

Auringon roihujen gammasäteily

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2026
Tuomas Hämäläinen
Tarkastaja:
Prof. Rami Vainio

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

TURUN YLIOPISTO
Fysiikan ja tähtitieteen laitos

Hämäläinen, Tuomas Auringon roihujen gammasäteily

LuK-tutkielma, 23 s., 1 liites.
Fysiikka
Helmikuu 2026

Auringon roihut ovat sähkömagneettisia ilmiöitä, jotka havaitaan Auringon ilmakehässä. Nämä roihut ovat erityisesti magneettisen rekonnektion aiheuttamia. Magneettinen rekonnektio on aurinkokuntamme voimakkain magneettinen tapahtuma, joka voi kiihdyttää varattuja hiukkasia relativistisiin nopeuksiin. Kiihdytetyt hiukkaset muodostavat useissa eri reaktioissa korkeaenergiaisinta sähkömagneettista säteilyä, gammasäteilyä. Säteilyn intensiteettiä energian funktiona voidaan kuvata säteily-spektrillä. Eri hiukkasreaktioiden ominaisuudet muodostavat spektriin usein toisistaan erotettavat spektrin osat, joita gammasäteilyä mittaavat satelliitit voivat mitata.

Tämä tutkielma tarkastelee Auringon roihuja ja niiden muodostamaa gammasäteilyä kvalitatiivisella tasolla. Tutkielma keskittyy erityisesti gammasäteilyä synnyttäviin hiukkasreaktioihin ja niiden havaittaviin ominaisuuksiin gammasäteily-spektrissä.

Asiasanat: Auringon roihut, magneettinen rekonnektio, Auringon hiukkaskiihdytysmekanismi, gammasäteily, gammasäteilyä mittaavat missiot

Sisällys

Johdanto	1
1 Auringon roihut	1
2 Gammasäteily	5
2.1 Jarrutussäteily	6
2.2 Pionien tuotto ja hajoaminen	8
2.3 Ytimien virittymisen purkautuminen	10
2.3.1 Kapeat spektriviivat	11
2.3.2 Leveät spektriviivat	12
2.4 Neutronisieppaus	13
2.5 Positroniannihilaatio	14
3 Missiot	14
3.1 Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager	15
3.2 Fermi Gamma-ray Space Telescope	17
4 Yhteenveto	17
A Tekoälyn käyttö tutkielmassa	20

Johdanto

Aurinkokuntamme voimakkaimmat magneettiset ilmiöt esiintyvät Auringon kromosfäärin yläpuolella matalalla Auringon koronassa [1–3]. Näissä tapahtumissa Auringon jännittyneen magneettikentän topologia uudelleenjärjestyy alhaisemmalle energiatilalle räjähdysmäisesti vapauttaen valtavia määriä energiaa [1, 2]. Tämä energia aiheuttaa hiukkasten kiihdytystä, plasman lämmitystä ja koronan plasman liikettä, jotka havaitaan koko sähkömagneettisen spektrin alueella [1, 2]. Tätä magneettisen energian vapautumisen aiheuttamaa sähkömagneettista ilmiötä kutsutaan Auringon roihuksi [1].

Roihuissa havaitaan sähkömagneettisen spektrin korkeaenergiaisinta säteilyä, gammasäteilyä [2]. Sitä syntyy relativistisiin nopeuksiin kiihdytettyjen hiukkasten vuorovaikuttaessa ympäröivän plasman kanssa, minkä vuoksi gammasäteilyn tutkiminen voi kertoa paljon näistä korkeaenergiaisista reaktioista [2, 4]. Näitä vuorovaikutuksia on useita, ja ne havaitaan gammasäteilyn spektrissä erillisinä osina [2].

Tämä tutkielma tarkastelee Auringon roihta (luku 1) ja erityisesti niiden gammasäteilyn (luku 2) spektrin osia kvalitatiivisella tasolla. Teoreettisen spektrin jälkeen tarkastellaan tärkeimpiä Auringon gammasäteilyä mittaavia missioita ja niiden havaintoja (luku 3).

1 Auringon roihut

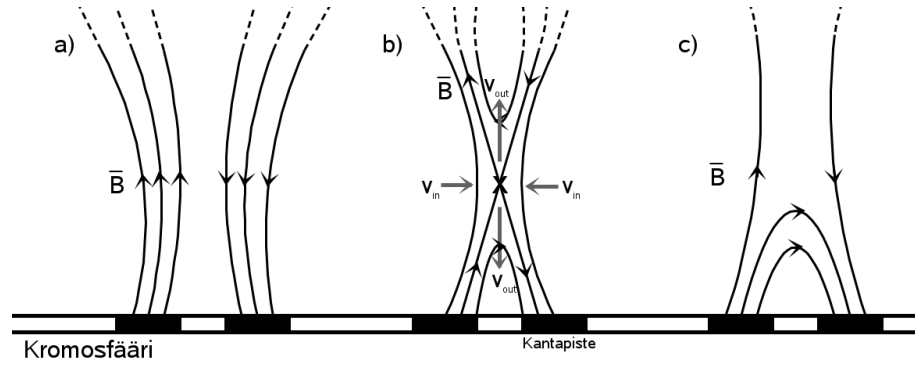
Auringon konvektioalueella muodostuu jatkuvasti uutta magneettista vuota Auringon dynamon ansiosta [2]. Tämä magneettinen vuo nousee fotosfäärin ja kromosfäärin läpi koronaan muodostaen fotosfäärin pinnalle voimakkaita magneettikentän alueita, joita kutsutaan aktiivisiksi alueiksi, jos ne ovat tarpeeksi suuria [2]. Näiden aktiivisten alueiden määrä seuraa Auringon aktiivisuuden noin 11 vuoden sykliä [5]. Aktiivisten alueiden välinen magneettikenttä muodostaa kaarimaisia sil-

mukoita fotosfäärin yläpuolelle [2]. Vuon noustessa fotosfääriin Auringon differentiaalinen rotaatio ja konvektio synnyttävät magneettikenttään epätasaisuuksia ja jännitystä [2]. Jotta jännitys ei kasvaisi liian suureksi, jännittyneen ja epätasaisen magneettikentän täytyy usein järjestyä uudelleen [2].

Magneettikentän uudelleenjärjestymisen on yleisesti hyväksytty tapahtuvan erilaissa magneettisissa rekonnektioprosesseissa [1, 2]. Magneettisessa rekonnektiossa varattuja hiukkasia kuljettavat vastakkaissuuntaiset magneettikentät lähestyvät toisiaan [5, 6]. Magneettikentät yhdistyvät magneettisessa rekonnektiopisteessä, vaihtuen kenttäviivojen topologista yhdistymistä [5, 6]. Magneettinen rekonnektiopiste sijaitsee virtalevyssä, jonka muodostavat vastakkaissuuntaiset magneettikentät [2, 5]. Tämän magneettikentän jännitys purkautuu plasman ulosvirtauksella, jonka aiheuttaa virtalevyn ja magneettikentän välinen Lorentzin voima [2].

Magneettikentän jännityksen purkautuminen vapauttaa suuren määrän energiaa, joka lämmittää ympäröivää plasmaa, liikuttaa suuria plasmamassoja ja kiihdyttää varattuja hiukkasia [6]. Hiukkasten kiihtyminen ja plasman lämmitys havaitaan sähkömagneettisena säteilynä koko sähkömagneettisen spektrin alueella [1]. Tätä sähkömagneettista ilmiötä kutsutaan Auringon roihuksi [1]. Roihujen yhteydessä usein havaittavia suuria koronasta poistuvia plasmapurkauksia kutsutaan koronan massapurkauksiksi [2, 4].

Auringon roihussa suuri osa korkeaenergisestä säteilystä syntyy kiihdytettyjen hiukkasten presipitoituessa kromosfääriin ja törmätessään tiheän kromosfäärin hiukkasiin [1]. Presipitoituessaan hiukkaset laskeutuvat magneettikenttää pitkin roihun kaaren kantapisteisiin [1]. Kantapisteissä hiukkaset muodostavat yleensä kaksi tiivistä säteilylähdetä [1]. Hiukkaset voivat myös jäädä väliaikaisesti magneettisiin ansoihin liikkumaan edestakaisin kantapisteiden välisessä magneettikentässä, jolloin niiden aiheuttama korkeaenerginen säteily voi viivästyä suoraan presipitointiin hiukkasiin verrattuna [2, 5]. Hiukkasten presipitoitumisaika riippuu myös niiden



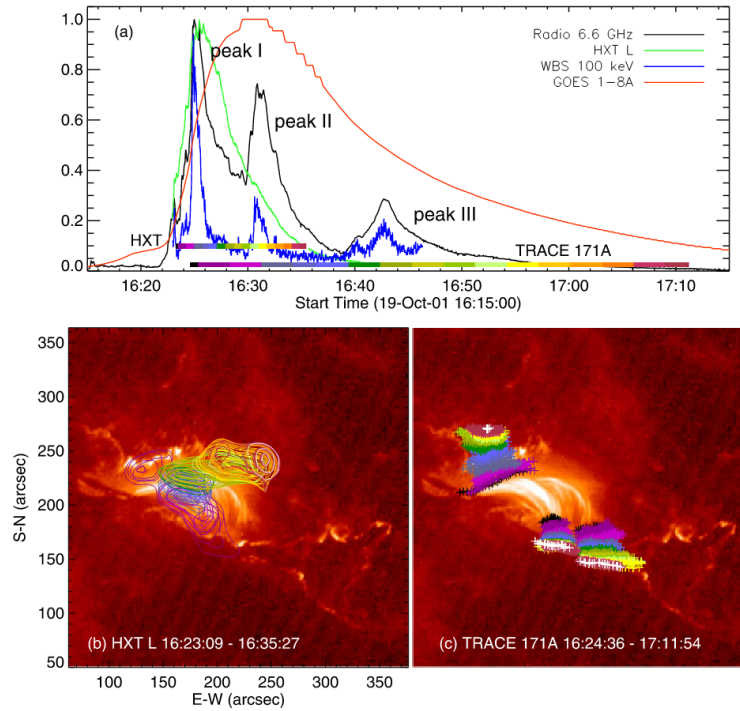
Kuva 1. Auringon roihun magneettisen rekonnektion yksinkertaistettu kuva, jossa ensin (a) kaksi vastakkaissuuntaista magneettikenttää \bar{B} lähestyvät toisiaan. Sitten (b) käynnistävä tapahtuma saa kenttäviivat yhdistymään ja magneettinen rekonnektio käynnistyy. Magneettikenttä uudelleenjärjestäytyy X-pisteessä, johon saapuu virtausnopeudella v_{in} plasmaa ja poistuu rekonnektioalueella virtausnopeuksiin v_{out} kiihdytettynä. Osa kiihdytetyistä hiukkasista presipitoituu roihun kantapisteisiin. Roihun jälkeen (c) magneettikenttä on alhaisemmalla energiatilalla. [2]

lentoajasta, joka vakioetäisyydellä riippuu hiukkasten nopeudesta [2]. Tämä tarkoittaa, että samaan aikaan kiihdytetyistä hiukkasista korkeaenergisemmät yleensä emittoivat säteilyä ensin [2].

Roihuille ja niiden rekonnektioprosesseille on monia malleja [2]. Näiden tärkeimmät erot ovat tilanteen topologiassa ja siinä, mikä ajaa vastakkaissuuntaiset magneettikentät yhteen aiheuttaen rekonnektion [2]. Roihujen standardimallina pidetään kaksiulotteista CSHKP-mallia [2]. Tämä on nimetty viiden mallia erityisesti kehittäneen tutkijan (Carmichael, Sturrock, Hirayama, Kopp ja Pneuman) nimien ensimmäisten kirjainten perusteella [2]. Yleistetty ja yksinkertaistettu roihujen CSHKP-malliin [2, 5] perustuva kuvaus on esitetty kuvassa 1.

Valtaosa roihuista havaitaan magneettisesti aktiivisilla alueilla, erityisesti Auringon neutraaliviivojen eli magneettikentän polaariteetin vaihtumisrajojen läheisyydessä. Roihujen sijaintia tai aikaa ei kuitenkaan voida vielä ennakoida tarkasti. [1]

Roihujen säteilyn aikakehitys voidaan jakaa kahteen eri vaiheeseen [1]. Ensimmäinen vaihe on lyhyt, usein monesta intensiteettihiipusta koostuva impulsiivinen



Kuva 2. Aikakehitys *SOL2001-10-19T01:05*-roihulle eri aallonpituuksilla. Suhteellisen säteilyintensiteetin valokäyrissä (a) voidaan erottaa esimerkiksi radioaalto- (musta) ja kovalla röntgensäteilyalueella (sininen) roihun impulsiivinen vaihe ja pehmeällä röntgensäteilyalueella (punainen) pitkäkestoinen vaihe. Alemmissä kuvissa (b ja c) on *TRACE*-satelliitin ultraviolettisäteilykuvat, joista ensimmäiseen (b) on piirretty ylemmän kuvan (a) perusteella värjätyt kovan röntgensäteilyn isoviivat. Samaan tapaan toiseen kuvaan (c) on piirretty ylemmän kuvan värjäyksellä ultraviolettikantapisteiden sijainnit. Kuva on lähteen [2] kuva 1.

vaihe (engl. impulsive phase), joka erottuu yleensä parhaiten röntgen- ja radiosäteilyalueella [1, 7]. Toinen vaihe on tasaisempi pitkäkestoinen vaihe (engl. gradual phase) [1]. Koska molempia vaiheita ei aina havaita roihussa, voidaan myös roihut jakaa impulsiivisiin ja pitkäkestoisiin roihuihin [4]. Esimerkki roihusta, jossa molemmat vaiheet ovat selvästi erotettavissa, on esitetty kuvassa 2.

Toinen yleinen tapa luokitella roihuja on niiden pehmeän röntgensäteilyn (engl. soft X-Ray) (SXR) intensiteetin perusteella. GOES-satelliitin (*Geostationary Operational Environmental Satellites*) standardi-instrumentti mittaa näitä intensiteettejä, joiden perusteella roihut luokitellaan tärkeysjärjestykseen. Tämä luokitus alkaa intensiivisimmistä X-luokan roihuista ja laskee M-, C- ja B-luokkien kautta alhai-

simman intensiteetin A-luokkaan. [1]

2 Gammasäteily

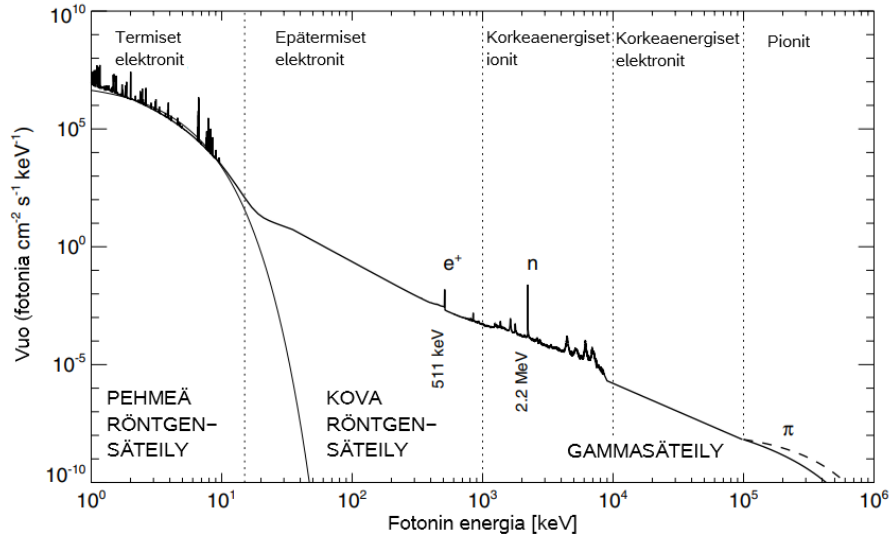
Gammasäteily on sähkömagneettisen spektrin korkeaenergisinta säteilyä. Gammasäteilyksi määritellään yleensä aallonpituutta $\lambda \approx 0,01$ nm lyhyempi sähkömagneettinen säteily, jota vastaa energialtaan yli $\epsilon \approx 100$ keV säteily. [2]

Roihujen gammasäteilyemissiot ovat tärkeitä, sillä ne kertovat kovan röntgensäteilyn (engl. hard X-Ray) (HXR) ohella erityisesti impulsiivisen roihun vaiheen korkeaenergiaisimmista ilmiöistä [1, 7]. Osa gammasäteilystä havaitaan kuitenkin myös pitkäkestoisessa vaiheessa [7]. Nämä korkeaenergiaisimmat ilmiöt perustuvat elektronien ja ionien kiihdytykseen usein relativistisiin nopeuksiin [2, 4].

Gammasäteilyn spektrissä esiintyy näiden hiukkasten aiheuttamia spektrin osia. Nämä osat voidaan jakaa koko tunnetun gammasäteily-spektrin alueella havaittuun kontinuumiin ja spektriviivoihin eli spektrissä havaittuihin piikkeihin tietyillä aallonpituuksilla. Spektriviivojen avulla voidaan määrittää roihun ympäröivään plasmaan kiihdytettyjen hiukkasten suhteellisia lukumääriä, tiheyksiä ja lämpötiloja. Lisäksi voidaan määrittää esimerkiksi rekonnektioalueelta presipitoituvien protonien ja ionien nousukulmajakauma eli hiukkasten nopeusvektorin ja magneettikentän välisten kulmien jakauma. [2]

Gammasäteily-spektrin kontinuumi aiheutuu erityisesti elektronien jarrutussäteilystä (luku 2.1) ja pionien hajoamisesta (luku 2.2). Spektriviivat aiheutuvat ionien ytimien viritystilojen purkautumisesta (luku 2.3), neutronisieppauksesta (luku 2.4) ja positroniannihilaatiosta (luku 2.5) [2]. Edellä kuvatun spektrin muodostavat ilmiöt käsitellään seuraavissa alaluvuissa.

Röntgen- ja gammasäteilyn laaja teoreettinen spektri on esitetty kuvassa 3. Vastaava teoreettinen spektri, joka keskittyy gammasäteilyalueeseen ja johon on merkitty kaikki spektrin osat, on esitetty kuvassa 4. Lisäksi tiivistetty kuvaus sekä tär-



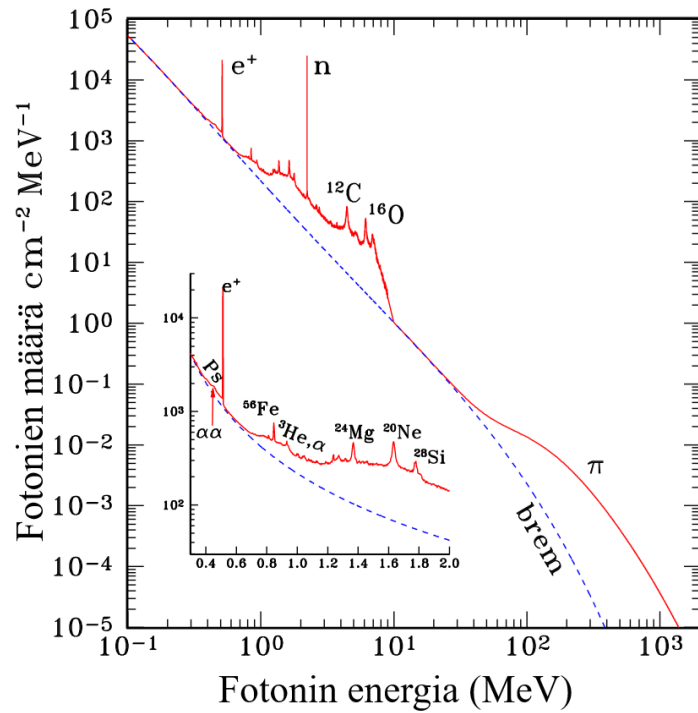
Kuva 3. Roihun röntgen- ja gammasäteilyn teoreettinen spektri, jossa kuvan yläreunassa on esitetty spektrin osan merkittävimmän ominaisuuden aiheuttava hiukkanen. Erityisesti positroniannihilaation, e^+ , ja neutronisieppauksen, n , spektriviivat energioineen ovat merkitty kuvaan. Lisäksi neutraalien pionien hajomisen, π , aiheuttama kontinuumi on merkitty katkoviivalla. Kuva on muokattu lähteen [2] kuvasta 14.1.

keimpien reaktioiden osapuolista että niissä syntyvästä säteilystä on esitetty kuvassa 5.

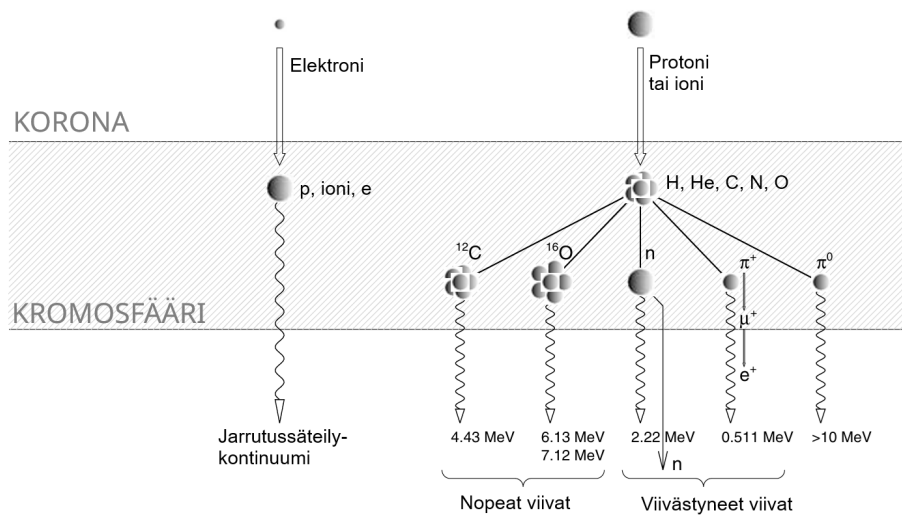
2.1 Jarrutussäteily

Jarrutussäteily (saks. bremsstrahlung) on elektronien emittoimaa sähkömagneettista säteilyä, kun niiden kineettinen energia vähenee epäelastisen sironnan johdosta [2]. Tämän epäelastisen sironnan aiheuttaa varattujen hiukkasten välinen Coulombin vuorovaikutus, ja sironnan takia emittoidun fotonin energia vastaa elektronin kineettisen energian muutosta [2, 8].

Auringossa jarrutussäteily tapahtuu erityisesti elektronien ja positiivisesti varattujen ionien välillä. Suurin osa Auringosta havaitusta jarrutussäteilystä on termisten elektronien aiheuttamaa termistä jarrutussäteilyä. Termiset elektronit ovat elektroneita, joiden liike on pääasiassa lämpöliikettä. [2]



Kuva 4. Roihun gammasäteilyn teoreettinen spektri, johon on merkitty spektrin osat. Lisäksi kuvaajassa on suurennettu alakuvaaaja, jossa erottuu paremmin monet virityksen purkausviivat. Kuvassa on samat merkinnät kuin kuvassa 3 merkityille ilmiöille. Lisäksi kuvaan on merkitty positroniumin aiheuttama kontinuumi Ps , $\alpha\alpha$ -viiva, jarrutussäteilyn kontinuumi $brem$ ja vahvimmat virityksen purkausviivat kyseisten viivojen aiheuttamilla isotoopeilla. Kuva on muokattu lähteen [8] kuvasta 1.



Kuva 5. Tiivistelmä tärkeimpien gammasäteilyä aiheuttavien reaktioiden osapuolista ja säteilyenergioista. Kuva on muokattu lähteen [2] kuvasta 14.7.

Kuitenkin erityisesti korkeammilla säteilyenergioilla HXR- tai gammasäteilyalueella elektronien nopeuksien täytyy olla relativistisia, jotta elektronit voisivat menettää siroinnassa tarpeeksi suuren määrän energiaa [2]. Tällaisia elektroneja, jotka ovat saaneet energiansa jonkin muun kuin lämpötilan tasoittumisen (termalisaation) vaikutuksesta, kutsutaan epätermisiksi elektroneiksi [2]. Auringon roihuissa epätermiset elektronit ovat pääasiassa magneettisen rekonnektion kiihdyttämiä, ja suurin osa epätermisestä jarrutussäteilystä syntyy näiden elektronien presipitoituessa kromosfääriin [2, 5]. Näiden epätermisten elektronien suhde valonnopeuteen $\beta = \frac{v}{c}$ on HXR-alueella $\beta_{HXR} \approx 0,2 - 0,5$ ja gammasäteilyalueella $\beta_\gamma > 0,5$ [2].

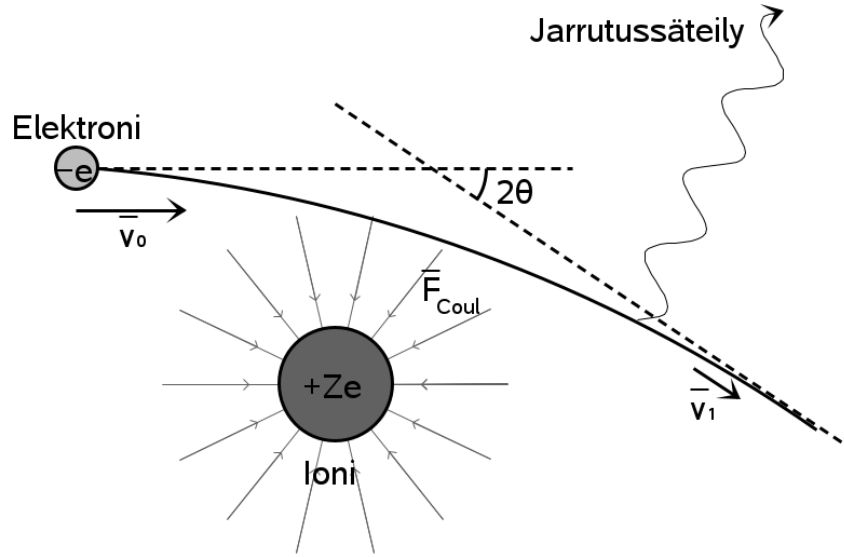
Yhden elektronin emittoiman jarrutussäteilyn energia riippuu muun muassa elektronin vauhdista ja kohtisuorasta etäisyydestä ioniin, jotka voivat vaihdella jatkuvalla jakaumalla. Näin erittäin monen elektronin emittoiman jarrutumissäteilyn energia muodostaa myös jakauman eli säteilyspektrissä kontinuumin. [2]

Epätermisen jarrutussäteilyn kontinuumin matalan energian raja-arvo riippuu havaintojen perusteella erityisesti roihun koosta [2]. Korkean energian raja-arvoa ei ole havaittu; suurimmat havaitut epätermisen jarrutussäteilyn energiat ovat olleet useita satoja MeV:ja [2, 4]. Myös kontinuumin muoto riippuu elektronien ja presipitaatioalueen ominaisuuksista, mutta sitä voidaan yleensä mallintaa erilaisilla potenssilakijakaumilla [5].

Esimerkki elektronin siroinnasta ionin Coulombin kentässä on esitetty kuvassa 6.

2.2 Pionien tuotto ja hajoaminen

Ionien presipitoituessa ja törmätessä kromosfäärin plasmaan, niiden energiat voivat olla useita satoja MeV:ja [2, 9]. Tällöin ytimien välisessä vuorovaikutuksessa voi syntyä varattuja (π^\pm) ja neutraaleja pioneja (π^0) [2, 9]. Neutraalien pionien hajoaminen on erittäin nopeaa [10]. Varattujen pionien elinaika on myös lyhyt, mutta niiden aiheuttama gammasäteily on viivästynyttä, koska se syntyy useiden välireaktioiden



Kuva 6. Esimerkkikuva jarrutussäteilystä, jossa aluksi v_0 nopeudella kulkeva elektroni siroaa positiivisen ionin Coulombin kentässä kokemansa voiman F_{Coul} takia kulmalla 2θ ja jatkaa tähän suuntaan hitaammalla nopeudella v_1 emittoiden jarrutussäteilyä. Kuva perustuu lähteen [2] kuvaan 13.2.

jälkeen [2, 10].

Yleisimmät pioneita muodostavat reaktiot tapahtuvat kiihdytetyn protonin ja kromosfäärin protonin tai alfa-hiukkasen välillä [10]. Tyypillinen positiivisesti varautun pionin tuottava reaktio on esitetty seuraavassa reaktioyhtälössä:



jossa p on protoni ja n neutroni [2].

Neutraalit pionit hajoavat lähes aina sähkömagneettisesti kahteen saman energaiseen gammasäteilyfotoniin (γ) [2, 9]. Näiden fotonien energiat ovat puolet neutraalin pionin lepoenergiasta ($m_\pi^0 c^2 = 134,96$ MeV) eli noin $E_\gamma = 67$ MeV [2]. Koska pioneilla ei ole tiettyä yhteistä nopeutta, tämä spektriviiva leventyy Doppler-ilmion (Doppler-leventymisen) vuoksi leveäksi kontinuumiksi [2]. Neutraalien pionien kontinuumin maksimi havaitaan kuitenkin tällä 67 MeV:n arvolla [2, 10]. Tämä kontinuumi voi yltää yli 100 MeV:n energioihin [10].

Varatut pionit voivat joskus hajota myoneihin (μ^\pm) ja myonin neutriinoihin (ν_μ) ja antineutriinoihin ($\bar{\nu}_\mu$) [2]. Myonit hajoavat edelleen elektroneiksi (e^-), positroneiksi (e^+), elektronien neutriinoihin (ν_e) ja antineutrooneihin ($\bar{\nu}_e$) ja myonien neutriinoihin ja antineutriinoihin [2]. Nämä hajoamisreaktiot on esitetty seuraavissa reaktioyhtälöissä [2]:

$$\pi^\pm \mapsto \mu^\pm + \nu_\mu/\bar{\nu}_\mu, \quad (2)$$

$$\mu^\pm \mapsto e^\pm + \nu_e/\bar{\nu}_e + \bar{\nu}_\mu/\nu_\mu. \quad (3)$$

Näiden varattujen pionien hajoamisreaktioiden muodostamat elektronit ja positronit vaikuttavat gammasäteily-spektriin tuottamalla jarrutussäteilyä (ks. luku 2.1) ja annihiloitumalla (ks. luku 2.5) [2, 11].

2.3 Ytimien virittymisen purkautuminen

Kiihdytettyjen ionien presipitoituessa kromosfääriin, törmäävä ydin ja hiukkanen tai toinen ydin voivat muodostaa virittyneen ytimen [2]. Ytimen virittymisen purkautumisen (engl. nuclear de-excitation) synnyttämä säteily havaitaan viritystilalle ominaisella energialla [2]. Gammasäteilyalueella nämä sijoittuvat 0,5 – 8,0 MeV energioille [2]. Näiden viritystilojen elinajat ovat lyhyitä ($\approx 10^{-12}$ s), minkä vuoksi syntyviä spektriviivoja kutsutaan "nopeiksi" viivoiksi (engl. prompt lines) [2, 9].

Muodostuvat spektriviivat ovat joko kapeita tai leveitä [2]. Kiihdytettyjen protonien tai helium-ytimien, eli alfa-hiukkasten (α), vuorovaikuttaessa kromosfäärin raskaampien ytimien kanssa muodostuu kapeita spektriviivoja [2]. Käänteisesti, jos raskaampi ioni kiihdytetään kromosfääriin, jossa se vuorovaikuttaa kevyen vety- tai helium-ytimen kanssa, muodostuu leveä spektriviiva [9]. Kapeat spektriviivat käsitellään luvussa 2.3.1 ja leveät spektriviivat luvussa 2.3.2.

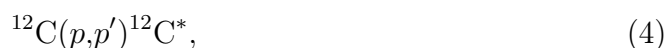
2.3.1 Kapeat spektriviivat

Ytimien virittymisen purkautumisen kapeat spektriviivat muodostuvat kiihdytettyjen protonien tai alfa-hiukkasten osuessa kromosfäärin raskaampiin ioneihin [2].

Kapeilla spektriviivoilla on myös viivan leveys, vaikka tämä on leveisiin viivoihin verrattuna huomattavasti kapeampi. Kapeiden viivojen leveys aiheutuu virittyneen ytimen rekyylivauhdista, eli reaktiossa ytimestä vapautuvan hiukkasen aiheuttamasta pienestä vastakkaissuuntaisesta nopeudesta. [2]

Vahvimmat piikit havaitaan yleensä hiilen (^{12}C) 4,439 MeV:n, hapen (^{16}O) 6,129 MeV:n, piin (^{28}Si) 1,779 MeV:n, neonin (^{20}Ne) 1,634 MeV:n, magnesiumin (^{24}Mg) 1,369 MeV:n ja raudan (^{56}Fe) 0,847 MeV:n energioilla [8].

Ytimien virittymisiä voidaan esittää reaktiokaavioilla, joissa ensimmäisenä esitetään virittyvä ydin. Sulkeiden sisällä on ensin virittävä hiukkanen ja sitten reaktiossa muodostuvat hiukkaset. Jos reaktiossa voi muodostua eri hiukkasia, näitä voidaan merkitä yleisesti "x":llä. Jos saapuva ja lähtevä hiukkanen ovat samoja hiukkasia, lähtevää merkitään "'":lla. Viimeisenä reaktiossa esitetään virittynyt ydin. Ytimen viritystä kuvataan "*" :llä. Jokaiselle edellisessä kappaleessa mainitulle vahvan piikin aiheuttavalle aineelle on mahdollinen viritysreaktio, jossa protoni tai alfa-hiukkanen virittää ytimen muuttamatta ytimen rakennetta [2]. Esimerkiksi tällaiset reaktiot hiilelle ovat [2]:



Taulukossa I on lisäksi esitetty aikaisemmin mainituille ytimille näiden viritystilaenergioiden reaktioita, jotka muuttavat ytimen rakennetta. Taulukossa on myös esitetty ytimien viritystilojen purkautumisenergioita ja keskimääräisiä elinaikoja.

Taulukko I. Ytimien virittymisen purkautumisen vahvimpien kapeiden viivojen energioita, muutamia mahdollisia ytimen rakennetta muuttavia viritysreaktioita ja keskimääräisiä elinaikoja. Muokattu lähteen [2] taulukosta 14.2

Energia (MeV)	Reaktio	Keskimääräinen elinaika (s)
4,439	$^{14}\text{N}(p,x)^{12}\text{C}^*$ $^{16}\text{O}(p,x)^{12}\text{C}^*$	$6,1 \times 10^{-14}$
6,129	$^{20}\text{Ne}(p,x)^{16}\text{O}^*$	$2,7 \times 10^{-11}$
1,779	$^{32}\text{S}(p,x)^{28}\text{Si}^*$	$6,9 \times 10^{-13}$
1,634	$^{24}\text{Mg}(p,x)^{20}\text{Ne}^*$	$1,1 \times 10^{-12}$
1,369	$^{25}\text{Mg}(p,pn)^{24}\text{Mg}^*$ $^{26}\text{Mg}(p,p2n)^{24}\text{Mg}^*$ $^{28}\text{Si}(p,x)^{24}\text{Mg}^*$	$2,0 \times 10^{-12}$

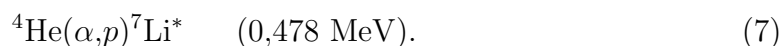
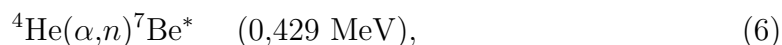
2.3.2 Leveät spektriviivat

Ytimien virittymisen purkautumisen leveät spektriviivat muodostuvat kiihdytettyjen raskaiden ionien osuessa kromosfäärin vetyyn ja heliumiin [2]. Raskaan ionin törmäys kevyen helium- tai vetyytimen kanssa jättää ionille huomattavan osan sen liikemäärää [2, 9]. Näin ionin ytimen virityksen purkaus tapahtuu kapeisiin viivoihin verrattuna suurilla nopeuksilla, jotka havaitaan Doppler-ilmiön vuoksi spektrissä leveinä viivoina [2, 8].

Näiden leveiden spektriviivojen maksimit sijaitsevat samoilla energioilla kuin vastaavat kapeat spektriviivat, sillä viritysreaktiot ovat samat [7, 9]. Viivojen suurten leveyksien takia leveät viivat ovat osittain päällekkäin, eikä niitä näin voida erottaa toisistaan [9]. Monista leveistä viivoista muodostuvaa leveää spektrin osaa voidaan kutsua "valekontinuumiksi" (engl. pseudo/quasi-continuum) [1, 8].

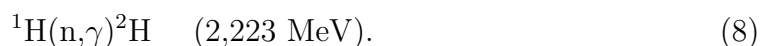
Raskaiden ja kevyiden ytimien virittymisreaktioiden lisäksi spektrissä voidaan havaita α -hiukkasen ja heliumatomin ytimen, eli käytännössä kahden heliumytimen, välisten viritysreaktioiden muodostama $\alpha\alpha$ -viiva [2, 8]. Tämä, intensiteettimaksi-

miltaan noin 0,45 MeV:n suhteellisen leveä viiva, muodostuu kahden virityreaktion purkautumisen yhdistyneenä viivana [2, 8]. Nämä litiumin (${}^7\text{Li}$) ja berylliumin (${}^7\text{Be}$) virityreaktiot ja niiden virittymisen purkautumisenergiat sulkeissa on esitetty seuraavilla reaktioyhtälöillä [2]:



2.4 Neutronisieppaus

Neutroneja syntyy monessa eri prosessissa Auringon kromosfäärissä. Esimerkiksi kiihdytetyt ionit ja helium-ytimen hajoaminen muodostavat neutroneja. Protonit (${}^1\text{H}$ -ytimet) voivat siepata näitä neutroneja muodostaakseen deuteroneja (${}^2\text{H}$ -ytimiä) reaktiossa:



Fuusiossa fotonina vapautuva deutronin sidosenergia on 2,223 MeV. [2]

Sieppausta varten neutronien täytyy liikkua hitaasti [2, 7]. Näin suurin osa 2,223 MeV:n viivan aiheuttavista neutroneista ensin hidastuu laskeutuessaan kromosfäärin läpi ja yhdistyy protonien kanssa vasta fotosfäärissä [2]. Tämä viivästyttää viivan havaitsemista minuuteilla roihun alusta ja aiheuttaa sen, että muodostuvan viivan leveys on erittäin ohut [2, 7].

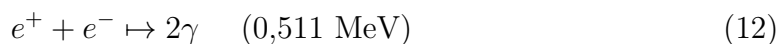
Fotosfäärissä voi tapahtua myös toinen neutronisieppausreaktio, jossa helium ${}^3\text{He}$ sieppaa neutronin reaktiossa [2]:



Tämä reaktio ei tuota gammasäteilyä, mutta voi lyhentää 2,223 MeV:n viivan havaitsemisaikaa [2].

2.5 Positroniannihilaatio

Kiihdytetyt ionit (^{12}C , ^{14}N , ^{16}O) voivat törmäyksissä muodostaa radioaktiivisia ytimiä (^{11}C , ^{13}N , ^{15}O) [2, 8]. Näiden ytimien hajotessa voi muodostua positroneja, jotka annihiloituvat elektronien kanssa muodostaen kaksi 0,511 MeV fotonia [2, 8]. Positroneja muodostuu myös positiivisesti varattujen pionien hajoamisessa (ks. luku 2.2) [2, 8]. Esimerkkireaktiosarja on esitetty reaktioyhtälöillä 10–12 [2].



Positronien suora annihilaatio elektronien kanssa johtaa kapeaan 0,511 MeV -viivaan [8]. Positronit ja elektronit tai positronit ja vetyatomit voivat kuitenkin myös hetkellisesti muodostaa positroniumin (Ps), eli yhden positronin ja elektronin muodostaman vetyä muistuttavan "atomin" [8]. Muodostuneen positroniumin spin voi olla 0 (singlettitila) tai 1 (triplettitila) [2].

Positronium on kuitenkin epävakaata, ja näin se annihiloituu, emittoiden singlettitilalla kaksi 0,511 MeV fotonia kuten suorassa annihilaatiossa ja triplettitilalla kolme matalaenergiaisempaa fotonia [2, 8]. Koska näiden kolmen fotonin energia ei ole vakio, muodostuu kontinuumi [2]. Positroniannihilaatio kontinuumiin ja viivan suhdetta mitataan " $3\gamma/2\gamma$ "-suhteella [2]. Tämän suhteen ja 0,511 MeV:n viivan leveyden avulla voidaan määrittää positroniannihilaatioalueen plasman tiheys [2, 9].

3 Missiot

Ilmakehä estää valtaosaa korkeaenergiaisemmasta sähkömagneettisesta säteilystä pääsemästä maan pinnalle [2]. Tämän takia ensimmäiset gammasäteilyhavainnot tehtiin 1970-luvulla avaruusaluksella kuljetetulla havaintolaitteella [8].

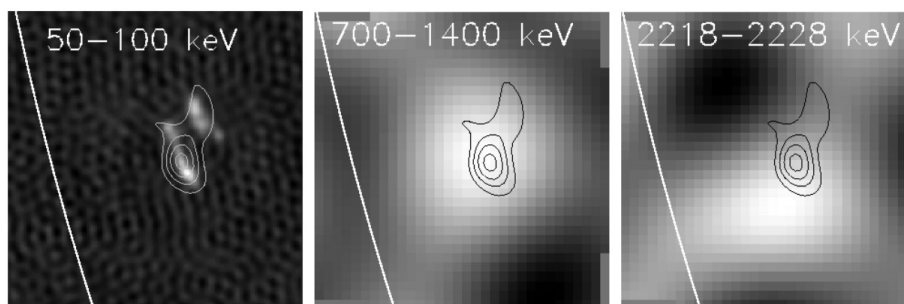
Kuitenkin vasta 1980-luvulla *Solar Maximum Mission* (SMM) aloitti gammasäteilyalueen systemaattisen tutkimisen spektrometrillään [8]. SMM:n yli 10 MeV:n energia-alueen havainnot antoivat todisteita muun muassa roihun vaiheista ja pioni-hajoamisesta roihuissa [4]. 1990-luvulla *Compton Gamma-Ray Observatory*:n (CGRO) *Energetic Gamma-Ray Experiment telescope* (EGRET) mittasi ensimmäiset GeV:n energia-aluehavainnot [4].

Muita tärkeitä Auringon korkeaenergiaisen säteilyn mittaamiseen osallistuneita missioita ja teleskooppeja ovat muun muassa: *Transition Region And Coronal Explorer* (TRACE), *International Gamma-ray Astrophysics Laboratory* (INTEGRAL) ja edelleen toimiva *Wind*-aluksen *Konus*-spektrometri [1, 2, 5]. Kuitenkin Auringon roihujen kannalta tärkeimmät 2000-luvun Auringon korkeaenergiaistasäteilyä mittaavat missiot ovat olleet *Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager* (RHESSI) ja edelleen mittauksia tekevä *Fermi Gamma-ray Space Telescope* [2, 4]. Näitä kahta missiota tarkastellaan tarkemmin seuraavissa alaluvuissa.

3.1 Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager

Vuonna 2002 alkaneen *Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager* (RHESSI) -mission havaintolaite oli ensimmäinen röntgen- ja gammasäteilyn kuvantamisspektroskopiaan, eli säteilyn suunnan ja energian mittaamiseen, kykenevä teleskooppi [1].

RHESSI:n yhdeksän kryogenisesti jäädytettyä ja segmentoitua germaniumhavaintolaitetta mahdollistivat korkean resoluution röntgen- ja gammasäteily-spektroskopian. Spektroskopian energia-alue oli 3 keV - 17 MeV. Tällä välillä spektrin resoluutio kasvoi noin 1 keV:stä aina noin 10 keV:iin. Jokaisen havaintolaitteen volframkollimaattori mahdollisti kuvantamisen noin yhteen MeV:iin asti Fourier muunnoksilla ja aluksen pyörimistä hyväksi käyttäen. Kuvantamisen kulmaresoluutio heikkeni noin kahdesta kaarisekunnista kahteenkymmeneen energian kasvaessa. Teleskoopin



Kuva 7. RHESSI:n ensimmäisiä gammasäteilykuvia SOL2002-07-23T00:35 (X4.8) -roihusta samalta aikajaksolta ja samalla $96'' \times 96''$ näkökentällä. Kaikkiin kuviin on merkitty 300-500 keV:n energia-alueen isoviivat (30%, 50%, 70% ja 90% intensiteeteillä) ja Auringon kiekon reuna valkoisella kaarella. Vasemmassa kuvassa on korkean resoluution ($3''$) röntgensäteilykuva 50-100 keV alueelta. Keskimäinen kuva on vastaava kuva matalammalla resoluutiolla ($35''$) 0,7-1,4 MeV energia-alueelta. Oikeanpuoleisimmassa kuvassa on myös matalamman resoluution kuva ($35''$) neutronisieppauksen viivan (2,223 MeV) energia-alueelta 2,218-2,228 MeV. Erityisesti kahdesta jälkimmäisestä kuvasta voidaan nähdä matalasta resoluutiosta huolimatta, että säteilylähteiden sijainnit eivät ole samat. Kuva on lähteen [12] kuva 3.

noin yhden asteen näkökenttä riitti koko Auringon kiekon havaitsemiseen. [1, 7]

RHESSI:n tulokset korjasivat ja varmistivat monia aikaisempia tuloksia roihuis-
ta, esimerkiksi kiihdytettyjen elektronien lukumäärään, gammasäteilyn aikakehitty-
miseen ja magneettikentän muutokseen liittyen [6]. RHESSI:n tärkeimpiin saavu-
tuksiin kuuluu kuitenkin roihujen lähes kaikkien merkittävien gammasäteilyspekt-
riviivojen (erittäin kapeaa neutronisieppausviivaa lukuun ottamatta) erottaminen
ensimmäistä kertaa teleskoopin korkearesoluutiospektrokopian avulla [2]. Lisäksi
RHESSI tuotti ensimmäiset roihujen gammasäteilykuvat, joiden perusteella kyet-
tiin muun muassa toteamaan, että röntgen- ja gammasäteilylähteiden välillä voi ol-
la suuri välimatka [6, 12]. Kolme näistä kuvista on esitetty esimerkkinä kuvassa 7
[6, 12].

3.2 Fermi Gamma-ray Space Telescope

Vuonna 2008 laukaistun *Fermi Gamma-ray Space Telescope* -mission (tästä lähtien vain Fermi) *Large Area Telescope* (LAT) -havaintolaite on moninkertaistanut havaittujen korkeaenergiaisten Auringon roihujen lukumäärän [4].

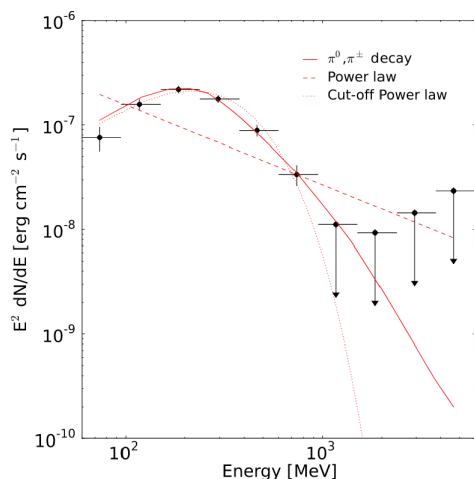
LAT mittaa saapuvien gammasäteilyfotonien teleskoopin ylimmissä kerroksissa muodostamien elektroni-positroniparien liikeratoja ja niiden energioita [13]. Näiden avulla voidaan määrittää saapuvan fotonin energia, suunta ja aikatieto [4]. LAT kykenee mittaamaan gammasäteilyä 30 MeV - 300 GeV energia-alueella ja 2,4 sr suuruisella näkökentällä [4]. Energia-alueensa johdosta LAT havaitsee erityisesti pionihajoamissäteilyä ja korkeaenergiaisinta jarrutussäteilyä [4]. Tätä energia-aluetta voidaan kuitenkin tarvittaessa kasvattaa alkamaan röntgensäteilyalueelta aina noin 8 keV:stä käyttämällä Fermin toista havaintolaitetta, *Gamma-ray Burst Monitor*:ia (GBM), LAT:in tukena [14]. Koska LAT havaitsee koko taivaan gammasäteilyä, Auringon on sen näkökentässä vain noin 40% ajasta [4].

Fermin havaintojen muodostamien roihukatalogien avulla on tarkentanut erityisesti ymmärrystä roihujen gammasäteilystä ja luokituksista. Esimerkiksi Fermin havaintojen perusteella gammasäteily on yleistä jopa keskisuurissa roihuissa, ja pitkäkestoisiin roihuihin liittyy lähes aina koronan massapurkaus. [4]

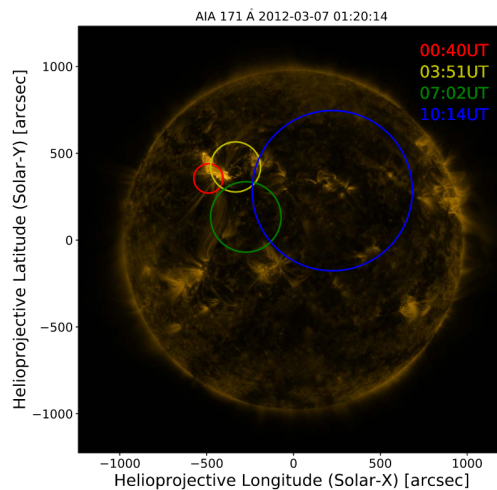
Kaksi esimerkkiä Fermin havaintodatasta on annettu kuvissa 8 ja 9.

4 Yhteenveto

Auringon roihujen gammasäteily on erityisesti monien relativistisiin nopeuksiin magneettisessa rekonnektiossa kiihdytettyjen hiukkasten reaktioiden aiheuttama. Nämä hiukkasreaktiot ovat monimuotoisia, tapahtuen eri hiukkasten välillä, eri sijainneissa Auringon ilmakehässä ja muodostaen usein tietyn energia-alueen gammasäteilyä. Nämä eri hiukkasreaktioiden muodostama säteily havaitaan gammasäteily-spektrissä



Kuva 8. Fermi-LAT:n mitaama pionihajoamisalueen spektri roihusta SOL2012-03-07, johon on sovitettu kolmen eri mallin käyrää: pionihajoamismallin käyrää (π^0, π^\pm decay), potenssilain käyrää (Power law) ja eksponentiaalisesti terminoitu potenssilakikäyrä (Cut-off Power law). Muokattu lähteen [4] kuvasta 2.



Kuva 9. Fermi-LAT:n määrittämä yli 100 MeV säteilyalue eri aikoina roihulle SOL2012-03-07. Jokainen ympyrä vastaa 95%:n luottamusaluetta. Tausta on *Atmospheric Imaging Assembly*:n 171 Å kuva Auringosta roihun aikana. Lähteen [4] kuva 23

yleensä erillisinä ja yksikäsitteisinä spektrin osina.

Laajana kontinuumina havaittu elektronien jarrutussäteily on toisista varatuista hiukkasista siroavien elektronien muodostamaa säteilyä, jonka energia vastaa sironnassa menetettyä liike-energiaa.

Ionien törmätessä tiheään kromosfäärin plasmaan muodostuu useita eri spektrin osia. Spektrin korkeaenergiaisin osuus on törmäyksissä muodostuneiden neutraalien pionien hajoamisen muodostama kontinuumi. Törmäyksessä ionit voivat myös virittyä, ja tämän purkautuminen havaitaan kapeina ja leveinä spektriviivoina eri energioilla riippuen törmäävistä ioneista. Törmäävät ytimet voivat muodostaa radioaktiivisia ytimiä, jotka tuottavat edelleen positroneja. Positronien annihilaatio muodostaa 0,511 MeV:n spektriviivan tai leveämmän kontinuumin, jos positroni ja elektroni muodostavat hetkellisesti positroniumin.

Monet kiihdytysreaktiot muodostavat neutroneja, joiden kanssa protonit voivat

fuusioitua neutronisieppauksessa, jossa vapautuu sidosenergia fotonina. Nämä fotonit muodostavat 2,223 MeV:n spektriviivan.

Muun muassa näitä spektrin osia on 1970-luvulta alkaen mitattu eri missioilla, joissa avaruuteen on laukaistu teleskooppeja ja observatorioita. Roihujen kannalta 2000-luvun tärkeimmät missiot ovat olleet *Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager* (RHESSI) ja *Fermi Gamma-ray Space Telescope*.

A Tekoälyn käyttö tutkielmassa

Tutkielman kieliasu tarkistettiin *Overleaf*-sivuston *OpenAI*:n *GPT*-mallilla.

Viitteet

- [1] 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, *Space Science Reviews* **159**, 19 (2011) [doi:10.1007/s11214-010-9701-8](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9701-8).
- [2] M. Aschwanden, *Physics of the Solar Corona: An Introduction, Geophysical Sciences* (Springer Berlin Heidelberg, 2004).
- [3] D. Paipa-Leon, N. Vilmer, M. Maksimovic, V. Krupar ja A. Vecchio, *Astronomy & Astrophysics* **694**, A111 (2025) [doi:10.1051/0004-6361/202452278](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202452278).
- [4] M. Ajello, L. Baldini, D. Bastieri, R. Bellazzini, A. Berretta, E. Bissaldi, R. D. Blandford, R. Bonino, P. Bruel, S. Buson, R. A. Cameron, R. Caputo, E. Cavazzuti, C. C. Cheung, G. Chiaro, D. Costantin, S. Cutini, F. D'Ammando, F. de Palma, R. Desiante, N. Di Lalla, L. Di Venere, F. F. Dirirsa, S. J. Fegan, Y. Fukazawa, S. Funk, P. Fusco, F. Gargano, D. Gasparrini, F. Giordano, M. Giroletti, D. Green, S. Guiriec, E. Hays, J. W. Hewitt, D. Horan, G. Jóhannesson, M. Kovac'evic', M. Kuss, S. Larsson, L. Latronico, J. Li, F. Longo, M. N. Lovellette, P. Lubrano, S. Maldera, A. Manfreda, G. Martí-Devesa, M. N. Mazziotta, I. Mereu, P. F. Michelson, T. Mizuno, M. E. Monzani, A. Morselli, I. V. Moskalenko, M. Negro, N. Omodei, M. Orienti, E. Orlando, D. Paneque, Z. Pei, M. Persic, M. Pesce-Rollins, V. Petrosian, F. Piron, T. A. Porter, G. Principe, J. L. Racusin, S. Rainò, R. Rando, B. Rani, M. Razzano, S. Razzaque, A. Reimer, O. Reimer, D. Serini, C. Sgrò, E. J. Siskind, G. Spandre, P. Spinelli, D. Tak, E. Troja, J. Valverde, K. Wood ja G. Zaharijas, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **252**, 13 (2021) [doi:10.3847/1538-4365/abd32e](https://doi.org/10.3847/1538-4365/abd32e).
- [5] A. L. Lysenko, D. D. Frederiks, G. D. Fleishman, R. L. Aptekar, A. T. Altyntsev, S. V. Golenetskii, D. S. Svinkin, M. Ulanov, A. E. Tsvetkova ja A. V. Ridnaia, *Physics Uspekhi* **63**, 818 (2020) [doi:10.3367/UFNe.2019.06.038757](https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.06.038757).
- [6] V. V. Zharkova, K. Arzner, A. O. Benz, P. Browning, C. Dauphin, A. G. Emslie, L. Fletcher, E. P. Kontar, G. Mann, M. Onofri, V. Petrosian, R. Turkmani, N. Vilmer ja L. Vlahos, *Space Science Reviews* **159**, 357 (2011) [doi:10.1007/s11214-011-9803-y](https://doi.org/10.1007/s11214-011-9803-y).
- [7] B. R. Dennis, A. G. Emslie ja H. S. Hudson, *Space Science Reviews* **159**, 3 (2011) [doi:10.1007/s11214-011-9802-z](https://doi.org/10.1007/s11214-011-9802-z).
- [8] R. Ramaty ja N. Mandzhavidze, *Solar Flares: Gamma Rays, 1998*, arXiv:astro-ph/9810089.
- [9] N. Vilmer, A. L. MacKinnon ja G. J. Hurford, *Space Science Reviews* **159**, 167 (2011) [doi:10.1007/s11214-010-9728-x](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9728-x).
- [10] R. J. Murphy, C. D. Dermer ja R. Ramaty, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **63**, 721 (1987) [doi:10.1086/191180](https://doi.org/10.1086/191180).

- [11] R. P. Lin, S. Krucker, G. J. Hurford, D. M. Smith, H. S. Hudson, G. D. Holman, R. A. Schwartz, B. R. Dennis, G. H. Share, R. J. Murphy, A. G. Emslie, C. Johns-Krull ja N. Vilmer, *The Astrophysical Journal* **595**, L69 (2003) [doi:10.1086/378932](https://doi.org/10.1086/378932).
- [12] G. J. Hurford, R. A. Schwartz, S. Krucker, R. P. Lin, D. M. Smith ja N. Vilmer, *The Astrophysical Journal* **595**, L77 (2003) [doi:10.1086/378179](https://doi.org/10.1086/378179).
- [13] W. B. Atwood, A. A. Abdo, M. Ackermann, W. Althouse, B. Anderson, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, D. L. Band, G. Barbiellini, J. Bartelt, D. Bastieri, B. M. Baughman, K. Bechtol, D. Bédérède, F. Bellardi, R. Bellazzini, B. Berenji, G. F. Bignami, D. Bisello, E. Bissaldi, R. D. Blandford, E. D. Bloom, J. R. Bogart, E. Bonamente, J. Bonnell, A. W. Borgland, A. Bouvier, J. Bregeon, A. Brez, M. Brigida, P. Bruel, T. H. Burnett, G. Busetto, G. A. Caliandro, R. A. Cameron, P. A. Caraveo, S. Carius, P. Carlson, J. M. Casandjian, E. Cavazzuti, M. Ceccanti, C. Cecchi, E. Charles, A. Chekhtman, C. C. Cheung, J. Chiang, R. Chipaux, A. N. Cillis, S. Ciprini, R. Claus, J. Cohen-Tanugi, S. Condamoor, J. Conrad, R. Corbet, L. Corucci, L. Costamante, S. Cutini, D. S. Davis, D. Decotigny, M. DeKlotz, C. D. Dermer, A. de Angelis, S. W. Digel, E. do Couto e Silva, P. S. Drell, R. Dubois, D. Dumora, Y. Edmonds, D. Fabiani, C. Farnier, C. Favuzzi, D. L. Flath, P. Fleury, W. B. Focke, S. Funk, P. Fusco, F. Gargano, D. Gasparrini, N. Gehrels, F.-X. Gentit, S. Germani, B. Giebels, N. Giglietto, P. Giommi, F. Giordano, T. Glanzman, G. Godfrey, I. A. Grenier, M.-H. Grondin, J. E. Grove, L. Guillemot, S. Guiriec, G. Haller, A. K. Harding, P. A. Hart, E. Hays, S. E. Healey, M. Hirayama, L. Hjalmarsdotter, R. Horn, R. E. Hughes, G. Jóhannesson, G. Johansson, A. S. Johnson, R. P. Johnson, T. J. Johnson, W. N. Johnson, T. Kamae, H. Katagiri, J. Kataoka, A. Kavelaars, N. Kawai, H. Kelly, M. Kerr, W. Klamra, J. Knödseder, M. L. Kocian, N. Komin, F. Kuehn, M. Kuss, D. Landriu, L. Latronico, B. Lee, S.-H. Lee, M. Lemoine-Goumard, A. M. Lionetto, F. Longo, F. Loparco, B. Lott, M. N. Lovellette, P. Lubrano, G. M. Madejski, A. Makeev, B. Marangelli, M. M. Massai, M. N. Mazziotta, J. E. McEnery, N. Menon, C. Meurer, P. F. Michelson, M. Minuti, N. Mirizzi, W. Mitthumsiri, T. Mizuno, A. A. Moiseev, C. Monte, M. E. Monzani, E. Moretti, A. Morselli, I. V. Moskalenko, S. Murgia, T. Nakamori, S. Nishino, P. L. Nolan, J. P. Norris, E. Nuss, M. Ohno, T. Ohsugi, N. Omodei, E. Orlando, J. F. Ormes, A. Paccagnella, D. Paneque, J. H. Panetta, D. Parent, M. Pearce, M. Pepe, A. Perazzo, M. Pesce-Rollins, P. Picozza, L. Pieri, M. Pinchera, F. Piron, T. A. Porter, L. Poupard, S. Rainò, R. Rando, E. Rapposelli, M. Razzano, A. Reimer, O. Reimer, T. Reposeur, L. C. Reyes, S. Ritz, L. S. Rochester, A. Y. Rodriguez, R. W. Romani, M. Roth, J. J. Russell, F. Ryde, S. Sabatini, H. F.-W. Sadrozinski, D. Sanchez, A. Sander, L. Sapozhnikov, P. M. S. Parkinson, J. D. Scargle, T. L. Schalk ja G. Scioleri, *The Astrophysical Journal* **697**, 1071 (2009) [doi:10.1088/0004-637X/697/2/1071](https://doi.org/10.1088/0004-637X/697/2/1071).
- [14] C. Meegan, G. Lichti, P. N. Bhat, E. Bissaldi, M. S. Briggs, V. Connaughton, R. Diehl, G. Fishman, J. Greiner, A. S. Hoover, A. J. van der Horst, A. von

Kienlin, R. M. Kippen, C. Kouveliotou, S. McBreen, W. S. Paciesas, R. Preece, H. Steinle, M. S. Wallace, R. B. Wilson ja C. Wilson-Hodge, *The Astrophysical Journal* **702**, 791 (2009) [doi:10.1088/0004-637X/702/1/791](https://doi.org/10.1088/0004-637X/702/1/791).