

Luisa Bonolis

luisa.bonolis@roma1.infn.it

Pauli, Fermi e i misteri del decadimento beta

*Perché, secondo l'opinion mia,
A chi vuol una cosa ritrovare,
Bisogna adoperar la fantasia,
E giocar d'invenzione e 'ndovinare.*
Galileo Galilei (1590)

*Il puro pensiero logico non può fornirci
alcuna conoscenza del mondo empirico;
qualsiasi conoscenza della realtà comincia
dall'esperienza e termina con essa.*
Albert Einstein (1933)

Per apprezzare i considerevoli sforzi compiuti da fisici teorici e fisici sperimentali nella decifrazione e comprensione degli spettri beta dei nuclei atomici in un arco di tempo che durò circa trent'anni, è necessario tenere presente che un enorme complesso di problematiche del tutto nuove per le conoscenze dell'epoca si intrecciarono con questo percorso. La vicenda inizia in un momento in cui la meccanica quantistica muoveva i primi timidi passi e gli atomi, la cui realtà veniva ancora messa in discussione da alcuni, non erano neppure dotati di un "nucleo". Per valutare nella giusta prospettiva il "tentativo disperato" di Wolfgang Pauli (l'ipotesi dell'esistenza di una nuova particella, il neutrino) e la formulazione teorica del decadimento beta da parte di Enrico Fermi, appare quindi importante ricostruire il contesto di queste ricerche senza trascurare sia il panorama generale sia una certa quantità di dettagli. È certamente un buon esempio di quanto il cammino della ricerca possa essere irto di difficoltà, pieno di rami spezzati, spesso circondato da una fitta nebbia. Attraverso schiarite sempre più ampie si arriva a una spiegazione in cui tutti gli elementi, che fino ad allora erano apparsi confusi o scorrelati, confluiscono in una spiegazione semplice e chiara, di cui si può capire il senso solo seguendo l'itinerario storico degli eventi.

Scoperte accidentali, ma non troppo

Verso la fine del XIX secolo tre scoperte risultano essenziali per ricostruire l'intricata vicenda che riguarda la natura fisica del decadimento beta: i raggi X, la radioattività dell'uranio e l'elettrone. Tutte e tre discendono direttamente o indirettamente dalle ricerche sui raggi catodici.

Dopo la grande unificazione in un unico ambito fisico dell'insieme dei fenomeni elettrici e magnetici fatta da Maxwell nella seconda metà del XIX secolo – a cui egli aggiunse l'intero complesso dell'ottica ondulatoria – luce, elettricità e magnetismo si erano fusi in una sola entità fisica, il campo elettromagnetico. A quel tempo, luce, magnetismo, elettricità, vuoto, comportamento della materia sottoposta a queste diverse radiazioni, apparivano costituire i pezzi di un gigantesco puzzle. La scoperta del fenomeno della radioattività dell'uranio da parte di Henri Becquerel nel 1896 aggiunse un nuovo mistero, perchè questa radiazione sembrava "naturale", nel senso che veniva prodotta senza strumenti costruiti dall'uomo. Questa sensazionale scoperta si collocava nell'ambito dell'area di ricerca rivolta alla comprensione dei fenomeni di scarica nei gas rarefatti, che intorno alla metà dell'800 impegnava sempre più i fisici di tutta Europa e che alla fine del 1895 aveva avuto un esodo sorprendente con la scoperta da parte di Röntgen di raggi misteriosi che

si propagavano all'esterno di un tubo a raggi catodici ricoperto di carta nera. Poiché la natura di questi raggi risultava del tutto sconosciuta egli li chiamò raggi X.

In un primo momento si ritenne che il fenomeno della fosforescenza potesse avere qualcosa a che fare con i raggi X, quindi sembrò necessario esaminare sperimentalmente l'eventualità di una qualche correlazione di questi ultimi con la fosforescenza relativa ai sali di uranio. Questa bizzarra congettura spiega la rapidità della scoperta da parte di Becquerel, un esperto di fosforescenza, il quale soltanto quattro mesi dopo, il primo marzo 1896, scoprì che l'uranio emette spontaneamente quelli che al momento apparivano dei nuovi misteriosi raggi, che egli chiamò "raggi uranici", perché non soltanto si erano rivelati penetranti come i raggi X, ma avevano in comune con questi ultimi anche la proprietà di ionizzare l'aria rendendola conduttrice, cosa che egli dimostrò usando uno spettroscopio a foglie d'oro. Ciò che lo colpiva era soprattutto la peculiare spontaneità del fenomeno, l'apparente assenza di una causa "eccitatrice": "Tutti gli esperimenti provano qualitativamente la quasi-permanenza del fenomeno". Soprattutto si chiedeva quale fosse la fonte di energia dei raggi incessantemente emessi dall'uranio: "non siamo ancora in grado di comprendere da dove l'uranio derivi l'energia che emette con tanta persistenza".

I raggi di Becquerel, considerati qualcosa come un epifenomeno sulla scia dei raggi Röntgen, di cui peraltro non possedevano la proprietà affascinante di fotografare l'interno del corpo, ebbero un impatto molto lieve sia sul pubblico che sulla comunità scientifica, e furono praticamente trascurati per circa un anno e mezzo. L'apatia generale finì bruscamente nel 1898, quando i coniugi Curie riuscirono a scoprire due nuovi elementi chimici, il polonio e il radio, sorgenti radioattive molto più intense dell'uranio e del torio. Nel titolo del secondo lavoro di Maria (1898) fa la comparsa l'espressione "sostanze radioattive". Alla fine del 1898 i Curie pubblicano insieme a G. Bémont un lavoro in cui si afferma, con riferimento ai precedenti lavori di Maria: "uno di noi ha mostrato che la radioattività è una proprietà atomica". È la prima volta nella storia che la radioattività viene esplicitamente collegata ai singoli atomi, come una loro proprietà intrinseca. La scoperta del radio stimola anche l'interesse del grande pubblico.

Nel 1899 Ernest Rutherford compie il primo passo nella decifrazione della natura della radiazione emessa dall'uranio ed è in grado di affermare: "Questi esperimenti dimostrano che la radiazione dell'uranio è complessa, e che esistono almeno due tipi distinti di radiazione: un tipo che viene assorbito molto facilmente, che chiameremo per comodità radiazione alfa, e un altro di natura più penetrante, che chiameremo radiazione beta". Il potere di penetrazione della radiazione beta era simile a quello dei raggi X, mentre quello dei raggi alfa era di gran lunga inferiore, infatti soltanto una minima parte di questi ultimi riusciva ad attraversare una lamiera d'alluminio dallo spessore di 25 millesimi di millimetro. Saranno necessari dieci anni per stabilire che le alfa sono particelle il cui peso è circa quattro volte l'idrogeno dotate di due unità di carica positiva, elio doppiamente ionizzato. La dimostrazione della presenza dell'elio sulla terra, un elemento che inizialmente era stato individuato soltanto per via spettroscopica nel sole, risaliva soltanto al 1895.

I raggi gamma, un tipo di radiazione ancora più penetrante, furono individuati nel 1900 dal fisico francese Paul Villard il quale osservò subito che non venivano deflessi da campi magnetici. Si sospettava che i raggi gamma e i raggi X fossero "parenti", ma solo più tardi fu dimostrato che si trattava effettivamente di radiazione elettromagnetica ad altissima frequenza.

A questo punto, tuttavia, Rutherford fu anche costretto ad ammettere che "la causa ed origine delle radiazioni emesse continuamente dall'uranio è un mistero". Ma si trattava di un mistero che, più tardi, egli stesso avrebbe contribuito a svelare.

Dalla valutazione dell'energia cinetica associata alle particelle alfa lo stesso Rutherford era riuscito a valutare che l'energia in gioco nel corso dei processi di disintegrazione, risultava circa un milione di volte maggiore rispetto a quella connessa alle trasformazioni chimiche conosciute. I sali di radio risultavano luminosi nell'oscurità, le sostanze radioattive concentrate emettevano calore e lo stesso Pierre Curie, insieme a Albert Laborde,

aveva dimostrato che un grammo di radio era in grado di fondere, in un'ora, una quantità di ghiaccio pari almeno al proprio peso. Da dove proveniva questa continua emanazione di energia, apparentemente inesauribile e dalle origini del tutto misteriose? A partire dal 1898 i fisici si posero domande del tipo: è possibile che l'energia non si conservi in questi processi? La sorgente dell'energia è interna o esterna all'atomo?

Nel dare accesso alla struttura microscopica della materia e alle forze che la governano, la radioattività conferirà un nuovo significato ai fenomeni fisici macroscopici. Ma fin dalla sua scoperta apparve subito chiaro che questo fenomeno era terribilmente complesso, e metteva in gioco dei processi di varia natura, difficili da comprendere. A quell'epoca scienziati rispettabili credevano ancora ai fantasmi o agli ectoplasmii. Inoltre la scoperta di tutta una serie di radiazioni misteriose – onde radio, raggi X, raggi catodici, ecc. – sembrava confermare che la natura produce delle “emanazioni” che i nostri sensi non sono in grado di percepire, ma che agiscono a distanza.

La scoperta della particella beta

I raggi catodici riservavano ancora una serie di sorprese. Negli anni Novanta dell'Ottocento due concezioni si opponevano riguardo la loro natura: i fisici tedeschi, come Hertz e Lenard, pensavano che i raggi catodici fossero vibrazioni elettromagnetiche nell'etere, mentre i fisici inglesi, come Kelvin e J.J. Thomson sostenevano l'idea di Crookes secondo la quale i raggi catodici erano costituiti da corpuscoli carichi.

Nel 1895 Jean Perrin, riusciva a dimostrare in modo diretto che i raggi catodici sono portatori di carica negativa. Inviando i raggi emessi dalla macchia fluorescente in una gabbia di Faraday, quest'ultima si caricava negativamente, inoltre un magnete permetteva di deviare il fascio in modo da farlo entrare o no nella gabbia. Le esperienze di Perrin vennero riprese ed approfondite da J.J. Thomson il quale, durante una conferenza alla Royal Institution il 30 aprile 1897, illustrò gli esperimenti che lo avevano portato a determinare e/m , il rapporto tra la carica e la massa dei raggi catodici. Thomson riuscì a deflettere i raggi per mezzo di campi elettrici e di campi magnetici incrociati, giungendo ad una notevole conclusione: le particelle negativamente cariche risultavano possedere una massa approssimativamente duemila volte inferiore a quella dell'atomo di idrogeno, il più leggero atomo conosciuto. Thomson ottenne gli stessi risultati indipendentemente dal materiale usato come catodo o dal gas presente nel tubo. Fu quindi indotto a concludere che i raggi catodici dovevano essere “un nuovo stato della materia, uno stato nel quale la suddivisione della materia è molto più avanzata che nel comune stato gassoso essendo questa materia la sostanza a partire dalla quale tutti gli elementi chimici sono costituiti”. Ma poiché a quel tempo gli atomi venivano considerati indivisibili, non ci si aspettava che potesse esistere qualcosa di più leggero dell'atomo di idrogeno. Successivamente Thomson racconterà: “All'inizio erano pochissimi coloro che credevano nell'esistenza di questi corpi più piccoli degli atomi. Molto tempo dopo un distinto collega presente alla mia conferenza mi rivelò che aveva pensato che io li stessi ‘prendendo in giro’”. Il 7 agosto 1897 Thomson presenta la sua memoria sulle proprietà corpuscolari dei raggi catodici al “Philosophical Magazine”; nello stesso articolo annunciava i suoi risultati sperimentali per il valore della carica di tali particelle ottenuto con un metodo recentemente introdotto dal suo studente C.T.R. Wilson il quale aveva scoperto che le particelle cariche possono formare dei nuclei intorno ai quali acqua soprassatura può condensare. In questo modo Thomson determina il valore della carica elementare e entro il 50 per cento del valore corretto. La misura di e è una delle prime applicazioni della tecnica della camera a nebbia, con la quale egli ottenne un valore piuttosto buono se si considera la novità del metodo. Simultaneamente Walter Kaufmann e un po' prima di loro Emil Wiechert avevano trovato lo stesso risultato. Thomson dimostrò anche che le particelle prodotte con l'effetto fotoelettrico e quelle dei raggi catodici esibiscono lo stesso rapporto e/m . Nel 1899 Thomson fu anche in

grado di fornire un valore per la massa dell'elettrone del giusto ordine di grandezza. In considerazione della completezza delle sue ricerche Thomson è considerato lo scopritore dell'elettrone.

Le difficoltà di Maxwell nella comprensione dell'universalità delle "molecole" di elettricità era ormai stata superata, l'atomo era stato diviso: *"L'elettrificazione implica essenzialmente la suddivisione dell'atomo, una parte della massa dell'atomo si libera e rimane separata dall'atomo originale"*. Le nuove particelle vennero chiamate elettroni, secondo il termine coniato nel 1874 dal fisico irlandese George Johnstone Stoney per l'unità di elettricità che si perde quando un atomo diventa uno ione.

La prova dell'esistenza di corpuscoli più piccoli degli atomi che veniva dallo studio dei raggi catodici e dell'effetto Zeeman appena scoperto contribuì a cambiare la visione nei riguardi del fenomeno della radioattività. Pierre Curie mostrò che soltanto la radiazione più penetrante, la beta, sembrava essere deflessa. Nel 1900 Becquerel mise in evidenza che il rapporto e/m per le particelle beta emesse dal radio è dello stesso ordine di grandezza di quello delle particelle dei raggi catodici. I raggi beta diventano le particelle a più alta velocità allora conosciute.

Nel 1902 Kaufmann studiando i raggi beta provenienti dal radio in campi elettrici e magnetici riuscì ad affermare che "per piccole velocità il valore misurato della massa degli elettroni che generano i raggi di Becquerel... è in accordo entro gli errori sperimentali con il valore trovato per i raggi catodici". Da quel momento in poi si ritenne assodato che i raggi beta sono elettroni. Gli esperimenti di Kaufmann avevano anche evidenziato che il radio emette elettroni dotati di velocità varie che si spingono fino quasi alla velocità della luce. I primi tentativi di fare una indagine quantitativa sulla distribuzione di velocità, fatti già dallo stesso Becquerel nel 1900, mostravano sulle lastre fotografiche una immagine che, secondo quanto affermato da lui stesso, indicava uno spettro di velocità ampio, diffuso, ma continuo. Si poneva quindi un interrogativo fondamentale: qual era lo spettro energetico degli elettroni emessi nel corso del processo di decadimento beta?

Fisica nucleare senza il nucleo

La scoperta della particella beta diventava un ingrediente essenziale della nuova scienza della radioattività, la cui effettiva comprensione venne soprattutto dalla straordinaria collaborazione tra Ernest Rutherford e Frederick Soddy, che proposero, almeno per i decadimenti naturali appena scoperti (alfa e beta), la necessità di un cambiamento della specie chimica (variazione del numero atomico Z , corrispondente al numero dei protoni nucleo dell'atomo, che rappresenta la posizione dell'elemento nella tavola periodica degli elementi e che ne determina le proprietà chimiche) e investigarono in dettaglio la natura delle radiazioni emesse. La radioattività naturale, a differenza dei fenomeni chimici e fisici ordinari che riguardano soltanto la struttura esterna dell'atomo, è la manifestazione di un cambiamento nella struttura subatomica e in questo senso fu il primo processo nucleare ad essere identificato. Intorno ai primissimi anni del '900 non si sapeva cosa fosse in realtà l'atomo, ma la sua esistenza ne risultava confermata e la radioattività costituiva il segno della sua disintegrazione: "La radioattività è un fenomeno atomico... C'è ogni ragione per supporre che l'espulsione di una particella carica non accompagni semplicemente la mutazione, ma che quest'espulsione sia la reale mutazione" (Rutherford e Soddy, 1903). Va ricordato che all'epoca l'esistenza degli atomi veniva ancora negata da personaggi come Ostwald e Mach ("chi li ha visti"). Soltanto con gli esperimenti sul moto browniano effettuati da Perrin del 1909, Ostwald accetterà la sconfitta e ammetterà esplicitamente che gli atomi sono una realtà.

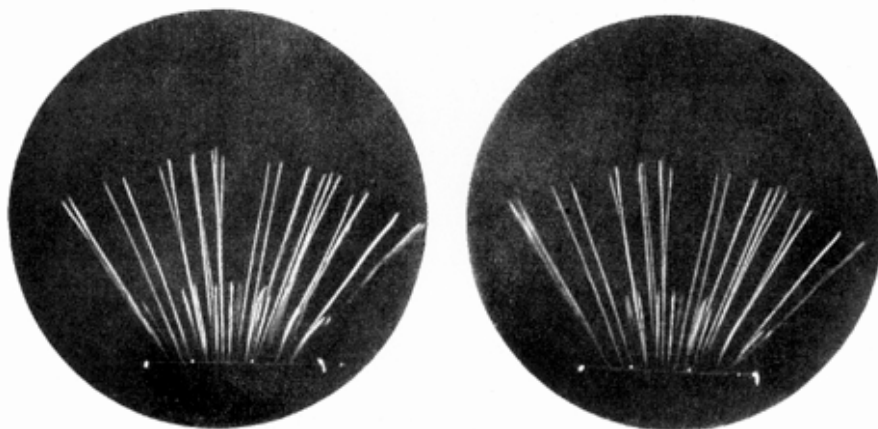
La radioattività poneva una serie di problemi completamente nuovi ("La radioattività, secondo le conoscenze attuali, dev'essere considerata effetto di un processo interamente estraneo alla sfera delle forze controllabili note, e non si può creare, alterare o distrugge-

re”, Rutherford e Soddy, 1903) e anche inquietanti: dato un certo numero di atomi dell’elemento radioattivo padre essi decadevano trasformandosi in un nuovo elemento figlio secondo una legge esponenziale ben precisa, con parametri caratteristici relativi a ciascun elemento, e tuttavia nessuno poteva prevedere quando un’atomo avrebbe “deciso” di decadere. Un comportamento che sconvolgeva completamente le modalità a cui i fisici erano abituati dalla fisica ottocentesca.

Nel frattempo Rutherford aveva cominciato ad inseguire le particelle alfa. Erano le sue preferite: le particelle beta erano troppo piccole, e inoltre, essendo elettroni, troppo comuni. Le alfa invece erano pesanti, di dimensioni atomiche e potevano essere visualizzate mentre si precipitavano fuori dagli atomi che le generavano con una enorme velocità ed energia. Nel 1908 insieme a Geiger riuscì per la prima volta a contare accuratamente e direttamente il numero di particelle alfa emesse per secondo da un grammo di radio, sparando particelle alfa in un tubo a vuoto contenente un filo carico al centro, attraverso il quale era possibile rivelare le collisioni che avvenivano nel gas rarefatto. Fu l’origine dei metodi elettrici ed elettronici per il conteggio delle particelle, un campo in cui com’è noto, lo stesso Geiger fu un pioniere. Nello stesso anno elaborarono un altro metodo per contare le singole particelle alfa. Si era scoperto che ogni particella alfa, quando colpisce uno schermo rivestito di materiale fluorescente, causa un debole ma ben definito lampo osservabile con un microscopio. Così ebbe origine il metodo del conteggio per scintillazione, destinato a diffondersi e a fornire, nel giro di qualche anno, risultati di fondamentale importanza. Misurando la carica complessiva proveniente dalla sorgente e dividendola per il numero delle particelle alfa conteggiate si otteneva la carica per particella! Dato che questa cifra era circa il doppio dei precedenti valori calcolati per e , la carica negativa dell’elettrone, essi conclusero che le alfa erano effettivamente elio doppiamente carico: “Una particella alfa è un atomo di elio” (Rutherford e Geiger, 1908).

La radioattività beta dal 1907 al 1914, un cammino irto di trabocchetti

Primo trabocchetto – Nel 1904 William Bragg scopre che i raggi alfa provenienti da un puro emettitore alfa sono monocromatici. Ciascun atomo emettitore può essere caratterizzato dalla velocità con cui vengono emesse le particelle alfa, le quali compiono un percorso costante di penetrazione nella materia. Questa scoperta induce a pensare erronea-



Radiazione α prodotta da una sorgente radioattiva naturale (ThC). Il percorso delle particelle α dipende dalla differenza di energia tra il nucleo radioattivo da cui sono emesse e il nucleo finale. Le particelle α sono molto ionizzanti e le loro tracce in camera di Wilson sono quindi molto spesse; le loro traiettorie sono tipicamente rettilinee perché subiscono poche deviazioni (L. Meitner, L. Freitag e K. Freitag, *Zeitschrift für Physik* 37 (1926) 481).

mente che anche i raggi beta, provenienti da un puro emettitore beta, debbano possedere una energia primaria monocromatica. Per analogia con il caso delle alfa, se un nucleo A si trasforma in un nucleo B con emissione di un elettrone, secondo la legge di conservazione dell'energia e dell'impulso, l'energia dell'elettrone deve essere approssimativamente uguale alla differenza tra le masse del nucleo iniziale e finale ($M_A - M_B$).

Gli esperimenti di Kaufmann (e Becquerel) avevano mostrato che lo spettro energetico degli elettroni emessi dal radio era invece distribuito con continuità su un'ampio ventaglio di valori, una ipotesi confermata da esperimenti condotti da Friedrich Paschen nel 1904. I fisici non erano convinti che le sorgenti usate fossero effettivamente puri emettitori beta e inoltre si riteneva che, anche in caso di spettro primario monoenergetico, per qualche motivo, per esempio irraggiando, gli elettroni avrebbero potuto perdere energia nella fuga dalla sorgente radioattiva. In ogni caso una minaccia a questa apparente continuità dello spettro beta era dietro l'angolo.

Secondo trabocchetto – Esperimenti di assorbimento da parte della materia dei raggi beta emessi dall'uranio mostravano che l'intensità diminuiva secondo una legge esponenziale. Un comportamento analogo osservato nell'attinio venne quindi interpretato nel senso che anche i raggi beta provenienti da tale elemento dovevano essere omogenei nel carattere. Tale interpretazione era basata sui risultati di esperimenti condotti da Lenard, il quale aveva dimostrato che i raggi catodici, che sono identici ai raggi beta di bassa velocità, sono assorbiti secondo una legge esponenziale, era naturale in prima istanza supporre che una legge d'assorbimento esponenziale fosse da interpretare nel senso che anche i raggi beta fossero omogenei, cioè costituiti da particelle beta proiettate tutte con la stessa velocità. Tutto ciò appariva confermato nel caso di esperimenti che utilizzavano sorgenti composte, che emettevano particelle beta di natura diversa. In questo caso l'assorbimento sembrava *non* seguire la legge esponenziale. Ma sull'interpretazione del risultato di tali esperimenti non tutti concordavano: William Bragg e Heinrich Schmidt ritenevano che i motivi dell'assorbimento esponenziale potessero essere di natura diversa.

La legge esponenziale venne utilizzata anche da Meitner e Hahn per verificare la congettura secondo cui i raggi beta, come le alfa, sono monocromatici al momento dell'emissione. Le ricerche erano complicate dal fatto che le sostanze radioattive all'epoca non erano ancora state catalogate definitivamente. Ogni deviazione dalla legge sembrava infatti indicare la presenza di altri emettitori beta nella sostanza considerata. Utilizzando il presupposto che una singola sostanza emette un solo tipo di radiazione omogenea Hahn e Meitner individuarono nuove sostanze nel corso delle loro ricerche. Nel 1909 i due si mostravano fortemente a favore della analogia tra radiazione alfa e beta, una chiave interpretativa che di lì a poco risultò molto lontana dal vero.

Nel 1909 William Wilson, uno studente di Rutherford, riuscì a selezionare un fascio di raggi beta, con lo stesso impulso, e ne misurò l'assorbimento capovolgendo la visione delle cose: un fascio costituito da elettroni garantiti come monoenergetici non seguiva nemmeno lontanamente il comportamento esponenziale nel corso dell'assorbimento. Wilson riuscì a dimostrare che i precedenti esperimenti erano stati malinterpretati. Per gli elettro-



Raggi β prodotti da RaC in un campo magnetico di 215 gauss. Le traiettorie dei raggi β sono facilmente curvate da un campo magnetico. I raggi β possono subire deviazioni importanti e sono relativamente poco ionizzanti, le loro tracce in camera di Wilson sono dunque sottili (H. Staub, *Helvetica. Physica Acta* 9 (1936) 306).

ni dotati di eguale velocità “la ionizzazione non varia esponenzialmente con lo spessore attraversato..., ma segue, approssimativamente, una legge lineare. Il fatto che raggi omogenei non siano assorbiti secondo una legge esponenziale suggerisce che i raggi emessi da tali sostanze siano eterogenei”. Questa conclusione venne considerata rivoluzionaria da Soddy, che in ogni caso si chiese anche quanto i metodi impiegati da Wilson fossero raffinati da poter supportare tale affermazione. Meitner e Hahn non erano d'accordo e continuarono a rimanere convinti che ciascun emettitore produce soltanto un singolo gruppo di raggi beta di velocità ben definita, caratteristica della sostanza in questione.

Le problematiche schematicamente delineate sopra rendono soltanto vagamente l'idea di quanto fossero difficili gli esperimenti e la loro decifrazione.

Lo spettro beta: controversia e consenso

La prova dell'esistenza dello spettro monoenergetico degli elettroni dei decadimenti beta fu cercata con notevoli e ingegnosi sforzi dai migliori esperti di processi radioattivi. A partire dal 1911, grazie anche al miglioramento delle tecniche sperimentali, cominciò a rivelarsi la crescente complessità dello spettro beta. I raggi venivano separati per via magnetica e lo spettro delle velocità veniva analizzato con metodi fotografici. Nel 1911 il fisico franco-polacco Jean Danysz trovò ben 30 gruppi omogenei nello spettro del radio B+C e tra il 1912 e il 1913 una serie di esperimenti sembrò confermare che lo spettro beta era uno spettro discreto di linee. Alcuni ipotizzavano che la sovrapposizione di vari gruppi omogenei avrebbe potuto simulare uno spettro continuo. In particolare, Lise Meitner e Otto Hahn a Berlino tentarono di determinare lo spettro degli elettroni di decadimento beta con strumentazione d'avanguardia, addirittura utilizzando un analizzatore magnetico della quantità di moto degli elettroni che, dopo avere seguito una traiettoria ad arco di cerchio nel campo del magnete, venivano rivelati con emulsioni fotografiche. Tuttavia, l'uso delle lastre fotografiche era ancora molto primitivo. A quel tempo si ignorava la relazione fra l'intensità dell'irradiazione e l'annerimento della lastra, il quale dipende dall'energia e dall'intensità, dal tempo di esposizione e da molti dettagli sulla procedura di sviluppo (studi sistematici inizieranno solo verso la metà degli anni Venti).

Nel 1914 il consenso era piuttosto generale: gli spettri beta erano spettri di linee, a parte l'apparente anomalia del Radio E, che non mostrava traccia di linee; soltanto un'ampia banda diffusa emergeva dalla lastra fotografica.

Nel 1914 il giovane James Chadwick, che aveva vinto una borsa di studio ed era andato a Berlino per lavorare con Geiger, il quale aveva appena sviluppato un contatore a punta. Chadwick decide di utilizzarlo per contare le particelle beta negli spettri di linee del Ra B+C. I risultati sembravano in contraddizione con le misure effettuate con il metodo fotografico, come scrive a Rutherford: “Ottengo le foto con facilità e rapidamente, ma con il contatore non trovo l'ombra di una linea. Probabilmente c'è qualche stupido errore da qualche parte”. Chadwick trova invece conferma dell'esistenza di uno spettro continuo, di debole intensità, su cui sono sovrapposte soltanto quattro linee nella zona più bassa dell'energia. Il metodo fotografico sembrava quindi contribuire ad aumentare la percezione di linee discrete rispetto al background continuo a causa della forte sensibilità a piccolissime mutazioni dell'intensità. Chadwick era anche convinto che la distribuzione continua in energia non fosse dovuta a effetti secondari di *scattering*.

Non tutti accettarono la dimostrazione di Chadwick, secondo cui lo spettro beta era essenzialmente continuo, con una sovrapposizione di uno spettro di linee a bassa intensità. Ma soprattutto, non esisteva una spiegazione teorica per questo spettro. Poiché gli elettroni prodotti dagli emettitori alfa sono secondari, ovvero provengono da elettroni esterni al nucleo, lo stesso sarebbe potuto accadere con gli emettitori beta, così che restava la domanda: quali linee dello spettro beta sono prodotte dai primari e quali dai secondari? Alcuni, come la Meitner, pensavano che lo spettro di righe fosse primario e che fosse in par-

te “diluito” da effetti secondari di *scattering*. Lei riteneva che Chadwick vedesse uno spettro continuo semplicemente perché il suo apparato mancava della necessaria risoluzione in energia per individuare le singole linee. Inoltre riteneva improbabile che un sistema quantizzato come il nucleo atomico potesse emettere uno spettro continuo (i nuclei sono caratterizzati da stati discreti dell’energia, come era noto dai raggi alfa e gamma).

Intorno al 1920, sollecitato da Rutherford, Charles Ellis aveva portato avanti delle ricerche i cui risultati sembravano confermare che le linee nello spettro beta erano dovute a elettroni di conversione interna, come già aveva ipotizzato Rutherford a partire dal 1914, e non erano dovute al processo di decadimento: un raggio gamma proveniente dal nucleo viene assorbito da un elettrone atomico periferico: il processo fotoelettrico produceva quindi elettroni con energie discrete legate alle energie iniziali dei gamma.

Guidata dall’analogia tra l’emissione alfa e beta, la Meitner interpretava invece lo spettro beta come composto da una parte discreta primaria che aveva origine nel nucleo e una parte secondaria che aveva origine negli elettroni esterni. Charles Ellis e il suo collaboratore William Wooster non erano d’accordo con la Meitner e pensavano che lo spettro continuo fosse primario, anche se restava l’enigma di come il processo beta, che rappresenta la transizione fra due nuclei ben definiti, non rilasciasse una ben definita quantità di energia. La Meitner proponeva una perdita di energia, ma Ellis e Wooster contestavano che il meccanismo da lei proposto per la perdita di energia (Compton, *bremsstrahlung*, e *scattering* da elettroni atomici) non poteva quantitativamente rendere conto di tale perdita ed erano fermamente convinti che non si potesse mantenere la semplice analogia tra decadimento alfa e beta. Secondo Ellis era chiaro che il decadimento beta è un processo considerevolmente più complicato.

Nel 1925 la controversia tra Ellis e Meitner entra in una nuova fase. La possibilità che l’energia che l’energia fosse conservata solo statisticamente in un insieme di processi, come già nel 1919 aveva ipotizzato Franz Exner riguardo alla fisica microscopica in generale e come proprio in quel periodo stavano proponendo Bohr, Kramers e Slater, veniva invece respinta come spiegazione da Ellis e Wooster: “Noi riteniamo che l’energia si conservi esattamente in ciascuna disintegrazione, poiché se dovessimo considerare che l’energia si conserva solo statisticamente non ci sarebbero più difficoltà nello spettro beta continuo. *Ma una spiegazione di questo tipo sarebbe giustificata soltanto nel caso di fallimento di qualsiasi altro tentativo e sebbene si possa tenerla presente come una possibilità estrema, pensiamo che sia meglio non tenerla in considerazione per il momento* (corsivo nell’originale) (C.D. Ellis, W.A. Wooster, Proc. Cambridge Philos. Soc 22, p. 849, 1925).

Il dibattito restò molto acceso fino al 1927 quando Ellis e Wooster presentarono un risultato sperimentale definitivo secondo il quale la quantità di energia rilasciata in ciascuna disintegrazione beta corrisponde all’energia cinetica media delle particelle beta e non alla loro energia massima. Era noto da esperimenti di conteggio che un solo elettrone viene emesso dal nucleo in corrispondenza di ciascun decadimento. Misurarono l’effetto di riscaldamento prodotto quando un numero noto di atomi si disintegra all’interno di un calorimetro, le cui pareti sono così spesse che tutti i raggi beta ne siano bloccati. Usarono elettroni beta da radio E, per determinare l’energia di disintegrazione media di questi elettroni. Il risultato fornì $350 \pm 40\text{KeV}$, in eccellente accordo con l’energia media delle particelle beta valutata con metodi elettrici e in base alla distribuzione secondo uno spettro continuo, $390 \pm 60\text{KeV}$, e completamente incompatibile con il valore di 1050KeV previsto in base all’assunzione che tutti gli elettroni avessero la stessa energia di disintegrazione al momento dell’emissione: “in una disintegrazione beta il nucleo si spezza emettendo una quantità di energia che varia entro ampi limiti”. Ellis e Wooster ammisero che questa era una “curiosa conclusione”, tuttavia restava il fatto che questo difficile e cruciale esperimento calorimetrico rivelava un risultato molto profondo: *lo spettro primario è lo spettro continuo*.

Perché dunque molti elettroni emergevano dal nucleo con un’energia inferiore rispetto all’energia massima? Era possibile che l’energia non fosse conservata nel corso del de-

cadimento beta? Ellis sottolineava che il suo esperimento lasciava ancora aperta la possibilità di ricostituire il bilancio energetico attraverso uno spettro gamma continuo prodotto dagli elettroni facenti parte del sistema di "satelliti" previsto dal modello nucleare di Rutherford. Questa radiazione elettromagnetica era sospettata di essere portatrice dell'energia mancante, che non sarebbe stato assorbita dal calorimetro, sfuggendo all'osservazione.

L'anno successivo, attraverso un esperimento di notevole difficoltà, la Meitner e Wilhelm Orthmann ripeterono l'esperimento con un apparato migliorato e trovarono un eccellente accordo con i risultati di Ellis e Wooster provando che lo spettro gamma continuo ipotizzato da Ellis come eventuale responsabile dell'energia mancante non esisteva. La Meitner concludeva che "nel nucleo hanno luogo processi che seguono leggi che attualmente ci sono completamente sconosciute". Meitner scrisse a Ellis: "Abbiamo verificato i vostri risultati completamente. Mi sembra ora che non possa sussistere dubbio alcuno che voi foste completamente corretti nell'assumere che le radiazioni beta primarie sono non omogenee. Ma non capisco minimamente il significato di questo risultato". (Meitner a Ellis, 14 febbraio 1928).

I due esperimenti insieme furono cruciali. Per quasi trent'anni i migliori fisici sperimentali dell'epoca si erano cimentati in un'ardua impresa che alla fine aveva portato a stabilire che lo spettro primario era effettivamente continuo e tuttavia la struttura continua della distribuzione in energia degli elettroni emessi nel corso dei decadimenti beta nucleari era considerata un'anomalia sulla cui diagnosi e cura le opinioni differivano profondamente. In ogni caso il problema della conservazione dell'energia in questi processi era ormai pienamente alla ribalta.

Nuovi trabocchetti: i modelli nucleari

Nel 1909 lo scattering con le alfa su vari elementi aveva mostrato deflessioni a grande angolo (Geiger e Marsden). Due anni dopo, in base ai risultati di questi esperimenti, Rutherford aveva proposto il suo modello di atomo nucleare. Nel 1912 Rutherford riconosceva che il decadimento alfa è un fenomeno nucleare, ma era convinto che i decadimenti beta e gamma fossero dovuti a instabilità della distribuzione elettronica. Nel 1913 Bohr proponeva il primo modello dell'atomo di idrogeno riuscendo a spiegare lo spettro di righe emesso da questo elemento. Gli elettroni trovavano una collocazione come satelliti del nucleo. Vengono riconosciuti gli isotopi (lavoro di Aston con lo spettrografo di massa) e diviene chiaro che il numero atomico e la carica nucleare sono due parametri indipendenti. Nel 1913 Van der Broek aveva osservato che gli esperimenti di scattering di Geiger e Marsden si accordavano molto meglio con la formula di Rutherford se la carica nucleare del nucleo veniva posta uguale non alla metà del suo peso atomico A (come assumevano i due), ma al suo numero atomico Z . Van der Broek concludeva che se il nucleo consiste principalmente di particelle alfa doppiamente cariche "allora il nucleo deve anche contenere elettroni per compensare questa carica extra". Nello stesso anno Bohr pubblicava la sua trilogia "On the Constitution of Atoms and Molecules" in cui era presente l'ipotesi della particella beta come costituente nucleare. In base alla sua teoria Bohr era convinto che gli elettroni coinvolti nel processo di trasmutazione dovessero provenire direttamente dal nucleo, mentre tutti gli altri avevano origine nella parte esterna dell'atomo. Un anno dopo la scoperta dell'elettrone, si era compreso che anche i raggi beta erano elettroni con velocità prossime a quelle della luce, ma fu soltanto con il modello atomico di Bohr che divenne chiaro che le energie dei raggi beta sono troppo alte per essere di origine atomica. Questi elettroni dovevano quindi provenire dal nucleo, esattamente come i raggi gamma, molto più energici dei raggi X di origine atomica. Rutherford era preparato ad accettare l'ipotesi di elettroni nel nucleo, sia in base al discorso energetico, sia perché gli elettroni come costituenti nucleari avrebbero dato conto delle leggi di

spostamento radioattivo, dell'esistenza di isotopi, e altri fenomeni. Nel 1914, nell'osservare che "Il nucleo di idrogeno è l'elettrone positivo", Rutherford affermava in modo chiaro che l'atomo di elio (particella alfa) contiene quattro elettroni positivi (particelle H) e due negativi.

L'origine nucleare della particella beta venne generalmente accettata quasi subito, anche se questo non implicava che tutti i raggi beta emessi dalle sostanze radioattive dovessero necessariamente avere tale provenienza. I raggi primari potevano dare origine a effetti secondari di varia natura.

Negli anni 1915-1919 vengono proposti numerosi modelli nucleari. Tutti prevedevano elettroni nel nucleo: sufficienti protoni per rendere conto della massa, combinati con un certo numero di elettroni per rendere conto della carica. Così naturale eppure così sbagliato. La meccanica quantistica avrebbe mostrato che gli elettroni nucleari sono fonte di una serie di paradossi.

Il "doppietto neutro" di Rutherford

Nel 1919 Rutherford e i suoi collaboratori trovarono che il bombardamento con particelle alfa del nucleo di azoto dava origine a particelle secondarie penetranti che erano "probabilmente atomi di idrogeno". Rutherford concludeva che "l'atomo di idrogeno liberato è un costituente del nucleo di idrogeno", insieme alle particelle alfa e agli elettroni. L'importanza di questa scoperta è all'origine dell'invito a tenere una conferenza alla Royal Society. Nel giugno del 1920, nel corso della Bakerian Lecture "Nuclear constitution of atoms", Rutherford concludeva che i nuclei di idrogeno, di lì a poco denominati protoni, dovevano insieme agli elettroni e alle particelle alfa essere i costituenti fondamentali dei nuclei. La particella alfa veniva considerata un sottosistema del nucleo. All'epoca Rutherford era convinto dell'esistenza di una combinazione di tre protoni e un elettrone e nel corso della conferenza fece la congettura che "sembra molto probabile che un elettrone possa legare due nuclei di idrogeno e forse anche un nucleo". Una combinazione a legame molto forte (1-2 MeV) "una sorta di doppietto neutro". Notò anche che tale particella, dalle caratteristiche nuove, privo di campo esterno, sarebbe stata essenziale per costruire i nuclei pesanti: "Il suo campo esterno sarebbe praticamente zero, eccetto molto vicino al nucleo, e di conseguenza dovrebbe essere in grado di muoversi liberamente attraverso la materia". Questa combinazione fu subito chiamata neutrone, mentre protone fu il nome suggerito da Rutherford per il nucleo di idrogeno, dal termine *protyle* coniato da Prout nel 1815. La ricerca del neutrone iniziò subito e continuò nel corso degli anni venti da parte di Chadwick, collaboratore di Rutherford, il quale fu molto influenzato da questa ipotesi.

Fino al 1927 Rutherford costruirà macchinosi modelli di nuclei utilizzando le particelle alfa, gli elettroni e quelli che lui stesso chiamava "satelliti neutri", che insieme ai "satelliti carichi" si sarebbero mossi in orbite ben precise intorno al nucleo centrale carico positivamente. Il tutto era tenuto insieme da forze elettriche e magnetiche.

L'era dei paradossi

Il 7 febbraio 1929 Rutherford apre la "Discussione sulla struttura dei nuclei atomici" alla Royal Society elencando le principali acquisizioni degli ultimi 15 anni:

1. La prova della costituzione isotopica degli elementi
2. Il lavoro sulla trasmutazione artificiale degli elementi
3. Progressi nella spettroscopia a raggi gamma
4. La deviazione, dalla legge di scattering "alla Rutherford" particolarmente nel caso di nuclei leggeri, osservata da tempo.

Rutherford menziona l'interpretazione del decadimento alfa come penetrazione di una barriera di potenziale di altezza finita (Effetto tunnel: Gamow, Gurney e Condon), ma non dice nemmeno una parola sul decadimento beta.

La nuova meccanica quantistica si confronta con il nucleo. Emergono una serie di paradossi, ciascuno conseguenza della supposizione che gli elettroni siano costituenti del nucleo. Tali paradossi andavano di pari passo con il persistente mistero parallelo: perché gli spettri beta sono continui?

Nel periodo 1929-1933 i fisici sono alla ricerca di una cura per due problemi: lo spettro continuo del decadimento beta e la struttura del nucleo.

La parola ai teorici: le inquietudini di Niels Bohr

Nel 1929 la controversia tra Ellis e la Meitner si era conclusa con la questione aperta dello spettro beta continuo. I primi trent'anni di ricerca sullo spettro beta furono dominati dai fisici sperimentali. I teorici in genere furono spettatori. Quando il problema dello spettro beta fu riconosciuto come una vera e propria anomalia in un complesso di problemi centrati intorno alla meccanica quantistica relativistica, l'attenzione dei teorici ne fu attratta generando una nuova disputa tra due giganti della fisica teorica dell'epoca: Niels Bohr e Wolfgang Pauli.

Febbraio 1929, Bohr a Fowler: "Di recente ho riflettuto molto sulle possibili limitazioni ai teoremi di conservazione nella teoria quantistica relativistica".

Luglio 1929 Bohr a Pauli: "Il decadimento beta non si colloca fuori della meccanica quantistica?".

Pauli a Oskar Klein: "Con le sue considerazioni riguardo a una possibile violazione della conservazione dell'energia, Bohr si è messo su una strada completamente sbagliata".

Pauli a Bohr: "Hai intenzione di maltrattare ancora per molto la povera legge dell'energia?".

Novembre 1929, Rutherford a Bohr: "Ho sentito dire che sei sul sentiero di guerra [...] Attenderò prima di esprimere un'opinione, anche se la mia impressione è sempre che 'ci sono più cose in Cielo e in Terra di quante ne sogni la tua filosofia'".

Paul Dirac: "Preferirei mantenere la conservazione rigorosamente valida, costi quel che costi".

In conclusione, secondo Peter Debye la crescente evidenza a favore della distribuzione continua in energia degli elettroni primari emessi nel decadimento beta era diventato un argomento "di cui è meglio non parlare, come le nuove tasse".

Per capire gli anni 1929-1934 si deve tener presente che all'epoca la gente è in cerca di una cura comune per entrambi i problemi: quello della struttura del nucleo e i problemi dello spettro beta. Bohr rilegge il complesso di questi segnali misteriosi come un venir meno delle leggi della meccanica quantistica, in particolare della legge di conservazione dell'energia alle dimensioni nucleari. Gli elettroni confinati nel nucleo per giustificare fenomeni come il decadimento beta e la diffusione anomala di raggi gamma ed altri processi radiativi di alta energia sembravano perdere una serie di "diritti" ormai consolidati, come quello di essere dotati di spin. "Gli elettroni nucleari mostrano una incredibile passività", notava Bohr, "Siamo indotti a considerare la cattura o l'espulsione di un elettrone da parte di un nucleo semplicemente come la morte o la creazione, rispettivamente, dell'elettrone come entità meccanica. Non possiamo quindi sorprenderci se questi processi non dovessero obbedire a principi come le leggi di conservazione dell'energia e dell'impulso, la cui formulazione si basa essenzialmente sull'idea di particelle materiali". In questi chiari termini il fisico danese si esprimeva nel suo intervento *Atomic Stability and Conservation Laws* tenuto nel corso del Convegno di fisica nucleare organizzato da Fermi e Corbino nel 1931 a Roma, senza tuttavia menzionare una certa ipotesi che Pauli aveva messo in circolazione nel corso dell'ultimo anno.

Il “rimedio disperato” di Pauli

“Care signore e signori radioattivi, sono giunto a una disperata via di uscita [...] per salvare la legge della statistica e la legge dell’energia. Vale a dire la possibilità che possano esistere nel nucleo particelle elettricamente neutre, che chiamerò neutroni, che hanno spin $1/2$ e soddisfano il principio di esclusione [...] La massa dei neutroni dovrebbe essere dello stesso ordine di grandezza della massa degli elettroni [...] Lo spettro β continuo diventerebbe allora comprensibile assumendo che nel decadimento β un neutrone venga emesso insieme all’elettrone, in modo che la somma delle energie del neutrone e dell’elettrone rimanga costante. Non oso per ora pubblicare nulla su questa idea e mi rivolgo a voi confidenzialmente, cari radioattivi, con la domanda di come si possa fornire la prova sperimentale di questo neutrone, nel caso dovesse avere un potere di penetrazione uguale o circa dieci volte maggiore rispetto a quello di un raggio γ . [...] Ammetto che la mia via di uscita può apparire piuttosto improbabile *a priori* poiché se questi neutroni esistono li avremmo forse già visti da tempo. Ma solo chi osa riesce vincitore...”

La lettera scritta da Pauli ai fisici riuniti a Tübingen (4 dicembre 1930), ma in realtà diretta in particolare a Lise Meitner e Hans Geiger, era stato il primo appello “ufficioso” rivolto alla comunità scientifica in cui Pauli affermava con chiarezza la sua fede nella conservazione dell’energia per salvare la quale era necessario ipotizzare l’esistenza di quello che inizialmente aveva chiamato “neutrone”. Questa nuova particella, il cui ruolo era ancora ambiguo, avrebbe risolto il problema dello spin nucleare (in quanto particella neutra nel nucleo) e il problema dell’energia mancante nello spettro continuo degli elettroni, in quanto compagne di fuga di questi ultimi dal nucleo. Pauli era ancora reticente a parlare della sua “disperata via d’uscita” e si sfogava privatamente con gli amici. Nel gennaio del 1931 aveva scritto a Oscar Klein: “Mi è chiaro, certamente, che l’ipotesi [del “neutrone”] non va a genio a Bohr e ai bohristi. Proprio per questo motivo il discuterne mi dà un particolare piacere”. Il 16 giugno Pauli parlò a Pasadena ad un simposio su “Lo stato attuale del problema della struttura nucleare”. “Avanzai pubblicamente per la prima volta la mia idea di una particella neutra molto penetrante [...] mi sembrava ancora qualcosa di decisamente incerto, tuttavia, e così non feci stampare il mio intervento”. La stampa non mancò questo ghiotto boccone e il giorno dopo il “New York Times” usciva con la notizia. “Un nuovo abitante del cuore dell’atomo è stato introdotto oggi nel mondo della fisica quando il Dr W. Pauli del Politecnico di Zurigo ha postulato l’esistenza di particelle o entità che ha battezzato ‘neutroni’”.

Durante il Congresso di fisica nucleare del mese di ottobre, a Roma, né lui né Bohr menzionarono l’idea in pubblico, idea di cui Fermi si mostrò invece entusiasta nel corso di numerose conversazioni private. Il nome “neutrino” per la nuova particella neutra sembra sia stato coniato da Edoardo Amaldi, ma è entrato ufficialmente nella terminologia internazionale attraverso Fermi, nel periodo che va dalla Conferenza di Parigi del luglio 1932 e la Conferenza Solvay dell’ottobre 1933, quando fu usato ufficialmente da Pauli.

Nel 1931 Gamow aveva pubblicato il primo libro sulla fisica nucleare scritto da un fisico teorico, *Constitution of Atomic Nuclei and Radioactivity*. Nella prima pagina definisce il suo modello di nucleo: “In accordo con i concetti della fisica moderna assumiamo che tutti i nuclei siano costituiti da particelle elementari - protoni ed elettroni”. E aggiunge: “Le usuali idee della meccanica quantistica falliscono completamente nella descrizione del comportamento degli elettroni nucleari”. Nel manoscritto originale Gamow aveva disegnato un teschio tutte le volte che si parlava di elettroni nucleari.

Pauli aveva ormai le idee piuttosto chiare a riguardo, ma aspettava ulteriori conferme: “Non vedo alcuna ragione teorica per considerare la legge di conservazione dell’energia meno certa, per esempio, della legge di conservazione della carica elettrica. Da un punto di vista empirico, quello che mi sembrava decisivo era se gli spettri beta degli elettroni mostravano un limite superiore netto, oppure una distribuzione di Poisson che decresce all’infinito. Il primo caso, secondo me, avrebbe supportato la mia idea di una nuova parti-

cella. All'epoca la questione non era stata ancora decisa sperimentalmente, ma Ellis, che era presente a Roma, aveva già in progetto un esperimento per affrontare di nuovo questo problema". Verso la fine degli anni Venti era infatti emerso che gli spettri beta sembrano mostrare un valore limite ben preciso allo spettro di valori osservato sperimentalmente. Diversi esperimenti furono portati avanti in questo senso tra il 1929 e il 1932, da cui apparve chiara l'importanza dell'andamento verso la parte finale dello spettro.

Il neutrone diventa protagonista del nucleo

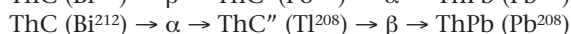
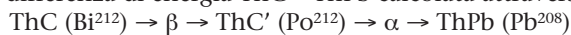
Il 17 febbraio 1932 Chadwick invia alla rivista *Nature* una nota in cui propone la seguente reazione nucleare alfa-Berillio: ${}^4\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \text{neutrone}$. Dopo dieci anni di ricerche infruttuose Chadwick è in grado di confermare l'esistenza di una particella neutra nel nucleo degli atomi. Il neutrone ha una massa approssimativamente uguale alla massa del protone.

Quasi tutti sono convinti che il neutrone sia uno stato legato protone-elettrone, una sorta di atomo di idrogeno collassato, del tipo di quello proposto da Rutherford nel 1920, incluso lo stesso Chadwick: "Il neutrone può essere descritto come un piccolo dipolo o, meglio, come un protone immerso in un elettrone". Gli elettroni diventano ospiti sempre più imbarazzanti nel nucleo, ma nonostante la scoperta del neutrone non significa che subito venga messo da parte il modello *elettrone-protone*. Ancora è difficile rinunciare all'idea che nei processi beta gli elettroni vengano fuori dai nuclei se non si trovano già là.

Già prima della Pasqua del 1932 Majorana aveva abbozzato una teoria dei nuclei leggeri basata su protoni e neutroni, entrambi considerati costituenti elementari, in cui i primi interagivano con i secondi attraverso forze di scambio. Majorana parlò delle sue idee con i colleghi di via Panisperna e Fermi, che aveva immediatamente capito l'interesse della teoria gli consigliò di pubblicare al più presto i suoi risultati, che sembravano di grande interesse. Però, Ettore non ne volle far nulla, perché considerava incompleto il suo lavoro. Il numero datato 19 luglio 1932 dello *Zeitschrift für Physik* conteneva il primo lavoro di Heisenberg in cui le forze nucleari venivano spiegate seguendo una analogia con le forze responsabili del legame chimico omeopolare. Le "Forze di scambio di Heisenberg", implicavano lo scambio sia delle coordinate spaziali sia degli spin, il che equivaleva a uno scambio di carica fra protone e neutrone che venivano così a "condividere" un elettrone. I tre lavori di Heisenberg usciti sullo *Zeitschrift für Physik* nel 1932-33 sono un ibrido fra vecchio e nuovo - modello di nucleo *protone-neutrone*, con un piede sul modello *protone-elettrone* per il neutrone. Il modello di Majorana per certi versi era migliore e fu lo stesso Heisenberg a convincere Majorana a pubblicare il suo lavoro, nel corso del soggiorno di quest'ultimo in Germania.

Ellis e Mott: qualcosa si conserva nel decadimento beta!

Nel maggio 1933 esce un lavoro di Ellis e Mott, che si rivela fondamentale per il seguito della storia. Essi considerano il decadimento beta di un nucleo P di energia E_P in un nucleo Q di energia E_Q : "Facciamo la nuova assunzione che $E_P - E_Q$ sia uguale al limite superiore dello spettro beta, cioè all'energia massima con cui una particella beta può essere espulsa". Di conseguenza, una particella beta poteva essere rilasciata con una energia inferiore a tale differenza, *ma non superiore a tale valore*. Essi puntualizzarono che la loro assunzione era consistente con l'ipotesi della particella neutra sostenuta da Pauli. Con questa supposizione considerano la serie del torio. Aggiungendo l'energia massima dello spettro beta all'energia monocromatica delle alfa trovano una sostanziale uguaglianza tra la differenza di energia ThC - ThPb calcolata attraverso i due processi di decadimento:



Il 2 giugno 1933, Pauli scrive a Heisenberg: "Per quanto riguarda la fisica nucleare sono tuttora fortemente convinto della validità del teorema dell'energia nel decadimento β , se si considera l'emissione di altre particelle leggere molto penetranti. Credo anche che il carattere di simmetria dell'intero sistema, così come l'impulso, debbano essere sempre conservati in tutti i processi nucleari".

Un recente lavoro di B.W. Sargent sembrava oltretutto confermare l'esistenza di un valore limite definito negli spettri beta relativi a differenti sorgenti radioattive.

Una nuova particella: il neutrino

"Così, durante il convegno Solvey sui nuclei atomici, a Bruxelles nell'ottobre 1933, ebbe luogo una chiarificazione generale... Ormai era evidente che, sulla base di questa concezione della struttura nucleare, i neutrini, come ora venivano chiamati, dovevano essere fermioni per conservare la statistica nel decadimento beta. Inoltre Ellis ci mise al corrente di un nuovo esperimento effettuato dal suo studente W.J. Henderson, che stabiliva un limite superiore netto allo spettro beta e ne consolidava la sua interpretazione. Alla luce delle nuove circostanze, le mie precedenti precauzioni nel differire la pubblicazione ora apparivano non necessarie. Alla fine della relazione di Heisenberg comunicai le mie idee sul neutrino" (W. Pauli, "On the earlier and more recent history of the neutrino", 1956).

Secondo la legge di conservazione dell'energia e dell'impulso, l'energia dell'elettrone deve essere approssimativamente uguale alla differenza tra le masse del nucleo iniziale e finale ($M_A - M_B$). Contrariamente alla radioattività alfa nella quale le particelle alfa vengono emesse con una energia ben determinata, l'energia degli elettroni emessi nel corso del decadimento beta risultava invece distribuita con continuità. A prima vista lo spettro continuo sembrava contraddire il principio di conservazione dell'energia.

Decadimento del neutrone

$Z^A \rightarrow (Z + 1)^A + \beta^- + \nu$

$E = (M_Z^A - M_{Z+1}^A)c^2$

$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \Rightarrow 0.7823\text{MeV}$

$m_n = 939.5656 \text{ MeV}$

$m_p = 938.2723 \text{ MeV}$

$m_e = 0.510999 \text{ MeV}$

$m_n - m_p = 1.293 \text{ MeV}$

Assumiamo inizialmente che il decadimento coinvolga come prodotti soltanto un protone e un elettrone. L'elettrone, molto più leggero, trasporta via la maggior parte dell'energia cinetica. Sarà una particella relativistica, il protone no. Il bilancio energetico è:

$$0.7823\text{MeV} = E_e^{cin} + \frac{1}{2m_p} p_p^2$$

Nel sistema di riposo del neutrone, la conservazione del momento richiede: $p_e = -p_p$

Facendo i calcoli si trova che l'energia cinetica dell'elettrone richiesta dallo schema di decadimento a due particelle fornisce i valori:

$E_e = 0.7819\text{MeV}$

$p_e = 1.188\text{MeV}$

I recenti esperimenti di Henderson stabilivano che lo spettro arrivava circa fino al valore massimo $E \approx M_A - M_B$, cioè l'energia complessiva messa in gioco nel processo di decadimento. Secondo Pauli, che considerava inattaccabile la legge di conservazione dell'energia, questo dato deponeva semplicemente a favore del fatto che il bilancio energetico complessivo, in cui andava assunto come riferimento costante tale valore, non poteva che essere di volta in volta suddiviso in diversi modi possibili fra l'elettrone e una fantomatica particella neutra, fornendo tutti i valori dello spettro al di sotto del valore massimo osservati.

Contraddizione con l'esperienza

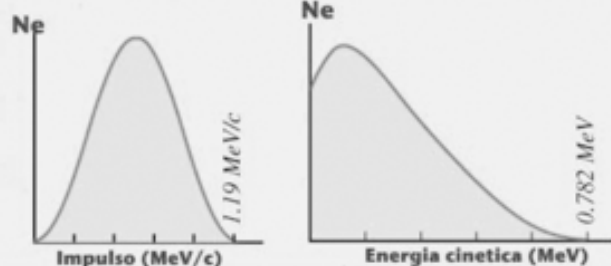
$$E_e = 0.7819 \text{ MeV}$$

$$p_e = 1.188 \text{ MeV/c}$$

Nell'ipotesi di decadimento a due corpi, l'impulso e l'energia risultano fissati a questi due valori.

Ma la natura non segue questo schema, a giudicare dalle distribuzioni dell'impulso e dell'energia osservate per gli elettroni emessi in corrispondenza dei singoli decadimenti.

Gli esperimenti mostrano che gli elettroni vengono emessi con un'energia che varia da zero a E_e .



Il "neutrone di Pauli", ormai ribattezzato neutrino, diventò quasi un argomento d'obbligo nel corso del settimo Convegno Solvay, tenuto all'insegna di "Struttura e proprietà del nucleo atomico", le discussioni vertevano sulla valanga di novità che avevano caratterizzato il 1932: il neutrone di Chadwick, il deuterio, il positrone scoperto da Anderson, le prime reazioni nucleari prodotte da protoni e deutoni artificialmente accelerati con il dispositivo messo a punto dagli inglesi John D. Cockcroft e Ernest T.S. Walton, un nuovo trionfo del Cavendish Laboratory di Rutherford, il più antico esempio di una nuova categoria di test per $E=Mc^2$, che diventa una chiave di volta per la valutazione dei bilanci energetici in fisica nucleare. Nel frattempo era stata anche scoperta la radioattività beta+, in cui vengono emessi positroni, piuttosto che elettroni.

Al convegno Pauli aveva ribadito: "L'interpretazione supportata da Bohr ammette che le leggi di conservazione dell'energia e dell'impulso non valgono nell'ambito dei processi nucleari, dove particelle leggere giocano un ruolo essenziale. Questa ipotesi non mi sembra né soddisfacente né tanto meno plausibile. In primo luogo la carica elettrica si conserva nel processo, e non vedo perché la conservazione della carica debba essere una legge più fondamentale rispetto alla conservazione dell'energia e dell'impulso... Se le leggi di conservazione non fossero valide, saremmo obbligati a concludere sulla base di queste relazioni che una disintegrazione beta ha luogo sempre con una perdita di energia e

mai con un guadagno; questa conclusione implica l'irreversibilità di questi processi rispetto al tempo, il che non mi sembra affatto accettabile" (Atti del Convegno Solvay, 1933).

Quello che fu per molto tempo un enigma doveva spiegarsi ormai, secondo Pauli, con l'emissione simultanea di una seconda particella che trasporta con sé il resto dell'energia ceduta dal nucleo al momento della disintegrazione: quello che convenzionalmente si chiama oggi antineutrino. Questo processo produce così un ugual numero di elettroni e antineutrini che trasportano con sé praticamente tutta l'energia liberata, eccetto il trascurabile rinculo relativo al nucleo.

Numero degli elettroni
No

Numero dei neutrini
Nv

Numero delle disintegrazioni

$E_1 + E_2 = E$

Energia degli elettroni

Energia dei neutrini

Energia totale

$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

La fiducia di Pauli nella simmetria

beta decay

$Z \rightarrow Z' + e^- + \bar{\nu}_e$

$q, E = qc$ p, KE_e

Energy spectrum of beta decay electrons from ^{137}Cs

$E = (M_Z^A - M_{Z+1}^A)c^2$

$Z^A \rightarrow (Z+1)^A + \beta^- + \bar{\nu}$

$^{137}_{55}\text{Cs} \rightarrow ^{137}_{56}\text{Ba} + e^- + \bar{\nu}$

L'argomentazione fondamentale di Pauli si può comprendere in base al seguente schematico ragionamento. Agli N_e elettroni emessi con energia E_1 corrisponde lo stesso numero N_v di antineutrini emessi con energia E_2 ($N_e = N_v$, vedi figura), in modo che in corrispondenza di ciascun processo accada sempre che $E_1 + E_2 = E$, l'energia totale liberata dal nucleo e corrispondente alla differenza tra le masse del nucleo iniziale e del nucleo finale. Lo spettro del decadimento beta ottenuto sommando sezione per sezione le distribuzioni relative a tutte le coppie elettrone-neutrino con energie "complementari" E_1 ed E_2 fornisce una "riga" ben determinata, come nel caso del decadimento alfa, in cui una particella alfa viene sempre emessa con un'energia definita corrispondente all'energia totale rilasciata nel corso del processo di disintegrazione.

Creazione e annichilazione di nuove particelle. Fermi e l'analogia con l'elettrodinamica

Il compito di assemblare tutti gli elementi in una teoria quantistica del decadimento beta fu messo in atto da Fermi, che fin dal Congresso di fisica nucleare tenuto a Roma nel

1931 conosceva bene il punto di vista di Pauli: Fermi “mostrò immediatamente un vivo interesse e un atteggiamento molto positivo verso la mia nuova particella neutra”.

Subito dopo il congresso Solvay, nel tardo autunno-inverno 1933, Fermi invia a *La Ricerca Scientifica* un primo lavoro preliminare in cui presenta a grandi linee una teoria della cui importanza era ben cosciente e per il quale era certo che sarebbe stato ricordato. Effettivamente rappresentava il coronamento della sua attività come fisico teorico fino a quel momento. Di lì a poco l'attività sperimentale avrebbe largamente invaso la sua vita scientifica.

All'inizio del 1934 Fermi invia una versione più completa alla rivista *Zeitschrift für Physik* e più tardi pubblica in italiano sul *Nuovo Cimento*: “È ben noto che nel cercare di costruire una teoria dei raggi β si incontra una prima difficoltà dipendente dal fatto che i raggi β primari escono dai nuclei radioattivi con una distribuzione continua di velocità che si estende fino a una certa velocità massima: ciò che a prima vista non sembra conciliabile col principio di conservazione dell'energia. Una possibilità qualitativa di spiegare i fatti senza dovere abbandonare il principio della conservazione dell'energia consiste, secondo Pauli, nell'ammettere l'esistenza del così detto “neutrino”, avente carica elettrica nulla e massa dell'ordine di grandezza di quella dell'elettrone o minore. Si ammette poi che in ogni processo β vengano emessi simultaneamente un elettrone, che si osserva come raggio β , e un neutrino che sfugge all'osservazione portando seco una parte dell'energia. Nella presente teoria ci baseremo sopra l'ipotesi del neutrino. Una seconda difficoltà per la teoria degli elettroni nucleari, dipende dal fatto che le attuali teorie relativistiche delle particelle leggere (elettroni o neutrini) non danno una soddisfacente spiegazione della possibilità che tali particelle vengano legate in orbite di dimensioni nucleari... Per comprendere tuttavia la possibilità dell'emissione dei raggi β , noi tenteremo di costruire una teoria dell'emissione delle particelle leggere da un nucleo in analogia alla teoria dell'emissione di un quanto di luce da un atomo eccitato nell'ordinario processo della irradiazione. Nella teoria dell'irradiazione, il numero totale dei quanti di luce non è costante; i quanti vengono creati all'atto della loro emissione da un atomo eccitato, e spariscono invece quando sono assorbiti. In analogia a ciò cercheremo di fondare la teoria dei raggi β sopra le seguenti ipotesi: ...” (Fermi, “Tentativo di una teoria dei raggi β ”, *Nuovo Cimento*)

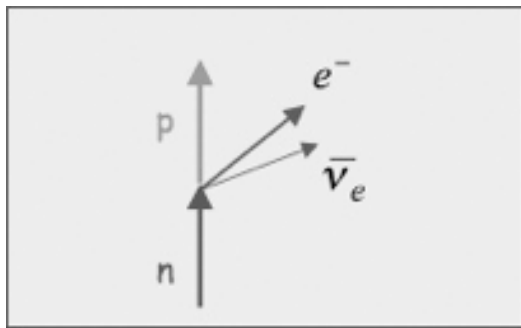
Il neutrino diventa così protagonista di una teoria del decadimento beta in cui compare una nuova coraggiosa ipotesi: “Elettroni e neutrini possono essere creati e distrutti [...] [La teoria] deve scegliersi in modo che ogni transizione da neutrone a protone sia accompagnata dalla creazione di un elettrone e di un neutrino; e che il processo opposto, la trasformazione di un protone in un neutrone, sia accompagnato dalla sparizione di un elettrone e di un neutrino”. Naturalmente valgono tutte le leggi usuali di conservazione, le differenze in energia, impulso, momento angolare e carica tra il nucleo padre e il nucleo figlio vengono trasportate via dall'elettrone e dal neutrino. Al centro della teoria di Fermi c'è l'idea che l'elettrone e il neutrino non preesistono nel nucleo, ma sono creati al momento della loro emissione. Fermi fu guidato in questo campo completamente nuovo dall'analogia con l'elettrodinamica. C'era infatti l'esempio del fotone, una particella creata all'atto di emissione della luce, e distrutta quando la luce viene assorbita. Questi processi erano ben compresi nella teoria quantistica del campo elettromagnetico, sviluppata da Dirac subito dopo la nascita della nuova meccanica quantistica. Che questo formalismo potesse essere applicato alla creazione e all'assorbimento di particelle qualsiasi, incluso l'elettrone, era stato mostrato nel 1927 da Jordan e Klein. Le prime tracce della dualità campo-particella si trovano nel lavoro di Einstein sull'effetto fotoelettrico, in cui viene introdotto il concetto di fotone. Nella fisica quantistica il concetto di particella e quello di campo sono totalmente intercambiabili. Ad ogni campo corrisponde un tipo di particelle tra loro identiche, ma vale anche il contrario. Il formalismo dei campi quantizzati proposto da Jordan e Klein consentiva in modo naturale la traduzione del linguaggio dei campi nel linguaggio delle particelle e viceversa e portava alla descrizione di particelle che sono iden-

tiche nel senso quantistico, che devono necessariamente obbedire alla statistica di Bose-Einstein, come i fotoni, o alla statistica di Fermi-Dirac, come i fermioni (elettroni, protone neutrone e neutrino). Fermi non lo aveva usato nella sua formulazione dell'elettrodinamica quantistica, ma ora diventava indispensabile.

Secondo Fermi il decadimento beta del nucleo è dovuto a un nuovo tipo di interazione che causa la trasformazione di un neutrone nel nucleo in un protone con la simultanea produzione di una coppia elettrone-neutrino, in analogia con quello in cui un protone emette un fotone; al fotone emesso corrisponde la coppia elettrone-neutrino. Per capire l'analogia di Fermi si può considerare il protone come un'antenna radio: la transizione del protone da uno stato quantico di energia più alta a uno di energia inferiore attiva una corrente elettrica che causa l'emissione di onde elettromagnetiche, il fotone. Nella visione di Fermi la trasformazione di un neutrone in un protone nel decadimento beta attiva un nuovo tipo di corrente, oggi chiamata corrente debole, che causa la creazione della coppia elettrone-neutrino. L'analogia non solo è alla base dell'uso di un certo tipo di formalismo matematico per descrivere l'interazione alla base del decadimento beta, ma si è rivelata anche sostanzialmente corretta sui tempi lunghi.

Fermi tratta il decadimento beta come una transizione che dipende dalla forza dell'accoppiamento tra gli stati iniziali e finali, nello stesso punto dello spazio, senza conoscere la natura dell'interazione. Questa interazione causa la trasformazione di un neutrone nel nucleo in un protone con la simultanea produzione di una coppia elettrone-neutrino.

Nel decadimento beta l'interazione converte un neutrone in un protone con l'emissione di un elettrone e di un (anti)neutrino. Se il neutrone fa parte di un nucleo atomico, questo processo trasmuta un elemento chimico in un altro. Armato di una teoria Fermi riesce a calcolare i tempi di decadimento corrispondenti a vari elementi radioattivi emettitori beta e riesce a fare una valutazione della costante di interazione G .



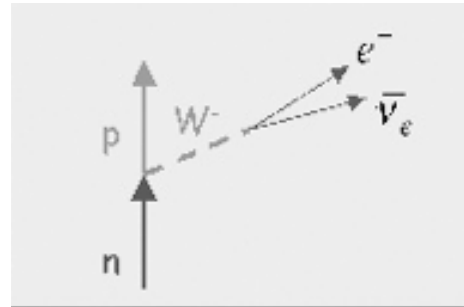
L'interazione debole non ha alcun analogo classico, ma Fermi usa la sua convinzione che la elettrodinamica quantistica sia un prototipo generale delle teorie di campo: formula perciò una teoria delle interazioni deboli che sfrutta per quanto possibile questa analogia. Questa tendenza è, in qualche misura, gratuita, tuttavia è avallata dai risultati che appaiono molto soddisfacenti. Per un fenomenologo come Fermi questo è il risultato più soddisfacente.

La teoria di Fermi contiene un singolo parametro libero, la costante di Fermi G , che determina la forza dell'interazione debole e può essere determinata misurando il tasso di decadimento di uno dei decadimenti permessi. G ha le dimensioni dell'inverso di una massa al quadrato, che con buona approssimazione è la massa del protone. Questo è il motivo per cui le interazioni di Fermi sono molto deboli nei fenomeni di bassa energia che includono i decadimenti radioattivi. La forza reale delle interazioni aumenta con l'energia, e una teoria più completa, la moderna teoria unificata è essenziale nei processi di alta energia.

L'impatto del lavoro di Fermi va molto al di là dello studio delle interazioni deboli. Il lavoro di Fermi fu il primo in cui la teoria quantistica dei campi fu utilizzata in senso moderno. Si deve considerare il primo lavoro moderno sulla fisica delle particelle elementari. Questa teoria ebbe un ruolo essenziale nello stimolare il fisico giapponese Hideki Yukawa a proporre la sua prima formulazione delle forze nucleari attraverso lo scambio di mesoni.

Possiamo anche dire che l'intuizione di Fermi si è rivelata più che fondata e da lì in poi la teoria delle interazioni deboli acquisterà progressivamente un assetto sempre migliore, inglobando al momento opportuno sia la non conservazione della parità che la riformulazione basata sui bosoni intermedi W^+ , W^- e Z^0 , che chiuderanno trionfalmente il cerchio in quella che oggi si chiama l'unificazione elettrodebole, nella quale l'interazione debole si ricongiungerà con l'elettrodinamica quantistica superando ogni aspettativa dello stesso Fermi. L'analogia di Fermi si è quindi rivelata corretta a un livello molto profondo, ma nelle teorie unificate, che hanno raggiunto la maturità negli anni sessanta, la relazione tra interazione debole e elettromagnetica si è rivelata molto più intima di quanto lo stesso Fermi avrebbe potuto sospettare. Come nel caso dell'induzione elettromagnetica l'interazione tra correnti deboli è mediata da un campo, i cui quanti, i bosoni intermedi W e Z^0 sono stati finalmente rivelati all'inizio degli anni ottanta (Carlo Rubbia e Simon van der Meer).

Ora sappiamo che le interazioni debole e elettromagnetica sono differenti manifestazioni della stessa forza, la forza elettrodebole. Poiché i W hanno una massa molto grande, la teoria di Fermi resta in molti casi una eccellente approssimazione per descrivere processi in cui l'energia a disposizione è molto minore dell'energia di massa dei W , una condizione non soltanto ben soddisfatta dalla radioattività beta, ma anche da tutti i processi di decadimento delle particelle elementari.



Il neutrino da “poltergeist” a particella

Dobbiamo riconoscere a Bruno Pontecorvo, circa dieci anni dopo la geniale formulazione di Enrico Fermi, il merito di avere capito che la proposta di Pauli avrebbe raggiunto la sua naturale conclusione solo nel momento in cui si fosse rivelato un neutrino emesso in un processo di decadimento, che avendo viaggiato nello spazio nella direzione prevista dalle leggi di conservazione, avrebbe prodotto un evento (una reazione) a distanza dal suo luogo di produzione (B. Pontecorvo, “Inverse β process,” Report P.D.-141, Chalk River Laboratory, 21 maggio 1945).

Questo avverrà solo molti anni dopo, nel 1956, quando finalmente Cowan e Reines, con pazienza certosina, identificheranno reazioni indotte da neutrini.

Poiché i prodotti di fissione dell'uranio decadono per via beta, ci sarebbe stato un enorme numero di neutrini vicino a un reattore nucleare. Naturalmente sarebbe stato possibile individuarli soltanto indirettamente. Cowan e Reines usarono un rivelatore a scintillatori liquidi proponendosi lo scopo di rivelare la reazione *antineutrino + protone* → *positrone + neutrone* (decadimento beta inverso). Questo significava che dovevano individuare contemporaneamente un neutrone e un positrone. Il positrone è carico e quindi può essere rivelato direttamente. Per trovare il neutrino usarono la reazione *neutrone + ⁴⁸Cd¹¹³ → ⁴⁸Cd¹¹⁴ + gamma*. Fu individuata la coincidenza ritardata tra due raggi gamma prodotti dall'annichilazione del positrone e dei gamma emessi quando un rivelatore al cadmio catturava il neutrone e si ritenne che in base all'esperimento l'esistenza del neutrino fosse stata accertata direttamente.

Cowan e Reines inviarono un telegramma a Pauli: “Siamo lieti di informarla che abbiamo definitivamente rivelato i neutrini da frammenti di fissione osservando il decadimento beta inverso di protoni”.

Dopo la morte di Pauli fu trovata fra le sue carte la bozza di una risposta che non era stata mai spedita: “Grazie per il messaggio. Tutto arriva a colui che sa aspettare”.

Bibliografia

- C. JENSEN, *Controversy and Consensus: Nuclear beta Decay 1911-1934* (Birkhäuser, 2000).
- A. PAIS, *Inward Bound. Of Matter and Forces in the Physical World* (Clarendon Press & Oxford University Press, Oxford–New York, 1986), pp. 1-436.
- M. MALLEY, "The discovery of the beta particle", *American Journal of Physics* 39 (dicembre 1971), 1454-1461.
- L.M. BROWN, "Nuclear structure and beta decay (1932-1933)", *American Journal of Physics* 56 (1988), 982-988.
- W. PAULI, "On the earlier and more recent history of the neutrino," in K. Winter (a cura di), *Neutrino Physics*, (Cambridge University Press, Cambridge, 1991), pp. 1-25; cit. a pp. 4-5.
- A. FRANKLIN, "The road to the neutrino", *Physics Today* (febbraio 2000), 22-28.
- L.M. BROWN, "The idea of the neutrino", *Physics Today* (settembre 1978), 23-28.
- R.H. STUEWER, "The nuclear electron hypothesis," in W. R. Shea (a cura di) *Otto Hahn and the Rise of Nuclear Physics* (Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1983), pp.19-67.
- E.J. KONOPINSKI, "Fermi's theory of beta-decay", *Reviews of Modern Physics* 27 (luglio 1955) 254-257.
- E.L. WILSON, "Fermi's theory of beta decay", *American Journal of Physics* 36 (1967) 1150-1160.
- N. CABIBBO, "Le interazioni deboli" in C. Bernardini e L. Bonolis (a cura di), *Conoscere Fermi* (Società Italiana di Fisica, Bologna 2001).
- N. CABIBBO, "Fermi's tentativo and weak interactions", in *Proceedings of the International Conference "Enrico Fermi and the Universe of Physics", Rome, September 29-October 2, 2001*.
- S.A. WATKINS, "Lise Meitner and the beta-ray energy controversy: An historical perspective", *American Journal of Physics* 51 (1983), 551-553.
- M. CINI, "Fermi e l'elettrodinamica quantistica" in C. Bernardini e L. Bonolis (a cura di), *Conoscere Fermi* (Società Italiana di Fisica, Bologna 2001).
- S. SCHWEBER, "Fermi and Quantum Electrodynamics (QED)" in *Proceedings of the International Conference "Enrico Fermi and the Universe of Physics", Rome, September 29-October 2, 2001*.
- S.S. SCHWEBER, "Enrico Fermi and Quantum Electrodynamics, 1929-32", *Physics Today* (giugno 2002) 31-36.
- L. BONOLIS, "Bruno Pontecorvo, from slow neutrons to oscillating neutrinos", *American Journal of Physics* 73 (2005) pp. 487-499.



Salice Terme. Discussione in aula, al centro C. Bernardini.