

Moderni fysiikka – tutkijoiden Rubikin kuutio?

Olli Hyvärinen
Kevät 2004
Pyhäjoen yläaste

Sisällysluettelo

Moderni fysiikka – mitä se on?	3
Modernin tieteen alku: mittaukset ja kokeet.....	3
Aika, avaruus ja katsojan silmä	4
Aika suhteellisuusteoriassa	7
Entäs sitten $E = mc^2$?	9
Avaruus vääntyy ja aaltoilee	10
Newtonin painovoimateorian ja Einsteinin suhteellisuusteorian välinen ristiriita	10
Kiihtyvyys suhteellisuusteoriassa	11
Yleisen suhteellisuusteorian perusteet	13
Onko yleinen suhteellisuusteoria oikeassa?	14
Kvanttimekaniikan kehys	14
Mustan kappaleen säteily	15
Kvantit ja kvantittuminen	16
Hullu kvanttimaailma	18
Yleinen suhteellisuusteoria ja kvanttimekaniikka vastakkain	19
Lähteet	20

Moderni fysiikka – mitä se on?

Nykyaikainen moderni fysiikka voitaisiin jakaa kahteen osaan, yleiseen suhteellisuusteoriaan ja kvanttimekaniikkaan. Molemmat teorit on todistettu lukuisin kokein paikkansa pitäviksi ja oikeiksi. Siltikään ne eivät ole yhteensopivia. Mikä mättää? Se on yksi nykyfyysikoiden kiperimmistä pulmista. Oikeastaan ongelma on tiedossa, mutta siihen ei ole vielä löydetty ratkaisua. Onneksi useimmissa tilanteissa tarvitaan vain toista teorioista. Suuren skaalan tapahtumissa – planeettojen ja galaksien välisissä vuorovaikutuksissa – käytetään suhteellisuusteoriaa. Kun skaalaa pienennetään ja lähestytään atomin kokoluokkaa, joudutaan käyttämään kvanttimekaniikkaa. Joissain tilanteissa, esimerkiksi tutkittaessa mustaa aukkoa teoreettisella tasolla, jouduttaisiin käyttämään molempia teorioita. Jos teorit yhdistää, täysin järkevästä matemaattisista lausekkeista saadaan hullunkurisia vastauksia. Tapahtumien todennäköisyys ei ole vaikkapa 50 prosenttia tai 5 prosenttia; lausekkeiden arvoiksi tulee äärettömyyksiä.

Omalla tavallaan suhteellisuusteoria on klassinen teoria, sillä se ei sisällä kvanttimekaniikan epätarkkuusluonnetta. Sitä ei ole saatu lisättyä suhteellisuusteoriaan, vaikka kuinka on yritetty. Ratkaisuksi on jopa ehdotettu moniulotteisia maailmakaikkeuksia, joiden ylimääräiset ulottuvuudet olisivat kätkeytyneet kokoon. Valmiita vastauksia ei ole. Monelle fysiikan opiskelijalle se voikin olla yllätys; koulufysiikasta kun tulee helposti sellainen olo, että kaikki on jo keksitty. Niin ei kuitenkaan ole. Moderni fysiikka on vielä täynnä avoimia, ratkaisuaan odottavia kysymyksiä: Mitä aine on ja mistä se on tullut? Miksi maailmakaikkeudessa on enemmän ainetta kuin antiainetta? Miksi me olemme olemassa?

Fysiikka voisikin verrata Rubikin kuution. Sekaisin pyöritellyn kuution uudelleenjärjestely voi aluksi vaikuttaa toivottomalta puuhalta, mutta pitkällisen pyörittelyn ja pohtimisen lopputuloksena kuution jokainen sivu saadaan samanväriseksi.

Modernin tieteen alku: mittaukset ja kokeet

Historioitsijat sijoittavat modernin tieteen alun Galilein 1600-luvulla tekemiin havaintoihin. Hän kehitti liikettä kuvaavia kaavoja, jotka perustuivat suoriin kokeisiin ja tarkkoihin mittauksiin. Galilei määritteli nopeuden ja kiihtyvyyden huolellisesti ja havaitsi niiden välisen suhteen mittaamalla toistuvasti kaltevaa tasoa vierivän kuulan nopeuden ja kiihtyvyyden. Nämä olivat ensimmäiset suunnitellusta kokeesta johdetut matemaattiset lausekkeet. Sitä aikaisemmat yhtälöt perustuivat luonnossa tapahtuvaan ilmiöiden tarkkailuun.

Galilei oli kenties ensimmäinen todellinen moderni tiedemies. Hän ymmärsi, että ilmiöitä voi tutkia havainnoimalla niiden yksinkertaisimpia osia. Modernien fyysikoiden tapaan hän halusi rakentaa suuren teorian, joka kattaisi kaikki ilmiöt, mutta hän ymmärsi edeltäjiään paremmin, että tähän tarvittaisiin uudenlainen menetelmä. Oli keskityttävä yksinkertaisimpiin ongelmiin, edettävä askel askeleelta ja tehtävä kokeita. Näin kaikki luonnon tutkimuksessa tarvittavan tieteellisen menetelmän vaiheet olivat hänen käytössään. Hänen päivistään saakka luontoa koskevat tieteellisen tiedon määrä on kasvanut tasaisesti.

Erityisesti tällä vuosisadalla houkutus muotoilla suuri kaiken teoria on ollut ylivoimainen jopa eräille parhaista tiedemiehistä. Esimerkiksi Albert Einstein käytti vuosia tällaisen teorian muotoiluun. Ja hän epäonnistui surkeasti. Nykyisin kuitenkin tiedämme, ettei hänellä ollut mahdollisuutta onnistua. Hänen aikanaan ei ollut vielä edes löydetty kvarkkeja eikä tunnettu kaikkia neljää perusvuorovaikutusta, heikko ja vahva voima olivat yhä tuntemattomia fyysikoille. Vasta nykypäivinä kaikenkattavan perusteorian kehittämiseen voisi olla mahdollisuuksia.

Aika, avaruus ja katsojan silmä

Albert Einsteinia alkoi jo teini-ikäisenä vaivata eräs ajan ja avaruuden luonteeseen liittyvä paradoksi. Se kuuluu näin: 1800-luvun puolivälin tienoilla skottilainen fyysikko James Maxwell onnistui yhdistämään sähköön ja magnetismin uudeksi käsitteeksi, sähkömagneettiseksi kentäksi. Voidaan sanoa, että sähkömagneettinen kenttä on kuin sähköisten ja magneettisten voimaviivojen vyyhti, joka täyttää avaruuden. Jos esimerkiksi ripotellaan rautajauhetta sellaisen paperin päälle, jonka alla on magneetti, voidaan nähdä, kuinka rautahitukset järjestäytyvät magneettikentän voimaviivojen mukaisesti. Kun joskus kuivalla säällä harjaa kissan takkuista turkkia ja kuulee ritisevän äänen ja ehkä tuntee muutaman sähköiskunkin, on tekemissä sähköisen voiman kanssa. Maxwellin teoria yhdisti onnistuneesti nämä kaksi voimaa samaan matemaattiseen muotoon. Lisäksi teoria osoitti aivan sattumalta, että sähkömagneettinen voima liikkuu vakionopeudella, joka on sama kuin valonnopeus. Mikä kuitenkin oleellisinta, teoria näytti, että valo liikkuu aina samalla nopeudella, koskaan hidastumatta. Valo liikkuu siis *aina* valon nopeudella. (Teoriaan ja mittauksiin perustuva valonnopeuden arvo on noin 300 000 km/s, mikä vastaa 1080 miljoonan kilometrin tuntinopeutta.)

Äkkiseltään ajateltuna tämä kaikki ei välttämättä kuulosta mitenkään merkilliseltä – ellei sitten esitä 16-vuotiaan Einsteinin kysymystä: ”Entäpä, jos havainnoija ajaa takaa valonsädettä ja liikkuu itsekin valon nopeudella?” Newtonilaisen intuition mukaan takaa-ajaja liikkuisi silloin valoaltojen rinnalla ja näkisi niiden seisovan paikallaan. Mutta Maxwellin teorian – kuten myös tähänastisten havaintojen – mukaan liikkumatonta valoa ei ole olemassa. Kukaan ei siis milloinkaan voi pitää valokimpaletta

käsissään. Einstein pohdiskeli Maxwellin ja Newtonin teorioiden välistä paradoksia onnellisen tietämättömänä siitä, että lukuisat maailman huippufyysikot painiskelivat samaisen ongelman parissa.

Einsteinin ratkaisu paradoksiin, erikoinen suhteellisuusteoria, käsittelee lähinnä sitä, miten toisiinsa nähden liikkuvat henkilöt näkevät maailman tapahtumat. Ensi näkemältä tämä voi tuntua merkityksettömältä aivovoimistelulta. Valonsäteitä jahdanneen Einsteinin käsissä pohdiskelu johti kuitenkin syvällisiin seurauksiin.

Tietyt erot eri nopeuksilla liikkuvien havaitsijoiden tekemissä havainnoissa ovat tuttuja arkielämässä. Esimerkiksi tienvarren puut näyttävät autoilijan mielestä liikkuvan. Toisaalta tienposkessa seisovan havaitsijan mielestä auton kojelauta, niin kuin koko muukin auto, näyttää liikkuvan. Autoilijan näkökulmasta tasaisesti liikkuva ajoneuvo pysyy kuitenkin paikallaan ja muu maailma liikkuu. Nämä ovat sellaisia perusasioita, ettemme yleensä kiinnitä niihin juurikaan huomiota.

Einsteinin muotoileman erikoisen suhteellisuusteorian mukaan nämä erot havaitsijoiden välillä ovat kuitenkin hienosyisempiä ja syvällisempiä. Teoria pitää sisällään eriskummallisen väittämän, jonka mukaan erilaisessa liiketilassa olevat tarkkailijat mittaavat aikaa ja avaruutta eri tavalla. Ero ei kuitenkaan johdu mittalaitteiden laadusta (tai laaduttomuudesta), vaan pikemminkin itse ajan ja avaruuden luonteesta. Erot erilaisissa koordinaatistoissa liikkuvien tarkkailijoiden havainnoissa johtuvat ajan ja avaruuden suhteellisuudesta – aikaa ja avaruutta sellaisena kuin me sen mittausten kautta ymmärrämme, ei aina koeta samalla tavalla. Teoriassaan Einstein muotoili täsmällisen ratkaisun siihen ristiriitaan, joka vallitsi liikettä koskevan intuitiomme ja valon ominaisuuksien välillä. Ratkaisulla on kuitenkin hintansa: toisiinsa nähden liikkuvat henkilöt eivät näe etäisyyksiä ja aikavälejä samanlaisina.

Einsteinin suhteellisuusteoria rikkoo perinteisen käsityksemme ajasta ja avaruudesta; intuitio absoluuttisesta ajasta ja avaruudesta ovat mennyttä. Einstein tiedotti havainnoistaan maailmalle jo lähes sata vuotta sitten, mutta suurin osa ihmisistä pitää yhä sekä aikaa että avaruutta absoluuttisina, muuttumattomina. Suhteellisuusteoria ei ole uponnut meihin, eikä päättelymme edelleenkään pohjaudu suhteellisuusteorian ennustamiin ilmiöihin. Syy tähän on kuitenkin selvä: suhteellisuusteoreettiset ilmiöt riippuvat liikenopeudesta, ja sellaisissa nopeuksissa, joihin nykyiset autot, lentokoneet tai avaruusalukset yltävät, ajan venymät ovat minimaalisia.

Erikoisen suhteellisuusteorian pohjana on oikeastaan kaksi perusolettamusta. Toinen perusolettamuksista ei oikeastaan koske mitään erityistä fysiikan lakia, vaan niitä kaikkia. Se tunnetaan nimellä suhteellisuusperiaate.

Suhteellisuusperiaatteen takana on yksinkertainen tosiasia: aina, kun puhutaan nopeudesta, on määriteltävä täsmällisesti, kuka tai mikä mittaa kyseisen nopeuden. Tätä voisi valottaa myös esimerkillä. Arkikielessä saatamme usein väittää olevamme paikallaan, emme siis ole liikkeessä jonkin tietyn pisteen, esimerkiksi kotimme, suhteen. Maa kuitenkin pyörii akselinsa ympäri ja kiertää Aurinkoa. Aurinkokuntamme on osa Linnunrataa, joka kieppuu hurjalla vauhdilla itsensä ympäri. Se on myös

liikkeessä muiden lähigalaksien suhteen, ja näiden muodostama galaksisysteemi taas muiden galaksisysteemien. Listausta voisi jatkaa loputtomiin. Tärkeä oivallus on kuitenkin se, ettei nopeus ole yksiselitteinen juttu. Autoilija voisi perustellusti väittää olevansa paikallaan autonsa suhteen, vaikka auto liikkuisikin sadan kilometrin tuntinopeudella tienposkessa seisovaan liftariin nähden. Ei siis ole mielekästä ilmoittaa kävelijän nopeudeksi 8 km/h. Sen sijaan on mielekästä ilmoittaa hänen nopeudekseen 8 km/h jonkin tietyn pisteen nähden.

Suhteellisuusperiaatteen voisi ilmaista myös toisin. Kuvitellaan tilannetta, jossa matkustaja olisi junavaunussa, jossa ei ole yhtään ikkunaa. Mikäli juna liikkuu tasaisella nopeudella, se näyttää sisältäpäin täsmälleen samanlaiselta, liikkua se tai ei. Einstein muotoili tämän asian niin, että matkustajan on mahdotonta tehdä koetta, joka paljastaisi hänen liiketilansa. Koska vapaa liike (sama asia kuin tasainen liike) on aina suhteellista, siitä voi mielekkäästi puhua vain suhteessa toisiin kappaleisiin, jotka ovat myös tasaisessa liikkeessä. Oma liiketilaa ei ole mahdollista määrittää ilman suoraa tai epäsuoraa vertailua muiden, ”ulkopuolisten” kappaleiden liikkeeseen. Absoluuttista tasaista nopeutta ei yksinkertaisesti ole olemassa; vain vertailut ovat fyysikaalisesti mielekkäitä.

Toinen erikoisen suhteellisuusteorian pohjana olevista perusolettamuksista liittyy valoon, tarkemmin sanottuna sen nopeuteen. Edellä puhuttiin siitä, ettei ole mielekästä ilmoittaa nopeutta ilmoittamatta, minkä suhteen nopeus on mitattu. Erilaiset fyysikoiden suunnittelemat mittaukset ovat kuitenkin osoittaneet, että valonnopeus on kaikkien havaitsijoiden mielestä aina vakio (noin 1080 miljoonaa kilometriä tunnissa), verrattiinpa sitä mihin tahansa.

Tämä seikka on aiheuttanut maailmankuvamme mullistuksen. Kuvitellaanpa tilanne, jossa sinä ja ystäväsi heittelette palloa lämpimänä kesäpäivänä, sanotaan nyt vaikka kuuden metrin sekuntivauhdilla. Käännyt hetkeksi seuraamaan tiellä pyöräilevää naapuriasi, joka vilkuttaa sinulle. Kun käännyt jatkaaksesi peliä, huomaatkin, kuinka ystäväsi verestävät silmät tuijottavat sinua pahanilkisesti. Hänen kädessään ei enää ole pesäpallo vaan käsikranaatti. Peli-intosi on arvattavasti tiessään ja käännyt juostaksesi pakoon. Jos juokset vaikkapa neljän metrin sekuntivauhdilla, hulluksi tulleen ystäväsi heittäjä kranaatti saavuttaa sinua arkijärjellä ajateltuna $6 - 4 = 2$ m/s. Sekä kokemus että teoria kertovat väittämän olevan totta.

Mutta kuvitellaanpa tilanne hieman toisenlaiseksi: ystävälläsi ei olekaan kranaattia vaan laserase. Jotta esimerkistä tulisi vaikuttavampi, kuvitellaan, että voisit hypätä 200 miljoonaa kilometriä tunnissa matkaavan avaruusaluksen kyytiin. Perinteisen newtonilaisen ajattelutavan mukaan lasersäde saavuttaisi sinua $1080 - 200 = 880$ miljoonaa kilometriä tunnissa. 1800-luvulta asti kerätty havaintoaineisto ja Maxwellin teorian huolellinen analysointi kuitenkin osoittavat, ettei näin itse asiassa käy. Vaikka liikut valonlähteestä pois päin, valo saavuttaa sinua silti samalla vakionopeudella, noin 1080 miljoonaa kilometriä tunnissa, eikä yhtään hitaampaa.

Tuntuu vaikealta hyväksyä, että valo käyttäytyy näin. Vuosisadan vaihteessa monet fyysikot yrittivät kaikkensa keksiäkseen jotain muuta. He eivät onnistuneet. Sen sijaan Einstein oli ensimmäinen joka hyväksyi valon nopeuden absoluuttisuuden, koska siinä oli vastaus häntä jo teini-iässä vaivanneeseen paradoksiin. Samalla hän syöksi vallasta koko newtonilaisen fysiikan.

Aika suhteellisuusteoriassa

On vaikea määritellä, mitä aika on. Yritys johtaa usein siihen, että sana ”aika” esiintyy itse määritelmässä tai sitten sen välttämiseksi on käytetty jotain kieliopillista hämäystä. Aika voitaisiin kuitenkin määritellä suureeksi, jota mitataan kelloilla. Tässä ongelmaksi kuitenkin tulee kellon määritelmä. Käytännöllisen kannan ottaaksemme voisimme sanoa, että kello on laite, joka suorittaa täydellisen jaksollista liikettä.

Tästä näkökulmasta ajateltuna on helppo todistaa, että arkipäiväinen käsityksemme ajasta on totaalisesti väärä. Jos alkaisimme tutkia, miten liike vaikuttaa kellon käyntiin, huomaisimme eriskummallisia muutoksia ajan kulussa. Heti voisi kuitenkin tehdä selväksi, ettei kokeessa oteta huomioon tärähdyksiä tai muita häiriöitä. Siinä tutkitaan vain yksinkertaisinta mahdollista liikettä: laakealla tasolla tasaisella nopeudella liikkuvaa kappaletta.

Otetaan käyttöön yksinkertainen ”valokello”, joka rakentuu kahdesta yhdensuuntaisesta peilistä ja niiden välissä poukkoilevasta fotonista. Jos peilit ovat 15 senttimetrin päässä toisistaan, niin fotonilta kuluu edestakaiseen matkaan sekunnin miljardisosa. Kellon voisi ajatella ”tikittävän” aina, kun fotoni on tehnyt täyden kierroksen – miljardi tikitystä merkitsisi, että yksi sekunti on kulunut.

Valokello on hyvä esimerkki, koska mekaanisten yksityiskohtien puute auttaa keskittymään itse asiaan: siihen, miten liike vaikuttaa kappaleen mittaamaan aikaan. Voisimme kuvitella tilanteen, jossa seuraisimme paikallaan olevan valokellon tikitystä. Yhtäkkiä toinen valokello liukuu vakionopeudella paikallaan olevan kellon ohi. Tikittääkö liikkuva kello samaan tahtiin kuin paikallaan pysyvä?

Vastaus saadaan tutkailemalla sitä reittiä, joka fotonin on meidän näkemämme täytynyt kulkea, jotta kello tikittäisi kerran. Se lähtee liikkeelle liikkuvan kellon pohjalta ja kulkee ensin ylemmän peilin luokse. Koska kello on meidän näkökulmastamme liikkeessä, niin fotonin täytyy kulkea viistoa reittiä. Ellei fotoni kulkisi tällaista reittiä, se karkaisi avaruuteen. Koska tasaisesti liikkuva kello voi oikeutetusti väittää itse olevansa paikallaan ja muun maailman liikkuvan, niin tiedämme, että fotonin täytyy kulkea piirtämäämme reittiä pitkin. Fotoni kimpoaa sitten ylemmästä peilistä ja palaa tosita viistoa reittiä pitkin alempaan peiliin. Kello tikittää kerran.

Tarinan yksinkertainen, mutta tärkeä ydin on siinä, että meidän näkemämme kahden viiston reitin yhdistelmä on huomattavasti pidempi kuin pystysuuntainen reitti, jonka paikallaan pysyvän kellon

fotoni tekee. Tiedämme, että valon nopeus on vakio, joten liikkuvan kellon fotoni kulkee täsmälleen samaa vauhtia kuin paikallaan pysyvä. Mutta koska liikkuvan kellon fotonin pitää kulkea pitempi matka kuin paikallaan pysyvän fotonin, huomaamme, että liikkuva kello tikittää harvemmin kuin paikallaan pysyvä. Koska olemme sopineet, että tikitysten lukumäärä kertoo, kuinka paljon aikaa on kulunut, joudumme toteamaan, että *liikkuvan kellon aika on hidastunut*.

Joillain saattaa herätä kysymys: ”Onko tämä vain jokin valokellojen erityispiirre vai päteekö se myös isoisän taskunauriiseen tai Rolex-rannekelloon?” Myös näiden kellojen mittaama aika hidastuu, se on seuraus suhteellisuusperiaatteesta. Kiinnitetään Rolex-kello kummankin valokellon päälle ja toistetaan koe. Paikallaan oleva valokello ja Rolex mittaavat samanlaista aikaa: aina kun fotoni on poukahtanut miljoona kertaa peilistä toiseen, Rolex tikittää kerran. Entä sitten liikkuva kello? Mittaavatko ne aikaa samalla tavalla? Havainnollisuuden vuoksi voisimme kuvitella, että kellon liike johtuu siitä, että se on pultattu kiinni ikkunattoman junanvaunun lattiaan, joka on tasaisessa liikkeessä.

Suhteellisuusperiaatteen mukaan matkustaja ei voi suorittaa mitään koetta, joka osoittaisi, liikkuko vaunu vai ei. Mutta jos valokello ja Rolex kävisivät eri tahtiin, vaunun liikkuminen olisi havaittavissa. Niinpä valokellon ja siihen kiinnitetyn Rolexin täytyy yhä näyttää samaa aikaa. Kellojen merkistä, mallista tai rakenteesta riippumatta pitää paikkansa, että toisiinsa nähden liikkuvat kellot käyvät eri tahtiin.

Valon nopeuden absoluuttisuudesta seuraa siis, että liikkuva valokello käy hitaammin kuin paikallaan pysyvä valokello. Suhteellisuusperiaatteen mukaan se ei päde ainoastaan valokelloihin – se pätee aikaan itseensä. Liikkuvan henkilön aika kuluu hitaammin kuin paikallaan olevan. Jos tämän johtopäätöksen takana oleva päättely pitää paikkansa, niin eikö silloin olisi mahdollista elää pidempään, jos pysyy liikkeessä sen sijaan, että pysyisi paikallaan? Tavallaan tämä onkin totta, se on jopa kokeellisesti todistettu. Koetta ei kuitenkaan tehty ihmisillä vaan myoneilla, eräillä hyvin nopeasti hajoavilla alkeishiukkasilla. On kuitenkin yksi sudenkuoppa, jonka takia emme voi julistaa, että ikuisen nuoruuden lähde olisi nyt löydetty.

Laboratoriossa levossa olevat myonit ovat radioaktiivista hajoamista muistuttavassa tilassa. Niiden keskimääräinen elinikä on noin kaksi miljoonasosasekuntia. Tämä hajoaminen on kokeellinen tosiasia, joka on havaittu lukuisissa kokeissa. Myoni elää kuin revolveri ohimolla; kun sen syntymästä on kulunut kaksi miljoonasosasekuntia, se painaa liipaisinta.

Jos emme kuitenkaan tarkastele paikallaan pysyvää alkeishiukasta, vaan fyysikoiden koelaitteistoissa lähes valon nopeudella kiitävää myonia, sen elinajassa tapahtuu dramaattisia muutoksia. Mikäli hiukkasen nopeus on noin 99,5 % valon nopeudesta, sen elinikä pitenee kymmenkertaiseksi. Erikoinen suhteellisuusteoria selittää tämän siten, että liikkuvien myonien ”rannekellot” tikittävät hitaammin. Vielä kauan sen jälkeen, kun myonien olisi laboratorion kellojen mukaan pitänyt jo painaa liipaisinta ja päättää kurja elämänsä, liikkuvien myonien omat kellot antavat odottaa tuomionpäivää.

Tässä on välitön ja dramaattinen dramaattinen esimerkki nopeuden vaikutuksesta ajan kulkuun. Jos ihmiset kiittäisivät samaa vauhtia kuin äskeiset myonit, heidän elinikänsä pitenis vastavasti. 70 vuoden sijasta ihmiset eläisivät 700 vuotta.

Tästä päästäänkin sudenkuoppaan: vaikka liikkuvat myonit elävät laboratorion kellojen mukaan huomattavasti pidempään kuin paikallaan pysyvät myonit, ajan hidastuminen ei kuitenkaan vaikuta vain niiden kellojen käyntinopeuteen. Kaikki niiden toiminnot hidastuvat samassa suhteessa. Meidän näkökulmastamme näiden myonien elämä on hidastettua. Omassa koordinaatistossaan ne kuitenkin ehtivät kokea saman ”määrän” elämää kuin liikkumattomat myonit. Jos paikallaan pysyvä ihminen ehtisi lukea elämänsä aikana sata kirjaa, ei hänen lähes valon nopeudella kiitävä kumppanikaan ehtisi lukea yhtään sen enempää.

Entäs sitten $E=mc^2$?

Valon nopeuden absoluuttisuutta ei välttämättä tule aina ajatelleeksi, vaikka sen seuraukset näkyvätkin suoraan Einsteinin kuuluisasta kaavasta $E=mc^2$. Useimmat ihmiset tunnistavat tämän kaavan ja osaavat sanoa, kuka sen on kehittänyt. $E=mc^2$ on luultavasti ainoa fysiikan kaava, jonka kadunmieskin tunnistaa. Harvempi kuitenkin ymmärtää syvällisemmin, mitä se tarkoittaa.

Einstein osoitti, että sellaiset käsitteet kuin aika ja paikka, jotka pitkään oli kuviteltu erillisiksi ja absoluuttisiksi, ovatkin toisiinsa kytkeytyneitä ja suhteellisia. Hän näytti myös, että massan ja energian välillä vallitsee syvä yhteys. Jos jompikumpi suureista tiedetään, toinen voidaan laskea. Kun massa (m) on tiedossa, energia (E) lasketaan kertomalla massa valon nopeuden neliöllä (c^2). Vastaavasti massa voidaan laskea jakamalla energia valon nopeuden neliöllä. Massa ja energia ovat ikään kuin vaihdettavia valuuttoja kuten vaikkapa dollari ja jeni. Toisin kuin valuutanvaihdossa, näiden kahden suureen vaihtosuhte on kuitenkin ikuisesti sama luku. Kaavaa tutkiessaan tavallinen saviainvokin voi huomata, että jo pienestä määrästä massaa saadaan valtavasti energiaa (c^2 on iso luku). Hiroshimassa maailma joutui tutustumaan siihen valtavaan tuhovoimaan, kun alle 1 % uraanikilosta muuttui energiaksi. Ehkä jonain päivänä voimme soveltaa Einsteinin kaavaa tuottamalla koko maailman energiantarpeen fuusiovoimaloissa ja käyttäen polttoaineena tavallista merivettä.

Palataksemme kuitenkin niihin käsitteisiin, jotka tässä kirjoituksessa ovat olleet eniten esillä: Einsteinin yhtälö antaa konkreettisen näytön siitä, miksei mikään voi liikkua valoa nopeampaa. Monet Cern-tiedeopiskelijoihinkin ovat saattaneet joskus pohtia, mikseivät tutkijat voisi kiihdyttää 99,5 % valon nopeudesta kulkevaa hiukkasta ”vielä vähän enemmän” – vaikkapa 99,99 % valon nopeudesta. Ja sitten vielä ihan vähän, juuri sen verran, että päästäisiin hieman yli valon nopeuden. Einsteinin kaavasta käy ilmi, miksi tällainen ei ole mahdollista. Jotta kappale saataisiin kiihtyvään liikkeeseen, sille pitäisi

antaa energiaa. Mitä suurempiin nopeuksiin kappale halutaan kiihdyttää, sitä enemmän energiaa tarvitaan. Koska energia ja massa ovat keskenään vaihdettavaa valuuttaa, joiden vaihtosuhte pysyy samana (valon nopeuden neliö, c^2), energian lisääntyessä täytyy myös massan kasvaa. Esimerkiksi myoni, jonka nopeus on 99,9 % valon nopeudesta ovat 22 kertaa raskaampia kuin levossa ollessaan. Nopeuden lisääminen on kuitenkin sitä vaikeampaa, mitä enemmän kappaleella on massaa. Jokainen on varmasti saanut huomata, että on aivan eriasia työntää rekkaa kuin lastenvaunuja. Jos myoni kiihdytetään 99,999 % valon nopeudesta kerroin on kasvanut jo 224; kun nopeus on 99,99999999 % valon nopeudesta, niin kerroin on yli 70000. Koska kappaleen massa kasvaa rajatta lähestyttäessä valon nopeutta, sen ylittämiseen tarvittaisiin äärettömän paljon energiaa. Energiaa ei kuitenkaan ole tarjolla äärettömän paljon, joten operaatio on tuomittu ikuisesti epäonnistumaan.

Avaruus vääntyy ja aaltoilee

Einsteinin erikoinen suhteellisuusteoria ratkaisi ristiriidan, joka vallitsi liikkuvia kappaleita koskevan ”ikiaikaisen intuition” ja valon vakionopeuden välillä. Lyhyesti sanottuna ratkaisu oli se, että intuitiomme on väärä – se perustuu kokemuksiin kappaleista, jotka liikkuvat tavattoman hitaasti valon nopeuteen nähden. Kun havaintoaineistomme koskee yksinomaan hitaasti liikkuvia kappaleita, saamme väärän kuvan avaruuden ja ajan luonteesta. Erikoisen suhteellisuusteoria paljasti niiden perimmäisen luonteen, joka poikkeaa jyrkästi aiemmasta käsityksestämme. Käsityksemme muuttaminen ei kuitenkaan ole mikään pikkujuttu. Einstein huomasi pian, että eräs erikoisen suhteellisuusteorian jälkivaikutuksista oli erityisen syvä: se sääntö, ettei mikään voi kulkea valoa nopeampaa, ei sovi yhteen Newtonin painovoimateorian kanssa. Poistaessaan yhden ristiriidan teoria aiheutti toisen. Kymmenen vuoden intensiivisen työn jälkeen Einstein mullisti jälleen totunnaiset käsitykset osoittaessaan, että avaruus ja aika voivat vääntyä ja käyristyä ja aiheuttaa siten painovoiman vaikutukset.

Newtonin painovoimateorian ja

Einsteinin suhteellisuusteorian välinen ristiriita

Einsteinin muotoilemassa erikoisessa suhteellisuusteoriassa on keskeistä, ettei mikään voi liikkua valoa nopeampaa. On tärkeää huomata, ettei tämä koske ainoastaan massallisia kappaleita vaan myös signaaleja ja vuorovaikutuksia. On yksinkertaisesti mahdotonta, että jokin tieto tai häiriö voisi välittyä valoa nopeampaa. On kuitenkin olemassa kaikenlaisia häiriöitä, jotka etenevät valoa hitaammin.

Esimerkiksi ääni kulkeutuu ilman läpi paineaaltoina, jotka etenevät noin 1000 kilometriä tunnissa – se on mitätön nopeus verrattuna valon nopeuteen, 1080 miljoonaa kilometriä tunnissa. Ukkosmyrskyn aikaan tämän nopeuseron voi itsekin havaita: vaikka salaman välähdys ja jyrähdys syntyvät samaan aikaan, jyrähdyksen kuulee vasta tovin kuluttua siitä, kun välähdys on jo nähty. Erikoisen suhteellisuusteoria osoittaa, että käänteinen tapaus – tilanne, jossa signaali välittyisi valoa nopeammin – on mahdoton. Mikään ei kulje nopeampaa kuin fotonit.

Tässä on nyt se ongelma: Newtonin mukaan kappaleet vuorovaikuttavat keskenään voimalla, joka riippuu ainoastaan kappaleiden massasta ja niiden välisestä etäisyydestä. Voiman suuruus ei riipu lainkaan siitä, kuinka kauan kappaleet ovat toistensa vaikutuspiirissä. Newtonin mukaan nämä muutokset tuntuvat *välittömästi* kappaleiden välisessä painovoimassa. Hänen gravitaatioteoriaansa väittää esimerkiksi, että jos aurinko räjähtäisi juuri nyt, niin maapallo alkaisi välittömästi poiketa ellipsiradaltaan. Tilanne olisi paradoksaalinen: aurinko paistaisi yhä taivaalla, sillä valo ei olisi vielä ehtinyt maahan.

Newtonin teoria on erikoisen suhteellisuusteorian kanssa välittömästi nokat vastakkain. Einsteinin mukaanhan mikään ei voi liikkua valoa nopeampaa. Ääretön nopeus on tämän rajoituksen kanssa pahimmassa mahdollisessa ristiriidassa.

Vakuuttuneena erikoisen suhteellisuusteorian paikkansapitävyydestä, Einstein alkoi muotoilla uudenlaista painovoimateoriaa. Lopulta hän päätyi yleiseen suhteellisuusteoriaan.

Kiihtyvyys suhteellisuusteoriassa

Jo ennen erikoisen suhteellisuusteorian keksimistä Newtonin painovoimateoriassa tiedettiin olevan yksi olennainen puute. Vaikka sen avulla pystyttiin laskemaan tarkasti kappaleiden liike painovoimakentässä, se ei selitä, mitä painovoima oikeastaan on. Miten on mahdollista, että miljoonien kilometrien päässä toisistaan olevat kappaleet vaikuttavat toisiinsa ilman mitään välittäjää? Newton oli itsekin hyvin tietoinen tästä ongelmasta.

Hän kuitenkin otti annettuna painovoiman ja ryhtyi kehittämään yhtälöitä, jotka kuvaisivat sen toimintaa mahdollisimman tarkasti. Newton ikään kuin lahjoitti meille painovoiman ”käyttöohjeen”, mutta ei selittänyt, miten ja miksi se toimii. Tilannetta voisi verrata siihen, kun tavallinen pulliainen ostaa CD-soittimen. Mukana tulevasta käyttöohjekirjasta voi opetella tekemään sillä erilaisia asioita. Ohjekirja ei kuitenkaan kerro, miten laite toimii. Harvempaa se edes kiinnostaisi. Pääasia on se, että se ylipäätään toimii. Muulla ei ole väliä. Jos laite kuitenkin hajoaa, sen voi korjata vain, jos ymmärtää sen toimintaperiaatteen. Samalla tavalla Einstein ymmärsi, että vuosisatojen aikana kerätystä havainnointiaineistosta huolimatta Newtonin painovoimateoria oli jotenkin vaikeasti havaittavalla

tavalla ”epäkunnossa” ja että sen korjaaminen edellytti painovoiman todellisen luonteen täydellistä ymmärtämistä.

Näitä pohdiskellessaan Einstein teki keskeisen oivalluksen, joka lopulta johti hänet radikaalisti uuteen painovoimateoriaan – teoriaan, joka ei ainoastaan korjannut Newtonin käsitystä painovoimasta vaan mullisti painovoimaa koskevan ajattelun kokonaan. Mikä kuitenkin tärkeintä, se oli täydellisessä sopusoinnussa erikoisen suhteellisuusteorian kanssa.

Einsteinin oivallus liittyi kysymykseen, joka on saattanut vaivata tämänkin tekstin tarkkaavaista lukijaa. Aiemmin keskityimme siihen, millaiselta maailma näyttää vakionopeudella toistensa suhteen liikkuvien havaitsijoiden silmin. Vertailemalla heidän havaintojaan teimme muutamia dramaattisia havaintoja avaruuden ja ajan luonteesta. Mutta entäpä havaitsijat, joiden liiketila ei ole tasainen vaan kiihtyvä? Heidän havaintojaan on vaikeampi analysoida kuin vakionopeudella liikkuvien havaitsijoiden, mutta voimme silti kysyä, ovatko nämä hankaluudet voitettavissa ja voidaan kiihtyvä liike sisällyttää hallitusti maailmankuvaamme.

Pohtiessaan, miten painovoima saataisiin sisällytetyksi erikoiseen suhteellisuusteoriaan, Einstein teki merkittävän havainnon: painovoiman ja kiihtyvän liikkeen välillä on yhteys. Tämä huomio on keskeinen yleisessä suhteellisuusteoriassa (erikoisen suhteellisuusteorian laajennus, joka sisältää painovoiman). Muistellaanpa taas sitä suhteellisuusteorian junaesimerkkiä. Einstein julisti, ettei tasaisesti liikkuvan junanvaunun sisällä oleva matkustaja voi tehdä sellaista koetta, joka osoittaisi, onko juna liikkeessä vai ei. Ilman ulkopuolista vertailukohdetta ei ole edes mielekäästä puhua nopeudesta. Jos liike sen sijaan on kiihtyvää, sen todella tuntee kehossaan, vaikka ei saisikaan aistihavaintoja vaunun ulkopuolelta. Esimerkiksi kasvot menosuuntaan istuva matkustaja tuntee selkensä painuvan penkkiin. Jos taas kiihtyvyys suuntautuu ylöspäin, niin jalat painuvat lattiaan. Einstein oivalsi, ettei junanvaunun sisällä ole mahdollista erottaa näitä tilanteita sellaisista, joissa ei esiinny kiihtyvyyttä, mutta on painovoimaa. On mahdotonta sanoa, johtuuko kehossa tunnettu voima kiihtyvistä liikkeistä vai painovoimakentästä. Jos vaunu seisoo paikallaan maanpinnalla, lattia painaa jalkoja aivan samoin kuin jos liikuttaisiin kiihtyvästi ylöspäin. Jos vaunu nostetaan pystyyn, niin että sen peräseinä tulee maata vasten, niin penkki tuntuu selässä aivan kuin liikuttaessa kiihtyvästi eteenpäin.

Tämä selostus osoittaa, että yleinen suhteellisuusteoria saattaa loppuun erikoisessa suhteellisuusteoriassa alkaneen työn. Erikoisen suhteellisuusteorian suhteellisuusteoria tekee kaikkien havaitsijoiden näkökulmista tasa-arvoisia: kaikki tasaisesti liikkuvat tarkkailijat näkevät fysiikan lait samanlaisina. Mutta tämä on melko rajallista demokratiaa, sillä se sulkee pois suuren joukon erilaisia havaitsijoita – nimittäin ne, joiden liiketila on kiihtyvä. Einsteinin vuonna 1907 tekemä oivallus kertoo, miten kaikki havaitsijat, tasaisesti tai kiihtyvästi liikkuvat, voidaan sisällyttää samaan tasa-arvoiseen teoriaan. Koska kiihtyvä liike ilman painovoimaa vastaa tasaista liikettä painovoiman kanssa, niin voimme valita jälkimmäisen ja todeta, että jokainen havaitsija, mikä hänen liiketilansa sitten onkin, voi

oikeutetusti väittää olevansa paikallaan ja että muu maailma liikkuu. Tässä mielessä, ottamalla mukaan gravitaation, yleinen suhteellisuusteoria tekee kaikki mahdolliset näkökulmat tasa-arvoisiksi.

Yleisen suhteellisuusteorian perusteet

Newtonin painovoimateoriassa auringon aiheuttama painovoima pitää maan ellipsiradallaan tarkemmin määrittelemättömän ”liekanarun” avulla. Se ylittää äärettömän nopeasti valtavia etäisyyksiä ja tarttuu maapalloon. Einsteinillä oli uusi näkemys siitä, mitä itse asiassa tapahtuu.

Jo Newton huomasi, että Aurinko tai mikä tahansa muu massiivinen kappale kohdistaa gravitaatiovoiman muihin kappaleisiin. Einsteinin syvällinen pohdinta johti kuitenkin johtopäätökseen, jonka mukaan massa, esimerkiksi Aurinko, saa avaruuden kaareutumaan. Hyödyllinen ja fyysikoiden paljon käyttämän analogian mukaan aika-avaruutta voidaan kuvata kumikalvolla. Massiivinen kappale saa aika-avaruuden kaareutumaan aivan kuin kumikalvon päälle laskettu keilapallo. Tämän radikaalin ajatuksen mukaan avaruus ei olekaan passiivinen tausta, joka tarjoaa kaikelle tapahtuvalle puitteet; sen sijaan avaruus reagoi kappaleiden läsnäoloon.

Tämä kaareutuminen vaikuttaa muiden kappaleiden liikkeisiin Auringon lähistöllä. Jos keilapallon kaarruttamalle kumikalvolle heitetään marmorikuula, se reagoi kalvon pinnanmuotoihin. Mikäli keilapallo on liian raskas tai kuulan nopeus jää liian pieneksi, se valuu keilan juurelle eikä pääse sieltä omin avuin pois. Jos heitto taas on onnistunut, kuula voi tehdä täyden kierroksen keilapallon ympärillä. Jos kitka jätettäisiin huomiotta, kuula voisi itse asiassa jäädä keilapallon kiertolaiseksi kaarevalle radalle – ”kiertoradalle”.

Kumikalvoanalogiassa keilapallo vastaa aurinkoa, joka kaarruttaa ympäröivää avaruutta. Marmorikuulaa vastaavan maan liikerata määräytyy tästä kaarevuudesta. Kuulan laikka maa jää kiertämään Aurinkoa, jos sen lähtönopeus ja suunta ovat oikeat. Muussa tapauksessa se joko syöksyy suoraan Aurinkoon tai ajautuu ulkoavaruuteen. Tätä Auringon vaikutusta maan liikkeeseen nimitetään tavallisesti painovoimaksi. Erona Newtonin teoriaan on se, että Einstein, toisin kuin Newton, onnistui kuvailemaan mekanismin, jolla se toimii. Einsteinin mukaan se gravitaation liekanaru, joka pitää maan radallaan ei ole mikään salaperäinen, silmänräpäyksellinen ilmiö; kysymys on vain Auringon aiheuttamasta avaruuden vääntymisestä.

Kaksi keskeistä painovoimaan liittyvää seikkaa voidaan nyt ymmärtää uudella tavalla. Ensinnäkin keilapallo venyttää kumikalvoa sitä enemmän, mitä raskaampi se on; Einsteinin painovoimateoriassa kappale kaarruttaa aika-avaruutta sitä enemmän, mitä massiivisempi se on. Toisekseen, mitä kauempana keilapallosta ollaan, sitä vähäisempää on kalvon venymä. Tämäkin vastaa kokemuksiamme painovoimasta.

On tärkeää huomata, että myös pieni kuula venyttää kumikalvoa, vaikkakin vain vähän. Vastaavasti myös Maa massiivisena kappaleena kaarruttaa avaruutta. Tämä mahdollistaa sen, että Maallakin on oma kiertolaisensa, kuu. Edelleenkin voitaisiin sanoa, että jokaisen ihmisen massa kaarruttaa häntä ympäröivää aika-avaruutta, mutta vaikutus on niin pieni, että se on täsmennyksenä merkityksetön.

Einstein hyväksyi täysin Newtonin toteamuksen, että ”painovoiman täytyy johtua jostain välittäjästä”. Einsteinin mukaan painovoiman välittäjänä on avaruuden rakenne.

Onko yleinen suhteellisuusteoria oikeassa?

Nykyteknologian sallimissa rajoissa ei ole havaittu poikkeamia yleisen suhteellisuusteorian ennusteista. Vain aika näyttää, paljastuuko yhä tarkentuissa mittaustuloksissa poikkeamia ennusteiden kanssa ja osoittautuuko suhteellisuusteoriakin vain likimääräiseksi kuvaukseksi luonnon toiminnasta.

Mittaustulosten tarkentaminen ei kuitenkaan ole ainoa tapa kehittää tiedettä eteenpäin. Huomasimme jo, että Newtonin painovoimateorialle ei lähdetty etsimään korvaajaa siksi, että se olisi ollut ristiriidassa mittaustulosten kanssa. Uusi teoria piti kehittää siksi, että se oli ristiriidassa erikoisen suhteellisuusteorian kanssa. Vasta yleisen suhteellisuusteorian keksimisen jälkeen tunnistettiin ne tilanteet, joissa Newtonin teoria epäonnistuisi. Teorioiden sisäiset ristiriidat voivat siis olla yhtä ratkaisevia kehityksen kimmokkeita kuin kokeelliset mittaukset.

Viimeisen puolen vuosisadan ajan fysiikassa on ollut käsillä uusi teoreettinen ristiriita, joka on yhtä vakava kuin erikoisen suhteellisuusteorian ja Newtonin painovoimateorian välinen. Yleinen suhteellisuusteoria näyttää olevan yhteen sopimaton modernin fysiikan toisen kulmakiven, kvanttimekaniikan, kanssa. Tämä ristiriita merkitsee sitä, etteivät nykyfyysikot ymmärrä, mitä avaruudelle, ajalle ja aineelle tapahtuu, kun ne ovat täysin kokoon puristuneita kuten alkuräjähdyksessä tai mustan aukon keskipisteessä. Yleisesti ottaen on kysymys siitä, että ihmiskunnan käsitys luonnonlaeista on syvällisellä tavalla vajavainen. Näiden kahden teorian välisen ristiriidan ratkaiseminen on yksi nykyfysiikan suurimmista ongelmista.

Kvanttimekaniikan kehys

Kvanttimekaniikka on käsitekehys, joka tekee mahdolliseksi mikromaailman ymmärtämisen. Erikoisen ja yleisen suhteellisuusteoria vaativat dramaattisia muutoksia ajattelussamme, kun kappaleet liikkuvat hyvin nopeasti tai kun ne ovat hyvin massiivisia. Kvanttimekaniikka taas osoittaa, että yhtä ällistyttäviä, ellei jopa ällistyttävämpiä ilmiöitä tulee vastaan atomin tai sen osien mittakaavassa.

Jos Einsteinin suhteellisuusteoriaa tutkailee riittävän tarkasti, huomaa johtopäätösten väistämättömyyden. Vaikka ne vaativat hahmottamaan maailman aivan uudella tavalla, se on kuitenkin vain seurausta loogisesta päättelystä. Edellytyksenä on vain peruslähtökohtein hyväksyminen.

Kvanttimekaniikan laita on kuitenkin toinen. Suurin osa sen laskusäännöistä on kehitetty jo ennen vuotta 1928. Siitä lähtien niitä on menestyksekkäästi sovellettu ja niistä on johdettu tieteen historian kaikkein tarkimmat numeeriset ennusteet. Mutta itse asiassa kvanttimekaniikkaa soveltavat tutkijat vain noudattavat teorian kehittäjien mekaanisia laskusääntöjä todella ymmärtämättä, miksi ne toimivat. Toisin kuin suhteellisuusteorian tapauksessa, vain harvat – jos ketkään – ihmiset ymmärtävät kvanttimekaniikkaa sisimmässään. Onko luonto todella järjenvastainen vai onko kvanttimekaniikka vain puettu niin kömpelöön muotoon, että se antaa oikeita ennusteita, mutta hämärtää kokonaiskuvaa? Kukaan ei tiedä vastausta.

Mustan kappaleen säteily

Tie kvanttimekaniikkaan alkoi kiperästä ongelmasta. Ajatellaan, että keittiön uuni on täysin eristetty. Asetetaan termostaatti tiettyyn lämpötilaan, vaikkapa 200 celsiusasteeseen, ja uunin annetaan lämmitä. Vaikka uuni olisi ennen lämmittämistä pumpattu tyhjäksi ilmasta, niin seinien lämmittäminen synnyttää uunin sisälle säteilyä. Se on samaa lämpösäteilyä, jota saamme Auringosta ja joka on elämämme perusehto.

Ongelma on seuraava: sähkömagneettiset aallot kuljettavat energiaa. 1900-luvun alussa fyysikot laskivat, paljonko tietyn lämpöisen uunin sisällä oleviin sähkömagneettisiin aaltoihin sisältyy energiaa. Vakiintuneet laskumenetelmät johtivat järjettömään tulokseen: lämpötilassa kuin lämpötilassa uunin sisältämä energia olisi äärettömän suuri. Kaikki ymmärsivät tämän hölynpölyksi – kuumassa uunissa voi olla paljon energiaa, mutta ei kuitenkaan äärettömän paljon.

Saksalainen fyysikko Max Planck tarttui ennakkoluulottomasti ongelmaan ja teki rohkean olettamuksen. Sen mukaan energiaa liikutellaan palasina – kvantteina – aivan kuin rahaa. Energiaa voi olla yhden energiayksikön suuruinen tai kahden tai kolmen tai niin edelleen – muita mahdollisuuksia ei ole. Planck edellytti, ettei energia esiinny murto-osina aivan kuten ei voida puhua puolen sentin kolikoistakaan. Hän julisti, että aallon pienin mahdollinen energia on verrannollinen sen taajuuteen ja käänteisesti verrannollinen sen aallonpituuteen.

Tätä tapaa soveltaen Planck sai uunin sisältämän energian rajalliseksi. Koska Planckin mukaan aallon minimienergia on verrannollinen sen taajuuteen, ja yhä suurempia taajuuksia tarkasteltaessa tulee ennen pitkää vastaan aallonpituus, jonka minimienergia ylittää aallon odotetun energiasisällön. Näin uunin kokonaisenergiaan vaikuttaa vain äärellinen määrä aaltoja, joten myös energia jää äärelliseksi.

Eliminoidessaan äärettömyyden Planck otti merkittävän askeleen eteenpäin. Hänen uusissa laskuissaan esiintyi vain yksi tuntematon vakio, jolle tarvitsi määrittää sopiva arvo, jotta uusin energiisisältö pystyttäisiin ennustamaan tarkasti missä tahansa lämpötilassa. Tämä vakio on aallon ja sen minimienergian verrannollisuuskerroin, jota nykyisin kutsutaan Planckin vakiona. Koska Planckin vakio on hyvin pieni luku, meistä tuntuu, että energiaa voidaan liikuttaa portaattomasti. Todellisuudessa ei kuitenkaan ole näin.

Kvantit ja kvantittuminen

Kun Planck teki urauurtavan oletuksensa energian siirtymisestä ”paketteina”, hänellä ei ollut sille mitään sen parempaa perustelua. Ei hän eikä kukaan muukaan tiennyt vakuuttavaa perustelua, miksi näin pitäisi olla. Oletus vain johti oikeaan lopputulokseen. Vuonna 1905 Einstein kuitenkin keksi selityksen, jonka ansioista hän sai vuonna 1921 fysiikan Nobelin.

Einstein päätyi selitykseensä, kun hän pohti niin sanottua valosähköistä ilmiötä. Jo 1800-luvun lopulla oli huomattu, että kun valo osaa tiettyihin metalleihin, niistä irtoaa elektroneja. Sinänsä tämä ei ole kovinkaan merkillistä. Metalleissa osa elektroneista on vain heikosti sitoutunut, siksi metallit johtavat niin hyvin sähköä. Metallipintaan osuva valo luovuttaa pintaan energiaa samaan tapaan kuin Auringon säteily lämmittää ihoa. Tämä metalliin siirtynyt energia voi saada osan heikosti kiinnittyneistä elektroneista irtoamaan kokonaan.

Valosähköisen ilmiön yllättävät piirteet tulevat esiin, kun irronneita elektroneja tutkitaan lähemmin. Äkkiseltään voisi kuvitella, että valon kirkkautta kasvattaessa myös irtoavien elektronien nopeus kasvaisi, koska metalliin osuvalla sähkömagneettisella aallolla on silloin enemmän energiaa. Näin ei kuitenkaan käy. Kasvattamalla valon kirkkautta saadaan vain irtoamaan enemmän elektroneja. Sen sijaan, kun valon taajuutta suurennetaan, saadaan elektronien nopeutta kasvatettua. Jos taajuutta pienennetään rajusti, tullaan lopulta tilanteeseen, jossa irtoavien elektronien nopeus on nolla. Elektroneja ei siis irtoa pinnasta vaikka valonlähde olisi sokaisevan kirkas.

Miten Einstein sitten selitti nämä hämmentävät havainnot? Sitä voisi valaista esimerkiksi Vuokraisäntä, joka vihaa lapsia, vaatii kaikkien alle 15-vuotiaden asuvan varaston kellarikerroksessa, jota kiertävältä parvekkeelta aikuiset voivat katsella alas. Yhtäkään kellarikerroksen lukemattomista lapsista ei päästetä ulos, ellei hän pysy maksamaan vartijalle neljän euron pääsymaksua. (Vuokraisäntä on todellinen raakalainen.) Aikuiset voivat antaa lapsilleen rahaa vain heittelemällä sitä parvekkeelta. Mitä mahtaa tapahtua?

Aluksi parvekkeelta heitellään kymmensenttisiä, mutta niillä ei ole ostettavissa ulospääsyä. On äärimmäisen epätodennäköistä, että joku kellarin lukemattomista, raivoisana mylläkkänä rahoista

tappelevista lapsista onnistuisi saamaan rahaa riittävästi ulospääsyä varten. Vaikka kymmensenttisiä heiteltäisiin kuinka paljon, ei yksittäisellä lapsella ole toivoakaan päästä kellarista pois. Sama pätee muihinkin pikkurahoihin. Vaikka aikuiset kuinka heittelisivät niitä alas, ei kukaan yksittäinen lapsi voi saada kokoon neljää euroa. Lapsi voi olla onnellinen, jos saa kalastettua edes yhden rahan. Useimmat eivät saa yhtään. Mutta kun parvekkeelta aletaan heitellä viiden euron seteleitä, vaikka vain yksi kerrallaan, ne onnelliset, jotka saavat rahan, voivat heti lähteä. On kuitenkin huomattava, että vaikka tämä aikuinen kaataisi alas tynnyreittäin kahisevaa, niin kellarista poispäässeitten lasten lukumäärä kasvaisi kyllä valtavasti, mutta yksittäiselle, poispäässeelle lapselle jäisi vaihtorahaksi kuitenkin vain euro. Tämä pätee heitettyjen viitosten lukumäärästä riippumatta.

Miten tämä sitten liittyy valosähköiseen ilmiöön? Edellä esitettyjen kokeellisten havaintojen pohjalta Einstein esitti, että valoa kuvattaisiin uudenaikaisella mallilla, johon sisältyisi ajatus aaltojen energian esiintymisestä paketteina. Einsteinin mukaan valonsädettä piti itse asiassa ajatella pienten pakettien virtana, fotoneina. Einstein ehdotti mikroskooppista mekanismia, johon valosähköinen ilmiö perustuisi: elektroni irtoaa metallipinnasta, jos siihen osuu riittävän suurienerginen fotoni. Saadakseen selitettyä koetulokset hän ehdotti, että yksittäisen fotonin energia on verrannollinen valoaaltojen taajuuteen (verrannollisuuskertoimena Planckin vakio).

Elektronit tarvitsevat pinnasta irrotukseen tietyn minimienergian, joka vastaa kellarissa olevilta lapsilta vaadittua pääsymaksua. Jos pintaan osuvan fotonin energia on liian pieni, se ei pysty ”potkaisemaan” elektronia vapaaksi. Siinä missä lapset eivät päässeet kellarista, huolimatta aikuisten heittämistä valtavista kolikkomääristä, elektroneja ei vapaudu metallista, huolimatta metalliin osuvan valon mahtavasta kokonaisenergiasta, jos valon taajuus (siis yksittäisen fotonin energia) on liian pieni.

Mutta samoin kuin lapsia alkoi päästä kellarista heti, kun rahaa pudoteltiin riittävän isoina yksiköinä, elektroneja alkaa irrota metallista heti, kun siihen osuvan valon taajuus tulee riittävän suureksi. Samoin kuin viitosten pudottelija kasvatti pudotettavaa rahasummaa seteleiden määrää kasvattamalla, tietyn taajuuden valon kirkkautta kasvatetaan lisäämällä fotonien kokonaismäärää. Samoin kuin jokaisella kellarista päässeellä lapsella oli mukanaan vain euro huolimatta siitä, kuinka paljon viitosia alas oli heitelty, pinnasta irronneilla elektroneilla on sama energia – ja siis sama nopeus – pintaan osuvan valon kirkkaudesta riippumatta.

Einsteinin ottama edistysaskel oli merkittävä, mutta aivan näin mutkatonta kvanttimekaniikka ei kuitenkaan ole.

Hullu kvanttimaailma

Kvanttimekaniikkaa on vielä vaikeampi sisäistää kuin suhteellisuusteoriaa. Eräs periaate, johon tiivistyy koko kvanttiajattelun ja klassisen ajattelun perusero, voi kuitenkin toimia intuition maamerkinä. Kyse on epätarkkuusperiaatteesta, jonka saksalainen fyysikko Werner Heisenberg keksi vuonna 1927.

Epätarkkuusperiaatteeseen joudutaan, kun halutaan määrittää jonkin hiukkasen paikka ja nopeus. Nämä mittaukset voidaan suorittaa valolla. Oikeastaan voisi sanoa, että kvanttimekaniikassa tasapainotellaan kahden pahan välillä. Jos halutaan saada selville hiukkasen tarkka nopeus, joudutaan käyttämään eli pienitaajuuksista (iso aallonpituus, vähäenerginen) valoa. Tällöin kuitenkin uhrataan paikan mittaustarkkuus, sillä hiukkasen paikka voidaan tietää vain yhden aallonpituuden tarkkuudella. Tämä johtuu siitä, että kun aalto heijastuu kohteesta, heijastus määrittää kohteen vain tietyllä rajallisella arvolla, joka on sama kuin aallon aallonpituus. Jos valon taajuutta kasvatetaan (pieni aallonpituus, suurienerginen), paikan epätarkkuus pienenee. Tällöin kuitenkin energiset fotonit luovuttavat energiaansa hiukkaselle, jolloin sen liiketila muuttuu ennalta arvaamattomalla tavalla. Hiukkasen paikka ja nopeus ovat kääntäen verrannollisia suureita: mitä tarkemmin toinen tiedetään, sitä epätarkemmaksi toisen mittaustarkkuus tulee.

Newtonin ja jopa Einsteinin teorioissa hiukkasen liikettä kuvataan antamalla sille täsmällinen paikka ja nopeus, mutta kvanttimekaniikka osoittaa, ettei näitä suureita voida mikrotasolla tuntea samanaikaisesti äärimmäisen tarkasti. Vaikka tässä onkin puhuttu vain hiukkasista, sama epätarkkuus pätee myös makroskooppisiin kappaleisiin. Emme siis voi koskaan tietää tarkalleen esimerkiksi heilurin nopeutta ja paikkaa samanaikaisesti. Sen sijaan voisimme piirtää siitä Gaussin käyrän, joka esittäisi heilurin sijainnin todennäköisyysjakaumaa. Tällöin heilurin todennäköisin paikka, eli Gaussin jakauman huippu, olisi kohtisuorassa maata kohti.

Epätarkkuusperiaatteeseen perustuu myös tunneloitumisena tunnettu hätkähdyttävä kvantti-ilmiö. Jos kumipallo heitetään metrien paksuista betoniseinää vasten, niin klassinen fysiikka ja intuitio kertovat samaa: se kimpoaa takaisin. Syynä on se, ettei pallolla yksinkertaisesti ole riittävästi energiaa sellaisen esteen läpäisemiseen. Mutta alkeishiukkasten tasolla kvanttimekaniikka osoittaa kiistattomasti, että pallolla on matala häntä, joka ulottuu seinän läpi. On siis olemassa pieni, mutta nolasta eroava todennäköisyys, että pallo itse asiassa meneekin seinän läpi. Miten tämä on mahdollista? Vastaus palautuu taas Heisenbergin epätarkkuusperiaatteeseen.

Epätarkkuusperiaatteen mukaan energian mittaustarkkuuden ja mittaukseen käytetyn aikavälin pituuden välillä vallitsee samankaltainen yhteys kuin hiukkasen nopeuden ja paikan välillä: molempia ei voida tietää äärimmäisen tarkasti samaan aikaan. Tämä merkitsee osapuilleen sitä, että hiukkasten

energia saa vaihdella rajusti, kunhan vaihtelut ovat riittävän lyhytaikaisia. Kvanttimekaniikka sallii hiukkasten lainata energiaa, kunhan ne palauttavat sen epätarkkuusperiaatteen määräämässä ajassa.

Kvanttimekaniikan yhtälöt osoittavat, että mitä korkeampi on energiavalli, sitä pienempi on tunneloitumisen todennäköisyys. Kun tarkastellaan makroskooppisia kappaleita, tunneloituminen on yhä mahdollista, vaikka se käykin hyvin epätodennäköiseksi, koska silloin kaikkien pallon hiukkasten pitäisi onnistua lainaamaan energiaa samanaikaisesti. Mutta periaatteessa sellaiset hämmästyttävät tapahtumat kuten seinän läpi käveleminen ovat mahdollisia.

Maalaisjärki ei millään suostu sisäistämään kvanttimekaniikan vaatimia muutoksia ajattelussa. Ei tunnu järkevältä ajatella, että jos pullo laitetaan jääkaappiin ja ovi kiinni, niin se ei välttämättä olekaan siellä sitten, kun ovi taas avataan. Vaikka meidän järkemme ei sitä voi käsittää, fysiikka ei ole ongelmassa, jos tällaista tapahtuisi. Sellaiset asiat, joita me pidämme itsestäänselvyyksinä – kuten kappaleiden täsmälliset paikat ja nopeudet ja täsmälliset energiat tietynä ajan hetkenä – osoittautuvat vain Planckin vakion pienuudesta johtuviksi näköharhoiksi.

Yleinen suhteellisuusteoria ja kvanttimekaniikka vastakkain

Yleistä suhteellisuusteoriaa sovelletaan tavallisesti suurissa, tähtitieteellisissä etäisyyskaaloissa. Tällaisissa skaaloissa kvanttiefektien merkitys käy niin vähäiseksi, että ne voidaan jättää täysin huomiotta. Joissain tilanteissa, esimerkiksi tutkittaessa mustaa aukkoa tai alkuräjähdyttä, nämä molemmat teoriat pitäisi yhdistää. Suhteellisuusteoria ei kuitenkaan sisällä kvanttimekaniikan epätarkkuusluonnetta, jolloin täysin järkevästi muotoilluista yhtälöistä saadaan hullunkurisia arvoja. Niiden mukaan jonkin tietyn tapahtuman todennäköisyys ei olisi 50 % tai 5 %. Yhtälöiden ratkaisuksi tulee äärettömyyksiä. Tämä on yleisen suhteellisuusteorian ja kvanttimekaniikan keskeinen ongelma. Fyysikot ovat monestikin yrittäneet muokata joko yleistä suhteellisuusteoriaa tai kvanttimekaniikkaa niin, että ristiriita vältettäisiin. Vaikka nämä yritykset ovat usein olleet kekseliäitä ja rohkeitakin, ovat ne kerta toisensa jälkeen epäonnistuneet surkeasti. Ainakaan vielä ei ole saatu fysiikan Rubikin kuutiota oikeaan järjestykseen.

Lähteet:

Greene, Brian. Kätkeyt ulottuvuudet. Tammi 2000.

Hawking, Stephen. Ajan lyhyt historia. WSOY 2000.

Hawking, Stephen. Maailmankaikkeus pähkinänkuoressa. WSOY 2003.

Kane, Gordon. Kvarkkitarha. Art House 1995.