

La critica di Notarrigo all'interpretazione soggettivistica della meccanica quantistica e alla «pretesa universalità» del teorema di Bell

Vincenzo Fano - Dipartimento di Scienze Pure e Applicate, Università di Urbino
"Carlo Bo" - vincenzo.fano@uniurb.it

Gino Tarozzi - Dipartimento di Scienze Pure e Applicate, Università di Urbino
"Carlo Bo"- gino.tarozzi@uniurb.it

Abstract: This paper discusses historically and critically the Einstein-Podolsky-Rosen paradox (1935) and the violation of Bell's inequality. In particular, it highlights how the physicist Salvatore Notarrigo developed a true *experimentum crucis* which tested experimentally a philosophical hypothesis. At first he obtained an uneven result from what was then imposed. Our contribution also investigates the notion of quantum wave up to the latest experimental results.

Keywords: Bell's inequality, Salvatore Notarrigo, *Experimentum crucis*, Quantum waves.

1. Premessa

Desideriamo esprimere la nostra particolare gratitudine agli organizzatori di questo convegno, e in particolare ai colleghi e amici Angelo Pagano e Roberto Mantovani, oltre che al Presidente della SISFA Lucio Fregonese, per l'invito a tenere una relazione nell'ambito del suo XXXIII congresso annuale, ma soprattutto per averlo fatto nell'ambito della sezione tematica dedicata all'eredità di Salvatore Notarrigo, presso il Laboratorio Nazionale INFN del Sud, una delle sedi più prestigiose della fisica sperimentale italiana.

Le ragioni per cui consideriamo un grande onore l'opportunità che ci è stata data di ricordare il prof. Notarrigo spero che emergeranno nel corso del nostro intervento, ma non possiamo fare a meno di anticipare fin d'ora quello che riteniamo uno dei motivi primari: Notarrigo è stato – a nostra conoscenza – l'unico fisico che abbia avuto il coraggio intellettuale di pubblicare i risultati di un esperimento che sembrava configurarsi come una falsificazione in senso forte popperiano della principale teoria della fisica contemporanea. Analoghi risultati che violavano le predizioni di tale teoria ottenuti da Holt e Pipkin dell'Università di Harvard non andarono oltre lo stadio di *preprint*.

Ci riferiamo naturalmente alla meccanica quantistica, una teoria della quale come vedremo egli ha sempre respinto la cosiddetta interpretazione ortodossa. Il suo rifiuto nasceva, come vedremo, da ragioni di natura filosofica, ed erano condivise anche da altri studiosi di fondamenti. Tali ragioni riguardavano gli aspetti antirealistici e

anticausali della formulazione standard della teoria, che comportavano una vera e propria rinuncia a quelle esigenze esplicative che caratterizzano ogni autentica teoria scientifica, rinuncia che è stata sintetizzata dalla celebre affermazione di Feynman che «è tutto assolutamente misterioso e più ci riflettiamo sopra più ci appare misterioso».

Ci ha profondamente colpito nel commosso ricordo del prof. Pappalardo, l'immagine di Notarrigo completamente immerso nel suo esperimento a cui lavora giorno e notte, ignorando il consiglio dell'amico, che preoccupato per questo suo eccessivo coinvolgimento, gli consiglia di non sovrainvestire troppo in qualcosa il cui risultato non dipende da noi e che in fondo è un esperimento come un altro, non una questione di vita o di morte. Per Notarrigo, tuttavia, così come per altri di noi in quegli anni, quello non era un normale esperimento, ma molto di più. Persino qualcosa di più di quello che è accaduto nei grandi esperimenti della storia della fisica, in grado di discriminare tra teorie e ipotesi scientifiche diverse, quelli che prendendo a prestito una terminologia baconiana vengono definiti *experimenta crucis*.

Nel suo e in analoghi esperimenti di controllo sperimentale della disegualianza di Bell successivamente realizzati, infatti, ciò che era in questione, caso senza precedenti nella storia della scienza, è la validità di principi filosofici fondamentali che appaiono presupposti non soltanto per ogni "buona" teoria scientifica, ma per la possibilità stessa di fare scienza. Si tratta del principio di causalità – che gioca un ruolo fondamentale nell'origine stessa prima della filosofia, poi della scienza occidentale, all'interno delle quali la nozione di spiegazione razionale in termini di cause, emersa come uno dei principali strumenti per sviluppare e per consolidare l'autonomia e la specificità di tali forme di sapere nei confronti del pensiero mitico e religioso, è sempre stata considerata uno degli elementi costitutivi di ogni modello di conoscenza – e del principio di realtà, quella realtà che le nostre teorie si propongono e riescono con più o meno successo a descrivere, principi che come accennavamo prima vengono messi in discussione dalla rappresentazione quantistica del mondo fisico.

Il prof. Pagano ci ha chiesto di presentare una relazione indirizzata a un pubblico in parte giovane, e in parte di non addetti ai lavori, come del resto accade in manifestazioni che hanno come questa un carattere celebrativo. Cercheremo quindi di soffermarci innanzitutto sul contesto generale in cui si inseriscono i contributi del prof. Notarrigo e sulle loro implicazioni concettuali, non trascurando però alcuni aspetti tecnici che appaiono essenziali per poter comprendere la prospettiva originale e non convenzionale delle sue ricerche sui fondamenti della meccanica quantistica. Per cui chiediamo anticipatamente scusa ai più esperti dell'uditorio per le molte banalità, semplificazioni e trattazioni sommarie e ai non esperti perché ci addenteremo comunque in alcune questioni di una certa complessità, riuscendo così molto probabilmente a scontentare sia gli uni che gli altri!

2. Descrivere la realtà attraverso una teoria antirealistica?

Il terzo volume dei *Poscritti* popperiani alla *Logica della scoperta scientifica*, anticipa e sintetizza già nel titolo *La teoria dei quanti e lo scisma nella fisica*, la posizione assunta

dal più grande filosofo (della scienza) del Novecento nei confronti dei fondamenti della meccanica quantistica:

La maggior parte dei fisici [...] crede che la sua interpretazione della meccanica quantistica, che è fondamentalmente realistica, sia identica all'interpretazione "ufficiale", alla cosiddetta interpretazione di Copenaghen, dovuta a Bohr e Heisenberg. Ma è un errore storico grossolano, che non avrebbe molta importanza se non per il fatto che tre dottrine di rilievo ancora risentono dell'influenza dell'interpretazione ["idealistica" e "positivistica"] di Copenaghen, la cui tesi fondamentale è – o piuttosto era – che la fisica quantistica non sarebbe tanto una teoria delle microparticelle, quanto piuttosto una teoria della nostra conoscenza [delle microparticelle] (Popper 1985, p. 4).¹

Le tre dottrine dell'interpretazione ortodossa cui fa riferimento Popper e che a suo parere non sono fortunatamente condivise dalla maggior parte dei fisici, soprattutto sperimentali, sono i tre presupposti fondamentali della formulazione standard della teoria:

1. l'interpretazione non statistica delle relazioni di indeterminazione, e cioè il principio di indeterminazione di Heisenberg;
2. il principio di complementarità di Bohr, e in particolare l'incompatibilità tra descrizione causale e spaziotemporale;
3. il postulato di riduzione della funzione d'onda, in base al quale un sistema non osservato (o non misurato) in uno stato di sovrapposizione, si riduce istantaneamente dopo la misurazione a uno stato ben definito.

Lo scisma tra questi due modi diversi e inconciliabili di intendere la fisica, che si manifesta a livello del dibattito sull'interpretazione della meccanica quantistica tuttora in corso, ha prodotto una situazione fortemente contraddittoria in cui da una parte i fisici, che operano nei centri di ricerca e nei laboratori, continuano a farlo perseguendo quella prospettiva realistica che caratterizza la fisica dal suo stesso costituirsi come scienza, ma dall'altra questa loro posizione genuinamente realistica appare in contraddizione con i fondamenti concettuali ed epistemologici, basati su un'ideologia soggettivistica e strumentalistica, della teoria che utilizzano. Notarrigo è tra i pochissimi scienziati che non parteciparono allo scisma, dato che da una parte non accettò i fondamenti concettuali dell'interpretazione ortodossa, dall'altra non continuò, come i fisici sperimentali di cui parla Popper, a fare ricerca ignorando che la realtà degli oggetti rivelati o registrati dai loro sempre più complessi e sensibili dispositivi di misura viene messa in discussione dalla teoria che utilizzano per descriverli, ma affrontò direttamente il problema con grande spregiudicatezza intellettuale portando non solo argomenti ma anche esperimenti che potessero confermare una interpretazione autenticamente realistica e causale dei fenomeni microfisici.

La posizione di Notarrigo appare ancora più avanzata in un contesto come quello italiano degli anni Settanta in cui la situazione contraddittoria cui allude Popper emerge

¹ Traduzione a cura degli autori.

piuttosto tardivamente, dato che il dibattito sui fondamenti della meccanica quantistica era appena iniziato a causa dell'influenza ideologica della filosofia neoidealista che dominò la cultura italiana per tutta la prima metà del Novecento e anche molto più tardi.

L'atteggiamento della filosofia neoidealista, come è ben noto, è liquidatorio nei confronti delle scienze formali, come la logica matematica che appare a Croce nella sua *Logica come scienza del concetto puro* «cosa risibile [quando venga considerata come scienza del pensiero], veramente degna dei cervelli che l'hanno costruita» (Croce 1920, p. 93), mentre nel caso dei fondamenti della fisica l'atteggiamento appare più complesso e articolato.

La cultura neoidealista, infatti, pur non riconoscendo valore conoscitivo alla scienza, non negava affatto il suo valore pratico, sottolineandone la natura essenzialmente pragmatica e la fisica, alla luce delle fondamentali scoperte agli inizi del Novecento, sembrava soddisfare, anche più di altre scienze empiriche, tali requisiti.

In base a questa prospettiva le ricerche sperimentali sulle applicazioni e l'impatto tecnologico della fisica venivano apprezzate e fortemente incoraggiate, mentre le indagini sui fondamenti concettuali delle teorie fisiche, considerati da Croce come pseudoconcetti privi di universalità e da Gentile come troppo astratti e dogmatici, vennero quasi completamente trascurate dai fisici italiani.

Una importante eccezione è costituita da Giovanni Gentile jr, uno tra i primi professori di fisica teorica in Italia, che si schierò apertamente a favore della interpretazione ortodossa della meccanica quantistica, considerandola come una delle più evidenti conferme della filosofia idealista, nella variante attualistica, secondo la quale l'oggetto fisico non esisterebbe in assenza di un soggetto che lo osserva.

Ettore Majorana invece, come è stato sottolineato in una relazione del primo giorno, vedeva i principi della meccanica quantistica come una confutazione della causalità, sottolineando la necessità di una rifondazione della fisica mediante le metodologie statistiche delle scienze sociali, seguendo un processo opposto rispetto a quello teorizzato e perseguito dalla filosofia scientifica del neopositivismo e non senza una certa confusione tra la natura probabilistica e indeterministica della teoria quantistica, in cui la probabilità ha un carattere primario, con quella statistica delle scienze sociali in cui la probabilità appare un elemento legato alla nostra mancata conoscenza.

Nella sintetica ed efficace biografia di Notarrigo scritta per l'*Enciclopedia Italiana*, Pagano (2013) sottolinea un importante contributo interdisciplinare del fisico catanese che lo portò alla proposta di un modello fisico per lo studio dell'interazione economia-ambiente e, riprendendo il pensiero di Karl Marx e riferendosi ai moderni lavori degli economisti Piero Sraffa e Nicholas Georgescu-Roegen e del fisico-matematico John von Neumann, dimostrò l'impossibilità di una crescita esponenziale dei consumi energetici globali in conseguenza della legge generale termodinamica dell'entropia.

Anche per queste ragioni, Notarrigo si pone quindi in aperto contrasto con la prospettiva idealista, che nega valore conoscitivo alla scienza, abbracciando, come è testimoniato da altri suoi scritti di carattere interdisciplinare, il punto di vista del materialismo dialettico che proprio in nome di questa portata conoscitiva dell'impresa scientifica vedeva nel ripudio dei principi di realtà e di causalità, caratteristico della

fisica contemporanea (e in particolare della meccanica quantistica), una deviazione pericolosa da un cammino che aveva portato a grandi progressi scientifici e materiali.

Già prima dell'avvento della meccanica quantistica, Lenin in *Materialismo ed empiriocriticismo*, esprimeva una forte preoccupazione per la crisi prodotta nella fisica dallo strumentalismo di Mach:

Il legame della fisica moderna o, più esattamente di una determinata scuola di fisica moderna, col machismo e con altre varietà della filosofia idealistica contemporanea, non può essere messo in dubbio (Lenin 1973, p. 246).

L'essenza della crisi della fisica contemporanea consiste nello sconvolgimento delle vecchie leggi e dei principi fondamentali, nel ripudio della realtà obiettiva esistente fuori della coscienza, e cioè nella sostituzione dell'idealismo e dell'agnosticismo al materialismo (Lenin 1973, p. 253).

3. La preistoria del paradosso di EPR (1927)

Il dibattito tra interpretazione realistica e interpretazione ortodossa accompagna la teoria sin dagli anni della sua stessa fondazione, e trova le sue radici più profonde da un lato nella controversia sulla natura della funzione d'onda tra de Broglie e Schrödinger, che la interpretavano come un processo fisico reale che si propagava nello spazio e nel tempo, e Born, Heisenberg e Pauli che la consideravano invece come uno strumento matematico per calcolare probabilità di rivelazione di particelle, e dall'altro nel dibattito tra Einstein e Bohr sul problema della completezza del formalismo quantistico, che non appariva in grado di descrivere come contemporaneamente reali tutte le proprietà che era in grado di prevedere. Già al congresso Solvay del 1927 Einstein presenta un paradosso che anticipava il più celebre argomento discusso nel 1935 con Podolski e Rosen e in cui emergono chiaramente i termini del dibattito tuttora in corso sui fondamenti della meccanica quantistica.

Scopo del paradosso era di dimostrare come la tesi ortodossa secondo cui la meccanica quantistica è una teoria completa dei processi fisici individuali comportasse un serio problema di compatibilità con uno dei postulati fondamentali della teoria della relatività speciale: quello di costanza della velocità della luce, che vieta la propagazione di azioni a distanza istantanee tra due sistemi spazio-temporalmente separati.

Einstein considerò (Fig. 1) a tale scopo una sorgente dalla quale venivano emessi elettroni, che si propagavano attraverso una fenditura tanto stretta da provocare lo *scattering* di queste particelle verso un secondo schermo, posto dietro la fenditura e rivestito con una pellicola fotosensibile, che avrebbe permesso così la loro localizzazione tramite un effetto osservabile. A questo punto Einstein sottolineò che potevano essere assunte due diverse concezioni nell'interpretazione della teoria. Secondo la prima, la descrizione fornita dalla funzione d'onda non rappresenterebbe il singolo micro-oggetto, ma piuttosto un insieme statistico di particelle distribuite nello spazio: in tal modo la MQ andrebbe considerata come una teoria statistica che non è in grado di descrivere i singoli processi elementari, ma un insieme di un'enorme quantità

d'essi. Analogamente il modulo quadrato della funzione d'onda $\psi(r)$ esprimerebbe la densità di probabilità che esista in r qualche particella dell'insieme.

Per la seconda concezione, che corrisponde all'interpretazione ortodossa nella forma di Born e considera la MQ come una teoria completa dei processi fisici individuali, esattamente ciò che verrà messo in discussione pochi anni dopo nel paradosso di EPR, ciascuna particella che si muove attraverso lo schermo è descritta da un pacchetto d'onde che, dopo esser stato diffratto a causa dell'attraversamento della fenditura, arriva in un preciso punto P dello schermo rivelatore. In questo modo il modulo quadro di $\psi(r)$ esprime la densità di probabilità che a un dato istante, una singola particella mostri la sua presenza in r . Questo significa che per la seconda interpretazione fino a quando non avverrà alcun processo di localizzazione, quella singola particella va considerata potenzialmente presente, con probabilità uniformemente costante, sull'intera superficie dello schermo rivelatore. Tuttavia, non appena avviene una sua localizzazione sullo schermo, la probabilità della sua presenza estesa a tutti i punti diversi da A diventa istantaneamente uguale a zero.

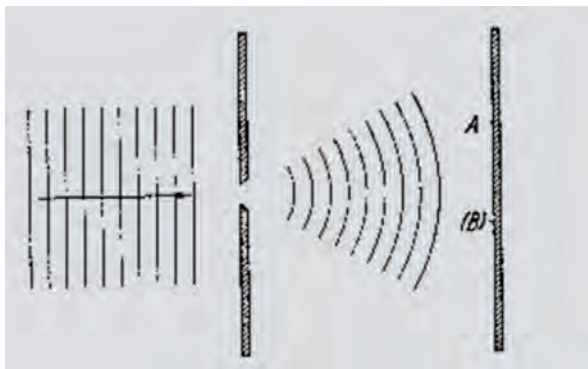


Fig. 1. Primo esperimento proposto da Einstein sul problema della località, 1927

Einstein sottolineò che un simile processo al momento della localizzazione della particella, noto come collasso o riduzione della funzione d'onda, comportasse un meccanismo di azione a distanza incompatibile con il postulato relativistico di costanza della velocità della luce.

Non restava quindi altro da fare che rigettare la tesi della completezza della meccanica quantistica.

4. Il paradosso di EPR (1935)

Vi sono diverse ragioni che rendono l'argomento di EPR fondamentale per il dibattito sul realismo in meccanica quantistica (ed in generale sulle teorie fisiche). Esso infatti stabilisce, in primo luogo, la necessità di basare il realismo delle entità fisiche non su argomenti filosofici a priori, ma su esperimenti e misurazioni. In secondo luogo, fu

proprio a partire dall'argomento di EPR che Schrödinger introdusse il concetto di *correlazione a distanza* (*entanglement*) che rappresenta una delle peculiarità fondamentali del formalismo quantistico.

L'esigenza realistica di EPR si evince con chiarezza dal fatto che l'argomento da loro proposto prende le mosse da un "criterio" di realtà che rappresenta ciò che gli stessi autori riconoscono essere condizione sufficiente (e non necessaria) per asserire la realtà di un qualche elemento:

Se, senza in alcun modo perturbare un sistema, possiamo predire con certezza (vale a dire con probabilità uguale a 1) il valore di una quantità fisica, allora esiste un elemento di realtà fisica corrispondente a quella quantità fisica (Einstein *et al.* 1935, p. 777).²

Questa riformulazione in termini significanti, dal punto di vista empirico, delle tesi del realismo metafisico è avvenuta operando uno spostamento della nozione di realtà dagli oggetti alle loro proprietà prevedibili, facendo propria la critica, prima kantiana e poi logico-empirista, all'esistenza come ulteriore proprietà che può essere attribuita a un oggetto in aggiunta alle sue proprietà empiriche. Esiste quindi una perfetta continuità tra realismo metafisico e realismo empirico, nel senso che quest'ultimo conserva l'idea fondamentale della realtà come indipendenza dalla mente (o coscienza) caratteristico del primo.

Il criterio di realtà di EPR è strettamente deterministico; ciò deriva dal fatto che esso richiede che le proprietà del sistema fisico a cui viene attribuita realtà devono essere prevedibili con certezza per ogni singolo sistema. Così le teorie a variabili nascoste che soddisfacevano la disuguaglianza di Bell erano non soltanto locali (vale a dire, in accordo con la località einsteiniana che vietava l'esistenza di azioni a distanza superluminali), ma anche deterministiche.

Il risultato di Bell venne comunque presto esteso alle teorie probabilistiche locali di variabili nascoste da Clauser e Horne (CH).

5. Notarrigo e i limiti di validità del teorema di Bell

In occasione del centenario della nascita di Niels Bohr che coincideva con il cinquantenario del paradosso di EPR, uno di noi (GT) organizzò insieme a Franco Selleri, con cui aveva – e ha mantenuto fino alla sua recente scomparsa – un intenso rapporto di amicizia e collaborazione scientifica, un congresso nazionale che si svolse a Cesena dall'11 al 13 aprile del 1985. Al congresso parteciparono come *invited speakers* alcuni dei principali studiosi italiani di fondamenti della meccanica quantistica come Enrico Beltrametti, Giancarlo Ghirardi, Francesco Guerra, Marcello Cini, Luigi Galgani, Antonio Pignedoli, Silvio Bergia, Maria Luisa Dalla Chiara, Giuliano Toraldo di Francia, Silvano Tagliagambe, e Augusto Garuccio. Notarrigo, che figurava tra gli invitati, mi scrisse una lettera in cui si dichiarava molto dispiaciuto di non poter

² Traduzione a cura degli autori.

intervenire, ma che avrebbe avuto molto piacere di poter contribuire agli eventuali Atti del convegno. Per cui quando la Kluwer accettò di pubblicare i *Proceedings*,³ fu tra i primi a mandarmi il suo articolo, in cui troviamo espressa la tesi fondamentale che la validità delle diseuguaglianze del tipo di Bell (Bell, CHSH, CH) sia fortemente limitata dall'assenza di un ritardo temporale nella definizione stessa delle coincidenze tra le rivelazioni dei due apparati spaziotemporalmente distanti. E appare fuori discussione il fatto che tale ritardo temporale è assente in tutte le precedenti diseuguaglianze. Tuttavia CH giustificano questa assenza introducendo una ipotesi aggiuntiva sulla *coincidence time window* τ :

The practical criterion for a “coincidence count” always involves a coincidence time window τ : pairs of counts separated in time by less than τ are defined to be coincident. This procedure may appear to make the definition of (the coincidence counting rate) N_{12} (ab) ambiguous, since in general it will depend upon the experimenter’s choice for τ . However, this dependence is usually insensitive to variation in τ which satisfy $s \ll \tau \ll 1/r$ where r is the average count rate at either detectors, and s is the typical time separation of the “true” coincidence pairs. Thus we tacitly require the experimental arrangement be such that this condition obtains (Clauser, Horne 1974, p. 534).

Ora è proprio questa l'ipotesi nascosta (o meglio una delle ipotesi nascoste) che consente di trasformare la diseuguaglianza di Bell in quella sperimentalmente controllabile di CHSH.

Per CH τ dev'essere un compromesso tra il valore ideale, ovvero $\tau = 0$, e il valore pratico sperimentalmente significativo $\tau > 0$, che deve tener conto della durata dell'esperimento, della separazione temporale tra le coppie di particelle, ecc. Per cui se in accordo a tale prospettiva molto ragionevole – ma la ragionevolezza non rappresenta sicuramente la molla del progresso in fisica – vogliamo realizzare un buon esperimento per controllare la diseuguaglianza, dobbiamo scegliere τ , in modo tale che sia soddisfatta la $s \ll \tau \ll 1/r$. Ora questo è proprio quanto non accade nel modello classico di sfere rotanti proposto da Notarrigo nel suo articolo. Egli mette così in luce un aspetto completamente nuovo delle diseuguaglianze di Bell, vale a dire la possibilità di una loro violazione da parte di un modello realistico locale facendo ricorso a un'elettronica scelta ad hoc. Si tratta di un risultato assolutamente non ovvio, e di notevole rilevanza concettuale, dal momento che mostra come le ricerche sul teorema di Bell compiute fino ad allora non tenessero conto delle insidie derivanti dal fatto che la definizione sperimentale delle coincidenze, rivelate nei test delle diseuguaglianze, non è equivalente alla definizione teorica.

La precedente analisi di Notarrigo mette quindi in discussione ciò che Popper molto efficacemente definiva la «pretesa universalità» del teorema di Bell, vale a dire l'ipotesi che

tutte le possibili teorie locali (di emissione e propagazione di particelle in direzioni opposte) portano a previsioni statistiche che differiscono dalle previsioni della meccanica quantistica (Popper 1985, p. 11).⁴

³ URL: <<http://link.springer.com/book/10.1007/978-94-009-2947-0>>.

⁴ Popper qui cita l'ipotesi chiamata da T. Angelidis “the Universality Claim”. Traduzione a cura degli autori.

La dimostrazione del teorema di Bell data da Clauser e Horne era fondata su un'altra ipotesi addizionale, molto meno nascosta di quella individuata da Notarrigo, la cosiddetta ipotesi di fattorizzabilità, che consisteva nella erronea identificazione della nozione fisica di località con il concetto di indipendenza statistica del calcolo delle probabilità come era apparso chiaro dalla discussione di un modello realistico locale in grado di violare questa ipotesi addizionale (Selleri, Tarozzi 1980). In tal modo il più grande filosofo della scienza del Novecento giungeva ad analoghe conclusioni circa i limiti di validità del teorema di Bell:

F. Selleri e G. Tarozzi hanno trovato un modello che soddisfa la definizione di Bell di località ma non la definizione di località di Clauser e Horne (conosciuta anche come "condizione di fattorizzabilità"); questo sembra mostrare ancora una volta che Clauser e Horne non hanno soddisfatto la pretesa di universalità (Popper 1985, p. 23).⁵

In un lavoro successivo Notarrigo ritorna sul problema estendendo la critica alla fattorizzabilità alle dimostrazioni deterministiche del teorema di Bell, che individuando nella fattorizzabilità la nozione critica non dal punto di vista teorico, come era stato fatto da Selleri e da uno di noi, ma da quello sperimentale:

the experiments performed so far in order to test Bell's inequality are not suited to test for determinism and locality, because of an intrinsic impossibility of factorizing the inputs of the required coincidence circuit. On the other hand the factorizability hypothesis is a necessary ingredient for proving the inequality and implies the need for ideal apparatuses which, however, cannot be easily realized in practice without a detailed deterministic model which is, in principle, rejected by the usual interpretation of quantum mechanics (Notarrigo 1988a, p. 693).

La spiegazione fisica della violazione andrebbe ricercata secondo Notarrigo nel fatto che la fattorizzabilità richiede apparati di misura ideali:

Bell's inequality is, of course, a correct mathematical theorem under his hypotheses. Two of such hypotheses (namely, determinism and locality) have been explicitly considered by Bell; a third hypothesis (factorizability) was implicitly advanced, certainly because he was considering ideal measuring apparatuses. The theorem is physically relevant on the theoretical side because it forbids any local classical interpretation of Q.M. which does not take into account the role of the finite resolution of any physical device. However, on the empirical side, Bell's theorem cannot forbid a local classical interpretation of Q.M., when the role of the measuring device is taken into account for a more complete specification, as envisaged by EPR, of the experiments. Of course, our considerations cannot tell how such a complete specification could be achieved but simply tell that the experiments devised for this purpose, at date, cannot forbid it (Notarrigo 1988a, p. 700).

Per ragioni legate alla sua formazione filosofica, Notarrigo ritiene il determinismo un principio irrinunciabile, e d'altra parte proprio su un modello deterministico si fondava

⁵ Traduzione a cura degli autori.

il modello matematico applicato all'economia politica descritto da Pagano nella sua breve biografia sull'*Enciclopedia Italiana*, di cui abbiamo riferito all'inizio.

Questa tanto ricercata, e non solo da Notarrigo, coesistenza tra descrizione quantistica e sua reinterpretazione realistica, locale e causale, apparve tuttavia ben presto illusoria alla luce di successive analisi delle ipotesi utilizzate nella derivazione del paradosso di EPR e del teorema di Bell, dalle quali emerse da una parte la possibilità di dimostrazione del teorema senza ricorso alla ipotesi di completezza del formalismo quantistico, che metteva in luce l'esistenza di una situazione paradossale molto più seria di quella originale, dovuta a un diretto conflitto tra realismo locale e descrizione quantistica basata sull'*entanglement*,⁶ dall'altra quella di generalizzare probabilisticamente il teorema stesso senza far ricorso all'ipotesi di fattorizzabilità, ma soltanto a un principio probabilistico di realtà e a uno stato entangled generalizzato.⁷

6. L'interpretazione realistica della funzione d'onda

Come abbiamo visto, l'argomento di EPR e il dibattito successivo ponevano per un realista, il problema dell'*incompletezza* della meccanica quantistica. La più naturale possibilità di completamento della teoria esistente, peraltro già proposta da de Broglie con la teoria dell'onda pilota allo stesso congresso Solvay del 1927 in cui Einstein presentò il paradosso discusso nel paragrafo 3, andava nella direzione di un'interpretazione realistica della funzione d'onda. Un simile impegno ontologico nei confronti di questo termine teorico del formalismo quantistico corrisponde all'assunzione di una concezione di realismo scientifico, vale a dire di un realismo che non riguarda – come quello empirico – le *proprietà* dei sistemi, ma che si concentra direttamente sulle *entità* stesse. Proprio questo portò a ritenere che il realismo empirico implicasse il realismo scientifico come sua formulazione debole e che entrambi dovessero essere sostenuti contemporaneamente per un'interpretazione realistica della meccanica quantistica coerente ed esaustiva: coerente perché se il formalismo quantistico dà, come mostrano sia la versione deterministica sia quella probabilistica dell'argomento di EPR, una descrizione incompleta, appare inevitabile andare a completare l'interpretazione parziale del suo concetto teorico fondamentale proposta da Born (la quale si limita a identificare il modulo quadro della funzione d'onda con la densità di probabilità di trovare una particella) attribuendo invece proprietà reali specifiche a tale termine teorico; esaustiva perché una teoria in cui si assume la realtà delle proprietà prevedibili dovrà impegnarsi ontologicamente anche sui suoi concetti fondamentali. Appariva quindi assolutamente naturale che l'interpretazione realistica della meccanica quantistica, così come quella di una qualunque altra teoria fisica, dovesse soddisfare entrambi i seguenti requisiti:

⁶ Vedi: Selleri, Tarozzi (1980); de Muynck, van Stekelenbor (1986); Selleri, Tarozzi (1986); de Baere (1988); Afriat, Tarozzi (2006); Calosi *et al.* (2011); Calosi *et al.* (2012).

⁷ Vedi: Selleri, Tarozzi (1983); Tarozzi (1994).

- a) il primo è che i concetti non-logici di una teoria che ne caratterizzano lo specifico contenuto empirico possano essere messi in corrispondenza con, o in altri termini hanno come “controparte”, proprietà o oggetti fisici reali;
- b) il secondo è che l’intera teoria soddisfi un principio generale ed epistemologico di realtà che non si limita esso stesso, né richiede necessariamente, un’interpretazione realistica di questo o quel concetto, ma stabilisce l’indipendenza da ogni processo mentale delle proprietà degli oggetti che possono essere predette senza essere, per questo scopo, costretti ad interagire con l’oggetto a cui queste proprietà sono riferite (Afriat, Tarozzi 2006, p. 130; Tarozzi 2007, pp. 27-28).

In altri termini dunque, esistono due assunzioni distinte e complementari che sono alla base di una interpretazione realista (non metafisica) di una teoria fisica:

- a) l’attribuzione di realtà ai suoi *concetti* fondamentali;
- b) l’assunzione che le *proprietà* fisiche predette da questa teoria sono proprietà oggettive (o, nella versione fenomenistica del realismo, intersoggettive) indipendenti dalla mente o dalla coscienza di un dato osservatore (Afriat, Tarozzi 2006, p. 132).

La teoria dell’onda pilota di de Broglie (1927) sosteneva, in estrema sintesi, che ogni particella è accompagnata e guidata nel suo moto da un’onda classica. Risultano così perfettamente spiegati i fenomeni di diffrazione e autointerferenza delle particelle, ma non il fatto che le evidenze empiriche mostrano che tutta l’energia si trova concentrata nella particella. Il che poneva un serio problema epistemologico, quello dell’assunzione dell’esistenza di un’entità fisica (l’onda pilota, appunto) a cui non era però direttamente associata alcuna quantità fisica osservabile, come accade invece nel caso dell’onda classica, una delle cui principali caratteristiche è proprio quella di trasportare energia.

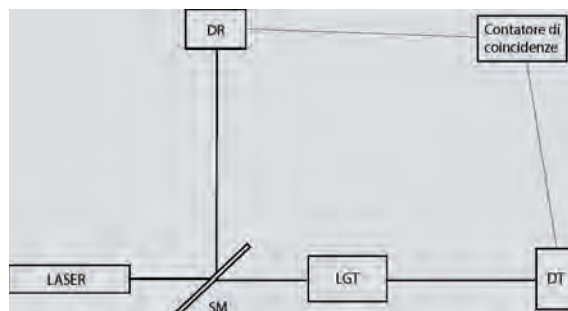


Fig. 2. Esperimento proposto da Selleri

Nel tentativo di individuare una via nuova per superare questo problema, F. Selleri avanzò una soluzione basata sull’ipotesi rivoluzionaria che, nonostante non fosse possibile associarle direttamente una qualche quantità fisica, l’onda quantistica potesse essere messa in relazione con variazioni nella probabilità di transizione di alcuni tipi di sistemi con i quali si trovasse a interagire, e quindi con fenomeni fisicamente osservabili. A partire da questa idea, fin dal 1969 Selleri propose un esperimento,

successivamente perfezionato (Selleri 1984), in cui una sorgente di fotoni (Fig. 2) incide su uno specchio semitrasparente che divide il fascio incidente in un fascio trasmesso e in uno riflesso che si propagano verso due rivelatori (DT e DR, rispettivamente).

Lungo il percorso del fascio trasmesso, tra lo specchio semitrasparente SM e DT, viene posto un tubo di guadagno laser LGT. Nei casi in cui DR, che si trova lungo il fascio riflesso, rivela la presenza di un fotone, nel fascio trasmesso dovrebbe essere presente la sola onda quantistica che, secondo l'ipotesi di Selleri, ha la possibilità di rivelare la sua presenza, generando emissione stimolata di fotoni nel passaggio attraverso LGT: infatti, le molecole contenute in LGT sono tenute in un livello eccitato, che include la lunghezza d'onda dell'onda incidente. Il fotone eventualmente emesso da LGT potrebbe essere rivelato da DT. In questo modo le coincidenze tra le rilevazioni di DT e DR indicherebbero inequivocabilmente la propagazione di un fenomeno ondulatorio privo di energia trasmesso dallo specchio semitrasparente lungo il braccio in cui è posto DT. La propagazione spaziotemporale di questa nuova entità potrebbe essere studiata controllando se le coincidenze tra DT e DR spariscono quando viene inserito un ostacolo nel fascio trasmesso prima di LGT (che impedirebbe in tal modo all'onda di dar vita all'emissione stimolata). Una risposta positiva dell'esperimento avrebbe mostrato, secondo Selleri, che

qualcosa che non trasporta energia o impulso ma che può produrre transizioni di probabilità, si propaga nello spazio e nel tempo (Selleri 1984, p. 116),⁸

confermando così una nuova interpretazione realistica dell'onda quantistica.

Due varianti dell'esperimento di Selleri furono successivamente suggerite da uno di noi: la prima di queste varianti (Tarozzi 1982; 1984) costituiva un controllo sperimentale dell'interpretazione realistica dell'esperimento della doppia fenditura proposta come alternativa all'interpretazione logico quantistica (Selleri, Tarozzi 1978), mentre la seconda provava a mettere in evidenza la coesistenza della nuova proprietà (di generare emissione stimolata di luce) delle onde quantistiche ipotizzata da Selleri, con quella ben nota di produrre auto-interferenza di fotoni, mostrando come entrambe queste proprietà si riferissero al medesimo oggetto e non dovessero essere considerate complementari e quindi anche reciprocamente esclusive nel senso di Bohr (Tarozzi 1985).

Il più importante esperimento per rivelare le proprietà fisiche delle onde quantistiche, è stato proposto da un altro fisico catanese, Vittorio Rapisarda, che come Notarrigo aveva progettato un esperimento molto sofisticato per controllare la validità del teorema di Bell, insieme ad Augusto Garuccio e Jean-Pierre Vigièr (Garuccio *et al.* 1982). Si tratta di un esperimento basato sul fallimento dell'ipotesi di Selleri che l'onda quantistica produca emissione stimolata di fotoni.

È stato mostrato da uno di noi (GT) che le due proposte sperimentali di Selleri e GRV, pur configurandosi come controlli dell'interpretazione della meccanica quantistica a due diversi livelli, non sono in realtà in conflitto e possono essere combinate in un singolo esperimento (Tarozzi 1985), che illustreremo ora brevemente.

⁸ Traduzione a cura degli autori.

L'apparato sperimentale (Fig. 3), consiste di una sorgente incoerente e d'intensità molto bassa di fotoni monocromatici che, incidendo su uno specchio semitrasparente (ST_1), vengono scissi in un fascio trasmesso ed uno riflesso. Entrambi i fasci vengono nuovamente divisi da altri due specchi semitrasparenti (ST_2 e ST_3) in due componenti.

Le componenti trasmesse si propagano verso i fotomoltiplicatori P_1 e P_2 rispettivamente, mentre entrambe le parti riflesse raggiungono il sistema interferenziale SI (composto da due fotomoltiplicatori P_C e P_D situati, rispettivamente, nelle zone di interferenza costruttiva e distruttiva). Lungo il cammino del fascio trasmesso, tra ST_1 e ST_2 , viene collocato un amplificatore laser AL.

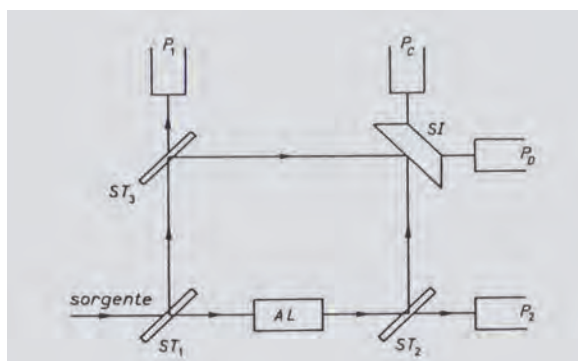


Fig. 3. Esperimento proposto da Rapisarda

Con un simile dispositivo possiamo, in primo luogo, controllare l'ipotesi dell'emissione stimolata di Sella, verificando l'esistenza di coincidenze non casuali tra le rivelazioni di P_1 e P_2 , una volta che ST_2 e ST_3 sono stati rimossi. La constatazione di tali coincidenze dimostrerebbe infatti che l'onda relativa alla particella che è stata rilevata da P_1 è stata trasmessa da ST_1 producendo poi l'emissione di una seconda particella, attraversando AL, rilevata da P_2 .

Ora, indipendentemente dal risultato trovato, siamo comunque in grado di controllare sperimentalmente il postulato di riduzione della funzione d'onda. In primo luogo, infatti, supponiamo che le coincidenze non casuali tra le rivelazioni di P_1 e P_2 non vengano trovate, e che, dunque, l'onda quantistica non provochi l'emissione stimolata di fotoni. Questo riporterebbe la situazione all'ipotesi di base di Garuccio, Rapisarda e Vigier, del 1982, secondo la quale AL si limiterebbe a duplicare le particelle che lo attraversano e che saranno, quindi, nei casi interessanti, rilevate da P_2 e da SI con probabilità $1/3$. In particolare, secondo i tre autori, la possibilità di isolare, nel fascio riflesso da ST_1 e ST_2 , l'onda quantistica priva della relativa particella, permetterebbe di avere interferenza in SI, e quindi, coincidenze tra P_2 e P_C (regione di interferenza costruttiva). Tale risultato sarebbe in contraddizione con le previsioni quantistiche basate sul postulato di riduzione del pacchetto d'onda che imporrebbero le coincidenze tra P_2 e P_D (e non P_C) a causa della scomparsa dell'interferenza in conseguenza della possibilità di stabilire il percorso seguito dalla particella nell'apparato.

Supponiamo ora di trovare coincidenze tra P_1 e P_2 , confermando l'ipotesi dell'emissione stimolata. In questo caso la rivelazione delle coincidenze tra P_2 e P_C non sarebbe più in contraddizione con il postulato di riduzione dal momento che non saremmo ora in grado di stabilire se il fotone rilevato da P_2 è una conseguenza della duplicazione della particella proveniente da ST_1 o dall'emissione stimolata provocata dalla sola onda quantistica nell'attraversare AL. Tuttavia, la rilevazione della particella in P_1 consente di stabilire che un'onda quantistica si è propagata da ST_3 a SI. Supponiamo ora di trovare coincidenze tra P_1 e P_2 , confermando l'ipotesi dell'emissione stimolata. In questo caso la rivelazione delle coincidenze tra P_2 e P_C non sarebbe più in contraddizione con il postulato di riduzione dal momento che non saremmo ora in grado di stabilire se il fotone rilevato da P_2 è una conseguenza della duplicazione della particella proveniente da ST_1 o dall'emissione stimolata provocata dalla sola onda quantistica nell'attraversare AL. Tuttavia, la rilevazione della particella in P_1 consente di stabilire che un'onda quantistica si è propagata da ST_3 a SI.

La novità concettuale dell'esperimento di GRV appare quella di stare a metà strada tra gli esperimenti che, come quello di Selleri e le sue varianti, controllavano l'interpretazione filosofica di un termine teorico e sono privi di conseguenze nei confronti della validità dell'attuale formalismo quantistico, e gli esperimenti sul teorema di Bell, che controllano invece, come abbiamo visto, la validità della descrizione quantistica basata sugli stati non fattorizzabili (entangled), logicamente implicati dal principio di sovrapposizione, uno dei due principi fondamentali su cui è stato costruito il formalismo stesso.

Ci troveremmo quindi di fronte ad un livello intermedio di controllabilità della teoria quantistica: una falsificazione sperimentale del postulato di riduzione non comporterebbe soltanto l'esigenza di un abbandono dell'interpretazione di Copenhagen, implicata da una eventuale rilevazione delle proprietà dell'onda quantistica, ma anche una modifica della formulazione assiomatica della teoria, che, a differenza di quanto accadrebbe nel caso di una conferma sperimentale delle disuguaglianze di Bell, consentirebbe tuttavia di conservare i principi matematici basilari dell'attuale formalismo.

Gli esperimenti finora realizzati tuttavia, non sono riusciti né a confermare l'interpretazione realistica della funzione d'onda sostenuta da Selleri, né tantomeno a confutare il postulato di riduzione della funzione d'onda caratteristico della interpretazione ortodossa (Hardy 1992; Zou *et al.* 1992), analogamente a quanto è accaduto nel caso degli esperimenti che hanno mostrato le violazioni della disuguaglianza di Bell in accordo alle previsioni della meccanica quantistica.

7. Conclusioni

La ricerca sulle situazioni paradossali della meccanica quantistica continua senza sosta. Recentemente Aharonov *et al.* (2013) hanno proposto un esperimento, che poi è stato effettivamente realizzato Denkmayr *et al.* (2014), il quale porta nuova acqua al mulino di chi crede nella realtà delle onde quantistiche.

A grandi linee la questione può venir rappresentata nella maniera seguente. Si consideri un fotone polarizzato in senso orizzontale H, ma la cui posizione è in

sovrapposizione su due luoghi, diciamo sinistra L e destra R. Si fanno interferire le due parti LH e RH. Dopo si mette a punto un apparato sperimentale in grado di post-selezionare o LH o RV, dove V sta per verticale. Questo è tecnicamente possibile. Siamo sicuri che i fotoni, che si trovano in questo stato, sono passati da sinistra L, perché se fossero del tipo RH, sarebbero ortogonali alla nostra post-selezione che comprende solo RV. Ciò malgrado se mettiamo un misuratore di polarizzazione sul ramo destro dell'esperimento è possibile che rilevi qualcosa, cioè che trovi una certa polarizzazione del fotone, che, senza entrare nei dettagli, chiamiamo σ_z . Questo è previsto dalla meccanica quantistica e confermato sperimentalmente.

Per rappresentare in maniera figurativa questa strana situazione fisica, si è utilizzata la metafora del gatto del Cheshire di *Alice nel paese delle meraviglie*. In un certo senso, infatti, il gatto – il fotone – è da una parte, mentre il suo ghigno – la polarizzazione σ_z è dall'altra.

Tale situazione paradossale ha come al solito una soluzione ortodossa, che suona più o meno così. Di fatto, se noi misuriamo contemporaneamente l'osservabile posizione a destra e σ_z , oppure la posizione a sinistra e σ_z , anche se le due osservabili commutano, si disturbano reciprocamente, per cui sul singolo fotone la separazione del gatto dal suo ghigno è impossibile.

Purtroppo per gli ortodossi, però, oggi è possibile quella che si chiama *misurazione debole*, in cui il disturbo è, per così dire, sotto controllo. Utilizzando in modo intelligente dal punto di vista teorico questo tipo di apparati – cosa che è stata effettivamente realizzata – si può aggirare la situazione e ottenere nuovamente la separazione fra il gatto e il ghigno.

È difficile negare, almeno di primo acchito, che la presenza del ghigno là dove non c'è il gatto fa pensare alla necessità che qualcosa lo sostenga ontologicamente. Forse la famigerata onda quantistica?

Questo nuovo e filosoficamente interessante risultato meriterebbe una ben più ampia discussione, tuttavia esso mostra che le intuizioni realistiche di fisici attenti alle questioni di fondamenti, come Selleri e Notarrigo, continuano a suggerire feconde ricerche.

Bibliografia

- Afriat A., Tarozzi G. (2006). *Can Nothing Cause Nonlocal Quantum Jumps?*, in Bassi A., Dürr D., Weber T., Zanghì N. (eds.). *Quantum Mechanics. Are There Quantum Jumps? On the Present Status of Quantum Mechanics*. New York: American Institute of Physics, pp. 3-7.
- Aharonov Y., Popescu S., Rohrlich D., Skrzypczyk P. (2013). "Quantum Cheshire Cats". *New Journal of Physics*. 15, p. 113015.
- Alai M., Auletta G., Tarozzi G. (2009). "Einstein's Local Realism and the Realistic Interpretation of the Wave Function", in Alunni C., Castellana M., Ria D., Rossi A. (eds.) *Albert Einstein et Herman Weyl (1955-2005). Questions épistémologiques ouvertes, Atti del Convegno Internazionale* (Presicce, 22-23 aprile 2005). Manduria: Barbieri Selvaggi Editore, pp. 27-49.

- Auletta G., Tarozzi G. (2004a). "Wave-like Correlations versus Path Detection. Another Form of Complementarity". *Foundations of Physics Letters*, 17, pp. 89-95.
- Auletta G., Tarozzi G. (2004b). "On the Reality of Quantum Waves". *Foundations of Physics*, 34, pp. 1675-1694.
- Bell J.S. (1964). "On Einstein Podolsky Rosen Paradox". *Physics I*, pp. 195-200.
- Bell J.S. (1966). "On the Problem of Hidden Variable in Quantum Mechanics". *Review of Modern Physics*, 38 (3), pp. 447-452.
- Bohm D. (1951). *Quantum Theory*. New York: Prentice-Hall.
- Calosi C., Fano V., Tarozzi G. (2011). "Quantum Ontology and Extensional Mereology". *Foundations of Physics*, 41, pp. 1740-1755.
- Calosi C., Fano V., Tarozzi G. (2012). "Holism as an empirically meaningful metaphysical hypothesis". *Epistemologia*, 35, pp. 221-233.
- Clauser J.F., Horne M.A. (1974). "Experimental consequences of objective local theories". *Physical Review D*, 10, pp. 526-535.
- Croce B. (1920). *Logica come scienza del concetto puro*. Bari: Laterza, 4° ed.
- de Baere W. (1988). "Some further comments on the Selleri-Tarozzi proof of the nonlocality of quantum mechanics". *Physics Letters A*, 131, pp. 13-21.
- de Broglie L. (1927). "La structure de la matière et du rayonnement et la mécanique ondulatoire". *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 184, pp. 273-274.
- de Muynck W.M., van Stekelenbor J.T.P.M (1986). "Discussion of a proof, given by Selleri and Tarozzi, of the nonlocality of quantum mechanics". *Physics Letters A*, 116, pp. 420-422.
- Denkmayr T., Geppert H., Sponar S., Lemmel H., Matzkin A., Tollaksen J., Hasegawa Y. (2014). "Observation of a quantum Cheshire Cat in a matter-wave interferometer experiment". *Nature Communications*, [online] URL: <<http://www.nature.com/articles/ncomms5492>>.
- Einstein A., Podolsky B., Rosen N. (1935). "Can Quantum-Mechanical Description of Reality Be Considered Complete?". *Physical Review* 47, pp. 777-780.
- Faraci G., Gutkowski D., Notarrigo S., Pennisi A.R. (1974). "An experimental test of EPR paradox". *Lettere al Nuovo Cimento*, 9, pp. 607-611.
- Faraci G., Gutkowski D., Notarrigo S., Pennisi A.R. (1974). "Angular correlation of scattered annihilation photons, to test the possibility of hidden variables in quantum theory". *Applied Physics*, 5, pp. 63-65.
- Faraci G., Notarrigo S., Pennisi A.R. (1979). "Simultaneous counting of true and random events in a four-fold coincidence system using two time-to-pulse-height converters". *Nuclear Instruments and Methods* 164, pp. 157-162.
- Garuccio A., Rapisarda V., Vigier J.-P. (1982). "New experimental set-up for the detection of de Broglie's waves". *Physics Letters A*, 90, pp. 17-19.
- Hardy L. (1992). "On the Existence of Empty Waves in Quantum Theory". *Physics Letters A*, 167, pp. 11-16.
- Lenin V.I. (1973). *Materialismo ed empiriocriticismo*. Roma: Editori Riuniti.
- Notarrigo S. (1984). "A Newtonian Separable Model Which Violates Bell's Inequality". *Nuovo Cimento*, 83B, pp. 173-187.

- Notarrigo S. (1988a). *On the Physical Meaning of Bell's Inequality and the Related Experimental Tests*, in *Problems in Quantum Physics, Gdańsk '87: Recent and Future Experiments and Interpretations* (Gdańsk, Poland, 21-25 September 1987). Kostro L., Posiewnik A., Pykacz J., Zukowski M. (eds.). Singapore: World Scientific, pp. 693-701.
- Notarrigo S. (1988b). *Determinism, Separability and Quantum Mechanics*, in Tarozzi G., van der Merwe A. (eds.), *The Nature of Quantum Paradoxes. Italian Studies in the Foundations and Philosophy of Modern Physics*. Dordrecht: Kluwer, pp. 207-214.
- Pagano A. (2013). *Salvatore Notarrigo*, in *Dizionario Biografico degli Italiani*, vol. 78, Roma: Istituto della Enciclopedia italiana. [online] URL: <[http://www.treccani.it/enciclopedia/salvatore-notarrigo_\(Dizionario-Biografico\)/>](http://www.treccani.it/enciclopedia/salvatore-notarrigo_(Dizionario-Biografico)/>) [data di accesso 10/07/2016].
- Popper K.R. (1985). *Realism in Quantum Mechanics and a New Version of the EPR Experiment*, in Tarozzi G., van der Merwe A. (eds.), *Open Questions in Quantum Physics*. Dordrecht: Reidel, pp. 3-25.
- Popper K.R. (2012). *La teoria dei quanti e lo scisma nella fisica*. Milano: Il Saggiatore.
- Selleri F. (1969). "On the Wave Function of Quantum Mechanics". *Lettere al Nuovo Cimento*, 1, pp. 908-910.
- Selleri F. (1984). *Gespensfelder*, in Diner S., Fargue D., Lochak G., Selleri F. (eds.) *The Wave-Particle Dualism*. Dordrecht: Reidel, pp. 101-128.
- Selleri F., Tarozzi G. (1978). "Is Nondistributivity for Microsystems Empirically Founded?". *Nuovo Cimento* 43B, pp. 31-40.
- Selleri F., Tarozzi G. (1980). "Is Clauser and Horne's factorability a necessary requirement for a probabilistic local theory?". *Lettere al Nuovo Cimento*, 29, pp. 533-536.
- Selleri F., Tarozzi G. (1981). "Quantum Mechanics, Reality and Separability". *Rivista del Nuovo Cimento*, 4 (2), pp. 1-53.
- Selleri F., Tarozzi G. (1983). "A Probabilistic Generalization of the Concept of Physical Reality". *Speculations in Science and Philosophy*, 6, pp. 55-64.
- Selleri F., Tarozzi G. (1986). "Why Quantum Mechanics is Incompatible with Einstein Locality". *Physics Letters A* 119, pp. 101-104.
- Tarozzi G. (1979). "The Conceptual Development of the E.P.R. Argument". *Memorie dell'Accademia Nazionale di Scienze, Lettere e Arti di Modena XXI*, pp. 353-373.
- Tarozzi G. (1982). "Two Proposal for Testing Physical Properties of Quantum Waves". *Lettere al Nuovo Cimento*, 35 (2), pp. 553-559.
- Tarozzi G. (1984). "From Ghost to Real Waves: a Proposed Solution to the Wave-Particle Dilemma", in Diner S., Fargue D., Lochak G., Selleri F. (eds.), *The Wave-Particle Dualism*. Dordrecht: Reidel, pp. 139-148.
- Tarozzi G. (1985). "Experimental Tests of the Properties of the Quantum Mechanical Wave-Function". *Lettere al Nuovo Cimento*, 42, pp. 439-442.
- Tarozzi G. (1994). "On the Implications of Generalised EPR States for the Completeness and Consistency of Quantum Theory", in Accardi L. (ed.), *The Interpretation of Quantum Theory. Where Do We Stand?, Proceedings of New York Conference on*

- The Interpretation of Quantum Mechanics*. Roma: Istituto dell'Enciclopedia Italiana, pp. 257-264.
- Tarozzi G. (2007). "Principi filosofici e principi della fisica. La riapertura delle controversie metafisiche nei fondamenti della meccanica quantistica", in Pera M. Tarozzi G., Fleishmann M., Del Giudice L. (a cura di), *Lezioni in onore di Giuliano Preparata*. Napoli: Bibliopolis, pp. 19-39.
- Tarozzi G., van der Merwe A. (eds.) (1985). *Open Questions in Quantum Physics*. Dordrecht: Reidel.
- Zou X.Y., Grayson T.P., Wang T.P., Mandel L. (1992). "Can an Empty de Broglie Pilot Wave Induce Coherence?". *Physical Review Letters*, 68, pp. 3667-3669.