

**Teoremi ed esperimenti  
contro ideologie e controllo dei media accademici:  
un case study  
Luigi Accardi<sup>1</sup>**

Centro Vito Volterra, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"

WEB-page: <http://volterra.mat.uniroma2.it>

Intervento al Convegno:

Quanti Copenhagen? Bohr, Heisenberg e le interpretazioni della Meccanica quantistica

Cesena, 18 - 20 ottobre 2002

fondamenti: cenni storici

Il programma per realizzare l'esperimento può essere prelevato dalla pagina WEB:

<http://volterra.mat.uniroma2.it>.

---

<sup>1</sup>accardi@volterra.mat.uniroma2.it

# Indice

1	Introduzione	3
2	Un sistema dinamico classico, locale, deterministico, reversibile, che realizza le correlazioni EPR	6
3	Il contributo della probabilità quantistica al problema dei fondamenti: cenni storici	10
4	Sindromi dell'irrazionalismo scientifico	14
5	Appendice (I):	16
6		16
7	Appendice (II):	20
8		20
9		20
10	Appendice (III):	23
11		23
12	Appendice (IV):	25
13		25
14	Bibliography	32

# 1 Introduzione

Da più di tre quarti di secolo il dibattito sui fondamenti della teoria quantistica è al centro delle riflessioni sulla filosofia della scienza e, più in generale, sul problema della conoscenza e dei limiti del sapere umano.

In questi anni praticamente tutti i più grandi fisici, i più importanti filosofi della scienza, i più grandi matematici, hanno dato vita a un dibattito che ha pochi uguali nel pensiero umano per profondità ampiezza e sottigliezza degli argomenti emersi. Recentemente questo dibattito ha anche ispirato progetti con valenza tecnologica o addirittura industriale, come la crittografia quantistica, la “teleportation”, il computer quantistico, ma il fascino intellettuale esercitato da questa problematica è dovuto ai numerosi problemi interpretativi, sorti da un formalismo matematico che lo stesso Heisenberg definì “lontano dall’intuizione”, e ai vari “paradossi” sorti in connessione con le interpretazioni proposte.

Questi paradossi sembravano indicare l’esistenza di contraddizioni insanabili tra:

(i) una visione realistica del mondo, in cui gli oggetti hanno proprietà obiettive e predeterminate

(ii) i risultati sperimentali della teoria quantistica

(iii) la teoria della relatività e più precisamente il principio di località.

La drammaticità della situazione era acuita dal fatto che sembrava non esserci via d’uscita: da una parte il ragionamento che conduceva ai paradossi sembrava alla maggioranza dei fisici inattaccabile: semplici argomenti matematici mostrano che **ogni modello realistico del mondo che rispetti il principio di località deve soddisfare certe disuguaglianze.**

Dall’altra, esperimenti accuratissimi, che continuano ad essere ripetuti in questi anni e a ricevere conferme, dimostrano che tali disuguaglianze sono violate in natura. Ci sono due classi principali di tali esperimenti: quelli di tipo “interferenza” (doppia fenditura, SQUID, macromolecole, ...) e quelli di tipo “correlazione” (spin, polarizzazione, ...).

Secondo la maggioranza dei fisici, che hanno pubblicato lavori in cui il problema di tale contraddizione viene esplicitamente affrontato, non ci sarebbe via d’uscita: occorre rassegnarsi e riconoscere l’incompatibilità della teoria

quantistica con “il realismo locale”: nessun sistema classico può, con scelte locali e indipendenti, riprodurre le correlazioni EPR (Einstein, Podolsky, Rosen).

La situazione comincia a cambiare verso la fine degli anni 1970, quando viene scoperta una ipotesi nascosta, di natura puramente matematica, nella deduzione delle disuguaglianze citate sopra. Da questa osservazione nascono le intuizioni basiche della probabilità quantistica:

(i) esistono molti modelli inequivalenti di leggi del caso (probabilità) così come esistono molti modelli inequivalenti di leggi dello spazio (geometria)

(ii) è possibile distinguere, mediante esperimenti, quali modelli possono descrivere un preassegnato insieme di dati statistici

(iii) occorre studiare sistematicamente, sia nei loro aspetti matematici, sia nelle loro applicazioni fisiche, questi nuovi modelli non Kolmogoroviani

Dare forma concreta a questo programma ha richiesto più di 15 anni poichè il fronte da gestire è molto ampio: dai più avanzati aspetti della matematica (probabilità, analisi funzionale, teoria degli operatori, ... cf. la serie [QP - PQ], ormai oltre il 20-mo volume) alle concrete applicazioni fisiche (teoria dei campi, meccanica statistica del non equilibrio, stato solido, ... cf. le recenti monografie [AcLuVo02], [AcKo00b]); fino ai problemi dei fondamenti (cf. la sezione (3)).

Ma gli sviluppi tecnici non sono sufficienti: occorre una idea nuova che spieghi in modo intuitivo e semplice i motivi fisici dell'emergenza di modelli probabilistici non Kolmogoroviani, allo stesso modo in cui la relatività generale spiega, con la presenza di masse, l'emergenza di geometrie non euclidee.

Mentre lo sviluppo matematico e delle applicazioni fisiche della probabilità quantistica è impetuoso, la ricerca di questa idea è lenta e faticosa e si conclude solo nel 1993 con l'intuizione che sistemi dinamici adattivi possono dare luogo a statistiche non kolmogoroviane. A questo punto i tempi sono maturi per tentare una sintesi. Questa viene realizzata nel libro [Ac97] dove la metafora del camaleonte illustra il prototipo di sistema adattivo.

L'unica concessione al tecnicismo fatta in questo libro è un'appendice in cui si spiega il meccanismo matematico attraverso il quale l'effetto camaleonte può dar luogo a statistiche non Kolmogoroviane.

Ma la soluzione di un problema teorico è meno convincente di un concreto esempio. Molti chiedono: *il tuo argomento dimostra che, in linea di principio, è possibile riprodurre le correlazioni EPR (Einstein, Podolsky, Rosen) usando l'effetto camaleonte. Ma puoi passare dal principio alla realtà? Puoi riprodurre effettivamente queste correlazioni usando quell'effetto?*

La risposta affermativa a queste domande viene data nel 2001 nel lavoro [AcImRe01] (cf. la sezione (2) dove, per comodità del lettore, viene riprodotta la dimostrazione del teorema su cui si basa l'esperimento). Simultaneamente all'uscita del Preprint di questo lavoro viene messo a disposizione, estraibile dalla pagina web del Centro Volterra, un programma che permette di riprodurre le correlazioni EPR (Einstein, Podolsky, Rosen) con le scelte locali e indipendenti di tre personal computers (sistemi classici per eccellenza).

Questo teorema e questo esperimento forniscono la prova conclusiva della validità della tesi, della probabilità quantistica, sostenuta nel libro [Ac97]. **I teoremi e gli esperimenti confermano che non sussiste alcuna incompatibilità tra teoria quantistica realismo e relatività.**

Tutto ciò giustifica l'affermazione che la probabilità quantistica fornisce la soluzione dei paradossi interpretativi della teoria quantistica.

Come si vede si tratta di una tesi "forte" ed è noto a tutti che queste suscitano antipatie e irritazioni. Spesso è difficile distinguere, soprattutto nelle dispute scientifiche, le convinzioni basate su fanatismi acritici da quelle basate su teoremi, esperimenti e rigore logico esercitato per decenni prima di esporre una tesi al pubblico giudizio. La breve ricostruzione storica del percorso che ha condotto a questa conclusione, e che sarà ampliata nella sezione (3) seguente, ha lo scopo di aiutare il lettore in questo arduo compito.

L'annuncio della soluzione di un problema, da parte di chi ritiene di averla trovata, non è un atto di presunzione, ma un dovere e fa parte essenziale dell'etica scientifica, così come di tale etica fanno parte lo scrutinio più rigoroso e severo degli argomenti addotti a sostegno di tale annuncio, la polemica e le critiche aperte.

Non ne fanno parte invece alcune reazioni irrazionali, che esprimono sentimenti molto più che ragionamenti.

Tentare di inserire elementi di irrazionalismo nel dibattito scientifico è operazione grave e pericolosa, a cui la comunità scientifica dovrebbe reagire con rigore etico.

Ma come si fa a decidere se e quando sono avvenuti sconfinamenti irrazionalistici in un dibattito scientifico?

Nella sezione (4) del presente lavoro ho cercato di elencare, senza alcuna pretesa di completezza, alcuni criteri per rispondere a tale domanda.

Le appendici costituiscono un invito a confrontare il materiale in esse contenuto con i criteri elencati nella sezione (4).

## 2 Un sistema dinamico classico, locale, deterministico, reversibile, che realizza le correlazioni EPR

Questa sezione è una introduzione agli aspetti matematici nuovi emersi dalla realizzazione dell'esperimento EPR–camaleonte. Per la comprensione del resto del lavoro i dettagli tecnici in essa contenuti non sono essenziali.

In essa si riassume la definizione del sistema dinamico costruito in [AcImRe01] e si dimostra che esso riproduce le correlazioni EPR. L'esperimento conferma che questo sistema dinamico può effettivamente essere simulato con operazioni locali e indipendenti.

Il sistema qui costruito fornisce il primo esempio di sistema dinamico **adattivo, locale e localmente simulabile**. La distinzione tra le due ultime proprietà è descritta in [AcImRe01], [AcImRe03a] (dove la differenza tra i sistemi adattivi e la consueta teoria del controllo è chiaramente spiegata) ed è essenziale per la realizzazione sperimentale.

Questa nuova classe di sistemi dinamici è molto interessante matematicamente ed ha potenziali applicazioni, oltre che alla fisica, alla biologia, alla medicina e all'economia.

### Definition 1 *Dati:*

– *uno spazio misurabile (spazio degli stati)*

$$(\Omega_1 \times \Omega_2, \mathcal{F}_1 \times \mathcal{F}_2)$$

– *per ogni  $a, b \in [0, 2\pi]$  due funzioni (osservabili) a valori  $\pm 1$*

$$S_a^{(1)} : \omega_1 \in \Omega_1 \rightarrow S_a^{(1)}(\omega_1) \in \{+1, -1\}$$

$$S_b^{(2)} : \omega_2 \in \Omega_2 \rightarrow S_b^{(2)}(\omega_2) \in \{+1, -1\}$$

– *per ogni  $a, b \in [0, 2\pi]$  due funzioni invertibili (dinamiche locali)*

$$T_{1,a} : \Omega_1 \rightarrow \Omega_1 \quad ; \quad T_{2,b} : \Omega_2 \rightarrow \Omega_2$$

Diremo che il sistema dinamico (locale, deterministico, reversibile, classico, adattivo)

$$\{(\Omega_1 \times \Omega_2, \mathcal{F}_1 \times \mathcal{F}_2, P), T := T_{1,a} \otimes T_{2,b}\}$$

realizza le correlazioni EPR se

$$\langle S_a^{(1)} S_b^{(2)} \rangle := \int \int_{\Omega_1 \times \Omega_2} S_a^{(1)}(\omega_1) S_b^{(2)}(\omega_2) dP \circ T^{-1}(\omega_1, \omega_2) = -\cos(b - a)$$

Il sistema dinamico (classico, deterministico, locale) che considereremo è composto da due sotto-sistemi spazialmente separati  $(1, M_1)$  e  $(2, M_2)$  e interpretati come segue:

- 1 e 2 sono particelle
- $M_1$  e  $M_2$  sono apparati di misura
- lo spazio degli stati di  $(1, M_1)$  è  $[0, 2\pi] \times \mathbb{R}$  e anche lo spazio degli stati di  $(2, M_2)$  è  $[0, 2\pi] \times \mathbb{R}$
- pertanto lo **spazio degli stati** dell'intero sistema  $(1, M_1, 2, M_2)$  è  $[0, 2\pi]^2 \times \mathbb{R}^2$

Le dinamiche (locali, adattive)  $T_{1,a}, T_{2,b}$  dove 1, 2 sono indici per particelle e  $a, b$  sono indici per apparati, sono definite dalle seguenti condizioni:

$$T_{1,a}, T_{2,b} : [0, 2\pi] \times \mathbb{R} \rightarrow [0, 2\pi] \times \mathbb{R} \quad (1)$$

$$T_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1) := (s_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1), m_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1)); T_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2) := (s_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2), m_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2))$$

$$s_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1) := \sigma_1, \quad ; \quad m_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1) := \lambda_1 \frac{1}{T'_{1,a}(\sigma_1)} \quad (2)$$

$$s_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2) := \sigma_2 \quad ; \quad m_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2) := \lambda_2 \frac{1}{T'_{2,b}(\sigma_2)} \quad (3)$$

e infine le funzioni

$$T'_{1,a}, T'_{2,b} : [0, 2\pi] \rightarrow [0, 2\pi]$$

sono definite da

$$T'_{1,a}(\sigma_1) = \frac{\sqrt{2\pi}}{4} |\cos(\sigma_1 - a)| \quad , \quad T'_{2,b}(\sigma_2) = \sqrt{2\pi} \quad , \quad \sigma_1, \sigma_2 \in [0, 2\pi] \quad (4)$$

In altre parole le dinamiche adattive (1) sono date, per  $\sigma_1, \sigma_2 \in [0, 2\pi]$ ;  $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$ , da:

$$T_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1) := \left( \sigma_1, \frac{\lambda_1^4}{\sqrt{2\pi}} |\cos(\sigma_1 - a)| \right) \quad , \quad T_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2) := \left( \sigma_2, \frac{\lambda_2^4}{\sqrt{2\pi}} \right)$$

Per  $(\sigma_1, \sigma_2 \in [0, 2\pi]$  ,  $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$ ) definiamo le misure locali

$$p_S(d\sigma_1, d\sigma_2) = \frac{1}{2\pi} \delta(\sigma_1 - \sigma_2) d\sigma_1 d\sigma_2$$

$$p_{1,a}(\sigma_1, d\lambda_1) = \delta(m_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1) - m_a) d\lambda_1$$

$$p_{2,b}(\sigma_2, d\lambda_2) = \delta(m_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2) - m_b) d\lambda_2$$

dove  $m_a, m_b$  sono arbitrari numeri reali .

**Osservazione (1)**  $p_S(d\sigma_1, d\sigma_2)$  è la preparazione del sistema composto (1,2) e, per il principio di causalità, esso non può dipendere dalla preparazione dell'apparato.

Infatti al tempo  $t = 0$  le particelle non possono sapere quale sarà la preparazione dell'apparato al tempo  $t = 1$  (il primo istante di interazione con esso).

$p_{1,a}(\sigma_1, d\lambda_1)$  e  $p_{2,b}(\sigma_2, d\lambda_2)$  sono le preparazioni iniziali degli apparati locali. Esse sono preparazioni di “tipo-responso” e devono essere interpretate in senso adattivo , i.e.:

se, al tempo  $t = 1$ , la particella arriverà a me nello stato  $\sigma_x (= \sigma_1, \sigma_2)$ , allora io mi posizionerò nello stato  $p_{1,x}(\sigma_x, d\lambda_x)$  ( $x = 1, 2$ ) (cf. [AcImRe03a] dove si dimostra come la teoria dei sistemi dinamici adattivi conduca naturalmente a misure di questo tipo). Combinando le misure locali descritte sopra, definiamo la misura (**distribuzione iniziale**) su  $[0, 2\pi]^2 \times \mathbb{R}^2$ :

$$p_S(\sigma_1, \sigma_2) p_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1) p_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2) d\sigma_1 d\sigma_2 d\lambda_1 d\lambda_2 \quad (5)$$

Infine, per  $a, b$  come sopra, definiamo le funzioni (**osservabili**) a valori  $\pm 1$

$$S_a^{(1)}, S_b^{(2)} : [0, 2\pi] \times \mathbb{R} \rightarrow \{\pm 1\} \quad (6)$$

mediante

$$S_a^{(1)}(\sigma, \mu) = S_a^{(1)}(\sigma) = \text{sgn}(\cos(\sigma - a)) \quad , \quad S_b^{(2)} = -S_b^{(1)} \quad ; \quad \sigma \in [0, 2\pi], \mu \in \mathbb{R} \quad (7)$$

**Theorem 1** *Nelle notazioni introdotte, la misura (5) è una misura di probabilità su  $[0, 2\pi]^2 \times \mathbb{R}^2$ . Inoltre*

$$\int S_a^{(1)}(s_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1), m_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1)) S_b^{(2)}(s_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2), m_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2)) \cdot p_S(\sigma_1, \sigma_2) p_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1) p_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2) d\sigma_1 d\sigma_2 d\lambda_1 d\lambda_2 = -\cos(a - b) \quad (8)$$

*Dimostrazione* . La positività è ovvia. La condizione di normalizzazione

$$\int \sim p_S(\sigma_1, \sigma_2) p_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1) p_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2) d\sigma_1 d\sigma_2 d\lambda_1 d\lambda_2 = 1 \quad (9)$$

segue da (7) e (8) scegliendo  $a = b$ . Per provare (8) osservare che, con le scelte (7), (5), le correlazioni (8) diventano

$$\int \int \int \int S_a^{(1)}(s_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1), m_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1)) S_b^{(2)}(s_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2), m_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2)) \quad (10)$$

$$\delta(m_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1) - m_a) \delta(m_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2) - m_b) p_S(\sigma_1, \sigma_2) d\lambda_1 d\lambda_2 d\sigma_1 d\sigma_2$$

Cambiando variabili

$$m_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1) = \mu_1 \quad ; \quad m_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2) = \mu_2$$

$$m'_{1,a}(\sigma_1, \lambda_1) d\lambda_1 = d\mu_1 \quad ; \quad m'_{2,b}(\sigma_2, \lambda_2) d\lambda_2 = d\mu_2$$

e notando che, dati  $a, b \in [0, 2\pi]$  per quasi tutti gli  $a, b, \sigma_1, \sigma_2 \in [0, 2\pi]$  le funzioni

$$m_{1,a}(\sigma_1, \cdot), m_{2,b}(\sigma_2, \cdot) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \quad (11)$$

date da (2), (3), (4), sono invertibili, si trova

$$d\lambda_1 = \frac{1}{m'_{1,a}(\sigma_1, m_{1,a}^{-1}(\sigma_1, \mu_1))} d\mu_1 =: T'_{1,a}(\sigma_1, \mu_1) d\mu_1 \quad (12)$$

$$d\lambda_2 = \frac{1}{m'_{2,b}(\sigma_2, m_{2,b}^{-1}(\sigma_2, \mu_2))} d\mu_2 =: T'_{2,b}(\sigma_2, \mu_2) d\mu_2 \quad (13)$$

e, dopo il cambio di variabili, (10) diventa

$$\int \int \int \int S_a^{(1)}(s_{1,a}(\sigma_1, m_{1,a}^{-1}(\sigma_1, \mu_1)), \mu_1) S_b^{(2)}(s_{2,b}(\sigma_2, m_{2,b}^{-1}(\sigma_2, \mu_2)), \mu_2)$$

$$T'_{1,a}(\sigma_1, \mu_1)T'_{2,b}(\sigma_2, \mu_2)\delta(\mu_1 - m_a)\delta(\mu_2 - m_b)p_S(\sigma_1, \sigma_2)d\mu_1d\mu_2d\sigma_1d\sigma_2 \quad (14)$$

Date le scelte (2), (3), (4) delle funzioni  $s_{1,a}, s_{2,b}$  e le scelte (7) di  $S_a^{(1)}, S_b^{(2)}$ , queste hanno la forma

$$\begin{aligned} S_a^{(1)}(\sigma_1) &:= S_a^{(1)}(s_{1,a}(\sigma_1, m_{1,a}^{-1}(\sigma_1, m_a), \mu_1) \\ S_b^{(2)}(\sigma_2) &:= S_b^{(2)}(s_{2,b}(\sigma_2, m_{2,b}^{-1}(\sigma_2, m_b), \mu_2) \end{aligned} \quad (15)$$

nel senso che il membro destro dipende solo dalle variabili che compaiono al membro sinistro. Pertanto (14) diventa

$$\int \int S_a^{(1)}(\sigma_1)S_b^{(2)}(\sigma_2)T'_{1,a}(\sigma_1)T'_{1,b}(\sigma_2)p_S(\sigma_1, \sigma_2)d\sigma_1d\sigma_2 \quad (16)$$

Infine, dato che

$$p_S(\sigma_1, \sigma_2) = \frac{1}{2\pi}\delta(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (17)$$

usando (4) si arriva a

$$\int S_a^{(1)}(\sigma)S_b^{(2)}(\sigma)T'_{1,a}(\sigma)T'_{1,b}(\sigma)\frac{d\sigma}{2\pi} = - \int_0^{2\pi} \cos(\sigma-a)\text{sgn}(\cos(\sigma-b))d\sigma = -\cos(b-a)$$

che è la tesi.

### 3 Il contributo della probabilità quantistica al problema dei fondamenti: cenni storici

Il teorema descritto nella sezione (2) e il corrispondente esperimento concludono una linea di ricerca durata più di 20 anni e il cui punto di partenza è stato l'analisi matematica delle due radici paradigmatiche dei paradossi quantistici:

- (i) l'esperimento delle due fenditure
- (ii) la disuguaglianza di Bell

La probabilità quantistica nasce alla fine degli anni 1970 con la dimostrazione del fatto che:

**i problemi sollevati da questi due esperimenti hanno la stessa radice matematica, cioè: esistono insiemi di dati statistici, provenienti da esperimenti diversi e mutuamente incompatibili, che non possono essere descritti da un singolo modello Kolmogoroviano.**

Questi risultati furono pubblicizzati in preprints e in molte conferenze internazionali e apparvero un paio di anni dopo nei lavori [Ac81b], [Ac81a], [AcFe81], [Ac81d].

La comune radice matematica dei due esperimenti cruciali per tutte le difficoltà interpretative e gli apparenti paradossi della teoria quantistica, non era mai stata osservata prima di allora nonostante l'immensa letteratura esistente sul tema.

E' vero che la letteratura sulle variabili nascoste è tutta centrata sul problema di costruire un "modello classico per la teoria quantistica", ma basta una occhiata, anche superficiale, a questa letteratura, per rendersi conto del fatto che, sotto la comune designazione: "modello classico per la teoria quantistica", si poteva trovare una molteplicità di modelli totalmente diversi (cf. e.g. [Jamm74] oppure [Ac86]) e accomunati dal fatto che tutti introducevano una quantità di ipotesi totalmente arbitrarie.

Al contrario: la rappresentabilità Kolmogoroviana (o non), di un insieme di dati statistici, si può decidere unicamente in base ai dati sperimentali. Lo strumento matematico che consente di effettuare questa decisione è costituito dagli **invarianti statistici**. L'analogia di questi con gli invarianti geometrici è discussa in vari lavori e qui non insisteremo su essa (cf. [Ac85], [Ac86]).

Tuttavia, proprio per sottolineare che l'introduzione di modelli non Kolmogoroviani è una necessità sperimentale e non una arbitraria generalizzazione matematica, a partire dai primi anni 1980 si tende a non parlare più di "probabilità non commutativa", ma di "probabilità quantistica".

La teoria degli invarianti statistici permette di discriminare tra il modello probabilistico classico e altri (e.g. quello quantistico), ma non permette di rispondere alla domanda:

**(i) da quali nuove richieste fisiche nascono i modelli non classici di probabilità?**

**(ii) si può dedurre il formalismo quantistico da assiomi fisicamente significativi?**

Sulla seconda domanda esiste una vastissima letteratura nella quale si possono distinguere vari filoni tra i quali quello quantitativamente più consistente, in termini di numero di lavori prodotti nel settore, è rappresentato dalle "logiche quantistiche". Tuttavia, dal punto di vista della chiarificazio-

ne concettuale del problema i risultati ottenuti da questa copiosa letteratura sono alquanto deludenti.

**La prima, e a tutt'oggi unica deduzione del formalismo quantistico da assiomi fisicamente significativi** fu ottenuta nei lavori [Ac82a], [Ac82c] e rielaborata successivamente, in termini di una nuova assiomatizzazione del calcolo delle probabilità (diversa da quelle di Kolmogorov e di De Finetti), nei lavori [Ac93], [Ac95a].

La nuova assiomatizzazione della teoria delle probabilità è basata non sulla nozione di **evento (indipendente da ogni interazione)** bensì su quella di **misura (che invece dipende da un'interazione)**. La nozione di evento si riottiene poi come caso limite.

Chi ama le ricostruzioni a posteriori potrebbe concludere che il passaggio dalla nuova assiomatica delle probabilità alla metafora “urne–camaleonti” è immediato. In effetti il colore di una pallina in un'urna è un esempio tipico di **evento (indipendente dall'interazione)**, mentre il colore di un camaleonte sulla foglia o sul tronco è un esempio tipico di **risponso a una misura (dipendente dall'interazione)**.

Sebbene coretta da un punto di vista logico questa conclusione non rispecchia il reale corso storico degli eventi. Infatti il passaggio dalla nuova assiomatizzazione della teoria delle probabilità alla **statistica dei responsi** ha richiesto più di 11 anni.

Parallelamente agli sviluppi matematici (calcolo degli invarianti statistici per vari tipi di modelli, costruzione della nuova assiomatica delle probabilità, ...) venivano sviluppate le implicazioni di questi sviluppi sul problema dei paradossi quantistici. Queste furono discusse tra l'altro nel convegno “The wave–particle dualism” organizzato nel 1982 a Perugia da S. Diner, G. Lochak e F. Selleri, i cui atti apparvero due anni dopo [Ac83a].

Queste implicazioni possono essere riassunte nell'affermazione:

**non è vero che le sole ipotesi di realismo e di località implicano la disuguaglianza di Bell.** Al contrario, la dimostrazione di queste disuguaglianze fa intervenire una ipotesi matematica aggiuntiva, messa in luce per la prima volta dalla probabilità quantistica, e **cioè l'esistenza di probabilità congiunte per terne di osservabili di spin.** Queste, per il principio di Heisenberg, non sono osservabili sperimentalmente (al contrario delle probabilità congiunte per le coppie di osservabili, che invece lo sono).

In particolare la disuguaglianza di Bell non aggiunge nulla alla conclusione dell'esperimento delle due fenditure dato che in entrambi i casi l'essenza del problema non è la non località, bensì la non Kolmogorovianità. Infatti

in entrambi i casi l'unica conclusione razionalmente giustificata è che: **esistono insiemi di dati statistici, provenienti da esperimenti diversi e mutuamente incompatibili, che non possono essere descritti da un singolo modello Kolmogoroviano.** Una conclusione tutt'altro che sorprendente per un probabilista classico.

L'articolo di rassegna [Ac86] discute in modo comparato i vari approcci al problema dei cosiddetti paradossi quantistici e fornisce un quadro abbastanza chiaro della posizione della probabilità quantistica agli inizi degli anni '80.

Il problema che restava aperto in quegli anni era il seguente:

**esiste un principio semplice e generale che, sulla base della fisica classica, spieghi in modo convincente perchè dei sistemi dinamici classici e deterministici possano dar luogo a statistiche non Kolmogoroviane?**

La risposta a questa domanda è venuta al termine di una lunga serie di tentativi infruttuosi che ha condotto, nei primi anni '90 all'introduzione dell'**effetto camaleonte.**

Questo consiste nel fatto che **la dinamica di un sistema dipende dall'osservabile misurata sul sistema stesso.**

Per capire le implicazioni di questo semplice e naturale principio fisico occorre un ulteriore sviluppo matematico. Più precisamente una estensione della teoria di von Neumann della misura quantistica nella quale due ingredienti, importanti per la presente discussione, erano assenti:

- la località
- la causalità

Inoltre la teoria di von Neumann riguardava unicamente i sistemi quantistici, mentre per gli scopi della probabilità quantistica occorre una formulazione unificata, ugualmente applicabile ai sistemi classici e a quelli quantistici.

Una tale generalizzazione fu formulata per la prima volta nel lavoro [Ac93]. Questa teoria è inoltre esposta nel Capitolo IX.7, Appendice (I) (“Una teoria realistica della misura”) del libro [Ac97]. Il teorema esposto nella sezione (2) del presente lavoro e l'esperimento, che di tale teorema non è altro che la simulazione, sono solo un esempio di questa teoria generale.

## 4 Sindromi dell'irrazionalismo scientifico

Sempre più spesso, anche sui mass media, si vedono appelli di scienziati contro le tentazioni dell'irrazionalismo e sempre più spesso mi chiedo quanto diritto abbia il mondo scientifico contemporaneo di lanciare appelli di questo genere.

In questa sezione evitando generalizzazioni analizzerò le reazioni di alcuni ambienti accademici alla soluzione proposta dalla probabilità quantistica dei paradossi interpretativi della teoria quantistica.

Per motivi di spazio e di tempo mi limiterò a pochi casi, riguardanti il mondo accademico italiano. Spero di trovare il tempo e l'energia per ampliare il discorso come meriterebbe. Infatti forse vale la pena di esplicitare che, come per tutti i case study, anche per quello di cui mi occuperò ora l'interesse principale non sta nei singoli fatti particolari, ma nella misura in cui questi fatti particolari sono la spia, il sintomo di una tendenza più generale. Infatti, se la risposta, analitica e documentata, alla domanda:

**Ha senso parlare, oggi, nella nostra società, di irrazionalismo scientifico?**

risulta essere **SI**, allora questo è uno dei problemi fondamentali della nostra epoca. Infatti, se c'è del vero nel detto che gli intellettuali sono la testa pensante dell'umanità, c'è anche del vero nel detto popolare che " ... quando il pesce comincia a marcire si vede dalla testa ... ".

Non esistono canoni codificati di razionalità e di etica del metodo scientifico, tuttavia il razionalismo è strettamente legato al realismo e all'etica e con questi condivide l'aspirazione a superare il livello dell'arbitrio (individuale o collettivo che sia).

Dato che l'essenza del metodo razionale consiste nell'enunciare chiaramente le ipotesi e i fatti e trarre conseguenze logiche da essi, il rifiuto di tale metodo, cioè l'irrazionalismo, si realizza nel: **rifiuto di confrontarsi sui contenuti**. Questo si traduce in una serie di corollari comportamentali tra i quali ho provato ad isolare i seguenti:

(1) l'appello alle emozioni invece che alle argomentazioni logiche

(2) la fuga dal confronto diretto, caratteristico delle dispute razionali e scientifiche, e il rifugio nel mutuo consenso di gruppi autoreferenziali

(3) l'appello allo spirito corporativo per isolare sociologicamente il sostenitore della tesi emotivamente osteggiata: “quello non è dei nostri”, oppure: “quello ha parlato male di Garibaldi” (cf. l'Appendice III).

(4) il tentativo di creare una atmosfera emotivamente ostile alle tesi emotivamente osteggiate (quindi largo uso del pettegolezzo e fuga dal confronto scientifico diretto attraverso i convegni e le pubblicazioni)

(5) uso della menzogna per deformare le tesi emotivamente osteggiate

(6) abuso del potere per impedire la diffusione delle tesi emotivamente osteggiate (controllo repressivo dei giornali scientifici e dei media divulgativi)

(7) sindrome del “lupo e l'agnello”, per cui chi detiene una forma di potere e potrebbe non giustificare verbalmente una sua azione, tuttavia lo fa, ma solo per rassicurare il proprio ego, e le giustificazioni proposte sono così stupide e inconcludenti che non fanno altro che sottolineare il disprezzo di chi le usa per la logica e per l'interlocutore non in grado di difendersi (cf. l'Appendice III).

(8) disprezzo della realtà e della verità e ricostruzione della storia secondo gli interessi propri o del proprio gruppo (Orwell: “1984”. L'istituto per la ricostruzione della storia, cf. l'Appendice IV).

(9) abuso del potere per infliggere punizioni esemplari a chi è emotivamente percepito come nemico (*damnatio memoriae*, esclusione dai convegni scientifici, la “ragione” del manganello (o del pettegolezzo) contrapposta a quella delle prove e dei documenti, ...)

(10) terrorismo ideologico al fine di creare un alone di sacralità iniziatica intorno a chi gestisce i misteri (del sapere o del potere) [retaggio della teoria delle origini divine del potere]

(11) abuso del potere per creare una accettazione acritica delle tesi emotivamente sostenute (pompaggio propagandistico attraverso i giornali scientifici e i media divulgativi; uso strumentale della disinformazione e della confusione)

(12) strumentalizzazione della storia della scienza in senso agiografico

Al fine di aiutare il lettore a rispondere alla domanda:  
**è possibile riscontrare nella prassi del mondo scientifico contemporaneo queste caratteristiche del comportamento irrazionale?**

allego senza commenti:

Appendice (I): Una recensione, di Domenico Costantini apparsa su “Le Scienze”, luglio '98, del libro [Ac97] dove il lettore interessato potrà riconoscere esempi concreti delle sindromi (1), (2), (3), (4), (5).

Può essere utile, al fine di inquadrare questa “recensione” nel suo naturale contesto sociologico, ricordare la risposta che lo stesso Costantini ha dato ad un fisico milanese che, durante un convegno organizzato dalla Fondazione Marottha, gli aveva chiesto chiarimenti sulle motivazioni e sullo stile:

“... **Mi hanno detto di andarci giù duro sul libro di Accardi ...**”

Inutile aggiungere che la ovvia ulteriore domanda “... chi te lo ha detto? ...” non ha ricevuto alcuna risposta.

Appendice (II) e (III): Uno scambio di corrispondenza tra il Prof. Franco Fagnola e il Prof. Enrico Bellone dove il lettore interessato potrà riconoscere esempi concreti delle sindromi (3), (6) e, soprattutto, (7).

L'Appendice (V) è dedicata alla sindrome “Orwell 1984” e si conclude con un esempio concreto dei metodi usati da “Le Scienze” per propagare la disinformazione scientifica

## 5 Appendice (I):

### 6

Una recensione di Domenico Costantini

**Le Scienze, luglio '98 (traduzione italiana di Scientific American)**

**URNE E CAMALEONTI:**

**Dialogo sulla realtà, le leggi del caso e l'interpretazione della teoria quantistica,**

*di Luigi Accardi*, il Saggiatore, Milano, 1997, pp. 508 (Lit. 60.000)

Una precisazione è necessaria, al fine di evitare fraintendimenti: questo libro non è di divulgazione. Non tragga in inganno la forma dialogica e nep-

pure l'estrema scarsezza di formule. Si tratta di un libro non facile: se non si hanno ben presenti le recenti discussioni sui fondamenti della meccanica quantistica, delle argomentazioni dell'autore si capirà ben poco. In considerazione di ciò non cercherò di fornire un'idea neppure parziale delle tesi esposte nel libro. Mi limiterò ad affrontare alcuni argomenti che mi auguro possano indirizzare il lettore già interessato alle suddette discussioni.

Come detto, si tratta di un dialogo fra due interlocutori: più precisamente *Academus*, che rappresenta il modo più diffuso di intendere i fondamenti della meccanica quantistica, quindi quelle idee note come interpretazione ortodossa della meccanica quantistica (si tratta della scuola di pensiero che, secondo l'autore, sostiene essere l'atto della misura di una grandezza a crearne il valore) e *Candido*, che espone le tesi dei sostenitori della probabilità quantistica, sostanzialmente quelle dell'autore.

A questi interlocutori principali si associa, solo nel settimo capitolo, *Bilbo*, che dà voce ai sostenitori della teoria delle variabili nascoste. Ma la discussione è animata da altri personaggi, questa volta reali; studiosi che contribuiscono o hanno contribuito alle discussioni sui fondamenti della meccanica quantistica. A questo riguardo non posso esimermi dal notare come questa trovata non appaia molto felice. Innanzitutto perché, pur essendo ognuno libero di citare chi e come vuole, non mi pare che il modo migliore di farlo sia prendere frammenti di articoli, poche righe nella maggioranza dei casi, e inserirli in un dialogo a più voci, conferendo alle citazioni una parvenza didascalica estranea a qualunque contributo scientifico. E poi perché far interloquire scienziati da tempo scomparsi come Einstein e Heisenberg, Feynman e Bell, è operazione a un tempo impropria e funerea, che certamente non contribuisce alla completa comprensione del loro pensiero.

Ma veniamo all'argomento principale del libro. Secondo l'autore, l'interpretazione ortodossa della meccanica quantistica sosterebbe che gli oggetti non esistono se nessuno li guarda, tesi strettamente legata alla famosa dualità onda-corpuscolo. Sempre secondo l'autore ciò dipenderebbe in modo essenziale da una analisi gravemente insufficiente ("sbagliata" afferma senza mezzi termini) del ruolo della probabilità nella meccanica quantistica. Vale a dire, questa meccanica compirebbe un'analisi statistica fuorviante dei risultati degli esperimenti che tenta di descrivere.

In sostanza, i sostenitori dell'interpretazione ortodossa avrebbero dapprima confuso probabilità congiunte con probabilità subordinate, e poi definito probabilità subordinate servendosi di probabilità congiunte non valutabili sperimentalmente. Questa è una tesi condivisibile, ma pare eccessivo ricon-

durre a questa confusione tutte le tesi dell'interpretazione ortodossa. Secondo l'autore, alla fine, tutti gli aspetti che la fisica moderna ha messo in luce nei fenomeni microscopici sarebbero il risultato di un'errata analisi statistico-probabilistica; una corretta analisi, basata sui principi della probabilità quantistica, diraderebbe ogni oscurità, palesando nel contempo il soggettivismo antirealistico che sarebbe all'origine dell'interpretazione ortodossa.

Questa tesi appare forzata. Chiunque conosca i dibattiti che hanno accompagnato la nascita della meccanica quantistica sa che le tesi bollate dall'autore come antirealiste erano già presenti negli anni trenta, ben prima che Feynman formulasse la sua analisi statistico-probabilistica dell'esperimento delle due fenditure. Questa analisi, indubbiamente lontana dall'essere soddisfacente, fu universalmente accolta, e la si ritrova in molti trattati di meccanica quantistica; ma da qui a dire che l'idealismo della scuola ortodossa, ammesso che sussista, tragga origine da quell'analisi, il passo è troppo lungo.

Si potrà sostenere, e con molte buone ragioni, che i fisici quantistici hanno trascurato gli aspetti statistico-probabilistici della nuova meccanica ma, a mio parere, i motivi di questo dato di fatto vanno cercati in un modo di intendere il compito della spiegazione scientifica che sembra condiviso anche dall'autore. Mi riferisco alla convinzione secondo la quale una descrizione deterministica del mondo è molto più soddisfacente di quanto non lo sia una descrizione probabilistica. Qui va cercata l'origine della scarsa cura prestata alla probabilità in meccanica quantistica e in fisica in generale. Se si vedono le cose in questo modo, la probabilità è solo uno strumento, e pertanto non mette conto studiarla in profondità, vale a dire al di là dei semplici principi che ne regolano l'uso.

Ma una volta chiarito questo punto, bisogna riconoscere che le discussioni connesse alla dualità onda-corpuscolo, unanimemente ritenuta il punto nodale della nuova fisica, precedono – e di un bel pezzo! – quelle sulla probabilità in meccanica quantistica. E sono quelle discussioni, connesse al tentativo di spiegare i fenomeni di interferenza, che segnarono la nascita della meccanica quantistica e non certo queste sulla differente natura della probabilità in microfisica e macrofisica.

Infine, paiono discutibili le modalità dell'esposizione, e in particolare le critiche con cui l'autore sostanzia le sue tesi. È senza dubbio auspicabile che le discussioni siano franche. La franchezza è indispensabile alla chiarezza, ed è pertanto requisito auspicabile in ogni dibattito scientifico, tanto più in quelli legati ai fondamenti delle diverse discipline. Ciò non giustifica tuttavia

l'atteggiamento un po' disdegnoso che l'autore manifesta nel formulare le sue critiche. Un esempio è bastevole: "Si è vero, anche Feynman confonde probabilità congiunta e probabilità condizionata. Ma ciò non fa che confermare la mia tesi che i fisici su un argomento così importante, hanno idee poco chiare. Sembra quasi che i fisici usino molto la teoria delle probabilità, ma la studino poco".

Domenico Costantini

## 7 Appendice (II):

### 8

Lettera del Prof. Franco Fagnola al Prof. Enrico Bellone  
Al Direttore de Le Scienze

Prof. E. Bellone

Piazza della Repubblica 8

20121 MILANO

Genova, 9 marzo 1999

Egregio Professor Bellone,

ho letto la recensione del libro di L. Accardi “Urne e Camaleonti” fatta da D. Costantini e, come studioso di probabilità quantistica, ho trovato fuorviante il modo in cui vengono presentate - ma sarebbe più corretto dire deformate - alcune importanti idee di questa nuova disciplina matematica che ha ottenuto tanti riconoscimenti in Italia e, soprattutto, all'estero.

Spero che mi sarà concesso di pubblicare questo mio commento alla suddetta recensione per riequilibrare un giudizio che mi è parso ingiusto e non documentato e garantire la pluralità di idee ed opinioni.

Sinceramente,

Franco Fagnola  
Università di Genova  
Dipartimento di Matematica  
Via Dodecaneso 35,  
16146 GENOVA

### 9

Intervento che il Prof. Bellone ha rifiutato di pubblicare

Leggendo la recensione del libro di L. Accardi “Urne e Camaleonti” fatta da D. Costantini ho provato una sensazione di sorpresa che non è facile descrivere.

Non essendo né un fisico né un esperto di fondamenti di teoria quantistica non entrerò nel merito della questione se davvero le tesi esposte dal libro chiudano definitivamente il dibattito sui cosiddetti “paradossi” della teoria quantistica.

Tuttavia non c’è dubbio che l’opera, per la sua chiarezza concettuale ed espositiva, è accessibile ai non esperti, anche se la lettura richiede un impegno maggiore rispetto ai libri che si limitano a ripetere delle tesi magari nascondendo le critiche mosse a queste.

La tesi, sostenuta dall’autore con numerosi argomenti specifici e documentazioni, a me, seppure come “non addetto ai lavori”, sembra convincente. Particolarmente chiara è l’analisi delle origini statistiche della cosiddetta “dualità onda-corpuscolo” e del significato probabilistico dei cosiddetti “termini d’interferenza”. Quest’analisi viene sorprendentemente ignorata nella recensione di Costantini il quale, nelle poche e oscure frasi che dedica all’argomento, dà addirittura l’impressione che l’autore non prenda in considerazione il problema. Un fatto che, se fosse vero (ma basta leggere il libro per vedere che non lo è), sarebbe ben singolare in un libro dedicato all’interpretazione della teoria quantistica.

Su questo aspetto della questione dovrebbero intervenire gli esperti del campo (e non mi risulta che Costantini lo sia). Un tale intervento sarebbe molto utile per un lettore (come me) esterno alla problematica dei fondamenti.

Per quanto riguarda invece il mio campo di competenze specifiche (la probabilità quantistica), non posso esimermi dal dissentire completamente dal tentativo di banalizzazione di un’idea profonda e innovativa che apre, per le leggi del caso, prospettive paragonabili solo a quelle apertesesi, per le leggi dello spazio, con la scoperta delle geometrie non euclidee.

Leggendo la recensione di Costantini si ha l’impressione che tutto il problema si riduca al fatto che “... i sostenitori dell’interpretazione ortodossa avrebbero dapprima confuso probabilità congiunte con probabilità subordinate e poi, definito probabilità subordinate servendosi di probabilità congiunte non valutabili sperimentalmente.”

In questo modo Costantini cerca di nascondere proprio uno dei principali contributi della probabilità quantistica: la dimostrazione del fatto che queste “probabilità congiunte”, di cui lui parla, non possono esistere se le

probabilità condizionate (che egli, con terminologia arcaica e desueta, chiama “subordinate”) sono quelle previste dalla teoria quantistica e confermate da esperimenti.

La dimostrazione fa uso della nozione di “invariante statistico” che gioca, per la probabilità, lo stesso ruolo degli “invarianti geometrici”. Infatti questi ultimi permettono di distinguere tra vari modelli di geometria mentre i primi permettono di distinguere tra vari modelli di probabilità, in particolare tra quello classico e quello quantistico. Un esempio elementare ma importante di tali invarianti statistici è illustrato nel libro in modo semplice proprio partendo dall’esperimento delle due fenditure. Questo esempio è sufficiente per dimostrare sperimentalmente la necessità di introdurre modelli non classici di probabilità di cui quello quantistico è un esempio.

Resta da spiegare come mai ci siano voluti tanti secoli per concepire la possibilità di questi modelli alternativi di probabilità. Anche qui, e il libro di Accardi lo spiega bene, la situazione presenta molte analogie con ciò che è accaduto nell’origine delle geometrie non euclidee.

Come probabilista ho trovato illuminante la metafora del camaleonte e la relativa discussione che illustra in modo semplice e convincente la differenza tra i conteggi sulle palline e quelli sui camaleonti e la conseguente differenza tra le rispettive statistiche. L’idea che la statistica delle proprietà stabili, come il calore o il peso delle palline, possa risultare diversa da quella delle proprietà adattive, come il colore dei camaleonti, mi sembra molto naturale e, nello stesso tempo, profonda poiché apre un nuovo orizzonte per chi è interessato ad una riflessione sulle leggi del caso libera da pregiudizi.

Un’ultima osservazione su quello che Costantini chiama malevolmente “un atteggiamento disdegnoso” e nel quale invece ho riscontrato solo un’ironia nei riguardi di certi atteggiamenti abbastanza frequenti del mondo accademico come per esempio quello di deformare banalizzandole le idee di un autore per avere poi gioco facile nel metterle alla berlina.

Costantini rimprovera ad Accardi una critica a Feynman relativa a una confusione tra probabilità congiunta e condizionata, **ma sorprendentemente non si pone il problema se questa sia fondata o no** anche se le motivazioni di questa critica sono esposte molto chiaramente e convincentemente nel libro di Accardi.

Infine, sul fatto che i fisici studino poco la probabilità, vorrei invitarlo a fare un’indagine su quante università italiane offrano un corso di probabilità nel piano di studi del Corso di Laurea in Fisica. Questo forse lo aiuterebbe a distinguere tra i fatti e le allusioni malevole.

Franco Fagnola

## 10 Appendice (III):

### 11

Lettera del Prof. Enrico Bellone al Prof. Franco Fagnola

Le Scienze S.p.A.  
editrice Italiana di Scientific American  
20121 Milano, p.zza della Repubblica, 8  
tel. 29001753 ?  
telefax 6552908  
email: redazione@lescienze.it

Egr. Prof.  
Franco Fagnola  
Dipartimento di Matematica  
Via Dodecaneso, 35  
16146 GENOVA  
Milano, 29 marzo 1999

Caro professor Fagnola,

ho letto attentamente il suo intervento critico nei confronti della recensione fatta dal Prof. Costantini e devo subito confessarle di trovarmi in una situazione di relativo imbarazzo, visto che lei esordisce autodefinendosi non esperto di fondamenti di teoria quantistica. Lei stesso, poche righe dopo, si augura che intervengano in proposito “gli esperti del campo”.

Sono d'accordo con lei, anche se il mio accordo diventa molto più debole di fronte alla sua tesi secondo cui per le teorie sul caso si sta assistendo a una rivoluzione paragonabile a quella che le geometrie non euclidee hanno prodotto a proposito delle leggi sullo spazio.

L'accordo poi svanisce del tutto quando lei fa riferimento a tematiche sulle quali, se non ho mal capito, Feynmann avrebbe avuto idee non fondate. In poche parole, lei critica un recensore di un libro accusandolo di non essere un esperto nel campo ma ammettendo la propria mancanza di competenze professionali.

Le scrivo queste annotazioni per farle notare che, da un lato, non sto difendendo Costantini, ma dall'altro, non posso pubblicare una replica così tardiva il cui autore ammette la propria parziale incompetenza.

La ringrazio comunque per avere pensato a “Le Scienze” e la prego di gradire i miei più cordiali saluti.

Prof. Enrico Bellone  
direttore

## 12 Appendice (IV):

### 13

Enrico Beltrametti e la ricostruzione della storia

A partire dal 1982 vari autori di differente provenienza (Fine [Fine82a], [Fine82b], Mermin [Merm82a], [Merm82b], Pitovsky [Pito89], ...) cominciarono a pubblicare una serie di varianti dei risultati e delle tesi della probabilità quantistica, ovviamente senza citazioni sulla loro origine. In effetti questi autori si occupano solo degli invarianti kolmogoroviani (problema lineare) e non considerano il caso più difficile e profondo degli invarianti Hilbertiani (problema non lineare) che era già stato formulato e risolto, sia pure in un caso particolare, nel lavoro [AcFe81].

In Italia le idee della probabilità quantistica sul tema dei fondamenti, cominciarono a diffondersi circa 10 anni dopo, cioè negli anni 1990, nel modo seguente.

Nel 1991, in un convegno a Luino, Beltrametti espose le idee standard sulle implicazioni della disuguaglianza di Bell per il problema del realismo locale. Alla fine della sua comunicazione feci un intervento nel quale dicevo che non era professionalmente serio, dopo circa dieci anni di sviluppo della probabilità quantistica, fare finta che tali sviluppi non esistessero e ignorare le sue obiezioni al ragionamento di Bell, obiezioni fondate non su arbitrarie opinioni, ma su precisi argomenti matematici.

Dopo il convegno Beltrametti mi scrisse chiedendomi di inviargli i principali lavori dove venivano sviluppate le tesi della probabilità quantistica. Seguì una corrispondenza, nella quale discutemmo principalmente l'invariante statistico dell'esperimento delle due fenditure.

Nell'ultima lettera di tale corrispondenza (tutta disponibile, per chi fosse interessato, sulla pagina web del Centro Volterra) Beltrametti dice tra l'altro: **“... ho ricevuto i tuoi lavori e te ne ringrazio molto. Essi rappresentano senza dubbio un passo molto importante per meglio comprendere la natura della meccanica quantistica. ...”**.

A conferma di tale giudizio, dal 1991 Beltrametti inizia a pubblicare una serie di lavori [Belt91] da solo e in collaborazione con altri autori, che altro non sono se non la traduzione del programma degli invarianti statistici nel contesto delle logiche quantistiche.

Inizialmente, sia pure in modo ambiguo e contorto, viene attribuito un minimo riconoscimento al contributo della probabilità quantistica:

“... Are there criteria able to decide whether a set of empirically measured probabilities of given events admits a classical or, alternatively, a quantum description? Conditions for classical representability were already formulated by George Boole in 1862 [1] (he called them “conditions of possible experience”) but the above question has been recently posed especially by Accardi who found answers in the form of special functions of the given probabilities, called “statistical invariants”, whose values are relevant to decide about the classical or the quantum representability [2–5]; more recently Pitowski added new relevant results by his “polytope approach”. The well known issue of Bell’s inequalities can be viewed as a particular case, in the sense of a condition for classical representability of probabilities pertaining to the events of the EPR–correlation. ...” ([BeCa94], p. 50)

(a questo proposito cf. anche la sezione 5 del lavoro [Belt92]). Tuttavia ben presto il tono cambia: ogni accenno alla probabilità quantistica scompare, la teoria degli invarianti statistici viene attribuita a Boole e il suo significato per i fondamenti della teoria quantistica si riduce al fatto che essa genera “Bell type inequalities” [BeDelNMa93]:

“... (Abstract) The problem of the intrinsic characterization of classical probabilities is considered. A theorem is given which specifies when an inequality of the form  $0 \leq L \leq 1$ , where  $L$  is a linear combination of the observed probabilities, is a condition for classical representability. An algorithm, based on Boole’s theory, that generates Bell–type inequalities for given empirical situations is illustrated. ...

... (Introduction) The difference between classical and quantum behaviour can be traced back to certain constraints on the statistics of the observed phenomena, that mark the boundary between the classical and the quantum case. Bell inequalities are the paradigmatic example of such constraints, when the statistics under discussion is the one arising from the so–called EPR correlation.

The problem of defining the boundary that marks the possibility, or impossibility, of representing classically the observed probabilities has been widely studied, but still has open questions. It can be already recognized in Boole’s study (1862) of the “conditions of possible experience”, and has received great attention after Bell’s work on hidden variable interpretations of the EPR correlation. A geometric characterization of the conditions of classical representability has been provided by the remarkable polytope ap-

proach by Pitowsky (1989), suggesting that these conditions can in general be written as inequalities of the form  $0 \leq L \leq 1$  where  $L$  is a linear combination with real coefficients of the probabilities  $p_i$  of the  $n$  events under examination and the joint probabilities  $p_{ij}, p_{ijk}, \dots, p_{1\dots n}$ . We shall call them Bell-type inequalities, noticing that the usual EPR correlation corresponds to  $n = 4$ . Pitowsky has also shown that the problem of making explicit these inequalities has a complexity that increases exponentially with  $n$ . Partial overcomings of this difficulty have however been obtained (Beltrametti and Maczyński, 1991, 1993). (p. 35) ...”

Come esempio di ricostruzione Orwelliana della storia il brano appena citato è davvero illuminante. È come dire che Euclide è l’inventore della geometria non Euclidea poichè il suo famoso teorema sulla somma degli angoli interni di un triangolo si può interpretare, **a posteriori e alla luce di quanto si è poi compreso circa duemila anni dopo**, come una condizione necessaria per l’esistenza di un modello euclideo per la terna dei suddetti angoli!

Beltrametti sa benissimo che la transizione dalla geometria euclidea a quella non euclidea, e similmente la transizione dalla probabilità classica a quella non Kolmogoroviana, **avviene quando il cambio di prospettiva tra le due diventa cosciente**: per Euclide, se tre angoli non soddisfano la sua condizione, essi non sono gli angoli interni di alcun triangolo; per Gauss essi sono gli angoli interni di un triangolo non euclideo. Analogamente per Boole un insieme di probabilità che non soddisfa le sue condizioni non definisce alcun modello probabilistico; per la probabilità quantistica definisce un modello probabilistico non Kolmogoroviano.

Ma la plausibilità storica è evidentemente l’ultima delle preoccupazioni degli autori del lavoro [BeDelNMa93]. Quello che essi vogliono dire riguarda il presente e il loro messaggio è tanto chiaro da non richiedere ulteriori spiegazioni. Puntualmente Pitowsky [Pito94] raccoglie questo messaggio e ricama sul tema.

Il gioco di squadra continua con l’osannante accenno al “... remarkable polytope approach by Pitowsky (1989) ...”. Di cosa si tratta?

Nel lavoro [AcFe81] si spiega chiaramente che il problema degli invarianti kolmogoroviani si riduce alla ricerca di condizioni affinché un sistema lineare ammetta soluzioni tutte comprese nell’intervallo  $[0, 1]$ . Una volta capito questo il problema si banalizza teoricamente ma può rimanere arduo computazionalmente. Non risulta che l’impostazione in termini di politopi abbia condotto ad alcun vantaggio concreto (computazionale o concettuale) e co-

munque tale impostazione non è affatto dovuta a Pitowsky, bensì a Gutkowski, Masotto e Valdes-Franco [GutkVaFr84], [GuMaVaFr79] che la avevano sviluppata almeno dieci anni prima.

Già nelle poche righe citate sopra le “sindromi (8) e (11)” (cf. la sezione (4)) sono evidenti. Le “sindromi” (1) e (2) e naturalmente (9) si vedono invece nel tentativo di rimpiazzare d’autorità il termine “invarianti statistici” con quello “Bell-type inequalities” (v. l’Abstract). Qui non si capisce se sia l’arroganza a offuscare l’illogicità o viceversa.

Da una parte Beltrametti finalmente accetta l’idea che “... The difference between classical and quantum behaviour can be traced back to certain constraints on the statistics of the observed phenomena, that mark the boundary between the classical and the quantum case. ...”, cioè la tesi della probabilità quantistica.

D’altra parte l’affermazione immediatamente successiva: “... Bell inequalities are the paradigmatic example of such constraints, ...” mostra una sovrana noncuranza del fatto storico che, prima del lavoro di Bell, per 40 anni, il “... paradigmatic example of such constraints ...” è stato l’esperimento delle due fenditure.

Ne segue che, secondo la storia e la logica, è la disuguaglianza di Bell ad essere un “2-slit-type inequality” e non l’esperimento delle 2 fenditure ad essere una “Bell-type inequality”.

Ma accettare questo dato di fatto equivarrebbe a riconoscere la validità della tesi della probabilità quantistica, che queste cose le stava ripetendo ormai da 13 anni (all’epoca dell’articolo [BeDelNMa93]). Evidentemente questa ipotesi non viene ritenuta accettabile dagli autori che puntano invece sull’alternativa Orwelliana: riscrivere la storia e affidarsi alla corporazione affinché la verità del gruppo si affermi sulla verità dei documenti e dei fatti.

La sintesi di tutte le “sindromi” elencate nella sezione (4) si può trovare a pag. 96 di [Belt00] dove il libro [Ac97] viene presentato come segue: “... Sotto forma di dialogo si discutono gli aspetti probabilistici della teoria quantistica con particolare enfasi sul punto di vista caro all’autore. ...”

Secondo i migliori canoni dell’irrazionalismo allusivo ogni confronto sui contenuti è accuratamente evitato: non una parola viene spesa per chiarire se questo punto di vista è “... caro all’autore. ...” perchè è sostenuto dalla matematica, dagli esperimenti e dal buon senso oppure perchè l’autore è un mentecatto un pò maniaco che si è fissato su un punto irrilevante. Ma che importanza può mai avere per “Le Scienze” il confronto intellettuale sui contenuti? Bellone docet: il ruolo di “Le Scienze” non è quello culturale

di aiutare il lettore a districarsi nella selva di banalità gergali e formali, che si continuano a pubblicare sui fondamenti della teoria quantistica, e a distinguere tra le idee davvero innovative e la noiosa e acritica ripetizione di materiale di routine, riprodotto per clonazione in centinaia di libri e articoli.

Il vero ruolo di “Le Scienze” (gestione Bellone) è sociologico: occorre indottrinare il lettore medio, con i metodi standard della peggiore propaganda commerciale, inculcando nella sua mente la gerarchia degli autori cari all’establishment che controlla la rivista e quella degli autori di cui è opportuno liberarsi con un’alzata di spalle e un sorriso di sufficienza.

Un lettore esperto della letteratura potrebbe trovare una contraddizione tra la produzione scientifica di Beltrametti negli ultimi anni e quello che egli scrive su “Le Scienze”.

Dato che, per un certo numero di anni a partire dal 1991, Beltrametti ha dedicato gran parte della sua produzione scientifica al tentativo di importare nelle logiche quantistiche alcune delle idee e tecniche della probabilità quantistica, ne segue che questo “... punto di vista caro all’autore ...” ha almeno il merito di avere ispirato la produzione scientifica di personaggi che non sono gli ultimi arrivati sulla scena dei fondamenti della fisica quantistica. Mentre dalle pubblicazioni non risulta niente di analogo per nessuno dei numerosissimi altri punti di vista o altre proposte sviluppate negli ultimi decenni. Come mai questa astiosa allusività per una linea che ha direttamente ispirato la sua produzione scientifica contrapposta all’uso della fanfara accademica al massimo volume per linee di cui non si può dire nulla del genere?

Un illuminante esempio dei metodi usati da “Le Scienze” in questa operazione d’indottrinamento si trova a pag. 8 (terza colonna) di [Belt00] dove, descrivendo l’esperimento delle due fenditure, Beltrametti usa la notazione che in tutti i testi, anche elementarissimi, di probabilità si usa per le probabilità congiunte e scrive: “....

$$p(D) = p(T \text{ e } D) + p(R \text{ e } D) \quad (18)$$

... Possiamo leggere questo risultato dicendo che la probabilità di giungere in  $D$  dovrebbe essere la somma della probabilità di giungervi attraverso il percorso  $R$  più la probabilità di giungervi attraverso il percorso  $T$ . ....”

Fin qui è tutto banalmente vero, così come è banalmente vero che, nella lingua italiana, la circonlocuzione “in altre parole” si usa quando si vuole ripetere in modo diverso ciò che si è appena detto. Immagino che un lettore di una rivista di divulgazione scientifica si aspetti che il linguaggio venga

usato in essa nel suo corrente significato. Evidentemente Beltrametti non è dello stesso parere. Infatti egli subito dopo aggiunge:

“... In altre parole, preso un intervallo di tempo  $t$  sufficientemente grande, il numero di fotoni che in tale tempo  $t$  arrivano in  $D$  dovrebbe essere la somma del numero di fotoni che durante un tempo  $t$  vi arrivano avendo chiuso il percorso  $R$ , più il numero di fotoni che nel tempo  $t$  vi arrivano avendo chiuso il percorso  $T$ . ...”

Ma questo testo esprime una situazione completamente diversa da quella descritta sia dalla formula (18) sia dalle parole che seguono immediatamente tale formula, una situazione che, tradotta in formule, si dovrebbe scrivere nella forma:

$$p(D) = p(D \mid T) + p(D \mid R) \quad (19)$$

dove  $p(D \mid T)$  (risp.  $p(D \mid R)$ ) è la probabilità condizionata di giungere in  $D$  attraverso il percorso  $T$  (risp.  $R$ ). Infatti è chiaro che, quando si chiude uno dei due percorsi, si sta **condizionando** la particella a passare per l'altro e quindi le probabilità coinvolte in questo caso non sono quelle congiunte, ma quelle condizionate.

E' importante osservare che la formula (19) non solo è diversa dalla (18), ma è tanto banalmente falsa quanto la (18) è banalmente vera.

Questa distinzione è accuratamente nascosta nell'articolo di Beltrametti il quale, dopo aver truccato le carte, si compiace di stupire didascalicamente il lettore:

“... Ma la natura riesce a rivelarsi sempre più fantasiosa delle nostre aspettative: il risultato empirico non è infatti quello che avevamo sopra immaginato: vale a dire, la probabilità osservata di giungere in  $D$  non è la somma delle probabilità corrispondenti ai due percorsi  $T$  e  $R$ . ...”.

Quello che Beltrametti nasconde al lettore (e poco importa se lo faccia per ignoranza o per mala fede) è che “... quello che avevamo sopra immaginato ...” riguarda la formula (18) (banalmente vera) mentre quella che viene falsificata dal “risultato empirico ... vale a dire, la probabilità osservata ... ” è la formula (19) (banalmente falsa).

In altre parole (ora è davvero il caso di dirlo!) Beltrametti:

(i) prima mette il lettore su una falsa strada scrivendo una formula vera, ma che non corrisponde a ciò che si misura sperimentalmente

(ii) poi commenta il significato di questa formula suscitando nella mente del lettore l'idea che la formula sia ovvia e che quindi i dati sperimentali dovrebbero soddisfarla

(iii) poi annuncia che rispiegherà, con altre parole, il significato della formula appena commentata

(iv) tuttavia, invece di fare ciò che ha promesso, descrive una situazione completamente diversa da quella spiegata prima e che si traduce in una formula tanto poco ovvia da essere falsa (formula che peraltro egli si guarda bene dall'esplicitare)

(v) infine completa il gioco di prestigio tentando di suscitare l'ammirato stupore del lettore rivelandogli che i dati sperimentali non soddisfano la formula che lui riteneva ovvia, ma senza svelargli che la sensazione di ovvietà nasceva dal primo significato della formula mentre quella che non è soddisfatta dai dati sperimentali è la seconda.

Ma se Beltrametti non imbrogliasse le acque, il suo gioco a effetto sarebbe rovinato. Infatti perchè mai il lettore dovrebbe stupirsi del fatto che una formula, falsa matematicamente e completamente anti-intuitiva fisicamente, è anche falsificata dagli esperimenti?

Se questo non è l'equivalente culturale del gioco delle tre tavolette, mi chiedo che cosa si possa definire tale.

Giochi di questo genere possono continuare fino a che il mutuo consenso della corporazione riesce a far quadrato intorno ad essi ed a impedire, a chi tenta di farlo, di far arrivare a un pubblico abbastanza vasto il messaggio che il re è nudo.

A tal fine occorre "... andarci giù duro ..." con le recensioni di certi libri, emarginare alcuni individui dai convegni e dai luoghi di confronto pubblico, impedire che certi articoli arrivino alle riviste che "creano tendenze".

Per questo motivo nessuno entrerà nel merito delle critiche sollevate nel presente lavoro così come nessuno è entrato nel merito delle tesi della probabilità quantistica.

Continueranno a fuggire il confronto aperto e pubblico delle idee e ad usare le armi del pettegolezzo, delle allusioni, di un malinteso spirito di corpo, del far leva su meschini interessi individuali e di gruppo, del controllo delle

riviste e dei media divulgativi, per isolare le tesi ritenute scomode e impedir loro di esprimersi.

Vorrei concludere con un'osservazione. Nei rapporti tra intellettuali e potere due tipi di tradizione sono ricorrenti, e riflettono la dialettica tra la **gestione** dei valori dichiarati e la **realizzazione** dei suddetti:

– l'intellettuale come cortigiano e come rappresentante di un gruppo in quanto entità sociologica

– l'intellettuale come coscienza critica di un gruppo che diventa rappresentante in quanto realizza in misura maggiore di altri i valori dichiarati dal gruppo stesso

Credo che oggi questa seconda tradizione sia seriamente minacciata e che, rispetto a quanto avventuroso nel passato stia emergendo un elemento nuovo e preoccupante: la minaccia non viene più solo dall'esterno del mondo scientifico, ma purtroppo anche dal suo interno.

## 14 Bibliography

[Ac81a] Accardi L.: Topics in quantum probability, Phys. Rep. 77 (1981) 169-192

[Ac81b] Accardi L.: Probabilità e teoria quantistica. Physis 23 (1981) 485-524

[AcFe81] Accardi L., Fedullo A.: On the statistical meaning of complex numbers in quantum theory, Lettere al Nuovo Cimento 34 (1982) 161-172  
University of Salerno preprint May (1981)

[Ac81d] Accardi L.: Quantum theory and nonkolmogorovian probability, In: Stochastic processes in quantum theory and statistical physics, ed. S. Albeverio et al., Springer LNP n.173 (1982) 1-18

[Ac82a] Accardi L.: Foundations of quantum probability. Rendiconti del Seminario Matematico dell'Università e del Politecnico, Torino (1982) 249-273

[Ac82c] Accardi L.: Some trends and problems in quantum probability, In: Quantum probability and applications to the quantum theory of irrever-

sible processes, L. Accardi, A. Frigerio and V. Gorini (eds.) Springer LNM n. 1055 (1984) 1-19

[Ac85] L. Accardi: Non kolmogorovian probabilistic models and quantum theory. invited talk given by L. Accardi the 45-th ISI Conference, Discus-sant J.S. Watson, Amsterdam, August (1985), ISI Bulletin. rielaborated by: [AcRe94] L. Accardi and E. Reviglio under the title: Quantum Probability and the Interpretation of Quantum Theory. Volterra Preprint N. 166 (1994)

[Ac93] L. Accardi: On the axioms of probability, in: The Foundations of Quantum Mechanics, Proceedings of the Lecce Conference (1993) C. Garola, A. Rossi (eds.) Kluwer (1995) 1-18 Volterra Preprint N. 194 November 1994

[Ac95a] L. Accardi: Can mathematics help solving the interpretational problems of quantum theory? *Il Nuovo Cimento* 110 B (1995) 685-721 cf. also: Mesoscopic Physics and fundamental problems in quantum mechanics, C.Di Castro, F.Guerra, G. Jona-Lasinio (eds.) (1995)

[Ac83a] Accardi L.: The probabilistic roots of the quantum mechanical paradoxes. In : The wave-particle dualism, S. Diner, G. Lochak, and F. Selleri (eds.) Reidel, Dordrecht (1984) 297-330

[Ac86] Accardi L.: Foundations of Quantum Mechanics : a quantum prob-abilistic approach. in *The Nature of Quantum Paradoxes*; eds. G.Tarozzi, A. van der Merwe Reidel (1988) 257-323 Preprint Dipartimento Di Matema-tica, Università di Roma Torvergata (1986)

[Ac93] L. Accardi: Einstein-Bohr: one all, in: The interpretation of quan-tum theory: where do we stand? *Acta Enciclopedica*, Istituto dell'Enciclo-pedia Italiana (1994) 95-115 Volterra preprint N. 174 (1993)

[Ac97] Luigi Accardi: Urne e camaleonti. Dialogo sulla realtà, le leggi del caso e la teoria quantistica. *Il Saggiatore* (1997); russian edition, *Regular and Chaotic dynamics* (2003); japanese edition, ed. Makino (2003); English edition (traduzione di Daniele Tartaglia), World Scientific (2003)

[AcLuVo02] Accardi L., Y.G. Lu, I. Volovich: Quantum Theory and its Stochastic Limit. Springer Verlag (2002) Japanese translation, Tokyo-

Springer (2002)

[AcKo00b] L. Accardi, S.V. Kozyrev: Quantum interacting particle systems, Lectures given at the: Volterra–CIRM International School: Quantum interacting particle systems , Levico Terme, 23–29 September 2000, in: Accardi L., F. Fagnola (eds.) “Quantum interacting particle systems”, World Scientific (2002) Preprint Volterra, N. 431 September (2000)

[QP - PQ] Series: Quantum Probability and Related Topics: [QP–0] (1978), [QP–I, II, III] Springer LNM N.1055 (1984), N. 1136 (1986), N. 1033 (1987), N. 1396 (1989), N. 1442 (1990); [QP–VI, . . . , XVII] World Scientific (1991, . . . , 2003)

[AcImRe01] L.Accardi, K.Imafuku, M.Regoli: On the physical meaning of the EPR–chameleon experiment, Infinite dimensional analysis, quantum probability and related topics, 5 N. 1 (2002) 1–20 quant-ph/0112067 Volterra Preprint N. 494 December (2001) N. 494

[AcImRe03a] Luigi Accardi, , Kentaro Imafuku, Massimo Regoli: Adaptive dynamical systems and the EPR–chameleon experiment, in: Proceedings of the Conference: Foundation of Probability and Physics-2, Vaxjo, June 2-7 (2002), to appear (2003)

[Bello94] Bellone E.: Perché dovremmo rileggere “Il Saggiatorè”? LXXX Congresso Nazionale Società Italiana di Fisica (1994)

[Belt91] Beltrametti E.: On the problem of classical and non-classical probabilities. J. Math. Phys. 32 (5) (1991) 1280–1286

[Belt92] Beltrametti E.: Recent facts in quantum logic surroundings. Proceedings Symposium on the Foundations of quantum mechanics, Colonia

[BeCa94] Beltrametti E.G., Cassinelli G.: Quantum Measurement and Probability, Ed. L. Accardi, Istituto della Enciclopedia Italiana, novembre (1994)

[BeDelNMa93] Beltrametti E., C. Del Noce, M.J. Maczynsky, Characterization and deduction of Bell–type inequalities. in: The foundations of

quantum mechanics – Historical analysis and open questions, Lecce 1993, ed. C.Garola, A. Rossi, Kluwer (1995)

[Belt00] Beltrametti E. (a cura di): Fenomeni Quantistici, Le Scienze, Quaderni N. 112 (2000)

[DBStr01] De Baere W., Struyve W.: Subquantum nonreproducibility and the complete local description of physical reality Preprint (2001)

[DMDBMa01] de Muynck W.M., De Baere W., Martens H.: Interpretations of quantum mechanics, joint measurement of incompatible observables, and counterfactual definiteness Foundations of Physics, 24, n. 12 (1994) 1589–1663

[Fine82a] Fine A.: Hidden Variables, Joint Probability, and the Bell Inequalities Physical Review Letters, 48 no. 5 (1982)

fqm [Fine82b] Fine A.: Joint Distributions, Quantum Correlations and Commuting Observables J. Math Phys. 23 no. 7 (1982)

[GutkVaFr84] Gutkowski D., Valdes Franco M.V.: Kolmogorovian statistical invariants for the Aspect -Rapisarda experiment, SLNM 1055 [QP-V] (ed) Accardi L., Frigerio A., Gorini V. (1984) 146–152

[Jamm74] Jammer M. The philosophy of quantum mechanics. Wiley (1974)

[Merm82a] Mermin N.D.: Joint Distributions and Local Realism in the Higher-Spin Einstein-Podolsky-Rosen Experiment, Reprinted from Foundations of physics 12 (1982) 101–135

[Merm82b] Mermin N.D.: Comment on “Hidden Variables, Joint Probability, and the Bell Inequalities”, Physical review letters 49 (1982) 242–243

[Pito94] Pitowsky I.: George Boolès ‘conditions of possible experience and the quantum puzzle, Brit. J. Phil. Sci. 45 (1994), 95–125

[Pito89] Pitowsky I.: Quantum probability and quantum logic, Springer LNP N. 321 (1989)