



Erasmus Recami

Facoltà di Ingegneria,  
Università Statale  
di Bergamo,  
e Sezione INFN  
di Milano

## L'opera scientifica di Ettore Majorana: cenni

Il 5 agosto del 1906 nasceva a Catania Ettore Majorana. Per ricordarne la figura a cento anni di distanza, pubblichiamo una rielaborazione, curata dall'autore, di alcune parti del più ampio studio raccolto nel volume *Il caso Majorana*, Di Renzo Editore, Roma 2002, IV ed. [N.d.R.]

### ABSTRACT

This article celebrates the 100th anniversary of the birth of the Italian theoretical physicist Ettore Majorana, probably the brightest Italian theoretician of the XX century. We outline the significance of some of his publications and we recall his life through letters, documents, testimonies discovered or collected by the author during almost 30 years. Finally, we offer information and comments on some unpublished Majorana manuscripts. [Obs.: Much of this material is protected by copyright, and cannot be reproduced without the written permission of the author and of the other holders of the relevant rights].

### Introduzione storico- biografica

Il 2006 è l'anno del centenario della nascita di Ettore Majorana, il grande fisico nato a Catania il 5 agosto 1906. Diciamo subito che Ettore Majorana è a molti noto soprattutto per il mistero che circonda la sua scomparsa, avvenuta (sembra tra Palermo e Napoli) quando aveva 31 anni. Ma il Majorana merita ogni attenzione essendo stato probabilmente il maggior fisico teorico italiano del secolo da poco concluso.

La fama di Ettore Majorana può essere facilmente appoggiata, infatti, a molte testimonianze come la seguente, dovuta alla memore penna di Giuseppe Cocconi. Invitato da Edoardo Amaldi [2], dal CERN gli scrive (18 luglio 1965):

«...Nel gennaio 1938, appena laureato, mi fu offerto, essenzialmente da te, di venire a Roma per sei mesi nell'Istituto di Fisica dell'Università come assistente incaricato, ed una volta lì ebbi la fortuna di unirmi a Fermi, Bernardini (che aveva avuto una Cattedra a Camerino pochi mesi prima) ed Ageno (lui pure giovane laureato), nella ricerca dei prodotti di disintegrazione dei "mesoni"  $\mu$  (allora chiamati mesotroni ed anche yukoni) prodotti dai raggi cosmici [...]. Ricordo che, mentre ero con Fermi nella nostra officinetta arrivò la notizia della scomparsa da Napoli del Majorana. Fermi si dette da fare telefonando da varie parti sinché, dopo alcuni giorni, si ebbe l'impressione che non lo si sarebbe ritrovato più.

Fu allora che Fermi, cercando di farmi capire che cosa significasse tale perdita, si espresse in modo alquanto insolito, lui che era così serenamente severo quando si trattava di giudicare il prossimo. Ed a questo punto vorrei ripetere le sue parole, così come da allora me le sento risuonare nella memoria: *"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 (e qui ho netta l'impressione che in quella categoria volesse mettere se stesso). 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..."*».

Enrico Fermi [uno dei maggiori fisici della nostra epoca; per quello che ha fatto nel 1942 a Chicago, con la costruzione della prima "pila atomica", il suo nome diverrà forse leggendario come quello di Prometeo...] si espresse in maniera per lui insolita anche in un'altra occasione, il 27 luglio 1938 (dopo la scomparsa di Majorana, avvenuta il sabato 26 marzo 1938), scrivendo da Roma al primo ministro Mussolini onde chiedere una intensificazione delle ricerche di Ettore:

«Io non esito a dichiararVi, e non lo dico quale espressione iperbolica, che fra tutti gli studiosi italiani e stranieri che ho avuto occasione di avvicinare il Majorana è fra tutti quello che per profondità di ingegno mi ha maggiormente colpito».

E un testimone diretto, Bruno Pontecorvo [8], aggiunge: «Qualche tempo dopo l'ingresso nel gruppo di Fermi [9], Majorana possedeva già una erudizione tale ed aveva raggiunto un tale livello di comprensione della fisica da potere parlare con Fermi di problemi scientifici da pari a pari. Lo stesso Fermi lo riteneva il più grande fisico teorico dei nostri tempi. Spesso ne rimaneva stupito [...]. Ricordo esattamente queste parole di Fermi: "Se un problema è già posto, nessuno al mondo lo può risolvere meglio di Majorana"». Il mito della "scomparsa", quindi, ha contribuito a dare a Majorana null'altro che la notorietà che gli spettava, per essere un genio e un genio molto avanzato rispetto ai suoi tempi.

Il Majorana, passato a fisica alla fine del '27, si laureò con Fermi il 6 luglio 1929, e continuò a collaborare col famoso gruppo di Enrico Fermi e Franco Rasetti (nato per volontà e attiva opera di Orso Mario Corbino), i cui fisici teorici – in ordine di ingresso nel gruppo – furono Ettore Majorana, Gian Carlo Wick, Giulio Racah, Giovanni Gentile jr., Ugo Fano, Bruno Ferretti, e Piero Caldirola. Membri del sottogruppo sperimentale furono Emilio Segré, Edoardo Amaldi, Bruno Pontecorvo, Eugenio Fubini, Mario Ageno, Giuseppe Cocconi, oltre all'ottimo chimico Oscar D'Agostino. Successivamente, Majorana conseguì la Libera Docenza in fisica teorica il 12 novembre 1932; trascorse circa sei mesi a Lipsia con Werner Heisenberg durante il 1933; e quindi, per ragioni ignote, interruppe la sua frequentazione del gruppo dei "ragazzi di via Panisperna". Smise perfino di pubblicare i risultati delle proprie ricerche (che già in precedenza aveva drasticamente selezionato basandosi sui suoi eccezionali spirito critico e amore per il rigore e le vere innovazioni); a parte l'articolo "Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone", già pronto fin dal 1933, e che, stimolato dai suoi colleghi, Majorana tirò fuori da un cassetto e pubblicò in occasione del Concorso nazionale del 1937 a tre posti di professore ordinario di fisica teorica.

In relazione a quest'ultimo punto, ricordiamo che nel 1937 i concorrenti furono numerosi, e molti di essi di elevato valore; soprattutto quattro: Ettore Majorana, Giulio Racah (ebreo, che successivamente passerà da Firenze in Israele fondandovi la fisica teorica), Gian Carlo Wick (di madre torinese e nota antifascista), e Giovanni Gentile jr. (figlio dell'omonimo filosofo, già ministro – come si direbbe ora – della Pubblica Istruzione, e ideatore delle "parastatistiche" in meccanica quantica). La commissione giudicatrice era costituita da: Enrico Fermi (presidente), Antonio Carrelli, Orazio Lazzarino, Enrico Persico e Giovanni Polvani. Su raccomandazione della commissione giudicante, il ministro dell'Educazione Nazionale Giuseppe Bottai nominò il Majorana professore di fisica teorica all'Università di Napoli per la sua "grande e meritata fama", al di fuori del Concorso stesso. La Commissione, invero, aveva dichiarato per iscritto al Ministro di esitare ad applicare a lui le normali procedure concorsuali; allegando il seguente giudizio [3, 4]:

«...Senza elencarne i lavori, tutti notevolissimi per l'originalità dei metodi impiegati e per l'importanza dei risultati raggiunti, ci si limita qui alle seguenti segnalazioni:

Nelle teorie nucleari moderne il contributo portato da questo ricercatore con la introduzione delle forze dette "Forze di Majorana" è universalmente riconosciuto, tra i più fondamentali, come quello che permette di comprendere teoricamente le ragioni della stabi-

lità dei nuclei. I lavori del Majorana servono oggi di base alle più importanti ricerche in questo campo.

Nell'atomistica spetta al Majorana il merito di aver risolto, con semplici ed eleganti considerazioni di simmetria, alcune tra le più intricate questioni sulla struttura degli spettri.

In un recente lavoro infine ha escogitato un brillante metodo che permette di trattare in modo simmetrico l'elettrone positivo e negativo, eliminando finalmente la necessità di ricorrere all'ipotesi estremamente artificiosa ed insoddisfacente di una carica elettrica infinitamente grande diffusa in tutto lo spazio, questione che era stata invano affrontata da molti altri studiosi».

Uno dei lavori più importanti di Ettore, quello in cui introduce la sua "equazione a infinite componenti" (di cui diciamo in seguito), non è menzionato: ancora non era stato capito. È interessante notare, però, che viene dato giusto rilievo alla sua teoria simmetrica per l'elettrone e l'anti-elettrone (oggi in auge, per la sua applicazione a neutrini e anti-neutrini); e a causa della capacità di eliminare l'ipotesi cosiddetta "del mare di Dirac" [P.A.M. Dirac, premio Nobel 1933]: ipotesi che viene definita "estremamente artificiosa e insoddisfacente", nonostante che essa dai più sia sempre stata accettata in maniera acritica.

I dettagli del primo incontro di Majorana con Fermi ci illuminano circa alcuni aspetti, scientifici e no, di Ettore. Essi sono noti da quando li ha narrati Segré [10]; ma vale la pena di rileggerli con attenzione: «Il primo lavoro importante scritto da Fermi a Roma [*Un metodo statistico per la determinazione di alcune proprietà dell'atomo...*] è oggi noto come metodo di Thomas-Fermi... Quando Fermi trovò che per procedere gli occorreva la soluzione di un'equazione differenziale non lineare, caratterizzata da condizioni al contorno insolite, con la sua abituale energia in una settimana di assiduo lavoro calcolò la soluzione con una piccola calcolatrice a mano. Majorana, che era entrato da poco in Istituto e che era sempre molto scettico, decise che probabilmente la soluzione numerica di Fermi era sbagliata e che sarebbe stato meglio verificarla. Andò a casa, trasformò durante la serata e la notte l'equazione originale di Fermi in una equazione del tipo di Riccati e la risolse senza l'aiuto di nessuna calcolatrice, servendosi della sua straordinaria attitudine al calcolo numerico... Quando il mattino dopo tornò in Istituto confrontò con aria scettica il pezzetto di carta, su cui aveva riportato i dati ottenuti, col quaderno di Fermi, e quando trovò che i risultati coincidevano esattamente non poté nascondere la sua meraviglia».

Abbiamo indugiato sul precedente aneddoto dato che le pagine con la soluzione in forma chiusa trovata dal Majorana per l'equazione differenziale di Fermi – equazione che Fermi, ripetiamolo, non era riuscito a risolvere analiticamente – sono state da noi alfine scoperte: e si è così potuto recentemente mostrare [7] che Majorana seguì in realtà due indipendenti metodi (molto originali) per giungere ai medesimi risultati, uno dei quali lo condusse ad una equazione di Abel, piuttosto che di Riccati. Il secondo cammino costituisce una novità anche per la matematica attuale. La comprensione dettagliata di quanto fatto da Majorana in quelle poche ore ha richiesto al valentissimo fisico teorico Salvatore Esposito, di Napoli, circa due mesi di intensa applicazione...

**Gli articoli  
pubblicati da  
Ettore Majorana**

Ettore scrisse pochi articoli scientifici: nove; oltre allo scritto semi-divulgativo "Il valore delle leggi statistiche nella fisica e nelle scienze sociali", pubblicato postumo su *Scientia* [36 (1942) 55-66] a cura di G. Gentile. Si ricordi che Majorana passò da ingegneria a fisica alla fine del 1927 o forse agli inizi del 1928 (anno

in cui pubblicò già un articolo, il primo, scritto insieme con l'amico Gentile), e poi si dedicò alla pubblicistica in fisica teorica solo per pochissimi anni, in pratica fino al 1933. Ciononostante, anche i soli lavori da lui *pubblicati* sono una miniera di idee e tecniche di fisica teorica che rimane tuttora parzialmente inesplorata.

Elenchiamo i suoi nove articoli pubblicati:

- (1) "Sullo sdoppiamento dei termini Roentgen ottici a causa dell'elettrone rotante e sulla intensità delle righe del Cesio", in collaboration with Giovanni Gentile Jr., *Rendiconti Accademia Lincei* **8** (1928) 229-233.
- (2) "Sulla formazione dello ione molecolare di He", *Nuovo Cimento* **8** (1931) 22-28.
- (3) "I presunti termini anomali dell'Elio", *Nuovo Cimento* **8** (1931) 78-83.
- (4) "Reazione pseudopolare fra atomi di Idrogeno", *Rendiconti Accademia Lincei* **13** (1931) 58-61.
- (5) "Teoria dei tripletti  $P'$  incompleti", *Nuovo Cimento* **8** (1931) 107-113.
- (6) "Atomi orientati in campo magnetico variabile", *Nuovo Cimento* **9** (1932) 43-50.
- (7) "Teoria relativistica di particelle con momento intrinseco arbitrario", *Nuovo Cimento* **9** (1932) 335-344.
- (8) "Über die Kerntheorie," *Zeitschrift für Physik* **82** (1933) 137-145; e "Sulla teoria dei nuclei", *La Ricerca Scientifica* **4** (1) (1933) 559-565.
- (9) "Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone", *Nuovo Cimento* **14** (1937) 171-184.

Esaminiamo brevemente gli articoli pubblicati. I primi, redatti tra il 1928 e il 1931, riguardano problemi di fisica atomica e molecolare: per lo più questioni di spettroscopia atomica o di legame chimico (sempre, s'intende, nell'ambito della meccanica quantistica). Come scrive E. Amaldi, un esame approfondito di questi lavori lascia colpiti per la loro alta classe: essi rivelano sia una profonda conoscenza dei dati sperimentali anche nei più minuti dettagli, sia una disinvoltura non comune, soprattutto a quell'epoca, nello sfruttare le proprietà di simmetria degli "stati quantistici" per semplificare qualitativamente i problemi e per scegliere la via più opportuna per la risoluzione quantitativa. Tra questi primi articoli ne scegliamo un solo: "Atomi orientati in campo magnetico variabile", apparso sulla rivista *Nuovo Cimento*, vol. **9** (1932) pp. 43-50. È l'articolo, famoso tra i fisici atomici, in cui viene introdotto l'effetto ora noto come Effetto Majorana-Brossel. In esso Ettore prevede e calcola la modificazione della forma delle righe spettrali dovuta a un campo magnetico oscillante; e ciò in connessione a un esperimento tentato a Firenze qualche anno prima (benché senza successo) da G. Bernardini ed E. Fermi. Questo lavoro è rimasto anche un classico della trattazione dei processi di ribaltamento "non adiabatico" dello *spin* (o "spin-flip"). I suoi risultati – una volta estesi, come suggerito dallo stesso Majorana, da Rabi nel 1937 e quindi, nel 1945, da Bloch e Rabi (i quali, entrambi premi Nobel [Rabi: 1944; Bloch: 1952], contribuirono a diffondere quanto trovato da Ettore tredici anni prima) – hanno costituito la base teorica del metodo sperimentale usato per ribaltare anche lo *spin* dei neutroni con un campo a radiofrequenza: metodo impiegato ancor oggi, ad esempio, in tutti gli spettrometri a neutroni polarizzati. In questo articolo viene introdotta anche la cosiddetta "Sfera di Majorana" (per rappresentare spinori mediante set di punti di una superficie sferica), di cui ha parlato entusiasticamente – per esempio – Roger Penrose [11] nei suoi ultimi libri semi-divulgativi (si vedano in Bibliografia le citazioni di Penrose e Zimba & Penrose, e quelle più recenti di Corrado Leonardi *et al.*).

Gli ultimi tre articoli di Ettore sono tutti di tale importanza che nessuno di essi può restare senza commento.

### L'equazione a infinite componenti

L'articolo "Teoria relativistica di particelle con momento intrinseco arbitrario" *Nuovo Cimento*, vol. 9 (1932) pp. 335-344 è il tipico esempio di lavoro che precorre talmente i tempi da venire compreso e valutato a fondo solo molti anni dopo.

A quel tempo era opinione comune [6] che si potessero scrivere equazioni quantistiche compatibili con la Relatività (cioè "relativisticamente invarianti") solo nel caso di particelle a spin zero o un mezzo. Convinto del contrario, Ettore comincia a costruire opportune equazioni quanto-relativistiche per i successivi valori possibili per lo spin (uno, tre mezzi, ecc.), arrivando a dare le regole anche per la costruzione di tale equazione per un valore generico dello spin; finché scopre che si può scrivere un'unica equazione rappresentante una serie infinita di casi, cioè un'intera famiglia infinita di particelle a spin qualsiasi (si ricordi che allora le particelle note – che ora sono centinaia – si contavano sulle dita di una mano!). Tralascia allora tutti i singoli casi studiati – senza più pubblicarli – e si dedica solo a queste equazioni "a infinite componenti", senza trascurare l'osservazione che esse possono descrivere non solo particelle ordinarie ma anche tachioni.

Per realizzare questo programma inventa una tecnica per la "rappresentazione di un gruppo" vari anni prima della "scoperta" di queste tecniche da parte di Eugene Wigner (premio Nobel 1963). Più ancora, Majorana ricorre per la prima volta – inventandole – alle rappresentazioni unitarie del Gruppo di Lorentz *a infinite dimensioni*: rappresentazioni riscoperte da Wigner in lavori del 1939 e 1948. Per comprendere l'importanza di quest'ultimo aspetto, rifacciamoci a quanto Ettore stesso – pur tanto schivo – riferisce a suo padre da Lipsia il 18 febbraio 1933: «Nell'ultimo mio articolo apparso sul *Nuovo Cimento* è contenuta una importante scoperta matematica, come ho potuto accertarmi mediante un colloquio col professor van der Waerden, olandese che insegna qui, una delle maggiori autorità in teoria dei gruppi».

Questa teoria è stata reinventata da matematici sovietici (in particolare Gelfand e collaboratori) in una serie di articoli del 1948-1958, e finalmente applicata dai fisici in anni ancora più tardi. L'articolo iniziale di Ettore, anzi, rimarrà in ombra per ben 34 anni, cioè fino a quando Amaldi lo traduce e segnala al fisico americano D. Fradkin, il quale a sua volta strabilia i teorici delle alte energie rendendo finalmente di pubblico dominio, nel 1966 [D. Fradkin: *American Journal of Physics* 34 (1966) 314], quanto compiuto da Majorana tanti anni prima. Dalla data del 1966, la fama di Ettore comincia a crescere costantemente anche tra i fisici delle particelle fondamentali.

### Le forze di scambio

Non appena, al sorgere del 1932, giunge a Roma notizia degli esperimenti dei Joliot-Curie [premi Nobel 1935 per la chimica], Ettore comprende che essi avevano scoperto il "protone neutro" senza accorgersene. Prima ancora, quindi, che ci fosse l'annuncio ufficiale della scoperta del *neutrone*, effettuata poco dopo da Chadwick [premio Nobel 1935 per la fisica], Majorana è in grado di spiegare la struttura e la stabilità dei nuclei atomici mediante protoni e neutroni. (I suoi manoscritti inediti ci dicono che egli si era già cimentato su questo problema ricorrendo, invano, a protoni ed elettroni, che erano le uniche particelle in precedenza note). Ettore precorse così anche il lavoro pionieristico di D. Ivanenko. Ma non volle pubblicarne nulla, né permise a Fermi di parlarne a Parigi agli inizi di luglio: ciò è narrato da Segré e da Amaldi. I suoi colleghi ricordano che già prima di Pasqua era giunto alle conclusioni più importanti della sua teoria: che protoni e neutroni fossero legati da forze quantistiche originate semplicemente dalla loro *indistinguibilità*; cioè da "forze di scambio" delle rispettive posizioni

spaziali (e non anche degli spin, come invece farà Heisenberg), così da ottenere la particella alfa (e non il deutone) quale sistema saturato rispetto alla energia di legame.

Solo dopo che Heisenberg pubblica il proprio articolo sullo stesso argomento, Fermi riesce a indurre Majorana a recarsi a Lipsia presso il grande collega. E, finalmente, Heisenberg sa convincere Ettore a pubblicare (anche se tanto in ritardo) i propri risultati: "Über die Kerntheorie", lavoro apparso il 3 marzo 1933 su *Zeitschrift für Physik*, vol. 82 (1933) pp. 137-145.

Le forze "di scambio" nucleari furono chiamate forze di Heisenberg-Majorana. Ettore ne parla al padre, con grande modestia, nella stessa lettera prima citata (del 18.2.1933): «Ho scritto un articolo sulla struttura dei nuclei che a Heisenberg è piaciuto molto benché contenesse alcune correzioni a una sua teoria». Sempre su questo lavoro scrive pochi giorni dopo, il 22 febbraio, alla madre: «Nell'ultimo "colloquio", riunione settimanale a cui partecipano un centinaio tra fisici, matematici, chimici, etc., Heisenberg ha parlato della teoria dei nuclei e mi ha fatto molta réclame a proposito di un lavoro che ho scritto qui. Siamo diventati abbastanza amici...».

Probabilmente la pubblicazione sulla stabilità dei nuclei venne subito riconosciuta dalla comunità scientifica (in particolare dai fisici nucleari) – evento raro, come sappiamo, per gli scritti di Ettore – anche grazie a questa opportuna "propaganda" fattane da Heisenberg, che proprio pochi mesi dopo riceverà il premio Nobel.

L'avversione a pubblicare le proprie scoperte, quando esse fossero risultate, all'esame del suo senso ipercritico, di carattere non abbastanza generale o espresse in forma matematica non abbastanza stringente ed elegante, divenne per Ettore anche motivo di vezzo. Racconta Amaldi: «Talvolta nel corso di una conversazione con qualche collega diceva quasi incidentalmente di aver fatto durante la sera precedente il calcolo o la teoria di un fenomeno non chiaro che era caduto sotto l'attenzione sua o di qualcuno di noi in quei giorni. Nella discussione che seguiva, sempre molto laconica da parte sua, Ettore a un certo punto tirava fuori dalla tasca il pacchetto delle sigarette Macedonia (era un fumatore accanito) sul quale erano scritte, in una calligrafia minuta ma ordinata, le formule principali della sua teoria o una tabella di risultati numerici. Copiava sulla lavagna parte dei risultati, quel tanto che era necessario per chiarire il problema, e poi, finita la discussione e fumata l'ultima sigaretta, accartocciava il pacchetto nella mano e lo buttava nel cestino».

Estremamente interessanti sono pure due altri passi di lettera. Il 14.2.1933, sempre da Lipsia, Majorana racconta alla madre: «... L'ambiente dell'istituto fisico è molto simpatico. Sono in ottimi rapporti con Heisenberg, con Hund e con tutti gli altri. *Sto scrivendo alcuni articoli in tedesco. Il primo è già pronto*, e spero di eliminare qualche confusione linguistica durante la correzione delle bozze». Il lavoro "già pronto" è naturalmente quello sulle forze nucleari di cui si sta parlando; il quale, però, rimase l'unico in lingua tedesca.

Ancora, nella lettera del 18 febbraio dichiara al padre: «... pubblicherò in tedesco, estendendolo, anche l'ultimo mio articolo apparso sul *Nuovo Cimento*».

In realtà Ettore non pubblicò più nulla, né in Germania, né al rientro in Italia, a parte l'articolo (del 1937) di cui stiamo per dire. Di notevole importanza è quindi sapere che Ettore stesse scrivendo altri lavori: in particolare, che stesse *estendendo* il suo articolo sulla equazione a infinite componenti. Nel brano alla madre, è probabile si riferisca pure alla sua teoria simmetrica di elettrone e anti-elettrone, pubblicata solo quattro anni più tardi.

## Il neutrino di Majorana

Dai manoscritti ritrovati pare, come si è detto, che Majorana formulasse in quegli stessi anni (1932-33) le linee essenziali anche della sua teoria simmetrica per l'elettrone e l'anti-elettrone: che le formulasse, cioè, non appena si diffuse la notizia della scoperta dell'anti-elettrone, o "positrone". Anche se Ettore pubblica tale teoria solo molto più tardi, accingendosi a partecipare al Concorso a cattedra di cui sappiamo: "Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone", *Nuovo Cimento*, vol. 14 (1937) pp. 171-184. Questa pubblicazione viene inizialmente notata quasi esclusivamente per aver introdotto la famosa *rappresentazione di Majorana* delle "matrici di Dirac" in forma reale<sup>1</sup>. Conseguenza di tale teoria è che un "fermione" neutro debba coincidere con la propria antiparticella: ed Ettore suggerisce che i neutrini possano essere particelle di questo tipo.

Ettore ci teneva molto a questa sua elaborazione teorica; ciò è testimoniato da Carrelli, che ne discusse con Ettore durante il breve periodo di lezioni a Napoli.

Come per altri scritti di Majorana, anche questo articolo ha cominciato ad avere fortuna solo vent'anni dopo, a partire dal 1957. Dopo di che ha goduto di fama via via crescente tra i fisici delle particelle relativistiche e delle teorie di campo<sup>2</sup>. Ora sono di gran moda espressioni come "spinori di Majorana", "massa di Majorana", "neutrini di Majorana" (e perfino "majoroni"). Le pubblicazioni di Majorana (ancora poco note, nonostante tutto) sono per la Fisica, lo si è detto, una continua fonte di ispirazione. Recentemente, ad esempio, Carlo Becchi ha osservato come nelle prime pagine di questo scritto si trovi una formulazione estremamente chiara del principio d'azione quantistico, che in anni successivi, attraverso i lavori di Schwinger e Symanzik, ha portato agli sviluppi recenti più importanti di teoria dei campi quanto-relativistici.

## I manoscritti inediti di Ettore Majorana

Ma Ettore ci ha lasciato anche molti manoscritti scientifici inediti, pure depositati presso la "Domus Galilaeana" (ora, purtroppo, in situazione critica: come quasi tutte le istituzioni culturali italiane) di cui abbiamo redatto un catalogo [12] in collaborazione con M. Baldo e R. Mignani. L'analisi di questi manoscritti permette di rilevare: (i) come Ettore fosse estremamente diligente e preciso nel lavoro. Tutte le sue scoperte risultano precedute da una indefessa serie di calcoli, fatti e rifatti: anche per i più dotati, naturalmente, la scienza non può essere solo un semplice gioco di intuizioni, come invece la leggenda aveva voluto farci credere; (ii) che, fra il materiale inedito, parecchi spunti hanno ancora un interesse scientifico *attuale*: alcune centinaia di pagine possono essere utili in maniera significativa per la ricerca contemporanea, ma solo poche pagine sono state da noi finora interpretate e pubblicate [6, 7, 5]; (iii) che tutto il materiale noto *sembra* scritto entro il 1933 (anche la bozza dell'ultimo articolo, sulla "Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone", che, come si è già detto, Ettore pubblicherà alle soglie del concorso a cattedra nel 1937, pare fosse già pronta dal 1933, anno in cui si ha la conferma della scoperta – appunto – del positrone); (iv) che quasi nulla ci è noto di ciò che egli fece negli anni a seguire (1934–1938). A parte una lunga serie di 34 lettere di risposta, scritte da Ettore in quegli anni (precisamente dal 17.3.1931 fino al 16.11.1937) allo zio Quirino, il quale lo sollecitava a fornire una spiegazione teorica dei risultati dei propri esperimenti. Queste lettere sono di carattere essenzialmente tecnico (lo zio Quirino era un fisico sperimentale di grandissima abilità, che aveva occupato anche il ruolo di presidente della Società Italiana di Fisica) e mostrano in tal modo che pure negli ultimi anni Ettore ben sapeva tornare alla fisica, sempre con le sue doti di eccelso teorico.

Invero la sorella Maria ricordava che anche in quegli anni Ettore – il quale aveva diradato sempre più le sue visite all'Istituto, a cominciare dalla fine del 1933, cioè dal suo rientro da Lipsia – continuò a studiare e lavorare a casa parecchie ore

al giorno; e la notte. Si diede Ettore solo a studi di letteratura e filosofia (amava particolarmente Pirandello, Schopenhauer e Shakespeare), o di “teoria dei giochi” e strategia navale (sua passione fin dall’infanzia), nonché di economia, di politica e infine di medicina; oppure continuò a dedicarsi anche alla Fisica? Dalla lettera a Quirino del 16.1.1936 ci viene una risposta; perché veniamo a sapere che Ettore si occupava “da qualche tempo di elettrodinamica quantistica”. Conoscendo la modestia di Ettore nell’esprimersi, ciò significa che durante l’anno 1935 Majorana si era dedicato a fondo a ricerche originali nel settore – per lo meno – della elettrodinamica quantistica. E ancora nel 1938, a Napoli, Carrelli avrà l’impressione che Ettore stesse lavorando a qualcosa di importante, di cui non voleva parlare. Ma lumi ancora più significativi ci sono giunti dalle lettere inviate, da Lipsia, ai propri genitori, lettere che abbiamo sopra citate, e, sempre da Lipsia, al CNR: delle quali diremo.

Non possiamo dimenticare gli appunti autografi di lezione redatti da Majorana nei primi mesi del 1938 a beneficio dei propri studenti dell’università di Napoli (probabilmente Ettore stava pensando di scrivere un libro per studenti avanzati di fisica teorica). L’intera serie di appunti per le sedici lezioni da lui tenute prima della scomparsa fu consegnata dal Majorana, entro una cartelletta, e il giorno prima di scomparire, all’allieva Gilda Senatore e (essendone intermediari Cenamo, Carrelli e Amaldi) finì nelle mani di Gilberto Bernardini, probabilmente soltanto in parte, e quindi negli archivi della “Domus Galilaiana”. La parte così sopravvissuta (relativa a dieci lezioni) fu pubblicata [1] per interessamento di Gialanella e soprattutto Bruno Preziosi, in un volume contenente anche gli appunti per la prolusione al corso – la lezione inaugurale – rinvenuti da Recami. Recentissimamente Salvatore Esposito, in collaborazione con Antonino Drago e altri, ha scoperto gli appunti delle restanti sei lezioni: e quindi l’intera serie potrà presto essere pubblicata presso il medesimo Editore napoletano.

Menzioniamo che nel 2003 S. Esposito, E. Majorana jr, A. van der Merwe e E. Recami hanno finalmente pubblicato per i tipi della Kluwer Academic Press (Dordrecht e Boston), nel volume “Ettore Majorana – Notes on Theoretical Physics”, una prima parte degli appunti lasciati inediti dal Nostro: e, precisamente, i quaderni (noti come i *Volumetti*), che comprendono i suoi appunti di studio redatti in Roma tra il 1927, anno in cui abbandonò gli studi di Ingegneria per passare a quelli di Fisica, e il 1931. Tale volume, apparso in traduzione inglese, sta per uscire nella versione originale italiana (a cura di S. Esposito e E. Recami) presso la casa editrice Zanichelli di Bologna. Si potrà verificare come tali manoscritti siano un modello non solo di ordine, divisi come erano e sono in argomenti e persino muniti di indici, ma anche di originalità, scelta dell’essenziale, e sinteticità; tanto che essi potrebbero venire riguardati, da un lato, come un eccellente complemento – dopo oltre settanta anni – di un testo *moderno* di fisica teorica, e, dall’altro, come una miniera di nuovi spunti e idee teoriche, in fisica e matematica, stimolanti e utili anche per la ricerca scientifica contemporanea. Un futuro, secondo volume, pubblicherà presto – si spera – almeno una frazione di altri manoscritti inediti, ancora più tecnici, ma ancora più ricchi di spunti scientifici originali: i cosiddetti *Quaderni*, contenenti le note scritte da Majorana durante le sue ricerche scientifiche; mentre i fogli sparsi, pur interessanti (alcune pagine originali sono state donate al Centro Ettore Majorana di Erice (TP)), difficilmente vedranno la luce in tempi ragionevoli.

Esistono altri manoscritti di Majorana?

Tornando alla lettera del 18 febbraio al padre, in essa abbiamo trovato la notizia molto interessante che Ettore stava per pubblicare in tedesco, estendendo-

lo, l'ultimo suo articolo apparso sul *Nuovo Cimento*. Come sappiamo, questo progetto non verrà poi realizzato; ma è importante ricordare ancora una volta come Ettore avesse in mente di generalizzare il lavoro in cui aveva introdotto la sua equazione a infinite componenti. Anzi, la questione diviene del massimo rilievo quando si leggano le lettere [3] inviate in quel periodo al Consiglio Nazionale delle Ricerche (ritrovate presso gli archivi del CNR, e a noi pervenute attraverso la cortesia di G. Fioravanti e soprattutto del collega M. De Maria). Nella prima (21.1.1933) Ettore specifica: «Attendo attualmente alla elaborazione di una teoria per la descrizione di particelle con momento intrinseco arbitrario che ho iniziata in Italia, e di cui ho dato notizia sommaria nel Nuovo Cimento (in corso di stampa)...». Nella seconda (3.3.1933) dichiara addirittura, riferendosi al medesimo lavoro: «Ho inviato alla *Zeitschrift für Physik* un articolo sulla teoria dei nuclei. Ho pronto il manoscritto di una nuova teoria delle particelle elementari e lo invierò alla stessa rivista fra qualche giorno...». Se ricordiamo che l'articolo qui considerato come "notizia sommaria" di una nuova teoria era già di altissimo livello, si comprende come sarebbe di enorme interesse scoprire una copia della teoria completa: la quale nel marzo 1933 aveva già assunto la forma di un manoscritto compiuto, forse già dattiloscritto in lingua tedesca. Ma Ettore, ripetiamo, non ne fece più nulla. Non dimentichiamo poi la citata lettera a Quirino del 16.1.1936, la quale ci ha rivelato che successivamente Ettore continuò a lavorare in fisica teorica, occupandosi a fondo – per lo meno – di elettrodinamica quantistica. Dove sono finiti gli appunti, gli scritti, gli articoli relativi a tutta questa attività?

Come abbiamo già segnalato, il giorno prima di salpare da Napoli (e successivamente sparire), Ettore Majorana consegnò alla propria studentessa Sig.na Gilda Senatore [ora Prof.ssa Senatore] una cartelletta di fogli scientifici contenente, tra l'altro, gli appunti di lezione manoscritti dal Majorana per i suoi allievi; affinché lei la conservasse. Tutto ciò lo si è saputo in seguito ad una approfondita ricerca effettuata nel 1990 da Bruno Russo [4], e successivamente confermata a voce dalla stessa Prof.ssa Senatore a chi scrive, nonché a Bruno Preziosi.

La cartelletta conteneva (oltre alle "lezioni") delle note incomplete, degli scritti conclusi, e articoli. Si hanno ragioni per credere che tale cartelletta contenesse anche alcuni almeno dei risultati del lavoro svolto da Majorana, in isolamento, tra la fine del 1933 e il 1938. Tali risultati sarebbero di straordinaria importanza, come sappiamo, per la stessa fisica teorica contemporanea, più ancora che per la storia della fisica. Ma avvenne che la Sig.na Senatore parlò confidenzialmente dei manoscritti avuti in pegno da Majorana a Francesco Cennamo, assistente del direttore Antonio Carrelli, quando questi divenne suo marito. Il dottor Cennamo, di propria iniziativa, li mostrò a Carrelli, che li sequestrò. E, per quanto a noi ora consta, essi si persero.

Molte altre idee di Ettore, quando non restarono nella sua mente, hanno lasciato traccia nella memoria dei colleghi. Una delle testimonianze più interessanti che abbiamo raccolto è di Gian Carlo Wick. Da Pisa il 16 Ott. 1978 scrive a Reami: «...Il contatto scientifico tra me ed Ettore di cui le accennò Segré avvenne a Roma in occasione del Congresso Volta (assai prima del soggiorno di Majorana a Lipsia). 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 [Premio Nobel 1945] e Weisskopf [*Helv. Phys. Acta* 7 (1934) 709], rimasi assolutamente convinto che quello che Majorana aveva descritto fosse la stessa cosa... ».

Aggiungiamo una breve Bibliografia. Lungi dall'essere completa, essa si riferisce soltanto agli argomenti toccati in questo articolo. [Osserviamo infine che molto del materiale che precede è coperto da *copyright*, e non può essere riprodotto senza il permesso scritto dell'autore, in solido con la famiglia Majorana e gli altri detentori dei relativi diritti.]

## Bibliografia

- [1] *Ettore Majorana - Lezioni all'Università di Napoli*, ed. by B. Preziosi (Bibliopolis; Napoli, 1987).
- [2] E. AMALDI, *La Vita e l'Opera di E. Majorana* (Accademia dei Lincei; Roma, 1966); "Ettore Majorana: Man and scientist", in *Strong and Weak Interactions. Present problems*, A. Zichichi ed. (Academic Press; New York, 1966); "Ricordo di Ettore Majorana", in *Giornale di Fisica* 9 (Bologna, 1968) p. 300; E. AMALDI: "From the discovery of the neutron to the discovery of nuclear fission", in *Physics Reports* 111 (1984) pp. 1-322; E. AMALDI: in *Il Nuovo Saggiatore* 4 (Bologna, 1988) p. 13.
- [3] I documenti qui citati si ritrovano (insieme con l'intera documentazione biografica riguardante E. Majorana, scoperta o raccolta in 5 o 6 lustri da E. Recami) nel libro E. RECAMI: *Il caso Majorana: Epistolario, Documenti, Testimonianze*, 2ª edizione (Oscar, Mondadori; Milano, 1991), pp. 230; e in particolare nella sua 4ª edizione del 2002 (Di Renzo; Roma; www.direnzo.it), pp. 273. [Essi sono coperti fin dal 1986 da *copyright* a favore della famiglia Majorana in solido con E. Recami]. Del qui citato volume esiste una pregevole traduzione in francese ad opera di F. e Ph. Gueret (inedita).
- [4] Vedere anche E. RECAMI: "I nuovi documenti sulla scomparsa di E. Majorana", in *Scientia* 110 (1975) p. 577; in *La Stampa* (Torino), 1 giugno e 29 giugno 1975; in *Corriere della Sera* (Milano), 19 ottobre 1982 e 13 dicembre 1983; "Ricordo di Ettore Majorana a sessant'anni dalla sua scomparsa: L'opera scientifica edita e inedita", in *Quaderni di Storia della Fisica*, (S.I.F., Bologna) 5 (1999) 19-68; e inoltre AA.VV.: *Scienziati e tecnologi contemporanei: Enciclopedia Biografica*, 3 voll., a cura di E. Macorini (Milano, 1974); M. FARINELLA: in *L'Ora* (Palermo), 22 e 23 luglio 1975; G.C. Graziosi: "Le lettere del mistero Majorana", in *Domenica del Corriere* (Milano), 28 novembre 1972; S. PONZ DE LEON: "Speciale News: Majorana", trasmesso il 30.9.1987 (Canale Cinque); B. RUSSO: "Ettore Majorana - Un giorno di marzo", programma televisivo trasmesso il 18.12.1990 (Rai Tre - Sicilia), e libro col medesimo titolo (Flaccovio; Palermo, 1997); F. e D. DUBINI: "La scomparsa di Ettore Majorana", programma televisivo trasmesso nel 1987 (TV svizzera).
- [5] *Ettore Majorana - Notes on Theoretical Physics*, edited by S. Esposito, E. Majorana Jr., A. van der Merwe, e E. Recami (Kluwer Acad. Pub.; Dordrecht, Boston and London, Nov. 2003).
- [6] M. BALDO, R. MIGNANI e E. RECAMI, "About a Dirac-like equation for the photon, according to Ettore Majorana", *Lett. Nuovo Cimento* 11 (1974) 568 [interessante pure ai fini di una possibile interpretazione fisica della funzione d'onda del fotone]. Ved. anche S. ESPOSITO, *Found. Phys.* 28 (1998) 231; e E. GIANNETTO; *Lett. Nuovo Cimento* 44 (1985) 140 e 145; "Su alcuni manoscritti inediti di E. Majorana", in *Atti IX Congresso Naz.le di Storia della Fisica*, a cura di F. Bevilacqua (Milano, 1988) p. 173.
- [7] S. ESPOSITO, "Majorana solution of the Thomas-Fermi equation", *Am. J. Phys.* 70 (2002) 852-856; "Majorana transformation for differential equations", *Int. J. Theor. Phys.* 41 (2002) 2417-2426.
- [8] B. PONTECORVO, *Fermi e la fisica moderna* (Editori Riuniti; Roma, 1972); e in *Proceedings International Conference on the History of Particle Physics, Paris, July 1982, Physique* 43 (1982).
- [9] Cfr. anche, ad es., G. ENRIQUES, *Via D'Azeglio* 57 (Zanichelli; Bologna, 1971).
- [10] E. SEGRÉ, *Enrico Fermi, Fisico* (Zanichelli; Bologna (1971); e *Autobiografia di un Fisico* (Il Mulino; Roma, 1995).
- [11] R. PENROSE, "Newton, quantum theory and reality", in *300 Years of Gravitation*, S.W. Hawking e W. Israel eds. (University Press; Cambridge, 1987); J. ZIMBA e R. PENROSE, *Stud. Hist. Phil. Sci.* 24 (1993) 697; R. PENROSE, *Ombre della Mente (Shadows of the Mind)* (Rizzoli; 1996), pp. 338-343 e 371-375; e i susseguenti studi, svolti a Palermo, C. LEONARDI, F. LILLO, A. VAGLICA e G. VETRI, "Quantum visibility, phase-difference operators, and the Majorana Sphere", preprint (Phys. Dept., Univ. of Palermo, Italy; 1998); "Majorana and Fano alternatives to the Hilbert space", in *Mysteries, Puzzles, and Paradoxes in Quantum Mechanics*, ed. by R. Bonifacio (A.I.P.; Woodbury, N.Y., 1999), pp. 312-315; F. LILLO, "Aspetti Fondamentali nell'Interferometria a Uno e Due Fotoni", Tesi di Dottorato (relatore C. Leonardi), Dip.to di Fisica, Università di Palermo, 1998.
- [12] M. BALDO, R. MIGNANI, E. RECAMI, "Catalogo dei manoscritti scientifici inediti di E. Majorana," in *Ettore Majorana - Lezioni all'Università di Napoli*, B. Preziosi ed. (Bibliopolis; Napoli, 1987) pp. 175-197; e E. RECAMI, "Ricordo di Ettore Majorana a sessant'anni dalla sua scomparsa: L'opera scientifica edita e inedita," in *Quaderni di Storia della Fisica* (S.I.F., Bologna) 5 (1999) 19-68.

**Note** <sup>1</sup> Si noti, però, che l'algebra  $\mathbb{R}(4) \simeq \mathbb{R}_{3,1}$  così introdotta da Majorana è del tutto diversa dall'algebra  $\mathcal{C}(4) \simeq \mathbb{R}_{4,1}$  introdotta da Dirac. Osserviamo, *en passant*, che l'algebra di Majorana è una delle due algebre associabili in maniera naturale allo spazio di Minkowski (la seconda essendo  $\mathbb{R}_{1,3} \simeq \mathbb{H}(2)$ , ove  $\mathbb{H}(2)$  è l'algebra delle matrici quaternioniche  $2 \times 2$ ).

<sup>2</sup> Nel 1981, ad esempio, una rivista giapponese di fisica ha ripubblicato in lingua inglese (con traduzione a cura di Luciano Maiani) questo articolo di circa quarantacinque anni prima.

È molto difficile dare un'idea dell'importanza di Ettore Majorana nella storia della fisica moderna. Majorana resiste ai criteri di valutazione più diffusi ai giorni nostri, basati sul numero dei lavori pubblicati su riviste internazionali e sul numero delle citazioni in lavori altrui di argomento affine: sono quelli che vengono chiamati spesso e forse impropriamente "criteri oggettivi". Le testimonianze di chi lo conobbe sono concordi nel ritenerlo un genio, senza alcuna esitazione e reticenza; ma dicono pure che fosse assai restio a pubblicare e che i pochi (appena nove) lavori pubblicati fossero di lettura difficilissima per i fisici suoi contemporanei, anche i più colti. Dunque, il caso Majorana meriterebbe forse un'analisi alla rovescia, sull'inadeguatezza dell'attuale sistema di valutazione dell'importanza scientifica dei personaggi della fisica (e non solo della fisica); ma, fermandosi alla semplice constatazione della rarità dei Majorana nella comunità scientifica, è meglio accontentarsi di vederlo come una figura eccezionale, quale fu, piuttosto che sovvertire il sistema. Dopotutto, anche all'epoca di Majorana pochissimi sarebbero stati in grado di apprezzare il suo lavoro, per esempio, in una commissione di concorso, e non può meravigliare che questa difficoltà sia insormontabile oggi. Ma questo non deve indurre, come abbiamo già precisato, nella tentazione di dirottare l'interesse per Majorana sulle pur singolari vicende della sua vita e della misteriosa scomparsa: egli è stato ed è uno dei fisici più interessanti del Novecento e, forse, di tutti i tempi, ed è di questo che si vuole offrire un racconto adeguato, senza divagare oltre le informazioni essenziali sulle vicende umane di cui già molto, forse troppo, è stato detto. Per sommi capi conviene dire subito che le poche note pubblicate da Majorana e i ricordi di chi lo conobbe, così come i suoi appunti sparsi e fortunatamente recuperati, mostrano che egli produceva due tipi distinti di lavori. Da un lato ci sono i calcoli su problemi posti da altri, con i quali si divertiva a mostrare la sua innata capacità di impiego delle matematiche superiori, spesso in gara con formidabili concorrenti come Fermi (per l'atomo statistico) o Heisenberg (per le forze nucleari); a volte con l'intento di aiutare generosamente un collega, come fece per anni con lo stesso zio Quirino che si era impantanato in un problema di elettronica dei metalli, o con Emilio Segrè quando si occupava in Germania di atomi magneticamente orientati in moto in campi rapidamente variabili; altre volte per il gusto di adattare teorie di suo gradimento appena pubblicate a problemi che ancora nessuno sapeva affrontare, come quando, ancora studente, scrisse il suo primo lavoro sulla spettroscopia X con l'amico Giovanni Gentile, Jr. E poi ci sono i problemi che egli stesso aveva formulato e che molto verosimilmente non solo nessuno dei suoi contemporanei avrebbe saputo risolvere ma nemmeno, appunto, formulare. [...] Per apprezzare la figura eccezionale di Ettore Majorana nel suo tempo e nel suo ambiente è indispensabile ricostruire sia il suo percorso formativo sia, per confronto, quello di altri. La comprensione della personalità scientifica di quest'uomo è inevitabilmente collocata su uno sfondo che non è popolato di soli fisici; anzi, al contrario di molti suoi colleghi, Majorana era un individuo dalle mille curiosità e di grande sensibilità culturale; e non aveva bisogno di isolarsi dal contesto mondano per dedicarsi a ciò che meglio gli riusciva. Se vogliamo, era un uomo acuto nell'osservare e valutare il mondo circostante in tutti i suoi aspetti, ma restio a partecipare, a mettersi in mostra, a esibire la propria genialità; della quel tuttavia era conscio. Insomma, un personaggio assai fuori dal comune, per questo sofferente, difficile, interessante, certamente inquietante. La fisica di cui si occupò con intuizioni che saranno riscoperte molto più tardi è, in un certo senso, il miglior pretesto per ricordarlo come merita.

Luisa Bonolis, *Majorana*, i grandi della scienza, *Le Scienze*, anno V, n. 27, giugno 2002