

Epistemologia da Física

HG 516 - 2014

Parte 3

Escola de Copenhague

- Niels Bohr: doutrina da “coplementaridade”

→ Renúncia a uma ontologia quântica:

“Não há um mundo quântico. ... É errado pensar que a tarefa da física é descobrir como a Natureza é.”

→ “Instumentalismo”:

- “[A] interpretação física apropriada do formalismo simbólico da mecânica quântica resume-se apenas em predições, de caráter determinado ou estatístico, relativas a fenômenos indivisíveis que aparecem sob condições definidas por conceitos da física clássica.”

Oposição realista

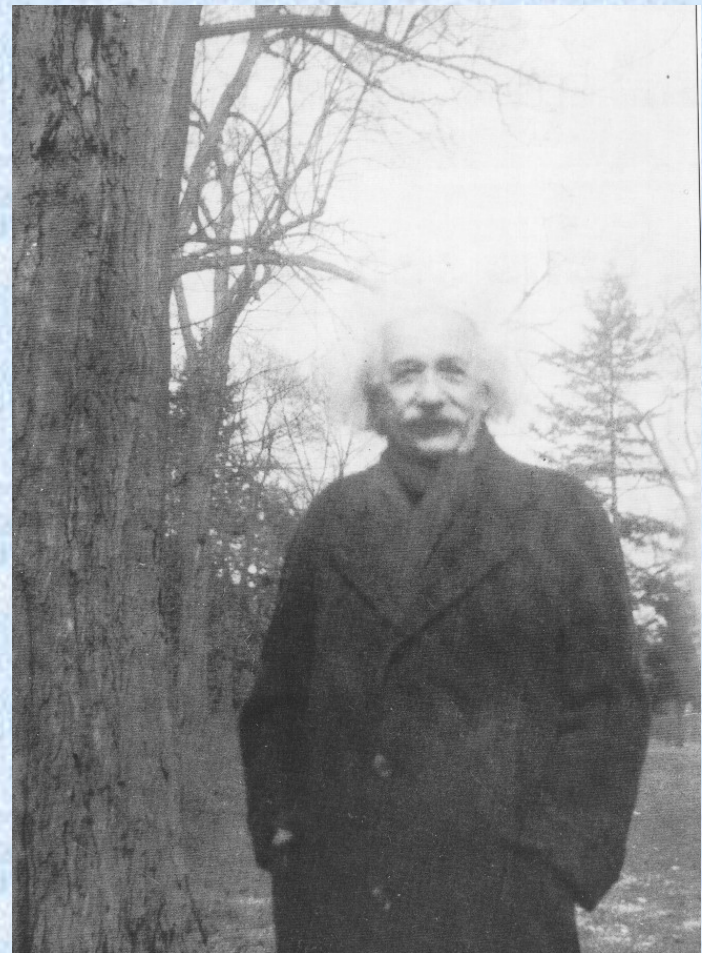
1. Einstein

“A física é,
evidentemente, a
descrição do Real.”

2. Schrödinger

3. de Broglie*

→ A mecânica quântica é
incompleta enquanto
descrição da realidade física



PREDIÇÕES NA MECÂNICA QUÂNTICA

ψ (estado quântico)

R1 R2 R3 ... (resultados de medida possíveis)

A MQ só dá as *probabilidades* da ocorrência dos resultados, $\Pr_{(R_n)}$ (com algumas exceções)

CONSEQÜÊNCIA:

A teoria tem uma limitação teórica,
relativamente às teorias clássicas

Ela é uma teoria essencialmente *probabilista*
(análoga à mecânica estatística clássica)

Haveria um nível teórico mais “fino” ?

- **Não** –

“Interpretação de Copenhague”:

A MQ é completa, diz tudo o que há para dizer sobre o mundo:

probabilidades sobre fenômenos; nada sobre a ontologia subjacente a eles

- **Sim** –

Einstein, Schrödinger, de Broglie:

Há alguma coisa a mais para dizer:

predições de fenômenos individuais e uma ontologia quântica

Argumento direto para a incompletude:

Nenhum Ψ permite deduzir os valores de todas as propriedades dinâmicas classicamente atribuídas aos objetos:

$$\Psi \Rightarrow p_1, \dots, p_3, \dots, p_6, \dots$$

No entanto, as propriedades não “contidas” em Ψ podem ser medidas a qualquer momento, e resultados bem definidos são obtidos

∴ Aparentemente, a descrição dos fenômenos dada por Ψ é incompleta

Objecção anti-realista (“ortodoxa”):

Tal raciocínio pressupõe que os resultados de medida sejam entendidos como a mera revelação de propriedades pré-existentes do objeto



Realidade

(pressuposição de uma realidade objetiva, independente dos “agentes de observação”)

Interpretação “ortodoxa” (“Copenhague”)

Duas variantes:

1. Propriedades antes inexistentes são **criadas** pela operação de medida (“idealismo”); ou
2. Essa operação introduz um **distúrbio ineliminável e incontrolável** nas propriedades pré-existentes, impossibilitando o seu conhecimento

Réplica realista:

Dois argumentos sofisticados para a incompletude da MQ:

1. Einstein, Podolsky e Rosen (1935)

“Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?”

2. “Gato” de Schrödinger (1935)

“The present situation in quantum mechanics”

ARGUMENTO DE EPR:

Procura invalidar as interpretações “criativa” e “perturbativa” do processo de medida, exibindo uma situação de medida na qual, *aparentemente*, não há nenhuma interação física entre aparelho e objeto



1. É possível prever o valor de certas grandezas em 2 por mensurações feitas em 1
2. **“Princípio da localidade”**: o que acontece num objeto não afeta o outro instantaneamente
3. Portanto nessas medidas não se pode dizer que houve “distúrbio” ou “criação” de valores no objeto distante
4. Portanto se um valor foi previsto, é pré-existente. Como a MQ não o fornece antes da mensuração, é incompleta

Versão de Bohm (1951) do argumento de EPR



grandeza bivalente (σ_n): $\sigma_n = +1$, $\sigma_n = -1$

(componente de spin na direção n , medido em unidades de $h/4\pi$)

Estado quântico “embaralhado” (singleto) :

$$\Psi_{1,2} = 1/\sqrt{2} (|n+\rangle \otimes |n-\rangle - |n-\rangle \otimes |n+\rangle)$$

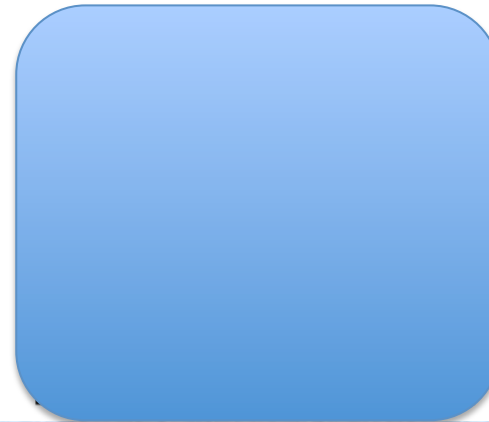
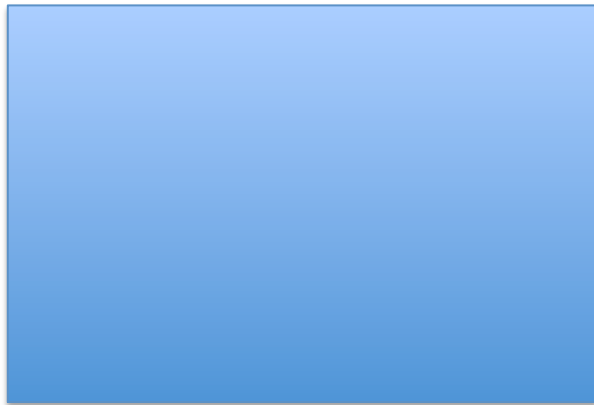
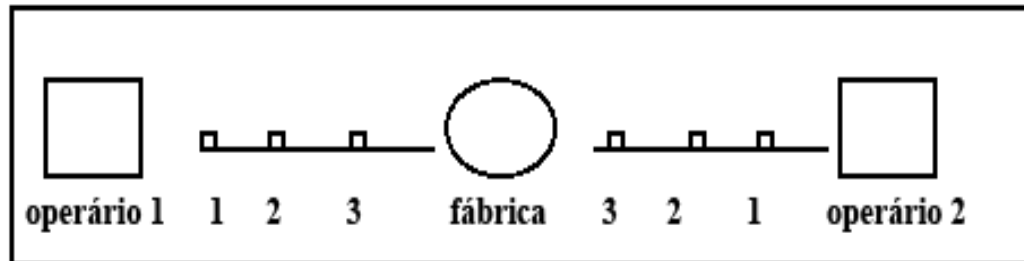
$$\sigma_n |n+\rangle = +1 |n+\rangle$$

$$\sigma_n |n-\rangle = -1 |n-\rangle$$

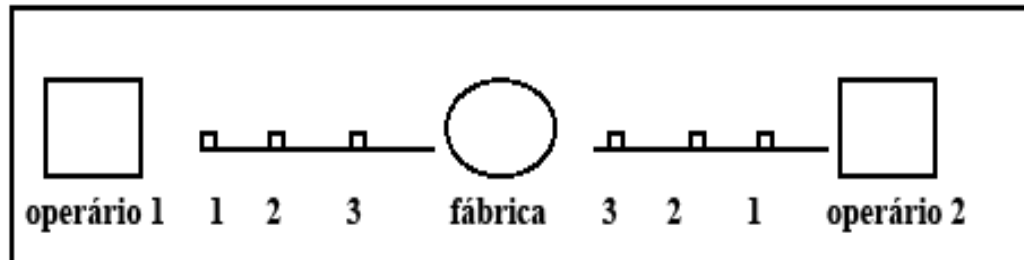
Esse estado prevê correlações absolutas:

σ_{n1}	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
σ_{n2}	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1

Fábrica de luvas: exemplo de correlações clássicas

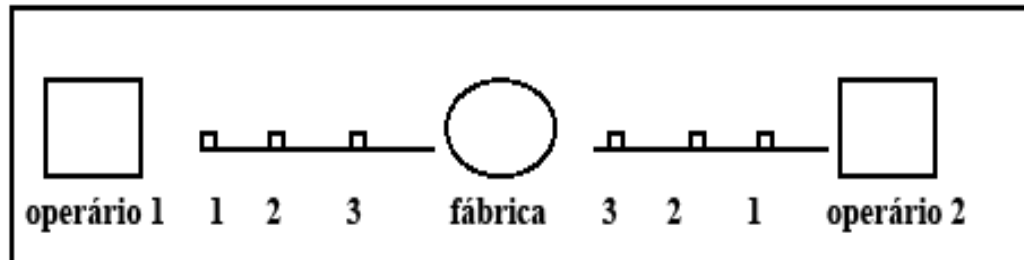


Fábrica de luvas: exemplo de correlações clássicas



Número do par	Luva 1	Luva 2
1	D	E
2	E	D
3	E	D
4	D	E
5	E	D
6	D	E

Fábrica de luvas: exemplo de correlações clássicas



Número do par	S_1	S_2
1	+1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	-1
5	-1	+1
6	-1	+1

Número do par	Luva 1	Luva 2
1	D	E
2	E	D
3	E	D
4	D	E
5	E	D
6	D	E

Fábrica de luvas: exemplo de correlações clássicas



Número do par	S_1	S_2
1	+1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	-1
5	-1	+1
6	-1	+1

Número do par	Luva 1	Luva 2
1	D	E
2	E	D
3	E	D
4	D	E
5	E	D
6	D	E

Só há duas explicações possíveis:

(i): As caixas contêm luvas E ou D antes de serem abertas e os pares são separados aleatoriamente; ou

Fábrica de luvas: exemplo de correlações clássicas



Número do par	S_1	S_2
1	+1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	-1
5	-1	+1
6	-1	+1

Número do par	Luva 1	Luva 2
1	D	E
2	E	D
3	E	D
4	D	E
5	E	D
6	D	E

Só há duas explicações possíveis:

- (i): As caixas contêm luvas E ou D antes de serem abertas e os pares são separados aleatoriamente; ou
- (ii): As caixas não contêm luvas E ou D antes de serem abertas (indefinição), mas ao ser vistoriada uma das caixas sua luva se torna E ou D aleatoriamente, e instantaneamente ocorre o inverso com a caixa distante de mesmo número (não-localidade).

Atribuição de valores pela MQ

Antes da medida:

Estado singleto: $\Psi_{1,2} = 1/\sqrt{2} (|n+\rangle \otimes |n-\rangle - |n-\rangle \otimes |n+\rangle)$

$$[\sigma_{n1} + \sigma_{n2}] = 0 \quad [\sigma_{n1}] = \dots \quad [\sigma_{n2}] = \dots$$

→ Isso torna impossível a explicação clássica (tipo (i))

Mas a explicação de tipo (ii) viola a localidade!

Portanto devemos entender a MQ como incompleta: completando-se a indefinição de $[\sigma_{n1}]$ e $[\sigma_{n2}]$ torna-se possível a explicação clássica

Na MQ, o que acontece depois da medida?

Antes da medida:

Estado singleto: $\Psi_{1,2} = 1/\sqrt{2} (|n+\rangle \otimes |n-\rangle - |n-\rangle \otimes |n+\rangle)$

$$[\sigma_{n1} + \sigma_{n2}] = 0 \quad [\sigma_{n1}] = \dots \quad [\sigma_{n2}] = \dots$$

Na MQ, o que acontece depois da medida?

Antes da medida:

Estado singleto: $\Psi_{1,2} = 1/\sqrt{2} (|n+\rangle \otimes |n-\rangle - |n-\rangle \otimes |n+\rangle)$

$$[\sigma_{n1} + \sigma_{n2}] = 0 \quad [\sigma_{n1}] = \dots \quad [\sigma_{n2}] = \dots$$

Depois da medida: $[\sigma_{n1} + \sigma_{n2}] = 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} [\sigma_{n1}] = +1 \\ [\sigma_{n2}] = -1 \end{array} \right. \quad \text{ou} \quad \left\{ \begin{array}{l} [\sigma_{n1}] = -1 \\ [\sigma_{n2}] = +1 \end{array} \right. \quad \text{resultados experimentais}$$

Na MQ, o que acontece depois da medida?

Antes da medida:

Estado singleto: $\Psi_{1,2} = 1/\sqrt{2} (|n+\rangle \otimes |n-\rangle - |n-\rangle \otimes |n+\rangle)$

$$[\sigma_{n1} + \sigma_{n2}] = 0 \quad [\sigma_{n1}] = \dots \quad [\sigma_{n2}] = \dots$$

Depois da medida: $[\sigma_{n1} + \sigma_{n2}] = 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} [\sigma_{n1}] = +1 \\ [\sigma_{n2}] = -1 \end{array} \right. \quad \text{ou} \quad \left\{ \begin{array}{l} [\sigma_{n1}] = -1 \\ [\sigma_{n2}] = +1 \end{array} \right. \quad \text{resultados experimentais}$$



$$\Psi_{1,2} = |n+\rangle \otimes |n-\rangle$$



$$\Psi_{1,2} = |n-\rangle \otimes |n+\rangle$$

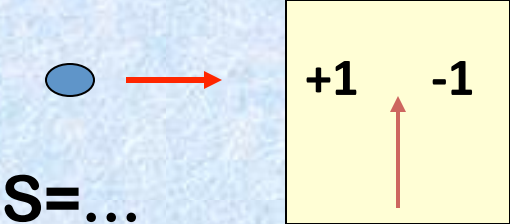

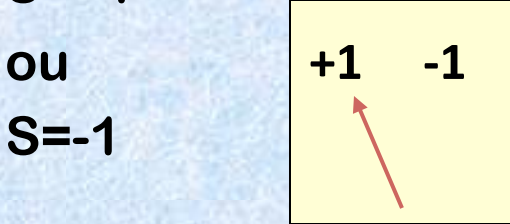


acerto ad hoc dos estados

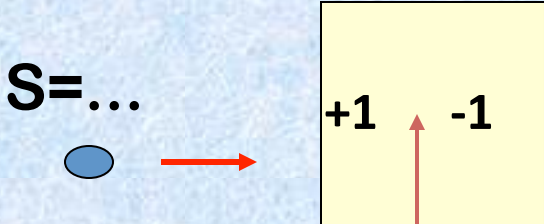
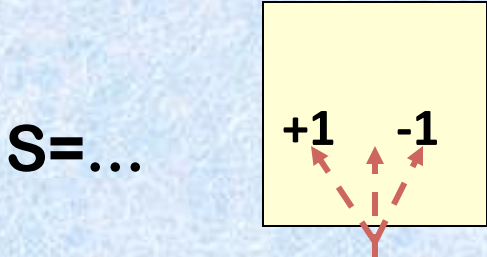
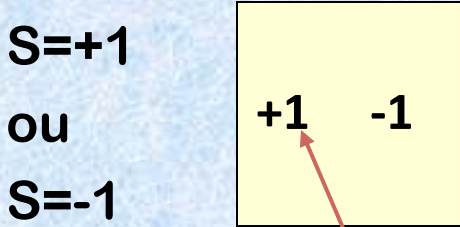
ARGUMENTO DE SCHRÖDINGER:

Mostra que, segundo a sua equação, no processo de medida há um acoplamento do objeto com o aparelho que transmite a indefinição de propriedades do objeto para o aparelho

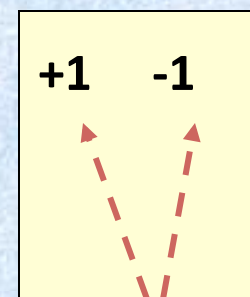
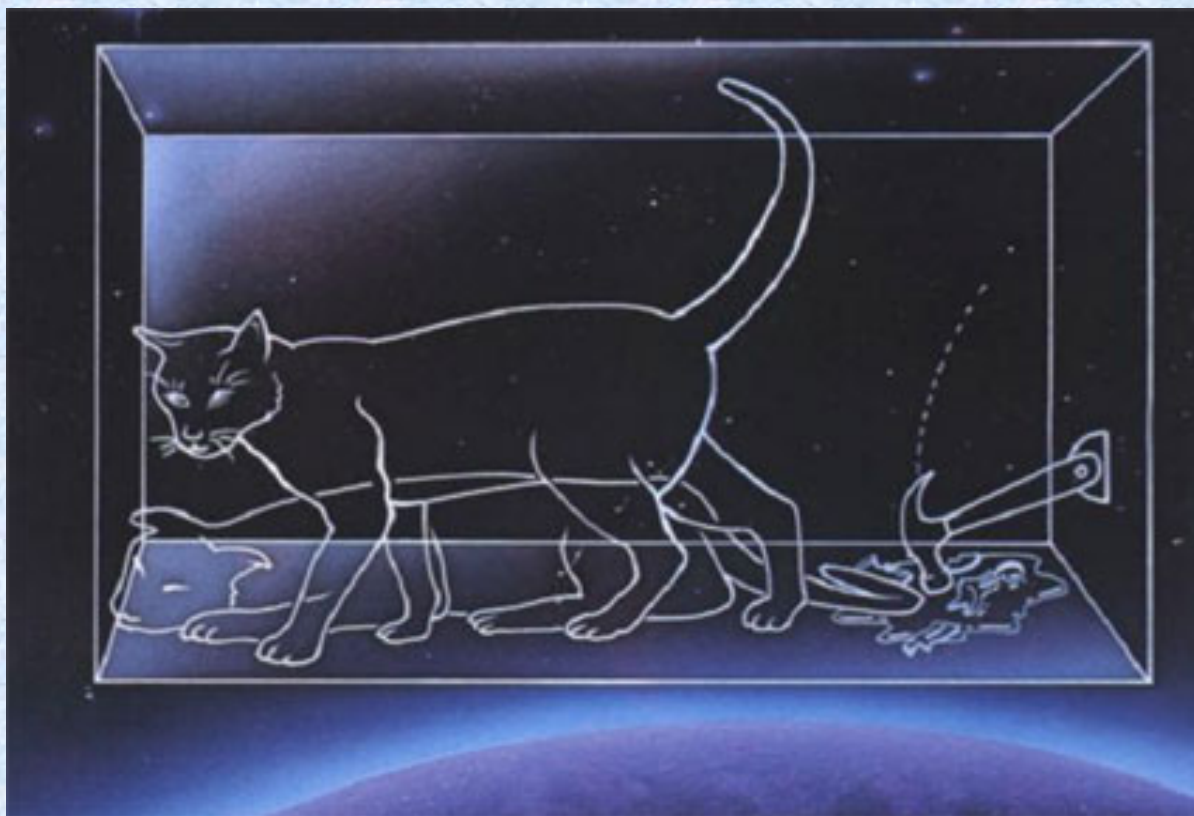
→ absurdo: exemplo do “gato”

O que ocorre numa medição

Antes (teórico: MQ)	Durante (teórico : MQ)	Depois (observado)
<p>objeto aparelho</p>  <p>$S = \dots$</p>	<p>objeto aparelho</p>  <p>$S = \dots$</p>	<p>objeto aparelho</p> <p>$S = +1$ ou $S = -1$</p>  <p><i>prob = 0,5 cada</i></p>
<p style="text-align: center;">  </p> <p style="text-align: center;">Eq. de Schrödinger</p>		<p style="text-align: center;">  </p> <p style="text-align: center;">processo aleatório</p>

Antes (teórico: MQ)	Durante (teórico : MQ)	Depois (observado)
<p>objeto aparelho</p> <p>$S=...$</p> 	<p>objeto aparelho</p> <p>$S=...$</p> 	<p>objeto aparelho</p> <p>$S=+1$ ou $S=-1$ <i>prob= 0,5 cada</i></p> 
<p>$(n+\rangle + n-\rangle) \otimes \alpha\rangle$</p>	<p>$n+\rangle \otimes \alpha+\rangle + n-\rangle \otimes \alpha-\rangle$</p>	<p>$n+\rangle \otimes \alpha+\rangle$ ou $n-\rangle \otimes \alpha-\rangle$</p>

O gato de Schrödinger



O que fazer ?

1. Nada
2. Completar a MQ
3. Postular a “ação da mente”
4. Modificar a eq. de Schrödinger
5. Proliferar universos

Completar a descrição quântica?

Adição de “mais informação” aos estados dos objetos (Ψ, λ)

$(\lambda$: variável “oculta”)



Teorias de variáveis ocultas (TVOs)

Provas formais contra TVOs:

(MQ + VO) → inconsistências

- 1932 – John von Neumann
- 1957 – Andrew Gleason
- 1966 – John S. Bell
- 1967 – Kochen & Specker
- 1990 – David Mermin

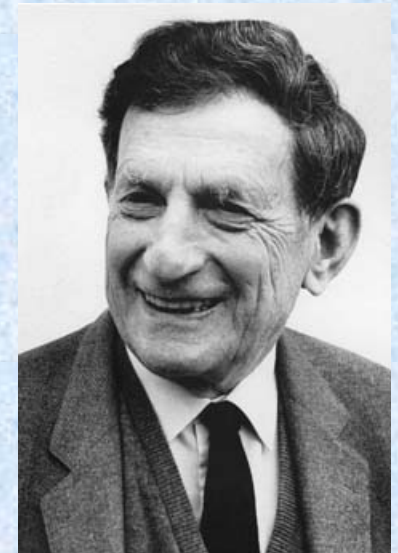
Então é impossível completar a MQ?

Não ...

**1952 - David Bohm:
TVO consistente (!)**

**Porém nessa teoria a atribuição
de valores às grandezas viola a
localidade (!)**

**(no caso de sistemas
correlacionados do tipo EPR!)**



John S. Bell:

1966: Toda TVO tem de ser não-local?

1964: Sim, se tiver de concordar com a MQ nas previsões estatísticas sobre sistemas correlacionados do tipo EPR



DESIGUALDADE DE BELL:

Sistemas “EPR” sem correlação absoluta



Coeficiente de correlação: $C(\phi)$

TVOs locais: $C(\phi) < N$ (desig. de Bell)

MQ: $C(\phi) > N$ para certos ϕ

TESTES EXPERIMENTAIS:

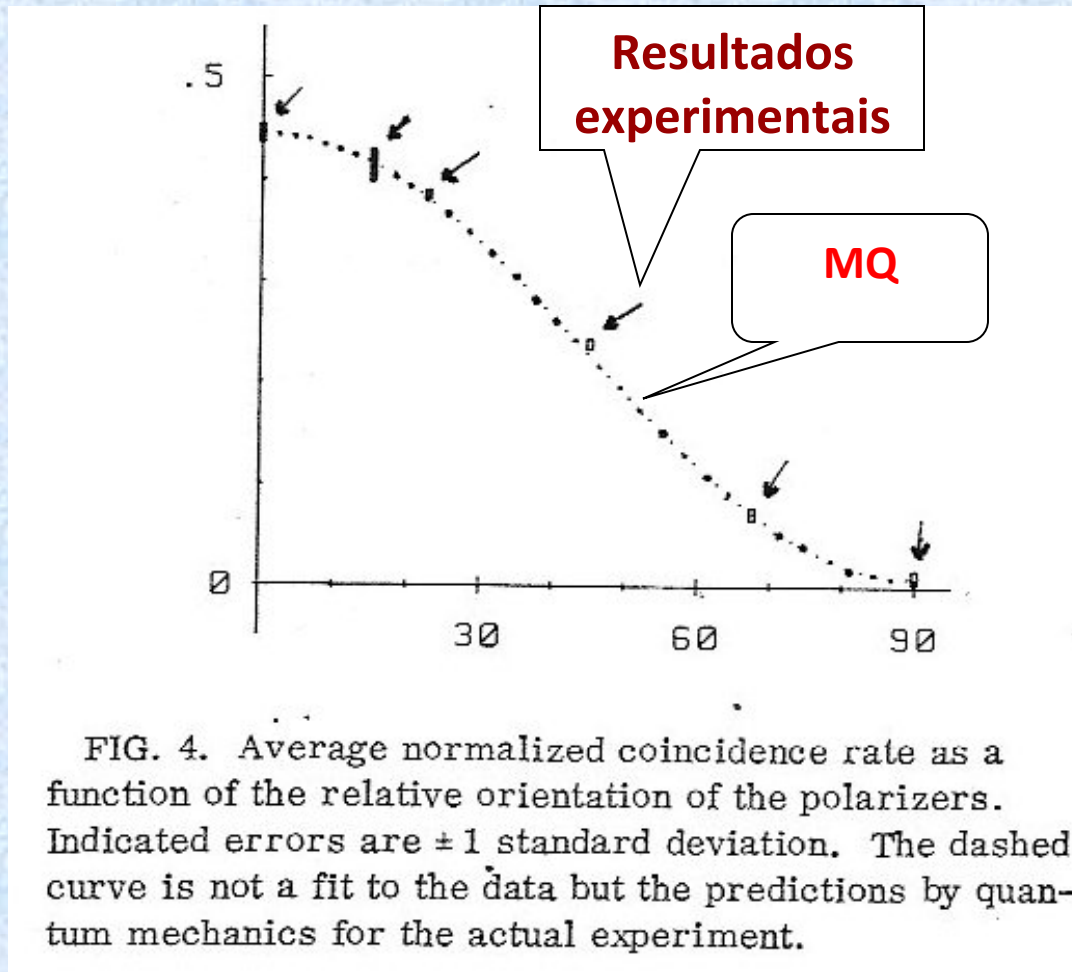
(fótons de cascatas atômicas ou de aniquilação elétron-pósitron)

→ *Violação* das desigualdades de Bell

→ Confirmação *quantitativa* das previsões quânticas

∴ Completar a MQ requer não-localidade

Teste mais importante: Aspect, Dalibard & Roger (1982)



Teorias
completas
locais

Resultados “mistos” contra as TVOs:

TVOs locais \Rightarrow inconsistências

- **Heywood & Redhead 1983**
- **Greenberger, Horne & Zeilinger 1989**

A MQ e a realidade física (I)

Principal divergência teórica:

A MQ é completa *quanto à predição de fenômenos* ?

Principal divergência filosófica:

A MQ objetiva a descrever “o Real” ?

→ Quatro possibilidades a escolher:

A MQ e a realidade física (II)

1. Completeza & anti-realismo

- Renúncia a predições individuais
(a teoria é puramente estatística)
- Renúncia em explicar o mundo
(instrumentalismo)

2. Completeza e realismo

- Indeterminação e “vagueza” na própria realidade quântica
(propriedades “potenciais”, “muitos-mundos”, “decoerência”)

A MQ e a realidade física (III)

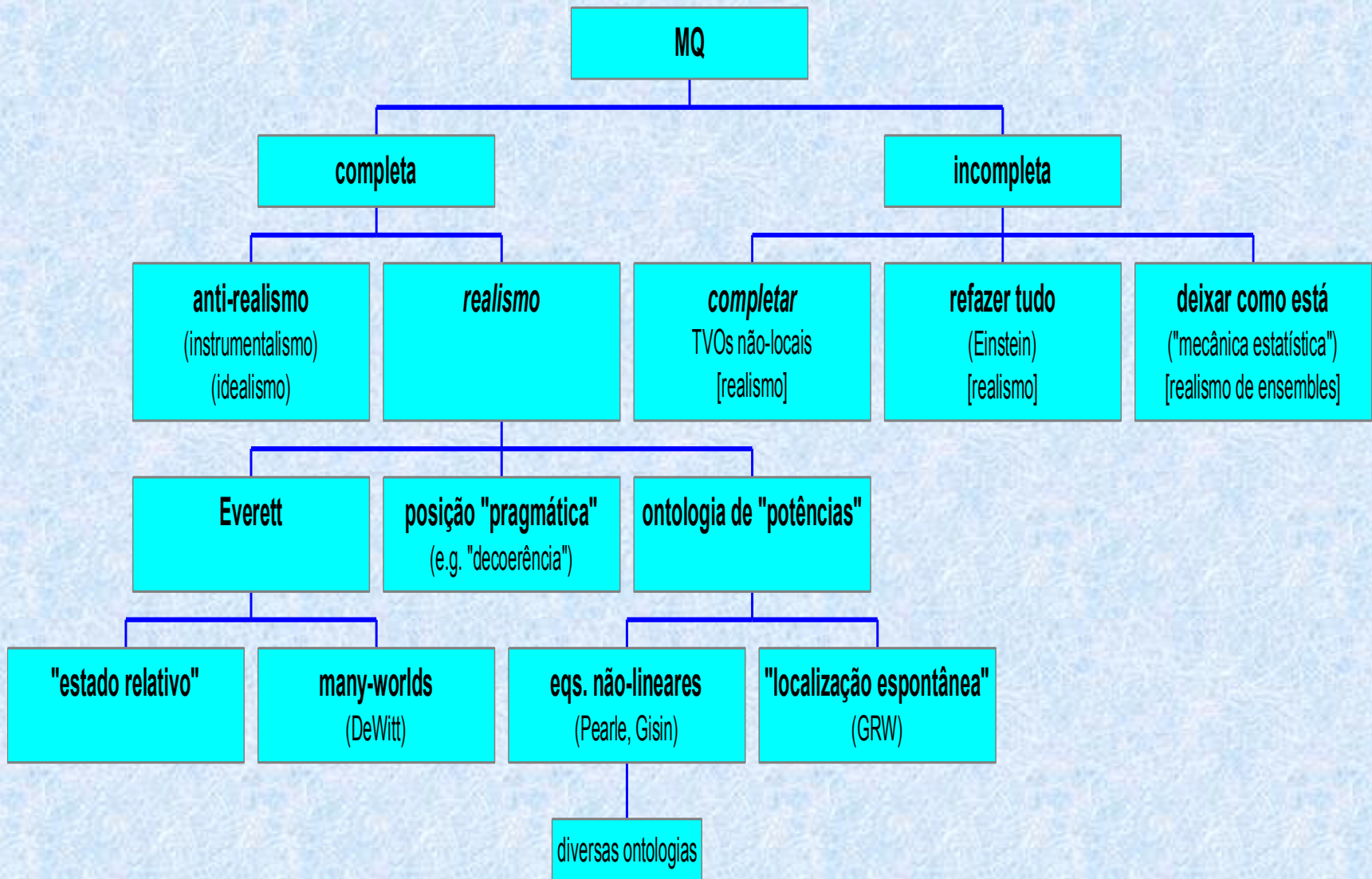
3. Incompleteza & anti-realismo

- Desenvolver novo formalismo, que dê não somente previsões estatísticas, mas previsões de resultados de medida de todas as quantidades físicas, mas sem uma ontologia quântica.
(Ninguém tentou isso...)

4. Incompleteza & realismo

- 4.1 - Completar à la Bohm: desenvolver uma TVO
(previsões de valores de resultados individuais + ontologia quântica não-local)
- 4.2 - Refazer tudo *ab initio*: Einstein
(mas ele não sabia que sua ontologia teria de ser não- local de qualquer modo...)

Quadro geral das interpretações da MQ (incompleto)



Como nenhuma opção é muito boa, conclui-se que...

“The trouble with the philosophy of quantum mechanics ... is that as soon as you’ve found a position, you lose your momentum”

(Autor desconhecido)