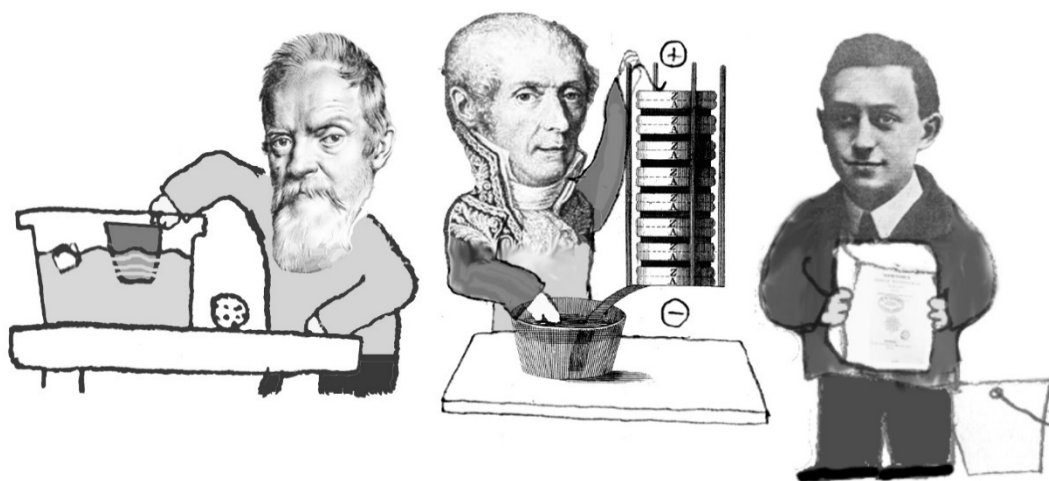


Corso “La Storia della Fisica con Reinventore”

con Antologia ed Esperimenti con materiali semplici
per docenti delle Scuole Superiori e non solo

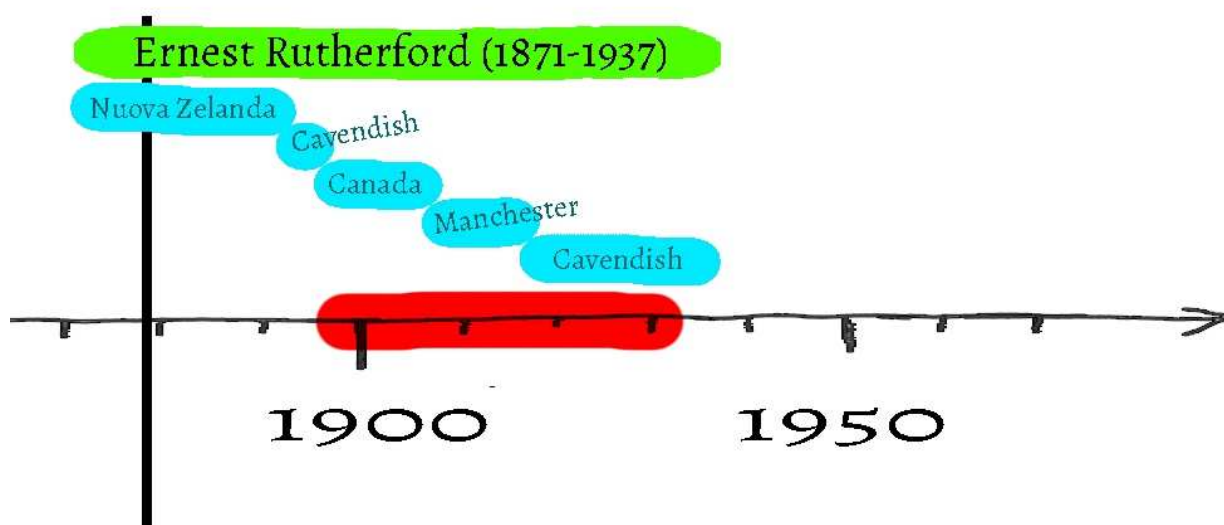


Lezione 7/20

Rutherford

Martedì 15 dicembre 2020

Linea del tempo



1. Rutherford studente

1.1 In Nuova Zelanda

pag. 3

1.2 Al Cavendish

pag. 6

2. Esperimenti e scoperte

2.1 In Canada

pag. 8

1. sicurezza – sorgenti radioattive
2. raggi alpha-beta-gamma (esperimenti con le lastre)
3. tempo di dimezzamento, l'età della terra (esperimenti con i dadi)
4. l'energia del sole (calcoli)

2.2 A Manchester

pag. 15

1. la lamina d'oro (esperimenti con le mystery box)
2. l'atomo di Bohr e la didattica della fisica (storia)

2.3 Al Cavendish

pag. 19

1. previsioni nella Bakerian Lecture
2. l'elettronvolt e l'effetto tunnel
3. scoperta del neutrone e la struttura del nucleo

3. Rutherford Insegnante

3.1 The happy warrior

pag. 23

3.2 The worldview of Rutherford

pag. 23

3.3 Big Science

pag. 24

Inoltre:

1 Allegati

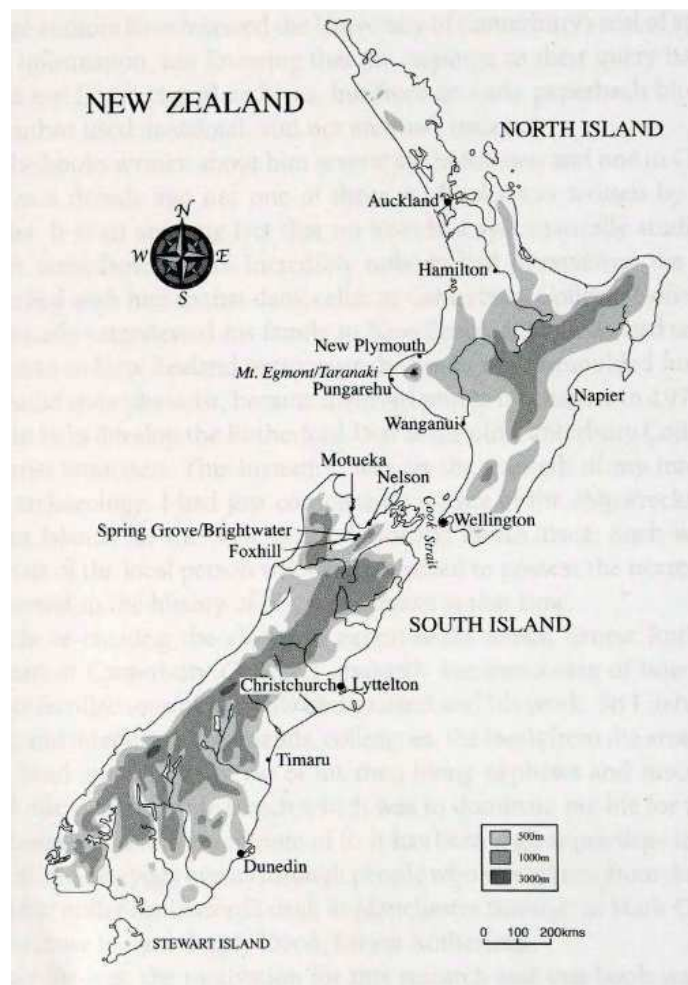
15 link

1. Rutherford Studente

1.1 In Nuova Zelanda

Rutherford trascorre la prima parte della sua vita in Nuova Zelanda. Nasce il 30 agosto 1871 a Brightwater (siamo quindi molto vicini al 150° anniversario della nascita), nella parte nord dell'Isola del Sud.

Cresce in una fattoria, frequenta le scuole fino all'università. È probabilmente il figlio più illustre della Nuova Zelanda, e tutti questi posti da lui frequentati sono diventati dei musei che lo ricordano.



Delle biografie che ne ricostruiscono gli anni della formazione, sono quelle neozelandesi – naturalmente – a sviluppare maggiormente questa parte.

Un testo in cui si può trovare molto materiale è “Rutherford Scientist Supreme” di John Campbell (1999). Antiche fotografie, cartine della Nuova Zelanda, delle diverse località, e una grande attenzione agli anni della formazione.

LINK 1 <https://archive.org/details/rutherfordscient0000camp>

L'autore cura anche un sito, **LINK 2** <https://www.rutherford.org.nz/biography.htm>



Nel 1882, appena prima del suo undicesimo compleanno, Ernst ricevette il suo primo libro di scienza, “Physics” di Balfour Stewart.

LINK 3 <https://archive.org/details/physics07stewgoog/page/n8/mode/2up>

È un libricino che sua madre avrebbe conservato, un “primer”. Una citazione dalla prefazione rende molto chiaro il metodo dell’autore: non tanto dare informazioni, ma “cercare di disciplinare la mente e portarla a contatto con la Natura [...] e per questo scopo è stata individuata una serie di esperimenti semplici.”

In publishing the Science Primers on Physics and Chemistry, the object of the Authors has been to state the fundamental principles of their respective sciences in a manner suited to pupils of an early age. They feel that the thing to be aimed at is not so much to give information, as to endeavour to discipline the mind in a way which has not hitherto been customary, by bringing it into immediate contact with Nature herself! For this purpose a series of simple experiments has been devised, leading up to the chief truths of each science.

E così, l’impostazione del primo libro di fisica di Rutherford ci fornisce anche l’impostazione di questa lezione: noi racconteremo l’opera di Rutherford come “una serie di esperimenti semplici”, che si snodano dal 1895 al 1932. Quest’epoca è segnata in rosso sulla scala del tempo. È il periodo che va dalla scoperta della radioattività (che Rutherford appena giunto al Cavendish sceglie come campo di lavoro) all’*annus mirabilis* 1932 in cui i suoi studenti Chadwick scoprono il neutrone e Cockroft-Wolton realizzano vari esperimenti con gli ioni accelerati (disintegrazione nucleare, reazioni nucleari...).

In questo periodo Rutherford esegue o guida, come dice il primer di Balfour, una serie di esperimenti semplici che “porta la mente a contatto con la Natura”. Nel nostro caso, la natura dell’atomo, la natura del nucleo.

Maggiori dettagli sul periodo in Nuova Zelanda nel testo di Campbell. Alcuni richiami telegrafici:

- La mamma maestra e suonatrice di pianoforte, il papà lavoratore (fattoria, falegname, meccanico...), una grande famiglia di 12 figli, uno all'anno abbastanza regolarmente. George, Ellen, Alice. Poi Ernst. Poi Jim... Campbell racconta che all'epoca il primo figlio era quasi "destinato" ad aiutare il papà nel lavoro, e la prima figlia ad aiutare la mamma con i bimbi piccoli.
- La vita all'aria aperta, pratica, manuale, è stata molto utile nella formazione della mente scientifica di Rutherford. Due sue citazioni sono caratteristiche di questo background: "bene, ora non abbiamo soldi, e quindi dobbiamo pensare" (We've got no money, and so we've got to think). "Ah i teorici! Tutto sto parlare di atomi e nessuno che si tiri su le maniche per fare gli esperimenti!"
- Quando ha quindici anni due suoi fratellini muoiono annegati, e sarà lui a portare la notizia alla mamma (che sta facendo una lezione di piano ad alcune bambine. Smetterà per sempre di suonare il pianoforte...) ma poi nonostante queste tragedie Rutherford diventerà "the happy warrior": vocione tonante, voglio results, tiriamoci su le maniche... con una capacità unica di generare entusiasmo intorno: molti suoi allievi diventeranno premi Nobel con ricerche da lui dirette, ma di cui non firma i lavori. Gentleman scientist.
- Detto questo, in Nuova Zelanda ha anche una breve esperienza da insegnante di scuola, appena laureato. "è la cosa più difficile del mondo, tentare di insegnare qualcosa a questi unruly boys..." E così quando vince una borsa di studio per due al Cavendish, non ci pensa due volte...

"unruly boys", ragazzi senza regole (nota: non è vero dunque che cent'anni fa gli studenti erano sempre educati, sempre rispettosi etc).



Rutherford nel corso degli anni

1.2 Al Cavendish

Il calendario schematico delle scoperte che si susseguono alla fine dell'800, nella "belle époque", per la fisica, comprende sicuramente:

- I raggi X (Roentgen, 1895).
- La radioattività (Becquerel, 1896).
- La radio (Marconi, tra esperimenti e brevetti 1895-1897).

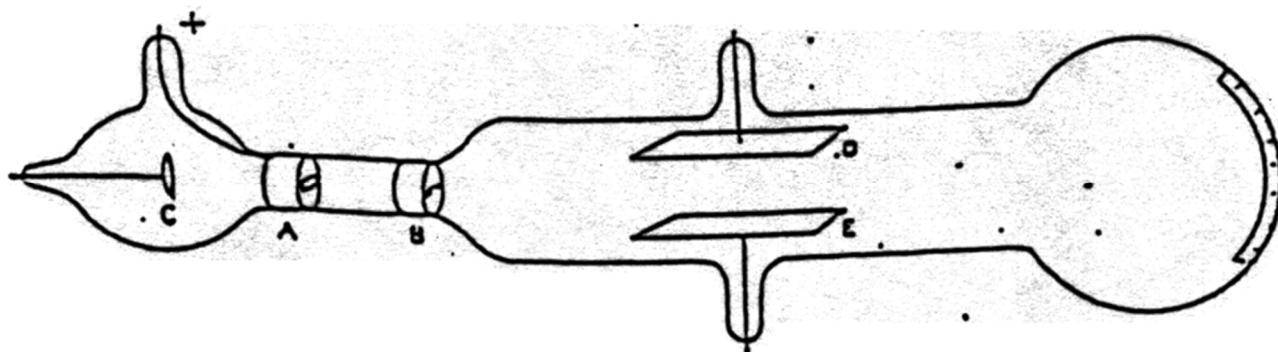
Rutherford arriva al Cavendish nel 1895. Di questo luogo abbiamo già parlato quando abbiamo incontrato James Clerk Maxwell, che ne è stato il fondatore.

Rutherford, che arriva appena compiuti ventiquattro anni, può essere definito un "post-graduate student" o "studente ricercatore". In buona sostanza, quello che fa corrisponde a un "dottorato" di oggi. Pubblica. Fa ricerche ed esperimenti sia sulla radio, sia sull'elettrone.

Il suo mentore o professore di riferimento è J.J. Thomson, che proprio in quegli anni "scopre l'elettrone" (la sua natura corpuscolare).

È una figura molto importante JJ Thomson, il terzo "Cavendish Professor di Fisica" dopo Maxwell e Rayleigh. Molto versato in matematica, aveva scritto libri di testo su argomenti cari a Maxwell: il moto dei vortici ad anello, applicazioni della dinamica alla fisica e alla chimica, ricerche in elettricità e magnetismo, molto sulla scarica dell'elettricità nei gas, i "raggi catodici".

Thomson è un bravo insegnante e costruisce un'atmosfera di lavoro molto collaborativa. Comprende il valore di Rutherford e lo invita ad assisterlo nelle ricerche. Rutherford lascia perdere la radio e si concentra sugli esperimenti sulla conduzione elettrica nei gas.



*Disegno di JJ Thomson di un suo "tubo di Crookes"
con cui ha osservato la deflessione degli elettroni in un campo elettrico*

Non c'era un buon vuoto nei tubi dei ricercatori precedenti a JJ Thomson (compreso lo stesso Hertz), e ciò aveva reso impossibile a loro osservare questa "deflessione" elettrica.

Misurando poi anche la deflessione magnetica, Thomson ricava il rapporto carica/massa dell'elettrone. Questi sono argomenti che oggi sono proposti normalmente agli studenti del 5° anno delle superiori.

Rutherford aiuta Thomson in questi lavori, e al tempo stesso ne viene formato.

Nel 1898, ed è il coronamento del suo lavoro come "studente-ricercatore", Rutherford compie esperimenti di questo tipo (deflessioni magnetiche) dalle emissioni delle sostanze radioattive, e le classifica come Radiazioni Alpha e Radiazioni Beta secondo le loro opposte deviazioni.

Per un elenco schematico delle pubblicazioni di Rutherford si veda il citato sito Rutherford Scientist Supreme, **LINK 4** <https://www.rutherford.org.nz/bibliography.htm>.

Gli articoli sono raccolti nei “Collected Papers di Lord Rutherford of Nelson”, disponibile su Archive.org.

L’articolo in questione (ed è un po’ una tesi di dottorato, ma non pubblica solo questa...) è

Uranium Radiation and the Electrical Conduction Produced by It

Phil Mag ser 5 **xlvi** 109-163 1899

(pagina 169 dei “collected papers”. È “comunicato” da JJ Thomson)

E così Rutherford ha individuato il suo campo di ricerca, la radioattività, scoperta in quegli anni, proprio quando lui è studente-ricercatore.

Parentesi, la scoperta: Bequerel studiava la fosforescenza dell’uranio, perché aveva notato che l’uranio causava emissioni che impressionavano le lastre, un po’ come i raggi X.

Finché si accorse che il sole e la fosforescenza non c’entravano niente, l’uranio impressionava le lastre anche quando non era fosforescente. L’uranio è “radioattivo” (termine suggerito da Madame Curie), emette “radiazioni”. È la scoperta della radioattività (premio Nobel per questa scoperta).

Questo argomento occuperà tutta la carriera scientifica di Rutherford.

Nel 1898, da studente-ricercatore, comincia a metterci ordine individuando che ci sono due tipi di radioattività, i raggi Alpha e i raggi Beta.

A McGill, quasi ripercorrendo i passi di JJ Thomson con l’elettrone, stabilirà la natura “corpuscolare” delle radiazioni Alpha.

Per un approfondimento sulle radiazioni Alpha, Beta, Gamma, si veda

Thaddeus J. Trenn “Rutherford on the Alpha-Beta-Gamma classification of radioactive rays”

Isis, Vol. 67, No. 1 (Mar., 1976), pp. 61-75 (15 pages), disponibile su Jstor.

LINK 5

https://www.jstor.org/stable/231134?read-now=1&refreqid=excelsior%3AAdd769d24256d47a1f6e28e6ebba65aac&seq=1#page_scan_tab_contents

Quando lascia il Cavendish per McGill, scrive alla fidanzata e futura moglie in Nuova Zelanda:

“As far as I can see, my chances for a Fellowship [in Cambridge] are very slight. All the dons practically and naturally dislike the idea of one of us getting a Fellowship, and no matter how good a man is, he will be chucked out. There is a good deal of friction over the research business... I know perfectly well that if I had gone through the regular Cambridge course, and done a third of the work I have done, I would have got a Fellowship bang off.

È un altro esempio del lato umano di Rutherford, della sua generosità e buona natura. Comprende perfettamente le inclinazioni degli accademici di Cambridge (i “dons”), sono ingiuste, certo, non sono meritocratiche, ma sono così di fatto e quasi per natura. Rutherford sembra non abbia neanche del risentimento. È the happy warrior. *Non gliene può fregar di meno.* Par di sentirlo “Vado a McGill che c’è un signor laboratorio e metto su la collaborazione con Soddy e facciamo il nostro show”.

[Per quest’ultimo aneddoto si veda Neil Cameron “1900: the Cavendish Physicists and the Spirit of the Age” in “Rutherford and Physics at the Turn of the Century”.]

2. Esperimenti e scoperte

2.1 In Canada (1898-1907)]

Per la descrizione degli esperimenti e illustrazioni originali si vedano anche l'esposizione e i materiali della "Rutherford Collection" all'Università di McGill, Montreal, Canada.

LINK 6 <http://www.physics.mcgill.ca/museum/rutherfordcollection.html>

2.1.1 Sicurezza – sorgenti radioattive

Poiché si tratta della radioattività, la primo esperimento della serie non può non essere "le sorgenti radioattive", e la sicurezza ad esse collegata.

A questo proposito possiamo menzionare il libro "A Force of Nature" di Richard Reeves (2008).

LINK 7 <https://archive.org/details/forceofnaturefro0000reev>
c'è anche tradotto in italiano "Una forza della natura" (Codice Edizioni).

È interessante dal nostro punto di vista perché l'autore vi racconta di quando, intorno al 2005, lui e alcuni compagni del dipartimento di fisica della sua vecchia scuola, lo "Stevens Institute of Technology" fecero una replica del famoso esperimento dello scattering da foglia d'oro.

Alcuni mesi di lavoro, naturalmente. Ma è passato circa un secolo, e tutte le conoscenze, anche mediche, sulla radioattività entrano nella loro progettazione e nella scelta della sorgente.

Alla fine la loro sorgente è un lontano discendente del Radio, l'Americio-241. La sua radioattività misura 25 millicurie. (1 curie = $23,7 \cdot 10^{10}$ radiazioni al secondo), quindi circa 370 milioni di particelle emesse al secondo.

La sorgente di Rutherford era il Radon-222. È un gas radioattivo prodotto dal decadimento del Torio, un metallo che è pochi gradini sotto il Radio nella sua discendenza radioattiva. La sua radioattività era circa 100 volte tanto, 30 miliardi di radiazioni al secondo.

Usavano campioni molto radioattivi. La prima cosa che fece Rutherford arrivato a McGill fu di ordinare campioni di Uranio e Torio in Germania. Non bisognava rimanere indietro con la ricerca. Rutherford aveva l'abitudine di mettere pezzetti di materiale radioattivo nella tasca della giacca, quando lasciava il lavoro, e portarli a casa nel cassetto della scrivania.

Il "Rutherford Museum" di McGill ospita "la scrivania da centomila dollari", il semplice banco di legno di casa Rutherford che fu molto costoso decontaminare.

(da "a force of nature")

Con le regole vigenti ora, nel laboratorio allo "Stevens Institute of Technology" e un quantitativo di Radon-222 come quello usato da Rutherford, nessuno avrebbe potuto entrare nell'edificio!

Al tempo di Rutherford, invece...

La regola del laboratorio era che per maneggiare questi materiali ci volevano i guanti. E chiunque volesse correre rischi poteva guardare le mani di uno degli assistenti di Rutherford, Crowe, che

maneggiava questi campioni ancora più spesso, per preparare gli esperimenti. Spesso li maneggiava a mani nude, indubbiamente per una maggiore sensibilità perché gli esperimenti erano delicati. Ma alla fine perse un po' di sensibilità alla punta delle dita, poi la pelle si indurì, poi si aprirono lesioni che non guarirono, e alla fine un dito fu amputato.

(da “the fly in the cathedral”)

L'Americio-241 invece, in quantitativi microscopici, è in molte case e luoghi di lavoro, essendo il “principio attivo” dei sensori di fumo. Quando una particella di fumo impedisce a una particella alpha di raggiungere un'armatura carica, scatta l'allarme.

Il sensore di fumo è un dispositivo di uso quotidiano che discende da queste ricerche. Si può ricondurre a quando, nel 1899, Rutherford soffiò fumo di tabacco nella sua camera di ionizzazione e osservò una drastica variazione di ionizzazione.

2.1.2 Raggi alpha, beta e gamma – esperimenti con le lastre

Un altro libro “di storia della fisica” su Rutherford che è importante citare e che abbiamo usato ampiamente in queste note è “Rutherford and Physics at the Turn of the Century” (edited by Mario Bunge e William R. Shea).

Raccoglie i diversi contributi al “Rutherford Symposium” organizzato dal Canada Council e McGill University nel 1977. Un convegno su Rutherford con fisici, storici, anche suoi ex-allievi...

Su Archive:

LINK 8 <https://archive.org/details/rutherfordphysic0000unse>

In questo libro si trova tra gli altri il contributo di Norman Feather “Some Episodes in the α Particle story, 1903-1977”.

Feather conseguì il dottorato con Rutherford e Chadwick (di cui era stretto collaboratore) nel 1931. Fece scoperte legate alla produzione di isotopi fissili dell'uranio. Poi scrisse diversi libri di fisica nucleare e anche di fisica generale. E una biografia di Rutherford nel 1940. Il celebrato autore di elettromagnetismo John David Jackson cita la monografia di Feather su “Electricity and Matter” come un buon resoconto della storia dell'elettromagnetismo con una “discussione perspicace degli esperimenti originali”.

Questo tipo di discussioni sono proprio quelle che cerchiamo di radunare in questo corso. E Feather porta la “discussione perspicace degli esperimenti originali” anche agli esperimenti di Rutherford a McGill.

Cominciamo dall'inizio. L'inizio è McGill, nei Macdonald Physics Laboratories, nell'inverno 1902-1903. È stato là che la radiazione α del 1898 ha finalmente assunto il carattere di uno sciame di “corpuscoli carichi proiettati con grande velocità”. [2] È stato là che è nata la particella α . Secondo me l'esperimento rilevante, condotto con un elettroscopio fatto con una lattina e una minuscola serie di armature metalliche a intervalli di un millimetro, con i gap parzialmente chiusi da una griglia sovrapposta, è uno degli esperimenti più belli in tutta la storia della scienza. α è stata rilevata... secondo me... questo è uno degli esperimenti più belli in tutta la storia della scienza. [3] Può sicuramente essere un'ispirazione – e magari anche un'esperienza un po' castigante – per un giovane fisico di oggi esaminare l'apparato originale di Rutherford nel museo a McGill.

Le note [2] e [3] si riferiscono agli articoli di Rutherford, due articoli del 1903:

Excited Radioactivity and the Method of its Transmission

Phil Mag ser 6, v 95-117 1903

The Magnetic and Electric Deviation of the Easily Absorbed Rays from Radium

Phil Mag ser 6, v 177-187 1903

Alpha dunque sono dei piccoli corpuscoli. (a differenza di raggi X che sono luce, radiazione)

Come viene misurato tutto ciò?

Con apparati sperimentali che somigliano a lampadine. C'è vetro soffiato. Il filamento o l'oggetto radioattivo che emette (radiazioni o corpuscoli...). C'è poi una lastra o una fenditura, dove le radiazioni o corpuscoli lasciano un'impronta, un'ombra: una striscia ben definita. Si fa entrare dell'aria, e questa striscia ben definita diventa sfumata. Perché? Con la luce sarebbe stato uguale, ma qui ci sono stati urti con le molecole...

Feather analizza altri episodi: il pensiero iniziale che α dovesse avere carica negativa (!), come pure la perdita di velocità di particelle α che attraversano sottili lastre di mica (*futuro componente del contatore Geiger...*). Vi lasciamo alla sua penna, all'articolo citato.

La cosa su cui ci vogliamo soffermare è che in nuce in questi esperimenti c'è tutta la fisica nucleare: le tracce, le diverse strumentazioni. Dai "tubi catodici" dove si vedono le tracce si va alle camere a nebbia e a bolle dove si fotografano, agli array... tutti questi apparecchi misurano sempre "tracce" di particelle che sfrecciano. Usate con i raggi cosmici, la fisica delle particelle, gli acceleratori...

Quindi aggiungiamo alcuni riferimenti a questi sviluppi:

1) Camera a nebbia

I diversi tipi di "tubi di Crookes" fanno parte da tempo di molti laboratori di fisica dei licei e di diversi cataloghi di fornitori. Notoriamente, si tratta di articoli molto costosi.

Ultimamente si sono andati aggiungendo esperimenti tipo "la camera a nebbia" per la visualizzazione delle tracce lasciate da raggi cosmici, radioattività del terreno, sostanze debolmente radioattive.

Ci sono esperienze in PLS o al Cern, e dispositivi a basso costo in vendita.

La nebbia si otteneva tipicamente da ghiaccio secco o da alcol, ma ultimamente grazie anche ai progressi dei frigoriferi casalinghi a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ci si riesce anche senza queste sostanze.



LINK 9 <https://home.cern/news/news/experiments/how-make-your-own-cloud-chamber>



LINK 10 <https://global.narika.jp/product/107764w1>

La “camera a nebbia” è comune anche come installazione museale, raffreddata con celle “Peltier”.

2) La nebbia in bottiglia

Sulla formazione della nebbia si può raccomandare un esperimento semplice. Sta molto bene con la discussione della camera a nebbia, per sottolineare le diverse “condizioni” di vapor saturo o sovrassaturo che accompagnano il fenomeno di formazione e dissolvimento della nebbia.

All’apertura di una bottiglia “ad alta pressione”, l’espansione improvvisa provoca un raffreddamento del gas contenuto, e quindi la formazione della nebbia.

Link a una dimostrazione del noto divulgatore americano Steve Spangler.

LINK 11 <https://www.youtube.com/watch?v=cXpuo3YHOn0>

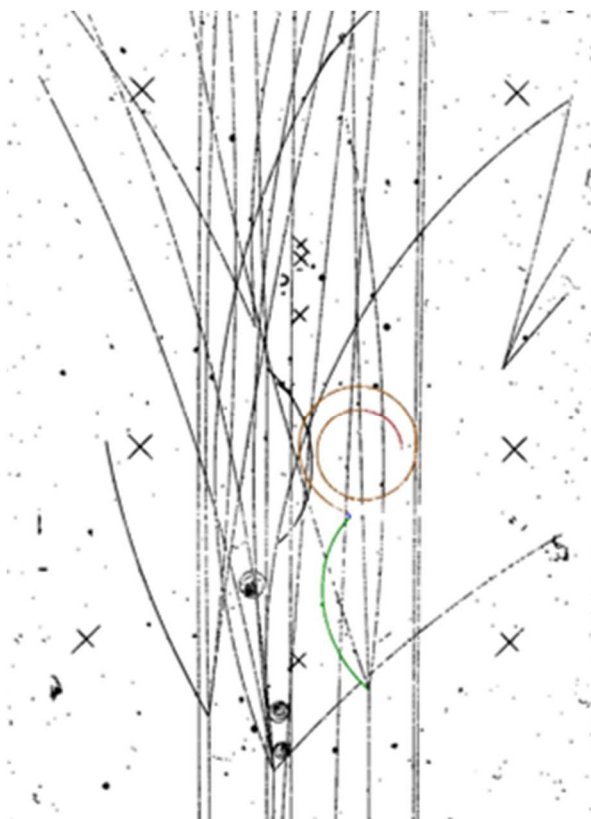


3) Il CERN e le foto delle tracce da scaricare

Dagli anni 20 agli anni 50 la tecnologia dominante per lo studio delle particelle fu la camera a nebbia (cloud chamber). Poi venne inventata la “camera a bolle”, da Glaser (Nobel nel 1960).

Il CERN, nella sua sezione didattica per le scuole superiori detta “S’Cool Lab”, mette a disposizione una serie di attività didattiche, tra cui alcune basate sulle foto originali delle tracce delle particelle in queste “camere a bolle”.

LINK 12 <https://scoollab.web.cern.ch/bubble-chamber-pictures-classroom>



4) Il tubo catodico

I tubi catodici, un tempo oggetti molto diffusi in tutte le case, stanno lentamente scomparendo, soppiantati dai transistor e dai led. I tubi catodici si potevano trovare, come discusso nelle puntate sull’elettromagnetismo, nelle valvole di radio e amplificatori, e ancora più evoluti, nei televisori e negli schermi di computer.

Là dove questi oggetti ci sono ancora, si possono conservare. Sono oggetti molto belli per “mostrare” i fasci di elettroni e gli schermi fosforescenti.

Esperimenti di deviazione di fasci di elettroni

LINK 13 <https://www.reinventore.it/approfondimenti/la-fisica-in-una-vecchia-tv>

2.1.3 Tempo di dimezzamento, l'età della Terra - esperimenti coi dadi

Seguiamo Rutherford in Canada.

Comincia a collaborare con il chimico Frederick Soddy a una teoria del “cambiamento radioattivo”. Le parole in circolo sono “Trasformazione”, “Trasmutazione”.

È il lavoro che gli varrà il premio Nobel, essi infatti collegano Radioattività e Trasmutazione, secondo il principio

$$\text{Radioattività} = \text{Trasmutazione}$$

all'emissione dei “raggi” si accompagna un “cambiamento di sostanza chimica”. Insieme a questo concetto si accompagna l'introduzione del concetto di “tempo di dimezzamento”.

(come noto, a tutto ciò seguono le serie radioattive, ramificazioni - decadimenti - vari isotopi, ma già questi due concetti che oggi ci sembrano di base valgono a Rutherford il premio Nobel).

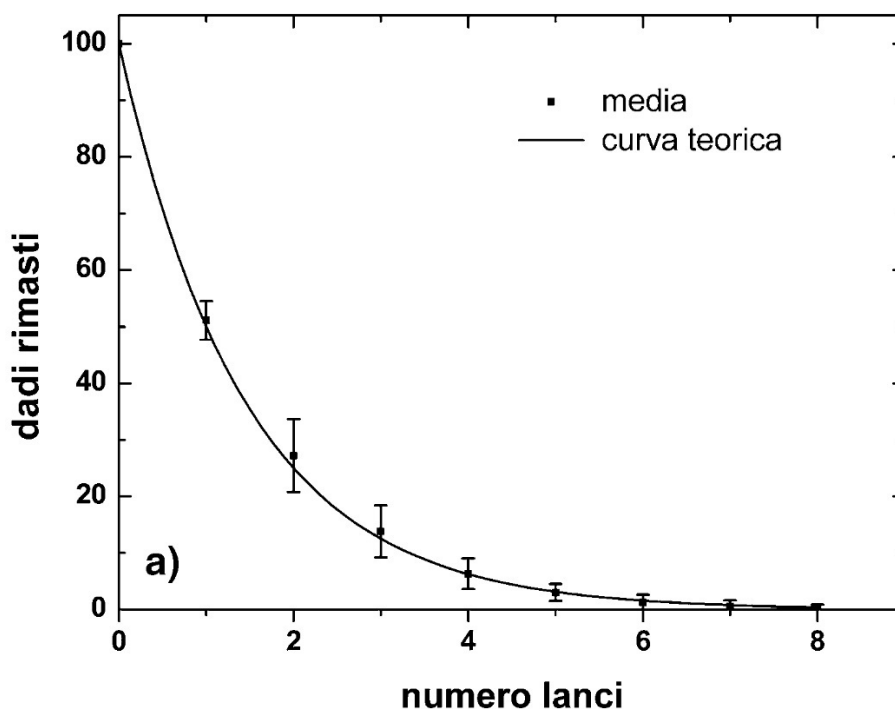
Soddy è un'altra figura molto interessante, personaggio poliedrico, chimico, economista. Non prese il Nobel insieme a Rutherford, ma ne prese un altro dopo, perché fu lui a chiarire il gran caos degli isotopi, a introdurre il termine stesso.

Per esplorare questi concetti e questi risultati con esperimenti, facciamo riferimento alla “Unità Didattica sul Decadimento Radioattivo”, di Gratton Oss e Operetto, pubblicata sul “Giornale di Fisica”

ALLEGATO 1 - (Gratton, Oss, Operetto)

Definizioni, esponenziali, logaritmi: è questo l'armamentario di equazioni, di tecniche, di grafici che serve per affrontare i fenomeni della radioattività.

Prima di andare ad affrontare contatori geiger, carbonio 14 etc (cose che generalmente non abbiamo – non tocchiamo)... prima di ciò, facciamo esperimenti con i dadi (qualcosa che abbiamo-tocchiamo) e ci impadroniamo dell'armamentario matematico-tecnico.



Anche per questo argomento c'è una fertile linea di sviluppo: l'Età della Terra.

Un gustoso aneddoto a McGill. Rutherford incontra nei corridoi il prof. di Geologia. Spara la sua domanda curiosa, "How old is the Earth supposed to be?" Cento milioni di anni è la risposta. "Ah!" tira fuori dalla tasca un pezzo di pechblenda "Io so per certo che questo pezzo di pechblenda ha 700 milioni di anni!". Via. (risate).

Naturalmente, la realtà è che biologi e geologi fino ad allora avevano "accettato un po' obtorto collo" i calcoli di Lord Kelvin sul raffreddamento della terra, sebbene le evidenze dei fossili e delle rocce suggerissero un'età maggiore. Ma al delle "gags" che Rutherford faceva nei corridoi, era anche sempre il gentleman scientist.

Così quando dovette scrivere che il calore generato dal decadimento radioattivo rendeva davvero obsoleti i calcoli di Lord Kelvin, attenuò la critica sottolineando che Kelvin stesso aveva anticipato che forse un giorno la scoperta di un nuovo fenomeno avrebbe richiesto una simile revisione.

Per approfondire la questione sull'età della terra, si veda Lawrence Badash "The Origin of Big Science: Rutherford at McGill", nel citato simposio "Rutherford and Physics at the Turn of the Century".

Badash è anche l'autore di "Rutherford, Boltwood and the Age of the Earth: The origin of radioactive dating techniques".

Per il contributo originale di Rutherford si veda "Some cosmical aspects of radioactivity".

2.1.4 Energia del sole

È un altro "aspetto cosmico" della radioattività, per usare le parole di Rutherford. Rivolto non più alla Terra ma al Sole. Lo evidenziamo comunque come una "perla" a sé stante della magnifica serie o "collana di esperimenti" che Rutherford sta compiendo.

Il tema merita di essere circoscritto ed evidenziato: è l'energia del sole, l'energia nucleare.

L'argomento è inquadrato nella prefazione di Shea al citato "Rutherford and Physics at the Turn of the Century".

Nel 1903 Rutherford e Soddy pubblicano un articolo che concludono scrivendo

"tutte queste considerazioni puntano alla conclusione che l'energia latente nell'atomo deve essere enorme se paragonata a quella liberata nelle reazioni chimiche. Ora i radio-elementi non differiscono in alcun modo dagli altri elementi nel loro comportamento fisico e chimico. Da un lato essi somigliano chimicamente ai prototipi [isotopi] inattivi nel sistema periodico, e dall'altro non possiedono caratteristiche chimiche che possano essere associate alla radioattività. Pertanto non c'è ragione di assumere che questo enorme quantitativo di energia sia posseduto soltanto dai radio-elementi... la conservazione dell'energia solare, per esempio, non presenta più alcuna difficoltà fondamentale se l'energia interna degli elementi componenti si considera disponibile, cioè se si svolgono processi di cambiamento sub-atomico".

Queste predizioni sono state verificate nel 1937 quando Bethe ricavò il ciclo delle trasformazioni atomiche per l'energia solare, e nel 1942 quando Fermi ottenne energia atomica su larga scala con la sua pila atomica all'Università di Chicago.

A questo punto Rutherford ha affrontato i punti che qui abbiamo enucleato:

- 1) Le particelle alpha
- 2) Il legame tra radioattività e trasmutazione chimica

E come conseguenze “cosmiche”

- 3) Il tempo di dimezzamento e l'età della Terra
- 4) L'enorme energia contenuta negli atomi – e nel Sole.

Oltre ai molti articoli e al lavoro che gli varrà il Nobel, ha scritto anche due libri:

- Radio-activity (1904)
- Radioactive Transformations (1906)

A questo punto gli viene offerta la cattedra a Manchester. Ci va, non perché a Manchester ci fossero condizioni migliori che a McGill. Ma perché lì sarà più vicino a quello che è “il centro”, “il nucleo”, della ricerca fisica mondiale, laddove c'è la maggior parte di scienziati che lavorano.

Sembrerebbe sia già successo abbastanza. E invece.

2.2 A Manchester (1907-1919)

2.2.1 L'esperimento della lamina d'oro

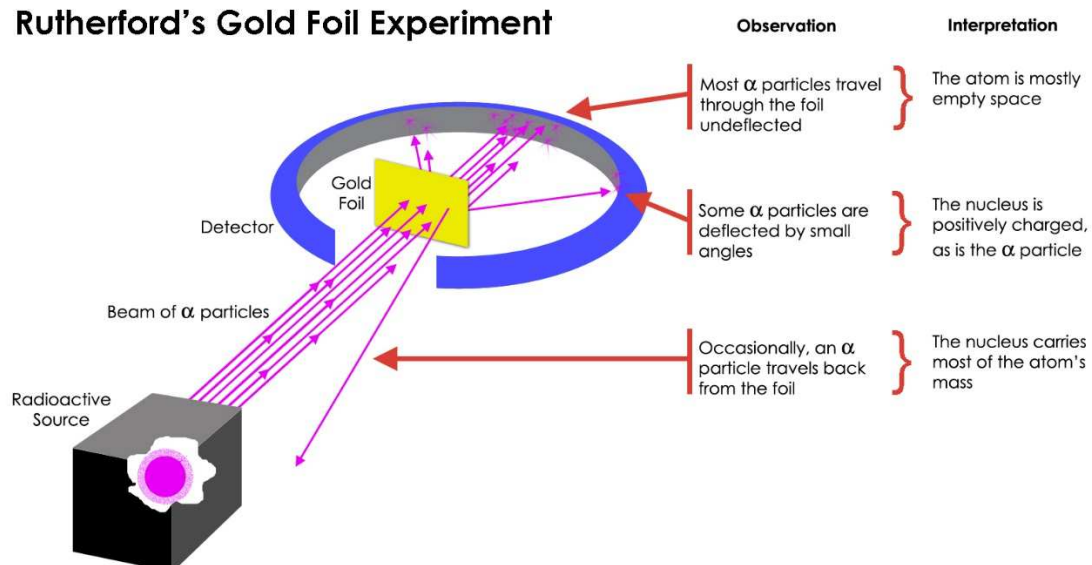
Eccoci a Manchester. Ernst è un importante prof. Ha già pubblicato il lavoro che tra due anni gli varrà il premio Nobel. Come suoi studenti arriveranno Bohr (e la sua opera come insegnante caposcuola sarà debitrice a Rutherford), Moseley, Geiger, Halevy, Marsden, Chadwick.

[Poi al Cavendish ci saranno Blackett, Kapitsa, Gamow, Cockroft e Walton, de Hevesy, GP Thomson, Appleton, Powell, Aston (per citare solo i premi Nobel, di fisica e di chimica!) è una lista che non finisce più.]

Ed ecco dunque l'esperimento di Marsden. (è un suo studente di 23 anni, fresco di laurea).

Gli ingredienti li conosciamo: sorgente radioattiva, tubo di vetro col vuoto, fogliolina d'oro, mica...

Rutherford's Gold Foil Experiment



Esperimento famoso, famosissimo, riportato in diversi libri che segnaliamo, sempre all'inizio:

- 1) all'inizio di una delle biografie citate, "Una Forza della Natura", perché gli autori lo ricostruiscono come replica fedele. (si veda 2.1).
- 2) come "preludio" ne "The fly in the Cathedral", di Brian Cathcart (2003) che racconta l'intera vicenda della "linea rossa" della nostra "linea del tempo".

Per il racconto, e la contestualizzazione dell'esperimento, ecco dunque l'indicazione: "The Fly in the Cathedral", preludio.

LINK 14 <https://archive.org/details/flyincathedral00cath>

Ci sembra il modo migliore di raccontarlo, questo esperimento. È quasi una pièce teatrale. I personaggi, lo studente, il professore, l'esperimento, il risultato inaspettato.

La produzione del professore, fino a quel momento così costante di scoperta in scoperta, si ferma improvvisamente, e per un anno e mezzo non combina granché. Finché un bel giorno nei corridoi annuncia che sa com'è fatto l'atomo, così, come sapeva che un pezzo di pechblenda aveva settecento milioni di anni.

L'esperimento si basa su urti e deviazioni dei "proiettili" alpha. Gli urti non erano nuovi, a Rutherford. Li aveva già usati, osservando che quando entrava l'aria nel tubo di crookes una linea ben definita diventava sfocata: gli urti con le molecole d'aria avevano deviato (ma di pochissimo, sembrava!) le particelle alpha, paragonate a proiettili. E ancora, dalle deflessioni in foglioline di mica (vedi l'articolo di Norman Feather) aveva ricavato l'intensità dei campi elettrici nell'atomo, per produrre una simile deviazione in così poco spazio (osservazione pratica e geniale!). Ma ora?

Molta didattica propone esperimenti, anche davvero belli, che potremmo chiamare "stile minigolf", con numerose varianti. Generalmente le particelle alpha sono delle palline, poche o tante. L'oggetto da scoprire può essere nascosto oppure no. Questi esperimenti mostrano come con lo "scattering", le palline che rimbalzano dall'oggetto, si possono ricavare informazioni sulla forma dell'oggetto. Ma in altri aspetti dell'analogia sono un po' carenti.

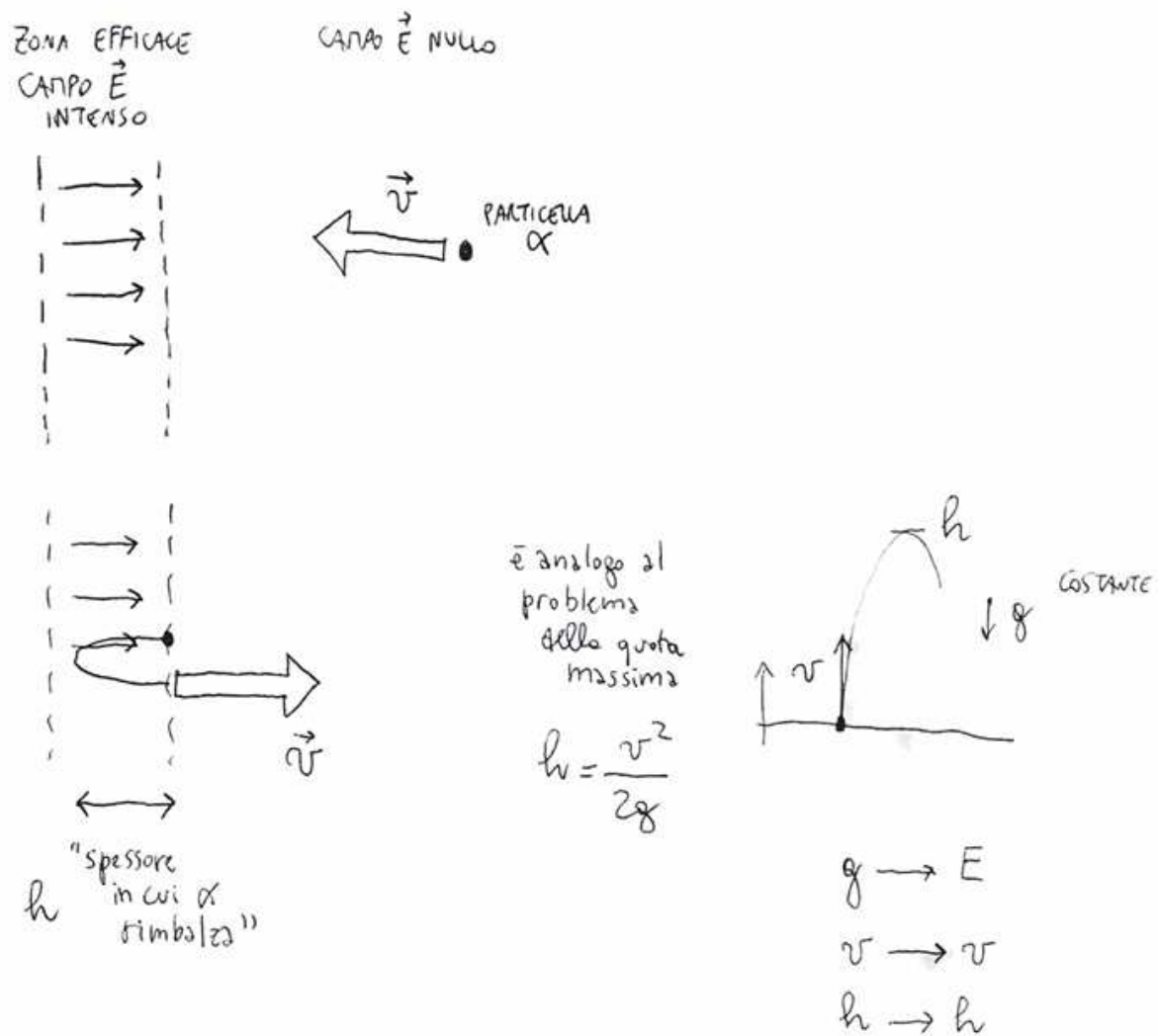
Possiamo però servirci di questo "stile minigolf" per raccontare alla lavagna quello che sta succedendo. Al minigolf sono frequenti "buche" con avvallamenti o piccoli vulcani. Queste si possono considerare illustrazioni delle "buche di potenziale", "barriere di potenziale", eccetera. Nello schema dunque, i raggi alpha sono palline al minigolf, e l'atomo è una "forma di potenziale" ignota, da conoscere.

In questo schema ci suggerisce che un modello "plum-pudding" (tipo JJ Thomson) presenta un generale avvallamento con delle piccole montagnette. Una pallina che va a tutta velocità può subire solo piccole deviazioni da un oggetto del genere.

Per rimandare indietro una pallina sparata a grandissima velocità, ci vuole una montagna altissima. Questo è il senso. E perché ci sia una montagna altissima in questo "minigolf", la massa dell'atomo dev'essere concentrata in un nucleo piccolissimo.

Si può semplificare al massimo la situazione, in una dimensione, con una pallina che viaggia con moto uniforme in una zona dove non ci sono forze e improvvisamente si trova in una zona "efficace" dove c'è un campo elettrico costante di verso opposto.

Si può ricavare una formula che lega la velocità della pallina, "lo spessore" della zona "efficace", l'intensità del campo elettrico. Dopotutto si riduce al problema della "quota massima".



Dalla stima emerge un campo elettrico elevatissimo.

E d'altro canto, con un campo elettrico di quell'ordine di grandezza, si può stimare con la legge di Coulomb una distanza tra le cariche davvero minuscola.

Il piano inclinato corrisponde a una zona "efficace" dove il campo elettrico si può considerare uniforme.

È il 1909. È stato così "visto" il nucleo dell'atomo.

Poi passeranno altri vent'anni prima che il nucleo "ceda"... prima che "si capisca com'è fatto"... in fisica nucleare dunque per vent'anni non succede niente... intanto relatività, indeterminazione, etc... aspettiamo il 1932...

le sorgenti radioattive (le semplici sostanze radioattive) non vanno bene per "bombardare il nucleo", per "entrarci dentro"... sparano proiettili-palline che non hanno abbastanza energia.

Ecco allora l'idea dei "proiettili artificiali": li acceleriamo noi.

2.2.1 L'atomo di Bohr

“L'atomo di Bohr” è in un certo senso una linea di sviluppo del lavoro di Rutherford a Manchester. Bohr infatti è un suo studente, il “teorico” del gruppo di Manchester.

Bohr è intrigato non tanto dal nucleo piccolo e massivo al centro dell'atomo, quanto dalla leggera confezione che gli sta intorno, gli elettroni.

Bohr è in un ambiente dove lavorano fisici e chimici. E lui trova il modo di collegare “l'atomo nucleare” con le proprietà chimiche degli elementi. Per quanto il suo “modello” dovesse essere perfezionato (è la “vecchia teoria dei quanti”) ottiene dei risultati spettacolari.

È istruttivo, a questo proposito, il ricordo di Norman Robert Campbell.

Some algebraic formulae caught my eye . . . It was part of a paper by Mr. N. Bohr of whom I had never heard . . . I sat down and began to read. In half an hour I was in a state of excitement and ecstasy, such as I have never experienced before or since in my scientific career. I had just finished a year's work revising my book on Modern Electrical Theory. These few pages made everything I had written entirely obsolete. That was a little annoying, no doubt; but the annoyance was nothing to the thrill of a new revelation, such as must have inspired Keat's most famous sonnet. And I had so nearly missed the joy of discovering this work for myself and rushing up to the laboratory to be the first to tell everyone else about it! Twenty years have not dumped my enthusiasm.

(citato in S.L. Jaki, “The Relevance of Physics” pag 96)

Per approfondimenti si può consultare il secondo articolo di una serie di Reinventore intitolata “I modellini nella didattica chimica”, intitolato “I ritratti dell'atomo”.

LINK 15

<https://www.reinventore.it/approfondimenti/i-modellini-nella-didattica-chimica-2-i-ritratti-dell-atomo>

Come l'esperimento della foglia d'oro di Rutherford, anche il “modello di Bohr” ha ricevuto innumerevoli “interpretazioni” in “didattica della fisica”.

Dopotutto l'esperimento e il modello si sono andati consolidando come le due “prime pietre” della fisica atomica-nucleare, e quindi è abbastanza naturale che sia così.

2.3 Al Cavendish (1919-1937)

2.3.1 Previsioni nella Bakerian Lecture

Alla fine della guerra Rutherford diventa il direttore del Cavendish. Torna a Cambridge dunque, e non è una semplice Fellowship. È il quarto Cavendish Professor, successore al suo mentore JJ Thomson.

Come scrive Devons in un articolo sul “Rutherford’s Laboratory”, *Rutherford era una figura molto importante quando tornò a Cambridge, centro scientifico di lunga tradizione. Rutherford la persona, e il Cavendish l’istituzione, si fusero in una cosa sola, e insieme irradiavano una brillantezza raramente eguagliata. A Montreal era Rutherford da solo; a Manchester Rutherford e la sua scuola; e ora a Cambridge era Rutherford, personificazione della grande tradizione del Cavendish e parte della sua gloria.*

Nella nostra lettura (“la riga rossa sulla linea del tempo”) questi sono anni in cui in fisica nucleare non ci sono breakthroughs. Il nucleo resiste. Tutt’intorno scoperte, relatività, meccanica quantistica... ma il nucleo è una noce dura da rompere.

Gli studenti diventano professori (Bohr...), tante cose succedono nel mondo della fisica. Riguardo al nucleo, ci vuole pazienza. Bisogna aspettare i primi anni trenta.

Tuttavia non mancano episodi istruttivi, degni di nota.

Rutherford tenne una “Bakerian Lecture” nel 1904 e una nel 1920. Qui ci riferiamo a quella del 1920, in cui racconta dei progressi sulla comprensione della natura del nucleo che stanno facendo al Cavendish. “Nuclear Constitution of Atoms” è il titolo.

Scriverà Chadwick, suo stretto collaboratore e collega: *“Una conferenza in cui il relatore predice chiaramente quattro future scoperte, insieme ad alcune proprietà che vengono poi riscontrate, è forse unica”*.

Le quattro previsioni sono quelle dell’esistenza del neutrone, del deuterio, del tritio e dell’elio tre.

Questa osservazione molto importante è citata in una delle prime biografie di Rutherford, quella di A. S. Eve, “Rutherford” (1939), come pure nell’articolo di S.L. Jaki, “The worldview of Rutherford” (sempre in Rutherford and Physics at the Turn of the Century).

Nel 1922, in una serie di lezioni, Rutherford predice l’esistenza del positrone.

Queste “predizioni” ci mostrano un Rutherford che non è certo uno “sperimentale” stereotipato. Anzi, teorizza, anche in modo ardito ma sempre molto matter-of-fact. Considerazioni così:

Questi “neutral doublet” (così chiama la formazione in cui un elettrone potrebbe legarsi molto più vicino a un nucleo H) potrebbero essere difficili da rilevare con lo spettroscopio, potrebbe essere impossibile contenerli in recipienti. D’altro canto potrebbero entrare facilmente negli atomi, e combinarsi col nucleo o esserne disintegrati dal campo elettrico, così da risultare nell’emissione di un H carico o un elettrone o entrambi...

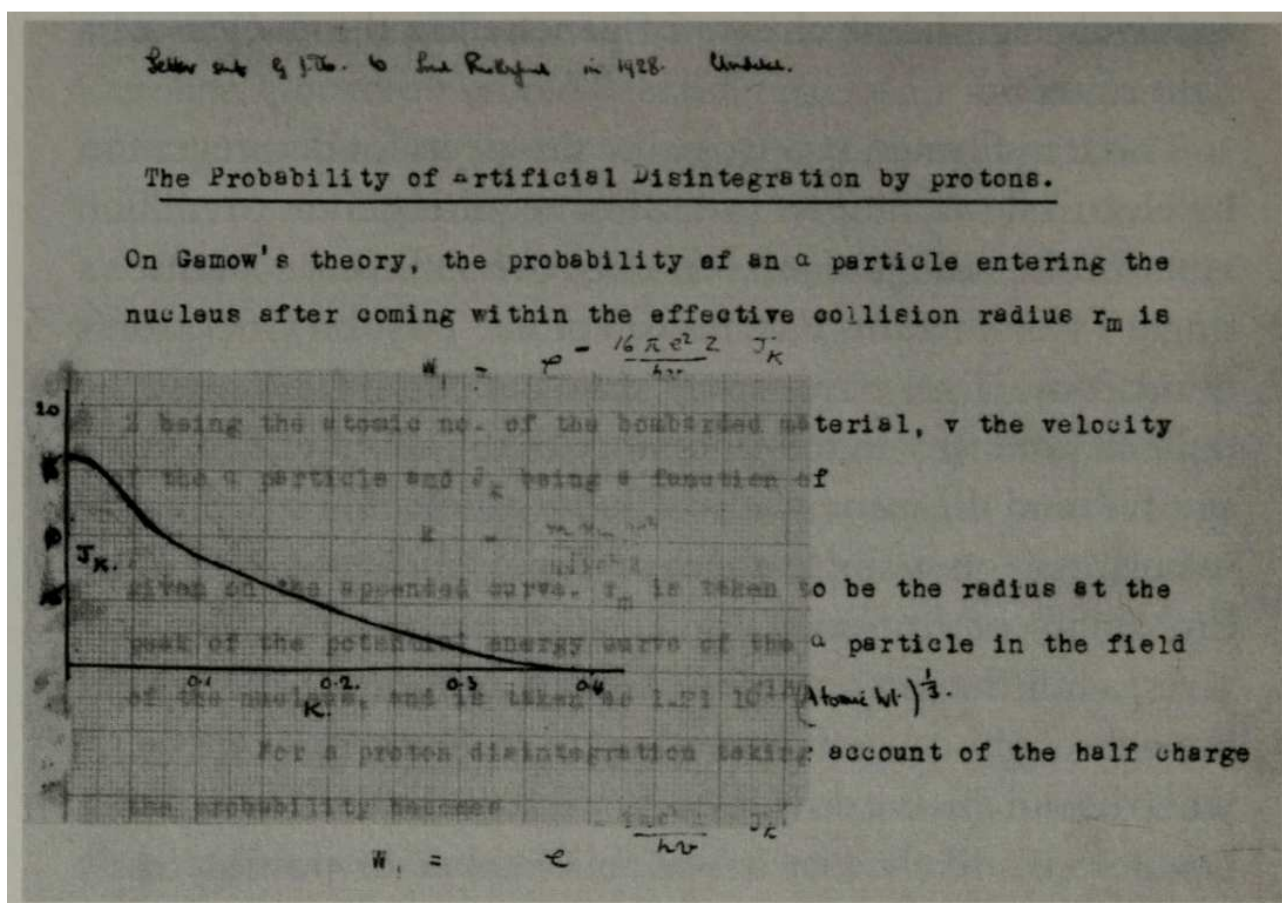
2.3.2 L'elettronvolt e l'Effetto Tunnel

L'immagine delle collinette del minigolf, buche e barriere di potenziale, viene qui ripresa. Si continua infatti con l'Effetto Tunnel. Come è noto, una "pallina" quantistica può entrare o uscire da una buca anche se non ha energia sufficiente per scavalcare la collinetta.

Per approfondire la storia che verrà delineata tra poco si veda il citato "The Fly in the Cathedral" di Brian Cathcart. Tra parentesi, l'autore è un giornalista, storico di formazione, che a poco a poco è diventato uno science writer.

Le tappe della storia sono queste:

- Gamow (giovane studente) a Gottinga intuisce che con un'equazione d'onda può render conto dell'emissione o "fuga" di una particella alpha da un nucleo.
 - Poi Gamow arriva a Copenhagen, dove inverte il ragionamento e calcola la probabilità di penetrazione di un nucleo da parte di una particella alpha.
 - Arriva il contatto con Gamow-Cavendish, uno dei pochi posti dove si fanno esperimenti con i nuclei, e Cockroft adatta i conti di Gamow ai protoni. E porta un "memo", una pagina dattiloscritta, a Rutherford.
 - Il risultato è che non servono più 8 o 10 milioni di volt per accelerare i protoni affinché possano "entrare" in un nucleo. Con l'effetto tunnel ne bastano 300mila.
 - 300mila volt sono comunque tanti, al tempo, ben oltre lo stato dell'arte.
 - Rutherford dice, ok al lavoro. E al progetto assegna Cockroft e Walton.
- (questo nell'autunno-inverno 1928)(v. "A man in white trousers" e "A finite probability")



- Un primo resoconto del lavoro di Cockroft e Walton è in “Experiments with High Velocity Positive Ions” (agosto 1930) e così facendo allertano tutto il resto del mondo che l’effetto Tunnel fornisce “una scorciatoia”, non sono necessari milioni di volt... ma a Pasadena, a Washington e in Germania hanno già riportato esperimenti con tubi e alto voltaggio a 2 milioni di volt... Cockroft e Walton si danno da fare per arrivare a 800mila volt. (tutto ciò non era necessario, in realtà). (v. “Other Ideas” e “Turning Point”)
- C’è anche un puzzle: al tempo sembra assodato che gli elettroni debbano esistere anche dentro i nuclei. Nei decadimenti radioattivi (beta), infatti, escono fuori dai nuclei! Ma ai teorici, man mano che acquistano familiarità con l’elettrone, la cosa comincia a sembrare impossibile. Devono proprio esserci, gli elettroni, nei nuclei? Gira una domanda che dà l’idea del problema: “Una pistola contiene fumo?”
- A questo punto sono un po’ tutti nella corsa ai voltaggi più alti: in America infatti ci sono Lawrence col ciclotrone (è a 900mila volt e intende arrivare a 20 milioni di volt), Van der Graaf e Tuve sono a 750mila volt.
- Ma alla fine basteranno protoni accelerati a 125mila elettronvolt a Cockroft e Walton per “entrare” nel nucleo del litio, destabilizzandolo e disintegrandolo in due particelle alpha, secondo la reazione ${}^1\text{H} + {}^7\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$

Per approfondimenti sulla vicenda, che è appassionante e molto istruttiva, con dettagli sui vari protagonisti (ognuno meriterebbe un ritratto a sé), e altro materiale, rimandiamo al testo di Brian Cathcart. (indicati tra parentesi alcuni capitoli).

È qui da sottolineare il “senso” dell’unità di misura dell’energia, l’elettronvolt. E l’utilità del racconto di questi esperimenti, tratti dalla storia della scienza, anche come esempi per piccoli calcoli e applicazione della teoria.

Si può parlare della velocità delle palline da golf, e dell’altezza delle barriere, discese, buche, in termini di quest’energia, che dà anche un rimando diretto ai campi elettrici o potenziali che bisogna ottenere in laboratorio.

2.3.3 La scoperta del Neutrone e la struttura del Nucleo

Ed ecco finalmente l’annus mirabilis 1932. Il riferimento è ancora “The Fly in the Cathedral”. Dopo anni di lavoro, due “gruppi” di Rutherford raggiungono il loro obiettivo.

(1) Chadwick (v. “off to the races” e “timeliness and promise”)

Chadwick scopre il neutrone.

Viene stimolato da alcuni articoli di Bothe e Becker (v. pag. 180-181) che hanno bombardato elementi leggeri con particelle alpha dal polonio e registrato i risultati con un contatore Geiger invece che uno schermo a solfuro di zinco. Registravano la presenza di raggi molto potenti, non particelle alpha né protoni, sembravano raggi gamma.

“Ecco il neutrone” pensò Chadwick. Sembra un biliardo in cui una particella “sboccia” nel nucleo e ne butta fuori un’altra.

E qui entra in scena Norman Feather, studente di Chadwick, che torna dall’America con una gran quantità di polonio. (v. pag. 183-184)

Nel gennaio 1932 i due leggono un articolo di Joliot e Irene Curie, che hanno ripetuto gli esperimenti di Bothe e Becker e li hanno proseguiti, bombardando un po' tutto con quei raggi per vedere cosa potevano fare. In un esperimento li mandarono sulla paraffina ed essi "sbocciarono" fuori dall'altra parte un fascio di protoni. I due stimarono che i raggi misteriosi fossero raggi gamma a 55 milioni di elettronvolt. (v. pag 207-209)

Chadwick (e Feather) leggono l'articolo ma non sono d'accordo sull'interpretazione ("just nonsense"). Ma Chadwick replica l'esperimento della paraffina con il polonio pronto appena portato da Feather. Segue una serie di esperimenti in sole tre settimane, e a febbraio annuncia "Possible Existence of a Neutron". (v. pag. 210-214)

(2) Cockroft e Walton (v. "red letter day")

Cockroft e Walton, hanno infine il loro complicato apparecchio sperimentale pronto, e con esso fanno diverse cose:

- $^1\text{H} + ^7\text{Li} \rightarrow 2\ ^4\text{He}$
- usano ^1H ovvero fasci di protoni "artificiali", da loro accelerati, non sorgenti radioattive naturali, con cui "entrano nel nucleo" di ^7Li (con l'effetto tunnel)
- non solo "sbocciano" fuori un pezzetto del nucleo, un protone o un neutrone. Ma il nucleo viene "disintegrato", si divide in due particelle alpha ^4He .
- Le due particelle alpha hanno energia di 8 milioni di elettronvolt ciascuna. Ecco che i protoni entranti a 125mila eV hanno tirato fuori dal nucleo 16milioni di eV. E così i due provano in laboratorio $E=mc^2$. Infatti la differenza di massa tra "reagenti" e "prodotti" in questa "reazione nucleare" è di sole 0,02 unità di massa atomica, e viene trasformata nella grande energia delle particelle.

Il loro esperimento è quindi descritto come "reazione nucleare artificiale", "disintegrazione del nucleo" o "splitting of the atom" (molto celebre), "elucidazione della struttura nucleare", "prima verifica laboratoriale di $E=mc^2$ ".

3. Rutherford Insegnante

3.1 The Happy Warrior

“La nave da guerra della fisica”, come era soprannominato Rutherford, non li firma neanche gli articoli di Chadwick e Cockroft-Walton, per quanto avesse partecipato e in un certo senso “sovrinteso” alle ricerche.

È il gentleman scientist... generoso, the happy warrior.

In ogni caso, una traiettoria scientifica straordinaria. È vero che Einstein avrebbe potuto meritare altri Nobel oltre alla spiegazione dell'effetto fotoelettrico. Almeno un altro (relatività generale) o forse due. Ma, come abbiamo visto, anche Rutherford (e la cosa è un po' meno nota...)

Chiesero una volta a Chadwick se Rutherford avesse una “mente acuta”. Per Chadwick acuta o appuntita, non era la parola giusta. “La sua mente era piuttosto la prua di una nave da guerra. Ha un tale impeto dietro, che non serve sia affilata come un rasoio”.

3.2 The Worldview of Rutherford

È il titolo dell'articolo di Stanley L. Jaki nel citato “Rutherford and Physics at the Turn of the Century”. “La visione del mondo di Rutherford”. È un articolo che segnaliamo e che forma una trilogia, insieme quelli su Planck e Einstein.

Per invogliare alla lettura, fornisco una breve traduzione di un brano all'inizio dell'articolo.

Rutherford era uno per cui atomi, protoni, elettroni e neutroni erano reali tanto quanto le pietre che formavano il muro del laboratorio. Egli, naturalmente, sapeva che altri avevano la convinzione opposta, e per giunta con riferimenti al suo lavoro e alle sue scoperte. Probabilmente, solo pochi tra i molti lettori di Eddington ne La natura del mondo fisico non erano d'accordo con la sua caricatura di Samuel Johnson che dà un calcio a una grossa pietra per confutare l'idealismo di Berkeley. Eddington, l'idealista, difficilmente aveva torto se poteva avocare a sé l'autorità di Rutherford e dire: “Rutherford ci ha lasciato talmente poco della pietra che non vale la pena di dargli un calcio”.

Di certo, i fisici non sondano più la realtà dando calci alle pietre, e nemmeno lasciando cadere pietre da una torre. Ma un Eddington, che cercava di derivare la realtà del mondo materiale dalla struttura del suo pensiero, non avrebbe trovato conforto guardando le grandi pietre o piuttosto muri di calcestruzzo che schermano la radiazione dagli acceleratori giganti. La radiazione, come ben si sa, viene dall'accelerazione di pezzetti di materia estremamente duri con i quali i fisici “calciano” altre, egualmente dure, particelle. I risultati sono dei veri fuochi d'artificio, la spettacolare proliferazione di particelle elementari. E dure devono essere, se l'analogia ha un significato. Perché più dura è una pietra, e più duramente è colpita da un'altra pietra, maggiore è la quantità di scintille prodotta.

L'immagine delle “particelle elementari” come piccole pietre, sassolini, è qualcosa da conservare.

3.3 Big Science

Un ultimo richiamo su “Rutherford insegnante” è al laboratorio. Il laboratorio di fisica. La “collanina” di esperimenti di Rutherford comincia con apparecchi fatti sostanzialmente con materiale povero e finisce con acceleratori e “big science”.

È un passaggio importante e la sua vicenda è ideale per raccontarlo. (v. pag 213 e 228 di “The Fly in the Cathedral”).

Al Cavendish c'è una frase per descrivere il laboratorio “del primo tipo”, quello con materiali poveri. È uno “string and sealing-wax laboratory”, un laboratorio con spago e ceralacca. Naturalmente, spago e ceralacca sono di uso quotidiano per spedire la posta, i pacchi, e in questo senso si interpreta il detto, sono cose semplici di uso quotidiano. Ma a cosa servono nel laboratorio di fisica? (la ceralacca in particolare, a cosa serve?).

Come abbiamo visto, gran parte degli esperimenti raccontati vengono eseguiti in tubi di vetro. In essi si fa il vuoto, e dentro ci sono pezzi diversi (catodi, sorgenti radioattive, schermi fosforescenti, eccetera).

È necessario smontare e rimontare questi apparecchi molte volte, e ogni volta bisogna sigillare bene il vuoto. Il metodo usato è la ceralacca. Tutte le giunture sono “sigillate” con la ceralacca. E s'intende che ogni volta che si smonta e si rimonta la si deve scaldare.

Cockroft e Walton, che smontano e rimontano molto spesso il loro apparecchio fatto con tanti pezzi di tubi di vetro, hanno un'idea migliore. E in collaborazione con un'industria, la sviluppano. È la plastilina, quella che noi chiamiamo abitualmente con un suo nome di marca, “pongo”.

È uno dei prodotti “industriali” che possiamo far risalire direttamente a questo tipo di ricerche: il pongo, il sensore antifumo, gli schermi a tubo catodico.

In un certo senso il pongo annuncia la fine del “laboratorio a spago e ceralacca”, perché non si usa più la ceralacca. In un certo senso, la fine degli “esperimenti di frontiera” a piccolo budget.

Ma i laboratori scolastici, o casalinghi, dove si impara, sono ancora “laboratori a spago e ceralacca”, e oggi si possono arricchire di ulteriori arnesi a basso costo, tra cui la plastilina amata dai bambini.