

AperTO - Archivio Istituzionale Open Access dell'Università di Torino

**La prima trasmutazione artificiale del nucleo e la scoperta del protone (Rutherford 1919) - The first nuclear artificial transmutation and the discovery of the proton (Rutherford 1919)**

**This is the author's manuscript**

*Original Citation:*

*Availability:*

This version is available <http://hdl.handle.net/2318/1726365> since 2020-02-03T14:52:32Z

*Published version:*

DOI:10.1393/gdf/i2020-10353-0

*Terms of use:*

Open Access

Anyone can freely access the full text of works made available as "Open Access". Works made available under a Creative Commons license can be used according to the terms and conditions of said license. Use of all other works requires consent of the right holder (author or publisher) if not exempted from copyright protection by the applicable law.

(Article begins on next page)

## **La prima trasmutazione artificiale del nucleo e la scoperta del protone (Rutherford 1919)**

## **The first nuclear artificial transmutation and the discovery of the proton (Rutherford 1919)**

Francesco Guerra

*Dipartimento di Fisica, Università di Roma “La Sapienza”, Roma, Italia*

*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma, Roma, Italia*

*Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche “Enrico Fermi”, Roma, Italia*

Matteo Leone

*Dipartimento di Filosofia e Scienze dell’Educazione, Università di Torino, Torino, Italia*

*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Torino, Torino, Italia*

*Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche “Enrico Fermi”, Roma, Italia*

Nadia Robotti

*Dipartimento di Fisica, Università di Genova, Genova, Italia*

*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Genova, Genova, Italia*

*Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche “Enrico Fermi”, Roma, Italia*

### **Riassunto**

Si ricostruisce il percorso che cento anni fa, nell’aprile del 1919, portò Rutherford alla realizzazione della prima trasmutazione artificiale del nucleo e alla scoperta del protone. Il filo conduttore di questo percorso è rappresentato dalla natura delle particelle  $\alpha$  e dal loro comportamento nel passaggio attraverso la materia. Studiando la diffusione (scattering) di queste particelle attraverso atomi pesanti, nel 1911, sulla base di alcuni esperimenti eseguiti da due suoi collaboratori, H. W. Geiger ed E. Marsden, Rutherford giungeva alla scoperta del nucleo atomico e alla formulazione della teoria dello scattering singolo. Estendendo, in modo naturale, queste ricerche allo scattering delle particelle  $\alpha$  attraverso atomi leggeri, in particolare attraverso l’Idrogeno, e coinvolgendo un suo nuovo collaboratore, C.G.Darwin, sul versante teorico e, nuovamente, Marsden su quello sperimentale, Rutherford a partire dal 1915 coglieva alcune anomalie di comportamento, che lo portavano a intervenire in prima persona. Con una serie di esperimenti che riprendevano in parte

quelli fatti da Marsden, ma che li superavano, giungeva così, nel 1919, alla scoperta che le particelle  $\alpha$  erano in grado di disintegrare il nucleo e che esisteva un nuovo componente nucleare, il “protone”, il quale veniva emesso in queste disintegrazioni. Nasceva così il primo modello nucleare a protoni ed elettroni.

## **Abstract**

We reconstruct the path that a hundred years ago, in April 1919, brought Rutherford to the realization of the first artificial transmutation of the nucleus and to the discovery of the proton. The common thread of this journey is represented by the nature of the  $\alpha$  particles and their behavior in the passage through the matter. In 1911, Rutherford came to the discovery of the atomic nucleus and to the formulation of the single scattering theory by studying the scattering of these particles through heavy atoms upon the basis of some experiments carried out by two of his collaborators, H.W. Geiger and E. Marsden. In the following years, Rutherford extended these researches to  $\alpha$  particle scattering through light atoms, and in particular through Hydrogen, again with the assistance of Marsden and of a new collaborator, the theoretician C.G. Darwin. And so it was that, since 1915, Rutherford started detecting anomalous experimental data and chose to intervene personally. As a consequence of this, by a series of experiments that partly resumed those made by Marsden, but which surpassed them, Rutherford came, in 1919, to the discovery that the  $\alpha$  particle was able to disintegrate the nucleus and that there was a new nuclear component, the "proton", which was issued in this disintegration. Thus, the first proton and electron nuclear model was born.

## **1. Ernest Rutherford, l'uomo delle particelle $\alpha$**

Ernest Rutherford nasce nel 1871 a Nelson, New Zealand, da una famiglia scozzese, immigrata dal 1842. Nel 1893 prende la doppia laurea in Matematica e in Fisica all'Università di Wellington in Nuova Zelanda. Nel 1894 vince una borsa di studio con cui si trasferisce al Trinity College di Cambridge, come “research student” presso il Cavendish Laboratory, sotto la direzione di J.J. Thomson, e successivamente ottiene il “B.A. Research Degree”. Nel 1898, a soli ventisei anni, si trasferisce in Canada come Professore di Fisica alla McGill University di Montreal.

Nel 1907 ritorna in Inghilterra, sempre come Professore di Fisica, presso l'Università di Manchester. L'anno dopo riceve il premio Nobel in Chimica “*per le sue investigazioni sulla disintegrazione degli elementi e sulla chimica delle sostanze radioattive*”.

Nel 1919 si trasferisce nuovamente al Cavendish Laboratory di Cambridge, succedendo a J.J. Thomson come Direttore del Laboratorio, e vi rimane fino alla morte (1937).

Rutherford è universalmente riconosciuto come il fondatore della Fisica Nucleare e, a buon diritto, potrebbe essere chiamato anche *l'uomo delle particelle  $\alpha$* . Infatti, con queste particelle, da lui stesso individuate, studiate e caratterizzate, non solo scoprì nel 1911 il nucleo atomico, ma riuscì a realizzare nel 1919, proprio cento anni fa, la prima disintegrazione artificiale del nucleo, individuando nello stesso tempo anche un suo primo costituente, il protone [1].

## **2. I “raggi $\alpha$ ” e la loro natura**

Dopo la scoperta, nel 1896, della radioattività naturale da parte di E. Becquerel, Rutherford nel gennaio del 1898, quando era ancora al Cavendish Laboratory di Cambridge, si interessò alla natura della radiazione emessa spontaneamente dai corpi radioattivi, dimostrando con un esperimento molto ingegnoso che essa non era omogenea, ma era composta da almeno due tipi di radiazioni: una molto penetrante, che chiamò “raggi  $\beta$ ”, e un'altra, meno penetrante, che chiamò “raggi  $\alpha$ ” [2].

I raggi beta furono subito identificati dallo stesso Becquerel con le nuove particelle, gli “elettroni”, appena scoperte da Thomson (1897), sulla base della loro deflessione in campo magnetico e in campo elettrico. L'identificazione dei “raggi  $\alpha$ ” risultò, invece, molto più problematica, a causa della loro massa molto maggiore.

Su questo punto si impegnò da subito Rutherford, riuscendo alla fine, nel 1903, a deflettere i “raggi  $\alpha$ ” in un campo magnetico e a stabilire che erano particelle pesanti, di carica positiva.

Successivamente, fu in grado di defletterli anche in campo elettrico giungendo, così, a una prima stima del loro rapporto carica/massa (circa 5000 u.e.m.) e della loro velocità (molto elevata, dell'ordine di  $2,5 \cdot 10^9$  cm/s) [3].

Nel 1908, dopo essersi trasferito all'Università di Manchester, con il contributo di Hans Wilhelm Geiger (1882-1945), ricercatore presso questa Università, riuscì a misurarne anche la carica e a stabilire così che erano “atomi di elio doppiamente ionizzati” (a quel tempo si parlava di atomi di elio perché il nucleo non era stato ancora scoperto).

Riguardo alle proprietà di queste particelle, quella che venne indagata per prima da Rutherford fu il loro comportamento nel passaggio attraverso la materia. Questo studio fu realizzato da Rutherford nel 1906, quando era ancora in Canada, utilizzando per la rivelazione delle particelle  $\alpha$  il metodo fotografico. Esso portò al risultato che le particelle  $\alpha$  nell'attraversare la materia, in qualsiasi stato essa si trovasse, gassoso oppure solido (Rutherford aveva fatto misure usando sia aria, sia una sottile lamina di mica) venivano leggermente deflesse rispetto al loro percorso originario.

Questo è il primo e unico esperimento sullo *scattering* delle particelle  $\alpha$  fatto da Rutherford prima della scoperta, nel 1911, del nucleo atomico [4]. Saranno due suoi nuovi collaboratori, il già citato Geiger ed Ernest Marsden (1889-1970), allora studente di Rutherford, che porteranno avanti questo tipo di ricerca, effettuando tra il 1908 e il 1910 (prima Geiger da solo e poi con Marsden) una serie di esperimenti sullo scattering delle particelle  $\alpha$  attraverso sottili diffusori d'oro e di platino.

Il grande salto di qualità in questi esperimenti, rispetto a quelli di Rutherford del 1906, fu la messa a punto, per rilevare le particelle  $\alpha$ , del metodo della scintillazione, che è un metodo quantitativo, molto più preciso di quello fotografico. Esso era basato sulla proprietà delle particelle  $\alpha$  di provocare uno spot luminoso quando incidavano su uno schermo di solfuro di zinco (ZnS) e quindi permetteva, con l'aiuto di un microscopio, di contare singolarmente le particelle  $\alpha$  che arrivavano sullo schermo.

Lo schema sperimentale generale da loro impiegato consisteva nel far incidere un sottile fascio di particelle  $\alpha$  normalmente a una lamina di materiale e nell'osservare su uno schermo di ZnS il numero di particelle deflesse ai vari angoli. Questo fu un lavoro molto difficile e laborioso che implicò il conteggio di molte migliaia di particelle.

Con questi esperimenti Geiger e Marsden giunsero al risultato strepitoso che le particelle  $\alpha$  nel passaggio attraverso diffusori d'oro e di platino venivano deflesse, rispetto alla loro direzione iniziale, di angoli notevoli, in certi casi addirittura maggiori di  $90^\circ$ .

Comunque, sebbene fossero consapevoli che questi grandi angoli di scattering richiedevano la presenza all'interno dell'atomo di campi elettrici molto intensi, non cercarono di spiegarne l'origine. Questo compito venne lasciato a Rutherford, il quale, l'anno successivo (1911), ne diede una soluzione, introducendo l'idea che la carica atomica positiva, che fino ad allora, secondo la teoria di J.J. Thomson del 1904, si pensava distribuita uniformemente in tutto il volume atomico, fosse concentrata al centro dell'atomo in un volume estremamente piccolo, il *nucleo*. In questo modo i campi elettrici presenti all'interno dell'atomo risultavano molto più intensi, ad esempio, nel caso dell'oro maggiori di circa  $10^9$  volte, e quindi si poteva ipotizzare che i grandi angoli di scattering fossero dovuti a un singolo urto atomico delle particelle  $\alpha$  con l'atomo bersaglio.

La teoria dello scattering che Rutherford formulava su queste basi (la cosiddetta *teoria dello scattering singolo*) trovò una conferma molto soddisfacente in successivi esperimenti di Geiger e Marsden del 1913.

Comunque il problema dello scattering delle particelle  $\alpha$  attraverso la materia non poteva ancora dirsi completamente esaurito.

### 3. Le particelle $\alpha$ contro atomi leggeri

Quando Rutherford, nel 1911, aveva sviluppato la sua teoria dello scattering singolo aveva affrontato soltanto il caso dell'urto di una particella  $\alpha$  contro un nucleo pesante (infatti si era mosso nell'ottica di spiegare i risultati di Geiger e Marsden, che erano relativi all'oro e al platino) e quindi "per semplicità di calcolo" aveva fatto l'assunzione, a priori ragionevole, che nella collisione il nucleo urtato rimanesse fermo. Tuttavia, come precisava lo stesso Rutherford nel 1911, "nei casi in cui la massa dell'atomo bersaglio (per esempio idrogeno, elio, litio) non è molto diversa da quella di una particella  $\alpha$ , la teoria generale dello scattering singolo richiede una modifica, poiché è necessario tener conto del moto dell'atomo stesso" [5, p. 688].

Questa modifica veniva apportata nel 1914, su suggerimento dello stesso Rutherford, da un altro suo giovane collaboratore, il fisico-matematico C.G. Darwin (1887-1962).

Darwin, oltre a ricavare un'espressione della distanza minima di avvicinamento tra le particelle  $\alpha$  e il nucleo bersaglio in funzione dei parametri delle particelle in gioco, giungeva a una nuova espressione per il numero di particelle  $\alpha$  deflesse a un certo angolo, che, nel caso di urto con atomi pesanti, era approssimata molto bene da quella di Rutherford.

Darwin, inoltre, elaborava in dettaglio la teoria dello scattering delle particelle  $\alpha$  contro l'idrogeno, giungendo alla conclusione che gli "atomi di H", nell'impatto con le  $\alpha$ , avrebbero acquistato una velocità 1,6 volte maggiore di quella delle  $\alpha$ , avrebbero avuto un *range* (ovvero un percorso) circa quattro volte quello delle particelle  $\alpha$  e avrebbero dovuto avere un'energia 0,64 volte quella delle  $\alpha$ . Pertanto, se tutto questo era vero, avrebbero dovuto essere visibili, come le  $\alpha$ , con il metodo della scintillazione, anche se con una luminosità più debole [6].

Nello stesso anno 1914 la teoria di Darwin, nel caso dell'idrogeno, veniva sottoposta a verifica sperimentale da parte di Marsden, ancora una volta sotto esplicita richiesta di Rutherford (scriveva infatti Rutherford in un articolo di poco antecedente a quello di Marsden: "*Mr. Marsden ha cortesemente effettuato esperimenti per conto mio per verificare la possibilità di rivelare la presenza di tali atomi di idrogeno. Un resoconto dettagliato dei suoi esperimenti apparirà più avanti*" [7]).

La tecnica per rilevare le particelle deflesse, utilizzata da Marsden [8], era quella della scintillazione, già sperimentata a Manchester e di cui si è prima detto.

L'apparato usato (Fig. 1) era costituito da un tubo lungo 1 m e di diametro 9 cm, chiuso da un lato da uno schermo di solfuro di zinco (Z), su cui, con un microscopio (M), venivano rilevate le  $\alpha$ , e dall'altro lato da una lastra di vetro (P). La sorgente di particelle  $\alpha$  (S) era costituita da un bulbo di vetro contenente "emanazione di Radio" ( $^{222}\text{Rn}$ ) posta su un supporto mobile, in modo da variare la

sua distanza dallo schermo Z. Il tutto era riempito con idrogeno a pressione atmosferica e posto in un campo magnetico, in modo tale da eliminare i raggi beta emessi dalla sorgente.

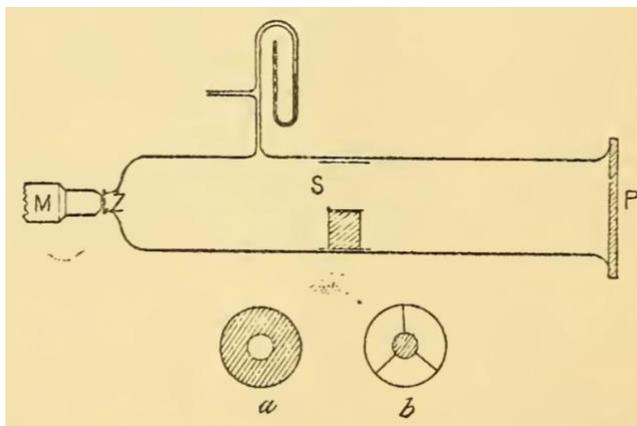


Fig. 1 – Apparato usato da Marsden per verificare la teoria di Darwin sullo scattering delle particelle  $\alpha$  su atomi di idrogeno [8, p. 824].

Variando la distanza della sorgente S dallo schermo Z e studiando le scintillazioni presenti su di esso, Marsden ricavò, in accordo con le previsioni della teoria di Darwin, che sullo schermo Z, oltre alle particelle  $\alpha$ , erano rilevabili altre “particelle scintillanti”, che chiamò “particelle H”, le quali producevano scintillazioni molto più deboli di quelle lasciate dalle  $\alpha$  ma avevano un range che era “almeno 3.5 volte superiore a quello delle  $\alpha$ ”. Inoltre, mettendo schermi di alluminio in varie posizioni strategiche tra S e Z, dimostrava che queste “particelle H” erano proprio generate nell’idrogeno”.

Già questi risultati mostravano, dunque, un “buon accordo qualitativo con i calcoli di Darwin” [8].

#### 4. Marsden e Lantsberry: un primo indizio

L’anno successivo (1915) Marsden, assieme a uno studente, W.C. Lantsberry, iniziava una serie di “misure quantitative del numero e distribuzione delle particelle H quando un fascio parallelo di particelle  $\alpha$  di definita velocità e intensità attraversava uno spessore noto di gas idrogeno” [9].

Come primo esperimento (e questa fu la mossa vincente) invece di usare l’apparato messo a punto in precedenza, con l’idrogeno allo stato gassoso, fecero un esperimento alla “vecchia maniera”, come avevano fatto per primi Geiger e Marsden, cioè fecero incidere perpendicolarmente su un sottile foglio di cera (che si sapeva contenere idrogeno) un fascio di particelle  $\alpha$  emesse da una sorgente di “emanazione di Radio” e osservarono con il metodo della scintillazione il numero di

“particelle H” (provenienti dalla cera) deflesse ai vari angoli. Per garantire che sullo schermo di solfuro di zinco arrivassero solo “particelle H”, era stata posta tra la cera e lo schermo una lamina di alluminio, in modo da assorbire tutte le particelle  $\alpha$ , dopo che avevano attraversato la cera.

I risultati, sorprendentemente, erano in contrasto con la teoria di Darwin. Scrivevano infatti Marsden e Lantsberry: “gli effetti osservati erano molte volte più grandi di quanto anticipato dalla formula” [9, p. 241].

Per spiegare il maggior numero di “particelle H” presenti, rispetto a quello prevedibile dalla composizione della cera ( $C_{27}H_{56}$ ), ipotizzarono che la stessa sorgente di particelle  $\alpha$  desse origine a “particelle H” (in realtà, senza rendersene conto, Marsden e Lantsberry avevano realizzato la prima disintegrazione nucleare della storia, liberando “particelle H” probabilmente dall’azoto dell’aria). A questo punto si concentrarono sulla sorgente di particelle  $\alpha$  e fecero un altro tipo di esperimento: tolsero la cera e posero la sorgente di particelle  $\alpha$ , sempre in aria, a una distanza dallo schermo di solfuro di zinco di 8 cm, cioè a una distanza molto maggiore del range delle  $\alpha$ , che era di 4 cm (per eliminare i  $\beta$  provenienti dalla sorgente, applicarono nello spazio tra sorgente e schermo un campo magnetico).

In queste condizioni, sebbene fosse noto che la presenza dell’idrogeno nell’aria era quasi inesistente, rilevarono sullo schermo scintillazioni identiche a quelle prodotte da “particelle H”. Sembrava dunque provato che la sorgente emettesse “particelle H”. Si trattava ora di stabilire da dove provenivano precisamente queste particelle. Come osservavano Marsden e Lantsberry, potevano provenire dall’idrogeno presente nel gas all’interno del tubo di vetro che racchiudeva la sorgente, oppure dall’idrogeno contenuto nel vetro del tubo, oppure dall’idrogeno o dal vapore d’acqua occluso nella superficie del tubo di vetro.

Dopo aver escluso per via sperimentale tutte queste possibilità, così concludevano:

*“Sembra forte il sospetto che le particelle H siano emesse dagli stessi atomi radioattivi”* [9, p. 243].

Questi esperimenti, interrotti da Marsden nel 1915 per la sua partenza per la Nuova Zelanda, dove era stato nominato professore di Fisica presso il Victoria University College di Wellington, vennero subito ripresi da Rutherford e portati avanti “a intervalli irregolari”, a causa della guerra (Rutherford era infatti impegnato in ricerche sull’avvistamento dei sommergibili), fino al 1919.

## **5. Rutherford interviene direttamente: primi risultati**

L’interesse di Rutherford alla prosecuzione di questi esperimenti sullo scattering di particelle  $\alpha$  con atomi di idrogeno derivava dalla convinzione, maturata sin dall’inizio, che essi potevano dare informazioni sulla distanza minima di avvicinamento delle particelle  $\alpha$  al nucleo di H (che lui

spesso chiamava “atomo di H”), sulle forze che intervenivano nel loro urto e, infine, sulle loro dimensioni.

Inoltre, un'altra questione che stava a cuore a Rutherford era quella di verificare la conclusione di Marsden e Lantsberry secondo cui le sostanze radioattive davano origine a veloci “particelle H” (fino ad allora non era mai stata osservata, nelle trasformazioni radioattive, la presenza di elementi leggeri, a eccezione dell'elio sotto forma di particelle  $\alpha$ ).

Nel 1919, poco prima di trasferirsi al Cavendish Laboratory di Cambridge, Rutherford comunicava i risultati raggiunti con questi nuovi esperimenti, che riguardavano non solo l'idrogeno, ma anche altri gas leggeri, in un lavoro diviso in quattro parti: *Collision of alpha particles with light atoms: I. Hydrogen; II. Velocity of the hydrogen atom; III. Nitrogen and oxygen atoms; IV. An anomalous effect in nitrogen* [10].

Nella quarta parte veniva annunciata, senza eccessivo clamore, quasi in sordina, l'avvenuta realizzazione, nel caso dell'azoto, di una prima trasmutazione nucleare attraverso il bombardamento di particelle  $\alpha$  e, con essa, l'identificazione nell'“atomo H” di un nuovo componente del nucleo, che nel 1920 chiamerà “protone” [10, p. 581-587].

L'apparato usato da Rutherford in questi esperimenti era un perfezionamento di quello ideato da Marsden, e con dimensioni molto più ridotte (Fig. 2-3). Si trattava di un tubo di bronzo lungo 18 cm, profondo 6 cm, largo 2 cm., che, per mezzo di due rubinetti, veniva riempito con il gas da esaminare. La sorgente di particelle  $\alpha$  (D) era costituita da “Radio C” ( $^{214}\text{Po}$ ), che, a differenza di quella usata da Marsden, era monoenergetica, ed era posta all'interno del tubo, su un supporto scorrevole. Un estremo del tubo era chiuso da una lastra di vetro (C), mentre l'altro estremo era chiuso da una piastra in ottone cerato, al centro del quale era praticata un'apertura rettangolare lunga 1 cm e larga 3 mm. Questa era coperta da una sottile lamina metallica (S) la cui funzione era quella di assorbire le particelle  $\alpha$  alla fine del loro percorso. Come scriveva Rutherford: “Poiché il numero di atomi H osservati in condizioni ordinarie è meno di centomila volte il numero delle  $\alpha$ , gli atomi H proiettati nella direzione delle  $\alpha$  possono essere osservati solo quando le  $\alpha$  vengono fermate” [10, p. 543]. Lo schermo di solfuro di zinco (F) era posto all'esterno del tubo, a una distanza di 1 o 2 mm dalla lamina metallica S. Questa disposizione presentava il duplice vantaggio di evitare contaminazioni con materia attiva volatile presente all'interno del tubo e di consentire l'eventuale introduzione di schermi assorbenti tra la lamina metallica S e lo schermo di solfuro di Zinco.

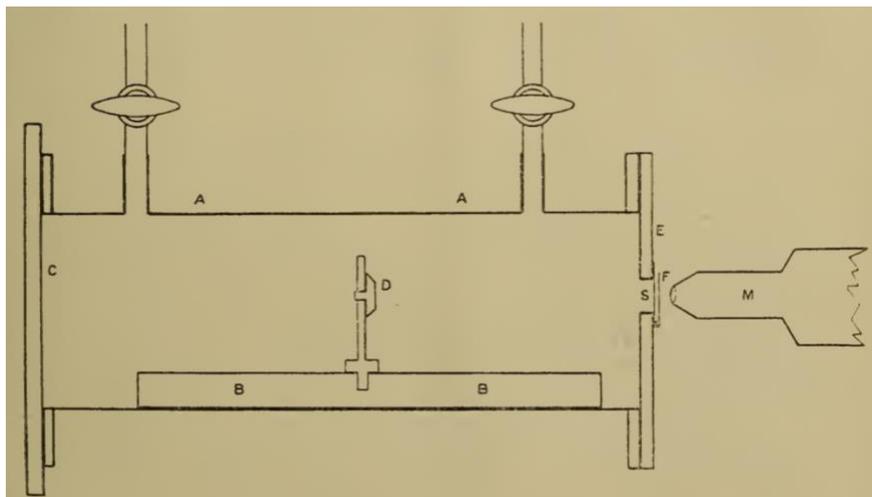


Fig. 2 – Schema dell'apparato con cui Rutherford studiò la collisione di particelle  $\alpha$  con atomi leggeri [10, p. 543].

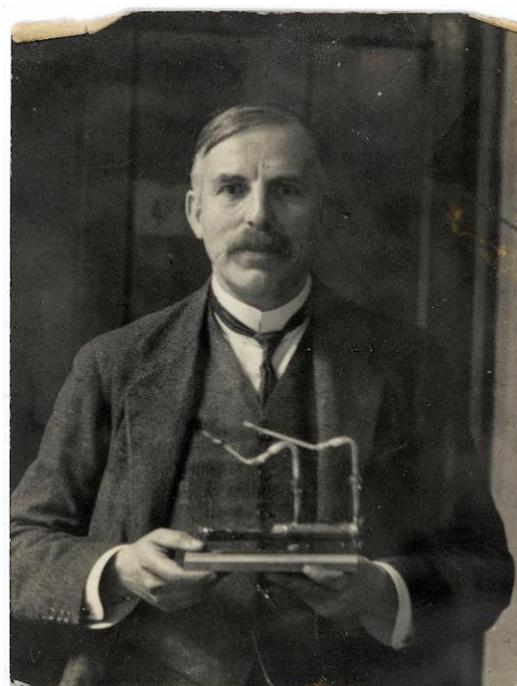


Fig. 3 - Rutherford fotografato con l'apparecchio con cui realizzò la sua prima disintegrazione nucleare (1919).

Con questo apparato, Rutherford, nella prima parte del lavoro, confermò, nel caso dell'idrogeno, alcune previsioni della teoria di Darwin, in accordo a quanto già fatto da Marsden, riguardo in particolare al range degli "atomi H", ma trovò forti discrepanze con la teoria riguardo alla

distribuzione delle velocità degli “atomi H” presenti, e anche riguardo al loro numero, che era maggiore di quello previsto teoricamente. In questa prima parte affrontò anche la questione sollevata da Marsden secondo cui la stessa sorgente radioattiva emetteva “particelle H”.

A tal fine rifece in pratica un esperimento molto simile a quello di Marsden (sorgente in aria, schermo di solfuro di zinco posto a oltre 2 cm il range delle  $\alpha$  e campo magnetico) e confermò che “come osservato da Marsden, atomi di H vengono emessi dalla sorgente radioattiva” [10, p. 558].

## **6. Un “effetto sorprendente”: la prima disintegrazione artificiale e la scoperta del protone**

A questo punto però, secondo Rutherford, era ancora aperta una questione di fondo e cioè “se questi «atomi H»”, visti anche da Rutherford e i cui effetti Marsden aveva chiamato “scintillazioni naturali”, avevano origine “dalle trasformazioni radioattive del materiale che costituiva la sorgente di particelle  $\alpha$ , come sostenuto da Marsden, oppure dall’H occluso nella sorgente” o da altre cause [10, p. 581].

Su questo punto si concentrava nella quarta e ultima parte del lavoro.

In particolare, studiava “le scintillazioni naturali” di Marsden in modo sistematico, non semplicemente esponendo la sorgente “all’aria aperta”, come aveva già fatto Marsden e come aveva fatto nella prima parte del suo lavoro, ma immergendola in gas diversi, e anche nel vuoto.

A tal fine usava lo stesso apparato con cui aveva studiato lo scattering delle particelle  $\alpha$  con l’idrogeno (Fig. 2), e poneva la sorgente (Radio C) in una posizione fissa, a circa 3 cm dal fondo dell’apparato, dentro a una scatola metallica, con un’apertura ricoperta con una lastra d’argento (S) in grado di fermare le  $\alpha$ , e variava il tipo di gas all’interno dell’apparato. Lo schermo di solfuro di zinco veniva lasciato all’esterno dell’apparato, distante circa 1 mm dalla lastra di argento, in modo da introdurre nello spazio tra la lastra d’argento e lo schermo fogli assorbenti di alluminio.

L’apparato veniva posto in un campo magnetico in modo da escludere i raggi  $\beta$  provenienti dalla sorgente. In queste condizioni individuava sullo schermo di solfuro di zinco scintillazioni “naturali tipo particelle H”.

A questo punto, come prima operazione, toglieva dall’apparato l’aria e misurava (con il vuoto) il numero di queste «scintillazioni H naturali» al variare degli spessori di alluminio (espressi in termini di cm d’aria) interposti tra la lastra di argento e lo schermo di solfuro di zinco. Da notare che si trattava di uno spazio piccolissimo, profondo un millimetro! Successivamente, rifece le misure introducendo nell’apparato rispettivamente ossigeno secco e biossido di carbonio. In queste condizioni osservava che il numero di “scintillazioni H naturali”, all’aumentare degli spessori interposti, diminuiva, rispetto al caso in cui era stato praticato il vuoto, di una quantità circa uguale

a quanto ci si aspettava in base al potere assorbente della colonna di gas attraversato.

Introducendo successivamente l'aria secca, Rutherford, però, si accorgeva di un "effetto sorprendente" [10, p. 581]. Il numero di scintillazioni "naturali" presenti era maggiore rispetto al caso del vuoto: ad esempio, per un assorbimento corrispondente a circa 19 cm di aria il numero delle scintillazioni osservato con l'aria secca era circa il doppio di quello osservato senza aria. Era chiaro da questo esperimento che le  $\alpha$ , nel passaggio attraverso l'aria secca, avevano dato origine a "scintillazioni a lungo range", che apparivano all'occhio circa uguali in brillantezza alle "scintillazioni H" e che quindi avevano i requisiti per essere attribuite ad "atomi di idrogeno".

A questo punto Rutherford iniziava una serie di osservazioni sistematiche per spiegare l'origine di queste "scintillazioni del tipo H", presenti con l'aria secca (che, al suolo, è composta all'incirca per il 78,09% di Azoto ( $N_2$ ), per il 20,9% di Ossigeno ( $O_2$ ), per lo 0,93% di Argon (Ar) e per lo 0,04% di Anidride Carbonica ( $CO_2$ )), più altri componenti in quantità minori, tra cui anche particelle solide in sospensione, il cosiddetto pulviscolo atmosferico).

In primo luogo veniva escluso che queste "scintillazioni a lungo range" fossero dovute ad atomi di Azoto o di Ossigeno (infatti il range di questi atomi, come aveva in precedenza mostrato Rutherford nella terza parte del lavoro, era molto inferiore, ossia circa 9 cm). Veniva poi escluso che fossero dovute alla presenza nell'aria di vapor d'acqua (il loro numero variava pochissimo asciugando completamente l'aria secca). Veniva anche escluso che provenissero dal pulviscolo atmosferico (filtrando l'aria secca non era riscontrabile nessuna variazione).

Poiché l'"effetto sorprendente" era osservabile solo in aria secca e non in Ossigeno o in Anidride Carbonica, esso poteva essere dovuto all'Azoto oppure agli altri gas presenti nell'aria secca.

Quest'ultima possibilità veniva esclusa paragonando gli effetti prodotti in aria con quelli prodotti in Azoto. Con Azoto puro, completamente asciugato, il numero di "scintillazioni a lungo range" era molto più grande che in aria. Quindi, queste "scintillazioni a lungo range del tipo H" ottenute nell'aria dovevano essere attribuite all'azoto. Esse, però, non potevano essere identificate con atomi d'azoto, perché, come aveva in precedenza mostrato, il range di questi atomi era minore. Così concludeva Rutherford:

*"È difficile evitare la conclusione che gli atomi a lungo range che hanno origine dalla collisione di particelle  $\alpha$  con azoto non sono atomi di azoto ma probabilmente atomi di idrogeno, o atomi di massa 2. Se questo è il caso, dobbiamo concludere che l'atomo di azoto si è disintegrato sotto le intense forze sviluppate in una stretta collisione con una veloce particella  $\alpha$  e che l'atomo di idrogeno che si è liberato formava una parte costituente del nucleo di azoto"* [10, p. 586].

Attraverso successivi esperimenti, volti a studiare la deflessione in un campo magnetico subito da questi "atomi a lungo range" provenienti dall'azoto, Rutherford riusciva a dimostrare che essi erano

proprio “atomi d’idrogeno”. Scriveva Rutherford nella *Bakerian Lecture* del 1920, dopo aver citato il risultato di questi esperimenti:

*“Le particelle a lungo range liberate dall’azoto sono atomi di idrogeno. La possibilità che le particelle possano essere di massa 2, 3, o 4 è definitivamente esclusa. [...] È dunque chiaro che alcuni degli atomi di azoto sono disintegrati dalla loro collisione con veloci particelle  $\alpha$  e che vengono espulsi veloci atomi d’idrogeno caricati positivamente. Si deve quindi concludere che l’atomo carico d’idrogeno è uno dei componenti con cui è fatto il nucleo d’azoto.*

*Mentre è noto da tempo che l’elio è il prodotto della trasformazione spontanea di alcuni elementi radioattivi, la possibilità di disintegrare la struttura di atomi stabili con mezzi artificiali è stata argomento di incertezza. Questa è la prima volta che è stata ottenuta evidenza che l’idrogeno è uno dei componenti del nucleo d’azoto”* [11, p. 385].

Così proseguiva, usando finalmente la parola “nucleo di idrogeno”, invece che “atomo di idrogeno”:

*“Considerando la possibile costituzione degli elementi, è naturale supporre che essi sono costituiti in definitiva da nuclei di idrogeno ed elettroni. In questa ottica il nucleo di elio è composto da quattro nuclei di idrogeno e due elettroni negativi con una carica risultante di due”* [11, p. 395].

Al nucleo di idrogeno, nello stesso anno 1920, durante il Congresso Annuale della British Association svoltosi a Cardiff, veniva dato da Rutherford il nome di “protone” [12]

Nasceva così, dalle mani di Rutherford, il modello nucleare a protoni ed elettroni”, che resterà fino al 1932, cioè fino alla scoperta da parte di Chadwick del “neutrone”, il punto di riferimento della fisica del nucleo.

Rutherford così concludeva l’articolo del 1919:

*“I risultati nel loro insieme suggeriscono che se una particella  $\alpha$  o proiettili simili di ancora maggiore energia fossero disponibili per l’esperimento, ci potremmo aspettare di rompere [“break down”] la struttura nucleare di molti degli atomi leggeri”* [10, p. 587].

Questa previsione venne confermata da Rutherford, assieme a J. Chadwick (allora suo dottorando), tra il 1921 e il 1922 in due articoli in cui veniva comunicato che, utilizzando una sorgente di particelle  $\alpha$  più potente (Radio C con particelle  $\alpha$  di range 7 cm) erano riusciti a produrre la disintegrazione artificiale di cinque elementi leggeri, oltre che dell’Azoto, sui 19 testati: Boro, Fluoro, Sodio, Alluminio, Fosforo [13-14]. Ulteriori disintegrazioni di nuclei leggeri venivano comunicate in un successivo lavoro del 1924, a firma sempre di Rutherford e Chadwick [15].

## **7. Vedere le disintegrazioni artificiali**

Il metodo della scintillazione, come si è detto, aveva portato a grandi risultati. Tuttavia, se si

volevano avere informazioni sul meccanismo dell'urto e sulle disintegrazioni nucleari che si erano prodotte, a parere di Rutherford, "vista la nostra ignoranza sulla costituzione dei nuclei e la natura delle forze nei loro immediati dintorni", tale metodo non era sufficiente. Come suggeriva già nella Bakerian Lecture del 1920, esso doveva essere affiancato dal "ben noto metodo dell'espansione di C.T.R. Wilson", ovvero utilizzare "la camera a nebbia", messa a punto da Wilson presso il Cavendish Laboratory nel 1911, la quale consentiva di visualizzare la traccia lasciata da una particella carica o da una radiazione ionizzante all'interno di un gas saturo e anche di fotografarla. Osservava Rutherford:

*"In questo modo noi speriamo di ottenere valide informazioni sulle condizioni che determinano la disintegrazione degli atomi e sull'energia relativa comunicata ai tre sistemi coinvolti, cioè la particella  $\alpha$ , l'atomo fuoriuscito e il nucleo residuo"* [11, p. 393].

Non a caso, appena giunto al Cavendish Laboratory, di questo problema incaricò un suo nuovo collaboratore, T. Shimizu, il quale mise a punto una variante della camera di Wilson, in cui l'espansione veniva prodotta periodicamente diverse volte al secondo e in cui era stato modificato il metodo di fotografare le tracce. Comunque, Shimizu non riuscì ad ottenere immagini che testimoniassero avvenute trasmutazioni nucleari.

Il successo fu raggiunto tre anni dopo (1924) da P.M.S. Blackett, un altro collaboratore di Rutherford [16]. Blackett modificò una sua precedente macchina di Wilson e studiò le tracce lasciate dalle particelle  $\alpha$  nel passaggio attraverso l'azoto (la sorgente di particelle  $\alpha$  era costituita da Torio B e Torio C). Scattò circa 23.000 fotografie e riuscì a individuare le tracce di circa 270.000  $\alpha$  di range 5,0 cm e 145.000  $\alpha$  di range 8,6 cm. In molte di queste tracce erano presenti delle "fork" (forcelle) (Fig. 4) in cui la traccia della  $\alpha$  si biforcava in due, una dovuta alla  $\alpha$  originaria, l'altra, più corta e più larga, dovuta al nucleo di azoto urtato, a testimonianza dell'avvenuta collisione elastica tra  $\alpha$  e azoto.

Comunque, oltre a queste "fork normali", Blackett ne trovava otto di un tipo diverso: la traccia dovuta alla particella  $\alpha$  spariva e comparivano due tracce, una, molto sottile, attribuibile al protone e l'altra molto simile a quella lasciata dal nucleo di azoto in una "fork normale" (Fig. 5).

Richiamandosi a quanto già previsto da Rutherford, Blackett concludeva che la particella  $\alpha$ , nell'urto con un nucleo, veniva da questo assorbita, e veniva espulso un protone (p) dando così origine a un nuovo nucleo, di specie chimica diversa da quella originaria: in questo caso, tenuto conto del numero atomico, l'Azoto ( $Z=7$ ), attraverso l'assorbimento di una particella  $\alpha$  ( $Z=2$ ) e l'espulsione di un protone ( $Z=1$ ), veniva trasformato in Ossigeno ( $Z=8$ ), secondo una reazione del tipo che ora chiamiamo ( $\alpha,p$ ).

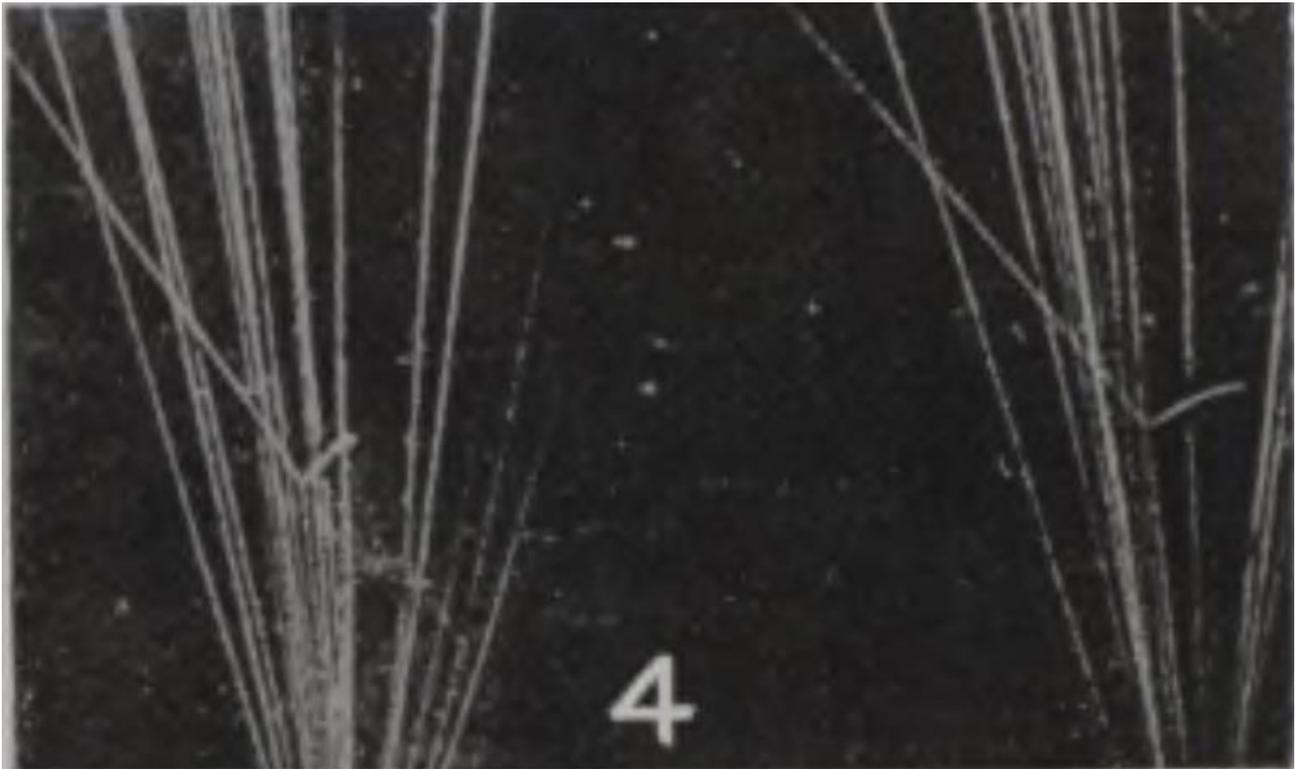


Fig. 4 – Fotografia in camera a nebbia con cui Blackett evidenziò la presenza di biforcazioni delle tracce delle particelle  $\alpha$ , prodotte dalla collisione elastica tra le particelle  $\alpha$  e atomi leggeri [16, tav. 6].

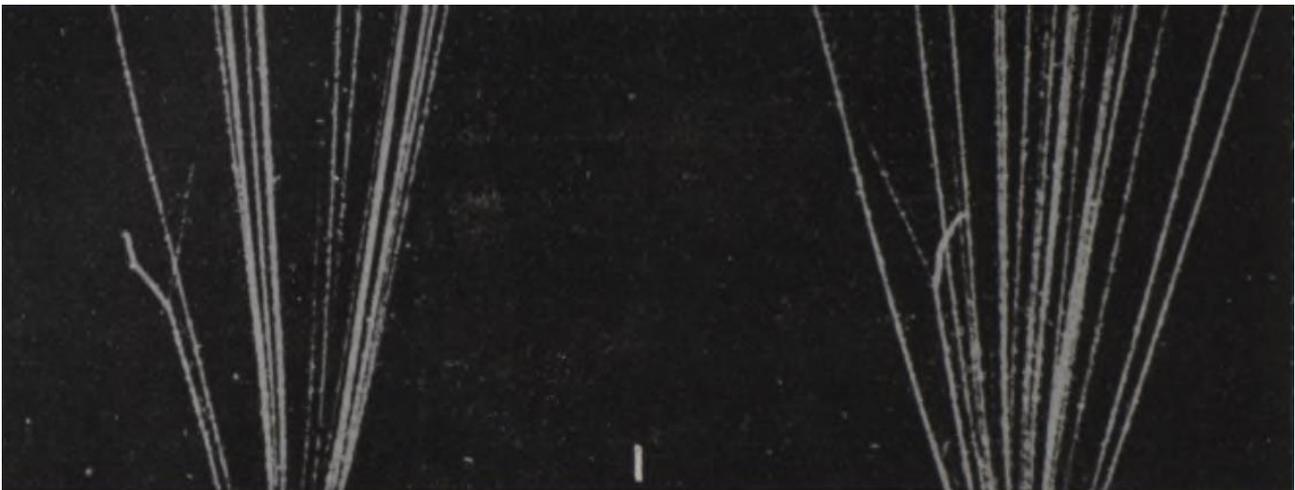


Fig. 5 – Fotografia in camera a nebbia con cui Blackett evidenziò la presenza di un diverso tipo di evento rispetto a quello raffigurato in Fig. 3. In questo caso, la biforcazione della traccia della particella  $\alpha$  è prodotta dalla disintegrazione di un nucleo di azoto e la contestuale emissione di un protone [16, tav. 7].

Così, sempre sotto l'indicazione e la supervisione di Rutherford, e grazie alla camera a nebbia di Wilson (non a caso definita da Rutherford “la macchina più intelligente nella storia della Fisica”), non solo veniva provata l'esistenza del protone e la possibilità di disintegrare gli atomi con le particelle  $\alpha$ , ma veniva indicato anche il modo in cui un elemento chimico poteva essere trasformato in un altro elemento chimico, realizzando, così, in un certo senso, il vecchio sogno degli alchimisti!

Rutherford, per le sue fondamentali ricerche sulla struttura della materia, fu nominato, a partire dal 1903, Membro della Royal Society (per poi diventarne Presidente nel 1925), Cavaliere nel 1914 (da cui il titolo di “Sir”), infine, nel 1931, *Barone Rutherford di Nelson di Cambridge nella Contea di Cambridge* (Fig. 6). Inspiegabilmente, ricevette un solo premio Nobel, quello per la Chimica nel 1908.

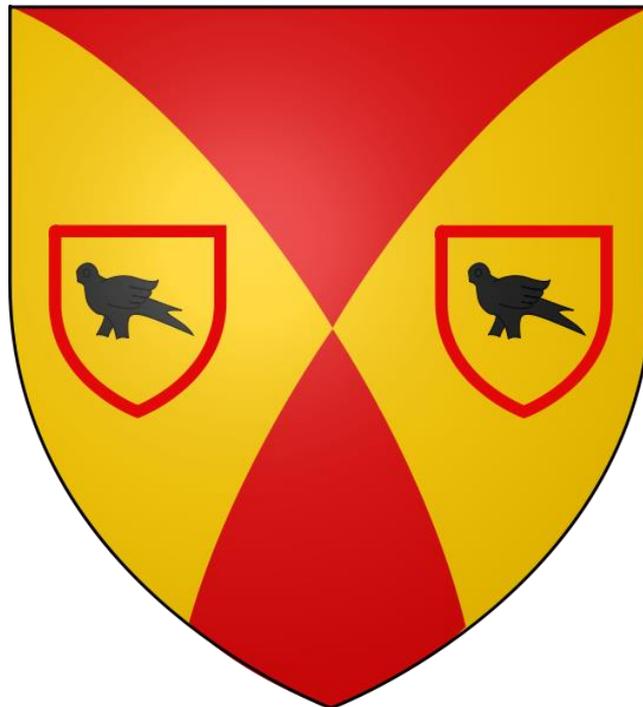


Fig. 6 – Stemma di Ernest Rutherford, 1° Barone Rutherford di Nelson

([https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/22/Ernest\\_Rutherford\\_Arms.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/22/Ernest_Rutherford_Arms.svg))

## Bibliografia

[1] Robotti N., “Rutherford e il sogno degli alchimisti”, *Asimmetrie*, 26 (2019), 38-39

[2] Rutherford E., “Uranium radiation and the electrical conduction produced by it”, *Phil. Mag.*, 47 (1899) 116.

- [3] Rutherford E., "The Chemical Nature of the alpha-Particles from Radioactive Substances". Before the Royal Academy of Science at Stockholm. In Chadwick J. (ed), *The Collected Papers of Lord Rutherford vol. II* (Interscience Publishers, New York) 1963, 137-146.
- [4] Leone M., Robotti N and Verna G., "'Rutherford's experiment' on alpha particles scattering: the experiment that never was", *Physics Education* 53:3 (2018) 035003.
- [5] Rutherford E., "The scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  particles and the structure of the atom", *Phil. Mag.*, 21 (1911) 669–688.
- [6] Darwin C.G., "Collision of  $\alpha$  particles with light atoms", *Phil. Mag.*, 27 (1914) 499-506.
- [7] Rutherford E., "The structure of the atom", *Phil. Mag.*, 27 (1914) 488-498.
- [8] Marsden E., "The passage of  $\alpha$  particles through hydrogen", *Phil. Mag.* 27 (1914) 824-830.
- [9] Marsden E. and Lantsberry W.C. "The passage of  $\alpha$  particles through hydrogen.—II", *Phil. Mag.* 30 (1915) 240-243.
- [10] Rutherford E., "Collision of  $\alpha$  Particles with Light Atoms, I. Hydrogen, II. Velocity of the Hydrogen Atom. III. Nitrogen and Oxygen Atoms. IV. An Anomalous Effect in Nitrogen", *Phil. Mag.* 37 (1919) 537-587.
- [11] Rutherford E., "Bakerian lecture: nuclear constitution of atoms", *Proc. Roy. Soc. London* 97A (1920) 374-400.
- [12] Masson O., "The constitution of atoms", *Phil. Mag.* 41 (1921) 281-285.
- [13] Rutherford E. and Chadwick J., "The artificial disintegration of light elements", *Phil. Mag.* 42 (1921) 809-825.
- [14] Rutherford E. and Chadwick J., "The disintegration of elements by  $\alpha$  particles", *Phil. Mag.* 44 (1922) 417-432.
- [15] Rutherford E. and Chadwick J., "Further Experiments on the Artificial Disintegration of Elements", *Proc. Phys. Soc.* 36 (1924) 417-22.
- [16] Blackett P.M.S., "The ejection of protons from nitrogen nuclei, photographed by the Wilson method", *Proc. Roy. Soc. London* 107A (1925) 349-360.