

Erasmus Recami¹

Ettore Majorana: L'opera scientifica edita e inedita²

Riassunto

Ettore Majorana, probabilmente il più brillante fisico teorico italiano di questo secolo (fu paragonato, da Enrico Fermi, a Galileo e Newton), scomparve misteriosamente da Napoli sessant'anni or sono, nel 1938, all'età di trentun anni. Nella prima parte di questo lavoro se ne tratteggiano la personalità scientifica (sulla base di lettere, documenti, testimonianze da noi raccolti in circa vent'anni) e il significato di alcune parti delle sue pubblicazioni.

Nella seconda porzione di quest'articolo si presenta il Catalogo (redatto da M. Baldo, R. Mignani e E. Recami) dei manoscritti scientifici inediti lasciati da E. Majorana e attualmente quasi tutti depositati presso la "Domus Galilaeana" di Pisa.

CAPITOLO I

ETTORE MAJORANA: LO SCIENZIATO E L'UOMO

1. La Fama

1.1. Genialità

La fama di Ettore Majorana, ovvia per gli specialisti, può solidamente appoggiarsi anche a testimonianze come la seguente, dovuta alla memore penna di Giuseppe Cocconi. Invitato da Edoardo Amaldi³, dal CERN gli scrive:

"Ginevra, 1965 Luglio 18 - Caro Amaldi, In una discussione che si ebbe tempo fa sul libro [poi edito dall'Accademia dei Lincei] che stai scrivendo su Ettore Majorana, ti dissi come io pure ebbi un tenue contatto con Majorana poco prima della sua fine. Tu esprimesti allora il desiderio che ti descrivessi con maggiore dettaglio il mio ricordo, e qui cerco di accontentarti.

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;

sfortunatamente gli mancava quel che invece è comune trovare negli altri uomini, il semplice buon senso".

Spero che queste mie righe ti dicano quanto desideravi. Cordiali saluti, Giuseppe Cocconi".

"Il semplice buon senso"; noi preferiremmo dire il senso comune; il quale non è detto sia sempre buono, o il migliore.

Enrico Fermi⁴ si espresse in maniera 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".

Il mito della "scomparsa" ha contribuito a dare a Majorana, quindi, null'altro che la notorietà che gli spettava, per essere egli davvero un genio: e di una genialità percorritrice dei tempi. Anzi, così come avviene quando è vera, la sua fama è cresciuta e cresce col tempo, anche tra i colleghi. Da una decina d'anni è esplosa: e una elevata percentuale di pubblicazioni scientifiche nel mondo (in alcuni settori della fisica delle particelle elementari) contiene ora il suo nome nel titolo.

Enrico Fermi è stato forse uno degli ultimi - e straordinari - esempi di grande teorico e contemporaneamente di grande sperimentale. Majorana era invece un teorico puro, anzi (per dirla con le stesse parole di Fermi, nel prosieguo del suo scritto a Mussolini) Ettore aveva al massimo grado quel raro complesso di attitudini che formano il fisico teorico di gran classe. Ettore "portava" la scienza, come ha detto Leonardo Sciascia: portava, anzi, la fisica teorica. Non era inferiore a un Wigner [premio Nobel 1963] o a un Weyl: i quali, per il loro rigore fisico-matematico, erano forse gli unici per i quali Ettore nutrì ammirazione senza riserve.

Da un lato, quindi, non aveva alcuna propensione per le attività sperimentali (neanche costretto, per intenderci, avrebbe mai potuto recare contributi concreti a progetti come quello della costruzione tecnologica della bomba atomica). Dall'altro lato, però, sapeva calarsi a profondità insuperate nella sostanza dei fenomeni fisici, leggendovi eleganti simmetrie e nuove potenti strutture matematiche, o scoprendovi raffinate leggi. La sua acutezza lo portava a vedere al di là dei colleghi: ad essere cioè un pioniere. Perfino i suoi appunti di studio - redatti in circa un anno a partire dagli inizi del 1928, quando egli passò dagli studi di ingegneria a quelli di fisica - sono un modello non solo di ordine, divisi come sono in argomenti e persino muniti di indici, ma anche di originalità, scelta dell'essenziale, e sinteticità. Tanto che questi quaderni, noti come i Volumetti, potrebbero essere riprodotti fotograficamente e pubblicati così come si trovano, in modo analogo a quanto qui si sta facendo per i suoi appunti di lezione e a quanto fece la Chicago University Press per gli appunti di meccanica quantistica di

Enrico Fermi: e costituirebbero un ottimo testo moderno (dopo oltre cinquant'anni!) di Istituzione di fisica teorica.

2. Il Concorso a Cattedre del 1937

2.1. Dall'Archivio Centrale dello Stato

Dopo il concorso del 1926, in cui ottennero la cattedra Fermi, Persico e Pontremoli, passarono altri dieci anni prima che si aprisse, nel 1937, un nuovo concorso per la fisica teorica, richiesto dall'università di Palermo per opera di Emilio Segré. Le vicende di questo Concorso, e specialmente i suoi antecedenti, hanno dato luogo nel 1975 ad una vivace polemica tra Leonardo Sciascia, Edoardo Amaldi, e altri (Segré, Zichichi, e chi scrive).

Qui ci limiteremo, secondo la nostra propensione, a riprodurre i documenti certi, esistenti presso l'Archivio Centrale dello Stato (Serie Direz. Gen. Istruzione Superiore; Busta Personali - II serie; Fascicolo Ettore Majorana): in nostro possesso, questa volta, grazie ad una collaborazione coi ticinesi fratelli Dubini, residenti a Colonia. 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. (come sappiamo figliolo dell'omonimo filosofo, già ministro - come si direbbe ora - della Pubblica Istruzione), ideatore delle "parastatistiche" in meccanica quantica. La commissione giudicatrice era costituita da: Enrico Fermi (presidente), Antonio Carrelli, Orazio Lazzarino, Enrico Persico e Giovanni Polvani.

Il verbale n.1 recita:

"La commissione nominata da S.E. il Ministro dell'Educazione Nazionale, e formata dai Professori Carrelli Antonio, Fermi S.E. Enrico, Lazzarino Orazio, Persico Enrico, Polvani Giovanni si è riunita alle ore 16 del giorno 25 ottobre 1937-XV in un'aula dell'Istituto Fisico della R. Università di Roma. La commissione si è costituita nominando come Presidente S.E. Fermi, e come Segretario Carrelli.

Dopo esauriente scambio di idee, la Commissione si trova unanime nel riconoscere la posizione scientifica assolutamente eccezionale del Prof. Majorana Ettore che è uno dei concorrenti. E pertanto la Commissione decide di inviare una lettera e una relazione a S.E. il Ministro per prospettargli l'opportunità di nominare il Majorana professore di Fisica Teorica per alta e meritata fama in una Università del Regno, indipendentemente dal concorso chiesto dalla Università di Palermo. La Commissione, in attesa di ricevere istruzioni da S.E. il Ministro, si aggiorna fino a nuova convocazione.

La seduta è tolta alle ore 19. Letto approvato e sottoscritto seduta stante.

E. Fermi, O. Lazzarino,

E. Persico, G. Polvani, A. Carrelli."

La lettera inviata lo stesso giorno a S.E. il Ministro, sulla quale il ministro Giuseppe Bottai vergò a mano la parola "Urgente", ripete il contenuto del verbale, dichiarando il Prof. Majorana Ettore avere tra i concorrenti una posizione scientifica nazionale e internazionale di tale risonanza che "la Commissione esita ad applicare a lui la procedura normale dei concorsi universitari".

Tale lettera ha un allegato, Relazione sulla attività scientifica del Prof. Ettore Majorana; firmata, come sempre, nell'ordine: Fermi, Lazzarino, Persico, Polvani e Carrelli. Vediamola:

"Prof. Majorana Ettore si è laureato in Fisica a Roma nel 1929. Fin dall'inizio della sua carriera scientifica ha dimostrato una profondità di pensiero ed una genialità di concezione da attirare su di lui la attenzione degli studiosi di Fisica Teorica di tutto il mondo. 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 stabilità 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 nel Par. 5.4), 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. E questo tocco di originalità in un documento burocratico è rallegrante; e l'argomento ci trova del tutto consenzienti.

Una volta attribuita la cattedra a Ettore "fuori concorso" - applicando una legge che era stata usata per dare una cattedra universitaria, appunto fuori concorso, a Guglielmo Marconi [premio Nobel 1909] - , la commissione riprendeva i suoi lavori giungendo all'unanimità alla formazione della terna vincente: 1° Gian Carlo Wick; 2° Giulio Racah; 3° Giovannino Gentile.

Wick andò a Palermo, Racah a Pisa, e Gentile Jr. a Milano. Giovannino Gentile, grande amico di Ettore⁵, scomparirà prematuramente nel 1942.

3. L'opera scientifica

"En science, nous devons nous int'resser aux choses, non aux personnes", ebbe a dover dire la polacca Marya Sklodowska in Curie [Madame Curie: premio Nobel 1903-Fisica e 1911-Chimica]. 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 nel 1928 (anno in cui pubblicò già un articolo, il primo: scritto insieme con l'amico Gentile), e poi si dedicò alla fisica teorica solo per pochissimi anni, fino al 1933.

Ma Ettore ci ha lasciato anche vari manoscritti scientifici inediti, pure depositati presso la "Domus Galilaeana"; di cui abbiamo redatto un catalogo in collaborazione con M. Baldo e R. Mignani. L'analisi di questi manoscritti permette di rilevare: 1) 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; 2) che fra il materiale inedito molti spunti hanno ancora interesse scientifico attuale (insieme coi colleghi citati, abbiamo operato una selezione: alcune centinaia di pagine [trasmesse in copia anche al Center for History of Physics dell'A.I.P., New York, e relativa "Niels Bohr Library"] possono ancora essere utili per la ricerca contemporanea; ma solo poche pagine sono state da noi interpretate e pubblicate⁶; 3) che tutto il materiale esistente sembra scritto entro il 1933 (anche la bozza dell'ultimo articolo, sulla "Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone", che 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 positone); 4) 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 17.3.31 fino al 16.11.37) allo zio Quirino, il quale lo sollecitava a fornire una spiegazione teorica dei risultati dei propri esperimenti. Queste lettere, pervenute a suo tempo a Franco Bassani e a noi per concessione di Silvia Quirino Toniolo, sono di carattere essenzialmente tecnico: tanto che ne abbiamo pubblicato altrove solo una piccola parte; ma esse mostrano in tal modo che anche negli ultimi anni Ettore, almeno per amore dello zio, ben sapeva tornare alla fisica, mostrando di possedere sempre le sue doti di eccelso teorico.

Invero la sorella Maria ricorda 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 ora 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. Altri lumi ci giungono, indirettamente, dalle importanti lettere scritte al C.N.R. da Lipsia, e di cui diremo nel Paragrafo 5.7.

3.2. Le prime pubblicazioni

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 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 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.

3.3. 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 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.); 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)⁷ 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.

3.4. Le forze di scambio

Non appena, al sorgere del 1932, giunge a Roma notizia degli esperimenti dei Joliot-Curie [premio 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 sono ora 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, o 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 `e 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, 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 simmetria di elettrone e anti-elettrone, pubblicata solo quattro anni più tardi.

3.5. Il neutrino di Majorana

Dai manoscritti lasciati 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 “positone”. 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 positone”, 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 reale⁸.

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 campi⁹. Ora sono di gran moda espressioni come “spinori di Majorana”, “massa di Majorana”, “neutrini di Majorana”.

Le pubblicazioni di Majorana (ancora poco note, nonostante tutto) sono per la Fisica una miniera. 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.

3.6. Esistono altri manoscritti scientifici inediti?

Tornando alla lettera del 18 febbraio al padre, in essa troviamo una notizia molto interessante: "Pubblicherò in tedesco, estendendolo, anche l'ultimo mio articolo apparso sul "Nuovo Cimento". Questo progetto non verrà poi realizzato; ma è importante che 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 CNR (ritrovate presso gli archivi del C.N.R., e a me 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 non ne fece più nulla; tanto che nella sua relazione finale (14.9.33) al CNR non la menziona neppure più: era divenuta tabù. Dopo avervi ricordato l'articolo sulla "Teoria dei nuclei", infatti, Majorana passa subito a parlare delle ricerche iniziate nel secondo periodo di Lipsia:

"Nell'ultimo periodo della mia residenza a Lipsia ho iniziato altri lavori che non ho potuto in seguito, per motivi di salute, né completare né avvicinare alla conclusione. Credo inutile parlarne". Perché? Perché Ettore, poi, non ne fece niente? Si potrebbe pensare che all'ultimo momento abbia riscontrato qualche grave errore, che inficiasse la sua nuova teoria. Ma, conoscendo Majorana, non lo riteniamo probabile. Propendiamo, semmai, per un'altra possibile spiegazione: il "referee" della rivista tedesca può avere respinto il suo manoscritto, tanto pionieristico, non avendolo capito (purtroppo l'archivio di quegli anni della Zeitschrift für Physik pare sia andato perduto durante la Seconda guerra mondiale). Ed Ettore non era persona da mettersi a combattere con gli sciocchi. Il colpo di grazia può essergli venuto da quei burocrati del CNR i quali pretenderanno che gli articoli di Majorana, che avrebbero recato lustro alla migliore rivista internazionale di fisica, uscissero sulle (allora ancora provinciali) riviste di lingua italiana. Ettore rispose a tono (il 9.5.33), ma poi potrebbe avere preso il sopravvento in lui quella noia, quel malessere per la stupidità umana che in un genio, in lui pur così affettuoso col prossimo, doveva agire ancora più prepotentemente che nei comuni mortali.

Non dimentichiamo però che la citata lettera a Quirino del 16.1.1936 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?

In seguito ad una approfondita ricerca¹⁰ effettuata - in qualità di regista televisivo - per conto della Rai-3, Sede di Palermo, Bruno Russo ha rintracciato e opportunamente intervistato, nel 1990, gli studenti che seguirono le lezioni universitarie tenute da Majorana a Napoli nei primi mesi del 1938.

Si è così venuti a sapere che Majorana, il giorno prima di salpare da Napoli (e successivamente sparire), consegnò alla propria studentessa Sig.na Gilda

Senatore [ora Prof.ssa Senatore] una cartelletta di carte scientifiche. Si ha ragione di credere che tale cartelletta contenesse anche alcuni almeno dei risultati del lavoro svolto da Majorana, in isolamento (e senza pubblicarne nulla: eccezion fatta per il materiale confluito nella "tarda" pubblicazione n.9), tra il 1933 e il 1938. Tali risultati sarebbero di straordinaria importanza, più ancora che storica, per la stessa fisica teorica contemporanea.

Avvenne che la Sig.na Senatore mostrò i manoscritti di Majorana al Dottor Cennamo, suo futuro marito, allora Assistente del Direttore Antonio Carrelli, e questi ritenne opportuno consegnarli - in via burocratica e gerarchica - al Professor Carrelli; e, per quanto a noi ora consta, essi si persero. Tale perdita, per la fisica teorica moderna, è davvero grave. Al riguardo ha dato nuova, ampia, interessante testimonianza la stessa Prof.ssa Gilda Senatore, durante le celebrazioni organizzate nel 1998 dalla memore Università di Napoli per i sessant'anni dalla scomparsa di Majorana.

3.7. Testimonianze di colleghi

Molte altre idee di Ettore, quando non restarono nella sua mente, hanno lasciato traccia soltanto nelle sue carte inedite, o nella memoria dei colleghi.

Una delle testimonianze più interessanti che abbiamo raccolto è di GianCarlo Wick. Da Pisa il 16 Ott. 1978 scrive:

"Caro Prof. Recami: . . . Il contatto scientifico [tra me ed Ettore] di cui le accennò Segré non avvenne a Lipsia, ma a Roma in occasione del Congresso Volta (dunque 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 Pauli¹¹ e Weisskopf rimasi assolutamente convinto che quello che Majorana aveva descritto fosse la stessa cosa. Beninteso, Majorana non pubblicò nulla e probabilmente non ne parlò a molti. Non ho nessunissima ragione di pensare che Pauli e Weisskopf ne sapessero nulla. . . - Cordialmente - Suo G.C. Wick".

E dal M.I.T. (Cambridge, Mass.), il 16 maggio 1984, Victor Weisskopf ci scriverà:

"Dear Dr. Recami: . . . I am very glad that you have found a letter in which Majorana says that he had good relations with me. . . I have only a vague recollection that I did have a discussion [at Copenhagen, in 1933], with Majorana about the newest developments in quantum electrodynamics".

L'articolo di Pauli e Weisskopf a cui accenna GianCarlo Wick uscì nel 1934 [Helvetica Physica Acta 7 (1934) 709]. Continua Wick

". . . Non ebbi mai occasione in seguito di parlare a Heitler di questo episodio. . . Non ci sarebbe da stupirsi se se ne fosse dimenticato, perché Majorana aveva parlato della cosa con quel tono distaccato e ironico che spesso usava anche a proposito delle cose sue. Insomma, senza darsi importanza. . . "¹².

Un'altra testimonianza ci giunge, anche se indirettamente, dalla grande e tragica figura di Bruno Touschek. Il 29.10.76 da Rieti ci scriveva infatti Eliano Pessa:

". . . Abbiamo discusso con Touschek il tuo lavoro su Majorana¹³ in Scientia 110 (1975) 577; ha avuto da dire per ciò che riguarda il tuo elenco delle opere scientifiche di Majorana a pag. 585. Secondo lui si dovrebbe aggiungere la teoria dell'oscillatore di Majorana", che è implicitamente contenuta nella sua teoria del

neutrino. L'oscillatore di Majorana è descritto da un'equazione del tipo $\ddot{q} + \delta(t)q = 0$ dove δ è una costante e $\delta(t)$ è la funzione delta di Dirac. Secondo Touschek le proprietà di questo oscillatore presentano un notevole interesse, specie per ciò che riguarda lo spettro energetico.

Non vi è, comunque, una bibliografia in merito. . . . “

Il problema, in verità, sembra essere non tanto quello di risolvere l'equazione (ben nota), quanto di intendere cosa avesse in mente (quali condizioni al contorno, ad esempio) Bruno Touschek.

3.8. Wataghin

Approfittiamo, infine, dei ricordi di Wataghin per ritornare ai giorni di Lipsia. Gleb Wataghin, il noto fisico italiano di origine ucraina recentemente scomparso, fondatore della fisica brasiliana, ce ne ha lasciato una testimonianza nel 1975 presso l'Università di Campinas (Stato di San Paolo del Brasile), in una intervista raccolta in lingua portoghese presso l'Istituto di Fisica che da lui prende il nome. Il linguaggio, ovviamente, è colloquiale:

“A Lipsia, ove lavorava Heisenberg, incontrai Jordan, Debye, Max Born che vi stava arrivando, ed anche Ettore Majorana: giovane che *pareceu, como era realmente, um verdadeiro genio*. . . Il cameratismo, l'amicizia esistente tra gli scienziati. . . si manifestava, per esempio, nel modo in cui si svolgevano le discussioni scientifiche, cos'ì come le manifestazioni sportive.

A Lipsia ci si riuniva, per un seminario di due ore, dalle due alle quattro del pomeriggio. Di mattina i teorici dormono.¹⁴ Dopo si andava a giocare a ping-pong nella migliore biblioteca, su un tavolo per gli studenti. Posso dire che il campione era Heisenberg. Poi si andava a piedi in una birreria, e magari si giocava a scacchi. Si giocava a scacchi anche all'Istituto di fisica.

Poiché Heisenberg era uno dei direttori, nessuno protestava che si giocasse a ping-pong o a scacchi in biblioteca: cosa impensabile, a quel tempo, in altri Istituti. . . Ai seminari giungeva gente di tutto il mondo. Per esempio, ricordo che una volta il seminario fu tenuto da Norzig e un suo collega: furono obbligati a una discussione molto impegnativa *depois das perguntas que faziam o Heisenberg e o Ettore Majorana* (a seguito delle domande che fecero H. ed E.M.)”.

Ancora, dichiara Wataghin nell'intervista:

“Vorrei ricordare in particolare la figura di Majorana, che - secondo il giudizio di molti, e in particolare dello stesso Fermi - era un genio eccezionale. . . Ammalato, soffriva di ulcera, mangiava quasi esclusivamente latte; non praticava sport o ginnastica; molte volte faceva delle lunghe passeggiate da solo. Poco comunicativo. Ma lo incontravamo ogni tanto, il sabato. Era molto critico: trovava che *toda gente que ele encontrava era não preparada, ou estúpida, etc*. Si occupava molto di leggi statistiche applicate alla materia nucleare. . . La simmetria di scambio tra protoni e neutroni poteva essere completa, compresi carica e spin; o riguardare solo la carica, o lo spin. Ciò non era stato proposto o studiato da altri. E la simmetria per scambio delle sole posizioni di protoni e neutroni (senza toccare lo spin) permetteva di comprendere statisticamente perché la materia nucleare dovesse avere una densità costante. . . Il che faceva sì che la teoria di Majorana avesse un grande vantaggio rispetto a quella proposta da Heisenberg”.

3.9. P.S.: Gli appunti per la lezione inaugurale (13.1.38)

“In questa prima lezione di carattere introduttivo illustreremo brevemente gli scopi della fisica moderna e il significato dei suoi metodi, soprattutto in quanto essi hanno di più inaspettato e originale rispetto alla fisica classica.

“La fisica atomica, di cui dovremo principalmente occuparci, nonostante le sue numerose e importanti applicazioni pratiche - e quelle di portata più vasta e forse rivoluzionaria che l'avvenire potrà riservarci -, rimane anzitutto una scienza di enorme interesse speculativo, per la profondità della sua indagine che va veramente fino all'ultima radice dei fatti naturali. Mi sia perciò consentito di accennare in primo luogo, senza alcun riferimento a speciali categorie di fatti sperimentali e senza l'aiuto del formalismo matematico, ai caratteri generali della concezione della natura che è accettata nella nuova fisica.

“La fisica classica (di Galileo e Newton) all'inizio del nostro secolo era interamente legata, come si sa, a quella concezione meccanicistica della natura che dalla fisica è dilagata non solo nelle scienze affini, ma anche nella biologia e perfino nelle scienze sociali, informando di sé in tempi a noi abbastanza vicini tutto il pensiero scientifico e buona parte di quello filosofico; benché, a dire il vero, l'utilità del metodo matematico che ne costituiva la sola valida giustificazione sia rimasta sempre circoscritta esclusivamente alla fisica.

“Questa concezione della natura poggiava sostanzialmente su due pilastri: l'esistenza oggettiva e indipendente della materia, e il determinismo fisico. In entrambi i casi si tratta, come vedremo, di nozioni derivate dall'esperienza comune e poi generalizzate e rese universali e infallibili soprattutto per il fascino irresistibile che anche sugli spiriti più profondi hanno in ogni tempo esercitato le leggi esatte della fisica, considerate veramente come il segno di un assoluto e la rivelazione dell'essenza dell'universo: i cui segreti, come già affermava Galileo, sono scritti in caratteri matematici.

“L'oggettività della materia è, come dicevo, una nozione dell'esperienza comune, poiché questa insegna che gli oggetti materiali hanno un'esistenza a sé, indipendente dal fatto che essi cadano o meno sotto la nostra osservazione. La fisica matematica classica ha aggiunto a questa constatazione elementare la precisazione o la pretesa che di questo mondo oggettivo è possibile una rappresentazione mentale completamente adeguata alla sua realtà, e che questa rappresentazione mentale può consistere nella conoscenza di un serie di grandezze numeriche sufficienti a determinare in ogni punto dello spazio e in ogni istante lo stato dell'universo fisico.

“Il determinismo è invece solo in parte una nozione dell'esperienza comune. Questa dà infatti al riguardo delle indicazioni contraddittorie. Accanto a fatti che si succedono fatalmente, come la caduta di una pietra abbandonata nel vuoto, ve ne sono altri - e non solo nel mondo biologico - in cui la successione fatale è per lo meno poco evidente. Il determinismo in quanto principio universale della scienza ha potuto perciò essere formulato solo come generalizzazione delle leggi che reggono la meccanica celeste. E' ben noto che un sistema di punti - quali, in rapporto alle loro enormi distanze, si possono considerare i corpi del nostro sistema planetario - si muove e si modifica obbedendo alle leggi di Newton. . . (omissis). . . Ne segue che la configurazione futura del sistema può essere prevista con il calcolo purché se ne conosca lo stato iniziale (cioè l'insieme delle posizioni e velocità dei punti che lo compongono). E tutti sanno con quale estremo rigore le osservazioni astronomiche abbiano confermato l'esattezza della legge di Newton; e come gli astronomi siano effettivamente in grado di prevedere con il

suo solo aiuto, e anche a grandi distanze di tempo, il minuto preciso in cui avrà un'eclisse, o una congiunzione di pianeti o altri avvenimenti celesti.

“Per esporre la meccanica quantistica nel suo stato attuale esistono due metodi pressoché opposti. L'uno è il cosiddetto metodo storico: ed esso spiega in qual modo, per indicazioni precise e quasi immediate dell'esperienza, sia sorta la prima idea del nuovo formalismo; e come questo si sia successivamente sviluppato in una maniera obbligata assai più dalla necessità interna che non dal tenere conto di nuovi decisivi fatti sperimentali. L'altro metodo è quello matematico, secondo il quale il formalismo quantistico viene presentato fin dall'inizio nella sua più generale e perciò più chiara impostazione, e solo successivamente se ne illustrano i criteri applicativi. Ciascuno di questi due metodi, se usato in maniera esclusiva, presenta inconvenienti molto gravi.

“E' un fatto che, quando sorse la meccanica quantistica, essa incontrò per qualche tempo presso molti fisici sorpresa, scetticismo e perfino incomprensione assoluta, e ciò soprattutto perché la sua consistenza logica, coerenza e sufficienza appariva, più che dubbia, inafferrabile. Ciò venne anche, benché del tutto erroneamente, attribuito a una particolare oscurità di esposizione dei primi creatori della nuova meccanica; ma la verità è che essi erano dei fisici, e non dei matematici, e che per essi l'evidenza e giustificazione della

teoria consisteva soprattutto nell'immediata applicabilità ai fatti sperimentali che l'avevano suggerita. La formulazione generale, chiara e rigorosa è venuta dopo, e in parte per opera di cervelli matematici. Se dunque noi rifacessimo semplicemente l'esposizione della teoria secondo il modo della sua apparizione storica, creeremo dapprima inutilmente uno stato di disagio o di diffidenza, che ha avuto la sua ragione d'essere ma che oggi non è più giustificato e può essere risparmiato. Non solo, ma i fisici - che sono giunti, non senza qualche pena, alla chiarificazione dei metodi quantistici attraverso le esperienze mentali imposte dal loro sviluppo storico - hanno quasi sempre sentito a un certo momento il bisogno di una maggiore coordinazione logica, di una più perfetta formulazione dei principi, e non hanno sdegnato per questo compito l'aiuto dei matematici.

“Il secondo metodo, quello puramente matematico, presenta inconvenienti ancora maggiori. Esso non lascia in alcun modo intendere la genesi del formalismo e in conseguenza il posto che la meccanica quantistica ha nella storia della scienza. Ma soprattutto esso delude nella maniera più completa il desiderio di intuirne in qualche modo il significato fisico, spesso così facilmente soddisfatto dalle teorie classiche. Le applicazioni, poi, benché innumerevoli, appaiono rare, staccate, perfino modeste di fronte alla sua soverchia e incomprensibile generalità.

“Il solo mezzo di rendere meno disagiata il cammino a chi intraprende oggi lo studio della fisica atomica, senza nulla sacrificare della genesi storica delle idee e dello stesso linguaggio che dominano attualmente, è di premettere un'esposizione il più possibile ampia e chiara degli strumenti matematici essenziali della meccanica quantistica, in modo che essi siano già pienamente familiari quando verrà il momento di usarli e non spaventino allora o sorprendano per la loro novità: e si possa così procedere speditamente nella derivazione della teoria dai dati dell'esperienza.

“Questi strumenti matematici in gran parte preesistevano al sorgere della nuova meccanica (come opera disinteressata di matematici che non prevedevano un così eccezionale campo di applicazione), ma la meccanica quantistica li ha “sforzati” e ampliati per soddisfare alle necessità pratiche; così essi non verranno

da noi esposti con criteri di matematici, ma di fisici. Cioè senza preoccupazioni di un eccessivo rigore formale, che non è sempre facile a raggiungersi e spesso del tutto impossibile.

“La nostra sola ambizione sarà di esporre con tutta la chiarezza possibile l'uso effettivo che di tali strumenti fanno i fisici da oltre un decennio, nel quale uso - che non ha mai condotto a difficoltà o ambiguità - sta la fonte sostanziale della loro certezza”.

Ettore Majorana

4. Elenco delle Pubblicazioni di Ettore Majorana

Prima di passare al Capitolo II, in cui elenchiamo i manoscritti scientifici inediti lasciati dal Majorana (e forniamo in particolare il catalogo dei “Quaderni”, inediti), ricordiamo qui gli scritti da Majorana pubblicati: i quali pure, come già si diceva, sono una miniera ancora parzialmente inesplorata di idee e di tecniche di alta fisica teorica. Abbiamo già detto, per fare solo un esempio, che nell'articolo n. 6 (quello in cui viene scoperto l'effetto Majorana-Brossel) Ettore introdusse anche la “Sfera di Majorana” per rappresentare spinori mediante punti su di una superficie sferica. Tale invenzione è nota soltanto da quando R. Penrose, accortosene in anni non lontani, ne ha fatto opportuna propaganda in *300 Years of Gravity*, ed. by S.W.Hawking & W.Israel (Cambridge Univ.Press.; 1987). Questa “Sfera” viene attualmente studiata da un gruppo di Palermo (C. Leonardi, F. Lillo, A. Vaglica e G. Vetri: ved. la Bibliografia).

1 “Sullo sdoppiamento dei termini Roentgen ottici a causa dell'elettrone rotante e sulla intensità delle righe del Cesio”, in collaborazione con Giovanni Gentile Jr.: *Rendiconti Accademia Lincei*, vol. 8, pp.229-233 (1928).

2 “Sulla formazione dello ione molecolare di He”: *Nuovo Cimento*, vol. 8, pp.22-28 (1931).

3 “I presunti termini anomali dell'Elio: *Nuovo Cimento*, vol. 8, pp.78-83 (1931).

4 “Reazione pseudopolare fra atomi di Idrogeno”: *Rendiconti Accademia Lincei*, vol. 13, pp.58-61 (1931).

5 “Teoria dei tripletti P” incompleti”: *Nuovo Cimento*, vol. 8, pp.107-113 (1931).

6 “Atomi orientati in campo magnetico variabile”: *Nuovo Cimento*, vol. 9, pp.43-50 (1932).

7 “Teoria relativistica di particelle con momento intrinseco arbitrario: *Nuovo Cimento*, vol. 9, pp. 335-344 (1932).

8 “Über die Kerntheorie”: *Zeitschrift f. Physik*, vol. 82, pp.137-145 (1933).

8bis “Sulla teoria dei nuclei”: *La Ricerca Scientifica*, vol. 4 (1), pp.559-565 (1933).

9 “Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone”: *Nuovo Cimento*, vol. 14, pp.171-184 (1937).

10 “Il valore delle leggi statistiche nella fisica e nelle scienze sociali (pubblicazione postuma, a cura di G. Gentile Jr.): *Scientia*, vol. 36, pp.55-66 (1942).

Alcuni commenti:

7) Questo è il famoso articolo con l'equazione quanto-relativistica a infinite componenti.

8) Questo è l'articolo con le “forze di scambio” nucleari di Majorana-Heisenberg (che spiega ad es. come esse si saturino per la particella alfa).

9) Questo è il manoscritto che E.M. estrasse dal cassetto nel 1937 (era pronto dal 1932/33), e pubblicò, circa i neutrini di Majorana, la "massa di Majorana", gli spinori di Majorana, etc. All'inizio, esso fu notato quasi soltanto per la presenza della rappresentazione (di Majorana) delle matrici di Dirac.

10) Questo scritto, postumo, fu estratto da Giovannino Gentile (figlio di uno dei più famosi filosofi italiani della prima metà del secolo, cioè dell'ex Ministro dell'Educazione Nazionale G.Gentile sr.) dalle carte lasciate da E.M. Si tratta di un articolo semi-divulgativo. Tra parentesi, G.Gentile jr. fu il primo a introdurre le parastatistiche (tanto che in America Latina vari autori chiamano "gentilioni" le particelle che obbediscono a parastatistiche).

Capitolo II

ELENCO DEI MANOSCRITTI SCIENTIFICI INEDITI DI E. MAJORANA¹⁵

5. Introduzione

Si vuole qui dare breve notizia dei manoscritti scientifici inediti lasciati da Ettore Majorana¹⁶ e a noi finora noti, e del relativo Catalogo. La maggior parte di tali manoscritti si trovano presso gli archivi della "Domus Galilaeana" di Pisa.¹⁷ Oltre ai suoi appunti per le proprie lezioni universitarie tenute a Napoli tra il Gennaio e il Marzo 1938 - appunti recentemente pubblicati¹⁸ - essi comprendono essenzialmente: (a) la tesi di laurea; (b) dodici fascicoli (riordinati da R. Liotta;¹⁹ (c) cinque Volumetti manoscritti; e (d) diciotto Quaderni.

I "Volumetti" sono stati redatti da Majorana tra il 1927 e il 1930, tranne l'ultimo che è stato presumibilmente scritto nel 1932 (non prima, perché il Volumetto V contiene a pag. 8 la schematizzazione dell'interazione nucleare, mediante scattering da buca sferica a profilo rettangolare, sotto il titolo "Urto tra protoni e neutroni": e il nome neutrone venne coniato nel 1932 (5);²⁰ e non dopo, perché verso il termine vi si incontrano i prodromi del suo articolo n. 7, uscito nel 1932). Essi sono quaderni-libro, ordinatissimi, divisi in capitoli, con pagine numerate e indice. I loro indici sono stati già resi noti da Liotta. (4) Nei Volumetti - scritti ciascuno nel tempo di un anno circa - Ettore sintetizza tutto ciò che ritiene essenziale dei suoi studi, prima di studente e poi di ricercatore. Come si è già detto altrove, tali Volumetti potrebbero essere riprodotti fotograficamente, così come sono, e costituirebbero un ottimo testo moderno di consultazione in fisica teorica per gli studenti universitari di oggi. Essi, tra parentesi, mettono in evidenza una delle caratteristiche più geniali di Ettore: cioè la capacità di scernere fra tutto il materiale gli elementi matematici e fisici più importanti per gli sviluppi futuri.

6. I "Volumetti": Cenno

A volte i "Volumetti" contengono anche spunti originali. Qui segnaliamo, in breve, quanto segue. Vol. II: nel capitolo 31, a pag. 78, Majorana cerca di ricavare la relazione $e^2 = \hbar c$; Vol. III: nel cap. 18, a pag. 105, sotto il titolo "Matrici di Dirac e Gruppo di Lorentz" (scritto tra il 28.06.29 e il 23.04.30), tratta il problema delle rappresentazioni di un numero generico p di matrici di Dirac con un numero arbitrario n di dimensioni: cioè il problema dell'equazione d'onda relativistica di un oggetto con spin arbitrario in uno spazio-tempo p -dimensionale; Vol. V: nel cap. 2, a pag. 8, tratta - come si è detto - dell'urto fra il protone e l'appena scoperto neutrone (prescindendo dallo spin del neutrone: "se esiste", dice); nel cap. 8, a pag. 36, comincia la trattazione delle rappresentazioni unitarie a infinite dimensioni del gruppo di Lorentz, che sfocerà nell'articolo n. 7 del 1932.

7. I Quaderni Scientifici

Il materiale che richiama la maggior attenzione è costituito dai diciotto Quaderni scientifici, in cui Ettore stende le parti più importanti delle sue ricerche a noi note (dopo i primi tentativi eseguiti, insieme coi calcoli numerici, su fogli a parte: raccolti ora nei fascicoli). Di questi Quaderni agli inizi degli anni Settanta non esisteva ancora alcun catalogo accettabile, dato che in Bibl. (4) erano stati solo elencati i "titoli" che Majorana stesso, saltuariamente e casualmente, aveva voluto mettere all'inizio di qualche sua indagine teorica: salvo poi, magari, interrompere tale indagine dopo mezza pagina per iniziarne - senza alcun segnale - una diversa, continuandola per parecchie pagine. In tali anni, quindi, ci si accinse a redarne un Catalogo,²¹ recentemente pubblicato. Di tale catalogo vogliamo qui segnalare l'esistenza, anche se esso, qua e là, presenta ancora qualche incertezza; esso apparirà nella parte finale di questo lavoro.

I Quaderni non recano date, e la loro numerazione (preesistente al nostro intervento) non segue l'ordine cronologico: per esempio, Ettore compilò il Quaderno IX ancora da studente. Osserviamo, tra parentesi, come l'esame dei manoscritti inediti suggerisca che anche il materiale per l'articolo n. 9 (pubblicato solo nel 1937, alle soglie del Concorso a cattedre universitarie) sia stato sostanzialmente preparato da Ettore entro il 1933. Naturalmente tra il materiale inedito (e non solo nei Quaderni) molti spunti e molte idee hanno ancora interesse scientifico attuale; noi abbiamo operato una selezione di tale materiale: alcune centinaia di pagine [trasmesse in copia anche al Center for History of Physics dell'A.I.P., New York, e relativa Niels Bohr Library] possono essere ancora utili per la ricerca contemporanea. Una piccola parte di esse sono state da noi studiate, interpretate e pubblicate.^{22, 23}

Catalogo dei Quaderni Scientifici

7.1. Quaderno I

p. 1: Risoluzione dell'eq. di Schrödinger con campo coulombiano regolarizzato nell'origine (ad es. per il caso de scattering di elio su idrogeno):

(a) metodo perturbativo, con sostituzione di $1/r$ con $1/\sqrt{r^2 + a^2}$;

(b) tentativo di risoluzione, con $1/r$ per $r > R$, e costante negativa per $r < R$;

(c) trattazione standard dello scattering da potenziale coulombiano. p. 14: Gruppo di Lorentz ed equazioni relativistiche del moto: lontana anticipazione dell'articolo n. 7 del 1932, con introduzione degli operatori a e b ivi contenuti. Ricordiamo che il manoscritto di tale articolo è allegato al fascicolo n. 8, busta II, e che interessante vi è una pagina poi cancellata da Majorana.

p. 26: Algebra degli spinori di Dirac, in relazione anche al suddetto articolo n. 7 (1932) e all'articolo n. 9 del 1937.

p. 37: Di nuovo Gruppo di Lorentz e Algebre spinoriali: equazioni relativistiche (in relazione all'articolo n. 7). Equazioni relativistiche al limite non-relativistico (mediante decomposizione degli spinori a 4 componenti o di spinori più generali).

p. 42: Atomo di Idrogeno relativistico.

p. 48: Appunti vari (eq. di Dirac; Gruppo di Lorentz).

p. 50: Appunti sulle regole di quantizzazione tipo Dirac.

p. 51: Da capo, Atomo di H relativistico: trattazione standard, con tabulazione delle funzioni d'onda angolari.

p. 64: Onde sferiche relativistiche.

p. 66: Quantizzazione del campo elettromagnetico libero (principio variazionale; trasformazioni di Lorentz del campo elettromagnetico; gauge di Coulomb; quantizzazione). A questa pagina erano inseriti dei fogli di carta da lettere listati a lutto (forse del 1934, anno della scomparsa del padre).

p. 76: Seguono 25 pagine lasciate in bianco, apparentemente per lavoro ancora da svolgere.

p. 101: Teoria dell'elettrone. Caso di due elettroni liberi. Tentativo per il caso di due elettroni interagenti.

p. 106: Scattering di particelle da un potenziale (teoria formale dello scattering): (a) metodo di Dirac; (b) metodo di Born; (c) tentativo di calcolo al secondo ordine.

p. 144: Onda piana in coordinate paraboliche.

p. 118: Inizio di studio delle frequenze di oscillazione (piccole oscillazioni) nell' NH_3 .

p. 121: Passaggio di un atomo orientato nei pressi di un punto di campo magnetico nullo (cfr. articolo n. 6 del 1932).

p. 132: Equazioni relativistiche del moto: Quantizzazione della equazione di Dirac.

p. 141: Inizio di tabella sulle funzioni di Bessel.

p. 145: Teoria di Dirac (?): tentativo di introduzione di insoliti operatori di traslazione spazio-temporale.

p. 150: Equazione di Dirac a massa nulla (equazione di Weyl). Inizio di teoria a due componenti del neutrino.

p. 154: Corpo rigido (ved. anche pag. 180).

p. 161: Orbitali interni del Calcio. Calcolo con potenziale coulombiano più potenziale schermato (fenomenologico): risoluzione approssimata, apparentemente originale. Caso $1s$.

p. 180: Rappresentazione del Gruppo delle rotazioni: cenno.

p. 186: Appunti di teoria degli stati instabili (cfr. la Tesi di laurea). Cenno sulla correlazione di incertezza energia-tempo.

7.2. Quaderno 2

p. 1: Calcoli vari di elettromagnetismo classico.

p. 3: Problema dei due centri (ad es. per molecola H_2): soluzione per vari casi generali, con calcolo della normalizzazione.

p. 35: Piccoli calcoli di Relatività generale.

p. 37: Continuazione da pag. 112 (vedi).

p. 38: Campo di Dirac: calcoli vari. ("Versuchenweiser").

p. 46: Equazione di Dirac: decomposizione in quattro equazioni componenti, disaccoppiate al limite non relativistico. Idem, dedotta da un principio variazionale; e nuova decomposizione. Problema della definizione positiva della densità di carica.

p. 60: Idem: calcolo degli stati stazionari.

p. 69: Carica deformabile (problema risolto).

p. 75: Trasformazioni di Lorentz ed Equazioni di Maxwell.

p. 79: ?

p. 81: Equazione relativistica per particella libera o in campo elettromagnetico.

p. 86: Approccio preliminare al nucleo atomico come formato da bosoni positivi e bosoni negativi. Campo scalare complesso per particelle cariche.

(Nel complesso, teoria non di facile interpretazione).

- p. 98: Carica in moto relativistico.
 - p. 101: Elettrodinamica quantistica (quantizzazione del campo elettromagnetico), fino a pag. 112.
 - p. 101: Alla pagina 101 sono allegate sette pagine (pag. 101/1 – 101/7) con lo studio delle analogie tra le equazioni di Maxwell e l'equazione di Dirac (cfr. anche Quaderno 3, p. 20). Tale allegato ha dato origine all'articolo "About a Dirac-like equation for the photon, according to E. Majorana" (di M. Baldo, R. Mignani e E. Recami): Lett. Nuovo Cimento 11 (1974) 568; e più recentemente, agli articoli di E. Giannetto, Lett. Nuovo Cimento 44 (1985) 140 e 145, e di S. Esposito, Found. of Phys. 28 (1998) 231.
 - p. 113: Spinori di Dirac.
 - p. 115: Calcoli numerici.
 - p. 121: Ancora sul problema dei due centri (un elettrone e due nuclei).
 - p. 130: Ancora sul problema coulombiano puro (nuovo metodo di risoluzione).
 - p. 137: Ancora sull'equazione di Dirac.
 - p. 141: Sovrapposizione di campi di Maxwell e Dirac. Calcoli vari. Quantizzazione.
 - p. 150: Ancora sugli stati stazionari per l'equazione di Dirac. Questione dell'elicità (?).
 - p. 157: Calcoli perturbativi. Correlazione d'incertezza energia-tempo. Calcoli vari. Approssimazioni varie. Equazioni algebriche.
 - p. 170: Calcolo approssimato di un integrale.
 - p. 171: Calcoli vari.
 - p. 176: Atomo di H in un campo elettrico.
 - p. 178: idem, più carica infinitesima.
 - p. 182: Equazioni di Maxwell.
 - p. 184: Spinore di Dirac; tetra-corrente di Dirac. Calcoli di non facile interpretazione.
 - p. 195: Matrici di Pauli.
- 7.3. Quaderno 3
- p. 1: Teoria di Dirac generalizzata a spin superiori. Trasformazioni infinitesime di Lorentz nella rappresentazione ordinaria (in 4 dimensioni cartesiane).
 - p. 2: idem: teoria di Dirac a $2n(n + 1)$ componenti.
 - p. 8: idem: casi $n = 1$ (quattro componenti) e $n = 2$ (dodici componenti).
 - p. 11: Irraggiamento: equazioni di Maxwell con vettore elettromagnetico complesso $\mathbf{Z} = \mathbf{E} + i\mathbf{H}$.
 - p. 16: idem: caso del campo agente su una carica in moto radiale. Introduzione di formalismo analogo a quello quantistico per la descrizione del campo elettromagnetico (attraverso la posizione $\mathbf{j} = \mathbf{E}_j - i\mathbf{H}_j$).
 - p. 20: Tentativo di scrittura delle equazioni di Maxwell in maniera simile alla equazione di Dirac. (Questione della realtà fisica della funzione d'onda del fotone?).
 - p. 26: elenco di alcuni argomenti.
 - p. 28: Tabella.
 - p. 29: Urto tra due elettroni (metodo di Moller).
 - p. 31: Elettrone in campo elettromagnetico: calcoli per trovare l'Hamiltoniana.
 - p. 34: L'operatore $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ (operatore energia); equazione di Klein-Gordon non quadratica?

- p. 35: Riprende un esercizio precedente.
- p. 36: Equazione di Dirac con campo centrale (atomo di H relativistico).
Correzioni relativistiche standard all'atomo di H.
- p. 38: Scattering elastico coulombiano.
- p. 41: Effetto Compton (teoria di Dirac): solo impostazione.
- p. 42: Pagine lasciate in bianco, fino a pag. 60.
- p. 61: Campo elettromagnetico in una scatola cubica.
- p. 63: idem: quantizzazione in coordinate cartesiane. Allegatevi due pagine (Z/1 e Z/2): ved. avanti.
- p. 67: Sui campi elettromagnetico e di Dirac (elettrodinamica quantistica: Hamiltoniana di un elettrone nel campo elettromagnetico), apparentemente con campo elettromagnetico quantizzato e campo di Dirac non quantizzato.
- p. 71: Trasformazioni di Lorentz rappresentate mediante matrici 2×2 .
Rappresentazione spinoriale del Gruppo di Lorentz.
- p. 75: pagine in bianco, fino a pag. 94.
- p. 95: Irraggiamento dipolare: Calcoli perturbativi.
- p. 99: Piccolo problema di elettrostatica.
- p. 100: Effetto Auger: tentativo abortito.
- p. 101: Calcoli sullo spettro continuo dell'energia di un sistema.
- p. 102: Calcoli elementari combinatoriali sul gruppo simmetrico di permutazione (Tabella di Young).
- p. 103: Teoria della diffusione coerente e incoerente (metodo di Dirac)?
- p. 108: Seguono cinque pagine in bianco.
- p. 113: Questioni dal teste di Witteraker e Watson (Formule di Darboux; Numeri e polinomi di Bernouilli; Equazioni differenziali del secondo ordine).
- p. 119: idem: funzione Gamma e applicazioni.
- p. 131: idem: funzione di Riemann.
- p. 135: Ancora calcoli sul problema dell'atomo di H con carica infinitesima vicina.
- p. 138: Seguono cinque pagine bianche.
- p. 143: Semplici calcoli.
- p. 144: Continuazione da pag. 188 (vedi). Calcoli con segno di richiamo uguale a quello presente alle pagine 37 e 112 del Quaderno 2.
- p. 155: Irraggiamento in una cavità. Quantizzazione.
- p. 160: Ancora sul campo elettromagnetico con vettore elettromagnetico complesso: nuovo metodo per descrivere il campo elettromagnetico in analogia a quello di Dirac (apparentemente per esplorare il significato della funzione d'onda quantistica).
- p. 162: Campo elettromagnetico prodotto da un quadrupolo?
- p. 163: Calcolo sulle cariche magnetiche (con pagina strappata).
- p. 165: Calcoli vari.
- p. 166: Piccoli calcoli sulla teoria perturbativa.
- p. 169: Calcoli sul vettore di Poynting.
- p. 170: Inizio di lavoro sulla equazione di Dirac, che continua alle pagg. 180–188 e alle pagg. 144 e segg.
- p. 174: Bianca
- p. 175: Fino a pag. 179, parentesi di calcoli in Seconda Quantizzazione sui problemi delle tre particelle (con correlazioni a due particelle), dell'oscillatore armonico, e delle particelle identiche. (?)

p. 180: Fino a pag. 188, riprende il lavoro di pag. 170 sulle onde piane a frequenze positive e negative dell'equazione di Dirac. Teoria di non facile interpretazione, probabilmente in preparazione dell'articolo n. 9 (pubblicato poi nel 1937).

p. 188: Calcoli.

Allegati: A questo Quaderno 3 sono allegati vari fogli:

pp. A/1-1 – A/4-3 (15 pagg. numerate): Calcoli sulla equazione di Dirac generalizzata a spin superiori: caso della teoria a 12 componenti: [Ciascuno dei fogli A/1 – A/4 è costituito da due pagine, ovvero da quattro facciate].

pp. B/2-1 – B/2-4 (quattro pagg.): Calcoli sul momento angolare per l'equazione di Dirac.

pp. C/1-1 – C/1-4 (quattro pagg.): Calcoli sull'equazione di Dirac con campo elettromagnetico.

pp. C/11-1 – C/11-4 (quattro pagg.): idem.

pp. Z/1 – Z/2 : Seconda Quantizzazione del campo di Dirac?

7.4. Quaderno 4

p. 1: Calcoli numerici.

p. 7: Atomo di H perturbato, e calcoli.

p. 23: Trasformazioni di Lorentz. Esercizi.

p. 27: Calcoli vari.

p. 30: Equazioni (di d'Alembert) delle onde: semplici calcoli.

p. 32: Trasformate di Fourier.

p. 38: Calcoli vari (Algebra gruppale; Funzioni di Eulero); Relazioni di Eulero per un solido geometrico; Gruppo simmetrico).

p. 46: Corpo nero: semplici calcoli.

p. 48: Calcoli vari di Geometria sferica; sul Gruppo delle rotazioni in 4 dimensioni; ecc.

p. 54: Calcoli di non facile interpretazione.

p. 55: Matrici del momento angolare (nello spazio ordinario) per vari valori del momento.

p. 60: Equazione differenziale del secondo ordine (una equazione agli autovalori, sembra generatrice di funzioni del tipo delle ipergeometriche).

p. 63: Rotatore rigido; problema agli autovalori.

p. 65: Calcoli vari (perturbativi, ecc.). Perturbazioni dipendenti linearmente dal tempo, per tempi brevi.

p. 69: Equivalenza energetica tra insieme canonico e microcanonico.

p. 70: Calcoli di un integrale.

p. 71: Semplici formule di termodinamica statistica.

p. 74: Equazione di Schroedinger per uno ione molecolare di idrogeno: cenno.

p. 74: Alla pag. 74 sono allegate tre pagine (74/1 – 74/3), con calcoli vari.

p. 77: Semplici algebra astratta.

p. 78: Termodinamica standard (trasformazioni di variabili; equazione di Claperyon; abbozzo di calcolo termodinamico per vapore saturo in presenza del proprio liquido).

p. 82: Bianca.

p. 83: (Listino di borsa).

p. 84: Tre pagine in bianco.

- p. 87: Ancora sulle equazioni tipo Dirac generalizzate: sviluppo esplicito del caso a 12 componenti.
- p. 95: Tre pagine lasciate in bianco.
- p. 98: Moto in coordinate polari (elementi). Sviluppo di un'onda piana in funzioni di Bessel. Equazione di Schrödinger in coordinate polari; caso del potenziale coulombiano.
- p. 100: Risoluzione (della parte radiale) dell'equazione di Schrödinger con potenziale coulombiano, col metodo delle trasformate di Laplace.
- p. 102: Studio dei polinomi di Legendre.
- p. 106: Studio della funzioni radiale per l'atomo di H (Funzioni coulombiane).
- p. 106: Vi sono allegate tre pagine (106/1 – 106/3), sullo stesso argomento.
- p. 108: Generatori delle rotazioni spaziali. Laplaciano in quattro dimensioni: scritto esplicitamente. Coordinate polari in quattro dimensioni euclidee. Gruppo delle rotazioni in quattro dimensioni.
- p. 121: Seguono 16 pagine bianche.
- p. 137: Tentativo di introduzione di coordinate polari nello spazio-tempo di Minkowski?
- p. 138: Bianca.
- p. 139: Equazione di Hamilton: semplici calcoli (cancellati). Vi sono allegate due pagine (139/1 – 139/2), sul moto relativistico di particella in campo elettromagnetico, e sulle funzioni ipergeometriche.
- p. 143: Equazione di Dirac per l'atomo di H (campo centrale): più precisamente, correzioni relativistiche alle "correzioni di Rydberg per la struttura iperfina".
- p. 149: Ancora sull'equazione di Dirac per l'atomo di H: struttura iperfina.
- p. 154: Equazione di Dirac a 4 componenti.
- p. 155: Equazione di Dirac a sedici componenti (matrici 16 x 16).
- p. 158: idem, a 6 componenti.
- p. 160: idem, a 5 componenti (caso di parastatistica?).
- p. 65: Momenti magnetici e struttura iperfina: trattazione standard. Calcolo sulla struttura fina (Formula di Landé).
- p. 169: Calcolo relativistico del momento magnetico dell'atomo di H.
- p. 171: Metodo originale per il calcolo del momento magnetico degli atomi (con la teoria di Dirac a sei componenti?).
- p. 174: Equazione di Dirac a 4 componenti, con interessanti modifiche.

7.5. Quaderno 5

- p. 1: Elettrodinamica e Relatività: equazione di Dirac per elettrone e positone. [Il frontespizio di tale Quaderno reca la parola "Ghenos"].
- p. 3: Equazione di Schrödinger (da un libro).
- p. 5: Teoria quantistica dei campi, col formalismo variazionale. Caso delle energie negative. Equivalenza tra I a e II a quantizzazione.
- p. 8: Equazione di Schrödinger per un sistema di N particelle.
- p. 11: Oscillatore armonico unidimensionale quantistico, in Seconda Quantizzazione.
- p. 14: Separazione degli operatori di creazione e annichilazione (non normali) in parte hermitiana e antihermitiana.
- p. 15: Trasformazioni canoniche, con esempi.
- p. 17: (?)
- p. 18: idem: trasformazioni canoniche lineari.
- p. 20: Semplici calcoli su trasformazioni canoniche.

- p. 23: Moto piano di un punto in campo centrale.
 - p. 24: Limite non-relativistico dell'equazione di Dirac.
 - p. 26: Proprietà dell'operatore di traslazione in Meccanica Quantistica.
 - p. 28: Equazioni di Maxwell: principio variazionale.
 - p. 31: Evoluzione temporale di un insieme statistico, in meccanica classica e quantistica.
 - p. 32: Introduzione di una famiglia a_{pq} di operatori allo scopo di costruire in generale l'operatore quantistico $\hat{A}(p,q)$ corrispondente ad una variabile dinamica classica $A(p,q)$: Confronto tra meccanica classica e quantistica, anche ai fini dell'interpretazione di quest'ultima. (continua)
 - p. 44: Esempio di trasformazione canonica infinitesima unidimensionale.
 - p. 45: Continuazione delle pagg. 32-43. (continua ancora)
 - p. 51: Struttura iperfina per spettri complessi (accoppiamento R.S., ecc.).
 - p. 65: Varie equazioni d'onda (campi ritardati?). Continua a pag. 76.
 - p. 71: Continuazione dalle pagg. 45-50. (continua ancora)
 - p. 74: Lagrangiane e Hamiltoniane varie.
 - p. 75: Trasformazioni di Lorentz.
 - p. 76: (in fondo) Introduzione di un ritardo θ in campi ritardati (?): ved. pagg. 65-66.
 - p. 77: Polinomi di Legendre e loro proprietà. Funzione ipergeometrica; momenti angolari; ecc.
 - p. 100: Semplici calcoli.
 - p. 102: Termini atomici e loro proprietà (per l'azione di operatori di momento angolare).
 - p. 109: Continuazione delle pagg. 71-73, con sviluppi in \hbar . (continua ancora).
 - p. 117: Ancora sul principio variazionale per le equazioni di Maxwell.
 - p. 119: Continuazione delle pagg. 109-116, con sviluppi fino ad \hbar^3 .
 - p. 124: Seguono sei pagine pressoché bianche.
 - p. 130: Semplici tabelle di integrali.
 - p. 131: Matrici di momenti angolari, forse in connessione con la equazione di Dirac in 5 dimensioni.
 - p. 137: Seguono 10 pagine bianche.
 - p. 147: Calcoli sui momenti angolari.
 - p. 150: Calcoli vari.
 - p. 156: Atomo di Elio (ved. articolo n. 3, pubblicato nel 1931). Continua alle pagg. 166-175.
 - p. 164: Calcoli.
 - p. 166: Continuazione delle pagg. 156-163.
 - p. 176: Tabella di polinomi di Legendre.
 - p. 177: Funzioni sferiche e atomo di He.
 - p. 181: Seguono 11 pagine bianche.
 - p. 192: Tabella di funzioni sferiche (per la molecola di idrogeno?).
 - p. 194: Calcoli di integrali. Trasformata di Fourier del potenziale coulombiano.
- 7.6. Quaderno 6
- p. 1: Conti numerici sullo ione molecolare di He (ved. articolo n. 2, pubblicato nel 1931).
 - p. 6: Calcoli sulle varie rappresentazioni dell'operatore di spin per l'equazione di Dirac.

- p. 8: Altri calcoli sullo ione molecolare di He (problema di tre fermioni).
- p. 15: Buca di potenziale rettangolare unidimensionale: esercizio.
- p. 26: Tabelle e calcoli sulle configurazioni elettroniche in atomi leggeri.
- p. 29: Calcoli sui termini anomali dell'He (cfr. articolo n. 3).
- p. 31: Oscillazioni armoniche a tre gradi di libertà.
- p. 37: Oscillazioni armoniche a 2 gradi di libertà, o con masse uguali, o con masse diverse (oscillatori accoppiati).
- p. 41: idem, formulazione generale.
- p. 42: Coefficienti di Clebsch–Gordon.
- p. 44: Configurazioni elettroniche nella molecola di H₂.
- p. 46: Calcoli per l'articolo n. 3, del 1931.
- p. 51: Calcoli sulla molecola di H₂O.
- p. 52: Fino a pag. 98, ricerca delle soluzioni radiali dell'equazione di Schrödinger con potenziale $V_0 = (-1/x + 11/16) \exp[-11x/8]$ o, più in generale, con potenziale $V = -c \exp[-2ax]$.
- p. 99: Conti sullo ione molecolare di He: elenco dei simboli usati.
- p. 101: Tabelle e conti numerici.
- p. 107: Calcoli di serie, integrali; calcoli soprattutto per l'He, e per la reazione pseudopolare tra atomi di H (cfr. articolo n.4, del 1931).
- p. 118: Fino a pag. 193, grosse tabelle e molti calcoli per l'articolo n. 4 (reazione pseudopolare tra atomi di H).
- p. 194: Programma di lavori e/o articoli futuri, sulla base anche dei conti già eseguiti in questo Quaderno 6: (i) La formazione di He₂⁺ (ii) Reazione pseudopolare tra atomi di H; (iii) Serie ortogonale di operatori anticommuntanti; (iv) Il termine anomalo 2p 2p³ P dell'Elio; (v) Energia di atomi leggeri; (vi) Termini anomali di Röntgen; (vii) Il doppietto 2p² P del Litio; (viii) Intensità nei Raggi X; (ix) Gruppi pp' incompleti.

7.7. Quaderno 7

- p. 1: Polinomi di Legendre, ecc.
- p. 6: Fino a pag. 60, calcoli relativi all'articolo sui termini anomali dell'Elio (cfr. la settima pagina dell'articolo n. 3).
- p. 61: Fino a pag. 116, calcoli relativi all'articolo sulla teoria dei triplette P' incompleti (articolo n. 5, del 1931).
- p. 117: Risonanza tra un elettrone con $l = 1$ e un elettrone con l generico, in un atomo.
- p. 123: Tabelle e calcoli numerici sul "potenziale statistico" di Thomas–Fermi: in preparazione dell'articolo n. 1, del 1928, uscito in coll. con G. Gentile Jr.
- p. 138: idem, altri calcoli fino a pag. 161.
- p. 161: Risoluzione dell'equazione di Dirac (con o senza campo elettromagnetico), nelle rappresentazioni standard e spinoriale.
- p. 172: Equazione di Dirac con campo centrale.
- p. 175: Caso particolare: campo coulombiano.
- p. 178: Equazione di Schroedinger; formulazione variazionale.
- p. 180: Equazione di Pauli, e suo confronto con quella di Dirac.

7.8. Quaderno 8

- p. 1: Calcolo combinatorio.
- p. 12: Due pagine bianche.
- p. 14: Meccanica statistica per la teoria del ferromagnetismo.

- p. 30: Calcoli di teoria delle perturbazioni.
- p. 36: Tre oscillatori accoppiati.
- p. 40: Due pagine bianche.
- p. 42: Sistemi di equazioni, lineari e non.
- p. 46: Altri conti statistici, forse in relazione al precedente problema del ferromagnetismo, ma ora quantistici. Da pag. 66 a pag. 74, però, calcoli di equazioni integrali (ad es. di Fredholm).
- p. 86: Fino a pag. 111, altri calcoli quantistici di non facile interpretazione (Funzioni di Bessel; Risoluzione di equazioni differenziali di II 0 grado; Equazione di Bessel sferica).
- p. 112: Calcoli di meccanica analitica, collegati con quanto precede, e in particolare con quanto alle pagg. 75–78.
- p. 118: Funzioni tipo Bessel o Neumann, con grafici e tabulazioni. Relazioni di ricorrenza.
- p. 125: Risoluzione dell'equazione di d'Alembert in coordinate sferiche.
- p. 132: Polinomi di Legendre, ecc.; meccanica analitica.
- p. 144: Ottica geometrica elementare; principio di Huygens; oscillazioni.
- p. 157: Trascrizioni analitiche dei principi di Fermat e di Huygens. Radiazione di onde elettromagnetiche.

7.9. Quaderno 9²⁴

- p. 1: Esercizi vari (ottica geometrica e fisica, ecc.).
- p. 28: Scarica nei gas; esperienze varie; ioni (studio ed esercizi); elettrostatica (esercizi); cariche in campi elettromagnetici.
- p. 41: Studio di esperienze varie, specie per determinare la carica dell'elettrone.
- p. 53: Studio degli oscillografi; di vari Effetti; di valvole termoioniche.
- p. 66: Equazione delle onde classiche: Ottica delle lenti.
- p. 76: Esercizi vari (equazione del moto ellittico piano; trigonometria).
- p. 84: Ottica fisica e geometrica.
- p. 106: Integrazioni su iperboloidi; elementi di volume (in relazione con l'Ottica). Integrali. Coniche; quadriche.
- p. 120: Esercizi vari; integrali; ecc.
- p. 151: Equazione delle onde quantistiche (di Schroedinger). Esercizi. Momento angolare.
- p. 164: Altri esercizi (calcolo di funzioni matematiche; serie; meccanica analitica; equazione delle onde in coordinate sferiche).
- p. 188: Esercizi di Meccanica Quantistica.

7.10. Quaderno 10²⁵

- p. 1: I 0 Capitolo (pagg. 1–17): Ionizzazione spontanea di un atomo di H posto in una regione a potenziale negativo.
- p. 18: II 0 Capitolo (pagg. 18–26): Legge fondamentale dei fenomeni radioattivi.
- p. 29: Seguono tre pagine bianche.
- p. 30: III Capitolo (pagg. 30–39): Urto di una particella alfa contro un nucleo radioattivo.
- p. 40: Seguono quattro pagine bianche.
- p. 44: IV Capitolo (pagg. 44–52): Calcoli di Gamow e Huntermans (per la Tesi di laurea).
- p. 53: Seguono tre pagine bianche.

- p. 56: Introduzione (pagg. 56–65).
- p. 66: Bianca.
- p. 67: Integrali, ecc.; esercizi di Ottica.
- p. 98: Soluzione di equazione differenziale col metodo delle funzioni di Green. Ottica varia. Teoremi di Green e di Stokes.
- p. 190: Permutazioni: esercizi.

7.11. Quaderno 11 ²⁶

- p 1: Teoria dei gruppi: calcoli.
- p. 6: Cinque pagine bianche.
- p. 12: Calcoli numerici.
- p. 13: Calcoli sull'Elio.
- p. 29: Fino a pag. 64, metodo di Hartree per atomi con due elettroni (calcoli approssimati).
- p. 65: Sette pagine bianche.
- p. 72: Ancora calcoli per l'Elio.
- p. 86: Polarizzazione dell'elio (metodo di Hartree).
- p. 88: Studio di operatori differenziali lineari. Sistemi di equazioni lineari. Matrici. Parentesi di Poisson. Sistemi completi di operatori.
- p. 94: Equazioni simboliche del parallelismo. Simboli di Christoffel. Geometria riemanniana. Geodetiche.
- p. 107: Equazione di Pauli, e passaggio all'equazione di Dirac, in due rappresentazioni. Hamiltoniana relativistica di un elettrone in campo elettromagnetico.
- p. 113: Ancora geometria riemanniana. Derivazione covariante. Geometria differenziale. Calcolo tensoriale in spazi non euclidei.
- p. 160: Equazioni di Schrödinger e di Dirac; ecc.
- p. 166: Calcolo tensoriale in spazi di Riemann; ecc.
- p. 172: Semplice problema agli autovalori.
- p. 174: Permutazioni.
- p. 180: Esercizi vari di Meccanica Quantistica. Trasformazioni di Fourier tridimensionali. Onde piane sviluppate in onde parziali. Polinomi di Legendre; ecc.

7.12. Quaderno 12

- p. 1: Elaborazione teorica di non facile interpretazione. Meccanica Quantistica (polinomi vari, per calcoli di valori medi).
- p. 16: Serie. Equazioni integrali.
- p. 21: Meccanica Quantistica: esercizi; regole di commutazione, ecc.; equazione di Schrödinger; esercizi vari.
- p. 32: Equazione di Dirac, e suo limite relativistico. Idem, con campo centrale e campo elettromagnetico.
- p. 45: Meccanica analitica (?).
- p. 48: Sviluppi sui polinomi di Legendre. Integrali vari.
- p. 51: Esperienza di Townsend.
- p. 53: Ancora sul limite non relativistico dell'equazione di Dirac (elettrone rotante in campo centrale: cenno).
- p. 54: Onde superficiali in un liquido.
- p. 58: Nucleo di carica Z_e con due elettroni: energia dello stato fondamentale. Calcoli col metodo perturbativo, e col metodo del minimo (principio variazionale); e studi vari su quest'ultimo metodo.

- p. 70: Rappresentazioni integrali delle funzioni di Bessel.
- p. 76: Oscillazioni forzate di un elettrone in campo elettrico alternato.
- p. 79: Ancora sulle funzioni di Bessel.
- p. 82: Moto anarmonico classico (moto "dispersivo" di un elettrone).
- p. 88: Meccanica analitica.
- p. 90: Integrali nel piano complesso.
- p. 92: Ancora funzioni di Bessel.
- p. 96: Funzioni sferiche di Legendre. Integrali. Funzioni di Legendre di 2^a specie.
- p. 101: Spazi vettoriali ad n dimensioni. Calcoli con matrici. Spazi duali. Teoria degli spazi vettoriali a dimensione finita.
- p. 112: Tabella di Mendeleev.
- p. 130: Ancora spazi vettoriali n-dimensionali. Trasformazioni hermitiane e unitarie in n dimensioni. Diagonalizzazione. Trasformazioni unitarie infinitesime.
- p. 142: Passaggio agli spazi di Hilbert (spazi a dimensione infinita).
- p. 145: Integrali: calcoli per l'articolo (n.3) sull'Elio.
- p. 151: Bianca.
- p. 152: Spazi di Hilbert (secondo il libro di Weyl).
- p. 154: Integrali, per l'Elio.
- p. 155: Equazione di Schrödinger.
- p. 156: Cenno sul diamagnetismo.
- p. 157: Fino a pag. 188, integrali per l'articolo sull'Elio.
- 7.13. Quaderno 13
 - p. 1: Calcoli numerici.
 - p. 2: Meccanica analitica: equazioni canoniche.
 - p. 3: Fino a pag. 13, rappresentazione di Majorana delle matrici di Dirac (rappresentazione reale). Calcoli per l'articolo n. 9 (teoria simmetrica dell'elettrone e del positone).
- 7.14. Quaderno 14
 - p. 1: Fino a pag. 8, geometria negli spazi di Riemann.
- 7.15. Quaderno 15
 - p. 1: Equazione $n_1 + 2n_2 + 3n_3 + \dots = N$.
 - p. 6: Equazione di Schroedinger in coordinate sferiche.
 - p. 8: Due pagine cancellate.
 - p. 10: Calcoli sull'equazione di Dirac.
 - p. 16: Equazioni di Maxwell.
 - p. 18: Calcoli con trasformazioni di Lorentz. (?)
 - p. 22: Gruppo di Lorentz (ved. anche Quaderno 1). Rappresentazioni a infinite componenti (per l'articolo n. 7, del 1932).
 - p. 26: Equazione di Dirac.
- 7.16. Quaderno 16²⁷
 - p. 1: Molecola di Elio.
 - p. 23: Tre pagine bianche.
 - p. 26: Ancora sull'Elio.
 - p. 31: Spazi n-dimensionali: Algebre e teoria dei gruppi. Permutazioni. Algebra invariante a sinistra. Rappresentazioni (equivalenti e non; irriducibili; ecc.) del gruppo delle permutazioni di f particelle.

- p. 50: Equazione tipo Schrödinger per due particelle.
 - p. 56: Bianca.
 - p. 57: Sistemi di f particelle. Caratteri del gruppo delle permutazioni. Teoria dei gruppi.
 - p. 76: Tre pagine bianche.
 - p. 79: Autofunzioni del Litio.
 - p. 83: Scattering di Thomson.
 - p. 84: Ancora sul Litio.
 - p. 98: Energia del Litio (termine fondamentale del Litio).
 - p. 100: Campo autoconsistente in atomo con due elettroni.
 - p. 103: Calcoli numerici.
 - p. 112: Tabella (per il Litio?).
 - p. 114: Calcoli numerici.
 - p. 118: Di nuovo Tabella.
 - p. 120: Calcoli numerici e Tabella.
 - p. 134: Calcoli algebrici.
 - p. 141: Semplici calcoli.
 - p. 157: Stato fondamentale di atomi pesanti (per Z tendente all'infinito) con tre elettroni.
 - p. 158: Andamento asintotico per i termini s dei metalli alcalini.
 - p. 162: Termine fondamentale del Litio? Integrali. Serie.
 - p. 174: Algebre e gruppo delle permutazioni in n dimensioni.
 - p. 175: Calcoli numerici.
 - p. 185: Quattro pagine bianche.
 - p. 189: Equazione agli autovalori in spazi a dimensione finita.
 - p. 190: Pagina cancellata.
- 7.17. – Quaderno 17
- p. 1: Rappresentazione del Gruppo di Lorentz. Equazione di Schrödinger. Studi vari. Zeri delle funzioni di Bessel.
 - p. 8: Teoria dei nuclei (per l'articolo n. 8, del 1933).
 - p. 31: Nuclei semplici: studio di due forme di interazione.
 - p. 35: Meccanica statistica di due particelle.
 - p. 36: Momento magnetico e suscettività magnetica di un atomo con m elettroni (trattazione relativistica).
 - p. 39: Trasformazioni generali di matrici.
 - p. 40: Teoria simmetrica (in preparazione dell'articolo n. 9). Continua alle pagg. 74–81.
 - p. 43: Trasformazione di matrici.
 - p. 45: Equazione di Dirac "reale" (senza campo, e con campo non relativistico).
 - p. 69: Analogia Dirac–Maxwell (continuazione da pag. 160).
 - p. 72: Calcoli numerici. Momento angolare in coordinate sferiche tetradimensionali; ecc.
 - p. 74: Altri calcoli per la teoria simmetrica elettrone/positone (dopo la 1^a pagina 81, proseguono alle pagg. 40–42).
 - p. 82: Polinomio (calcoli).
 - p. 83: Trasformazioni di spinori (studio della analogie tra equazione di Dirac e equazioni di Maxwell).
 - p. 88: Bianca.
 - p. 89: Equazione di Dirac.
 - p. 92: Teoria perturbativa.

- p. 94: Tre pagine bianche.
- p. 97: Gas degeneri.
- p. 98: Calcoli in coordinate polari; equazione di Schroedinger.
- p. 104: Studio delle relazioni tra prodotto quantistico e prodotto classico.
- p. 127: Due pagine bianche.
- p. 129: Equazione d'onda del neutrone; e scattering di fotoni su neutrone.
- p. 146: Ancora teoria simmetrica di elettrone e positone.
- p. 150: Fino a pag. 151bis, equazione d'onda del neutrone; ecc.
- p. 151ter: Fino a pag. 153, calcoli geometrici.
- p. 154: Autofunzioni atomiche.
- p. 156: Gruppo di Lorentz.
- p. 159: Ancora sulle analogie Maxwell-Dirac.
- p. 161: Autofunzioni atomiche: termini 2s del Litio.
- p. 167: Calcoli di Meccanica Quantica. Integrali nel piano complesso. Equazione radiale di Schrödinger; ecc. Altri integrali.
- p. 176: Equazione di Dirac.
- p. 177: Autofunzioni atomiche.
- p. 179: Calcoli di Meccanica Quantica: commutatori, ecc.
- p. 183: Fino a pag. 190, Formulario.

7.18. Quaderno 18

- p. 1: Equazioni di Maxwell: calcoli variazionali multidimensionali. p. 8: Calcoli vari: integrali; rappresentazione integrale di funzioni di Bessel; funzioni di Hankel; soluzioni di scattering della equaz. di Schrödinger; funzione di Green generalizzata, e metodo della fz. di Green; integrali vari; equazioni di Hamilton; equazione di Schroedinger e sua risoluzione per serie; derivate; formule trigonometriche; equazioni differenziali; calcoli di Meccanica Quantica.
- p. 34: Equazione di Schrödinger per due particelle: metodo di Ritz. Equazioni integrali. Integrali vari. Equazione differenziale $y'' = xy$. Regioni d'integrazione.
- p. 54: Meccanica analitica. Calcoli numerici e algebrici. Equazione di van der Waals. Termodinamica.
- p. 61: Meccanica Quantica: semplici calcoli; teoria delle perturbazioni; funzioni d'onda di multi-corpi.
- p. 69: Seconda Quantizzazione.
- p. 74: Calcoli vari; calcolo combinatorio; ecc.
- p. 89: Termini anomali dell'Elio (per l'articolo n. 3); Tabelle relative.
- p. 106: Integrali; calcoli numerici; calcoli geometrici; altri calcoli per l'articolo sull'Elio; e altro.
- p. 128: Calcoli per l'articolo n. 4, del 1931 (reazione pseudopolare tra atomi di Idrogeno?).
- p. 134: Tabelle di integrali. Di nuovo calcoli sulla reazione pseudopolare tra atomi di H (?); e sull'Elio.
- p. 156: Equazioni differenziali; equazione $y''_j - ky_j = 0$; teoria di Pauli del paramagnetismo; orto- e para-elio.
- p. 158: Ancora sui termini anomali dell'He.

Ringraziamenti

L'autore ringrazia l'Organizzazione di questo Convegno, e in particolare Pasquale Tucci, per il cortese invito. Per la fattiva collaborazione ai fini della realizzazione di questo lavoro, l'autore è molto grato a Marcello Baldo, Franco Bassani, Francisco Caruso, Carlo Castagnoli, Francesco del Franco, Francisca

V.Fortaleza-Gomes, Mário Giambiagi, J. Leite Lopes, Ettore Majorana Jr., Alwyn van der Merwe, Roberto Mignani, Pio Picchi, Bruno Preziosi, Renato A. Ricci, Miriam Segre Giambiagi, Amòs Troper, Pasquale Tucci e Carmen Vasini, oltre che alla famiglia Majorana di Roma e Catania, e alla "Domus Galilaeana" di Pisa (Prof. Derenzini, Prof. Maccagni, Prof. C. A. Segnini, Dr.ssa A. Colotto, Dr. D. Ronco, Dr. Tricarichi, Sig.na Puccianti, e Sig. Guerri). Ringrazia infine, per la generosa cooperazione, Dharam Ahluwalia, Edoardo Amaldi, Carlo Becchi, Gilberto Bernardini, Nicola Cabibbo, Giuseppe Cocconi, Aldo Covello, Mimmo De Maria, Antonino Drago, Donatello e Fosco Dubini, Salvatore Esposito, Myron Evans, Alberto Gabriele, Enrico Giannetto, Françoise Gueret, Philippe Gueret, Grazia Ianniello, Antonio Insolia, Francesco Izzo, Corrado Leonardi, Fabrizio Lillo, Annamaria Papa, Franco Rasetti, Umberto Recami, Tina Roberto, Bruno Russo, Laura R. Sansoni, Gianni Sansoni, Edvige Schettino, Leonardo Sciascia, Emilio Segré, Gilda Senatore, Paolo Strolin, Franco Strumia, Alexander Tenenbaum, Ettore G. Vaccaro, Victor Weisskopf e Giancarlo Wick.

Bibliografia

AA.VV.: Scienziati e tecnologi contemporanei: Enciclopedia Biografica, 3 voll., a cura di E.Macorini (Milano, 1974).

E. Amaldi: *La Vita e l'Opera di E.Majorana* (Accademia dei Lincei; Roma, 1966).

E. Amaldi: "Ettore Majorana: Man and Scientist", in *Strong and Weak Interactions*, a cura di A.Zichichi (New York, 1966).

E. Amaldi: "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: *Il Nuovo Saggiatore* 4 (Bologna, 1988) p.13.

M. Baldo, R. Mignani e E. Recami: "Catalogo dei manoscritti scientifici inediti di E.Majorana", in *E.Majorana - Lezioni all'Università di Napoli* (Bibliopolis; Napoli, 1987), p.175.

M. Bunge: *La Causalità* (Torino, 1970).

F.L. Cavazza e S.R. Granbard: *Il Caso Italiano: Italia Anni '70* (Milano, 1974).

Conferenze e Discorsi di Orso Mario Corbino (Roma, 1939).

F. e D. Dubini: "La scomparsa di Ettore Majorana", programma televisivo trasmesso nel 1987 (TV svizzera).

G. Enriques: *Via D'Azeglio 57* (Zanichelli; Bologna, 1971).

S. Esposito: "Covariant Majorana formulation of electrodynamics", in *Found. of Phys.* 28 (1998) 231-244.

G. Fraser: in *Cern Courier* 38, issues no.5 and 6 (Summer and Sept., 1998).

M. Farinella: in *L'Ora* (Palermo), 22 e 23 luglio 1975.

E. Fermi: "Un maestro: O.M. Corbino", in *Nuova Antologia* 72 (1937) p.313.

L. Fermi: *Atomi in Famiglia* (Milano, 1954).

B. Gentile: "Lettere inedite di E.Majorana a G.Gentile jr.", in *Giornale critico della filosofia italiana* (Firenze, 1988) p.145.

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.

G.C. Graziosi: "Le lettere del mistero Majorana", in *Domenica del Corriere* (Milano), 28 novembre 1972.

G. Holton: *The Scientific Information: Case Studies* (Cambridge, 1978).

C. Leonardi, F. Lillo, A. Vaglica e G. Vetri: "Quantum visibility, phasedifference operators, and the Majorana Sphere", preprint (Phys.Dept., Univ. of Palermo, Italy; 1998), to appear; "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. ved. anche 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.

A. Majorana: "La questione degli spostati e la riforma dell'Istruzione Pubblica in Italia", discorso alla Camera dell'11 marzo 1899 (Roma, 1899).

Ettore Majorana - Lezioni all'Università di Napoli, ed. by B.Preziosi (Bibliopolis; Napoli, 1987).

G., A. e D. Majorana: *Della Vita e delle Opere di Salvatore Majorana Calatabiano* (Catania, 1911).

R. Mignani, E. Recami e M. Baldo: "About a Dirac-like equation for the photon, according to E.Majorana", *Lett. Nuovo Cimento* 11 (1974) p.568.

R. Penrose: *Ombre della Mente (Shadows of the Mind)* (Rizzoli; 1996), pp.338-343 e 371-375.

R. Penrose: "Newton, quantum theory and reality", in *300 Years of Gravity*, ed. by S.W.Hawking & W.Israel (Cambridge Univ.Press; 1987).

B. Pontecorvo: *Fermi e la Fisica Moderna* (Roma, 1972).

B. Pontecorvo: contributo al Congresso sulla storia della fisica delle particelle (Parigi, 1982).

S. Ponz de Leon: "Speciale News: Majorana", trasmesso il 30.9.1987 (Canale Cinque).

E. Recami: *Il caso Majorana: Epistolario, Documenti, Testimonianze*, 2^a edizione, nella serie "oscar" (Mondadori; Milano, 1991), pp.1-230. [Di questo volume esiste un'ottima traduzione in francese ad opera di F. & Ph. Gueret (inedita)].

E. Recami: "I nuovi documenti sulla scomparsa di E.Majorana", in *Scientia* 110 (1975) p.577.

E. Recami: in *La Stampa* (Torino), 1 giugno e 29 giugno 1975.

E. Recami: in *Corriere della Sera* (Milano), 19 ottobre 1982 e 13 dicembre 1983.

E. Recami: "E.Majorana: lo scienziato e l'uomo", in *E.Majorana - Lezioni all'Università di Napoli* (Bibliopolis; Napoli, 1987), p.131; e "A cinquant'anni dalla scomparsa di E.Majorana", in *Mondotre* (Siracusa, 1988) p.119.

E. Recami: in *Ci"encia & Sociedade: PERFIS*, a cura di F.Caruso e A.Troper (C.B.P.F.; Rio de Janeiro, 1997), pp.107-172.

V. Reforgiato: *Cenni Biografici e Critici su Angelo Majorana* (Catania, 1895).

V. Reforgiato: *Raccolta di Recensioni e Giudizi sulle Opere del Prof. Avv. Giuseppe Majorana* (Catania, s.d.).

A. Rocca: *Il Liberty a Catania* (Catania, 1984).

B. Russo: "Ettore Majorana - Un giorno di marzo", programma televisivo trasmesso il 18.12.90 (Rai Tre - Sicilia).

G. Scavonetti: *La Vita e l'Opera di Angelo Majorana* (Firenze, 1910).

E. Schrödinger: *Scienza e Umanesimo* (Firenze, 1970).

L. Sciacca: *I Catanesi Com'Erano* (Catania, 1975).

L. Sciascia: *La Scomparsa di Majorana* (Torino, 1975).

E. Segré: *Enrico Fermi, Fisico* (Bologna, 1971).

E. Segré: *Autobiografia di un Fisico* (Il Mulino; 1995).

E. Segré: "Una lettera inedita di E. Majorana", in *Storia contemporanea* 19 (1988) p.107.

C. Tarsitani: "O..M. Corbino", in *Sapere* 49 (Roma, 1983), n.5.

S. Timpanaro: *Pagine di scienza: Leonardo* (Milano, 1926).

V. Tonini: "Il Taccuino Incompiuto" (Armando; Roma, 1984) [pregevole divagazione, che parte da una tipica finzione letteraria per indagare liberamente sulla possibile "vita segreta" di E. Majorana].

G. Wataghin: in *Boletim Informativo*, Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp; Campinas, S.P.), 6 e 13 settembre 1982.

J. Zimba e R. Penrose: *Stud. Hist. Phil. Sci.* 24 (1993) 697.

NOTE

¹ Dip.to di Ingegneria, Univ. statale di Bergamo; I.N.F.N. – Sezione di Milano, Italia; e D.M.O./FEEC e C.C.S., UNICAMP, Campinas, S.P., Brasile. In Italia: Fax (39)–035–562779; e–mail Erasmus.Recami@mi.infn.it [Inoltre, in Brasile: e–mail Recami@unicamp.br]

² Work partially supported by CNR, MURST and INFN.

³ Il primo storico di Ettore Majorana. Si vedano di E. Amaldi: "La Vita e l'Opera di E. Majorana (Accad. Naz. dei Lincei: Roma (1966); "Ricordo di Ettore Majorana", *Giornale di Fisica* 9 (1968) 300; "Ettore Majorana: Man and scientist", in *Strong and Weak Interactions*, a cura di A. Zichichi (New York, 1966); "From the discovery of the neutron to the discovery of nuclear fission", *Phys. Reports* 111 (1984) 1–322; "I miei giorni con Fermi", in *La Repubblica*, Supplemento al n. 285 del 31.12.86 (Roma).

⁴ 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.

⁵ Due belle e interessanti lettere di Ettore a Giovannino Gentile ci sono recentemente pervenute grazie al cortese interessamento di L. Sciascia, L. Canfora e F. Valentini.

⁶ M. Baldo, R. Mignani & 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 E. Giannetto, *Lett. Nuovo Cimento* 44 (1985) 140 e 145; e S. Esposito, *Found. Phys.* 28 231

⁷ D. Fradkin: *American Journal of Physics* 34 (1966) 314.

⁸ Si noti, però, che l'algebra $R(4) = R_{3,1}$ così introdotta da Majorana è del tutto diversa dall'algebra $C(4) = R_{4,1}$ introdotta da Dirac. Osserviamo, en passant, che l'algebra di Majorana è una delle due algebre associabili naturalmente allo spazio di Minkowski (la seconda essendo $R_{1,3} = H(2)$, ove $H(2)$ è l'algebra delle matrici quaternioniche 2×2).

⁹ 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.

¹⁰ B. Russo: "Ettore Majorana – Un giorno di marzo", programma televisivo trasmesso il 18.12.90 (Rai Tre – Sicilia).

¹¹ Premio Nobel 1945.

¹² "Sono molto contento che lei abbia rapporti con me. . . Io ricordo solo vagamente che ebbi in effetti [a Copenaghen, nel 1933] a discutere con Majorana intorno ai più recenti sviluppi dell'elettrodinamica quantistica."

¹³ E. Recami: "Nuovo notizie sulla scomparsa del fisico E. Majorana", *Scientia* 110 (1975) 577–598.

¹⁴ Ricordiamo la "definizione" di fisica di Orear: "La Fisica è quella cosa che fanno i fisici la sera tardi".

¹⁵ A cura di M. Baldo, R. Mignani e E. Recami.

¹⁶ Si vedano ad es. E. Recami: "Ettore Majorana: lo scienziato e l'uomo", in *Bibl. (3)*, pp.131–174; ed E. Recami: *Il caso Majorana: Epistolario, Documenti, Testimonianze*, 2^a ediz. (Mondadori; Milano, 1991).

¹⁷ Cfr. ad es. E. Amaldi: *La vita e l'opera di E.Majorana* (Acc. dei Lincei; Roma, 1966).

¹⁸ *Ettore Majorana – Lezioni all'Università di Napoli*, a cura di B. Preziosi (Bibliopolis; Napoli, 1987).

¹⁹ R. Liotta: in *Bibl. (2)*, pag.91.

²⁰ Ved. ad es. P. Caldirola & E. Recami: *Voci "Teorie fondamentali" e "Componenti fondamentali della materia"*, in *Scienza e Tecnica del Novecento (EST/Mondadori; Milano, 1977)*

²¹ M. Baldo, R. Mignani & E. Recami: *"Catalogo degli scritti di E. Majorana"*, in *Bibl. (3)*, pp.175–197.

²² M.Baldo, R.Mignani & E.Recami: "About a Dirac-like equation for the photon, according to Ettore Majorana", *Lett. Nuovo Cimento* 11 (1974) 568; E.Recami: "Possible physical meaning of the photon wave-function according to E.Majorana", in *Hadronic Mechanics and Non-Potential Interactions*, a cura di M.Mijatovich (Nova Sc. Pub.; New York, 1990), p.231.

²³ E.Giannetto: *Lett. Nuovo Cimento* 44 (1985) 140; 44 (1985) 145; E.Giannetto: in *Atti IX Congresso Naz.le Storia della Fisica*, a cura di F. Bevilacqua (Milano, 1988); E.Giannetto: "E.Majorana and the rise of Elementary particle theoretical physics", accettato per la pubblicaz. su *Physis*; "On Majorana's theory of arbitrary spin particles", in corso di stampa sui *Proceedings of the School on the Scientific Heritage of E.Majorana - Erice, 1989*; "E.Majorana e il problema degli stati ad energia negativa", in corso di stampa sugli *Atti del Convegno sui Beni Culturali – Pavia, 1990*.

²⁴ *Quaderno da studente*, di antica data.

²⁵ *Quest'altro Quaderno n. 10* contiene essenzialmente il materiale preparato per la *Tesi di laurea*.

²⁶ *Studi vari*, da testi universitari.

²⁷ *Gli studi presenti in questo Quaderno 16* sembrano basati sul testo del Weyl