

## MUTAMENTI NEI RAPPORTI TRA ESPERIMENTI E TEORIE DALLA FISICA CLASSICA ALLA MECCANICA QUANTISTICA

Alla fine dell'800 il quadro dei rapporti tra esperimenti e teorie nella fisica presenta nuove articolazioni, che incrinano la compattezza degli assetti tradizionali. In particolare, sembra ora venir meno quella supposta corrispondenza biunivoca, sia pure più o meno esplicitamente mediata da ben precisi modelli interpretativi precostituiti della realtà fisica, tra fenomeni ed entità teorico-matematiche che aveva alimentato la speranza di una rappresentazione definitiva del mondo fisico. Questa sarebbe stata infatti - così almeno si pretendeva - completamente convalidata dai dati sperimentali, sia pure appunto - come si diceva - attraverso l'imposizione al mondo fisico di ben precise interpretazioni preventive dei dati empirici stessi, che certamente risultavano ingabbiati in quelle interpretazioni, ma con la convinzione che quella forzatura avrebbe dato ottimi risultati, cioè a dire una piena corrispondenza finale tra teorie matematiche e fenomeni[742]. E si badi bene che tale forzatura, come qui la chiamo, non riguarda solo quelle posizioni che esplicitamente affermano l'esigenza di introdurre modelli della realtà ed interpretazioni intese per trattare i fenomeni studiati dalla fisica al fine di correlarli con le leggi matematiche e le teorie formalizzate, ma è invece comune anche a quelle altre posizioni che, come l'energetica di Ostwald e Helm, l'empiriocriticismo di Mach e il fenomenismo matematico di Kirchhoff, pretendevano di fare a meno il più possibile della mediazione di modelli espliciti e di connettere invece direttamente leggi matematiche e dati empirici. In realtà anche nel loro caso i fenomeni appaiono, seppure surrettiziamente, senza cioè dichiararlo, ingabbiati in ben precise forme e modi di rappresentazione (di cui evidentemente non si riesce a fare a meno), che vanno ben aldilà della semplice registrazione empirica e generalizzazione matematica automatica e neutrale dei dati. La loro stessa comune esigenza di unità e di unificazione, sia pure nel rifiuto esplicito di principi a priori trascendentali o ontologici, generava comunque uno sforzo di tipo riduzionistico, di ridurre cioè a supposti elementi semplici e fondamentali della conoscenza fisica lo studio dei fenomeni, e tradisce così in realtà una tendenza a privilegiare un modo di rappresentazione rispetto ad altri possibili, ben oltre la semplice registrazione passiva dei dati e la loro mera correlazione formale, in quanto esso sia ritenuto appunto più adeguato degli altri al compito di compattare dati empirici e forme matematiche, oltretutto attraverso una critica senza esclusione di colpi rivolta a tutti gli altri possibili modi di rappresentazione rivali, definiti senza mezzi termini scolastici e dogmatici[743]. D'altra parte, a loro volta, questi altri modi di rappresentazione, non fenomenologici come quelli che pretendevano appunto di restringere la base di unificazione della fisica a puri elementi empirici e schemi matematici non interpretati fisicamente ma in termini di mera economia di pensiero, si contrapponevano a questi perchè ritenuti incapaci di fornire una reale unità, e non altrettanto produttivi sul piano della stessa, pur tanto conclamata, conoscenza sperimentale, meno capaci cioè di suggerire nuovi esperimenti. In particolare, le concezioni di tipo atomistico della materia (di Maxwell, Boltzmann, Kelvin, J. J. Thomson) si ritenevano assai più feconde di quelle fenomenologiche, in quanto presumevano di poter ricavare previsioni inedite di tipo teorico e anche sperimentale da assunzioni modellistiche esplicite circa la costituzione intima della materia, che consentissero di applicare analogicamente ai fenomeni schemi matematici assai potenti di tipo deterministico, pretendendo addirittura appunto di porre questi ultimi, per loro tramite, in stretta corrispondenza biunivoca con i fenomeni[744].

Ebbene, sempre nell'ambito della fisica classica, ad un certo punto quest'impostazione del rapporto teoria-esperienza incontro ostacoli e difficoltà assai seri agli occhi degli atomisti più convinti. Maxwell dichiarò infatti esplicitamente ad un certo punto che i sostenitori dell'atomismo, per perseguire il loro punto di vista, dovevano rinunciare a concepire il rapporto teoria-esperimento come tale che l'esperimento mostri direttamente l'evidenza della costituzione atomica della materia in termini di stretta derivabilità dei fenomeni dall'ipotesi dell'esistenza di atomi individuali e dalla loro

storia deterministicamente ricostruita mediante leggi matematiche rigorose secondo il metodo, da lui detto appunto "storico", inaugurato da Newton. Al massimo gli esperimenti, incapaci di sondare la realtà fino al punto di evidenziare la realtà individuale degli atomi, possono rivelare solo l'esistenza di loro aggregati statistici attraverso i loro effetti fisici, la corrispondenza teoria-esperimenti cessando pertanto di essere perfettamente biunivoca, cioè uno a uno, sia pure per il tramite di modelli, ma semmai plurivoca, nel senso che ad un esperimento singolo corrispondono molte entità teoriche (atomi, molecole o particelle subatomiche) aggregate tra loro[745]. Inizialmente invece, sempre nella seconda metà dell'800, gli esperimenti che cercavano di gettare luce sul mondo atomico miravano a rivelare anche aspetti individuali della struttura interna degli atomi, riportando ad esempio nella nascente spettroscopia caratteristiche visibili degli spettri a moti vibratorii delle molecole individuali[746]. Al contrario, nei grandi esperimenti a partire dal 1895 si trattava per lo più di effetti aggregati, essendo in essi l'evidenza empirica correlata, sempre attraverso modelli, a caratteristiche o effetti collettivi piuttosto che individuali, in una corrispondenza appunto uno-molti e non uno-uno tra eventi sperimentali ed enti teorici. Passare allo studio della struttura specifica, nell'assunzione che si tratti di una struttura matematica deterministica secondo le leggi della fisica classica, degli enti individuali, comportava dunque, a partire dalle evidenze empiriche, un lavoro di interpretazione, essenzialmente teorico e dotato di un margine di forte arbitrarietà, della supposta realtà microscopica, che si distanziava appunto nettamente dall'immediatezza sperimentale macroscopica rivelata dagli apparati di medie usati in quegli esperimenti, un'immediatezza solo teoricamente ed ipoteticamente e non immediatamente interpretabile come effetto cumulativo di enormi quantità di entità atomiche individuali. Gli apparati di medie funzionavano infatti come rivelatori di spostamenti di masse visibili, macroscopicamente evidenti e quindi risultanti da grandi aggregati di individui atomici, senza rivelare i singoli individui stessi, le entità teoriche primarie, sì presupposte ma non certo dimostrate nella messa a punto ed esecuzione degli esperimenti[747].

Ebbene, una delle caratteristiche più importanti della nuova fisica quantistica che, più ancora della stessa relatività einsteiniana e ancor più della stessa concezione di Einstein, essenzialmente statistica, della realtà dei quanti, la differenzia immediatamente dalla tradizione classica della fisica di fine ottocento, e da tale sua interpretazione, essenzialmente teorico-modellistica del rapporto teoria-esperimento, consiste proprio nel tentativo di ristabilire un nesso più diretto tra teorie ed esperimenti, tra entità teoriche individuali ed evidenze empiriche[748], sia pure rinunciando al contempo all'unità della spiegazione fisica, e ammettendo ormai definitivamente la caduta di quella stessa corrispondenza biunivoca tra esse che aveva contrassegnato la stessa tradizione classica almeno fino a Maxwell. Questa era stata invece, anche dopo Maxwell, comunque sempre unitaria, al limite - come abbiamo visto - completando teoricamente gli iati tra individui teorici e aggregati sperimentali interpretando appunto i fatti sperimentali come aggregati collettivi dei primi, in un rapporto uno-molti tra esperimenti ed enti teorici, e concependo quindi gli apparati sperimentali per lo più come apparati di medie. La nuova fisica dei quanti invece, diversamente dall'approccio atomistico classico che introduceva ipotesi sugli enti teorici individuali - ipotesi destinate, come si è visto, a restare irriducibili all'esperienza -, cercava di trovare subito riscontri diretti nell'esperienza alle sue entità teoriche individuali, per quanto ipotetiche esse fossero, ma appunto a costo di rinunciare ad una definizione univoca e semanticamente completa di quelle stesse entità teoriche individuali, in un rapporto di corrispondenza cioè non più univoco ma, per quanto stretto, direi equivoco con i fatti sperimentali. Per la verità, le premesse per un riavvicinamento in termini nuovi, non più univoci, tra teoria ed esperimento, erano state già poste nella fase precedente di sviluppo della fisica a fine ottocento, che peraltro, come si è visto, aveva già evidenziato la fine della corrispondenza biunivoca tradizionalmente intesa tra di essi nel quadro della fisica classica. Si tratta della scoperta della radioattività verificatasi anch'essa nel 1895. Nei fenomeni radioattivi non contava in effetti tanto l'aspetto statistico, di media, macroscopico, anche se questo ovviamente risultava dall'accumulo di grandi numeri di eventi radioattivi microfisici individuali, quanto piuttosto - si pensi a Rutherford - la risposta macroscopica, osservabile eventualmente attraverso un apparato amplificatore (come poi

soprattutto i contatori Geiger e le camere a nebbia), al passaggio di raggi o particelle individuali, anche se fin dall'inizio si assumeva con tutta evidenza il numero di possibili risposte al passaggio di tali entità individuali come in principio infinito o comunque molto grande[749]. Si assumeva infatti la traiettoria della particella o del raggio come del tutto arbitraria, eppure capace, nonostante la sua non prevedibilità, di produrre quà e là effetti individuali particolari ben localizzati, come ad esempio perdite o accrescimenti di massa-energia delle sorgenti o dei bersagli, o attivazione di relais elettrici o effetti ottici comunque macroscopicamente rilevabili mediante apparati amplificatori. In definitiva, come divenne in seguito sempre più chiaro, pur restando indeterminata la storia, e dunque l'identità individuale complessiva dell'oggetto quantistico, tuttavia si evidenziavano sul piano sperimentale, macroscopico, particolari proprietà empiriche attribuibili direttamente all'oggetto individuale, in conseguenza dell'impatto, di per sè imprevedibile, dell'oggetto stesso con l'apparato sperimentale macroscopico. Inizialmente in realtà, l'approccio pragmatico ingenuo di un Millikan era interessato solo all'effetto sperimentale in senso stretto, interpretato nei termini teorici più ovvi, in quanto evidenziava proprietà misurabili, come il rapporto tra la carica e la massa dell'elettrone, concepito come una pallina di biliardo o, nei raggi cosmici, l'energia delle particelle penetranti ancora classicamente intesi come individui, senza approfondire affatto il problema cruciale della dinamica dell'impatto[750], che invece la meccanica quantistica affrontò nei termini di un rapporto nuovo, non più univoco benchè stretto, tra le entità teoriche e i fenomeni. Nella nuova meccanica quantistica i calcoli matematici non avevano infatti solo, come nell'approccio pragmatico ingenuo iniziale, la funzione di fornire numeri agli sperimentali da confrontare con i dati, senza affatto toccare l'immagine classica dei fenomeni, ma servivano appunto ad approfondire il nuovo rapporto tra le entità teoriche e i fenomeni, secondo modalità diverse dalla fisica classica[751]. Il fenomeno dell'impatto, evidenziato macroscopicamente attraverso precise misure del momento della particella incidente sull'apparato, comportava in questa nuova struttura teorica un'ambiguità nella definizione della posizione della stessa particella, che quindi assumeva non uno ma una pluralità di valori possibili in quanto entità teorica, con conseguente distribuzione statistica degli stati finali esatti di essa a seguito dell'impatto stesso. L'entità teorica individuale di cui precise proprietà empiriche venivano rilevate sperimentalmente risultava quindi non univocamente determinata in relazione ad altre proprietà, in funzione delle prime. In termini matematici, ciò significava applicare tecniche di approssimazione allo studio dei processi atomici che incorporavano le relazioni di indeterminazione di Heisenberg stabilendo una corrispondenza tra singole evidenze sperimentali rilevate e immagini teoriche dei processi stessi al tempo stesso precisa ed ambigua, precisa nel rilevare proprietà particolari degli individui teorici e ambigua nel renderne così invece indeterminate altre, con l'impossibilità di far coincidere queste immagini indeterminate con le successive misure esatte, ma imprevedibili nel loro esito, sebbene, una volta effettuate, a loro volta traducibili in strutture matematiche precise e tuttavia implicanti sempre, a loro volta, indeterminazione delle proprietà ad esse complementari[752].

Non è affatto strano a questo punto se tale rapporto nuovo teoria-esperimento, non più univoco ma, appunto, ambiguo, per quanto stretto, generasse una serie di interpretazioni e modellizzazioni diverse, che solo sommariamente vengono unificate nella cosiddetta interpretazione ortodossa o di "Copenaghen" della meccanica quantistica[753]. Vi è anzitutto l'interpretazione di Bohr nei termini di un'irriducibile complementarità delle proprietà degli oggetti quantistici, sulla base della quale non possiamo non rappresentarci i fenomeni in termini classici, cioè di particelle o onde a seconda degli esperimenti che effettuiamo, ma in modo mutuamente esclusivo, per cui gli aspetti corpuscolari subentrano quando quelli ondulatori svaniscono e viceversa. Siamo di fronte ad un'evidente perdita di continuità nella definizione degli oggetti che viene attribuita demiurgicamente agli strumenti scelti ed usati per effettuare gli esperimenti, sulla cui base la realtà aldilà dei fenomeni osservati assume positivamente una certa evanescenza, ma secondo regole linguistiche e limitazioni precise dei modi di rappresentazione a quelli classici, purtuttavia operanti diversamente che nella fisica classica, e cioè in modo complementare[754]. Diversa è in realtà l'interpretazione proposta dallo stesso

Heisenberg, nonostante l'equivalenza pragmatica con quella di Bohr. Qui l'ambiguità quantistica, la corrispondenza stretta ma ambigua tra esperimenti e struttura matematica viene ricostruita secondo una diversa modellizzazione o modo di rappresentazione: le proprietà che risultano indeterminate sulla base del suo principio di incertezza, una volta determinate sperimentalmente quelle ad esse complementari, sono in realtà in uno stato di potenzialità, di tendenza dinamica ad essere (come le "potentiae" aristoteliche e come poi le "propensities" di Popper) anche se non ancora sono, e tuttavia arriveranno ad essere, una volta realizzate le opportune circostanze sperimentali. L'ambiguità della situazione viene quindi ricondotta alla sfera della potenzialità come categoria ontologica più debole e più generale dell'effettualità empirica e distinta da essa [755]. Diversa ancora appare quindi l'interpretazione di Born dell'ambiguità quantistica, da lui vista nei termini di un'interpretazione statistica che va rigorosamente distinta da quella di Einstein. Mentre infatti questa rientra nell'interpretazione della statistica come ignoranza, che lascia quindi sussistere una corrispondenza univoca tra entità teoriche non note in tutti i loro dettagli individuali, ma nondimeno in sé esattamente definite, e dati sperimentali parziali, quali sono quelli trattati dalla meccanica quantistica, in quanto siano ritenuti classicamente relativi solo a collettività statistiche di eventi e non ad eventi singoli, l'interpretazione di Born assumeva come irriducibile in linea di principio il dato statistico a definizioni di stato più esatte, in quanto espressione di un'impossibilità di principio di una più esatta definizione di posizione e momento di un sistema individuale, nei termini di uno sparpagliamento irreparabile della funzione d'onda rappresentante lo stato del sistema, con conseguente imprevedibilità, definita statisticamente, dei valori esatti assunti, in funzione di certe misure di proprietà, dalle proprietà ad esse complementari. In questo caso l'entità teorica funzione d'onda non è interpretabile né classicamente come oggetto costituito da una collettività rivelata dagli esperimenti e in corrispondenza univoca con essi, e neppure come una pura potenzialità diversa dall'effettualità delle singole misure che l'attualizzano, ma è una struttura formale che delimita il range, non ulteriormente definibile, di risultati sperimentali individuali possibili, mentre la particella, quale realtà unicamente osservabile, presenta per questo un'irreparabile incompletezza di definizione [756]. Un'ulteriore diversa interpretazione "ortodossa" del rapporto - ambiguo - teoria-esperimento nell'ambito della meccanica quantistica, che assume come insuperabile la complementarità delle proprietà dei microoggetti, è quella, dovuta inizialmente a Pauli e poi soprattutto a Jordan, secondo cui la teoria si limita solo a correlare numeri sperimentali senza fornire alcuna immagine né di tipo pittoriale intuitivo né di tipo matematico probabilistico di tali correlazioni, non sostiene cioè alcun modello sostanziale o formale delle correlazioni, ma si limita ad esporle in termini di pure correlazioni matematiche di dati sperimentali definiti operativamente. Ogni pretesa interpretativa non farebbe che generare inconsistenze e paradossi, e sarebbe quindi da evitare accuratamente [757]. Hume avrebbe detto: è sofisticeria e illusione. Ma è davvero così? Nel momento in cui ci si pone il problema della previsione, sia pure meramente statistica, o meglio probabilistica, non ci si può fermare a registrare dati sperimentali non interpretati e le correlazioni puramente matematiche tra loro che ne risultano. Ci si pone il problema dei limiti e della portata di tale prevedibilità, anzitutto di quale ne sia l'affidabilità e il fondamento - il problema cioè, sia pure in termini critici e problematici, della realtà [758]. Tuttavia, se questa stessa realtà rivelata dagli esperimenti è presa alla lettera in tutti i suoi aspetti, essa genera, com'è noto, immagini controintuitive, paradossali, e quell'ambiguità costitutiva della meccanica quantistica di cui si parlava si traduce quindi in autentico, insuperabile disagio intellettuale.

In particolare, com'è noto, prendere alla lettera in senso realistico il concetto di funzione d'onda comporta, alla luce degli esperimenti che apparentemente violano la diseguaglianza di Bell, l'accettazione del noto paradosso della non località, conseguenza appunto di una vera e propria confusione tra modelli teorici concettuali e realtà fisica, in sostanza tra conoscenza della realtà e realtà, assumendo cioè una corrispondenza necessaria tra esperimenti e rappresentazioni modellistiche ambiguamente suggerite dalla teoria, come se queste fossero invece univocamente determinate da essi [759]. Se però, anche sul piano matematico e formale, la struttura della teoria non

consente un'interpretazione realistica ingenua, ontologica dei suoi concetti che non sia al tempo stesso paradossale (teoremi di Bell e BKS) - si pensi in particolare alla teoria di Bohm, chiaramente non-locale e al tempo stesso deterministica - [760], resta tuttavia appunto l'esigenza di riconoscere una qualche portata realistica, anche solo pensando alla capacità previsionale della teoria, ai suoi concetti, che ci induce a cercare una terza via, che se da un lato ammetta una corrispondenza tra teorie ed esperimenti non puramente strumentale e fenomenistica, dall'altro intenda però evitare una corrispondenza di tipo ontologico stretto, non più proponibile se si vuole tener conto dei risultati sperimentali e dei vincoli teorici, che sembrano comunque vietare definitivamente un rapporto di corrispondenza ingenuamente inteso tra esperimenti e formalismi matematici mediati da modelli e rappresentazioni concettuali. Si tratta cioè di evitare la falsa alternativa tra una concezione puramente verificazionista e operazionista della teoria e una concezione inevitabilmente paradossale degli oggetti quantistici quando siano intesi in termini di puri modelli ontologici, arrivando invece ad elaborare un tipo di rapporto tra teoria ed esperimento che salvi la possibilità di concepire sì strutture irriducibili alle apparenze, ma al tempo stesso tali da essere irriducibili a semplici rappresentazioni intuitive della realtà dei quanti di tipo modellistico univoco, data l'indecidibilità dovuta all'ambiguità costitutiva delle interpretazioni possibili di tali strutture, che quindi conservano una certa libertà di elaborazione e di definizione che è tutt'ora aperta. Questa situazione non può non far pensare quindi, una volta ammessa la validità sostanziale sul piano fenomenologico e matematico della teoria quantistica, ad un'inedita, e forse divergente e non conciliabile al suo interno, apertura sul piano interpretativo, proprio a causa di quell'incompletezza semantica della teoria su cui così fortemente insisteva ad esempio Albert Einstein[761]. Incompletezza semantica che, purchè si eviti di ontologizzare i modelli, di reificarli in termini di teorie provate, definitive, dimostrate - raccolgo qui l'indicazione fornitaci da C. Garola di un realismo semantico e non ontologico o metafisico[762] -, ci consente comunque, in un'accezione di modello e interpretazione non lontana da quella adottata ad esempio da B. van Fraassen[763], di tentare di interpretare e modellizzare quell'ambiguità della teoria facendo riferimento ad altre teorie fisiche già elaborate, come la dinamica stocastica, o addirittura di tentare di elaborare teorie e concetti nuovi che chiamino in gioco aspetti di non-linearità e complessità sostanzialmente ignorati dalla meccanica quantistica nella sua formulazione originaria, rigidamente lineare e acausale. Cercando ad esempio di vedere se si possa così superare il conflitto, insanabile nell'interpretazione ortodossa, tra evoluzione deterministica spontanea della funzione d'onda e salti quantici acausali di riduzione del pacchetto d'onde in teoria della misura, riformulando l'equazione di Schroedinger in termini non lineari, da cui si possa ricavare dinamicamente, senza più discontinuità assolute, il processo di riduzione[764]. Resta naturalmente il problema già sollevato[765], se, per quanto piccola, la modificazione della meccanica quantistica che viene così proposta allo scopo di superarne l'ambiguità e ristabilire quindi un realismo macroscopico minimale rappresenti ancora un'interpretazione di essa o non piuttosto un'alternativa ad essa che deve comunque dimostrare la sua piena capacità di riprodurre l'intero contenuto teorico e sperimentale.

---

[742] Si tratta di una convinzione condivisa dall'intera tradizione della fisica fin quasi alla fine dell'800, da Galileo che eguagliava *intensive*, cioè quanto a conoscenza della verità di particolari fenomeni, anche se non di tutti cioè *extensive*, la scienza umana al sapere divino, a Newton che sosteneva di risalire per induzione dai moti visibili alle loro cause dinamiche per dedurre poi quelli da queste, ai fisici matematici del primo 800 come Poisson, Ampère, Fourier, e ai teorici del secondo 800 come Helmholtz, Hertz, Boltzmann, che perseguivano un completo parallelismo tra leggi teoriche e fenomeni, in termini o più empirico-matematici o più indirettamente modellistici.

[743] In effetti il fenomenismo matematico del secondo 800 presentava aspetti interpretativi ancora più consistenti di quello dei fisici matematici del primo 800,

che pure non mancava di componenti modellistiche implicite. Questo infatti non giungeva ancora al punto di voler ridurre, come poi Mach o Ostwald in diretta polemica con gli altri riduzionismi

definiti appunto scolastici, ad una base unica elementare, in termini di semplicità ed economia di pensiero, l'intera fisica anzi l'intera scienza, superando così comunque i confini della semplice esperienza.

[744] Ciò non toglie che in alcuni dei grandi fisici teorici del secondo '800 oltre a Maxwell, come ad esempio Boltzmann e Poincaré, fosse già acuta la consapevolezza dei margini di arbitrarietà ed approssimazione propri dei particolari modelli interpretativi adottati, in quanto equivalenti ad infiniti altri possibili modelli capaci di porre altrettanto fecondamente in corrispondenza biunivoca forme matematiche e fenomeni mediante costruzioni concettuali diverse anche se affini.

[745] Cfr. P. Galison, *How Experiments End*, The University of Chicago Press, Chicago 1987, c. 2, *From Aggregates to Atoms*, p. 21.

[746] *Ibidem*, p. 22.

[747] *Ibidem*, pp. 22-7.

[748] *Ibidem*, c. 3, *Particles and Theories*, pp. 75-133.

[749] *Ibidem*, pp. 76-7.

[750] *Ibidem*, pp. 80-9.

[751] *Ibidem*, pp.89-102.

[752] La prima esposizione chiara e completa di tale nuova situazione epistemologica della fisica quantistica, che si fonda appunto sulle relazioni di indeterminazione di Heisenberg, e' contenuta in W. Heisenberg: "Ueber den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik", *Zeitschrift fuer Physik*, 43 (1927), pp. 172-98.

[753] Cfr. M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, J. Wiley and Sons, New York, 1974, c. 4, *Early Versions of the Complementarity Interpretation*, p. 87.

[754] *Ibidem*, c. 4 cit. e c. 6, *The Incompleteness Objection and Later Versions of the Complementarity Interpretation*.

[755] *Ibidem*, c. 2, *Early Semiclassical Interpretations*, p. 44. Quanto alla "propensity interpretation" di Popper, cfr. *ibidem*, c. 10, *Statistical Interpretations*, pp. 448-53.

[756] *Ibidem*, c. 2 cit., pp. 38-44.

[757] Cfr., per un confronto tra tale approccio operazionista, che ispiro' tra l'altro la nascita della seconda quantizzazione, dei campi, indifferente alla loro natura corpuscolare o ondulatoria, e l'interpretazione statistica di Einstein, P. Bernardini, "La statistica di Einstein e la seconda quantizzazione, quale continuità?," *Physis*, 23 (1981), pp. 337-74.

[758] E' questo il punto di vista sostenuto in particolare, in polemica con lo stesso Hume, nel classico libro di M. Bunge, *La causalità*, Torino, Boringhieri, 1971.

[759] In sostanza sembra che proprio l'assunzione realistica ingenua dei concetti introdotti dalla meccanica quantistica, come appunto quello di funzione d'onda, comporti di necessità l'accettazione di aspetti paradossali che l'interpretazione ortodossa si limitava invece solo a suggerire implicitamente, in presenza di risultati sperimentali, come quelli sulla diseguaglianza di Bell, che confermano la teoria in contrasto con i punti di vista alternativi. Di qui il senso di sconforto di Bell

che, interpretando in senso ontologico forte tali risultati sperimentali contrari alle sue attese, vi vede addirittura il crollo della causalità e della località in fisica (cfr. J. Bell, *Quantum Profiles*, Princeton, Princeton University Press, 1991, c. 1). Sicuramente diverse sarebbero invece le conclusioni se non si interpretassero i concetti della teoria in senso ontologico forte.

[760] Cfr. N. D. Mermin, "Hidden variables and the two theorems of John Bell", *Reviews of Modern Physics*, 65 (1993), pp. 803-15.

[761] Cfr. A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen, "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered incomplete?", *Physical Review*, 47 (1935), pp. 77-80.

[762] Cfr. C. Garola, "Questioning Nonlocality: An Operational Critique to Bell's Theorem", in *The Foundations of Quantum Mechanics. Historical Analysis and Open Questions* (C. Garola, A. Rossi eds.), Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1995.

[763] Cfr. B. van Fraassen, *Quantum Mechanics: An Empiricist View*, Oxford, Clarendon Press, 1991.

[764] Cfr. G. Ghirardi, A. Rimini, C. Weber, in *Physical Review D*, 34 (1986), p. 470.

[765] Cfr. G. Tarozzi, *Filosofia della microfisica*, Modena, Mucchi, 1992, pp. 180-6.