

Ettore Majorana e il Problema degli Stati ad Energia Negativa: la Nascita della Fisica Teorica delle Particelle Elementari⁰

Enrico R. A. Giannetto
Dipartimento di Scienze della Persona
Università di Bergamo
Piazzale S. Agostino 2, Bergamo 24129
enrico.giannetto@unibg.it

Con l'avvento della relatività speciale di Poincaré ed Einstein (1905), e la correlata non validità della legge pre-relativistica della conservazione della massa, anche il principio di conservazione dell'energia attraversa una nuova fase di sviluppo, in cui subisce un radicale mutamento concettuale: si deve parlare piuttosto di conservazione della massa-energia. Ciò, anche se, effettivamente, come fa notare Max Jammer, si deve giungere agli esperimenti di Blackett e Occhialini del 1933, e di Klemperer del 1934 sui fenomeni di creazione e annichilazione di coppie, per affermare definitivamente la reciproca, assoluta (senza residui), trasformabilità di massa ed energia¹.

Un'ulteriore radicale modifica concettuale del principio di conservazione dell'energia (non discutendo, qui, la sua caratterizzazione "convenzionale" quale deriva dall'analisi della relatività generale²) è sicuramente legata alla meccanica quantistica, in cui le relazioni d'indeterminazione stabilite da Heisenberg³ nel 1927 pongono dei problemi alla stessa definibilità operativa dell'energia in microfisica: in meccanica quantistica,

⁰ Questo articolo è una versione leggermente ritoccata di quello apparso in *Giornale di Fisica* **34** (1993), pp. 151-158.

¹ Per tali questioni, si veda M. Jammer: *Concepts of mass in classical and modern physics*, (1961), tr. it. di M. Plassa & I. Prinetti, *Storia del concetto di massa* (Feltrinelli, Milano, 1974).

² Si vedano, ad esempio, H. Reichenbach: *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*, (1928), tr. it. di A. Carugo, *Filosofia dello spazio e del tempo* (Feltrinelli, Milano, 1977); A. S. Eddington: *Space, Time and Gravitation*, (1920), tr. it. di L. Bianchi, *Spazio, tempo e gravitazione* (Boringhieri, Torino, 1971); E. Giannetto: *Il crollo del concetto di spazio-tempo negli sviluppi della fisica quantistica: l'impossibilità di una ricostruzione razionale nomologica del mondo*, in G. Boniolo, a cura di: *Aspetti epistemologici dello spazio e del tempo*, (Borla, Roma, 1987). E' comunque da segnalare anche la precedente analisi convenzionalista di Poincaré, già a livello di meccanica classica.

³ W. Heisenberg: *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, *Zeitschrift für Physik*, **43** (1927) pp. 172-198, tr. it. in W. Heisenberg: *Indeterminazione e realtà*, a cura di G. Gembillo (Guida, Napoli, 1991) pp. 147-182; si veda anche E. Giannetto: *Il crollo...*, op.cit.

infatti, si ha un operatore quanto-meccanico che solo in certe condizioni di misure, in certi contesti sperimentali, può essere interpretato in termini del concetto classico di energia, e sempre nei limiti delle relazioni d'indeterminazione. In effetti, all'interno della validità di queste, ovvero per i cosiddetti "interfenomeni", si dovrebbe parlare di una violazione del principio di conservazione dell'energia⁴.

L'analisi di questi singoli mutamenti concettuali, che così profondamente investono il principio di conservazione dell'energia, richiederebbe una discussione storico-epistemologica a sé stante⁵, che non è qui ovviamente riproponibile.

Vorrei, invece, prendere in considerazione un problema particolare, collegato a questi mutamenti, ma che sorge allorché si passa ad un ulteriore sviluppo, quello della teoria quanto-relativistica di campo. Ed evidenziare il ruolo che tale problema ha nella costruzione della teoria di Ettore Majorana, pubblicata nel 1932 sul Nuovo Cimento con il titolo "*Teoria relativistica di particelle con momento intrinseco arbitrario*"⁶, e che, a mio avviso, segna la nascita di una effettiva, generale, fisica teorica delle particelle elementari⁷. Ruolo tenuto anche in altri successivi sviluppi teorici contenuti nel lavoro pubblicato da Majorana nel 1937 con il titolo "*Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone*"⁸, come è possibile desumere anche dall'analisi di suoi manoscritti inediti.

Il problema in questione è quello dell'emergere di stati ad energia negativa come soluzioni dell'equazione propria della teoria dell'elettrone di Dirac⁹, già del 1928.

Nel 1929 esce già un primo articolo di Landau¹⁰ critico della nascente elettrodinamica quantistica, e in particolare della linearità di alcune sue equazioni

⁴ M. Hesse: *Forces and Fields*, (1961), tr. it. di L. Sosio, *Forze e campi* (Feltrinelli, Milano, 1974); E. Giannetto: *Fisica Quantistica e Verità Logica*, Epistemologia, **XII** (1989) pp. 261-276.

⁵ E. Giannetto: *Sulla storia del concetto di energia*, Lezioni alla Scuola di Perfezionamento in Didattica della Fisica, Università di Messina (1990), non pubblicate; E. Giannetto: *L' esterno dell'interno: il "paradigma" fisico dell'energia*, in "Atti del Convegno 'Le comunità scientifiche tra storia e sociologia della scienza', Roma 1991" (Franco Angeli, Milano), in corso di stampa.

⁶ E. Majorana: *Teoria relativistica di particelle con momento intrinseco arbitrario*, Nuovo Cimento **9** (1932), pp. 335-344. I lavori pubblicati di Majorana sono ristampati e commentati in E. Amaldi: *La vita e le opere di Ettore Majorana* (Accademia dei Lincei, Roma, 1966).

⁷ E. Giannetto: *Su alcuni manoscritti inediti di E. Majorana*, in F. Bevilacqua, a cura di: "Atti del IX Congresso Nazionale di Storia della Fisica, Urbino 1988" (Milano, 1989), pp. 173-185. A questo articolo si rimanda per una più ampia trattazione dei dettagli di tali ricerche di Majorana, in relazione anche alla precedente teorizzazione di equazioni tipo-Dirac a finite componenti per particelle di spin arbitrario, mai pubblicate ed equivalenti alla successiva teoria accettata di Dirac-Fierz-Pauli prodotta solo fra il '36 e il '39. Ivi sono pure discussi in dettaglio le relazioni di tali teorie di Majorana con la contemporanea fisica teorica delle particelle elementari.

⁸ E. Majorana: *Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone*, Nuovo Cimento **5** (1937) pp. 171-184.

⁹ P. A. M. Dirac: *The quantum theory of the electron*, Proceedings of the Royal Society of London **117** (1928) pp. 610-624 & **118** (1928) pp. 351-361.

fondamentali. Se ne ha traccia immediata in una lettera scritta da Majorana all'amico fisico Giovannino Gentile jr., datata 22-12-1929¹¹ :

...Ho letto l'articolo di Gamow che mi hai indicato; mi sembra che dia veramente una buona idea di quelli che sono i primi vagiti della nascente teoria dei nuclei. La quale mi sembra tuttavia che non abbia alcuna probabilità di giungere a maturità se non innestata sul tronco dell'elettrodinamica quantistica, che a sua volta emette ancora i più pietosi vagiti (leggere un articolo, se non erro di Landau...

Nel 1931, Landau e Peierls¹² discutono le ulteriori restrizioni relative alla versione relativistica delle relazioni d'indeterminazione, per le quali la possibilità di localizzare una particella è inficiata da un'indeterminazione dell'energia pari all'energia di soglia per la generazione di una coppia particella-antiparticella, e il quadrimpulso cessa di rappresentare una variabile dinamica. Tali restrizioni conducono a problemi sulla stessa definibilità operativa del campo elettromagnetico¹³ . Le indeterminazioni coinvolgono gli stessi campi associati alle particelle, e la violazione interferenomenica del principio di conservazione dell'energia corrisponde alla creazione-distruzione di cosiddette particelle "virtuali" scambiate nell'interazione. L'estensione metaforica del campo semantico del concetto di energia operata dalla teoria di Dirac, fino appunto ad abbracciare stati ad energia negativa, fornisce un "framework" teorico per descrivere

¹⁰ L. Landau: *Zum spin-Effekt im Mehrkörperproblem*, *Physikalische Zeitschrift* **30** (1929) pp. 654-655.

¹¹ Lettera di Ettore Majorana a Giovanni Gentile jr. del 22-12-1929, da Roma. Sono grato al prof. Erasmo Recami per avermi fornito copie di lettere di Majorana, questa compresa, come di parecchi altri documenti che lo riguardano, e per i continui incoraggiamenti a proseguire queste ricerche. La lettera in oggetto è stata già pubblicata, a cura di Benedetto Gentile, tra le "*Lettere inedite di Ettore Majorana a Giovanni Gentile jr.*", *Giornale Critico della Filosofia Italiana* **8** (1988) pp. 145-153, nondimeno la trascrizione ivi fornita non è impeccabile né completa (va, infatti, integrata con il brano sopra cit. e soppresso nell'edizione); tra l'altro, nel leggerla, ho subito scoperto, dandone comunicazione a Erasmo Recami, che il nome di Lev Landau, cui Majorana fa esplicito riferimento, è erroneamente scambiato, e nel testo e nelle note redazionali, con quello di [Fritz] London, altro fisico, che non è però l'autore dell'articolo ivi menzionato.

¹² L. Landau & R. Peierls: *Erweiterung des Unbestimmtheitsprinzips für die relativistische Quantentheorie*, *Zeitschrift für Physik* **69** (1931) pp. 56-69, tr. ingl. in D.ter Haar, ed.: *Collected Papers of Landau* (Pergamon Press, Oxford, 1965), pp. 40-51, e anche in J. A. Wheeler & W. H. Zurek, eds.: *Quantum Theory and Measurement* (Princeton University Press, Princeton, 1983), pp. 465-476. In quest'ultimo volume sono contenute anche le repliche di Rosenfeld e Bohr a Landau e Peierls, e inoltre anche una tr. ingl. del già citato articolo di Heisenberg del 1927.

¹³ Si vedano oltre agli articoli citati alla nota precedente, anche: E. Giannetto: *Il crollo...*, op.cit. e bibliografia relativa ivi contenuta; M. Jammer: *The Philosophy of Quantum Mechanics* (Wiley, New York, 1974), pp. 136-158; A. I. Miller: *Measurement Problems in Quantum Field Theory in the 1930's* in A. I. Miller, ed.: *Sixty-Two Years of Uncertainty* (Plenum Press, New York, 1990), pp. 139-152.

l'esistenza di possibili antiparticelle (è solo del 1932 la prima nota sulla scoperta del positrone da parte di Anderson)¹⁴. Tuttavia, come fatto notare anche da Landau e Peierls, tale "meaning variance" nel concetto di energia induce una corrispondente variazione di significato nel concetto di vuoto, da intendersi conseguentemente come un mare d'infinita particelle ad energia negativa; e ciò, invero, dà luogo a problemi legati alle cosiddette "autoenergie" e a relative divergenze matematiche (infiniti) per la definizione stessa della massa(-energia) delle particelle.

La storia più recente della fisica teorica delle particelle elementari ha indicato una soluzione, - invero dai più ritenuta solo parziale -, di questo problema nella teoria del gruppo di rinormalizzazione¹⁵. Eppure, basti l'esempio, ancora nel 1986, Jackiw¹⁶ ha messo in evidenza degli effetti inattesi del mare d'energia negativa di Dirac, dimostrando che l'operatore numero di particelle possiede anche valori non interi per una teoria di seconda quantizzazione dei fermioni e che si produce un così battezzato effetto di "quantum mechanical symmetry breaking", il quale attribuisce una asimmetria fisica allo stato di vuoto e non alla dinamica (come nel caso del più conosciuto fenomeno di "rottura spontanea di simmetria" di Heisenberg¹⁷, e invece, diversamente, non dovuto alla degenerazione dello stato di vuoto ma alla stessa definizione di vuoto).

Diventa ancora più interessante, allora, da un punto di vista non solo storico, ma anche teorico, considerare le possibili alternative teoriche proposte da Majorana a questo scenario che include gli stati ad energia negativa: alternative che appunto contemplanò l'eliminazione degli stati ad energia negativa senza rinunciare alla descrizione delle antiparticelle.

Dal punto di vista storico-epistemologico, poi, è appunto estremamente interessante rilevare come questo problema degli stati ad energia negativa, solo indirettamente connesso (non esplicitamente almeno) alla conservazione/non-conservazione dell'energia, ma certamente legato alla comprensione di una sua ulteriore, mutata, determinazione concettuale, sia la base da cui Majorana parta per costruire quello che è sicuramente il primo esempio di uno spazio di rappresentazione unificato per le

¹⁴ C. D. Anderson: *Science* **76** (1932) p. 238. Si veda anche N. R. Hanson: *The concept of the positron*, (1963), tr. it. di I. Zucchetto, *Il concetto di positrone* (Piovan, Abano Terme, 1989).

¹⁵ Si veda, per esempio, C. Itzykson & J. B. Zuber: *Quantum Field Theory* (McGraw-Hill, New York, 1980).

¹⁶ R. Jackiw: *Effects of Dirac's negative energy sea on quantum numbers*, *Helvetica Physica Acta* **59** (1986) pp. 835-843.

¹⁷ Si veda, per esempio, F. Strocchi: *Elements of Quantum Mechanics of Infinite Systems* (World Scientific, Singapore, 1985).

particelle che vengono a comparire in multipletti o addirittura in una sorta di “supermultipletti”¹⁸ : come risulta appunto dall’articolo del 1932, le particelle vengono descritte in particolari condizioni d’interazione, infatti, per cui possono considerarsi “collassare” in questi multipletti.

E l’enfasi sul problema teorico dell’energia è tanto più rilevante quando si pensi che, al momento in cui Majorana completa e pubblica queste sue prime ricerche sull’argomento, ovvero agosto 1932 – ricerche che, fra l’altro, come mostrano i pur non perfettamente databili manoscritti inediti, hanno già una non piccola evoluzione precedente¹⁹ –, vi è uno spettro estremamente ridotto di particelle elementari conosciute, scoperte sperimentalmente, da poter giustificare un tale lavoro teorico.

Ovviamente, il tema dell’energia quale elemento genetico delle teorizzazioni di Majorana non è quello codificabile nell’accettazione di un principio di conservazione dell’energia, fondante quanto riduzionista²⁰ (cui pure le sue teorie, in quanto teorie quanto-relativistiche di campo, ambigamente, in maniera irrisolta, rimandano²¹), ma è presente quale nucleo problematico. A livello genetico-epistemologico, non di contesto della giustificazione, è una fisica che procede da problemi e per problemi quella che Majorana produce e che si oppone alla astrattezza metodica della teoria di Dirac, che muove geneticamente da principi che si giustificano solo nell’ideologia di una pura “estetica” matematica, in un platonismo triviale che sottopone la “physis” all’arbitrario dominio del “logos mathematikòs”²² : ideologia dominante in maniera quasi totale anche nei contemporanei lavori di fisica teorica delle particelle elementari, e che, come mostra la citazione seguente, Majorana irride.

¹⁸ Si veda la nota 7.

¹⁹ Si veda la nota 7.

²⁰ Si vedano le opere citate alla nota 5, e anche A. Rossi: *Il principio di conservazione dell'energia tra fenomenismo e riduzionismo meccanicistico* in F. Bevilacqua, a cura di: "Atti del Convegno 'I Beni Culturali Scientifici nella Storia e nella Didattica della Fisica', Pavia 1990 ", in corso di stampa. Si veda inoltre, per una più ampia ricostruzione storica, F. Bevilacqua: *The Principle of Conservation of Energy and the History of Classical Electromagnetic Theory* (La Goliardica Pavese, Pavia, 1983).

²¹ Si vedano i lavori citati alle note 4 e 15, e anche E. Giannetto: *Il crollo...*, op. cit.

²² Si vedano E. Giannetto: *Fisica Quantistica...*, op. cit. e inoltre: E. Giannetto: *La logica quantistica tra i fondamenti della matematica e i fondamenti della fisica*, in U. Bartocci & J. P. Wesley, eds.: *Foundations of Mathematics & Physics* (Wesley, Blumberg, 1990), pp. 107-127; E. Giannetto: *On Truth: a Physical Inquiry*, in M. C. Galavotti & D. Costantini, a cura di: "Atti del Congresso 'Nuovi problemi della logica e della filosofia della scienza', Viareggio 1990 " (Cleup, Bologna, 1991), pp. 221-228.

Si tratta di alcune considerazioni illuminanti a questo proposito, che sono prese dal manoscritto inedito²³ dell'articolo del 1932 e che però non compaiono nella stesura definitiva dell'articolo pubblicato (i corsivi sono miei):

«...Ma il tratto più caratteristico della nostra teoria è che in essa viene meno la simmetria fra passato e futuro, così che esistono, per esempio, stati con massa positiva, o anche immaginaria, ma non con massa negativa, come accade nella teoria di Dirac. La presenza di stati privi di senso fisico è in realtà una conseguenza necessaria della *forma lineare imposta* alle equazioni indipendentemente da un'eventuale indeterminazione nel segno dell'energia, e questo lascia presumere, per analogia, che anche gli stati negativi della teoria di Dirac non abbiano fondamento che nella *illegittima conservazione dello schema quantistico nell'ambito della relatività*, o nella scelta di un tipo di equazione che appare a priori inadatto... *come se la natura fosse in imbarazzo per la scelta del segno nel radicale $\sqrt{(p^2c^2+m^2c^4)}$* . L'indeterminazione nel segno dell'energia può essere in realtà superata usando equazioni del tipo fondamentale... solo se la funzione d'onda ha infinite componenti che non lasciamo separare in tensori o spinori finiti».

I corsivi che ho immesso sottolineano quelli che sono appunto, a mio avviso, i punti più rilevanti delle sue critiche al paradigma dominante. Ed è questo distacco critico-problematico di Majorana, il quale prosegue con grande originalità costruttiva in un cammino di ricerca davanti al quale le stesse analisi profonde di Landau si fermano, che può fare intravedere quanto espresso da Fermi in un suo famoso giudizio²⁴, che pone Majorana accanto ai geni di Galileo e Newton quale creatore di una nuova fisica: proprio perché si può supporre che lo spirito critico che lo aveva mosso, pure all'interno degli schemi delle teorie di campo quanto-relativistiche, alla formulazione prima delle basi di una nuova, generale, fisica teorica delle particelle elementari e poi di quelle di una nuova fisica teorica nucleare contemporaneamente ad Heisenberg²⁵, lo avrebbe

²³ E. Majorana: *Fascicolo 8 dei Manoscritti Scientifici Inediti*, depositati alla Domus Galilaeana di Pisa. Sono grato al prof. Vincenzo Cappelletti della Domus Galilaeana per la possibilità di consultare tali manoscritti. Un catalogo di tali manoscritti, a cura di M. Baldo, R. Mignani & E. Recami, è stato pubblicato in E. Majorana: *Lezioni all'Università di Napoli* (Bibiopolis, Napoli, 1987), pp. 178-195. Tale catalogo è di complemento al catalogo, a cura di R. Liotta, pubblicato in E. Amaldi: *La vita...*, op. cit., pp. 91-101.

²⁴ Si tratta di un giudizio di Enrico Fermi, espresso in un dialogo con Giuseppe Cocconi, di cui dà notizia E. Amaldi: *La vita...*, op. cit., p. XLVIII. Mi si permetta di rimandare anche alla voce da me curata, *Majorana Ettore*, Nuovo Dizionario Enciclopedico (Edizioni dell'Enciclopedia Italiana Treccani, Roma), in corso di stampa.

²⁵ E. Majorana: *Über die Kerntheorie*, *Zeitschrift für Physik* **82** (1933) pp. 137-145 e *Sulla teoria dei nuclei*, *La Ricerca Scientifica* **1** (1933) pp. 559-565; W. Heisenberg: *Über den Bau der Atomkerne*,

condotto (o lo ha condotto, considerato che, invero, potrebbe esserci rimasta solo una parte dei suoi ultimi lavori²⁶) a nuovi, “rivoluzionari”, rivolgimenti teorici.

A livello epistemologico, l'unico “principio”, di sfondo, che ispira i lavori di Majorana è quello d'indeterminazione, che, come appare da quanto scritto nella lezione “zero” e nelle ultime parole dei manoscritti rimasti delle lezioni²⁷ del 1938 a Napoli e ancora nell'articolo “postumo” del 1942 sul “valore delle leggi statistiche nella fisica e nelle scienze sociali”²⁸, è usato in chiave anti-riduzionistica e unitaria per il superamento delle rappresentazioni classiche dei fenomeni naturali e di quelli della “natura artificiale”. Ed è appunto il nucleo problematico dell'energia, che, senza alcuna rappresentazione mentale preconcepita delle particelle, lo conduce ad abbandonare l'accettata relazione uno-a-uno campo-particella e a rivoluzionarla nella costruzione analitica di un nuovo modello semantico-pragmatico delle particelle elementari (una nuova loro “rappresentazione mentale”) in cui tutti i bosoni e tutti i fermioni sono

Zeitschrift für Physik **77** (1932) p. 1. Della contemporaneità delle ricerche di Majorana, o forse della loro precedenza rispetto a quelle di Heisenberg, riferisce E. Amaldi: *La vita...*, op.cit., p. XXIII.

²⁶ Almeno da tre lettere di Majorana si ha notizia di uno sviluppo ulteriore della teoria per particelle di spin arbitrario pubblicata nell'articolo del 1932. Si parla di un'estensione di questa teoria in quella, al padre e datata 18-2-1933 (Leipzig), che è stata codificata come "Quinta lettera da Lipsia" in E. Recami: *Il caso Majorana* (Mondadori, Milano, 1987). Per una copia delle altre due lettere sono grato al prof. Michelangelo De Maria, che le ha rintracciate insieme ad altre presso gli archivi del CNR, da cui Majorana aveva ottenuto la borsa di studio per il suo soggiorno a Leipzig: si tratta di aggiornamenti delle sue ricerche fatte al prof. Bordoni. In una, datata 21-1-1933, Majorana scrive (le sottolineature sono mie): "...Attendo attualmente alla elaborazione di una teoria relativistica per la descrizione di particelle con momento intrinseco arbitrario che ho iniziata in Italia e di cui ho dato notizia sommaria nel Nuovo Cimento...". Nell'altra, datata 3-3-1933, Majorana scrive: "...Ho inviato alla *Zeitschrift für Physik* un articolo sulla teoria dei nuclei. Ho pronto il manoscritto di una nuova teoria relativistica delle particelle elementari e la invierò alla stessa rivista fra qualche giorno...". Purtroppo, le mie ricerche, agli archivi della rivista cui tale manoscritto doveva essere destinato, agli archivi di Heisenberg (presso il cui istituto, a Leipzig, Majorana effettuava le sue ricerche nel periodo della borsa di studio, dal gennaio all'inizio dell'autunno del 1933) e agli archivi di Bohr (presso il cui istituto, a København, aveva passato tre mesi di questo periodo, a partire dallo stesso 3 marzo 1933), non hanno avuto esito: non è rimasta alcuna traccia di tale manoscritto. Da un'altra indagine, condotta dal regista Bruno Russo di Rai 3, documentata con interviste nel suo lungometraggio "*Ettore Majorana. Un giorno di Marzo*", risulta (per un resoconto essenziale si veda un mio articolo, pubblicato su "La Sicilia", p. 3, del 29-12-1990) che Majorana aveva lasciato, immediatamente prima di scomparire, forse lo stesso 25-3-1938, una "voluminosa carpetta" di suoi scritti, non bene identificati, ad una studentessa del suo corso di lezioni: questa carpetta sarebbe poi stata consegnata ad un assistente del prof. Antonio Carrelli, e poi a questo stesso, direttore dell'istituto di fisica di Napoli, presso cui Majorana aveva preso servizio dal gennaio 1938. Purtroppo, anche le ricerche di tale "carpetta", effettuate da varie persone, sono rimaste senza esito.

²⁷ E. Majorana: *Lezioni...*, op. cit. Il manoscritto della lezione "zero" fu ritrovato nel 1972 da E. Recami e pubblicato nel "Corriere della Sera" del 19-10-1982; la ristampa nel libro delle lezioni si trova alle pp. 169-172, all'interno del saggio di E. Recami: *Ettore Majorana: lo scienziato e l'uomo*. Le ultime note delle lezioni sono a p. 111.

²⁸ E. Majorana: *Il valore delle leggi statistiche nella fisica e nelle scienze sociali*, *Scientia* **36** (1942) pp. 58-66.

associati ad un unico campo, che soddisfa ad un'equazione tipo-Dirac ad infinite componenti. Tale nuova "rappresentazione mentale" delle particelle elementari non è appunto un'immagine pregiudiziale rilevante solo nel contesto genetico della scoperta e come tale inessenziale alla codificazione legittimata, formale della fisica, ma è il risultato di una costruzione matematica²⁹ che resta essenziale come nuovo modello semantico-pragmatico della struttura logico-formale dell'equazione di Dirac, allo stesso livello definitorio della nuova teoria.

Anche lo stesso tema della simmetria, discusso da Majorana, non è assunto da Majorana come principio fondante, proprio di una ideologica estetica matematica, ma è secondario geneticamente al nucleo problematico dell'energia, partendo dal quale le proprietà di simmetria della teoria non sono assunte aprioristicamente, ma sono costruite³⁰.

Questo si può notare, data la discussione ancora più esplicita del tema della simmetria, nell'articolo del 1937³¹, in cui si dà una nuova soluzione al problema della soppressione degli stati ad energia negativa: qui, non risulta più necessario passare ad un'equazione ad infinite componenti, ma Majorana riesce a fornire una descrizione separata delle particelle dalle antiparticelle nell'ambito di equazioni a finite componenti. Questa nuova teoria di Majorana è stata riassorbita nella letteratura manualistica³² alla semplice scoperta di una nuova rappresentazione delle matrici di Dirac (la cosiddetta "rappresentazione di Majorana"), ma non è affatto equivalente alla teoria di Dirac: non si tratta semplicemente della possibile non-esistenza di alcuni tipi di antiparticelle, o di alcune differenti proprietà dei neutrini; è una soluzione al problema dell'energia, che

²⁹ Si vedano i lavori citati alla nota 5 e E. Giannetto, C. Tarsitani & M. Vicentini Missoni: *The Relations between Epistemology, History of Science and Science Teaching from the Point of View of the Research on Mental Representations*, Science and Education, in corso di stampa.

³⁰ Si veda l'articolo citato alla nota 7. Una tematizzazione analoga di teorie scientifiche che si costruiscono a partire da problemi, in contrapposizione ad altre teorie scientifiche organizzate assiomaticamente, seppure in relazione alla matematica costruttiva e intesa come "categoria" esaustiva per una ricostruzione della storia della fisica, è presente in vari lavori di A. Drago. Si veda, ad esempio, A. Drago: *Storia delle teorie fisiche secondo le loro due scelte fondamentali: la matematica e l'organizzazione della teoria*, in S. D'Agostino & S. Petruccioli, a cura di: "Atti del V Congresso Nazionale di Storia della Fisica", Rend. Acc. Naz. dei XL, ser.V, 9 pt. II, Memorie Sci. Fis. e Nat., (1985) pp. 365-373.

³¹ Si veda la nota 8.

³² Si veda, per esempio, il testo citato alla nota 15; per la dimostrazione dell'impossibilità di una tale riduzione, si veda N. Salingaros: *Physical Algebras in Four Dimensions. II. The Majorana Algebra*, Advan. in Appl. Math. 4 (1983) pp. 31-38.

evita i problemi della rinormalizzazione legati agli stati ad energia negativa e alla conseguente concezione del vuoto della teoria. Majorana scrive³³ (i corsivi sono miei):

L'interpretazione dei cosiddetti 'stati ad energia negativa' proposta da Dirac conduce, come è ben noto, ad una descrizione sostanzialmente simmetrica degli elettroni e dei positroni. La sostanziale simmetria del formalismo consiste precisamente in questo, che fin dove è possibile applicare la teoria girando le difficoltà di convergenza, essa fornisce realmente risultati del tutto simmetrici. Tuttavia gli *artifici suggeriti per dare alla teoria una forma simmetrica* che si accordi con il suo contenuto, non sono del tutto soddisfacenti; sia perché si parte sempre da una impostazione asimmetrica, sia perché la simmetrizzazione viene in seguito ottenuta mediante tali procedimenti (come la cancellazione di costanti infinite) che possibilmente dovrebbe evitarsi... Per quanto riguarda gli elettroni e i positroni, da essa [i.e., dalla nuova teoria di Majorana] si può attendere soltanto un progresso formale, ma ci sembra importante, per le possibili estensioni analogiche, che venga a cadere la nozione stessa di stato di energia negativa.

Ancora più importante è fare rilevare come, mentre nell'impostazione analitica della teoria di Dirac (in cui l'equazione differenziale è centrale) le considerazioni di simmetria, legate all'“ideologia estetica”, restano puramente di principio e di “contorno”, nella ricerca di Majorana, che parte dal nucleo problematico dell'energia, invece, l'equazione differenziale non ha più un ruolo centrale e le considerazioni di simmetria sono legate allo studio dei sistemi algebrici, che le equazioni possono realizzare (e che possono sostituire le stesse equazioni), e dei loro gruppi di trasformazione (tramite appunto la teoria dei gruppi)³⁴. La ricerca di Majorana si inserisce, quindi, con la sua genesi problematica, in quella linea di “algebrizzazione della dinamica” che ha le sue origini matematiche nei lavori di Galois, e che si ritrova all'origine della meccanica quantistica nella formulazione della meccanica delle matrici di Heisenberg (impostazione algebrica) in opposizione alla matematicamente, fisicamente e epistemologicamente, non equivalente meccanica delle onde di Schroedinger (impostazione analitica)³⁵. Queste ricerche di Majorana, di molto

³³ Si veda la nota 8.

³⁴ Si veda la nota 7.

³⁵ Si vedano l'articolo citato alla nota 7 e Y. Ne'eman: *The Spectrum-Generating Groups and the String*, *Foundations of Physics* **18** (1988) pp. 245-275; per una completa formulazione algebrica della teoria di Majorana, si veda A. Böhm: *The Algebraic Method and Infinite Component Wave Equations*, in A. O. Barut, W. E. Brittin, eds.: *Lectures in Theoretical Physics, Boulder*, vol. **X B** (New York, 1968).

precedenti a quelle di Wigner³⁶, costituiscono allora non solo il primo lavoro di una generale fisica teorica delle particelle elementari, ma anche la sua originaria impostazione algebrica che poi servirà da modello³⁷ e si ritroverà nelle ricerche dei cosiddetti “spectrum-generating-groups” fino alle stringhe e alle superstringhe, che, come afferma Neeman³⁸, rappresentano una continuazione della linea algebrica in opposizione epistemica a quella analitica della teoria quanto-relativistica di campo, un ritorno ad una meccanica quantistica “in una versione generalizzata della antica meccanica delle matrici”³⁹. L’equazione del 1932 di Majorana sarà il primo modello per la cosiddetta “democrazia nucleare”⁴⁰, teoria che rifiuta l’esistenza di campi *fondamentali*, si potrebbe dire in riflesso della genesi problematica del suo modello in Majorana, non pre-costituito da principi *fondanti*. La centralità dell’idea di simmetria si ricollega alle origini del pensiero scientifico arcaico con la sua tematizzazione di una simmetria-armonia dell’inizio del mondo, successivamente rotta. L’algebrizzazione della fisica, della dinamica, dei processi fisici è poi la base, invero, per una derivazione “empirica” della logica che diventa una “logica fisica”, a posteriori, ovvero per un rovesciamento della relazione che vedeva la “physis” sottomessa all’arbitrio aprioristico, di ispirazione analitica, delle rappresentazioni del “logos mathematikòs” e della sua estetizzante ideologia⁴¹.

³⁶ Si veda la nota 7 e E. P. Wigner: *Ann. Math.* **40** (1939) p. 149; V. Bargmann & E. P. Wigner: *Proc. Nat. Acad. Sci.* **34**, (1948) p. 211.

³⁷ Si veda la nota 7.

³⁸ Si veda la nota 35.

³⁹ Si veda la nota 35.

⁴⁰ Si veda la nota 7 e G. F. Chew: *The Analytic S-Matrix* (Benjamin, New York, 1966).

⁴¹ Si vedano gli articoli citati alla nota 22 e D. Finkelstein: *Matter, Space and Logic*, *Boston Studies in the Philosophy of Science* **5** (1969) p. 199.