

OSNOVE KVANTNE MEHANIKE

Peter Lukan
Filozofska fakulteta
Univerza v Ljubljani

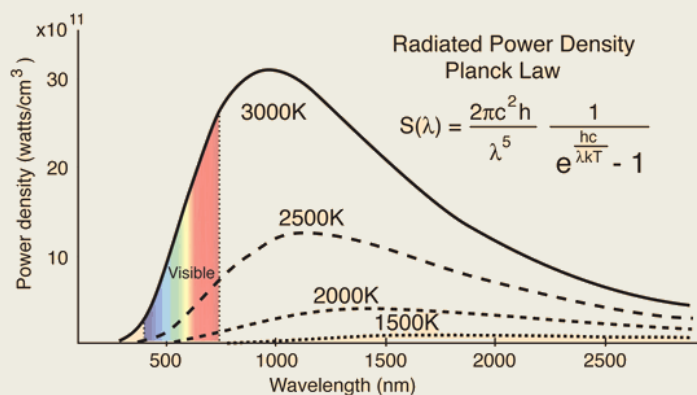
PREGLED

- Uvod
- Nekateri ključni pojmi teorije:
 - kvantni skok
 - kvantnomehanski model atoma
 - valovna funkcija
 - Schrödingerjeva enačba
 - načelo nedoločenosti.
- dualnost delec-val in poskus z dvema režama
- načelo korespondence
- nekateri zanimivi poskusi in pojavi
- filozofski problemi povezani s kvantno mehaniko.

KVANTNA MEHANIKA – UVOD

- Mehanika je veja fizike, ki se ukvarja z gibanjem teles.
- Kaj je kvant? *Quantum = lat. enota.*
- Max Planck je razložil sevanje črnega telesa (levi graf) s privzetkom, da je svetloba na neki način vezana v ‚paketih‘ (kvantih).
- Albert Einstein je uspešno razložil pojav fotoefekta s pomočjo privzetka, da je svetloba *kvantizirana*, in sicer kot *fotoni*; fotoni so torej enote svetlobe.
- Fotoni različnih barv imajo različno energijo. Po Plancku se imenuje konstanta h , ki pomaga izračunati, kolikšno energijo ima posamezni foton. To je odvisno od njegove frekvence (intuitivno: barve):

$$\text{Energija} = h \cdot \text{frekvenca}$$



High energy photon for blue light.



Lower energy photon for red light.

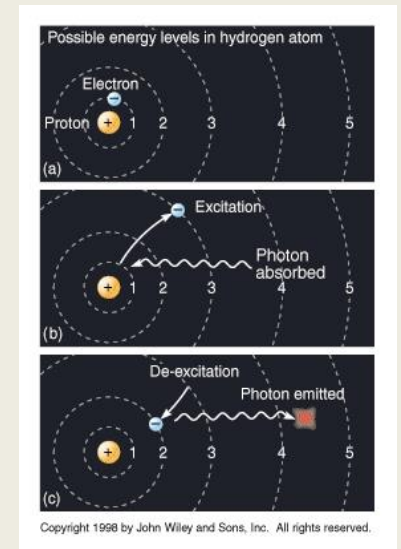


Low energy photon for infrared light.
Should be invisible!

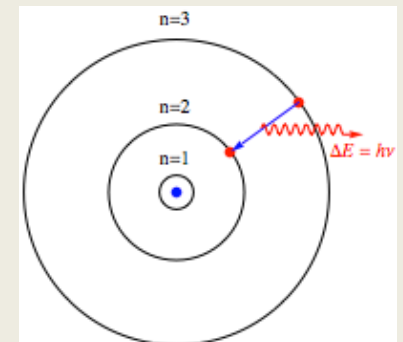


KVANTNI SKOK

- Niels Bohr je 1913 uvedel t.i. *planetarni model atoma*, v katerem negativni elektroni krožijo okoli pozitivnega jedra po tirnicah, tako kot planeti okoli Sonca.
- Posamezne tirnice imajo določeno energijo, zato rečemo, da vsaka tirnica ustreza določenemu energijskemu nivoju. Če je elektron na tirnici, ki je bolj oddaljena, ima več energije, ker je bližje temu, da bi bil ‚svoboden‘ od vezanosti na pozitivno jedro.
- Prehod iz ene tirnice na drugo se zgodi, če do elektrona pride takšen foton, ki ima ravno pravšnjo energijo (frekvenco), da spravi elektron v naslednjo večjo tirnico. Elektron pri tem naredi nekakšen instanten premik z ene tirnice na drugo, kar je dobilo ime *kvantni preskok*.
- Ko elektron pade na nižjo tirnico (bližje jedru), se pri tem izseva foton, ki ima natančno takšno energijo, kot je razlika med energijskima nivojema obeh tirnic.

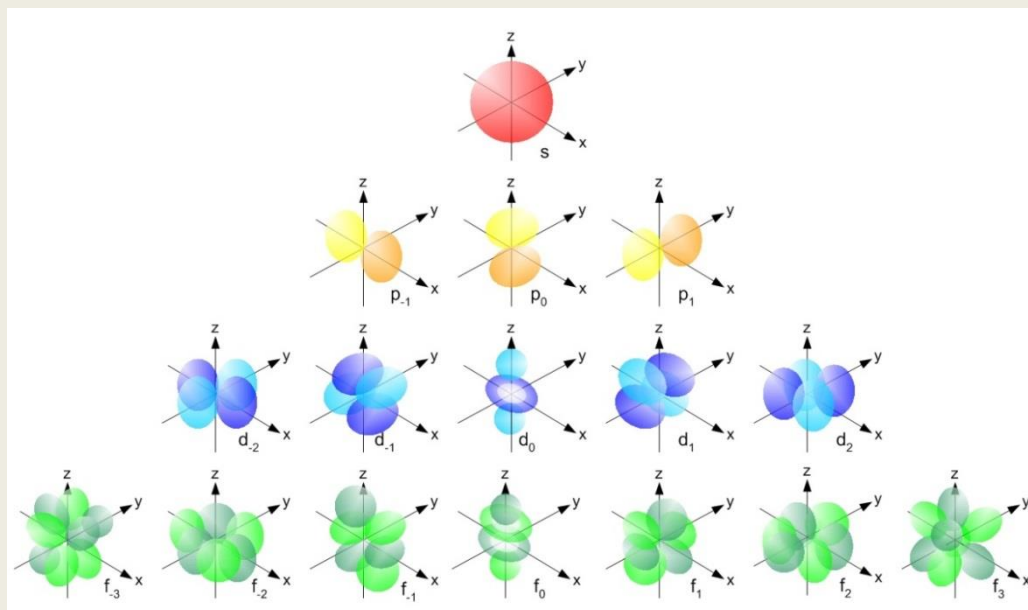


kvantni preskok



KVANTNI MODEL ATOMA Z ORBITALAMI

- Enostavni planetarni model atoma je z razvojem kvantne mehanike zamenjal bolj dodelani model z orbitalami.
- Orbitale imajo natančno matematično določeno obliko. Dobimo jih, ko rešimo določene osnovne enačbe kvantne mehanike. Orbitale so grafična predočitev matematičnih rešitev, ki jih je dala kvantna mehanika. V grafični obliki jih običajno srečamo pri kemiji. Orbitale predstavljajo prostor, v katerem je 95 % verjetnost, da najdemo elektron.
- V tem modelu elektroni ,skačejo' med orbitalami, ne več med tirnicami.

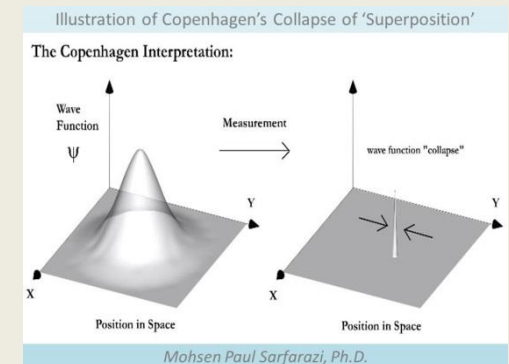
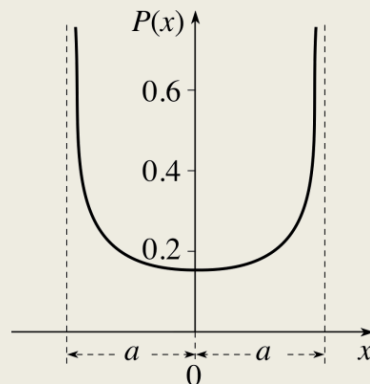
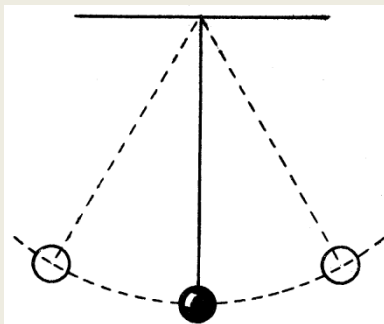


VALOVNA FUNKCIJA

- Kvantna mehanika je zastavljena splošno, opis atoma je samo eden od njenih rezultatov.
- Opisuje gibanje delcev atomskih dimenzij. To počne na dokaj neobičajen način – s pomočjo t.i. *valovne funkcije*, ki jo pripišemo delcu (simulacija):

<https://www.youtube.com/watch?v=OgTKDEkJuKU>

- Ko „zamrznemo“ spreminjanje valovne funkcije (oziroma čas), dobimo *verjetnostno porazdelitev*, kje se bo delec nahajal ob tem času.
- Na soroden način lahko obravnavamo tudi makroskopske pojave, npr. klasično nihalo:



Verjetnost, da najdemo nihalo na nekem položaju, če niha od a do $-a$. V skrajnih legah se nihalo skoraj ustavi, zato je verjetnost tam večja, v osrednji legi pa gre nihalo najhitreje, zato je verjetnost najmanjša.

Kolaps valovne funkcije pri meritvi. Tako se spremeni valovna funkcija pred meritvijo in takoj po njej.

- Ko položaj delca izmerimo, ima določen položaj, valovna funkcija, ki napoveduje možne položaje, se tedaj „sesede“ (t.i. *kolaps valovne funkcije*).

SCHRÖDINGERJEVA ENAČBA

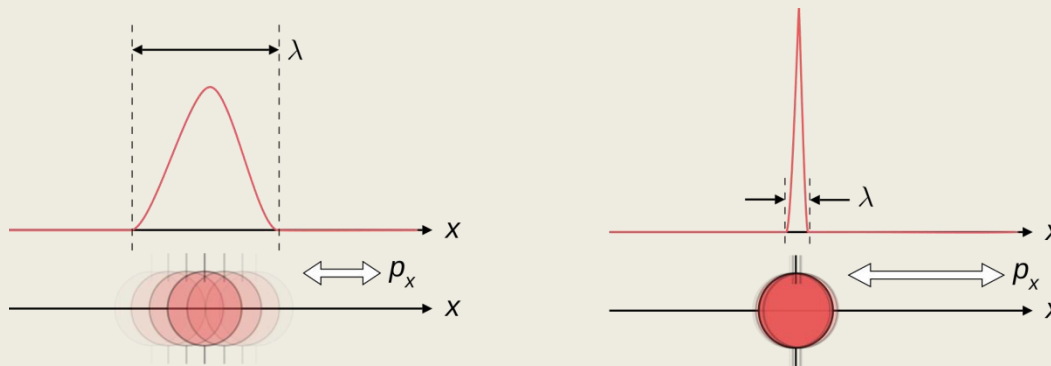
- Je temeljna enačba gibanja v kvantni mehaniki. Pove, kako se spreminja valovna funkcija s časom.
- Zgleda takole:

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right] \Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi$$

- Njen utemeljitelj Erwin Schrödinger jo je ob uvedbi (1925) interpretiral drugače, kot se je kasneje uveljavilo med teoretiki. Enačba matematično opisuje valovanje, gre za t.i. valovno enačbo. Interpretiral jo je, kot da opisuje nekakšne masne valove.
- Max Born je za njim (1926) predlagal interpretacijo, ki se je prijela: enačba ne opisuje masnih valov, temveč jo je treba razumeti *verjetnostno* (če kvadriramo valovno funkcijo, dobimo verjetnostno porazdelitev, kje se nahaja delec).

NAČELO NEDOLOČENOSTI

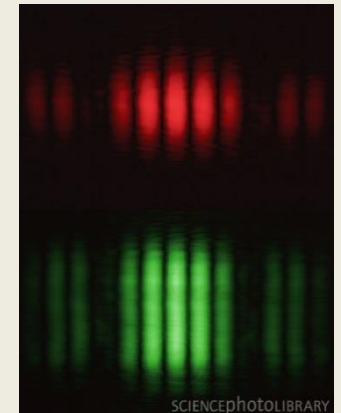
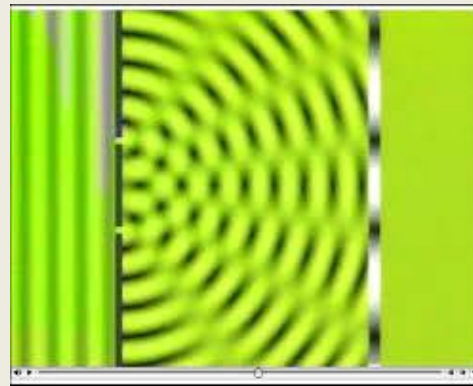
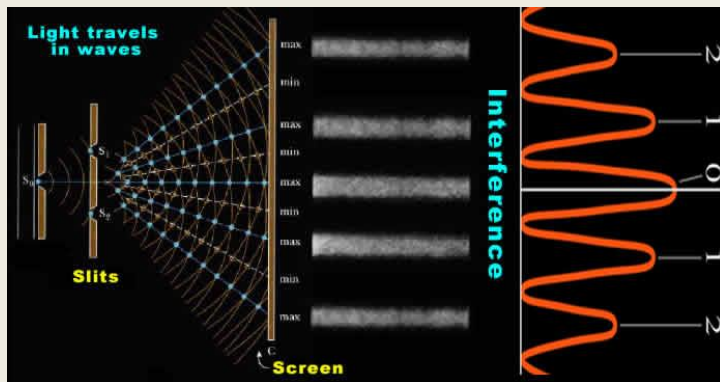
- Kvantna teorija postulira, da ni mogoče hkrati izmeriti hitrosti (točneje: gibalne količine) in položaja delca. Temu rečemo *načelo nedoločnosti*. Uvedel ga je Werner Heisenberg (1927).
- Načelo pravi, da natančneje kot bomo merili položaj delca, manj natančno bomo lahko izmerili njegovo hitrost in obratno.



Nedoločnost lahko morda poskusimo vizualizirati kot razmazanost slike delca (spodaj). Na vrhu sta narisani ustrezni valovni funkciji – širša pomeni večjo nedoločnost (delokaliziranost) položaja, ožja pa manjšo nedoločnost (delokaliziranost) položaja.

DUALNOST DELEC-VAL

- Svetlobo lahko obravnavamo na dva načina: je valovanje, hkrati pa jo lahko obravnavamo tudi kot delec – namreč foton. To je odvisno od konteksta oziroma pojava.
- Začeli pa so domnevati tudi obratno: da lahko delce v ustreznih primerih obravnavamo tudi kot valovanje.
- Pojav, s pomočjo katerega so to poskusili, se imenuje interferenca. Ta je nekakšen ‚zaščitni znak‘ pojavov, ki vključujejo valovanje.

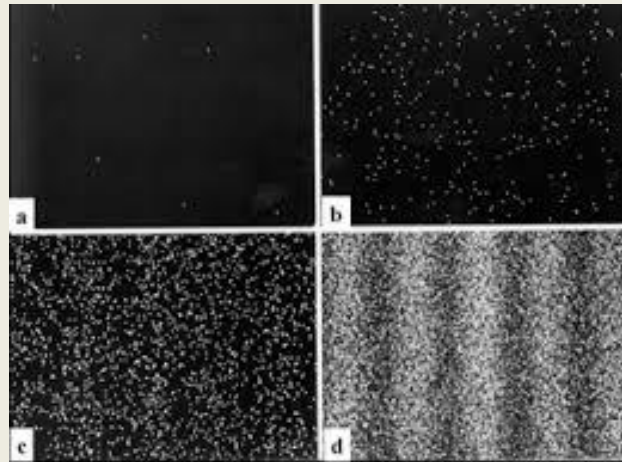


primer realnega interferenčnega pojava

Shematski prikaz potovanja svetlobe skozi dve reži (iz ptičje perspektive). Na skrajni levi (obeh slik) imamo t.i. ravno valovanje. Iz rež izhajajo krogelni valovi, ki se zaradi medsebojnega seštevanja v določenih smereh ojačijo (konstruktivna interferenca) in v določenih medsebojno izničijo (destruktivna interferenca). Na zaslonu, ki ga postavimo, so ta področja ojačitev in oslabitev vidna kot svetlobne črte in temne črte med njimi.

DUALNOST DELEC-VAL

- Za delce so ta poskus ravno tako naredili s pomočjo dveh rež – t.i. poskus z dvojno režo (*double slit experiment*). Čeprav bi pričakovali, da dobimo dve črti, saj gredo delci skozi dve reži, dobimo interferenčni vzorec, tako kot pri običajnem valovanju.
- Interferenčno sliko pri elektronih dobimo tudi takrat, ko streljamo delce enega po enega!



Interferenčni vzorec z elektroni pri poskusu dveh rež. Slike kažejo svetlobne pike na mestih zaslona, kamor so prileteli elektroni. V tem primeru so elektrone streljali posamično enega za drugim.

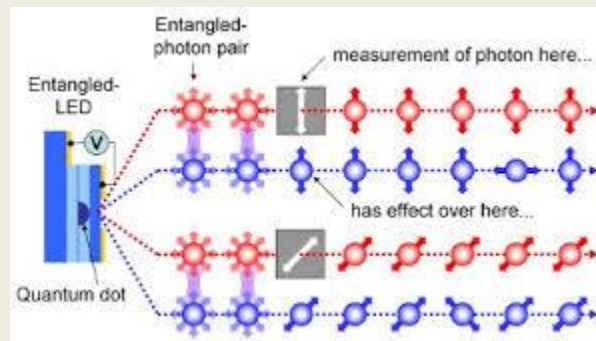
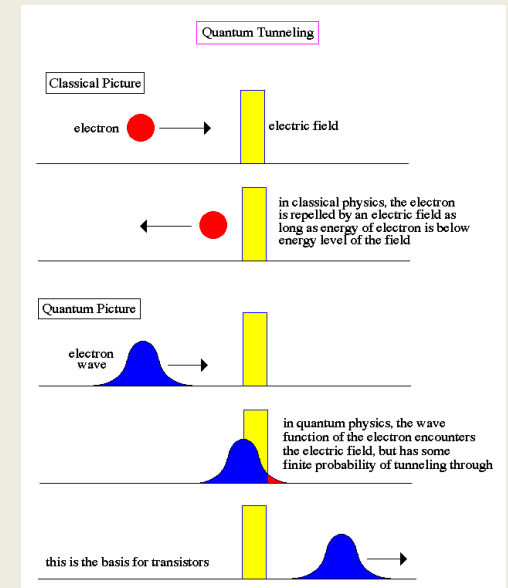
- Če delec pomerimo na eni izmed rež, da bi ugotovili, skozi katero režo je šel, interferenčnega vzorca ne dobimo! Zato se pogosto reče, da se npr. elektron „vede kot delec, če ga pomerimo, če ga ne pomerimo, pa se vede kot val“.
- Poskus z dvema režama: <https://www.youtube.com/watch?v=DfPeprQ7oGc>

NAČELO KORESPONDENCE

- Načelo s tem imenom je uvedel Niels Bohr, da bi poudaril, da se kvantna mehanika kljub očitni drugačnosti navezuje na klasično mehaniko.
- Načelo je lahko razumljeno kot bolj splošna metodološka zahteva, naj se vsaka nova teorija ali opis narave ujema s starejšim, če ta daje pravilne rezultate.
- Kvantna mehanika se v limiti ujema s klasično mehaniko. To limito lahko ponazorimo več konkretnih načinov, v trenutnem kontekstu npr. takole:
 - Razlike med energijskimi nivoji v klasični mehaniki so tako majhne, da ne razločimo več posameznih nivojev, imamo torej kontinuum možnih energijskih stanj za neko telo, česar smo vajeni v klasični mehaniki, kjer ne govorimo o energijskih stanjih.
 - Ko delci pri poskusu dveh rež potujejo skozi dovolj široke reže, nimamo interferenčnega pojava, temveč dobimo dve črti na zaslonu za režama, povsem enako, kot bi pričakovali v klasični mehaniki, če bi streljali kroglice skozi dve okni.
- Načelo korespondence je pojem, ki poudarja, da je kvantna mehanika kljub vsemu ,prizemljena‘.

ZNANI POSKUSI/POJAVI

- Kvantno tuneliranje (slika desno). Klasični delec se od ovire odbije, valovna funkcija pa deloma seže onstran ovire, kar pomeni neko končno verjetnost, da delec pride skozi. Pri tem moramo v kvantni mehaniki pod pojmom ovire razumeti vpliv drugih delcev na nek delec in ne nekakšnega ‚mikroskopskega zidu‘.
- Kvantna prepletenost. Mogoče je pripraviti par delcev na takšen način, da imata neko odvisno lastnost (t.i. *spin*, ki ima lahko samo dve vrednosti: gor ali dol). Takšna delca potujeta daleč narazen in ko pomerimo lastnost enega (ali ima *spin* gor ali dol), se takoj spremeni valovna funkcija drugega delca.



Kvantna prepletenost. Tudi če sta prepletena delca daleč vsaksebi (več km), naj bi z meritvijo enega instantno (tj. hitreje od svetlobe) vplivali na drugega, saj v trenutku postane jasna tudi lastnost drugega.

Kvantno tuneliranje. Ta pojav je podlaga za razlago, zakaj Sonce gori. Je tudi teoretična podlaga za opis delovanja tranzistorja, ključnega elementa vse ‚pametne‘ elektronike (tj. računalniki, mobilni telefoni, elektronske merilne naprave), brez katerega ne bi bilo informacijske revolucije.

FILOZOFSKI PROBLEMI KVANTNE MEHANIKE

- Vprašanje znanstvenega jezika. O tem je veliko pisal Werner Heisenberg. Težavno je govoriti o pojavih in izidih poskusov v kvantni mehaniki, ker naletimo nenehno na ovire, npr. ko govorimo enkrat o delcih in drugič o valovih, ko govorimo o valovni funkciji, pri tem pa nimamo konsenza o njenem pomenu, ko govorimo o kolapsu valovne funkcije. Jedro težave je v povezati teoretični jezik in jezik empiričnega izkustva.
- Vprašanje interpretacije meritev. Kaj se zgodi pri kvantni meritvi? T.i. kolaps valovne funkcije, ki je bil opisan, je eden od načinov, kako tolmačiti dogajanje. Veliko je teoretikov, ki se ne strinjajo z rabo tega pojma, in trdijo, da ne gre za nikakršno sesedanje valovne funkcije, temveč enostavno za to, da izmed možnih napovedanih izidov pač izmerimo enega, kar je izventeoretično dejanje. Pri meritvah imamo poleg tega še vprašanje substancialnega vpliva merilne naprave na izid poskusa, kar se pogosto metafizično karikira v formulacijah tipa „delec se vede drugače, če ga zavest gleda“.
- Vprašanje holizma ali vsepovezanosti. Kvantna mehanika zaradi pojava kvantne prepletenosti in vpliva merilnih naprav na izid poskusov odpira vprašanje o holistični naravi sveta. O tej temi so pisali tudi teoretiki kvantne mehanike, kot sta Erwin Schrödinger in David Bohm.

FILOZOFSKI PROBLEMI KVANTNE MEHANIKE

- Vprašanje (in)determinizma in (ne)lokalnosti:
 - determinizem: enolična določenost položaja in hitrosti delca
 - lokalnost: medsebojni vpliv potuje s svetlobno hitrostjo
 - dilema, do katere je pripeljal razvoj kvantne mehanike, je ta, da lahko izbiramo zgolj med dvema možnostma: bodisi *lokalnost + indeterminizem* ALI *nelokalnost + determinizem*.
- Vprašanje interpretacije znanstvene teorije. V kvantni mehaniki se je razvila množica interpretacij (> 10). Gre za interpretacije v smislu konceptualnega sveta, ki ga teorija prinaša s seboj. Najbolj znane (po zastopanosti) so:
 - Ortodokсна kopenhagenska (Heisenberg, Bohr) – to je oblika kvantne teorije, kakor se je prvotno razvila. Vključuje pojem kolapsa, se ne sprašuje po tem, kaj se dogaja z delci, preden jih izmerimo, stavi predvsem na ujemanje napovedi in meritev. Veliko znanstvenikov je začutilo pri njej interpretativni manko.
 - Mnogosvetne teorije (Everett) – te teorije zavračajo kolaps valovne funkcije in razumejo meritev kot dogodek, pri katerem se izrazi samo eden od mnogih svetov, v ostalih svetovih pa bi pri meritvi za npr. položaj delca dobili enega od preostalih možnih izidov. Vesolja potekajo vzporedno in so razumljena v ontološkem smislu, ob vsaki novi meritvi se razvejajo.
 - Bohmova statistično-deterministična interpretacija – ne priznava kolapsa valovne funkcije, valovno funkcijo razume ne kot opis vedenja enega delca, temveč množice delcev, od katerih pa ima vsak dobro določen tir. Nedoločnost se še vedno nanaša na en delec in je stvar merjenja, saj ne moremo hkrati izmeriti položaja in hitrosti. Ob meritvi izvemo, kakšno trajektorijo je delec imel. Ta teorija priznava nelokalnost (glej zgoraj).
 - Statistična interpretacija (Einstein) – minimalistična interpretacija. Valovna funkcija se nanaša izključno na skupino delcev, če jo apliciramo na posamezen delec, pridemo do nenaravnih opisov dogajanja. Teorija ne razlaga dinamičnega dogajanja, prisega zgolj na statistični status uspešnih napovedi teorije.