KÍSÉRLETI METAFIZIKA

Okság és kvantumelmélet

Szabó Gábor

Email: gsz@szig.hu

Program

Kérdés: Érvényes-e az okság elve a kvantumelméletben?

- Okság és korreláció
- Egy gondolatkísérlet
- EPR-paradoxon

Korreláció és okság

- **Korreláció:** Ha két esemény gyakrabban (vagy ritkábban) következik be együtt, mint azt a véletlen bekövetkezések alapján várnánk.

Korreláció és okság

- **Korreláció:** Ha két esemény gyakrabban (vagy ritkábban) következik be együtt, mint azt a véletlen bekövetkezések alapján várnánk.
- Pl. felhő - eső, két szurkoló felugrása a meccsen

Korreláció és okság

- **Korreláció:** Ha két esemény gyakrabban (vagy ritkábban) következik be együtt, mint azt a véletlen bekövetkezések alapján várnánk.
- Pl. felhő - eső, két szurkoló felugrása a meccsen
- **Okság elve:** nincsen korreláció kauzalitás nélkül.

Kauzális minták

- **Direkt hatás:** (felhő - eső)

$$A \longrightarrow B$$

Kauzális minták

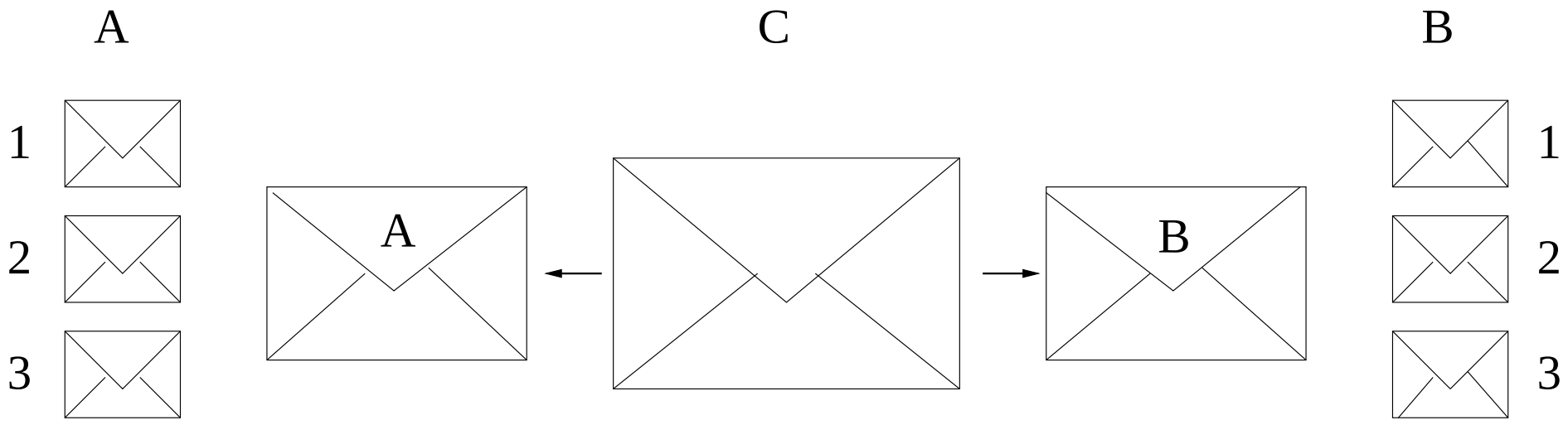
- **Direkt hatás:** (felhő - eső)

$$A \longrightarrow B$$

- **Közös ok:** (két szurkoló felugrása a meccsen)

$$\begin{tikzcd} A & & B \\ & C \arrow[ul] \arrow[ur] & \end{tikzcd}$$

Egy gondolatkísérlet



A kísérlet menete

Futamok	Bal oldal	Jobb oldal
1.	1	2
2.	3	3
3.	2	1
4.	1	1
5.	2	3
6.	1	2
7.	2	2
8.	1	2
...	...	...
N.	2	1

Korreláció

Futamok	Bal oldal	Jobb oldal
1.	1	2
2.	3	3
3.	2	1
4.	1	1
5.	2	3
6.	1	2
7.	2	2
8.	1	2
...	...	...
N.	2	1

Hányféle sora van a táblázatnak?

- A lehetséges kombinációk száma: $(3 \times 2)(3 \times 2) = 36$

Hányféle sora van a táblázatnak?

- A lehetséges kombinációk száma: $(3 \times 2)(3 \times 2) = 36$
- Nem fordulnak elő a táblázatban:

$$(1,1)\ (2,2)\ (3,3)\ (1,1)\ (2,2)\ (3,3)$$

Hányféle sora van a táblázatnak?

- A lehetséges kombinációk száma: $(3 \times 2)(3 \times 2) = 36$
- Nem fordulnak elő a táblázatban:

$$(1,1)\ (2,2)\ (3,3)\ (1,1)\ (2,2)\ (3,3)$$

- Így marad $36 - 6 = 30$:

$$\begin{array}{cccccc}
(1,2) & (2,1) & (2,3) & (3,2) & (1,3) & (3,1) \\
(1,2) & (2,1) & (2,3) & (3,2) & (1,3) & (3,1) \\
(1,2) & (2,1) & (2,3) & (3,2) & (1,3) & (3,1) \\
(1,2) & (2,1) & (2,3) & (3,2) & (1,3) & (3,1) \\
(1,1) & (1,1) & (2,2) & (2,2) & (1,1) & (3,3)
\end{array}$$

Valószínűségek

Futamok	Bal oldal	Jobb oldal
1.	1	2
2.	3	3
3.	2	1
4.	1	1
5.	2	3
6.	1	2
7.	2	2
8.	1	2
...	...	...
N.	2	1

Valószínűségek

A $(1, 2)$ kimenet valószínűsége:

$$p(1, 2) = \frac{N(1, 2)}{N}$$

a többi valószínűség hasonlóképpen számítható ki.

Korreláció

- A 30 előforduló sor valószínűsége:

$$
\begin{array}{cccccc}
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,1) & p(1,1) & p(2,2) & p(2,2) & p(1,1) & p(3,3)
\end{array}
$$

Korreláció

- A 30 előforduló sor valószínűsége:

$$
\begin{array}{cccccc}
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,1) & p(1,1) & p(2,2) & p(2,2) & p(1,1) & p(3,3)
\end{array}
$$

- Korreláció:

$$p(1,1) = p(2,2) = p(3,3) = 0$$
$$p(1,1) = p(2,2) = p(3,3) = 0$$

Átlépés a metafizikába!

A rejtett okok

Típusok	Bal oldal	Jobb oldal
a.	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
b.	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
c.	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
d.	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
e.	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
f.	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
g.	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
h.	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)

A rejtett valószínűségek

Rejtett valószínűségek:

$$r_a = \frac{N(1,2,3,1,2,3)}{N}$$

a többi hasonlóképpen értelmezhető.

A rejtett valószínűségek

Valószínűségek	Bal oldal	Jobb oldal
r_a	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_b	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_c	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_d	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_e	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_f	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_g	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_h	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)

A felszíni és a rejtett valószínűségek

- Van 30 felszíni valószínűségünk:

$$
\begin{array}{cccccc}
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,1) & p(1,1) & p(2,2) & p(2,2) & p(1,1) & p(3,3)
\end{array}
$$

A felszíni és a rejtett valószínűségek

- Van 30 felszíni valószínűségünk:

$$
\begin{array}{cccccc}
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,1) & p(1,1) & p(2,2) & p(2,2) & p(1,1) & p(3,3)
\end{array}
$$

- Van 8 rejtett valószínűségünk: $r_a \;\; r_b \;\; r_c \;\; r_d \;\; r_e \;\; r_f \;\; r_g \;\; r_h$

A felszíni és a rejtett valószínűségek

- Van 30 felszíni valószínűségünk:

$$
\begin{array}{cccccc}
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,2) & p(2,1) & p(2,3) & p(3,2) & p(1,3) & p(3,1) \\
p(1,1) & p(1,1) & p(2,2) & p(2,2) & p(1,1) & p(3,3)
\end{array}
$$

- Van 8 rejtett valószínűségünk: $r_a \;\; r_b \;\; r_c \;\; r_d \;\; r_e \;\; r_f \;\; r_g \;\; r_h$
- Mi a kapcsolat közöttük?

A felszíni és a rejtett valószínűségek

Valószínűségek	Bal oldal	Jobb oldal
r_a	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_b	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_c	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_d	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_e	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_f	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_g	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_h	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)

A felszíni és a rejtett valószínűségek

Valószínűségek	Bal oldal	Jobb oldal
r_a	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_b	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_c	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_d	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_e	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_f	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_g	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_h	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)

- $p(1,2)$ valószínűsége: $p(1,2) = \frac{1}{9}(r_c + r_e)$

A felszíni és a rejtett valószínűségek

Valószínűségek	Bal oldal	Jobb oldal
r_a	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_b	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_c	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_d	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_e	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_f	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_g	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)
r_h	(1, 2, 3)	(1, 2, 3)

- $p(1,2)$ valószínűsége: $p(1,2) = \frac{1}{9}(r_c + r_e)$
- A többi felszíni valószínűség hasonlóan kifejezhető a rejtett okok valószínűségével.

Bell-egyenlőtlenség

- Három felszíni valószínűség:

$$
\begin{aligned}
p(1,2) &= \frac{1}{9}(r_c + r_e) \\
p(2,3) &= \frac{1}{9}(r_b + r_f) \\
p(1,3) &= \frac{1}{9}(r_b + r_e)
\end{aligned}
$$

Bell-egyenlőtlenség

- Három felszíni valószínűség:

$$
\begin{aligned}
p(1,2) &= \frac{1}{9}(r_c + r_e) \\
p(2,3) &= \frac{1}{9}(r_b + r_f) \\
p(1,3) &= \frac{1}{9}(r_b + r_e)
\end{aligned}
$$

- Bell-egyenlőtlenség:

$$\boxed{p(1,3) \leqslant p(1,2) + p(2,3)}$$

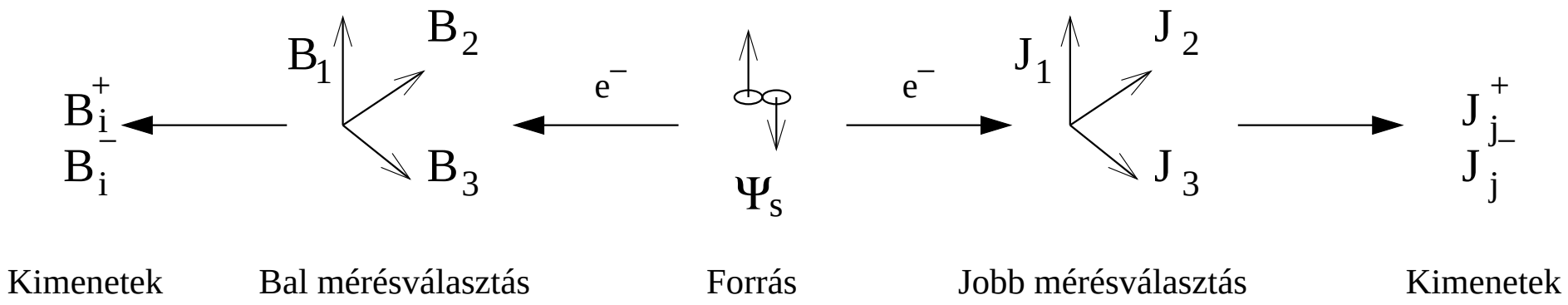
A Bell-egyenlőtlenség előfeltételei

- A játékszabályok megsértésével a Bell-egyenlőtlenségek teljesülését közvetlenül is igazolhatnánk.

A Bell-egyenlőtlenség előfeltételei

- A játékszabályok megsértésével a Bell-egyenlőtlenségek teljesülését közvetlenül is igazolhatnánk.
- De mi a helyzet akkor, ha a játékszabályok áthágását természettörvények tiltják?

EPR-paradoxon



Ψ_s: forrás

B_i, J_j: mérésválasztások

$B_i^+, B_i^-, J_j^+, J_j^-$: mérési kimenetek

A kísérlet menete

Futamok	Bal oldal	Jobb oldal
1.	B_1^+	J_2^+
2.	B_3^+	J_3^-
3.	B_2^-	J_1^-
4.	B_1^-	J_1^+
5.	B_2^+	J_3^-
6.	B_1^+	J_2^+
7.	B_2^+	J_2^-
8.	B_1^+	J_2^+
...	...	...
N.	B_2^+	J_1^+

Korreláció

Futamok	Bal oldal	Jobb oldal
1.	B_1^+	J_2^+
2.	B_3^+	J_3^-
3.	B_2^-	J_1^-
4.	B_1^-	J_1^+
5.	B_2^+	J_3^-
6.	B_1^+	J_2^+
7.	B_2^+	J_2^-
8.	B_1^+	J_2^+
...	...	...
N.	B_2^+	J_1^+

Rejtett okok

Típusok	Egyik oldal	Másik oldal
a.	$(1^+, 2^+, 3^+)$	$(1^-, 2^-, 3^-)$
b.	$(1^+, 2^+, 3^-)$	$(1^-, 2^-, 3^+)$
c.	$(1^+, 2^-, 3^+)$	$(1^-, 2^+, 3^-)$
d.	$(1^-, 2^+, 3^+)$	$(1^+, 2^-, 3^-)$
e.	$(1^+, 2^-, 3^-)$	$(1^-, 2^+, 3^+)$
f.	$(1^-, 2^+, 3^-)$	$(1^+, 2^-, 3^+)$
g.	$(1^-, 2^-, 3^+)$	$(1^+, 2^+, 3^-)$
h.	$(1^-, 2^-, 3^-)$	$(1^+, 2^+, 3^+)$

A Bell-egyenlőtlenség és a kvantumelmélet

- Bell-egyenlőtlenség:

$$\boxed{p(1^+, 3^+) \leqslant p(1^+, 2^+) + p(2^+, 3^+)}$$

A Bell-egyenlőtlenség és a kvantumelmélet

- Bell-egyenlőtlenség:

$$\boxed{p(1^+, 3^+) \leqslant p(1^+, 2^+) + p(2^+, 3^+)}$$

- Mit mond a kvantumelmélet a Bell-egyenlőtlenségekről?

A Bell-egyenlőtlenség és a kvantumelmélet

- A kvantumelmélet szerint:

$$p(i^+, j^+) = \frac{1}{18}(1 - cos\phi_{ij})$$

ahol ϕ_{ij} az i és j irány közötti szög.

A Bell-egyenlőtlenség és a kvantumelmélet

- A kvantumelmélet szerint:

$$p(i^+, j^+) = \frac{1}{18}(1 - cos\phi_{ij})$$

ahol ϕ_{ij} az i és j irány közötti szög.

- Behelyettesítve a fenti Bell-egyenlőtlenségbe:

$$cos\phi_{12} + cos\phi_{23} \leqslant 1 + cos\phi_{13}$$

A Bell-egyenlőtlenség és a kvantumelmélet

- A kvantumelmélet szerint:

$$p(i^+, j^+) = \frac{1}{18}(1 - cos\phi_{ij})$$

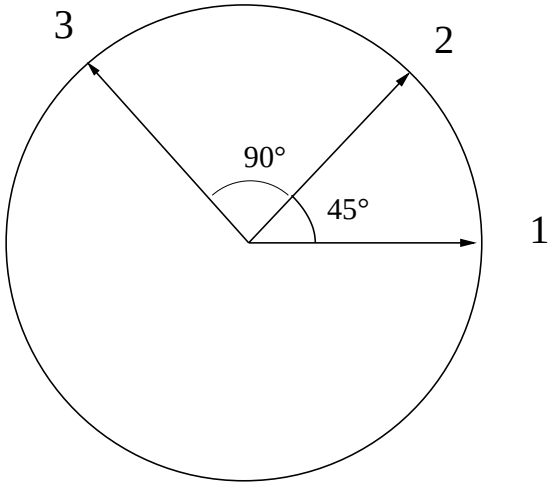
ahol ϕ_{ij} az i és j irány közötti szög.

- Behelyettesítve a fenti Bell-egyenlőtlenségbe:

$$cos\phi_{12} + cos\phi_{23} \leqslant 1 + cos\phi_{13}$$

- Kérdés: az egyenlőtlenség bármely szögre teljesül-e?

A Bell-egyenlőtlenségek sérülése



$$cos\phi_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \qquad cos\phi_{23} = 0, \qquad cos\phi_{13} = -\frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\sqrt{2} \nleq 1!$$

Az EPR-korrelációk tehát nem magyarázhatók közös okkal.

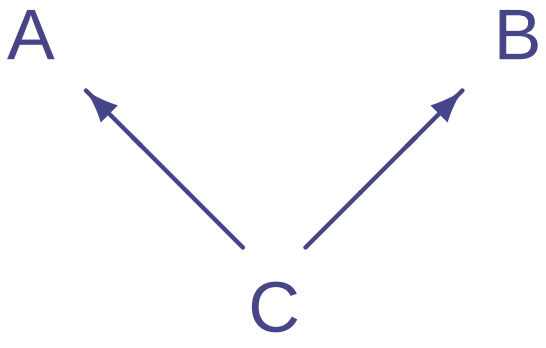
Történeti háttér

- 1900: Planck – kvantumhipotézis
- 1925: Schrödinger, Heisenberg – kvantummechanika
- 1935: Einstein-Podolsky-Rosen-gondolatkísérlet
- 1964: Bell-egyenlőtlenségek
- 1982: Aspect-kísérletek
- 1998: Anton Zeilinger: kvantumkorreláció véletlen mérésválasztással;
  1999: interferencia fullerénnel (C_{60}, 1080 részecske, kvantumfoci) $\rightarrow$ insulin, biológiai molekulák?
- 1998: Nicolas Gisin: kvantumkorreláció 11 km-en (Genf-Bernex-Bellevue, Swiss Telecom)

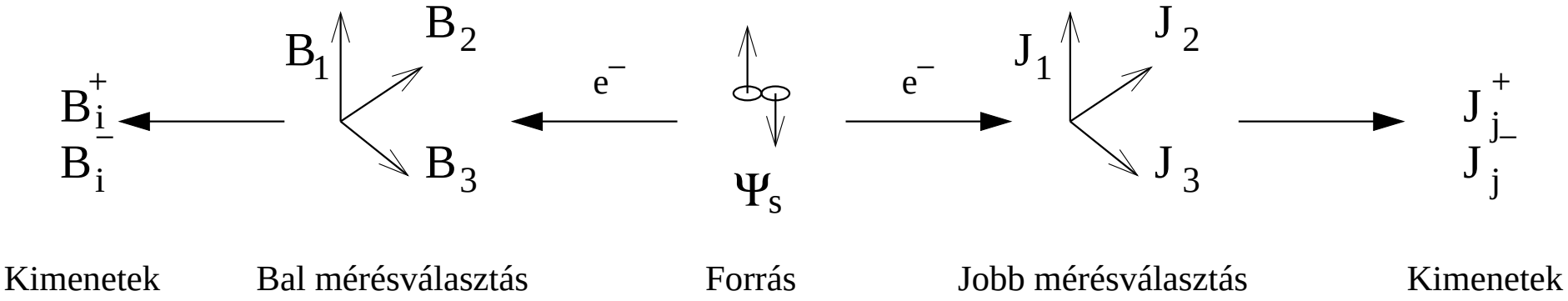
Kauzális minták

Direkt hatás:

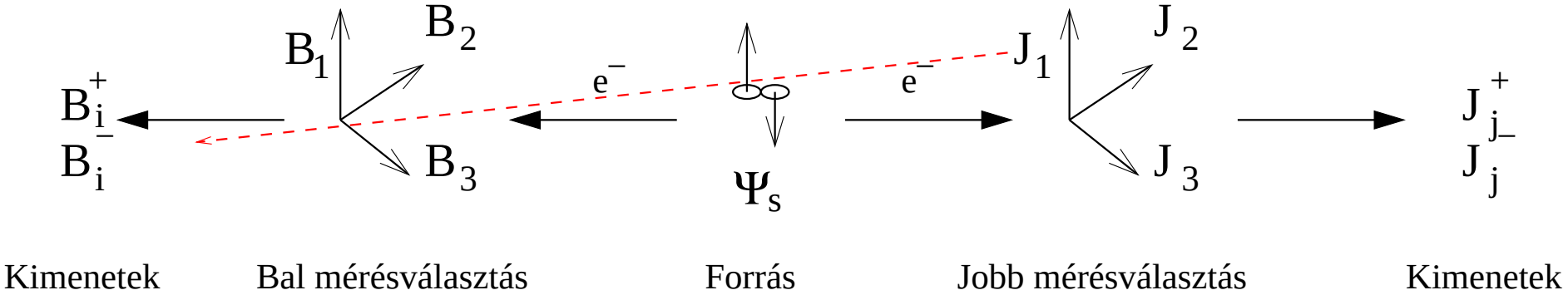
Közös ok:



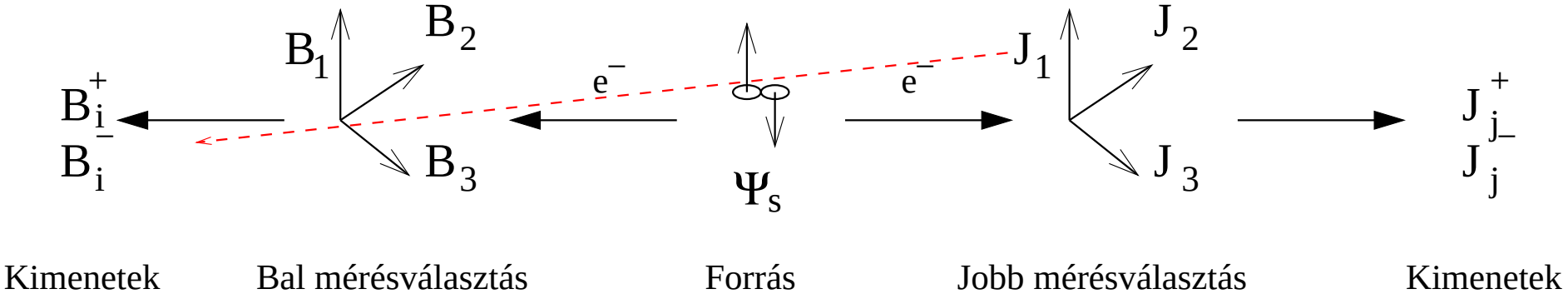
Direkt hatás az EPR-szituációban



Direkt hatás az EPR-szituációban



Direkt hatás az EPR-szituációban



A fénynél gyorsabb jelterjedést a relativitáselmélet kizárja!

Kísérleti metafizika

- A kvantumelmélet csatolt részecskék között korrelációt jósol.

Kísérleti metafizika

- A kvantumelmélet csatolt részecskék között korrelációt jósol.
- Ezt a korrelációt a kísérletek megerősítik.

Kísérleti metafizika

- A kvantumelmélet csatolt részecskék között korrelációt jósol.
- Ezt a korrelációt a kísérletek megerősítik.
- Okság elve: nincsen korreláció kauzalitás nélkül.

Kísérleti metafizika

- A kvantumelmélet csatolt részecskék között korrelációt jósol.
- Ezt a korrelációt a kísérletek megerősítik.
- Okság elve: nincsen korreláció kauzalitás nélkül.
- Két kauzális mintát ismerünk: a direkt hatást és a közös okot.

Kísérleti metafizika

- A kvantumelmélet csatolt részecskék között korrelációt jósol.
- Ezt a korrelációt a kísérletek megerősítik.
- Okság elve: nincsen korreláció kauzalitás nélkül.
- Két kauzális mintát ismerünk: a direkt hatást és a közös okot.
- A direkt hatást a relativitáselmélet kizárja.

Kísérleti metafizika

- A kvantumelmélet csatolt részecskék között korrelációt jósol.
- Ezt a korrelációt a kísérletek megerősítik.
- Okság elve: nincsen korreláció kauzalitás nélkül.
- Két kauzális mintát ismerünk: a direkt hatást és a közös okot.
- A direkt hatást a relativitáselmélet kizárja.
- A közös okokat a Bell-egyenlőtlenségek zárják ki.

Kísérleti metafizika

- A kvantumelmélet csatolt részecskék között korrelációt jósol.
- Ezt a korrelációt a kísérletek megerősítik.
- Okság elve: nincsen korreláció kauzalitás nélkül.
- Két kauzális mintát ismerünk: a direkt hatást és a közös okot.
- A direkt hatást a relativitáselmélet kizárja.
- A közös okokat a Bell-egyenlőtlenségek zárják ki.
- **Kérdés:** Érvényes az okság elve a kvantumelméletben?

Irodalom

- Szabó E. László, *A nyitott jövő problémája, Véletlen, kauzalitás és determinizmus a fizikában*, Typotex, 2002. (A könyv letölthető innen: http://phil.elte.hu/leszabo/publications.html)
- Hraskó Péter, ”A Bell-egyenlőtlenség”, *Magyar Fizikai Szemle*, 1984, 257.
- Anton Zeilinger honlapja: http://www.quantum.at/zeilinger