

KVANTNI TRIKOVI

Kako izgleda mikrosvijet dok ga ne opažamo?

Hrvoje Nikolić
 Institut Ruđer Bošković, Zagreb

Zagreb, 11. listopada 2018

Znanost, fizika i kvantna fizika

Znanost: kombinacija empirije i teorije

Empirija (eksperiment) → znanje

- utvrđuje činjenice

Teorija → razumijevanje

- nudi objašnjenje i predviđanje činjenica

- Slaganje teorije i eksperimenta nikad nije savršeno.

- Generalno, najbolje slaganje u fizici.

- Unutar fizike, najbolje slaganje u **kvantnoj fizici**.

⇒ U tom smislu, kvantna fizika je **najuspješnija** znanost.

Istovremeno, u nekom smislu kvantna fizika je i **najmisterioznija** znanost.

U ovom predavanju pokušat ću objasniti:

- Što je to tako misteriozno u kvantnoj fizici?
- Zašto je misteriozno?
- Koja su moguća rješenja tih misterija?

Misteriozno **ne** znači mistično.

- Misterij - pretpostavlja da racionalno objašnjene **postoji**, ali još nije poznato.
- Mistika - pretpostavlja da racionalno objašnjenje **ne** postoji.

Znanost pretpostavlja da fenomeni u prirodi i društvu mogu biti misteriozni, ali da nisu mistični.

Zašto se teorija i eksperiment najbolje slažu baš u fizici?

- Suprotno onome što neki fizičari vole misliti, to **nije** zato što su fizičari najpametniji.
- To je zato što se fizika bavi **najjednostavnijim** sistemima.
- Npr. atom ili kristal (fizika)
su jednostavniji od živog organizma (biologija)
koji je opet jednostavniji od čitavog društva (sociologija).

Složeni sustavi se sastoje od više manjih jednostavnijih sustava.

Kvantna fizika se bavi najsitnijim djelićima sustava.

- Zato je najuspješnija (jer se bavi najjednostavnijim sustavima).
- Zato je najmisterioznija (jer je najsitnije dijelove najteže direktno opažati).

Opći principi kvantne fizike

Kvantna teorija u standardnom obliku:

- Skup matematičkih pravila za računanje **vjerojatnosti** različitih mogućih rezultata **mjerenja**.
- Ta pravila su u odličnom slaganju sa eksperimentima.
- **Vjerojatnosti** - ne daju sigurna predviđanja za **pojedinačne** događaje, predviđaju samo statistiku ako isti eksperiment ponovimo puno puta.
- Pravila govore samo o rezultatima mjerenja, ne govore ništa o tome što se zbiva kad **ne** vršimo mjerenje.

Misteriji:

- Znači li to da ne postoji neposredni uzrok zašto se u danom eksperimentu ostvari baš jedan a ne neki drugi događaj?
- Ili samo da nam treba bolja teorija koja će dati neposredni uzrok?
- Znači li to da zakoni fizike ne mogu ništa reći o svojstvima sistema dok ih ne mjerimo?
- Ili opet, da nam samo treba bolja teorija koja će nam i to reći?

Najvažnija jednačba kvantne fizike - Schrodingerova jednačba:

$$H\psi(t) = i\hbar\partial_t\psi(t)$$

- opisuje kako kvantno stanje (valna funkcija) ψ ovisi o vremenu t .

Bornovo pravilo:

$$\text{vjerojatnost} = |\psi|^2$$

Iz toga se izvode dva najvažnija svojstva kvantne fizike:

1) **kontekstualnost** - ovisnost o mjerenju

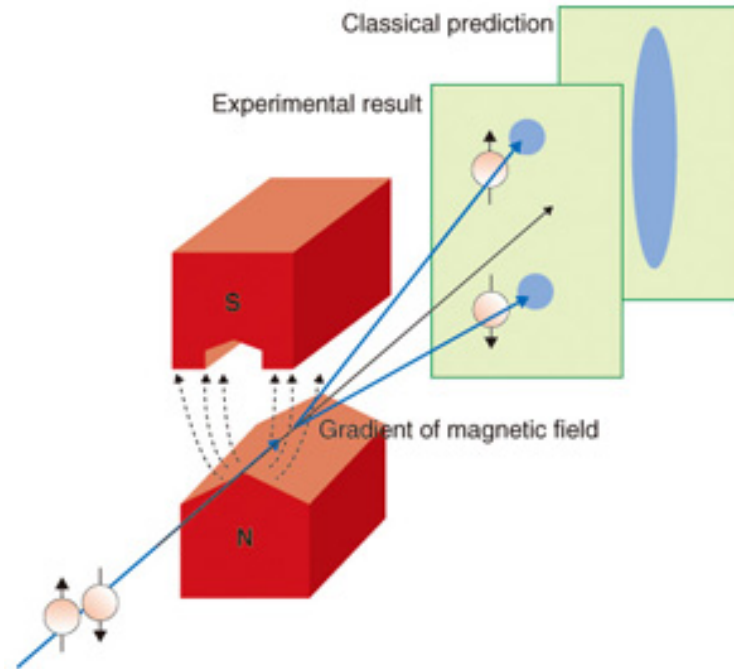
2) **nelokalnost** - korelacije među udaljenim objektima

- Detaljnija objašnjenja u nastavku.
- Za sada dovoljno reći da se svi misteriji kvantne fizike mogu, na ovaj ili onaj način, svesti na kontekstualnot i nelokalnost.

Kontekstualnost

Primjer: mjerenje spina

- Mjeri se pomoću Stern-Gerlach uređaja.
- Mjerenje spina u smjeru y :



- Ako česticu detektiramo gore, kažemo da je spin $|+y\rangle$.
- Ako česticu detektiramo dole, kažemo da je spin $|-y\rangle$.
- Za mjerenje spina u smjeru x , uređaj se zarotira za 90° .

- Što ako istoj čestici spin mjerimo više puta?
Hoćemo li uvijek dobiti isti rezultat?
- Da ako uvijek mjerimo u istom smjeru (npr. smjeru y).
- No što ako mjerimo jedanput u jednom a drugi put u drugom smjeru?
- Pretpostavimo da smo izmjerili u y -smjeru i dobili $|+_y\rangle$.
- Ako nakon toga izmjerimo u x -smjeru, šanse su 50:50 da ćemo dobiti $|+_x\rangle$ ili $|-_x\rangle$.
- Što ako sad opet izmjerimo u y -smjeru?
- Naivno očekivanje: moramo opet dobit $|+_y\rangle$.
- Stvarnost: šanse su 50:50 da ćemo dobiti $|+_y\rangle$ ili $|-_y\rangle$.
- ⇒ Zaključak je da je mjerenje spina u x -smjeru utjecalo na spin u y -smjeru.

Generalan zaključak: **Mjerenje mijenja svojstva kvantnih sistema.**

- To se zove kontekstualnost.

Nelokalnost

Nelokalnost u klasičnoj Newtonovoj gravitaciji:

- Potencijalna energija između dviju čestica vektora položaja \mathbf{r}_1 i \mathbf{r}_2

$$V(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = -\frac{\text{const} \cdot m_1 \cdot m_2}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}$$

- To je skupno svojstvo obje čestice zajedno.
- Ne može se reći kolika je potencijalna energija prve čestice a kolika druge.
- Fizikalna posljedica: trenutna sila na daljinu.

- Danas imamo bolju teoriju (opća teorija relativnosti) u kojoj gravitacijska sila lokalna (prenosi se brzinom svjetlosti).
- Newtonova gravitacija korisna za shvatiti što koncept nelokalnosti uopće znači.

Nelokalnost u kvantnoj mehanici dvije čestice:

- Npr. vodikov atom: \mathbf{r}_1 položaj jezgre, \mathbf{r}_2 položaj elektrona.
- Sistem se opisuje valnom funkcijom

$$\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \psi(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \neq \psi_1(\mathbf{r}_1)\psi_2(\mathbf{r}_2)$$

- Postoji samo jedna skupna valna funkcija za čitav sistem.
- Ovisi samo o relativnom položaju $\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ jedne čestice u odnosu na drugu.
- Ne postoji zasebna $\psi_1(\mathbf{r}_1)$ za jednu česticu a zasebna $\psi_2(\mathbf{r}_2)$ za drugu.

Slično i za dvije čestice sa spinovima:

Lokalno stanje: $|+x\rangle|-y\rangle$

- Lijeva čestica $|+x\rangle$, desna čestica $|-y\rangle$

Nelokalno stanje:

$$|+x\rangle|-y\rangle + |-x\rangle|+y\rangle$$

- Ne može se reći u kojem stanju je lijeva čestica ($|+x\rangle$ ili $|-x\rangle$?)
a u kojem desna ($|-y\rangle$ ili $|+y\rangle$?)

- To se zove **entanglement** (hrv. isprepletenost ili spregnutost).

Može se reći nešto o ukupnom sistemu:

– Prvi član sume: Ako lijeva čestica $|+x\rangle$ tada desna čestica $|-y\rangle$.

– Drugi član sume: Ako lijeva čestica $|-x\rangle$ tada desna čestica $|+y\rangle$.

– Kažemo da su čestice **korelirane**.

- Da bismo **utvrdili** je li lijeva čestica $|+x\rangle$ ili $|-x\rangle$,
moramo izvršiti **mjerenje** spina u x -smjeru.

- Zbog kontekstualnosti, mjerenje nužno **mijenja** stanje.

- Zbog nelokalnosti stanja, promjena na jednoj čestici automatski znači promjenu i na drugoj čestici.

Reichenbachov princip zajedničkog uzroka

Primjer:

- Istraživanje pokazalo da na ulicama ima više ubojstava kad se prodaje više sladoleda.
- Znači li to da sladoled potiče ljude na ubojstvo?
- Ili možda ubojstva potiču ljude da jedu više sladoleda?
- Ne, nego i jedno i drugo uzrokovano trećim faktorom - ljetom!
- Kad je toplo ljudi jedu više sladoleda, a također i više izlaze na ulice, a kad je veća gužva na ulicama veća je i vjerojatnost ubojstva.

Općenit princip:

Ako A koreliran sa B , tada

- ili A uzrokuje B , ili B uzrokuje A (ili obostrano utječu jedan na drugog)
- ili postoji neki C koji uzrokuje i A i B .

- To je općenit princip u svim (prirodnim i društvenim) znanostima.
- Ako točan \Rightarrow mora postojati nešto što **uzrokuje** kvantne korelacije dviju čestica.

Problem:

- U teoriji, koliko god čestice bile udaljene, promjena se prenosi trenutno.
 - Prema teoriji relativnosti, nikakva informacija ne bi smjela putovati brže od brzine svjetlosti c .
 - Eksperimenti potvrđuju da se promjena prenosi puno brže od c .
 - Kako je to moguće?
-
- Postoje različite interpretacije.
 - Fizičari se međusobno ne slažu koja interpretacija je točna.

Analogija sa interpretacijama mađioničarskog trika:



1) Šuti i uživaj!

(U kvantnoj fizici “šuti i računaj!”)

2) Hipnoza, zec ne postoji.

(U kvantnoj fizici informacijska interpretacija.)

3) Magija, zec se doslovno stvori - materijalizira.

(U kvantnoj fizici kolaps valne funkcije.)

4) Mađioničar skriva pravi mehanizam.

(U kvantnoj fizici skrivene variable.)

Interpretacije

Glavna pitanja za interpretacije:

Ontologija: ono što postoji neovisno o opažanju

- Ima li kvantni sistem svojstva prije nego ih izmjerimo/opazimo?
- Ako da, koja su to svojstva? (Položaj čestice? Brzina? Spin?)
- Ima li u znanosti to pitanje uopće smisla?

Nelokalnost: porijeklo korelacija na daljinu

- Postoji li informacija koja se prenosi brže od svjetlosti?
- Ako da, je li to u skladu sa teorijom relativnosti?
- Ako ne, kako onda čestice znaju da moraju biti korelirane?

Kauzalnost: interpretacija vjerojatnosti u kvantnoj fizici

- Einstein: “Bog se ne kocka.”
- Jesu li kvantni događaji zaista slučajni?
- Ili postoje neposredni uzroci?

Popis interpretacija koje ću detaljnije pojasniti:

- 1) Šuti i računaj!
- 2) Kolaps interpretacija
- 3) “Ortodoksna” interpretacija
- 4) Interpretacija mnogo svjetova
- 5) Bohmova interpretacija

Šuti i računaj!

- Zapravo nije interpretacija nego stav da se interpretacijama ne treba ni baviti.
- Matematika kvantne mehanike predviđa vjerojatnosti rezultata eksperimenata.
- Predviđanja se slažu sa stvarnim eksperimentima.
- Osim tih vjerojatnosti ništa drugo i ne možemo mjeriti, pa onda o tome ne treba ni razmišljati.
- Svaki pokušaj “dubljeg razumijevanja” je filozofija, a ne znanost.

Prednosti:

- Vrlo pragmatično.
- Za praktične potrebe sasvim dovoljno.

Kritike:

- Znanost nije inženjerstvo.
- Smisao znanosti nije samo praktična upotrebljivost, nego i dublje razumijevanje.

Kolaps interpretacija

Ontologija:

- Kvantno stanje (valna funkcija $\psi(t)$) postoji čak i kad ga ne mjerimo.
- Ne postoji ništa drugo osim valne funkcije.

Kontekstualnost:

- Mjerenje uzrokuje trenutnu promjenu kvantnog stanja.
- Tzv. kolaps valne funkcije.

Kauzalnost:

- Promjena se događa slučajno, nemoguće predvidjeti u koje stanje će sistem prijeći.

Nelokalnost:

- Mjerenje na jednom mjestu uzrokuje trenutnu promjenu svuda u svemiru.

Prednost:

- Jednostavno za praktičnu primjenu.

Kritika 1:

- Mjerenje zahtjeva interakciju između mjerenog objekta i mjernog uređaja.
- No nije svaka interakcija mjerenje.
- Nije precizno definirano kad interakcija jest a kad nije mjerenje.

Predložena rješenja:

a) Svijest uzrokuje kolaps (von Neumann, Wigner).

b) Kolaps ne ovisi uopće o mjerenju ili svijesti.

Ovisi o nečem drugom, npr:

- Vjerojatnost kolapsa veća što je broj entangliranih čestica veći (Ghirardi-Rimini-Weber).
- Veza s kvantnom gravitacijom (Penrose).

Kritika 2:

- Schrödingerova jednađba opisuje kontinuiranu promjenu $\psi(t)$.
- Trenutna promjena u suprotnosti sa Schrödingerovom jednađbom.
- Postoje dobri teorijsko-matematički argumenti zašto bi Schrödingerova jednađba trebala biti točna (matematička elegancija).
- Kolaps je matematički *ad hoc*, narušava eleganciju.

Kritika 3:

- Trenutna promjena znači da se nekakva informacija prenosi brže od c .

“Ortodoksna” interpretacija

Interpretacija kontekstualnosti:

- Fizika je empirijska znanost: bitno je samo ono što opazimo/izmjerimo.
- Mjerenje **ne mijenja** svojstva sistema; ono ih **stvara**.
- Prije nego izmjerimo položaj, čestica **nema** položaj.
- Prije nego izmjerimo spin, čestica **nema** vrijednost spina (čak ni 0).

Interpretacija nelokalnosti:

- Nema ni korelacije među udaljenim česticama dok netko ne izmjeri tu korelaciju.
 - Mjeritelj ne može **istovremeno** izmjeriti obje čestice.
 - Mora izmjeriti prvu, pa zatim odputovati do druge.
 - To putovanje ne može brže od c .
- ⇒ Nitko ne može **izmjeriti** da se korelacije događaju trenutno.

Prednost “ortodoksne” interpretacije:

- Nema konflikta sa teorijom relativnosti, pod uvjetom da i relativnost interpretiramo kao teoriju koja govori **samo** o opažanjima.

Kritike:

- Po toj logici ispada da ni *“Mjesec ne postoji dok ga nitko ne gleda”*.
- Točnije, da ni makroskopski objekti ne postoje dok ih nitko ne opaža.
- Teško prihvatljivo sa zdravo-razumskog stajališta.

Mekša varijanta “ortodoksne” interpretacije:

- Stvari možda postoje i bez opažanja, ali znanost (fizika) se time ne bavi.
- Stoga, kad govorimo **unutar** fizike, možemo **reći** da stvari ne postoje dok ih nitko ne opaža.

Informacijska interpretacija (QBism):

- Fizika se ne bavi prirodom kao takvom, nego samo informacijom (o prirodi) koju ljudi posjeduju.

Interpretacija mnogo svjetova

Ontologija:

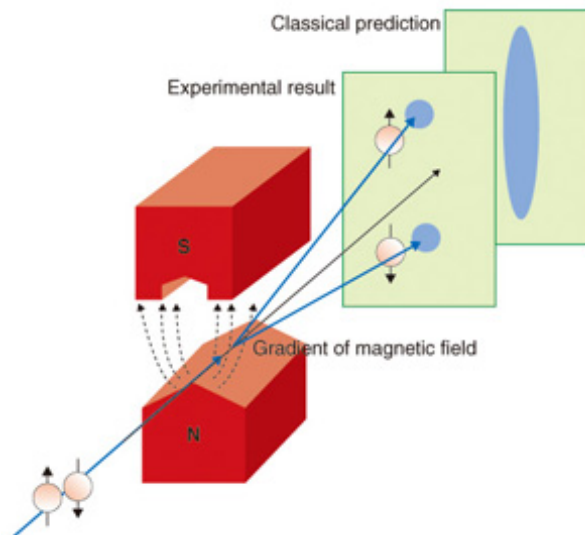
- Valna funkcija $\psi(t)$ postoji i kad ju ne mjerimo.
- Sve što postoji je valna funkcija.

Kauzalnost:

- Determinizam, nema kolapsa valne funkcije.
- Schrodingerova jednađba za $\psi(t)$ vrijedi uvijek.

Matematička činjenica:

- Schrodingerova jednađba $\Rightarrow \psi(t)$ se cijepa pri mjerenju



- Cijepanje postoji i u drugim interpretacijama (osim u kolaps interpretaciji koja modificira Schrödingerovu jednađbu).
- No druge interpretacije kažu da je $\psi(t)$ samo pomoćna matematička veličina, a ne fizička stvarnost.
- Stoga je i cijepanje u drugim interpretacijama samo matematičko cijepanje, ne i fizičko cijepanje.

- Interpretacija mnogo svjetova to interpretira kao **stvarno fizičko cijepanje**.
- ⇒ Pri svakom mjerenju svemir se cijepa na više različitih svemira.

Kauzalnost:

- Potpuni determinizam, sve je određeno Schrödingerovom jednađbom.

Prednost:

- Ima manje pretpostavki od drugih interpretacija.

Jedine pretpostavke (postulati) su:

- Jedina fizička stvarnost je $\psi(t)$.
- $\psi(t)$ uvijek zadovoljava Schrödingerovu jednađbu.

Najčešća kritika:

- Budući da možemo opaziti samo jedan svemir, nema smisla postulirati dodatne svemire.
- Kritika nije opravdana, jer ta interpretacija **ne postulira** dodatne svemire.
- Dodatni svemiri su **logička posljedica** drugih postulata.

Najvažnija kritika:

- Postulati teorije ne govore ništa o vjerojatnostima.
- Empirijski znamo da vrijedi Bornovo pravilo: **vjerojatnost = $|\psi|^2$** .
- Kako iz postulata izvesti Bornovo pravilo?
- Pokazuje se da ga je nemoguće izvesti bez da se uvedu neke dodatne pretpostavke.
- Nije jasno koje bi to točno pretpostavke trebale biti (ima više različitih ideja).
- Kad se uvedu dodatne pretpostavke, više se ne može reći da je to teorija sa najmanje pretpostavki.
- Na taj način gubi se glavna prednost interpretacije.

Bohmova interpretacija

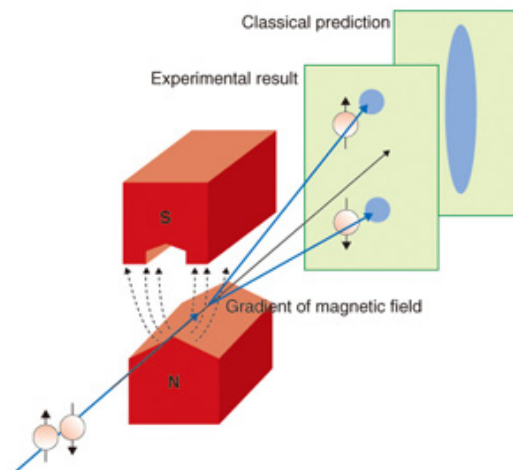
- Konstruirana po uzoru na klasičnu Newtonovu mehaniku.

Klasična Newtonova mehanika:

- Kinematika: Čestica je točkasi objekt koji ima putanju $\mathbf{R}(t)$.
- Dinamika: Putanja određena klasičnim silama (gravitacijska, električna, magnetska, ...)

Bohmova mehanika:

- Kinematika: Ista kao za klasičnu mehaniku.
- Dinamika: Putanja određena kvantnim (ne klasičnim) silama.
- Te sile računaju se iz valne funkcije $\psi(t)$.
- $\psi(t)$ je samo pomoćna matematička veličina za računanje sila na čestice.



Ontologija:

- Čestica ima položaj $\mathbf{R}(t)$ u svakom trenutku t , bez obzira da li ga mjerimo.

Kauzalnost:

- Putanja $\mathbf{R}(t)$ je deterministička, određena silama koje se računaju iz $\psi(t)$.
 - $\psi(t)$ je deterministička, određena Schrödingerovom jednačinom.
- ⇒ Teorija je deterministička, budućnost određena početnim uvjetima za $\mathbf{R}(0)$ i $\psi(0)$.

Kontekstualnost:

- Mjerenje mijenja valnu funkciju $\psi(t)$.
- Posljedica je da se zbog toga mijenja i putanja $\mathbf{R}(t)$.

Vjerojatnost i Bornovo pravilo:

- Čestica ima točan položaj i brzinu u svakom trenutku, ali u praksi mi taj položaj ne znamo dok ga ne izmjerimo.
- Posljedica tog ljudskog neznanja je da naše nepotpuno znanje opisujemo vjerojatnostima.

Analogija sa ruletom:



- kuglica = čestica
- pregrade = rascijepljena valna funkcija
- Čestica završi samo u jednoj pregradi.
- Rezultat deterministički određen početnim položajem i brzinom čestice.
- U praksi znamo samo vjerojatnost.

Nelokalnost:

- Brzina jedne čestice u trenutku t određena položajima svih ostalih čestica u tom istom trenutku t .
- Utjecaj ne ovisi o udaljenosti među česticama
- To se odnosi na sve čestice koje su međusobno entanglirane.

- Bohmova interpretacija spada u širu kategoriju interpretacija sa “skrivenim varijablama” .
- Po pretpostavci postoje iako ih se ne može direktno opažati.
- U Bohmovojoj teoriji, “skrivenne varijable” su položaji čestica.

Analogija sa termodinamikom:

- U 19.st. nije bilo direktnog dokaza postojanja atoma.
- Boltzmann je postavio teoriju da je termodinamika posljedica gibanja sićušnih “nevidljivih” čestica - atoma.
- Mnogi njegovi suvremenici su ga osporavali.
- Danas znamo da je bio u pravu.

Zašto ne možemo direktno dokazati postojanje Bohmove putanje?

Analogija:

- To je kao da želimo dokazati postojanje putanje Mjeseca tako da promatramo plimu i oseku.
 - Znamo da gravitacija Mjeseca stvara plimu i oseku.
 - Gravitacija djeluje na daljinu, pa iz gravitacijskog utjecaja ne možemo direktno odrediti položaj Mjeseca.
 - Iz istog razloga ne možemo direktno dokazati postojanje tamne materije u Svemiru.
-
- Slično, čestice u Bohmovoј teoriji djeluju jedna na drugu na daljinu, zbog čega ne možemo direktno dokazati njihovo postojanje.

Prednost Bohmove interpretacije:

- Sličnost sa klasičnom mehanikom, što ju čini intuitivnom.

Kritike:

- Matematički kompliciranija, jer osim Schrödingerove jednačbe sadrži i jednačbe za putanje čestica.
- Nema smisla dodavati u teoriju nešto što se ionako ne može mjeriti.
- Trenutno djelovanje na daljinu čini se u suprotnosti sa teorijom relativnosti.

Moj osobni doprinos teoriji:

- Radio sam na poopćenju teorije tako da bude u skladu sa teorijom relativnosti (i kvantnom teorijom polja).
- To se može učiniti na puno različitih načina, nije jasno koji je najbolji.
- Prilično komplicirano, za sada nije pronađen jednostavan matematički elegantan način da se to uradi.

Primjer: Relacija neodređenosti u različitim interpretacijama

- Neodređenost položaja Δx i neodređenost položaja Δp ne mogu oboje biti proizvoljno mali:

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

Experimentalno značenje koje ne ovisi o interpretaciji:

- Govori sa kolikom sigurnošću možeš **unaprijed predvidjeti** ishod budućeg mjerenja.
- Što si sigurniji koliki će biti x , to si manje siguran koliki će biti p .
- To **ne** znači da se i x i p ne mogu izmjeriti proizvoljno točno. Ali znači slijedeće:
 - 1) Ne možeš ih **istovremeno** izmjeriti proizvoljno točno.
 - 2) Ako odlučiš prvo izmjeriti x a zatim p , tada što si točnije izmjerio x , to si manje siguran što ćeš dobiti kad budeš mjerio p .

Što nam to govori o vrijednostima x i p prije mjerenja?

- Δx i Δp su svojstva valne funkcije ψ .
- Različite interpretacije različito interpretiraju ψ .
- ⇒ Različite interpretacije nude različite odgovore na to pitanje.

Kolaps interpretacija i interpretacija mnogo svjetova:

- ψ je stvarno (ontološko) fizičko svojstvo.
- ⇒ Čestica prije mjerenja se nalazi u stanju “razmrljanog” x i/ili p .
- Čestica nije točkasta nego izgleda kao oblak/val.

Ortodokсна interpretacija:

- Pitanje nema smisla.
- Prije mjerenja čestica nema nikakva svojstva.
- Ili ako ih i ima, fizika se time ne bavi.

Bohmova interpretacija:

- **Čestica** (kao takva) ima točno definiran i x i p , ali prije mjerenja **mi** (ljudi) ne znamo koliki su.

Zaključak

- Teorijska fizika služi nam za predviđanje i objašnjavanje opažanja.

Klasična teorijska fizika:

- Predviđa buduće događaje sa sigurnošću (barem u principu).
- Govori kako izgleda svijet čak i dok ga ne opažamo.

Kvantna teorijska fizika:

- Predviđa vjerojatnosti događaja.
- Ne daje jednoznačan odgovor na pitanje kako izgleda svijet dok ga ne opažamo.
- Zbog toga postoje različite interpretacije koje nude različite odgovore na to pitanje.
- Za sada se ne zna koja interpretacija je “točna”.