpi macroscopici è normalmente determinata dalla misura dei loro

---

<sup>2</sup>E. Dijksterhuis, op. cit., p. 624.

<sup>3</sup>*Ibidem*, p. 417.

pesi a riposo nella stessa posizione sulla superficie terrestre<sup>4</sup>. Nello spiegare la sua teoria della relatività generale, nel 1916, Einstein dichiara all'inizio un fatto abbastanza noto prima, ma mai ancora compreso in tutte le sue conseguenze, cioè l'uguaglianza dell'accelerazione gravitazionale per oggetti di masse diverse porta alla conclusione che la massa inerziale di tutti i corpi ha lo stesso valor che la loro massa gravitazionale/energia potenziale. Questa uguaglianza è alla base del Principio di Equivalenza poiché l'equivalenza tra la massa gravitazionale e quella inerziale è una conseguenza della equivalenza tra la gravità e l'accelerazione. Tutto questo risulta dalla scoperta fatta da Galileo che tutti gli oggetti hanno la stessa accelerazione gravitazionale in una data posizione nel campo, e dalla corretta interpretazione delle leggi di Newton.

La proprietà di additività delle masse è valida quando l'interazione tra le parti costituenti è trascurabile, come detto prima. Relativisticamente, la massa inerziale è proporzionale all'energia totale, cioè, include anche le interazioni fra le parti. Così, se l'energia termica o l'energia di deformazione di un corpo cresce, la sua massa inerziale crescerà anche.

Un esempio semplice ci può aiutare: immaginiamo una molla libera, non distesa, con una certa massa a riposo  $m_0$ . Se essa molla viene compressa, allora esiste un'energia – chiamata in meccanica di energia potenziale – che è immagazzinata nella molla. Ecco, questa molla avrà una massa a riposo  $m > m_0$ . La differenza nella massa  $\Delta m = m - m_0 = \Delta E/c^2$  è, evidentemente, molto piccola. La quantità  $\Delta E$  rappresenta l'energia potenziale che è stata fornita alla molla quando essa è stata compressa. Supponiamo ora di mettere questa molla compressa in un vassoio di acido. Il prodotto della dissoluzione della molla compressa avrà una massa superiore a quella della molla non compressa!

Ugualmente, un piatto riscaldato al forno è più pesante di un piatto identico, ma non riscaldato. Ancora, la differenza è molto piccola. Situazioni come

---

<sup>4</sup>La massa gravitazionale può essere considerata come *passiva* e *attiva*. La massa gravitazione passiva è una grandezza fisica proporzionale all'interazione di ciascun corpo con il campo gravitazionale, cioè, è la massa dell'oggetto quando misurata tramite la forza che esso sperimenta in un dato campo gravitazionale; la massa gravitazione attiva è proporzionale all'intensità del campo gravitazionale da esso generata, ossia, è la massa dell'oggetto quando misurata tramite la forza gravitazionale da esso generata. La meccanica classica considera la sostanziale equivalenza tra le masse gravitazionali attive e passive. Si veda, ad es., D. F. Bartlett and D. Van Buren, *Equivalence of Active and Passive Gravitational Mass Using the Moon*, Phys. Rev. Lett. **57**, 21 (1986).

queste non ci portano a differenze che siano veramente rilevanti, esse sono generalmente molto piccole. Ma la situazione cambia drasticamente quando abbiamo a che fare con forze potentissime come quelle che uniscono i nuclei atomici. Nei processi nucleari, le differenze di massa sono significanti, come vedremo più avanti.

Ora torniamo al discorso di prima, per vedere come viene definita la massa inerziale nella teoria relativistica. La definizione (3.1) è ancora valida, ma la massa  $m$  è definita in maniera diversa, cioè

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (3.2)$$

nella quale  $m_0$  indica una costante caratteristica del corpo: sua *massa a riposo*, che è anche denominata di *massa propria* o *massa invariante*<sup>5</sup>.

Dall'equazione (3.2) deduciamo che la massa dell'oggetto dipende dalla sua velocità! Così, nella misura in cui aumenta la sua velocità, aumenta anche la sua energia: l'oggetto acquista energia cinetica, associata al suo moto. Qui si vede anche perché esiste un limite per la velocità di un corpo. Se la velocità di un corpo si avvicina alla velocità della luce, cioè, se  $v \rightarrow c$ , la quantità  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  si avvicina allo zero e, così, la massa  $m$  tende a diventare molto grande, tende a diventare infinita.

Facciamo un esempio concreto. Una particella di massa a riposo  $m_0$  come l'elettrone, accelerata nello SLAC - *Stanford Linear Accelerator*, nella California, in un tubo lungo circa tre chilometri, può arrivare all'estremità con una massa circa 40 mila volte più grande della sua massa a riposo. Un acceleratore ancora più potente è il *Large Hadron Collider* - LHC, il grande laboratorio europeo di fisica delle alte energie (CERN), nei dintorni di Ginevra, la cui circonferenza è di 27 chilometri.

In questi acceleratori, le particelle come i protoni e gli elettroni vengono sottoposte a forze elettriche molto potenti per accelerarli ad alte velocità. La loro velocità può arrivare vicina alla velocità della luce – il momento  $p$  aumenta fino a che non sia più possibile per il campo magnetico mantenere le particelle

---

<sup>5</sup>R. D. Sard, *Relativistic Mechanics – Special Relativity and Classical Particle Dynamics* (W. A. Benjamin, New York, 1970).

nel loro corso. Così, si avvicina il limite di quella macchina<sup>6</sup>. In una macchina come LHC ad ogni collisione si verifica la trasformazioni predetta dall'equazione  $E = mc^2$ .

Una particella come il protone ha una massa a riposo  $m_0 = 1.6726231 \times 10^{-27}$  kg e viene accelerata nell'LHC fino a che la sua velocità arrivi a 99.9999991% della velocità della luce. Il protone, a questa velocità, raggiunge un'energia di 7 TeV (tera elettrone-volt), cioè, 7 mila miliardi di elettrone-volt. Alla sua volta, 1 eV è l'energia che acquista un elettrone nel passare fra due punti dello spazio, tra i quali esista una differenza di potenziale di 1 V (volt) e vale  $1.602 \times 10^{-19}$  J (joule).

Ma quanto vale 1 J?

Supponiamo che all'uscita di un supermercato, una scatola di pasta di 1 kg cada dalle nostre mani nel suolo, a 1 m di altezza. L'energia potenziale che è convertita in energia cinetica durante la caduta della scatola è di  $\Delta E = 1 \text{ kg} \times 10 \text{ m/s}^2 \times 1 \text{ m} = 10 \text{ J}$ .

L'energia del protone nell'LHC sarà di  $7 \text{ TeV} = 11.2 \times 10^{-7} \text{ J}$ . In effetti, 1 TeV è l'energia di moto di un mosquito che vola<sup>7</sup>. Non sembra molto! L'energia della scatola di pasta è circa dieci milioni di volte più grande di quella del protone.

Anche così diciamo trattarsi di un esperimento ad alta energia. Lo straordinario in questa macchina è che questa energia è localizzata in dimensioni molto, molto piccole. Per averne un'idea delle dimensioni di cui parliamo, basta ricordare che il puntino di una i potrebbe contenere circa 500 miliardi di protoni<sup>8</sup>. Il cosiddetto raggio classico del protone è di circa  $r_p \approx 10^{-18}$  m.

Siccome la massa inerziale dipende dalla velocità della particella rispetto a un sistema di riferimento, come dato dall'equazione (3.2), allora la massa avrà valori diversi nei differenti sistemi di riferimento. La massa propria può essere determinata tramite la misura della massa nel sistema di riferimento a riposo:

$$m(0) = m_0.$$

<sup>6</sup>R. Stannard, *Relativity* (Oxford University Press, Oxford, 2008).

<sup>7</sup>LHC - *The Guide* - CERN Brochure, 2009.

<sup>8</sup>B. Bryson, *Breve storia di (quasi) tutto* (Guanda, Roma, 2008).

Il messaggio centrale di quest'analisi è che l'espressione

$$E = mc^2$$

connetta la massa inerziale  $m$  all'energia  $E$ . Tutte le forme di energia che appartengono alla particella contribuiscono all'energia totale  $E$ , di conseguenza, alla sua massa inerziale  $m$ . A meno di una costante universale – la velocità della luce nel vuoto,  $c$  –, la massa,  $m$ , e l'energia,  $E$ , sono uguali e, perciò, fisicamente equivalenti. Se conosciamo una di loro, conosciamo anche l'altra.

Quest'equivalenza fondamentale ci permette di concludere che la legge di conservazione dell'energia e la legge di conservazione della massa, discusse nel Cap. 2, sono una sola legge.

## 3.2 La velocità della luce

La discussione sulla natura della luce è molto antica, molto ricca e caratterizzata da un vivo dibattito che, verso la metà dell'ottocento, contrapponeva i difensori di una teoria corpuscolare e i difensori di una teoria ondulatoria.

La teoria corpuscolare in Descartes veniva associata all'emissione di grani di luce, di infime particelle che erano emesse dal corpo luminoso. Essa fu sviluppata da Newton per spiegare diverse proprietà come propagazione rettilinea, riflessione e rifrazione. Newton e, dopo di lui, i newtoniani hanno dovuto modificare e complicare la teoria, introducendo forze attrattive, repulsive, moto perpetuo di rotazione, e altro per cercare di spiegare fenomeni più complicati.

Tra questi fenomeni si trovano l'interferenza e la diffrazione, scoperte nel 1664 dal gesuita bolognese Francesco Maria Grimaldi (1618–1663), e la polarizzazione della luce. Lo stesso Newton ha proposto che la luce fosse costituita da particelle dissimetriche, ammettendo che i raggi di luce avessero dei lati (quattro lati) per spiegare la birifrangenza.

Dall'altra parte, si è notato che la teoria che concepisce la luce in termini di impulsi o pulsioni ondulatorie spiega perché questi pulsioni (o raggi) si rallentano quando incidono in un mezzo più denso. Questa spiegazione, che risale al filosofo inglese Thomas Hobbes (1588-1679), diventò più sistematica e com-

prensibile nell'opera pubblicata nel 1690 da Christiaan Huygens (1629–1695) sotto il titolo: “*Traité de la lumière*”. Nei primi anni dell'ottocento, soprattutto dopo le opere di Thomas Young (1773–1829) e Augustin Fresnel (1788–1827), la teoria ondulatoria si è consolidata dal punto di vista matematico e acquistò un ruolo molto importante, anche se non ancora deciso poiché gli addetti alla teoria corpuscolare continuavano a difendere la loro posizione. Fu il francese François Arago (1786–1853) a suggerire un esperimento “cruciale”: se la luce si propagasse più rapidamente nell'acqua, si potrebbe dedurre che essa è un flusso di particelle; se invece si propagasse con velocità minore, allora si potrebbe dedurre che è un'onda!

La questione fondamentale era, però, un'altra: la velocità della luce è finita o infinita?<sup>9</sup>

Galileo, nella prima giornata delle “*Due nuove scienze*”, discute la questione e propone anche un esperimento che permette di misurarla, ma conclude che essa è “*velocissima*” e che si propaga istantaneamente. L'esperienza quotidiana ci dice soltanto che la luce è molto più veloce che il suono<sup>10</sup>:

*SALVIATI. La poca conclusione di queste e di altre simili osservazioni mi fece una volta pensare a qualche modo di poterci senza errore accertar, se l'illuminazione, cioè se l'espansion del lume, fusse veramente istantanea; poiché il moto assai veloce del suono ci assicura, quella della luce non poter esser se non velocissima: e l'esperienza che mi sovvenne, fu tale. Voglio che due pigliano un lume per uno, il quale, tenendolo dentro lanterna o altro ricetto, possono andar coprendo e scoprendo, con l'interposizion della mano, alla vista del compagno, e che, ponendosi l'uno incontro all'altro in distanza di poche braccia, vadano addestrandosi nello scoprire ed occultare il lor lume alla vista del compagno, sì che quando l'uno vede il lume dell'altro, immediatamente scuopra il suo; la qual corrispondenza, dopo alcune risposte fattesi scambievolmente, verrà loro*

---

<sup>9</sup>G. Holton and S. Brush, *Introduction to Concepts and Theories in Physical Science*, (Addison-Wesley, Reading, Mass., 1973), p. 387.

<sup>10</sup>G. Galilei, *Discorsi e dimostrazioni mathematica intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica & i movimenti locali* (giornata prima). Disponibile in <http://www.liberaliber.it>.

*talmente aggiustata, che, senza sensibile svaro, alla scoperta dell'uno risponderà immediatamente la scoperta dell'altro, sì che quando l'uno scuopre il suo lume, vedrà nell'istesso tempo comparire alla sua vista il lume dell'altro. [...] E quando si volesse far tal osservazione in distanze maggiori, cioè di otto o dieci miglia, potremmo servirci del telescopio, aggiustandone un per uno gli osservatori al luogo dove la notte si hanno a mettere in pratica i lumi; li quali, ancor che non molto grandi, e per ciò invisibili in tanta lontananza all'occhio libero, ma ben facili a coprirsi e scoprirsi, con l'aiuto de i telescopii già aggiustati e fermati potranno esser commodamente veduti.*

La conclusione di Galileo non è affatto trascurabile perché sappiamo oggi che la velocità è molto elevata e richiede degli strumenti molto più accurati per misurarla.

L'astronomo danese Ole Roemer (1644–1710), osservando il periodo orbitale del satellite Io, di Giove, intuì che la variazione apparente del periodo orbitale del satellite indicava che la luce aveva una velocità finita. Per queste osservazione, Roemer usava un telescopio rifrattore e un orologio tra i migliori del XVII secolo<sup>11</sup>.

Nel settembre del 1676, Roemer annunciò all'Accademia delle Scienze di Parigi che l'eclisse di Io, che si aspettava accadesse alle 5:45 (più quarantacinque secondi) del mattino del 9 novembre, in verità si verificherebbe dieci minuti dopo. Gli astronomi dell'Osservatorio Reale di Parigi infatti hanno osservato quanto predetto da Roemer. La spiegazione che lui fornì dopo era che la luce che proviene da Giove impiega più o meno tempo per arrivare alla Terra a seconda della posizione relativa di Giove e della Terra nelle loro orbite. Comparando diverse eclissi in diverse punti dell'orbita terrestre, Roemer determinò che il tempo impiegato era di 22 minuti perché la luce coprisse la distanza necessaria per arrivare alla Terra.

Huygens, usando i dati di Roemer, e usando anche le sue stime per il diametro dell'orbita – ricordiamo che i diametri delle orbite della Terra e di Giove non

---

<sup>11</sup>M. K. Grainer, *Fare astronomia con piccoli telescopi* (Springer Verlag Italia, Milano, 2009), p. 71.

erano conosciuti con precisione – trovò che la velocità della luce era di 214.000 km/s, che è circa due terzi del valore attuale. Ma Roemer aveva sbagliato il tempo, che è minore (circa 16.5 minuti). Il metodo di Roemer è potente, ma gli strumenti non erano ancora sufficientemente accurati!

L'esperimento di Roemer è importante non soltanto per il valore che ha trovato, ma soprattutto per dimostrare che la velocità della luce è finita, anche se molto elevata. Così, la domanda fondamentale fatta sopra trova una risposta soddisfacente.

Negli anni successivi, la velocità della luce è stata misurata in maniera sempre più accurata. Un esperimento molto famoso è quello di Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819–1896) nel quale la luce incideva su una ruota dentata e passava da un lato del dente quando incideva e dall'altro quando tornava, dopo essere riflessa da uno specchio. Lo specchio era situato a circa 8 chilometri di distanza, di modo che la luce percorreva 16 chilometri (andata e ritorno). In questo metodo, occorre mettere in rotazione la ruota con la giusta frequenza in modo che il raggio al ritorno incontri un dente<sup>12</sup>.

A Fizeau dobbiamo anche la realizzazione di un esperimento "cruciale" come quello menzionato sopra.

In effetti, Fresnel aveva predetto che la luce sarebbe parzialmente trascinata da un mezzo in movimento e ha anche determinato la formula matematica per questo effetto. L'effetto fu confermato da Fizeau, nel 1851, facendo la luce percorrere dei tubi riempiti con l'acqua corrente, in modo tale che la luce, durante il suo intero percorso, ora viaggia nella stessa direzione della corrente di acqua, ora viaggia nella direzione opposta e ora viaggia anche nella direzione perpendicolare alla corrente acquosa<sup>13</sup>. La velocità della luce così misurata è data da

$$v = \frac{c}{n} \pm v_a \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right),$$

<sup>12</sup>H. L. Fizeau, *Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière* Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris), **29**, 90-92 (1849).

<sup>13</sup>H. L. Fizeau, *Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur*, Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris), 33 349-55 (1851).



nella quale  $n$  è l'indice di rifrazione dell'acqua e  $v_a$  la velocità dell'acqua rispetto ai tubi (stazionari). Il risultato è molto generale e vale per qualsiasi corpo con un indice di rifrazione  $n$  che si muova con velocità  $v_a$  relativamente all'osservatore, cioè, al sistema di riferimento inerziale  $S$ .

Un'altra misura famosa della velocità della luce è stata condotta da Jean Bernard Léon Foucault (1819–1868), nel 1862, che ha usato un metodo impiegando uno specchio girante. L'idea di base è quella di far incidere obliquamente la luce da una sorgente fissa su uno specchio che gira, di modo che la luce venga riflessa da questo specchio nella direzione di un altro specchio stazionario. Quando la luce riflessa da questo specchio stazionario incide al ritorno sullo specchio girante, lo trova già spostato e viene riflessa in una direzione diversa (cioè non torna sulla sorgente). Misurandosi la differenza di percorso e conoscendosi la velocità dello specchio, si può determinare il tempo necessario per il viaggio della luce nel percorso noto. Così riassume Foucault le sue conclusioni<sup>14</sup>:

*Effettivamente, la velocità della luce si è mostrata molto diminuita. Dati anteriori indicavano che la velocità era di 308 milioni di metri al secondo, e questo nuovo esperimento con gli specchi giranti danno un valore, in numeri tondi, di 298 milioni. È possibile, secondo me, credere all'esattezza di questo numero, nel senso che le correzioni che esso potrebbe subire non cambiano il suo valore in più di 500 mila metri.*

La storia non finisce qui, ovviamente, e dovremmo menzionare anche la serie di misure condotte da Albert A. Michelson (1852–1931) nei suoi accuratissimi esperimenti, fra tante altre<sup>15</sup>. Ma la conclusione più importante è stata stabilita: la velocità della luce è finita e è stata misurata con grande accuratezza. La costante universale,  $c$ , denota la velocità della luce nel vuoto e il suo valore è di 299.792.458 metri al secondo.

<sup>14</sup>J. B. L. Foucault, *Détermination expérimentale de la vitesse de la lumière: parallaxe du Soleil* Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris), 55 501-503 (1862).

<sup>15</sup>A. A. Michelson, *Experimental Determination of the Velocity of Light*, Proceedings of the American Association for the Advancement of Science 71-77 (1879).

### 3.3 $E = mc^2$ : Il contenuto energetico dell'UNIVERSO

Abbiamo imparato nelle sezioni precedenti che una particella a riposo non ha energia cinetica, ma questo non significa che essa non abbia energia. Quello che ci dice la teoria della relatività è che la massa inerziale è una misura del suo contenuto energetico.

L'interpretazione della massa come una misura dell'energia a riposo è confermata da osservazioni del decadimento radioattivo, ad esempio, nel quale particelle a riposo decadono in prodotti che hanno una massa minore, e questi prodotti portano via energia cinetica uguale alla decrescita della massa totale, ma su questo punto ritorneremo più avanti.

Adesso, prendiamo, ad esempio, un chilogrammo di carbone (usato nei "churrasco" per arrostitire la carne) e calcoliamo il contenuto energetico "racchiuso" in questo particolare materiale combustibile. L'energia a riposo di questa quantità di materia è data dalla semplice operazione:

$$E = (1 \text{ kg}) \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 9 \times 10^{16} \text{ joules.}$$

Se tutta quest'energia a riposo fosse convertita in energia elettrica, sarebbe possibile fornire elettricità per una casa tipica in Italia, in Francia o negli Stati Uniti per milioni di anni!

Nel processo, però, soltanto una frazione molto piccola (circa una parte in un miliardo) dell'energia a riposo è rilasciata. La differenza fra la massa del carbone e la massa dei prodotti della combustione è molto piccola (non misurabile). Come abbiamo discusso nel Cap. 2, nelle reazioni chimiche è come se la massa fosse conservata. In termine generale, se 1 J (joule) di energia, sia essa cinetica, potenziale o altra, viene fornito ad un oggetto materiale, il cambio (crescita) che si verifica nella sua massa è semplicemente:

$$\frac{1 \text{ joule}}{(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2} = 1.1 \times 10^{-17} \text{ kg.}$$

Questo non implica che il sistema abbia ancora più molecole che prima; quello che accade è che l'inerzia dell'energia del materiale arricchito viene cambia-

ta. Come accennato sopra, nei fenomeni nucleari e negli acceleratori, dove le masse delle particelle coinvolte nei processi sono relativamente molto piccole e le energie sono relativamente alte, il cambiamento nella massa può diventare notevole.

La legge di conservazione della massa potrebbe essere enunciata in una maniera modificata nella forma:

$$\sum \left( m_0 + \frac{\text{Energia}}{c^2} \right) = \text{costante.} \quad (3.3)$$

In (3.3), energia significa energia meccanica, energia termica, energia chimica, energia elettrica, ecc. e il simbolo  $\Sigma$  indica la somma di tutte.

Consideriamo adesso un altro esempio di inter-conversione massa-energia simile a quello trattato nel Cap. 2, e che si riferiva all'atomo d'idrogeno. Questo, invece, riguarda al nucleo del deuterio, che è un suo isotopo stabile, ed è noto come il deutone (o deuterone). Esso è formato da un protone (il nucleo di un atomo di idrogeno) e un neutrone (particella neutra che è costituente di tutti gli atomi, tranne che l'atomo d'idrogeno). Si sa che la massa del protone vale 1.00731 u.m.a. (unità di massa atomica) e quella del neutrone vale 1.00867 u.m.a. Per definizione, 1 u.m.a. vale  $1.66 \times 10^{-27}$  kg e la denoteremo semplicemente di  $u$ <sup>16</sup>. La massa a riposo del deuterone è trovata come  $M_0 = 2.01360$  u. Come accade per l'atomo d'idrogeno, la massa a riposo del deuterone è minore della somma delle masse a riposo del neutrone e del protone, implicando una differenza di massa pare a

$$\Delta m_0 = [(1.00731 + 1.00867) - 2.01360] u = 0.00238 u.$$

Questa differenza equivale ad un'energia

$$\begin{aligned} \Delta E &= \Delta m_0 c^2 = (0.00238 \times 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}) \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 3.17 \times 10^{-13} \text{ joules} = 2.22 \text{ MeV.} \end{aligned}$$

Quando un neutrone e un protone, a riposo, si combinano per formare un

---

<sup>16</sup>L'unità di massa atomica è uguale a 1/12 della massa di un particolare atomo di carbonio, chiamato isotopo, che viene indicato con <sup>12</sup>C.

deuterone, quest'energia è rilasciata sotto forma di radiazione gamma, cioè onde elettromagnetiche di alta energia. Se, invece, il deuterone è diviso in un protone e un neutrone, la stessa quantità di energia deve essere fornita al neutrone e viene chiamata di *energia di legame*. La variazione frazionaria della massa a riposo è data da<sup>17</sup>.

$$\frac{\Delta m_0}{M_0} = \frac{0.00238}{2.01360} = 0.12\%.$$

Un altro esempio di questa interconversione tra energia e massa è rappresentato dalla cosiddetta produzione di coppia o creazione di coppia elettrone ( $e^-$ )–positrone ( $e^+$ ). Un fotone gamma di alta energia (cioè raggi X di corta lunghezza d'onda) (abbiamo imparato da Einstein, nel Cap. 1, sulla natura dei quanta di luce!) impatta contro un bersaglio e subisce un urto anelastico. Nel processo, produce una coppia di particelle composta da un elettrone (materia) e da un positrone (antimateria) che viene rappresentata come la “reazione”:

$$\gamma \longrightarrow e^+ + e^-.$$

Il processo inverso è detto annichilazione elettrone-protone. In questo processo possiamo dire che, prima della produzione della coppia, la massa ( $m_p = m_0$ ) del sistema era

$$m_0 = \frac{\text{energia dei raggi gamma}}{c^2},$$

che corrisponde alla massa dell'energia radiante. Dopo la produzione, la massa ( $m_d$ ) del sistema è data da

$$m_d = \text{massa a riposo delle due particelle} + \frac{\text{energia cinetica delle due particelle}}{c^2}.$$

La massa calcolata così è la stessa, prima e dopo la conversione.

Prendiamo, adesso, un esempio in cui intervengono processi radioattivi. Il processo di datazione con il carbonio usa il decadimento radioattivo del carbonio 14 (un nucleo contenendo 6 protoni e 8 neutroni) in un nucleo di

<sup>17</sup>R. Resnick, op. cit. p. 148.

azoto (contenendo 7 protoni e 7 neutroni). Nel processo, un elettrone ( $e^-$ ) e un antineutrino ( $\bar{\nu}$ ) sono creati. La reazione si scrive nella forma:



Le masse a riposo dei nuclei sono  $m_C = 13.999950$  u, per il  ${}^{14}\text{C}$ , e  $m_N = 13.999234$  u, per il  ${}^{14}\text{N}$ . La massa dell'antineutrino è trascurabile. Prima del decadimento, la massa totale è uguale a  $m_C$ . Dopo, la massa totale diventa

$$m_T = 13.999234 \text{ u} + \frac{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}}{1.66 \times 10^{-27} \text{ kg/u}} = 13.999783 \text{ u}.$$

La differenza nella massa sarà:

$$\Delta m = 13.999783 \text{ u} - 13.999950 \text{ u} = -0.000167 \text{ u}.$$

Se denotiamo  $Q$  l'energia rilasciata nel processo, la conservazione dell'energia totale implica che:

$$\text{energia a riposo (prima)} = \text{energia a riposo (dopo)} + \text{energia rilasciata},$$

cioè,

$$m_C c^2 = m_T c^2 + Q \longrightarrow Q = (m_C - m_T) c^2 = 2.50 \times 10^{-14} \text{ joules}.$$

La variazione frazionaria dell'energia a riposo è  $0.000167u/13.999950u = 0.0012\%$  e sembra molto piccola. Però, è ancora circa diecimila volte maggiore della variazione frazionaria che accade quando si brucia il carbone per il "churrasco". Nei processi di fusione, la variazione frazionaria è di circa 1%. Si può mostrare che l'elettrone in questo decadimento del carbonio ha un'energia cinetica tale che la sua velocità è  $v = 0.6425 c$ , cioè, quasi 65% della velocità della luce<sup>18</sup>.

Consideriamo, finalmente, un esempio di interconversione in una reazione chimica tipica. L'atomo di Na e l'atomo di Cl si combinano per formare il sale comune di cucina. Supponiamo che gli atomi separati abbiano un tenore

<sup>18</sup>A. Giambattista, B. M. Richardson, and R. C. Richardson, *College Physics* (McGraw-Hill, Boston, 2004), p. 968.

di energia uguale a  $E = 0$ . Quando si collegano per formare la molecola NaCl, l'energia di legame della molecola é  $E_L = -5.8 \times 10^{-19}$  joules. Questo significa che parte dell'energia,  $\Delta E$ , è scapata del sistema sotto la forma di radiazione elettromagnetica, e questo rappresenta una variazione dell'energia totale a riposo, ossia  $\Delta E = \Delta m_0 c^2$ . Così

$$\Delta m_0 = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{-5.8 \times 10^{-19} \text{ J}}{(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})^2} = -6.4 \times 10^{-36} \text{ kg}.$$

La massa a riposo totale degli atomi isolati è semplicemente la soma delle masse delle molecole:

$$m_0 = 23 u + 35 u = 58 \times 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} = 9.63 \times 10^{-26} \text{ kg}.$$

Comparando  $m_0$  e  $\Delta m_0$ , troviamo:

$$\frac{\Delta m_0}{m_0} = \frac{-6.4 \times 10^{-36} \text{ kg}}{9.63 \times 10^{-26} \text{ kg}} \approx -10^{-10}.$$

Questa è una misura della decrescita nella massa a riposo durante la reazione chimica per formare la molecola di cloruro di sodio, ed è una quantità molto piccola.

### 3.3.1 La fissione nucleare

Nelle reazione nucleare, il valore assoluto della variazione  $\Delta m_0/m_0$  può essere maggiore di quelli nelle reazioni chimiche anche per un fattore di  $10^7$  (dieci milioni). Nei casi più riusciti, si può arrivare a  $\Delta m_0/m_0 \approx 10^{-3}$ . Nel decadimento di una singola particella, questa variazione frazionaria può essere ancora maggiore. Questi grandi valori che si trovano nella fisica nucleare e anche nella fisica delle particelle sono un riflesso delle interazioni nucleari e delle interazioni fra le particelle elementari, che sono molto più forti di quelle coinvolte nelle reazioni chimiche.

Un esempio molto importante dell'azione di queste forze nucleari si trova nel processo di *fissione nucleare*. Simbolicamente, questo processo si può rappresentare come<sup>19</sup>:

---

<sup>19</sup>R. M. Eisberg and L. S. Lerner, *Physics: Foundations and Applications* (McGraw-Hill,

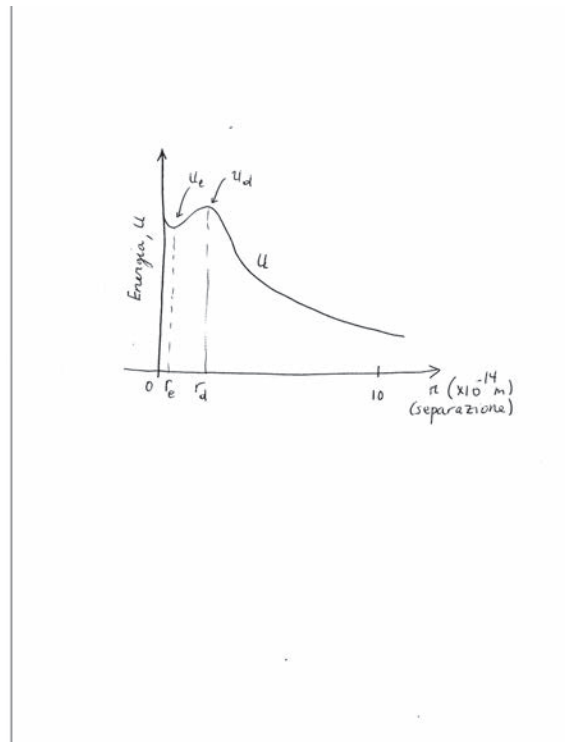
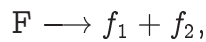


Figura 3.1: energia potenziale del sistema come funzione della separazione  $r$  dei frammenti della fissione nella reazione nucleare dell'uranio.



in cui  $F$  rappresenta il nucleo di un atomo come, ad esempio, l'uranio, che si divide per fissione in due nuclei minori,  $f_1$  e  $f_2$ , che sono i frammenti di fissione. Un'analisi più dettagliata può essere fatta guardando l'energia potenziale del nucleo come funzione della separazione delle sue parti costituenti, come quello della Fig. 3.1.

Possiamo immaginare che ci siano due nuclei  $f_1$  e  $f_2$  di cariche positive, ognuno contenendo una massa che è circa la metà della massa a riposo e metà della carica del nucleo dell'atomo di uranio. Per semplicità, usiamo un sistema di riferimento nel quale un frammento sia all'origine del sistema di coordinate e l'altro sia ad una distanza  $r$  dell'origine. Guardando la regione di destra della Fig. 3.1, quando i nuclei dei frammenti sono lontani l'uno dall'altro, l'energia

---

New York, 1981), Vol. 2.

è positiva, ma ancora bassa. In questa situazione, c'è una repulsione elettrica fra i nuclei che varia con l'inverso del quadrato della separazione, cioè  $1/r^2$ . L'energia di repulsione aumenta man mano che la separazione diminuisce.

Quando la distanza fra i nuclei è molto piccola,  $f_1$  e  $f_2$  si sovrappongono e incominciano ad attrarsi come conseguenza della *forza nucleare forte* che, in quella posizione, comincia a farsi sentire. La forza nucleare forte e quella nucleare debole hanno un raggio molto corto di attuazione. La forza nucleare forte diventa repulsiva se la distanza è molto piccola. I neutroni e i protoni di  $f_1$  e  $f_2$  interagiscono tramite la forza nucleare forte. Quando la distanza tra loro è minore di  $r_d$  ( $\approx 10^{-14}$  m), la forza – che è attrattiva – fa sì che l'energia potenziale diminuisca; siccome  $f_1$  e  $f_2$  continuano ad approssimarsi, l'interazione diventa repulsiva e l'energia potenziale di nuovo comincia a crescere. In questo scenario riusciamo a capire perché  $U$  passa da un massimo, quando  $r = r_d$ , ad un minimo, quando  $r = r_e$ .

Se, adesso, al nucleo viene fornita un'energia extra, quando un frammento è nella posizione  $r_e$  (minimo) e se quest'energia è sufficiente per superare la barriera ( $U_d - U_e$ ) – chiamata di barriera di fissione –, il nucleo che riceve quest'energia extra avrà un'energia più grande della sua energia potenziale; la differenza può essere l'energia cinetica dei due frammenti separati. Come l'energia è grande, viene divisa fra i due nuclei e essi sono liberi con alta energia.

Nell'atomo di  $^{235}\text{U}$  questa differenza di energia, che è circa  $0.1 \times 10^{-11}$  joules, può essere fornita da un neutrone lento in movimento. Siccome il neutrone non è carico, può muoversi liberamente all'interno del nucleo carico dell'uranio.

Quando il neutrone attinge la superficie dell'atomo, la forza nucleare forte può spingere sempre di più all'interno (poiché la forza è attrattiva) facendo sì che la sua energia cresca. Il valore di quest'energia è proprio  $0.1 \times 10^{-11}$  J. Il nucleo così ha catturato un neutrone e diventa  $^{236}_{92}\text{U}$ . Comincia la fissione come illustrata dalla Fig. 3.2.

In questo processo dell'uranio-235, i frammenti sono il  $^{92}_{36}\text{Kr}$  e il  $^{141}_{56}\text{Ba}$ . Ogni frammento a sua volta rilascia in media un neutrone, più il neutrone che è stato fornito al sistema. Tipicamente, da quei due nuovi neutroni, uno si perde (ad esempio, all'interno del reattore); l'altro subisce delle collisioni e si ritarda. Eventualmente, questo neutrone attinge un nucleo di  $^{235}\text{U}$  e spara un nuovo



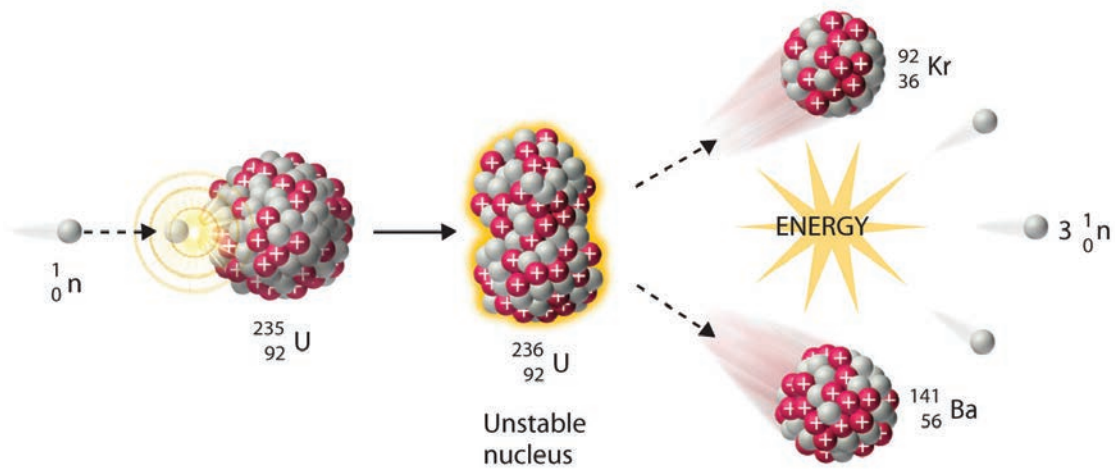


Figura 3.2: Illustrazione tipica del decadimento dell'atomo di  $^{235}_{92}\text{U}$  con l'ausilio di un neutrone lento, che incide sull'atomo.

processo di fissione. È questa la cosiddetta *reazione a catena* (Fig. 3.3). Così il processo si ripete.

Conviene determinare la decrescita nella massa a riposo totale di un sistema che inizialmente è formato soltanto da un atomo di  $^{235}\text{U}$ , insieme a un neutrone lento (cioè, di energia cinetica trascurabile) un momento prima di attingere l'atomo, e che consiste finalmente in due frammenti di fissione separati spazialmente, ma che non hanno ancora emesso i neutroni.

Ammettiamo che l'energia cinetica totale del sistema sia  $E = 0$  quando  $U = 0$ ; allora  $E = U_d = 3.3 \times 10^{-11}$  J. Nel sistema finale, i frammenti di fissione condividono un'energia cinetica totale  $K = U_d$ . Si sa che quest'energia ha origine nell'energia a riposo e, perciò, possiamo scrivere

$$\Delta m_0 c^2 = -U_d = -3.3 \times 10^{-11} \text{ J.}$$

Così, determiniamo che la perdita di massa a riposo si può scrivere nella forma:

$$\Delta m_0 = -\frac{3.3 \times 10^{-11} \text{ J}}{(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})^2} = -3.7 \times 10^{-28} \text{ kg.}$$

Ma, la massa a riposo totale inizialmente era:

$$m_0 = 236 u = 236 \times 166 \times 10^{-27} \text{ kg} = 3.9 \times 10^{-25} \text{ kg.}$$

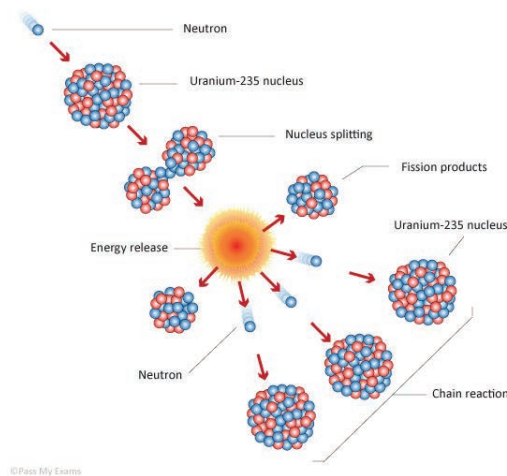


Figura 3.3: Illustrazione del fenomeno della reazione a catena. I neutroni che vengono rilasciati nel processo di fissione possono essere usati per scattare nuovi processi di fusioni.

Allora, la variazione frazionaria della massa sar :

$$\frac{\Delta m_0}{m_0} = -\frac{3.7 \times 10^{-28} \text{ kg}}{3.9 \times 10^{-25} \text{ kg}} \approx -10^{-3}.$$

Questo valore deve essere comparato al valore ottenuto in una reazione chimica, che   dell'ordine di  $10^{-10}$ , come abbiamo visto prima. Se consideriamo l'energia prodotta in joules, quando si brucia un chilogrammo di carbone per il *churrasco*, possiamo dire che la centrale nucleare   pi  efficiente di una centrale di carbone o di petrolio per un fattore di  $10^7$  (dieci milioni).

Una *centrale nucleare* viene usata infatti per trasformare quest'energia di modo a farla arrivare alle case e agli impianti. Il processo pu  essere usato anche per generare energia per gli aerei, per i sottomarini, per produrre isotopi nel trattamento del cancro, ecc.

Un *reattore nucleare*   un dispositivo nel quale la fissione accade continuamente con il proposito di produrre energia termica e, cos , azionare una centrale elettrica. Il combustibile   fatto dagli atomi pesanti che subiscono la fissione quando assorbono neutroni dentro un vassoio, che   il reattore. Questi neutroni scattano la reazione a catena. Ogni volta che un atomo si spacca, rilascia energia nella forma di calore, come descritto prima. Quest'energia ter-

mica è estratta dal reattore per mezzo dell'acqua che, di seguito, viene usata per muovere una turbina. In poche parole, il reattore nucleare e la centrale nucleare sono sorgenti di calore esotiche.

### 3.3.2 La fusione nucleare

...l'amor che move il sole e l'altre stelle.  
(Dante, Par XXXIII, 145).

Nella *fusione nucleare* due nuclei più leggeri (come l'idrogeno) si combinano per formare un nucleo più grande (come l'elio). Nel processo, energia è rilasciata perché la massa a riposo totale del nucleo formato è minore della soma delle masse a riposo dei nuclei separati. Il processo, così, rilascia energia di legame.

La fusione nucleare è alla base del processo di nucleosintesi stellare, presente nel cuore delle stelle e che le fa bruciare. Protoni ( ${}^1\text{H}$ ) vengono bruciati per formare l'elio ( $\text{He}^4$ ). L'energia rilasciata per ogni atomo di elio può essere calcolata per mezzo del bilancio (ciclo di Bethe) nella variazione di massa a riposo:

$${}^1\text{H} + {}^1\text{H} + {}^1\text{H} + {}^1\text{H} + 2m_e - M(\text{He}^4) = \Delta m \approx 50 m_e.$$

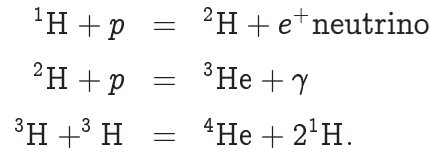
dove  $2m_e$  indica la massa dei due elettroni che formano l'atomo di elio. Il risultato sopra viene usato di nuovo nell'equazione di Einstein e, così,

$$\Delta E = \frac{\Delta m}{c^2} \approx 25 \text{ MeV}.$$

Riassumendo, possiamo dire che dalla fusione nucleare si ottiene un'enorme quantità di energia, dovuta al difetto di massa: una volta che i due atomi si fondono, la massa risultante non è pari alla somma delle masse dei due nuclei, ma minore. La differenza tra la somma delle masse di partenza e la massa finale si è convertita in energia seguendo la legge di Einstein.

La temperatura al centro del Sole è di circa  $2 \times 10^7$  K (venti milioni di gradi). La sequenza delle reazioni nucleari di fusione in una stella è complessa, ma si

crede che a questa temperatura i processi nucleari siano dominati dall'insieme di reazioni del tipo sotto<sup>20</sup>:



L'effetto netto di questo processo è il bruciare idrogeno per produrre  ${}^4\text{He}$ . Ma, nel processo, una particella come il neutrino è emessa nel primo stadio, trasformando così il Sole in una grande sorgente di neutrini.

La centrale a fusione nucleare si basa sul principio della fusione di due atomi leggeri, generalmente trizio e deuterio, che produce una enorme quantità di energia. La reazione più probabile è quella che avviene tra un nucleo di deuterio e un nucleo di trizio, reazione in cui si genera un nucleo di elio (particella alfa) e un neutrone, come si vede dalla Fig. 3.4. In questa reazione, la massa complessiva dei prodotti è inferiore a quella delle particelle interagenti e si verifica liberazione di energia secondo il principio di equivalenza massa-energia che stiamo discutendo.

Per capire, bisogna ricordare che sono noti tre isotopi dell'idrogeno: l'idrogeno propriamente detto ( ${}^1\text{H}$ ), il deuterio ( ${}^2\text{H}$ ) (o D) e il trizio ( ${}^3\text{H}$ ) (o T). Il nucleo di tutti e tre contiene un protone, il che li caratterizza come forme dell'elemento idrogeno; il nucleo di deuterio contiene inoltre un neutrone mentre quello del trizio due neutroni. In tutti i casi l'atomo neutro ha un elettrone al di fuori del nucleo per compensare la carica del singolo protone. Due nuclei posti ad una distanza minima (millimiliardesimo di millimetro) tendono a fondersi sotto spinta della forza nucleare rilasciando energia.

Il processo di fusione è però ostacolato da un'altra forza, quella elettrostatica. Questa forza è provocata dalla carica positiva dei protoni che li porta a respingersi. Per superare la barriera elettrostatica, i nuclei devono essere portati ad uno stato di eccitazione raggiungibile solo ad altissime temperature (100 milioni di gradi), tali da spingere al movimento i nuclei e quindi a scon-

<sup>20</sup>C. Kittel, W. D. Knight, and M. A. Ruderman, op. cit., p. 377.

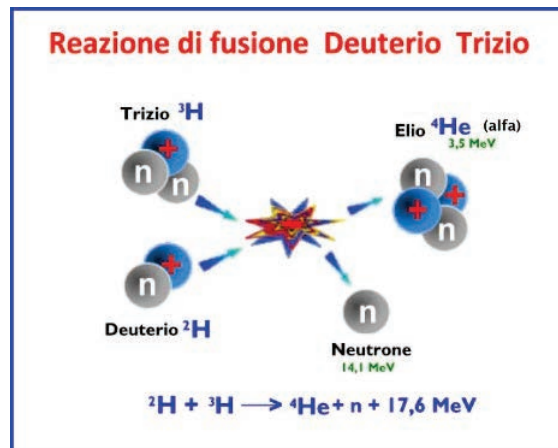


Figura 3.4: Illustrazione tipica del processo di fusione del deuterio e del trizio, risultando nella produzione di una particella  $\alpha$ ,  ${}^4\text{He}$ , un neutrone,  $n$ , e energia.

trarsi (ovvero a fondersi). I tentativi di fare la fusione a freddo non sono ancora riusciti e il suo annuncio non è attendibile.

La bellezza di questo processo di fusione è tanto evidente quanto sua importanza. La fusione nucleare ci offre la possibilità di poter disporre di una illimitata sorgente di energia, che potrebbe risolvere i problemi energetici che oggi affliggono l'umanità. Le difficoltà, però, sono molto serie per ottenerci efficienza nel processo, oltre all'operare a temperature che sono altissime.

Per finire, ci piace pensare nell'importanza umana di questo processo caratteristico delle stelle, mentre guardiamo il cielo notturno. Ecco quando detto al riguardo da uno esperto di astrofisica rispetto al ruolo della nucleosintesi in generale<sup>21</sup>:

*Ogni atomo nel vostro corpo proviene da una stella che ha esploso. Gli atomi nella vostra mano sinistra probabilmente vengono da una stella diversa da quelli della vostra mano destra. È veramente la cosa più poetica che io conosca in fisica: voi siete tutti polvere di stelle. Voialtre non sareste qui se le stelle non fossero esplose, perché gli elementi – il carbonio, l'azoto, l'ossigeno, il ferro, tutte le cose che importano per l'evoluzione della vita – non furono creati nell'inizio del tempo. Essi furono creati nella fornace delle stelle, e*

<sup>21</sup>Lawrence Krauss, *speech at Conway Hall*, London on Sunday 16 October 2012

*l'unica maniera per arrivare al vostro corpo è stata trovata perché le stelle sono state così gentili da esplodere... Le stelle morirono e per questo voi siete qui, oggi. [...] Gli atomi nella vostra mano sinistra provengono probabilmente da una stella differente da quelli nella vostra mano destra perché 200 milioni di stelle sono dovute esplodere per formare gli atomi nel vostro corpo.*

### 3.4 L'equazione che ha cambiato il mondo?

L'equazione che è stata oggetto di nostra analisi è comunemente associata alla creazione della bomba atomica. Questa convinzione è rinforzata anche dalla famosa lettera scritta da Einstein al presidente nordamericano Franklin Roosevelt, nell'agosto del 1939, avvertendo sulla possibilità di "bombe estremamente potenti di un nuovo tipo"<sup>22</sup>:

*Signor Presidente, la lettura di alcuni recenti lavori di E. Fermi e di L. Szilard, comunicatimi sotto forma di manoscritto, mi induce a ritenere che, tra breve, l'uranio possa dare origine a una nuova e importante fonte di energia. [...] Negli ultimi quattro mesi, grazie agli studi di Joliot in Francia e di Fermi e Szilard in America, ha preso sempre più consistenza l'ipotesi che, utilizzando un'adeguata massa di uranio, vi si possa provocare una reazione nucleare a catena, con enorme sviluppo di energia e formazione di un gran numero di nuovi elementi simili al radio: non vi è dubbio che ciò si potrà realizzare tra breve. In tal modo si potrebbe giungere alla costruzione di bombe che - è da supporre - saranno di tipo nuovo ed estremamente potenti. Uno solo di tali ordigni, trasportato via mare e fatto esplodere in un porto, potrebbe distruggere l'intero porto e parte del territorio circostante.*

Ma la storia – come al solito – è sempre più complessa.

E incomincia prima, con la scoperta della trasmutazione degli elementi chimici, fatta da Ernest Rutherford (1871–1937) ed il suo studente Frederick Sod-

<sup>22</sup>Disponibile nel sito <http://docs.fdrlibrary.marist.edu/psf/box5/a64a01.html>

dy (1877–1956), che, alla sua volta, faceva parte di un certo numero di scoperte che hanno consolidato lo studio della fisica dell'atomo a cavallo fra i secoli XIX e XX.

Nel novembre del 1895, W. Röntgen (1845–1923) ha scoperto i raggi X; in 1896, A. H. Becquerel (1852–1908) ha trovato la radioattività durante l'investigazione nei sali di uranio. Nel 1897, come abbiamo visto, J. J. Thomson ha scoperto l'elettrone; lui è stato anche il supervisor di Rutherford, a Cambridge. La scoperta di Rutherford e Soddy accade dopo i lavori pionieri di Pierre Curie (1859-1906) e Marie Curie (1867 - 1934), che hanno scoperto nuovi elementi chimici, polonio e radio. Marie Curie aveva inoltre stabilito anche che l'abilità di radiare trovata in questi elementi non dipendeva da una particolare disposizione degli elementi nella molecola, ma bensì da qualcosa che accadeva all'interno dell'atomo stesso.

In questa prospettiva, la scoperta della legge di decadimento radioattivo di Rutherford e Soddy tornava quantitativo lo studio di questi fenomeni e svelava una potenzialità insospettata in questa nuova frontiera della materia. Nel lavoro pubblicato nel 1902, loro si sorprendono con l'intensità de fenomeno che avevano testimoniato<sup>23</sup>:

*L'energia del cambiamento radioattivo deve essere quindi almeno ventimila volte, e può essere un milione di volte, più grande dell'energia di qualsiasi cambiamento molecolare.*

E, in un'altra parte del lavoro, affermano:

*[...] l'energia totale del cambiamento radioattivo [...] può essere soltanto una porzione dell'energia interna dell'atomo, perché l'energia dei prodotti risultanti è conosciuta. Tutte queste considerazioni puntano alla conclusione che l'energia latente nell'atomo deve essere enorme se comparata all'energia liberata nel cambiamento chimico ordinario. Gli elementi (radioelementi) non differiscono degli altri elementi nel loro comportamento chimico e fisico [...] non c'è una ragione per ammettere*

---

<sup>23</sup>E. Rutherford and F. Soddy, *The cause and nature of radioactivity* (Parts I and II), *Philosophical Magazine* IV, 370-396, 569-585 (1903)

*che questa riserva enorme di energia sia soltanto in possesso dei radioelementi.*

E la loro conclusione è ancora più trasparente:

*L'esistenza di quest'energia [...] deve essere presa in considerazione in fisica cosmica. La manutenzione dell'energia solare, ad esempio, non presenta più qualsiasi difficoltà fondamentale se l'energia interna degli elementi che lo compongono viene considerata disponibile, cioè, se i processi subatomici continuano ad accadere.*

Quindi, non ci possono essere dei dubbi che gli sviluppi necessari per la creazione di un artefatto come la bomba atomica risalgono a periodi anteriori alla proposta della famosa equazione di Einstein. Quello che sicuramente si può affermare è che l'equazione di Einstein permette di fare i calcoli della quantità di energia che potrebbe essere rilasciata da una bomba, da qualsiasi bomba nucleare, a fissione, come la bomba atomica, o a fusione, come la bomba H.

La discussione della storia di tutto lo sforzo per arrivare alla bomba va oltre il nostro scopo, ma può essere accompagnata nel dettaglio per mezzo del libro che ci ha ispirato a scrivere queste pagine, come accennato nella Prefazione. Possiamo, per completezza, presentare le linee generali di questo sviluppo per mezzo di una sequenza riassunta dei passi e dei contributi fondamentali<sup>24</sup>.

Partiamo dalla scoperta del neutrone, nel 1932. Come abbiamo visto prima, la particella subatomica neutra può incidere sui nuclei carichi senza essere disturbata dalle forze di repulsione di natura elettrostatica. Le ricerche di Enrico Fermi (1901–1954) e i suoi collaboratori a Roma, nel 1934, hanno chiamato l'attenzione di Otto Hanh (1879–1968) e Fritz Strassman (1902–1980), a Berlino. Con la collaborazione indispensabile di Lise Meitner (1878–1968) e del suo nipote, Otto Frisch (1904–1968), loro hanno capito che quello che accadeva era proprio la fissione nucleare, cioè, che gli atomi – in contraddizione con quanto dice il nome stesso – possono essere divisi!

---

<sup>24</sup>J. Baggott, *The Quantum Story - A History in 40 Moments* (Oxford University Press, Oxford, 2011), pp. 159-167.



Il notevole scienziato danese Niels Bohr (1885–1962) aveva sentito parlare di questa scoperta e, mentre si trovava a Princeton, negli Stati Uniti, ha discusso il fenomeno della fissione nucleare, puntando sull'importanza dell'uranio-235 nel processo di creare una bomba. Ma anche i tedeschi hanno sentito parlare a riguardo e hanno agito presto: nell'aprile del 1939, il *Reich Bureau of Standards* e il *German War Office* hanno stabilito dei progetti di ricerca nucleare. Nell'agosto dello stesso anno, Einstein ha scritto a Roosevelt la lettera di cui abbiamo parlato sopra. La guerra fra gli alleati e la Germania è stata dichiarata nel settembre del 1939, dopo l'invasione della Polonia. I progetti nucleari tedeschi andavano avanti sotto la guida del fisico Werner Heisenberg (1901–1976).

Gli sforzi nordamericani per la creazione dell'arma atomica sono stati stimolati dalla scoperta che poche libbre di uranio-235 puro sono sufficienti per lo sviluppo di una bomba basata sulla reazione a catena. Una massa pare a quella di una palla da golf (anche se molto densa perché l'uranio è pesante) basterebbe. Il progetto nordamericano è stato approvato da Roosevelt nel novembre del 1941, ed è diventato il famoso Progetto Manhattan quando l'Esercito americano ha preso la sua carica, nel settembre del 1942. Nel mese seguente, il fisico J. Robert Oppenheimer (1904–1967) è diventato il direttore scientifico del progetto che avrà la sua sede a Los Alamos, nel Nuovo Messico. Pochi mesi dopo il primo reattore nucleare ha funzionato (sotto la guida di Fermi) nell'Università di Chicago.

Bohr è riuscito a scappare da Copenhagen, occupata dai nazisti, con l'aiuto del Servizio Segreto Inglese ed è arrivato a Los Alamos nel gennaio del 1943. Nel 1941, lui aveva trovato personalmente il collega Heisenberg e si era convinto che i tedeschi riuscirebbero a sviluppare la bomba sotto la guida di Heisenberg. Questo fatto ha influenzato certamente gli sforzi degli scienziati che lavoravano a Los Alamos.

I fisici tedeschi non sono riusciti a sviluppare la bomba; non sono riusciti neanche a far funzionare un reattore nucleare; questi si sono mostrati sorprese con lo sviluppo bene riuscito negli Stati Uniti, quando furono catturati dalle Forze Alleate, nel maggio del 1945.

Il resto della storia è molto conosciuto. La bomba è stata lanciata su Hi-

roshima e Nagasaki nell'agosto del 1945. Poco tempo dopo, molti dei fisici che hanno contribuito alla sua creazione si sono pentiti. Anche se molto famosa e conosciuta, vale la pena riprodurre una frasi di Oppenheimer a riguardo che dice più o meno che "i fisici hanno conosciuto il peccato e questa è una conoscenza che non potranno perdere".

Se guardiamo a ritroso tutti gli sviluppi della fisica nel ventesimo secolo e gli sforzi legati alla creazione della bomba, possiamo capire perché l'equazione di Einstein – che funziona come simbolo di tutto questo – è non soltanto molto famosa, ma ha, veramente, cambiato il mondo.

## Conclusioni

L'anno miracoloso di Einstein ha ispirato l'Unesco a dichiarare il 2005 come l'anno internazionale della fisica, cent'anni dopo. La scelta è una conferma ulteriore della fertilità di quel periodo in un campo specifico dell'attività scientifica – anche se questo campo specifico è la fisica e, in particolare, la fisica matematica. Ancora nella fisica, il ventesimo secolo ci presenta un'altra rivoluzione, concentrata soprattutto negli ultimi anni della decade di 1920, con lo stabilimento della meccanica quantistica di Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Pauli e Dirac, soltanto per menzione alcuni dei grandi fondatori del campo.

La meccanica quantistica è la meccanica dell'atomo, ma non soltanto. È anche la meccanica delle particelle che costituiscono gli atomi, e è il paradigma nel quale si sviluppa la moderna comprensione della struttura della materia. Tenendo conto dei progressi della fisica nel ventesimo secolo, si può pensare che il termine “fisica atomica”, diventato molto forte e sinonimo di qualcosa di molto potente e poco comprensibile dai laici, rappresenti ormai soltanto la descrizione fino a certo grado di precisione di come stanno le cose nel mondo microscopico.

Nel ventunesimo secolo, la fisica è andata oltre a questo grado di accuratezza, e ci permette di costruire un discorso coerente, tanto dal punto di vista teorico quanto dal punto di vista sperimentale, sui costituenti fondamentali della materia. I modelli teorici – come, ad esempio, il modello standard delle particelle–, e i risultati sperimentali, come quelli ottenuti dal *Large Hadron Collider*, a Ginevra, portano il discorso a un livello di raffinamento tale che l'intero mondo materiale viene descritto in termini di poche particelle, i quarks e i leptons.

Uno sguardo su questo scenario complessivo ci fa pensare che la frasi di Op-

penheimer, ripetuta fino all'esaurimento nel dopoguerra, è ancora emblematica e attuale. La scienza ha portato l'Occidente al dominio del mondo; sua figlia diletta, la tecnica, ha portato l'uomo a commettere il peccato di Prometeo. Per riparare la difettosa distribuzione dei doni fatta dal fratello Epimeteo, Prometeo rubò agli dei qualche scintilla di fuoco e poi corse dagli uomini ed annunciò che recava loro il dono più grande. Ma forse questa rapina fatta agli dei abbia un senso ancora più profondo, che va oltre la scoperta dei mezzi per fabbricare un'arma letale come la bomba.

Se vogliamo, nel senso simbolico questo fuoco che viene derubato potrebbe essere quello riferito da Eraclito, quando ci diceva che "tutte le cose sono uno scambio del fuoco, e il fuoco uno scambio di tutte le cose, come le merci sono uno scambio dell'oro e l'oro uno scambio delle merci"<sup>25</sup>.

Secondo Heisenberg, il fuoco in Eraclito poteva essere sostituito con energia e qualora questa sostituzione fosse possibile, l'energia diventerebbe la sostanza con la quale sono fatte tutte le particelle elementari, gli atomi e perciò tutte le cose; l'energia sarebbe anche quella sostanza che muove tutte le cose<sup>26</sup>.

Inoltre, la quantità totale di questa sostanza non cambia e le particelle elementari sono formate dall'energia, come abbiamo accennato con i processi di creazione-annichilazione di coppie. La materia tiene origine quando l'energia si converte nella forma di una particella elementare. Stando così le cose, il frammento di Eraclito acquista una sorprendente attualità e può essere ripetuto parole per parole nel senso più moderno possibile: tutte le cose sono uno scambio di energia, e l'energia uno scambio di tutte le cose, come le merci sono uno scambio dell'oro e l'oro uno scambio delle merci. Allora, Prometeo sarebbe stato un ladro molto saggio perché avrebbe rubato proprio l'oro con il quale l'Universo materiale si fa.

E la nostra formula  $E = mc^2$  è quella che ci permette di scoprire il fattore di conversione di quest'oro in qualcosa di "materiale" e vice-versa. Evidentemente, il fattore di conversione è la velocità della luce nel vuoto e la massa di un corpo

<sup>25</sup> *Umsatz findet wechselweise statt des Alls gegen das Feuer und des Feuers gegen das All, wie des Goldes gegen Waren und der Waren gegen Gold.* H. Diels, *Die Fragmente der Vorsokratiker* (Weidmannsche Buchhandlung, Berlin, 1903), p. 79. Frammento 90, secondo l'edizione Diels-Kranz (DK). Inevitabile, anche, non pensare a Eliot, nei suoi *Four Quartets*, IV: WE ONLY LIVE, ONLY SUSPIRE, CONSUMED BY EITHER FIRE OR FIRE.

<sup>26</sup> W. Heisenberg, *Fisica e Filosofia* (Il Saggiatore, Milano, 2003), trad. G. Gnoli.

è una misura del suo contenuto di energia, così come l'energia è una misura della sua massa inerziale.

Il matematico francese Jules-Henri Poincaré (1854–1912) diceva che quando intendiamo enunciare il principio di conservazione dell'energia in tutta la sua generalità, cioè, applicandolo all'Universo, il suo senso ultimo ci sfugge, e rimaniamo soltanto con la possibilità di affermare che qualcosa, in questo Universo, rimane costante<sup>27</sup>.

In questa prospettiva ampliata che abbiamo considerato qui, il senso profondo del principio di conservazione dell'energia continua eventualmente a sfuggirsi, ma adesso viene accresciuto della scoperta dell'equivalenza fra la massa e l'energia. Perciò, quella qualcosa che rimane costante nell'Universo è la massa-energia e, nel senno di questa quantità che non cambia, la formula di Einstein ci svela come succedono le continue conversione dell'energia in materia e della materia in energia.

---

<sup>27</sup>J. H. Poincaré, *La Scienza e l'Ipotesi* (Edizione Dedalo, Bari, 2012), Cap. VIII, trad. Maria Grazia Porcelli.

# Ringraziamenti

# Indice Analitico

- accelerazione
  - gravità, 47
- Arago, François, 77
- Arrhenius, Svante, 12
- Avogadro, numero di, 16–18
- Becher, Johann Joachim, 39
- Becquerel, Antoine Henri, 94
- Bernoulli, Johann, 45
- Bohr, Niels, 96
- Boltzmann, Ludwig, 14–16, 18
- British Association for the Advancement of Science, 59, 60
- Brown, Robert, 13
- calcolo infinitesimale, 46
- calore latente, 67
- calore specifico, 57
- calorico, teoria del, 41, 67, 69
- Cambridge, Università di, 69
- Carnot, Lazare, 46, 47
- Carnot, Sadi, 46, 60, 61, 69
- Colding, Ludwig August, 61
- Compton, Arthur Holly, 12
- Conservazione della massa, 39
- conservazione della massa, 41, 42
- Coriolis, Gaspard-Gustave, 46–50, 65
- Coulomb, Charles Augustin, 46
- Curie, Marie, 94
- Curie, Pierre, 94
- d'Alembert, Jean le Rond, 46
- Dalton, John, 14, 56
- deuterone, 82, 83
- diffusione, 8, 16, 17
- effetto fotoelettrico, 9, 10, 12
- Einstein, Albert, 4, 5, 7–19, 21–23, 28–31, 33–35, 42, 43, 73, 83, 90, 93, 95–98, 100
- Einstein, Albert, 15, 42
- elettrodinamica di Maxwell, 11, 19, 21, 22, 29, 30
- elettrone, 10, 42, 43, 74, 75, 83, 84, 91, 94
- Eliot, Thomas Sterns, 99
- energia
  - cinetica, 10, 11, 33, 34, 36, 46, 47, 49, 65, 74, 75, 81, 83, 84, 87, 88

- potenziale, 66, 70, 73, 75, 86, 87
- equivalente meccanico, 45, 55–61,  
64, 67
- equivalenza  
calore e lavoro, 50, 52, 61  
massa e energia, 42
- Fahrenheit, Daniel Gabriel, 57
- Faraday, Michael, 62, 69
- Fermi, Enrico, 93, 95
- fissione, 5, 42, 85–89, 95, 96
- Fizeau, Armand Hyppolyte Louis,  
79
- flogisto, 39–41
- fluido o materia sottile (etere), 42,  
67
- Foucault, Jean Bernard Léon, 80
- Fresnel, Augustin, 77, 79
- Frisch, Otto, 95
- fusione, 5, 42, 84, 90–92, 95
- Galilei, Galileo, 77
- Galilei, Galileu, 38
- Grimaldi, Francesco Maria, 76
- Grove, William Robert, 62
- Habicht, Conrad, 7, 16
- Hallwachs, William, 9
- Hanh, Otto, 95
- Heisenberg, Werner, 96
- Helmholtz, Hermann von, 61–70
- Herschel, John Frederick William,  
62
- Hertz, Heinrich Rudolf, 9
- Hirn, Gustave-Adolphe, 61
- Hobbes, Thomas, 76
- Holtzmann, Karl, 61
- Huygens, Christiaan, 44, 77
- idrogeno, 43, 82, 90, 91
- Joule, James Prescott, 50, 56–63,  
67–70
- Joule-Thomson, effetto, 60
- Kirchhoff, Gustav Robert, 63
- Klein, Felix, 30
- Kuhn, Thomas, 43
- Landolt, Hans, 42
- Langevin, Paul, 15
- Lavoisier, Antoine Laurent, 37–39,  
41
- Leibniz, Gottfried Wilhelm, 45, 63,  
65, 68
- Lennard, Phillip, 10
- Lenz, Heinrich, 67
- Lewis, Gilbert Newton, 12
- Liebig, Justus von, 52, 62
- Loschmidt, Joseph, 18
- Lucrezio, 13
- Luna, 43
- macchine termiche, 50
- Mach, Ernst, 14
- massa  
gravitazionale, 72, 73  
inerziale, 5, 71–76, 81, 100
- Maxwell, James Clerk, 69
- Mayer, Julius Robert, 50–55, 58,  
59, 61–63, 68, 69



- meccanica  
 razionale, 50  
 statistica, 8, 9, 11, 15, 18
- Meitner, Lise, 95
- Meyer, Lothar, 42
- Michelson, Albert A. , 80
- Minkowski, Hermann, 29
- Mohr, Karl Friedrich, 62
- moto browniano, 8, 12–17
- Navier, Claude Louis, 50
- Needham, John T., 13
- neutrone, 82, 83, 87, 88, 91, 92, 95
- Newton, Isaac, 37, 38
- Nörrenberg, Johann Gottlieb, 52
- Oppenheimer, J. Robert, 96, 97, 99
- ossidazione, 39
- ossigeno, 39, 41, 51
- Ostwald, William, 14
- Perrin, Jean Baptiste, 17, 18
- Planck, Max, 9, 11, 15
- Poggendorff, Johann C., 52
- Poincaré, Jules-Henri, 100
- Poncelet, Jean-Victor, 50
- positrone, 42, 83
- Priestley, Joseph, 41
- principio di minima azione, 64
- Principio di Relatività di Einstein,  
 24
- Principio di Relatività di Galileo,  
 19, 20, 30
- Progetto Manhattan, 96
- protone, 42, 43, 75, 82, 83, 91
- radiazione di corpo nero, 9, 11
- Rankine, William John Macquorn,  
 49, 54, 69, 70
- Righi, Augusto, 10
- Roemer, Ole, 78, 79
- Royal Institution, 55
- Royal Society, 56, 57, 68, 69
- Rumford, Benjamin, Conte di, 57,  
 58
- Rutherford, Ernest, 93
- Röntger, Wilhelm Conrad, 94
- Séguin, Marc, 61, 62
- Sarton, George, 50, 51, 53, 58
- Smoluchowski, Marian von, 15, 17
- Soddy, Frederick, 94
- Sole, 43
- Stahl, George Ernst, 40
- Strassman, Fritz, 95
- Szilard, Leo, 93
- teoria della relatività  
 generale, 8, 35, 73  
 speciale, 19, 24, 26, 28, 30, 34,  
 35, 42, 70, 81
- Terra, 43
- Thomson, Joseph John, 10, 94
- Thomson, William (Lord Kelvin),  
 60, 69
- Torricelli, assioma di, 47
- trasformazioni di Galileo, 19, 21,  
 25, 26
- trasformazioni di Lorentz, 24–30
- Tyndall, John, 55

Varignon, Pierre, 45

vis viva, forza viva, 44, 46–49,  
64–66

von Gleichen, Wilhelm Friedrich,  
13

von Laue, Max, 11

Wöhler, Friedrich, 52

Young, Thomas, 77