

## 5. DOPPLER-ILMIÖ TÄHTITIEESSÄ

Valohiukkasilla ei ole Doppler-ilmiötä tähtitieteessä, mutta hiukkas-pulsseilla tällainen saattaa olla. On aivan yleistä, että pulssien taajuudet ja hiukkasten taajuudet sekoitetaan keskenään, ja toistaiseksi aina kun valohiukkasille on löydetty joko tavallinen tai suhteellisuusteoreettinen doppler-ilmiö, niin laskelmista on löydetty joku ajatteluvirhe. Kun doppler-ilmiön avulla päätellään, että osa kirkkaimmista E-galakseista pyörii hyvin hitaasti tai ei ollenkaan, niin tällainen ajatus ei ole ollenkaan mielekäs, koska pyöriminen on rakenteisuuden edellytys. Se, että osasta kirkkaimpia E-galakseja ei saada doppler-ilmiötä, täytyy päinvastoin ymmärtää erittäin voimakkaaksi todisteeksi sen puolesta, että doppler-ilmiötä ei esiinny tähtitieteessä, sillä pyörimätön litistynyt galaksi on todellakin täysin mahdoton ajatus. Valohiukkanen on aina sama valohiukkanen tähden tai galaksin liikkeestä riippumatta, minkä lisäksi tähtitieteen valohiukkaset ovat aina samanlaisia kuin fysiikan valohiukkaset.

Doppler-ilmiötä on tässä yhteydessä aihetta tarkastella hieman tavallista syvällisemmin ja aloitetaan yksinkertaisimmasta äänihiukkasten doppler-ilmiöstä. Tässä on kysymyksessä nimenomaisesti pulssiluonteinen ilmiö eikä aaltoliike, jonka doppler-siirtymälle saadaan seuraavat yhtälöt

$$f = f_0 / (1 - v/v_s) \quad \text{äänilähde lähestyy} \quad (5.1)$$

$$f = f_0 \cdot (1 + v/v_s) \quad \text{havainnoija lähestyy} \quad (5.2)$$

Näissä yhtälöissä  $f_0$  on äänen taajuus, kun sekä havainnoija että äänilähde ovat levossa väliaineen suhteen ja  $v_s$  on äänen ominaisnopeus väliaineessa = molekyylien hilajärjestelmä. Fysiikka on tähän asti ymmärtänyt äänen pulssien kuulemiseksi, mutta on jättänyt kokonaan selvittämättä, että ovatko itse äänihiukkasetkin erilaisia. Hyvä arvaus on, että myös äänihiukkaset ovat erilaisia. Tähän mahdolliseen äänihiukkasten kokoon eivät yhtälöt 5.1 ja 5.2 vaikuta millään tavoin, joten voidaan sanoa, että äänihiukkasten koolla on enintään marginaalinen vaikutus doppler-siirtymään. Eri suuruisten äänihiukkasten vaikutus äänen nopeuteen näyttääkin olevan samaa suuruusluokkaa  $10^{-8}$  kuin eri kokoisten valohiukkasten väliset nopeuserot.

Suhteellisuusteoreettinen ennuste doppler-siirtymälle on, kun lähde ja havainnointilaitte lähestyvät toisiaan nopeudella  $v$

$$f = f_0 \cdot (1 + v/c) / (1 - v^2/c^2)^{1/2} \quad (5.3)$$

$$= f_0 \cdot (1 + v/c)^{1/2} / (1 - v/c)^{1/2} \quad (5.4)$$

$$= f_0 \cdot (1 - v^2/c^2)^{1/2} / (1 - v/c) \quad (5.5)$$

Yleisessä muodossa viimeksi mainitusta saadaan

$$f = f_0 \cdot (1 - v^2/c^2)^{1/2} / (1 - v \cdot \cos \alpha / c) \quad (5.6)$$

missä  $\alpha$  on havainnointisuunnan ja havainnointikohteen suunnan välinen kulma. Arvolla  $\alpha=0$  saadaan yhtälö 5.5 ja arvolla  $\alpha=90^\circ$  saadaan

$$f = f_0 \cdot (1 - v^2/c^2)^{1/2} \quad (5.7)$$

jota kutsutaan poikittaiseksi doppler-efektiksi ("Transverse Doppler Effect").

Yhtälöiden 5.3 ... 5.7 muodostamisessa on jouduttu olettamaan, että avaruus on tyhjä, jolloin ei ole väliä liikkuuko kohde vai havainnoija, minkä lisäksi tietysti on oletettu, että sähkömagneettisella säteilyllä on vakionopeus  $c$  kaiken suhteen = eri suuntiin erilaisilla nopeuksilla kulkevien havaintolaitteiden suhteen. Viimeksi mainittu oletus on mieletön, eikä siitä ole löytynyt yhtään pitävää todistetta eikä tietysti pidäkään löytyä. Ensin mainittu oletus avaruuden tyhjiydestä on vain täysin väärin, sillä avaruuden täyttää gravitaatiokenttä, jota pitkin sähkömagneettiset pulssit etenevät samantapaisesti kuin äänihiukkasten pulssit etenevät molekyylien hilajärjestelmässä. Itse asiassa pienillä arvoilla  $v$  yhtälöstä 5.3 tulee juuri ääniyhtälö 5.2 ja yhtälöstä 5.5 tulee ääniyhtälö 5.1. Eräissä tapauksissa yhtälöillä 5.3 ... 5.7 saadut tulokset näyttävät oikeilta, mutta yleinen syy tähän on, että hiukkasen liikkuessa gravitaatiokentän suhteen, sen taajuus muuttuu juuri yhtälön 5.7 osoittamalla tavalla ja tämä on selvitetty fysiikan kohdassa 7A.4. Jo vuonna 1889 Fitzgerald ja erikseen vuonna 1892 Lorentz esittivät, että on olemassa tekijä

$$\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \quad (5.8)$$

mikä vaikuttaa mittaustuloksiin. Menemättä yksityiskohtiin etsimisen syistä ja matematiikasta todetaan, että he löysivät oikean ja tärkeän fysiikan kertoimen, mikä täsmäsi eräisiin tärkeisiin kokeellisen fysiikan tuloksiin. Tämä kerroin 5.8 löytyi siis paljon ennen suhteellisuusteorioita ja peruslähtökohtia tarkastellen tällä ei ole mitään tekemistä suhteellisuusteorian kanssa, paitsi että suhteellisuusteorian oli pakko ottaa tämä kerroin muodollisesti käyttöön.

Edellä esitetyn mukaisesti sähkömagneettisille hiukkaspulssille tulee yksiselitteisesti päteä yhtälöiden 5.1 ja 5.2, joiden mukaisella periaatteella toimii myös tuttu tutka. Yksittäisille valohiukkasille nämä yhtälöt eivät kuitenkaan päde ja yksittäisen valohiukkasen muuttumaton mitta voidaan ilmoittaa matkana  $n$  kappaletta gravitaatiokentän soluja. Sähkömagneettisilla pulsseilla se on doppler-ilmiössä nimenomaisesti tämä luku  $n$ , mikä muuttuu ja tämä asia on juuri pulssien ja yksittäisten hiukkasten välinen ratkaiseva ero sekä taajuuksissa että aallonpituuksissa.

Valohiukkanen on aina sama valohiukkanen riippumatta havainnointilaitteen tai valonlähteen nopeuksista, mutta valohiukkasenkin tapauksessa on huomioitava, että liikkuuko mittauskenttä mittalaitteen mukana vai ei. Mikäli mittauskenttä liikkuu mittalaitteen mukana, niin tällöin aallonpituus ja taajuus säilyvät ennallaan, mutta tämän lisäksi valohiukkasella näyttää olevan nopeus  $c$  mittalaitteen suhteen. Tämä on hyvin tärkeä kohta, joten kerrataan se vielä: jos valohiukkasen ja mittalaitteen välinen nopeusero oli mittalaitteen ulkopuolella  $c + x$ , niin em. tapauksessa mittalaitteen mittaama nopeus onkin  $c$ . Jos mittauskenttä ei liiku mittalaitteen mukana, niin aallonpituus muuttuu, mutta taajuus sekuntia kohti säilyy ennallaan. Tässä jälkimmäisessä tapauksessa mittalaite mittaa nopeuden  $c + x$ . Valohiukkanen on kuitenkin aina sama muuttumaton valohiukkanen. Valohiukkasille ei siis ole luonteensa puolesta minkäänlaista doppler-siirtymää liikkuvan valonlähteen suhteen ja tämä tieto on tietysti tähtitieteelle tärkeä asia, koska tällöin valohiukkasen koko määräytyy paikallisista olosuhteista, mitkä siis tällä tavalla saadaan ainakin osittain selville.

Yhtälön 5.2 mukaisessa tapauksessa mittalaite liikkuu gravitaatiokentän suhteen nopeudella  $v$  ja yksinkertaisilla nopeusvektorilaskelmilla saadaan fysiikan kohdan 7A.4 mukaisesti hiukkasen värähdystiheyden riippuvuudeksi nopeudesta  $v$

$$f = f_0 \cdot (1 - v^2/c^2)^{1/2} \quad (5.9)$$

Kokeellinen fysiikka osoittaa tuloksen 5.9 oikeaksi useilla eri tavoilla alkaen yksinkertaisimmillaan atomikelloista. Avaruuteen liittyvänä esitetään tässä yhteydessä myönnytys (esim. Alonso: Physics, s. 494).

Myoni ja pioni ovat a-kvarkin perusalkioryhmiä siten, että  $a = 4$   $\pi = 3$   $\mu = 35$  MeV, jolloin käänteisenergiana  $\mu = 105$  MeV ja  $\pi = 140$  MeV. Kun a-kvarkki on perusrakenneryhmä protoneissa ja gravitaatiokentässä, niin tämän takia  $\mu$  ja  $\pi$  ovat yleisiä hiukkastörmäyskokeissa ja tämän takia ne liukenevat gravitaatiokenttään. Myonin elinikä eli aika, jonka jälkeen myoneista on puolet jäljellä on laboratoriossa  $1,5 \cdot 10^{-6}$  s. Myonit syntyvät noin 60 km korkeudella ilmakehässä ja liikkuvat maapallon pintaa kohti lähes valohiukkasten nopeudella. Laboratorioelinajassa niistä pitäisi tulla maan pinnalle  $1/10^{40}$  -osan, mutta niitä tulee paljon enemmän. Tämä voidaan ymmärtää siten, että keskimäärin joka värähdyksessä osa myonista pilkkoutuu gravitaatiokenttään ja kun värähdysnopeus alenee yhtälön 5.9 mukaisesti, niin tullaan juuri oikeaan suuruusluokkatulokseen. Tämä asia ei ole yhtään tämän kummallisempi ja ajan kulun suhteen on idealtaan väärin kääntää yhtälö 5.9 ”ylösalaisin”, jolloin saadaan, että aika pitenee, kun värähdysaika pitenee, mutta ei tästä todellinen aika miksikään muutu, vaan on aina sama tasainen Newtonin muuttumaton aika.

Tulos 5.9 on myös suoraan suhteellisuusteoreettinen yhtälö 5.7 kohtisuoralle doppler-ilmilölle (”Transverse Doppler”). Tämän sanotaan olevan puhtaasti suhteellisuusteoreettinen ilmiö, jolla ei ole vastinetta klassisessa fysiikassa. Tämä on täysin väärin, sillä kysymyksessä on puhtaasti klassisen fysiikan ilmiö, jolla ei ole mitään tekemistä suhteellisuusteorian kanssa. Hyvä esimerkki on tunnettu Kundigin koe vuodelta 1963 (esim. Halliday: Physics, s. 897), missä keskellä olevan gammasäteilijän ympärillä pyöri absorboiva levy ja sen takana oli säteilyn mittalaite. Tämä koe antoi täsmälleen yhtälöiden 5.9 ja 5.7 mukaisia tuloksia, mutta koska absorptio on verrannollinen absoptioaikaan, niin tulos 5.9 on oikein pitäen vielä mielessä, että hiukkaset ovat aina samanlaisia ja niitä lähtee koko ajan yhtä paljon. Absorptiossa on kuitenkin huomattava, että on olemassa kaksi absorboivaa erilaista kenttää (N ja 1/N) ja kun toisen kentän suhteellinen elinikä kasvaa, niin toisen luonnollisesti pienenee. Mikäli värähdysluku eikä kentän elinaika määrää absorption, niin tässä tapauksessa molemmat kentät reagoivat samalla tavalla. Liikkuvan säteilynlähteen suhteen tilanne on taas toinen, koska liike gravitaatiokentän suhteen voi lisätä säteilyä, kuten mahdollisesti juuri Poundin tunnetuissa kokeissa on voinut käydä (Misner: Gravitation, s. 1056).

Lopuksi yhteenvetona ja kertauksena todetaan vielä edellä esitetyn mukaisesti, että valohiukkasella ei tähtitieteessä ole minkäänlaista doppler-siirtymää säteilynlähteen suhteen, mutta sen sijaan pulssiluonteisilla hiukkasilmiöillä tällainen on. Jos taas mittalaite liikkuu gravitaatiokentän suhteen, niin sen atomin taajuus muuttuu yhtälön 5.9 mukaisesti. Tällä ja mittauskentän todellisella nopeudella on erilaisia vaikutuksia erilaisilla hiukkasilla ja erilaisilla mittausmenetelmillä, joista vaikutuksista vain osa liittyy doppler-siirtymiin ja osalla ei ole tekemistä doppler-siirtymien kanssa. Tämän tähtitieteen kohdan 5 tärkein tulos ja yksiselitteinen informaatio on: valohiukkasella ei ole tähtitieteessä doppler-ilmiotä liikkuvan tähden suhteen.