

Princip komplementarnosti Nilsa Bora i kvantni tunel efekat

Slobodan Perović

Odeljenje za filozofiju, Filozofski
Fakultet, BU

Centar za napredne studije, Univerzitet u
Rijeci

Novi Sad – 8. 4. 2016

Princip komplementarnosti

- Talasno-čestična komplementarnost
- Komplementarnost između principa superpozicije i zakona održanja
- Kasnije: komplementarnost makro i mikrofizičkog sveta; komplementarnost biološkog i fizičkog sveta

Interpretacije principa

- J. Bub (1974): princip je opskuran i otvoren prema mnogim i međusobno isključivim interpretacijama, i u tom smislu je srodan Kantovim ili Vitgenštajnovim naoko dubokim, a zapravo, opskurnim, filozofskim stavovima

- Beller (1999) and M. Bitbol (1996): uspeh komplementarnosti nije rezultat uvida koje je omogućio, već iz Borovog neprincipijelnog nametanja svojih metafizičkih preferenci

- E. Scheibe (1973): Borov princip komplementarnosti je stanovište koje se fokusira na komplementarnost fenomena – delova informacije ili formi iskustva koje (navodno) izbegavaju ontološke kontradikcije i dileme klasičnog pristupa fizičkim sistemima

- D. Murdoch (1989): interpretira Borovu komplementarnost kao formu pragmatizma sa dozom realizma u vezi fizičkih sistema

- D. Howard (1979, 2004): primarno fokus na spletenosti eksperimentalnog aparata i posmatrača (tek kasnije formulisan eksplicitno)

Teškoće interpretacije

- Borov težak stil pisanja
- Neopravдано поистовећење Borovog stanovišta (нaročito у раном периоду nastanka p.k) са каснијим развојем идеја
- Ortodoksija Kopenhagena: микс Borovih поенти, Fon Nojamanove subjективистичке интерпретације квантних феномена (дихотомија посматрача и посматраног система) и инструменталистичког stanovišta (Hajzenberga)

- Da li je široko rasprostranjeno slaganje oko Borovog pristupa bilo neopravдано?

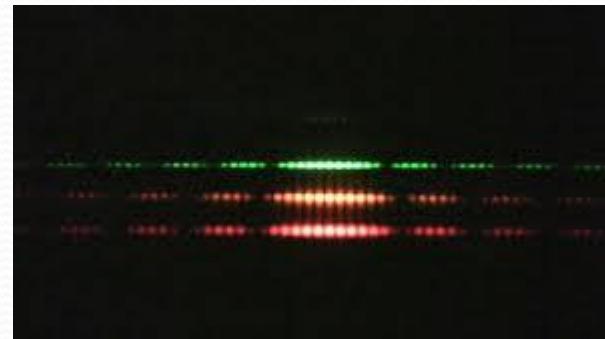
Borov naučni metod

- P.K. nije bio maglovita metafizička stipulacija, nego rezultat Bekonovske metode koja se zasniva na pažljivom uključivanju eksperimentalnih rezultata u provizornu opštu hipotezu
- Odbacuje ishitrene generalizacije koje su u skladu sa prethodno utvrđenim metafizičkim stavovima i izvedene na osnovu parcijalne evidencije

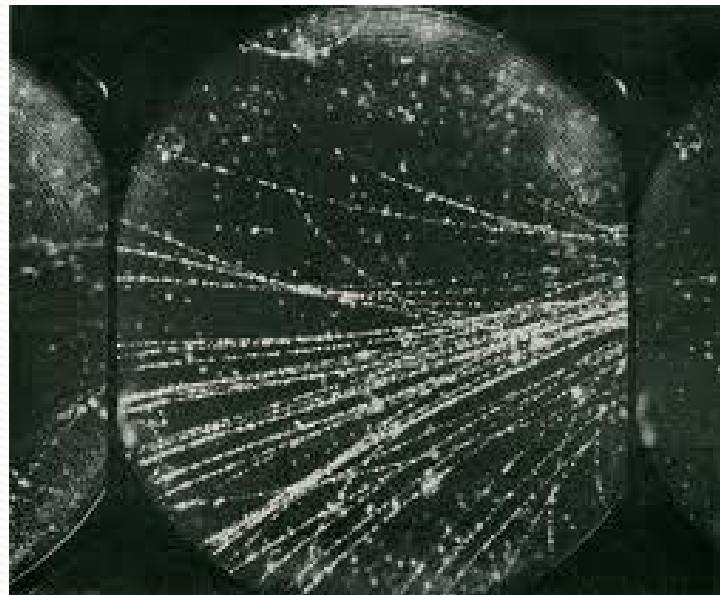
- **Emergence of complementarity and the Baconian roots of Niels Bohr's method.** *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 44(3), 162–173. 2013.
- **Why were matrix mechanics and wave mechanics considered equivalent?.** *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 39(2), 444–461. 2008.
- **Schrödinger's interpretation of quantum mechanics and the relevance of Bohr's experimental critique.** *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 37(2), 275–297. 2006.

- Dva stadijuma eksperimentalnog procesa
- Prvi stadijum ('the works'): Eksperimentalni rezultati su sakupljeni i opisani u okviru svakodnevnog iskustva i njegovih ograničenja

- Tačke na ekranu uočene, i njihova pozicija zabeležena, uz detaljna svojstva eksperimentalnog aparata (energija i priroda snopa i sl.)



- U maglenoj komori, tragovi se snime i njihova svojstva mere i beleže.



- U prvom stadijumu ‘jezik’ koji opisuje lokalne fizičke interakcije i diskretna fizička svojstva
- Pojmovi klasične fizike dostupni u opisu

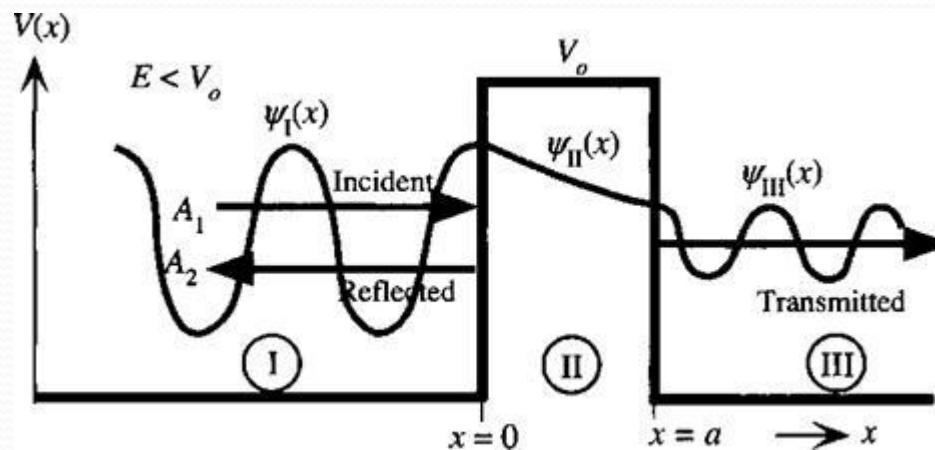
- Drugi, interpretativni (teorijski) stadijum cilja na razjašnjavanje raznolikih rezultata
 - Tragovi na ekranu ili rezultat kontakta sa česticom ili diskretni tragovi kontinulnog talasnog fronta
 - Tragovi u maglenoj komori: tragovi čestice koja je proletela kroz oblak pare , ili specifični jonizujući trag talasnog fronta.

- Rezultati drugog stadijuma mogu biti u koliziji sa našim svakodnevnim iskustvom i percepcijom (npr. pojmovi kvantne teorije u sukobu sa našim ‘intuicijama’)
- Cilj: konstrukcija provizornog master aksioma (hipoteze): Princip komplementarnosti
 - Posredni aksiomi (talasno-mehanički i korpuskularni pristup, talasna i matrična mehanika)

- Da li je P.K. takođe bio od koristi u istraživanju novih neobjašnjenih fenomena?
- Da li može da igra, i da li igra takvu ulogu i danas?

Otkriće kvantnog tunel efekta i P.K.

- Tipična udžbenička predstava:

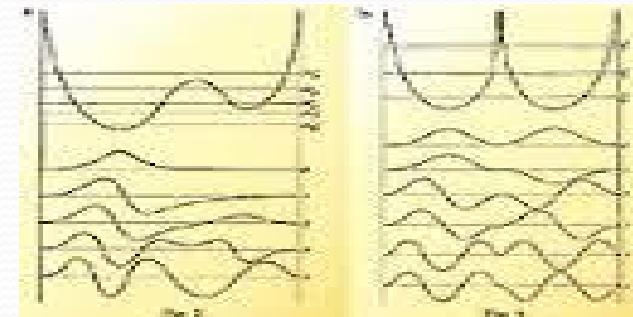


- Transmission of particles through a potential barrier of finite height and width is less easily visualized in the Heisenberg–Bohr formulation of quantum mechanics, which speaks of particles going over the top of the barrier with transient violation of conservation of energy. In both formulations, the language that permeates most descriptions of quantum transmission through a potential barrier has the anachronistic ring of Newtonian mechanics, with its underlying assumption that a particle always moves in a continuous orbit.

Merzbacher, E. “The Early History of Quantum Tunneling.” *Physics Today* 55(8) (2002): 44–50.

- Ako je Mercbaher u pravu onda izgleda da je Hundovo inicijalno oktriće tunel efekta – i još u većoj meri kasniji razvoj – predstavljalo odbacivanje Borovog modela i pojmove, i prihvatanje talasno-mehaničkog okvira kvantnih sistema.
- Da li je P.K. igrao neku ulogu u ranom razumevanju tunel efekta?

F. Hund



Analizira oscilacije elektrona između dva vezana atomska stanja (bound states)

- Parovi atoma kao potencijalne jame (potential wells)
- Distanca između atoma u molekulu je definisana kao širina i dužina barijere koja određuje 'ritam' tunelovanja (nivo zavisi od strukture molekula)

- Hund počinje od Borovog modela atoma i opisuje njegove dinamike
- Proširuje ga koristeći talasno-mehanički opis ponašanja barijere kao ne-stacionarne oscilacije stanja superpozicije dva vezana stanja

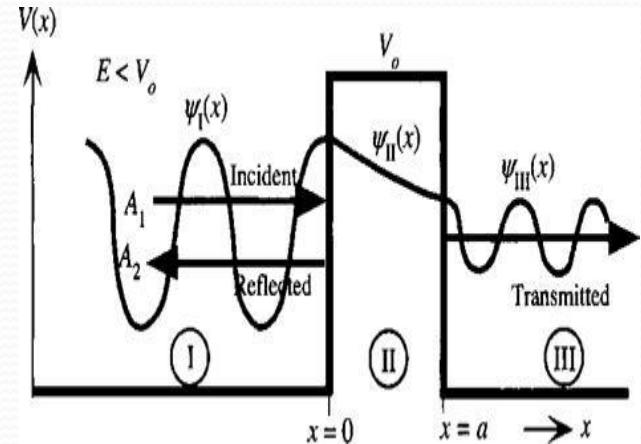
- *Nature* 1925: Borov načelni nacrt tunel efekta u kontekstu u kom je Hund za njega zainteresovan u to vreme
- Referira na Hundov rad na spektrima molekula, koji je lično ohrabrio

- L. Nordheim



- Slobodni elektron i barijera

- Pri vrhu barijere refleksija ili transmisija su moguće, dok klasično samo refleksija moguća
- Površinska barijera metala koja zadržava elektron



Fowler and Nordheim (1928):

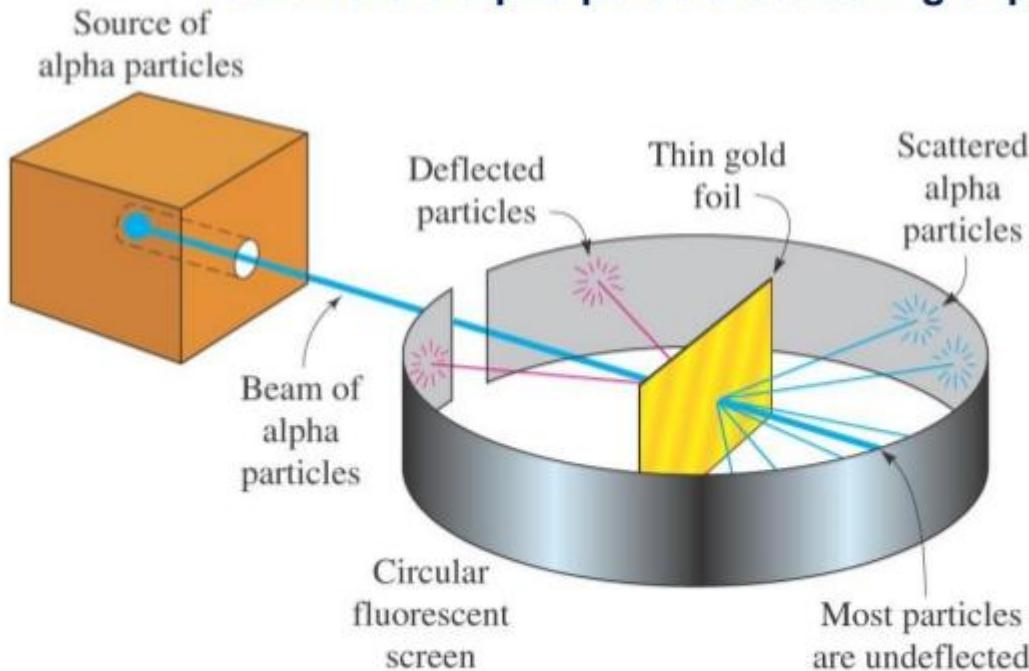
- “the emission begin[s] to be sensible for fields of rather more than $10^{exp}7$ Volts/cm”
- The emission “will depend essentially on the exact form of the potential energy curve”
 - tj. širina i dužina
- “[i]n order to study the emission through the potential energy step ... we have only to solve the wave equation” (ibid. 175)
 - Energija elektrona u spoljašnjem polju specifične forme potencijala

- Problem je postavljen kao kontinualna interakcija elektrona u električnom polju, što čini upotrebu Hajzenberg-Borovog kvazičestičnog okvira suvišnim

- Oba pristupa upotrebljena prilikom objašnjenja α raspada (potreban celovit teorijski okvir – master aksiom)
 - Gamow (1928)
 - Gurney and Condon (1929)

- Raderfordovo pionirsko istraživanje α radijacije

Rutherford's alpha particle scattering experiment.



Rutherford in 1911 performed experiments that shot a stream of alpha particles at a gold foil.

- Kako gusto pakovani nukleus, koji na okupu drže očigledno vrlo jake nuklearne sile može da apsorbuje česticu istog nanelektrisanja sa mnogo manje energije, što rezultira nuklearnom transformacijom
- Takođe je bilo misteriozno kako iste individualne α čestice, sa mnogo manje energije mogu da izlete iz jezgra uprkos jakim silama koje ih drže na okupu

- Analogija između talasne i optičke mehanike:
De Brojjevi talasi (matter-waves) neznatno penetriraju prepreku i stižu do nukleusa

- Nema oštro definisanog stacionarnog stanja zbog ‘curenja’ De Brogljevih talasa (matter waves)
- ‘curenje’ je malo, tako da je sistem najadekvatnije opisan kao *kvazi-stacionarno stanje*
- Materijalni talas – održanje verovantoće

- U slučaju Gamova, a možda još više G-C, načelni pristup sintetiše Nordhajmov kontinualni tretman barijere i Hundov pristup preko vezanih stanja
 - Gamovljeva impresioniranost Borovim pristupom

- “One can think of the particle as executing its classical motion in range I [before the barrier], but as having at each approach to the barrier the probability of escaping to range II [after the barrier] given by expression ... above” (Gurney and Condon 1028 122)

$$\exp \left\{ -(4\pi/h) \int [2\mu(V-W)]^{1/2} dx \right\}$$

- “His [Oppenheimer’s] formula for the mean time required for dissociation of the atom by a steady electric field splits naturally into a factor which is the classical frequency of motion in the Bohr orbit multiplied by an exponential probability factor of the type of expression ... used in this paper”

- “There are two parts to the study of the theory. One is the weaving of the new canvas of purely mathematical relations on which the picture of nature is to be painted. The other is the painting of the picture. Any given set of experimental operations leading to numerical results of an observation of the system, i.e. pointer-readings, will be called an observable”

Condon and Morse (1931)

Principi Borovog pristupa:

- Sinteza teorijskih pristupa koji su naoko protivrečni, u svetlu specifičnih metafizičkih pretpostavki, može da bude od koristi u smislu objašnjenja poznatih i eksperimentalno proučenih fenomena, i predvidjanja novih
- Eksperimentalne granice postavljene na domen teorijskog okvira, tj. na razumevanje fizičkih svojstava

Brzina kojom se odvija tunel-efekat (vreme tunelovanja)

- “[t]here is no way of telling ...what the mean duration in this region [i.e. within the barrier] is for those [particles] that penetrate.”
Condon and Morse (1931, 59)
- “[i]n fact, different operational procedures will lead to conflicting experimental outcomes, so that the time or duration of a process in quantum physics, such as tunneling, is no longer unique, in contrast to the situation in classical physics”
(Chiao 2008, 2)

Pristupi problemu:

1. Fokus na talasu (wave packet) koji prolazi kroz barijeru.
 1. Poređenje ulaznog i izlaznog pika, ili centra mase (centroid) talasnog paketa.
 2. Kašnjenje faze tj grupe (predviđa se i beleži kašnjenje refleksije ili transmisije).
2. "unutrašnji časovnik", prateći stepene slobode unutar sistema barijera-čestica koji indiciraju vreme koje čestica provodi unutar barijere.
3. Praćenje semi-klasičnih trajektorija, uz pomoć Fenjmanovih dijagrama, Bomove mehanike, ili Vignerove distribucije.
4. Fokus na odnosu između gustine verovatnoće (probability density) unutar barijere i gustine upadnog fluksa – tzv. vreme boravka (dwell time)

- Kontroverza slična situaciji kada su se talasna mehanika i matrična mehanika pojavile kao adekvatni pristupi različitim eksperimentalnim rezultatima (posredni aksiomi), i zasnivali se na suprotnim pojmovima, a bili ekvivalentni u odnosu na Borov model atoma

- “the coincidence of the quasi-classical limit of our QM definitions of time durations with analogous well-known expressions of classical mechanics”
- the Feynman approach of studying the time-evolution of collisions following semi-classical trajectories and Schrödinger’s purely wave-mechanical approach both “lead to the same results”

Olkovsky et al. (2004)

- Komplementarnost kao okvirni teorijski pristup i njegove instance u savremenoj fizici nisu rešenje važnog problema vremena tunelovanja i dilema do kojih taj problem dovodi, ali su koristan metodološki vodič.