



HELSINKI  
INSTITUTE OF  
PHYSICS



# Fysiikkaa runoilijoille

## Osa 4

# Kvanttimekaniikka

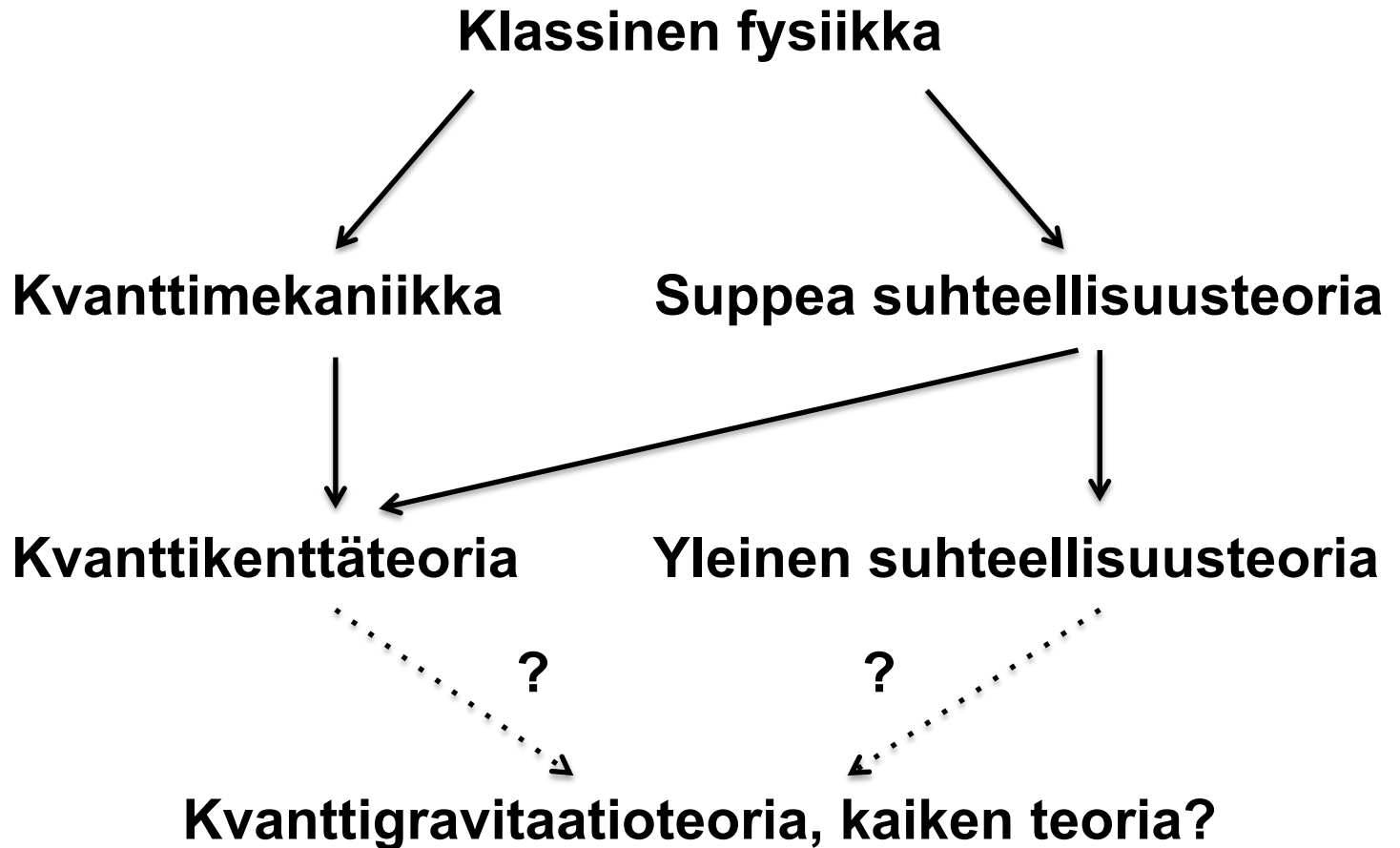
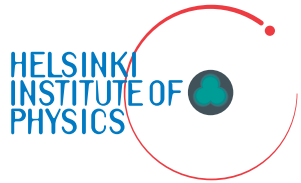
*Syksy Räsänen*

Helsingin yliopisto

fysiikan osasto ja fysiikan tutkimuslaitos

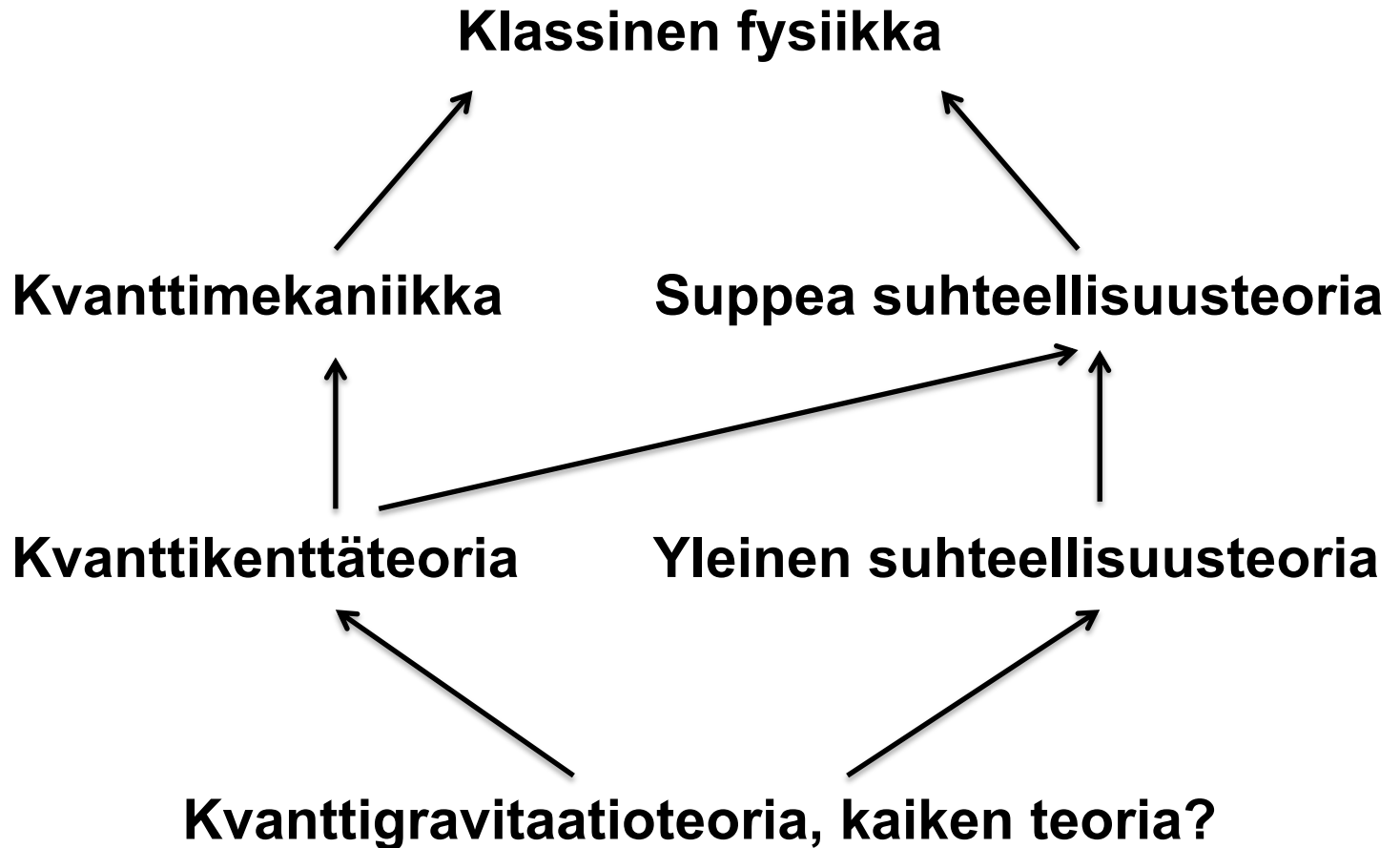


# Modernin fysiikan sukupuu





# Fysiikan teorioiden rajatapauksia





# Teoria aineesta

---



- Yleinen suhteellisuusteoria on perustavanlaatuinen teoria aika-avaruudesta.
- Yleinen ST kertoo, miten avaruus kehittyy ajassa, jos se sisältää tietynlaista ainetta.
  - Yleinen ST ei kerro, millaista aine on.
- Kvanttimekaniikka (ja kvanttikenttäteoria) on teoria aineesta.
- Se on myös paljastanut asioita olemisesta ja tapahtumisesta.
  - Vrt. yleinen ST: gravitaatiolain etsiminen johti oivalluksiin aika-avaruudesta.



# Kaksi vallankumousta

---

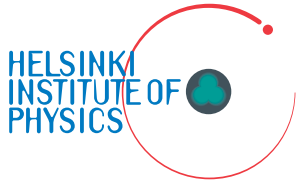


- 1800-luvun lopulla klassinen fysiikka oli kriisissä, koska se oli ristiriidassa sisäisesti ja havaintojen kanssa.
- Suhteellisuusteoria ja kvanttifysiikka mullistivat tahoillaan käsityksemme todellisuudesta.
- Kvanttimekaniikka ja kvanttikenttäteoria kuvaavat kaikkia mikromaailman ilmiöitä.
  - Alkeishiukkaset, atomit, molekyylit, kiinteä aine, ...



# Kvanttivuosisata

---



- Kvanttimekaniikka (ja kvanttikenttäteoria) on 1900-luvun määrittänyt fysiikan teoria.
- Toisin kuin suhteellisuusteorian tapauksessa, käytännön sovellusten merkitys on valtava: esim. kaikki elektroniikka ja nykyaikainen kemia pohjaa kvanttifysiikkaan.
- Kvanttifysiikka on nykYTEknologian perusta, ja sen vaikutusta on vaikea yliarvioida.



# Mitä kvanttimekaniikka muuttaa ja mitä ei



- Kvanttimekaniikka on
  - epärelativistinen (kvanttikenttäteoria ei ole)
  - epädeterministinen
  - kausaalinen

- Kvanttimekaniikka

kumoaa klassisen käsityksen

- determinismistä
- aineesta
- tapahtumisesta ja olemisesta

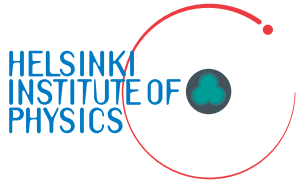
ei muuta kuvaa

- ajasta ja avaruudesta
- kausaliteetista
- gravitaatiosta



# Syyt ja seuraukset

---



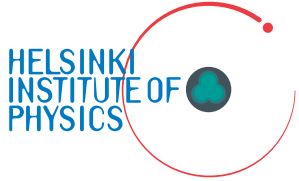
- **Kausaliteetti:** syy on aina ennen seurausta, tai vähintään samaan aikaan. ("Ei seurausta ennen syytä.")
- **Determinismi:** kaikilla tapahtumilla on syy. ("Ei seurausta ilman syytä.")





# Pala kerrallaan

---



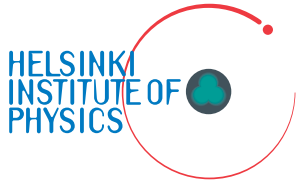
- Suhteellisuusteoria löydettiin enimmäkseen matemaattisten pohdintojen pohjalta.
  - Havainnoilla oli toissijainen rooli, ja suppea sekä yleinen ST tulivat valmiiksi (melkein) kerralla.
- Kvanttifysiikka on löydetty pala palalta, havaintojen ja teorian vuorovaikutuksessa.
- Suppea suhteellisuusteoria löydettiin klassisen mekaniikan ja sähkömagnetismin ristiriitojen kautta.
- Niillä oli tärkeä osa myös kvanttimekaniikan löytymisessä.



# Pieni aurinkokunta

$$\vec{F} = -G_N \frac{m_p M_p}{r^2} \vec{e}$$

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e}$$



- Coulombin laki on samanlainen kuin Newtonin gravitaatiolaki.
- Tämän takia elektroni voi kiertää ympyrää ytimen ympärillä.
- Vuonna 1911 Ernest Rutherford (1871-1937) sai selville, että atomeilla on positiivisesti varattu ydin, jota elektronit kiertävät.
- Yksinkertaisin atomi on vetyatomi: ytimenä on yksi protoni, jota kiertää yksi elektroni.



# Atomien ongelma

---



- Klassisen sähkömagnetismin mukaan kiihtyvässä liikkeessä oleva hiukkanen lähettää sähkömagneettisia aaltoja.
- Sähkömagneettisilla aalloilla on energiaa, joten elektroni menettää energiaa ja putoaa kohti ydintä.
- Atomi tuhoutuu sekunnin murto-osassa, ja säteilee äärettömästi energiaa.
- Klassinen mekaniikka + sähkömagnetismi vievät johtopäätökseen, että atomeita ei voi olla olemassa.



# Bohrin atomimalli

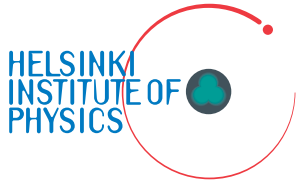


- Niels Bohr (1885-1962) esitti vuonna 1913 ratkaisun: vain tietyt kokonaisluvulla numeroidut ympyräradat ovat sallittuja, eli radat ovat **kvantittuneita**.
  - Kuten suppeassa ST:ssä, muutetaan klassista mekaniikkaa.
- Kun elektroni siirtyy alemmalle radalle, se säteilee energiaa.
  - Jostain syystä se ei säteile ympyräradalla ollessaan.
- On alin mahdollinen rata, joten atomit ovat stabiileja.
- Malli selittää myös sen, että atomit lähettävät valoa vain tietyillä aallonpituuksilla, eli **fotonien** energia on kvantittunut.



# Mallista teoriaan

---

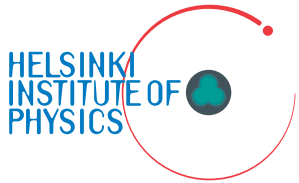


- Bohrin malli oli menestys: se selitti tunnettuja havaintoja ja ennusti oikein uusia.
- Se oli kuitenkin rajoitettu. Malli oletti kvantittumisen, ja käsitteli vain atomien ratoja ja fotoneita.
  - Malli, ei teoria: vrt. Keplerin lait.
- Kvanttimekaniikan teoria löydettiin 1925. Keskeisiä löytäjiä olivat Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Max Born ja Pascual Jordan.



# Kvanttimekaniikan aine ja lait

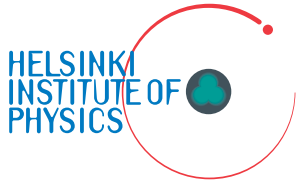
---



- Kvanttimekaniikka ei päde vain atomeille, vaan kaikelle aineelle.
  - Yhtä kattava teoria kuin klassinen mekaniikka.
- Kvanttimekaniikassa aine koostuu hiukkasista, kuten klassisessa mekaniikassa, mutta sen kuva hiukkasista on erilainen.



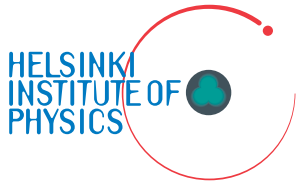
# Jyväsestä aaltofunktioon



- Klassisessa mekaniikassa hiukkasta kuvataan jyväsellä, jolla on aina tietty paikka ja nopeus.
  - Kun kerrotaan, miten hiukkaset vuorovaikuttavat, Newtonin toinen laki kertoo, miten jyvänen liikkuu.
- Kvanttimekaniikassa hiukkasta kuvataan **aaltofunktiolla**.
  - Kun kerrotaan, miten hiukkaset vuorovaikuttavat, **Schrödingerin yhtälö** kertoo, miten aaltofunktio kehittyy.
  - Voima ei ole perustavanlaatuinen käsite.



# Mahdollinen ja mahdoton

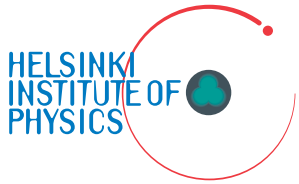


- Kvanttimekaniikka on kvanttiteoria hiukkasista.
- Kvanttimekaniikan mukaan hiukkasta kuvaa aaltofunktio.
- Aaltofunktio kertoo:
  - Mitkä havainnot ovat mahdollisia (esim. millaista valoa atomi voi lähettää).
  - Mitkä ovat mahdollisten havaintojen todennäköisyydet.
- Siinä kaikki.





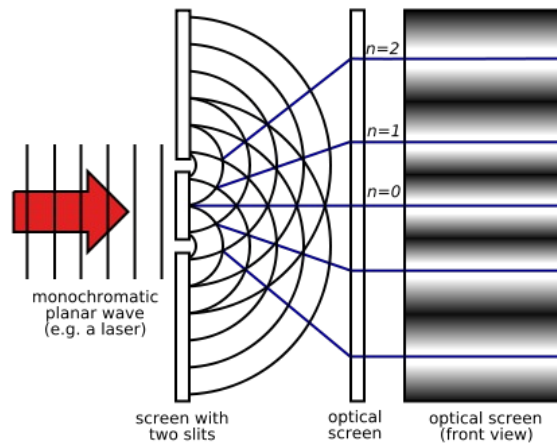
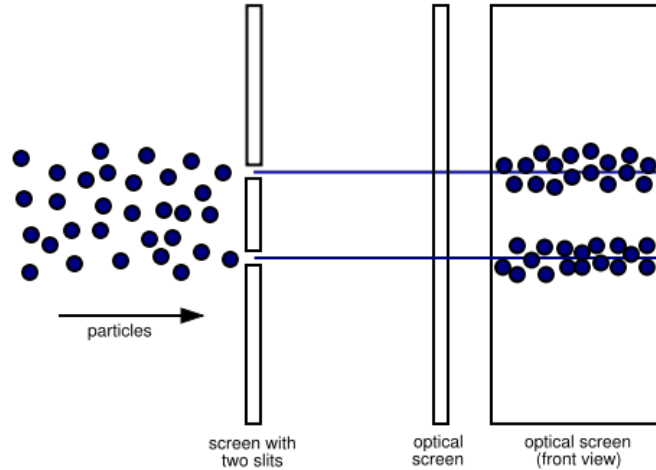
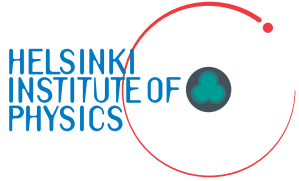
# Olemisen rajat, ei tiedon rajat



- Esimerkiksi aaltofunktio kertoo millä todennäköisyydellä hiukkanen löytyy mistäkin paikasta (ja millä todennäköisyydellä siltä mitataan tietty nopeus).
- Kyse ei ole siitä, että hiukkasesta ei tiedetä enempää, vaan siitä, että *ei ole enempää tiedettävää*.
- Hiukkasen paikka ja nopeus eivät ole **määrättyjä (definite)**.
- Mitä vähemmän epämääräinen hiukkasen paikka on, sitä epämääräisempi sen nopeus on. Tämä on **Heisenbergin epämääräisyysperiaatteen** ilmentymä.



# Kaksoisrakokoe



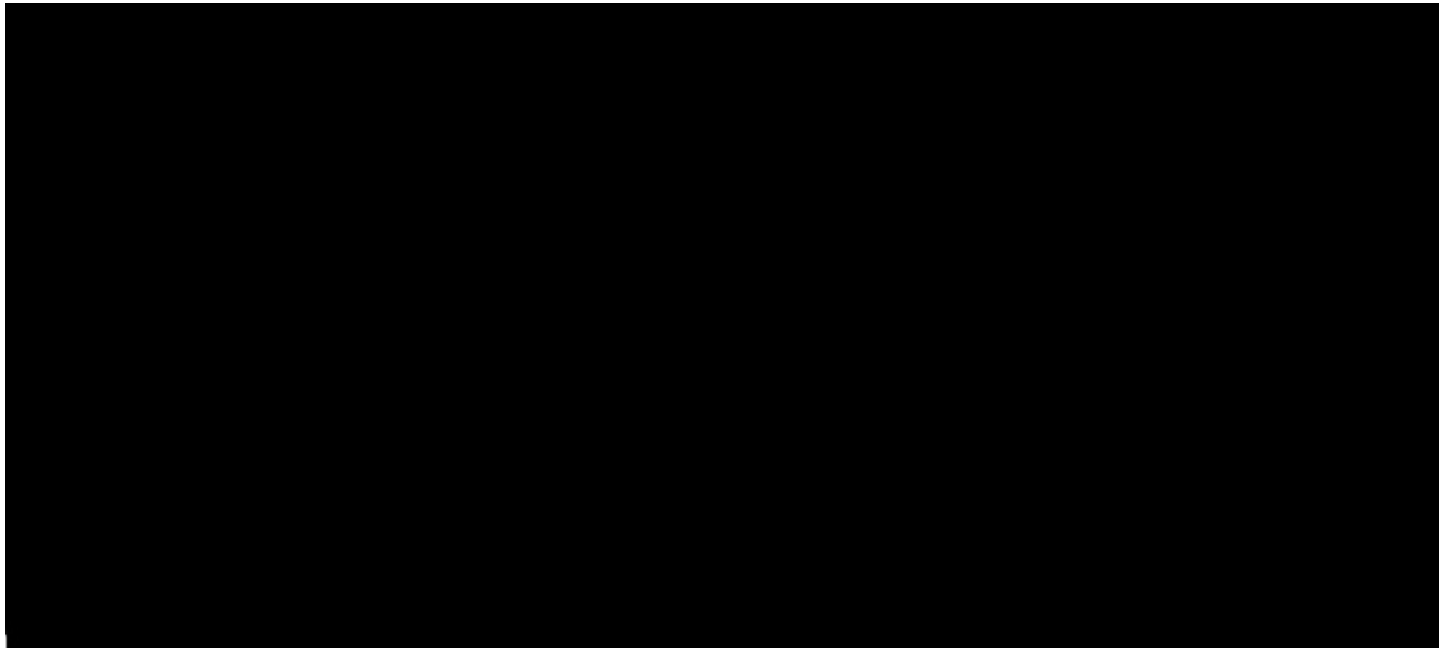
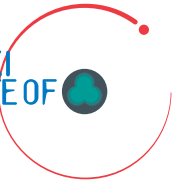
- Interferenssikuvion valolle havaitsi Thomas Young (1773-1829) vuonna 1803.
- Interferenssikuvion yksittäisille elektroneille havaitsi Claus Jönsson (1930-) vuonna 1961.



# Interferenssi elektroni kerrallaan

---

HELSINKI  
INSTITUTE OF  
PHYSICS





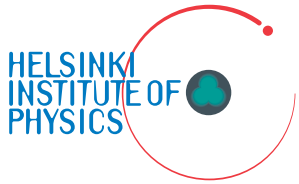
# Olla ja ei olla



- Seuraavat lausunnot elektronista ovat väärin:
  - Se menee ylemmästä aukosta.
  - Se menee alemmasta aukosta.
  - Se menee kummastakin aukosta.
  - Se ei mene kummastakaan aukosta.
- Klassinen käsitys aineesta hiukkasina, jolla on määrätty paikka ja nopeus, on riittämätön.
  - Todellisuus on **epämääräinen**.
- Ei voi ennustaa, minne hiukkanen osuu, vain todennäköisyyden sille.
  - Todellisuus on **epädeterministinen**.



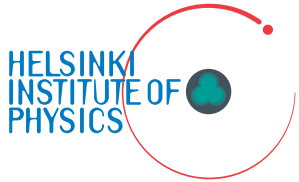
# Todennäköisyysaalto



- Interferenssikuvio syntyy, koska aaltofunktio interferoi itsensä kanssa (kuten vesiaalto).
- Jos havaitaan, kummasta aukosta elektroni menee, interferenssikuvio katoaa.
- Tällöin todennäköisyys sille, että se olisi mennyt toisesta aukosta on 0%, eli siitä ei mene todennäköisyysaaltoa.
- Aaltofunktion käsitteen avulla ymmärrettynä kaksoisrakokoikeessa ei ole mitään outoa.



# Hiukkasen kaksi merkitystä



- Sanalla **hiukkanen** on kvanttimekaniikassa kaksi eri merkitystä.
- Ensinnäkin se tarkoittaa klassisen mekaniikan mallia aineen osasille: pistemäistä, jatkuvasti olemassa olevaa jyväästä.
- Toisekseen se tarkoittaa kvanttimekaniikan kuvaamaa perustavanlaatuaista olentoa, kuten fonia tai elektronia.
- Kvanttikenttäteoria selventää hiukkasten luonnetta.



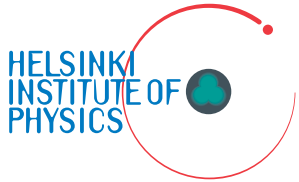
# Aaltohiukkasdualismi



- Elektronin käyttäytymistä kuvaa joissain tilanteissa aaltomalli, toisissa jyväsmodellit.
- Tätä kutsutaan joskus **aaltohiukkasdualismiksi**.
- Elektroni ei ole aalto eikä jyvänen, mutta molemmat mallit kuvaavat oikein joitakin sen piirteitä.
  - Malli ei ole sama asia kuin todellisuus. (Pätevyysalue.)
- Kaikissa tilanteissa elektronia kuvaa aaltofunktio.



# Ei ratoja, ei nopeuksia

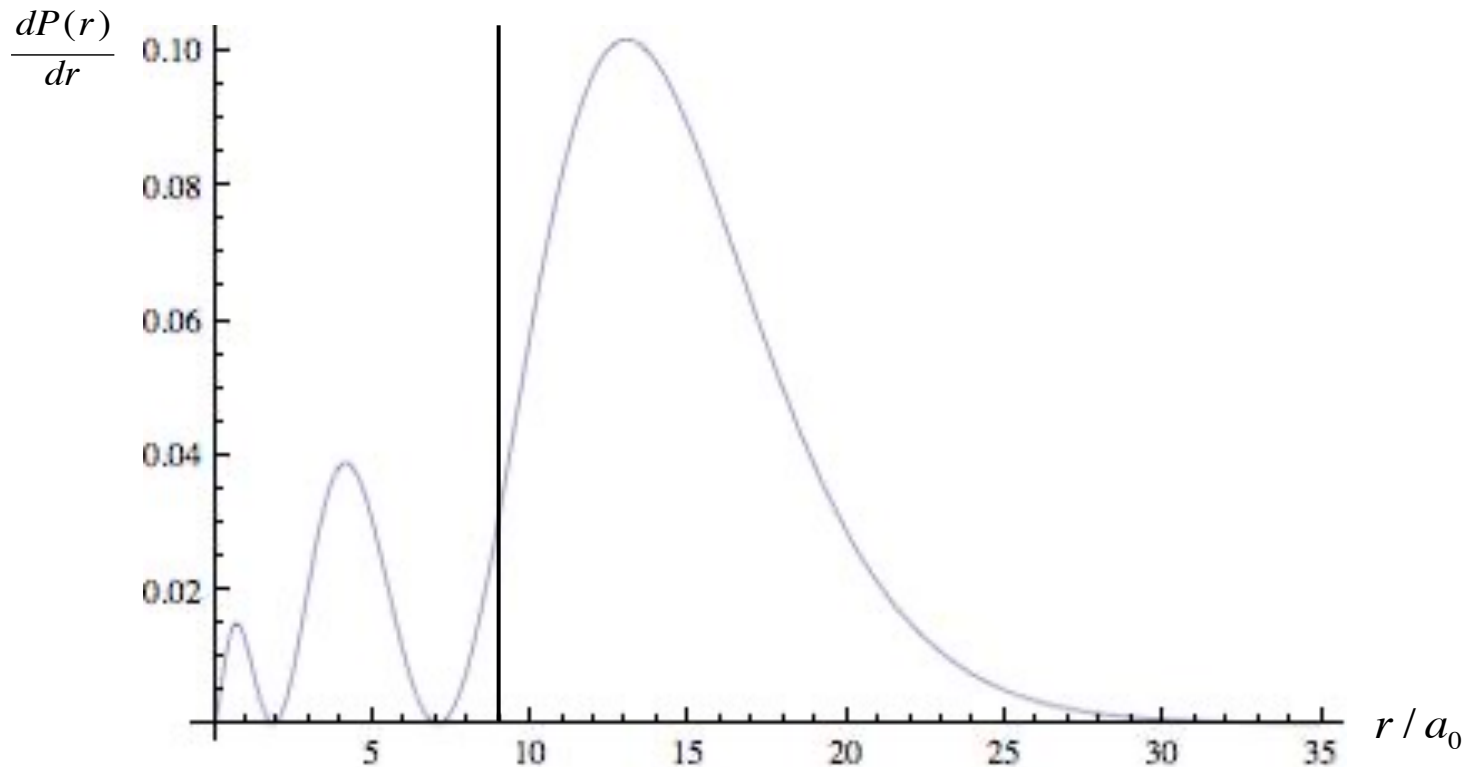
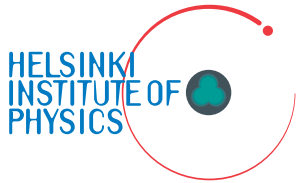


- Bohr teki atomista stabiilin olettamalla, että elektronit liikkuvat vain tietyillä radoilla.
- Bohr oli väärässä.
- Elektroneilla ei ole ratoja. Niillä ei ole määrättyä paikkaa ellei niitä havaita, eli ne eivät liiku avaruudessa. (Ne eivät myöskään pysy paikallaan.)
- Bohrin malli olisi ratojen suhteen suunnilleen oikein, jos todennäköisyys löytää elektroni olisi suuri Bohrin mallin radan kohdalla ja pieni muualla.





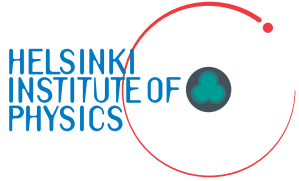
# Vetyatomin todennäköisyysjakauma tilassa $n=3$



Bohrin atomimallissa elektroni on kohdassa  $r = 9 a_0$ .



# Kvanttimekaaninen atomimalli



- Vaikka elektronien sijainti on Bohrin mallissa väärin, niiden energiat ovat (likipitäen) oikein.
- Kvanttimekaniikan mukaan vain tietynlaiset varattua hiukkasta kuvaavat aaltofunktiot säteilevät. Atomissa elektronin aaltofunktio on seisova aalto, joka ei säteile.
- Vetyatomin tarkemmassa kuvauksessa otetaan huomioon protonin äärellinen koko, elektronin ja protonin tarkempi vuorovaikutus, jne.. Kaikki täsmää.
- Kvanttimekaniikan matemaattinen rakenne on selkeä.

# Periodic Table of the Elements

© www.elementsdatabase.com

- hydrogen
- alkali metals
- alkali earth metals
- transition metals
- poor metals
- nonmetals
- noble gases
- rare earth metals

1 H																	2 He						
3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr						
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe						
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Unq	105 Unp	106 Unh	107 Uns	108 Uno	109 Une	110 Unn														

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



# Maailma kellokoneistona: oleminen ja tapahtuminen

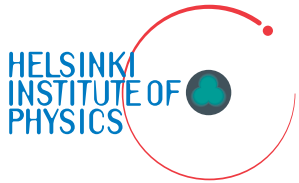
---



- Klassisen fysiikan mukaan aine koostuu hiukkasista, joilla on aina tietty paikka ja nopeus: maailman tila on määrätty. (Oleminen.)
- Klassisen fysiikan mukaan hiukkasten tulevaisuus on ennustettavissa niiden paikoista ja nopeuksista: maailma on deterministinen. (Ei ole erityistä tapahtumista.)
- Kvanttimekaniikassa molemmat asiat ovat toisin.



# Aaltofunktion romahdus

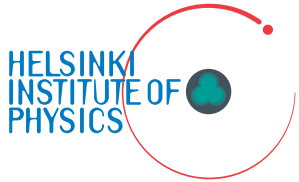


- Kun havaitsemme elektronin, se on havaintopisteessä havaintohetkellä.
- Havaittaessa aaltofunktio **romahtaa (collapse)**: todennäköisyys on yhdessä pisteessä 100% ja muualla 0%.
- Koska havainnon tulos on sattumanvarainen, menneisyys ei määritä tulevaisuutta.
- Vastaavasti nykytilasta ei voi päätellä menneisyyttä.
- Kvanttimekaniikassa on **tapahtuminen**, jossa epämääräisyys muuttuu määrätyksi.



# Mitä ovat hiukkaset?

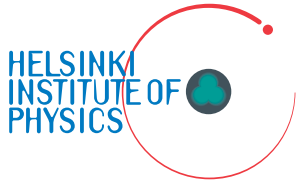
---



- Kvanttimekaniikka määrittelee hiukkasen vain sen kautta, mitä havaitaan.
- Isojen kappaleiden paikan todennäköisyys on suurin sillä radalla, mikä niillä klassisessa mekaniikassa olisi. Niinpä näyttää siltä kuin ne liikkuisivat klassisen mekaniikan radoilla.
- Mikä on todellisuus havainnon taustalla?



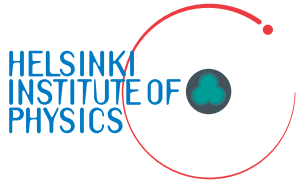
# Schrödingerin kissa



- Kaikki aine rakentuu hiukkasista, joten kvanttimekaniikka kuvaa myös meitä ja muita arkisen mittakaavan kappaleita.
- Vuonna 1935 Erwin Schrödinger (1887-1961) havainnollisti tätä ajatuskokeella kissasta.
- Hänen tarkoituksenaan oli osoittaa, että kvanttimekaniikka on puutteellinen teoria, koska se johtaa kummallisiin tuloksiin.
- Nykyään hänen kissaansa pidetään osoituksena siitä, että todellisuus on kummallinen.



# Elossa ja kuollut

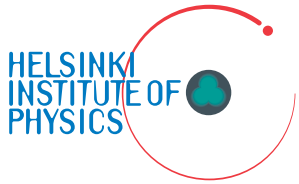


- Suljetaan kissa laatikkoon myrkkykapselin ja radioaktiivisen atomin kanssa.
  - Jos atomi hajoaa, kapseli rikkoutuu ja kissa kuolee. Jos se ei hajoa, kissa elää.
- Jos emme havaitse laatikon sisään, atomin tila on epämääräinen. Siksi kissankin tila on epämääräinen.
- Ennen kuin laatikko avataan ja tehdään havainto, kissa ei ole elossa eikä kuollut, sillä on vain todennäköisyys olla elossa tai kuollut. (Tarkemmin sanottuna se on sekoitus elävää ja kuollutta.)





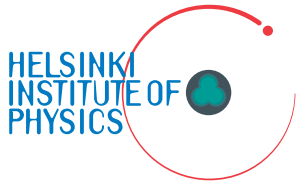
# Kaksi kysymystä kissasta



- Schrödingerin kissa herättää ainakin kaksi kysymystä.
- Ensinnäkin: onko kissa epämääräisessä tilassa? (Onko kyse todella epämääräisyydestä eikä epätietoisuudesta?)
- Toisekseen: miksei tällaista tilannetta nähdä makroskooppisille kappaleille (toisin kuin elektroneille)?



# Epämääräisyyden todellisuus



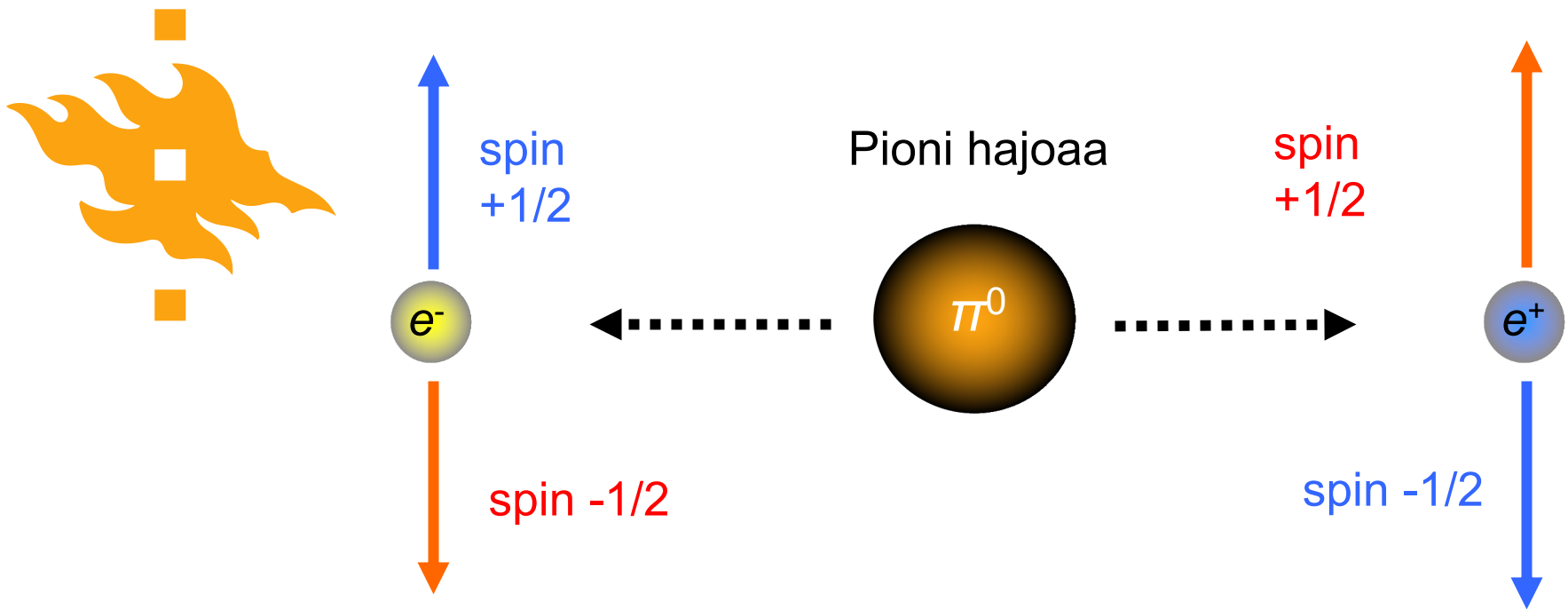
- Kysymys yksi: onko kissa epämääräisessä tilassa?
- Kaksoisrakokoe osoittaa, että epämääräiset tilat ovat todellisia. (Toteutettu 2 000 atomin molekyyille.)
- Epämääräisyys ja epätietoisuus voidaan myös erottaa toisistaan kokeellisesti tarkastelemalla **lomittumista (entanglement)**.
- Jos kahden hiukkasen ominaisuudet riippuvat toisistaan ja ovat epämääräiset, niin yhden mittaaminen muuttaa toistakin.



# Lomittuminen



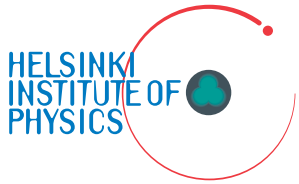
- Yksinkertaisen esimerkin lomittumisesta tarjoaa ominaisuus nimeltä **spin**.
- Spin on hiukkasten kvanttimekaaninen ominaisuus, jolla ei ole vastinetta klassisessa fysiikassa.
- Elektronilla ja positronilla voi olla spin  $+1/2$  tai  $-1/2$ . Pionilla on spin 0.
- Spinien summa säilyy. Pionin hajoamisesta syntyvien elektronin ja positronin spinit ovat vastakkaiset.



- Kun mitataan elektronin spin, se romahtaa arvoon  $+1/2$  tai  $-1/2$ . Positronin spin määräytyy samalla hetkellä.
- Hiukkaset ovat yhteydessä rajattoman pitkien matkojen yli.
- Välittyykö informaatiota valoa nopeammin? (Einstein-Podolsky-Rosen-paradoksi)



# EPR-paradoksittomuus

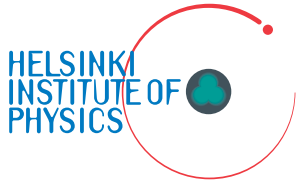


- EPR-paradoksin ratkaisu: romahdus ei välitä informaatiota.
- Kun elektronin spiniksi on mitattu  $+1/2$ , positronin spinin mittaaja saa 100% todennäköisyydellä tuloksen  $-1/2$ . Mutta hän ei tiedä sitä, ellei elektronin mitannut kerro!
- On sattumanvaraista, kumman tuloksen saa, joten mittaamalla ei voi välittää informaatiota. (Epädeterminismi takaa kausaliteetin säilymisen epämääräisyydestä huolimatta.)



# Yhteyksiä ilman rajoja

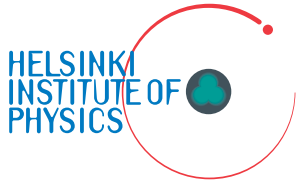
---



- Kvanttimekaniikka ei ole **lokaali** teoria.
- Lokaalissa teoriassa vuorovaikutukset ovat paikallisia ja muutokset etenevät korkeintaan valonnopeudella.
- Kvanttimekaniikka on **kausaallinen** teoria.
- Kausaalisessa teoriassa informaatiota ei voi välittää ajassa taaksepäin, eikä syy voi olla seurauksen jälkeen.



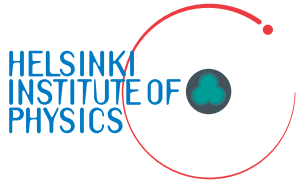
# Onko todellisuus aavemainen?



- Einstein kutsui lomittumista nimellä **aavemainen kaukovaikutus (spooky action at a distance)**.
- Ehkä kvanttimekaniikka on väärin, ja elektronin/positronin spin määräytyy pionin hajoamishetkellä? Tällöin kyse olisi epätietoisuudesta, ei epämääräisyydestä.



# Voiko arkijärjen pelastaa?

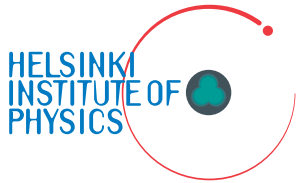


- **Piilomuuttujateorioiden** idea: kvanttimekaniikan taustalla on deterministinen, määrätty ja lokaali teoria.
- Kvanttifysiikka olisi approksimaatio, ja päätelmä todellisuuden epämääräisestä luonteesta olisi sen pätevyysalueen ulkopuolella.
  - Vrt. klassisen mekaniikan determinismi ja ajan absoluuttisuus.
- Kaukovaikutus, epämääräisyys, epädeterminismi olisivat vain näennäisiä. Todennäköisyyskuvaus johtuisi tietämättömyydestä.





# Piilomuuttujien testaaminen



- Yllättävää kyllä, piilomuuttujia voidaan kokeellisesti testata, mittaamalla eri suunnissa olevien spinien **korrelaatioita**.
- Jos todellisuutta kuvaa lokaali ja määrätty teoria, niin spinien korrelaatiot ovat aina erilaisia kuin kvanttimekaniikassa, jossa ne ovat epämääräisiä.
- Tämän ilmaisee täsmällisesti **Bellin epäyhtälö**.



# Bellin epäyhtälö



- John Bell (1928-1990) esitti vuonna 1964 epäyhtälön, jonka kaikki määrätyt teoriat toteuttavat. Se on seuraavanlainen.
  - kurssia “Fysiikkaa runoilijoille” seuraavien ja Rakkautta & Anarkiaa –festivaalilla käyneiden opiskelijoiden lukumäärä  
 $\leq$  kurssia “Fysiikkaa runoilijoille” seuraavien opiskelijoiden ja ei-opiskelijoiden lukumäärä.
- Kvanttimekaniikka rikkoo Bellin epäyhtälöä, koska voi olla sekoituksessa, missä on opiskelija ja ei ole opiskelija.



# Havaittu epämääräisyys



- Bellin epäyhtälöä testattiin ensimmäisen kerran kokeellisesti vuonna 1972, fotonien polarisaatiolla. (Nobelin palkinto 2022.)
- Havainnot rikkovat Bellin epäyhtälöä ja noudattavat kvanttimekaniikan ennustuksia.
- Kvanttimekaniikan mukaan todellisuus on epämääräinen.
- Jos maailma olisi määrätty, sen pitäisi olla erittäin epälokaali.
- Outoudelta ei voi välttyä.



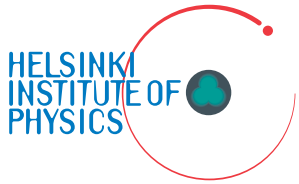
# Takaisin romahdukseen



- Maailma on siis epämääräinen (tai epälokaali). Miksei sellaista nähdä kissoilla?
- Miksi makroskooppisessa maailmassa asiat näyttävät määräytyiltä? Miten niiden tila määräytyy?
- **Kööpenhaminan tulkinta:** aaltofunktio romahtaa mitattaessa.
  - Tila on epämääräinen kunnes sitä mitataan, ja sen jälkeen.



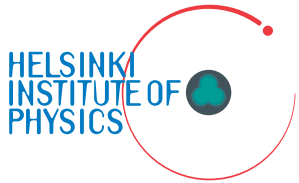
# Kööpenhaminan tulkinta



- Kööpenhaminan tulkinta on toimiva resepti käytännön sovellukseen, mutta lähempi tarkastelu paljastaa ongelmia.
  - Resepti asettaa mittaajan erikoisasemaan. Kuka kelpaa mittaajaksi? (Mitä jos laitamme Schrödingerin laatikkoon ja jätämme kissan ulos?)
  - Kuka mittaa mittaajia? (Tulkinta olettaa klassisen kuvauksen mittaajasta.)
  - Kosmologia: eikö maailmankaikkeuden tila ole määrätty ennen kuin joku kehittyi sitä mittaamaan?



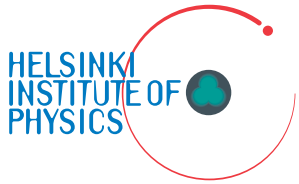
# Kvanttimekaniikan keittokirja



- Ehkä pitäisi enemmän puhua Kööpenhaminan käyttöohjeesta tai reseptistä.
- Kööpenhaminan tulkinta kertoo, miten kvanttimekaniikan matemaattinen teoria yhdistetään havaintoihin, mutta ei selitä yhteyttä.
  - Se on ylimääräinen lisä teoriaan.
- Se paikkaa sitä, että ”havaitsemisen” kuvaaminen kvanttimekaniikassa on monimutkaista.
  - Se, mikä on ilmeistä klassisessa fysiikassa, osoittautuu vaikeimmaksi asiaksi kvanttifysiikassa.



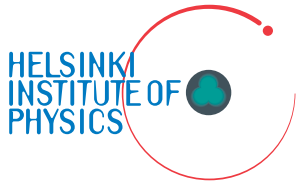
# Dekoherenssi



- **Dekoherenssi** ratkaisee osan kissaongelmaa.
- Vuorovaikutus lomittaa kissan ja muun ja maailman erottamattomaksi kokonaisuudeksi.
  - Elävä kissa esim. hengittää, joten laatikosta tulee hiilidioksidia.
- Yksinkertaisempi tapaus: molekyyli voi siirtyä eri energiatilaan ja lähettää fotonin kaksoisrakokokeessa.
- **Systeemi ja ulkomaailma kytkeytyvät yhdeksi kokonaisuudeksi, joten niiden tila määräytyy samaan aikaan.**



# Yhdessä määrättyjä

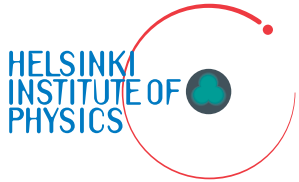


- Ei-eristetyt systeemit näyttävät aina määrättyiltä.
- Ilman dekoherenssia:
  - Tilamme on se, että teemme havainnon kissasta.
  - Kissan tila on sekoitus elävää ja kuollutta.
- Dekoherenssin kanssa meidän ja kissan tila määrättyvät yhdessä. Niinpä mahdolliset tilat ovat seuraavat:
  - Tilamme on se, että teemme havainnon JA kissan tila on elossa.
  - Tilamme on se, että teemme havainnon JA kissan tila on kuollut.





# Arjen ongelma

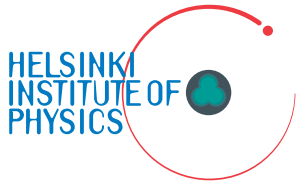


- Dekoherenssi ei kerro, miten systeemin tilasta tulee määrätty (romahdus), eikä mikä vaihtoehdoista nähdään (epädeterminismi).
- Miten tila romahtaa? Ja miksi emme koe epämääräisiä tiloja yhdessä kissan kanssa? Miksi maailma näyttää määrättyltä?
- Lyhyesti sanottuna: miksi klassinen fysiikka on hyvä approksimaatio? Miksi arki on yksinkertaista?
  - Kvanttimekaniikan rakenne on yksinkertainen, mutta yhteyden löytäminen klassiseen fysiikkaan on vaikeaa.
- Tähän on esitetty kolme selitystä.
  - Joskus näistäkin puhutaan ”tulkintoina”.



# Vaihtoehto 1: epämääräisyyttä ei ole

---

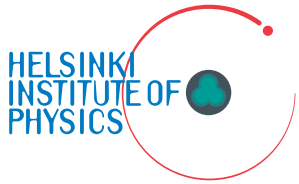


- Ehkä kvanttimekaniikan takana on deterministinen ja määrätty (mutta epälokaali) piilomuuttujateoria, jossa kaikki on määrättyä koko ajan.
  - Vaatii viestintää yli valonnopeudella.
- Tällöin päätelmä, että maailma on epämääräinen ja epädeterministinen olisi kvanttimekaniikan pätevyysalueen tuolla puolen.
- Yritykset tällaisiksi teorioiksi eivät ole olleet järin onnistuneita.
  - Yhteensovittaminen suhteellisuusteorian kanssa hankalaa.



# Vaihtoehto 2: laki romahdukselle

---

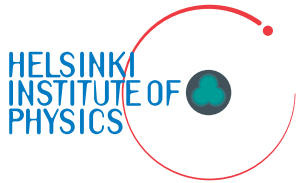


- Ehkä kvanttimekaniikan takana on teoria, jonka mukaan aaltofunktio romahtaa tietyissä olosuhteissa, havainnoista riippumatta.
- Esimerkiksi aaltofunktio voisi romahtaa, kun sen kuvaama systeemi on tarpeeksi iso.
- Yritykset tällaisiksi teorioiksi eivät ole olleet järin onnistuneita.



# Vaihtoehto 3: romahdusta ei ole

---

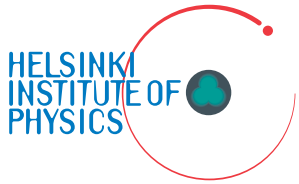


- Ehkä kvanttifysiikan takana ei ole mitään perustavanlaatuisempaa, eikä aaltofunktio koskaan romahda.
- Selitettävänä ei ole, miksi aaltofunktio romahtaa, vaan miksi meistä näyttää siltä kuin se romahtaisi.
- Entä jos maailman tila ei koskaan ole määrätty?
- Hugh Everett (1930-1982) esitti vuonna 1957, että aaltofunktio ei romahda. Vaihtoehtojen joukosta ei valikoidu yhtä, vaan kaikki vaihtoehdot toteutuvat.



## Vaihtoehto 3: romahdusta ei ole

---

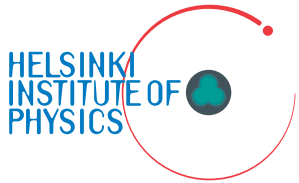


- Everettin idea tunnetaan **monimaailmatulkintana**. Siitä on kehitetty useita versioita.
- Sen mukaan kaksoisrakokokeessa elektroni osuu kaikkiin mahdollisiin kohtiin, ja me näemme sen osumassa kaikkiin mahdollisiin kohtiin, mutta kokemuksemme on rajoittunut vain yhteen vaihtoehtoon.
- Yhteys tietoisuuteen?



# Vaihtoehto 3: romahdusta ei ole

---

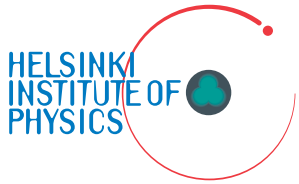


- Kuten kahden muun vaihtoehdon kohdalla, puheet eivät riitä.
- Pitää kuvata matemaattisesti, miten meidän kaltaisemme systeemit vuorovaikuttavat muiden systeemien kanssa siten, että vaikutelma määrätystä maailmasta muodostuu.
- Ts. pitää käsitellä tarkasti sitä, mitä ”havaitseminen” tarkoittaa. (Siksi termi ”tulkinta” on harhaanjohtava.)
- Yritykset tähän eivät ole olleet täysin onnistuneita.



# Todellisuus mielikuvituksen tuolla puolen

---



- Kvanttimekaniikka on mullistanut käsityksen todellisuudesta tavalla, jota ei olisi voinut kuvitella.
- Ei ymmärretä, miksi makroskooppinen maailma näyttää määrättyltä: arjen yksinkertaisuus on ratkaisematon ongelma.
- Kvanttifysiikka on parhaiten testattu ja teknologisesti hedelmällisin tieteellinen teoria.
- Elektroniikan, kemian jne. sosiaaliset vaikutukset ovat mittaamattomia.
- Seuraava askel on kvanttikenttäteoria, joka on vielä tarkempi, mutta ei vähemmän outo.