



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Note sulla biografia scientifica di Ettore Majorana, il Grande Inquisitore

Relatore

Prof. Giulio Peruzzi

Laureando

Filippo Festa

Anno Accademico 2019/2020

"Un uomo solo non può nulla
contro le correnti del tempo"

Ludwig Boltzmann

Prefazione al II Volume sulla Teoria dei Gas

Indice

1 L'uomo e lo scienziato, il Grande Inquisitore	1
1.1 Introduzione	1
1.2 Il Grande Inquisitore	2
1.3 Contributi alla fisica	4
2 La produzione scientifica	6
2.1 Fisica atomica e molecolare	6
2.2 Fisica nucleare	10
2.3 Teoria quantistica dei campi e teoria dei gruppi	12
2.4 Studi ulteriori.	16
3 Conclusioni	17

Sommario

Ettore Majorana, uomo di scienza vissuto nella prima metà del secolo scorso, è stato membro per una parte della sua vita del famoso gruppo di ricerca in ambito fisico “i ragazzi di via Panisperna”, in cui ha collaborato attivamente nei panni di teorico puro. Il soprannome attribuitogli dai compagni e dagli amici dell’epoca, il “Grande Inquisitore”, gli calzava particolarmente a pennello: egli aveva la dote di essere un critico straordinariamente attento sia riguardo al proprio lavoro, che verso quello altrui, e un’attitudine di matematico che gli ha permesso di vedere lontano nello sviluppo della fisica teorica, e di esserne così un pioniere.

Questo elaborato si prefigge inizialmente di tratteggiare la personalità e il temperamento di Ettore Majorana, che si delineano a partire sia dalle lettere alla famiglia e agli amici, sia dalle testimonianze di chi in prima persona lo ha conosciuto raccolte negli anni. Secondariamente, la tesi vuole tracciare i punti essenziali degli studi di Majorana, scientifici e non, in un contesto storico di ampio respiro, basandosi sia su fonti primarie, come articoli ufficiali e materiale inedito mai pubblicato, che su fonti secondarie, elaborate da diversi autori dopo la sua misteriosa scomparsa, avvenuta la notte fra il 25 e il 26 marzo 1938.

Capitolo 1

L'uomo e lo scienziato

1.1 Introduzione

Nella prima metà del XX secolo la comunità scientifica occidentale è in pieno fermento di idee: da una parte si assiste alla formulazione della teoria della relatività einsteiniana, dall'altra alla nascita della teoria dei quanti a partire da esperimenti che misero in luce profonde lacune della fisica classica nella descrizione del mondo atomico e subatomico.

È in questo stimolante contesto che nel 1927 vengono a crearsi i presupposti per la fondazione di una scuola di fisica moderna a Roma attorno alla figura di Enrico Fermi, grazie al siciliano Orso Mario Corbino, direttore dell'istituto di fisica romano in via Panisperna, e al fratello Epicarmo, alto personaggio politico dell'epoca e ministro durante il fascismo. Nascono così “i ragazzi di via Panisperna”, noti al tempo con il nome di “ragazzi di Corbino”, uno dei più famosi gruppi nella storia della fisica sia a livello teorico che sperimentale, formato da: Fermi, detto il “papa”, Franco Rasetti, Edoardo Amaldi, Emilio Segré, chiamato il “basilisco” a causa del suo carattere caustico, Ettore Majorana, detto il “Grande Inquisitore” perché “*sempre critico nei confronti del lavoro altrui come del proprio*”¹, il chimico Oscar D'Agostino, e Bruno Pontecorvo, soprannominato “cucciolo” a causa della giovane età.

Ettore si inserisce all'interno del gruppo non ancora laureato, ma già dai suoi primi lavori accademici, pre e postlaurea avvenuta nel 1929, si riconosce una strabiliante essenzialità nel rigore formale e un approccio analitico originale. In questi primi anni le assidue ricerche scientifiche in via Panisperna e le pubblicazioni dell'epoca testimoniano infatti di un Majorana fortemente impegnato nello studio teorico, spesso frutto di discussione con Fermi.

La risoluta insistenza di Enrico è determinante nel convincere Ettore a condurre un viaggio formativo sovvenzionato dal CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) a Lipsia e Copenhagen nella prima metà del 1933, con lo scopo di conoscere due grandissime personalità, fondamentali per lo sviluppo della meccanica quantistica: Werner Karl Heisenberg e Niels Bohr. Questo viaggio è un punto di svolta nella vita di Majorana per almeno tre motivi. In primo luogo la sua ultima pubblicazione a noi pervenuta, datata 1937, è un lavoro la cui stesura preliminare termina intorno al 1933; secondariamente in Germania avvia un rapporto di amicizia e di stima reciproca con Heisenberg, probabilmente il legame più significativo che stringerà sul piano umano. Infine, ma non per importanza, nel periodo che va dall'autunno del 1933, stagione del ritorno a Roma dal viaggio europeo, e la fine del '37, anno del concorso nella penisola per tre cattedre in fisica teorica, si apre una profonda frattura fra Ettore e i restanti colleghi di via Panisperna: il Majorana raramente si presenta all'Istituto di fisica romano e non parla più di fisica con i suoi vecchi compagni, che lo trovano “*ammalato nel corpo e impenetrabile nello spirito*”².

¹ Umberto Bartocci: *La scomparsa di Ettore Majorana: un affare di stato?* Editore Andromeda, Bologna 1999, p.33.

² Leandro Castellani: *Dossier Majorana*. Fratelli Fabbri Editori, Milano 1974, p.74.

Amaldi racconta: *“Non pochi tentativi fatti da Giovanni Gentile jr., da Emilio Segré e da me per riportarlo a fare vita normale furono senza risultato. Ricordo che nel 1936 non usciva che raramente di casa, neanche per andare dal barbiere, così che i capelli gli erano cresciuti in modo anormale; in quel periodo qualcuno degli amici che era andato a trovarlo gli mandò a casa, nonostante le sue proteste, un barbiere”*³.

1.2 Il Grande Inquisitore

Majorana è un teorico puro, dotato di uno spiccato intuito matematico che gli permette di calarsi a fondo nell'interpretazione dei fenomeni fisici. Di questi Ettore riesce a leggere eleganti simmetrie che lo portano ad approcci originali per l'epoca; in buona sostanza egli è un pioniere. Usando le più calzanti parole di Fermi: *“Ettore Majorana ha al massimo grado quel raro complesso di attitudini che formano il fisico teorico di gran classe”*⁴; e in un ricordo risalente alla scomparsa di Ettore nel 1938 raccontato da Giuseppe Cocconi, al tempo assistente di fisica presso l'università di Roma, sempre Fermi sostiene: *“Perché, vede, al mondo ci sono varie categorie di scienziati; gente di secondo e terzo rango, che fan del loro meglio ma non vanno molto lontano. C'è anche gente di primo rango, che arriva a scoperte di grande importanza, fondamentali per lo sviluppo della scienza. Ma poi ci sono i geni, come Galileo e Newton. Ebbene, Ettore era uno di quelli. Majorana aveva quel che nessun altro al mondo ha; sfortunatamente gli mancava quel che invece è comune trovare negli altri uomini, il semplice buon senso”*⁵.

Qualche tempo dopo l'ingresso nei “ragazzi di Corbino” Ettore ha già un livello di comprensione della fisica tale da poter parlare da pari a pari con Fermi, il quale non di rado ne resta meravigliato. Il loro primo incontro avviene nel periodo in cui Enrico sta lavorando al modello statistico che prenderà poi il nome di modello di Thomas-Fermi e il discorso con Majorana riguarda pure questa nuova ricerca. Fermi gli mostra i suoi recenti lavori sull'argomento, e in particolare la tabella in cui sono raccolti i valori del cosiddetto potenziale universale di Fermi, da lui calcolato in modo non analitico. Ettore, scettico, il giorno seguente si presenta di nuovo all'Istituto chiedendo senza alcun preambolo a Enrico di vedere la tabella del giorno prima. Estrae così dalla tasca un foglio su cui aveva scritto una analoga tabella da lui calcolata nelle ventiquattro ore precedenti, trasformando l'equazione differenziale non lineare di Thomas-Fermi in una equazione di Riccati che poi aveva risolto analiticamente. Dopo aver constatato che i due risultati sono in pieno accordo fra loro, non riesce a nascondere la sua meraviglia. Questo episodio è narrato in dettaglio da Emilio Segrè, il quale scherzosamente sostiene che la facilità con cui Majorana esegue a memoria le operazioni aritmetiche più complicate sarebbe potuta diventare un numero da teatro di varietà.

In questi anni di partecipazione al gruppo romano talvolta Majorana dice *“di aver fatto durante la sera precedente il calcolo o la teoria di un fenomeno non chiaro che era caduto sotto l'attenzione sua”*⁶ o dei suoi colleghi in quei giorni. Dopo una discussione laconica, e dopo aver tirato fuori *“il pacchetto delle sigarette Macedonia (era un fumatore accanito) sul quale erano scritte, in una calligrafia minuta ma ordinata, le formule principali della*

³ Erasmo Recami: *Il caso Majorana: epistolario, documenti, testimonianze*. Arnoldo Mondadori Editore, Milano 1987, p.213.

⁴ Erasmo Recami: *Il caso Majorana...*, cit., p.172.

⁵ Erasmo Recami: *Il caso Majorana...*, cit., p.22.

⁶ Erasmo Recami: *Ricordo di E. Majorana a sessant'anni dalla sua scomparsa: l'opera edita ed inedita*. Quaderni di Storia della Fisica issue no.5, 1999, p.27.

sua teoria o una tabella di risultati numerici”⁷, Ettore riporta su una lavagna solo quella parte dei risultati necessari per chiarire il problema. Infine, una volta “*finita la discussione e fumata l’ultima sigaretta*”⁸, accartoccia il pacchetto e lo butta nel cestino insieme alle sue soluzioni.

Per tutta la vita Majorana appare infatti insensibile nel riconoscere la caratura del proprio lavoro, del quale da un lato evita la pubblicazione, dall’altro spesso discute, come testimonia Gian Carlo Wick, con un tono distaccato, ironico e senza darsi importanza. Particolarmente emblematico è un episodio avvenuto nel 1932, poco dopo la scoperta di Chadwick del neutrone. Anticipando il lavoro del sovietico Dmitri Ivanenko, Majorana capisce che è fondamentale, per spiegare la stabilità del nucleo atomico e la densità costante della materia nucleare, che i protoni e i neutroni costituenti il nucleo siano legati da forze quantistiche originate dalla loro indistinguibilità fermionica, da forze di scambio ora a noi note come forze di Heisenberg-Majorana. Nonostante il gruppo romano e Fermi comprendano “*immediatamente l’originalità e l’importanza di tali teorie*”⁹, Majorana non vuole pubblicare nulla, non permette a Enrico di parlarne all’imminente congresso di Parigi agli inizi di luglio, e non si rammarica come i colleghi quando nello stesso anno Heisenberg pubblica le sue considerazioni sullo stesso argomento.

Questo quadro riflette l’eccezionale spirito critico che il “Grande Inquisitore” possiede: la sua estrema esigenza di redigere degli studi dal carattere più omnicomprensivo possibile ed espressi in modo matematicamente rigoroso è una caratteristica che non lo abbandonerà mai. Per di più il suo giudizio non migliora nemmeno quando riguarda gli altri, come riportano alcune testimonianze fra cui anche quella di Franco Rasetti: “*Ben raramente ho sentito Majorana apprezzare il lavoro di qualcuno; anche i più grandi fisici teorici di quell’epoca erano trattati da Majorana così: con un certo disprezzo*”¹⁰; oppure gli ancora più caustici commenti di Ettore riguardo il lavoro di Giulio Racah, allora professore di fisica all’università di Pisa, in una lettera indirizzata all’amico Gentile datata 21 novembre 1937: “*La prima parte non è originale e anche come matematica è traballante: Racah non sa, o non crede, che gli spinori hanno due valori e ne trascura le conseguenze. Cose che succedono sempre quando si impara da altri (Pauli) piuttosto che da se stessi*”¹¹.

Questa tagliente attitudine la si può tuttavia inquadrare in un contesto di più ampio respiro, considerando da un lato la sua timidezza e ritrosia al rapporto umano, dall’altro il suo carattere gioviale, sarcastico e irriverente nei confronti degli amici più stretti. Molti dei grandi scienziati dell’epoca che l’hanno conosciuto lo ricordano come poco comunicativo e introverso: Hans Bethe riesce a scambiare qualche parola con Ettore solamente due o tre volte durante il suo soggiorno a Roma nel 1931. Léon Rosenfeld, fisico belga che incontra Majorana a Copenhagen nel ‘33, a questo riguardo rammenta: “[Ettore] *Era molto timido e si accontentava di ascoltare senza prendere parte alla conversazione, anche se l’espressione dei suoi occhi rivelava che egli ascoltava attentamente e aveva le sue proprie idee... L’unico, apparentemente, con cui conversava liberamente era Placzek, presumibilmente perché lo conosceva già da Roma. Il risultato fu che si attaccò a Placzek, e in effetti non lo si vide mai senza di lui*”¹². Al contrario, Majorana si mostra in tutta la sua autenticità nell’intimità degli affetti, e in modo particolare con gli amici più cari. Gastone

⁷ Ibidem.

⁸ Ibidem.

⁹ Leandro Castellani: *Dossier...*, cit., p.51.

¹⁰ Leandro Castellani: *Dossier...*, cit., p.46.

¹¹ Erasmo Recami: *Il caso Majorana...*, cit., p.161.

¹² Erasmo Recami: *Il caso Majorana...*, cit., p.137-138.

Piqué, compagno fraterno di Ettore sia al liceo Tasso di Roma che durante i primi anni di ingegneria, oltre a ricordare la giovialità dell'amico ne ricorda l'affetto sincero, e confida quanto siano state importanti le parole di calore e conforto del Majorana in una lettera inviata in occasione della morte del padre. Oltre a questo aspetto, nelle corrispondenze con Gastone si legge di un Ettore giocoso, anche se a volte dalla sua autoironia traspare una velata amarezza, come testimonia una lettera risalente al 17 ottobre 1927: *“Devi sapere che mi sono dato al più scientifico dei passatempi: non faccio nulla e il tempo passa lo stesso. [...] Se non mi viene un accidente, verrò tra pochi giorni. Né devi credere che sia impossibile che mi venga un accidente nel fiore dell'età; al contrario abbilo per molto verosimile. Infatti io sono stato fin dalla nascita un genio ostinatamente immaturo; il tempo e la paglia non sono serviti a nulla e non serviranno mai, e la natura non vorrà essere così maligna da farmi morire immaturamente d'arteriosclerosi”*¹³. In un'altra lettera esemplare datata 21 novembre 1937 e rivolta a Giovanni Gentile jr., compagno liceale di Majorana che resterà suo amico fraterno per tutta la vita, si ritrova il caratteristico humor di Ettore, che dopo essere stato nominato professore di fisica teorica fuori concorso all'università di Napoli *“per alta e meritata fama”* commenta: *“Pio XI è molto vecchio ed io ho ricevuto un'ottima educazione cristiana; se al prossimo conclave mi fanno papa per meriti eccezionali, accetto senz'altro”*¹⁴.

1.3 Contributi alla fisica

La produzione scientifica ufficiale della troppo breve attività di ricerca di Ettore Majorana si può suddividere in due fasi: la prima comprende i lavori di fisica atomica e molecolare (contrassegnati dal numero 1 al 7), la seconda incorpora i lavori sulla fisica del nucleo e le proprietà dei corpuscoli elementari (numero 8, 9 e 10). Di seguito si trova la lista completa delle pubblicazioni di Ettore Majorana datate e in ordine cronologico:

1. *“Sullo sdoppiamento dei termini Roentgen ottici a causa dell'elettrone rotante e sulla intensità delle righe del Cesio”*, in collaborazione con Giovanni Gentile Junior, Rendiconti Accademia Lincei, vol.8, pp.229–233 (1928)
2. *“Ricerca di un'espressione generale delle correzioni di Rydberg valevole per atomi neutri o ionizzati positivamente”*, Nuovo Cimento, vol.6, pp.14-16 (1929)
3. *“Sulla formazione dello ione molecolare di He”*, Nuovo Cimento, vol.8, pp.22-28 (1931)
4. *“I presunti termini anomali dell'Elio”*, Nuovo Cimento, vol.8, pp.78-83 (1931).
5. *“Reazione pseudopolare fra atomi di Idrogeno”*, Rendiconti Accademia Lincei, vol.13, pp.58-61 (1931)
6. *“Teoria dei tripletti P' incompleti”*, Nuovo Cimento, vol.8, pp.107-113 (1931)
7. *“Atomi orientati in campo magnetico variabile”*, Nuovo Cimento, vol.9, pp.43-50 (1932)
8. *“Teoria relativistica di particelle con momento intrinseco arbitrario”*, Nuovo Cimento, vol.9, pp.335-344 (1932)
9. *“Uber die Kerntheorie”*, Zeitschrift für Physik, vol.82, pp.137-145 (3 marzo 1933)

¹³ Erasmo Recami: *Il caso Majorana...*, cit., p.112

¹⁴ Erasmo Recami: *Il caso Majorana...*, cit., p.161

“*Sulla teoria dei nuclei*”, La Ricerca Scientifica, vol.4 (1), pp.559-565 (11 maggio 1933)

10. “*Teoria simmetrica dell’elettrone e del positrone*”, Nuovo Cimento, vol.14, pp.171-184 (1937)
11. “*Il valore delle leggi statistiche nella fisica e nelle scienze sociali*” (pubblicazione postuma, a cura di G. Gentile Jr.), Scientia, vol.36, pp.55-66 (1942)

Ettore Majorana pubblica nove dei suoi dieci lavori accademici dal 1928 al 1933, dimostrando la sua capacità di dare contributi fondamentali in settori diversi della ricerca fisica in tempi molto brevi. A questi possiamo anche includere “*Sulla meccanica dei nuclei radioattivi*”, la tesi di laurea che nel 6 luglio 1929 gli valse la lode e venne redatta sotto la supervisione del relatore Enrico Fermi, e “*Il valore delle leggi statistiche nella fisica e nelle scienze sociali*”, pubblicato a cura di Giovanni Gentile Jr. dopo la scomparsa di Majorana. Citando quanto riportato da Edoardo Amaldi, un esame di questi lavori e la dedizione di Majorana rivelano “*una profonda conoscenza dei dati sperimentali anche nei più minuti dettagli, una disinvoltura non comune, soprattutto a quella epoca, nello sfruttare le proprietà di simmetria degli stati per semplificare i problemi o per la scelta della più opportuna approssimazione per risolvere quantitativamente i singoli problemi*”¹⁵.

Ad ogni modo, in realtà larga parte dei suoi lavori non è mai stata pubblicata ufficialmente, rimanendo sconosciuta alla maggior parte della comunità scientifica. Oltre agli appunti delle lezioni universitarie tenute a Napoli tra il gennaio e il marzo 1938, Majorana lascia una consistente raccolta di scritti inediti che comprende cinque “*Volumetti*”, dodici “*Fascicoli*” e diciotto “*Quaderni*”. Questa raccolta non solo è interessante dal punto di vista accademico, ma fornisce altre importanti indicazioni sullo sviluppo delle pubblicazioni, che si rivelano essere l’ultimo passo di lunghi e diligenti studi: anche per i più dotati la scienza non è un semplice gioco di intuizioni, come spesso viene dipinta nell’immaginario collettivo. Inoltre, dal materiale inedito pare che la realizzazione di tutti gli studi di Ettore a noi pervenuti sia avvenuta entro il ’33, pure una bozza preliminare dell’ultimo articolo, “*Teoria simmetrica dell’elettrone e del positrone*”, che Ettore pubblicherà alle soglie del concorso del 1937. Di fatto, nonostante alcuni indizi contenuti in delle lettere di Majorana e in testimonianze dell’epoca, non è noto a cosa Majorana abbia lavorato fra il 1934 e il 1938.

I “*Volumetti*” sono le sue note personali di fisica teorica, prima di studente e poi di ricercatore, redatti tra il 1927 e il 1930. Le caratteristiche che colpiscono di più sono il rigore e l’ordine: l’opera è divisa in cinque capitoli numerati, ognuno datato con il giorno del suo completamento e preceduto da un indice che ne riassume il contenuto. Contrariamente, il quinto e ultimo “*Volumetto*” non presenta queste caratteristiche perché rimasto incompleto; inoltre sembra sia stato scritto non oltre il ’32, dato che al suo interno troviamo il lavoro intitolato “*Urto fra protoni e neutroni*”¹⁶ e il termine “*neutrone*” non era stato coniato prima di quell’anno¹⁷.

I “*Quaderni*” sono una raccolta di scritti in cui Ettore traccia le linee delle trattazioni necessarie alle sue pubblicazioni. Le pagine non sono datate e la loro numerazione non segue l’ordine cronologico: basti pensare che il nono capitolo contiene problemi affrontati

¹⁵ Edoardo Amaldi: *La vita e l’opera di Ettore Majorana (1906-1938)*. Accademia Nazionale dei Lincei, Roma 1966, p.XX

¹⁶ Salvatore Esposito, Ettore Majorana jr., Erasmo Recami: *Ettore Majorana: Notes on theoretical physics*. Kluwer Academic Publishers, Boston Dordrecht London 2003, p.425

¹⁷ Erasmo Recami: *Ricordo...*, cit., p.48

dal Majorana ancora studente. Lungo lo scritto i titoli dei lavori scientifici sono presenti saltuariamente e accade non di rado che Ettore, una volta iniziata la trattazione, passi all'improvviso alla successiva senza chiarirne il motivo¹⁸.

Infine i “*Fascicoli*”, ordinati e titolati da Rosario Liotta nel 1966, sono una serie di elaborati che riuniscono i calcoli preliminari e i primi approcci delle ricerche di Majorana, dalle pubblicazioni alle trattazioni presenti nei “*Quaderni*”¹⁹.

Inutile sottolineare che all'interno del materiale inedito, di cui solamente una piccola porzione è stata interpretata e pubblicata, molti spunti e molte idee hanno ancora interesse scientifico attuale e possono essere utili per la ricerca contemporanea, in particolare nell'ambito della fisica teorica avanzata.

—

Capitolo 2

La produzione scientifica

2.1 Fisica atomica e molecolare

Il 1928 è l'anno in cui Ettore Majorana sposta il suo interesse verso il campo della fisica e, dopo i suoi primi contatti con Fermi, passa dal corso di studi in ingegneria alla facoltà di scienze, in cui acquisisce una profonda conoscenza del modello statistico elaborato da Fermi nell'anno precedente: il modello statistico di Thomas-Fermi. Nonostante il recente ingresso nel gruppo di via Panisperna, il ragazzo non tarda a dare il suo contributo. Il giorno seguente al già citato primo incontro fra Fermi e Majorana, Ettore riesce a trovare attraverso un approccio innovativo e interamente contenuto all'interno dei “*Volumetti*” una soluzione semi-analitica dell'equazione differenziale non lineare di Thomas-Fermi²⁰. È interessante notare che questo approccio può essere facilmente generalizzato e applicato a un'ampia classe di equazioni differenziali particolari²¹. Sempre all'interno dei “*Volumetti*”, precisamente nel secondo capitolo datato 23 aprile 1928, troviamo anche una valutazione del potenziale di Fermi senza l'uso del metodo statistico e alcune sue applicazioni, come il calcolo dell'energia atomica dello stato fondamentale²². Traccia di questi lavori è riscontrabile all'interno della prima pubblicazione di Majorana, “*Sullo sdoppiamento dei termini Roentgen ottici a causa dell'elettrone rotante e sulla intensità delle righe del Cesio*”, stesa in collaborazione con l'amico siciliano Giovanni Gentile Junior, chiamato da Corbino in via Panisperna in veste di assistente. In questo articolo, facendo uso delle

¹⁸ Erasmo Recami: *Ricordo...*, cit., p.49

¹⁹ Ibidem

²⁰ Salvatore Esposito: “Ettore Majorana and his heritage seventy years later”. In: *Annalen der Physik* Vol.17, WILEY-VCH Verlag, Berlin 2008-05, p.305

²¹ Ibidem

²² Francesco Guerra, Robotti Nadia: “Ettore Majorana's forgotten publication on the Thomas-Fermi Model”. In: *Physics in perspective* Vol.10 SP Birkhäuser Verlag, Basel 2008-03, p.60

autofunzioni elettroniche ottenute con il metodo di Fermi, i due ragazzi calcolano perturbativamente lo sdoppiamento, dovuto allo spin dell'elettrone, sia dei termini spettroscopici Röntgen 3d del gadolinio ($Z=64$) e dell'uranio ($Z=92$), che dei termini ottici 6p del cesio ($Z=55$), oltre al rapporto d'intensità per le prime due righe di assorbimento di quest'ultimo²³. Le conclusioni tratte da Ettore e Gentile si accordano bene con i risultati sperimentali, tanto che Fermi le fa sue e le cita nel giugno dello stesso anno in una conferenza a Lipsia, dove, invitato da Peter Debye, riepiloga tutti i risultati del suo modello statistico.

Ettore presenta la trattazione dal titolo "*Ricerca di un'espressione generale delle correzioni di Rydberg valevole per atomi neutri o ionizzati positivamente*" nel dicembre del '28, in occasione dell'Adunanza generale della Società Italiana di Fisica all'università di Roma. Qui Majorana divulga i risultati ottenuti quello stesso anno sul modello di Thomas-Fermi per atomi e ioni, che verranno effettivamente pubblicati nel 1929. La teoria si allontana dall'originale di Fermi, raffinandone le previsioni: Ettore infatti propone una migliore approssimazione del potenziale effettivo al quale sono soggetti gli elettroni ottici; estende il modello dagli atomi neutri agli ioni e lo applica per il calcolo delle correzioni di Rydberg alle linee spettrali sia di alcuni elementi, che dei loro composti ossigenati; di fatto tenta di valutare statisticamente l'effetto dei legami chimici²⁴. Questa sua ricerca anticipa di cinque anni la corposa pubblicazione di Fermi e Amaldi del 1934, la quale comprenderà e supererà i loro precedenti lavori riguardanti il modello di Fermi, senza tuttavia fare riferimento alla paternità dell'idea di fondo di Majorana, probabilmente perché ormai dimenticata.

Oltre ai primi due articoli di spettroscopia atomica, Ettore prosegue la sua ricerca e pubblica nel 1931 ben quattro lavori: due che tentano come i precedenti di dare spiegazioni riguardo lo spettro elettromagnetico di emissione e assorbimento di particolari elementi chimici, e due che trattano il legame chimico. Questi ultimi, "*Sulla formazione dello ione molecolare di He*" e "*Reazione pseudopolare fra atomi di Idrogeno*", attingono a piene mani dall'articolo redatto cinque anni prima da Heiter e London sulla formazione della molecola di idrogeno, base della teoria quantistica del legame chimico, rivelando la particolare attenzione di Majorana riguardo i lavori accademici dell'epoca. Ettore, partendo da opportuni dati sperimentali, sfrutta l'idea quantomeccanica d'indistinguibilità per spiegare il meccanismo di scambio degli elettroni di valenza tra specie atomiche, e dimostra una grande padronanza nel costruire delle funzioni d'onda in accordo con le proprietà di simmetria dei sistemi investigati²⁵. Non solo, una volta usato il principio variazionale per il calcolo della distanza di equilibrio fra gli atomi costituenti la molecola, la relativa energia e la frequenza di oscillazione molecolare²⁶, introduce anche semplificazioni ad arte per superare i limiti derivanti la non integrabilità analitica e ottenere risultati quantitativi²⁷. I restanti due articoli del 1931 sono "*I presunti termini anomali dell'Elio*" e la "*Teoria dei tripletto P' incompleti*". Il primo tenta di far luce sull'esperienza dello spettro dell'elio di Kruger risalente all'anno precedente. Kruger aveva scoperto due righe spettrali non interpretabili come combinazione di termini conosciuti e aveva proposto di interpretarle come prodotto di una transizione elettronica da uno stato normale a due stati accentati, cioè

²³ Francesco Guerra, Robotti Nadia: "Ettore...", cit., p.60

²⁴ Ibidem

²⁵ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore Majorana scientific papers on occasion of the centenary of his birth*. Springer, Berlin Heidelberg New York 2006, p.46

²⁶ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.47

²⁷ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.81

stati con due elettroni eccitati in livelli tali da rendere energeticamente possibili processi di auto-ionizzazione spontanea²⁸. Tramite un'analisi basata sulle proprietà di simmetria delle autofunzioni imperturbate dei sedici stati che si ottengono combinando fra loro due autofunzioni idrogenoidi di numero quantico principale pari a due, e utilizzando calcoli perturbativi spinti al secondo ordine, Majorana conferma l'ipotesi di Kruger per una delle due righe esaminate ed esclude che l'altra sia dovuta all'atomo di elio²⁹. In particolare, in questo lavoro è significativa la discussione delle proprietà di simmetria degli stati rispetto allo scambio degli spin degli elettroni, alle trasformazioni di parità e alle rotazioni spaziali e assiali³⁰, un approccio insolito in quegli anni, anni in cui non era ancora chiara l'importanza delle simmetrie in fisica, ma che dà l'idea della lungimiranza di Majorana. Infine, l'articolo "*Teoria dei triplette P' incompleti*", probabilmente il più significativo dei quattro, tratta la caratterizzazione di spettri ottici di atomi con due elettroni nei livelli eccitati. Majorana prende spunto dai risultati sperimentali di Foote et al. pubblicati nel '25, che descrivevano la mancata osservazione di alcune righe nello spettro di assorbimento degli atomi di mercurio, cadmio e zinco, precisamente fra le sei righe previste per le transizioni ai livelli di tripletto $(2p)^2 \ ^3P_{0,1,2}$ più bassi in energia, quelle associate al livello $\ ^3P_2$ non erano presenti nello spettro di nessuno dei tre atomi³¹. Ettore spiega l'assenza di tali livelli energetici introducendo un nuovo tipo di perturbazione; questa essenzialmente spiega che la deviazione delle righe spettrali dalle posizioni previste è dovuta a un processo di risonanza fra uno o più orbitali quasi degeneri³². Specificatamente, la novità introdotta da Majorana è quella di ipotizzare che i livelli mancanti siano perturbati da stati degeneri dello spettro continuo, e che gli stati risultanti possano decadere attraverso una transizione non radiativa, che Ettore introduce e chiama "ionizzazione spontanea"³³. Questo processo converte l'energia di un atomo eccitato in un elettrone libero e uno ione positivo, e forma delle righe spettrali con proprietà tipiche delle transizioni ottiche associate allo spettro continuo: grandi larghezze, asimmetrie nella forma e intensità anomale³⁴. La ionizzazione spontanea viene introdotta in modo indipendente lo stesso anno dal fisico canadese Shenstone, il quale pubblica i risultati ottenuti in "*The Physical Review*" e battezza il nuovo processo "auto-ionizzazione", nome rimasto in uso fino a oggi per indicarlo. Questo fenomeno ha giocato un ruolo importante nello sviluppo della spettroscopia, poiché è osservato in una grande varietà di spettri atomici e molecolari e la teoria prevede la disposizione e il profilo delle righe di auto-ionizzazione in casi molto diversi fra loro³⁵.

Il modello di ionizzazione spontanea di Majorana e la relativa teoria di mescolamento degli stati sono molto complessi e non vengono accettati per lungo tempo, anche a causa delle obiezioni mosse da Conton e Shortley nel libro "*The Theory of Atomic Spectra*" nel 1935, ritenuto la bibbia della spettroscopia atomica. Solamente vent'anni dopo, nel 1955, Garton e Rajaratnam identificano nello spettro dello zinco deboli righe di assorbimento terminanti nel livello $\ ^3P_2$ e allargate per auto-ionizzazione, infine nel 1970 Martin e Kaufman confermano la correttezza delle assegnazioni spettroscopiche fatte da Ettore.

²⁸ Edoardo Amaldi: *La vita e l'opera di Ettore Majorana (1906-1938)*. Accademia Nazionale dei Lincei, Roma 1966, p.XV

²⁹ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XVI

³⁰ Ibidem

³¹ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.97

³² Ibidem

³³ Ibidem

³⁴ Ibidem

³⁵ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.99

L'ultima pubblicazione di Ettore per quanto riguarda la fisica atomica e molecolare è *“Atomi orientati in campo magnetico variabile”* e risale al 1932. L'articolo viene elaborato per rispondere alle domande sorte da un esperimento condotto da Segré e Frisch nel laboratorio di Otto Stern ad Amburgo, dopo la richiesta di aiuto di Emilio rivolta a Ettore. Infatti a partire dal '31 Segré tenta di mettere a punto un esperimento che generalizza al caso non adiabatico le famose indagini di Stern e Gerlach sulla quantizzazione spaziale del momento angolare, compiute tramite campi magnetici statici³⁶. Il nuovo esperimento di Stern vuole sfruttare un campo magnetico di intensità costante con direzione uniformemente rotante che varia rapidamente, ma poiché produrre un campo con queste caratteristiche presenta per la coppia difficoltà tecniche invalicabili, per assicurare la transizione non adiabatica decidono di far passare il fascio atomico polarizzato vicino a un punto con campo nullo³⁷. Majorana dimostra che l'effetto globale di un campo magnetico variabile $\vec{H}(t)$ su un atomo con momento angolare J pari a $\frac{1}{2}$ e proiezione del momento lungo l'asse di quantizzazione pari a m , può essere descritto tramite una brusca rotazione del momento angolare³⁸. A rotazione avvenuta, il sistema non è più in uno stato di ben definita quantizzazione spaziale rispetto alla direzione originale del campo, ma è descritto tramite una sovrapposizione di $2J + 1$ stati con diversi valori del numero quantico m' ³⁹. Ettore, oltre a calcolare esplicitamente l'ampiezza di probabilità di transizione dal livello m iniziale a m' , individua nel problema due frequenze caratteristiche: la frequenza di precessione di Larmor del dipolo magnetico atomico e la frequenza di rotazione del campo vista dall'atomo in moto⁴⁰. Majorana capisce che quando le due frequenze diventano comparabili, l'atomo ha un'alta probabilità di invertire la direzione di dipolo magnetico, cioè compiere uno spin-flip⁴¹. L'estensione della trattazione al caso con momento J qualsiasi è stata poi sviluppata da Bloch e Rabi nel '45, citando il lavoro di Majorana come indispensabile per la risoluzione del problema. Infine, nella pubblicazione Ettore introduce una rappresentazione pittorica di uno stato con momento angolare arbitrario pari a J , oggi nota ai matematici con il nome di “sfera di Majorana”⁴² o impropriamente come “sfera di Bloch estesa”, di cui Roger Penrose ha parlato entusiasticamente nei suoi ultimi libri divulgativi. In questa rappresentazione uno stato con momento angolare J uguale a $\frac{N}{2}$ è rappresentato da N punti sulla sfera unitaria, in più la rotazione del momento dopo l'interazione con il campo magnetico variabile corrisponde a una rotazione rigida degli N punti rappresentativi lo stato sulla sfera⁴³.

La trattazione di Majorana dei processi di ribaltamento dello spin resta oggi un classico, è riportata in testi di meccanica quantistica e ha costituito la base teorica del metodo sperimentale usato per ribaltare lo spin dei neutroni con un campo a radiofrequenza: metodo impiegato in tutti gli spettrometri a neutroni polarizzati⁴⁴.

Oltre ai lavori contenuti nelle pubblicazioni ufficiali, moltissime altre questioni rilevanti vengono affrontate da Ettore nei *“Quaderni”*. Per esempio, per quanto riguarda la fisica

³⁶ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.121

³⁷ Ibidem

³⁸ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XIX

³⁹ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XIX-XX

⁴⁰ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.122

⁴¹ Ibidem

⁴² Erasmo Recami: *Ricordo...*, cit., p.24

⁴³ Salvatore Esposito: *The Physics of Ettore Majorana: Theoretical, Mathematical, and Phenomenological*. Cambridge University Press, Cambridge 2014, p.28

⁴⁴ Erasmo Recami: *Ricordo...*, cit., p.24

molecolare Majorana studia la teoria generale dei modi vibrazionali, in particolare della molecola di acetilene C_2H_2 , che presenta particolari proprietà geometriche⁴⁵. Ettore affronta anche dei problemi relativi alla costruzione di un modello per i materiali ferromagnetici: l'approccio è originale in quanto la sua formulazione hamiltoniana non segue né quella di Heisenberg, né la successiva di Van Vleck⁴⁶. Sfruttando un ragionamento statistico, Majorana calcola la magnetizzazione di un sistema ferromagnetico quando viene applicato un campo magnetico esterno e la magnetizzazione spontanea⁴⁷. Inoltre, nel materiale inedito si trovano svariati esempi di materiali ferromagnetici con diverse geometrie⁴⁸.

2.2 Fisica nucleare

Il primo approccio di Ettore Majorana alla fisica nucleare si sostanzia nel luglio 1929 con la stesura della sua tesi di laurea *“Sulla meccanica dei nuclei radioattivi”*, uno fra i primi lavori in questo ambito ad emergere a Roma. Lo scritto è una rivisitazione delle conoscenze che allora si avevano sulle forze nucleari, con particolare riferimento alla teoria di Gamow del decadimento α del '28, a cui Ettore contribuisce con una trattazione del moto di una particella all'interno di un nucleo radioattivo e con un affinamento di alcuni calcoli fatti da Gamow stesso e Houtermans⁴⁹.

L'interesse di Majorana per la fisica nucleare si rafforza all'inizio del '32, con l'apparire dei primi lavori che portarono alla scoperta del neutrone. Questa sua rinnovata inclinazione rientra in un graduale cambio di orientamento della ricerca scientifica dell'istituto romano in via Panisperna, dove già da qualche anno si parla dell'opportunità di abbandonare lo studio della fisica atomica per favorire l'indagine nell'ambito allora inedito della fisica del nucleo. Amaldi racconta: *“Queste idee cominciarono a prendere forma concreta verso la fine del 1931, tanto che al mio ritorno da Lipsia, nel mese di ottobre, accettai con piacere il compito di esporre sistematicamente, in una serie di seminari, il contenuto del classico libro di Rutherford, Chadwick ed Ellis che avevo cominciato a studiare qualche mese prima. Al seminario partecipavano Fermi, Majorana, Rasetti, Segré e pochi altri. La mia esposizione veniva spesso interrotta da qualcuno degli ascoltatori con osservazioni del tipo più diverso che davano luogo a lunghe discussioni e fornivano a Fermi l'occasione per sviluppare all'impronta la teoria di qualcuno dei fenomeni esposti. Majorana ascoltava silenzioso, inserendo nella discussione solo eccezionalmente osservazioni quasi sempre estremamente acute”*⁵⁰.

Nel gennaio del '32 i coniugi Joliot e Curie pubblicano alcune valutazioni riguardo l'esperimento di bombardamento del berillio tramite particelle alfa condotto da Bothe e Becker nel 1930. Nella loro prima nota mostrano che la radiazione penetrante prodotta dalla collisione fra berillio e radiazione alfa può trasferire a protoni presenti in materiali idrogenati energie cinetiche di circa 5 milioni di elettronvolt, e ipotizzano inoltre che si tratti di un fenomeno analogo all'effetto Compton, in cui un fotone si scontra con un protone in modo elastico. Viste queste note, Majorana disse scuotendo la testa: *“Non hanno capito niente; probabilmente si tratta di protoni di rinculo prodotti da una particella neutra*

⁴⁵ Salvatore Esposito: “Ettore Majorana and his heritage...”, cit., p.307

⁴⁶ Ibidem

⁴⁷ Ibidem

⁴⁸ Ibidem

⁴⁹ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.92

⁵⁰ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XXI

*pesante*⁵¹. Pochi giorni dopo, il 17 febbraio 1932, arriva a Roma la rivista “*Nature*” contenente l’articolo di Chadwick intitolato “*Possible existence of a neutron*”. Questa congettura non è originale per l’epoca: già Rutherford nel 1920 suggeriva che all’interno di un nucleo formato da protoni ed elettroni, le uniche particelle allora conosciute⁵², fosse possibile trovare particelle neutre formate da un protone e un elettrone. Dopo l’articolo di Chadwick la comunità scientifica comprende che i neutroni sono uno dei costituenti dei nuclei, assunto che porterà conseguentemente alla nascita e proliferazione di modelli nucleari in cui coesistono protoni, elettroni e neutroni. Il primo a ipotizzare in una pubblicazione ufficiale un nucleo costituito da soli protoni e neutroni è Ivanenko nel ’32, tuttavia Amaldi, nonostante non ricordi se Ettore fosse arrivato alla stessa conclusione in modo indipendente, rivela che “*prima di Pasqua di quello stesso anno, egli [Majorana] aveva cercato di fare la teoria dei nuclei leggeri ammettendo che i protoni e i neutroni (o protoni neutri come lui diceva allora) ne fossero i soli costituenti e che i primi interagissero con i secondi con forze di scambio*”⁵³. Ad ogni modo, Ettore considera il suo lavoro incompleto e non vuole pubblicare nulla, inoltre proibisce a Fermi di parlarne a Parigi il 7 luglio alla Quinta Conferenza Internazionale sull’Elettricità, dove Enrico discute dei paradossi che emergono se si congettura un nucleo atomico formato anche da elettroni. Solamente Heisenberg, dopo la divulgazione del proprio articolo sullo stesso argomento il 19 luglio del ’32 e l’arrivo di Ettore a Lipsia nel gennaio del ’33, riesce a convincere Majorana a pubblicare i suoi risultati, probabilmente grazie al peso della sua autorità e al rapporto speciale che si era creato fra lui e il ventiseienne siciliano. In una lettera al padre datata 18 febbraio 1933, Ettore da Lipsia dice di avere già scritto “*un articolo sulla struttura dei nuclei che a Heisenberg è piaciuta molto, sebbene contenga qualche correzione alla sua teoria*”⁵⁴.

La pubblicazione di Majorana, “*Über die Kerntheorie*”, è presente all’interno della rivista *Zeitschrift für Physik* nel marzo del ’33. Dopo avere esaminato le ipotesi poste alla base del modello di Heisenberg, in particolare il problema della struttura del neutrone, Ettore conclude che, allo stato delle conoscenze allora a disposizione, l’unica cosa da fare è cercare di stabilire la legge d’interazione fra protone e neutrone solamente attraverso l’assunzione di criteri semplici, ma in grado di riprodurre il più correttamente possibile le proprietà empiriche dei nuclei⁵⁵. Egli scrive che “*Le varie fonti di informazioni che possediamo sulla teoria dei nuclei [...] sembrano indicare concordemente che non si può attribuire ai nuclei un’organizzazione fortemente centrale simile a quella degli atomi. Sembra al contrario che i nuclei siano costituiti da una specie di materia estesa e impenetrabile le cui parti agiscono reciprocamente solo per immediato contatto*”⁵⁶.

Sia l’articolo di Majorana che quello di Heisenberg concordano sulle seguenti ipotesi: i nuclei sono composti esclusivamente da protoni e neutroni, in mancanza di prove sperimentali certe l’interazione fra neutroni è trascurabile, le uniche forze fra protoni sono dovute all’interazione coulombiana, che in prima approssimazione può essere trascurata per i nuclei leggeri⁵⁷. Poiché questi presentano all’incirca un numero uguale di protoni e di neutroni, i due suppongono che la causa principale della stabilità nucleare risieda nella

⁵¹ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XXII

⁵² Anderson scopre infatti il positrone nell’agosto del ’32

⁵³ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XXIII

⁵⁴ Erasmo Recami: *Il caso Majorana...*, cit., p.126

⁵⁵ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XXXI

⁵⁶ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.175

⁵⁷ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.182-183

mutua interazione fra protoni e neutroni⁵⁸. L'approfondita conoscenza di Majorana del meccanismo di scambio degli elettroni di valenza della teoria di Heitler e London si rivela di fondamentale importanza per l'affinamento della precedente pubblicazione di Heisenberg⁵⁹, dove si parte dall'analogia fra lo scambio di un elettrone fra un atomo d'idrogeno H e uno ione idrogeno H^+ , costituenti lo ione molecolare H_2^+ , e lo scambio di una "carica" fra la coppia protone-neutrone⁶⁰. L'introduzione di questa "carica" è un semplice artificio formale; Heisenberg nella teoria la considera l'autovalore della terza componente di un operatore ρ , con stesse caratteristiche dell'operatore di spin, che chiama " ρ -spin" o meglio "spin isotopico". In base al valore di questo nuovo numero quantico, i neutroni e i protoni possono essere quindi considerati come stati diversi di un'unica particella, che oggi chiamiamo il nucleone⁶¹.

Majorana tuttavia considera l'analogia di partenza di Heisenberg di dubbio significato, poiché a suo avviso implica necessariamente che il neutrone sia una particella composta da un protone e un elettrone; inoltre ritiene scomoda l'introduzione dello spin isotopico, e preferisce trattare protoni e neutroni come particelle diverse. Ettore allora suggerisce che la forza fra un protone e un neutrone sia invece dovuta allo scambio delle coordinate spaziali fra i due, introduce il corrispondente potenziale di scambio e giustifica le sue assunzioni attraverso due importanti implicazioni, assenti nella teoria di Heisenberg⁶². In primo luogo il suo modello è compatibile con l'evidenza sperimentale della costanza della densità nucleare; secondariamente esso assicura una particolare stabilità alla particella alfa⁶³, dovuta a "*qualche fenomeno di saturazione che potrebbe essere in un certo modo analogo alla saturazione delle valenze*"⁶⁴. Proprio questa conseguenza portò Heisenberg a riconoscere una maggiore potenza predittiva alla teoria di Majorana rispetto alla propria, e a menzionare il contributo dato da Ettore in occasione di seminari da lui presieduti sulle forze nucleari⁶⁵.

Nella raccolta del materiale inedito di Majorana, in particolare nei "*Volumetti*", è presente la trattazione delle possibili forme del potenziale nucleare forte agente in un nucleo, che descrive l'interazione fra protoni e neutroni. Nello scritto Ettore dà particolare rilievo al caso dei nuclei leggeri, come il deutone e la particella alfa, e dunque discute a livello preliminare lo studio che convergerà nel suo articolo sulle forze nucleari⁶⁶.

2.3 Teoria quantistica dei campi e teoria dei gruppi

L'articolo "*Teoria relativistica di particelle con momento intrinseco arbitrario*" viene pubblicato da Ettore Majorana nel 1932 nella rivista "*Nuovo cimento*"; è un lavoro che oltre a non essere molto conosciuto, si colloca al di fuori della linea principale dello sviluppo storico della fisica delle particelle elementari. Infatti, Majorana tenta di costruire una generalizzazione relativistica della meccanica quantistica per particelle di spin arbitrario, sia intero che semintero, che non produca soluzioni con energia negativa⁶⁷, dunque

⁵⁸ Ibidem

⁵⁹ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.46

⁶⁰ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.182-183

⁶¹ Ibidem

⁶² Ibidem

⁶³ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.184

⁶⁴ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.176

⁶⁵ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XXV

⁶⁶ Salvatore Esposito: "Ettore Majorana and his heritage...", cit., p.308

⁶⁷ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.148

profondamente diversa dalla teoria sviluppata da Dirac per l'elettrone nel 1928. Il tentativo di Majorana è giustificato dal fatto che al momento della stesura del suo articolo, avvenuta nell'estate del '32, a Roma non è ancora noto il lavoro di Anderson risalente al settembre dello stesso anno, in cui per la prima volta si parla di elettroni positivi⁶⁸. Il punto di partenza della teoria è un'equazione differenziale lineare del tutto simile nella forma all'equazione di Dirac, su cui Ettore, che non esclude a priori la presenza di una funzione d'onda con un numero qualsiasi di componenti, impone prima delle condizioni tali da garantire alla relazione soluzioni solamente con energia positiva, poi l'invarianza rispetto alle trasformazioni di Lorentz⁶⁹. Ettore trova allora un'equazione lineare con soluzione Ψ_{jm} , una funzione d'onda con infinite componenti se la risoluzione avviene in un sistema di riferimento dove la quantità di moto non è nulla, caratterizzata dall'indice m , che assume tutti i valori compresi fra $-J$ e $+J$, e dall'indice J , che corrisponde a tutti i valori non negativi appartenenti o alla serie dei numeri interi ($J = 0, 1, 2, \dots$) o a quella dei numeri seminteri ($J = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$)⁷⁰. Queste soluzioni descrivono una sequenza infinita di stati con momento angolare intrinseco J crescente, a ognuno dei quali Majorana associa esplicitamente un'energia dipendente solo dal valore dello spin J . Non potendo accettare questa conclusione, Ettore lascia aperta la possibilità che la sua teoria possa essere usata per descrivere particelle con momento intrinseco arbitrario J_0 , sempre che si dichiarino non fisiche tutte le soluzioni con J diverso da J_0 ⁷¹. I risultati ottenuti appaiono oggi di difficile interpretazione fisica, infatti variando J pare che a ciascun gruppo di $2J + 1$ componenti della soluzione Ψ_{jm} corrisponda una particella di diverso spin. Pertanto, come riportato da Amaldi: *“la interpretazione più naturale di Ψ_{jm} è quella di una funzione d'onda che rappresenta simultaneamente o tutti i possibili bosoni o tutti i possibili fermioni. Se si cambia sistema di riferimento le varie componenti vengono mischiate fra loro. Tuttavia, nel sistema di riferimento del centro di massa, [...] la funzione d'onda di Majorana corrisponde a quella di una particella di spin ben definito, il cui valore dipende dalla autofunzione prescelta”*⁷². Inoltre, evitare gli stati con energia negativa ha un ulteriore costo elevato: non è infatti proibito ottenere delle soluzioni con energie immaginarie pure, che, se considerate fisicamente accettabili, implicherebbero l'ipotetica esistenza di particelle con massa appartenente al campo complesso e aventi velocità superiori a quelle della luce, i cosiddetti “tachioni”⁷³. Nonostante i risultati ottenuti nell'articolo possano per certi versi apparire insoddisfacenti, è importante sottolineare come alcuni di questi riemergeranno con una diversa interpretazione sia negli anni '60, dopo lo studio dei poli di Regge e la scoperta di stati adronici con spin elevato, sia successivamente in moderne teorie di stringa⁷⁴. Una novità nell'articolo è la presenza di un'espressione esplicita della più semplice rappresentazione unitaria infinito dimensionale del gruppo di Lorentz⁷⁵, le cui trasformazioni associate sono sfruttate da Ettore per imporre la covarianza alla sua equazione. Lo studio di questa rappresentazione appare per la prima volta in *“Gruppentheorie und quantummechanik”* di Weyl nel 1928, libro che Majorana certamente

⁶⁸ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XXXIV

⁶⁹ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XXXV

⁷⁰ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XXXIV

⁷¹ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.149

⁷² Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XXXIV

⁷³ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.149

⁷⁴ Ibidem

⁷⁵ Salvatore Esposito: “Ettore Majorana and his heritage...”, cit., p.308

conosce⁷⁶. Nel materiale inedito, specificamente dal terzo “*Volumetto*” in poi⁷⁷, sono infatti presenti moltissime trattazioni che testimoniano l’importanza per Ettore della nascente teoria dei gruppi come strumento per indagare i fenomeni quantomeccanici. Per esempio, Majorana completa e generalizza l’analisi di Weyl sul gruppo delle permutazioni, particolarmente rilevante per i sistemi di particelle identiche⁷⁸, discute la simmetria della geometria cubica, approfondisce le isometrie nello spazio euclideo tridimensionale e le armoniche sferiche per diversi valori di momento angolare⁷⁹. Nel quinto “*Volumetto*” troviamo la ricerca preliminare della rappresentazione del gruppo di Lorentz poi contenuta nella pubblicazione del ’32, di cui Ettore scriverà l’anno più tardi in una lettera al padre da Lipsia: “*In questo lavoro è contenuta una importante scoperta matematica come ho potuto accertarmi mediante il colloquio col prof. van der Waerden, olandese che insegna qui, una delle maggiori autorità in fatto di teoria dei gruppi*”⁸⁰. Questo problema è stato poi discusso sia da Wigner nel ’39 e nel ’48, l’unico che quasi incidentalmente cita l’articolo di Majorana, che da Gelfand e dai suoi collaboratori sovietici, i quali hanno ricostruito ed esteso la teoria di Ettore senza rendersene conto⁸¹.

Una delle tematiche che Ettore approfondisce a lungo nei suoi lavori inediti, e successivamente costituirà la base del suo ultimo articolo, è la teoria di Dirac dell’elettrone e la relativa equazione relativistica per particelle con spin pari a $\frac{1}{2}$, che viene spesso affrontata impiegando il formalismo canonico e il principio variazionale di minima azione. Nei “*Quaderni*” si trovano infatti molti lavori che testimoniano, nonostante la mancanza delle date, l’attenzione di Majorana verso la teoria dei campi. Ettore decompone il campo elettromagnetico e lo studia in una prospettiva completamente Lorentz invariante, considera in dettaglio le equazioni di campo e le loro proprietà, che discute con un approccio standard, dà espressioni esplicite per gli operatori di creazione e di annichilazione del fotone in diverse basi, assieme alle relative relazioni di commutazione, infine tenta di costruire un’equazione di Dirac che comprenda anche l’interazione elettromagnetica⁸².

Nell’articolo del 1937 “*Teoria simmetrica dell’elettrone e del positrone*”, probabilmente il contributo più duraturo di Ettore Majorana alla fisica moderna, egli affronta il problema di trovare una formulazione alternativa a quella di Dirac del ’28, che possa ovviare al bisogno di considerare il vuoto come un mare infinito di particelle a energia negativa, il cosiddetto mare di Dirac⁸³. Tra l’altro, in questo lavoro scientifico Ettore riconosce implicitamente che la seconda quantizzazione è necessaria per una spiegazione completa e consistente dell’equazione relativistica per particelle con spin $\frac{1}{2}$, cosa che in quegli anni non era nota a molte persone⁸⁴. L’interpretazione degli stati con energia negativa conduce, come dice Majorana stesso, a una descrizione sostanzialmente simmetrica degli elettroni e dei positroni⁸⁵. “*Tuttavia gli artifici suggeriti per dare alla teoria una forma simmetrica che si*

⁷⁶ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XXXIV

⁷⁷ Antonino Drago, Salvatore Esposito: “Following Weyl on Quantum Mechanics: The Contribution of Ettore Majorana”. In: *Foundations of physics* Vol.34, Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers, New York 2004-05, p.877

⁷⁸ Antonino Drago, Salvatore Esposito: “Following Weyl...”, cit., p.879

⁷⁹ Antonino Drago, Salvatore Esposito: “Following Weyl...”, cit., p.877

⁸⁰ Erasmo Recami: *Il caso Majorana...*, cit., p.126

⁸¹ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XXXVIII

⁸² Salvatore Esposito: “Ettore Majorana and his heritage...”, cit., p.309-310

⁸³ Francesco Guerra, Robotti Nadia: “Ettore...”, cit., p.66

⁸⁴ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XLIV

⁸⁵ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.201

accordi con il suo contenuto, non sono del tutto soddisfacenti; sia perché si parte sempre da una impostazione asimmetrica, sia perché la simmetrizzazione viene in seguito ottenuta mediante tali procedimenti (come la cancellazione di costanti infinite) che possibilmente dovrebbero evitarsi. Perciò abbiamo tentato una nuova via che conduce più direttamente alla meta”⁸⁶. Partendo da queste premesse, Ettore costruisce una teoria di campo basata su variabili anticommutanti e infine deriva un’equazione del tutto simile a quella di Dirac da un principio variazionale⁸⁷.

Il contributo alla ricerca portato da questa pubblicazione consiste nell’aver scoperto una rappresentazione innovativa delle matrici gamma dove queste sono tutte immaginarie, ora nota come rappresentazione di Majorana, che porta alla notevole implicazione di generare campi fermionici reali. Segue che questi campi devono corrispondere a fermioni con carica elettrica e momento magnetico nulli, inoltre il loro corrispondente operatore deve essere hermitiano, sicché perdono metà dei loro gradi di libertà e, in ultima analisi, scompare la distinzione fra fermione e antifermione⁸⁸. Ettore allora suggerisce che il neutrone o il neutrino, o entrambi, possano essere fermioni con queste caratteristiche, ossia corpuscoli neutri che si identificano con le loro contrapposte particelle di antimateria. Come dice Majorana stesso: *“Il vantaggio di questo procedimento rispetto all’interpretazione elementare delle equazioni di Dirac è che non vi è più nessuna ragione di presumere l’esistenza di antineutroni o antineutrini. Questi ultimi vengono in realtà utilizzati nella teoria dell’emissione β positiva, ma tale teoria può essere, ovviamente, modificata in modo che l’emissione β , sia negativa che positiva, venga sempre accompagnata dall’emissione di un neutrino”*⁸⁹.

In realtà diverse rilevazioni sperimentali hanno rigettato l’ipotesi che il neutrone possa essere una particella di Majorana; infatti, oltre ad avere un momento magnetico diverso da zero, nel ’56 è stata scoperta da Cork la sua antiparticella, l’antineutrone⁹⁰, dopo un esperimento condotto utilizzando il sincrotrone per protoni Bevatron in California. La proposta del neutrino ha invece avuto sorti alterne e si è inevitabilmente intrecciata da una parte con il progresso e l’avvento di tecniche sperimentali sempre più accurate, e dall’altra con la cosiddetta “teoria a due componenti” di Weyl del ’29, per certi versi in antitesi con quella di Majorana. La differenza fra le due è sostanziale: Ettore non richiede a priori che i neutrini abbiano massa nulla⁹¹, ma neanche ne esclude il caso, come a voler suggerire che non si possa prescindere da questa ipotesi in mancanza di dati certi. A livello teorico una seppur piccola massa del neutrino comporta una violazione della conservazione del numero leptonico⁹², congettura non attualmente escludibile sulla base dei dati empirici e tornata in auge dopo la recente scoperta dell’oscillazione del sapore di questi corpuscoli⁹³.

Nonostante oggi appaia fuori portata valutare direttamente se i neutrini siano o meno particelle di Majorana, molti ambiziosi accademici stanno cercando di ideare degli esperimenti per metterne almeno alla prova le conseguenze⁹⁴. A questo proposito, molte proposte avanzate dalla comunità scientifica si basano sull’osservazione empirica del decadimento doppio β senza l’emissione di neutrini, come CUORE, un esperimento di

⁸⁶ Ibidem

⁸⁷ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.215

⁸⁸ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XL

⁸⁹ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.206

⁹⁰ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XLI

⁹¹ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XLV

⁹² Ibidem

⁹³ Frank Wilczek: “Majorana Returns”. In: *Nature physics* Vol.5, 2009, p.614

⁹⁴ Ibidem

dimensioni mai raggiunte prima inaugurato nell'ottobre del 2017 presso i laboratori nazionali del Gran Sasso dell'INFN⁹⁵. Questo decadimento è un processo di secondo ordine nella teoria di Fermi, che ha un'ampiezza proporzionale alla massa di Majorana e viola la conservazione del numero leptonic⁹⁶. La mancata conservazione di questo numero quantico permetterebbe di rispondere al perché nell'universo prepondera la materia sull'antimateria, fatto da cui è dipesa l'evoluzione del cosmo stesso e spiegabile proprio attraverso il decadimento di neutrini super pesanti poco dopo il big bang⁹⁷.

2.4 Studi ulteriori

Nonostante Ettore Majorana pubblicò il suo ultimo articolo "*Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone*" nel 1937, gli ultimi anni della sua ricerca accademica, in particolare dopo il suo ritorno dal viaggio europeo nell'autunno del '33, appaiono oggi nebulosi. Di fatto, come già ribadito in precedenza, sfortunatamente non è noto a cosa Majorana abbia lavorato fra la fine del 1933 e il 1938⁹⁸.

La sorella di Ettore, Maria, ricorda che in quegli anni il fratello aveva diradato sempre di più le visite all'istituto, ma continuava a studiare a casa parecchie ore al giorno, e soprattutto la notte⁹⁹. L'interesse di Majorana non si limitava solo all'ambito fisico, ma spaziava in un contesto molto ampio, dalla letteratura, di cui Ettore amava i grandi classici e in particolare le opere di Shakespeare e Pirandello¹⁰⁰, alla teoria dei giochi e alla strategia navale¹⁰¹, fin dall'infanzia fra le sue passioni, nonché all'economia e alle questioni filosofiche. Gli indizi lasciati da Ettore per quanto riguarda la sua ricerca scientifica in quel periodo sono pochi, tuttavia testimoniano il fatto che Majorana non abbia mai abbandonato lo studio della fisica. In una lettera destinata a suo zio Quirino, professore di fisica sperimentale all'università di Torino, Ettore infatti confessa: "*Io mi occupo da qualche tempo di elettrodinamica quantistica*"¹⁰², senza tuttavia entrare nel dettaglio. Conoscendo la modestia di Majorana nell'esprimersi, ciò significa che si stava dedicando a fondo a ricerche originali in quel settore, come anche testimoniato nel 1938 dal direttore dell'Istituto di fisica dell'università di Napoli Antonio Carrelli, che ha l'impressione che Ettore stia lavorando a qualcosa di molto importante, di cui però non vuole parlare. La più significativa testimonianza è quella lasciata da Gian Carlo Wick che racconta di un suo incontro con Majorana: "*La conversazione ebbe luogo in un ristorante, in presenza di Heitler, e dunque senza lavagna né formule scritte; ma nonostante l'assenza di dettagli quello che Majorana descrisse a parole era una "teoria relativistica di particelle cariche di spin zero basata sull'idea di quantizzazione dei campi" (seconda quantizzazione). Quando assai più tardi vidi il lavoro di Pauli e Weisskopf rimasi assolutamente convinto che quello che Majorana aveva descritto fosse la stessa cosa. Beninteso, Majorana non pubblicò nulla e probabilmente non ne parlò a molti*"¹⁰³. Wick si riferisce alla teoria per campi scalari più

⁹⁵ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.216

⁹⁶ Ibidem

⁹⁷ Ibidem

⁹⁸ Erasmo Recami: *Ricordo...*, cit., p.49

⁹⁹ Erasmo Recami: *Ricordo...*, cit., p.23

¹⁰⁰ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XI

¹⁰¹ Erasmo Recami: *Il caso Majorana...*, cit., p.71

¹⁰² Erasmo Recami: *Il caso Majorana...*, cit., p.158

¹⁰³ Erasmo Recami: *Il caso Majorana...*, cit., p.185

tardi formulata da Pauli e Weisskopf, una delle pietre miliari per lo sviluppo dell'elettrodinamica quantistica¹⁰⁴.

L'articolo *"Il valore delle leggi statistiche nella fisica e nelle scienze sociali"*, originariamente scritto da Ettore per una rivista di sociologia, viene pubblicato postumo a cura dell'amico Giovanni Gentile Junior nel 1942. Questo lavoro, verosimilmente scritto fra il '33 e il '37, è piuttosto singolare: non solo è l'unica pubblicazione ufficiale in cui Majorana tratta argomenti al di fuori dalla ricerca in ambito fisico, ma porta alla luce idee innovative e sicuramente minoritarie fra gli studiosi del Novecento¹⁰⁵. Dopo aver presentato l'utilizzo in fisica delle leggi statistiche come mezzo per l'indagine fenomenologica, Ettore introduce la meccanica quantistica come una teoria fondamentale e di completo successo nel descrivere i processi che coinvolgono il mondo microscopico dell'infinitamente piccolo. Inoltre, la considera una teoria statistica irriducibile, in quanto non in grado di spiegare in modo deterministico l'evoluzione, per esempio, di singoli atomi o particelle. Partendo allora da questa osservazione, cioè la mancanza di determinismo a livello del sistema studiato, Majorana suggerisce un'analogia formale fra le leggi statistiche osservate in fisica e nelle scienze sociali, dove queste diventano potenti strumenti d'indagine per la modellizzazione sia economica, che dei fenomeni sociali.

—

Conclusioni

Una volta terminato l'esame dei lavori, accademici e non, di Ettore Majorana, viene naturale porsi il difficile problema di fornire una valutazione d'insieme alla sua figura di scienziato, nei limiti del possibile. A questo proposito non sono mai state scritte parole più calzanti e conclusive di quelle di Edoardo Amaldi, che è doveroso riportare nella loro interezza: *"Non vi è alcun dubbio che egli [Majorana] aveva una mente matematica, sopra tutto analitica, straordinaria e uno spirito critico del tutto eccezionale. Ma forse, proprio questo acutissimo spirito critico, unito alla mancanza di alcune doti di equilibrio d'insieme sul piano umano, ostacolarono le sue capacità di sintesi creativa, così da non permettergli di raggiungere una produttività scientifica confrontabile con quella esplicita, alla stessa età, dai maggiori fisici contemporanei.*

*Ciò non toglie che la scelta di alcuni dei problemi da lui trattati, i metodi seguiti nella loro trattazione e, più in generale, la scelta dei mezzi matematici per affrontarli, mostrano una naturale tendenza a percorrere i tempi, che in qualche caso ha quasi del profetico"*¹⁰⁶.

¹⁰⁴ Salvatore Esposito: "Ettore Majorana and his heritage...", cit., p.311

¹⁰⁵ Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore...*, cit., p.248

¹⁰⁶ Edoardo Amaldi: *La vita...*, cit., p.XI

Bibliografia

- [1] Edoardo Amaldi: *La vita e l'opera di Ettore Majorana (1906-1938)*. Accademia Nazionale dei Lincei, Roma 1966
- [2] Giuseppe Franco Bassani, Council of the Italian Physical Society: *Ettore Majorana scientific papers on occasion of the centenary of his birth*. Springer, Berlin Heidelberg New York 2006
- [3] Erasmo Recami: *Il caso Majorana: epistolario, documenti, testimonianze*. Arnoldo Mondadori Editore, Milano 1987
- [4] Erasmo Recami: *Ricordo di E. Majorana a sessant'anni dalla sua scomparsa: l'opera edita ed inedita*. Quaderni di Storia della Fisica issue no.5 pp.19-68, 1999
- [5] Leonardo Sciascia: *La scomparsa di Majorana*. Prima edizione Einaudi, Torino 1975
- [6] Umberto Bartocci: *La scomparsa di Ettore Majorana: un affare di stato?* Editore Andromeda, Bologna 1999
- [7] Leandro Castellani: *Dossier Majorana*. Fratelli Fabbri Editori, Milano 1974
- [8] Francesco Cordella, Alberto De Gregorio, Fabio Sebastiani: *Enrico Fermi: gli anni italiani*. Editori Riuniti, Roma 2001
- [9] Salvatore Esposito, Ettore Majorana jr., Erasmo Recami: *Ettore Majorana: Notes on theoretical physics*. Kluwer Academic Publishers, Boston Dordrecht London 2003
- [10] Antonino Zichichi: *Ettore Majorana: Genius and Mystery*. CERN Courier Volume 46 Number 6 pp.23-26, July-August 2006.
Articolo completo: http://www.ccsem.infn.it/em/EM_genius_and_mystery.pdf
- [11] Frank Wilczek: "Majorana Returns". In: *Nature physics* Vol.5 pp.614-618, 2009
- [12] Francesco Guerra, Robotti Nadia: "Ettore Majorana's forgotten publication on the Thomas-Fermi Model". In: *Physics in perspective* Vol.10 pp.56-76 SP Birkhäuser Verlag, Basel 2008-03
- [13] Antonino Drago, Salvatore Esposito: "Following Weyl on Quantum Mechanics: The Contribution of Ettore Majorana". In: *Foundations of physics* Vol.34 pp.871-887 Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers, New York 2004-05
- [14] Steven R. Elliott, Marcel Franz: "Colloquium : Majorana fermions in nuclear, particle, and solid-state physics". In: *Reviews of modern physics* Vol.87 pp.137-163 American Physical Society, United States 2015-02

- [15] Salvatore Esposito: “Ettore Majorana and his heritage seventy years later”. In: *Annalen der Physik* Vol.17 pp.302-318 WILEY-VCH Verlag, Berlin 2008-05
- [16] Alessandra Vittorini-Orgeas, Antonio Bianconi: “From Majorana theory of atomic autoionization to Feshbach resonances in high temperature superconductors”. In: *Journal of superconductivity and novel magnetism* Vol.22 pp.215-221 Springer US, Boston 2009-04
- [17] Werner Heisenberg: *Der physikalische Prinzipien der Quantentheorie*. S. Hirzel Verlag, Leipzig 1930
- [18] Emilio Segré: *Enrico Fermi, Fisico*. Zanichelli, Bologna 1971
- [19] Salvatore Esposito: *The Physics of Ettore Majorana: Theoretical, Mathematical, and Phenomenological*. Cambridge University Press, Cambridge 2014