

# Finalmente uma verdadeira mecânica quântica

Tópicos de História  
da Física Moderna

Manhã

Diego de Oliveira

Apresentação baseada em:

Dos Raios X aos Quarks

Emilio Segrè

Capítulo VIII



# Contexto Histórico

1910



# Contexto Histórico

1910



# Contexto Histórico

1910



# Contexto Histórico

1910

Enquanto isso no Brasil...

# Contexto Histórico

1910

Enquanto isso no Brasil...

Eleição Presidencial de 1910: Marechal Hermes da Fonseca.

# Contexto Histórico

1910

Enquanto isso no Brasil...

Eleição Presidencial de 1910: Marechal Hermes da Fonseca.

"Para as faltas leves, prisão a ferro na solitária, por um a cinco dias, a pão e água; faltas leves repetidas, idem, por seis dias, no mínimo; faltas graves, vinte e cinco chibatadas, no mínimo."

# Contexto Histórico

1910

Enquanto isso no Brasil...

Eleição Presidencial de 1910: Marechal Hermes da Fonseca.



"Para as faltas leves, prisão a ferro na solitária, por um a cinco dias, a pão e água; faltas leves repetidas, idem, por seis dias, no mínimo; faltas graves, vinte e cinco chibatadas, no mínimo."

# Abrindo o caminho...



- Aristocrata Francês
- Estudou história
- Por influência do irmão, Maurice (secretário do primeiro encontro de Solvay – 1911), decidiu-se dedicar-se ao estudo da física teórica.
- Estudou o dilema: dualidade da natureza da luz.

“...sou da opinião que a próxima fase do desenvolvimento da física teórica nos trará uma teoria da luz que pode ser interpretada como uma espécie de fusão das teorias ondulatória e da emissão... (Einstein – 1909)



Louis de Broglie  
(1892–1987)

# Abrindo o caminho...

- Aristocrata Francês



teoria da luz que pode ser interpretada como uma espécie de fusão das teorias ondulatória e da emissão... (Einstein - 1909)



Louis de Broglie  
(1892-1987)

# Abrindo o caminho...



- Aristocrata Francês
- Estudou história
- Por influência do irmão, Maurice (secretário do primeiro encontro de Solvay – 1911), decidiu-se dedicar-se ao estudo da física teórica.
- Estudou o dilema: dualidade da natureza da luz.

“...sou da opinião que a próxima fase do desenvolvimento da física teórica nos trará uma teoria da luz que pode ser interpretada como uma espécie de fusão das teorias ondulatória e da emissão... (Einstein – 1909)



Louis de Broglie  
(1892–1987)

# Abrindo o caminho...



- Ideia de de Broglie: “... os elétrons também não podem ser considerados simplesmente como corpúsculos.” ...

$$\lambda = h/p$$

- Observou que a óptica tem duas faces:  
geométrica e ondulatória
- Ondas estacionárias demandam órbitas que “caibam” números inteiros de comprimentos de onda de elétrons. (... números inteiros)

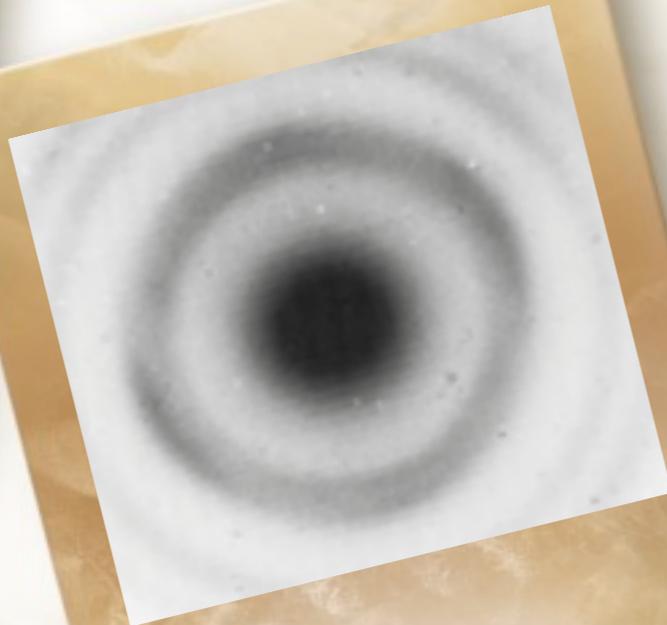


Louis de Broglie  
(1892–1987)

# Abrindo o caminho...



Walter Elsasser  
(1904 - 1991)



- O fenômeno de interferência produzidos por ondas de elétrons eram observados, mas não eram reconhecidos como tal... até que Walter Elsasser em 1925 explica essas experiências como difração de elétrons.
- “Jovem, você está sentado em cima de uma mina de ouro. (Einstein, ao ver o resultado do trabalho de Elsasser).



# Abrindo o caminho...



... Ninguém sabia avaliar...

- Juntou suas notas montando um documento ... tese de doutorado. Este foi classificado por Einstein como um documento com descobertas muito importantes.
- Concluiu que era necessário construir uma mecânica que tenha a mesma relação com a mecânica ordinária que a ótica ondulatória possui em relação à ótica geométrica

# Matrizes Mágicas



Werner Karl Heisenberg  
(1901–1976)

- Alemão
- Decidiu permanecer na Alemanha durante o nazismo
- Um dos líderes do projeto alemão da bomba atômica (sem alcançar muito sucesso... [ainda bem])
- Trabalhou para reerguer a ciência alemã após a 1ª Grande Guerra
- Amava a natureza e gostava de praticar esportes

# Matrizes Mágicas

- Austríaco
- Conheceu Heisenberg em Munique. Tornaram-se grandes amigos
- Era crítico e reconhecido por seu perfeccionismo
- Ficou famoso pelo artigo sobre relatividade geral para uma enciclopédia de matemática alemã – era apenas para revisar a parte de relatividade...
- Tinha algumas peculiaridades marcantes:



Wolfgang Ernst Pauli  
(1900–1958)

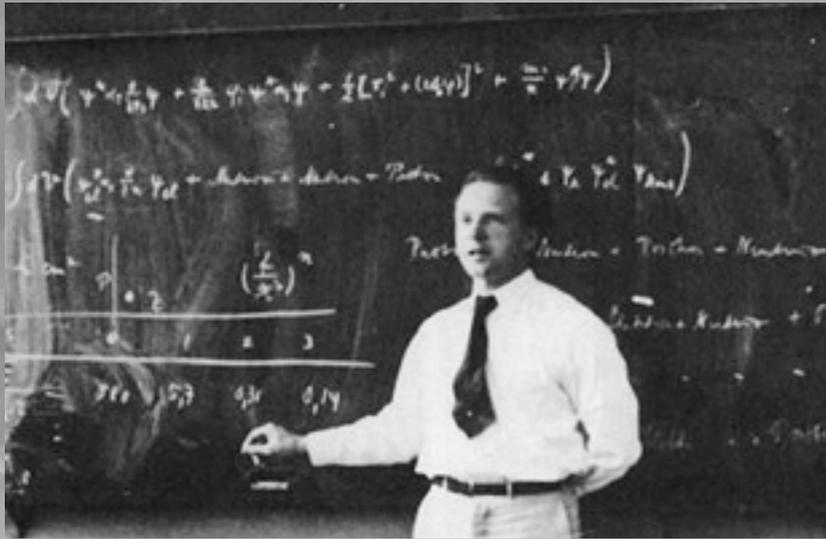
# Matrizes Mágicas

- Efeito Pauli:  
suposta capacidade bizarra de quebrar equipamentos científicos apenas com sua presença.
- “ganz falsch”:  
completamente errado!  
"Não apenas não está certo, como nem ao menos está errado!"
- “Quatsch”:  
Droga! – quando diante de uma nova teoria.



Wolfgang Ernst Pauli  
(1900–1958)

Heisenberg



# Matrizenmechanik

- Heisenberg e Pauli estavam sempre em contato.
- Pauli – da crítica mais entusiasmada a mas feroz.
- Em uma conferência Heisenberg se encontrou com Bohr... estudo do esquema das órbitas eletrônicas...
- Pauli e Heisenberg montaram um esquema que, após a ajuda de Max Born e seus “discípulos”, montaram uma formulação com uso de matrizes (**p** e **q**):

$$pq - qp = h/2\pi i$$



Pauli

Heisenberg



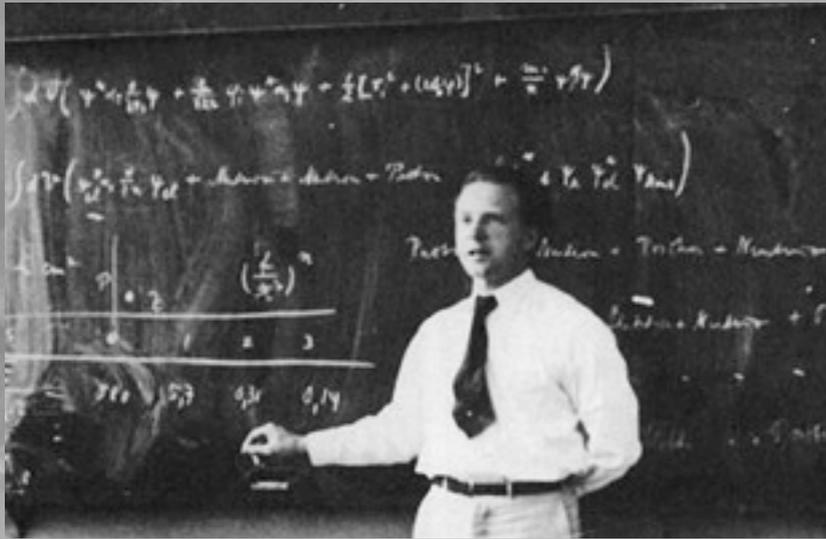
Pauli

# Matrizenmechanik

- Heisenberg e Pauli estavam sempre em contato.
- Pauli – da crítica mais entusiasmada a mas feroz.
- Em uma conferência Heisenberg se encontrou com Bohr... estudo do esquema das órbitas eletrônicas...
- Pauli e Heisenberg montaram um esquema que, após a ajuda de Max Born e seus “discípulos”, montaram uma formulação com uso de matrizes (**p** e **q**):

$$pq - qp = h/2\pi i$$

Heisenberg



# Matrizenmechanik

## Prós:

- Continha ideias novas
- Era a abertura de novos caminhos
- Oferecia a possibilidade de abandonar o conceito de órbita

## Contras:

- Expressões complicadas
- Não era muito clara
- Conceitos físicos nebulosos
- Limitada a um grupo pequeno de iniciados



Pauli

# Abstração e Matemática

- Inglês
- Começou estudando engenharia e passou para matemática.
- Aprendeu a teoria atômica de Bohr e logo depois conheceu a mecânica quântica por meio do primeiro artigo de Heisenberg sobre a Matrizenmechanik
- Notou semelhança entre os resultados e o Parêntese de Poisson
- Conseguiu melhorar a formulação de seus contemporâneos



Paul Adrien Maurice Dirac  
(1902–1984)

# O Tridente Admirável



Erwin Rudolf Josef  
Alexander Schrödinger  
(1887–1961)

- Austríaco
- Escrevia com facilidade e clareza
- Publicou o **Quantisierung als Eigenwertproblem** onde encontra-se a equação batizada em sua homenagem
- Trocou cartas com Einstein e Planck e outros
- Seu sucesso foi imediato – contraste com Heisenberg e Pauli
- Adoeceu de tão exausto – debates com Bohr.
- Teve dificuldades com o  $\psi$

# O Tridente Admirável

Prof. Schrödinger  
Zürich 6, Huttenstrasse 9

Sonderdruck aus  
„Annalen der Physik.“ IV. Folge.  
Bd. 79. 1926. Nr. 4.  
Verlag von Joh. Ambr. Barth in Leipzig.

§33-50

23) m. z.

47)

### 3. Quantisierung als Eigenwertproblem; von E. Schrödinger.

(Erste Mitteilung.)

§ 1. In dieser Mitteilung möchte ich zunächst an dem einfachsten Fall des (nichtrelativistischen und ungestörten) Wasserstoffatoms zeigen, daß die übliche Quantisierungsvorschrift sich durch eine andere Forderung ersetzen läßt, in der kein Wort von „ganzen Zahlen“ mehr vorkommt. Vielmehr ergibt sich die Ganzzahligkeit auf dieselbe natürliche Art, wie etwa die Ganzzahligkeit der *Knotenzahl* einer schwingenden Saite. Die neue Auffassung ist verallgemeinerungsfähig und rührt, wie ich glaube, sehr tief an das wahre Wesen der Quantenvorschriften.

Die übliche Form der letzteren knüpft an die Hamiltonsche partielle Differentialgleichung an:

$$(1) \quad H\left(q, \frac{\partial S}{\partial q}\right) = E.$$

Es wird von dieser Gleichung eine Lösung gesucht, welche sich darstellt als *Summe* von Funktionen je einer einzigen der unabhängigen Variablen  $q$ .

Wir führen nun für  $S$  eine neue unbekannte  $\psi$  ein derart, daß  $\psi$  als ein *Produkt* von eingriffigen Funktionen der einzelnen Koordinaten erscheinen würde. D. h. wir setzen

$$(2) \quad S = K \lg \psi.$$

Die Konstante  $K$  muß aus dimensionellen Gründen eingeführt werden, sie hat die Dimension einer *Wirkung*. Damit erhält man

$$(1') \quad H\left(q, \frac{K}{\psi} \frac{\partial \psi}{\partial q}\right) = E.$$

Wir suchen nun *nicht* eine Lösung der Gleichung (1'), sondern wir stellen folgende Forderung. Gleichung (1') läßt sich bei Vernachlässigung der Massenveränderlichkeit stets, bei Berücksichtigung derselben wenigstens dann, wenn es sich um das *Ein*-elektronenproblem handelt, auf die Gestalt bringen: quadratische



Prof. Schrödinger  
Zürich 6, Huttenstrasse 9

Sonderdruck aus  
„Annalen der Physik.“ IV. Folge.  
Bd. 81. 1926. Nr. 18.  
Verlag von Joh. Ambr. Barth in Leipzig.

§33-55

30) m. z.

54)

### 1. Quantisierung als Eigenwertproblem; von E. Schrödinger

(Vierte Mitteilung.)

Inhaltsübersicht: § 1. Elimination des Energieparameters aus der Schwingungsgleichung. Die eigentliche Wellengleichung. Nichtkonservative Systeme. — § 2. Ausdehnung der Störungstheorie auf Störungen, welche explizite die Zeit enthalten. Dispersionstheorie. — § 3. Ergänzungen zu § 2: Angeregte Atome, entartete Systeme, Streckenspektrum. — § 4. Erörterung des Resonanzfalles. — § 5. Verallgemeinerung für eine beliebige Störung. — § 6. Relativistisch-magnetische Verallgemeinerung der Grundgleichungen. — § 7. Über die physikalische Bedeutung des Feldskalars.

§ 1. Elimination des Energieparameters aus der Schwingungsgleichung. Die eigentliche Wellengleichung. Nichtkonservative Systeme

Die Wellengleichung (18) bzw. (18') von S. 510 der zweiten Mitteilung

$$(1) \quad \Delta \psi - \frac{2(E - V)}{E^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$$

bzw.

$$(1') \quad \Delta \psi + \frac{3n^2}{\lambda^2} (E - V) \psi = 0,$$

welche das *Fundament* der in dieser Abhandlungsreihe versuchten Neubegründung der Mechanik bildet, leidet an dem Übelstand, daß sie das Veränderungsgesetz für den „mechanischen Feldskalar“  $\psi$  nicht *einheitlich* und nicht *allgemein* ausspricht. Gleichung (1) enthält nämlich den Energie- oder Frequenzparameter  $E$  und ist, wie a. a. O. ausdrücklich betont, mit einem *bestimmten*  $E$ -Wert gültig für Vorgänge, welche

1) Vgl. Ann. d. Phys. 79. S. 361. 489; 80. S. 437. 1926; ferner über den Zusammenhang mit der Heisenbergschen Theorie: ebendort 79. S. 784.



reza

Is

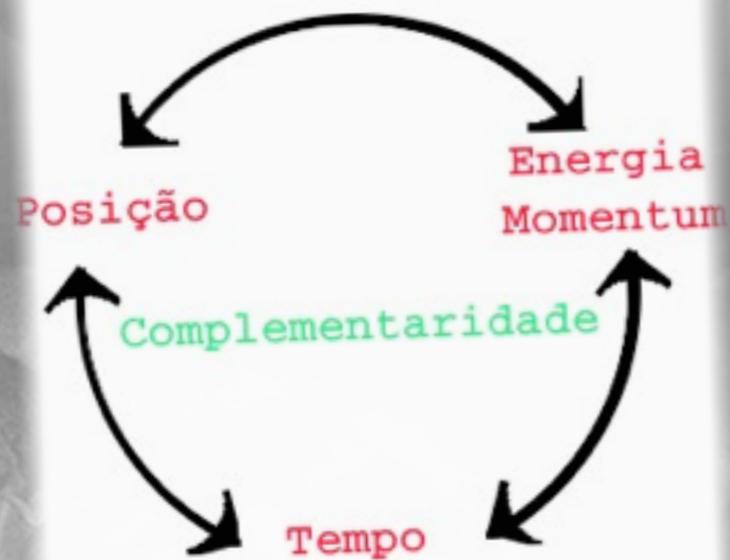
rada

Pauli

ebates

E  
Alex

# Certeza: Incerteza



Heisenberg



Schrödinger e o gato  
1935

- “A luz então é um fenômeno ondulatório ou será um composto de partículas?”
- Heisenberg conclui que as condições quânticas estão na raiz do dilema
- Devido a esta natureza dualística surge o **Princípio da Incerteza de Heisenberg**:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

erro ≠ imperfeição  
[complementaridade]  
recuo e difração: inevitáveis

# Nem todos apreciam

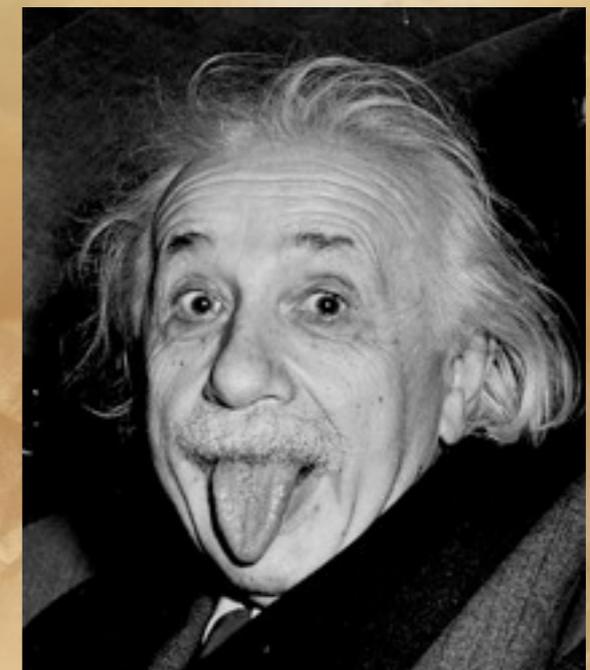
- Física probabilística ganha força
- Conferência Internacional de Física (Itália – 1927 [Mussolini]) – Inauguração da Mecânica Quântica



Fermi,  
Heisenberg e  
Pauli



Bohr



Einstein (ausente)

- Mas logo depois, em Bruxelas...

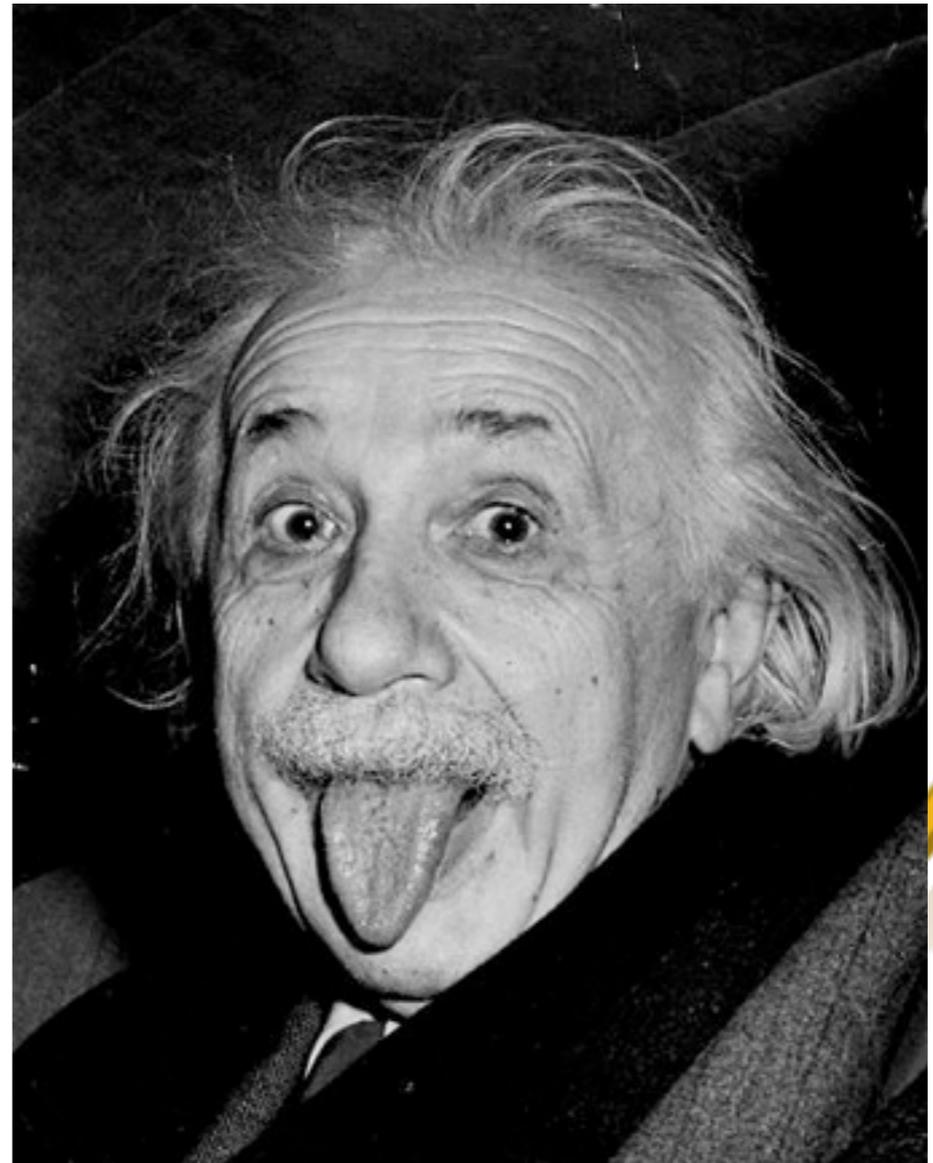
# Nem todos apreciam

“...A solução deste problema é a Relatividade Geral...”



VS

“Deus não joga dados”



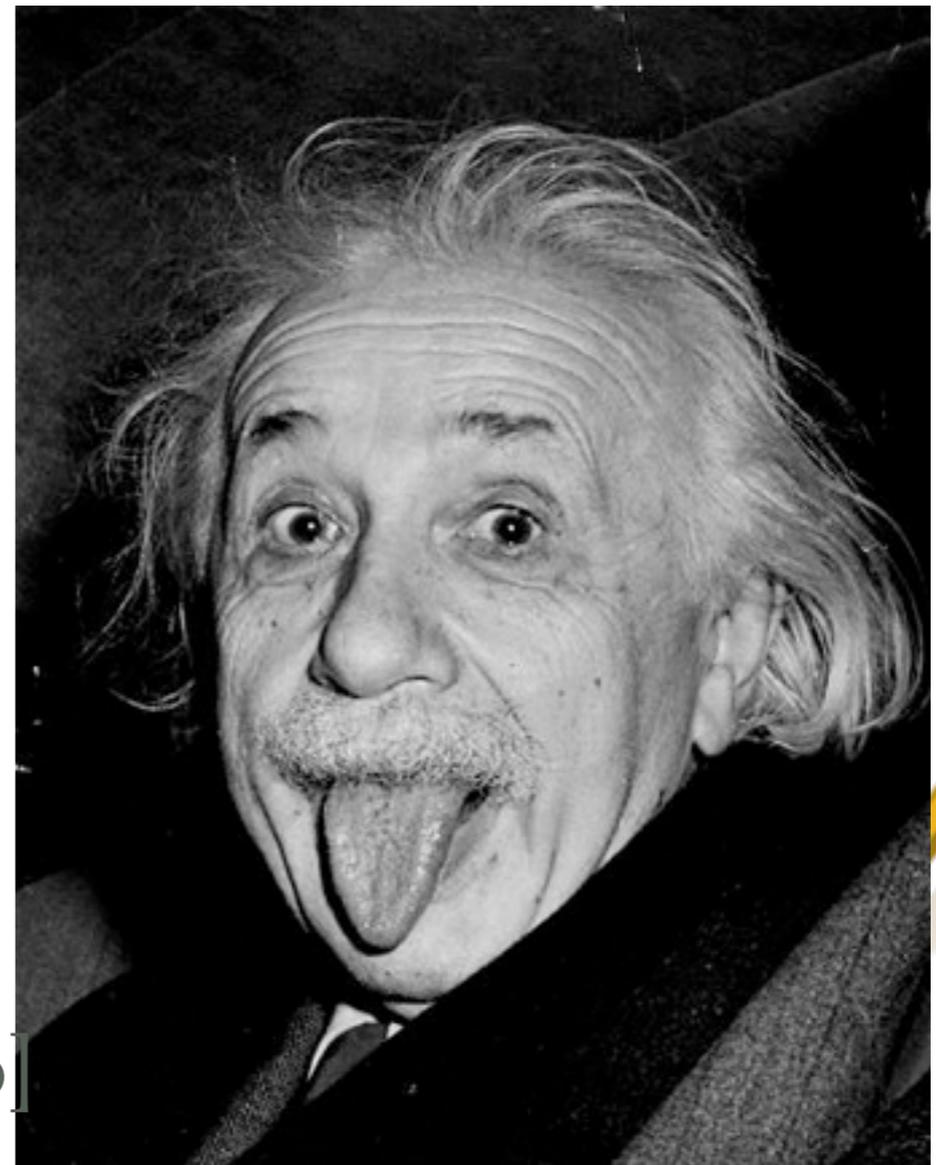
# Nem todos apreciam

“...A solução deste problema é a Relatividade Geral...”



VS

“Deus não joga dados”



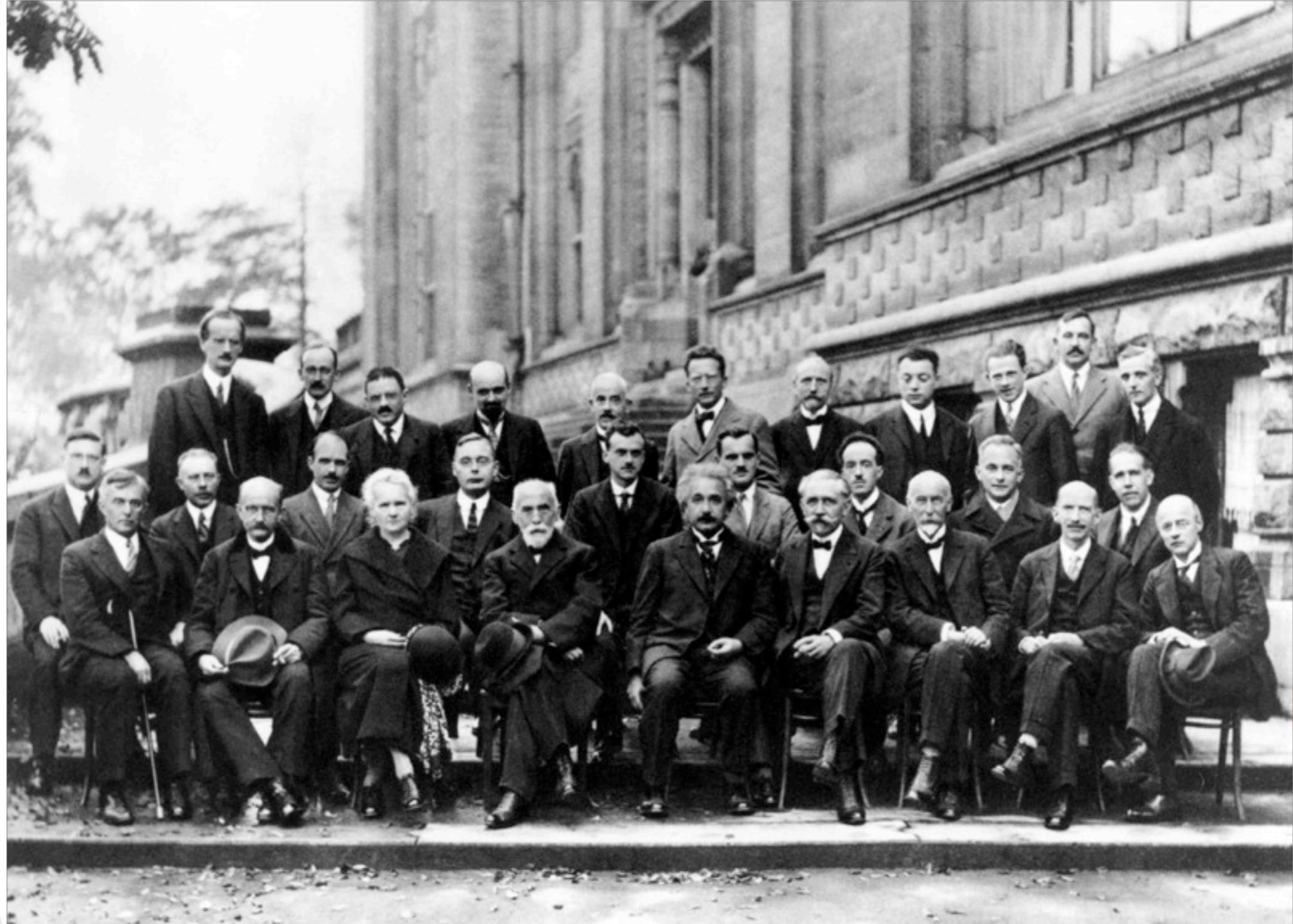
[Questão]



# Conferência de Solvay – 1927



# Conferência de Solvay – 1927



# Conferência de Solvay – 1927



SOLVAY CONFERENCE 1927

colourized by pastincolour.com

A. PICARD    E. HENRIOT    P. EHRENFEST    Ed. HERSEN    Th. DE DONDER    E. SCHRÖDINGER    E. VERSCHAFFELT    W. PAULI    W. HEISENBERG    R.H FOWLER    L. BRILLOUIN  
P. DEBYE    M. KNUDSEN    W.L. BRAGG    H.A. KRAMERS    P.A.M. DIRAC    A.H. COMPTON    L. de BROGLIE    M. BORN    N. BOHR  
I. LANGMUIR    M. PLANCK    Mme CURIE    H.A. LORENTZ    A. EINSTEIN    P. LANGEVIN    Ch.E. GUYE    C.T.R. WILSON    O.W. RICHARDSON

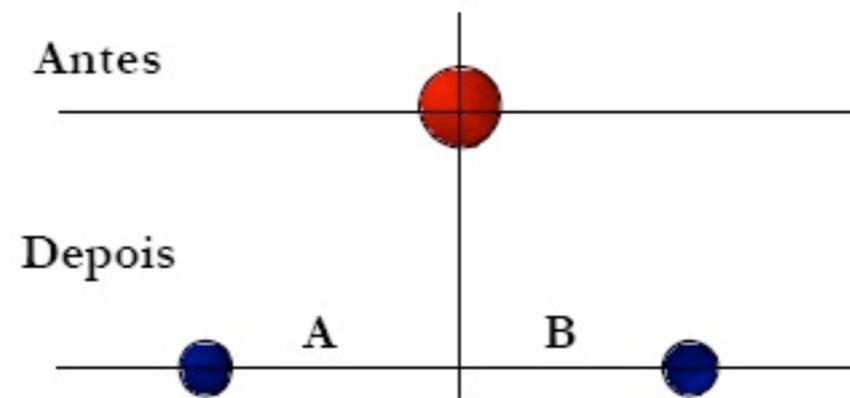
Absents : Sir W.H. BRAGG, H. DESLANDRES et E. VAN AUBEL

# Paradoxo EPR



# Paradoxo EPR

Einstein, Podolsky e Rosen (1935)



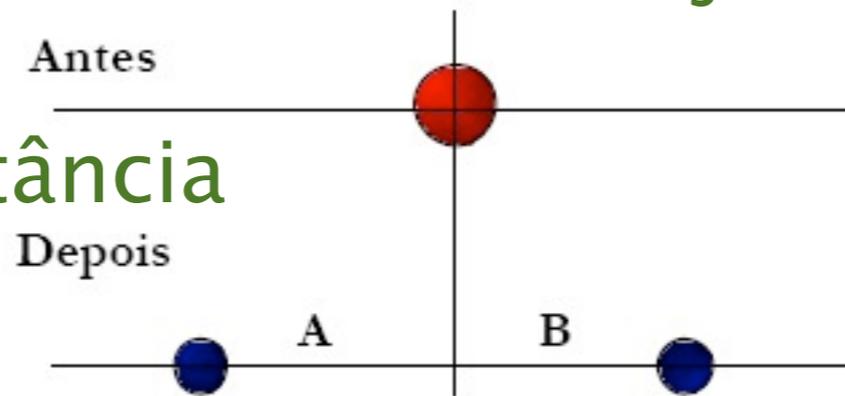
# Paradoxo EPR

Einstein, Podolsky e Rosen (1935)

O que for alterado em A, o será em B

Nada viaja mais rápido que a luz

Ação fantasma à distância



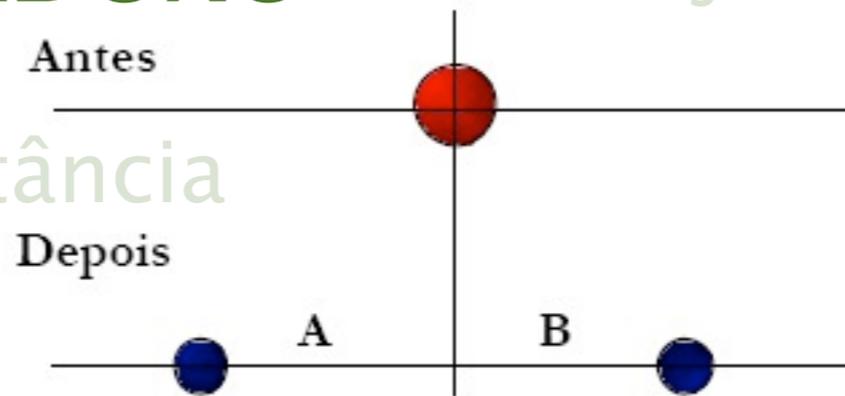
# Paradoxo EPR

Einstein, Podolsky e Rosen (1935)

O que for alterado em A, o será em B

**PARADOXO** Nada viaja mais rápido que a luz

Ação fantasma à distância



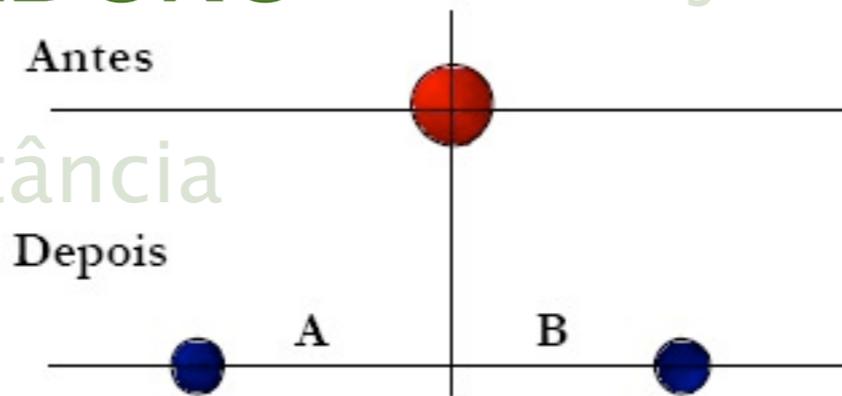
# Paradoxo EPR

Einstein, Podolsky e Rosen (1935)

O que for alterado em A, o será em B

**PARADOXO** Nada viaja mais rápido que a luz

Ação fantasma à distância



O gato de Schroedinger (1935)

Meio vivo



Meio morto



bOra!bigod



Obrigado!

