

IL NUCLEARE

I2

Direttore

Ettore GADIOLI

Università degli Studi di Milano

Comitato scientifico

Giuseppe GORINI

Università degli Studi di Milano–Bicocca

Ignazio LICATA

Institute for Scientific Methodology

Elio SINDONI

Università degli Studi di Milano–Bicocca

Comitato redazionale

Francesca BALLARINI

Università degli Studi di Pavia

Francesco CERUTTI

European Organization for Nuclear Research CERN

Andrea MAIRANI

Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica

Comitato editoriale

Giuseppe BATTISTONI

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Laszlo SAJO BOHUS

Universidad Simón Bolívar

Piero CALDIROLA

International Centre for the Promotion of Science

Giuseppe GORINI

Università degli Studi di Milano–Bicocca

Ignazio LICATA

Institute for Scientific Methodology

Elio SINDONI

Università degli Studi di Milano–Bicocca

Mauro GIANNINI

Università degli Studi di Genova

IL NUCLEARE

La Fisica Nucleare ha portato a scoperte fondamentali ed è tuttora un campo di indagine alle frontiere della ricerca che permette in modo peculiare ed esclusivo lo studio della materia elementare in condizioni estreme.

Non meno importante è il suo utilizzo in ricerche e applicazioni tecnologiche di immediato interesse per la Società, tra cui oggi sono di particolare importanza la produzione controllata e sicura di energia e le applicazioni mediche per la diagnosi e la terapia di tumori.

Conclusioni analoghe si raggiungono se si considerano le ricerche sulla radioattività: accanto a studi di carattere fondamentale, le applicazioni di tipo medico ed industriale, per il controllo ambientale, la sicurezza, la datazione di reperti sono innumerevoli.

Questa collana si propone la pubblicazione di testi volti a descrivere questa variegata moltitudine di argomenti e a rappresentare una fonte di informazioni obiettive e documentate.

Mauro Giannini

Dai nuclei ai quark





Aracne editrice

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

Copyright © MMXIX
Gioacchino Onorati editore S.r.l. – unipersonale

www.gioacchinoonoratieditore.it
info@gioacchinoonoratieditore.it

via Vittorio Veneto, 20
00020 Canterano (RM)
(06) 45551463

ISBN 978-88-255-2695-0

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: luglio 2019

Ad Antonella

Indice

- 13 Capitolo I
 Un lungo cammino
- 21 Capitolo II
 Tutto è cominciato con l'atomo
 2.1 La scoperta dell'atomo, 21 - 2.2 Le dimensioni atomiche, 25
- 29 Capitolo III
 La crisi dell'atomo indivisibile
 3.1 L'elettrone, la prima particella elementare, 30 - 3.2 La radioattività naturale, 32 - 3.3 Le radiazioni trasportano energia, 38 - 3.4 Alcuni commenti, 41
- 45 Capitolo IV
 La scoperta del nucleo atomico
 4.1 Il modello atomico di Thomson, 45 - 4.2 Novità inaspettate, 46 - 4.3 L'atomo di Rutherford, 48 - 4.4 Perché non hanno usato un microscopio?, 51 - 4.5 Commenti, 54
- 57 Capitolo V
 L'atomo come sistema composto
 5.1 I problemi del modello di Rutherford, 57 - 5.2 L'atomo di Bohr, 60 - 5.3 Un po' di meccanica quantistica, 64 - 5.4 Momento angolare e simmetria, 68 - 5.5 Atomi con più di un elettrone, 74 - 5.6 Lo spin dell'elettrone, 76 - 5.7 Il legame tra elettroni e nucleo, 79 - 5.8 Conclusioni, 81

83 Capitolo VI

Anche il nucleo è un sistema composto

6.1 Il modello di Rutherford entra in crisi, 83 - 6.2 I costituenti del nucleo, 84 - 6.3 I decadimenti radioattivi, 88 - 6.4 *Il decadimento α* , 88 - 6.5 *Il decadimento β* , 90 - 6.6 *Le catene radioattive*, 92 - 6.7 *Il decadimento γ* , 94 - 6.8 Origine dei raggi, 94 - 6.9 Massa dei nuclei e difetto di massa, 97 - 6.10 Come viene costruito il nucleo, 101 - 6.11 Il nucleo ha una dimensione e una forma, 106

111 Capitolo VII

La forza nucleare

7.1 Proprietà della forza nucleare, 111 - 7.2 Le prime teorie della forza nucleare, 112 - 7.3 La caccia al mesone di Yukawa, 115 - 7.4 La teoria mesonica, 120 - 7.5 Raggi cosmici e nuovi metodi sperimentali, 122

127 Capitolo VIII

Le simmetrie della forza nucleare

8.1 Lo spin isotopico, 127 - 8.2 La forza nucleare è indipendente dalla carica, 134 - 8.3 Il numero barionico, 136 - 8.4 La conservazione della parità, 138 - 7.5 Conclusioni, 142

145 Capitolo IX

Tante nuove particelle

9.1 Le risonanze barioniche, 146 - 9.2 La scoperta delle particelle strane, 152

159 Capitolo X

L'introduzione dei quark

10.1 Lo schema a ottetti (e decupletti), 159 - 10.2 I quark, 164 - 10.3 La scoperta dei quark, 171 - 10.4 Conclusioni, 173

177 Capitolo XI

Quark e interazione elettrodebole

11.1 Interazioni elettromagnetiche, 177 - 11.2 Interazioni elettromagnetiche e quark, 179 - 11.3 Quark e interazioni deboli, 180 - 11.4 L'interazione elettrodebole, 186

191	Capitolo XII
	<i>Quark e interazioni forti</i>
	12.1 I nuovi quark, 191 - 12.2 La scoperta del colore, 196 - 12.3 La cromodinamica quantistica, 201
211	Capitolo XIII
	<i>Considerazioni finali</i>
215	<i>Bibliografia</i>
219	<i>Appendice</i>
231	<i>Indice dei nomi</i>

Un lungo cammino

L'indagine del mondo subatomico ha notevolmente aumentato le nostre conoscenze sulla struttura fondamentale della materia, tramite un percorso che ha portato a individuare costituenti via via più fondamentali: dapprima il piccolo nucleo centrale in cui si concentra praticamente tutta la massa dell'atomo, quindi i protoni e neutroni, di cui sono fatti i nuclei e infine i quark, che sono i mattoni più piccoli, secondo le conoscenze attuali.

In questa discesa verso la struttura intima della materia si assiste anche a una progressiva diminuzione delle dimensioni, come illustrato nella Fig. 1.1¹. I valori riportati sono indicativi, al fine di dare un'idea degli ordini di grandezza delle varie componenti della materia. Gli atomi e le molecole possono essere anche cento volte più grandi (macromolecole), ma comunque di dimensioni decisamente piccole sulla scala quotidiana. Per i nuclei la variabilità è molto più contenuta, il valore indicato si riferisce sostanzialmente al nucleo più pesante esistente in natura, cioè l'uranio, il nucleo più leggero essendo costituito soltanto dal protone.

L'elettrone e il quark sono ancora più piccoli, ma non è possibile determinarne sperimentalmente una eventuale dimensione nulla, l'unica cosa che si è in grado di fare è stabilire un limite superiore al loro raggio, che è appunto il valore riportato nella figura e che autorizza pienamente a considerarli, nell'ambito delle conoscenze attuali, praticamente come puntiformi.

I protoni e i neutroni sono i primi rappresentanti di una numerosissima famiglia di particelle subatomiche, chiamate cumulativamente

1. Le traiettorie degli elettroni attorno al nucleo sono un modo intuitivo di rappresentare la struttura atomica, ma come si vedrà nel Cap. 5, il concetto di traiettoria non è compatibile con i principi della meccanica quantistica.

adroni (dal greco *hadrós*, forte), in quanto risentono delle cosiddette interazioni forti, tipiche dei fenomeni nucleari. Tutti gli adroni, e sono parecchie centinaia, sono costituiti da quark, che come vedremo sono solo sei, mostrando che grande semplificazione l'introduzione dei quark abbia introdotto nella descrizione delle particelle elementari. I quark, insieme con le particelle della famiglia degli elettroni (anche in questo caso si tratta di sei particelle), sono da considerarsi i mattoni elementari di tutta la materia che ci circonda.

Questo risultato è certamente molto affascinante, perché sintetizza in modo potente le nostre conoscenze e permette anche di stabilire importanti connessioni con la formazione e la struttura delle stelle e dell'universo.

A questo quadro così semplice ed efficace si è arrivati attraverso un lungo cammino, iniziato nel 1911 quando Rutherford interpretò in modo magistrale l'esperimento condotto da Geiger e Marsden, proseguito con l'attività di una serie di scienziati, che sarebbe qui troppo lungo elencare, fino ad arrivare all'introduzione dei quark fatta indipendentemente da Gell-Mann e Zweig nel 1964.

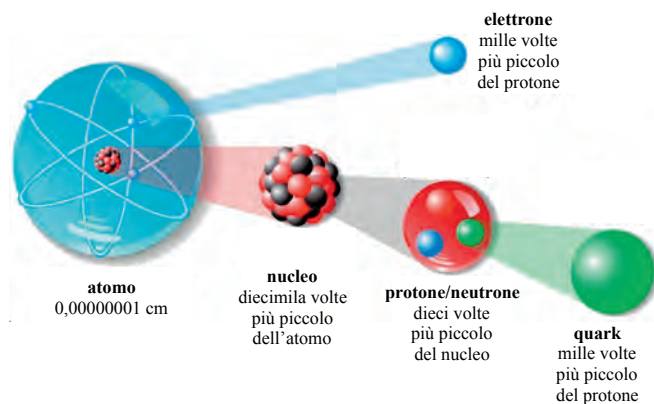


Figura 1.1. Confronto tra le dimensioni dei vari costituenti della materia, di cui si tratterà in questo libro. I valori numerici sono approssimati, per dare un'idea semplice dei vari rapporti. Le figure dei componenti non sono ovviamente in scala.

I quark sono un punto di arrivo importante ma hanno anche dato luogo a sviluppi successivi, in quanto stanno alla base del cosiddetto Modello Standard, che inquadra in modo consistente e, per ora, esauriente, tutti i fenomeni che avvengono a livello subatomico.

Sarebbe anche molto affascinante poter seguire i vari passi degli sviluppi accennati sopra, ma non sempre è possibile in un'opera di divulgazione rivolta a persone che non necessariamente possiedono le cognizioni di fisica richieste.

Tuttavia, nel caso dell'argomento di questo libro, si può, specialmente nella fase iniziale, seguire più profondamente il cammino percorso, facendo apprezzare anche ai non addetti ai lavori non solo i risultati raggiunti ma anche come ci si è arrivati.

Come ci si può aspettare, il modo con cui hanno operato i vari ricercatori di cui parleremo si basa sul *metodo scientifico*, che forse vale la pena illustrare qui brevemente.

Il metodo scientifico ha certamente radici che provengono da esperienze del passato, in particolare dal mondo greco, ma nel senso che lo intendiamo oggi si è consolidato con Galileo e si basa su due pilastri: la matematica e gli esperimenti.

Per quanto riguarda la matematica, è famosa la affermazione, esposta da Galilei nel *Saggiatore*, secondo la quale la filosofia naturale è scritta in linguaggio matematico e «i suoi caratteri son triangoli, cerchi e altre figure geometriche»². Gli esperimenti, chiamati *sensate esperienze*, sono il metodo per analizzare i fenomeni ed arrivare a una loro descrizione di tipo quantitativo, senza pretendere di *tentar l'essenza*.

Il primo esempio di sensata esperienza è in realtà molto antico. Si tratta infatti della determinazione della circonferenza terrestre fatta nel III Secolo a.C. da Eratostene, usando un procedimento che è ammirato ancora oggi per la sua genialità e semplicità e che presenta sostanzialmente tutte le caratteristiche tipiche degli esperimenti scientifici dell'era Galileiana.

L'ipotesi di partenza è che il sole sia molto lontano, con la conseguenza che i raggi del sole incidono sulla terra paralleli tra di loro (v. Fig. 1.2). Inoltre, Eratostene venne a conoscenza che nel giorno del solstizio d'estate i raggi del sole a Siene (l'odierna Assuan) sono

2. G. GALILEI, *Il Saggiatore*, capitolo 6.

praticamente perpendicolari cioè gli edifici non fanno ombra e i pozzi vengono illuminati. Se la terra è veramente tonda, allora un palo infisso verticalmente nel terreno ad Alessandria, che è praticamente sullo stesso meridiano di Siene, il giorno del solstizio proietta un'ombra: tra i raggi del sole e la verticale c'è quindi un angolo diverso da zero, che Eratostene riuscì a stabilire essere circa $1/50$ dell'angolo giro. Come si vede dalla Fig. 1.2, quest'angolo (indicato con la lettera α) secondo le leggi della geometria, coincide con quello formato dalle due verticali su Siene e Alessandria, rispettivamente. La distanza tra Siene ed Alessandria era valutata dagli egiziani essere circa 5000 stadi e, date le considerazioni geometriche fatte, risulta essere circa $1/50$ della circonferenza terrestre, che quindi è data da 50 moltiplicato per 5000, cioè 250000 stadi. Se si prende come valore dello stadio (egiziano) 157,5 m, si ottiene una circonferenza terrestre di 39375 km, incredibilmente vicino al valore odierno di 40076 km. Ci sono valutazioni diverse dello stadio, che comporterebbero per la circonferenza terrestre valori diversi da quello attuale, ma questo non altera in modo significativo il risultato di Eratostene.

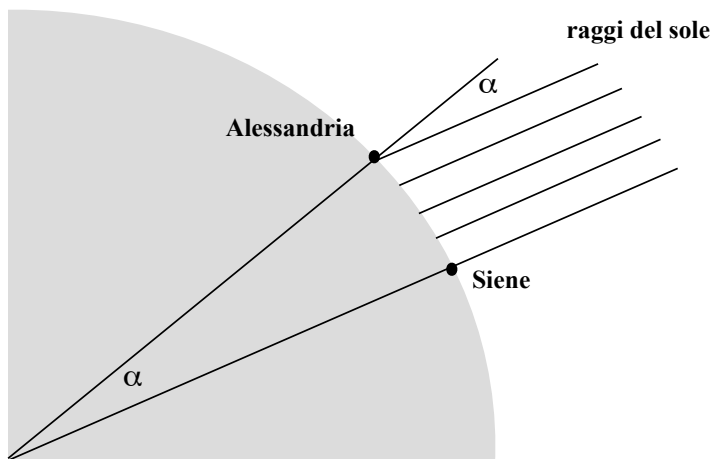


Figura 1.2. Illustrazione del metodo usato da Eratostene nel III Secolo a. C.; lo schema non riporta in scala il raggio della terra e la distanza tra Alessandria e Siene.