Fisica e Filosofia

Ciclo di incontri
“Filosofia e Scienza”

Gianluca Introzzi
Università di Pavia

Aula goldoniana del Collegio Ghislieri

Pavia - Giovedì 17 marzo 2016 h.18

Meccanica Quantistica: una nuova ontologia

“Fisica e Filosofia”
Riflessioni sull'immagine scientifica

Gianluca Introzzi
Università di Pavia

Aula goldoniana del Collegio Ghislieri

Pavia - Giovedì 17 marzo 2016 h.18

Formalismo e Interpretazione

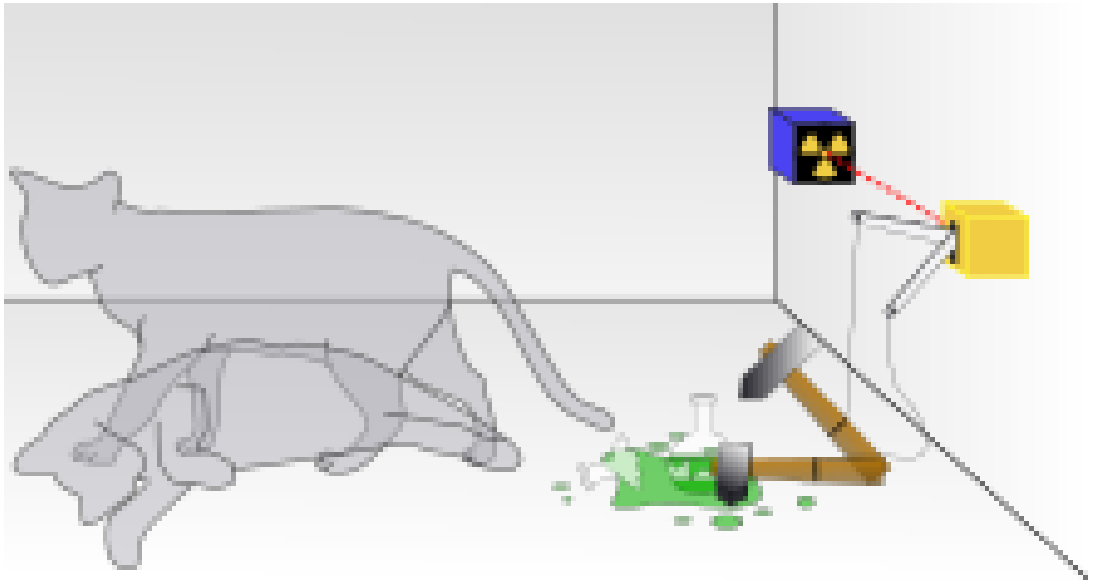
- La meccanica quantistica è stata, fin dalle sue origini, un'incredibile fonte di domande filosofiche
- Il **formalismo** della teoria (equazione di Schrödinger) fu, dopo la sua formulazione nel 1926, immediatamente accettato dai fisici
- Al contrario, la sua **interpretazione** diede luogo a dispute lunghe e controverse (dibattito Bohr-Einstein), che vertevano sull'esistenza e il significato di una realtà quantistica

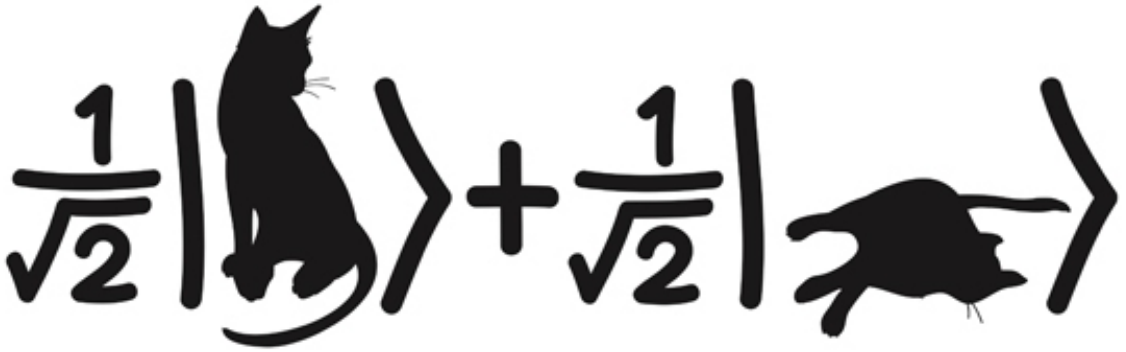
A long list of Apologies...

- Devo cominciare scusandomi per la lunga lista di temi entusiasmanti che non tratterò stasera, vuoi per l'eccessiva complessità formale, vuoi per l'insufficiente conoscenza che ho di tali argomenti
- Ne faccio un elenco, in modo da lasciarvi la curiosità di continuare le indagini, di scoprire quanto complessa sia l'immagine del mondo che abbiamo elaborato, come veramente «Ci sono più cose in cielo e in terra, Orazio, di quante ne sogni la tua filosofia»

(Amleto, atto I, scena V)

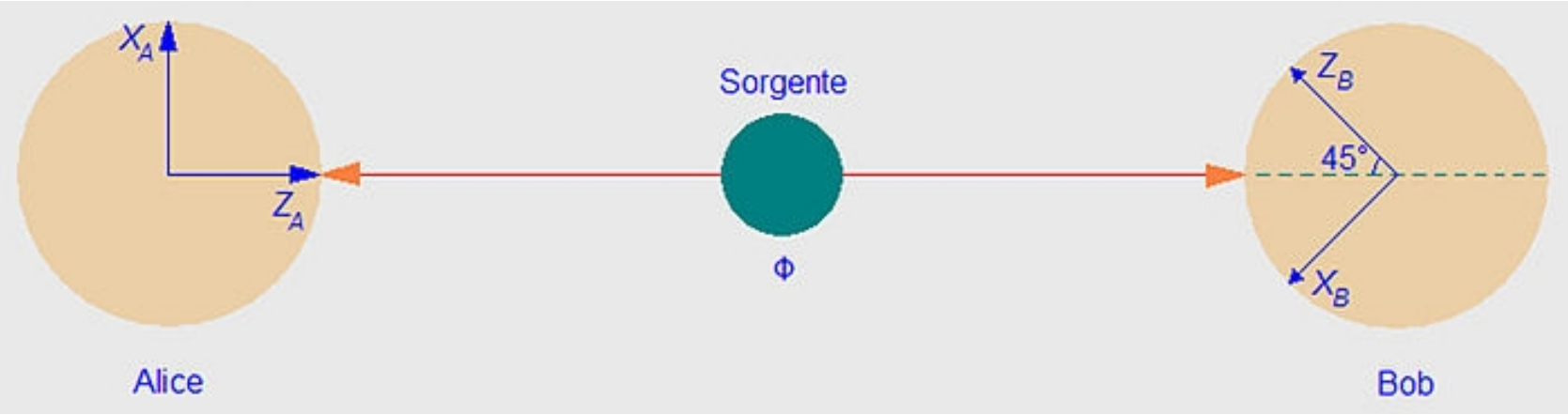
Gatto di Schrödinger
Entanglement (1935)





Paradosso di E.P.R. (1935)
Correlazioni quantistiche

Talvolta lo stato quantistico di un sistema non può essere descritto singolarmente, ma solo come sovrapposizione di più (2) sistemi. La misura di un osservabile in A determina istantaneamente il valore dell'osservabile in B. Poiché i 2 sistemi possono essere spazialmente separati, l'entanglement implica la presenza di correlazioni istantanee a distanza tra quantità fisiche, determinando il carattere non locale della teoria quantistica. Il principio di causalità e la relatività ristretta risultano preservati.



Relazioni d'indeterminazione

- L'indeterminismo quantistico è **ontologico**, non epistemico (meccanica statistica classica)
- **Non** si tratta di un **principio** d'indeterminazione (relazioni ricavabili dalla dispersione delle onde classiche di Fourier + dualismo onda/particella)
- Si hanno due sorgenti d'indeterminazione:
  - **intrinseca** (dipende dal formalismo della MQ)
  - **operazionale** (correlazione misura/disturbo)
- Indeterminazione energia/tempo non ancora ben compresa (cos'è il tempo ? Relatività ?)

Heisenberg (1927) – Robertson (1929)
Ozawa (2003) – Fujikawa (2012)

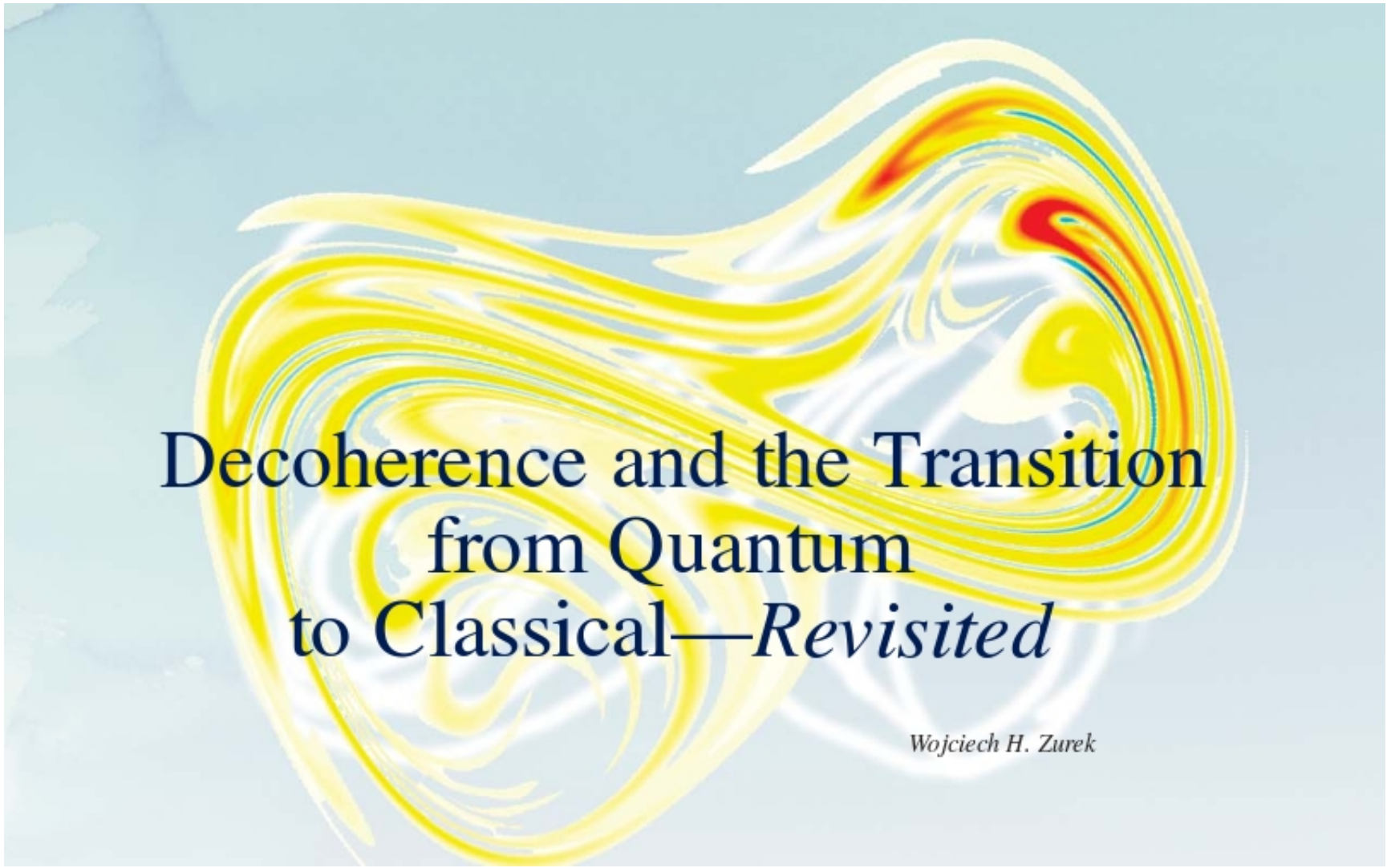
$$\epsilon_A \, \eta_B \geq \frac{1}{2} \left| \langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle \right|$$

$$\sigma_A \, \sigma_B \geq \frac{1}{2} \left| \langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle \right|$$

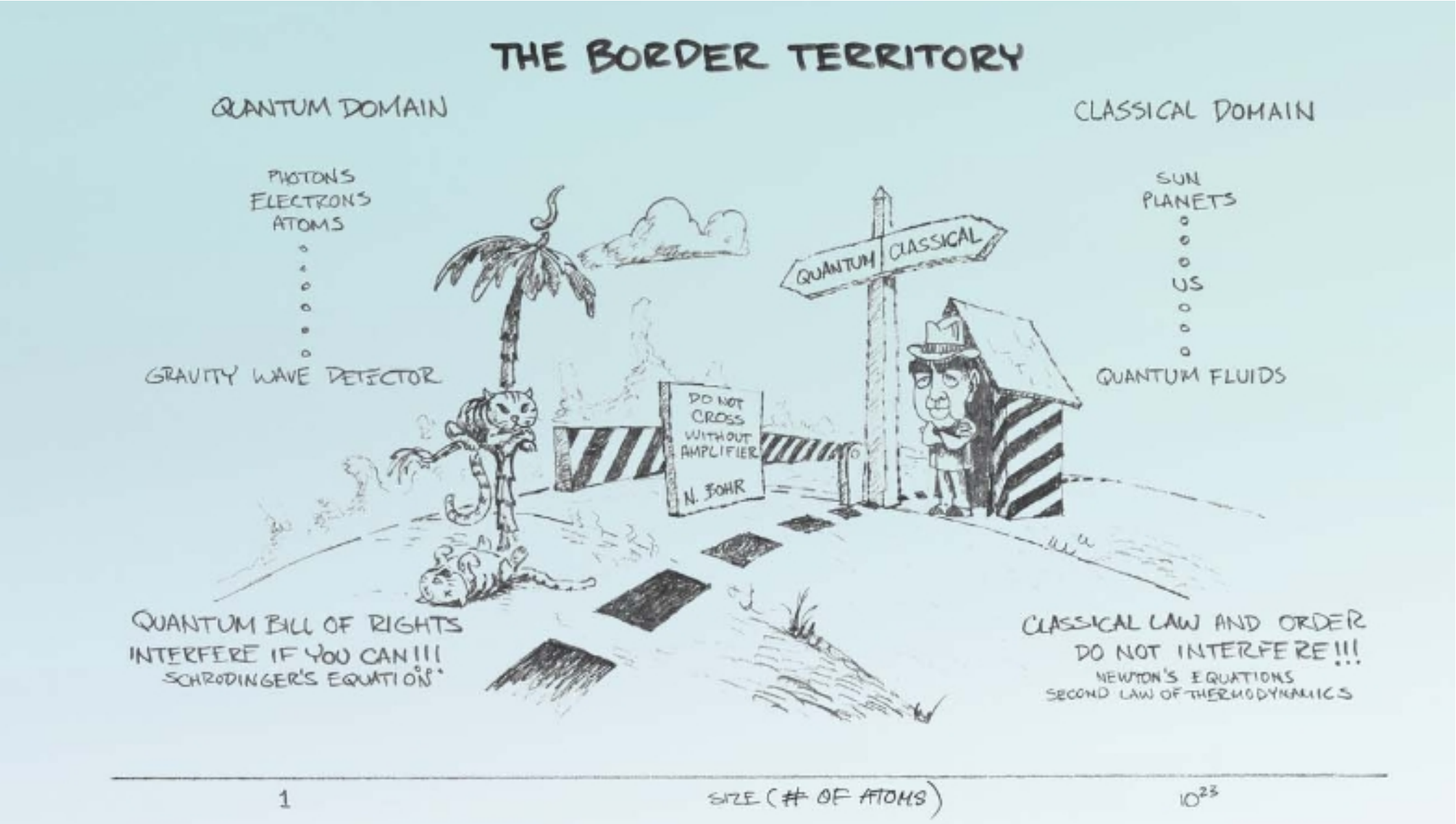
$$\epsilon_A \, \eta_B + \epsilon_A \, \sigma_B + \sigma_A \, \eta_B \geq \frac{1}{2} \left| \langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle \right|$$

$$\bar{\epsilon}_A \, \bar{\eta}_B \geq \left| \langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle \right|$$

Decoerenza quantistica
Wojciech H. Zurek (1982)



Il confine tra MC e MQ



Stato quantistico Ψ – Matrice piena
Coerente – Termini fuori diagonale

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 439 & -65 & 67 & -7 & 19 & 12 & 3 & 4 \\ -36 & 100 & 13 & 15 & 25 & -7 & 12 & 2 \\ 23 & 27 & 13 & 32 & -17 & 16 & -2 & 2 \\ 21 & 1 & 15 & -19 & 14 & 3 & 1 & -0 \\ -1 & -1 & -7 & 13 & -2 & -2 & 1 & -0 \\ -9 & 4 & -1 & -3 & -1 & -0 & -1 & -2 \\ 7 & 3 & -6 & -0 & -2 & 1 & 1 & -1 \\ -2 & -0 & -1 & 2 & 1 & -0 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

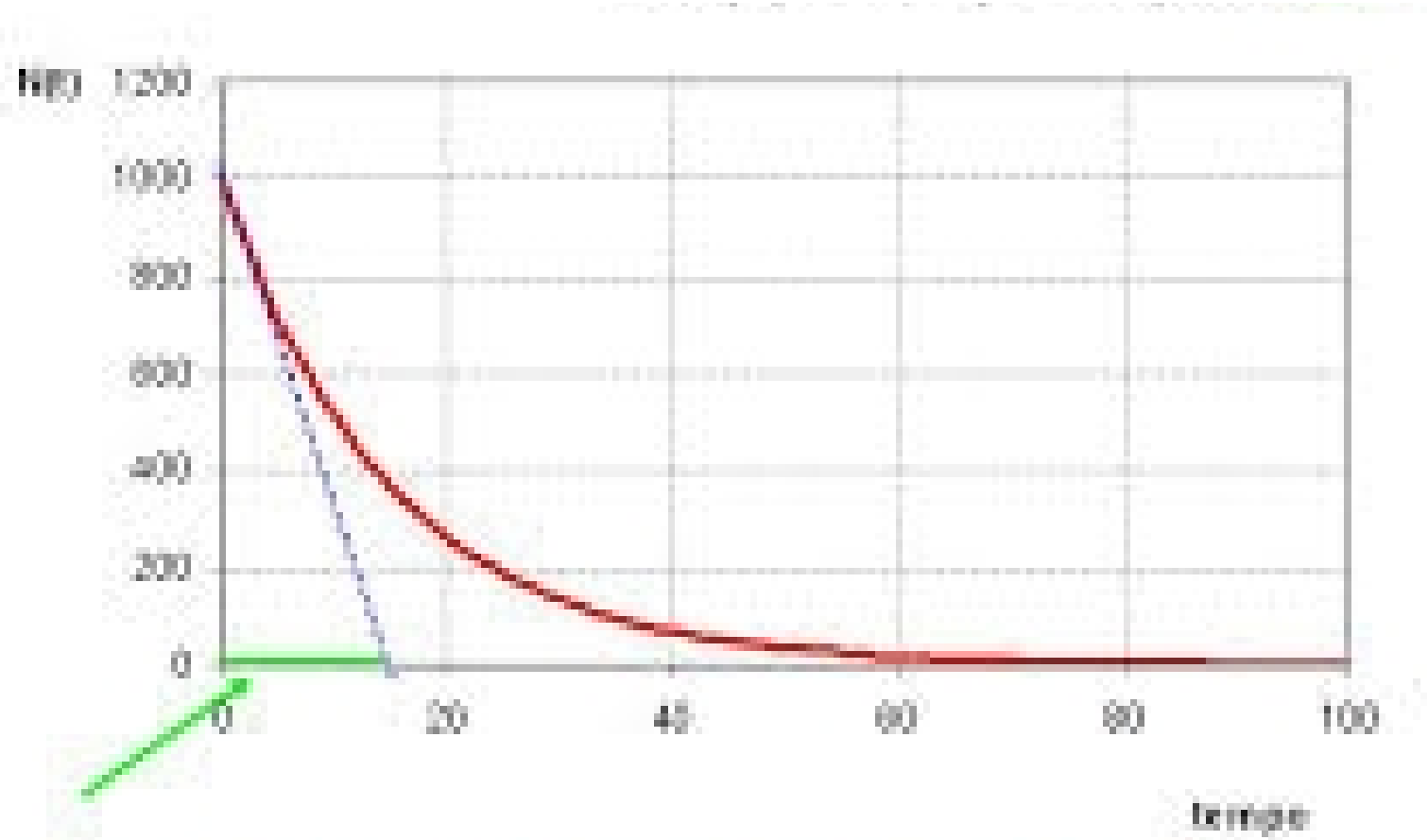
Stato classico o Miscela statistica Incoerente – Matrice diagonale

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & \lambda_3 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

Lo stato classico **non** presenta termini fuori diagonale. Ma come si passa da MQ a MC ?

La decoerenza spiega lo "spegnimento" esponenziale dei termini fuori diagonale mediante l'interazione del sistema Ψ con l'ambiente esterno

Tempo di coerenza τ



τ = costante di tempo = vita media della particella

Gatto di Schördinger in laboratorio

Serge Haroche – Nobel 2012

Realizzazione di sistemi mesoscopici e studio della perdita di coerenza quantistica. Dopo 60 anni, il gatto di Schrödinger entra in laboratorio

It's gonna be a long ride...

International Year of Light 2015

- La luce non è solo una risorsa concreta e fondamentale per lo sviluppo sociale ed economico, ma anche simbolo di vita, di civiltà, di spiritualità.
- L' ONU ha dichiarato il 2015 Anno Internazionale della Luce (International Year of Light). Ricorrenze 2015:
- 1815 - Primi lavori di Fresnel sulle onde luminose
- 1865 - Pubblicazione di Maxwell su Elettromagnetismo
- 1905 - Relatività ristretta di Einstein
- 1915 - Relatività generale di Einstein (articolo: 1916)
- 1965 - Pubblicazione della scoperta della radiazione cosmica di fondo a 3 K da parte di Penzias e Wilson

Cos'è la luce ?

« Io mi era tenuto tanto inhabile a poter penetrare che cosa sia il lume, che mi sarei esibito a stare in carcere in pane e acqua purché io fussi assicurato di conseguire una da me tanto disperata cognizione.»

Galileo Galilei

Parte I

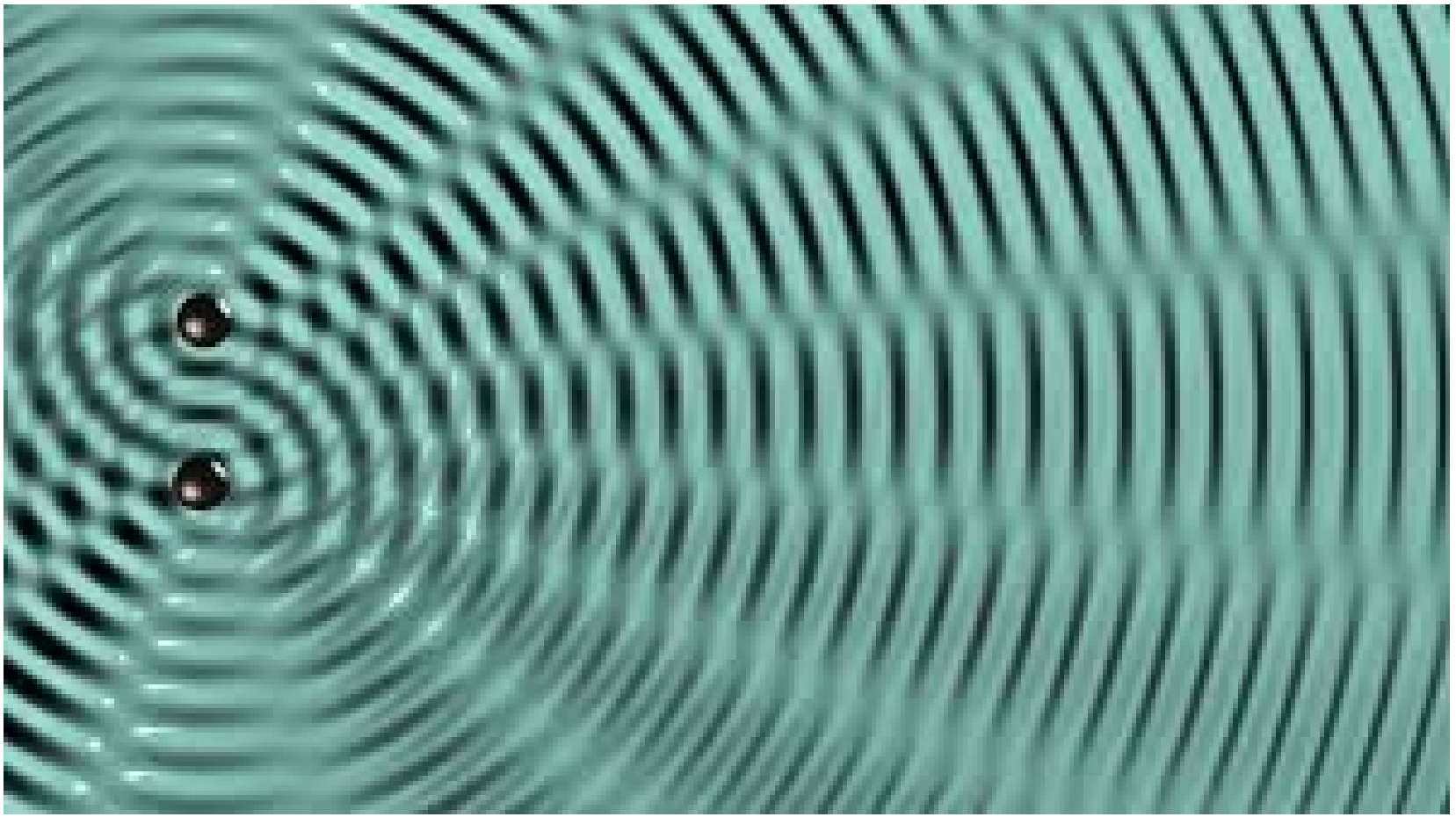
TEORIE ONDULATORIE della LUCE nel XIX secolo

La natura della luce nel XIX secolo

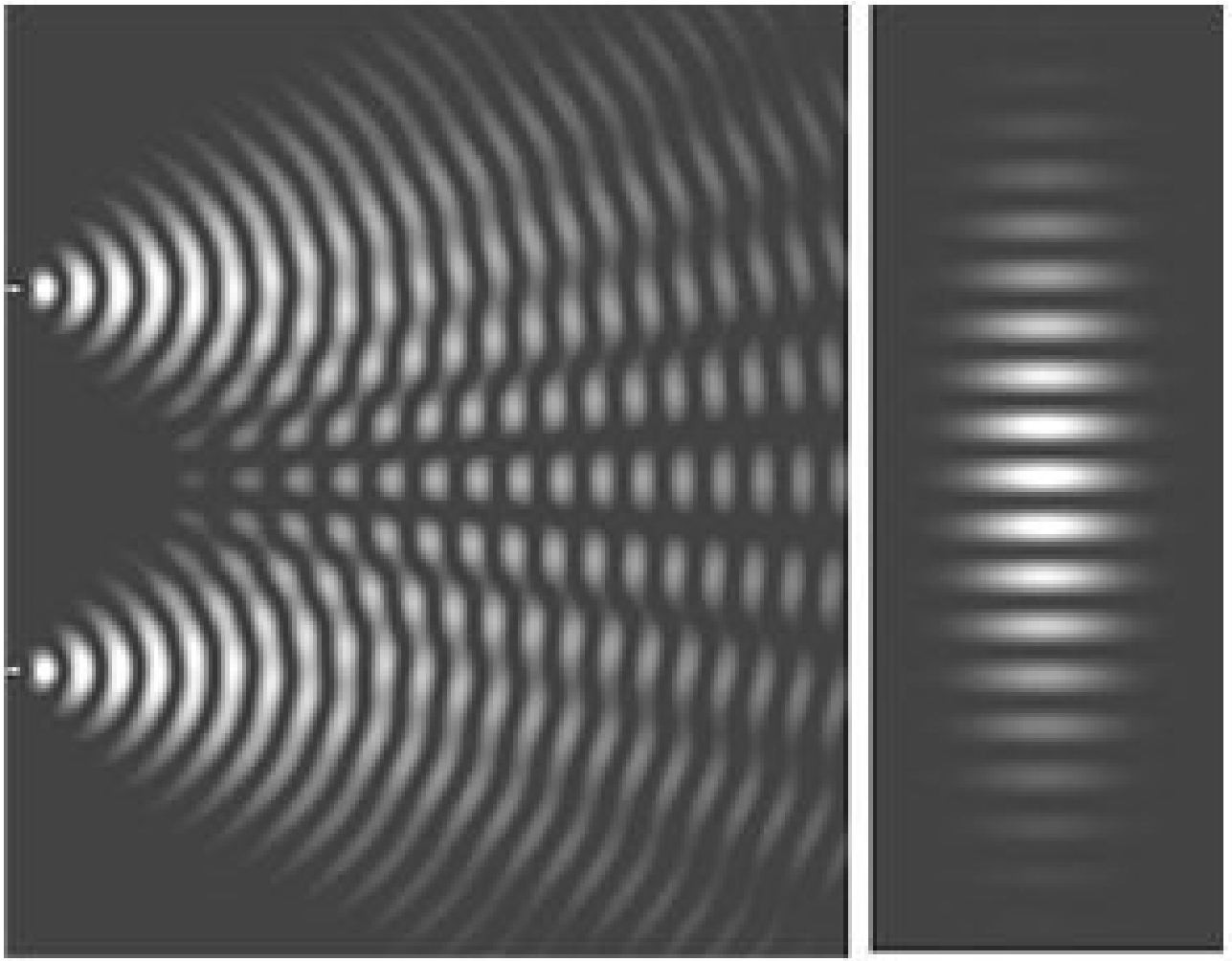
- La lunga diatriba sulla natura della luce nel '600 e primi '700 vide contrapposta l'ipotesi corpuscolare di Newton a quella ondulatoria di Huygens. Durante il resto del '700, secolo newtoniano per eccellenza, la gran parte degli scienziati propendeva per l'ipotesi corpuscolare.
- Le cose cambiarono nel corso dell'800 con l'esperimento d'interferenza mediante una doppia fendiura (Young, 1804), la “macchia di Fresnel” nella diffrazione (1818) e la misura della velocità della luce di Foucault (1850).
- Maxwell nel 1864 spiegò la luce come onda elettromagnetica: oscillazione di campi elettrici e magnetici perpendicolari, che si propaga nel vuoto a 300.000 Km/s. Un trionfo della Fisica ottocentesca !

Thomas Young
(1773 -1829)

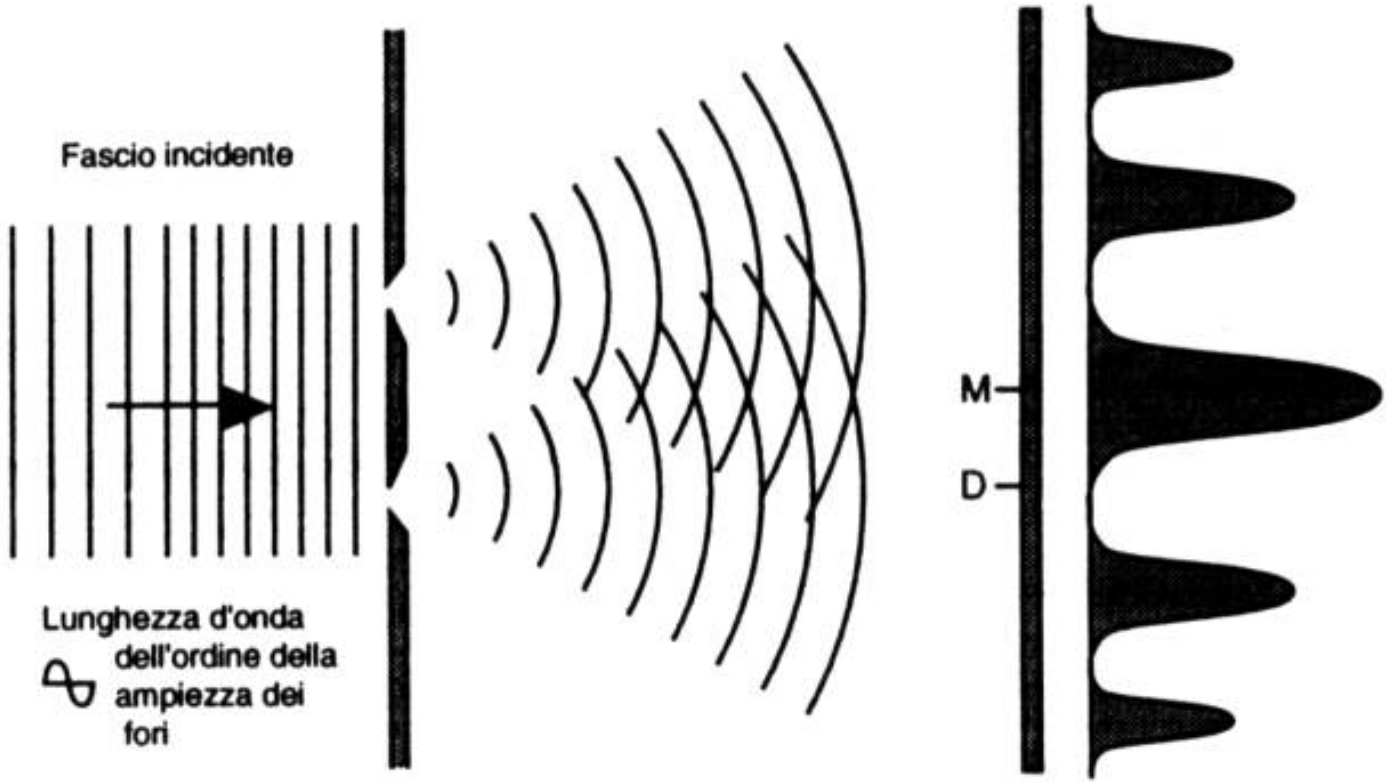
Due oscillatori nell'acqua



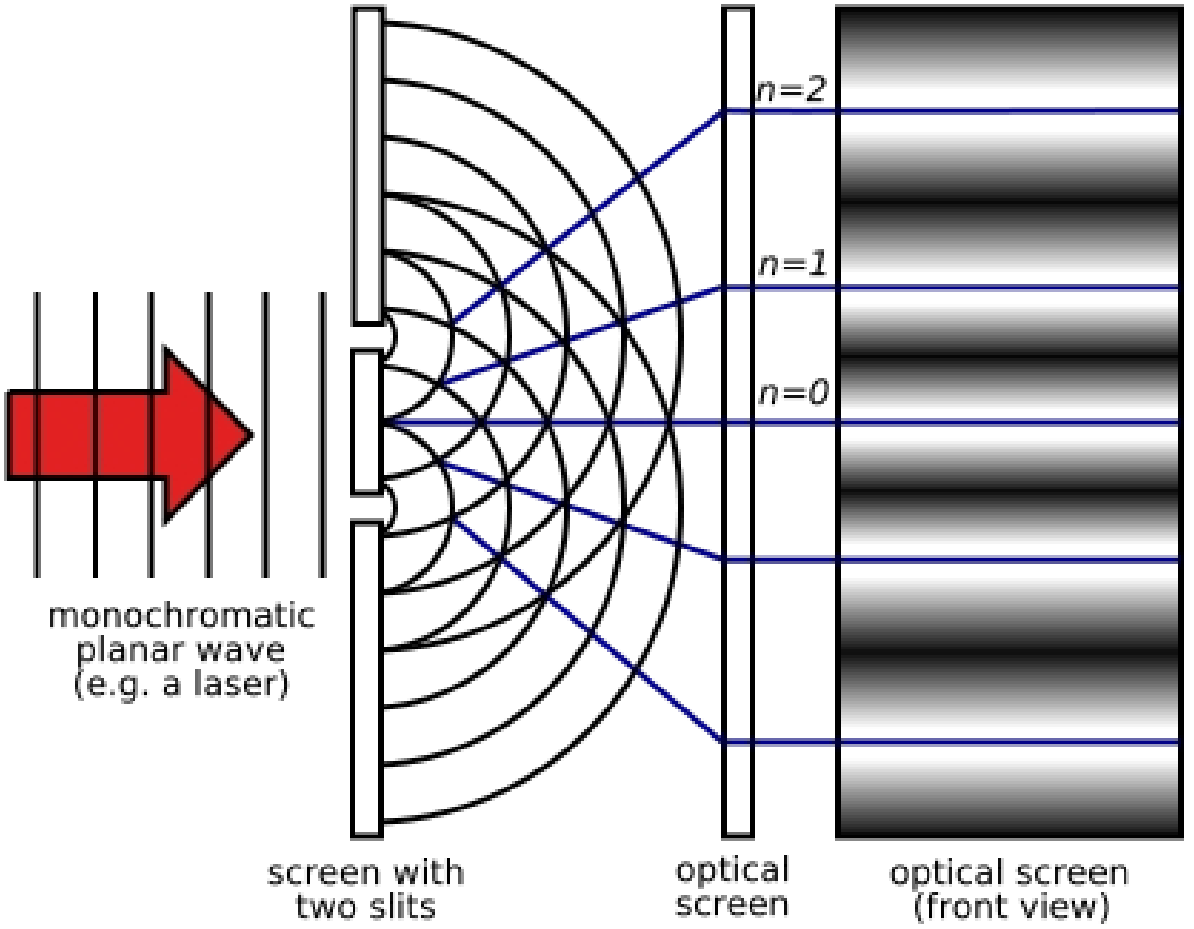
Ricostruzione d'interferenza luminosa



Intensità dei picchi d'interferenza



Spiegazione dell'interferenza delle onde



James Clerk Maxwell
(1831 -1879)

Le equazioni di Maxwell

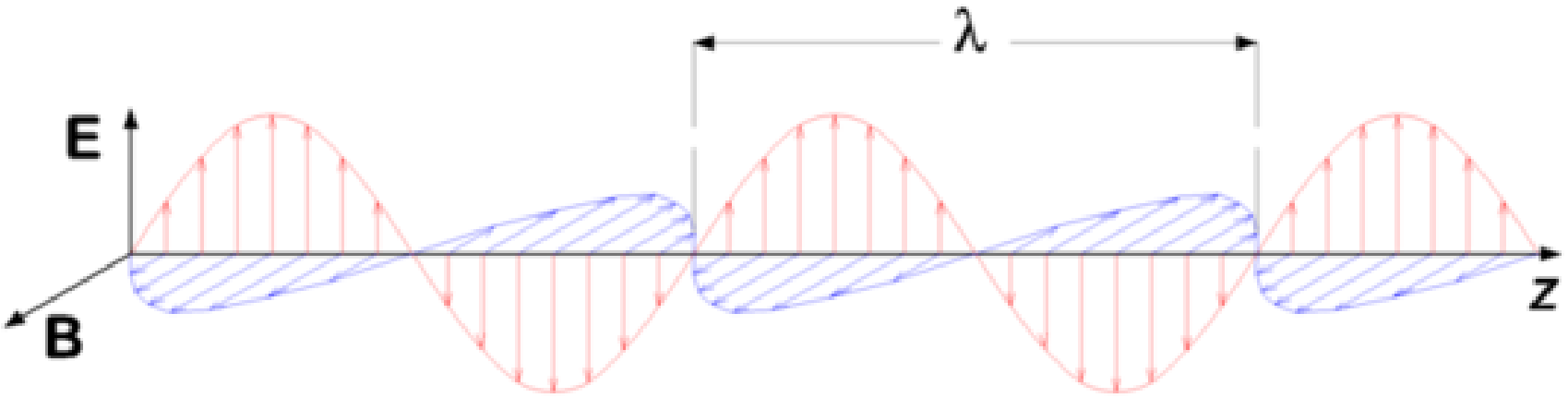
$$\nabla \bullet \boldsymbol{E} = \rho / \varepsilon_0$$

$$\nabla \bullet \boldsymbol{B} = 0$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{J} + \frac{1}{c^2}\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t}$$

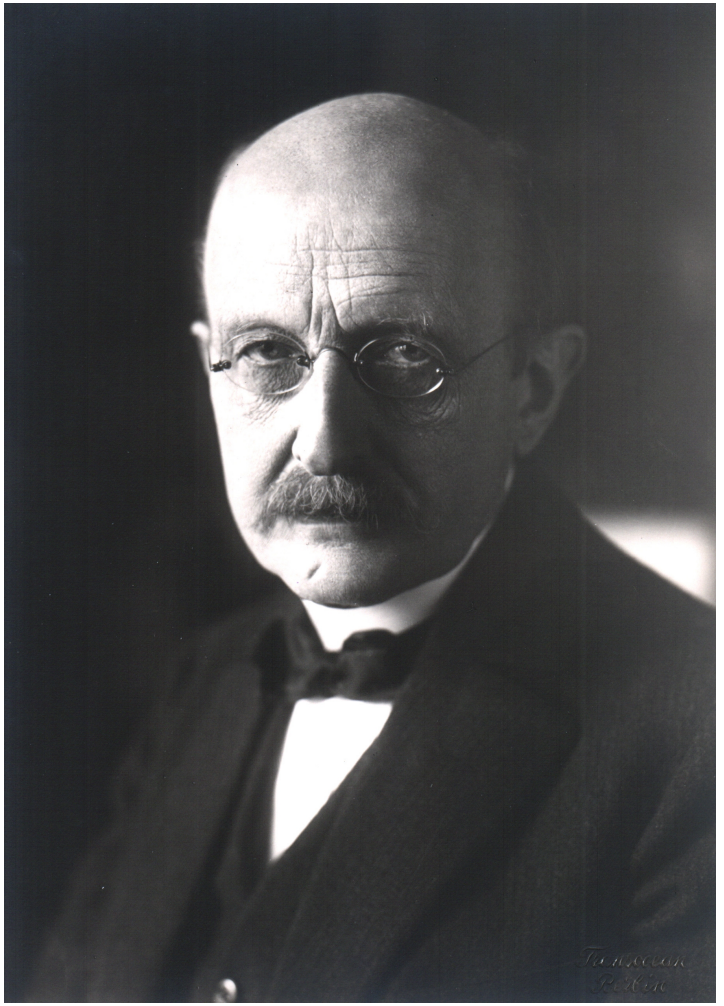
Onda elettromagnetica



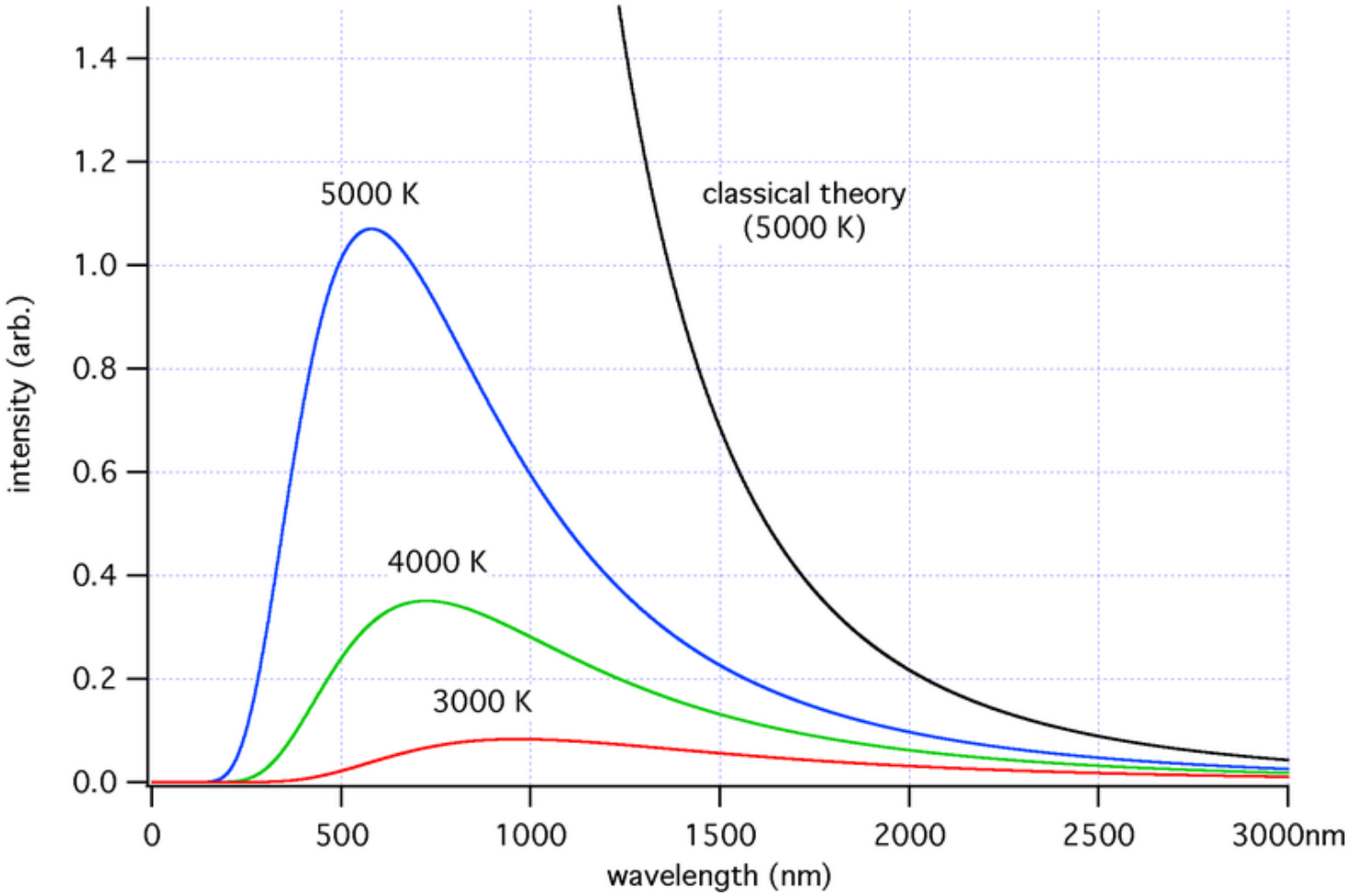
Parte II

La LUCE QUANTISTICA nel XX secolo

Max Planck
(1858-1947)



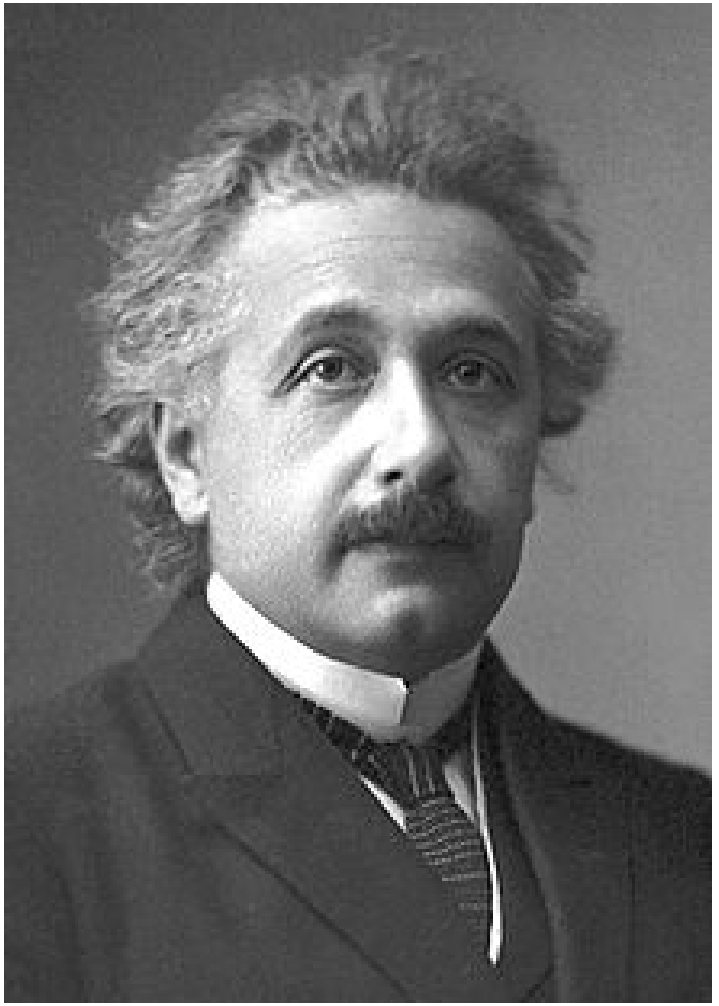
Spettro emissivo di un corpo nero



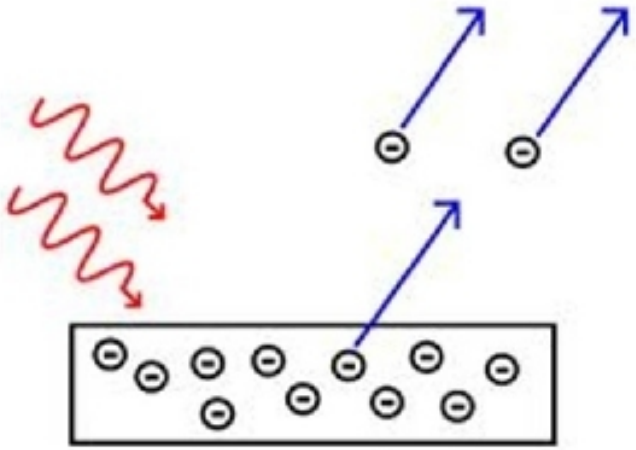
I quanti di Planck e di Einstein

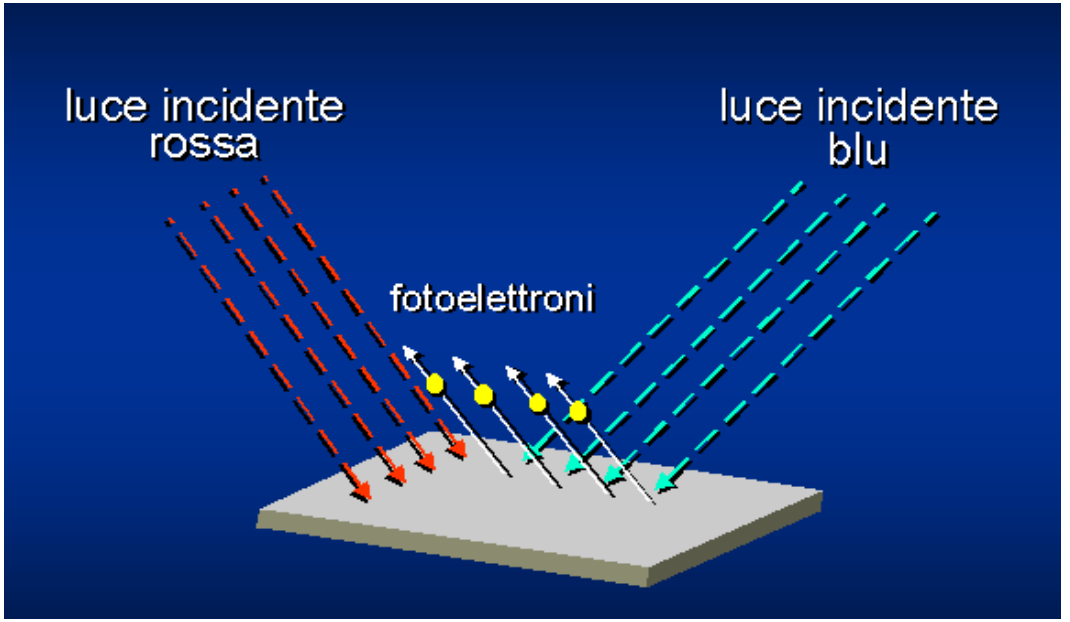
- Max Planck introdusse nel 1900 il concetto di quanto d'energia ($E = h\nu$), l'energia minima emessa da un corpo nero ad una certa temperatura T che quindi irraggia onde e.m. (UV - visibile - IR) di frequenza ν. Si trattava, secondo Planck, di un artificio matematico al quale non corrispondeva alcuna reale situazione fisica.
- Albert Einstein ipotizzò nel 1905 che la luce, a livello microscopico, fosse costituita non da onde, ma da particelle, che chiamò quanti di luce (ora fotoni). Se ν è la frequenza della luce, l'energia di quei fotoni è data da $E = h\nu$, con h costante di Planck: $h = 6.63 \times 10^{-34}$ Js. Grazie a tale ipotesi riuscì a spiegare l'effetto fotoelettrico, per il quale vinse il premio Nobel nel 1921.
- Ma allora, in definitiva, aveva forse ragione Newton ?

Albert Einstein
(1879-1955)



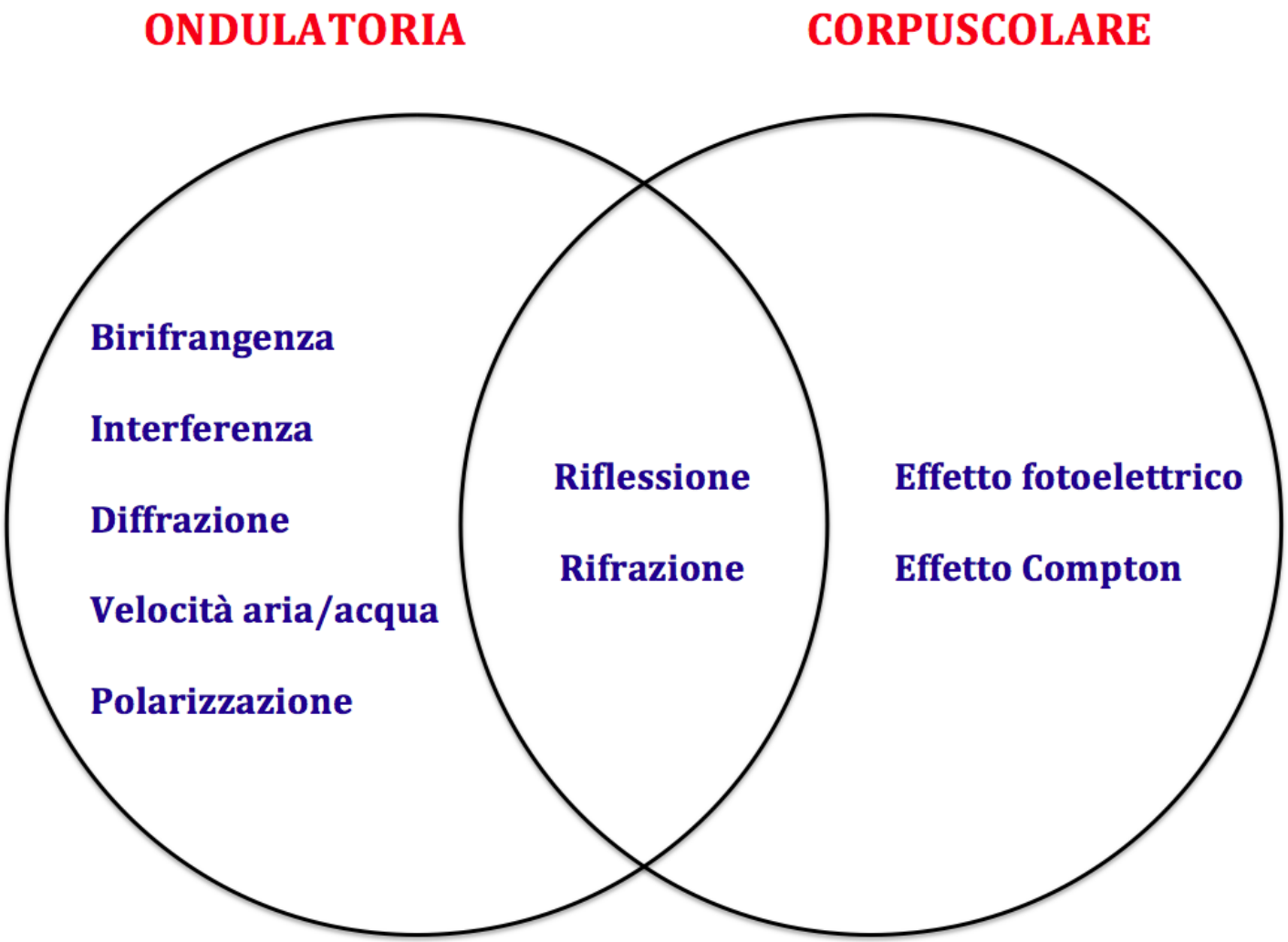
Effetto fotoelettrico e fotoni





Metallo illuminato dalla luce – Fotoni: $E=h\nu$ < $E=h\nu$

L'ambigua natura della luce



Parte III

MECCANICA QUANTISTICA: una NUOVA ONTOLOGIA

Una metafisica sperimentale

- Gli enti della Fisica Classica (FC) sono classificabili come onde (trasporto d'energia senza alcun trasporto di materia) o particelle (oggetti dotati di massa, la cui energia a riposo vale $E_0 = mc^2$).
- Ma in Meccanica Quantistica (MQ) la situazione è profondamente diversa.
- « I numerosi risultati sperimentali che hanno sondato e confermato la validità della meccanica quantistica possono di fatto essere considerati come contributi ad una metafisica sperimentale.» (**Abner Shimony – "*Search for a naturalistic world view* – vol.2"**)

Louis de Broglie
(1892-1987)

Dualismo e Complementarità

- Albert Einstein nel 1909 e Louis De Broglie nel 1923 sostennero che a livello microscopico vi è un dualismo onda/particella, per cui gli enti quantistici hanno contemporaneamente proprietà classiche sia di onda, sia di particella.
- Niels Bohr nel 1927 enuncia il "principio di complementarità", secondo il quale non è possibile in linea di principio attribuire in modo univoco agli enti quantistici proprietà di onda o di particella. Essi avrebbero statuto ontologico non definito, e si manifesterebbero come onde o come particelle a seconda dello strumento d'indagine che si utilizza negli esperimenti (un po' come l'acqua, che prende la forma del recipiente che la contiene).

Richard Feynman
(1918-1988)

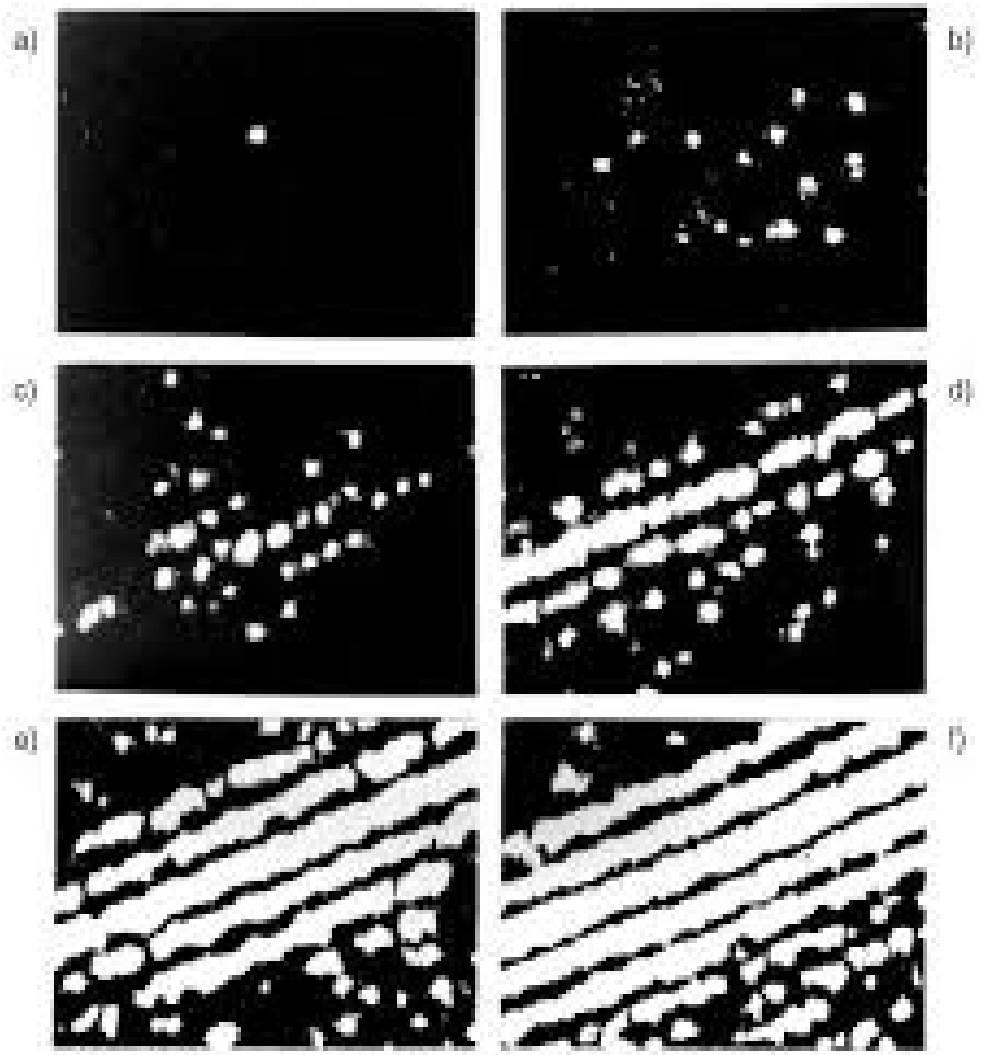
L'esperimento mentale di Feynman

- L'esperimento della doppia fenditura con elettroni singoli: «Prenderò questo solo esperimento che è stato formulato in modo da contenere tutti i misteri della meccanica quantistica, così da mettervi interamente di fronte ai misteri, ai paradossi e alle particolarità della natura. Qualsiasi altra situazione della meccanica quantistica può sempre essere spiegata dicendo: "Vi ricordate dell' esperimento delle due fenditure ? E' la stessa cosa".»
- Quando nel 1961 Feynman inizia ad insegnare a Caltech non è a conoscenza dell'esperimento di C. Jönsson con fasci d'elettroni, che riproduce le fenditure di Young. Il *Gedankenexperiment* era diventato reale; cosa che accadrà spesso, da quel momento in poi.

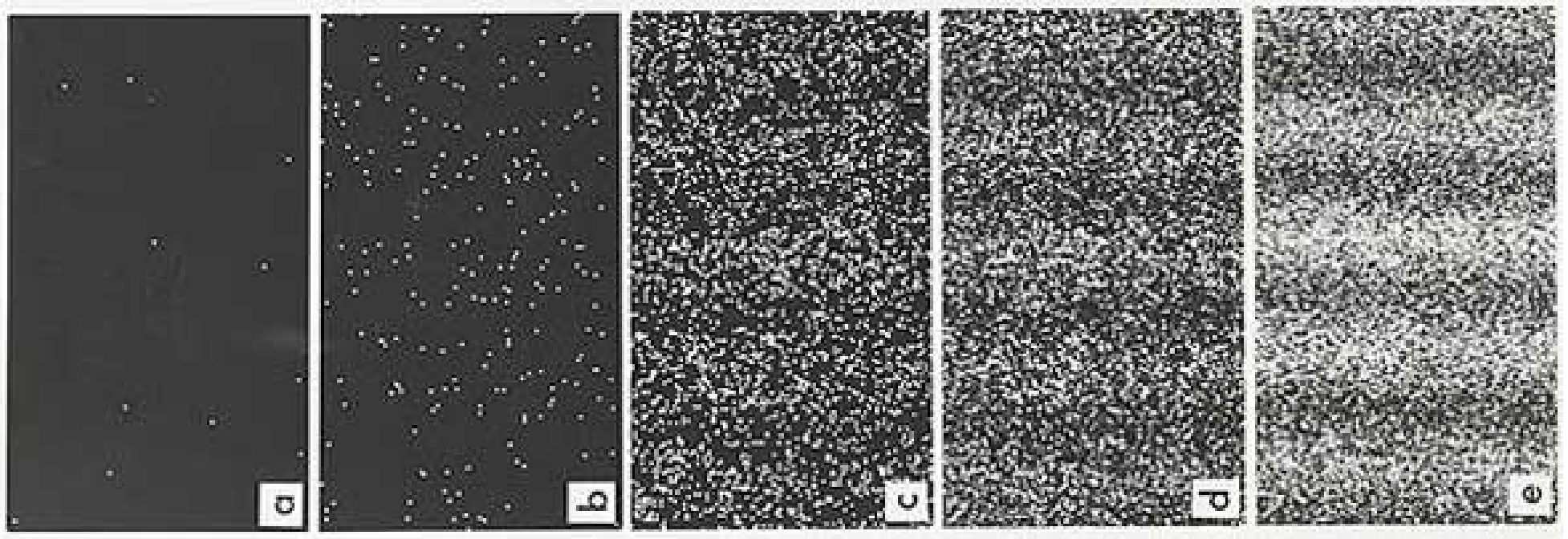
L'esperimento di Young per elettroni

- Come si comportano degli elettroni inviati, uno alla volta, attraverso una doppia fenditura ? Si tratta di particelle dotate di massa. Ma la figura che si forma sullo schermo dopo che molti elettroni si sono accumulati sulla lastra è tipica delle onde: si vedono le frange d'interferenza !
- Dove sta il mistero ? Per avere una figura d'interferenza, il singolo elettrone dovrebbe essere passato contemporaneamente da entrambe le fenditure ! Ma si tratta, secondo la Fisica Classica, di una particella dotata di massa, ovvero di un ente singolo.
- Impossibile secondo la Fisica Classica; dualismo onda/particella o complementarità di Bohr in MQ.

P.G. Merli, G.F. Missiroli, G. Pozzi (Bologna, 1976)



A. Tonomura et al.
(Hitachi Ltd., 1989)



10 – 200 – 6.000 – 40.000 – 140.000 elettroni

Niels Bohr
(1885-1962)

Interpretazione di Copenhagen: la doppia fenditura secondo Bohr

- Com'è possibile che l'elettrone singolo “sappia” dove andare a finire sullo schermo in modo da contribuire, insieme ad altri che sono passati o passeranno per la doppia fenditura, a formare la figura d'interferenza ?
- Secondo l'interpretazione di Copenhagen (principal-mente dovuta a Niels Bohr) della MQ, si tratta di un fatto incomprensibile: la MQ non può dire nulla sulla traiettoria degli elettroni.
- Secondo Bohr, la MQ può solo calcolare le probabilità d'arrivo dell'elettrone sullo schermo, e trova che tali probabilità coincidono con la formazione di una figura d'interferenza.

David Bohm
(1917-1992)

Interpretazione causale della MQ

- Ma esiste anche un'interpretazione causale della MQ, dovuta a David Bohm (1952), secondo la quale è possibile reintrodurre il concetto di traiettoria in MQ, e descrivere causalmente il moto delle particelle per effetto di una forza quantica F_q, analoga alla forza classica F_c, con l'aggiunta di un potenziale quantico Q.

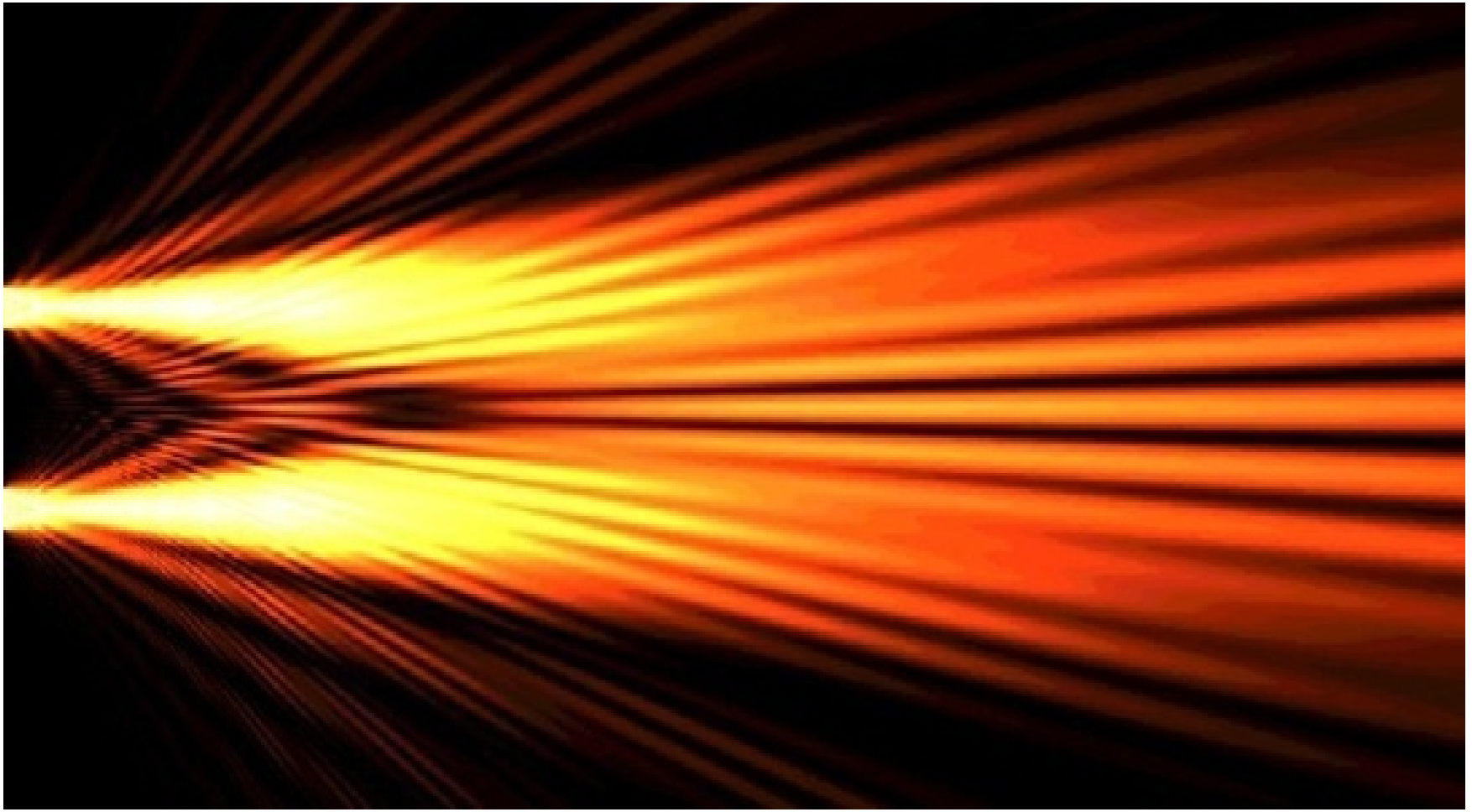
  Newton: $F_c = -\,\mathrm{grad}\ V$ Bohm: $F_q = -\,\mathrm{grad}\ (V + Q)$

- Anche la formulazione di Bohm utilizza l'equazione di Schrödinger: il **formalismo** è quindi analogo a quello di Copenhagen (stesse predizioni), ma se ne discosta radicalmente a livello dell'**interpretazione** della teoria.

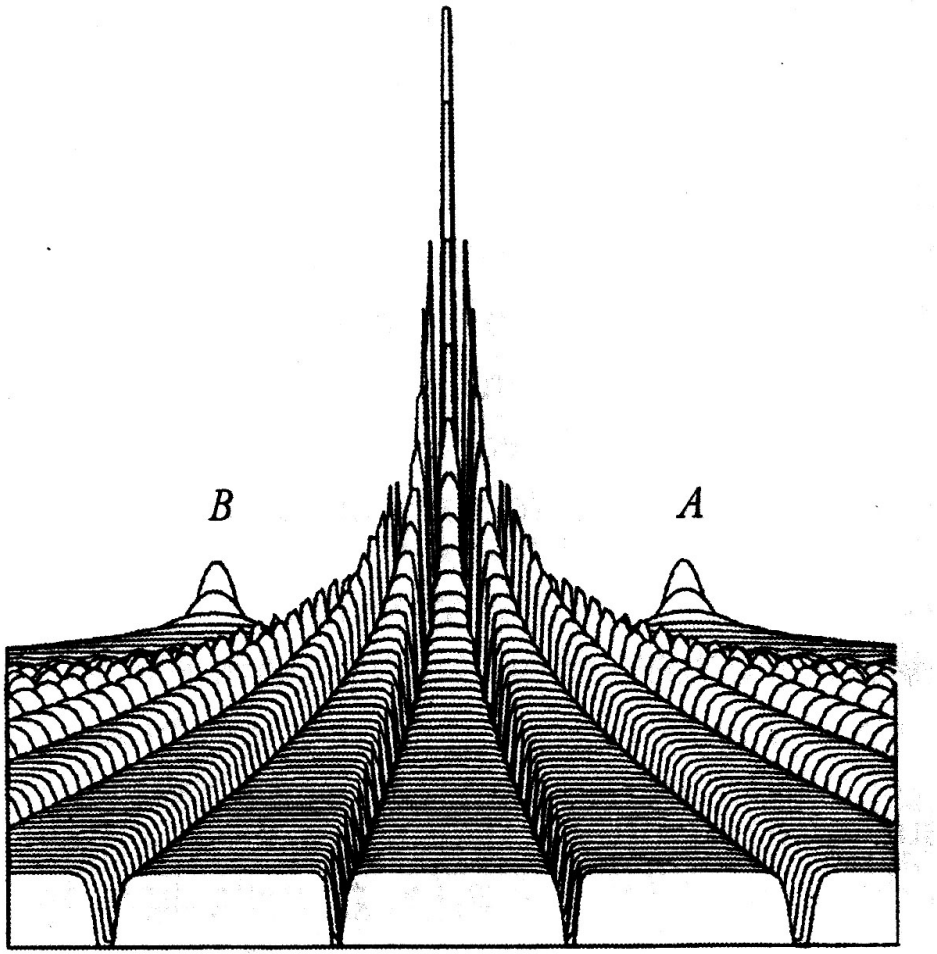
La doppia fenditura secondo Bohm

- Secondo Bohm, esiste quindi un potenziale Q quantico tra le fenditure e lo schermo, che “guida” ogni singolo elettrone entrante ad andare di preferenza in certe zone dello schermo.
- Il risultato complessivo, quando si registra l'effetto di molti elettroni attraverso le due fenditure, è proprio la figura d'interferenza. Quindi secondo Bohm non c'è alcun mistero: tutti gli elettroni sono guidati dallo stesso potenziale Q per formare la figura d'interferenza.

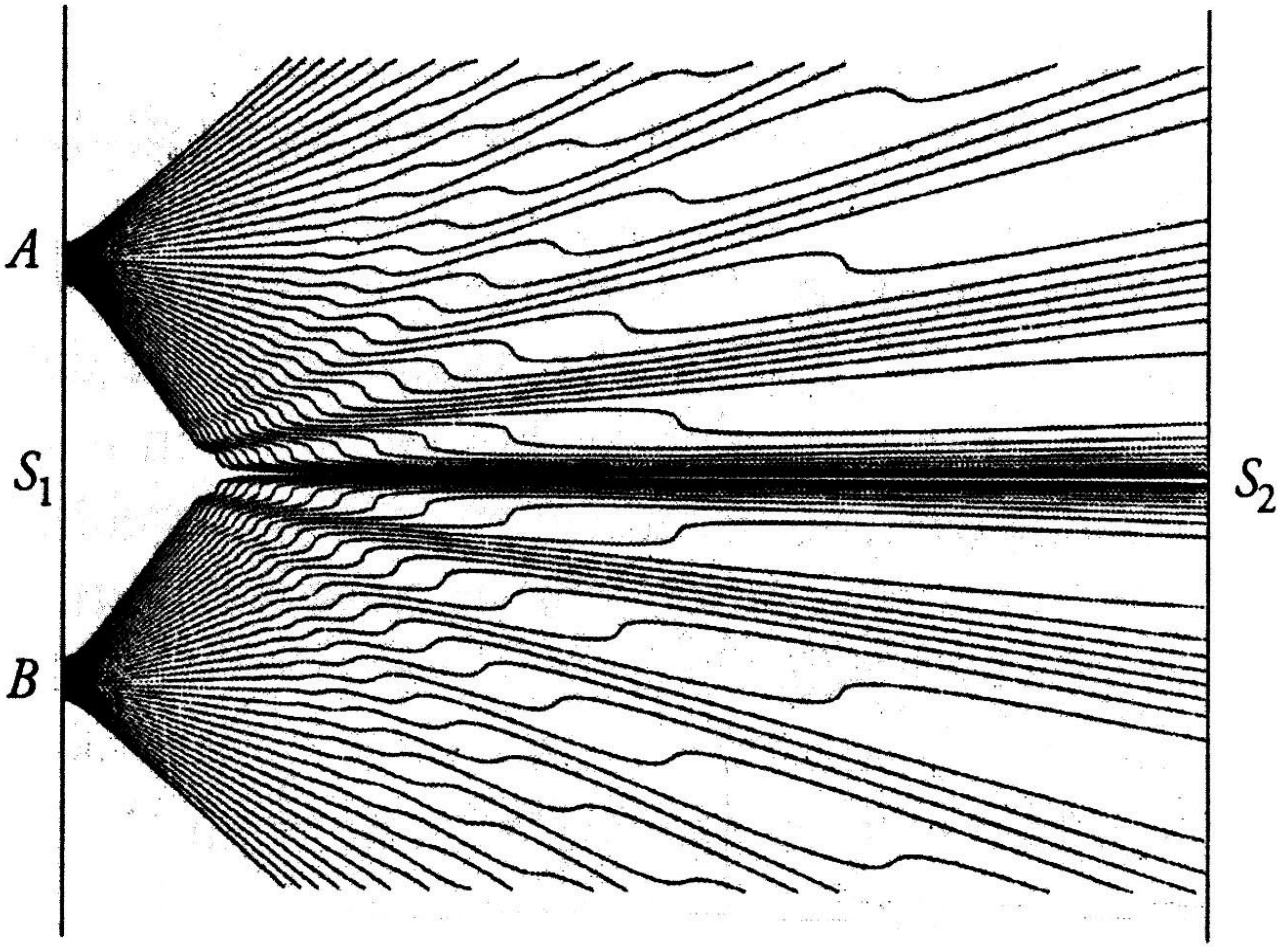
Rappresentazione delle traiettorie possibili secondo Bohm



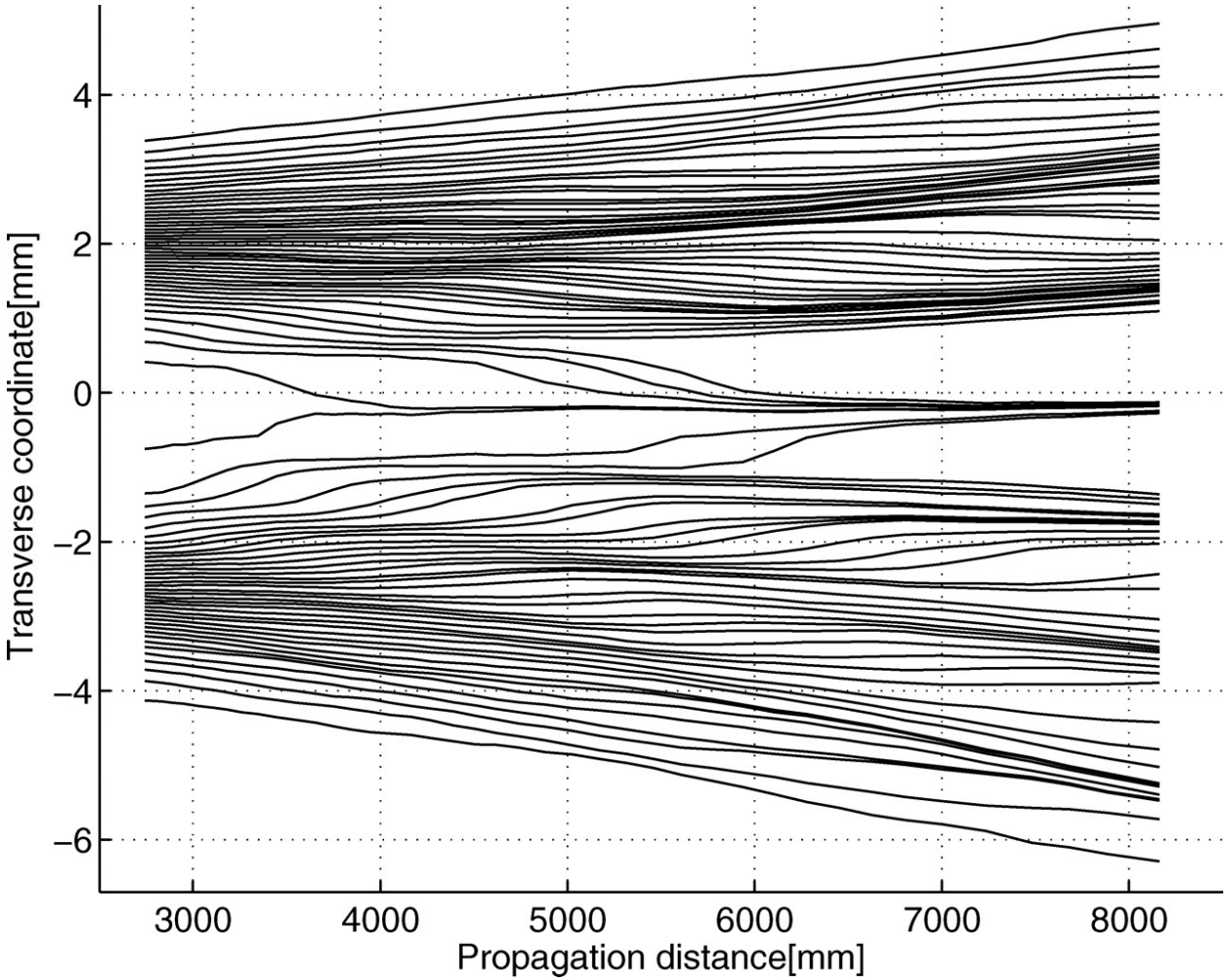
Potenziale quantico di Bohm



Traiettorie possibili secondo Bohm



Misura “debole” su fotoni singoli
A.M. Steinberg et al. - Science (2011)



Cos'è un fotone ?

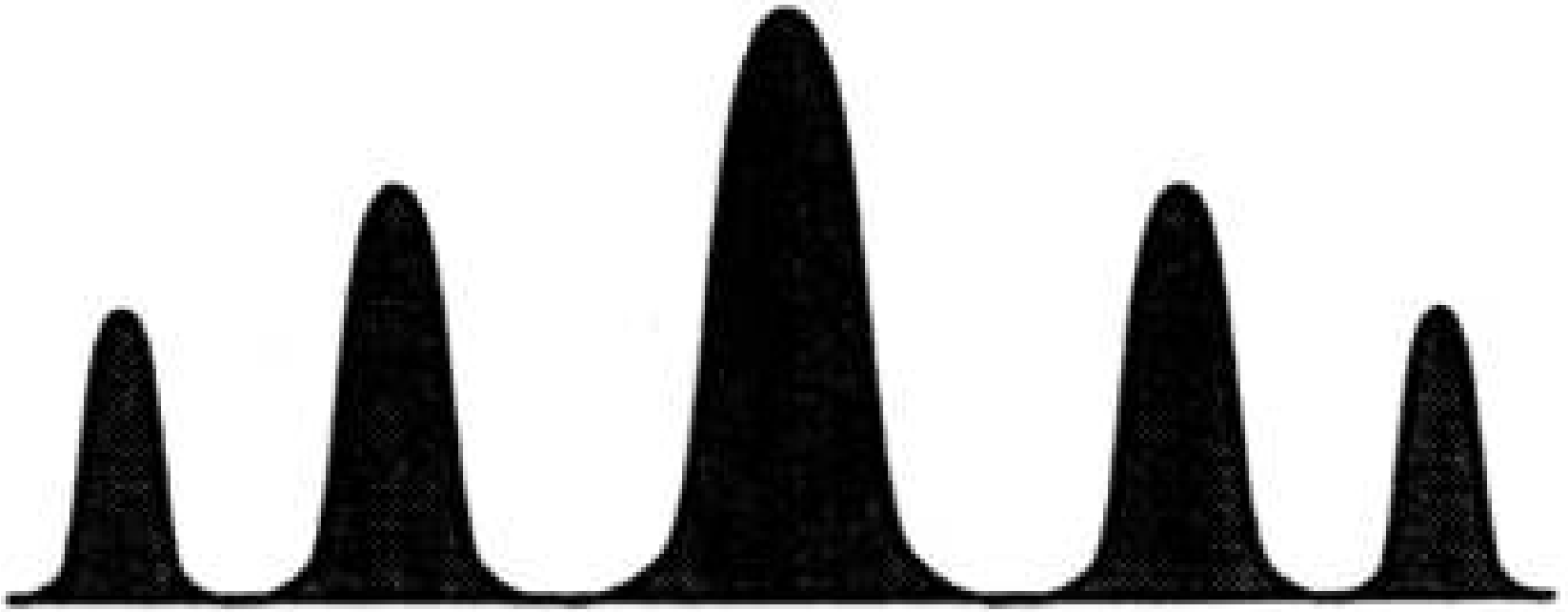
- Per Bohr, si tratta di una domanda mal posta.
  Il fotone si manifesterà come onda se indagato con un interferometro (doppia fenditura), come particella se misurato con un contatore.
- Complementarità di Bohr per doppia fenditura:
  V = Visibilità di frangia = proprietà ondulatorie
  P = Predicibilità cammino = proprietà particella

$$0 < V < 1 \qquad 0 < P < 1$$

- Onda: $V = 1$ $P = 0$
  Particella: $V = 0$ $P = 1$

Intensità dei picchi d'interferenza

$$V = (I_{MAX} - I_{min}) / (I_{MAX} + I_{min})$$

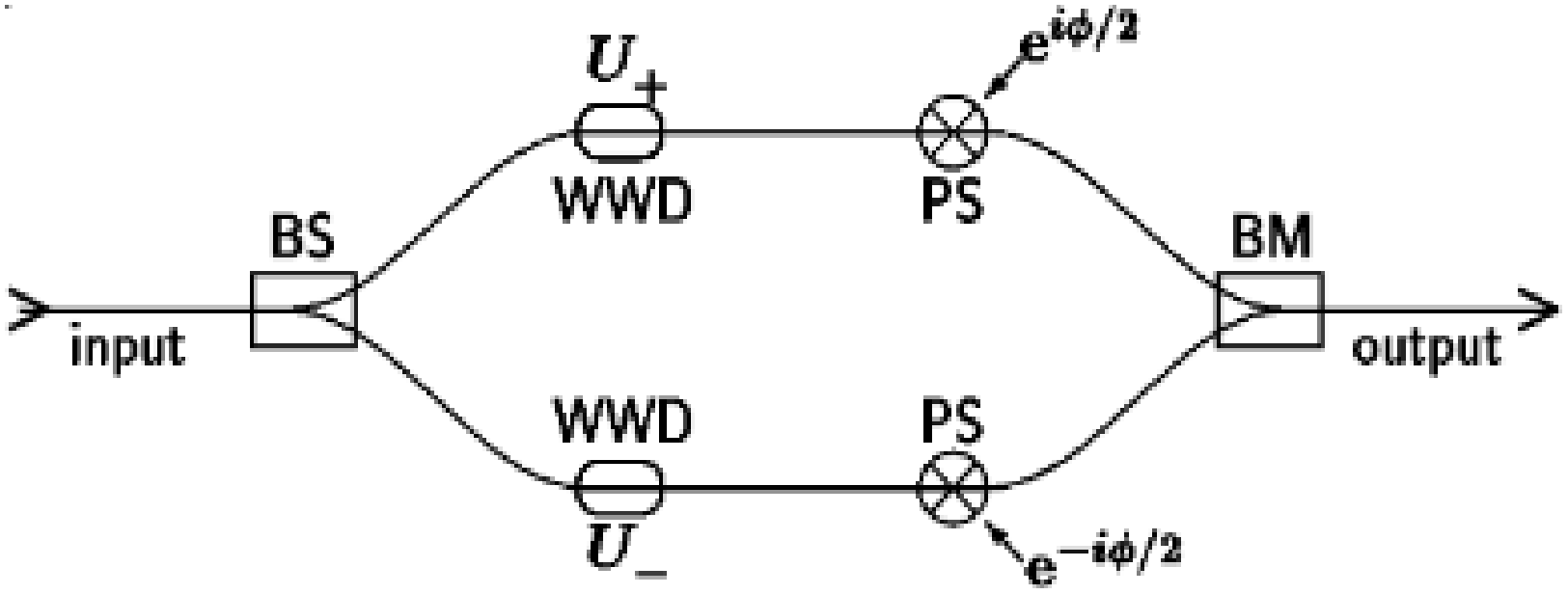


Greenberger-Yasin (1988)

- Nel 1988 D.M. Greenberger e A. Yasin hanno pubblicato "**Simultaneous** wave and particle knowledge in a neutron interferometer", in cui hanno generalizzato la complementarità:
- In generale $V^2 + P^2 < 1$
  Doppia fenditura $V^2 + P^2 = 1$

  Valgono ancora i casi limite di Bohr. Ma anche: ($V^2 = 0.2$; $P^2 = 0.8$) - ($V^2 = 0.5$; $P^2 = 0.5$) ecc.
- Si tratta di proprietà del sistema quantistico, prima che questi interagisca con un sistema di misura

Which-Way Interferometer



Il fotone entra da SN, arriva al Beam Splitter, si divide tra i due bracci, interagisce con i 2 Wich Way Detector U_+ e U_-

(che ne registrano il passaggio), arriva al Beam Merger, esce dall'interferometro e se ne misura la fase, ovvero la figura d'interferenza. A posteriori si vanno a leggere i WWD U_+ U_-

Berthold-Georg Englert (1996)

- Nel 1996 B.-G. Englert pubblicò "**Fringe visibility** and **which-way** information: An inequality", in cui mostra come si possano misurare quantità legate sia al cammino percorso sia alla figura d' interferenza di fotoni singoli in un interferometro
- V_o = Visibilità a posteriori = proprietà ondulatorie
  D = Distinguibilità misurata = proprietà particella
  In generale $V_o^2 + D^2 < 1$
  Per fotoni singoli $V_o^2 + D^2 = 1$
- Ma allora, cosa resta della dicotomia onda/particella di Bohr ? Come descriviamo il fotone ?

Dualità onda/particella

- Le relazioni e gli esperimenti di Greenberger-Yasin e di Englert non permettono più di parlare di dualismo onda/particella nei termini della complementarità di Bohr (onda o particella), ma di dualità di Greenberger-Englert (né onda, né particella)
- R. Feynman già nel 1965 aveva scritto che l'elettrone «non si comporta in nessuno dei due modi ... non è **né** l'una **né** l'altra cosa... Il comportamento quantistico degli oggetti atomici (elettroni, protoni, neutroni e così via) è lo stesso per tutti, sono tutti "onde-particelle", o qualunque altro nome vi piaccia dar loro.» (**R. Feynman – "*The Feynman Lectures on Physics* – vol.3"**)

Quantoni: gli enti della MQ

- Nel 1967 l'epistemologo Mario Bunge suggerì d'usare un nuovo nome collettivo per gli enti della MQ: né onde, né particelle, ma quantoni:

  « ...è necessario riconoscere che si ha in questo caso un tipo differente d'entità, che è specificatamente quantico. Perciò chiamiamo questi enti *quantoni.*» (**J.-M. Lévy-Le-blond – "*Quantics. Rudiments of Quantum Physics*"**)

- Ma cosa sono i "quantoni" ? Sono nuovi enti fisici o un ***escamotage*** nominalistico ? Si tratta in effetti di un "nuovo animale" (ornitorinco) o di un nuovo nome che abbiamo inventato per identificare un "animale fantastico" (unicorno) ?

Statistiche quantistiche

- Lo *spin* (proprietà intrinsecamente quantistica) permette d'identificare due tipi di enti quantici:

  a) Bosoni con *spin* intero (0, 1, 2...)

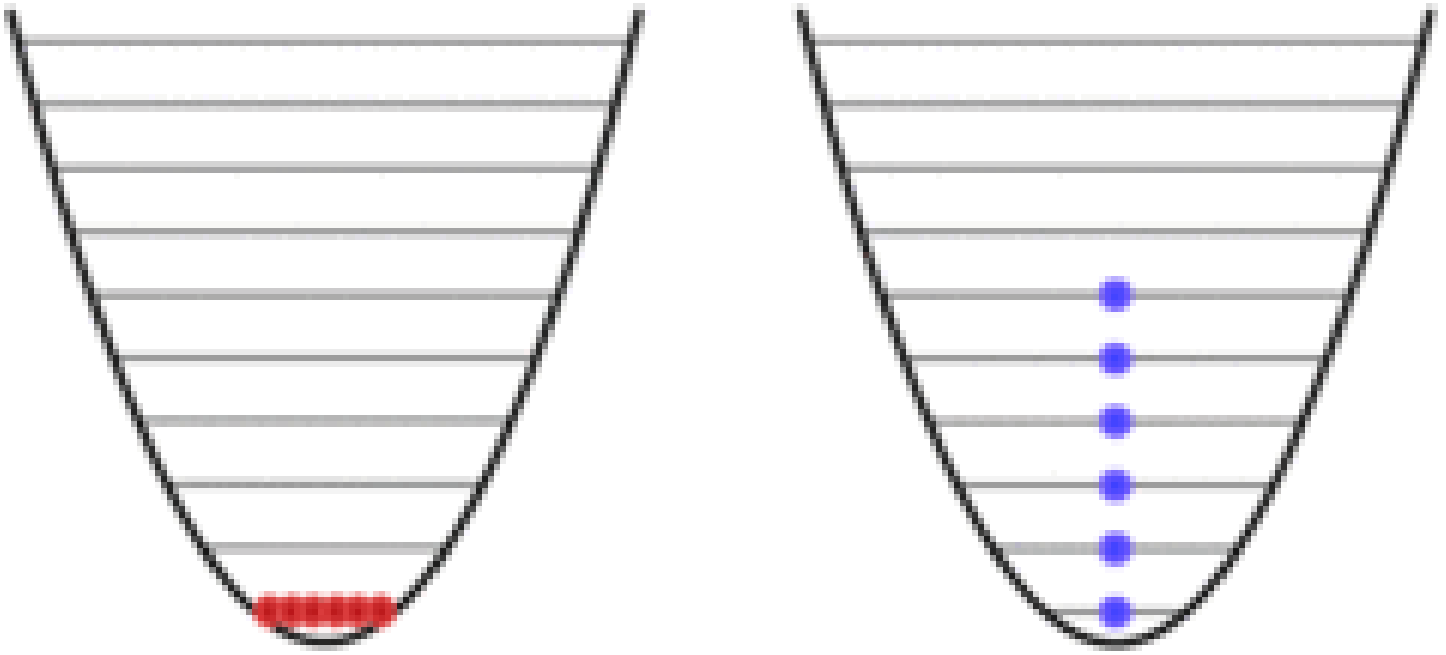
  b) Fermioni con *spin* semi-dispari (1/2, 3/2, 5/2...)

- Il teorema di connessione tra spin e statistica, formulato da Wolfgang Pauli nel 1940, identifica due comportamenti statistici totalmente diversi:

  a) Bosoni sono bosofili (statistica di Bose/Einstein)

  b) Fermioni sono fermiofobici (statistica di Fermi/Dirac)

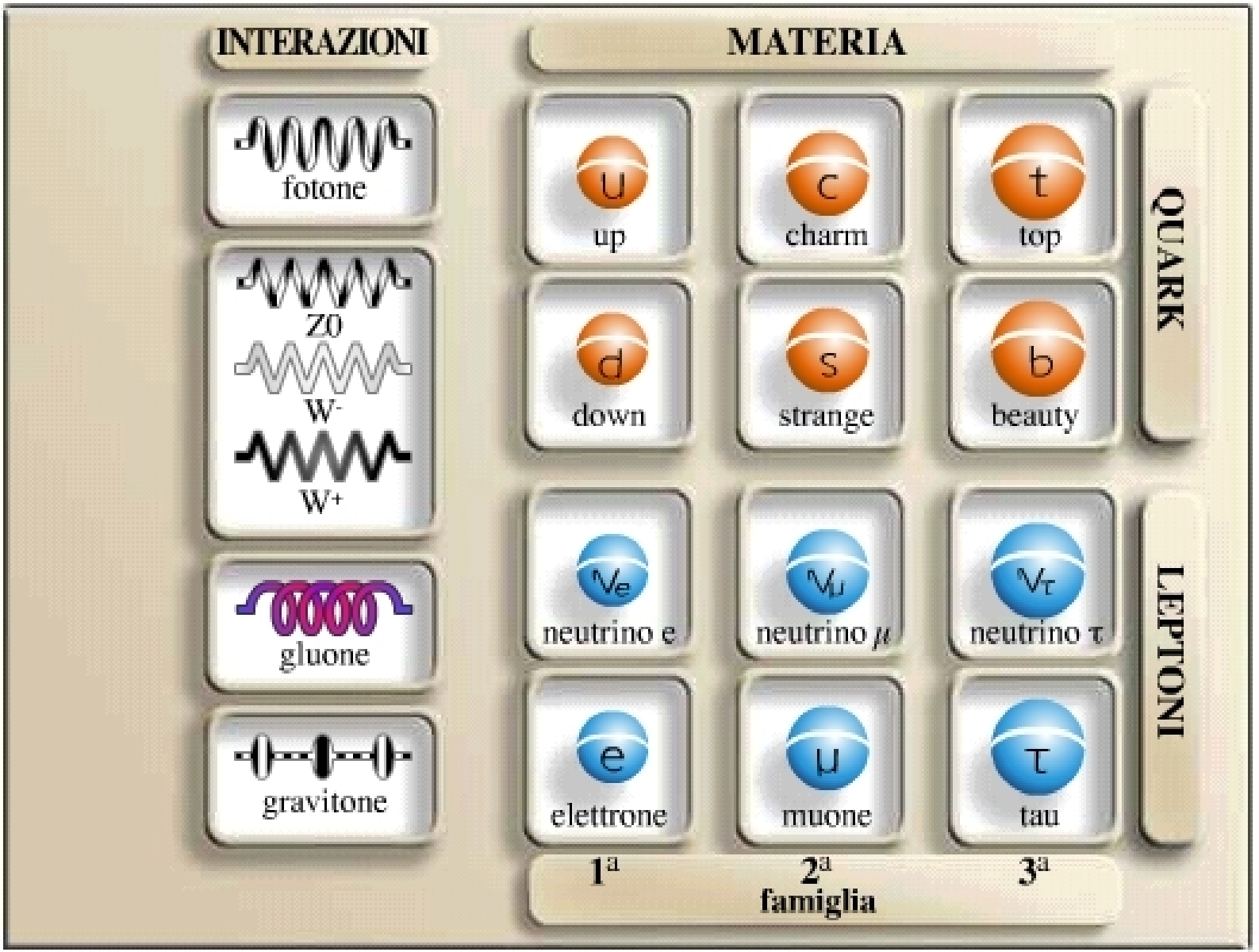
Bosoni bosofili
Fermioni fermiofobici



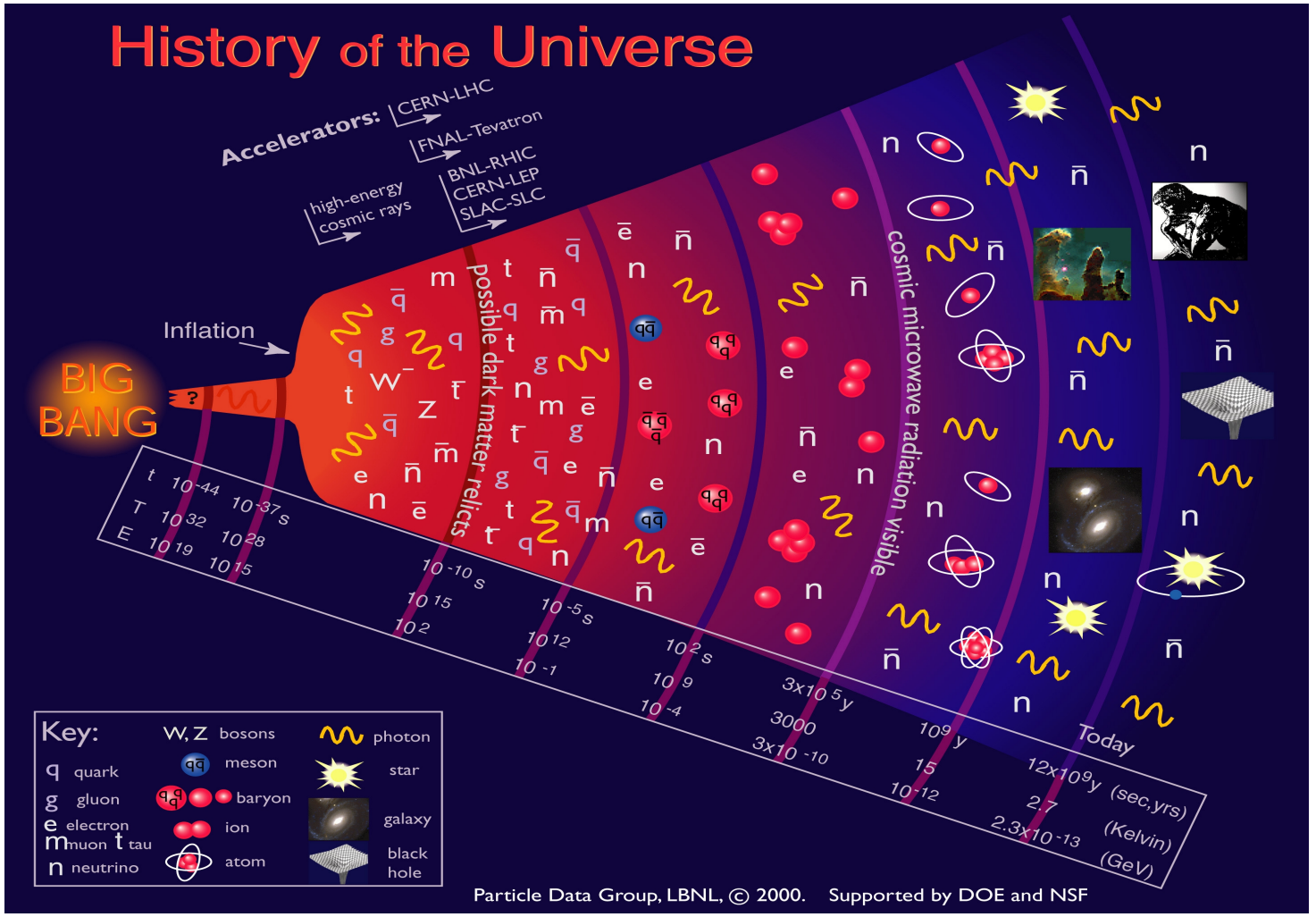
Bosoni e Fermioni

- Tutti gli enti microfisici (quantoni) sono classificabili o come bosoni o come fermioni.
- La dicotomia onda/ particella caratterizza sistemi classici (FC). Quella bosone/fermione è fondamentale in ambito quantistico (MQ)
- La struttura ontologica della realtà quantistica è costituita non da onde e/o particelle (FC), ma da bosoni o fermioni (MQ)
- Il modello standard dei costituenti elementari della materia (quark, leptoni, bosoni di gauge) identifica quark, leptoni come fermioni; i bosoni di gauge come bosoni

Bosoni e Fermioni elementari



Big Bang: l'origine dell'Universo



Cos'è un fotone

- Chiedersi se un fotone sia un'onda o una particella ha lo stesso senso che domandarsi se un canguro sia una mela o una pera. Anche se gli ultimi tre sono tutti studiati in biologia, appatengono a due regni distinti (animale e vegetale) e quindi incomparabili. Lo stesso vale per onda, particella e fotone: sono enti fisici, ma i primi due della FC; il terzo della MQ.
- Secondo la MQ, un fotone è un bosone con spin S = 1 che viaggia alla velocità della luce $c = 3 \times 10^8$ m/s e di conseguenza ha massa nulla: m = 0.
- Nel modello standard delle particelle elementari, il fotone è un bosone di gauge, mediatore delle interazioni elettro/magnetiche

Articolo on-line

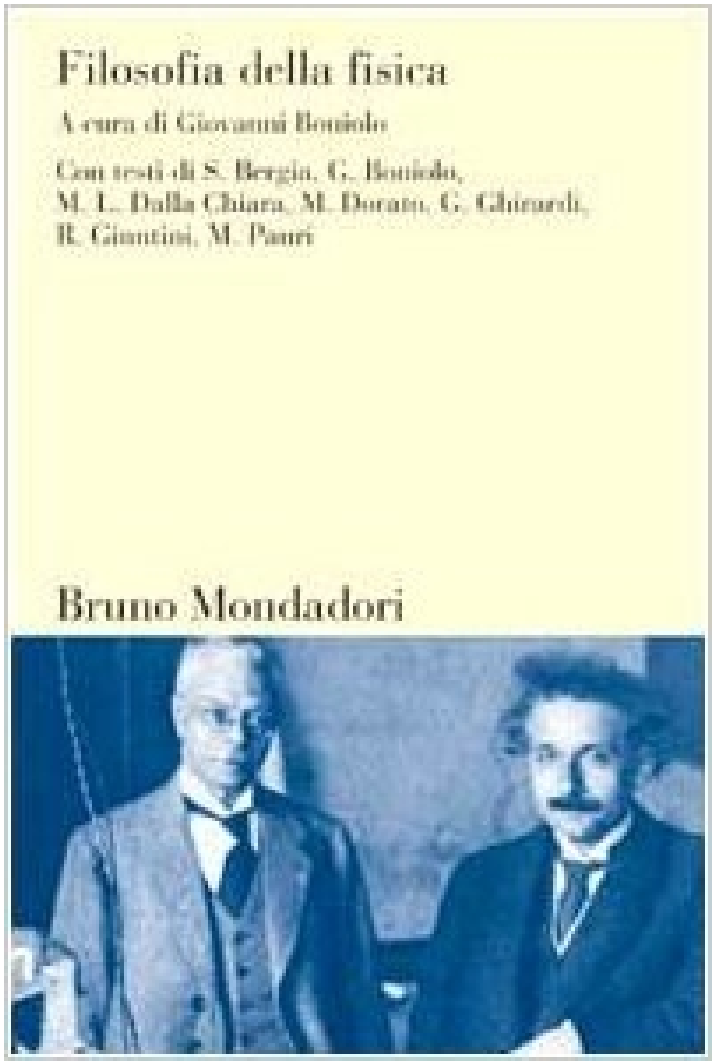
IL DUALISMO ONDA/PARTICELLA:
ANALISI STORICA e RECENTI INTERPRETAZIONI

Sin dai due articoli di Einstein del 1909 sulle fluttuazioni d'energia del corpo nero, che introdussero il dualismo onda/particella nella fisica moderna, filosofi e fisici si sono interrogati sul significato e la portata di tale problematico concetto. Questo articolo ne presenta otto interpretazioni differenti, e discute l'evoluzione del dualismo in meccanica quantistica dalle origini ad oggi.

Atti della Accademia Roveretana degli Agiati
anno 260, 2010, serie VIII, volume X B, pp.5-18

http://www.agiati.it/UploadDocs/4878_art01_introzzi.pdf

Boniolo – Filosofia della fisica



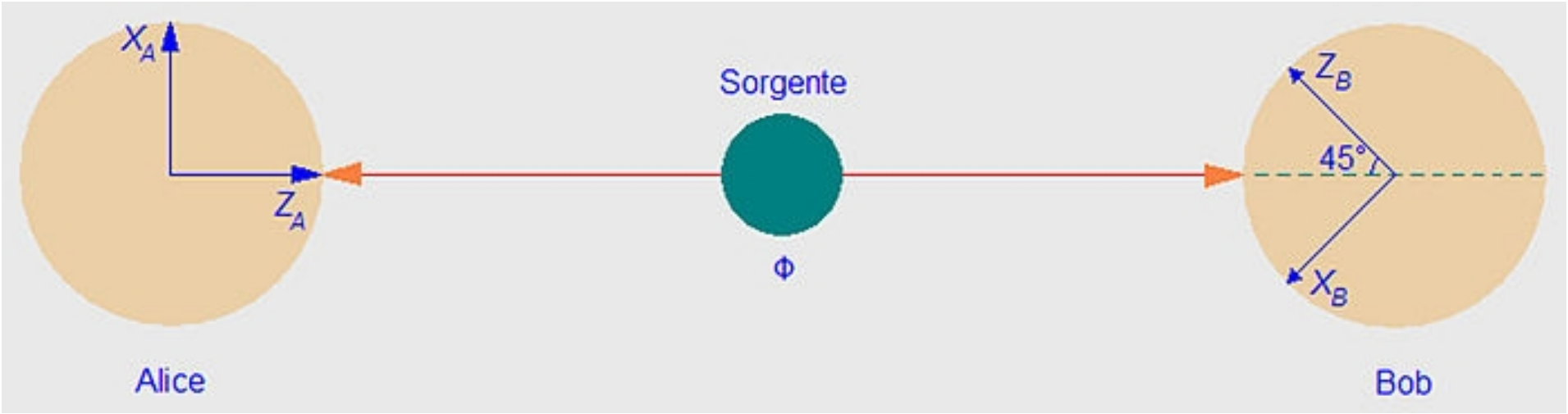
Dorato – La natura delle cose

Morganti – Filosofia della fisica

Pecere – Il libro della natura – vol.1

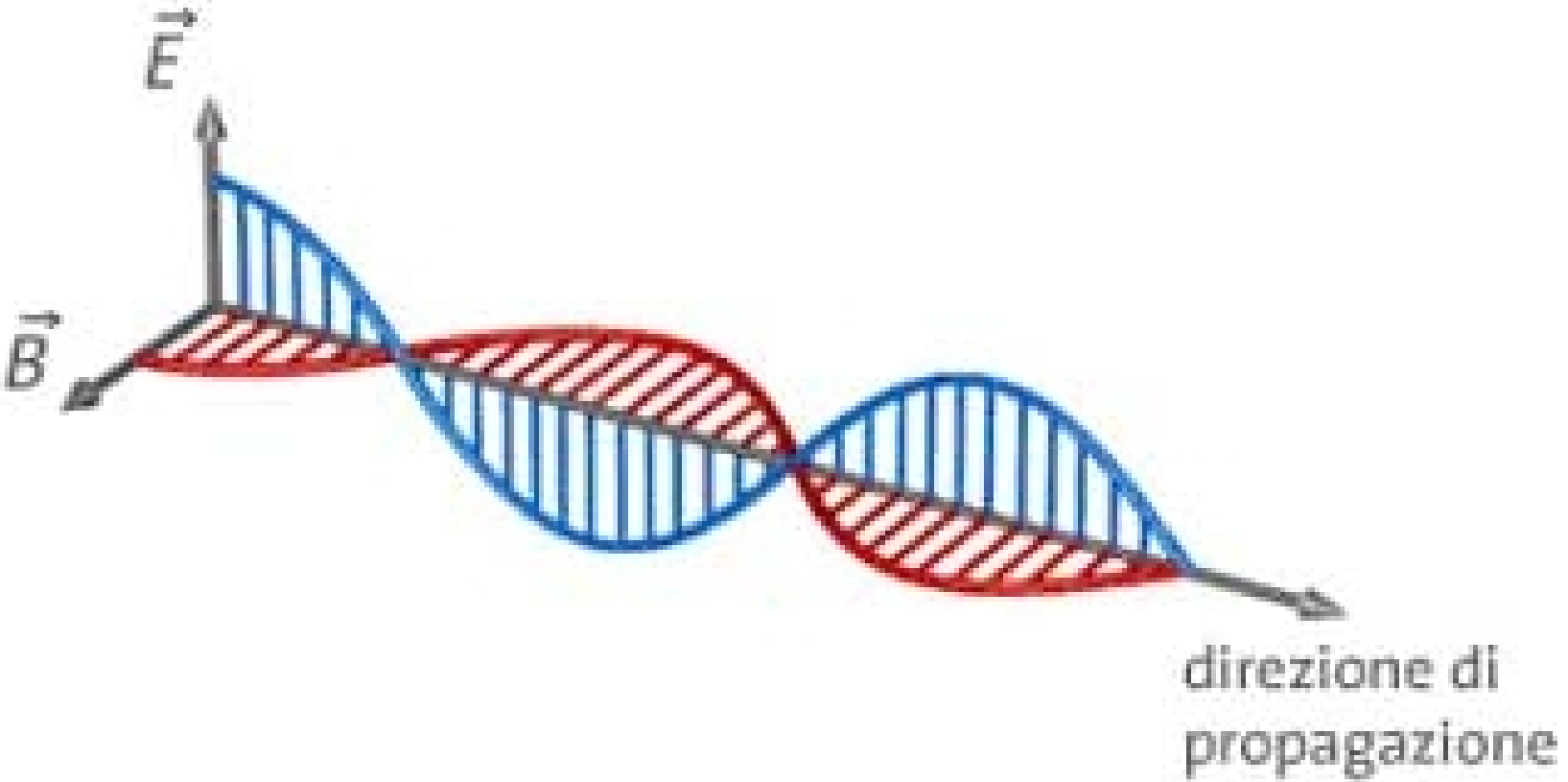
Pecere – Il libro della natura – vol.2

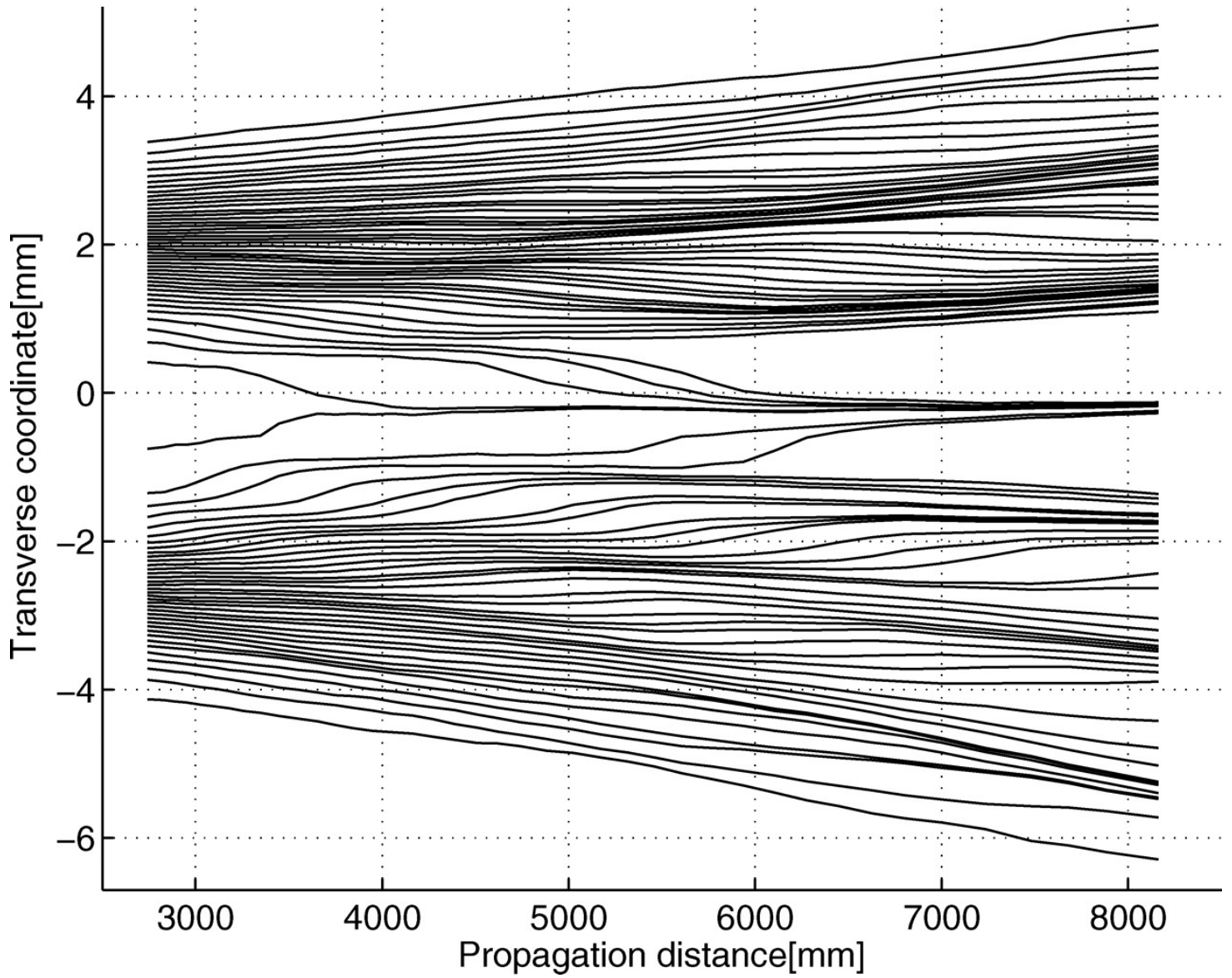
Lucidi di riserva


X_A
Z_A
Sorgente
Φ
Z_B
45°
X_B
Alice
Bob

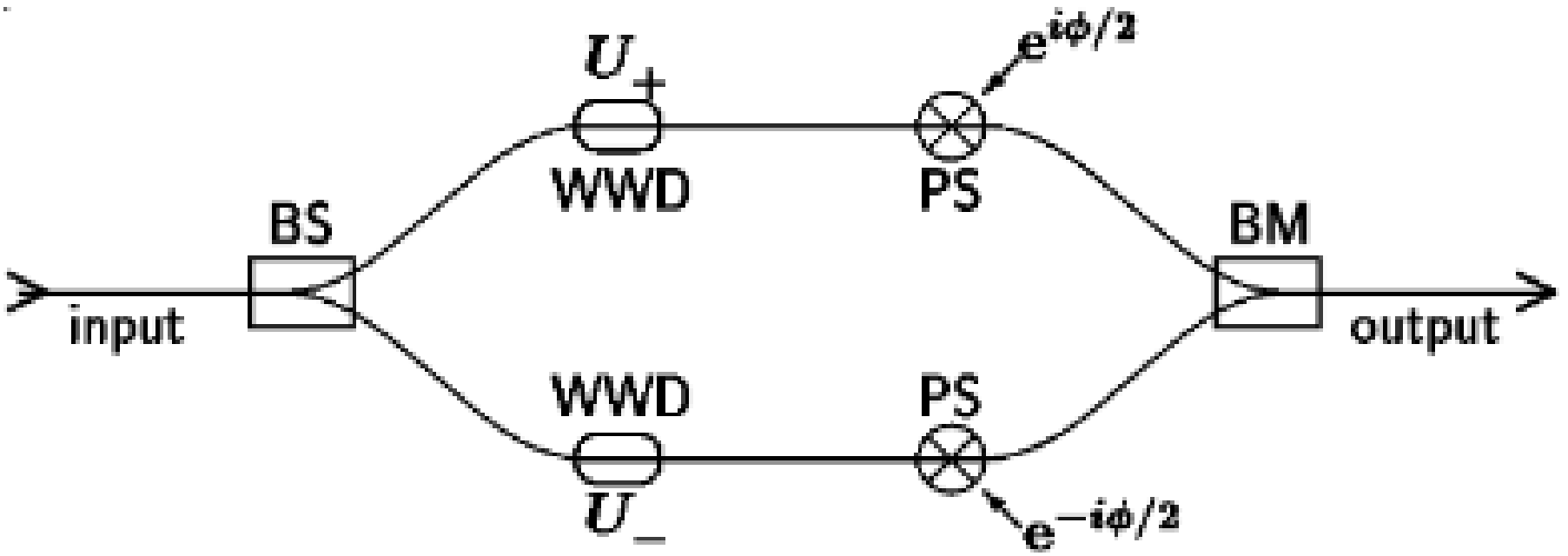
campo magnetico

campo elettromagnetico



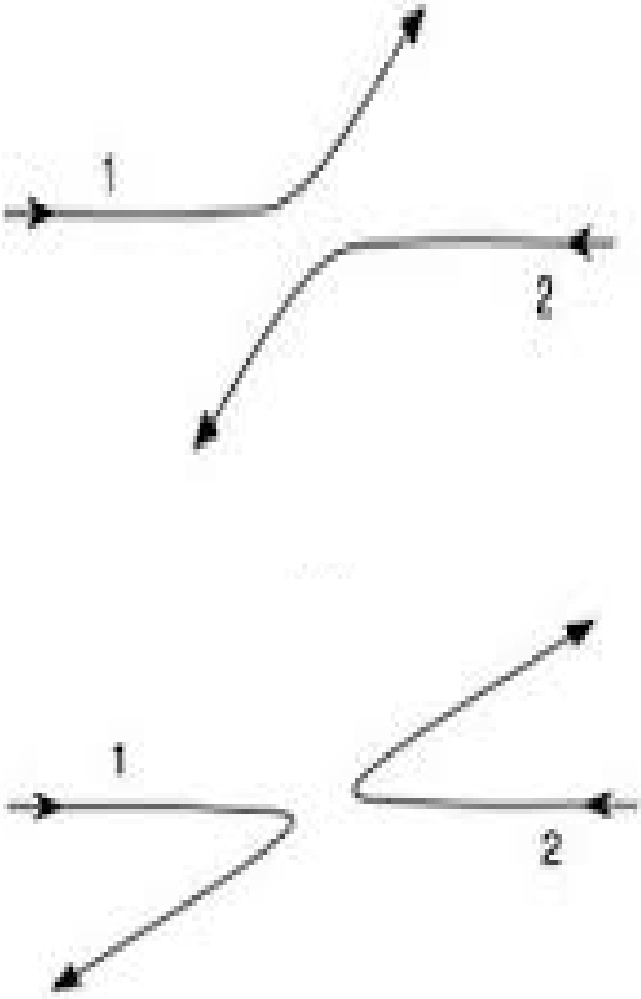

Transverse coordinate[mm]
4
2
0
−2
−4
−6
3000
4000
5000
6000
7000
8000
Propagation distance[mm]

Which-Way Interferometer



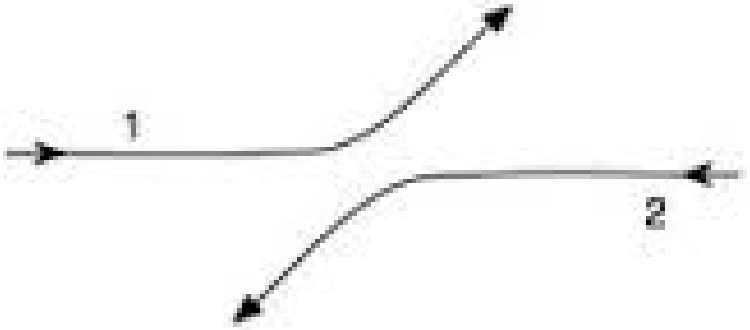
Indistinguibilità quantistica

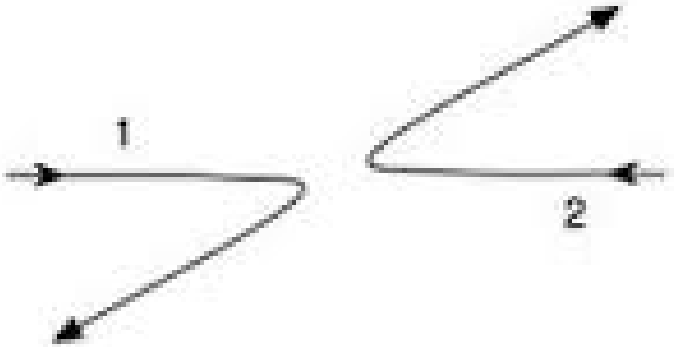
Le particelle classiche risultano sempre distinguibili, grazie all' esistenza delle loro traiettorie. In MQ cade il concetto di traiettoria. Di conseguenza, enti identici in MQ risultano essere tra loro indistinguibili



Indistinguibilità quantistica

Le particelle classiche risultano sempre distinguibili, grazie all'esistenza delle loro traiettorie. In MQ non risulta più definibile la traiettoria. Di conseguenza, enti identici in MQ risultano essere tra loro indistinguibili





Bosoni e Fermioni

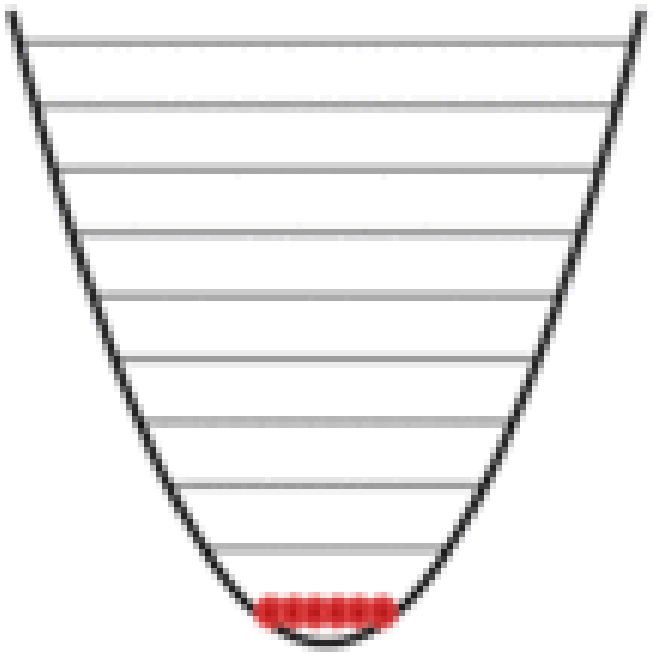
- Il teorema di connessione tra spin e statistica, formulato da Wolfgang Pauli nel 1940, identifica due tipi di enti quantici:

  1) Bosoni con *spin* intero (0, 1, 2...)
  2) Fermioni con *spin* semi-dispari (1/2, 3/2, 5/2...)

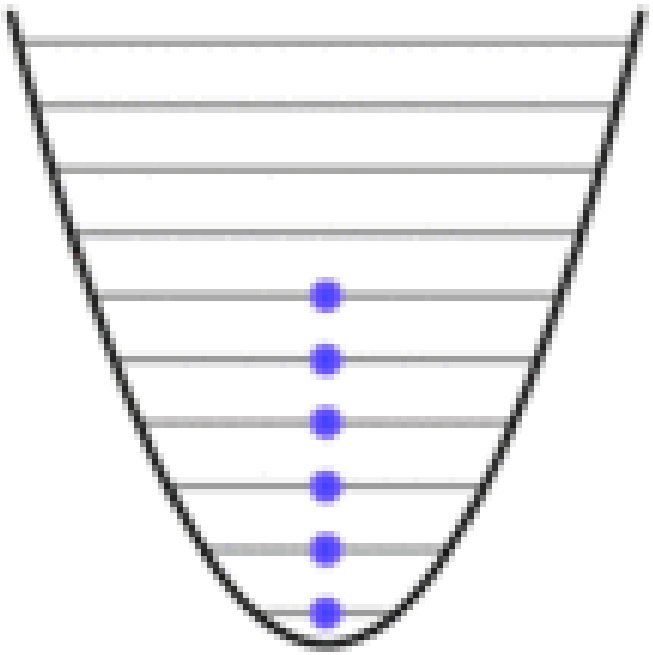
- Tutti gli enti microfisici (quantoni) sono classificabili o come bosoni o come fermioni. La dicotomia onda/particella caratterizza sistemi classici (Fisica Classica) mentre quella bosone/fermione è fondamentale in ambito quantistico.

- La struttura ontologica della realtà quantistica è costituita non da onde e/o particelle (FC), ma da bosoni o fermioni: modello standard dei costituenti elementari.

Bosoni bosofili
Fermioni fermiofobici



(criceti)



(orsi)