

Suhteellisuusteoriasta, laskuista ja yksiköistä  
kvantti- ja hiukkasfysiikassa

Tapio Hansson

# Laskentoa

- ▶ SI-järjestelmä soveltuu hieman huonosti kvantti- ja hiukaksfysiikkaan.
- ▶ Sen perusyksiköiden mittakaava on arkipäivän ilmiöissä, joten kokoluokan mennessä häviävän piskuiseksi ja nopeuksien kasvaessa suhteellisuusteoreettisiksi SI-yksiköissä ilmoitetut luvut eivät ole havainnollisia eivätkä helppokäyttöisiä.
- ▶ Kvanttikokoluokassa myös esimerkiksi hiukkasten nopeudet kasvavat helposti suhteellisuusteoreettisen tarkastelun vaativalle tasolle, mikä tuo oman lisänsä laskujen haasteisiin.

# Massa

- ▶ Alkeishiukkasten maailmassa aineen ja energian ekvivalenssi on varsin arkinen tosiasia.
- ▶ Massallisen hiukkasen massan energia saadaan kertomalla se valonnopeuden neliöllä:

$$E = mc^2.$$

- ▶ Taulukkokirjat tuntevat hiukkasten niin kutsutut lepomassat, jotka on määritetty paikoillaan oleville hiukkasille.
- ▶ Suhteellisuusteorian mukaan "hiukkasen massa kasvaa" kun sen nopeus kasvaa, ja tämä massan kasvu estää hiukkasia koskaan kulkemasta yli valonnopeutta.

## Liikemassa

- ▶ Massan kasvu on itseasiassa vain ilmaus liike-energian kasvulle, sillä liike-energia ja massa ovat yhtäläisiä energiaa molemmat.
- ▶ Hiukkasen liikemassalla tarkoitetaan massaa, jota sen yhteenlaskettu liike-energia ja lepomassa vastaavat. Nopeudella  $v$  kulkevan hiukkasen liikemassa on

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

- ▶ Kaava  $E = mc^2$  kuvaa itseasiassa hiukkasen kokonaisenergiaa, kun massan paikalla on liikemassa.

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

# Massattomat hiukkaset

- ▶ Massattomat hiukkaset kulkevat aina valonnopeudella.
- ▶ Niiden energiat voivat kuitenkin vaihdella, esimerkiksi fotonin energia riippuu taajuudesta.
- ▶ Myös massattomille hiukkasille voidaan määrittää liikemassa joka saadaan energiasta

$$m = \frac{E}{c^2}.$$

- ▶ Massattomuus on itseasiassa pienempi ongelma kuin se, miksi joillain hiukkasilla on massa. Tähän pyrkii Higgsin teoria antamaan vastauksen. Teoria sai vahvistusta 2013 kun Higgsin bosoni löydettiin LHC-kiihdyttimellä.

# Yksiköt

- ▶ Valonnopeus on merkittävä tekijä korkeaenergisessä fysiikassa, joten tapana on asettaa valonnopeuden arvo ykköseksi, ja verrata muita nopeuksia siihen.
- ▶ Tällöin esim. pyöräilijän nopeus

$$8 \text{ m/s} = \frac{8}{299792458} c \approx 2,669 \cdot 10^{-8} c$$

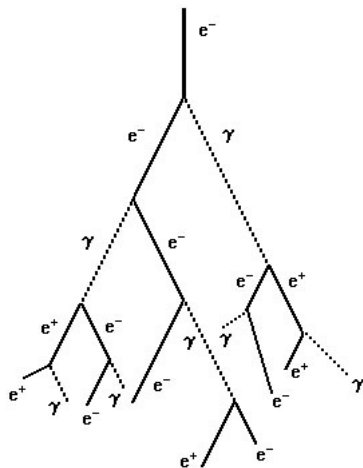
- ▶ Mutta toisaalta nopeahkon elektronin nopeus  
 $100 \text{ Mm/s} = 1 \cdot 10^8 \text{ m/s} \approx 0,33 c$ .

# Yksiköt

- ▶ Energian yksikkö on yleensä elektronivoltti (eV).
- ▶ Yksi elektronivoltti on liike-energia, jonka elektroni saa kun se kiihdytetään yhden voltin jännitteellä.
- ▶ Elektronivoltti voidaan muuntaa jouleiksi kertomalla luku alkeisvarauksella  $e = 1.6022 \cdot 10^{-19}$
- ▶ Massan yksiköksi tulee  $1 \frac{\text{eV}}{c^2}$ , mutta puheessa on tapana jättää valonnopeuden neliö pois ja sanoa, että esim. elektronin massa on 0.511 MeV.
- ▶ Liikemäärän yksiköksi tulee vastaavasti  $1 \frac{\text{eV}}{c}$  mutta siitäkin puhutaan yleensä vain elektronivolteina.

## Esimerkki: Kosminen elektroni

- ▶ Kosminen säteily koostuu suurella nopeudella avaruudessa kulkevista varatuista hiukkasista.
- ▶ Viereinen kaavio esittää kosmisen elektronin hajoamista sen saapuessa ilmakehään.
- ▶ Mitä kummallista kaavioon liittyy?
- ▶ Selitä miten tämä on mahdollista.





## Kosminen elektroni

- ▶ Yhdestä elektronista syntyy siis yhteensä kolme positronia, neljä elektronia ja kolme fotonia. miten tässä voi energia säilyä tai hiukkasluvut tai mitkään???
- ▶ Positronit hoitavat leptoniluvun säilymisen.
- ▶ Energia sen sijaan voi säilyä vain siinä tapauksessa, että alkuperäisellä elektronilla on huomattavasti liike-energiaa.
- ▶ Energian täytyy olla suurempi kuin seitsemän elektronin lepoenergia

$$7m_0c^2 = 7 \cdot 0.511 \text{ MeV}/c^2 \approx 3.6 \text{ MeV}/c^2.$$

- ▶ Hiukkasfysiikassa saadaan siis luotua raskaita hiukkasia antamalla olemassa oleville runsaasti kineettistä energiaa.

# Tehtäviä

- ▶ Lyhyt info ja muutama tehtävä hiukkasfysiikan yksiköistä:  
http:  
`//quarknet.fnal.gov/toolkits/ati/whatgevs.html`