

QUADERNI, 37

IL VALORE DELLA FISICA
ENRICO PERSICO NELLA CULTURA ITALIANA
DEL NOVECENTO

a cura di
VINCENZO BARONE
e
GIOVANNI BATTIMELLI



ACCADEMIA DELLE SCIENZE DI TORINO

I fondamenti della teoria quantistica nell'opera di Fermi e di Persico

VINCENZO BARONE*

1. Tra fisica e filosofia

«Ogni scienziato per cui la scienza non sia soltanto un mestiere, ha il diritto, anzi direi il dovere, di avere delle opinioni sui fondamenti filosofici della scienza»¹.

Non è per giustificare la propria presenza in un consesso di filosofi (cui impartirà una lezione di neopositivismo – la prima in Italia² –, ammonendo a rifuggire dallo «pseudo pensiero, l'allineamento di parole vuoto di contenuto, ma camuffato da vero o da falso») che Enrico Persico pronuncia queste parole al Congresso Nazionale di Filosofia del 1933, all'inizio del suo intervento intitolato *Aspetti logici di questioni fisiche*. La perentoria affermazione del giovane professore di Fisica teorica dell'Università di Torino non è dettata dal contesto e dall'occasione, ma da una convinzione profonda, che informa tutto la sua multiforme attività intellettuale.

Ben diverso, al riguardo, è il punto di vista di Enrico Fermi, amico fraterno di Persico fin dagli anni dell'adolescenza e vincitore assieme a lui del primo concorso a cattedra di Fisica teorica in Italia. Se Persico è attento agli aspetti epistemologici della fisica, e li coltiva con passione e competenza, Fermi è completamente refrattario a qualunque commistione tra scienza e filosofia. Un

* Università del Piemonte Orientale, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e Accademia delle Scienze di Torino; barone@to.infn.it.

¹ E. Persico, *Aspetti logici di questioni fisiche*, in *Atti dell'VIII Congresso Nazionale di Filosofia (Roma, 24-28 ottobre 1933)*, Società Filosofica Italiana, Roma 1934, pp. 106-113, cit. p. 106; rist. parz. in AA.VV., *L'immagine della scienza*, a cura di G. Giorello, Il Saggiatore, Milano 1977, pp. 121-129.

² Si veda la testimonianza di Ludovico Geymonat in *Paradossi e rivoluzioni. Intervista su scienza e politica*, a cura di G. Giorello e M. Mondadori, Il Saggiatore, Milano 1979, p. 31, e nella Commemorazione di Persico tenuta presso il Centro di Studi Metodologici di Torino il 17 giugno 1971 (in questo volume, p. 194).

«perfetto agnostico» dal punto di vista filosofico, lo definisce efficacemente Gerald Holton³. Persico, dal canto suo, lo dipinge come una sorta di neopositivista spontaneo. Ecco cosa dice di lui, ricordandone l'opera nel 1962:

Fin dalla sua adolescenza Fermi aveva una precisa visione positivista del mondo, anche se difficilmente avrebbe accettato questa o una qualsiasi altra etichetta convenzionale per la sua filosofia [...]. In realtà, le discussioni filosofiche non lo interessavano molto e anche lo sviluppo della filosofia scientifica che si verificò durante gli anni della sua maturità, attraverso l'attività del Circolo di Vienna e di altri gruppi, sembra averlo lasciato piuttosto indifferente. Forse perché molte delle idee di fondo del positivismo logico erano già profondamente radicate in lui come verità autoevidenti e perché non aveva alcuna inclinazione per le discussioni e le sottigliezze filosofiche⁴.

Qualche indicazione in proposito può venire dall'articolo *La fisica moderna*⁵ che Fermi scrive nel 1930 per una rivista di cultura come «Nuova Antologia». Soffermandosi sul criterio che ha guidato la costruzione della meccanica quantistica, e che «pur essendo in sé quasi evidente, ha bisogno, in alcuni casi, di un certo coraggio per essere applicato», osserva:

Nella fisica di oggi si considera che abbiano un significato preciso soltanto le grandezze suscettibili di una determinazione sperimentale; ben inteso anche se questa possa farsi solo per mezzo di esperienze di esecuzione difficilissima, o anche praticamente impossibile, purché l'impossibilità sia tecnica e non teorica. Ora esistono alcune nozioni che sfuggono ad una precisazione rigorosa e che perciò, dal punto di vista della fisica moderna, debbono venire modificate, anche quando esse ci derivano dall'intuito comune. Così per esempio nella costruzione della nuova meccanica dell'atomo gli stessi concetti di posizione e di velocità hanno dovuto subire delle modificazioni essenziali⁶.

³ G. Holton, *Einstein e la cultura scientifica del XX secolo*, trad. it., il Mulino, Bologna 1991, p. 267.

⁴ E. Persico, recensione di E. Fermi, *Collected Papers (Note e Memorie)*, Vol. I, in «Scientific American», 207, n. 5, 1962, p. 184.

⁵ E. Fermi, *La fisica moderna*, in «Nuova Antologia», 65, 1930, pp. 137-145; rist. in E. Fermi, *Note e Memorie*, Vol. I, Accademia Nazionale dei Lincei e University of Chicago Press, Roma 1961, pp. 371-378, e in E. Fermi, *Atomi Nuclei Particelle. Scritti divulgativi ed espositivi 1923-1952*, a cura di V. Barone, Bollati Boringhieri, Torino 2009, pp. 63-72.

⁶ E. Fermi, *La fisica moderna*, in *Atomi Nuclei Particelle*, cit., p. 69.

Sebbene dia qui l'impressione di aderire a quelle idee di sapore neopositivistico che fanno da sfondo filosofico alla neonata meccanica quantistica, Fermi in realtà non va oltre l'affermazione del principio che nelle leggi di natura debbano comparire solo grandezze osservabili – un principio enunciato nel 1925 da Heisenberg e Born e che nel frattempo è diventato un vero e proprio *cliché* in molte presentazioni della teoria quantistica. In un saggio del 1928 Persico aveva espresso, con maggiore radicalità e consapevolezza filosofica, le stesse vedute⁷. Ma per Fermi il postulato dell'osservabilità delle quantità fisiche è solo una «verità autoevidente», e non c'è traccia nel suo articolo del vero armamentario dell'empirismo logico, che invece è ben presente negli scritti di Persico⁸, il quale, forse, tendeva a proiettare sul suo amico qualcosa del proprio credo epistemologico.

Diversi nel loro atteggiamento dinanzi alle questioni filosofiche e concettuali, Fermi e Persico sono accomunati dallo stesso stile di ricerca, di tipo *fenomenologico*, nel senso in cui questa espressione è intesa nella fisica attuale: il loro interesse, in altri termini, è nella spiegazione teorica dei dati sperimentali e nella creazione di modelli interpretativi, più che nella costruzione di apparati formali.

Il fenomenologo – scrive Carlo Bernardini riferendosi a Fermi, ma il discorso può estendersi anche a Persico – è, in un certo senso, un conservatore razionale, convinto della adeguatezza delle idee già esistenti nel costituire un sistema di principii, poco interessato a modificare i principii stessi quando questi hanno già dimostrato di poter fornire la chiave interpretativa di un vasto e disparato numero di fenomeni⁹.

Pur essendo coetanei di Heisenberg e Dirac, Fermi e Persico non prendono parte all'edificazione della meccanica quantistica, contribuendo piuttosto a farne uno strumento potente di risoluzione di problemi. Sono, d'altronde, i primi fisici teorici in Italia, privi di maestri in questo campo, cresciuti in un ambiente accademico in cui la fisica è, esclusivamente, fisica sperimentale, improntata per di più a un accentuato empirismo. Nel caso di Fermi, sostiene

⁷ E. Persico, *Recenti punti di vista sui fondamenti della fisica*, in «Nuovo Cimento», 5, 1928, pp. CXVII-CXXVIII.

⁸ Id., *Aspetti logici di questioni fisiche*, cit.; Id., *Analisi del determinismo fisico*, in AA.VV., *Fondamenti logici della scienza*, De Silva, Torino 1947, pp. 25-50.

⁹ C. Bernardini, *La fisica di un eccezionale fenomenologo*, in *Enrico Fermi. Significato di una scoperta*, AIN-ENEA, Roma 2001, pp. 92-97, cit. p. 96.

Segrè¹⁰ che furono proprio «il suo amore per i problemi concreti e definiti e la sua diffidenza per le questioni troppo generali, tendenza rinforzata in lui dalla sua formazione culturale di autodidatta» a tenerlo lontano dalle speculazioni «alquanto nebulse e peggio ancora miste di filosofia» che si addensavano attorno alla nascente meccanica quantistica.

Come vedremo, fu più che altro l'attività di disseminazione della nuova fisica, all'interno dell'università ma anche presso un pubblico più vasto, a mettere Fermi e Persico di fronte ad alcuni problemi fondazionali della meccanica quantistica e a dare loro l'opportunità di fornire due importanti contributi teorici in questo campo, entrambi legati al principio di indeterminazione di Heisenberg.

2. La diffusione della fisica quantistica

A partire dal 1923 Fermi e Persico avviarono una capillare campagna di divulgazione della fisica atomica e della teoria quantistica, che si intensificò dopo la loro chiamata, nel 1926, sulle cattedre di fisica teorica, rispettivamente, di Roma e di Firenze. I due si alternarono nelle stesse sedi e sulle stesse riviste, dividendosi i ruoli secondo le rispettive inclinazioni: gli aspetti concettuali e le implicazioni epistemologiche a Persico, i temi strettamente scientifici a Fermi.

Una delle loro collaborazioni più assidue fu con il Seminario matematico dell'Università di Roma e con il «Periodico di Matematiche», diretti entrambi da Federigo Enriques. Il «Periodico» era il giornale della «Mathesis», l'associazione degli insegnanti di matematica delle scuole medie, presieduta dallo stesso Enriques, il quale ne aveva ampliato gli orizzonti, trasformandola in una Società di scienze fisiche e matematiche, anche per soddisfare un'esigenza di aggiornamento dei docenti, particolarmente urgente dopo che la riforma Gentile del 1923 aveva abbinato la matematica e la fisica nelle cattedre liceali. Altro pilastro della vita scientifica dell'epoca era la Società Italiana per il Progresso delle Scienze (SIPS), il cui congresso annuale era un'importante occasione di informazione e di dibattito sullo stato della ricerca e della cultura nel nostro paese. Fermi e Persico parteciparono con assiduità alle riunioni della SIPS, tenendo numerose comunicazioni tanto nella Sezione di fisica quanto nelle sedute plenarie e di classe. A tutto ciò va aggiunta, da parte di entrambi, un'intensa attività saggistica, che si concretizzò in scritti di sintesi e di alta

¹⁰ E Segrè, *Nota biografica*, in E. Fermi, *Note e Memorie*, Vol. I, cit., p. XXVI.

divulgazione comparsi su varie riviste (in particolare, su «Il Nuovo Cimento», «Scientia» e «Nuova Antologia»).

Se ci limitiamo al periodo 1923-1930, l'elenco dei contributi riguardanti gli aspetti fondamentali della teoria quantistica dà un'idea dell'impegno profuso da Fermi e Persico nella diffusione della nuova fisica¹¹:

- EF, *Sui principii della teoria dei quanti* (SM, 1923)
- EP, *Principi della teoria dei quanti* (SM, 1923)
- EP, *L'attuale modello di atomo* (PM, 1923)
- EF, *Argomenti pro e contro l'ipotesi dei quanti di luce* (SM, 1926)
- EF, *Problemi matematici connessi alla nuova meccanica* (SM, 1926)
- EF, *Nuova meccanica quantistica* (SIPS, 1926)¹²
- EP, *Lo stato attuale della fisica atomica* (SIPS, 1927)
- EP, *L'evoluzione della teoria dei quanti* («Scientia», 1928)
- EP, *I principii della nuova meccanica ondulatoria* (SM, 1926)
- EP, *Recenti punti di vista sui fondamenti della fisica* («Nuovo Cimento», 1928)
- EF, *Le basi logiche della nuova meccanica* (SM, 1929)
- EF, *I fondamenti sperimentali delle nuove teorie fisiche* (SIPS, 1929)
- EF, *Il principio di indeterminazione* (SM, 1930)
- EP, *Il principio di causalità nella fisica moderna* (PM, 1930)
- EF, *I fondamenti sperimentali della nuova meccanica atomica* (PM, 1930)
- EF, *La fisica moderna* («Nuova Antologia», 1930).

Passando dall'ambito della divulgazione a quello della ricerca, scopriamo che, nonostante il loro lungo sodalizio, Fermi e Persico scrissero un solo lavoro in collaborazione, all'insegna – non sorprendentemente – della continuità tra vecchia e nuova teoria dei quanti. Rientrava in quel «conservatorismo razionale» di cui abbiamo parlato la loro lunga fedeltà alla teoria di Bohr e Sommerfeld. Questa, con la sua combinazione di elementi classici e quantistici e le numerose ipotesi supplementari che richiedeva per dar conto dei fenomeni più complessi, era alquanto insoddisfacente da un punto di vista formale (Persico la definiva, più che una vera teoria, «una codificazione

¹¹ «SM» = Seminario matematico dell'Università di Roma, «PM» = «Periodico di Matematiche».

¹² Questa comunicazione rappresenta probabilmente il primo resoconto in Italia delle teorie di Heisenberg e Schrödinger: in *Atti della Società Italiana per il Progresso delle Scienze*, 15^a Riunione (Bologna 1926), SIPS, Roma 1927, pp. 552-554 (si noti che il titolo riportato negli *Atti* contiene un refuso: *quantitativa* per *quantistica*).

provvisoria degli strappi da farsi alla teoria antica»¹³), ma aveva dimostrato di possedere una buona capacità esplicativa e di essere feconda sul piano dei risultati. Fermi, in particolare, continuò a servirsene per lungo tempo, anche quando la nuova meccanica quantistica era già nata¹⁴.

Tra le due versioni originarie della meccanica quantistica – la meccanica delle matrici di Heisenberg, Born e Jordan, e la meccanica ondulatoria di Schrödinger – la preferenza dei fisici italiani andò fin dall'inizio alla seconda, più intuitiva e, da un punto di vista matematico, più tradizionale. Nel corso del 1926 Fermi e Persico si impadronirono rapidamente del suo formalismo e delle sue tecniche e alla fine di quell'anno sottoposero ai Lincei un lavoro in cui estendevano il principio delle adiabatiche¹⁵, uno dei capisaldi della teoria di Bohr-Sommerfeld, alla meccanica ondulatoria, ricavando delle espressioni per l'energia cinetica e l'energia potenziale corrispondenti a quelli che saranno poi identificati come i valori medi di queste due grandezze¹⁶.

È interessante notare come in questo lavoro Fermi e Persico aderissero ancora all'interpretazione di Schrödinger della funzione d'onda (o «scalare di campo») ψ , secondo la quale il modulo quadro della ψ rappresenta la densità elettrica delle particelle¹⁷. Fermi conosceva bene l'interpretazione statistica di Born¹⁸ (secondo cui il modulo quadro della ψ è la probabilità di trovare la particella in un certo punto dello spazio), avendo fornito nello stesso anno un'applicazione della teoria di Born in una breve nota che rappresenta il suo

¹³ E. Persico, *L'evoluzione della teoria dei quanti*, in «Scientia», 44, 1928, pp. 373-386, cit. p. 381.

¹⁴ Il famoso lavoro sulla statistica delle particelle che obbediscono al principio di esclusione di Pauli (la «statistica di Fermi-Dirac»), uno dei più importanti contributi teorici di Fermi, faceva ancora riferimento alle vecchie regole di quantizzazione di Sommerfeld. Cfr. E. Fermi, *Sulla quantizzazione del gas perfetto monoatomico*, in «Rendiconti Lincei», 3, 1926, pp. 145-149 (rist. in E. Fermi, *Note e Memorie*, Vol. I, cit., pp. 181-185).

¹⁵ Il principio delle adiabatiche, o principio di Ehrenfest, stabilisce che se un sistema si trova inizialmente in uno stato stazionario, continuerà a trovarsi in tale stato dopo una trasformazione adiabatica (e, più in generale, che una trasformazione adiabatica lascia invariato il valore della probabilità di uno stato quantistico).

¹⁶ E. Fermi e E. Persico, *Il principio delle adiabatiche e la nozione di «forza viva» nella nuova meccanica ondulatoria*, in «Rendiconti Lincei», 4, 1926, pp. 452-457 (rist. in E. Fermi, *Note e Memorie*, Vol. I, cit., pp. 222-226).

¹⁷ Fermi adottò questa interpretazione anche in altri lavori del 1926 e del 1927.

¹⁸ Born aveva presentato la sua interpretazione probabilistica in due lavori del 1926 dedicati alla teoria quantistica degli urti: *Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge*, in «Zeitschrift für Physik», 37, 1926, pp. 863-867; *Quantenmechanik der Stossvorgänge*, in «Zeitschrift für Physik», 38, 1926, pp. 803-827 (tradotti in S. Boffi, *L'interpretazione statistica della meccanica quantistica*, Quaderni di fisica teorica, Università di Pavia, 1992).

primo lavoro di meccanica ondulatoria¹⁹, ma per qualche tempo rimase incerto sul significato della funzione d'onda e prese in considerazione varie opzioni²⁰.

Nel dicembre del 1926 affrontò proprio questo argomento nella sua prima conferenza sulla meccanica quantistica al Seminario di Enriques, di cui abbiamo il riassunto:

La nuova meccanica di Schrödinger permette di risolvere molti problemi della fisica atomica in modo assai soddisfacente. Tuttavia per la interpretazione anche di fenomeni assai semplici, come per esempio quello del moto di un punto libero, essa si trova di fronte a difficoltà derivanti dal fatto che non si riesce a costruire un «pacchetto di onde» che resti coerente durante il movimento del punto. Per potersi attenere letteralmente alla interpretazione data da Schrödinger alla sua teoria bisognerebbe poter costruire *in generale* delle soluzioni soddisfacenti a tale condizione di coerenza. Altrimenti bisogna accontentarsi di una interpretazione statistica come quella proposta da Born²¹.

Sembra di poter dire, leggendo queste righe, che Fermi fosse interessato alla possibilità di discriminare, sulla base di criteri fisici concreti, tra interpretazioni diverse della funzione d'onda²². Il che è indicativo del suo particolare atteggiamento nei confronti dei problemi fondazionali della meccanica quantistica, che lo interessavano solo nella misura in cui erano suscettibili di una trattazione fisico-matematica, e non soltanto di analisi logico-concettuali. Un chiaro esempio al riguardo è rappresentato dal suo approccio al problema del determinismo, che sfocerà in un importante, e complessivamente poco noto, lavoro del 1930.

¹⁹ E. Fermi, *Zur Wellenmechanik des Stossvorganges*, in «Zeitschrift für Physik», 40, 1926, pp. 399-402 (rist. in E. Fermi, *Note e Memorie*, Vol. I, cit., pp. 218-221). Il problema affrontato in questo lavoro è quello della collisione tra una particella e un rotatore quantistico, e la soluzione viene ottenuta, in puro stile fermiano, sfruttando l'analogia con la diffrazione ottica.

²⁰ Cfr. E. Segrè, *Enrico Fermi fisico*, cit., p. 43.

²¹ E. Fermi, *Problemi matematici connessi alla nuova meccanica*, in «Rendiconti del Seminario Matematico della R. Università di Roma», serie II, 5, 1928, p. 23.

²² In occasione del congresso Solvay del 1927, Wolfgang Pauli, usò proprio i risultati ottenuti da Fermi nel suo lavoro sulla teoria quantistica degli urti per dimostrare l'inconsistenza di un'altra interpretazione della meccanica ondulatoria, quella dell'onda-pilota di de Broglie. Cfr. M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, New York 1974, pp. 109-114.

3. Il dibattito sul determinismo e il contributo di Fermi

Il 12 gennaio 1929 Fermi tiene al Seminario matematico di Roma una conferenza intitolata *Le basi logiche della nuova meccanica*. Questo il sommario:

Secondo il principio di causalità valido nella meccanica e nella fisica classica, la determinazione della situazione iniziale di un sistema (posizione e velocità di tutti i punti, campo elettromagnetico ecc.) è sufficiente a determinare tutti gli stati futuri, ed anche antecedenti del sistema. Se si va ad analizzare però se esista la possibilità di determinare lo stato iniziale, si trova che le stesse misure necessarie per effettuare tale determinazione perturbano il sistema, per modo che la determinazione completa dello stato non sembra, nemmeno in linea teorica, possibile con alcuno dei mezzi a noi conosciuti. La nuova meccanica permette di costruire, indipendentemente dal vincolo della causalità, una teoria perfettamente conseguente di tutti i fenomeni conosciuti. Tale teoria però, a differenza delle teorie classiche, consente solo di trovare, per le diverse grandezze, delle leggi di distribuzione e non delle determinazioni complete²³.

Il tema, come si vede, è quello del determinismo fisico, alla luce del principio di Heisenberg e del carattere probabilistico della nuova meccanica. Sulla scia di questo intervento, Enriques invita Fermi e Persico a tenere due conferenze sulla meccanica quantistica al Congresso annuale della Mathesis, che si svolge a Firenze nel settembre 1929, nell'ambito della 18ª riunione della SIPS. I due si ripartiscono come al solito gli incarichi: Persico tratta gli aspetti epistemologici del principio di causalità nella nuova fisica²⁴, mentre Fermi illustra le evidenze sperimentali a sostegno delle teorie quantistiche²⁵.

²³ E. Fermi, *Le basi logiche della nuova meccanica*, in «Rendiconti del Seminario Matematico della R. Università di Roma», serie II, 6, 1930, p. 48.

²⁴ E. Persico, *Il principio di causalità nella fisica moderna*, in *Atti della Società Italiana per il Progresso delle Scienze*, 18ª Riunione (Firenze 1929), SIPS, Roma 1930, Vol. 1, pp. 372-378. Le citazioni che seguono sono tratte da questo testo. La conferenza fu pubblicata anche in «Periodico di Matematiche», serie IV, 10, 1930, pp. 1-6.

²⁵ E. Fermi, *I fondamenti sperimentali delle nuove teorie fisiche*, in *Atti della Società Italiana per il Progresso delle Scienze*, 18ª Riunione, cit., pp. 365- 371 (rist. in E. Fermi, *Note e Memorie*, Vol. I, cit. pp. 330-335). La conferenza, in forma rivista e con il titolo *I fondamenti sperimentali della meccanica atomica*, fu pubblicata anche sul «Periodico di Matematiche», serie IV, 10, 1930, pp. 71-84.

Il «principio di causalità», o, con espressione più esatta – come tiene a precisare Persico – il determinismo, nello schema della fisica classica consiste nell'affermare che, «se si conoscessero per un istante posizione e velocità di tutti gli elettroni e tutti i protoni, e campo elettrico e magnetico in ogni punto, resterebbero determinati tutti i fenomeni passati e futuri». Ciò che la meccanica quantistica nega in questa proposizione «non è la conseguenza ma la premessa, vale a dire la possibilità, anche teorica, di procurarsi quegli elementi, come la posizione e la velocità di una medesima particella, che servono a determinare i valori delle costanti di integrazione»²⁶: il principio di indeterminazione di Heisenberg stabilisce infatti l'impossibilità di misurare simultaneamente e con precisione arbitraria la posizione e la velocità di una particella (le grandezze che classicamente individuano lo stato di una particella). Ciò non significa che sia «impossibile e inutile il ricercare le leggi dei fenomeni anche nel mondo microscopico: bisogna soltanto cambiare l'impostazione dei problemi e ricercare solo le leggi probabilistiche», tenendo conto che «le probabilità sono rette da leggi deterministiche»²⁷.

Persico anticipa e confuta due possibili obiezioni a questo punto di vista. Innanzi tutto – spiega –, se l'indeterminismo sembra ripugnare all'intuizione è solo perché questa si forma sulla base dell'esperienza comune, che riguarda sistemi macroscopici, soggetti a un'evoluzione deterministica. Quanto poi all'ipotesi «che esista un altro ordine di fenomeni oggi sconosciuti i quali permettano di ristabilire il determinismo», Persico afferma di ritenerla molto improbabile e comunque non necessaria per inquadrare tutti i fenomeni fisici noti in uno schema coerente.

Al congresso fiorentino Fermi non affronta questo genere di questioni, ma si limita a esporre e discutere le basi sperimentali della nuova meccanica quantistica. È quindi soprattutto la conferenza di Persico, per il suo contenuto più provocatorio e controverso, ad animare la discussione. Nel resoconto del dibattito comparso sul «Periodico di Matematiche» si legge:

²⁶ Qui Persico riprende le considerazioni conclusive del lavoro di Heisenberg sulle relazioni di indeterminazione. Cfr. W.K. Heisenberg, *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik and Mechanik*, in «Zeitschrift für Physik», 43, 1927, pp. 172-198 (trad. it. in W. Heisenberg, *Indeterminazione e realtà*, Guida, Napoli 1991).

²⁷ «Il moto delle particelle segue leggi di probabilità, ma la probabilità stessa evolve in accordo con la legge causale» scrive Max Born nel suo lavoro sulla teoria quantistica degli urti, in cui propone l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda: M. Born, *Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge*, cit., p. 804 (trad. it. in S. Boffi, *L'interpretazione statistica della meccanica quantistica*, cit., p. 62).

Il prof. Enriques, che presiedeva l'adunanza, ha osservato non essere utile, ai fini di un migliore chiarimento della questione, che l'assemblea si trovi troppo facilmente d'accordo nel sentimento che respinge le nuove vedute. E perciò (mentre rammaricava l'assenza del prof. Fermi) ha pregato espressamente il prof. Persico di dire quelle cose che egli stimasse più opportune per sostenere le vedute di Heisenberg²⁸.

Le reazioni dei presenti, complessivamente negative, furono perlopiù improntate a pregiudiziali di natura filosofica²⁹. Non sorprende che Fermi decidesse di non prendere parte alla discussione, lasciando a Persico (ma anche a Orso Mario Corbino e Gleb Wataghin) il compito di rispondere alle critiche dei filosofi e degli scienziati della vecchia guardia.

Come scrive Segrè, «Fermi era piuttosto propenso a essere impaziente con le persone che non capivano o non si sforzavano abbastanza per capire i nuovi sviluppi della meccanica quantistica, ma trattava le reali difficoltà, incontrate nello sforzo di capire, in modo ben diverso da quelle che nascevano dalla pigrizia o addirittura dall'incomprensione totale dei fatti»³⁰. Il suo atteggiamento sfuggente alla riunione della «Mathesis» non era quindi dettato da disinteresse per il tema del dibattito, ma solo da insofferenza per i termini in cui esso veniva affrontato³¹. Il terreno su cui sentiva di poter dare il proprio contributo non era quello vago e confuso del dibattito fiorentino, bensì quello della scienza pura.

Così fece in effetti pochi mesi dopo, nel modo che gli era più congeniale: attraverso un lavoro scientifico in cui la questione del determinismo veniva tradotta in un problema ben definito e suscettibile di risoluzione³². La sua nota

²⁸ F. Enriques, *Il determinismo e la fisica quantistica nel Congresso fiorentino della "Mathesis"*, in «Periodico di Matematiche», serie IV, 10, 1930, p. 65.

²⁹ Cfr. *ivi*, pp. 65-71, e gli interventi raccolti negli *Atti della Società Italiana per il Progresso delle Scienze*, 18ª Riunione, cit., pp. 377-390.

³⁰ E. Segrè, *Enrico Fermi fisico*, cit., p. 65.

³¹ Questo sentimento era condiviso da molti fisici della nuova generazione. Giovanni Polvani, per esempio, così si esprimeva nel 1930: «Per il principio di indeterminazione, per questo dissolvimento delle leggi naturali – come teme alcuno – per questo ritorno al mondo democriteo, posto a caso – come altri crede – già da tre anni si lanciano gravi rampogne contro i fisici, da parte di molti dotti incompetenti o, se non vi dispiace, da molti competenti indotti». Cfr. G. Polvani, *Significato sperimentale, teorico, filosofico della meccanica ondulatoria*, in «Rendiconti del Seminario Matematico e Fisico di Milano», 4, 1930, pp. 148-158.

³² È interessante osservare come anche il giovanissimo Bruno de Finetti avesse tratto stimolo dal dibattito fiorentino per formulare scientificamente il problema del determinismo sulla base delle proprie pionieristiche ricerche sui processi stocastici. Cfr. B. de Finetti, *Le leggi differen-*

su *L'interpretazione del principio di causalità nella meccanica quantistica*³³ (che, secondo Segrè³⁴, trae origine da alcune domande poste dal matematico Guido Castelnuovo in coda al seminario romano del gennaio 1929 citato poc'anzi³⁵) venne presentata all'Accademia dei Lincei nel maggio del 1930 ed è, come giustamente sottolinea Persico³⁶, uno dei lavori più rappresentativi dello stile scientifico di Fermi.

Lo scopo di questa nota – scrive Fermi in apertura – è di precisare fino a che punto si può, secondo la meccanica quantistica, parlare di causalità, e in che senso deve intendersi la affermazione che la meccanica quantistica non conduce a una determinazione degli eventi futuri.

Si dice che vale «il principio di causalità», spiega Fermi, quando «la determinazione dello stato del sistema a un certo istante è sufficiente per determinare lo stato del sistema stesso in qualsiasi istante del passato o dell'avvenire». Lo stato di un sistema quantistico può essere descritto mediante una funzione d'onda ψ , la cui evoluzione temporale è governata dall'equazione di Schrödinger, che è un'equazione deterministica. Conoscendo la funzione ψ in un certo istante, è possibile prevedere esattamente la sua forma in un qualunque istante futuro. Tuttavia, la funzione d'onda ha un contenuto probabilistico e non fornisce informazioni definite su tutte le proprietà del sistema.

Alternativamente – ed è la via che percorre Fermi –, si può descrivere lo stato di un sistema – per esempio, una particella – misurando alcune sue

ziali e la rinuncia al determinismo, conferenza del 5 aprile 1930, in «Rendiconti del Seminario Matematico della R. Università di Roma», serie II, 7, 1931, pp. 63-74.

³³ E. Fermi, *L'interpretazione del principio di causalità nella meccanica quantistica*, in «Rendiconti Lincei», 11, 1930, pp. 980-985, e in «Nuovo Cimento», 7, 1930, pp. 361-366; rist. in E. Fermi, *Note e Memorie*, Vol. I, cit. pp. 349-354, e in E. Fermi, *Atomi nuclei particelle*, cit., pp. 56-62.

³⁴ E. Segrè, *Enrico Fermi fisico*, cit., pp. 64-65.

³⁵ Castelnuovo esporrà poi le proprie riflessioni sull'argomento negli articoli *Determinismo e probabilità*, in «Scientia», 53, 1933, pp. 1-12, e *Il principio di causalità*, in «Scientia», 60, 1936, pp. 61-68.

³⁶ E. Persico, recensione di E. Fermi, *Collected Papers*, cit., p. 186. Persico ricorda che il principio di indeterminazione di Heisenberg aveva dato luogo in Italia a «numerose discussioni tra matematici e filosofi, alcuni dei quali, sulla base di una conoscenza alquanto nebulosa della questione, si rifiutavano di rinunciare a una visione strettamente deterministica della natura. Molte di queste discussioni scaturivano da equivoci attorno a parole come “determinismo”, “causalità” e “indeterminazione”. L'articolo di Fermi, che traeva origine da uno di questi dibattiti, pone la questione in una forma chiara e definita».

grandezze caratteristiche. Ma, mentre in meccanica classica lo stato di una particella è interamente determinato dai valori della sua posizione x e della sua quantità di moto p (massa per velocità), in meccanica quantistica il principio di indeterminazione di Heisenberg pone delle limitazioni sulla possibilità di misurare simultaneamente x e p . Si può però misurare con precisione una generica grandezza osservabile data da una funzione di x e p – che Fermi chiama $g(x,p)$ – e definire così lo stato della particella in un certo istante. Questo è il massimo che ci è concesso sapere sul sistema. Ciò comporta – precisa Fermi –

che la determinazione dello stato di un sistema può venir fatta in modi essenzialmente differenti, dipendentemente dalla particolare scelta della funzione $g(x,p)$ che viene misurata.

Il primo risultato che Fermi dimostra è l'equivalenza tra le due descrizioni – in termini della funzione d'onda $\psi(x)$ o di un'osservabile $g(x,p)$ – dello stato di un sistema. Se, facendo una misura di $g(x,p)$, si ottiene il valore g' , il sistema si troverà nello stato descritto dall'autofunzione ψ di $g(x,p)$ con autovalore g' , cioè³⁷

$$g(x,p) \psi(x) = g' \psi(x)$$

Viceversa, se il sistema è descritto da una funzione d'onda $\psi(x)$, è sempre possibile definire un'osservabile $g(x,p)$ che assume per quel sistema un valore definito, per esempio 0. Fermi costruisce esplicitamente questa osservabile, facendo vedere che per una generica funzione d'onda scritta in decomposizione polare come $\psi(x) = \rho(x) e^{i\theta(x)}$ essa ha la forma

$$g(x,p) = \left(p - \hbar \frac{d\theta}{dx} \right)^2 + \frac{\hbar^2}{\rho} \frac{d^2\rho}{dx^2}$$

La condizione $g(x,p)\psi=0$, che identifica lo stato ψ , corrisponde nello spazio bidimensionale delle fasi (lo spazio posizione-quantità di moto) alla curva di equazione $g(x,p)=0$: mentre in meccanica classica, quindi, lo stato di un sistema è individuato, nello spazio delle fasi, da un singolo punto, in meccanica quantistica esso è individuato da una curva.

³⁷ Qui Fermi fa uso del formalismo della meccanica quantistica introdotto da P.A.M. Dirac nel suo fondamentale articolo *The physical interpretation of the quantum dynamics*, in «Proceedings of the Royal Society», A, 113, 1927, pp. 621-641.

Il problema della «causalità», a questo punto, diventa il seguente: data una qualsiasi osservabile fisica funzione della posizione e della velocità della particella, possiamo prevedere il valore che essa avrà in un istante futuro per mezzo di un'esperienza opportunamente scelta da eseguirsi all'istante attuale? Fermi dimostra che la risposta a questa domanda è positiva: il valore che una grandezza fisica assumerà in un istante futuro si ottiene misurando all'istante $t = 0$ un'altra grandezza, la cui forma è sempre esattamente determinabile. La conclusione è allora che:

Tutto quello che è possibile conoscere dello stato di un sistema a un dato istante, mediante esperienze fatte a quell'istante, è possibile conoscerlo anche mediante opportune esperienze fatte ad un qualunque istante antecedente o seguente a quello che si considera. In questo senso dunque l'indeterminazione del sistema non viene per così dire a crescere col passare del tempo.

Ciò non significa però – precisa Fermi – che «i rapporti di causalità validi secondo la meccanica quantistica siano identici a quelli che valgono nelle teorie classiche». Mentre infatti nel caso classico «si può con opportune misure fatte sul sistema al tempo zero, prevedere il valore di qualsiasi grandezza fisica a qualsiasi tempo», nel caso quantistico si può con una misura al tempo zero determinare il valore che avrà una certa grandezza in un tempo successivo, ma

se si volesse conoscere il valore di un'altra grandezza, o della stessa grandezza a un istante diverso, occorrerebbe effettuare all'istante zero una misura differente, incompatibile, almeno in generale, con la precedente.

Sul piano concettuale il lavoro di Fermi aveva il merito – in un momento in cui non c'era ancora una piena cognizione della nuova meccanica – di chiarire un punto importante, e cioè che l'evoluzione temporale degli stati di un sistema quantistico è deterministica: la conoscenza dello stato del sistema in un certo istante permette di prevedere lo stato in qualunque istante successivo. È il carattere probabilistico della relazione tra stati e proprietà osservabili a introdurre delle limitazioni nella possibilità di predire il comportamento futuro dei sistemi a partire da ciò che di essi si sa al presente.

La nota di Fermi, scritta in italiano, non ebbe alcuna risonanza all'estero, fatta eccezione per la Francia, dove Louis de Broglie la fece tradurre e pubblicare, con l'aggiunta di alcune sue osservazioni, nella serie *Exposés de physique théorique* (all'interno della collana delle *Actualités Scientifiques et*

Industrielles) che dirigeva per l'editore Hermann³⁸. Sul piano scientifico, l'interesse di de Broglie era legato soprattutto all'esempio usato da Fermi per illustrare i suoi risultati, quello di una particella libera in una dimensione spaziale, di cui si vuole determinare la posizione. Questo esempio si prestava bene a illustrare le considerazioni sugli integrali primi in meccanica quantistica svolte da de Broglie in una sua nota³⁹ del 1932. In meccanica classica un integrale primo è una grandezza, funzione della posizione e della quantità di moto, che si conserva durante il moto di una particella; l'analogo quantistico è un operatore (che rappresenta una grandezza osservabile) i cui elementi di matrice rimangono costanti nel tempo. De Broglie aveva dimostrato che, dato un operatore definito in un certo istante t da una funzione $A(x,p)$, esiste sempre un integrale primo che si riduce ad A al tempo t . L'esempio fatto da Fermi corrispondeva al caso speciale $A(x,p)=x$.

Ma l'importanza che de Broglie attribuiva al lavoro di Fermi andava al di là di questa particolare applicazione. Nella premessa dell'opuscolo, il curatore André George⁴⁰, dopo aver elogiato «il celebre fisico di Roma» per la sua «abituale chiarezza», scriveva:

L'articolo presenta un triplo interesse: completa le vedute di Heisenberg e Bohr su una delle questioni più attuali della Fisica, illustra la teoria degli integrali primi in Meccanica ondulatoria, arreca infine un contributo al problema filosofico tanto dibattuto della causalità e della nozione di causalità⁴¹ permessa oggi dalla Fisica⁴².

C'era, dunque, da parte di George e di de Broglie, la consapevolezza della rilevanza anche epistemologica dello scritto di Fermi, che gettava nuova luce sulla questione del determinismo e della causalità, ampiamente discussa

³⁸ A. George, *Mécanique quantique et causalité, d'après M. Fermi*, con note di L. de Broglie, Hermann, Paris 1932. Fu attraverso questa pubblicazione che, per esempio, venne a conoscenza del lavoro di Fermi il fisico e filosofo Henry Margenau, che in quegli anni stava sviluppando le proprie importanti riflessioni epistemologiche sulla causalità. Cfr. H. Margenau, recensione di A. George, *op. cit.*, in «Bulletin of the American Mathematical Society», 39, 1933, p. 653. Questo è l'unico riferimento coevo (o pressoché tale) all'articolo di Fermi che sono riuscito a reperire nella letteratura scientifica in lingua inglese.

³⁹ L. de Broglie, *Remarques sur les intégrales premières de la Mécanique ondulatoire*, in «Comptes Rendus de l'Académie des Sciences», 194, 1932, pp. 693-695.

⁴⁰ George non era un fisico, ma un divulgatore; le sue considerazioni, quindi, non potevano non risentire direttamente dell'influenza di de Broglie.

⁴¹ George precisava che il termine «causalità» andava inteso nel senso ristretto di «determinazione degli eventi futuri». Cfr. A. George, *op. cit.*, p. 3.

⁴² *Ibidem*.

in quegli anni in Francia, soprattutto per merito di Émile Meyerson⁴³ e Paul Langevin⁴⁴. La veste formale dell'articolo di Fermi, tuttavia, rendeva difficile, per chi non possedesse una specifica preparazione in fisica, assimilarne il messaggio: di conseguenza il dibattito filosofico, sia in Italia sia in Francia, non tenne conto di quell'importante contributo chiarificatore⁴⁵. Persico, nei suoi *Fondamenti della meccanica atomica*⁴⁶, pubblicati nel 1939, illustrò il contenuto dell'articolo di Fermi in un paragrafo intitolato «Il determinismo e la meccanica quantistica»⁴⁷, ma, anche in questo caso, la sede dell'esposizione – un manuale universitario, sia pure ampiamente usato e tradotto in inglese⁴⁸ – non favorì la diffusione delle riflessioni fermiane.

Da un punto di vista strettamente scientifico, invece, possiamo dire che il risultato più interessante ottenuto da Fermi nella nota del 1930 è quello contenuto nella prima parte: vale a dire, la dimostrazione del fatto che è possibile descrivere lo stato quantistico di un sistema nello spazio delle fasi, mediante una specifica funzione $g(x,p)$. Solo di recente è stato riconosciuto che questo approccio precede quella che viene abitualmente considerata la prima rappresentazione degli stati quantistici nello spazio delle fasi, proposta da Eugene Wigner nel 1932 con l'introduzione della funzione di quasi-probabilità⁴⁹ (la «funzione di Wigner»), ed è stata messa in luce un'interessante relazione tra le due descrizioni⁵⁰. Sulla stessa scia, altri autori hanno evidenziato il rapporto

⁴³ In una nota a p. 3 George faceva un fugace riferimento alle nozioni di «legalità» e «causalità» in Meyerson. Proprio con uno scritto di Meyerson su questo tema, *Réel et déterminisme dans la physique quantique*, de Broglie inaugurò nel 1933 una nuova serie delle *Actualités* di Hermann, intitolata *Exposés de philosophie des sciences*.

⁴⁴ Cfr. P. Langevin, *Y a-t-il une crise du déterminisme?*, in «Le Mois», n. 2, 1931, pp. 273-275. È l'articolo a cui risponde Meyerson in *Réel et déterminisme*, cit.

⁴⁵ Bisognerà aspettare un epistemologo scientificamente ben attrezzato come Vittorio Somenzi per trovare citato il «teorema di Fermi» a sostegno del fatto che la meccanica quantistica non impone una rinuncia al «principio di causalità inteso anche soltanto come dipendenza del risultato di osservazioni in un istante dal risultato di osservazioni nell'istante precedente» (la critica è rivolta alle tesi di Hans Reichenbach). Cfr. V. Somenzi, *I fondamenti filosofici della meccanica quantistica*, in «Rivista critica di storia della filosofia», 10, 1955, pp. 85-89.

⁴⁶ E. Persico, *Fondamenti della meccanica atomica*, Zanichelli, Bologna 1939.

⁴⁷ *Ibidem*, pp. 374-377. A p. 356 Persico menziona in una nota anche la funzione di Fermi.

⁴⁸ E. Persico, *Fundamentals of Quantum Mechanics*, Prentice Hall, New York 1950.

⁴⁹ E. Wigner, *On the quantum correction for thermodynamic equilibrium*, in «Physical Review», 40, 1932, pp. 749-759.

⁵⁰ Cfr. G. Benenti e G. Strini, *Gaussian wave packets in phase space: the Fermi g_F function*, in «American Journal of Physics», 77, 2009, pp. 546-551. G. Benenti e G. Strini, *Quantum*

esistente tra il risultato di Fermi e l'interpretazione della meccanica quantistica di David Bohm⁵¹.

4. Persico sul principio di indeterminazione

Ricordava Persico, in un'intervista rilasciata – assieme a Franco Rasetti – a Thomas Kuhn nel 1963, di essere rimasto molto impressionato dal lavoro di Heisenberg sulle relazioni di indeterminazione e di averne parlato con Fermi.

Fui sorpreso – raccontò – di scoprire che lui non ne era così entusiasta. Ebbi l'impressione che non gli attribuisse la stessa importanza che gli attribuivo io. Probabilmente perché Fermi non era particolarmente interessato agli aspetti filosofici della fisica e quel lavoro era troppo filosofico⁵².

A Kuhn, che faceva notare l'eccezione rappresentata dall'articolo del 1930 sulla causalità, riguardante proprio un problema di fondamenti, Rasetti replicò che quello affrontato da Fermi era «un problema al quale si può dare una precisa soluzione quantitativa, non di quelli che rimangono in forma vaga. È formulato in maniera tale da ammettere una risposta perfettamente definita»⁵³.

Il lavoro del 1930 fu quasi certamente discusso da Fermi con Persico: un appunto di quest'ultimo, conservato nel suo archivio personale presso il Dipartimento di Fisica della Sapienza, contiene infatti dei calcoli preliminari sullo stesso problema⁵⁴. Non è da escludere che sia stato l'approfondimento della questione affrontata da Fermi – e di un importante articolo di Kennard⁵⁵ sul principio di indeterminazione (unico riferimento bibliografico citato da Fermi, oltre alla memoria di Dirac del 1927) – a suggerire a Persico un altro

mechanics in phase space: first order comparison between the Wigner and the Fermi function, in «European Physical Journal D», 57, 2010, pp. 117-121.

⁵¹ Cfr. G. Dennis, M.A. de Gosson e B.J. Hiley, *Fermi's ansatz and Bohm's quantum potential*, in «Physics Letters A», 378, 2014, pp. 2363-2366.

⁵² Intervista di Thomas Kuhn a E. Persico e F. Rasetti, 8 aprile 1963, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics.

⁵³ *Ibidem*.

⁵⁴ Archivio Persico, Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma, sc. 28, f. 189.

⁵⁵ E.H. Kennard, *Zur Quantenmechanik einfacher Bewegungstypen*, in «Zeitschrift für Physik», 44, 1927, pp. 326-352.

problema legato alle relazioni di indeterminazione di Heisenberg: quello degli stati di minima indeterminazione e del modo di calcolarli.

Subito dopo la pubblicazione dell'articolo di Heisenberg⁵⁶ sulla *Unbestimmtheits-relation* tra posizione e quantità di moto, il fisico statunitense Earle H. Kennard, in soggiorno sabbatico a Göttingen e Copenaghen, aveva pubblicato un lavoro in cui la relazione di Heisenberg veniva posta su solide basi matematiche e presentata per la prima volta nella forma di una disuguaglianza. Kennard aveva definito in maniera generale e rigorosa il valor medio e l'indeterminazione di un'osservabile fisica, e mostrato che il prodotto delle indeterminazioni della quantità di moto p e della posizione q doveva essere sempre maggiore o uguale a una quantità proporzionale alla costante di Planck h . Indicando con p_i l'indeterminazione sulla quantità di moto e con q_i quella sull'impulso, la disuguaglianza di Kennard (quella che oggi chiamiamo comunemente «relazione di Heisenberg») era⁵⁷: $p_i q_i \geq h/2\pi$.

Kennard, inoltre, aveva fatto vedere – ed è questo l'aspetto su cui si appuntò l'attenzione di Persico – che il prodotto delle indeterminazioni $p_i q_i$ assume un valore minimo (pari a $h/2\pi$) quando la particella si trova in uno stato descritto da una funzione d'onda gaussiana.

Nei tre anni successivi, gli aspetti formali del principio di indeterminazione furono discussi da vari autori (tra gli altri, da Hermann Weyl, Howard P. Robertson and Erwin Schrödinger)⁵⁸, ma il problema della minimizzazione del prodotto delle indeterminazioni non venne più affrontato, fino alla breve comunicazione dal titolo *Considerazioni sul principio di indeterminazione* che Persico presentò, nel settembre, alla 19ª Riunione annuale della SIPS⁵⁹.

Il primo passo di Persico fu di estendere la disuguaglianza di Kennard – «l'espressione quantitativa del principio di indeterminazione di Heisenberg», nelle sue parole – al caso di una generica coppia di grandezze fisiche, non necessariamente coniugate. Per mezzo di una trasformazione canonica una delle

⁵⁶ W.K. Heisenberg, *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik and Mechanik*, in «Zeitschrift für Physik», 43, 1927, pp. 172-198.

⁵⁷ Le definizioni di Kennard (adottate poi anche da Persico) delle indeterminazioni differivano di un fattore $\sqrt{2}$ da quelle attuali, cosicché nella disuguaglianza originaria compare al secondo membro la quantità $h/2\pi$, invece che $h/4\pi$.

⁵⁸ Sulla storia del principio di indeterminazione cfr., per esempio, M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, New York 1966.

⁵⁹ E. Persico, *Considerazioni sul principio di indeterminazione*, in *Atti della Società Italiana per il Progresso delle Scienze*, 19ª Riunione (Bolzano-Trento 1930), SIPS, Roma 1931, Vol. II, pp. 94-95.

grandezze può essere identificata con la posizione q , mentre l'altra sarà una funzione $P(q,p)$ di q e del suo momento coniugato $p = -i\hbar\partial/\partial q$.

A questo punto, per determinare la funzione d'onda $\psi(q)$ che minimizza il prodotto delle indeterminazioni $P_i q_i$, Persico adotta un ingegnoso metodo variazionale, che lo porta infine a ottenere l'equazione agli autovalori

$$\left[\left(\frac{q - \bar{q}}{q_i} \right)^2 + \left(\frac{P(q,p) - \bar{P}}{P_i} \right)^2 \right] \psi = \psi$$

dove \bar{q} e \bar{P} sono i valori medi delle rispettive grandezze. Risolvendo questa equazione si ottengono le funzioni d'onda ψ di minima indeterminazione⁶⁰. Persico illustra il metodo calcolando gli stati che minimizzano il prodotto della posizione e della quantità di moto: in questo caso l'equazione variazionale può essere messa nella forma di un'equazione di Riccati e risolta facilmente, ottenendo il risultato ben noto della funzione d'onda gaussiana.

Diversamente da altri contributi di Persico alla SIPS⁶¹, la comunicazione del 1930 (in italiano) non fu ripubblicata su riviste scientifiche di maggiore diffusione, né Persico ne fece cenno – stranamente, visto il valore pedagogico del contributo – nel suo trattato di meccanica quantistica, i *Fondamenti della meccanica atomica*⁶². Il metodo di Persico, e la sua equazione, sono rimasti dunque totalmente ignorati. In realtà, nel 1968, lo stesso approccio è stato proposto, in maniera del tutto indipendente, da Roman Jackiw, nel contesto di un importante lavoro sull'indeterminazione numero-fase⁶³, ben noto in letteratura, ma la primogenitura di Persico non è ancora riconosciuta.

Tornando al 1930, successivamente alla comunicazione di Persico alla SIPS il fisico irlandese Robert W. Ditchburn (che ignorava il contributo del fisico italiano) affrontò il problema del calcolo degli stati di minima indeterminazione con un metodo diverso, suggerito (come lo stesso Ditchburn afferma nel

⁶⁰ Per la precisione, l'equazione di Persico fornisce gli stati per i quali il prodotto delle indeterminazioni di q e P è stazionario, cioè ha un minimo, un massimo o un punto di flesso. Tra le sue soluzioni bisogna scegliere quella che minimizza $q_i P_i$.

⁶¹ Per esempio, la comunicazione *Un problema di meccanica ondulatoria unidimensionale*, riguardante il moto di una particella soggetta a un gradino di potenziale variabile nel tempo, e certamente di rilevanza meno generale della nota sul principio di indeterminazione, fu presentata alla 21ª riunione della SIPS del 1932 e pubblicata subito dopo anche sul «Nuovo Cimento», 9, 1932, pp. 284-289.

⁶² E. Persico, *Fondamenti della meccanica atomica*, cit.

⁶³ R. Jackiw, *Minimum uncertainty product, number-phase uncertainty product, and coherent states*, in «Journal of Mathematical Physics», 9, 1968, pp. 339-346.

suo lavoro⁶⁴) da J.L. Synge. Questo è oggi il metodo comunemente adottato nei manuali di meccanica quantistica⁶⁵, ma si tende a ignorare il fatto che, in generale, esso non si applica al caso in cui il commutatore delle due osservabili considerate non sia un *c*-numero, ma un operatore. Il metodo variazionale di Persico, invece, non presenta questa limitazione e ha una validità generale⁶⁶.

5. Conclusione

La comunità fisica italiana non contribuì in modo significativo all'edificazione della meccanica quantistica. I nostri due principali fisici teorici degli anni Venti, Fermi e Persico, manifestarono fin dall'inizio un'indole genuinamente fenomenologica: poco interessati ai formalismi astratti, applicarono in maniera ingegnosa e con risultati di grande rilievo⁶⁷ prima la vecchia teoria dei quanti, poi la meccanica ondulatoria, ai fenomeni della fisica atomica. Come abbiamo visto, furono principalmente il loro impegno pedagogico per la diffusione della nuova fisica e il desiderio di chiarire – attraverso la formulazione di problemi ben definiti – gli aspetti fondamentali della teoria quantistica⁶⁸, a generare alcuni lavori sul principio di indeterminazione e sulle sue implicazioni che, sebbene poco conosciuti all'epoca (e ancora oggi), rivestono un indubbio interesse storico, epistemologico e didattico, e meritano di essere riscoperti.

⁶⁴ R.W. Ditchburn, *The Uncertainty Principle in Quantum Mechanics*, in «Proceedings of the Royal Irish Academy», A, 39, 1930, pp. 73-81.

⁶⁵ Curiosamente, Persico usa nei *Fondamenti della meccanica atomica* (cit., pp. 120-122) un metodo simile a quello di Ditchburn – ma concepito probabilmente in maniera autonoma – per calcolare la forma del pacchetto d'onde che minimizza il prodotto delle indeterminazioni della posizione (la «semilunghezza del pacchetto») e del numero d'onda (la «semilarghezza della riga»).

⁶⁶ Cfr. V. Barone, *The Persico equation for minimum uncertainty states*, in «American Journal of Physics», in corso di stampa.

⁶⁷ Il pensiero va naturalmente, in primo luogo, alla statistica di Fermi-Dirac delle particelle di spin semintero e al modello di Thomas-Fermi degli atomi con molti elettroni.

⁶⁸ Una concreta espressione di quella «disperata sete di chiarezza» di cui parlava Persico nella sua relazione al Congresso di Filosofia del 1933. Cfr. E. Persico, *Aspetti logici di questioni fisiche*, cit., p. 112.

