

НЕЛОКАЛНОСТ И СКРИВЕНЕ ВАРИЈАБЛЕ У КВАНТНОЈ ФИЗИЦИ

Марко Војиновић

Група за гравитацију, честице и поља

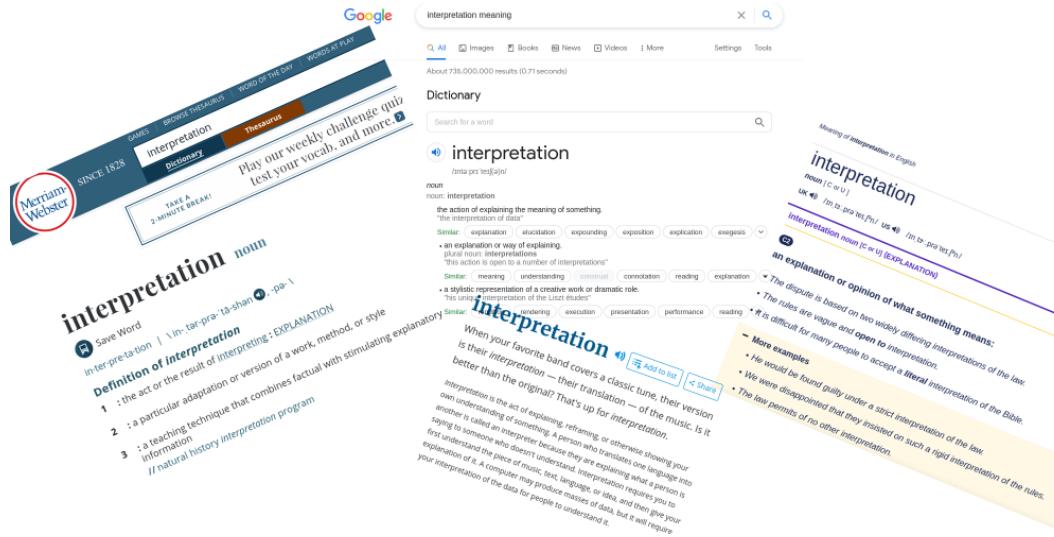


Институт за физику, Универзитет у Београду, 2021

ТЕМЕ

- Шта су интерпретације квантне теорије?
- Шта су локалност и нелокалност?
- Шта су скривене варијабле?
- де Број–Бомова интерпретација КМ
- Закључне напомене

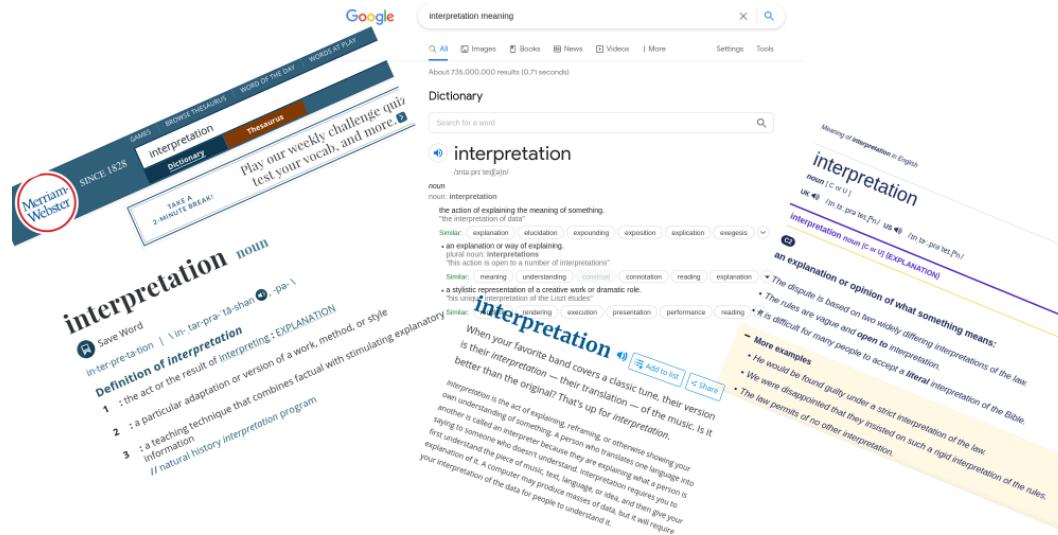
ИНТЕРПРЕТАЦИЈЕ



Шта значи “интерпретација”?

- Описивање новог појма старим појмовима...
- Разумевање неуобичајених појава помоћу уобичајених појава...
- Објашњавање квантне физике класичном физиком.

ИНТЕРПРЕТАЦИЈЕ



Шта значи “интерпретација”?

- Описивање новог појма старим појмовима...
- Разумевање неуобичајених појава помоћу уобичајених појава...
- Објашњавање квантне физике класичном физиком.

Али квантна физика је *различита* од класичне физике?!

- Објашњавање квантне физике класичном физиком, уз нека одрицања.

ИНТЕРПРЕТАЦИЈЕ

Ког аспекта класичне физике треба да се одрекнемо да бисмо описали квантну физику?

- Постоји више одговора,
- сваки одговор има своју “цену”,
- избор одговора зависи од философских тј. метафизичких предрасуда.

⇒ **Не постоји консензус.**

ИНТЕРПРЕТАЦИЈЕ

Ког аспекта класичне физике треба да се одрекнемо да бисмо описали квантну физику?

- Постоји више одговора,
- сваки одговор има своју “цену”,
- избор одговора зависи од философских тј. метафизичких предрасуда.

⇒ **Не постоји консензус.**

Али постоји класификација!

Све квантне појаве се могу објаснити у терминима класичне физике, уколико:

- одустанемо од једнозначности појава ⇒ **паралелни светови**, или
- одустанемо од реализма појава ⇒ **релативне чињенице**, или
- одустанемо од локалности појава ⇒ **скривене варијабле**.

ЛОКАЛНОСТ

Локалност значи да физика “овде и сада” не зависи од физике “тамо и тада”,



ЛОКАЛНОСТ

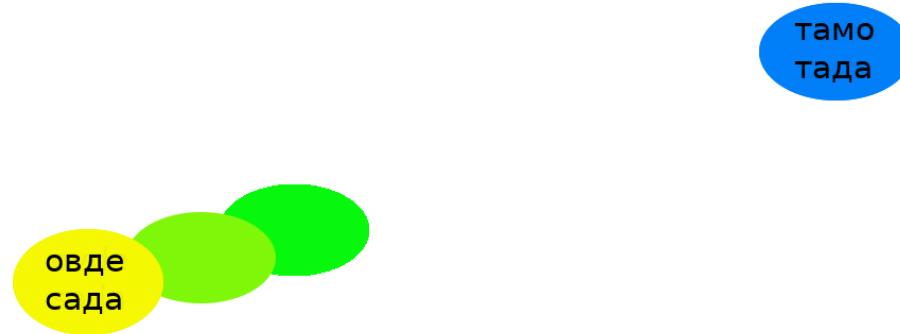
Локалност значи да физика “овде и сада” не зависи од физике “тамо и тада”,



али физика “овде и сада” може да утиче на физику “одмах поред и непосредно затим”,

ЛОКАЛНОСТ

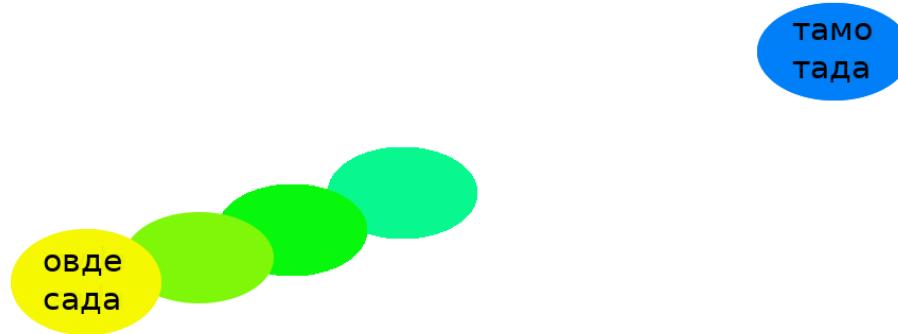
Локалност значи да физика “овде и сада” не зависи од физике “тамо и тада”,



али физика “овде и сада” може да утиче на физику “одмах поред и непосредно затим”,
и утицај физике “овде и сада” тако поступно путује до физике “тамо и тада”.

ЛОКАЛНОСТ

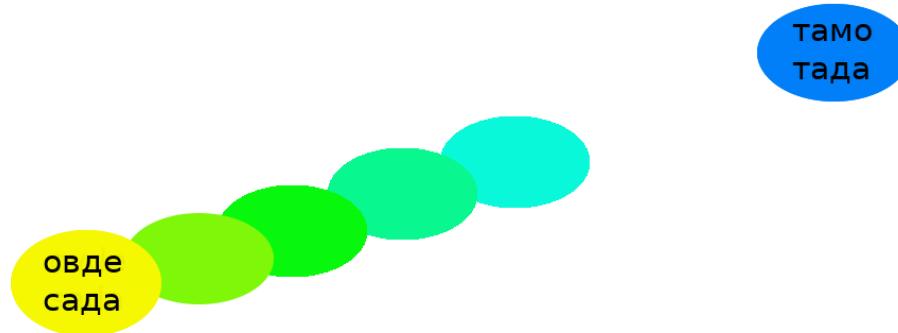
Локалност значи да физика “овде и сада” не зависи од физике “тамо и тада”,



али физика “овде и сада” може да утиче на физику “одмах поред и непосредно затим”,
и утицај физике “овде и сада” тако поступно путује до физике “тамо и тада”.

ЛОКАЛНОСТ

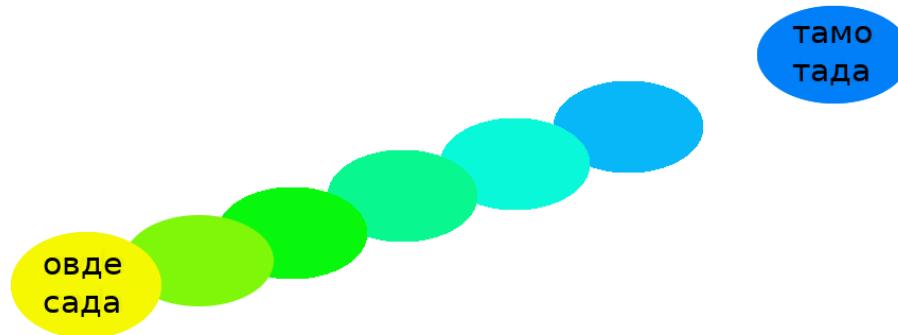
Локалност значи да физика “овде и сада” не зависи од физике “тамо и тада”,



али физика “овде и сада” може да утиче на физику “одмах поред и непосредно затим”,
и утицај физике “овде и сада” тако поступно путује до физике “тамо и тада”.

ЛОКАЛНОСТ

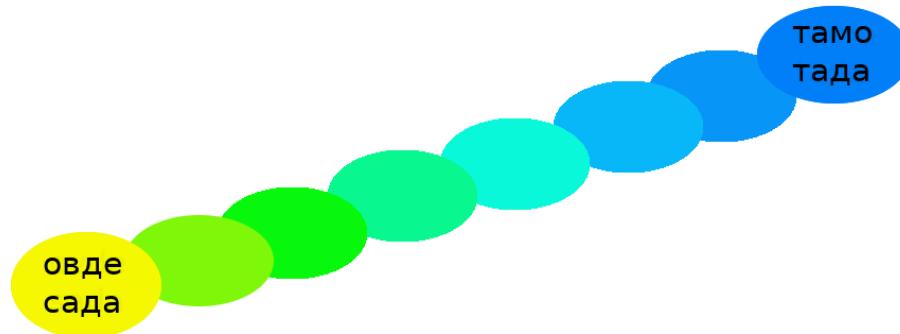
Локалност значи да физика “овде и сада” не зависи од физике “тамо и тада”,



али физика “овде и сада” може да утиче на физику “одмах поред и непосредно затим”,
и утицај физике “овде и сада” тако поступно путује до физике “тамо и тада”.

ЛОКАЛНОСТ

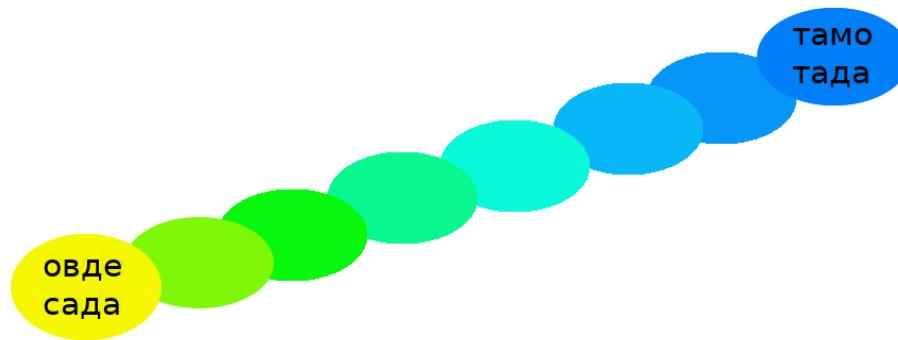
Локалност значи да физика “овде и сада” не зависи од физике “тамо и тада”,



али физика “овде и сада” може да утиче на физику “одмах поред и непосредно затим”,
и утицај физике “овде и сада” тако поступно путује до физике “тамо и тада”.

ЛОКАЛНОСТ

Локалност значи да физика “овде и сада” не зависи од физике “тамо и тада”.

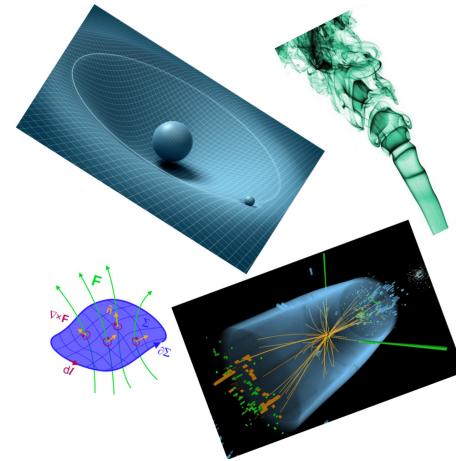


Другим речима, интеракције се простиру *коначном брзином*.

ЛОКАЛНОСТ

Примери локалних теорија:

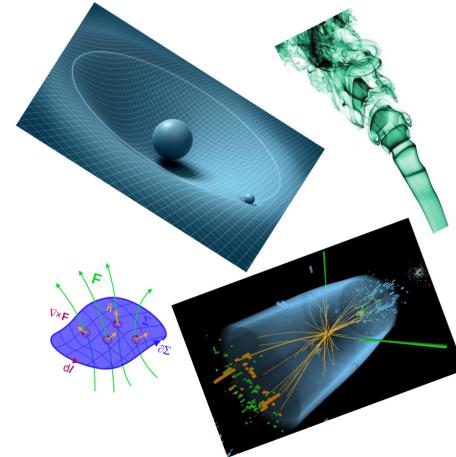
- механика флуида,
- Максвелова електродинамика,
- општа теорија релативности,
- Стандардни Модел елементарних честица.



ЛОКАЛНОСТ

Примери локалних теорија:

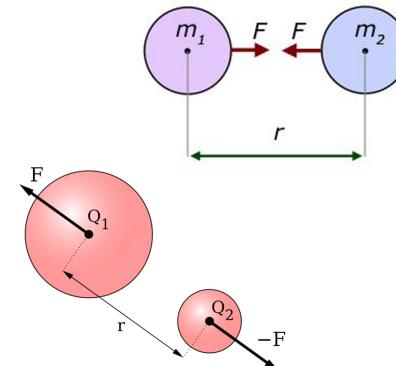
- механика флуида,
- Максвелова електродинамика,
- општа теорија релативности,
- Стандардни Модел елементарних честица.



Примери нелокалних теорија:

- Њутнова гравитација,
- Кулонова електростатика.

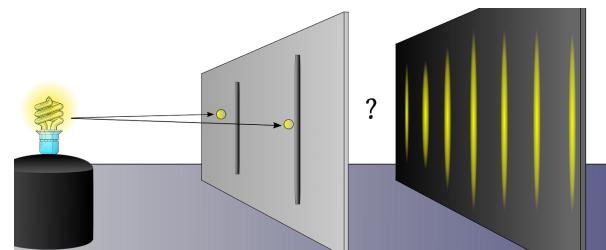
(“тренутно дејство на даљину”)



ЛОКАЛНОСТ

Зашто бисмо помислили да квантна теорија није локална?

Експеримент са два отвора:

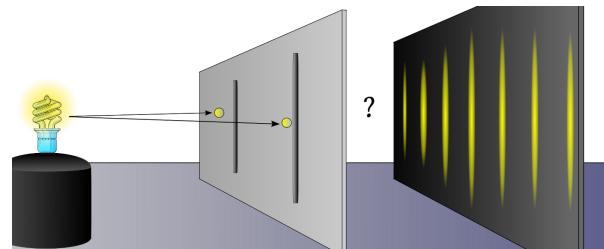


- честица пролази кроз један прорез, али некако “зна” да је отворен и други!

ЛОКАЛНОСТ

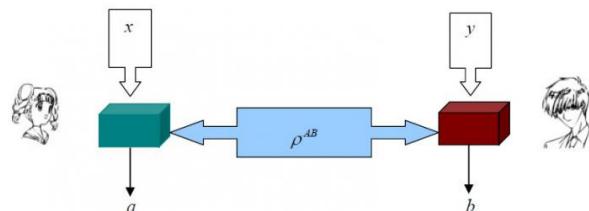
Зашто бисмо помислили да квантна теорија није локална?

Експеримент са два отвора:



- честица пролази кроз један прорез, али некако “зна” да је отворен и други!

Белов експеримент:



- “дистантне корелације” које су јаче од класичних!

СКРИВЕНЕ ВАРИЈАБЛЕ

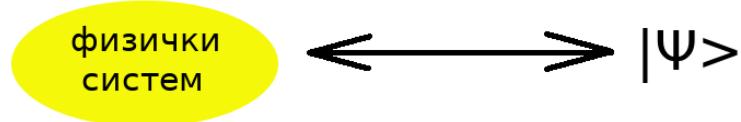
Стандардна (Дирак–фон Нојманова) интерпретација квантне ме-ханике постулира да таласна функција $|\psi\rangle$ пружа комплетан опис физичког система.



⇒ Све што дефинише понашање физичког система “записано” је у таласној функцији, и никада више.

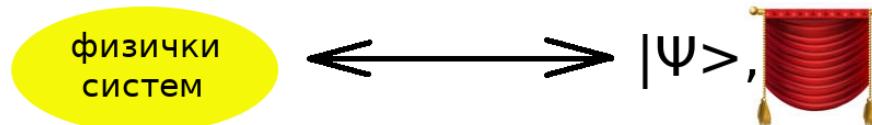
СКРИВЕНЕ ВАРИЈАБЛЕ

Стандардна (Дирак–фон Нојманова) интерпретација квантне механике постулира да таласна функција $|\psi\rangle$ пружа комплетан опис физичког система.



⇒ Све што дефинише понашање физичког система “записано” је у таласној функцији, и никде више.

Али шта ако таласна функција није довољна? Шта ако постоје неке додатне, нама непознате величине, које “допуњују” информацију коју имамо из таласне функције?



⇒ Хипотеза скривених варијабли.

де БРОЈ–БОМ



Louis de Broglie (1892–1987) David Bohm (1917–1992)

Осим таласне функције ψ , постулирају се додатни објекти — честице, описане варијаблама положаја q_k .

де БРОЈ–БОМ



Louis de Broglie (1892–1987) David Bohm (1917–1992)

Осим таласне функције ψ , постулирају се додатни објекти — честице, описане варијаблама положаја q_k .

- Положаје честица q_k не можемо тачно да измеримо — скривене варијабле!

де БРОЈ–БОМ



Louis de Broglie (1892–1987) David Bohm (1917–1992)

Осим таласне функције ψ , постулирају се додатни објекти — честице, описане варијаблама положаја q_k .

- Положаје честица q_k не можемо тачно да измеримо — скривене варијабле!
- Таласна функција задовољава стандардну Шредингерову једначину:

$$\left[i\hbar \frac{\partial}{\partial t} + \sum_k \frac{\hbar^2}{2m_k} \nabla_k^2 - V(q) \right] \psi(q, t) = 0 .$$

де БРОЈ–БОМ



Louis de Broglie (1892–1987) David Bohm (1917–1992)

Осим таласне функције ψ , постулирају се додатни објекти — честице, описане варијаблама положаја q_k .

- Положаје честица q_k не можемо тачно да измеримо — скривене варијабле!
- Таласна функција задовољава стандардну Шредингерову једначину:

$$\left[i\hbar \frac{\partial}{\partial t} + \sum_k \frac{\hbar^2}{2m_k} \nabla_k^2 - V(q) \right] \psi(q, t) = 0 .$$

- Положаји честица задовољавају тзв. пилот једначину:

$$\frac{dq_k}{dt} = \frac{\hbar}{m_k} \operatorname{Im} \left(\frac{\nabla_k \psi}{\psi} \right) .$$

де БРОЈ–БОМ

Централне особине дББ теорије:

- **Експлицитна нелокалност** — положај честице зависи од таласне функције, која зависи од граничних услова далеко од честице.
- **Нема таласно-честичног дуализма** — истовремено постоје и честица и талас, као различити објекти.

де БРОЈ–БОМ

Централне особине дББ теорије:

- **Експлицитна нелокалност** — положај честице зависи од таласне функције, која зависи од граничних услова далеко од честице.
- **Нема таласно-честичног дуализма** — истовремено постоје и честица и талас, као различити објекти.
- **Детерминизам** — из тачног познавања садашњости, можемо тачно да израчунамо прошлост и будућност.
- **Важи класична физика** — за сваку честицу се може поставити други Њутнов закон:

$$m\vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_q,$$

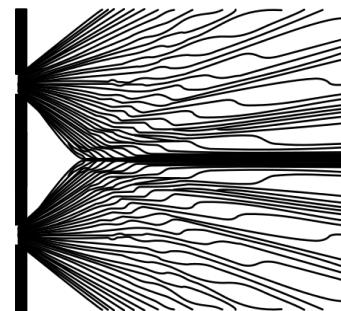
где је \vec{F}_q тзв. “квантна сила”, којом таласна функција делује на честицу.

Квантна сила омогућава класичан опис свих типичних квантних ефеката!

де БРОЈ–БОМ

Конкретно:

- класичне трајекторије у експерименту са два отвора,



- нелокалност обезбеђује додатне корелације у Беловом експерименту,
- постојање честица решава проблем мерења (једнозначност исхода мерења),
- квантна уплетеност је описана квантном силом.

Кудерови експерименти са капљицама уља лепо илуструју разне квантне ефекте!

де БРОЈ–БОМ

Понављати исту радњу изнова и изнова, и сваки пут очекивати различите исходе
је:

де БРОЈ–БОМ

Понављати исту радњу изнова и изнова, и сваки пут очекивати различите исходе је:

- (а) симптом лудила,

де БРОЈ–БОМ

Понављати исту радњу изнова и изнова, и сваки пут очекивати различите исходе је:

- (а) симптом лудила, или

де БРОЈ–БОМ

Понављати исту радњу изнова и изнова, и сваки пут очекивати различите исходе
је:

- (а) симптом лудила, или
- (б) експеримент из квантне механике.

де БРОЈ–БОМ

Понављати исту радњу изнова и изнова, и сваки пут очекивати различите исходе је:

- (а) симптом лудила, или
- (б) експеримент из квантне механике.

Квантна механика није детерминистичка теорија — постоје фундаментално случајне појаве. Откуд онда детерминизам у дББ?

⇒ Положаји честица q су скривене варијабле, не можемо никад прецизно да их одредимо. У њима је енкодирана случајност квантне механике.

⇒ Релације неодређености, вероватноће, Борново правило, . . .

де БРОЈ–БОМ

Недостатак дББ теорије — релативистичко уопштење теорије не вальа!

- “Наивно” уопштење на релативистичку физику \Rightarrow постоји привилеговани референтни систем!
- “Озбиљно” уопштење на релативистичку физику \Rightarrow временска нелокалност!

де БРОЈ–БОМ

Недостатак дББ теорије — релативистичко уопштење теорије не вальа!

- “Наивно” уопштење на релативистичку физику \Rightarrow постоји привилеговани референтни систем!
- “Озбиљно” уопштење на релативистичку физику \Rightarrow временска нелокалност!
- Нерелативистичка дББ теорија је нелокална по простору, али **локална по времену!!**
 \Rightarrow **Локалност по времену је одговорна за детерминизам.**
- Релативистичка дББ теорија је **нелокална и по простору и по времену!!** (Лоренцове трансформације мешају простор и време)
 \Rightarrow **Релативистичка теорија није детерминистичка!!**

Питање: зашто уопште уводити такву теорију?

ЗАКЉУЧАК

Примамљиве особине дББ — нарушава локалност, али зато:

- чува једнозначност исхода и реализам природе,
- чува детерминизам и класичну Њутновску слику света,
- описује све што и стандардна квантна механика!

⇒ **Најкласичнија интерпретација квантне механике!!**

ЗАКЉУЧАК

Примамљиве особине дББ — нарушава локалност, али зато:

- чува једнозначност исхода и реализам природе,
- чува детерминизам и класичну Њутновску слику света,
- описује све што и стандардна квантна механика!

⇒ **Најкласичнија интерпретација квантне механике!!**

Нажалост, упркос свим тим успесима, одговарајућа релативистичка теорија:

- губи једнозначност исхода,
- губи детерминизам и класичну слику света,
- уопштење на релативистичку теорију поља је бескорисно.

ЗАКЉУЧАК

Примамљиве особине дББ — нарушава локалност, али зато:

- чува једнозначност исхода и реализам природе,
- чува детерминизам и класичну Њутновску слику света,
- описује све што и стандардна квантна механика!

⇒ **Најкласичнија интерпретација квантне механике!!**

Нажалост, упркос свим тим успехима, одговарајућа релативистичка теорија:

- губи једнозначност исхода,
- губи детерминизам и класичну слику света,
- уопштење на релативистичку теорију поља је бескорисно.

Наравоученије: дББ теорија показује до које мере је квантна теорија слична класичној, и илуструје у чему су разлике.

ХВАЛА НА ПАЖЊИ!