

Ettore Majorana

Appunti di Fisica Teorica

a cura di S. Esposito e E. Recami



(Riproduzione vietata)

Indice

Prefazione	ix
Volumetto 1: 8 marzo 1927	2
1.1 Potenziale elettrico	2
1.2 Potenziale ritardato	5
1.3 Energia mutua di due distribuzioni di masse elettriche o magnetiche	7
1.4 Effetto pellicolare in condutture elettriche cilindriche omogenee	8
1.5 Teoria termodinamica delle pile termoelettriche	11
1.6 Energia di un conduttore isolato	12
1.7 Attrazione di masse lontane	13
1.8 Formulario	15
1.9 Linee elettriche	17
1.10 Densità di una distribuzione sferica	20
1.11 Skineffect elettrico limite	20
1.12 Skineffect elettrico limite per sezioni particolari. Indicazioni per sezioni qualunque.	25
1.12.1 Sezioni ellittiche	25
1.12.2 Influenza delle irregolarità del contorno	26
1.13 Perdite per isteresi nei conduttori magnetici in regime di effetto pellicolare limite	28
1.14 Campo prodotto nel suo piano da una distribuzione lineare omogenea circolare di masse newtoniane	30
1.15 Campo prodotto nel suo piano da una corrente circolare	31
1.16 Effetto pellicolare debole in conduttori a sezione ellittica aventi la stessa permeabilità del mezzo	31
1.17 Scariche oscillanti nei condensatori	32
1.18 Autoinduzione di una bobina di grande lunghezza ad asse rettilineo e sezione circolare e a parecchi strati	34
1.19 Energia di una distribuzione circolare uniforme di masse elettriche o magnetiche	35

1.20	Autoinduzione di una bobina ad asse rettilineo e di limitata lunghezza	38
1.21	Distanze medie di elementi di volume o superficiali o lineari	39
1.22	Somma di alcune serie	41
1.23	Autoinduzione di una bobina rettilinea di lunghezza limitata a sezione circolare e avvolgimento di piccolo spessore	42
1.24	Variazione del coefficiente di autoinduzione in seguito all'effetto pellicolare	45
1.25	Errore medio nella determinazione della probabilità di un evento mediante un numero finito di prove	47
1.26	Squilibrio di un sistema trifase puro	48
1.27	Tavola per il calcolo della funzione $x!$	49
1.28	Influenza di un campo magnetico sul punto di fusione	50
1.29	Calore specifico di un oscillatore	53
1.30	Se i figli dei medesimi genitori tendano ad appartenere allo stesso sesso	54
1.31	Propagazione del calore posto in una sezione di una sbarra indefinita, di cui un'altra sezione è tenuta a zero. Similitudine dei grilli.	56
1.32	Combinazioni	58
1.33	Energia e calore specifico del rotatore	59
1.34	Attrazione dell'ellissoide	61
1.35	Casi particolari: ellissoide con un asse molto allungato; ellissoide rotondo	66
1.36	Equilibrio di un liquido rotante	69
1.37	Alcuni integrali definiti	73
1.38	Propagazione del calore in un mezzo isotropo e omogeneo	75
1.38.1	Propagazione in una dimensione	75
1.39	Trasformazioni conformi	78
1.40	Meccanica ondulatoria del punto materiale in un campo conservativo. Variazione degli autovalori	82
1.41	Massa elettromagnetica dell'elettrone	83
1.42	Polinomi di Legendre	86
1.43	Δ in coordinate sferiche	87
Volumentto 2: 23 aprile 1928		90
2.1	Δ in coordinate polari	90
2.2	Sviluppo di una funzione armonica nel piano	90
2.3	Quantizzazione dell'oscillatore lineare armonico	92
2.4	Riduzione a diagonale di una matrice	96

2.6	Quantizzazione ondulatoria di un punto attratto con forza costante verso una parete perfettamente elastica	99
2.7	Hamiltoniana relativista per il movimento di un elettrone	103
2.8	Funzione di Fermi	108
2.9	Il potenziale infratomico senza statistica	111
2.10	Applicazione del potenziale di Fermi	114
2.11	Curva statistica dei termini fondamentali negli atomi neutri	118
2.12	Quinte potenze	119
2.13	Molecola biatomica a nuclei uguali	120
2.14	Seste potenze	121
2.15	Settime potenze	122
2.16	Potenziale nell'atomo in seconda approssimazione	123
2.17	Polarizzabilità dell'atomo	124
2.18	Sviluppi e integrali di Fourier	126
2.19	Corpo nero	127
2.20	Teoria dell'irraggiamento	128
2.21	Momento di inerzia della Terra	135
2.22	Teoria dell'irraggiamento	139
2.23	Sulle matrici	141
2.24	Teoria dell'irraggiamento	144
2.25	Moto kepleriano piano perturbato	146
2.26	Teoria dell'irraggiamento	153
2.27	Integrali definiti	155
2.28	Sviluppi in serie	157
2.29	Teoria dell'irraggiamento: diffusione dell'elettrone libero	159
2.30	Onde di De Broglie	163
2.31	$e^2 \simeq hc$?	164
2.32	L'equazione $y'' + Py = 0$	165
2.33	Indeterminazione del potenziale vettore e scalare	170
2.34	Sulla ionizzazione spontanea di un atomo di idrogeno posto in una regione a potenziale elevato	171
2.35	Urto di una particella α contro un nucleo radioattivo	188
2.36	Potenziale ritardato	200
2.37	L'equazione $y'' = xy$	202
2.38	Degenerazione di risonanza con più elettroni	203
2.39	Formole varie	204
2.39.1	Formole di Schwarz	204
2.39.2	Valor massimo di variabili casuali	205
2.39.3	Coefficienti binomiali	208
2.39.4	Coefficienti dello sviluppo di $1/(1-x)^n$	210

2.39.5	Relazione tra i coefficienti binomiali	210
2.39.6	Valori medi di r^n tra superfici sferiche concentriche	211

Volumetto 3: 28 giugno 1929 **220**

3.1	Somma di alcune serie	220
3.2	L'equazione $\square H = r$	222
3.3	Equilibrio di una massa liquida eterogenea in rotazione (Problema di Clairaut)	228
3.4	Determinazione di una funzione quando sono noti i momenti	243
3.5	Curve di probabilità	252
3.6	L'integrale definito $\int_0^{\pi/2} \frac{\sin kx}{\sin x} dx$	254
3.7	Prodotti infiniti	258
3.8	Polinomi e numeri di Bernoulli	259
3.9	Parentesi di Poisson	261
3.10	Grandezze fisiche elementari	266
3.11	Curva del cane	268
3.12	Potenziale statistico nelle molecole	270
3.13	Gruppo delle trasformazioni unitarie in due variabili	273
3.14	Relazioni di scambio fra trasformazioni infinitesime nelle rappresentazioni di gruppi continui	284
3.15	Formole empiriche per l'energia di atomi con due elettroni	287
3.16	Gruppo delle rotazioni $O(3)$	291
3.17	Gruppo di Lorentz	296
3.18	Matrici di Dirac e gruppo di Lorentz	300
3.19	Elettrone rotante	308
3.20	Caratteri della \mathcal{D}_j e riduzione di $\mathcal{D}_j \times \mathcal{D}'_j$	319
3.21	Regole di selezione e di intensità in campo centrale	322
3.22	Effetto Zeeman anomalo (secondo la teoria di Dirac)	328
3.23	Sistemi completi di equazioni differenziali del primo ordine	334

Volumetto 4: 24 aprile 1930 **340**

4.1	Relazione fra suscettibilità e momento elettrico variabile nello stato fondamentale di un atomo	340
4.2	Probabilità di ionizzazione di un atomo di idrogeno in campo elettrico	343
4.3	Sviluppo di un polinomio in $-1 \leq x \leq 1$ secondo i polinomi di Legendre	350
4.4	Regole di moltiplicazione dei polinomi di Legendre	350

4.5	Funzione di Green per l'equazione differenziale $y'' + (2/x - 1)y + \phi(x) = 0$	351
4.6	Su uno sviluppo in serie del logaritmo integrale	355
4.7	Caratteri primitivi del gruppo delle permutazioni di f oggetti	357
4.8	Sviluppo dell'onda piana secondo le funzioni sferiche	362
4.9	Formola di Rutherford dedotta con la meccanica classica	365
4.10	La formola di Rutherford come prima approssimazione del metodo di Born	368
4.11	L'equazione di Laplace	372
4.12	Forze di polarizzazione fra atomi di idrogeno	374
4.13	Rappresentazione integrale delle funzioni di Bessel	376
4.14	Simmetria cubica	379
4.15	Formole	382
4.16	Onde piane secondo la teoria di Dirac	384
4.17	Operatori impropri	395
4.18	Rappresentazione integrale delle autofunzioni dell'idrogeno	397
4.19	Deviazione di un raggio α dovuta a un nucleo pesante (mec- canica classica)	399
4.20	Diffusione dovuta a un centro $a/r - b/r^2$	400
4.21	Il sistema di funzioni ortogonali definito da $y''_a = (x - a)y_a$	402
4.22	Sviluppi in integrali di Fourier	405
4.23	Integrali circolari	407
4.24	Frequenze d'oscillazione dell'ammoniaca	408
4.25	Funzioni sferiche con spin ($s = 1$)	411
4.26	Diffusione di elettroni veloci (metodo di Born relativistico)	424
4.27	Grandezze atomiche di uso frequente	430
4.28	Stati quasi-stazionari	431
4.29	Funzioni sferiche con spin (II)	445

Volumetto 5 **448**

5.1	Rappresentazioni del gruppo di Lorentz	448
5.2	Urto fra protoni e neutroni	454
5.3	Zeri delle funzioni di Bessel d'ordine mezzo	456
5.4	Statistica e termodinamica	457
5.4.1	Entropia di un sistema in equilibrio termico	457
5.4.2	Gas perfetti	458
5.4.3	Gas monoatomico	459
5.4.4	Gas biatomico	460
5.4.5	Formole numeriche per l'entropia dei gas	462
5.4.6	Energia libera dei gas biatomici	463

5.5	Polinomi di uso frequente	464
5.5.1	Polinomi di Legendre	464
5.6	Trasformazioni di spinori	465
5.7	Funzioni sferiche con spin $s = 1/2$	471
5.8	Rappresentazioni unitarie in infinite dimensioni del gruppo di Lorentz	476
5.9	L'equazione $(\square + \lambda)A = p$	480
5.10	Formole varie relative ad autofunzioni atomiche	485
5.11	Teoria classica della radiazione di multipolo	486
5.12	Autofunzioni dell'idrogeno	496
	Indice analitico	500

Prefazione

Introduzione storico-biografica

La fama di Ettore Majorana può solidamente appoggiarsi a molte testimonianze come la seguente, dovuta alla memore penna di Giuseppe Cocconi. Invitato da Edoardo Amaldi, 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" μ (allora chiamati mesotroni ed anche yukoni) prodotti dai raggi cosmici. L'esistenza dei "mesoni" μ era stata proposta circa un anno prima, ed il problema del loro decadimento era già molto attuale.

Fu proprio mentre mi trovavo con Fermi nella piccola officina del secondo piano, intenti lui a lavorare al tornio un pezzo della camera di Wilson che doveva servire a rivelare i mesoni in fine *range*, io a costruire un trabiccolo per l'illuminazione della camera, utilizzando il flash prodotto dall'esplosione di una fettuccia di alluminio cortocircuitata su una batteria, che Ettore Majorana venne in cerca di Fermi. Gli fui presentato e scambiammo poche parole. Una faccia scura. E fu tutto lì. Un episodio dimenticabile se dopo poche settimane, mentre ero ancora con Fermi nella medesima officinetta, non fosse arrivata la notizia della scomparsa da Napoli del Majorana. Mi ricordo che 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 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, aggiunge: «Qualche tempo dopo l'ingresso nel gruppo di Fermi, 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"».

Ettore Majorana scomparve piuttosto misteriosamente il 26 marzo 1938, e non fu mai più ritrovato. Il mito della sua "scomparsa" ha contribuito a null'altro che alla notorietà che gli spettava, per essere un genio e un genio molto avanzato rispetto ai suoi tempi.

Il presente volume, in traduzione, ha prima visto la luce in lingua inglese per i tipi della Kluwer Academic Press, e sotto lo stimolo, in particolare, del direttore della rivista "Foundations of Physics" (A. van der Merwe). Ora esce nella versione *originale*, scritta da Ettore Majorana in lingua italiana.

In questo libro appare finalmente una prima parte degli appunti lasciati inediti dal Nostro: e, precisamente, i quaderni (noti come i *Volumentti*), 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 1931-2. 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 almeno una frazione di altri manoscritti inediti, ancora più tecnici, ma ancora più ricchi di spunti scien-

tifici originali: i cosiddetti *Quaderni*, contenenti le note scritte da Majorana durante le sue ricerche scientifiche.

Ricordiamo che 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 sul suo eccezionale 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), GianCarlo 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:

«...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 ricerca-

tore con la introduzione delle forze dette “Forze di Majorana” è universalmente riconosciuto tra i piú fondamentali, come quello che permette di comprendere teoricamente le ragioni della stabilit  dei nuclei. I lavori del Majorana servono oggi di base alle piú 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 piú 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 necessit  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 piú importanti di Ettore, quello in cui introduce la sua “equazione a infinite componenti” (di cui diciamo in seguito), non   menzionato: ancora non era stato capito.   interessante notare, per , 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 capacit  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 piú 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 Segr ; ma vale la pena di rileggerli con attenzione: <<Il primo lavoro importante scritto da Fermi a Roma [su alcune propriet  statistiche dell’atomo]...   oggi noto come metodo di Thomas-Fermi... Quando Fermi trov  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 calcol  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. And  a casa, trasform  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 torn  in Istituto confront  con aria scettica il pezzetto di carta, su cui aveva riportato i dati ottenuti, col quaderno di Fermi, e quando trov  che i risultati coincidevano esattamente non pot  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 infine scoperte proprio nei Volumetti (e tra altri fogli sparsi): si   cos  potuto recentemente mostrare che Majorana segu  in realt  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 novit  anche per la Matematica attuale. La comprensione dettagliata di quanto fatto da Majorana in quelle poche ore ha richiesto a uno di noi 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* (Vol.36 (1942) p.55) a cura di G. Gentile. Si ricordi che Majorana pass  da Ingegneria a Fisica alla fine del 1927 o agli inizi del 1928 (anno in cui pubblic  gi  un articolo, il primo: scritto insieme con l’amico Gentile), e poi si dedic  alla ricerca scientifica 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

- (1) “Sullo sdoppiamento dei termini Roentgen ottici a causa dell’elettrone rotante e sulla intensit  delle righe del Cesio,” in collaborazione con

¹Nell’elenco che segue non   inclusa, propriamente, la comunicazione di Majorana alla XXII Adunanza Generale della Societ  Italiana di Fisica, pubblicata su *Il Nuovo Cimento* Vol.6 (1929) pp.XIV-XVI e dal titolo “Ricerca di un’espressione generale delle correzioni di Rydberg, valevole per atomi neutri o ionizzati positivamente”. Tale pubblicazione, recentemente messa in evidenza da F. Guerra e N. Robotti, non fu infatti scritta da Majorana, ma probabilmente dal Segretario della S.I.F. G. Dalla Noce che aveva assistito all’intervento del nostro autore (come anche agli altri interventi). Tuttavia nel presente volume, al paragrafo 2.16 del Volume 2, il lettore interessato pu  trovare il testo originale su cui si bas  la comunicazione scientifica di Majorana, il quale non intese mai pubblicare nulla su tale argomento.

Giovanni Gentile Jr., *Rendiconti dell'Accademia dei Lincei* Vol.8 (1928) pp.229-233.

- (2) “Sulla formazione dello ione molecolare di He,” *Il Nuovo Cimento* Vol.8 (1931) pp.22-28.
- (3) “I presunti termini anomali dell'Elio,” *Il Nuovo Cimento* Vol.8 (1931) pp.78-83.
- (4) “Reazione pseudopolare fra atomi di Idrogeno,” *Rendiconti dell'Accademia dei Lincei* Vol.13 (1931) pp.58-61.
- (5) “Teoria dei tripletti P' incompleti,” *Il Nuovo Cimento* Vol.8 (1931) pp.107-113.
- (6) “Atomi orientati in campo magnetico variabile,” *Il Nuovo Cimento* Vol.9 (1932) pp.43-50.
- (7) “Teoria relativistica di particelle con momento intrinseco arbitrario,” *Il Nuovo Cimento* Vol.9 (1932) pp.335-344.
- (8) “Über die Kerntheorie,” *Zeitschrift für Physik* Vol.82 (1933) pp.137-145; “Sulla teoria dei nuclei,” *La Ricerca Scientifica* Vol.4 (1933) pp.559-565.
- (9) “Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone,” *Il Nuovo Cimento* Vol.14 (1937) pp.171-184.

Torniamo agli 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 uno solo:

“Atomi orientati in campo magnetico variabile” apparso sulla rivista *Il Nuovo Cimento*. 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 insiemi di punti di una superficie sferica), di cui ha parlato entusiasticamente —per esempio— Roger Penrose 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” 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 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, Majorana ricorre per la prima volta —inventandole— alle rappresentazioni unitarie del Gruppo di Lorentz *a infinite dimensioni*: rappresentazioni riscoperte da Eugene Wigner (pre-

mio Nobel 1963) 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* Vol.34 (1966) p.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. 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 sulla rivista *Zeitschrift für Physik*.

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: << *publicherò 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.

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. La “Teoria simmetrica dell’elettrone e del positrone” viene inizialmente notata quasi esclusivamente per aver introdotto la famosa *rappresentazione di Majorana* delle “matrici di Dirac” in forma reale². 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 campo³. 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

²Si noti, però, che l’algebra $\mathcal{R}(4) \simeq \mathcal{R}_{3,1}$ così introdotta da Majorana è del tutto diversa dall’algebra $\mathcal{C}(4) \simeq \mathcal{R}_{4,1}$ 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 $\mathcal{R}_{1,3} \simeq \mathcal{H}(2)$, ove $\mathcal{H}(2)$ è l’algebra delle matrici quaternioniche 2×2).

³Nel 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.

Schwinger e Symanzik, ha portato agli sviluppi recenti più importanti della 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” di cui è stato redatto un catalogo 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; (iii) che tutto il materiale noto *sembra* scritto entro il 1933; (iv) che quasi nulla ci è noto di ciò che egli fece negli anni a seguire (1934–1937). A parte una lunga serie di 34 lettere di risposta, scritte da Ettore in quegli anni (precisamente dal 17.3.31 fino al 16.11.37) 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 importanti ci sono giunti dalle lettere inviate, da Lipsia, ai propri genitori, lettere che abbiamo sopra citate, e, sempre da Lipsia, al C.N.R.: delle quali diremo.

Non possiamo dimenticare, poi, gli appunti autografi di lezione redatti da Majorana nei primi mesi del 1938 a beneficio dei propri studenti dell'Università di Napoli. Gli appunti per le lezioni da lui tenute prima della scomparsa fu consegnata dal Majorana, entro una cartelletta di carte, il giorno prima di scomparire, all'allieva Gilda Senatore e (essendone intermediari Cennamo, Carrelli e Amaldi) finì nelle mani di Gilberto Bernardini, probabilmente soltanto in parte, e quindi negli archivi della "Domus Galilaeana". La parte così sopravvissuta (relativa a dieci lezioni) fu pubblicata per interessamento di G. Gialanella e soprattutto B. 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 Antonico Drago, ha scoperto gli appunti delle restanti sei lezioni: e quindi l'intera serie potrà presto essere pubblicata.

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, estendendolo, 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 inviate in quel periodo al Consiglio Nazionale delle Ricerche (ritrovate presso gli archivi del C.N.R., e a noi pervenute attraverso la cortesia di G. Fioravanti e soprattutto del collega M. De Maria). Nella prima (21.1.33) 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 (3.3.33) 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 Gilda Senatore una cartelletta di carte scientifiche: 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, 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 almeno anche alcuni 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 GianCarlo Wick. Da Pisa il 16 ottobre 1978 scrive a Recami: <<...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 [*Helvetica Physica Acta* Vol.7 (1934) p.709], rimasi assolutamente convinto che quello che Majorana aveva descritto fosse la stessa cosa. . . >>.

Questo volume

Nel presente libro riproduciamo (per la prima volta in originale) i cinque quaderni, accuratamente redatti e bene organizzati dal Majorana, noti come “Volumetti”. Scritti in Roma tra il 1927 e il 1931-2 (iniziati, quindi, prima ancora che Majorana passasse da Ingegneria a Fisica), essi sono attualmente depositati presso la citata Domus Galilaeana di Pisa. Ciascuno di essi, nel formato di approssimativamente 11 cm × 18 cm, consta di circa 100–150 pagine, ordinatamente numerate. Ogni Volumetto contiene al suo inizio un indice, che venne via via composto dal suo autore man mano che un particolare argomento risultava esaurito; e una data, eccetto per l’ultimo, e minore, Volumetto, il quale non reca data, probabilmente perché non fu mai completato. Vi sono motivi per ritenere che la data riportata da Majorana su ciascun Volumetto non corrisponda, precisamente, né alla data di inizio della stesura né a quella di chiusura, in quanto vi sono molte indicazioni sia in un senso (mancanza della data nel Volumetto V, ecc.) che nell’altro (riferimenti bibliografici ad articoli pubblicati dopo la data del Volumetto in cui compare, ecc.). Majorana, infatti, probabilmente cominciava ad utilizzare un nuovo quaderno già prima che il precedente fosse completato, ritornando su quest’ultimo successivamente. In tal caso la data riportata sugli originali sarebbe solo indicativa del periodo in cui l’autore ha annotato i suoi studi.

Varie pagine bianche numerate appaiono nei manoscritti originali, in alcuni casi tra la fine di un capitolo e l’inizio del successivo: qui abbiamo tralasciato tali pagine bianche.

Verosimilmente, Majorana affrontò i vari argomenti seguendo idee e risultati ben definiti, quali nascevano dai suoi *studi*. Ogni Volumetto fu scritto durante il periodo di circa un anno, cominciando dagli anni in cui stava portando a termine i propri studi presso l’Università di Roma. Pertanto il contenuto passa da questioni tipiche degli usuali corsi accademici a problemi di ricerca di frontiera. Nonostante questa variabilità di livello (che risulta evidente esaminando i vari Volumetti, o anche all’interno dello stesso Volumetto), lo stile scientifico non è mai comune. Quale esempio, citiamo

lo studio da parte del Majorana del cambiamento del punto di fusione di una sostanza quando essa viene immersa in un campo magnetico, o, ancora più interessante, l’esame della propagazione del calore da lui effettuato usando una “similitudine dei grilli”. Sempre degno di nota è il suo modo di trattare questioni di Fisica a lui contemporanea in maniera lucida ed originale: come nei casi della spiegazione, proposta da Fermi, della massa di origine elettromagnetica degli elettroni; dell’equazione di Dirac e sue applicazioni; e del gruppo di Lorentz; ciò rivelando a volte la letteratura scientifica da lui preferita. In quanto alle ricerche di frontiera, citiamo qui solo due esempi illuminanti: lo studio degli stati quasi-stazionari, che anticipa la teoria di Ugo Fano di circa 20 anni; e la teoria dell’atomo di Fermi, sviluppata attraverso soluzioni analitiche dell’equazione di Thomas-Fermi con le sue opportune condizioni al contorno, in termini di semplici quadrature: tecniche del tutto nuove e sconosciute.

Nel riprodurre questi Volumetti ci siamo attenuti per quanto possibile all’originale, tranne nei pochissimi casi in cui le notazioni usate da Majorana potevano non risultare abbastanza chiare. Abbiamo perciò sostituito il ricorrente simbolo della costante di Planck, h , con il più comune $2\pi\hbar$, eccetto quando si tratti di risultati della vecchia teoria quantistica. Tutte le variazioni sono messe in evidenza da note a piè pagina. Abbiamo poi introdotto delle note ogni qual volta l’interpretazione dei procedimenti seguiti, o il significato di qualche brano, richiedevano delle aggiunte esplicative. Le poche note a piè pagina che appaiono sul manoscritto originale sono state identificate facendole precedere dal simbolo *.

Il notevole sforzo fatto nel mettere in forma elettronica e controllare tutte le equazioni e le Tabelle di numeri è stato motivato dal nostro desiderio di facilitare per quanto possibile la lettura dei Volumetti di Majorana, con la speranza di rendere accessibile la loro ricchezza intellettuale al più vasto pubblico di lettori.

Le figure che qui appaiono sono state riprodotte senza l’uso di strumenti fotografici o scansioni digitali, ma sono del tutto fedeli ai disegni originali. Lo stesso vale per le Tabelle con risultati numerici, le quali sono state riprodotte indipendentemente dall’originale: ovvero, sono state controllate rifacendo tutti i calcoli sulla base dei metodi adottati dall’autore. Sviate Tabelle presentavano dei vuoti, rivelando che l’autore aveva tralasciato di calcolarle integralmente: in tali casi le abbiamo completate. Altre piccole modifiche, relative soprattutto alla correzione di sviste, vengono indicate con una nota.

Aggiungiamo nel seguito una breve Bibliografia. Lungi dall’essere completa, essa correda solo gli argomenti toccati in questa Prefazione.

Ringraziamenti

I curatori di quest'opera desiderano ringraziare esplicitamente Alwyn van der Merwe ed Ettore Majorana Jr, senza il cui indefesso aiuto questo libro non avrebbe visto la luce, e Roberto Battiston per il costante interessamento. Sono poi riconoscenti alla famiglia Majorana (nelle persone di Fabio e Pietro Majorana, e della signora Nunni Cirino, rispettivamente figli e vedova dell'Ing. Luciano, fratello del Majorana) per la affettuosa collaborazione. Per la cortese disponibilità, essi ringraziano inoltre l'attuale presidente della Società Italiana di Fisica, Franco Bassani, e vari colleghi (in particolare D. Ahluwalia, A. De Gregorio ed E. Giannetto) per stimolanti discussioni.

Il materiale autografo originale su cui si basa la presente edizione è attualmente conservato presso la Domus Galilaeana di Pisa; si ringraziano C. Segnini, già curatore della Domus, così come i precedenti responsabili della stessa Istituzione. La preparazione di tale volume è stata in parte finanziata dal Dipartimento di Scienze Fisiche dell'Università di Napoli "Federico II", grazie al gentile interessamento di A. Drago, B. Preziosi, M. Romano e M. La Commara.

Per la realizzazione tecnica di quest'opera i curatori hanno molto beneficiato dell'aiuto di G. Celentano, R. De Risi, R. De Stefano, C. Grosso e L. Scarpone, a cui va la nostra sentita gratitudine; unitamente a Federico Enriques e allo Staff della casa editrice Zanichelli per il loro interessamento e la fattiva collaborazione.

S. Esposito
E. Recami

Bibliografia

- [1] Il testo inglese della presente opera si trova in *Ettore Majorana - Notes on Theoretical Physics*, a cura di S. Esposito, E. Majorana Jr., A. van der Merwe, e E. Recami (Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, Boston and London, 2003).
- [2] I *documenti* usati in questa Prefazione si possono trovare (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 (Mondadori; Milano, 1991), pp.230; e in particolare nella sua 4a edizione (Di Renzo; Roma, 2002), pp.273.
Vedere anche E. Recami: "I nuovi documenti sulla scomparsa di E. Majorana", in *Scientia* Vol.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*, Vol.5 (1999), p.19; e inoltre AA.VV.: *Scienziati e tecnologi contemporanei: Enciclopedia Biografica*, 3 volumi, 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 18.12.90 (Rai Tre - Sicilia), e il libro col medesimo titolo (Flaccovio; Palermo, 1997); F. e D. Dubini: "La scomparsa di Ettore Majorana", programma televisivo trasmesso nel 1987 (TV svizzera).
- [3] Le prime opere biografiche su Majorana sono le seguenti:
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 cura di A. Zichichi (Academic Press; New York, 1966); "Ricordo di Ettore Majorana", in *Giornale di Fisica* Vol.9 (1968) p.300; E. Amaldi: "From the discovery of the neutron to the discovery of nuclear fission", in *Physics Reports* Vol.111 (1984) p.1; E. Amaldi: in *Il Nuovo Saggiatore* Vol.4 (1988) p.13.
Vedere anche B. Pontecorvo: *Fermi e la fisica moderna* (Editori Riuniti; Roma, 1972); e in *Proceedings of the International Conference*

on the History of Particle Physics, Paris, July 1982, Physique Vol.43 (1982); G.Enriques: *Via D'Azeglio 57* (Zanichelli; Bologna, 1971); E.Segré: *Enrico Fermi, Fisico* (Zanichelli; Bologna, 1971); e *Autobiografia di un Fisico* (Il Mulino; Roma, 1995).

- [4] La riproduzione degli originali delle lezioni svolte a Napoli da E. Majorana sono pubblicate in *Ettore Majorana – Lezioni all'Università di Napoli*, a cura di B. Preziosi (Bibliopolis; Napoli, 1987).
Vedere anche S. Esposito: “Il corso di Fisica teorica di Ettore Majorana: il ritrovamento del Documento Moreno”, in *Il Nuovo Saggiatore*, Vol.21 (2005) p.21.
- [5] Il catalogo dei manoscritti scientifici inediti di Majorana si trova in M. Baldo, R. Mignani, e E. Recami, “Catalogo dei manoscritti scientifici inediti di E. Majorana,” in *Ettore Majorana – Lezioni all'Università di Napoli, loc. cit.*; e E. Recami, “Ettore Majorana: L’opera edita ed inedita,” *loc. cit.*.
- [6] Alcuni lavori originati da intuizioni di Majorana sono i seguenti:
R. Mignani, M. Baldo e E. Recami: “About a Dirac-like equation for the photon, according to Ettore Majorana”, in *Lettere al Nuovo Cimento* Vol.11 (1974) p.568 [interessante pure ai fini di una possibile interpretazione fisica della funzione d’onda del fotone]. Vedere anche S. Esposito: “Covariant Majorana formulation of Electrodynamics”, in *Foundation of Physics* Vol.28 (1998) p.231; e E. Giannetto: “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.
S. Esposito: “Majorana solution of the Thomas-Fermi equation”, in *American Journal of Physics* Vol.70 (2002) p.852; “Majorana transformation for differential equations”, in *International Journal of Theoretical Physics* Vol.41 (2002) p.2417; E. Di Grezia e S. Esposito: “Fermi, Majorana and the statistical model of atoms”, in *Foundation of Physics* Vol.34 (2004) p.1431.
R.Penrose, “Newton, quantum theory and reality,” in *300 Years of Gravitation*, S. W. Hawking and W. Israel eds. (University Press; Cambridge, 1987); J. Zimba e R. Penrose, “On Bell Non-Locality Without Probabilities: More Curious Geometry”, in *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* Vol.24 (1993) p.697; R. Penrose: *Ombre della Mente* (Rizzoli; Milano, 1996), pp.338–343 e 371–375; e i successivi studi, svolti a Palermo, C. Leonardi, F. Lillo, A. Vaglica e G. Vetri: “Quantum visibility, phase-difference opera-

tors, and the Majorana Sphere” (Dipartimento di Fisica, Università di Palermo; 1998); “Majorana and Fano alternatives to the Hilbert space”, in *Mysteries, Puzzles, and Paradoxes in Quantum Mechanics*, a cura di R.Bonifacio (A.I.P.; Woodbury, N.Y., 1999), p.312; F.Lillo: “Aspetti fondamentali nell’interferometria a uno e due fotoni”, Tesi di Dottorato (Dipartimento di Fisica, Università di Palermo, 1998).