

Onko Centaurus A erittäin korkeaenergisten kosmisten säteiden lähde?

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2025
Sara Thessler
Tarkastaja:
Dos. E. Lindfors

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Thessler, Sara Onko Centaurus A erittäin korkeaenergistien kosmisten säteiden lähde?

LuK-tutkielma, 20 s., 3 liites.

Fysiikka

Toukokuu 2025

Maan ilmakehään saapuu kosmisia säteitä kaikista suunnista avaruudesta. Kosmiset säteet yleensä luokitellaan kolmeen eri energialuokkaan. Kosmisia säteitä, joiden energiat ylettyvät noin 10^{18} eV:ista jopa yli 10^{20} eV:n energioihin, kutsutaan erittäin korkeaenergisiksi kosmisiksi säteiksi. Useista tekijöistä johtuen näiden saapuvien kosmisten säteiden alkuperää ei edelleenkään tunneta.

Tässä tutkielmassa tarkastellaan erityisesti näiden erittäin korkeaenergistien kosmisten säteiden mahdollisia alkuperiä. Tutkielman tavoitteena on etsiä vastaus kysymykseen, onko Centaurus A erittäin korkeaenergistien kosmisten säteiden lähde, tarkastelemalla kosmisten säteiden ominaisuuksia ja niiden mahdollista alkuperää rajoittavia tekijöitä.

Vastausta etsitään analysoimalla keskeisimpiä erittäin korkeaenergistien kosmisten säteiden ominaisuuksia, kuten hiukkasten ratojen kaartuminen magneettikentissä ja energiahäviöt. Lisäksi käsitellään alkuperää rajoittavia tekijöitä kuten mahdollisen alkuperän kykyä kiihdyttää hiukkaset tarvittavan korkeille energioille ja alkuperän etäisyyttä.

Kosmisten hiukkasten ominaisuuksia ja alkuperää rajoittavia tekijöitä verrataan Centaurus A:n tunnetuihin ominaisuuksiin, jotta voidaan määrittää Centaurus A:n todennäköisyys olla näiden kosmisten säteiden lähde. Tähän mennessä tehtyjen havaintojen ja kerätyn datan mukaan Centaurus A täyttää monet vaadittavat ehdot. Se on esimerkiksi optimaalisella etäisyydellä ja sen hiukkassuihkut näyttäisivät kykenevän kiihdyttämään hiukkaset riittävän korkeille energioille.

Asiasanat: Kosmiset säteet, UHECR, ilmasuihkut, alkuperän määrittäminen, Centaurus A

Sisällys

| | |
|--|-----------|
| Johdanto | 1 |
| 1 Kosmiset säteet ja hiukkaset | 1 |
| 1.1 Kosmiset hiukkaset ja niiden energiaspektri | 1 |
| 1.2 Kosmiset hiukkaset Maan ilmakehässä | 3 |
| 2 Korkeaenergisten hiukkasten tutkiminen | 6 |
| 2.1 Kosmisten hiukkasten havainnointi | 6 |
| 2.2 Korkeaenergisten säteiden lähtöpisteen määrittäminen | 8 |
| 2.3 Energiahäviön vaikutus hiukkasten alkuperän määrittämiseen | 12 |
| 3 Centaurus A korkeaenergisten säteiden lähteenä | 14 |
| 3.1 Centaurus A ja sen tuottamat säteet | 14 |
| 3.2 Onko Centaurus A kosmisten säteiden lähde vai ei? | 15 |
| 4 Yhteenveto | 17 |
| Viitteet | 19 |

Johdanto

Kosmisia säteitä on tutkittu vuodesta 1912 lähtien. Ensimmäiset erittäin korkeaenergiset kosmiset hiukkaset havaittiin vuonna 1962 [1][2][3]. Säteiden alkuperä on edelleen säilynyt avoimena kysymyksenä, johon pyritään aktiivisesti löytämään vastaus. Kiinnostus johtuu siitä, että mahdollisen alkuperän on oltava erittäin tehokas hiukkaskiihdytin eli pystyä kiihdyttämään hiukkaset $10^{18} - 10^{20}$ eV:iin tai jopa korkeammille energioille.[4][5]

Yksiselitteistä ja varmaa vastausta mahdolliselle alkuperälle ei ole vielä löydetty, mutta jatkuva tutkimus ja kehittyvät havaintolaitteistot ovat mahdollistaneet hiukkasten ominaisuuksien ja mahdollista alkuperää rajoittavien tekijöiden määrittämisen. Näiden avulla mahdollisten alkuperien joukosta Centaurus A on noussut suosituimmaksi ja todennäköisimmäksi kosmisten säteiden lähteeksi.[4][6]

Tässä tutkielmassa tutustutaan erittäin korkeaenergisiiin kosmisiin säteisiin, niiden ominaisuuksien määrittämiseen ja alkuperää rajoittaviin tekijöihin. Niiden pohjalta pyritään vastaamaan kysymykseen: onko Centaurus A erittäin korkeaenergistien kosmisten säteiden lähde? Tutkielmassa on käytetty tekoälyä lähteiden ja käsitteiden selkeyttämiseen ja ymmärtämiseen.

1 Kosmiset säteet ja hiukkaset

1.1 Kosmiset hiukkaset ja niiden energiaspektri

Kosmiset säteet ovat Maan ilmakehään avaruudesta saapuneita hiukkasia. Saapuvat kosmiset hiukkaset ovat atomia pienempiä varauksellisia hiukkasia, yleensä protoneja tai elektroneja [4]. Kosmiset hiukkaset jaetaan yleisesti kolmeen eri energialuokkaan: erittäin korkeaenergiset kosmiset hiukkaset (eng. *Ultra High Energy Cosmic Rays, UHECR*), hyvin korkeaenergiset kosmiset hiukkaset (eng. *Very High Energy Cosmic Rays, VHECR*) ja matalaenergiset kosmiset hiukkaset (eng. *Low Energy Cosmic*

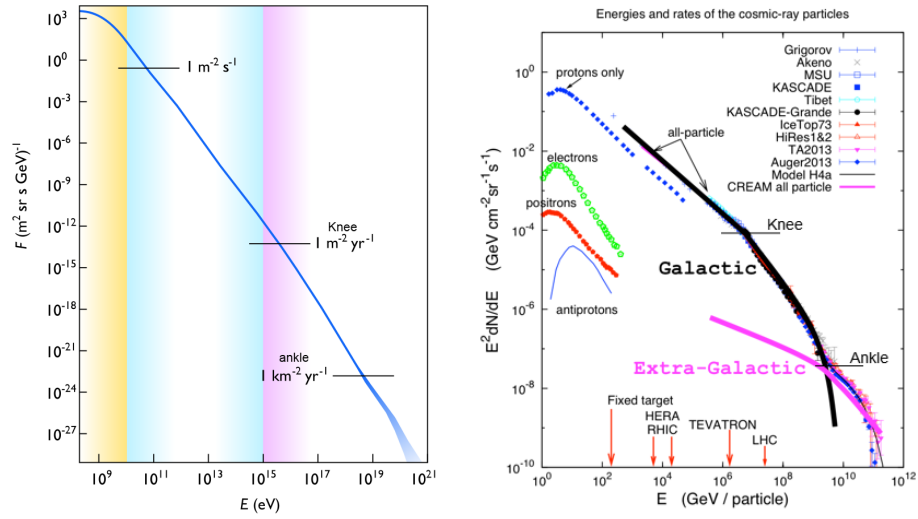
Rays, LECR) [4][7]. Kuvassa 1 on kuvaaja kosmisten hiukkasten energiaspektristä ja energian kasvamisen vaikutuksesta hiukkasten vuohon eli niiden saapumistiheyteen.

Matalaenergiisiin kosmisiin säteisiin kuuluvat ne, jotka ulottuvat korkeintaan GeV energioille ja ne koostuvat yleensä protoneista [8]. Matalaenergiset kosmiset säteet ovat peräisin Auringosta ja tärkeitä planetaarisen systeemin muotoutumisessa [7]. Matalaenergiset hiukkaset on merkitty kuvassa 1a) keltaisella värillä. Kuvasta voidaan myös nähdä niiden saapumistiheys, joka on noin 1 hiukkanen sekunnissa [s] per neliometri [m²].

Hyvin korkeaenergisien kosmisen säteilyn energiaspektri ylettyy 10¹¹ eV:sta 10¹⁸ eV:tiin. Energiaspektri asettuu erittäin korkeaenergistien ja matalaenergistien kosmisten hiukkasten energiaspektrien väliin [1]. Kuvassa 1a) tämä energia-alue on merkitty sinisellä ja liilalla. Kuvasta huomataan myös saapumistiheyden harveneminen hiukkasten energian kasvaessa. Molemmassa kuvan 1 kuvissa on nähtävissä energiaspektrin kuvaajan huomattava jyrkkeneminen, joka on nimetty polveksi (eng. *knee*). Myöhemmin kuvaaja loivenee uudelleen niin sanotun nilkan (eng. *ankle*) kohdalla.

Tämän tutkielman aiheelle merkittävimpiä ovat erittäin korkeaenergiset kosmiset säteet. Erittäin korkeaenergistien kosmisten säteiden energiaspektri alkaa noin 10¹⁷ eV:n ja 10¹⁸ eV:n kohdalta ylettyen 10²⁰ eV:iin. Energiaspektrin on havaittu yltävän myös 10²⁰ eV:in yli [2][3][4]. Kuvassa 1a) erittäin korkeaenergiset hiukkaset on merkitty liilalla. Niiden vuo on alhainen alkaen yhdestä hiukkasesta vuodessa [yr] per neliometri [m²] muuttuen noin 10¹⁹ eV:n kohdalla yhteen hiukkaseen vuodessa [yr] per neliökilometri [km²].

Kosmisiä hiukkasia saapuu Maahan linnunradan sisä- ja ulkopuolelta. Linnunradan sisä- ja ulkopuolisten kosmisten hiukkassäteiden energiaspektrien raja on noin 0,1 – 10 EeV:n välillä [4]. Hiukkasten oletetun tulosuunnan raja Linnunradan sisäpuolelta (eng. *Galactic*) Linnunradan ulkopuolelle (eng. *Extra-Galactic*) on nähtävissä erityisesti kuvassa 1b). Tässä tutkielmassa käsitellään korkeaenergisimpiä kos-



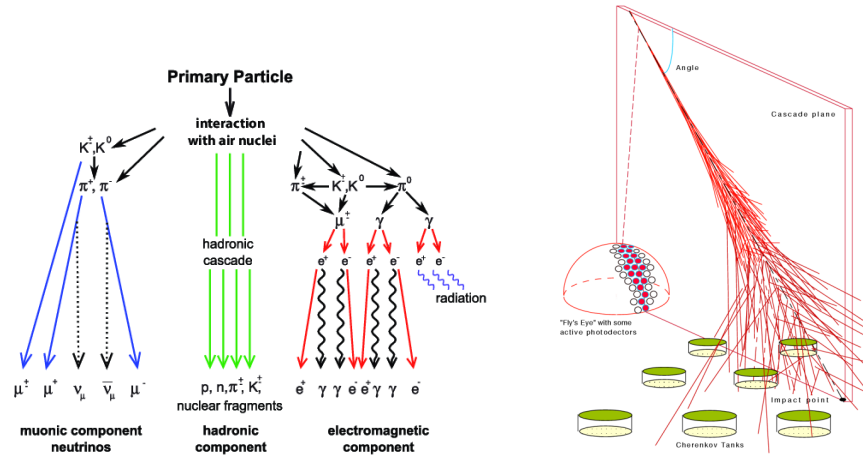
Kuva 1. a) Kosmisten hiukkassäteiden spektri eli vuo niiden energian funktiona. Keltaisella on merkitty matalaenergiset, sinisellä ja lilalla on merkitty hyvin korkeaenergiset kosmiset säteet. Lilalla on merkitty myös erittäin korkeaenergiset kosmiset säteet. Kuvaajassa on myös merkitty hiukkasten saapumistiheys. [9][10][11] b) Sama kuvaaja kuin a) kuvassa, mutta kuvassa on havaitut hiukkaset, niitä tutkivat observatoriot ja satelliitit sekä hiukkasten todennäköisen alkuperän muutoksen Linnunradan sisäpuolelta Linnunradan ulkopuolelle. Spektrin jyrkkeneminen on nimetty polveksi (eng. *Knee*) ja loiveneminen nilkaksi (eng. *Ankle*). [12]

misiä hiukkasia, jotka ovat peräisin Linnunradan ulkopuolelta. Niiden tarkempaa alkuperää ei kuitenkaan tunneta.

Kosmiset säteet voivat tuoda lisää tietoa universumin äärimmäisimmistä tapahtumista ja prosesseista. Lisäksi ne voivat edistää hiukkasfysiikkaa, sillä niiden saavuttamat energiat ylittävät kaikki ihmisrakenteiset hiukkaskiihdyttimet [4]. Erittäin korkeaenergistien kosmisten hiukkasten vuo tihentymien havaitseminen auttaisi paikantamaan luonnolliset, avaruudessa sijaitsevat hiukkaskiihdyttimet [5].

1.2 Kosmiset hiukkaset Maan ilmakehässä

Korkeaenergistien kosmisten säteiden havainnointi perustuu laajojen ilmasuihkujen (eng. *Extensive Air Showers, EAS*) havaintoihin [3][4]. Laajoiksi ilmasuihkuiksi kutsutaan ilmiötä, jossa kosmiset säteet törmäävät ilmakehään ja vuorovaikuttavat sen molekyylien kanssa. Kosmiset hiukkaset osuvat molekyylien ytimiin muodostaen



Kuva 2. a) Kaavio laajoista ilmasuihkusta, josta nähdään kaikki ilmasuihkuissa muodostuvat hiukkaset. Ilmasuihkuista havaitaan 3 eri komponenttia: myoni komponentti, hadroni komponentti ja sähkömagneettinen komponentti. [13] b) Pierre Augerin observatorion hybridijärjestelmää (Fly's eye ja Cherenkovin tankit) illustroiva kuva ilmasuihkujen havaitsemisesta. Kuvassa myös nähdään ilmasuihkun hiukkasten hajaantumisen verrattuna alkuperäisen hiukkasen tulosuuntaan. Koska ilmasuihkun hiukkaset leviävät laajalle alueelle, havaintolaitteen tankit on levitettävä laajalle alueelle. Cherenkovin tankit on levitetty 3000 km² alueelle. [14]

uusja sekundäärihiukkasia ja muita komponentteja kuvan 2a) kaavion mukaisen ketjureaktion seuraksena. Kaaviosta nähdään hiukkasten törmäyksissä muodostuvan mesoneita (esim. myoni), hadroneita (esim. protoni) ja leptoneita (esim. elektroni, positroni), jotka edelleen hajoavat, törmäävät tai parimuodostavat uusia hiukkasia. Syntyneet hiukkaset leviävät hyvin suurille pinta-aloille [2][13]. Kuvassa 2b) on illustraatio ilmasuihkujen havainnoinnista Augerin havaintolaitteilla (enemmän kappaleessa 2.1).

Maan pinnalla kaikki kosmisten hiukkasten havainnot perustuvat niiden muodostamien ilmasuihkujen havaintoihin. Laajat ilmasuihkut ovat ainoa tapa tutkia kosmisiä säteitä, sillä todennäköisyys vuorovaikutukseen ilmakehän molekyylien kanssa on niin suuri, etteivät itse kosmiset hiukkaset pääse maanpinnalle asti. Korkeanenergisiä kosmisiä hiukkasia myös saapuu hyvin vähän Maan ilmakehään, mitä suurempi niiden energia sitä harvemmin niitä saapuu. Tätä kuvaa hiukkasten vuontiheyden putoaminen kuvan 1 kuvaajissa. Koska kosmisiä hiukkasia saapuu harvoin

ja niiden muodostamat ilmasuihkut leviävät hyvin laajoille alueille, tarkkojen ja yksityiskohtaisten havaintojen tekeminen on täysin mahdotonta. Kuvan 2b) illustraatioissa näkyy hyvin ilmasuihkun osuminen havaintolaitteisiin. Ilmakehään osuvien kosmisten hiukkasten energia vaikuttaa myös ilmasuihkussa hiukkasten määrään ja alaan, jolle hiukkaset leviävät. Esimerkiksi ilmasuihkussa, jonka aiheuttaneen kosmisen hiukkasen energia on 10^{15} eV, on suurinpiirtein 10^6 hiukkasta levittyneenä 10^4 m²:n alueelle. Jos kosmisen hiukkasen energia on 10^{20} eV, sen aiheuttamassa ilmasuihkussa hiukkasia on noin 10^{11} levittyneenä 10 km²:n alueelle.[2]

Havaituista ilmasuihkuista saadaan arvioitua erittäin korkeaenergistien hiukkasten ominaisuuksia. Ilmasuihkuista tehdyillä havainnoilla saadaan tietoa esimerkiksi hiukkasten mahdollisesta tulosuunnasta, energiasta ja hiukkaslajeista. Ilmasuihkuista saatuja arvioita ja hiukkasten ominaisuuksia ei kuitenkaan voida suoraan käyttää hiukkasten lähteen selvittämiseen, sillä niihin vaikuttavat myös energiahäviöt ja suunnanmuutokset, jotka tapahtuvat ilmakehässä ja matkalla lähtöpisteestä Maapallolle.[4]

Ilmasuihkujen ja korkeaenergistien hiukkasten havaitsemisessa tärkeänä osana "mittalaitetta" on myös Maan ilmakehä. Ilmakehän ansiosta saapuvien hiukkasten energia voidaan mitata, koska ilmakehä toimii eräänlaisena mittalaitteen kalorimetrimina (eng. *calorimeter*). Lisäksi ilmakehän ominaisuuksia on tarkkailtu vuosikymmeniä ja ne tunnetaan jo hyvin yksityiskohtaisesti, mikä mahdollistaa laajojen ilmasuihkujen tarkan mallintamisen ja systemaattisten virheiden poistamisen saaduista havainnoista.[1]

Ilmakehän lisäksi hiukkasten havaittuihin energiaspektreihin vaikuttavat hiukkasten matkalla lähtöpisteestä Maapallolle kohtaamat magneettikentät ja fotonikentät. Maan pinnalla havaitut energiat ovat mahdollisesti vain murto-osa hiukkasten saavuttamista alkuperäisistä energioista [3]. Energiaspektristä ja siihen vaikuttavista tekijöistä puhutaan enemmän kappaleessa 2.3.

2 Korkeaenergisten hiukkasten tutkiminen

2.1 Kosmisten hiukkasten havainnointi

Ensimmäiset havainnot kosmisista säteistä teki Victor Hess vuonna 1912 kuumailmapallostasta. Tuolloin havaitut hiukkaset olivat matalaenergisiä [1][2]. Nykyisin matalaenergisiä hiukkassäteitä on tutkittu paikallisesti Voyager 1 ja 2 satelliiteilla [7]. Korkeaenergisten hiukkassäteiden tutkiminen alkoi vuonna 1962, kun havaittiin ensimmäiset hiukkaset, joiden energia oli noin 10^{20} eV. Tuolloin kokeellinen havainto oli osa kosmisten hiukkasten ja säteiden tutkimista laajoissa ilmasuihkuissa.[3]

Korkeaenergisten ja erittäin korkeaenergisten hiukkasten tutkiminen jatkuu aktiivisesti Pierre Augerin observatoriossa (eng. *The Pierre Auger Observatory, Auger*) Argentiinassa sekä USA:ssa sijaitsevassa teleskooppiryhmä projektissa (eng. *Telescope Array Project, TA*) [3][4]. TA projektissa ja Augerissa on myös matalan energian (TA:lla alin saavuttaa $10^{16,5}$ eV ja Augerilla alin on $10^{15,8}$ eV) hiukkasten tutkimiseen tarkoitettu laajennus [4][6][15]. Havaintoja korkeaenergisistä hiukkasista on tehnyt myös AGASHA, Yakutsk ja HiRes, mutta Auger ja TA ovat viimeisimmät ja kehittyneimmät.[5]

Pierre Augerin observatoriolla korkeanenergisten hiukkasten havaitsemisessa on yhdistetty kaksi menetelmää: suuri pinta-havaintolaite (eng. *Surface Detector, SD*) ja fluoresenssi-havaintolaite (eng. *Fluorescence Detector, FD*). Nämä ovat nähtävissä myös kuvassa 2b). Hybridi-järjestelmässä molemmat havaintolaitteet havaitsevat ilmasuihkuja täydentäen toistensa havaintoja. Periaatteena on käyttää molempia havaintolaitteita tutkimaan samoja asioita täysin erilaisilla menetelmillä. Menetelmissä on täysin erilaiset systemaattiset virheet, jolloin vertaamalla tuloksia ristiin saadaan yhteneville tuloksille suurempi varmuus.[16]

SD-havaintolaite koostuu kahdesta eri järjestelmästä: perusjärjestelmästä ja pienemmästä järjestelmästä. Perusjärjestelmä koostuu 1660:stä Cherenkov-havainto-

laitteesta, jotka on asetettu kolmiomaiseen muotoon niin, että vierekkäisten havaintolaitteiden välissä on 1500 m. Pienemmän järjestelmän havaintolaitteiden välissä on noin 750 m. Järjestelmän kokonaispinta-ala on noin 3000 km² ja koko alue on keskimääräisesti 1400 m korkeudella merenpinnasta. Hiukkasia havaitaan aktiivisesti koko vuorokauden ajan. Cherenkov-havaintolaitteet ovat kestäviä, mutta herkkiä sähkömagneettisille hiukkasille (esim. elektroneja ja fotoneja) ja myoneille (elektronin kaltaisia alkeishiukkasia). Cherenkov-havaintolaitteet ovat vesisäiliöitä, joiden sisällä on valomonistinputkia (eng. *Photonmultiplier Tube, PMT*). Nämä valomonistinputket havaitsevat Cherenkov-säteilyä, joka syntyy ilmasuihkussa syntyneen hiukkasen matkustaessa väliaineessa (tässä tapauksessa vedessä) nopeammin kuin paikallinen valonnopeus. Säteily muunnetaan sähköiseksi signaaliksi, josta voidaan analysoida ilmasuihkujen ominaisuuksia.[16]

FD-havaintolaitteen päätarkoitus on mitata SD-havaintolaitteen tallentamien hiukkassuihkujen pitkittäistä kehittymistä, eli hiukkassuihkun muutosta ilmakehässä. FD-havaintolaite toimii aina yhdessä SD-havaintolaitteen kanssa. Varautuneet hiukkaset (sähkömagneettiset komponentit) virittävät ilmakehän molekyylit. Tämän varauksen purkautuessa syntyy säteilyä, jota kutsutaan fluoressivaloksi. FD-havaintolaite, eli Fluoresenssi-havaintolaite, havaitsee hiukkassuihkun sähkömagneettisten komponenttien (yleensä elektronit ja fotonit) vuorovaikutusta ilmakehässä olevien molekyylin kanssa eli varauksen purkautumisessa syntyvää fluoressivaloa. Fluoressivalo säteilee sähkömagneettisen säteilyn spektrin ultravioletti-alueella. Se on hyvin heikkoa, mikä rajoittaa sen havaitsemisen pimeisiin öihin hyvällä säällä. Mahdollisuus havaita fluoressivaloa on pystytty kasvattamaan 12 %:sta 15 %:in koko ajasta.[16]

Augerin ja TA:n saamien tuloksien välillä on pieniä eroja, joiden syitä yritetään selvittää ja ymmärtää. TA:lla ja Augerilla on yhteinen työryhmä, joka vertailee suhteellisia eroja tuloksien välillä [5]. TA käyttää eri havaintotekniikkaa perus-

tuen maanpäällisiin skintillaatio- eli tuikkimishavaintolaitteisiin. Skintillaatiohavaintolaitteet reagoivat ainoastaan sähkömagneettisiin komponentteihin, jolloin myonit jäävät huomioimatta. Tämän takia TA:n määrittämien tuloksien avulla on tarkoituksena pystyä erottamaan myonien tuottamat tulokset Augerin saamista tuloksista [15]. Augeria ja TA:ta kehitetään jatkuvasti, jotta erittäin korkeanenergisistä hiukkassäteistä saataisiin enemmän informaatiota [4].

Laajojen ilmasuihkujen havainnoista pyritään määrittämään Maahan saapuvien erittäin korkeaenergistien hiukkasten anisotropia, energiaspektri ja massakoostumus. Anisotropia tarkoittaa yleisesti hiukkasten saapumista epätasaisesti eri suunnista. Anisotropian ja dipolianisotropian merkitys lähtöpisteen määrittämisessä käsitellään tarkemmin kappaleessa 2.2. Energiaspektreista puhuttiin jo kappaleessa 1.1. Ne auttavat ymmärtämään hiukkasten etenemisen ja kiihtymisen toimintaperiaatetta ja siten alkuperää. Massakoostumus kertoo, mistä hiukkasista säteet muodostuvat. Ilmasuihkuille määritetään myös mittausvyvyys [g/cm^2], eli kuinka syvälle ilmakehään hiukkassuihkut tunkeutuvat ennen kuin ne saavuttavat intensiteetinsä. Intensiteetinsä tarkoittaa tilannetta, jossa hiukkasten määrä ja suhteellinen hiukkasenergia saavuttavat maksiminsa. Se antaa arvioita ilmasuihkun synnyttäneiden hiukkasen ominaisuuksista, koska maksimiin vaikuttaa hiukkasten massa ja lähtöenergia.[3][5]

2.2 Korkeaenergistien säteiden lähtöpisteen määrittäminen

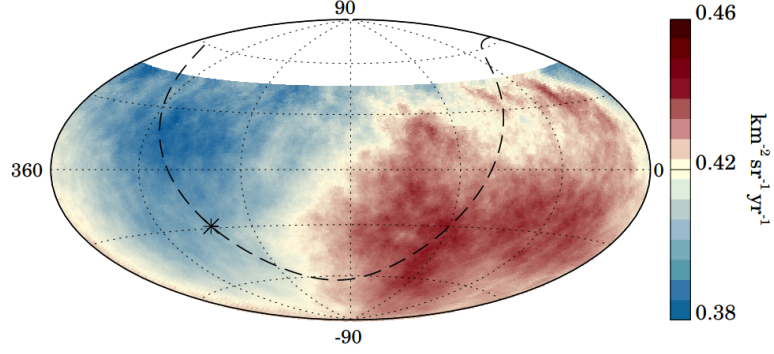
Erittäin korkeaenergistien hiukkassäteiden lähtöpiste eli alkuperä on edelleen erittäin suuri kysymys, mutta sitä pyritään arvioimaan anisotropian, energiaspektrien ja massakoostumuksen avulla. Suurimman informaation lähtöpisteen suhteen antavat hiukkasen saapumissuuntien anisotropia ja hiukkasten energiaspektrit. Näistä saatuihin tuloksiin hiukkasten ominaisuuksista eniten vaikuttavat hiukkasten varaus, varauksesta johtuva hiukkasten vuorovaikutus magneettikenttien kanssa sekä hiuk-

kasten energioiden väheneminen hiukkasten vuorovaikuttaessa avaruuden foton- ja magneettikenttien ja sitten Maan ilmakehän kanssa.[3][4][5]

Matalaenergiset kosmiset säteet saapuvat Maahan isotrooppisesti eli tasaisesti kaikista suunnista [8]. Vastaavasti matalamman energian (alle 10^{18} eV) kosmisten säteiden kokeman dipolianisotropian amplitudi on alle 1 %. Niiden vaihe, joka kertoo hiukkasten mahdollisen tulosuunnan, alkaa myös kääntyä kohti Linnunradan ydintä. Tämän takia ne ovat todennäköisimmin peräisin Linnunradan sisäpuolelta. Koska anisotropia tarkoittaa hiukkasten saapumista epätasaisesti eri suunnista, dipolianisotropialla viitataan tilanteeseen, jossa hiukkaset suosivat tiettyjä suuntia muodostaen dipolimaisen muodon. Dipolianisotropian amplitudilla kuvataan kosmisten hiukkassäteiden intensiteetin voimakkuutta tietyissä suunnissa verrattuna tasaisen saapumisen odotusarvoon.[3]

Erittäin korkeaenergistien kosmisten säteiden ($\geq 8 \cdot 10^{18}$ eV) kokeman dipolianisotropian amplitudi on noin 6 % ja vaihe osoittaa vastakkaiseen suuntaan Linnunradan ytimestä. Vaiheen ollessa vastakkaiseen suuntaan Linnunradan ytimestä, suurin osa hiukkasista tulee Linnunradan ulkopuolelta. Täten myös mahdollinen lähtöpiste on esimerkiksi jokin aktiivinen galaksi tai korkeaenergiset gammapurkaukset [3]. Dipolianisotropia on nähtävissä kuvassa 3, jossa saapumissuuntien jakauma on esitetty siten, että punaisella merkityistä suunnista hiukkasten saapumistiheys on suurin ja sinisiltä pienin.

Koska erittäin korkeaenergiset kosmiset säteet ovat varauksellisia hiukkasia, hiukkaset vuorovaikuttavat matkan aikana galaksin ulkopuolisten magneettikenttien (eng. *the ExtraGalactic Magnetic Fields, EGMFs*) ja galaktisten magneettikenttien (eng. *the Galactic Magnetic Fields, GMFs*) kanssa. Hiukkasten vuorovaikuttaessa magneettikenttien kanssa niiden radat kaareutuvat. Kaartumisen takia hiukkasten saapumissuunta Maan ilmakehään, josta ne havaitaan, ei todennäköisesti ole sama hiukkasen alkuperäisen suunnan kanssa.[4]



Kuva 3. Kartta hiukkassuihkujen, joiden energia on $> 8 \cdot 10^{18}$ eV, saapumissuunnista ekvatoriaalisilla koordinaateissa. Punaiselle alueelle saapuu eniten hiukkassäteitä ja siniselle alueelle vähiten paljastaen dipolianisotropian muodostaman kuvion. Kuvassa musta tähti (*) katkoviivalla kuvaa Linnunradan keskustaa ja katkoviiva kuvaa galaktista tasoa. [17]

Vaikka magneettikenttien vaikutus hiukkasiin tunnetaan hyvin, tieto galaksien välisten magneettikenttien voimakkuudesta ja geometriasta on hyvin rajallista. Tietämättömyys johtuu siitä, ettei magneettikenttien alkuperää eikä muuntumista tunneta juuri ollenkaan. Magneettikentille on määritettävissä ylä- ja alaraja kosmisen mikroaaltotaustan (eng. *Cosmic Microwave Background, CMB*) ja gammasäteilyn avulla [4]. Galaksien ulkopuolisten magneettikenttien vaikutus voidaan kuitenkin arvioida seuraavalla kaavalla:

$$\delta\theta_{\text{EG}} \approx 0.15^\circ \left(\frac{D}{3.8 \text{ Mpc}} \cdot \frac{\lambda_{\text{EG}}}{100 \text{ kpc}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{B_{\text{EG}}}{1 \text{ nG}} \right) \left(\frac{Z}{E_{100}} \right), \quad (1)$$

jossa D on lähteen etäisyys, B_{EG} on magneettikentän neliöllinen keskiarvo, λ_{EG} on koherenssipituus, Z on erittäin korkeaenergistien kosmisten hiukkasten varaus (yksikkönä protonin varaus: $q_p = 1e = 1,062 \cdot 10^{-19}$ C) ja E_{100} on erittäin korkeaenergistien kosmisten hiukkasten energia (yksikkönä 100 EeV). Galaksin ulkopuolisten magneettikenttien aiheuttaman heijastumisen arvioidaan yleensä olevan niin pieni, että se voidaan jättää huomiotta tietyissä tilanteissa. Esimerkiksi jos Centaurus A:sta lähtee kosminen hiukkanen, joka on protoni ($Z = 1$) ja sen energia olisi 100 EeV ($E_{100} = 1$). Centaurus A:n etäisyys on $D = 3,4$ Mpc. Yleiset arviot muille parametreille ovat $B_{\text{EG}} = 1$ nG ja $\lambda_{\text{EG}} = 100$ kpc. Tällöin galaksien ulkopuolisten

magneettikenttien aiheuttama heijastuminen olisi kaavan (1) mukaan:

$$\delta\theta_{\text{EG}} \approx 0,15^\circ \cdot \left(\frac{3,4 \text{ Mpc}}{3,8 \text{ Mpc}} \cdot \frac{100 \text{ kpc}}{100 \text{ kpc}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1 \text{ nG}}{1 \text{ nG}} \right) \left(\frac{1}{1} \right) \quad (2)$$

$$\approx 0,15^\circ \cdot (0,894737 \cdot 1)^{\frac{1}{2}} \cdot 1 \cdot 1 \quad || (0,894737)^{\frac{1}{2}} = 0,945905 \approx 1 \quad (3)$$

$$\approx 0,15^\circ. \quad (4)$$

Toisin sanoen galaksien ulkopuolisten magneettikenttien aiheuttama heijastuminen ei vaikuttaisi merkittävästi hiukkasen lähtöpaikan määrittämiseen.[18][19]

Galaktisten magneettikenttien (GMFs) vaikutus hiukkasten tulossuuntiin on taas merkittävä, mutta sitä on erittäin hankala mallintaa. Näitä magneettikenttiä voidaan mitata kolmella eri tavalla: tähtien valon polarisaatio, Faradayn rotaatiomittaus (eng. *Faraday rotation measure, RM*) ja synkrotronisäteily. Tähtien valon polarisaatio kertoo, kuinka niiden valo vuorovaikuttaa galaksin magneettikentän kanssa, sillä tähden valo itsessään ei ole polarisoitunutta. Faradayn rotaatiomittaus mittaa sähkömagneettisen aallon polarisaatiotason kiertymistä sen kulkiessa magneettikentän tai ionisoidun kaasun läpi. Synkrotronisäteily on magneettikentässä liikkuvien elektronien säteilemää säteilyä, josta voidaan tehdä johtopäätöksiä magneettikentän rakenteista. Näiden havaintomenetelmien avulla galaktisia magneettikenttiä on pystytty mallintamaan, vaikka mallien välillä onkin vielä eroavaisuuksia.[4]

Galaktisten magneettikenttien kuudesta mallista JF12 malli on paras sovitus hiukkasille, joiden oletetaan tulevan Centaurus A:sta. JF12 mallissa on 34 eri parametria kuvaamassa magneettikentän vaikutusta, mutta sekään ei riitä kuvaamaan satunnaisia ja koherenssikenttien yksityiskohtaisia vaikutuksia kaikista suunnista saapuville hiukkasille [20]. Erittäin korkeaenergisisille kosmisille hiukkasille, joiden oletetaan saapuvan Centaurus A:sta, on määritetty kaava, jolla voidaan määrittää normaalin magneettikentän aiheuttama heijastuminen:

$$\Delta\theta_{\text{reg}} = (2,3^\circ \pm 0,24^\circ) \left(\frac{Z}{E_{100}} \right), \quad (5)$$

jossa Z on edelleen hiukkasten varaus (yksikkönä protonin varaus: $q_p = 1e = 1,062 \cdot 10^{-19}$ C) ja E_{100} on hiukkasten energia (yksikkönä 100 EeV) kuten galaksien ulkoisille magneettikentillekin. Kaavassa oleva $0,24^\circ$ epävarmuus johtuu mallin muiden parametrien epävarmuuksista. Käytämällä samoja parametrejä kuin aikaisemminkin eli Centaurus A:sta lähtisi protoni ($Z = 1$) energialla 100 EeV ($E_{100} = 1$) saadaan galaktisten magneettikenttien aiheuttama heijastuminen kaavalla (5), jonka suuruutta voidaan verrata galaksien ulkoisten magneettikenttien aiheuttamaan heijastumiseen. Täten galaktisten magneettikenttien aiheuttama heijastuminen olisi:

$$\Delta\theta_{\text{reg}} = (2,3^\circ \pm 0,24^\circ) \left(\frac{Z}{E_{100}} \right) \quad (6)$$

$$= (2,3^\circ \pm 0,24^\circ) \left(\frac{1}{1} \right) \quad (7)$$

$$= 2,3^\circ \pm 0,24^\circ. \quad (8)$$

Toisin sanoen galaktisten magneettikenttien vaikutus hiukkasten heijastumiseen on noin 15 kertaa suurempi kuin galaksien ulkoisten magneettikenttien vaikutus.[20]

Toisaalta mitä suurempi varautuneen hiukkasen energia on verrattuna sen varaukseen, sitä vähemmän hiukkasen rata kaartuu magneettikenttien vaikutuksesta [5]. Tämän takia erittäin korkeaenergistien kosmisten säteiden lähtöpisteen määrittämisen tulisi olla paljon helpompaa verrattuna matalaenergiisiin kosmisiin säteisiin. Lähtöpisteen määrittämistä kuitenkin hankaloittaa se, että hiukkanen menettää energiaa matkatessaan avaruuden läpi taustasäteilyjen vuoksi.[4][5][6]

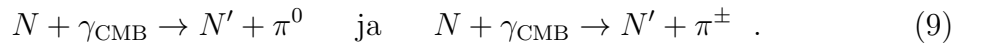
2.3 Energiahäviön vaikutus hiukkasten alkuperän määrittämiseen

Erittäin korkeanenergisistä kosmisista hiukkasista vuorovaikuttavat matkallaan magneettikenttien lisäksi taustasäteilyn kanssa. Vuorovaikuttavaa taustasäteilyä kosmisiä hiukkasia kohtaan on kahden tyyppistä: kosminen mikroaaltotausta (eng. *Cosmic Microwave Background, CMB*) ja galaksin ulkopuoleinen taustavalo (eng. *Extragalactic*

lactic Background Light, EBL). CMB on varhaisen maailmankaikkeuden jäännösa-
teilyä. EBL on tähtien ja galaksien aiheuttamaa taustavaloa infrapuna-, näkyvän ja
ultraviolettivalon alueella.[6]

Vuorovaikutukset CMB:n ja EBL:n kanssa ovat merkittävä syy kosmisten hiuk-
kasten menettämälle energialle. Energiahäviö aiheutuu hiukkasten ja taustasätei-
lyn fotonien törmäyksissä muodostuvista uusista hiukkasista. Törmäyksissä syn-
tyy esimerkiksi sekundäärihiukkasia (esim. neutriinot), gammasäteilyä ja elektroni-
positronipareja.[21]

Kosmisten hiukkasten ollessa protoneja vaikuttaa niihin pääasiassa CMB-säteily.
Tällöin tapahtuu parimuodostumista (hiukkasen ja sen anti-hiukkasen samanaikai-
nen syntyminen) ja fotonipionituotantoa (eng. *photopion production*). Fotopionituo-
tanta tarkoittaa prosessia, jossa CMB-fotonit (γ_{CMB}) törmäävät nukleonien (proto-
nit/neutronit, lyhenne N) kanssa synnyttäen pioneja (π^0 ja π^\pm). Fotopionituotanto
voidaan kuvata seuraavasti:



Tämä prosessi tuottaa hyvin mittavan energiahäviön erityisesti erittäin korkeaener-
gisten protonien tapauksessa. Tästä syystä kosmisten säteiden spektri jyrkkenee te-
rävästi $E \simeq 6 \cdot 10^{19}$ eV kohdalla, ilmiötä kutsutaan GZK-katkeamiseksi. EBL vuoro-
vaikutus protonien kanssa verrattuna CMB vaikutukseen on mitättömän pieni joh-
tuen EBL fotonien huomattavasti harvemmasta esiintymisestä. EBL voi kuitenkin
aiheuttaa neutriinujen syntymistä.[21]

Raskaampien ytimien törmätessä EBL:n ja CMB:n fotonien kanssa aiheutuu fo-
tohajoamista (eng. *photon disintegration*). Fotohajoaminen vaatii hieman korkea-
energisiä fotoneja, jonka takia myös EBL:llä on huomattava vaikutus prosessiin.
Fotohajoamisprosessissa kosmisen hiukkasen ydin hajoaa. Erittäin korkeaenergisten
kosmisten hiukkasten tapauksessa hajonneella ytimellä on suurin piirtein sama mää-
rä energiaa kuin alkuperäisellä ytimellä. Ytimen hajoaminen ei siten ole merkittävä



Kuva 4. Centaurus A kuvattuna eri aallonpituuksilla. Suurin kuva on useammalla aallonpituudella yhteensä, oikeassa reunassa ylhäältä alas Centaurus A on kuvattuna näkyvällä valolla, röntgen valolla ja vasemmalla ylhäältä alas infrapunavalolla ja radioaalloilla. [22]

energiahäviöiden lähde, mutta vaikuttaa kosmisten säteiden massakoostumukseen.[21]

Aiheutuvat energiahäviöt asettavat ylärajan erittäin korkeaenergisten kosmisten hiukkasten mahdollisen alkuperän etäisyydelle. Esimerkiksi hiukkasten, jotka saavuttavat 10^{20} eV energiatasot, täytyy olla peräisin muutaman sadan Mpc:n etäisyydeltä. Mitä pidemmän matkan hiukkaset kulkevat, sitä todennäköisemmin ne menettävät merkittävästi energiaa. Mahdollisen alkuperän täytyy siis sijaita tarpeeksi lähellä ja kyettävä kiihdyttämään hiukkaset tarvittavan korkeille energioille.[4]

3 Centaurus A korkeaenergisten säteiden lähteenä

3.1 Centaurus A ja sen tuottamat säteet

Centaurus A on aktiivinen galaksi, jonka ytimessä on erittäin suuri musta aukko. Centaurus A tunnetaan myös nimellä NGC 5128 ja se on osa 25 galaksin galaksi-ryhmää. Centaurus A on Linnunrataa lähimpänä sijaitseva aktiivinen radiogalaksi, jonka etäisyys on 3,4 Mpc. Centaurus A on läheisyytensä takia yksi tutkituimmista

galakseista eteläisessä pallonpuoliskolla [23]. Centaurus A:sta, niin ytimen mustasta aukosta kuin ympäröivästä galaksista, on havaintoja koko sähkömagneettisen spektrin alueelta [19].

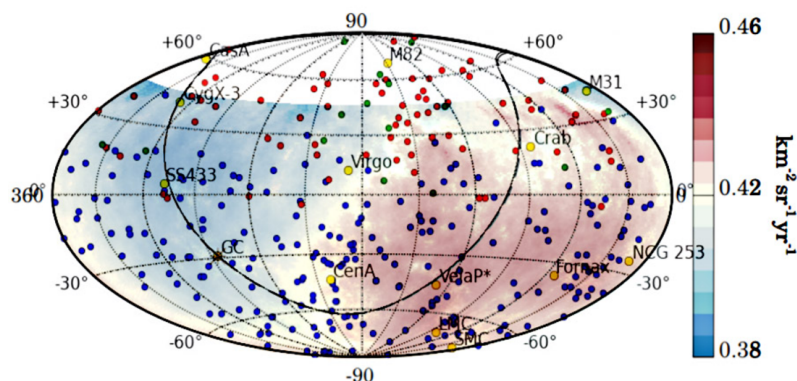
Centaurus A:sta lähtevät hiukkassuihkut, jotka laajenevat noin 5 kpc:n etäisyydellä ytimestä rakenteiksi, ulottuvat noin 250 kpc:n etäisyydelle ytimestä. Centaurus A:n ytimestä lähtevät hiukkassuihkut säteilevät radio, röntgen- ja gammasäteilyä [23]. Kuvassa 4 nähdään Centaurus A useilla eri aallonpituuksilla, ja varsinkin radioaalloilla nähdään hiukkassuihkujen ulottuvuus ja sulkamainen muoto.

3.2 Onko Centaurus A kosmisten säteiden lähde vai ei?

Centaurus A:ta on etäisyytensä takia pidetty todennäköisimpänä vaihtoehtona erittäin korkeaenergistien kosmisten säteiden lähteeksi. Energiahäviön minimoimiseksi mahdollisen lähtöpisteen tulisi olla muutaman sadan Mpc:n säteellä [4]. Centaurus A:n etäisyys riippuen lähteestä asettuu 3,4-3,8 Mpc:n kohdalle [19][23]. Tähtien hiukkasten, jotka ovat mahdollisesti peräisin Centaurus A:sta, kokema energiahäviö on tarvittavan pieni siihen, että hiukkaset voivat saapua Maan ilmakehään jopa yli 10^{20} eV:in energioilla.

Anisotropian kohdalla Centaurus A:n mahdollisuutta voidaan arvioida kuvan 5 avulla. Kuvassa 5 nähdään kuvan 3 anisotropiakartta, johon on merkitty mahdollisia lähteitä erittäin korkeaenergisille kosmisille säteille. Kuten kuvasta 5 voidaan nähdä, Centaurus A:n kohdalla (kuvassa CenA) on selkeästi kosmisten hiukkasten keskittymä.

Magneettikenttien takia hiukkasten lähtöpisteen selvittämiseen on käytetty simulaatioita. Kuten kappaleessa 2.2 selitettiin, tätä varten galaksimme magneettikentän rakenne ja voimakkuus pitää mallintaa. Tällä hetkellä yksi suosituimmista malleista on JF12 GMF malli. Perusajatuksena simulaatiossa on jäljittää hiukkasten matkaa kääntämällä hiukkasen ominaisuudet vastakkaisiksi. Toisin sanoen nopeus ja hiukka-



Kuva 5. Sama kuva kuin kuvassa 3, mutta kuvaan on nimetty myös mahdollisia lähteitä. Kuvassa pisteet ovat havaittuja erittäin korkeaenergisii kosmisiä säteitä, joista siniset pisteet on havaittu Augerilla ja punaiset/vihreät pisteet on havaittu TA:lla viimesen vuosikymmenen aikana. Kuvassa Cen A tarkoittaa Centaurus A:ta ja sen suunnalta on havaittu paljon erittäin korkeaenergisii kosmisiä säteitä. [24]

sen sähkövaraus on käännetty vastakkaiseksi, jolloin hiukkanen, joka on lähestynyt Maata, teoreettisesti jäljittää reittinsä takaisin. Hiukkanen niin sanotusti peruuttaa takaisin lähtöpisteeseen. Näiden simulaatioiden tuloksista on nähty, että hiukkaset peruuttavat tarpeeksi lähelle Centaurus A:ta ollakseen hyvällä todennäköisyydellä Centaurus A:sta.[19]

Erittäin korkeaenergistien kosmisten säteiden lähtöpisteen täytyy pystyä kiihdyttämään hiukkaset $\sim 10^{20}$ eV:iin. Kosmisten säteiden mahdollisissa lähteissä, esimerkiksi aktiivisissa galakseissa kuten Centaurus A, hiukkasten on havaittu kiihtyvän shokkiaalloissa ensimmäisen asteen fermin kiihtymisen kautta. Fermin shokkikihtymisessä hiukkaset saavat energiaa törmätessään plasmassa oleviin magneettisiin häiriöihin tai turbulenttisiin rakenteisiin. Kiihtyminen jatkuu niin kauan kuin hiukkanen pysyy kiihdyttävällä alueella.[4]

Hiukkasten kiihtytysprosessiin liittyy kuitenkin rajoitteita. Tarvittavan tehokas kiihtyminen on mahdollista vain, jos shokkikihtymisen niin sanotut Hillas-kriteerit täyttyvät. Nämä kriteerit yhdistävät magneettikenttien voimakkuuden ja kiihtytysalueen koon, jotka mahdollisen alkuperän tulee täyttää pystyäkseen kiihdyttämään hiukkaset tarvittavan korkealle energialle. Centaurus A:n hiukkassuihkujen koko,

magneettikentän suuruus ja magneettikentän luoman turbulenssin on arvioitu täytävän Hillas-kriteerit. Jos kuitenkin Centaurus A:n hiukkassuihkut ovat ultrarelativistisia, shokkikiihdytysprosessi on tehoton. Tällöin muut vaihtoehtoiset kiihdyttävät ovat todennäköisempiä Centaurus A:n kohdalla.[4]

Toisaalta Centaurus A:n lisäksi havainnoissa on noussut muitakin mahdollisia lähteitä. Hiukkasten ominaisuuksien ja ratojen mallinnuksessa Centaurus A:n lisäksi tuloksissa nousi toisena esille NGC 4945 [25]. Kuvassa 5 on nähtävissä intensiteetin olevan suuri muidenkin kohdalla. Centaurus A:n kaltaisilla intensiteettialueella on esimerkiksi galaksin NGC253, Suuren (eng. *Large Magellanic Cloud, LMC*) ja Pienen (eng. *Small Magellanic Cloud, SMC*) Magellanin pilven kohdalla.

4 Yhteenveto

Centaurus A on yksi todennäköisimmistä lähteistä erittäin korkeaenergisille kosmille hiukkasille. Se on optimaalinen lähde otettaessa huomioon mahdolliset rajoitteet, jotka on pystytty määrittämään erityisesti erittäin korkeaenergisille hiukkasille. Näistä mahdollisista rajoitteista lähtöpisteen määrittämiseen tärkeimmät ovat energiahäviö, magneettikenttien aiheuttama kaareutuminen ja mahdollisen lähtöpisteen kyky toimia hiukkaskiihdyttimenä.

Energiahäviön luoma rajoite on mahdollisen lähtöpisteen etäisyys. Erittäin korkeaenergistien kosmisten hiukkasten mahdollisen alkuperän etäisyys täytyy olla alle 100 Mpc:n, jotta kosmisten säteiden kokema energiahäviö on mahdollisimman vähäinen [4]. Centaurus A:n etäisyys on 3,4-3,8 Mpc eli optimaalinen energiahäviöiden minimoimiseksi [19][23].

Magneettikenttien vaikutuksesta varauksellisten hiukkasten radat kaartuvat ja siten hiukkasen saapumisuunta ei kerro suoraan hiukkasen lähtöpistettä taivaalla. Galaksien ulkoisten magneettikenttien vaikutus on niin pieni, että se voidaan jättää huomiotta [18][19]. Oman galaksimme magneettikentästä on tehty mallinnuksia,

jotka osoittavat, että hiukkasten lähtöpiste voisi olla Centaurus A.[19]

Tärkeä ominaisuus on Centaurus A:n kyky kiihdyttää hiukkaset tarpeeksi korkeille energioille. Centaurus A:n ytimeistä lähtevät sulkamaiset hiukkassuihkut ovat tarpeeksi suuria ja niissä on havaittu shokkiaaltoja, jotka pystyvät kiihdyttämään hiukkaset tarpeeksi korkeaenergisiksi. [4]

On myös otettava huomioon, että tutkimuksissa on noussut muitakin mahdollisuuksia. Esimerkiksi mallinnettaessa hiukkasten reittejä ja ominaisuuksia myös NGC4945 näyttäisi mahdolliselta lähtöpisteeltä [25]. Toisena esimerkkinä on dipolianisotropiakuvio, jonka intensiivisemmissä kohdissa nousi esille esimerkiksi Magellanin pilvet ja NGC 253 [24].

Viitteet

- [1] K. Louedec, *Astroparticle Physics* **60**, 54 (2015).
- [2] K.-H. Kampert ja A. A. Watson, *The European Physical Journal H* **37**, 359–412 (2012).
- [3] R. Aloisio, *Journal of Physics: Conference Series* **2429**, 012008 (2023).
- [4] A. Coleman, J. Eser, E. Mayotte, F. Sarazin, F. Schröder, D. Soldin, T. Venters, R. Aloisio, J. Alvarez-Muñiz, R. Alves Batista, D. Bergman, M. Bertaina, L. Caccianiga, O. Deligny, H. Dembinski, P. Denton, A. di Matteo, N. Globus, J. Glombitza, G. Golup, A. Haungs, J. Hörandel, T. Jaffe, J. Kelley, J. Krizmanic, L. Lu, J. Matthews, I. Mariş, R. Mussa, F. Oikonomou, T. Pierog, E. Santos, P. Tinyakov, Y. Tsunesada, M. Unger, A. Yushkov, M. Albrow, L. Anchordoqui, K. Andeen, E. Arnone, D. Barghini, E. Bechtol, J. Bellido, M. Casolino, A. Castellina, L. Cazon, R. Conceição, R. Cremonini, H. Dujmovic, R. Engel, G. Farrar, F. Fenu, S. Ferrarese, T. Fujii, D. Gardiol, M. Gritsevich, P. Homola, T. Huege, K.-H. Kampert, D. Kang, E. Kido, P. Klimov, K. Kotera, B. Kozelov, A. Leszczyńska, J. Madsen, L. Marcelli, M. Marisaldi, O. Martineau-Huynh, S. Mayotte, K. Mulrey, K. Murase, M. Muzio, S. Ogio, A. Olinto, Y. Onel, T. Paul, L. Piotrowski, M. Plum, B. Pont, M. Reininghaus, B. Riedel, F. Riehn, M. Roth, T. Sako, F. Schlüter, D. Shoemaker, J. Sidhu, I. Sidelnik, C. Timmermans, O. Tkachenko, D. Veberic, S. Verpoest, V. Verzi, J. Vicha, D. Winn, E. Zas ja M. Zotov, *Astroparticle Physics* **149**, 102819 (2023).
- [5] R. Alves Batista, J. Biteau, M. Bustamante, K. Dolag, R. Engel, K. Fang, K.-H. Kampert, D. Kostunin, M. Mostafa, K. Murase, F. Oikonomou, A. V. Olinto, M. I. Panasyuk, G. Sigl, A. M. Taylor ja M. Unger, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **6**, 1 (2019).
- [6] Pierre Auger Collaboration, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2023**, 024 (2023).
- [7] X. Sun, S. Zheng, Z. Shi, B. Liu ja R. Yang, *Universe* **10**, 310 (2024).
- [8] S. Gabici, *The Astronomy and Astrophysics Review* **30**, 1 (2022).
- [9] S. Lafebre, Cosmic ray flux versus particle energy, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cosmic_ray_flux_versus_particle_energy.svg, 2019, haettu 1.3.2025.
- [10] Swordy, S. P., *Space Science Reviews* **99**, 85 (2001).
- [11] A. De Angelis ja M. Pimenta, *Introduction to Particle and Astroparticle Physics: Multimessenger Astronomy and its Particle Physics Foundations, Undergraduate Lecture Notes in Physics* (Springer Nature Heidelberg, 2018).

- [12] IceCube MasterClass, IceCube Collaboration, Cosmic-ray Energy Spectrum, <https://masterclass.icecube.wisc.edu/en/analyses/cosmic-ray-energy-spectrum/>, 2013, haettu 5.3.2025.
- [13] A. Haungs, D. Kang, S. Schoo, D. Wochele, J. Wochele, W. D. Apel, J. C. Arteaga-Velázquez, K. Bekk, M. Bertaina, J. Blümer, H. Bozdog, I. M. Brancus, E. Cantoni, A. Chiavassa, F. Cossavella, K. Daumiller, V. de Souza, F. Di Piero, P. Doll, R. Engel, B. Fuchs, D. Fuhrmann, A. Gherghel-Lascu, H. J. Gils, R. Glasstetter, C. Grupen, D. Heck, J. R. Hörandel, T. Huege, K. H. Kampert, H. O. Klages, K. Link, P. Łuczak, H. J. Mathes, H. J. Mayer, J. Milke, B. Mitrica, C. Morello, J. Oehlschläger, S. Ostapchenko, M. Petcu, T. Pierog, H. Rebel, M. Roth, H. Schieler, F. G. Schröder, O. Sima, G. Toma, G. C. Trinchero, H. Ulrich, A. Weindl ja J. Zabierowski, *The European Physical Journal C* **78**, 2 (2018).
- [14] A. A. S. Watson, 3rd CERN - CLAF School of High-Energy Physics **2006**, 191 (2005).
- [15] K. Martens, *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* **165**, 33 (2007).
- [16] The Pierre Auger Collaboration, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **798**, 172 (2015).
- [17] The Pierre Auger collaboration, *Science* **357**, 1266–1270 (2017).
- [18] G. R. Farrar ja M. S. Sutherland, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2019**, 004–004 (2019).
- [19] A. Keivani, G. R. Farrar ja M. Sutherland, *Astroparticle Physics* **61**, 47 (2015).
- [20] G. R. Farrar, R. Jansson, I. J. Feain ja B. Gaensler, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2013**, 023–023 (2013).
- [21] R. Aloisio, D. Boncioli, A. di Matteo, A. Grillo, S. Petrerä ja F. Salamida, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2015**, 006–006 (2015).
- [22] WEBB Space Telescope, Centaurus A in Different Wavelengths (Hubble, Spitzer, Chandra, VLA), <https://webbtelescope.org/contents/news-releases/2021/news-2021-015>, 2021, credits: NASA, CXC, SAO, Astrophotography by Rolf Olsen, NASA-JPL, Caltech, NRAO, AUI, NSF, UOH, M. J. Hardcastle, Haettu 28.2.2025.
- [23] F. Israel, *Astronomy and Astrophysics Review* **8**, 237–278 (1998).
- [24] D. Fargion, P. G. D. S. Lucentini ja M. Y. Khlopov, arXiv: High Energy Astrophysical Phenomena **2018**, 1 (2017).
- [25] The Pierre Auger Collaboration, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2024**, 022 (2024).