IRIS AperTO

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

AperTO - Archivio Istituzionale Open Access dell'Università di Torino

Profound and far-reaching theoretical implications. La spettrometria di massa di Aston e il suo impatto sulla fisica del nucleo

This is the author's manuscript

Original Citation:

Availability:

This version is available http://hdl.handle.net/2318/1670077 since 2018-06-27T17:37:31Z

Publisher:

CUEN

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)

12 October 2024

Profound and far-reaching theoretical implications.
La spettrometria di massa di Aston e il suo impatto sulla fisica del nucleo

FRANCESCA TURCO
turco@ch.unito.it

LUIGI CERRUTI
lcerruti@ch.unito.it

Dipartimento di Chimica Generale ed Organica Applicata
Università di Torino

0. La spettrometria di massa, un territorio di confine fra fisica e chimica

Fra i molti aspetti che distinguono le scienze del novecento dalle epoche precedenti non vi è solo l'uso di una strumentazione sempre più estrema nelle sue prestazioni, ma vi è la creazione di *territori sperimentali di confine*, comuni a più discipline 'classiche', in cui la distinzione fra chimica e fisica, o tra biologia e chimica, è data solo dalle *finalità conoscitive* secondo cui sono raccolti i dati. Un caso, esemplare, è quello della affermazione delle tecniche di spettrometria di massa, che ha portato negli anni 1920-1930 contributi di avanguardia, tanto per la fisica quanto per la chimica, per poi entrare progressivamente in tutti i laboratori chimici a partire dalla fine della seconda guerra mondiale. Il tema scelto per la presente comunicazione esclude questa seconda fase, che inizialmente fu dovuta alla commercializzazione della strumentazione messa a punto negli Stati Uniti durante la guerra, e che pure ha avuto aspetti interessanti per la trasformazione di pratiche sperimentali della chimica organica fra le più consolidate. Abbiamo in realtà preferito concentrare la nostra attenzione su Francis Aston, un chimico di formazione, che si è posto consapevolmente sul limite fra fisica e chimica, portando a queste due discipline sia risultati di eccellenza sulle masse degli isotopi, sia elaborazioni teoriche sulle masse nucleari di forte valore conoscitivo. Secondo la più schietta tradizione chimico-fisica classica Aston era affascinato dalla pratica sperimentale in tutte le sue componenti, dalla costruzione degli strumenti all'esecuzione delle misure. Per quanto riguarda la spettrometria di massa svolse per intero la sua attività presso il Cavendish Laboratory di Cambridge durante la gestione di due dei suoi più prestigiosi Direttori: Joseph John Thomson e Ernst Rutherford. Il 'caso' Aston è di rilievo anche per l'intenso ambiente di ricerca del Cavendish Laboratory, che - come è noto - fu il centro di indagine sperimentale sul nucleo più importante del mondo nel periodo fra il 1919, l'inizio della direzione di Rutherford, e il 1932, anno in cui furono eseguite esperienze che in tempi successivi portarono agli 'sperimentali' del Cavendish ben due premi Nobel, nel 1935 a James Chadwick e nel 1951 a Cockcroft e Walton.

Nella nostra ricerca ci è stata più volte d'aiuto la lettura di un'opera in cui lo stesso Aston, ricostruisce le prime fasi della storia della spettrometria di massa.[1] Ricordiamo anche che l'ambito storiografico in cui si muove la nostra comunicazione è stato trattato ottimamente da Giuseppe Bruzzaniti.[2]

Senza voler anticipare i risultati della presente ricerca possiamo comunque rilevare che la ricerca stessa è stata orientata da una precisa assunzione storiografica, e cioè dalla particolare fertilità conoscitiva delle 'zone grigie', dove scienze diverse vengono a contatto, talvolta senza che la gran parte degli scienziati 'disciplinaristi' se ne rendano conto. Nella storia della scienza italiana spicca un caso emblematico. Fu proprio la padronanza dei dati della chimica e della fisica, e il loro accordo, a rendere grande il *Sunto* che Stanislao Cannizzaro pubblicò nel 1858. Ma nell'ambito

[1] F. W. Aston, *Mass-spectra and Isotopes*, London: Arnold, 1933. La prima parte del volume è intitolata *Historical*, pp. 1-54.
[2] G. Bruzzaniti, *Dal segno al nucleo. Saggio sulle origini della fisica nucleare*, Torino: Bollati Boringhieri, 1993.

degli stili di ricerca dell'ottocento le procedure conoscitive seguite da Cannizzaro sono un'eccezione, condivisa prima e dopo il 1858 da ben pochi altri scienziati.[3] Come accennavamo all'inizio di questa introduzione è in particolare nel novecento che si è realizzato un forte *effetto sinergico dei dati sperimentali con diversi domini specialistici e disciplinari*.

Fra le vicende legate al 'significato multiplo' dei dati della spettrometria di massa abbiamo privilegiato quelle più strettamente connesse alla fisica del nucleo, la fisica *par excellence* del Laboratorio in cui operava Aston. Così, dopo un breve ritratto biografico del nostro chimico-fisico (sezione 1), seguiremo lo sviluppo delle sue ricerche e delle sue proposte teoriche fra il 1919 e il 1932 (sezioni 2 e 3), daremo un certo spazio ai contributi di George Gamow sulla teoria quantistica del nucleo (sezione 4), e infine vedremo in dettaglio il 'funzionamento' dei dati di Aston nel contesto movimentato - e per certi aspetti prodigioso - delle scoperte che resero indimenticabile il 1932.

1. Francis W. Aston, un profilo biografico[4]

La figura di Francis William Aston (1877-1945) ha un certo rilievo nello sviluppo della scienza del Novecento, essenzialmente per essere stato uno dei non molti scienziati che furono in grado di dare un contributo egualmente apprezzato dalle comunità dei chimici e dei fisici, contigue ma non sempre comunicanti. Questa sua 'doppia' figura scientifica comincia a delinearsi già a partire dal suo corso di studi, che lo porta a contatto con docenti di ottimo livello in entrambe le discipline, e dai suoi primi lavori. Aston, nato nel 1877 nella contea di Birmingham, dal 1893 studia presso il Mason's college, con insegnanti quali i chimici W. A. Tilden e P. F. Frankland ed il fisico J. H. Poynting. Nel 1898 intraprende, grazie ad una borsa di studio, un lavoro di stereochimica con Frankland e segue un corso di fermentazioni che metterà a frutto lavorando dal 1900 al 1903 come chimico in un birrificio. Dal 1903 al 1908 lavora come fisico ricercatore con Poynting alla Birmingham University (l'ex Mason's College). È in questo periodo che incomincia ad occuparsi di fenomeni di conduzione in gas a bassa pressione, ed in particolare del cosiddetto *dark space* di Crookes, una zona buia che si forma dietro il catodo nei tubi di scarica.

Nel 1910, a 33 anni, Aston viene invitato da J. J. Thomson, dietro suggerimento di Poynting, al Cavendish Laboratory del Trinity College di Cambridge, prima in qualità di assistente personale e, a partire dal 1913, come Clerk Maxwell Scholar. L'episodio fondamentale di questa collaborazione è la costruzione, terminata nel 1912, di una versione migliorata dell'apparecchio a raggi positivi, sul quale Thomson lavorava da tempo. Con questo strumento viene analizzato il neon, che dà origine a due tracce sulla lastra fotografica utilizzata come rivelatore: una corrispondente alla massa 20 e una alla 22. Si tratta dei due isotopi di questo gas nobile, ma l'interpretazione iniziale è diversa e piuttosto confusa. Dal discorso pronunciato da Thomson nel gennaio 1913, in occasione di una conferenza alla Royal Institution, emerge l'imbarazzo nell'interpretazione di questo dato inatteso. Thomson suppone che la parabola corrispondente alla massa 22 sia dovuta ad un composto idrogenato del neon "benché non abbiamo a tutt'oggi nessuna prova diretta della combinazione di questo gas inerte"[5] e addirittura è pronto a mettere in discussione uno strumento conoscitivo potente e fecondo di risultati brillanti come la tavola periodica:

---

[3] Uno di noi ha trattato questo problema in comunicazioni a due dei nostri primi Congressi: L.Cerruti., "Ricognizione sui confini: chimica e fisica nel *Sunto* di Cannizzaro", *Atti del III Congresso Nazionale di Storia della Fisica*, Palermo, 1982, pp. 109-116; Id., "La ricezione della teoria atomico-molecolare di Cannizzaro negli anni 1860", *Atti del IV Congresso Nazionale di Storia della Fisica*, Milano: CLUED, 1984, pp. 107-112.

[4] I dati biografici sono tratti da "Obituary notices. Francis William Aston", *JCS*, 1948, pp. 1468-1475 e da W. H. Brock, "Aston, Francis William", *Dictionary of Scientific Biography*, New York: Scribner, 1970, *ad vocem*.

[5] F. W. Aston, *Les isotopes*, Parigi: Librairie scientifique J. Hermann, 1923. Cit. alla p. 38.

> "Può essere tuttavia che diamo alla legge di Mendeleef un'interpretazione troppo rigida e che, nelle vicinanze del peso atomico del neon, ci sia un gruppo di due o più elementi dalle proprietà simili, come in altre parti della tavola abbiamo il ferro, il nichel, il cobalto"[6]

Thomson si dedica all'approfondimento della prima congettura, la formazione dell'idruro di neon, e lascia che sia Aston ad applicarsi all'ipotesi, che al momento sembra meno probabile, dell'esistenza di un "meta-neon" (ricordiamo che la notazione "metaelementi" è di Crookes, il lavoro del quale Aston doveva conoscere piuttosto bene). Aston affronta il problema tentando la separazione con distillazione frazionata ed in un secondo tempo tramite diffusione. Nel 1913 l'operazione è parzialmente riuscita, e Aston annuncia la presenza di un nuovo elemento con le stesse proprietà del neon. Questo giro di parole contiene già il concetto di isotopia, ma senza approfondirlo, in maniera piuttosto vaga. È probabilmente l'influenza di Thomson, che nel frattempo si sta occupando di ricerche su una particella di massa tre[7], ad impedire che Aston prenda un deciso impegno ontologico. Proprio perché la separazione è parzialmente riuscita, Thomson continua a parlare di "neon" e di "gas con peso atomico 22" come di elementi diversi. In realtà, essendo ancora lontana la scoperta del neutrone e la formalizzazione del modello corrente di nucleo, i due concetti sono praticamente coincidenti. Che il "gas con peso atomico 22" riceva un nuovo nome o sia definito un isotopo del neon si risolve, nel primo caso, con uno stiracchiamento della tavola periodica, nel secondo porterà alla sistemazione di più atomi con nuclei diversi nella stessa casella (e qualcuno proporrà, peraltro in maniera etimologicamente corretta, che la definizione di elementi debba scendere un gradino nella scala della complessità della materia ed essere riservata a quelli che verranno invece chiamati isotopi). Indubbiamente la prima alternativa avrebbe snaturato la tavola di Mendeleef, non solo creando dei notevoli problemi grafici, ma scompaginandone la periodicità, e quindi rendendola sostanzialmente inutile. Nel 1914 Frederick Soddy pubblica un lavoro sui "radioelementi chimicamente inseparabili" nel quale conferma l'ipotesi, dell'esistenza di atomi dello stesso elemento con diversi pesi atomici, aperta dalle ricerche di B. B. Boltwood, di E. Rutherford e di altri sui decadimenti radioattivi.[8] Viene quindi annunciata ufficialmente l'esistenza di atomi diversi che occupano lo stesso (*isos*) posto (*topos*) nella tavola periodica. Bisogna evidenziare come questo lavoro, derivante da studi sui decadimenti nucleari, sia riferito agli elementi radioattivi, elementi molto pesanti e che da più di quindici anni si sono rivelati dotati di proprietà cosi inusuali da rendere tutt'altro che scontata l'estensione del concetto di isotopia agli elementi leggeri. Nonostante questo ostacolo conoscitivo Soddy, ed evidentemente anche Aston, sono favorevoli a questa possibilità.

La guerra interrompe la collaborazione fra Thomson e Aston che torna a fare il chimico, lavorando nei laboratori della RAF a Farnborough. In questo periodo ha un incidente aereo, dal quale esce illeso, e inventa un particolare tipo di tubi al neon (!). Dopo la guerra Aston torna definitivamente a Cambridge, non avendo neanche durante il periodo trascorso a Farnborough interrotto del tutto la linea di pensiero costituita dalle ricerche precedenti, e riprende gli studi sulla separazione del neon. Ben presto si convince che l'unica possibilità di separare le masse 20 e 22 in maniera soddisfacente, e quindi provare l'esistenza di due isotopi, consista nell'approfondire il metodo dei raggi positivi. Nel 1919 si susseguono a ritmo serrato una serie di articoli di Aston che ripercorrono questa linea di pensiero e ne presentano gli sviluppi. In febbraio Aston invia (da Farnborough) al *Philosophical Magazine* un articolo sulla possibilità di separare gli isotopi.[9] La

---

[6] Ib., cit alla p..38.

[7] Risulterà poi essere idrogeno triatomico, H_3^+, una molecola-ione che è tuttora di grande interesse teorico e sperimentale; si veda: B. McCall**,** Laboratory and Observational Spectroscopy of H_3^+", 7 ottobre 1996, http://fermi.uchicago.edu/~bjmccall/prospectus/paper.html#dempster (ultimo accesso 11 dicembre 2000).

[8] Di grande utilità per la ricostruzione delle tecniche sperimentali e del contesto teorico in cui si sviluppò la fisica del nucleo è il testo di M. Mladjenovic, *The History of Early Nuclear Physics (1896-1931)*, Singapore: World Scientific, 1992; qui il riferimento è al cap. 8, pp. 109-130.

[9] F. A. Lindemann e F. W. Aston, "The possibility of separating isotopes", *Phil. Mag.*, **37**, pp. 523-535 (1919).

retorica utilizzata per la comunicazione consiste nell'effettuare una panoramica dei possibili metodi utilizzabili e mostrare, con tono neutro e abbondanza di dati, come con tecniche 'classiche' (distillazione frazionata, diffusione, separazione gravitazionale, separazione chimica) si abbiano risultati nulli o scarsi, e infine presentare brevemente un metodo relativamente nuovo (raggi positivi) che invece permette, in teoria, una separazione quantitativa.

> "Poiché l'esistenza di elementi di differente peso atomico che occupano la stessa posizione nella tavola periodica ma appaiono essere inseparabili con mezzi chimici *sembra essere adesso generalmente accettata*, è interessante considerare i vari metodi con i quali può esserci qualche speranza di separarli"[10]

Pochi mesi più tardi, in agosto, viene spedito (sempre al *Philosophical Magazine*, ma questa volta dal Cavendish Laboratory), un secondo articolo che verrà pubblicato sul numero di dicembre, appena duecento pagine dopo il primo.[11] L'articolo introduce una versione più evoluta dell'apparecchio a raggi positivi di J. J. Thomson, si tratta di uno dei primi spettrografi di massa (sezione 2) che permetterà ad Aston di provare definitivamente che le masse 20 e 22 sono due isotopi del neon.

Aston non è il solo a lavorare in questa direzione, l'anno precedente A. J. Dempster, un ricercatore del Reyerson Physical Laboratory di Chicago, aveva costruito uno strumento, basato su un principio leggermente diverso (con l'utilizzo di particelle dotate tutte di uguale energia cinetica per effettuare la separazione è sufficiente un campo magnetico), con il medesimo obiettivo di separare particelle cariche in spettri di massa. Lo strumento di Dempster presenta però un inconveniente:

> "La configurazione di Dempster dipende dalla conoscenza del potenziale attraverso il quale i raggi sono generati nel tubo di scarica, ed è quindi praticabile solo nel caso di raggi con bassa velocità."[12]

In realtà questo ostacolo non si rivelerà insormontabile e la competizione fra Dempster e Aston continuerà almeno fino al 1937. Periodicamente ciascuno dei due scienziati costruirà strumenti dalle prestazioni via via crescenti, e sarà il modello di Dempster ad avere un'enorme diffusione commerciale. Per il momento è la versione di Aston quella più feconda di risultati, grazie ad un potere separatore leggermente superiore a quello dello strumento costruito dal collega americano, ma principalmente grazie al ritmo costante nell'effettuare le misure e all'impegno ontologico nell'interpretazione dei risultati ottenuti: Aston è il primo ad enunciare, con un supporto sperimentale valido, l'esistenza di isotopi anche per elementi leggeri e soprattutto è sua la conferma della w*hole number rule*, la legge del numero intero (sezione 2). Per quest'interpretazione, probabilmente la conferma ad un'ipotesi che meditava da tempo, lo scienziato inglese viene eletto, nel 1919, *fellow* del Trinity College e nel 1920 diviene *fellow* anche della Royal Society. Nel corso della sua vita otterrà molte altre onorificenze, oltre al premio Nobel (1922) ricordiamo che divenne membro onorario dell'Accademia delle Scienze di Russia, dell'Accademia dei Lincei, e che gli furono conferiti il dottorato onorario dalle Università di Birmingham e di Dublino.

Nel 1922 pubblica il volume *Isotopes*, un trattato sulla storia della scoperta dell'isotopia, le sue implicazioni e le proprietà degli isotopi.[13] Nel 1927, cinque anni dopo il premio Nobel, Aston rende noti i dati ottenuti con un secondo e più potente strumento, consegnando al *Philosophical Magazine* un articolo che sarà citato innumerevoli volte, nei più diversi contesti della fisica atomica e della fisica molecolare.[14] Il livello di precisione[15] raggiunto consente di misurare la *packing*

---

[10] Ib., p. 523. La sottolineatura è nostra.
[11] F. W. Aston, "A positive ray spectrograph", *Phil. Mag.*, **38**, pp. 707-714 (1919).
[12] Ib., p. 707.
[13] F. W. Aston, *Isotopes*, London: Arnold, 1922.
[14] F. W. Aston, "A New Mass-Spectrograph and the Whole Number Rule", *Proc. R. Soc*, **115 A**, pp. 487-514 (1927).

fraction, una grandezza che quantifica la piccola deviazione dei pesi degli isotopi dal numero intero, una quantità che, rendendo conto dell'energia necessaria alla stabilità del nucleo atomico, permette di indagarne la struttura (sezioni 3 e 4).

In una conferenza a Cambridge, organizzata nel 1936 dalla Commissione di Storia della Scienza, Aston dichiara di essere certo che una volta conosciuti i valori esatti delle masse atomiche i "chimici nucleari" saranno in grado di sintetizzare elementi cosi come i "chimici ordinari" sintetizzano composti. Nel 1937 è costruito un terzo spettrografo, dotato di precisione ancora maggiore.

L'attività professionale di Aston più significativa fu dunque scandita dalla successiva messa a punto di strumenti e dall'esecuzione di misure sempre più precise, in qualunque campo operasse. Egli fu un abilissimo sperimentatore e costruttore di strumenti di precisione, oltre ai due fondamentali spettrografi di massa, per i quali progettò fino ai più piccoli dettagli (sezione 3), mise a punto, per lo strumento di Thomson del 1912, la camera per ottenere le lastre fotografiche, un nuovo tipo di pompa, che permise di ottenere un vuoto molto più elevato di quanto possibile in precedenza, studiò diversi tipi di emulsioni fotografiche per stabilire quale fosse la migliore per la rilevazione degli spettri, ideò una microbilancia con sensibilità dell'ordine di 10^{-9} grammi. Era inoltre un abile soffiatore di vetro e contribuì alla costruzione fisica di un laboratorio. Aston era un ricercatore solitario, e infatti solo sei delle sue 143 comunicazioni sono in collaborazione, ma in certe circostanze critiche per la messa punto degli strumenti che costruiva, o per la piena comprensione dei dati sperimentali, il nostro chimico fisico fu costretto a chiedere l'aiuto di matematici,[16] facilitato in ciò dal particolare ambiente accademico e scientifico che caratterizzava Cambridge. È in questa chiave 'ambientale' che si può interpretare la collaborazione con il fisico matematico Ralph Howard Fowler (1889-1944). Fowler era giunto a Cambridge nel 1920 come *lecturer* di matematica al Trinity College, dopo aver acquisito una notevolissima esperienza in matematica applicata durante la guerra.[17] Aston e Fowler si frequentarono sui campi di golf, e al momento di perfezionare il primo spettrografo di massa il chimico fisico chiese al fisico matematico di aiutarlo nell'analisi dei problemi matematici connessi con la focalizzazione degli ioni nei campi elettrici e magnetici.[18] I risultati della loro collaborazione arrivarono alla redazione del *Philosophical Magazine* nel novembre 1921, e furono pubblicati nel fascicolo del 1° marzo 1922.[19] Aston non dimenticò mai di attribuire completamente a Fowler il merito dell'analisi matematica dei principi fisici del primo spettrografo,[20] analisi che anche nella forma approssimata aveva dei passaggi che meritavano un suo commento un po' sconsolato: *This is complicated*.[21]

Anche dalla vita privata emerge il carattere solitario dello scienziato: Aston non si sposò mai. Morì nel 1945, a Cambridge. Da lui furono descritti non meno di 212 isotopi sui 287 naturali esistenti.

2. Il primo spettrografo di massa di Aston, 1919-1925

---

[15] Aston parla di 'accuratezza' riferendosi al numero di cifre significative di unità di massa atomica che è in grado di misurare. I chimici sono molto sensibili a questo proposito; per il lettore contemporaneo il termine va tradotto con 'precisione'.

[16] Fra questi matematici abbiamo già incontrato F. A. Lindemann; cfr. il Rif. 9.

[17] J. Mehra, H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, New York: Springer, 1982, pp. 54-55. Fowler fu gravemente ferito durante la campagna di Gallipoli; una volta ristabilito continuò il servizio come ufficiale dell'artiglieria di marina, collaborando per quasi tre anni alla messa a punto di strumentazione di tiro.

[18] Ib., p. 56.

[19] F. W. Aston , R. H. Fowler," Some Problems of the Mass-spectrograph", *Phil. Mag.*, **43**, pp. 514-528 (1922).

[20] Rif. 1, p. 39.

[21] Ib., p. 47.

2.1 La messa a punto dello strumento

L'articolo fondamentale del 1919, quello di agosto, si apre con la descrizione del principio di funzionamento e dei limiti dell'apparecchio a raggi positivi di J. J. Thomson. La separazione delle particelle cariche positivamente è dovuta alla duplice azione di un campo elettrico ed uno magnetico, paralleli. Il primo origina uno "spettro elettrico" deflettendo le particelle cariche in proporzione al rapporto e/mv^2, il secondo genera uno "spettro magnetico" con deflessioni proporzionali a e/mv (le virgolette sono dello stesso Aston). Questa doppia separazione origina (su uno schermo fluorescente o su una lastra fotografica) delle parabole, una per ogni dato rapporto e/m. Misurando, per un particolare valore di ascissa, le ordinate dei vari archi di parabola e confrontandole con il valore ottenuto da una massa nota si ottiene una misura della massa da riferirsi ad ogni parabola incognita (essendo di solito la carica *e* unitaria si ottiene una sola parabola per ogni massa). Lo strumento, come lo stesso Aston ammette, è ottimo per valutazioni generali, ma non utilizzabile per applicazioni che richiedano precisione e potere separatore elevati (il più evoluto fra gli strumenti di Thomson, quello del 1912 costruito con la collaborazione di Aston, permette di separare masse differenti del 10%).[22] Per ottenere parabole sottili, e quindi misure precise, è necessario che i canali di bronzo o di rame che convogliano le particelle siano molto stretti, il che causa la perdita di una parte considerevole del fascio, il deterioramento del tubicino in seguito alle ripetute collisioni e soprattutto il rapidissimo decrescere dell'energia totale disponibile per impressionare la lastra (proporzionale alla quarta potenza del diametro del tubicino). I primi due inconvenienti sono facilmente risolti da Aston sostituendo il tubicino con due strette fenditure ricavate nell'alluminio, un metallo che si deteriora molto poco sotto il bombardamento delle particelle.

La soluzione davvero innovatrice è quella al problema dell'intensificazione dei segnali raccolti: deviando, per mezzo di un campo magnetico opportunamente orientato, le particelle cariche nello stesso piano, ma nel verso opposto, rispetto alla deviazione dovuta al campo elettrico, si ottiene che tutte le particelle di uguale massa e differente velocità, che con il metodo di Thomson originavano un arco di parabola, siano in questo modo focalizzate in un punto (in realtà una piccola riga). Vale a dire che si ottiene, sulla consueta lastra fotografica, uno spettro di particelle separate esclusivamente in base alla massa. Si ha quindi una forte analogia con le tecniche spettroscopiche, sottolineata da diverse illustrazioni che mostrano schematicamente la possibilità di effettuare una focalizzazione elettrica o magnetica.[23] Nel titolo dell'articolo compare il termine *spectrograph*, che verrà mantenuto. Consapevole che le variazioni tecniche e concettuali introdotte con l'attuale comunicazione rendono possibile un'effettiva svolta epistemologica, grazie ad un netto miglioramento delle prestazioni di una metodologia già promettente, Aston si svincola dalla notazione 'raggi positivi' e conferisce alle sue innovazioni la dignità di nuova tecnica, battezzandola con un nome preso da procedure ormai classiche. La scelta del termine *spectrograph* è peraltro impeccabile e supportata dall'analogia tra la 'focalizzazione' del suo strumento e quella delle lenti, che Aston stesso evidenzia. Anche riguardo ad un altro fenomeno la terminologia viene presa dall'ottica: le linee dovute a particelle con carica multipla sono dette del secondo o terzo ordine. Quando questa comunicazione viene spedita lo strumento non è stato ancora del tutto costruito; l'articolo riporta esclusivamente il principio di funzionamento, i calcoli che lo sottintendono (eseguiti con la collaborazione di "molti amici" non meglio identificati) e poche lastre di prova che mostrano come la convergenza sia stata felicemente realizzata ottenendo righe intense e sottili. In questo modo Aston si propone di chiarire al di là di ogni disputa "la composizione del Neon atmosferico – elemento o miscela isotopica –". [24]

[22] Rif. 5, p. 37.
[23] Rif. 11, p. 709-710.
[24] Ib., p. 713.

2.2 I risultati

La fretta di Aston nel presentare il nuovo strumento, che lo porta ad una pubblicazione di un lavoro ancora parziale, può essere spiegata dalla consapevolezza dell'incalzare di altri ricercatori, in particolar modo Dempster, che si stanno applicando al nuovo campo di ricerche aperto da Soddy e interrotto dagli eventi della Prima Guerra Mondiale. L'anno seguente compare, sempre sul *Philosophical Magazine*, un ulteriore articolo[25] (è in questo testo che compare la notazione *Mass-spectra*) che contiene la descrizione dei dettagli tecnici dell'apparecchio, questa volta completamente costruito, e i primi risultati. Lo spettrografo permette di separare linee di masse differenti di 1 su 130 con un'incertezza di una parte su 1000. Grazie a questi parametri Aston riesce finalmente a provare in modo definitivo come il neon sia costituito da due isotopi di massa 20 e 22 (è presente anche, ma come dubbia, l'indicazione di un terzo isotopo di massa 21). Un'anticipazione di questo risultato era stata pubblicata in una breve nota apparsa su Nature il 27 novembre 1919.[26] Questa interpretazione è supportata dal riconoscimento della complessità di molti altri elementi: il cloro risulta costituito da due isotopi di massa 35 e 37 e, forse, da un terzo di massa 39, l'argo dalle masse 36 e 40, il boro dagli isotopi 10 e 11, il silicio da 28, 29 e forse 30, il bromo, che avendo peso intero (80) ci si attende 'puro'[27] risulta essere una miscela di isotopi 79 e 81 nella stessa quantità, per il kripto vengono riconosciuti non meno di sei isotopi diversi, per lo xeno cinque, il mercurio è sicuramente composito, ma le linee non sono ben risolte. Ossigeno, carbonio, fluoro, fosforo, arsenico, idrogeno, elio e azoto appaiono invece semplici, sullo zolfo persiste l'incertezza.[28] Molti di questi risultati non sono corretti, ma il loro valore globale è comunque notevole. È evidente che una simile serie di risultati non può essere spiegata con la scoperta di decine di nuovi elementi e la tesi di Aston si afferma decisamente.

La 'comparsa' di tutti questi nuovi isotopi rende necessaria l'introduzione di una nomenclatura. Aston propone di apporre un apice sulla destra del simbolo dell'elemento per specificare l'isotopo e aggiunge:

> "Questo sistema è reso ragionevole dal fatto che le masse dei costituenti degli elementi misti si sono finora rivelate numeri interi sulla scala utilizzata."[29]

Come ricordato nella sezione precedente le conseguenze del lavoro svolto con questo primo spettrografo di massa portano Aston all'assegnazione del Premio Nobel per la chimica nel 1922. È significativo che la Commissione Nobel assegni il premio del 1921 a Soddy e quello dell'anno successivo ad Aston. Il campo di indagini aperto dal primo e universalizzato dal secondo costituisce una svolta profonda nella concezione della materia: viene a cadere una parte della definizione che Dalton aveva dato di atomo all'inizio dell'Ottocento. I diversi atomi di uno stesso elemento sono sì simili fra loro e hanno lo stesso comportamento chimico, ma non hanno necessariamente lo stesso peso. La conseguenza più rilevante del lavoro dei due scienziati è che i pesi atomici degli elementi possono essere frazionari, ma solo in quanto media dei pesi di una miscela di isotopi di diversa massa, mentre ogni singolo atomo ha peso intero (sulla scala O = 16), è la conferma della validità della *whole number rule*, la legge del numero intero. Anche questo risultato, discusso nell'articolo del 1920 al *Philosophical Magazine* è anticipato brevemente su *Nature*, sul numero del 18 dicembre 1919.[30] Come Aston si affretta a precisare non è detto che "la legge del numero intero sia valida con

---

[25] F. W. Aston, "The mass-spectra of chemical elements", *Phil. Mag.*, **39**, pp. 611-625 (1920).
[26] F. W. Aston, "Neon", *Nature*, **104**, p. 334 (1919).
[27] Come ricorda Aston le notazioni *pure* e *mixed* sono proposte da F. A. Paneth.
[28] Questi risultati, ripresi in parte nella nota del 1920 sul *Philosophical Magazine*, compaiono in brevi comunicazioni su *Nature*, fra il 1919 e il 1920.
[29] Rif. 25, p. 619.
[30] F. W. Aston, "The constitution of the element", *Nature*, **104**, p. 393 (1919).

esattezza matematica",[31] ma questi primi dati parrebbero confermarla, almeno entro l'ordine di precisione raggiunto. Ne risulta evidentemente che tutti i nuclei atomici sono costituiti da una medesima unità fondamentale, una sostanza primitiva comune a tutte le sostanze. Nel 1921 Aston concluderà una conferenza con le seguenti parole:

> "I risultati che vi ho proposto questa sera si trovano al confine tra fisica e chimica, e sebbene come chimico io veda con un certo sgomento la possibilità di diciotto differenti cloruri di mercurio, come fisico è un grande sollievo scoprire che la Natura impiega in ultima approssimazione mattoni uniformi nelle sue operazioni di costruzione degli elementi."[32]

Questa concezione di grande fascino ed eleganza è riemersa ripetutamente nella storia della filosofia e della scienza. Ricordiamo perlomeno W. Prout, che nel 1815 cercò di dimostrare come l'unità fondamentale fosse l'atomo di idrogeno (o *protile*), W. Crookes che nel 1886 avanzò l'ipotesi che i pesi atomici degli elementi risultassero dalla media dei pesi, diversi, dei singoli atomi, e, in tempi molto più vicini a quelli trattati, W. D. Harkins in collaborazione con E. D. Wilson. Questi già nel 1915 parlano di isotopi per il neon, senza smorzature grafiche come le virgolette. Inoltre sulla base di dati della letteratura, effettuano calcoli che, facendo emergere per molti elementi leggeri una deviazione costante in percentuale rispetto a numeri interi (sulla scala dell'idrogeno uguale a uno), li portano a riaffermare la validità dell'ipotesi di Prout, con qualche modifica.[33] Le particelle fondamentali non sarebbero semplicemente gli atomi di idrogeno ma protoni, elettroni e particelle alfa[34] (più tardi Harkins proporrà anche particelle fondamentali di massa due e tre). Aston condivide l'idea che le unità fondamentale siano protoni ed elettroni o particelle alfa.

> "possiamo supporre che un atomo elementare di massa *m* possa essere cambiato in uno di massa *m+1* dall'addizione di una particella positiva e di un elettrone. Se entrambi entrano nel nucleo ne risulta un isotopo, essendo la carica nucleare inalterata. Se solo la particella positiva entra nel nucleo viene formato un elemento di numero atomico maggiore "[35] "È possibile sia che i nuclei degli elementi pesanti si formino direttamente dalle cariche [protoni ed elettroni] […] sia che da principio si costituiscano gli atomi di elio per unirsi in seguito"[36]

Benché verso la metà del citato articolo del 1920 Aston affermi che "l'attesa regola del numero intero e la legge di additività sono valide al limite dell'accuratezza"[37] poche pagine dopo riporta come peso atomico dell'idrogeno 1,008 ("determinato con accuratezza con metodi chimici"), che pure è risultato essere un elemento 'puro'. La massa dell'idrogeno molecolare risulta esattamente doppia di quella dell'atomo, mentre l'elio risulta più leggero di due molecole di H_2. Ne deriva quindi per l'idrogeno uno scarto di circa l'1% da un numero intero, il che potrebbe essere spiegato con la perdita di massa, per i nuclei più complessi, dovuta alla vicinanza di particelle cariche all'interno di questi, in sostanza essere dovuta alla formazione di legami subnucleari. Aston afferma decisamente che:

> "La teoria elettromagnetica asserisce che le masse non sono generalmente additive, ma solo quando le cariche sono relativamente distanti una dall'altra. Questo è sicuramente il

[31] Rif. 25, p. 624.
[32] F. W. Aston, "Mass-spectra and atomic weight", *J. Chem. Soc.*, **119**, pp. 677-687 (1921). Cit. a p. 687.
[33] W. D. Harkins, E. D. Wilson, "The changes of mass and weight involved in the formation of complex atoms", *J.Am.Chem.Soc*, **37**, pp. 1366-1383 (1915).
[34] W. D. Harkins, E. D. Wilson, "The structure of complex atoms. The hydrogen-helium system", *J.Am.Chem.Soc*, **37**, pp. 1383-1396 (1915).
[35] Rif. 25, p. 624.
[36] Rif. 5, p. 126.
[37] Rif. 25, p. 619. Cfr. nota 15.

caso quando le molecole H_2 e H_3 sono formate da H_1. [...] Nel caso dell'elio, dello standard ossigeno e di tutti gli altri elementi, questo non è più valido, essendo i loro nuclei composti da particelle ed elettroni impacchettati insieme ed estremamente vicini. Le masse di queste strutture non saranno esattamente la somma delle masse dei loro costituenti ma probabilmente meno, così che l'unità di massa sulla scala scelta sarà inferiore a quella di un singolo atomo di idrogeno".[38]

Anche questa spiegazione era stata anticipata da Harkins e Wilson.

"Sembra dunque praticamente certo che gli elettroni e le particelle positive che formano il nucleo di un atomo complesso sono impacchettate insieme ed estremamente vicine. Come risultato di questo stretto impacchettamento i campi elettromagnetici delle particelle cariche devono sovrapporsi per un'estensione considerevole, il che potrebbe significare che le masse degli atomi non sono affatto uguali alla somma delle masse delle singole particelle dalle quali sono costruiti"

Vediamo ancora con quali parole questo risultato viene commentato nel discorso pronunciato da H. G. Söderbaum durante l'assegnazione del Nobel ad Aston.

"Ma anche in accordo alla teoria del nucleo di Rutherford l'idrogeno assume una posizione particolare rispetto a tutti gli altri elementi. Infatti il relativo atomo è l'unico il cui il nucleo non si compone di un certo numero di unità strettamente impacchettate, ma consiste di una singola particella positiva di elettricità, il protone. In considerazione di questo fatto la divergenza dell'idrogeno dalla regola del numero intero non può dirsi completamente inattesa, soprattutto se si accetta l'idea che la separazione (*gulf*) fra massa ed energia è meno insormontabile di quanto fosse stato precedentemente supposto".

La misura delle piccole deviazioni che il peso dei diversi isotopi presenta rispetto al numero intero, deviazione dovuta all'energia necessaria per tenere insieme i nuclei atomici, permette di indagare la costituzione dei nuclei stessi. Un nuovo miglioramento di prestazioni è richiesto per questa questione cruciale e per poter separare le linee spettrali di elementi più pesanti, Aston avvia quindi la costruzione di un secondo strumento. Questo non sarà pronto fino al 1925, nel frattempo prosegue il lavoro con il primo spettrografo. Con questo vengono determinate le costituzioni isotopiche di più di 50 elementi. Inizialmente vengono esaminati non metalli e metalloidi, essendo la generazione dei raggi positivi limitata agli elementi o composti gassosi. Nel novembre 1923 Aston invia un ulteriore articolo al *Philosophical Magazine*, che sarà pubblicato sul numero di febbraio dell'anno successivo,[39] in cui descrive i diversi tentativi fatti per estendere il metodo di analisi anche agli elementi metallici. La prima soluzione adottata consiste nel far scoccare un arco elettrico fra due punte metalliche, sotto vuoto spinto. Nonostante diversi tentativi questo metodo, per cause non ben chiarite, risulta impraticabile. In un secondo tempo viene tentato il miglioramento del metodo dei raggi anodici. Una delle sue varianti, quella dell'anodo riscaldato, è già stata impiegata con successo per la determinazione degli spettri di massa dei metalli alcalini, ma Aston dichiara che le speranze di incrementarne le potenzialità sembrano molto piccole. Ci si rivolge allora alla seconda variante del metodo, quella detta dell' "anodo composito", già utilizzata con successo da G. P. Thomson nel caso degli elementi più leggeri dei primi due gruppi del sistema periodico. Questa variante consiste nella costruzione di un anodo misto di grafite e alogenuri metallici. Aston esegue numerosi tentativi con tubi di scarica di diverse forme e dimensioni posizionando gli elettrodi "in ogni sorta di posizione",[40] viene anche tentata l'aggiunta di un catodo di tungsteno riscaldato ausiliario, ma senza apprezzabili risultati. Dopo un mese di tentativi viene scelta la conformazione ottimale. Il metodo, battezzato dei "raggi anodici accelerati" consente l'analisi anche dei metalli pesanti, vengono eseguite con successo le determinazioni della

[38] Ib., p. 625.
[39] F. W. Aston, "The mass-spectra of chemical elements – part V. Accelerated anode rays", *Phil. Mag.*, **47**, pp. 385-400 (1924).
[40] Ib., p. 386.

composizione isotopica di germanio, rame, stronzio, cobalto, scandio, manganese, gallio, vanadio, cromo, titanio, argento e yttrio. Viene anche perseguita, ma senza risultato, un' "opportunità unica":[41] la determinazione del peso atomico dell'afnio, recentemente scoperto, non ancora portata a termine con mezzi chimici. Anche le analisi di zirconio, niobio, molibdeno, cadmio e piombo sono per il momento infruttuose. Sottolineiamo come per la preparazione dei sali utilizzati per la costruzione dei catodi sia stato necessario fare in laboratorio parecchia chimica inorganica. Tutto questo lavoro viene portato a termine nonostante la "completa ignoranza del meccanismo di scarica, che è probabilmente molto complesso".[42]

3. Il secondo spettrografo di massa di Aston, 1925-1932

Durante la Bakerian Lecture pubblicata nel 1927, Aston stesso ricorda che l'impossibilità di approfondire le due questioni cruciali riportate nella sezione precedente (la misura delle deviazioni dal numero intero e la separazione delle linee spettrali degli elementi pesanti), fece avvertire immediatamente i limiti del primo spettrografo di massa. [43] Questo resterà in funzione fino al marzo 1925, ma già dal 1921 iniziano i lavori per la costruzione di un nuovo e più potente strumento. L'impresa conoscitiva di Aston legata al secondo spettrografo di massa può essere analizzata da diversi punti di vista; qui ne prenderemo in considerazione tre. In primo luogo descriveremo la paziente attenzione del chimico fisico inglese al dettaglio della pratica strumentale, e successivamente vedremo come questa *cura* permise l'apertura di due campi di ricerca interamente nuovi: l'interpretazione teorica della *packing fraction* e la determinazione sperimentale del peso atomico degli elementi.

3.1 La costruzione del secondo spettrografo

Il principio di funzionamento dello spettrografo resta immutato, ma alcuni accorgimenti strutturali derivati dall'esperienza accumulata sul primo strumento permettono di aumentarne notevolmente la risoluzione e la precisione. Raddoppiando gli angoli di deviazione dovuti ai campi elettrico e magnetico, costruendo delle fenditure ancora più sottili, migliorando il livello di vuoto raggiunto e perfezionando la misura delle distanze fra le linee spettrali sulle lastre si giunge ad un grado di precisione di 1 su 10000 e si incrementa il potere risolutore di cinque volte, raggiungendo il livello di 1 su 600. Con le possibilità aperte da questi parametri Aston prova definitivamente le deviazioni dalla *whole number rule* e le misura con maggiore precisione. Diviene inoltre possibile separare le linee di massa anche dei "più pesanti elementi conosciuti".[44] Nella conferenza è riportata la scoperta di nuovi isotopi dello zolfo e dello stagno, è confermata l'esistenza di due isotopi dello xeno, e viene presentata la composizione isotopica del mercurio, risultato importante perché le molteplici linee dovute a questo elemento forniscono un punto di riferimento anche nella zona delle masse alte.

Oltre alle fondamentali variazioni, ricordate sopra, introdotte in questo secondo strumento, molte altre modifiche di varia entità contribuiscono ad un miglioramento delle prestazioni e alla semplicità di manutenzione. Ne riportiamo una parte per rendere l'idea del laborioso lavoro di ottimizzazione portato avanti dallo scienziato-costruttore nel corso di almeno cinque anni. Uno studio approfondito viene condotto per stabilire quale sia la forma migliore per il tubo di scarica. Vengono confrontati vantaggi e svantaggi della vecchia forma a bulbo rispetto al cilindro

[41] Ib., p. 398.
[42] Ib., p. 391.
[43] Rif. 14.
[44] Ib, p. 488.

rastremato utilizzato, fra gli altri, da Wilhelm Wien. Aston riconosce, per molti aspetti, la superiorità di quest'ultimo, più semplice per quel che riguarda la costruzione e la manutenzione, e nel quale è più rapido raggiungere il grado di vuoto necessario. Rispetto alla quantità totale di raggi che passano attraverso il catodo Aston smentisce invece la netta superiorità che Wien attribuisce alla propria conformazione, affermando che qualora sia posta "sufficiente cura nell'alloggiare il catodo nella posizione ottimale la sua [della forma a bulbo] inferiorità sia molto meno marcata di quanto le cifre (*figures*) di Wien suggeriscono". Inoltre la forma a cilindro crea una scarsissima popolazione di particelle con carica multipla. Questo, che potrebbe apparire come un vantaggio, è in realtà controproducente in quanto uno dei parametri che consentono ad Aston di raggiungere il grado di precisione riportato è il metodo di misura delle distanze sulle lastre, che in molti casi si basa sul confronto con particelle portanti carica doppia o addirittura tripla. Queste misure sono migliorate dall'uso di un "comparatore" basato sul principio evidenziato da J. H. Poynting nel 1905.[45] Una delle maggiori difficoltà riguarda la costruzione, l'applicazione e la misura (*to produce, to apply and to measure*)[46] del campo elettrico. Per avere deflessioni elevate quanto quelle desiderate (un sesto di radiante) è necessario un campo intenso. Le piastre, costruite curve, vengono quindi fissate rigidamente molto vicine l'una all'altra e montate su un piatto mobile che ne permette piccoli aggiustamenti. Viti di speciale costruzione ed innesti a baionetta assicurano semplicità di disassemblaggio e garantiscono che tutte le componenti siano rimontate esattamente nella posizione precedente.

Durante la laboriosa messa a punto dello strumento Aston fu tentato di sostituire il metodo fotografico, che valutava su lastre la posizione e l'intensità dei raggi positivi, con il rilevamento delle cariche totali portate dagli ioni mediante un cilindro di Faraday, secondo una disposizione sperimentale già adottata da Thomson.[47] Prevalse l'opzione più 'conservatrice' di migliorare il metodo fotografico piuttosto che alterare notevolmente l'apparato, anche per motivi di 'disponibilità' dello strumento, come chiarì lo stesso Aston:

> "Sembrò anche imprudente (*unwise*) intraprendere cambiamenti strutturali che avrebbero reso lo strumento inutilizzabile nel suo normale funzionamento fotografico, che poteva essere richiesto con urgenza in ogni momento. Quest'ultima considerazione risultò ampiamente giustificata all'inizio di quest'anno [1929] quando fui in grado di lasciare il lavoro fotometrico sul kripton per applicare lo strumento all'analisi del piombo da uranio con risultati di grande rilievo a proposito del peso atomico del protoattinio e di altri problemi legati alla radioattività".[48]

Tutto ciò costituisce solo una parte del lungo elenco di innovazioni tecniche provate e casomai adottate che Aston riporta.

3.2 Un problema per i teorici: la packing fraction

Con i risultati riportati nella parte finale dell'articolo Aston conferma definitivamente le deviazioni dalla legge del numero intero. Questa deviazione viene quantificata tramite la *packing fraction*, un'espressione della differenza della massa dell'isotopo rispetto al numero intero, divisa per la

[45] Ib., nota alla p. 496. Quando un oggetto viene esaminato attraverso uno spesso vetro con un angolo di inclinazione variabile l'immagine risulta spostata quando il vetro viene ruotato, lo spostamento è proporzionale alla tangente all'angolo di rotazione. Ricordiamo che Aston nel 1905 era un collaboratore di Poynting.

[46] Ib., p. 490. La formula citata racchiude il 'credo' scientifico di Aston, e merita di essere ripresa nell'immediato contesto linguistico: *the higher the potentials necessary to deflect the rays [...] the more difficult they would be to produce, to apply and to measure*.

[47] L.Cerruti, "A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J. J. Thomson, 1910-1923", in: P. Tucci (a cura di), *Atti del XVIII Congresso di Storia della Fisica e dell'Astronomia*, Como: Celebrazioni Voltiane, 1999, pp. 109-133.

[48] F. W. Aston, "The Photometry of Mass-Spectra and the Atomic Weights of Krypton, Xenon and Mercury", *Proc. R. Soc*, **126 A**, pp. 511-525 (1929-30); alla p. 513.

massa stessa, cioè il guadagno o la perdita di massa (rispetto all'ossigeno!) *per protone*. Questo valore è contemporaneamente una misura dell'energia necessaria alla separazione delle particelle subnucleari e quindi della stabilità dei nuclei. Un abbondante - come sempre - materiale sperimentale (grafici, tabelle) ne mostra gli andamenti in funzione della massa. La rappresentazione più famosa di questi risultati è data in una figura che abbiamo ripreso anche noi, per il suo grande rilievo storico (Figura 1),[49] e perché essa apre la breve sezione di appena tre pagine che conclude la comunicazione

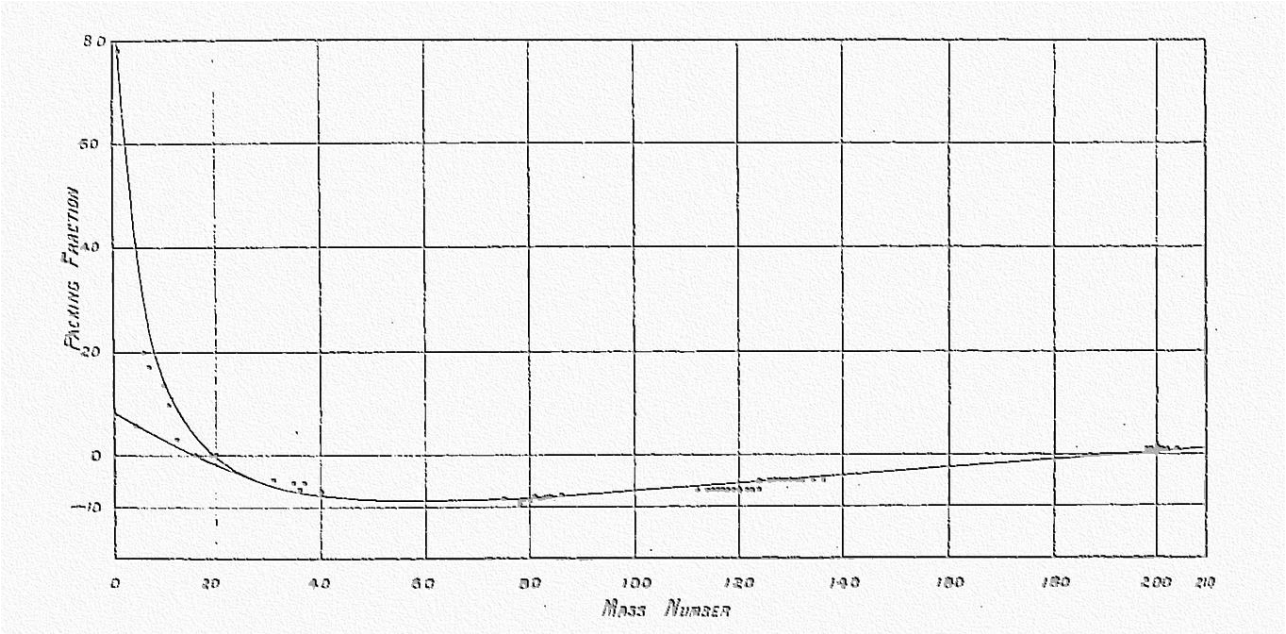

Figura 1: da Rif. 14, p. 511.

Aston considera la *packing fraction* una delle tre "costanti fondamentali di un atomo", insieme al numero atomico e al numero di massa. Per l'Autore la sua importanza è accentuata dal fatto che essa "dà una informazione del tutto nuova sul nucleo", e il suo ruolo nella fisica del nucleo diventa inequivocabile se si esamina un caso cruciale:

> "Il valore discriminante di questa informazione è subito chiaro, infatti se la *packing fraction* dell'atomo di elio non fosse stata maggiore di quella dell'atomo di ossigeno essa avrebbe escluso la possibilità che il nucleo di quest'ultimo fosse semplicemente costituito di quattro nuclei di elio, ovvero particelle α, immutati, perché non ci sarebbe stata perdita di energia, cioè difetto di massa".[50]

Aston è quindi consapevole che è questo dato sperimentale che 'regge' un modello di nucleo, anche soltanto discorsivo, in cui le particelle alfa possano mantenere una loro individualità. Il nostro chimico-fisico descrive l'andamento della curva nei termini che saranno ripresi da tutti gli Autori successivi: "Partendo dall'idrogeno con una grande *packing fraction* positiva la curva scende rapidamente, attraversa lo zero nella regione di numero di massa zero e affonda (*sinks*) a un valore minimo di circa -9 nella regione di numero di massa 80. Poi risale nuovamente e riattraversa la linea dello zero nella regione 200". Qui Aston lascia affiorare uno stupore 'da chimico': "non c'è nessuna marcata periodicità".[51] Questa distanza dalla fenomenologia chimica è ripresa anche oltre, quando discute del comportamento della *packing fraction* per gli atomi pesanti: "Non è ciò che ci saremmo

[49] Varianti di questa curva si trovano in scritti di Rutherford, cfr. il successivo Rif. 85, p. 380, e dello stesso Aston, cfr. Rif. 1, p. 167.
[50] Rif. 14, p. 510.
[51] Ib., p. 512.

aspettati se il nucleo avesse una struttura simile all'esterno dell'atomo, e possedesse una funzione periodica".[52]

Aston analizza nel dettaglio la zona delle masse molto basse dove sono evidenziati comportamenti diversi, fra elementi con numero atomico pari e elementi con numero atomico dispari. I primi hanno una frazione di impacchettamento minore, cioè una maggiore stabilità, questo concorda con i dati ottenuti da Rutherford e Chadwick che mostrano come, sotto il bombardamento di particelle alfa, i nuclei di massa dispari emettano protoni con maggiore facilità. Aston è consapevole di come questi dati e l'insieme di tutte queste osservazioni, per il momento non ancora organiche, saranno fondamentali per la determinazione della struttura dei nuclei (sezione 4). Avanza esso stesso una proposta, "puramente illustrativa", di possibile struttura per i nuclei di massa dispari degli elementi leggeri:

> "le masse dei nuclei di questi particolari atomi possono essere considerati costituiti di due parti distinte, una che cambia di una unità per ogni aumento nel numero di massa, ed un'altra, una piccola eccedenza (*excess*) che rimane costante. [....] possiamo immaginare che i nuclei di questi atomi consistano di un nocciolo centrale di massima solidità (*tightness*) di impacchettamento […] circondato da, *let us say*, tre protoni o neutroni attaccati con una fermezza (*tightness*) [minore]"[53]

Come si vede nel 1927 a Cambridge si parlava già disinvoltamente di neutroni, d'altra parte questo richiamo all'ambiente di ricerca del Cavendish Laboratory è necessario perché il richiamo di Aston e di Rutherford ai reciproci contributi è frequente. Nel febbraio del 1927 Rutherford aveva tenuto una Guthrie Lecture, in cui si era riferito più volte ai dati sperimentali e ai concetti teorici di Aston, [54] e qui, nella Bakerian Lecture del giugno successivo, il nostro chimico-fisico fa proprio il modello 'semi-cristallino' proposto dal Direttore del Cavendish nella sua conferenza, trovando nell'andamento della curva della *packing fraction* la conferma sperimentale delle congetture di Rutherford: "il nucleo consiste di una parte interna di struttura «cristallina», uniforme, strettamente (*tightly*) legata, al di fuori della quale vi è un sistema più lasco (*looser*) di neutroni, protoni ed elettroni, che è tanto più complesso quanto più è pesante l'elemento". Quanto Aston sia conscio dell'impatto sulla teoria del nucleo dei suoi dati sperimentali è reso palese dalle parole con cui si conclude la Bakerian Lecture, uno degli onori più alti che possano spettare ad uno scienziato militante:

> "I risultati qui riportati mostrano che lo spettrografo di massa ha delle possibilità come strumento di precisione. […] possiamo aspettarci un aumento nell'accuratezza così come nel numero delle misure. Si spera che queste diano dei dati utili per il teorico nell'attacco ora imminente, sul problema meno compreso e più interessante della fisica moderna, la struttura elettromagnetica del nucleo".[55]

Vedremo nella sezione 4 la primissima fase di questo *attack* dei teorici alla struttura del nucleo.

3.3 Un problema per gli sperimentali: la determinazione dei pesi atomici

Le scelte editoriali di uno scienziato sono un aspetto rilevante della sua personalità come ricercatore, in quanto indicano di volta in volta i lettori di riferimento, il (ritenuto) livello della ricerca, l'ampiezza del pubblico che si intende contattare. Abbiamo visto nel profilo biografico di Aston che divenne *fellow* della Royal Society nel 1920, quindi fin da allora egli ebbe accesso diretto ai prestigiosi *Proceedings of the Royal Society of London*, tuttavia dal punto di vista editoriale

[52] Ib., p. 513.
[53] Ib., p. 512.
[54] *Vide infra*, Rif. 69 (a).
[55] Rif. 14, p. 513.

preferì sempre l'utilizzo di *Nature* o del *Philosophical Magazine*, a seconda della più o meno impellente necessità di una rapida comunicazione o della corposità dei contributi. Nella pur vasta produzione scientifica Aston scelse i *Proceedings* solo in pochissimi casi, ad esempio quando presentò il secondo spettrografo di massa con i suoi formidabili esiti sperimentali e teorici,[56] e dieci anni più tardi quando descrisse il suo terzo e ultimo strumento.[57] Uno di questi casi di eccellenza riguarda la pubblicazione della composizione isotopica del cripto, delle xeno e del mercurio, in un articolo il cui significato storico va molto al di là dell'ennesimo miglioramento nelle misure, e anche dello stesso risultato, fortemente innovativo. La comunicazione porta un titolo tutto rivolto a sottolineare gli aspetti sperimentali del contenuto, ossia la tecnica impiegata e i dati ottenuti: *The Photometry of Mass-Spectra and the Atomic Weights of Krypton, Xenon and Mercury*. L'esordio però chiarisce subito l'ampiezza del problema che l'Autore intende affrontare:

> "L'evoluzione della materia è uno dei problemi più seducenti e importanti della fisica. Per tutti gli elementi, eccetto quelli di origine radioattiva, i dati sperimentali su cui possiamo contare per chiarire il problema sono pochi e di difficile applicazione. Una possibile linea di approccio è lo studio dell'abbondanza relativa dei differenti tipi di atomo. Qui il problema può essere affrontato in due stadi, l'abbondanza relativa degli elementi chimici in tutta la materia accessibile con l'analisi, e l'abbondanza relativa degli isotopi in ciascun elemento chimico".[58]

Fra le due diverse prospettive sperimentali quella dell'abbondanza relativa degli elementi chimici pare ad Aston di difficile percorso, in quanto seriamente ostacolata dall'inaccessibilità dell'interno della Terra, e fortemente dipendente dalle procedure di campionamento e dall'elaborazione statistica. Per il nostro Autore la seconda prospettiva è invece "virtualmente libera da ogni incertezza nel campionamento". La costanza della composizione isotopica dei campioni naturali è ovviamente un assunto fondamentale. Aston la asserisce con forza, e - visto dal nostro osservatorio - non senza imprudenza, in quanto già cita, ridimensionandolo, il caso del boro: "Dalla scoperta degli isotopi fra gli elementi inattivi sono state eseguite centinaia di analisi per verificare la natura invariabile dei pesi atomici degli elementi complessi che si trovano in natura, e, con la possibile e *numericamente insignificante* eccezione del boro, tutte hanno dato costantemente un risultato negativo".[59] Solo in laboratorio, *with immense labour*, è stato possibile alterare le miscele isotopiche naturali. Aston è quindi convinto di poter contribuire a risolvere il "problema fondamentale" dell'evoluzione degli elementi:

> "Gli esperimenti qui descritti furono intrapresi con questa speranza essenziale (*ultimate*) ed anche con lo scopo più immediato di valutare i pesi atomici degli elementi complessi esclusivamente (*purely*) dai dati ottenuti con lo spettrografo di massa".[60]

I brani che abbiamo citato come paragrafi in evidenza sono i passi iniziale e finale della "Introduzione" all'articolo, che poi prosegue con una "Discussione dei metodi". La retorica della paginetta di introduzione è interessante, perché l'Autore enfatizza dall'inizio alla fine il problema dell'evoluzione della materia, per concludere con l'annuncio imprevisto/imprevedibile di una innovazione sperimentale di enorme portata, scientifica e disciplinare. Quando Aston presentò la sua comunicazione, nel dicembre 1929, la determinazione dei pesi atomici era un dominio incontrastato dei più pazienti e raffinati chimici generali, in grado di investire anni di lavoro nella separazione, purificazione e misura delle sostanze coinvolte nelle procedure di determinazione dei pesi atomici di un singolo elemento. Dal punto di vista chimico era stata proprio la *purificazione* delle sostanze ad essere lo stadio più infido delle pratiche di laboratorio, un luogo di elezione per ricerche accanite e dispute interminabili. In quanto chimico, Aston è perfettamente consapevole di

---

[56] Rif. 14.
[57] F. W. Aston, "A Second-order Focusing Mass-spectrograph,", *Proc. R. Soc.*, **163A**, pp. 391-404 (1937).
[58] Rif. 48, p. 511.
[59] Loc. cit., corsivo nostro.
[60] Rif. 48, p. 512.

innescare una competizione accanita fra fisici e chimico-fisici da una parte e chimici inorganici dall'altra,[61] e non rinuncia al vezzo retorico del colpo di scena inaspettato, al termine di una introduzione giocata sul tema del "problema fondamentale". A noi non deve sfuggire l'ironia di quel *purely*, che si fa beffe dell'eterna ricerca di purezza dei chimici, delegando allo spettrografo di massa la separazione con i suoi campi gli eventuali elementi indesiderati.

Secondo lo stile del nostro Autore ben un terzo dell'articolo è dedicato ad un'analisi minuziosa delle tecniche fotografiche e fotometriche messe in opera nelle misure, e nella successiva analisi dei dati. Dei risultati riprendiamo solo quelli messi in evidenza da Aston stesso in relazione alla determinazione con spettrometria di massa dei pesi atomici, e per comodità di confronto li abbiamo messi in Tab. 1.

Tabella 1
La determinazione dei pesi atomici: tecniche a confronto

Elemento	Determinazione mediante densità dei gas, 1910	Determinazione di Aston 1929	Valori IUPAC 1995
Cripto	82,92	83,77 ± 0,02	83,80
Xeno	130,22	131,27 ± 0,04	131,29

L'eccellenza dei risultati di Aston è evidente, ma è anche chiaro che la sfida del nostro chimico-fisico viene lanciata di fatto, nel primo caso pubblicato, su un terreno di natura incerta. Da una parte è vero che i due gas nobili pongono ardui problemi alla spettrografia di massa, in quanto nel caso del cripto si hanno sei isotopi (78, 80, 82, 83, 84, 86), e nel caso dello xeno ben nove (124, 126, 128, 129, 130, 131, 132, 134, 136). Ma, dall'altra parte, è anche vero che la chimica interviene solo per evocazione (nel 1929) quando si parla di gas nobili, per cui il confronto che Aston fa nel suo articolo[62] è fra due tecniche fisiche, ovvero tra la misura di densità dei gas nobili e la spettrometria di massa. In ogni modo la sfida era lanciata, e, per quanto è a nostra conoscenza, Aston fu il primo a lanciarla e a vincerla - non senza ambiguità.

Ancora in riferimento all'eccellenza dei risultati di Aston dobbiamo ricordare che anteriormente alla messa a punto del secondo strumento solo un fisico francese, con un lavoro rimasto poi isolato, aveva ottenuto prestazioni superiori a quelle del primo spettrometro di massa. Nel fascicolo di settembre-ottobre 1925 degli *Annales de Physique* J.-L. Costa pubblicò i risultati di tre anni di ricerche, condotte su indicazione di Jean Perrin nel Laboratorio parigino di Chimica fisica, diretto dall'eminente scienziato francese.[63] Nell'articolo veniva espressa più volte ammirazione per l'impresa conoscitiva di Aston, e d'altra parte non si trattava di un'ammirazione per così dire 'platonica', in quanto lo spettrografo di massa costruito a Parigi si basò concettualmente e strutturalmente sul modello di Cambridge. I risultati di Costa furono poi utilizzati da Cockcroft e Walton nel loro articolo del 1932 sulle prime reazioni nucleari, di cui parleremo nella sezione 5.3, è quindi opportuno riportarli in dettaglio. Per l'esecuzione delle esperienze e nella discussione dei risultati Costa assume due diverse masse di riferimento. La massa dell'elio posta eguale a 4 è utilizzata per idrogeno, carbonio, ^{6}Li, e azoto; a sua volta la massa atomica chimica dell'azoto, posta eguale a 14,008, è impiegata per calibrare la posizione della banda corrispondente a ^{7}Li. Per l'azoto il fisico francese non riesce a valutare sulla scala He = 4 una differenza apprezzabile rispetto al

[61] Nei primi anni 1980, mezzo secolo dopo l'inizio della sfida, rimanevano ai metodi chimici uno o due elementi per i quali la loro precisione superava quella della spettrometria di massa. Si veda: L. Cerruti, *La mole. Uno studio sulla epistemologia regionale dei chimici*, monografia n. 17, Torino: Istituto di Metrologia "Gustavo Colonnetti", 1984, pp. 58-59.
[62] Rif. 48, p. 524; abbiamo tratto da qui i valori riportati nelle due prime colonne di Tab. 1.
[63] J.-L. Costa, "Spectres de masse de quelques éléments légers", *Ann. Phys.*, (10) **4**, pp. 425-456 (1925).

valore 'chimico' 14,008, quindi anche la massa di ^{7}Li si può ritenere misurata rispetto a He = 4. In Tab. 2, sono riportati tutti i valori proposti da Costa.

Tabella 2
Le misure di J.-L. Costa, 1925

massa dell'elio	4,000
massa dell'idrogeno[64]	1,0079 ± 0,0005
massa del protone	1,0074 ± 0,0005
massa del carbonio	12,000
massa del litio-6	6,009 ± 0,001
massa del litio-7	fra 7,010 e 7,013
massa dell'azoto	un po' meno di 14,008

4. I modelli del nucleo e la *packing fraction*

La descrizione della struttura del nucleo aveva posto a Rutherford un compito veramente arduo, fin dal momento in cui la lunga analisi dei dati sperimentali ottenuti da Geiger e Mardsen lo aveva indotto a proporre un modello di atomo contrario alle leggi dell'elettromagnetismo classico. Nel famoso articolo del 1911 se l'era cavata - a livello retorico - rimuovendo il problema: "Non è necessario che sia posta a questo punto la questione della stabilità dell'atomo proposto, perché questa dipenderà ovviamente dalla struttura minuta dell'atomo, e dal moto delle particelle cariche costituenti".[65] Le riflessioni di Rutherford sulla teoria del nucleo sono state seguite in dettaglio da Bruzzaniti,[66] e non vi è bisogno di riprenderle qui, vogliamo però sottolineare che fin dal 1911 il fisico inglese aveva in mente due tratti del modello che furono presenti anche nelle successive elaborazioni. Il primo tratto è la supposta esistenza di masse 'decentrate': "l'evidenza sperimentale non è sufficientemente precisa da negare la possibilità che una piccola frazione della carica positiva possa essere portata da satelliti che si estendono a qualche distanza dal centro".[67] Il secondo elemento è la presenza nel nucleo di particelle alfa 'preformate', un tratto che ritroveremo fra poco ancora nelle elaborazioni quantistiche della fine degli anni 1920: "il valore approssimato trovato per la carica centrale dell'atomo d'oro (100 *e*) è circa quella che si attenderebbe se un atomo d'oro consistesse di 49 atomi di elio, ciascuno portante una carica 2*e*".[68]

Ancora nel 1927, nella Guthrie Lecture, ritroviamo una permanenza per certi aspetti straordinaria, che lascia intendere un serio impegno ontologico: "Se assumiamo le particelle α come una specie di satellite neutro, esso deve consistere di un nucleo di elio che ha guadagnato due elettroni. Questi elettroni non possono occupare la stessa posizione come nell'atomo di elio ordinario allo stato libero [...] Essi sono probabilmente molto più strettamente legati al nucleo, circolanti in orbite che sono rese possibili solo dalla distorsione della struttura nucleare della

[64] Per un errore di calcolo, poi comunicato ad Aston, questo valore di Costa risultava in eccesso rispetto a quello ricavabile dal dato sperimentale, che nei limiti dell'errore avrebbe corrisposto al valore comunicato da Aston stesso nel suo lavoro fondamentale del 1927; cfr. Rif. Rif. 14, p. 509, in nota.
[65] E. Rutherford, "The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom", *Phil Mag.*, (6) **21**, pp. 669-688 (1911), alla p. 671.
[66] G. Bruzzaniti, Rif. 2, *passim*.
[67] Rif. 65, p. 687.
[68] Loc. cit.

particella α dagli intensi campi elettrico o magnetico del nucleo centrale".[69] Nel meccanismo per l'emissione delle particelle α che Rutherford sta proponendo questi 'satelliti neutri' hanno una funzione essenziale, e il modello di nucleo è così descritto: "Nella nostra immagine (*picture*) del nucleo noi abbiamo così un nucleo interno concentrato, che porta una carica positiva ed è circondato a breve distanza da un [certo] numero di elettroni, e poi a distanza parecchi satelliti neutri che circolano intorno al sistema". La differenza sostanziale rispetto alla situazione conoscitiva di tre lustri prima è evidente quando Rutherford, subito dopo il passo citato, promette in un ulteriore contributo una "discussione più completa di questo tipo di struttura nucleare", resa possibile "dalla abbondanza di dati radioattivi a disposizione".[70] Prima di accennare a come fu mantenuta la promessa rimane da ricordare che nella Guthrie Lecture Rutherford si riferì più volte ad Aston, sia dal punto di vista teorico (regola del numero intero e *packing fraction*),[71] sia per il significato che si sarebbe potuto attribuire ai dati empirici sull'isotopia: "Aston ha mostrato che in alcuni casi può esistere un gran numero di isotopi, indicando così (*thus indicating*) che parecchi satelliti possono essere aggiunti senza disturbare l'equilibrio del sistema nucleare".[72]

Il contributo promesso a febbraio durante la Guthrie Lecture fu pubblicato sul *Philosophical Magazine* nel settembre 1927. L'articolo iniziava denunciando i "risultati apparentemente in conflitto sulle dimensioni dei nuclei ottenute con metodi diversi". I metodi riguardavano lo *scattering* delle particelle α da parte degli atomi pesanti, che davano $R < 3{,}2 \times 10^{-12}$ cm, e l'emissione radioattiva che suggeriva "con forza che la struttura nucleare [dovesse] estendersi ad una distanza di almeno 6×10^{-12} cm".[73] Nel procedere dell'elaborazione i satelliti neutri non solo assumevano un ruolo fondamentale nello spiegare il meccanismo di emissione delle particelle alfa,[74] ma si caricavano anche di determinazioni realistiche, come le dimensioni delle orbite e le dimensioni stesse dei satelliti.[75] Infine, proprio nella sezione finale, Rutherford cercava un punto di appoggio nei dati della spettrometria di massa:

> "Nessuna informazione inequivocabile è finora disponibile sul numero di questi satelliti circondanti il nucleo o se i satelliti siano tutti dello stesso tipo. Da uno studio della massa relativa degli isotopi da parte di Aston, non sembra improbabile che possano esistere satelliti neutri di massa 2 o massa 3 e forse (*possibly*) anche di massa 1 - neutroni - [...]."[76]

Nei due saggi di Rutherford vi sono diversi accenni alla *new mechanics*,[77] ovvero alla *new or wave mechanics*, e proprio da quella direzione dovevano venire interventi decisivi per la comprensione dei fenomeni nucleari. I contributi vennero dagli Stati Uniti ad opera di Roland W. Gurney (1898-1953) e Edward U. Condon (1902-1974), e da un giovane ricercatore sovietico, G. Gamow. Nella presente comunicazione parleremo solo di Gamow, sia perché ebbe forti interazioni con l'ambiente di ricerca in cui operava Aston, sia perché fra la fine degli anni 1920 e l'inizio degli anni 1930 egli diede alla fisica del nucleo degli apporti più numerosi e diversificati di quelli dei fisici americani.

I contributi di George Gamow (1904-1968) che qui ci interessano furono portati in un periodo in cui il fisico sovietico, come altri giovani e brillanti ricercatori, si muovevano fra le capitali della *new mechanics* collaborando nei campi più diversi all'affermazione della fisica

---

[69] (a) E. Rutherford, "Atomic Nuclei and Their Transformations", *Proc. Phys. Soc.*, **39**, pp. 359-372 (1927), cit. da: (b) J. Chadwick (a cura di), *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, vol. III, *Cambridge*, London: Allen, 1965, pp. 164-180, alla p. 178. La conferenza fu tenuta il 25 febbraio 1927.

[70] Rif. 69 (b), p. 179. Questo appello alla ricchezza (*wealth*) di dati sperimentali conferma l'impegno ontologico di Rutherford.

[71] Ib., p. 165-166.

[72] Ib., p. 179.

[73] E. Rutherford, "Structure of the Radioactive Atom and the Origin of the α-Rays", *Phil Mag.*, (7) **4**, pp. 580-605 (1927); cit. da Rif. 69 (b), pp. 181-202, alla p. 181.

[74] Bruzzaniti presenta molto chiaramente il modello; Rif. 2, p. 213.

[75] Rif. 73, in Rif. 69 (b), pp. 191-194.

[76] Ib., p. 200.

[77] Rif. 69 (a), in Rif. 69 (b), p. 174.

quantistica. Nato ad Odessa, vi compì gli studi secondari e iniziò quelli universitari. Nel 1923 si trasferì a Leningrado, dove si laureò nel 1926.[78] Nell'estate di quell'anno frequentò la scuola estiva a Göttingen, dove prese contatto con la meccanica ondulatoria in una delle 'culle' della nuova fisica. I suoi primi lavori fecero sì che Niels Bohr gli offrisse una borsa dell'Accademia Reale Danese da usufruire presso il suo Istituto di Fisica Teorica (1928-1929). Nel 1929-1930 fu a Cambridge, con una borsa della Rockefeller Foundation; nel 1930-1931 lavorò ancora a Copenaghen, e nel 1931 ottenne una posizione accademica in patria, all'Università di Leningrado. La sua fertile e varia produzione scientifica dopo l'approdo negli Stati Uniti (1933) cade al di là del periodo qui studiato.

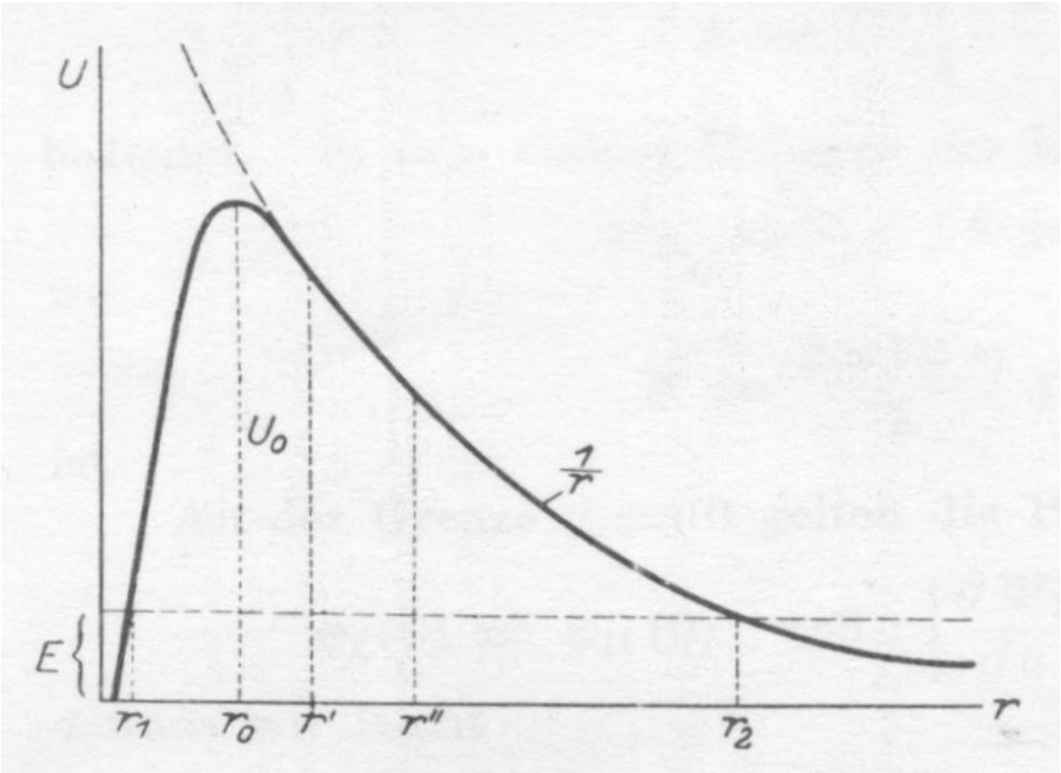

Figura 2: da Rif. 81, p. 204.

Il primo lavoro di Gamow sulla costituzione del nucleo è datato 29 luglio 1928, ed era stato scritto nell'ambiente effervescente dell'Institut für theoretische Physik di Göttingen. L'articolo, che fu pubblicato sulla *Zeitschrift für Physik*, era anche il primo che il giovane fisico pubblicava con il suo solo nome,[79] e conteneva il ringraziamento di cuore (*herzlich*) a Max Born per il permesso (*Erlaubnis*) di lavorare nel suo Istituto. Il punto di partenza di Gamow è esattamente il lavoro di Rutherford sul *Philosophical Magazine* del settembre 1927.[80] Sulla base dei dati e dell'argomentazione del fisico inglese viene proposta al lettore la Figura 2, dove **r''** è la distanza fino alla quale si è verificata l'esistenza della sola interazione coulombiana fra le particelle alfa e il nucleo; la distanza **r'**, dove inizia la deviazione dalle forze coulombiane, è sconosciuta, ma

[78] (a) G. Gamow, "Gamow, George", *Scienziati e tecnologi contemporanei*, Milano: Mondadori, 1974, *ad vocem*. Qualche ulteriore notizia, e fotografie interessanti nella breve biografia pubblicata dal figlio, Rutem Igor Gamow, (b) URL: http://spot.colorado.edu/~gamow/george/prof_life.html (ultimo accesso 11 dicembre 2000).

[79] Le note precedenti, pure pubblicate sulla *Zeitschrift für Physik*, erano state redatte rispettivamente con D. D. Ivanenko ("Zur Wellentheorie-der Materie", 1926) e con W. Prokofiev ("Anomale Dispersion an den Linien der Hauptserie des Kaliums (Verhaltnis der Dispersionskonstanten des roten und violetten Dubletts)", 1927). La bibliografia di Gamow è all'URL: http://spot.colorado.edu/~gamow/george/articles.html (ultimo accesso 11 dicembre 2000); l'uso della bibliografia non è agevole perché il curatore in molti casi non ha riportato gli anni di pubblicazione.

[80] È il nostro Rif. 73.

verosimilmente molto più piccola di **r''**; ad $\mathbf{r_0}$ la curva raggiunge un massimo. "Per $\mathbf{r} < \mathbf{r_0}$ dominano già le forze di attrazione, in questo intervallo le particelle dovrebbero circolare come satelliti del resto del nucleo".[81] Per sfuggire (*wegzufliegen*) le particelle alfa dovrebbero superare una barriera di potenziale di altezza $\mathbf{U_0}$, ma il dato sperimentale dell'energia delle particelle è molto più piccolo. Qui Gamow inserisce i dati già utilizzati da Rutherford: dalla deviazione delle particelle alfa si ha **r''** = 3,2 x 10^{-12} cm, mentre le stesse particelle sono emesse dall'uranio con un'energia che sulla curva di Figura 2 corrisponde ad $\mathbf{r_2}$ = 6,3 x 10^{-12} cm. Così, "per volar via (*wegfliegen*), una particella α proveniente dall'interno del nucleo dovrebbe attraversare la regione fra $\mathbf{r_1}$ e $\mathbf{r_2}$, dove la sua energia cinetica sarebbe negativa, il che naturalmente sarebbe impossibile nella rappresentazione classica". A questo punto l'Autore si riferisce al modello proposto da Rutherford per "superare questa difficoltà", e giudica "molto innaturali" le assunzioni del fisico inglese. Invece, se "[t]rattiamo il problema dal punto di vista della meccanica ondulatoria la summenzionata difficoltà cade da sé".[82]

Gamow richiama due lavori di L. W. Nordheim (1927) e J. R. Oppenheimer (1928) sulla probabilità non nulla di transizione di una particella attraverso una barriera di potenziale finita, e avvia la propria trattazione del problema, in cui la barriera di potenziale di Figura 2 viene 'rettificata' in una barriera rettangolare (**Figura 3**). La soluzione dell'equazione di Schrödinger gli permette di descrivere il passaggio delle particelle alfa attraverso la barriera,[83] e, con opportune approssimazioni e semplificazioni, di "trasferire qualche risultato, valido per il modello semplice, al nucleo reale, senza una precisa conoscenza dell'andamento del potenziale".[84] La validità della trattazione quantistica viene confermata dal ventiquattrenne Gamow con la deduzione teorica della relazione empirica fra la probabilità di un decadimento alfa e l'energia della particella emessa, relazione trovata da Hans Geiger e J. M. Nuttall nel 1912.

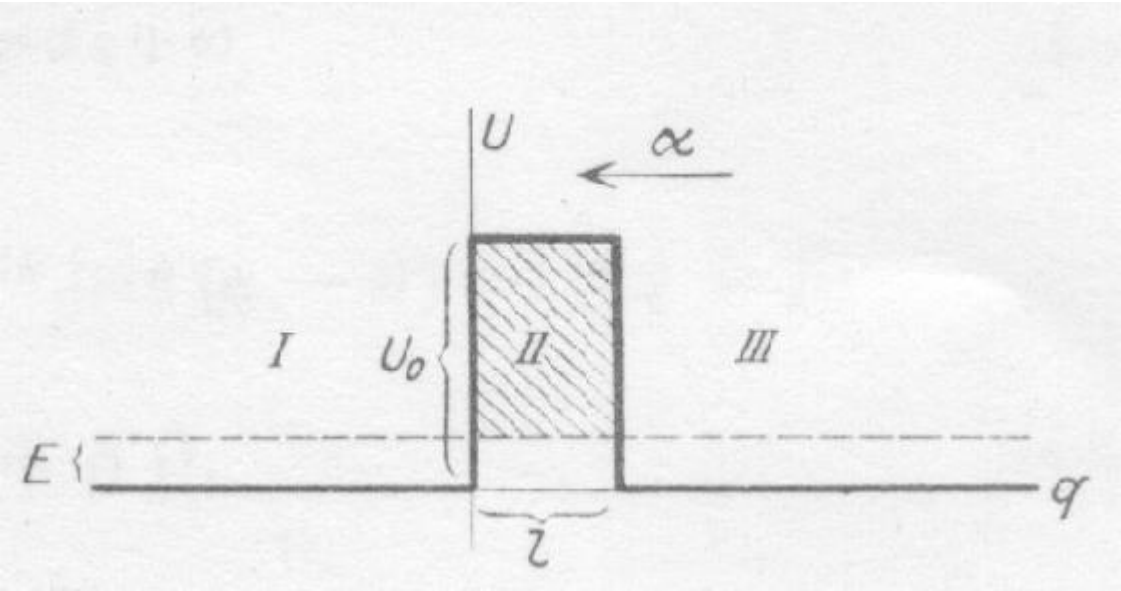

Figura 3: da Rif. 81, p. 205.

Nell'articolo che abbiamo appena discusso era sufficiente l'assunzione di una forma per la barriera di potenziale, e di un raggio approssimato del nucleo, per arrivare alla deduzione della relazione di Geiger e Nuttall, non vi era quindi nessun riferimento alla massa dei nuclei. Sei mesi dopo l'invio di questo lavoro, scritto come abbiamo visto a Göttingen, Gamow partecipa il 7 febbraio 1929 ad una discussione sulla struttura dei nuclei atomici tenuta alla Royal Society, ed

[81] G. Gamow, "Zur Quantentheorie des Atomkernes", *Z. Physik*, **51**, pp. 204-212 (1928), alla p. 204.
[82] Ib., p. 205.
[83] La figura proposta da Gamow è nota, ed è ripresa, ad esempio, in Rif. 2, p. 216.
[84] Rif. 81, p. 209.

introdotta da Sir Ernst Rutherford. La relazione di apertura di Rutherford occupa ben due terzi delle 17 pagine pubblicate sui *Proceedings*, ed inizia con un richiamo ai progressi avvenuti nelle conoscenze sul nucleo a partire dal marzo 1914, quando alla Royal Society si era tenuta l'ultima discussione sulla costituzione dell'atomo. Per noi è interessante notare che fra questi progressi Rutherford mette al primo posto il tema della nostra comunicazione: "Il primo, [dei nuovi metodi di attacco al problema], e per certi aspetti il più importante, è stato la prova della costituzione isotopica degli elementi ordinari, e la determinazione accurata delle masse o pesi degli isotopi individuali, principalmente per il lavoro del dr. Aston".[85] Nel corso del discorso di apertura, subito prima di iniziare a discutere il *packing effect*, Rutherford richiama il modello di Gamow ed esprime in modo pittoresco il suo giudizio sulla nuova fisica quantistica:

> "nella meccanica ondulatoria le particelle possono compiere gesta (*accomplish feats*) che sarebbero totalmente impossibili nella meccanica classica. Invece di richiedere alla particella di saltare la barriera per sfuggire (*escape*), la particella, o piuttosto il sistema d'onda con cui è identificata, trapela (*leaks out*) attraverso la barriera e infine emerge con un'energia cinetica eguale all'energia totale posseduta all'interno della barriera"[86]

Rutherford sottolinea che la teoria quantistica assegna un valore molto piccolo al raggio del nucleo di uranio, "circa 7×10^{-13} cm, e [che] in questo piccolo volume nucleare devono trovar spazio 238 protoni e 136 elettroni. Sembra incredibile ma potrebbe non essere impossibile".

Per quanto riguarda "la portata di alcuni risultati del dr. Aston sulla struttura dei nuclei", viene ricordato "il risultato essenziale a cui era pervenuto - che l'unità di massa nella struttura del nucleo è il protone di massa quasi eguale a 1, mentre il protone (nucleo di H) alla stato libero ha una massa 1,0073 in termini di O = 16". E Rutherford aggiunge: "Questa differenza di massa fra il protone libero e quello nucleare è imputata a questo *packing effect*, cioè all'interazione dei campi elettromagnetici dei protoni e degli elettroni nel nucleo fortemente condensato".[87] Come base della discussione del suo modello di nucleo Sir Ernst assume l'ormai famoso diagramma di Aston della *packing fraction* in funzione del numero di massa. Ancora una volta Rutherford afferma che i costituenti fondamentali dei nuclei sono le particelle alfa, e giunge a proporre uno schema della "formazione graduale dei nuclei atomici". Negli elementi più leggeri il nucleo è composto da una combinazione di particelle alfa, protoni e elettroni, con le singole parti fortemente coese, "in parte per le forze distorsionali e in parte per le forze magnetiche": "Possiamo solo speculare sulla natura di queste forze". Dapprima la formazione di questi nuclei è accompagnata da emissione di energia, e per pesi atomici intorno a 120 si raggiunge il legame più stretto (*closest binding*). Dopo questo stadio le particelle aggiuntive sono sempre meno strettamente legate: "Possiamo così supporre che il nucleo consista di una struttura strettamente impacchettata vicino al suo centro, e che diventa gradualmente meno densa verso l'esterno. Questo sistema è circondato da una barriera di potenziale che impedisce di sfuggire alle particelle α". Al modello appena esposto Rutherford aggiunge un auto-commento: "questa visione statica dell'atomo può non essere approvata dai miei amici teorici che possono desiderare che le particelle α abbiano completa libertà di moto all'interno del nucleo".[88]

Uno dei *theoretical friends* presenti alla discussione della Royal Society era appunto Gamow, che apre il suo intervento riferendosi alle "ultime parole del Presidente sulla costituzione generale del nucleo come una collezione di particelle α". Intesa in modo così generico la proposta di Rutherford è accettata dal fisico sovietico, che introduce il suo modello del nucleo 'a goccia':

---

[85] E. Rutherford, in: (a) "Discussion on the Structure of Atomic Nuclei", *Proc. R. Soc.*, **123 A**, pp. 373-390 (1929), alla p. 373.
[86] Ib., p. 379.
[87] Loc. cit.
[88] Rif. 85 (a), p. 381.

> "Un simile insieme di particelle α con forze attrattive fra di loro, che variano rapidamente con la distanza, può essere trattato in qualche modo come una piccola goccia d'acqua in cui le particelle sono tenute insieme dalla tensione superficiale".[89]

Anche rimanendo in una prima rozza (*rough*) approssimazione da un simile modello si possono ottenere risultati interessanti:

> "possiamo ottenere una relazione fra l' «energia della goccia» e il numero di particelle α contenute nella goccia - cioè il peso atomico del nucleo. La forma generale della curva che rappresenta questa relazione concorda bene con la curva di Aston per il difetto di massa, dando prima un'energia negativa, e in seguito cambiando per valori più grandi di N".[90]

Nel febbraio 1929 Gamow non è ancora in grado di andare molto oltre la promessa di successivi calcoli, e ad una cauta osservazione sulla validità generale del modello: "Ulteriori difficoltà nascono in connessione con gli elementi più pesanti dell'argo, dove entrano in gioco gli elettroni nucleari liberi, data la nostra attuale ignoranza sul comportamento degli elettroni nucleari".[91]

Il 28 gennaio 1930, ad un anno quasi esatto dall'incontro alla Royal Society, è lo stesso Rutherford a comunicare alla prestigiosa accademia inglese un ampio lavoro di Gamow, in cui l'Autore a partire dalle "ben note idee di cui si fa uso nella teoria della capillarità" sviluppa il suo modello:

> "Una simile collezione di particelle α sarà molto simile ad una minuscola goccia d'acqua dove la pressione interna, dovuta all'energia cinetica del moto quantizzato, è in equilibrio con le forze della tensione superficiale che cercano di diminuire il raggio della goccia".[92]

Al termine di un'argomentazione sviluppata per ottenere "l'ordine di grandezza, [e] stimare il comportamento generale di un tale modello",[93] l'Autore sottolinea che "[i]l trattamento meccanico-ondulatorio accurato di questo modello è condotto per mezzo della soluzione dell'equazione auto-consistente di Hartree", e che "[l]a soluzione di questa equazione, con l'assunzione di molte semplificazioni sulla legge delle forze, è stata ottenuta da D. R. Hartree". Tuttavia la soluzione esatta non si è potuta ottenere per la scarsa conoscenza sulla legge delle forze, e non si è potuto andare oltre l'ottenimento di livelli discreti di energia e di un raggio nucleare dei giusti ordini di grandezza. Così Gamow è ricondotto ai suoi calcoli puramente modellistici, e propone la Figura 4, che così commenta:

> "I punti rappresentano i dati sperimentali calcolati dai difetti di massa misurati da Aston,* e cioè l'intera massa del nucleo meno la somma delle masse delle particelle α e degli elettroni contenuti in esso. Vediamo che la «curva» teorica concorda più o meno bene con i punti sperimentali nella regione degli elementi leggeri, ma con l'incremento della massa dei nuclei arriva troppo presto all'asse dello zero. Questa deviazione non può di certo essere dovuta alla rozzezza dei nostri calcoli, ma può essere spiegata semplicemente se ricordiamo che per gli elementi più pesanti entrano in gioco gli elettroni nucleari liberi".[94]

"Per sormontare questa difficoltà", afferma Gamow, "dobbiamo rivolgere la nostra attenzione agli elettroni nucleari". Non sarebbe del tutto pertinente al tema della nostra comunicazione il seguire

---

[89] G. Gamow, Rif. 85 (a), p. 386.
[90] Loc. cit.
[91] Rif. 89, p. 387.
[92] G. Gamow, "Mass Defect Curve and Nuclear Constitution", *Proc. R. Soc.*, **126 A**, pp. 632-644 (1929-30), alla p. 633. Gamow firma l'articolo come Rockefeller Foundation Fellow, e dà come sede Cambridge. Nei rigraziamenti conclusivi troviamo una costellazione di scienziati di prima grandezza: l'amico Dr. L. Landau per la discussione di molti punti del lavoro, Sir E. Rutherford e il Dr. R. H. Fowler per il loro "gentile interessamento", e il Dr. J. D. Cockcroft per la correzione del manoscritto.
[93] Ib., p. 634.
[94] Ib., pp. 636-637. L'asterisco che abbiamo ripreso anche nella nostra citazione si riferisce al "ben noto articolo di Aston", il Rif. 14.

nei dettagli la trattazione del giovane fisico, ma alcuni punti possono essere significativi per cogliere meglio la situazione conoscitiva della meccanica quantistica 'militante', alla soglia degli anni 1930. Questa migliore conoscenza ci sarà utile in particolare nella sezione 5.2, dedicata ai risultati sperimentali sull'esistenza del neutrone ottenuti al Cavendish Laboratory nel 1932, ma certamente non è priva di interesse *per se*, in quanto mette in luce un notevole imbarazzo nell'applicazione del principio di indeterminazione ai problemi nucleari.[95]

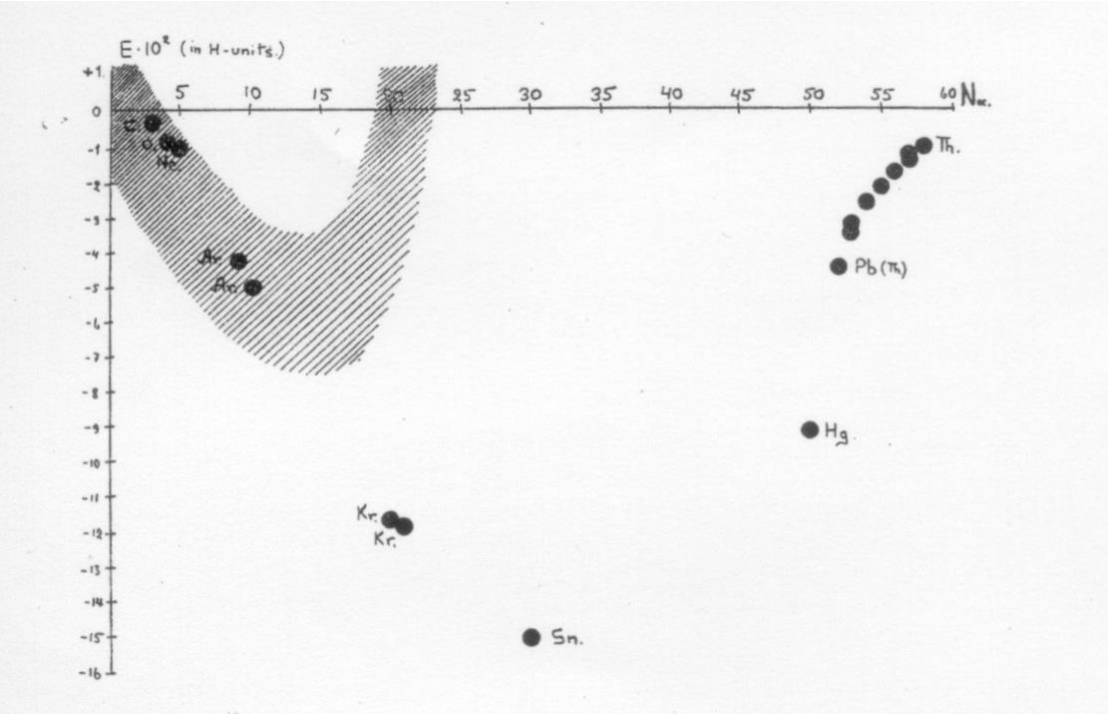

Figura 4: da Rif. 92, p. 637.

In realtà, nell'articolo di Gamow che stiamo ancora commentando non c'è ancora nessuna esitazione. Nella trattazione del contributo energetico degli elettroni nucleari si legge: "Per gli elettroni che si muovono nella goccia-α (*α-drop*) solo i primi pochi livelli hanno energia negativa e sono stabili. Secondo il principio di Pauli, due e solo due elettroni possono stare su un tale livello".[96] Il diagramma che mette in relazione il numero di elettroni nucleari liberi con il numero di particelle alfa mostra una *striking regularity*. Non c'è dubbio che Gamow ha un esplicito impegno ontologico nei confronti degli elettroni nucleari, anche per la funzione essenziale che la loro assunzione ha nel 'prolungare' verso masse sempre più alte il successo del suo modello a goccia:

> "Vediamo che, a causa dell'effetto elettronico, la parte stabile (discendente) della curva dell'energia può essere continuata molto oltre che per il nucleo a goccia-α nudo.
>
> La parte più importante della curva dell'energia è il ramo ascendente per $N_\alpha > 30$. Sembra che i nuclei in questa regione debbano essere inevitabilmente instabili. La conoscenza sperimentale in questa regione è, tuttavia, piuttosto scarsa, non essendo ancora stati misurati molti difetti di massa e persino dei numeri isotopici".[97]

È comunque con un appello alla spettrometria di massa che si conclude il contributo di Gamow: "Per sviluppare ulteriormente il punto di vista proposto in questo articolo, sono richieste una più

[95] L'articolo in cui W. Heisenberg enunciava e discuteva il principio di indeterminazione fu pubblicato sulla *Zeitschrift fur Physik* nel 1927; cfr. E. Bellone, "La meccanica dei quanti non relativistica", in: P. Rossi (a cura di), *Storia della scienza moderna e contemporanea*, vol. III, t. I, Torino: UTET, 1988, pp. 577-608.
[96] Rif. 92, p. 638.
[97] Ib., p. 639.

completa conoscenza della distribuzione dei numeri isotopici e una più accurata misura della massa dei nuclei".[98]

L'ambiente di ricerca di Cambridge coinvolse fortemente il giovane fisico sovietico, che con un gesto insolito dedicò all'intero Cavendish Laboratory, e non a singoli scienziati o ad un particolare maestro, il suo primo libro, sulla costituzione del nucleo atomico e la radioattività. Possiamo ancora notare che l'Autore data la sua brevissima introduzione da Copenaghen, il 3 luglio 1931.[99] È quindi trascorso un anno e mezzo dalla comunicazione alla Royal Society. Ancora una volta le "cosiddette particelle alfa" hanno un ruolo privilegiato: "esse sono unità complesse, che a loro volta consistono di quattro protoni e di due elettroni [...] Risale all'energia di legame straordinariamente forte delle particelle α se esse, malgrado la forte interazione, anche all'interno del nucleo non si decompongono in protoni e elettroni, ma possono essere trattate come particelle individuali".[100] Ma è rispetto alla presenza nel nucleo di elettroni 'liberi' che la situazione conoscitiva di Gamow è profondamente cambiata. Bruzzaniti ha già messo in luce le difficoltà semantiche del termine 'elettrone nucleare' nel contesto dell'opera di Gamow,[101] a partire da quella che nella versione tedesca è propriamente chiamata *Unsicherheitrelation*, la "relazione di incertezza". L'applicazione del principio di indeterminazione a particelle con la massa degli elettroni, confinate nello spazio ristretto di un nucleo, portava ad assegnar loro una velocità vicina a quella della luce, e quindi - al livello della teoria - alla necessità di applicare la quantistica relativistica. Tuttavia, affermava l'Autore, la possibilità di una trattazione teorica non doveva essere scartata:

> "Fortunatamente non è questo il caso. In seguito a cause per ora interamente sconosciute (*völlig unbekannter*), gli elettroni, il cui ruolo all'interno del nucleo è ancora completamente sconosciuto e oscuro (*völlig ungeklärt und dunkel*), non influenzano in modo apprezzabile il movimento nel nucleo delle particelle più pesanti (i protoni e le particelle α). Potremmo quindi effettivamente trattare quei processi nucleari, in cui le particelle α o i protoni giocano un ruolo essenziale, laddove potremmo trascurare del tutto la presenza degli elettroni nucleari".[102]

Gamow si muove con abilità sulla scacchiera epistemica. Viene evocata una duplice e completa (*völlig*!) ignoranza, che però non mette in dubbio la realtà degli elettroni nucleari, ma semplicemente li mette fuori gioco. La posizione di Gamow è di attesa, "per ora [...] ancora", e di separazione.

È ovvio che, dato il tema del volume, i dati della spettrometria di massa hanno una parte di rilievo nelle argomentazioni dell'Autore, a partire dalla classificazione dei nuclei e dall'analisi delle energie di legame nucleari, temi che seguono immediatamente la citazione che abbiamo analizzato poco sopra.[103] È pure evidente che la dimostrazione sperimentale dell'esistenza del neutrone introdusse una 'novità' formidabile nell'elaborazione sul nucleo, producendo un pluralismo di teorie di grande interesse epistemologico. Heisemberg fu estremamente tempestivo.[104] La comunicazione di Chadwick, successiva all'annuncio del 27 febbraio 1932,[105] apparve sui *Proceedings* in aprile,[106]

---

[98] Ib., p. 644. Sono le ultime parole del testo prima dei ringraziamenti.

[99] (a) G. Gamow, *Der Bau des Atomkerns und die Radioaktivität*, Leipzig: Hirzel, 1932. L'edizione inglese di questo testo fu pubblicata l'anno precedente: (b) G. Gamow, *Constitution of Atomic Nuclei and Radioactivity*, Oxford: Clarendon, 1931. Citiamo dall'edizione tedesca perché è quella presente nella Biblioteca di Fisica di Torino; la copia porta il timbro dell'Istituto di Fisica Teorica della R. Università di Torino, e il numero di inventario 24. La cattedra di fisica teorica era stata istituita nel 1930 e affidata al trentenne Enrico Persico (1900-1969); cfr. V. de Alfaro, "Gli studi di fisica", in: F. Traniello (a cura di), *L'Università di Torino*, Torino: Pluriverso, 1993, pp. 226-235.

[100] Rif. 99 (a), p. 1.

[101] Bruzzaniti, Rif. 2, p. 244-247; si consideri in particolare la Tabella 4, p. 246.

[102] Rif. 99 (a), p. 7.

[103] Ib., pp. 7-24.

[104] J. Bromberg, "The Impact of Neutron: Bohr and Heisenberg", *Hist. Stud. Phys. Scie.*, **3**, pp. 307-341 (1971).

[105] *Vide infra*, Rif. 129.

[106] *Vide infra*, Rif. 132 (a).

il 7 luglio arrivò alla redazione della *Zeitschrift für Physik* il primo articolo della 'trilogia' che Heisemberg scrisse *Über den Bau der Atomkerne*. Gli altri fisici teorici furono forse meno rapidi, ma non meno fertili. Come ha notato Thomas Bonk, al Convegno Solvay del 1934 la teoria di Heisemberg si dovette confrontare con altre *tre* teorie, dovute a Gamow, Perrin e Iwanenko.[107] Le teorie di Gamow e di Perrin includevano ancora l'elettrone nella composizione del nucleo, a dimostrazione di un ampio pluralismo epistemologico che ammetteva gerarchie diverse fra i principi fondamentali della (ancora) nuova fisica quantistica.

5. Il contributo della spettrometria di massa all'*annus mirabilis*, 1932

Il 1932 segnò uno spartiacque nella conoscenza della fisica del nucleo. Come Emilio Segrè,[108] anche noi abbiamo chiamato *annus mirabilis* il 1932, seguendo tre tracce in vario modo pertinenti al nostro racconto: la scoperta del deuterio, la conferma sperimentale dell'esistenza del neutrone, la prima reazione nucleare.

5.1 Teorie & tecniche, ovvero la scoperta del deuterio

Certamente non c'è bisogno di insistere in questa sede storiografica sulla rilevanza estrema, in fisica come in chimica, di qualunque conoscenza positiva - anche di origine tecnologica - sull'idrogeno, inteso come atomo, molecola, sostanza. Questo acuto interesse conoscitivo della comunità scientifica è testimoniato in modo esemplare dalla motivazione del premio Nobel assegnato a Heisemberg nel 1932: "per la creazione della meccanica quantistica, la cui applicazione ha portato, fra l'altro, alla scoperta delle forme allotropiche dell'idrogeno".[109]

L'isotopo pesante dell'idrogeno era 'atteso' da tempo, almeno dalla famosa Bakerian Lecture tenuta da Rutherford nel 1920. Ne riportiamo un passo abbastanza ampio perché contiene due congetture di grande rilievo, sull'esistenza dell'isotopo dell'idrogeno e sull'esistenza del neutrone:[110]

> "sembra molto probabile che un elettrone possa anche legare due nuclei H e forse anche un nucleo H. In un caso, ciò implica la possibile esistenza di un atomo di massa circa 2 portatore di una carica, che può essere considerato come un isotopo dell'idrogeno. Nell'altro caso, è coinvolta l'idea della possibile esistenza di un atomo di massa 1 che ha carica nucleare zero".[111]

Per quanto riguarda la seconda congettura - quella che interessava maggiormente Rutherford - si poteva leggere nel testo una vera e propria descrizione del nuovo 'atomo' (si veda la prossima sezione), mentre per l'isotopo pesante dell'idrogeno il cenno del grande fisico si esaurì nel breve testo citato.

La traccia che portò alla scoperta dell'isotopo pesante dell'idrogeno fu indicata da ricerche di William F. Giauque (1895-1982), svolte nell'ambito di uno studio sulla determinazione sperimentale dell'entropia, e, nel caso che ci interessa, indirizzate ad indagare la (possibile) composizione isotopica dell'ossigeno. Giauque aveva nutrito fin dalla prima giovinezza un doppio

---

[107] T. Bonk, "Quantenmechanik und Atomkern", in: D. Hoffmann, F. Bevilacqua, R. H. Stuewer (a cura di), *The Emergence of Modern Physics*, Pavia: Università degli Studi, 1996, pp. 201-215, alla p. 208.

[108] E. Segrè, *Personaggi e scoperte nella fisica contemporanea*, Milano: Mondadori, 1983, p. 171. Il titolo completo del capitolo dedicato agli eventi del 1932 è: "L'anno mirabile 1932: neutrone, positrone, deuterio e altro".

[109] Come è noto Heisemberg previde nel 1927 l'esistenza delle forme orto e para della molecola di idrogeno. Ho tratto questo riferimento al significato particolare attribuito al Nobel del teorico tedesco da un cospicuo rapporto pubblicato dalla NASA: John L. Sloop, *Liquid Hydrogen as a Propulsion Fuel,1945-1959*, NASA SP-4404, 1978, p. 267. Il libro è consultabile in Rete presso il sito del History Office della NASA (http://history.nasa.gov), e all'indirizzo http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/SP-4404/contents.htm (ultimo accesso 11 dicembre 2000).

[110] Il termine non fu utilizzato da Rutherford in questa occasione. Bruzzaniti ha messo in evidenza l'uso di questo termine nei lavori di W. Harkins del 1921, cfr Rif. 2, p. 188.

[111] E. Rutherford, "Nuclear Constitution of Atoms. Bakerian Lecture", *Proc. R. Soc.*, **97 A**, pp. 374-400 (1920), cit. da Rif. 69 (b), p. 34.

amore, per l'ingegneria e per la chimica; a livello accademico conseguì a Berkeley il B.S. in chimica nel 1920 e il Ph.D. sempre in chimica nel 1922, nel College of Chemistry diretto dal grande chimico fisico G. N. Lewis, ma si registrò pure come ingegnere professionista presso lo Stato della California. Già all'inizio della carriera il giovane chimico fisico seppe dar sfogo alla sua duplice passione progettando gli impianti per la liquefazione dell'idrogeno e dell'elio, e sovrintendendo alla loro costruzione. Nel periodo in cui stava gettando le basi delle sue decennali ricerche sulla termodinamica delle basse temperature Giauque interagì fortemente con Raymond T. Birge, del Dipartimento di fisica, da cui apprese l'applicabilità della meccanica statistica quantistica al calcolo di grandezze termodinamiche, in particolare alla determinazione dell'entropia assoluta di qualsiasi gas biatomico a partire dai dati spettroscopici.[112]

Nel nostro racconto cogliamo Giauque a metà strada fra il concepimento nel 1924 dell'idea che lo condusse a vincere il Nobel per la chimica nel 1949, e la realizzazione nel 1933 del primo esperimento di smagnetizzazione adiabatica.[113] Quanto sia stato intenso, e accademicamente improduttivo, questo periodo di 'preparazione' è indicato dal fatto che ben quattro anni passarono fra la messa a stampa dei risultati della tesi di Ph.D. nel 1923 e la pubblicazione nel 1927 della teoria nata dalla riflessioni sulla suscettibilità magnetica a basse temperature del $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$.[114] Ma il ritorno di Giauque sull'arena pubblica doveva essere ben presto salutato da un risultato clamoroso. Nel 1929, insieme al suo allievo Herrick L. Johnston e mediante l'applicazione ai dati spettroscopici di un metodo elaborato da James Franck e da Birge, il chimico fisico di Berkeley, Giauque constatò la presenza nell'ossigeno atmosferico oltre all'isotopo 16, ritenuto fino ad allora l'unico esistente, di piccole quantità di isotopi di massa atomica 17 e 18.[115] I tre tipi di atomi di ossigeno sarebbero stati presenti nell'atmosfera nelle proporzioni di 3150:1:5 rispettivamente, dando una massa media per l'ossigeno di 16,0035.

L'interesse di William F. Giauque per il terzo principio della termodinamica e per il calcolo assoluto dell'entropia, e la sua abilità sperimentale avevano prodotto un risultato di grande rilievo, ma non del tutto inaspettato, in particolare da Aston, che nella fondamentale Bakerian Lecture del 1927 aveva messo in rilievo le difficoltà sperimentali che rendevano tutt'altro che certa l'unicità isotopica dell'ossigeno:

> "Per la presente ricerca l'atomo neutro di ossigeno O^{16} è stato adottato come standard. L'identità di questa scala con quella dei pesi atomici chimici dipende dal fatto se l'ossigeno sia o meno un elemento semplice. La presenza di una percentuale molto piccola di un isotopo è difficile da provare, e per l'ossigeno questo è particolarmente vero, perché è probabile che siano sempre presenti le unità vicine 14, 15, 17, 18. La possibilità di un isotopo O^{17} è stata effettivamente suggerita dagli esperimenti di Blackett [nel 1925] sulla disintegrazione dei nuclei di azoto per impatto di raggi alfa, ma finora l'evidenza è nel complesso in favore della semplicità dell'ossigeno".[116]

Le difficoltà sperimentali di Aston diventano evidenti se si ricorda che la composizione isotopica dell'ossigeno dell'atmosfera è 99,76 % di ^{16}O; 0,04% di ^{17}O; 0,2 % di ^{18}O. I risultati di Giauque erano quindi tanto più benvenuti quanto più mettevano in evidenza la fertilità di approcci diversi al problema della determinazione delle masse atomiche. D'altra parte, segnalava Aston, la scala delle masse determinate a livello isotopico rimaneva identica con quella adottata a livello dei pesi atomici

---

[112] K. S. Pitzer, D. A. Shirley, "William Francis Giauque", *Biographical Memoirs*, **69**, pp. 38-57 (1996).

[113] W. F. Giauque, D. P. MacDougall, "Attainment of temperatures below 1° absolute by demagnetization of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$", *Phys. Rev.* **43**, p. 768 (1933).

[114] W. F. Giauque, "A thermodynamic treatment of certain magnetic effects. A proposed method of producing temperatures considerably below 1° absolute", *J. Am. Chem. Soc*,. **49**, pp. 1864-1870 (1927); Id., "Paramagnetism and the third law of thermodynamics. Interpretation of the low-temperature magnetic susceptibility of gadolinium sulfate", *J. Am. Chem. Soc.*, **49**, pp. 1870-1877 (1927).

[115] W. F. Giauque , H. L. Johnston, "An isotope of oxygen, mass 18. Interpretation of the atmospheric absorption bands", *J. Am. Chem. Soc.*, **51**, pp. 1436-41 (1929); Id., "An isotope of oxygen, mass 17, in the earth's atmosphere", *J. Am. Chem. Soc.*, **51**, pp. :3528-34 (1929).

[116] Rif. 14, p. 500.

solo se il peso atomico relativo dell'ossigeno rimaneva fissato a 16. Come si è detto le proporzioni dei tre isotopi, determinate da Giauque e Johnston, portavano ad una massa media pari a 16,0035. Questo rendeva inevitabile (per un lungo periodo) l'adozione di due scale basate su masse diverse, una fisica, con $^{16}O = 16$, ed una chimica, con O (atmosferico) = 16. Aston fece un uso immediato di questa doppia scala; nel dicembre del 1929, nel lavoro in cui proponeva - non a caso! - la determinazione delle masse atomiche mediante la determinazione precisa delle miscele isotopiche degli elementi (v. sopra sezione 3.3) assegnava il peso atomico del kripton in questi termini: "il peso atomico sulla scala di massa fisica $O^{16} = 16$ è 83.783".[117] Ma i risultati di Giauque e Johnston posero anche un problema diverso, e per molti aspetti più importante di quello di due convenzioni diverse a seconda dell'ambito di ricerca, era stata infatti 'indicata' la strada verso la scoperta del deuterio.

Che la strada fosse solo indicata e non ancora aperta è testimoniato dal tempo trascorso fra la scoperta degli isotopi dell'ossigeno e la pubblicazione del contributo di Raymond T. Birge (il citato collega di Giauque) e D. M. Menzel, articolo che viene assunto a livello storiografico come il 'colpo di pistola' per la corsa alla scoperta dell'isotopo pesante dell'idrogeno.[118] Al momento della pubblicazione dei dati di Giauque e Johnston la determinazione chimica del peso atomico dell'idrogeno dava il valore 1,00777 (ossigeno posto eguale a 16), mentre la misura mediante spettrometria di massa portava Aston ad assegnare il valore 1,00778, con un evidente ottimo accordo. [119] La comparsa di due diverse scale faceva sì che i due valori per l'idrogeno non fossero più in accordo fra di loro, e nella loro nota, pubblicata sulla *Physical Review* nel 1931, T.T. Birge e D.M. Menzel deducevano da questa discrepanza che fra gli atomi di idrogeno con massa 1 ve ne fossero altri con massa 2, nella proporzione di 1 atomo 'pesante' per 4500 atomi 'leggeri'.[120]

La determinazione sperimentale dell'esistenza del deuterio venne realizzata attraverso la collaborazione della Columbia University di New York con il National Bureau of Standards, avviata per iniziativa di Harold Clayton Urey (1893-1981). Urey aveva calcolato che la differenza di tensione di vapore fra le molecole contenenti i due isotopi sarebbe stata sufficiente per arricchire dell'isotopo pesante l'idrogeno fatto distillare al punto triplo. La preparazione del campione non era evidentemente di semplice soluzione, così Urey si rivolse a F. G. Brickwedde, un ricercatore del Bureau of Standards. Brickwedde evaporò 4000 cm^3 di idrogeno liquido ad una temperatura vicino al punto triplo, fino a ridurre il volume del liquido ad un solo centimetro cubo. Nell'autunno del 1931 Urey e G. M. Murphey, un suo assistente, esaminarono lo spettro del campione, stabilendo la presenza dell'isotopo al di là di ogni dubbio.

I tre scienziati fecero in tempo a presentare i loro risultati alla riunione annuale della American Physical Society, che si tenne a New Orleans il 29 e 30 dicembre 1931.[121] Urey, Brickwedde e Murphey parlarono di fronte a 200 colleghi, raccontando la storia della preparazione del campione e illustrando i dati spettroscopici. Le linee $H\beta$, $H\gamma$ e $H\delta$ erano accompagnate da righe più deboli che corrispondevano nei limiti dell'errore sperimentale (0,02 Å) con quelle calcolate per un isotopo di massa due. Nei campioni normali di idrogeno il rapporto fra le intensità era di circa 1/4000, mentre nel campione che aveva subito il processo di concentrazione il rapporto saliva a 1/800.[122] Il riassunto della comunicazione che abbiamo citato apparve sulla *Physical Review* nel marzo 1932, due mesi dopo la pubblicazione dell'articolo principale, che meritò ad Urey il Nobel per la chimica del 1934.[123] La risonanza nella comunità scientifica della scoperta dell'isotopo pesante dell'idrogeno fu ovviamente notevole, con un'eco precisa e dai tratti inaspettati anche

---

[117] Rif. 48, p. 521.
[118] Rif. 109, p. 268.
[119] Loc. cit.
[120] Rif. 2, p. 253.
[121] È evidente l'intenzione dei fisici americani di festeggiare il capodanno nell'accogliente porto della Luisiana.
[122] H.C.Urey, F.G.Brickwedde, G.M.Murphey, "An isotope of hydrogen of mass 2 and its concentration", *Phys. Rev.*, **39**, p. 864 (1932).
[123] H.C.Urey, F.G.Brickwedde, G.M.Murphey, "A Hydrogen Isotope of Mass 2", *Phys. Rev.*, **39**, p. 164 (1932); cit. da Rif. 2, p. 302.

nell'articolo con cui Chadwick confermava l'esistenza del neutrone.

5.2 La conferma sperimentale dell'esistenza del neutrone

Fra gli esperimenti che resero il 1932 un anno memorabile per la fisica il più noto è certamente quello che portò alla conferma dell'esistenza del neutrone, sia per l'intrinseca importanza della scoperta di una nuova particella nucleare da parte di J. Chadwick, sia - e ancor più, forse - per la mancata scoperta da parte di Frédéric Joliot e Irène Joliot-Curie. Oltre che negli usuali resoconti,[124] l'intera storia è stata narrata con vivacità, e commentata in profondità, da Emilio Segrè,[125] non vi è quindi nessuna necessità di riprenderla in questa comunicazione, se non dal particolare punto di vista che ci siamo proposti.

Come abbiamo accennato nella sezione precedente, l'ipotesi dell'esistenza di 'qualcosa' che avrebbe potuto avere una parte della fenomenologia del neutrone era stata avanzata e argomentata da Rutherford fin dal 1920. Per rimarcare la distanza, non solo temporale, fra la congettura del grande fisico inglese e quanto dirà nel 1932 il suo allievo e collega Chadwick, può essere utile riportare un brano intero della Bakerian Lecture del 1920:

> "Secondo il nostro attuale punto di vista, l'atomo di idrogeno neutro è considerato come un nucleo di carica unitaria con un elettrone legato a distanza, e lo spettro dell'idrogeno è attribuito ai movimenti di questo elettrone distante. In certe condizioni tuttavia potrebbe essere possibile per un elettrone *combinarsi* molto più da vicino con il nucleo H, formando specie di doppietto neutro. Un tale *atomo* dovrebbe avere proprietà veramente nuove. Il suo campo esterno sarebbe praticamente zero, eccetto che molto vicino al nucleo, e di conseguenza dovrebbe essere in grado di muoversi liberamente attraverso la materia. *La sua presenza sarebbe probabilmente difficile da determinare con lo spettroscopio, e potrebbe essere impossibile* (*it may be impossible*) *contenerlo in un recipiente sigillato*. D'altra parte dovrebbe penetrare rapidamente la struttura degli atomi e potrebbe o unirsi al nucleo o essere disintegrato dal suo intenso campo, probabilmente portando alla espulsione di un atomo H carico o di un elettrone o di entrambi".[126]

Ho evidenziato in corsivo un paio di termini, e la frase in cui Rutherford asserisce due 'possibili impossibilità': l'osservazione spettroscopica e la raccolta di un campione di questa "specie di doppietto neutro". È evidente che Rutherford aveva allora una visione 'sostanzialista' di ciò che sarebbe poi diventato il neutrone. Nell'anno a cui stiamo facendo riferimento in questa sezione, il 1932, molti fisici si erano comunque convinti che per spiegare le proprietà dei nuclei fosse non solo necessaria una maggiore comprensione delle forze attive all'interno dei nuclei, ma che la loro stessa 'composizione' richiedesse la partecipazione di particelle elementari diverse dalle due conosciute fino ad allora, il protone e l'elettrone. I maggiori interrogativi, e le conseguenti 'attese', nascevano in due aree distinte della ricerca fisica. La prima era la spettroscopia molecolare che aveva dimostrato l'inconsistenza fra l'interpretazione quantistica dei dati sperimentali e la predizione dello spin nucleare basata sulla coppia elettrone/protone. Il caso più clamoroso era quello del nucleo dell'azoto di massa 14, che se fosse stato composto da 14 protoni e 7 elettroni avrebbe dovuto avere uno spin semi-intero, mentre aveva spin nullo. La seconda contraddizione era ancora più radicale, perché metteva in gioco uno degli aspetti fondamentali della fisica quantistica, il principio di indeterminazione; infatti le dimensioni del nucleo erano così piccole da fissare la posizione dell'elettrone con una precisione tale da portare ad una incertezza enorme sul momento dell'elettrone, e quindi sulla sua energia cinetica. L'elettrone si sarebbe dovuto muovere nel nucleo con velocità tale da non poter essere trattenuto al suo interno da forze dell'ordine di grandezza

---

[124] Ad esempio in: H.A.Boorse, L.Motz, J.H.Weaver, *The Atomic Scientists. A Biographical History*, New York: Wiley, 1989, pp. 336-340.
[125] Rif. 108.
[126] Rif. 111 (b), loc. cit.

conosciuto. Vedremo che nell'argomentazione di Chadwick solo la prima di queste 'preoccupazioni' avrà un ruolo esplicito, ed ambiguo, mentre la seconda sarà sostanzialmente ignorata.

James Chadwick (1891-1974) aveva ottenuto il suo primo titolo accademico in fisica nel 1911, all'Università di Manchester. Affascinato dalla personalità di Rutherford ne divenne allievo, lavorando su vari problemi della radioattività, e conseguendo il M.Sc. nel 1913. La prossima tappa della sua carriera scientifica sarebbe dovuta essere un'immersione nella fisica tedesca al Physikalish-Technische Reichanstalt, sotto la direzione di Hans Geiger. Lo scoppio della guerra lo colse in Germania, e in quanto suddito nemico fu internato in un campo di prigionia per civili.[127] Al termine della guerra rinnovò la collaborazione con Rutherford a Manchester, e lo seguì a Cambridge nel 1919, diventando Assistent Director del Cavendish Laboratory nel 1923. Secondo la testimonianza di Marcus Oliphant, un collaboratore di Rutherford dal 1927, "Chadwick leggeva tutti i giornali e conosceva qualunque cosa accadesse nelle branche della fisica di interesse per il Cavendish".[128] Ottimo sperimentale, e colto lettore onnivoro, Chadwick era, insieme a Rutherford, nelle migliori condizioni per cogliere le contraddizioni della nota pubblicata da Frédéric Joliot e Irène Joliot-Curie il 18 gennaio 1932.

Gli esperimenti di Joliot e Joliot-Curie nascevano da osservazioni di W. Bothe e H. Becker, che bombardando berillio con particelle alfa di alta energia avevano constatato l'emissione di radiazioni penetranti. Essi avevano interpretato queste radiazioni come raggi gamma, che per altro avevano un'energia maggiore di quella delle particelle alfa incidenti, e quindi dovevano essere di origine nucleare. Nella nota del 18 gennaio 1932 i due fisici francesi avevano riportato una nuova e sorprendente osservazione, che la radiazione penetrante di Bothe era in grado di far emettere protoni da uno strato di paraffina. Con le parole di Chadwick: "[e]ssi suggerirono che il trasferimento di energia al protone avvenisse mediante un processo simile all'effetto Compton", dando all'emissione di protoni un'interpretazione basata "sull'assunzione che la radiazione dal berillio fosse una radiazione a quanti (*quantum radiation*)". [129] La spiegazione del fenomeno data da Joliot e Joliot-Curie apparve incongruente ai ricercatori del Cavendish (e ad Ettore Majorana in Italia[130]).

La reazione di Chadwick fu di una rapidità degna di un velocista, infatti il 17 febbraio giungeva alla redazione di *Nature* una lettera, messa a stampa nel fascicolo del 27 febbraio, in cui confutava l'interpretazione dei due fisici francesi. I passi decisivi sono proprio al termine della breve lettera:

> "Se si suppone che la radiazione consista di quanti, allora la cattura della particella α da parte del nucleo Be^9 formerà un nucleo C^{13}. Il difetto di massa di C^{13} è conosciuto con sufficiente accuratezza per mostrare che l'energia del quanto emesso in questo processo non può essere più grande di circa 14×10^6 volt. È difficile pensare che un simile quanto sia responsabile degli effetti osservati. [...] Finora, ogni evidenza è in favore del neutrone, mentre l'ipotesi del quanto può essere sostenuta solo se la conservazione dell'energia e del momento è, in qualche momento, lasciata cadere".[131]

Già in questo passo risalta la funzione cruciale che ebbe la conoscenza del difetto di massa del C^{13} nell'argomentazione di Chadwick, nel momento stesso dell'annuncio della *Possible Existence of a Neutron*, come recitava il titolo della lettera. Riferimenti più ampi, e fatti direttamente alle misure di Aston, si trovano nel successivo, più ampio articolo di Chadwick, pubblicato sui *Proceedings of the*

---

[127] Il trattamento dei prigionieri di questo *Zivilgefangenenlager* fu certamente più umano di quello riservato ai lavoratori-schiavi della seconda guerra mondiale. Mehra e Rechenberg riferiscono che Chadwick potè organizzare un piccolo laboratorio di ricerca, aiutato da diversi colleghi, fra cui W. Nernst; Rif. 17, p. 31.
[128] Ib., pp. 31-32.
[129] J. Chadwick, "Possible Existence of a Neutron", *Nature*, **129**, p. 312 (1932).
[130] Rif. 108, p. 180; Majorana, "un carattere speciale" secondo Segrè, così commentò: "Che cretini! hanno scoperto il protone neutro e non se ne accorgono".
[131] Rif. 129.

Royal Society, con un titolo ormai assertivo: *The Existence of a Neutron*.[132]

La base sperimentale su cui Chadwick basò i ragionamenti in favore dell'esistenza del neutrone era più ricca, in quanto la fenomenologia era stata estesa all'osservazione di atomi di rinculo, ottenuti irradiando con la radiazione penetrante di Bothe gas diversi (idrogeno, elio, azoto, ossigeno e argo). L'esito di queste nuove misure portava Chadwick ad una conclusione precisa:

> "Se supponiamo che la radiazione non sia una radiazione a quanti (*quantum radiation*), ma consista di particelle di massa quasi eguale a quella del protone, tutte le difficoltà connesse con le collisioni scompaiono, sia per quanto riguarda la loro frequenza, sia per quanto concerne il trasferimento di energia a masse differenti. Per spiegare il grande potere di penetrazione della radiazione dobbiamo inoltre assumere che la particella non abbia carica netta. Noi possiamo supporre che consista di un protone e di un elettrone in stretta combinazione, il 'neutrone' discusso da Rutherford nella sua Bakerian Lecture del 1920".[133]

Per produrre la radiazione penetrante di Bothe, ovvero i neutroni, Chadwick aveva utilizzato berillio e boro come bersagli delle particelle alfa. Nel caso del berillio l'Autore afferma che "[l]e relazioni energetiche del processo [di emissione del neutrone] non possono essere dedotte esattamente, perché le masse del nucleo di Be^9 e del neutrone non sono note con accuratezza".[134] Ma, aggiunge Chadwick: "Fortunatamente (*Fortunately*), rimane il caso del boro".[135] Le misure erano state eseguite su un bersaglio di boro polverizzato, depositato su una lamina di grafite, e l'Autore descrive così il processo nucleare:

> "È probabile che i neutroni siano emessi dall'isotopo B^{11}, perché sappiamo che l'isotopo B^{10} si disintegra con l'emissione di un protone. Il processo di disintegrazione sarà allora
>
> $$B^{11} + He^4 \rightarrow N^{14} + n^1.$$
>
> Le masse di B^{11} e N^{14} sono note dalle misure di Aston, e i dati ulteriori necessari per la deduzione della massa del neutrone possono essere ottenute sperimentalmente."[136]

Nell'equazione delle 'energie' Chadwick esprime tutto in termini di massa, e il seguente passo dimostra fino a che punto le deduzioni di Chadwick dipendano in modo essenziale dalle misure di Aston e dalla loro precisione:

> "Le masse sono B^{11} = 11,00825 ± 0,0016; He^4 = 4,00106 ± 0,0006; N^{14} = 14,0042 ± 0,0028. Le energie cinetiche in unità di massa sono [per la] particella α = 0,00565; [per il] neutrone = 0,0035; e [per il] nucleo dell'azoto = 0,00061. Troviamo quindi che la massa del neutrone è 1,0067. Gli errori citati per le misure di massa sono quelli dati da Aston. Essi sono gli errori massimi che possono essere ammessi nelle sue misure, e l'errore probabile può essere preso come circa in quarto di questi.† Tenendo conto degli errori nelle misure di massa sembra che la massa del neutrone non possa essere minore di 1,003, e che probabilmente stia fra 1,005 e 1,008".[137]

Chadwick ha inserito in questo passo un rinvio in nota, in cui conferma l'affidabilità delle misure di Aston: "† La massa di B^{11} relativa a quella di B^{10} è stata controllata con metodi ottici da Jenkins e McKellar [1932]. Il loro valore concorda con quello di Aston per una parte su 10^5. Questo suggerisce che si può dare grande fiducia (*great confidence*) alle misure di Aston". La ripetuta

---

[132] (a) J. Chadwick, "The Existence of a Neutron", *Proc. R. Soc.*, **136 A**, pp. 692-708 (1932); qui sarà citato da: (b) M. H. Shamos, *Great Experiments in Physics*, New York: Holt, 1959, pp. 267-280.

[133] Rif. 132 (b), p. 273. Dal punto di vista retorico si può notare che anche in questo passaggio solenne Chadwick usa il pronome *we*, mentre in due punti l'Autore sente di dover parlare in prima persona: *I made further experiments*, (p. 269), quando introduce le osservazioni sugli atomi di rinculo; *In conclusion, I may restate briefly the case (*p. 279), all'inizio del breve paragrafo che conclude l'articolo.

[134] Ib., p. 274.

[135] Ib., p. 275.

[136] Ib., p. 276.

[137] Loc. cit.

enfasi data ai dati sperimentali di Aston è retoricamente giustificata dalle conclusioni sulla natura del neutrone che Chadwick intende sostenere fino in fondo: "Ci si deve attendere un simile valore per la massa del neutrone se il neutrone consiste di un protone e di un elettrone, ed esso sostiene con forza (*lends strong support*) questo punto di vista". Ignorando ogni possibile contraddizione con il principio di indeterminazione, il fisico sperimentale del Cavendish insiste sul proprio impegno ontologico: "Possiamo supporre che il protone e l'elettrone formino un piccolo dipolo, o possiamo assumere la descrizione (*picture*) più attraente di un protone incassato (*embedded*) in un elettrone. In entrambi i punti di vista possiamo aspettarci che il 'raggio' del neutrone sia qualche unità in 10^{-13} cm".[138]

Se il principio di indeterminazione viene semplicemente ignorato da Chadwick, la seconda 'preoccupazione' che abbiamo citato, sullo spin nucleare, viene ridimensionata in almeno due punti della comunicazione alla Royal Society. Innanzi tutto il nostro Autore sembra ritenere il suo modello di neutrone al sicuro da questa obbiezione: "Possiamo allora procedere a costruire i nuclei a partire da particelle α, neutroni e protoni, e siamo in grado di evitare la presenza di elettroni non combinati nel nucleo. Questo ha certi vantaggi perché, come è ben noto, gli elettroni in un nucleo hanno perso alcune delle proprietà di cui godono al di fuori, ad esempio il loro spin e momento magnetico".[139] Poco più oltre, mentre si sta avviando alle conclusioni, Chadwick ci conferma la fluidità della situazione conoscitiva in cui si trovava: "È, ovviamente (*of course*), possibile supporre che il neutrone sia una particella elementare. Questa opinione ha attualmente poco a suo favore, eccetto la possibilità di spiegare la statistica di nuclei come N^{14}".[140]

Questa situazione di fluidità teorica era probabilmente il risultato (non del tutto infecondo?) di una attività sperimentale straordinaria, con cui proprio in quel fatale 1932 il laboratorio diretto da Rutherford stava raccogliendo i frutti delle annose ricerche sulla natura del nucleo.

5.3 La prima reazione nucleare

Il terzo evento del 1932 che stabilisce una stretta connessione fra i risultati ottenuti mediante la spettrografia di massa e la fisica del nucleo è la pubblicazione dei risultati dell'esperienza di Cockcroft e Walton, due fisici inglesi che ottennero la disintegrazione artificiale dei nuclei di diversi elementi mediante un acceleratore lineare di protoni da loro costruito nel Cavendish Laboratory. Se questo sviluppo sperimentale era perfettamente integrato nella linea di ricerca principale dei fisici di Cambridge, la sua realizzazione effettiva dipese dal costituirsi di una particolare situazione conoscitiva i cui tratti fondamentali furono la determinazione accurata delle masse nucleari, lo sviluppo del modello quantistico del nucleo, la messa a punto di macchine in grado di produrre particelle cariche ad alta energia.[141] È di un certo interesse notare quanto siano differenziate le conoscenze e le competenze che confluirono nell'esperimento di Cockcroft e Walton. La base sperimentale determinata con la spettrometria di massa aveva portato Aston a interpretare il dato empirico del difetto di massa nella direzione teorica della *packing fraction*. L'interpretazione quantistica della stabilizzazione dei nuclei in termini di barriere di potenziale - 'penetrabili' con una certa probabilità ad energie al di sotto del valore della barriera - aveva reso concepibile l'accesso al nucleo da parte di particelle con energie relativamente basse. A questi aspetti conoscitivi, presenti/disponibili per altro a tutti i ricercatori nel campo della fisica atomica, ne va aggiunto il terzo, più particolare, e cioè la disponibilità a Cambridge di specifiche competenze

---

[138] Rif. 132 (b), p. 277.

[139] Loc. cit. Bruzzaniti ha discusso con la sua usuale accuratezza il problema dello spin e della statistica del nucleo dell'azoto; cfr. Rif. 2, pp. 229-235. Alla nota 63, p. 301, dell'opera di Bruzzaniti leggiamo: "Robert Mulliken [nel 1931] condivideva totalmente le conclusioni [del 1929] di Heitler e Herzberg secondo cui gli elettroni non contribuivano in nessun modo alla statistica del nucleo".

[140] Rif. 132 (b), p. 278; la *fluidità* del pensiero teorico di Chadwick è evidente nella posizione assunta nei confronti dell'isotopo pesante dell'idrogeno, "recentemente descritto da Urey, Brickwedde e Murphy": "È infatti possibile che anche questa particella possa trovarsi come unità di struttura nucleare"; loc. cit.

[141] H.A.Boorse, L.Motz,, *The World of the Atom*, vol. II, New York: Basic Books, 1966, p. 1352.

teoriche, sperimentali e tecnologiche. I primi due tratti, delle masse nucleari precise e del modello quantistico del nucleo, sono stati indagati nelle sezioni precedenti, qui vedremo più da vicino il terzo fattore, quello umano, per poi giungere all'esperimento di Cockcroft e Walton e alla loro famosa memoria inviata ai *Proceedings of the Royal Society* nel giugno 1932.

John Douglas Cockcroft (1897-1967), al momento dello scoppio della prima guerra mondiale si era procurato una borsa di studio per frequentare l'Università a Manchester, ma nel 1915, non appena compì i 18 anni, si arruolò come volontario e combatté in artiglieria fino alla fine del conflitto.[142] Tornato a Manchester preferì iscriversi al College of Technology dove ottenne il B. Sc. in ingegneria elettrica, e nel 1922, durante un 'apprendistato' alla Metropolitan Vickers, ottenne il M. Sc. Tech. Cockcroft fu incoraggiato ad approfondire gli studi matematici, e trasferitosi a Cambridge affrontò l'ordalia del Mathematical Tripos, uscendone vincitore nel 1924. Munito di questo titolo prestigioso Cockcroft entrò nel Cavendish Laboratory ed iniziò a lavorare con il fisico sovietico P.Kapica sulla produzione di intensi campi magnetici e di basse temperature.[143] Verso la fine del 1928 cominciò ad interessarsi della possibile disintegrazione dei nuclei atomici mediante protoni accelerati da grandi differenze di potenziale, mosso in questa nuova direzione di ricerca dalla lettura di un lavoro di Gamow sulla disintegrazione degli atomi, ricevuto come dattiloscritto.[144] Cockcroft si convinse che a causa del fenomeno di *tunnelling* non sarebbero stati necessari milioni di eV per penetrare all'interno dei nuclei di atomi leggeri; in particolare calcolò che una volta accelerate a 300.000 V, su un bersaglio di boro, 6 particelle su 1000 avrebbero potuto penetrare nel nucleo.[145] Nel dicembre 1928 Cockcroft convinse Rutherford ad ottenere dall'Università un finanziamento di 1.000 sterline per acquistare un trasformatore da 300 keV e i componenti per costruire i tubi di rettifica e accelerazione. La macchina sarebbe stata costruita e messa in funzione in collaborazione con Walton, un giovane fisico di provata abilità sperimentale.

Ernest Thomas Sinton Walton (1903-1995) aveva compiuto gli studi universitari, centrati su matematica e fisica sperimentale a Dublino, ricevendo il M.Sc. nel 1927. Nello stesso anno era entrato al Cavendish Laboratory con una borsa di ricerca, dove ottenne il Ph.D. nel 1931. Walton aveva cominciato a lavorare sull'accelerazione di particelle prima della collaborazione con Cockcroft. Il suo primo progetto riguardò una macchina per accelerare elettroni su orbite circolari, ma fu infruttuoso. Quando Cockcroft e Walton iniziarono la collaborazione presero come punto di partenza per la messa a punto del loro acceleratore un apparato costruito da T. E. Allibone, con cui venivano prodotti elettroni con energie fino a 300 kV, ma con flussi instabili.

L'acceleratore fu costruito in uno stanzone non utilizzato del Cavendish Laboratory, impiegando anche parti spaiate, pezzi di apparecchiature dismesse, assi di legno e chiodi riciclati, come era per altro la pratica consolidata del laboratorio. Nell'apparato di Cockcroft e Walton il voltaggio del trasformatore da 300 keV era rettificato e moltiplicato di quattro volte mediante condensatori e raddrizzatori termoionici. Il sistema dei raddrizzatori consisteva di una torre alta quattro metri, costituita da quattro cilindri di vetro, del tipo allora usato nelle pompe di benzina, posti sotto vuoto dinamico. I cilindri erano collocati uno sopra l'altro, con gli elettrodi e i filamenti caldi posti all'interno. L'apparecchiatura dava una tensione fino a 700 kV, stabile nei limiti di qualche unità percentuale. Questa tensione era poi applicata ad una torre di accelerazione consistente in due cilindri di vetro che contenevano gli elettrodi per la focalizzazione del fascio, mentre sulla cima della torre un tubo a scarica di idrogeno forniva i protoni. Al di sotto dell'acceleratore vi era la postazione per le osservazioni sperimentali, poco più che una grossa

---

[142] Nella biografia di Cockcroft pubblicata nel sito della BBC si sottolinea che "passò attraverso il sanguinoso conflitto relativamente indenne, ma [che] l'esperienza lo lasciò con un profondo odio per la guerra"; crf. http://www.bbc.co.uk/history/programmes/local_heroes/biogs/jdc1.shtml (ultimo accesso 11 dicembre 2000).

[143] P. L. Kapica (1894-1984) diresse il Mond Laboratory a Cambridge dal 1930 al 1934, anno in cui rientrò in Unione Sovietica; cfr. N. E. Alekseevskij, "Kapica, Pëtr Leonidovic", *Scienziati e tecnologi contemporanei*, Milano: Mondadori, 1974, *ad vocem*. A succedergli fu nominato Cockcroft.

[144] Rif. 17, p. 36. L'articolo di Gamow sarà poi citato quando verranno descritte le prime reazioni nucleari; *vide infra* Rif. 148, p. 238.

[145] Rif. 142.

cassa, con scudi di piombo e schermata elettrostaticamente.[146]

Il 14 aprile 1932 Walton, seduto all'interno di questa cassa, diresse il fascio di protoni su un bersaglio di litio, ottenendo delle scintillazioni che per le loro caratteristiche sembravano essere dovute a particelle alfa. Rutherford fu immediatamente avvertito del successo dell'esperimento e le sue reazioni entusiastiche sono entrate nel mito della fisica.[147] Una lettera di Cockcroft e Walton fu pubblicata il 30 aprile su *Nature* con il titolo "Disintegration of lithium by swift protons". Già nel febbraio Rutherford aveva fatto pervenire alla Royal Society un lavoro dei due giovani fisici con una descrizione dell'apparecchiatura e delle sue prestazioni, lavoro pubblicato sui *Proceedings* nel fascicolo A 830, del 1° giugno 1932. Il 15 giugno arrivò alla redazione dei *Proceedings* l'articolo fondamentale sulla "disintegrazione di elementi per mezzo di protoni ad alta velocità", che fu pubblicato senza indugio nel fascicolo A 831, del 1° luglio 1932. Anche la 'macchina' editoriale della comunità scientifica inglese aveva funzionato alla perfezione.

Nell'articolo i due fisici riferiscono i dati ottenuti sulla composizione del fascio ("circa metà della corrente è portata da protoni e metà da ioni H_2^+ ") e sulla costituzione delle particelle responsabili delle scintillazioni, a partire dalla loro fenomenologia ("le scintillazioni erano molto simili come aspetto e luminosità alle scintillazioni delle particelle α").[148] La reazione nucleare non viene indicata con simboli, ma descritta soltanto a parole: "l'ovvia interpretazione dei nostri risultati è assumere che l'isotopo di massa 7 del litio cattura un protone e che il risultante nucleo di massa 8 si suddivide (*breaks up*) in due particelle α". L'interpretazione si basa sul confronto dei dati sperimentali ottenuti al Cavendish ("Se il momento è conservato nel processo [...] un'energia di 17,2 milioni di volt sarebbe liberata in questa disintegrazione") con la variazione di massa durante la reazione:

> "La massa del nucleo di Li_7, determinata da Costa, è 7,0104 con un errore probabile di 0,003. La diminuzione di massa durante il processo è quindi 7,0104 + 1,0072 - 8,0022 = 0,0154 ± 0,003. Questo è equivalente ad una liberazione di energia di (14,3 ± 2,7) x 10^6 volt. Concludiamo quindi che le energie osservate delle particelle α sono consistenti con la nostra ipotesi".[149]

Dei tre valori che compaiono nel calcolo della diminuzione di massa solo quello del nucleo di Li_7 ha una paternità esplicita, anche se il valore non corrisponde né a quello di Costa,[150] né a quello ricalcolato da Aston (7,012, per O=16,0000),[151] e nemmeno ai valori di Costa o di Aston riportati sulla scala fisica, secondo il coefficiente indicato da Mecke e Childs nel 1931.[152] I valori 1,0072 e 8,0022/2 sono dati senza la fonte, ma corrispondono ai dati di Aston per l'atomo di idrogeno e per quello di elio a cui sono state sottratte, rispettivamente, le masse di uno o due elettroni.

Per quanto riguarda le conoscenze nel 1932 su un possibile isotopo del berillio di massa 8 si deve dire che erano assai incerte. Questo isotopo aveva un ruolo rilevante nella teoria sull'evoluzione degli elementi avanzata nel 1929 da R. Atkinson e G.F. Houtermans, in cui i due fisici avevano supposto che si potesse disintegrare in due particelle alfa.[153] L'unico dato disponibile sull'esistenza di un isotopo del berillio era stato pubblicato da due fisici americani, H. Watson e G. Parker, che avevano studiato degli spettri a bande ottenute con un arco fra elettrodi di berillio in

---

[146] E. Finch, D. Weaire, "Ernest Thomas Sinton Walton, 1903-95", pubblicato in *Physics World*, November 1995, ma letto in http://www.tcd.ie/Physics/Walton/life.html (ultimo accesso 11 dicembre 2000).

[147] Secondo il racconto di Walton, Rutherford, di corporatura notevole, entrò a fatica nella postazione, e dopo aver constatato le scintillazioni escamò: *These look mighty like alpha particles. I should know - I was at their birth*; Rif. 146.

[148] J.D. Cockcroft, E.T.S. Walton, "Experiments with High Velocity Positive Ions. II. - The Disintegration of elements by High velocity Protons", *Proc. Roy. Soc.*, **136 A**, pp. 229-242 (1932).

[149] Ib., p. 236.

[150] Cfr. la Tab. 2, al termine della sezione 3.3.

[151] Rif. 14, p. 510.

[152] J. B. Hoag, S. A. Korff, *Electron and Nuclear Physics*, New York: Van Nostrand, 1948, p. 239.

[153] R. Atkinson, G.F. Houtermans, *Z. Phys.*, **54**, pp. 664 e sgg. (1929), cit. da Rif. 1, p.114. In effetti l'isotopo ^8Be si decompone in due pertcelle alfa in meno di 10^{-16} secondi.

atmosfera di idrogeno.[154] L'esistenza di questo isotopo era stata accettata da Gamow,[155] ma forti dubbi sull'affidabilità del dato sperimentale saranno poi avanzati da Aston.[156] In effetti Cockcroft e Walton sono prudentissimi - a livello linguistico - rispetto alla denominazione dell' 'oggetto' risultante dalla temporanea unione di un nucleo di litio con un protone. Nel corso dell'articolo, dopo aver descritto l'impiego di una camera a nebbia, avevano scritto: "sembrava ora abbastanza chiaro che stavamo osservando particelle α espulse dai nuclei di litio sotto il bombardamento di protoni, e che l'isotopo del litio di massa 7 si stava suddividendo in due particelle α".[157] La stessa formulazione si trovava nella lettera inviata a *Nature*: "sembra non improbabile che l'isotopo di litio di massa 7 catturi occasionalmente un protone e che il nucleo di massa 8 risultante si divida in due particelle α".[158] In questo atteggiamento prudente rientra anche il fatto singolare che proprio della prima - e da loro più studiata - reazione nucleare non danno una descrizione a livello simbolico, cosa che invece fanno in altri tre casi. Per il fluoro, studiato sotto forma di fluoruro di calcio polverizzato, scrivono:

> "Se assumiamo che la reazione sia:
>
> $$F_{19} + H_1 = O_{16} + He_4$$
>
> è di particolare interesse confrontare l'energia osservata con l'energia che ci si deve attendere dai cambiamenti massa, dal momento che tutte le masse coinvolte sono conosciute, dai lavori di Aston, con precisione piuttosto buona".[159]

Reazioni analoghe, ma senza una discussione quantitativa, sono proposte per il sodio e il potassio: $Na_{23} + H_1 = Ne_{20} + He_4$ e, rispettivamente, $K_{39} + H_1 = A_{36} + He_4$.[160] Malgrado il dato un po' pencolante, attribuito a Costa, e le esitazioni referenziali degli Autori, la nota con cui Cockcroft e Walton annunciavano i risultati del loro esperimento aggiunse un ulteriore anello alla lunga catena di grandi successi sperimentali del Laboratorio diretto da Rutherford.

Prima di giungere alle conclusioni di questa nota possono essere di interesse alcune annotazioni, di contesto più ampio rispetto al 'mondo' del Cavendish Laboratory che è stato al centro della comunicazione. Va innanzi tutto ricordato che la produzione di particelle con energia sufficiente per eccitare reazioni nucleari fu un problema a cui i fisici diedero risposte diverse fra la fine degli anni '20 e l'inizio degli anni '30. Nel 1927 il venticinquenne ricercatore norvegese Rolf Widerøe costruì ad Aachen un 'acceleratore multiplo', formato da due elettrodi tubolari in linea, fra i quali era stato applicato un campo elettrico oscillante; con questo apparato riuscì ad accelerare ioni sodio e potassio ad una velocità che avrebbe richiesto l'applicazione di 50.000 volt. Widerøe aveva compiuto gli studi universitari come ingegnare elettrotecnico, e pubblicò i risultati che costituivano la sua tesi di dottorato su una rivista tedesca di elettrotecnica.[161] L'americano Robert D. Van de Graaff (1901-1967), che aveva ottenuto il M.S in ingegneria meccanica nel 1923, cominciò ad interessarsi della fisica del nucleo mentre preparava il dottorato in fisica a Oxford. Tornato negli Stati Uniti nel 1929, progettò a Princeton, sotto la direzione di K.T.Compton il primo acceleratore elettrostatico, in grado di fornire corrente continua a un potenziale di oltre un milione di volt.[162] Dall'altra parte degli Stati Uniti, sulla costa del Pacifico, fu messo a punto il primo ciclotrone da

---

[154] H. Watson, G. Parker, *Phys. Rev*., **37**, pp. 167 e sgg. (1931), cit. da Rif. 1, p. 114.
[155] Rif. 99, p. 8.
[156] Rif. 1, p. 114.
[157] Rif. 148, p. 232.
[158] J. D. Cockcroft, E. T. S. Walton, "Disintegration of Lithium by Swift Protons", *Nature*, **129**, p. 649 (1932).
[159] Rif. 148, p. 240.
[160] Con "A" gli Autori intendono Ar, il simbolo dell'argo.
[161] R. Wideröe: 'Über ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen', *Arch. f. Elektrot.* **21**, 387 (1928); riferimento cit. dall'autobiografia di Wideröe, *Life and Work of Rolf Wideröe*, compilata da Pedro Waloschek e consultabile all'URL: (a) http://www-library.desy.de/elbooks/wideroe/WiE-CONT.htm (ultimo accesso 11 dicembre 2000). Boorse *et al*. definiscono Widerøe *a German engineer*, cfr. Rif. 124, p. 360.
[162] "Van de Graaff, Robert Jemison", *Scienziati e tecnologi contemporanei*, Milano: Mondadori, 1974, *ad vocem*.

Lawrence e Livingston. Ernest O. Lawrence (1901-1958) aveva ottenuto il B.A. in chimica nel 1919 e il M.A., ancora in chimica, nel 1922, per approdare al Ph.D. in fisica nel 1925; nel 1929, quando affrontò il problema di accelerare particelle cariche, Lawrence era già un ricercatore di successo. I biografi affermano che mentre stava indagando se era possibile un metodo che non richiedesse la produzione di grandi (o enormi) differenze di potenziale, gli capitò fra le mani l'articolo di Widerøe pubblicato sull' *Archiv für Elektrotechnik*. Sebbene Lawrence non conoscesse il tedesco, i diagrammi che illustravano il contributo del fisico norvegese gli furono sufficienti come punto di partenza per il progetto del ciclotrone, portato a compimento all'Università di California con il suo studente Milton Stanley Livingston.[163] All'inizio del 1931 Lawrence e Livingston erano in grado di ottenere ioni di idrogeno molecolare con un'energia di 13.000 eV, utilizzando un magnete con poli da 4 cm e un oscillatore a radiofrequenza.[164]

Il confronto della tecnica adottata da Cockcroft e Walton con l'acceleratore elettrostatico di Van de Graaff e con il ciclotrone di Lawrence e Livingston porta a concludere che l'apparato del Cavendish Laboratory era il meno innovativo, e d'altra parte esso non ebbe sviluppi imponenti quali quelli avuti dagli strumenti di Van de Graaff e di Lawrence. Al di là dell'enorme significato scientifico e del grande impatto sull'opinione pubblica,[165] nella sua contenuta economia di mezzi l'esperienza che meritò ai due fisici inglesi il (tardo)[166] Nobel nel 1951 appare più conclusiva di una certa epoca sperimentale, piuttosto che atto iniziale di una nuova pratica di ricerca. Questo aspetto 'conclusivo' fu drammaticamente sottolineato nel 1935, con una grave frattura avvenuta all'interno del Cavendish Laboratory. Chadwick, che in un certo modo era da decenni l'*alter ego* di Rutherford, rinunciò ad insistere per la costruzione di un ciclotrone in un nuovo e diverso laboratorio, erede e continuatore di quello che fino ad allora era stato all'avanguardia nelle ricerche di fisica del nucleo. Chadwick si trasferì a Liverpool e avviò immediatamente la costruzione di un ciclotrone.[167] Per noi, osservatori italiani, la data del 1935 è significativa anche perché è in quell'anno che è stata individuata una svolta decisiva, e non positiva, nel lavoro del gruppo di Fermi a Roma.[168]

6. Conclusioni

Con Aston, una volta tanto, gli accademici svedesi furono tempestivi e preveggenti. L'assegnazione del premio Nobel per la chimica nel 1922 sanzionò, nelle sue stesse motivazioni, l'importanza della scoperta degli isotopi degli elementi non radioattivi e della regola dei numeri interi (sezione 2). Il premio non solo giunse con insolita tempestività, ma addirittura anticipò le migliori ricerche del chimico-fisico del Cavendish, ricerche che aprirono interi nuovi settori di indagine, sia a livello sperimentale sia a livello teorico (sezione 3). I risultati del secondo spettrografo che cominciarono

---

[163] Rif. 161 (b), p. 358-361. I diagrammi sono consultabili nell'autobiografia di Widerøe, insieme al progetto che a sua volta era stato all'origine dell'acceleratore lineare dello stesso Widerøe, e che era stato proposto nel 1924 dallo svedese Gustav Ising sull'*Archiv för Mathematik, Astronomie och Fysik* ; Rif. 161 (a).

[164] "Lawrence, Ernest Orlando", *Scienziati e tecnologi contemporanei*, Milano: Mondadori, 1974, *ad vocem*. Segré ha pubblicato una fotografia che ritrae Lawrence con in mano uno dei primi ciclotroni di dimensioni minime; Rif. 108, p. 224.

[165] L'esperimento di disintegrazione artificiale del litio colpì l'immaginazione del pubblico, ed ebbe ampia risonanza sulla stampa di tutto il mondo; cfr. Rif. 141, p. 1356, e il Rif. 146.

[166] Al momento della pubblicazione dei risultati Cockcroft aveva 35 anni e Walton 29; quando ottennero il premio avevano 54 e 48 anni, rispettivamente. La prudenza dell'Accademia svedese aveva atteso che i due scienziati passassero dalla giovinezza alla maturità, sempre meglio però che con Barbara McClintock (premiata a 81 anni), Georg Wittig (82 anni), Charles J. Pedersen (83 anni). Pedersen ottenne il Nobel per la chimica nel 1987, venti anni esatti dopo la pubblicazione di un suo contributo rivoluzionario su certi composti detti 'eteri corona'. L'anziano ricercatore si permise di ironizzare, dichiarando al *Boston Globe* di essere contento di essere ancora vivo, e al *Washington Post* che non bisogna avere necessariamente trentacinque anni per diventare celebri; cfr. F.Turco, L.Cerruti, "Charles J. Pedersen e le origini della chimica supramolecolare", *Nuncius. Annali di storia della scienza*, **15**, fascicolo 1, pp. 111-168 (2000), p.125.

[167] Rif. 17, pp. 36-37.

[168] Si veda, ad esempio, il giudizio di Emilio Segrè: Rif. 108, p. 202.

ad affluire in letteratura dopo il 1927 ebbero un impatto decisivo sulla fisica del nucleo fra la fine degli anni 1920 e l'inizio degli anni 1930. Abbiamo visto infatti che la misura della *packing fraction* di molti isotopi da parte di Aston diede una nuova base sperimentale e dati utili per i modelli quantistici del nucleo (sezione 4), e che risultò essenziale per la comprensione degli esperimenti del 1932 di Chadwick e di Cockcroft e Walton (sezioni 5.2 e 5.3).

Durante la sessione invernale 1931-1932 Aston tenne al University College del Galles una serie di conferenze che costituirono la base del libro su *Mass-spectra and Isotopes* che abbiamo citato più volte nelle pagine precedenti.[169] Quando il volume fu messo a stampa era trascorso l'intero, fatale 1932, e nel primo capitolo della parte intitolata *Theoretical and General* l'Autore poteva citare i contributi di Gamow, Chadwick, Cockcroft e Walton. Il paragrafo finale del capitolo è dedicato al arpporto fra trasmutazione ed energia atomica, e qui leggiamo:

> "Due risultati [fondamentali] sono stati dimostrati per la prima volta con lo spettrografo di massa, in primo luogo la regola del numero intero, che indicò l'alta probabilità che gli atomi fossero composti delle stesse unità finali, e il secondo luogo il fatto che un atomo di elio pesa effettivamente meno di quattro atomi di idrogeno. [Questi risultati] hanno implicazioni profonde e di grande portata (*profound and far-reaching theoretical implications*).[170]

I dati sperimentali di Aston costituirono anche il termine di confronto per la trattazione dell'effetto isotopico nelle diverse spettroscopie molecolari, ma la loro trattazione, pur connessa alla fisica del nucleo è rimasta al di fuori della presente comunicazione, già troppo estesa. Per altro il materiale documentario che abbiamo esposto nelle pagine precedenti ci pare in grado di sostenere la fertilità del nostro interesse storiografico, teso a mettere in evidenza la particolare produttività conoscitiva delle ricerche condotte sui confini disciplinari. L'effetto sinergico di cui godono queste ricerche - quando hanno successo! - si spiega immediatamente a livello sociologico e cognitivo: quando un dato interessa più di un campo di ricerca esso riceve una donazione di senso da ciascuna delle specialità coinvolte, si crea così una spinta poderosa allo sviluppo delle tecniche sperimentali che - migliorate - acuiscono ancor più l'interesse verso nuovi dati. Il caso della spettrometria di massa che abbiamo cominciato a studiare in questa comunicazione diventerà tanto più significativo quanto più potrà essere confrontato con altri, numerosi casi del novecento. Un altro caso esemplare è quello dello sviluppo delle tecniche cromatografiche ed elettroforetiche che, nate e sviluppate in ambito biochimico, hanno letteralmente sconvolto nel secondo dopoguerra interi rami fondamentali della biologia, dalla genetica umana alla genetica delle popolazioni, alla stessa teoria dell'evoluzione.[171] Sicuramente in un confronto allargato ci si troverebbe di fronte ad andamenti con intensità, cadenze e ritmi diversi, che potrebbero essere illuminanti sulla natura dello sviluppo scientifico contemporaneo.

---

[169] La copia che abbiamo utilizzato fu inventariata con il n. 162 dall'Istituto di Fisica Teorica diretto da Persico; cfr. le osservazioni al Rif. 99.

[170] Rif. 1, p. 170.

[171] L. Cerruti, "The Impact of the Chromatographic and Electrophoretic Techniques on Biochemistry and Life Sciences", relazione ad invito presentata alla Conferenza "From the test-tube to the auto-analyzer: The development of chemical instrumentation in the twentieth century", Londra, 11-12 agosto 2000, organizzata dalla Commission for the History of Modern Chemistry della International Union for the History and Philosophy of Science.