

IL NUCLEARE

II

Direttore

Ettore GADIOLI

Università degli Studi di Milano

Comitato scientifico

Ignazio LICATA

Institute for Scientific Methodology

Elio SINDONI

Università degli Studi di Milano–Bicocca

Giuseppe GORINI

Università degli Studi di Milano–Bicocca

Piero CALDIROLA

International Centre for the Promotion of Science

Comitato redazionale

Francesca BALLARINI

Università degli Studi di Pavia

Francesco CERUTTI

European Organization for Nuclear Research CERN

Comitato editoriale

Giuseppe BATTISTONI

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Laszlo SAJO BOHUS

Universidad Simón Bolívar

Elio SINDONI

Università degli Studi di Milano–Bicocca

Ignazio LICATA

Institute for Scientific Methodology

Giuseppe GORINI

Università degli Studi di Milano–Bicocca

Piero CALDIROLA

International Centre for the Promotion of Science

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.

Vai al contenuto multimediale



Gli autori desiderano ringraziare i professori Claudio Manfredotti, Ginevra D'Erasmo, Augusto Garuccio e Alessandro Mirizzi per aver espresso preziose considerazioni, suggerimenti e commenti.

Un particolare ringraziamento va al prof. Ettore Gadioli, Direttore della Collana "Il Nucleare" dell'Aracne, che ci ha permesso di migliorare il testo grazie ai suoi preziosi suggerimenti e osservazioni.

Un particolare ringraziamento va anche alla dott.ssa Mimma Zaccheo per aver reperito la maggior parte delle fonti bibliografiche.

Vincenzo Augelli
Boris G. Augelli

Introduzione alla radioattività





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 978-88-255-2185-6

*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: giugno 2019

A Chiara e Lorenzo

- 11 Capitolo I
 Introduzione storica
- 1.1. Un po' di storia, 11 – 1.2. Il progetto Manhattan, 50 – Appendice 1A, 56 – Appendice 1B, 58 – Appendice 1C, 60 – Appendice 1D, 62.
- 63 Capitolo II
 Il decadimento radioattivo
- 2.1. Introduzione, 63 – 2.2. Legge temporale dei decadimenti radioattivi, 64 – 2.3. Trasformazioni radioattive successive, 73 – 2.4. Equilibri radioattivi, 77 – 2.5. Le serie radioattive naturali, 86 – 2.6. La famiglia del Nettunio, 91.
- 93 Capitolo III
 La radiazione alfa
- 3.1. Il decadimento alfa: considerazioni energetiche, 93 – 3.2. Decadimento alfa: spettro energetico, 95 – 3.3. La legge di Geiger e Nuttall, 97 – 3.4. Il rapporto q/m della particella α , 104 – Appendice 3A, 107.
- 111 Capitolo IV
 La radiazione beta
- 4.1. Spettro della radiazione beta, 111 – 4.2. La teoria del decadimento beta e l'ipotesi del neutrino, 115 – 4.3. Doppio decadimento beta, 124 – 4.4. Scoperta del neutrino, 127 – 4.5. Parità e interazioni deboli, 129 – 4.6. Cattura elettronica, 138 – Appendice 4A, 141 – Appendice 4B, 143.
- 145 Capitolo V
 La radiazione gamma
- 5.1. La radiazione γ , 145 – 5.2. Assorbimento dei raggi γ , 146 – 5.3. Effetto fotoelettrico, 147 – 5.4. Effetto Compton, 150 – 5.5. Produzione di coppie, 154 – 5.6. Fotodisintegrazione, 156 – 5.7. Conversione interna ed isomeria nucleare, 159 – Appendice 5A, 162.

165 Capitolo VI

Definizioni ed unità di misura in radioattività

6.1. Unità di misura dell'attività, 165 – 6.2. Dosimetria della radiazione, 165.

175 Capitolo VII

Alcune applicazioni dei radioisotopi

7.1. Datazione, 175 – 7.2. Datazione mediante termoluminescenza, 179 – 7.3. Produzione di energia nucleare a scopi pacifici, 182 – 7.4. Tomografia ad emissione di positroni (PET, positron emission spectroscopy), 186.

Introduzione storica

1.1. Un po' di storia

Un contributo notevolissimo alla comprensione della concezione atomica della materia fu dato dallo studio della radioattività, cioè, dallo studio della radiazione corpuscolare o elettromagnetica emessa da certi elementi instabili che, dopo un certo tempo, si trasformano in altri elementi. A seconda che l'elemento sia instabile di per sé o che lo diventi tramite reazioni, dette nucleari, si parla di radioattività naturale o artificiale.

La radioattività fu scoperta da Henri Becquerel nel febbraio 1896¹, poco dopo la scoperta dei raggi X da parte di W. Roentgen². Tale scoperta fu del tutto accidentale. Becquerel stava indagando sulla vera origine dei raggi X, se essi erano dovuti alla fluorescenza (proprietà di certi cristalli che colpiti da una radiazione e.m. di lunghezza d'onda opportuna, emettono una radiazione luminosa caratteristica che cessa con l'eccitazione esterna) o alla fosforescenza (proprietà simile alla fluorescenza che ha un tempo di durata anche di qualche anno, cessata l'eccitazione esterna) del materiale della parete dell'ampolla di vetro in cui i raggi X venivano prodotti. Per verificare ciò, egli ricercava una radiazione penetrante proveniente da tutta una serie di corpi fosforescenti che egli aveva a disposizione nel Museo di Storia Naturale di Parigi, del quale era Direttore, che impressionasse una lastra fotografica costituita da una lastra di vetro ricoperta da uno strato di materiali fotosensibili. Un sale di uranio mostrava una notevole intensità di fluorescenza per cui Becquerel posizionò il sale, già esposto ai raggi del sole, sulla lastra avvolta in carta nera. Dopo alcune ore scopri la

1. H. BECQUEREL, *Sur les radiations émises par phosphorescence*, «Comptes Rendue», 122 (1896), p. 420.

2. W. ROENTGEN, *Eine Neue Art von Strahlen*, «Sitzungsberichte der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft» zu Würzburg, Dec. 1895.

lastra e vide con soddisfazione impressa l'immagine del minerale. Sembrava quindi confermata l'ipotesi di Roentgen che i raggi X fossero collegati alla fosforescenza. Becquerel volle ripetere l'esperimento una settimana dopo, ma, essendo il sole coperto, pose il minerale sulla lastra in un cassetto. Il giorno dopo, aprendo il cassetto, si rese conto che l'immagine del minerale era di nuovo impressa sulla lastra anche se non era stato esposto alla luce del sole.

Il fenomeno, quindi, non aveva alcun rapporto con la fosforescenza. Becquerel provò a riscaldare, raffreddare, polverizzare, sciogliere in acidi il cristallo, ma l'intensità della radiazione rimaneva la stessa. Egli osservò, in seguito, che la radiazione emessa aveva la proprietà di ionizzare l'aria.

Questa proprietà dell'uranio, detta "radioattività" dai coniugi Maria Skłodowska (più nota come M.me Curie) e Pierre Curie, appariva essere indipendente sia dallo stato di combinazione chimica dell'uranio nel composto che dalle condizioni fisiche dello stesso a cui il fenomeno era associato.

Tale scoperta spinse altri ricercatori a cercare materiali aventi la stessa proprietà dell'uranio.

Nel 1898 i coniugi Curie e, separatamente, Schmidt, osservarono radiazioni molto intense in composti del torio. M.me Curie osservò anche che l'attività delle sostanze, cioè il numero di decadimenti per unità di tempo, era proporzionale alla percentuale di uranio o di torio presente prescindendo dalla combinazione chimica; ella fece quindi l'ipotesi che la radioattività doveva avere origine atomica.

Nello stesso anno i coniugi Curie, confrontando la radioattività di minerali di uranio con quella dell'uranio metallico; notarono che i minerali di uranio erano cinque volte più radioattivi di quanto ci si sarebbe aspettato a causa del loro contenuto di uranio; era molto probabile, quindi, che qualche altra sostanza più radioattiva fosse presente nei minerali.

Essi separarono l'uranio da una tonnellata di residui di un giacimento uranifero; il ricavato era molto radioattivo e tramite processi di frazionamento riuscirono a separare una sostanza con proprietà simili al bismuto. Tale sostanza fu chiamata polonio³.

3. Il 18 luglio 1898, PIERRE e MARIE CURIE inviarono ai Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, una nota dal titolo *On a new radio-active substance contained in pitchblende*.

Poco tempo dopo, i Curie, precipitando frazionatamente un residuo di pechblenda, ottennero un cloruro di bario molto attivo. Il peso atomico di questo “bario” nel cloruro era maggiore di quello del bario ordinario per cui si pensò alla presenza di un nuovo elemento che chiamarono radio (26 dicembre 1898).

Nel 1899 fu scoperto da Rutherford il gas *radon* detto anche emanazione del radio⁴.

Nello stesso anno, egli misurò la corrente di ionizzazione nell'aria compresa tra due piatti di cui uno con uno strato radioattivo; ciò permise di distinguere due radiazioni, già osservate nel 1897, in base alla loro capacità di penetrazione nella materia: i raggi meno penetranti, che determinavano la maggior parte della ionizzazione, furono chiamati *alfa*; essi venivano assorbiti da pochi millesimi di centimetro di alluminio interposto tra le placche o in pochi centimetri di aria. I raggi più penetranti, responsabili di una piccola parte della corrente di ionizzazione, furono chiamati *beta*; essi erano capaci di penetrare alcuni metri di aria o millimetri di alluminio. Poiché i raggi beta venivano deflessi da campi magnetici, si pensò che essi consistessero di particelle negative ad alta velocità⁵.

Ancora nel 1899, Elster e Geitel⁶ stabilirono la legge del decadimento radioattivo secondo cui il numero di particelle emesse in un secondo diminuiva esponenzialmente col tempo. Tale legge fu stabilita sperimentalmente.

Intanto, Debierne scopriva l'attinio nella pechblenda⁷.

Nel 1900, Rutherford e Soddy e Crookes, con procedimenti di separazione chimica, isolarono e studiarono le attività dei vari prodotti del decadimento radioattivo. Con l'isolamento del radon e alcuni altri

4. E. RUTHERFORD, *A Radio-active Substance Emitted from Thorium Compounds*, «Philosophical Magazine», 49 (1900), p. 1.

E. RUTHERFORD e H.T. BROOKS, *The New Gas from Radium*, «Transaction of Royal Society of Canada», 7 (1901), Section III, p. 21.

5. E. RUTHERFORD, *Uranium radiation and the electrical conduction produced by it*, «The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science» Series 5, 47 (1899), pp. 109–163.

6. J. ELSTER e H. GEITEL, *Ueber Bequerelstrahlen*, «11. Jahresbericht, Verein für Naturwiss., Braunschweig», (1899a), pp. 271–276.

7. A. DEBIERNE, *Sur une nouvelle matière radioactive*, «Comptes rendus», 129 (1899), p. 593; ID., *Sur un nouvel élément radio-actif: l'actinium*, «Comptes rendus», 130 (1900), p. 906.

prodotti a vita breve, si scopriva che la radioattività non è una proprietà permanente, ma che decresce in intensità ad una velocità caratteristica della sostanza.

Ancora nel 1900, Villard trovava che nel decadimento del radio era presente una radiazione che non veniva deviata da campi magnetici e più penetrante di quella beta; tale radiazione fu denominata *gamma*⁸.

Nel 1903, Rutherford e Soddy⁹, analizzando una grossa mole di risultati sperimentali ottenuti da Curie, Laborde, Ramsay e Soddy stesso sulla produzione di elio in gas ottenuti da composti del radio, esprimevano in modo chiaro le proprietà di trasmutazione stabilendo corrette relazioni tra cambiamento chimico di un atomo e tipo di radiazione emessa.

Soddy introdusse sia il termine “isotopo” per distinguere atomi aventi stesse proprietà chimiche ma masse diverse e diverse proprietà di decadimento sia il termine “trasmutazione”.

Dalla deflessione di raggi alfa in campi elettrici e magnetici si ottenne per e/m un valore circa metà di quello ottenuto per l'idrogeno. Rutherford dedusse per i raggi alfa una velocità media di circa $2.5 \cdot 10^9$ cm/s. Il regolare ritrovamento di elio gassoso in esperimenti fatti da Curie, Ramsay, Laborde, nei depositi di minerali radioattivi, portò all'ipotesi che i raggi alfa erano in realtà atomi di elio doppiamente ionizzati. Essi furono rivelati singolarmente, per la prima volta, in base alla loro capacità di produrre una scintillazione su uno schermo di solfuro di zinco, ZnS, da Crookes e, separatamente, da Elster e Geitel, nel 1903.

Nello stesso anno i Curie osservarono, insieme a A. Laborde, che un campione puro di un sale di radio sviluppava una quantità di calore di circa 100 calorie per ora e per grammo, in modo continuo e costante senza sensibile variazione, in apparente contraddizione con il principio di conservazione dell'energia (l'effetto fu poi spiegato da Rutherford e Soddy sulla base delle successive conoscenze sulla disintegrazione atomica).

8. P. VILLARD, *Sur la réflexion et la réfraction des rayons cathodiques et des rayons déviés du radium*, «Comptes rendus», 130 (1900), p. 1010.

9. E. RUTHERFORD e F. SODDY, *Radioactive Change*, «The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science», 5 (1903), p. 576.

Nel 1904 fu verificato sperimentalmente che i raggi alfa sono particelle con range definiti nella materia (piuttosto che una radiazione avente una attenuazione esponenziale). W.H. Bragg misurò i range caratteristici in aria delle particelle alfa provenienti da varie sostanze radioattive. Trovò che tali range in aria erano compresi tra 3 e 9 cm alla pressione di 1 atm e temperatura di 15 °C e corrispondevano ad energie cinetiche comprese tra 4 e 9 MeV^{10, 11}.

Nello stesso anno, Rutherford, alla luce delle nuove scoperte sulla radioattività, riprese le idee di Lord Kelvin¹² per la determinazione dell'età della Terra e della durata del calore solare. Kelvin aveva stimato l'età della Terra tra 20 e 400 milioni di anni e tale stima si ridusse a 20–40 milioni di anni nel 1899. In un intervento alla Royal Institution di Londra, nel maggio 1904, e alla presenza di Lord Kelvin, Rutherford¹³ affermò che la presenza del radio nella crosta terrestre costituiva una nuova fonte di calore sconosciuta a Kelvin che aumentava la stima dell'età della Terra. Nel 1929, Rutherford¹⁴ stimò l'età della Terra 3.4 miliardi di anni utilizzando informazioni che non possedeva nel 1904 (la stima attuale è di 4.5 miliardi di anni).

Nel 1905, Schweidler¹⁵ interpretò in maniera statistica il processo di decadimento delle sostanze radioattive. Assumendo che ciascun atomo radioattivo abbia una certa probabilità di decadere, che è grande per piccoli tempi di decadimento, e detto N il numero medio di atomi che decadono in un certo intervallo di tempo, si hanno sempre delle deviazioni da N , le fluttuazioni essendo inversamente proporzionali alla \sqrt{N} .

10. S. TOLANSKY, *Introduzione alla fisica atomica*, Cap. 14, Boringhieri, Torino, 1966.

11. L'elettronvolt (eV) è l'energia posseduta da una particella di carica $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C quando si muove attraverso una differenza di potenziale di 1 V. Essendo l'energia, $E = qV$, $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ (C)} \cdot 1 \text{ (V)} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$.

12. W. THOMSON, *On the secular cooling of the Earth*, «Trans. Roy. Soc. Edinburgh», 23 (1862), p. 157.

13. E. RUTHERFORD, *The Radiation and Emanation of Radium II*, «Technics», August 1904, p. 171.

14. E. RUTHERFORD, *Origin of actinium and age of the Earth*, «Nature», 123 (1929), p. 313.

15. E. V. SCHWEIDLER, *Premier Congrès pour l'étude de la Radiologie et de l'Ionisation*. Liège, 11–16 septembre 1905, p. 400.

Ancora nel 1905, Einstein realizzò una grande sintesi tra due importanti leggi di conservazione della meccanica classica: quella della massa e quella dell'energia. Con la celebre relazione $E = mc^2$, Einstein stabiliva l'equivalenza tra massa ed energia sostituendo il concetto classico che distingueva le due quantità. La massa non è una quantità costante, ma varia con l'ammontare di energia assorbita dal corpo stesso. Ad un corpo in quiete di massa m_0 , si associa una energia a riposo m_0c^2 , essendo c la velocità della luce; se il corpo si muove con velocità v , l'energia ad esso associata è

$$(m_0c^2 + E_0)/\sqrt{1 - \beta^2}$$

dove E_0 è l'energia assorbita dal corpo e $\beta = v/c$; questa può essere considerata come l'energia di un corpo di massa $m_0 + E_0/c^2$ e velocità v . La sintesi massa-energia giocò un ruolo essenziale negli sviluppi e nelle applicazioni della fisica del nucleo, in particolare, e della fisica dei quanti, in generale.

Nel 1906, l'interpretazione statistica di Schweidler fu confermata da Kohlraush e da Meyer e Regener e nel 1908 da Geiger. Essi stabilirono la natura casuale del decadimento radioattivo osservando delle fluttuazioni statistiche nel numero delle particelle emesse nell'unità di tempo.

Nel 1906, Rutherford osservò leggere deflessioni di particelle alfa da parte di fogli di mica, ma non ancora riusciva a capirne il motivo.

Nel 1908 viene fatta la prima applicazione del contatore proporzionale¹⁶ come mezzo rivelatore di particelle alfa singole da parte di Rutherford e Geiger. Essi misurarono l'attività specifica del radio, cioè il numero di disintegrazioni di 1 grammo di sostanza in 1 secondo, ottenendo il valore di $3.5 \cdot 10^{10}$ dis/s g.

Nello stesso anno, Rutherford e Geiger misurarono la carica di una particella alfa misurando la carica trasportata da un numero noto di alfa emesse da una sorgente con attività specifica nota, su un'armatura collegata ad un elettrometro sensibile. Nota la carica Q e il numero di alfa, essi trovarono $q_\alpha \cong 2e$.

16. Si veda Appendice 1A.

Nel 1909, Rutherford e Royds¹⁷ fecero l'analisi spettroscopica di un fascio di particelle alfa emesse dal radon per stabilire in modo definitivo la sospettata equivalenza tra alfa e nucleo di elio. In Fig. 1.1 è riportato l'apparato sperimentale utilizzato da Rutherford e Royds per testare se fosse apparso dell'elio in un contenitore in cui particelle alfa fossero state immesse.

Il radon 222 prodotto dal radio veniva compresso dalla colonna di mercurio nel capillare A. Le pareti di A erano sufficientemente sottili da far passare le particelle alfa emesse. A era fissato sul capillare B avente vetro più spesso. Con schermi di solfuro di zinco si osservava la fosforescenza a 3, 5, 7 cm a seconda del range delle particelle alfa¹⁸. Con il termine "range" intendiamo la distanza attraversata dalla particella nel mezzo e ne faremo uso anche in seguito. Nel tubo esterno T veniva fatto il vuoto e successivamente il mercurio veniva spinto nel tubo T fino alla base di A. Le particelle alfa venivano fermate da T o dal mercurio.

Se le particelle alfa fossero state atomi di elio, questi avrebbero dovuto diffondere dal vetro e dal mercurio nella regione dove c'era il vuoto. Comprimeando il gas nel tubo e provocando una scarica, con metodi spettroscopici si sarebbe dovuto rilevare la presenza del gas elio.

Prima d'introdurre il radon nel tubo A, si verificò che non ci fosse elio nel tubo. Ventiquattro ore dopo l'introduzione del radon, si notò l'assenza della riga gialla dell'elio che divenne debolmente visibile dopo due giorni; quattro giorni dopo, due linee dello spettro dell'elio furono osservate e dopo sei giorni tutte le linee erano presenti. L'esperimento dava una prova decisiva che le particelle alfa dopo aver perso la loro carica, ovvero dopo aver acquistato elettroni passando attraverso il vetro, erano effettivamente atomi di elio.

Nello stesso anno, Geiger informò Rutherford che c'era uno studente, di nome Marsden, molto capace nella sperimentazione. Rutherford gli suggerì di fargli effettuare un esperimento per osservare un

17. E. RUTHERFORD e T. ROYDS, *The Nature of the α Particle from Radioactive Substances*, «Philosophical Magazine», 17 (1909), p. 281.

18. Rutherford individua come prodotti del decadimento del radio, l'emanazione del radio, cioè il radon, il radio A, cioè il polonio 218 e il radio C, ovvero il bismuto 214. I range osservati sono delle particelle α emesse da radon, polonio e bismuto, rispettivamente.

qualche effetto provocato da particelle alfa riflesse da superfici metalliche. Marsden progettò un esperimento in cui particelle alfa urtavano sottili lamine di vari materiali in una camera a vuoto; le particelle venivano rivelate dopo l'urto, tramite uno schermo di solfuro di zinco,

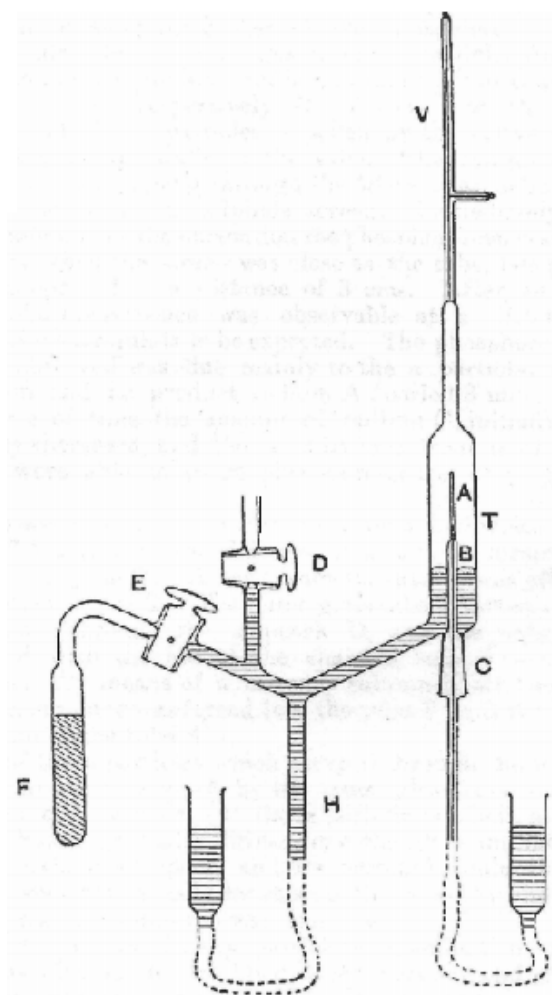


Figura 1.1. Apparato sperimentale usato da Rutherford e Royds per la determinazione della natura delle particelle alfa («Philosophical Magazine», 17 (1909), p. 282).

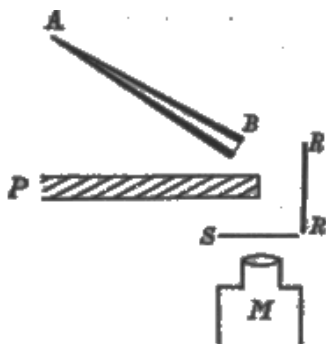


Figura 1.2. Apparato utilizzato da Geiger e Marsden per lo studio dello scattering di particelle α da parte di sottili fogli metallici («Proc. of the Royal Soc. A», 82 (1909), p. 496).

ZnS, che emette bagliori luminosi quando colpito da una particella carica. L'apparato sperimentale utilizzato è quello rappresentato in Fig. 1.2¹⁹. Come sorgente di particelle alfa veniva utilizzato radon in un tubo conico di vetro AB, chiuso in B con della mica attraverso cui le particelle alfa passavano e urtavano la lamina RR. S è lo schermo di ZnS posto dietro la piastra di piombo P che impedisce l'urto diretto di particelle alfa con S. Il numero di scintillazioni al minuto e per mm^2 veniva contato tramite il microscopio M.

Geiger e Marsden trovarono che una piccola frazione delle particelle alfa incidenti sulla lamina, circa 1 su 8000, subivano deflessioni medie di 90° .

In un esperimento successivo²⁰, Geiger aveva dedotto dai dati sperimentali l'angolo di deflessione più probabile in dipendenza dallo spessore della lamina. Come si può osservare in Fig. 1.3, l'angolo di scattering più probabile risulta essere molto minore di quello osservato in alcuni casi in cui le particelle venivano addirittura riflesse nel semispazio d'incidenza.

19. H. GEIGER e E. MARSDEN *On a diffuse reflection of the α -particles*, «Proc. of the Royal Soc. A», 82 (1909), p. 495.

20. H. GEIGER, *The Scattering of the α -Particles by Matter*, «Proceedings of Royal Society», A 83 (1910), p. 492.

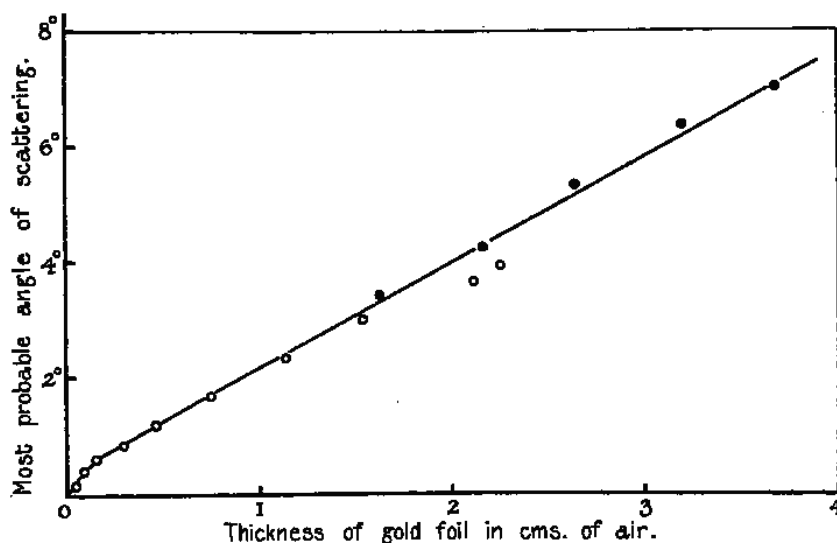


Figura 1.3. Angolo di scattering più probabile in funzione dello spessore equivalente del foglio di oro (Rif. 20, pag. 499).

Successivamente, Rutherford dimostrò che le grandi deviazioni non potevano essere dovute alla somma di un gran numero di piccole deviazioni, ma ad un unico evento di scattering con un singolo atomo.

I risultati degli esperimenti evidenziarono deviazioni delle particelle possibili solo supponendo che gli atomi fossero dotati di un nucleo centrale massivo, di carica positiva e di volume molto piccolo²¹.

Sulla base di questi esperimenti, Rutherford propose il suo modello nucleare dell'atomo contrapposto a quello formulato da J.J. Thomson nel 1902. Per Thomson, l'atomo era costituito da N cariche elettriche negative disseminate in una sfera di N cariche elettriche positive uniformemente distribuite. Con un tale modello, le azioni attrattive delle cariche negative sarebbero state compensate da quelle repulsive delle cariche positive, per cui il fascio delle particelle alfa sarebbe passato attraverso la lamina con piccole deviazioni.

Geiger e Mardsen notarono, invece, che le particelle alfa erano distribuite su un angolo compreso tra 0° e 180° , per cui vi erano moltissime particelle che non venivano deflesse, ma alcune venivano addirittura riflesse indietro (Fig. 1.4).

21. E. RUTHERFORD, *The scattering of alpha and beta particles by matter and the structure of the atom*, «Philosophical Magazine» 21 (1911), p. 669.