

# Hiukkaskiihdytys Auringossa

LuK-tutkielma  
University of Turku  
Fysiikka  
2025  
Fil. yo. Valtteri Mäkräinen  
Tarkastajat:  
Prof. Rami Vainio  
FM Christian Palmroos  
FM Seve Nyberg

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

## Mäkäräinen Valtteri Hiukkaskiihdytys Auringossa

Kandidatutkielma, 18 s., 3 liites.

Fysiikka

Maaliskuu 2025

---

Tässä tutkielmassa tutustutaan Auringossa tapahtuvaan hiukkaskiihdytykseen fenomenologisella tasolla. Auringon hiukkaskiihdytyksessä syntyy suurenergiaisia varattuja hiukkasia, jotka voivat kulkea hyvinkin lähellä valonnopeutta ja niiden havaittu määrä riippuu Auringon aktiivisuudesta. Auringon suurenergiaiset hiukkaset saavat alkunsa Auringon roihupurkauksista ja koronan massapurkauksista. Näissä ilmiöissä hiukkaset kiihtyvät suuriin energioihin, joko magneettisen rekonnektion seurauksena tai shokkien kiihdyttäminä.

Auringon suurenergiaiset hiukkastapahtumat on luokiteltu kahteen eri luokkaan: impulsiivisiin ja pitkäkestoisiin hiukkastapahtumiin. Nämä tapahtumat eroavat toisistaan hiukkaskoostumuksen, ilmiöiden ja tapahtumien kestojen perusteella. Impulsiiviset tapahtumat ovat elektronirunsaita ja lyhytkestoisia hiukkastapahtumia, joihin liittyy roihupurkaukset ja pienet koronan massapurkaukset sekä auringonsuihkut. Pitkäkestoiset tapahtumat ovat puolestaan protonirunsaita ja kestoiltaan pidempiä hiukkastapahtumia, joihin liittyy aina koronan massapurkaus.

Asiasanat: Aurinko, roihupurkaus, koronan massapurkaus, kiihdytysmekanismi, hiukkastapahtumat

# Sisällys

<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>1 Aktiivinen Aurinko</b>	<b>1</b>
1.1 Auringon magneettikenttä . . . . .	1
1.2 Magneettinen rekonnektio . . . . .	3
1.3 Roihupurkaukset . . . . .	3
1.4 Koronan massapurkaukset . . . . .	5
<b>2 Teoria</b>	<b>6</b>
2.1 Hiukkasten liike sähkömagneettisissa kentissä . . . . .	6
2.2 Suurenergiaiset hiukkaset . . . . .	7
<b>3 Suurenergiaiset hiukkastapahtumat</b>	<b>9</b>
3.1 Impulsiiviset hiukkastapahtumat . . . . .	10
3.2 Pitkäkestoiset hiukkastapahtumat . . . . .	12
<b>4 Yhteenveto</b>	<b>16</b>

# Johdanto

Tässä tutkielmassa tutustutaan Auringon ilmiöihin liittyvään hiukkaskiihdytykseen pääasiassa havaintoihin perustuvalla menetelmällä. Luvussa 1 käydään läpi perusasioita liittyen Aurinkoon, kuten sen magneettikenttää ja aktiivisuutta, sekä Aurinkoon liittyviä ilmiöitä, kuten magneettista rekonnektiota, joka voi kiihdyttää hiukkasia suurin energioihin. Luvussa käydään myös läpi Auringossa tapahtuvat suurenergiaiset ilmiöt eli roihupurkaukset ja koronan massapurkaukset.

Luvussa 2 käydään läpi perusteoriaa hiukkasten liikkeestä sähkömagneettisessa kentässä perustuen yksihiukkasliikemalliin, sekä tutustutaan Auringosta tuleviin suurenergiaisiin hiukkasiin ja niiden kiihdytysmekanismeihin.

Luvussa 3 tarkastellaan aluksi suurenergiaisten hiukkastapahtumien historiaan, jonka jälkeen tutustutaan impulsiivisiin ja pitkäkestoisiin hiukkastapahtumiin. Hiukkastapahtumissa tarkastellaan niihin liittyviä kiihdytysmekanismeja sekä näiden suhteita roihupurkauksiin ja koronan massapurkauksiin. Tämän lisäksi käydään läpi muun muassa tapahtumien hiukkaskoostumuksia, määriä, kestoja, suuruuksia sekä hiukkasten lähdelämpötiloja ja lähdepaikkoja Auringossa. Tekoälytyökalua ChatGPT on käytetty tutkielmassa oikolukemiseen.

## 1 Aktiivinen Aurinko

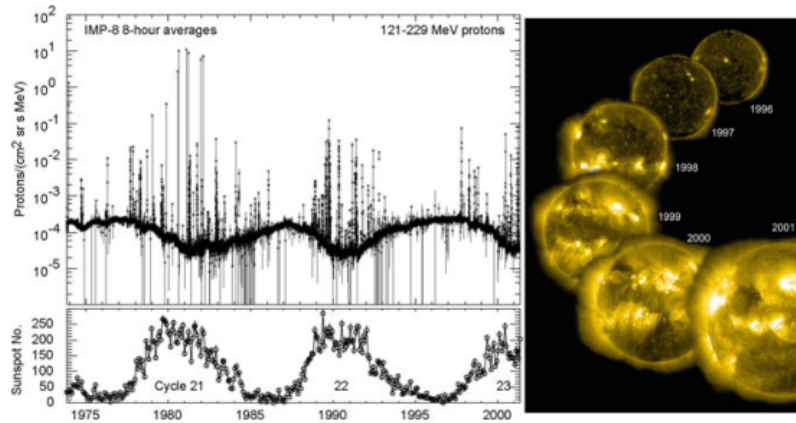
### 1.1 Auringon magneettikenttä

Auringon magneettikentän ymmärtäminen edellyttää Auringon rakenteen tuntemista. Aurinko koostuu ytimestä, joka tuottaa ydinreaktion kautta energiaa ja säteilee ytimestä radiatiiviselle alueelle. Radiatiiviselta alueelta energia virtaa plasman liikkeen mukana kohti fotosfääriä, josta energia pääsee karkaamaan avaruuteen. Fotosfääri on Auringon atmosfäärin sisin osa ja se muodostaa Auringon näkyvän pinnan, jonka lämpötila on noin 5800 K. Fotosfäärissä esiintyy auringonpilkkuja, joiden

lämpötila on fotosfääriä alhaisempi. Pilkkujen lämpötila on noin 4500 K. Fotosfäärin ulkopuolella sijaitsee kromosfääri, jossa lämpötila nousee 6000 K:iin. Auringon yläatmosfäärin muodostaa korona, jonka lämpötila on suurimmillaan muutaman MK luokkaa. [1]

Auringon magneettikenttä kaukaa muistuttaa dipolikenttää, vaikkakin on tosiasiasa hyvin monimutkainen. Auringon magneettikenttä muodostuu holvikaaren muotoisista silmukoista, jotka nousevat Auringon konvektiovyöhykkeestä fotosfääriin auringonpilkkujen kohdalla. Pilkkujen kohdalla magneettikentän voimakkuus on luokkaa 0,2–0,3 T. Magneettikentän divergenssi on aidosti nolla kaikkialla universumissa eli magneettikentän kenttäviivat ovat suljettuja. Kuitenkin hyvin kauaksi ulottuvia silmukoita Auringosta voidaan approksimoida avoimina. Auringon pyöriessä ja magneettikentän ollessa jäätyneenä kiinni ulosvirtaavaan aurinkotuulen plasmaan, magneettikenttä alkaa spiraloitua, jota matemaattisesti mallinetaan Arkhimedeen spiraalina. Auringosta lähtöisin olevaa heliosfäärin spiraloituvaa magneettikenttää kutsutaan Parkerin spiraaliksi löytäjänsä Eugene Parkerin mukaan. [1]

Auringosta tulevien suurenergiaisten hiukkasten määrä ei suoraan riipu auringonpilkkujen määrästä, mutta ne seuraavat hyvin Auringolle havaittua sykliä ja siten Auringon aktiivisuutta. Syklin aikana auringonpilkkujen määrä kasvaa maksimiinsa syklin puolivälissä ja putoaa minimiinsä syklin lopussa. Auringonpurkausten määrä kasvaa auringonpilkkujen määrän kasvaessa, mutta putoaa viiveellä auringonpilkkujen määrän pienentyessä. Auringon sykli on 11 vuotta kestävä jakso, jonka aikana yleensä aktiivisuuden maksimissa magneettikenttä vaihtaa napaisuuttansa. Kuvassa 1 on esitetty IMP-8 satelliitin mittaushavaintoja 121–229 MeV protoneista yhdessä auringonpilkkujen määrän kanssa. Auringosta tulevat protonit erottuvat korkeina piikkeinä kosmisista protoneista auringonpilkkumaksimien läheisyydessä. [1, 2]



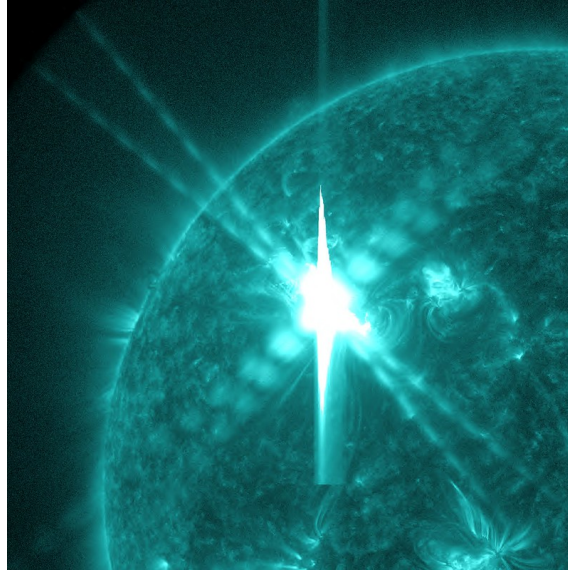
Kuva 1. Ylävasemmalla näkyy 120–230 MeV protonien intensiteettien keskiarvoja ajan funktiona, kun mittauksen keräysaika on 8 tuntia 27 vuoden ajalta, ja havainnot tehtiin IMP-8 satelliitilla käyttäen satelliitin mukana ollutta Cosmic Ray Nuclei Experiment -instrumenttia. Sen alapuolella on auringonpilkkujen havaittuja lukumääriä ajan funktiona eri Auringon sykleille 27 vuoden ajan. Oikealla puolella on Extreme Ultraviolet Imaging (EIT) -teleskoopin ottamia kuvia Auringosta 284 Å aallonpituusalueella. EIT:tä kuljettaa Solar and Heliospheric Observatory -luotain. Kuvassa näkyvät EIT:n ottamat kuvat kuvaavat Auringon aktiivisuutta vuodesta 1996 vuoteen 2001. [1]

## 1.2 Magneettinen rekonnektio

Auringossa tapahtuu magneettista rekonnektiota, jossa erisuuntaiset magneettikenttäviivat puristuvat yhteen, uudelleenyhdistyvät ja muodostavat uudet kenttäviivat. Rekonnektiopisteessä magneettikenttä on heikko, jolloin kenttäviivalla ansassa oleva plasma vapautuu. Tällöin plasma pääsee virtaamaan kenttäviivalta toiselle samalla kuin magneettikentän topologia muuttuu. Rekonnektiossa magneettikentän äkillinen topologian muutos alempaan potentiaalienergiaan vapauttaa huomattavan määrän energiaa, josta osa menee varattujen hiukkasten kineettiseksi energiaksi. [3]

## 1.3 Roihupurkaukset

Ensimmäisen roihupurkauksen havaitsi Richard Christopher Carrington syyskuuta 1859 tutkiessaan auringonpilkkuja, jolloin hän näki kirkastuman Auringossa. Roihupurkaukset ovat suurenergiaisia purkauksia, joista vapautuvan energian määrä voi



Kuva 2. Havaittu roihupurkauksen aiheuttama kirkastuma Auringossa röntgen alueella. Kuvan otti Nasan Solar Dynamics Observatory -luotain kuudes maaliskuuta vuonna 2012. [5]

olla jopa  $10^{25}$  J ja niitä voidaan havaita kaikilla aallonpituusalueilla. Roihupurkausten kesto on minuuteista tunteihin ja niiden lopussa Auringon koronaan saattaa muodostua suuria plasmasilmukoita. [1, 4]

Roihupurkaukset saavat energiansa magneettisesta rekonnektiosta ja syntyvät magneettisesti aktiivisilla alueilla, joissa on lähekkäin vastakkaisia magneettikenttiä. Magneettinen rekonnektio kuumentaa plasman kymmenien megakelvinien lämpötiloihin ja tätä kuumaa ja kirkasta ilmiötä kutsutaan aurinkoroihuksi. Roihujen suurenergiaiset hiukkaset ovat kuitenkin magneettisesti loukussa suljetuilla magneettikenttäviivoilla ja pääsevät pakenemaan roihupurkausalueelta havaittavaksemme vain avoimilta kenttäviivoilta. [1]

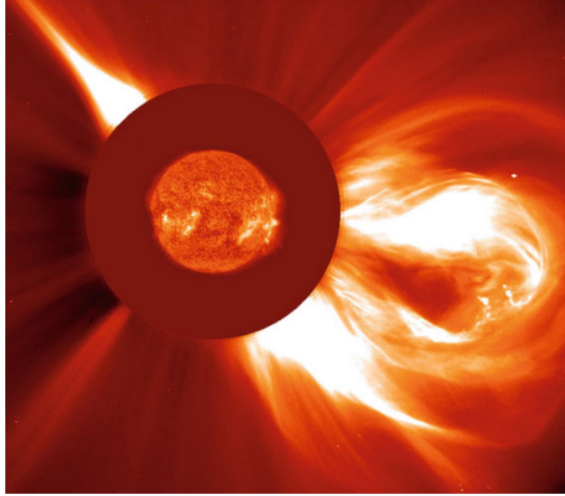
Kuvassa 2 on Nasan ottama kuva roihupurkauksesta Auringossa, josta havaittiin tulevan suurenergiaisia hiukkasia Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) -luotaimen kyydissä olevalla teleskoopilla. [5]

## 1.4 Koronan massapurkaukset

Koronan massapurkaukset (engl. coronal mass ejection, CME) ovat laajoja purkauksia Auringon atmosfäärissä, joissa Auringosta purkautuu  $10^{11}$ – $10^{13}$  kg plasmaa. Plasma kuljettaa mukanaan Auringon magneettikenttää ja sen energia on luokkaa  $10^{20}$ – $10^{25}$  J. [1]

CME:t syntyvät erilaisista magneettikentän muutoksista, kuten rekonnektios-  
ta. Yleensä Auringon pinnasta noin  $10^4$  km korkeudessa olevat filamentit toimi-  
vat koronan massapurkauksen keskuksena. Filamentit ovat kromosfääristä peräi-  
sin olevaa viileää plasmaa, jotka ovat sitoutuneet Auringon magneettisiin silmukoi-  
hin. CME havaittiin ensimmäisen kerran Orbiting Solar Observatory 7 -satelliitilla  
vuonna 1971. CME:n havainnointiin tarvitaan koronagrafia, jonka avulla Aurin-  
gon pinnan kirkkaus ei estä massapurkauksen havainnointia. Kuvassa 3 on esitetty  
SOHO-luotaimen ottama kuva suuresta CME:stä. SOHO-luotaimen mukana oleva  
Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO) -koronagrafilla havaittiin  
CME:iden määrän riippuvan Auringon syklistä. Auringon syklille 23 ihmissilmil-  
lä tutkituista havainnoista huomattiin maksimissa tapahtuvan keskimäärin kuusi  
CME:tä vuorokaudessa, kun taas minimissä havaittiin keskimäärin 0,5 per vuoro-  
kausi. Käyttämällä tietokoneavusteista skannausta, huomattiin maksimin CME:iden  
määrän kasvavan keskimäärin kahdeksaan ja minimin noin kahteen per vuorokausi.  
Yhteensä Auringon syklille 23 havaittiin noin 13000 CME:tä. [6]

CME:iden nopeudet voivat vaihdella suuresti 300 km/s:sta aina 3000 km/s:iin  
saakka. Nopeimmille CME:ille tyypillistä on hiukkasten shokkikiihdytys, joka voi kiih-  
dyttää plasman hiukkasia suuriin energioihin. Shokkiaalto muodostuu, jos CME:n  
nopeus on suurempi kuin koronan plasman tai aurinkotuulen Alfvénin nopeus. Alfvé-  
nin nopeudella tarkoitetaan plasman Alfvénin aaltojen nopeutta, mitkä puolestaan  
ovat poikittaisia aaltoja, jotka etenevät magneettikentän suuntaisesti. [1]



Kuva 3. Suuri korona nmassapurkaus lähtee Auringosta. Kuvan ottanut SOHO:n LASCO-koronagrafi. Koronagrafi peittää Auringon, jotta massapurkaus voidaan havaita. Koronagrafin keskelle on asetettu ääriultravioletialueella otettu kuva Auringosta. Auringon kuva otettiin samaan aikaan kuin havaittu massapurkaus EIT-teleskoopilla. [1]

## 2 Teoria

### 2.1 Hiukkasten liike sähkömagneettisissa kentissä

Hiukkasten liikettä sähkömagneettisissa kentissä kuvataan yksihiukkasliikkeellä, jossa Lorentz voima on

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (1)$$

Yhtälössä (1)  $\mathbf{F}$  on hiukkaseen kohdistuva sähkömagneettisen voiman vektori,  $q$  on hiukkasen varaus,  $\mathbf{E}$  on sähkökenttä,  $\mathbf{v}$  nopeus ja  $\mathbf{B}$  magneettikenttä. Varattu hiukkanen kiihtyy sähkökentän kenttäviivojen suunnassa. Magneettikenttä puolestaan saa varatun liikkeessä olevan hiukkasen pyörimään ympyräradalla, jonka säde on Larmorin säde, mikäli sähkökenttä on nolla. Yleisesti hiukkasen liikettä voidaan kuvata johtokeskusapproksimaation avulla sähkömagneettisissa kentissä. Johtokeskusapproksimaatiossa käytetään johtokeskuskoordinaatistoa, jossa hiukkasen nopeus magneettikentän suuntaan on nolla. Johtokeskusapproksimaatiossa hiukkasen liike on jaettu johtokeskuksen liikkeeseen sekä ympyräliikkeeseen johtokeskuksen ympäri.

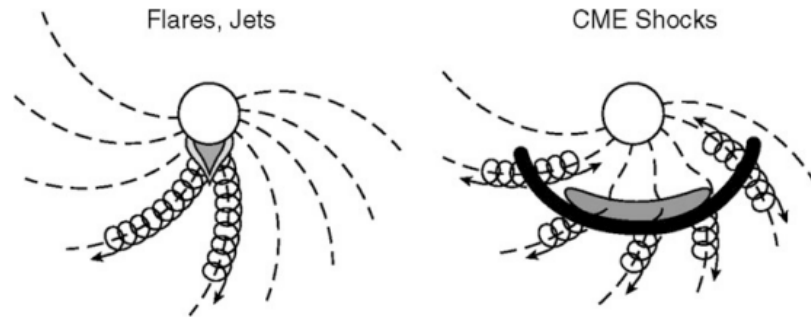
[3]

Sähkömagneettisissa kentissä hiukkasille tapahtuu sähköistä ja magneettista kulkeutumista. Jos sähkökenttä poikkeaa nolasta, sähkökentän kiihdytyksen ansiosta Larmorin säde kasvaa positiivisesti varatuille hiukkasille, hiukkasen tullessa kohti voimistuvaa sähkökenttää ja pienenee tullessa kohti heikkenevää sähkökentän osaa ja käänteisesti negatiiviselle hiukkaselle. Tämä ilmiö aiheuttaa sähköistä kulkeutumista hiukkaselle, joka on kohtisuoraa liikettä magneettikenttää vasten. Magneettista kulkeutumista tapahtuu, jos magneettikenttä on epähomogeeninen. Epähomogeenisessa magneettikentässä hiukkasen Larmorin säde pienenee magneettikentän gradientin suunnassa, mikä aiheuttaa kulkeutumisen. Kulkeutumisen suunta on vastakkainen negatiivisille ja positiivisille hiukkasille. [3]

## 2.2 Suurenergiaiset hiukkaset

Auringon suurenergiaiset hiukkaset (engl. solar energetic particle, sep) ovat Auringon ilmiöissä kiihtyneitä varattuja hiukkasia, kuten elektroneja, protoneja ja muita raskaampia hiukkasia. Niiden vauhdit voivat olla hyvinkin lähellä valonnopeutta. Näiden hiukkasten energiat vaihtelevat kiloelektronivolteista gigaelektronivoltteihin. sepit pääasiassa seuraavat Parkerin spiraalin kenttäviivoja, elleivät ne koe häiriöitä esimerkiksi laajojen CME:iden muodostamista shokkirintamista. Suurenergiaiset hiukkastapahtumat ovat jaettu kahteen eri luokkaan pääasiassa niiden syntyperän perusteella: impulsiivisiin ja pitkäkestoisiin. Impulsiivisissa tapahtumissa kiihdytysmekanismina uskotaan toimivan pääasiassa luvussa 1.2 käsitelty magneettinen rekonnektio, kun taas pitkäkestoisissa mekanismeina toimivat erilaiset shokkikihdytykset. Näitä on havainnollistettu Kuvassa 4. [1]

Shokkikihdytyksessä hiukkanen kohtaa shokin rajapinnan. Rajapinnan toisella puolella magneettikenttä on voimakkaampi kuin toisella puolella, mikä johtuu plasman virtausnopeuden muutoksesta. Aluetta ennen shokkia kutsutaan ylävirraksi ja



Kuva 4. Vasemmalla kuvassa on Auringosta lähtevä magneettisen rekonnektion aiheuttama roihupurkaus. Oikealla puolestaan on Auringosta peräisin oleva koronan massapurkaus, joka muodostaa shokkirintaman. Molemmista kuvista lähtee Parkerin spiraalia pitkin suurenergiaisia hiukkasia. Vasemmassa kuvassa ne lähtevät suoraan Auringon pinnalta, kun taas oikeassa ne lähtevät shokkirintamalta. [1]

aluetta shokin jälkeen alavirraksi. Yleensä shokkikiihdytyksessä hiukkanen törmää shokkirintamaan useita kertoja saadakseen suuria energioita. Shokkikiihdytysmekanismeja on monia, mutta kolme yleisintä ovat shokkikulkeutumiskiihdytys (engl. shock drift acceleration), shokkisurffaaminen (engl. shock surfing) ja diffusiivinen shokkikiihdytys (engl. diffusive shock acceleration). [7]

Shokkikulkeutumiskiihdytyksessä hiukkanen vuorovaikuttaa kohtisuorassa hiukkasen liikkeeseen nähden olevan shokkirintaman kanssa. Hiukkanen kulkeutuu kohti shokkirintamaa ylävirrasta sähköisen kulkeutumisen ansiosta. Ylittäessään shokin rajapinnan magneettikenttä voimistuu, jolloin hiukkaseen kohdistuu suurempi magneettikentän aiheuttama voima, jolloin se kokee magneettista kulkeutumista, mikä aiheuttaa Larmorin säteen pienemisen ja tästä johtuen useamman törmäyksen shokin kanssa ja hiukkasen liike-energian kasvun. [7]

Shokkisurffaamisessa on samankaltainen tilanne kuin shokkikulkeutumiskiihdytyksessä, mutta siinä kulkeutumisliike johtuu shokkirintaman ylittävästä sähkökentästä. Hiukkasten osuessa shokin rajapintaan, sähkökenttä heijastaa ne takaisin ylävirtaan, josta ne voivat kulkeutua uuteen törmäykseen shokin kanssa, kasvattaen niiden liike-energiaa. Diffusiivisessa shokkikiihdytyksessä hiukkanen siroaa magneetti-

kentän häiriöistä kummallakin puolella rajapintaa edestakaisin rajapinnan yli, kasvattaen sen liike-energiaa. [7]

### 3 Suurenergiaset hiukkastapahtumat

Ensimmäiset sepit havaittiin vuonna 1946, kun havaittiin GeV-energiatason protonia ilmakehässä, niin kutsutussa maanpäällisessä tapahtumassa (engl. ground level enhancement, GLE). Kun mittaukset avaruudessa mahdollistuivat 1960-luvulla, havaittiin Auringosta tulevan radiopurkauksia, jotka yhdistettiin avaruudessa havaittuihin hiukkasiin. Näille teorisoiittiin kaksi syntytapaa: impulsiivisesti kiihdytetyt elektronit, jotka tuottavat tyypin III radiopurkauksia, ja shokkien kiihdyttämät elektronit, jotka puolestaan tuottavat tyypin II radiopurkauksia. [1]

Samoihin aikoihin havaittiin  $\sim 40$  keV elektroneja, joita havaittiin roihupurkauksien ja tyypin III radiopurkauksien yhteydessä. Noin 20 keV elektroneille havaittiin yhteys röntgensäteilyyn. 90-luvulla 10–100 keV elektronien havaittiin liittyvän tyypin III radiopurkauksiin. Myöhemmin 20 MeV protonit yhdistettiin tyypin II radio-säteilyyn liittäen kiihdytysmekanismit toisiinsa. [1]

Vetyä ja heliumia raskaampia alkuaineita havaittiin sep-tapahtumissa jo 1960-luvulla. Havaitut alkuaineet olivat hiilen, typen ja hapen ytimiä, joiden energiat ylittivät 25 MeV/amu. Mittaustulosten lisääntyessä näitä alkuaineiden määriä ja suhteita alettiin verrata Auringon koronan ja fotosfäärin alkuainesuhteisiin. Hiukkasten alkuainesuhteiden havaittiin riippuvan alkuaineen ensimmäisestä ionisoitumisenergiasta sekä massan ja varauksen suhteesta  $A/Q$ . Kaikki alkuaineet, joiden ensimmäinen ionisoitumisenergia on alle 10 eV, ovat ionisoituneita fotosfäärissä. Koronassa puolestaan alkuaineet ovat suurten lämpötilojen vuoksi ionisoituneet ja kevyimmät alkuaineet ovatkin ionisoituneet kokonaan. [1]

Alkuainesuhteiden perusteella sep-tapahtumat jaettiin impulsiivisiin ja pitkäkestoisiin tapahtumiin. Näillä tapahtumilla huomattiin myöhemmin muitakin eroja ku-

ten havaittavat ilmiöt ja tapahtumien kesto aika.

### 3.1 Impulsiiviset hiukkastapahtumat

Impulsiiviset tapahtumat löydettiin alun perin kiihdytetyjen elektronien tuottamasta tyypin III radiopurkauksista, eikä niistä havaittu muita hiukkasia. Kuitenkin 1970-luvulla havaittiin  $^3\text{He}$ -runsaat tapahtumat. Vuonna 1985 havaittiin elektronien tuottamien tyypin III radiopurkauksien yhteydessä  $^3\text{He}$ -isotooppeja. Näistä havainnoista pääteltiin impulsiivisten roihujen osuus havainnoissa ja niitä alettiin tutkia. Näiden roihujen havaittiin syntyvän magneettisesti aktiivisilla alueilla ja niiden röntgenemissiot olivat pienemmät kuin tavallisilla aurinkoroihuilla, mistä pääteltiin roihujen, joilla röntgenemissiot ovat verrattaen heikkoa, liittyvän  $^3\text{He}$ -tuottaviin tapahtumiin. [8]

Impulsiiviset tapahtumat eroteltiin aluksi pitkäkestoisista tapahtumista pääasiassa niiden alkuainesuhteiden eroista. Alkuainesuhteet tapahtumissa erosivat aina rautaan asti, mukaan lukien heliumin eri isotoopit. Pelkkien alkuainesuhteiden tarkastelu ei riittänyt, sillä  $^3\text{He}$ , jonka runsautta pidettiin alussa tyypillisenä impulsiivisille tapahtumille, havaittiin myös suurissa pitkäkestoisissa tapahtumissa. [8]

Yleisesti impulsiiviset tapahtumat ovatkin  $^3\text{He}$ - ja elektronirikkaita tapahtumia. Niissä on myös noin kymmenkertainen määrä rautaa verrattuna Auringon koronan raudan runsauteen. Rauta on näissä tapahtumissa hyvin ionisoitunutta, sillä rautai-  
onien varausluvun on havaittu olevan jopa +20 [9]. Korkean ionisaatiotason perusteella on päätelty, että impulsiivisten tapahtumien hiukkaset saivat alkunsa kuumasta koronasta [9]. Impulsiivisissa tapahtumissa on kuitenkin myös suhteellisesti enemmän muita raskaampia alkuaineita kuin koronassa. Kuvassa 5 on tyypillisiä alkuaineiden suhteita impulsiivisissa tapahtumissa verrattuna koronan alkuainesuhteisiin. Impulsiivisissa tapahtumissa on alkuaineita havaittu aina lyijyyn asti [1]. Impulsiivisissa tapahtumissa myös  $^3\text{He}$ -isotooppia on huomattavasti suurempi osuus

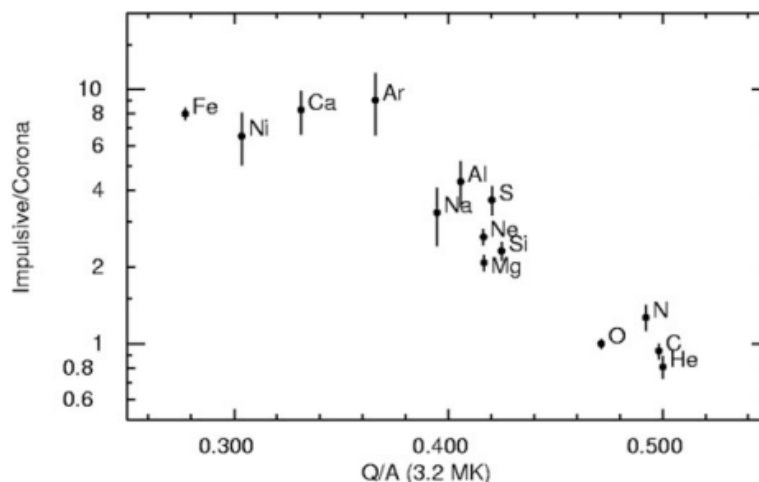
kuin  $^4\text{He}$ -isotooppia, joka on yleinen aurinkotulessa [1]. Aurinkotulessa  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -suhde on luokkaa  $5 \cdot 10^{-5}$ , kun taas impulsiivisissa tapahtumissa  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -suhde on noin 1 [10]. Toisaalta impulsiivisissa tapahtumissa havaittu vedyn määrän suhde heliumiin on noin 10:n luokkaa [10].

Impulsiivisten hiukkastapahtumien kesto on keskimäärin tunneista muutamiin päiviin ja niitä tapahtuu yhteensä muutamia kymmeniä vuodessa keskimääräisesti Auringon syklin aikana. [10]

Roihuja pidettiin impulsiivisten tapahtumien ainoana aiheuttajana, kunnes 1. toukokuuta 2000 havaittiin CME, jonka havaittiin olevan rautarikas ja sisälsi myös muita heliumia raskaampia alkuaineita. CME:lle havaittiin vedyn ja heliumin suhteen olevan noin 10 luokkaa. CME:stä tulleen hiukkaspurkauksen kesto oli noin yksi päivä. Tämän lisäksi CME:n leveydeksi havaittiin noin  $20^\circ$ . Kyseinen CME tunnistettiin impulsiivisen hiukkastapahtuman CME:ksi. Yleisesti impulsiivisten hiukkastapahtumien CME:t ovat pienempiä kuin tyypilliset CME:t ja niiden nopeudet ovat hitaampia. [1, 11]

Yleisesti impulsiivisista tapahtumista tulevat sepit ovat Auringon pinnalla paikallisempia, sillä tapahtumien lähteiden leveys on pieni. Nämä sepit voivat kuitenkin levitä alkulähteestään Auringon pituuspiireihin verrattuna noin  $100^\circ$  verran ja joissakin tapauksissa myös kokonaan Auringon ympäri, pääasiassa aurinkotuulten ja magneettikenttien avulla. [1]

Suurenergiaisten ionien energiat ovat yleensä 0,1–10 MeV/amu luokkaa impulsiivisissa tapahtumissa. Hiukkasten massan ja varauksen suhteesta on puolestaan päätelty niiden lähdelämpötila ionisaatioenergioiden perusteella. Lähdelämpötiloiksi on laskettu havaintojen perusteella olevan 2–4 MK, mikä ei vastaa roihujen muutamien kymmenien MK lämpötiloja. Tästä on päätelty, että roihujen yhteydessä havaitut suurenergiaiset hiukkaset saavat energiansa magneettisessa rekonnektiossa roihujen läheisyydessä olevista auringonsuihkuista, muttei itse roihuista. [1]



Kuva 5. Eri alkuaineiden keskimääräisiä runsauksien suhteita impulsiivisissa hiukkastapahtumissa virherajoiheen verrattuna koronan alkuainerunsauksiin. Vaaka-akselilla on havaittujen alkuaineiden varauksen ja massan suhteita, joista on päätelty lähdelämpötilaksi 3,2 MK. Pystyakselilla on puolestaan impulsiivisten tapahtumien alkuaineiden ja koronassa olevien alkuaineiden suhde. [1]

### 3.2 Pitkäkestoiset hiukkastapahtumat

Pitkäkestoiset hiukkastapahtumat ovat protonirunsaita, suurenergiaisia ja suurimpia hiukkastapahtumia. Pitkäkestoisissa hiukkastapahtumissa havaitut sepit voivat saada GeV:ien suuruisia energioita. Pitkäkestoiset tapahtumat konseptina saivat alkunsa tyyppin II radiopurkauksien mukana tulleista protoneista. Ensimmäiset suorat havainnot CME:istä saatiin 1970-luvulla ja vuonna 1984 osoitettiin, että 96% suurista ja nopeista CME:istä liittyvät pitkäkestoisiin tapahtumiin. [1]

Pitkäkestoisiin hiukkastapahtumiin liittyy aina CME. Nämä CME:t ovat laajoja ja nopeita verrattuna pienempien tapahtumien CME:ihin. Pitkäkestoisissa tapahtumissa ne voivat levitä hyvinkin laajalle alueelle. Laajojen CME:iden muodostamien shokkirintamien ansiosta sepit pystyvät leviämään jopa kokonaan Auringon ympärille. [1]

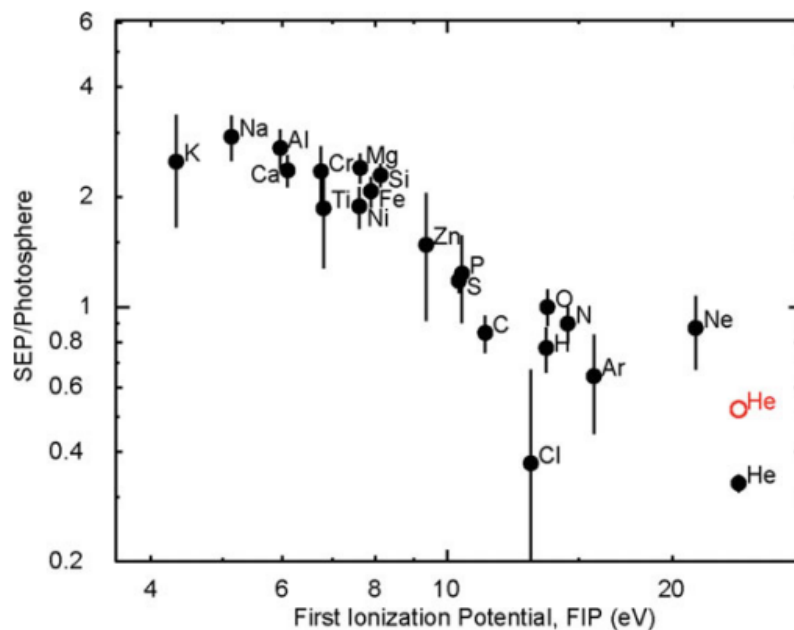
Pitkäkestoisten tapahtumien hiukkaskoostumus on erilainen kuin impulsiivisten tapahtumien koostumus. Pitkäkestoisissa tapahtumissa on havaittu vedyn ja heliumin suhteen olevan noin 100:n luokkaa, joka on kymmenen kertaa suurempi kuin

impulsiivisissa tapahtumissa. Pitkäkestoisissa tapahtumissa raudan ja hapen suhde on 0,1:n luokkaa, eli raskaampia alkuaineita on suhteellisesti vähemmän kuin impulsiivisissa tapahtumissa. Tämä voidaan nähdä hyvin vertailemalla Kuvaa 5 ja Kuvaa 6. Raudan ionisaatioaste on myös huomattavasti pienempi, 14 luokkaa. Pitkäkestoisissa tapahtumissa ei myöskään ole huomattavaa korostusta  $^3\text{He}/^4\text{He}$  -suhteessa, sillä se on suurusluokaltaan samansuuruista kuin aurinkotuulen  $^3\text{He}/^4\text{He}$  -suhde. [10, 12]

Yleisesti raskaampien alkuaineiden määrät ovat pienempiä verrattuna kevyempiin alkuaineisiin pitkäkestoisissa tapahtumissa. Silti raskaampien alkuaineiden määrä voi olla suhteellisesti suurempi kuin pitäisi kahdesta eri syystä: raskaammat alkuaineet voivat kokea uudelleenkiikdytyksen, jos ne tulevat aluksi impulsiivisista tapahtumista, kuten auringonsuihkuista, ja sitten kohtaavat shokin, jossa ne kokevat uudelleenkiikdytyksen. Toinen tapa on monimutkaisempi, missä suurenergiaisten protonien intensiteetit kasvavat niin suuriksi, että ne vahvistavat Alfvén aaltoja ja jäävät loukkuun lähelle shokkirintamaa, mutta suuremmat ionit siroavat massansa vuoksi pois rintamalta. [9]

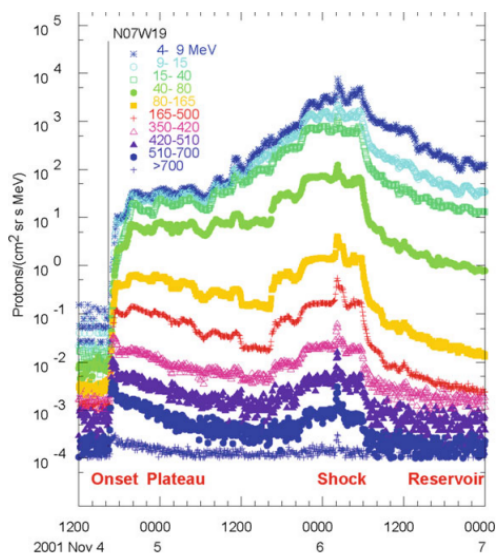
Lähdelämpötila pitkäkestoisille hiukkastapahtumille on 0,8–1,6 MK 69% tapahtumista, mikä vastaa melko hyvin koronan lämpötilaa. Pitkäkestoisten tapahtumien sepit ovatkin pääasiassa koronan ympäristöstä CME:iden mukana matkanneita hiukkasia. Tosin noin 24 %:ssä pitkäkestoisista tapahtumista sepien lähdelämpötilaksi on arvioitu olevan 2–4 MK. Suuremman lähdelämpötilan omaavat hiukkaset ovat pääasiassa aikaisemmin mainittuja uudelleenkiikdytyksen kokeneita impulsiivisista tapahtumista tulleita hiukkasia. [1]

Pitkäkestoisia tapahtumia karakterisoiva ominaisuus on niiden pidempi kestoai-ka. Tapahtumat kestävät yleensä muutamien päivien ajan ja niitä tapahtuu noin 10 kappaletta vuodessa keskimääräisesti Auringon syklin aikana. Helios-luotainpari havaitsi pitkäkestoisille tapahtumille melko tasaisen ajanjakson protonien intensiteeteissä, minkä jälkeen protonien intensiteetti nousi maksimiinsa shokin kohdalla.



Kuva 6. Vaaka-akselilla on ensimmäinen ionisaatiopotentiaali elektronivolteissa. Pystyakselilla on pitkäkestoisten tapahtumien hiukkasten runsauksia fotosfäärin runsauksiin verrattuna, jolloin saadaan keskiarvo pitkäkestoisten tapahtumien alkuainerunsauksista. He tarkoittaa heliumin  $^4\text{He}$  isotooppia, punaisella merkattu He on eri pitkäkestoisten tapahtumien He:n runsauksilla saatu suhde. [1]

Myöhemmissä mittauksissa havaittiin, että pitkäkestoisilla tapahtumilla intensiteettien palautuminen kestää pitkään, kun hiukkasintensiteetit vähenevät takaisin taustan tasolle. Tämä selittyy sillä, että osa hiukkasista jää loukkuun shokin ja CME:n taakse, josta ne leviävät avaruuteen hitaasti CME:n itsessään laajentuessa. Tätä havainnollistaa Kuva 7, jossa huomataan aluksi melko tasainen taustaintensiteetti, jonka jälkeen shokin kohdalla intensiteetti kasvaa maksimiinsa, ja lopulta intensiteetit hitaasti pienenevät ajan kuluessa. [1, 10]



Kuva 7. Protonien intensiteettejä ajan funktiona pitkäkestoisessa hiukastapahtumassa, joka alkoi Auringon leveyspiiriltä N07 ja pituuspiiriltä W19. Protonit havaittiin NOAA/GOES-satelliitilla. Sininen \* merkki vastaa 4–9 MeV protoneja, turkoosi ympyrä 9–15 MeV, vihreä rengas 15–40 MeV, vihreä ympyrä 50–80 MeV, oranssi neliö 80–165 MeV, punainen kolmio 165–500 MeV, purppura avoin kolmio 350–420 MeV, sininen kolmio 420–510 MeV, sininen ympyrä 510–700 MeV ja sininen + merkki yli 700 MeV protoneja. "Onset" kuvaa tapahtumien alkuhetkeä havaitsijalle, kun taas "plateau" kuvaa ajanjaksoa, jolloin protonien intensiteetti on miltei vakio. "Shock"-kohdassa shokkiaalto kohtaa havaitsijan, jolloin protonien intensiteetit saavat maksimiarvonsa. Lopulta koronan massapurkausta ja shokkia seuraava magneettinen säiliö saavuttaa havaitsijan kohdassa "Reservoir", jossa protonien intensiteetit hiljalleen pienenevät koronan massapurkauksen laajentuessa. [1]

## 4 Yhteenveto

Auringossa tapahtuvaan hiukkaskiihdytykseen liittyy räjähtäviä ilmiötä, kuten roihupurkaukset ja koronan massapurkaukset. Molemmat näistä tuottavat havaittavia suurenergiasia hiukkasia.

Auringon suurenergiaiset hiukkaset ovat jopa lähes valonnopeudella kulkevia protoneja, elektroneja ja ioneja. Niiden havaittu määrä riippuu Auringon aktiivisuudesta. Ne seuraavat pääasiallisesti Parkerin spiraalin kenttäviivoja. Suurenergiaisiin hiukkasiin liittyvät hiukkastapahtumat on jaettu kahteen eri luokkaan: impulsiivisiin ja pitkäkestoisiin hiukkastapahtumiin.

Impulsiiviset tapahtumat ovat pienempiä hiukkastapahtumia verrattuna pitkäkestoisiin. Niihin liittyvät ilmiöt ovat roihupurkaukset ja pienet koronan massapurkaukset. Roihupurkauksissa kiihdytysmekanismi toimii magneettinen rekonnektio ja koronan massapurkauksissa shokkikiihdytys. Impulsiivisten tapahtumien hiukkaskoostumus on elektroni- ja  $^3\text{He}$ -rikasta. Tämän lisäksi niissä esiintyy myös raskaampia alkuaineita, kuten rautaa, jonka ionisaatioaste on peräti 20. Ionisaatioasteesta on impulsiivisten tapahtumien lähdelämpötilaksi päätelty olevan 2,5–3,2 MK.

Pitkäkestoiset hiukkastapahtumat ovat suurempia, suurenergiaisempia ja nimensä mukaan pidempikestoisia kuin impulsiiviset hiukkastapahtumat. Niihin liittyvät suuret koronan massapurkaukset, jotka pystyvät levittämään hiukkasia hyvinkin laajalle alueelle verrattuna lähtöpituuspiiriin Auringossa. Pääasiallisena kiihdytysmekanismeina toimivat erilaiset shokkikiihdytysmekanismit. Verrattuna impulsiivisiin tapahtumiin pitkäkestoiset tapahtumat ovat hyvin protonirunsaita tapahtumia, joissa raskaampia alkuaineita on vähemmän. Ionien ionisaatioaste on myös pienempi; raudan ionisaatioaste on keskimäärin 14 pitkäkestoisissa tapahtumissa. Ionisaatioasteen eron vuoksi pitkäkestoisten tapahtumien hiukkasten lähdelämpötilan on arvioitu olevan huomattavasti pienempi kuin impulsiivisten tapahtumien hiukkasten lähdelämpötila. Suurimmalle osalle pitkäkestoisten tapahtumien hiukkasista lähde-

lämpötila on 0,8–1,6 MK, mutta pienemmälle osalle se on 2–4 MK, mikä kertoo, että osa pitkäkestoisten tapahtumien hiukkasista onkin uudelleenkihdytettyjä impulsiivisten tapahtumien hiukkasia.

Tulevaisuudessa Auringon hiukkaskiihdytykseen liittyvä tutkimus jatkuu, sillä hiukkastapahtumien ominaisuuksia voidaan hyödyntää Auringon kiihdytysmekanismien ja ilmiöiden ymmärtämisessä ja mallintamisessa.

## Viitteet

- [1] D. V. Reames, *Solar Energetic Particles: A Modern Primer on Understanding Sources, Acceleration and Propagation*, Vol. 978 of *Lecture Notes in Physics* (Springer International PublishingCham, 2021).
- [2] D. H. Hathaway, *Living Reviews in Solar Physics* **12**, 4 (2015).
- [3] H. Koskinen, *Johdatus plasmafysiikkaan ja sen avaruussovellutuksiin* (Limes-Helsinki, 2001).
- [4] L. Fletcher, B. R. Dennis, H. S. Hudson, S. Krucker, K. Phillips, A. Veronig, M. Battaglia, L. Bone, A. Caspi, Q. Chen, P. Gallagher, P. T. Grigis, H. Ji, W. Liu, R. O. Milligan ja M. Temmer, **159**, 19 .
- [5] NASA, X Class Solar Flare Sends ‘Shockwaves’ on The Sun., <https://www.flickr.com/photos/gsfcr/6819094556/>, haettu 20.1.2025.
- [6] P. F. Chen, *Living Reviews in Solar Physics* **8**, (2011).
- [7] *Solar Particle Radiation Storms Forecasting and Analysis*, Vol. 444 of *Astrophysics and Space Science Library*, toimittanut O. E. Malandraki ja N. B. Crosby (Springer International PublishingCham, 2018).
- [8] D. V. Reames, *Space Science Reviews* **175**, 53 (2013).
- [9] D. V. Reames, *The European Physical Journal Plus* **139**, 710 .
- [10] M.-B. Kallenrode, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* **29**, 965 (2003).
- [11] S. W. Kahler, D. V. Reames ja N. R. Sheeley, Jr., *The Astrophysical Journal* **562**, 558 (2001).
- [12] M. Desai ja J. Giacalone, *Living Reviews in Solar Physics* **13**, 3 .