

---

# Percorsi

---

## ATTUALITÀ DEI PARADOSSI DI COPENHAGEN

**A. Orefice**

*Università di Milano*

**R. Giovanelli**

*Università di Parma*

Il filo che, nel labirinto della Fisica moderna, collega i successivi stadi di sviluppo della Meccanica Quantistica (MQ) ha un fascino ipnotico che induce la maggior parte degli scienziati ad accettarlo come l'unica sequenza logicamente possibile.

Vorremmo ripercorre qui, in modo obiettivo, i «nodi» principali di tale filo logico.

Ricordiamo, per cominciare, che la *prima* teoria dei quanti cercava di non scostarsi troppo dalla fisica classica, cui si limitava ad associare alcune «ricette» nonclassiche. Essa era basata, sostanzialmente, sulla discretizzazione spettrale di Planck, sull'atomo di Bohr-Sommerfeld e sull'ipotesi dei quanti di luce formulata da Einstein per spiegare l'effetto fotoelettrico. La descrizione dello spettro del corpo nero richiedeva, di per sé, solo l'emissione di «fiotti» energetici  $h\nu$ ; e anche le transizioni orbitali previste dall'atomo di Bohr apparivano spiegabili senza concepire tali «fiotti» come particelle. Per l'interpretazione dell'effetto fotoelettrico, però, data l'evidenza di eventi fortemente localizzati, fu ipotizzata l'esistenza di «granuli» puntiformi di energia elettromagnetica (che, nel 1926, vennero battezzati *fotoni*); e l'effetto Compton, scoperto nel 1923–24, fu decisivo per l'adozione generale di tale punto di vista. Va per altro osservato che le onde elettromagnetiche trasportano energia e quantità di moto, e vengono emesse (e/o assorbite) da oggetti di dimensioni minori, o dell'ordine di grandezza, della loro lunghezza d'onda. Benché già la fisica classica sia in grado di prevedere

tale fatto, l'idea della *corpuscolarità* fotonica appare quindi suggerita dal fatto che, quando si opera su radiazioni di altissima frequenza, le porzioni di spazio entro cui vanno applicate le consuete regole di conservazione di momento ed energia sono (rispetto allo sperimentatore) piccolissime. Nessun fenomeno d'apparenza puntiforme si osserva, in effetti, per lunghezze d'onda elevate.

La fase successiva della teoria dei quanti fu quella «matriciale», proposta nel 1925 da Heisenberg. Questi, influenzato dallo *Zeitgeist* mitteleuropeo dei primi decenni del secolo, sostenne che, non avendo senso parlare di ciò che non può essere osservato sperimentalmente, conviene limitarsi a raccogliere i dati empirici in tabelle (le «matrici», appunto), senza tentarne ulteriori e fuorvianti interpretazioni. Il suo pensiero si precisò nel 1927 con la formulazione del Principio d'Indeterminazione, che si riferiva, originariamente, alla perturbazione apportata dall'osservatore stesso al sistema osservato. Quando si misura la posizione ( $x$ ) d'una particella, infatti, se ne perturba e rende parzialmente indeterminata la quantità di moto ( $p$ ), e viceversa; e il prodotto delle due indeterminazioni risulta non inferiore alla costante di Planck, secondo la famosa relazione:

$$(1) \quad \Delta p \Delta x \geq h .$$

Benché, sulle prime, Heisenberg non intendesse porre in dubbio l'esistenza di una precisa realtà fisica sottostante, il suo approccio portò ben presto (per la prima volta nella storia della Fisica, ma marchiandola per sempre) all'idea, accettata dalla maggioranza dei fisici, di un limite intrinseco di conoscibilità del reale.

Possiamo notare sin d'ora che la relazione (1) è figlia della sua epoca. Mentre, infatti, ad esempio, il limite teorico di risoluzione di un

microscopio era ritenuto, all'epoca di Heisenberg, pari a  $\lambda/2$ , e fu da lui utilizzato in modo essenziale nel più importante dei ragionamenti che conducono alla (1), la risoluzione spaziale ottenuta in anni recenti<sup>(1)</sup> è inferiore a  $\lambda/50$ , il che riduce notevolmente le limitazioni imposte da tale relazione. Nel 1955, inoltre, Mössbauer scoprì un effetto fisico in cui un nucleo di un cristallo radioattivo può emettere un quanto di radiazione  $\gamma$  senza rinculare (dimostrando che un evento misurabile, e quindi una misura, può lasciare invariato lo stato del sistema osservato) e senza che tale radiazione presenti alcuno spostamento Doppler (segnalando l'apparente immobilità dei nuclei emittenti, difficilmente conciliabile con il principio di indeterminazione). Le implicazioni dell'effetto Mössbauer<sup>(2)</sup> rimangono pertanto, nonostante le spiegazioni correnti, uno dei problemi cruciali della fisica d'oggi.

Una svolta fondamentale avvenne negli stessi anni 1924–27, come sviluppo dell'intuizione di de Broglie delle *onde di materia*: onde ambientate nello spazio fisico (presto osservate negli esperimenti di diffrazione di Davisson e Germer) che ben si prestavano, tra l'altro, ad interpretare la quantizzazione orbitale dell'atomo di Bohr, presentandola come la semplice richiesta di un numero intero di lunghezze d'onda elettroniche lungo le orbite «lecite». L'idea di de Broglie venne subito raccolta e sviluppata da Schrödinger, ma le difficoltà concettuali ripresero ad aumentare quando si passò all'interpretazione probabilistica di Born, divenuta nota come *interpretazione di Copenhagen*. Nell'ambito di tale interpretazione la soluzione,  $\Psi$ , dell'equazione di Schrödinger, priva (di per sé) di ogni significato fisico diretto, è ambientata in uno spazio astratto — quello delle configurazioni. Nonostante ciò, è proprio la  $\Psi$  che, nello spazio fisico, propaga, interferisce, diffrange e trasporta ogni informazione di cui sia lecito parlare: tipicamente, non è possibile parlare di *traiettoria* delle particelle, dato che la  $\Psi$  non prevede nulla del genere. Tale concetto fu ribadito, nel 1932, dal *Teorema di Von Neumann*, la leggendaria *impossibility proof* secondo cui non può essere costruita alcuna teoria coerente basata sull'esistenza di parametri fisici che la  $\Psi$  non conosca, e quindi *nascosti* (quali sarebbero, ad esempio, quelli richiesti dalla descrizione di una ben precisa traiettoria).

Secondo l'interpretazione «ortodossa», insomma, da Born a Von Neumann, la natura probabilistica della  $\Psi$  non corrisponde ad un *deficit*

di informazione, ma a quella stessa indeterminazione intrinseca della realtà fisica che già Heisenberg aveva suggerito. Di certo, il Teorema di Von Neumann (contenuto in un poco accessibile volume<sup>(3)</sup> scritto — in tedesco — in anni politicamente agitatissimi) riuscì a saggio un'intera generazione di fisici, che forse rinunciò a verificarlo. Che il Teorema fosse almeno in parte infondato cominciò a palesarsi nel 1952, quando Bohm costruì una teoria perfettamente coerente<sup>(4)</sup> ove il concetto di traiettoria delle particelle veniva recuperato in pieno, introducendo così delle *variabili nascoste* che contraddicevano, nei fatti, le asserzioni di Von Neumann. Tutte le *teorie di variabili nascoste* risultarono però, per lungo tempo, incapaci di prevedere fenomenologie diverse da quelle già previste dalla teoria ufficiale. Il fatto, quindi, che tali teorie fossero *possibili*, e intuitivamente più accettabili, fu ritenuto irrilevante.

Ricordiamo, a questo punto, che il Principio d'Indeterminazione può esser messo<sup>(5)</sup> nella forma

$$(2) \quad \Delta N \Delta \Phi \geq 1,$$

ove  $\Delta N$ ,  $\Delta \Phi$  sono le indeterminazioni, rispettivamente, del numero  $N$  di particelle componenti il sistema fisico studiato e della fase  $\Phi$  dell'onda ad esso associata. Secondo la (2), se  $N$  è noto con esattezza (e quindi  $\Delta N = 0$ ) dev'essere  $\Delta \Phi = \infty$ , il che fa perdere di vista completamente, a causa della totale indeterminazione della fase, la natura ondulatoria del sistema descritto. Quando, viceversa, si vogliono descrivere fenomeni di interferenza o diffrazione, le fasi delle onde dovranno essere note con precisione, rendendo, così, altamente indeterminato il numero di particelle del sistema.

Tenendo presente la (2), ci si può chiedere se sia lecito ritenere, come normalmente si fa nell'ambito dell'interpretazione di Copenhagen, che l'equazione di Schrödinger possa descrivere il comportamento ondulatorio di una particella singola ( $N = 1$ ;  $\Delta N = 0$ ). La cosa è d'importanza fondamentale: se si ha a che fare, infatti, con *molte particelle*, l'uso dell'equazione di Schrödinger permette, semplicemente, di prevedere quale frazione di esse sarà trovata in ognuno degli autostati possibili. Se invece si ha a che fare con *una sola particella* l'interpretazione ortodossa ci dice che tale particella vive (se non osservata) in una sovrapposizione di tutti i suoi autostati, ed è *l'osservatore* il re-

sponsabile del suo *collassare* (secondo probabilità ben precise e calcolabili) su un solo autostato — quello osservato.

C'è chi, come De Witt ed Everett<sup>(6)</sup>, prende questa sovrapposizione alla lettera, e afferma che l'Universo è, in realtà, un «Multi-verso» di realtà parallele in continua biforcazione. C'è poi chi ha elaborato la teoria della *decoerenza*<sup>(7)</sup>, secondo cui l'Universo è permeato da *disturbi* che, comportandosi come *osservatori quantici*, fanno incessantemente collassare ogni sistema fisico su uno solo dei suoi autostati, dando alla realtà la rassicurante unicità classica cui siamo abituati.

Ma torniamo ora, più in dettaglio, all'interpretazione di Copenhagen relativa al comportamento delle particelle singole. Secondo tale interpretazione, un nucleo radioattivo vive, se non osservato, in una miscela di due stati possibili: di nucleo decaduto, o non decaduto. Se il nucleo può attivare, decadendo, un meccanismo che immette del gas velenoso nella scatola ov'è racchiuso il famoso *gatto di Schrödinger*, la povera bestia rimane (se non osservata) in uno stato misto morto/vivo, e sarà l'osservatore, guardando nella scatola, a far collassare il nucleo nello stato di decaduto o no, e quindi il gatto nello stato di morto o di vivo.

Nello stesso ordine di idee, si considerino le frange d'interferenza generate su uno schermo da un'onda che vi incida passando, previamente, attraverso due sottili fenditure. Se la sorgente luminosa è così debole da emettere solo una particella alla volta, come può tale particella sapere, passando attraverso una sola delle due fenditure, che esiste anche l'altra fenditura, e andarsi a disporre sullo schermo in una delle frange luminose dovute proprio alla presenza di *due* fenditure? È possibile che la particella, indivisibile, passi per entrambe le fenditure, interferendo con sé stessa? Secondo l'interpretazione di Copenhagen, è proprio ciò che accade. Tali paradossi, però — il gatto di Schrödinger e l'autointerferenza di una particella — potrebbero forse essere evitati se si tenesse conto della (2), che pare escludere la liceità di trattare ondulatoriamente particelle singole. È interessante citare, a questo proposito, una serie di esperimenti effettuati presso l'École Normale Supérieure di Parigi da Haroche *et al.*<sup>(8)</sup> sull'osservabilità di singoli fotoni, in modo tale da non distruggerli per assorbimento, cioè mediante esperienze dette «di QND» (*Quantum Non-Demolition*). Un atomo di rubidio, eccitato ad uno

stato di *Rydberg* (in cui l'elettrone più esterno è lontanissimo dal resto dell'atomo), viene lanciato in una cavità speculare (tra le cui pareti superconduttrici rimbalza un fotone con lunghezze d'onda di 6 mm) ad una velocità tale da attraversarla in un tempo pari al periodo del fotone intrappolato. L'impiego di pareti superconduttrici introduce un fattore essenziale di annullamento di ogni perdita resistiva, e la suddetta eguaglianza dei tempi fa sì che il fotone venga «sondato» senza alcuno scambio netto di energia. La fase dell'atomo, inteso nella sua natura ondulatoria, varia però in modo verificabile tramite la sua interferenza con un secondo atomo spedito successivamente. Questa sarebbe la prova sia dell'esistenza autonoma, sia dell'osservabilità con modalità QND, di un fotone singolo. Ma la convinzione che l'entità «osservata» abbia natura corpuscolare è assicurata solo dalla fede nell'interpretazione di Copenhagen, e la stessa idea che il fotone possa rimbalzare tra le pareti della cavità e interagire con l'atomo di rubidio senza alterare la sua individualità appare alquanto sconcertante.

Il più importante tra i paradossi generati dalla trattazione di particelle singole è il *gedanken experiment* proposto da Einstein, Podolsky e Rosen nel 1935<sup>(9)</sup>, e divenuto famoso come *paradosso EPR*.

Consideriamo due particelle *correlate*, cioè che abbiano tra loro interagito *anche una sola volta*. Secondo la MQ tali particelle sono descritte da un'unica funzione d'onda, che le correla per sempre (è il famoso *quantum entanglement*). Diamo ad esse il tempo di allontanarsi quanto si voglia l'una dall'altra, e misuriamo una grandezza fisica (nella proposta originaria di EPR, la *quantità di moto*) relativa allo stato di *una sola* delle due particelle. Prima della misura, tale stato è indefinito: è la misurazione che costringe la particella ad «optare», collassando su un solo autostato. Ma dopo la misurazione la seconda particella, fosse anche giunta lontana anni-luce, dovrà farsi trovare, *istantaneamente*, in uno stato *correlato*, cioè prevedibile una volta rilevato lo stato della prima. «Spooky action at distance», come ironizzava Einstein? Davvero la Natura può ammettere fenomeni *nonlocali*, cioè effetti che si propagano con velocità infinita? Pur potendosi dimostrare (con sollievo dei relativisti) che questa propagazione istantanea avverrebbe senza consentire alcuna trasmissione di energia, la cosa è, quanto meno, imbarazzante.

Secondo EPR l'esistenza di opportuni parametri nascosti consentirebbe di ritenere che le due particelle siano sin dall'inizio in stati ben precisi, e viaggiando si portin dietro, semplicemente, tale informazione. La Meccanica Quantistica, quindi — non essendo in grado di descrivere tale fatto — sarebbe una teoria incompleta.

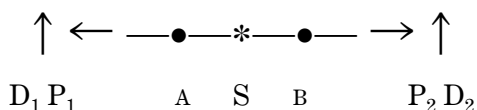
Secondo la MQ, invece, entrambi i valori vengono fissati (in modo nonlocale) solo al momento della misura, e non occorre alcun ulteriore chiarimento.

La questione fu ritenuta non verificabile, e perciò di scarso interesse, per 30 anni: e in effetti la generazione di fisici la cui vita scientifica si svolse nel primo ventennio del secondo dopoguerra la ignorò completamente.

Nel 1965, finalmente, scese in campo Bell<sup>(10)</sup>.

Il suo primo exploit fu la dimostrazione formale che il teorema di Von Neumann era basato su ipotesi troppo restrittive: tali ipotesi, tautologicamente valide in MQ, non lo sono necessariamente in generale — il che compromette e rende inaccettabile la famosa impossibility proof. Aperta così, in modo rigoroso, la strada alla possibilità di costruire teorie di variabili nascoste, Bell passò ad esaminare il caso più illustre in cui una tale teoria veniva sollecitata (il paradosso EPR, per l'appunto) pervenendo ad un'importante conclusione, impropriamente nota come Teorema di Bell, che rese per la prima volta possibile una verifica sperimentale.

Per darne un'idea approssimativa, supponiamo di avere una sorgente luminosa, S, che emette in direzioni opposte due fotoni, A e B, con la stessa polarizzazione, verso due polarizzatori eguali, P1 e P2, tra loro, inizialmente, paralleli. I due fotoni, se riescono ad attraversare i polarizzatori, giungono su due fotomoltiplicatori eguali, che agiscono come detectors: D1 e D2, sistemati in modo da agire l'uno dopo l'altro, con un intervallo di tempo così breve da impedire ogni comunicazione tra loro.



Quando il polarizzatore P1 lascia passare (o arresta) il fotone A, il polarizzatore P2, ovviamente, lascia anch'esso passare (o arresta) il fotone B: sia nel caso che la (eguale) polarizzazione dei due fotoni venga decisa al momento

della loro emissione (come sostengono EPR), sia nel caso che essa venga decisa al momento della rilevazione eseguita su uno dei due fotoni (come asserisce la MQ), i due detectors, finché i polarizzatori rimangono tra loro paralleli, forniscono risultati sempre coincidenti. Se però il polarizzatore P2 viene ruotato di un angolo  $\Theta$ , i risultati dei due detectors non saranno più necessariamente coincidenti. La frazione di coincidenze,  $F(\Theta)$ , sarà del 100% se  $\Theta = 0$ , e si ridurrà a zero se  $\Theta$  tende a  $\pi/2$ . Secondo una versione semplificata datane da Pagels<sup>(11)</sup> il Teorema di Bell consiste nella dimostrazione che, nel caso che la polarizzazione dei due fotoni venga decisa al momento della loro emissione (come sostengono EPR), dovrà sempre risultare

$$(3) \quad F(2\Theta) \geq 2F(\Theta) - 1;$$

se, invece, il valore di entrambe le polarizzazioni viene deciso al momento della rilevazione eseguita su uno dei due fotoni (come asserisce la MQ), la (3) potrà essere, come si suol dire, violata.

Fra i non molti Bell tests realmente effettuati, quelli di Aspect e coll., eseguiti negli anni 1981-83 ad Orsay, sono di gran lunga i più famosi. Il resoconto dettagliato delle esperienze di Aspect (nel quale non ci inoltreremo) è contenuto nella sua Tesi di Dottorato. I risultati resi pubblici sono contenuti, invece, in due brevi Physical Review Letters<sup>(12)</sup>, in cui si asserisce l'esistenza di un pieno accordo tra dati sperimentali e previsioni quantistiche ortodosse.

Al lavoro di Aspect sono state mosse le critiche più svariate. Ci limitiamo qui a citare quelle (basate sull'esame dettagliato della Tesi di Dottorato, ben più esplicita dei lavori pubblicati) avanzate recentemente dalla Thompson<sup>(13)</sup> e da Selleri<sup>(14)</sup>.

Secondo la Thomson, l'analisi dei dati mostra che i risultati sarebbero in perfetto accordo con la classica realtà locale einsteiniana, se solo i «fotoni» venissero interpretati come estesi treni d'onda, e non come oggetti puntiformi. Inoltre, pur avendo Aspect scelto, tra la gran massa di dati ottenuti, solo i più favorevoli alla sua tesi, la curva da lui ottenuta per la funzione  $F(\Theta)$  non violava affatto la disuguaglianza di Bell. Egli suppose allora che alcune delle coincidenze osservate fossero spurie (i cosiddetti accidentals), e andassero quindi ad aumentare illecitamente il valore di  $F(\Theta)$ . Ne valutò il nu-

mero a modo suo, e lo sottrasse, punto per punto, dalla curva grezza. *Solo a questo stadio* il grafico ottenuto violava, finalmente, la disegualianza di Bell! Di qui il suggerimento, da parte della Thompson, di usare flussi fotonici così bassi da ridurre a zero il numero degli *accidentals*.

Secondo Selleri, la situazione effettivamente affrontata da Aspect era complicata dal fatto che l'efficienza di contatori e polarizzatori reali è (e tanto più era nel 1982) molto bassa. Questo fatto richiese ad Aspect tutto un insieme di ipotesi aggiuntive (del tutto inverificabili) relative ai possibili comportamenti dei fotoni. Tali ipotesi furono adottate in accordo con la MQ ufficiale, ed esclusero quindi *a priori* la possibilità di scelte teoriche differenti. Le ipotesi che inficiano l'interpretazione dei risultati di Aspect furono insomma dello stesso tipo di quelle che portano al Teorema di Von Neumann: la validità dell'interpretazione di Copenhagen viene semplicemente postulata, e non può ritenersi quindi convalidata dai risultati ottenuti.

In epoca assai più recente (1998) un'esperimento concettualmente analogo a quello di Aspect è stato compiuto da Tittel *et al.*<sup>(15)</sup> presso il Group of Applied Physics di Ginevra. Interessante ed esplicito il titolo del lavoro pubblicato: «Experimental demonstration of quantum correlations over more than 10 km». Oltre ad incorrere in obiezioni simili a quelle di Selleri, tale esperimento è basato sull'ipotesi che i fotoni A e B di Aspect viaggino non già nel vuoto, ma lungo molti chilometri di fibre ottiche, mantenendo, pur tra innumerevoli interazioni, la loro individualità e la loro iniziale correlazione.

È il caso di ricordare che il *quantum entanglement* segnalato da Einstein, Podolsky e Rosen come inaccettabile conseguenza dell'interpretazione di Copenhagen è divenuto di recente, rovesciando le intenzioni di tali autori, la base per speculazioni sempre più spericolate, come l'idea del cosiddetto *teletrasporto quantico*. Un articolo di Bouwmeester *et al.* comparso su *Nature* nel 1997<sup>(16)</sup> (e analoga è la sostanza di un esperimento compiuto all'Università La Sapienza di Roma l'anno successivo<sup>(17)</sup>), descrive un esperimento in cui un fotone trasferisce *in maniera istantanea* il suo spin su un altro, appartenente ad una coppia di fotoni arbitrariamente lontana, ed *entangled* in senso EPR. Lo stato quantico trasferito è, e rimane, del tutto sconosciuto. La convinzione, quindi, che il tele-

trasporto dello stato quantico sia realmente avvenuto è assicurata, una volta di più, da un atto di fede nell'interpretazione di Copenhagen.

Ricordiamo infine che il medesimo Haroche citato in precedenza<sup>(8)</sup> va studiando da vari anni, presso l'École Normale Supérieure di Parigi, la correlazione EPR (per usare i suoi termini, la generazione di «*Schrödinger cat superposition states*») e la successiva «decoerenza» tra atomi di Rydberg in cavità superconduttrici.

Possiamo concludere, nel complesso, che le esperienze sinora eseguite sul *quantum entanglement* non possono (e, in fondo, non vogliono) essere intese come *test* di validità dell'interpretazione di Copenhagen rispetto ad altre di tipo «realista», essendo sempre basate su ipotesi garantite solo dall'accettazione preventiva di tale interpretazione.

Siccome, però, già si pensa (anche da parte di *corporations* avvedute come la IBM e la At&t) allo sfruttamento del *quantum entanglement* per il teletrasporto (addirittura) della materia e per la realizzazione dei cosiddetti *calcolatori quantistici* (di potenza quasi infinita, data il propagarsi istantaneo dell'*informazione quantica*), l'asserzione fideistica che incontrollabili «risultati sperimentali» sono in accordo con l'interpretazione di Copenhagen potrebbe essere ben presto sostituita da evidenze inequivocabili, come sempre sono le realizzazioni tecnologiche di larga diffusione.

#### Referenze

- (1) H. HEINZELMANN e D.W. POHL, *Appl. Phys. A*, **59**, 89 (1994).
- (2) R. GIOVANELLI e A. OREFICE, *Nuovo Cimento D*, **20**, 1451 (1998).
- (3) J. VON NEUMANN, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (Springer, 1932).
- (4) D. BOHM, *Phys. Rev.*, **85**, 166 (1952).
- (5) W. HEITLER, *The Quantum Theory of Radiation* (Dover, 1984).
- (6) B.S. DE WITT, *The Many-Universes Interpretation of QM in Foundations of QM*, edited by B. d'Espagnat (Academic Press, New York, 1971).
- (7) W.H. ZUREK, *Phys. Today*, Ottobre 1991, p. 36.
- (8) S. HAROCHE *et al.*, *Phys. Rev. A*, **45**, 5193 (1992); *Sci. Am.*, **268**, 26 (1993); *Nature*, **400**, 239 (1999).
- (9) A. EINSTEIN, B. PODOLSKY and N. ROSEN, *Phys. Rev.*, **47**, 777 (1935).
- (10) J.S. BELL, articoli raccolti nel volume *Speakable and Un-speakable in Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, 1987).
- (11) H. PAGELS, *The Cosmic Code* (Simon and Schuster, 1982).
- (12) A. ASPECT *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **49**, 91 (1982) e **49**, 1804 (1982).
- (13) C.H. THOMPSON, *Open Questions in Relativistic Physics*, edited by F. Selleri (Apeiron, 1998), p. 351.
- (14) F. SELLERI, *La Fisica del Novecento* (Progedit, 1999).
- (15) W. TITTEL *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 3563 (1998).
- (16) D. BOUWMEESTER *et al.*, *Nature*, **390**, 575 (1997).
- (17) D. BOSCHI *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 1121 (1998).