

Kylmän ja tiheän QCD-aineen termodynamiikkaa

Matilda Marjamäki

FYS4006 Tutkielmaseminaari, lokakuu 2024

Kvanttiväridynamiikka (eng. Quantum Chromodynamics, QCD) on hiukkasfysiikan standardimallin vahvoja vuorovaikutuksia kuvaava teoria. Kvanttiväridynamiikkaa pyritään selittämään kvanttikenttäteorian tarjoamien työkalujen avulla. Tässä vahvoja vuorovaikutuksia kuvaavassa teoriassa nukleoneja, eli atomiytimen rakenneosia, ei käsitellä itsenäisinä, erillisinä objekteina, vaan aineen kokonaisrakennetta tarkastellaan vielä pienemmässä mittakaavassa. Voidaan myös huomata, että vahva vuorovaikutus on pitkälti analoginen sähkömagneettisen vuorovaikutuksen kanssa, mutta teoriat eivät ole kuitenkaan täysin yhteneviä. Kvanttiväridynamiikassa gluonit, eli niin kutsutut "liima hiukkaset", välittävät vahvaa vuorovaikutusta ja ovat itsessään varautuneita. Gluonit voivat näin ollen olla myös vuorovaikutuksessa keskenään. Sähkömagneettisen vuorovaikutuksen mittabosonit, fotonit, eivät kanna sähkövarausta eli ne eivät voi vuorovaikuttaa toistensa kanssa. Kvanttiväridynamiikassa kvarkkien ja gluonien välillä ilmenevät vuorovaikutukset, johtuvat näiden kantamista värivaruksista.

QCD:ssa tutkitaan siis aineen rakenteen erittäin pieniä osia ja niiden käyttäytymistä erilaisten ulkopuolisten olosuhteiden vallitessa. Vahva vuorovaikutus ilmenee äärimmäisissä olosuhteissa, kuten erittäin korkeissa lämpötiloissa tai suurella kemiallisella potentiaalilla. Tämä tarkoittaa, että QCD-ainetta ei voida suoraan havaita luonnossa ja näin ollen tarvitaan esimerkiksi laboratoriotutkimuksia tai teoreettisia työkaluja, jotta aineen rakenne pystyttäisiin määrittämään paremmin.

Nykyinen käsitys QCD-aineen rakenteesta tuodaan esiin faasidiagrammin avulla. Lämpötilan ja baryonien kemiallisen potentiaalin mukaan skaalattu faasidiagrammi on käytännöllinen tapa esittää QCD-aineen faasimuutoksia. Matalilla energioilla on sidottuja tiloja, joissa hiukkaset ovat vangittuina hadroneihin. Korkeilla energioilla tai lyhyillä etäisyyksillä hiukkasten vuorovaikutukset heikkenevät, jolloin kvarkkeja ja gluoneja voidaan mallintaa lähes vapaina hiukkasina. Tämä kvanttiväridynamiikan erityispiirre, jossa hiukkasten vuorovaikutukset heikkenevät korkean energian tai pienten etäisyyksien myötä, tunnetaan asympotoottisena vapautena.

Kokeellinen ja teoreettinen tutkimus ovat parantaneet käsitystämme QCD:n faasidiagrammista. Kokeellista tutkimusta tehdään pääasiassa hiukkaskiihdyttimillä, mutta viime aikoina on hyödynnetty myös lähestymistapaa, joka perustuu neutronitähdistä tehtyihin mittauksiin. Samanaikaisesti mittausten tueksi kehitetään teoreettisia menetelmiä. Teoreettiset menetelmät jaetaan karkeasti häiriöteoreettisiin ja ei-häiriöteoreettisiin menetelmiin.

Nykyinen tutkimus ei kykene vielä täysin määrittämään QCD-aineen faasidiagrammia. Haasteena on erityisesti tilanyhtälön tarkka laskeminen äärellisen kemiallisen potentiaalin ja matalan lämpötilan tapauksessa. Näissä olosuhteissa uskotaan esiintyvän niin kutsuttua kvarkkiainetta. Kvarkkiaineen määrittämiseksi käytetään erityisesti häiriöteoreettisia menetelmiä. Tulosten perusteella pyritään antamaan tilanyhtälö tälle vielä määrittelemättömälle kylmälle ja tiheälle aineelle.