

# **Varattujen hiukkasten liike säteilyvöissä ja rengasvirrassa**

Fysikaalisten tieteiden  
kandidutkielma

Laatija(t):  
Otto-Ville Koponen

Ohjaaja(t):  
Professori Rami Vainio

21.01.2025  
Turku

Kandidatutkielma

**Oppiaine:** Fysikaaliset tieteet

**Tekijä(t):** Otto-Ville Koponen

**Otsikko:** Varattujen hiukkasten liike säteilyvöissä ja rengasvirrassa

**Ohjaaja(t):** Professori Rami Vainio

**Sivumäärä:** 25 sivua

**Päivämäärä:** 21.01.2025

### **Tiivistelmä**

Tässä työssä tarkastelemme Maan magnetosfäärin rakennetta, säteilyvöitä, ja rengasvirtaa. Keskitymme yksittäisten varattujen hiukkasten liikkeeseen aloittaen yksinkertaisista tapauksista, joista sitten muodostetaan kokonaisvaltainen kuva magnetosfäärin hiukkaspopulaatioiden liikkeistä ja johdetaan säteilyvöiden ja rengasvirran muodostumismekanismi.

Analysoimme pintapuolisesti rengasvirran ja säteilyvöiden hiukkaslähteitä keskittyen erityisesti kosmisen hiukkassäteilyn tuottamien albedoneutronien hajoamiseen (CRAND-mekanismiin) säteilyvöiden tapauksessa ja ionosfäärin protoneiden injektioitumiseen geomagneettisten myrskyjen aikana rengasvirran tapauksessa. Lisäksi käsitellään lyhyesti säteilyn vaaroja satelliiteille, rengasvirran indusoiman magneettikentän vaikutusta Maan pinnalla sekä Etelä-Atlantin anomalian (SAA) synty mekanismeita.

**Avainsanat:** geomagneettinen kenttä, magnetosfääri, varatut hiukkaset, rengasvirta, säteilyvöet, aurinkotuuli, avaruusfysiikka, CRAND, Van Allenin vyöhykkeet

## **Sisällysluettelo**

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Magnetosfäärin osat</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Yksihiukkasliike</b>	<b>8</b>
3.1	Johtokeskusapproksimaatio ja gyroliike	8
3.2	Ponnahdusliike	9
3.3	Ajautumisliike	11
3.4	Yhteenveto	12
<b>4</b>	<b>Rengasvirta</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Säteilyvyöt</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>Rengasvirran ja säteilyvöiden vaikutukset</b>	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>22</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>24</b>



# 1 Johdanto

Maan lähiavaruuden hiukkaspopulaatioiden tuntemus on tärkeää sekä magnetosfäärin sisäisen dynamiikan että magnetosfäärin ja aurinkotuulen välisen vuorovaikutuksen ymmärtämisen kannalta. Säteily on merkittävä terveysriski astronauteille, mikä tekee säteilyvöiden ajasta riippuvan paikan seuraamisen ja korkeaenergiaisten hiukkaspopulaatioiden tutkimisen tärkeäksi nykyisen ja tulevan lähiavaruuden tutkimuksen kannalta. Ihmiskehon lisäksi teknologiset järjestelmät kärsivät korkeaenergiaisten hiukkasten aiheuttamista vaurioista; Maata kiertävien satelliittien määrän kasvaessa vuosi vuodelta, ovat magnetosfäärin hiukkaspopulaatioiden tutkiminen, seuraaminen ja kartoittaminen sekä ionisoivan säteilyn vaikutusten ymmärtäminen yhä ajankohtaisempia aiheita.

Säteilyvyöt ovat myös itsessään merkittävä tutkimuksen kohde erityisesti plasmafysiikan kannalta, sillä nämä hiukkaspopulaatiot tarjoavat luontaisen ja dynaamisen plasmakammion, joka on skaalaltaan huomattavasti suurempi kuin mitä maanpäällisissä laboratorioissa voitaisiin toteuttaa.

Maan lähiavaruudessa on useita eri hiukkaspopulaatioita, jotka syntyvät eri lähteistä ja liikkuvat eri tavoin. Hiukkaspopulaatioiden keskeisimmät eroavaisuudet ovat niiden etäisyys, sekä hiukkasten tyypit ja energiat. Tämän tekstin kannalta tärkeimmät hiukkaspopulaatiot ovat kahteen säteilyvyöhön jakautuvat Van Allenin vyöhykkeiden hiukkaset sekä maata kiertävän rengasvirran muodostavat hiukkaset. Tekstissä pyritään esittämään näiden hiukkaspopulaatioiden liikkeitä ja alkuperät dipolikentässä, joka Maan lähiavaruudessa on suhteellisen tarkka approksimaatio geomagneettisesta kentästä. Hiukkasten liikettä kuvaavia matemaattisia malleja ei käsitellä syvällisesti. Muita lähiavaruuden hiukkaspopulaatioita ei tekstissä käsitellä.

Tämän työn keskeinen tavoite on luoda olemassaolevaa kirjallisuutta käyttäen intuitiivinen kuva magnetosfäärin dynamiikasta lukijalle jolla on hyvä käsitys fysiikan perusteista, muttei vielä syvällisempää käsitystä avaruusfysiikasta tai plasmafysiikasta.

## 2 Magnetosfäärin osat

Maan magnetosfääriä tarkastellessa on luontaista käyttää etäisyyden mittayksikkönä maapallon sädettä tai siitä johdettuja yksiköitä. Maan sädettä merkitään vastedes symbolilla  $R_e$  ja se määritellään pyöristettyyn arvoon

$$R_e = 6\,370\,000 \text{ m (8 s.121)}$$

Ellei toisin mainita, on kaikki etäisyydet vastedes ilmoitettu suhteessa Maan keskipisteeseen, ei pintaan.

Aurinkotuulesa, pääosin Auringon ja maapallon välisessä avaruudessa sijaitsee shokkiaalto, jota kutsutaan Maan keulashokiksi. Keulashokin tyypillinen etäisyys Maa–Aurinko janalla on noin  $13 - 15 R_e$ , mutta voi aurinkotuulen voimakkuudesta riippuen vaihdella välillä  $10 - 20 R_e$  (5 s.1,9). Keulashokissa aurinkotuulen nopeus tippuu äkillisesti aliaäniseksi sen lähestyessä magnetopaussia, jolloin myös aurinkotuulen magneettikenttä ja hiukkastiheys kasvavat. Tällöin aurinkotuulen plasma myös kuumenee (12 s.6,8). Keulashokin ja magnetopauussin välistä aluetta kutsutaan turbulentiksi välivyöhykkeeksi.

Magnetopausi on se rajapinta joka erottaa Maan magneettikentän ja aurinkotuulen hallitsemia alueita toisistaan. Magnetopauussin tyypillinen etäisyys Maa–Aurinko janalla on noin  $10 R_e$ , joskin sen tarkka paikka riippuu aurinkotuulen dynaamisen paineen ja magnetosfäärin magneettikentän paineen välisestä tasapainosta. Erityisen vahva aurinkotuuli voi puskea magnetopauussin jopa  $6.6 R_e$ :n etäisyydelle (1 s.8).

Turbulentissa vyöhykkeessä aurinkotuuli mukautuu Maan magnetopauussin muotoon ja virtaa sen ohi muodostaen pitkälle aurinkotuulen alavirtaan osoittavan pyrstön, joka ulottuu usean kymmenen  $R_e$ :n etäisyydelle (6 s.61,62; 7).

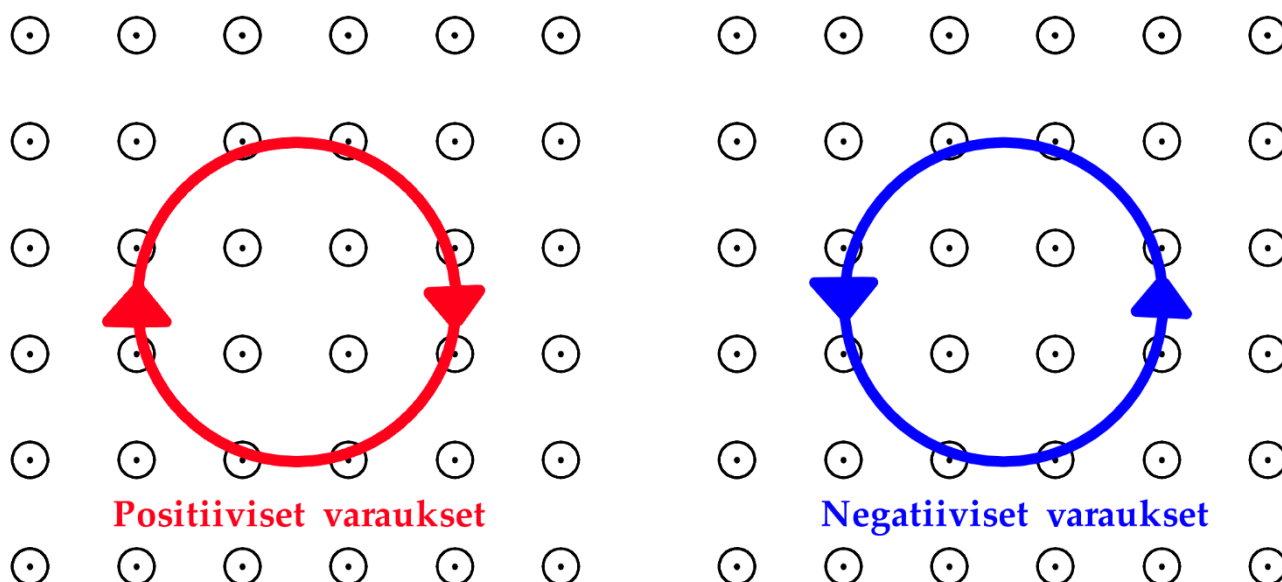
Osa aurinkotuulen hiukkasista pääsee virtaamaan magnetopauussin sisälle tullen osaksi Maan magnetosfäärin hiukkaspopulaatioita. Näistä tämän tekstin kannalta tärkeimmät ovat Van Allenin säteilyvyöhykkeiden hiukkaspopulaatiot, joista enemmän myöhemmin niiden omassa luvussa.

Plasmasfääri on Maan magnetosfäärin sisemmissä osissa sijaitseva kylmän (eli matalaenergiaisen) plasman täyttämä alue, joka ulottuu plasmapaussista maapallon ionosfäärin saakka. Plasmapaussi on plasmasfäärin uloin osa. Kuten magnetopaussin, myös plasmapaussin sijainti riippuu Maan magneettikentän ja aurinkotuulen välisestä voimatasapainosta (1 s.14). Tyypillinen etäisyys plasmapaussille on noin  $4 R_e$ :tä (1 s.3,4). Ionosfääri on Auringon säteilyn ionisoima alue Maan yläilmakehässä. Ionosfääri ulottuu noin 60 km korkeudesta merenpinnan suhteen noin 1000 km korkeuteen (2;3). Ionosfäärin merkitys tälle tekstille tulee plasmasfäärin paikan, sekä varattujen hiukkasten alkuperän määrittämisen kautta.

### 3 Yksihiukkasliike

#### 3.1 Johtokeskusapproksimaatio ja gyroliike

Aloitetaan tarkastelemalla liikuvaa varattua hiukkasta muuttumattomassa homogeenisessa magneettikentässä ilman sähkökenttää tai muita voimia. Tällöin Lorentzin voima saa varatun hiukkasen kiertämään kehää kierto liikkeen suunnan riippuessa hiukkasen sähkövarauksesta (ks. Kuva 1) (1 s.21; 11 s.15).



Kuva 1: Varattujen hiukkasen liike homogeenisessä katsojaa kohti osoittavassa magneettikentässä. Kuva tehty Krita-Ohjelmalla.

Tällaista hiukkasen pyörimisliikettä kutsutaan gyroliikkeeksi. Pyörimisliikkeen sädettä kutsutaan joko hiukkasen gyroliikkeen Larmor-säteeksi tai yksinkertaisesti gyrosäteeksi. Tästä edes tässä tekstissä käytetään termiä Larmor-säde. Gyroliikkeessä olevan hiukkasen Larmor-sädettä voidaan matemaattisesti kuvata kaavalla:

$$r_L = \frac{mv_{\perp}}{|q|B},$$

missä  $m$  on hiukkasen massa,  $v_{\perp}$  on hiukkasen magneettikenttää vastaan kohtisuora nopeus,  $q$  on hiukkasen varaus, ja  $B$  on magneettikentän voimakkuus. Yhteen gyroliikkeen kierrokseen kuluva aika kutsutaan gyroperiodiksi. Gyroperiodi saadaan yhtälöstä:

$$t_L = \frac{2\pi m}{|q|B}$$



Yhtälön suureet ovat samat kuin yllä (1 s.28).

Gyroliikkeestä on johdettavissa hiukkasen johtokeskusapproksimaatio (1 s.29).

Johtokeskusapproksimaatiossa hiukkasen liikettä tarkasteltaessa käytetään hiukkasen tarkan paikan sijaan hiukkasen gyroliikkeen keskipistettä. Johtokeskusapproksimaatio on hyvä approksimaatio silloin kun vallitseva magneettikenttä on muuttumaton ja homogeeninen, tai kun vallitsevan magneettikentän muutokset ajan ja paikan suhteen ovat pieniä gyroliikkeen skaaloissa (1 s.48).

### 3.2 Ponnahdusliike

Seuraavaksi tarkennamme esimerkkitulannettamme ja tuomme sen lähemmäksi Maan magneettikenttää. Oletetaan, että varattu hiukkanen on dipolimagneettikentässä, jonka magneettivuon tiheys magneettisen pohjois- ja etelänavan suuntaan muuttuu hyvin hitaasti hiukkasen gyroliikkeen skaalassa. Myös magneettikentän suunta vaihtuu hitaasti riippuen hiukkasen paikasta dipolikentän pohjois-etelä suunnassa.

Tarkastelemallamme hiukkasella tuskin on vain magneettikentälle kohtisuoraa nopeutta ja vaikka olisikin, voi pienikin muutos hiukkasen paikassa johtaa hiukkasen nopeusvektorin magneettikentän suuntaisen komponentin kasvuun, koska magneettikentän suunta on nyt paikasta riippuvainen. Täten siis tarkastelemamme hiukkanen ei enää teekään täydellistä kehää gyroliikkeessään, vaan hiukkanen liikkuu ruuvikierteessä kohti joko dipolimagneetin pohjois- tai etelänapaa seuraten jotakin dipolikentän kenttäviivaa. Hiukkasen nopeusvektorin ja magneettikentän kenttäviivojen välistä kulmaa kutsutaan nousukulmaksi ja sitä merkitään tästäedes symbolilla  $\alpha$ .

Hiukkasen nousukulmalle pätee (1 s.42):

$$\frac{\sin^2 \alpha}{B} = \text{vakio}$$

eli paikallisen magneettikentän  $B$  kasvaessa on nousukulman kasvettava myös. Nousukulma kasvaa kunnes  $\sin \alpha = 1$ , jolloin hiukkasen nopeus on jälleen täysin kohtisuorassa paikallista magneettikenttää vastaan. Paikkaa, jossa hiukkasen nousukulma on  $90^\circ$  kutsutaan peilipisteeksi. Tällaisessa konfiguraatiossa olevaa magneettikenttää kutsutaan magneettiseksi peiliksi.

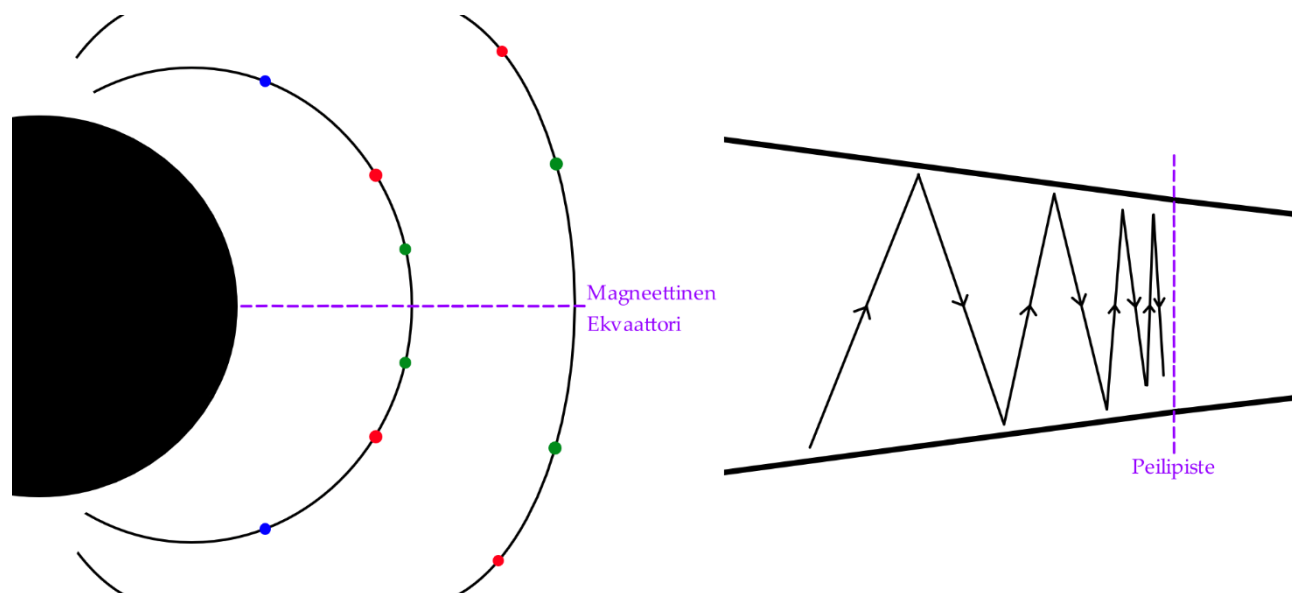
Peilipisteessä hiukkasen kentän suuntainen nopeus kääntyy vastakkaiseksi Lorentzin voiman vaikutuksesta ja hiukkanen alkaa matkaamaan kohti pienenevää magneettikenttää kohden (10 s.3). Jos hiukkasen seuraaman kenttäviivan toisessa päässä on toinen magneettinen peili, josta hiukkanen taas peilautuu, kutsutaan koko konfiguraatiota magneettiseksi pulloksi. Peilipisteitä ja hiukkasen liikettä on hahmoteltu kuvassa 2 (1 s.42).

Magneettinen pullo varastoi hiukkasia, joiden nousukulmalle pätee (10 s.4)

$$\sin^2 \alpha_0 \geq \frac{B_0}{\min(B_{max, j})},$$

missä  $B_0$  on magneettisen pullon minimikenttä,  $\alpha_0$  on hiukkasen nousukulma siinä pisteessä jossa pullon magneettikenttä on minimissään, ja  $B_{max, j}$  on mikä tahansa pullon maksimikenttä. Käytännössä minimikenttä  $B_0$  on magneettisella ekvaattorilla, ja maksimikentät ovat pullon peilipisteet.

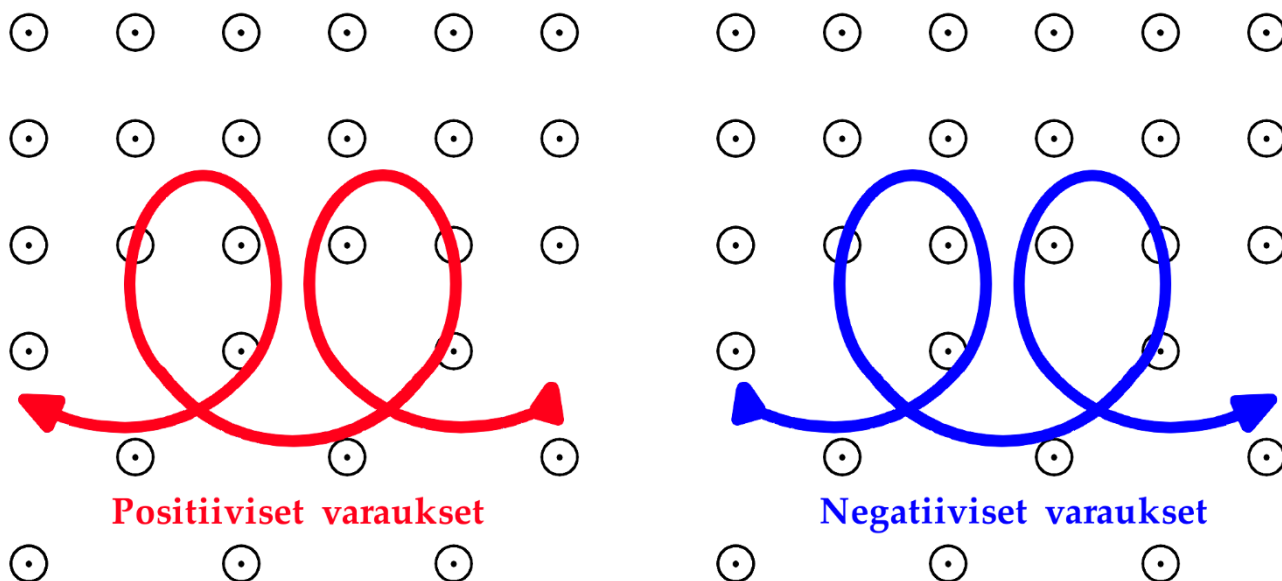
Hiukkaset, joiden nousukulman sini on annettua ehtoa pienempi karkaavat yläilmakehään. Sitä nopeusvektorien joukkoa, joiden nousukulmat mahdollistavat hiukkasen karkaamisen magneettisesta pullosta, kutsutaan vuotokartioksi (10 s.4).



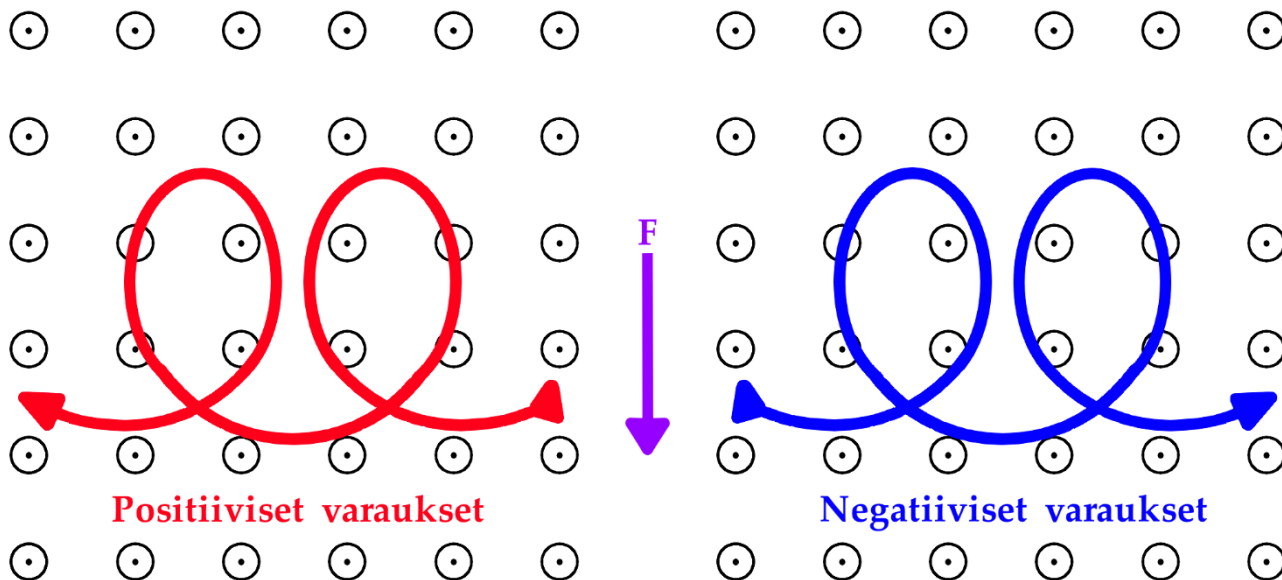
*Kuva 2: Vasemmalla: Samalla kenttälinjalla olevien eri hiukkasten peilipisteitä. Hiukkanen liikkuu edestakaisin saman väristen peilipisteiden välillä, seuraten samaa kenttäviivaa. Oikealla: Hiukkasen liike peilipisteen tienoilla. Paksut mustat viivat kuvaavat magneettikenttää. Kuvassa ei ole huomioitu hiukkasen kääntymistä peilipisteessä. Kuva tehty Krita-ohjelmalla.*

### 3.3 Ajautumisliike

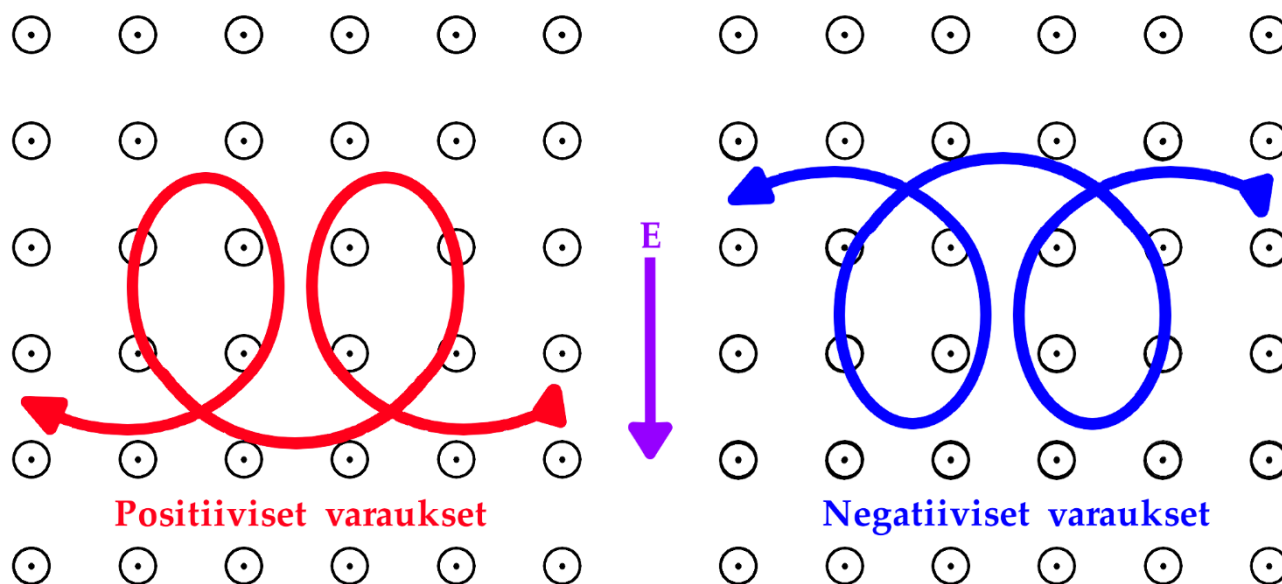
Maan ympäristössä magneettikenttä ei siis ole homogeeninen ja lisäksi hiukkasiin vaikuttavat myös erilaiset sähkökentät (9) ja painovoima. Epähomogeeninen magneettikenttä ja vallitsevat ei-magneettiset voimat vaikuttavat gyroliikkeessä olevan hiukkasen Larmor-säteen pituuteen eri paikoissa gyroliikkeen rataa.



*Kuva 3: Varattujen hiukkasten liike epähomogeenisessa magneettikentässä, jossa gradientti. Pisteiden tiivys kuvaa magneettikentän voimakkuutta. Kuva tehty Krita-ohjelmalla.*



*Kuva 4: Varattujen hiukkasten liike homogeenisessa magneettikentässä jossa hiukkasiin vaikuttaa myös ei-magneettinen voima joka osoittaa alaspäin. Voiman tyyppi on mielivaltainen. Kuva tehty Krita-ohjelmalla.*



Kuva 5: Varattujen hiukkasten liike homogeenisessa magneettikentässä jossa hiukkasiin vaikuttaa myös alaspäin osoittava sähkökenttä. Kuva tehty Krita-ohjelmalla.

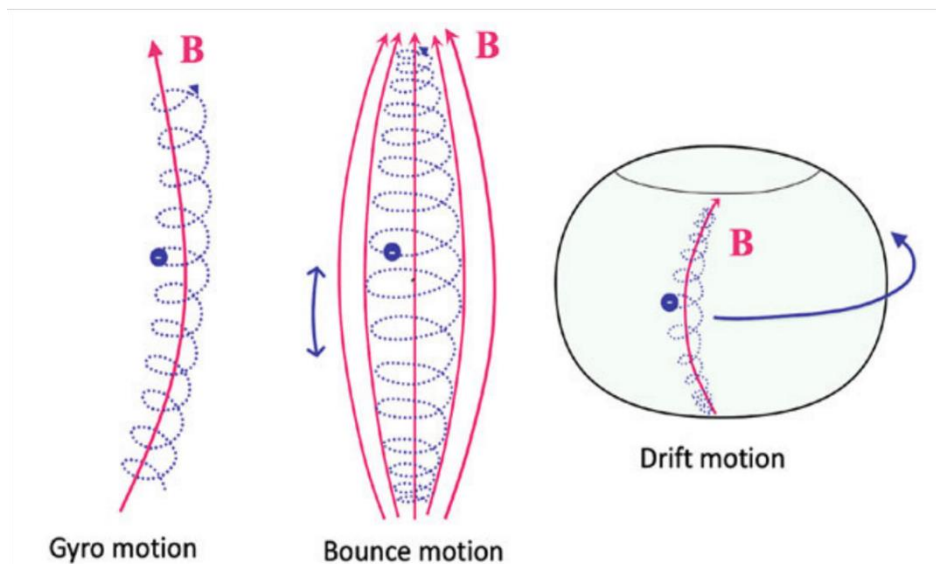
Paikallisesti lyhyempi Larmor-säde johtaa kuvien 3, 4 ja 5 mukaiseen ajautumaan tarkastelemallemme hiukkaselle. Jos Larmor-säteen muutokset johtuvat magneettikentän voimakkuuden muutoksista, kutsutaan vastaavaa ajautumaa gradienttijaatumaksi. Muissa tapauksissa sitä kutsutaan vain ajautumaksi.

Gradienttijaatumien tapauksessa ajautuman suunta riippuu varauksen etumerkistä; elektronit ja negatiivisesti varautuneet ionit ajautuvat itään, positiivisesti varautuneet ionit ajautuvat länteen (11 s.15).

Sähkökenttien vaikutus varattujen hiukkasten liikkeeseen on hieman erilainen kuin painovoiman, kuten kuvasta 5 nähdään. Sähkökentässä sekä positiivisesti että negatiivisesti varautuneet hiukkaset ajautuvat yhtäsuurilla nopeuksilla samaan suuntaan (11 s.15).

### 3.4 Yhteenveto

Varatut hiukkaset Maan magneettikentässä siis kokevat gyroliikettä, jossa niiden radat kiertävät heliksinä magneettisen kenttäviivan ympärillä, ponnausliikettä, jossa ne peilautuvat edestakaisin peilipisteistä, ja atsimutaalista ajautumisliikettä, jossa ne vaeltavat joko itä- tai länsisuunnassa maapallon ympäri (ks. Kuva 6).



Kuva 6: Negatiivisesti varatun hiukkasen eri liikkeet maapallon magneettikentässä. Kuvan Lähde: H. E. J. Koskinen ja E. K. J. Kilpua, *Physics of Earth's Radiation Belts: Theory and Observations*

Ponnahdusliikkeen ja ajautumisliikkeen yhdistelmän seurauksena piirtää varatun hiukkasen johtokeskus maapallon ympärille pinnan, jota kutsutaan ajautumiskuoreksi. Ajautumiskuoret jaotellaan käyttämällä McIlwainin L-parametria, joka määritellään seuraavasti:

$$L = \frac{r_0}{R_e}$$

missä  $r_0$  on se etäisyys, jossa magneettikentän kenttäviiva ohittaa ekvaattorin (1 s. 6,7).

Taulukkoon 1 on merkitty eri energiaisten elektronien tyypilliset periodit eri liiketyypeille.  $\tau_g$  kuvaa gyroperiodia,  $\tau_b$  puolestaan ponnahdusliikkeen periodia, ja  $\tau_d$  atsimutaalisen ajautumisliikkeen periodia. Huomattavaa, että suurienergisillä (relativistisilla) elektroneilla ponnahdusperiodit ovat energiasta riippumatta saman pituisia. Tämä johtuu siitä, että näin suurienergisäiset elektronit liikkuvat lähes valonnopeudella (1 s.50,51,52,53,54).

Taulukko 1. Elektronin liike eri ajautumiskuurilla.

Tyypilliset periodit gyroliikkeelle ( $\tau_g$ ), ponnahdusliikkeelle ( $\tau_b$ ), ja ajautumisliikkeelle ( $\tau_d$ ) eri energioilla ja ajautumiskuurilla. (1, s.53)

Kuoren L		10 keV	100 keV	1 MeV	5 MeV	10 MeV
$L = 2$	$\tau_g$	9.71 $\mu\text{s}$	11.4 $\mu\text{s}$	28.1 $\mu\text{s}$	103 $\mu\text{s}$	196 $\mu\text{s}$
	$\tau_b$	0.64 s	0.23 s	0.14 s	0.13 s	0.13 s
	$\tau_d$	44.2 h	3.65 h	36.9 min	8.09 min	4.19 min
$L = 4$	$\tau_g$	0.08 ms	0.09 ms	0.26 ms	0.82 ms	1.57 ms
	$\tau_b$	1.27 s	0.46 s	0.27 s	0.26 s	0.26 s
	$\tau_d$	22.1 h	1.83 h	18.5 min	4.05 min	2.09 min
$L = 6$	$\tau_g$	0.26 ms	0.31 ms	0.76 ms	2.88 ms	5.29 ms
	$\tau_b$	1.91 s	0.69 s	0.41 s	0.38 s	0.38 s
	$\tau_d$	12.3 h	1.22 h	12.3 min	2.7 min	1.4 min

## 4 Rengasvirta

Yksittäisen hiukkasen liike voidaan yleistää suurelle määrälle hiukkasia. Koska atsimutaalinen ajautumisliike on vastakkaisuuntaista positiivisesti ja negatiivisesti varautuneille hiukkasille, syntyy magnetosfääriin sisäosiin toroidaalinen länsisuuntainen sähkövirta (13 s.2). Tätä virtaa kutsutaan rengasvirraksi ja sen pääasiallisia varauksenkuljettajia ovat positiivisesti varautuneet ionit, geomagneettisesti rauhallisina aikoina erityisesti protonit (13 s.3,5,6).

Rengasvirran voimakkuus riippuu magnetosfäärin hiukkasmäärästä ja hiukkasjoukon keskimääräisestä ajautumisnopeudesta. Rengasvirran voimakkuus vaihtelee magnetosfäärin myrskyisyyden mukaan, johtuen hiukkaspopulaatioiden muutoksista. Myrskyisinä aikoina säteilyvöihin irtoaa ionosfääristä happi-ioneita, mikä johtaa rengasvirran vahvistumiseen. Tällöin happi-ioneiden osuus rengasvirran varauksenkuljettajista voi nousta yhtä merkittäväksi tai jopa merkittävämmäksi kuin protonien (1 s.173; 13; 14).

Rengasvirran muodostavien korkeaenergiaisten varattujen hiukkasten törmätessä atomeihin geokoronassa<sup>1</sup> tapahtuu varauksen vaihtoa, jonka seurauksena korkeaenergiaisen hiukkasen sähkövaraus laskee, kun taas geokoronan atomista tulee varattu. Näin varaus siirtyy korkeaenergisistä Maata kiertävistä hiukkasista hitaasti maapallon ympäri ajautuviin hiukkasiin, jolloin rengasvirran voimakkuus laskee (1 s.175; 17). Myös Coulombin törmäykset, magnetohydrodynaamiset aallot, ja aalto–hiukkas-vuorovaikutusilmiöt poistavat rengasvirran hiukkasia ilmakehään (1 s.175,176; 18).

---

<sup>1</sup> Suureksi osaksi vetyatomeista ja protoneista koostuva Maan eksosfäärin osa.

## 5 Säteilyvyöt

Magnetosfäarin korkeaenergiaiset hiukkaset jakautuvat karkeasti kahteen eri populaatioon. Näitä populaatioita kutsutaan Van Allenin vyöhykkeiksi tai säteilyvyöiksi. Maalla on tyypillisesti kaksi Van Allenin vyöhykettä, sisempi ja ulompi. Sisempi vyöhyke sijaitsee tyypillisesti välillä  $1.2 - 3 R_e$ , kun taas ulompi vyöhyke välillä  $3 - 7 R_e$ .

Sisempi Van Allenin vyöhyke koostuu pääosin ioneista joiden energiat ovat useiden MeV luokkaa ja korkeimmillaan jopa muutama GeV. Ulompi Van Allenin vyöhyke koostuu korkeaenergiaisista elektroneista, joiden tyypilliset energiat ovat kymmenien tai satojen kiloelektronvolttien luokkaa. Hiukkasten pääalkuperänä on ionosfääri ja aurinkotuuli. Vyöhykkeitä erottaa rakoalue (Engl. "Slot Region"), jossa hiukkasten määrä on merkittävästi matalampi (1 s.1,2,172,173; 13; 15 s.1,9,10; 16). Kuvissa 7, 8 ja 9 on nähtävissä eri energiaisten protonien vuo säteilyvyöissä. Huomioitavaa miten selkeästi korkeaenergiaisten hiukkasten vuon huippu sijaitsee välillä  $1.5 - 2 R_e$ , selvästi sisemmässä vyössä, kun taas matalaenergiaisilla hiukkasilla (kuva 7) vuon huippu sijaitsee sisemmän ja ulomman vyön välimaastossa. Kuvassa 10 on nähtävissä värikoodattu vuo yli 1 MeV energiaisille elektroneille. Huomattavaa vyöhykkeiden välinen rakoalue noin  $2-2.5 R_e$ :n kohdalla.

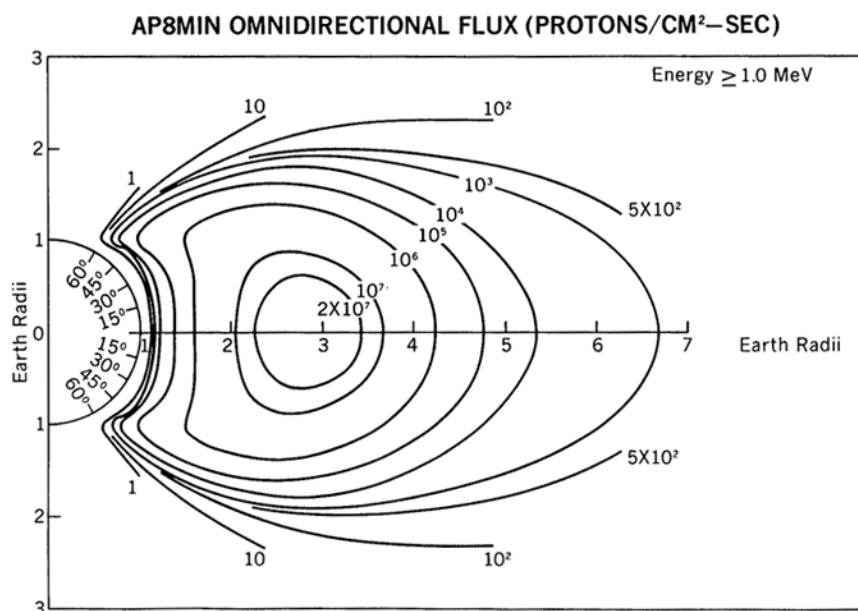


Figure 66. AP8MIN R- $\lambda$  Plot of Constant Intensity Flux Contours with an Energy of  $\geq 1.0$  MeV



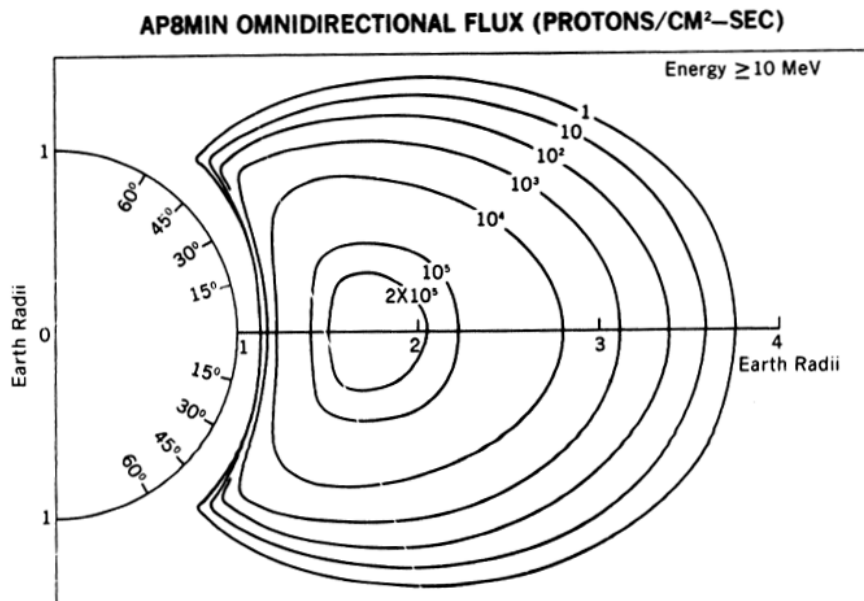


Figure 67. AP8MIN R- $\lambda$  Plot of Constant Intensity Flux Contours with an Energy of  $\geq 10$  MeV

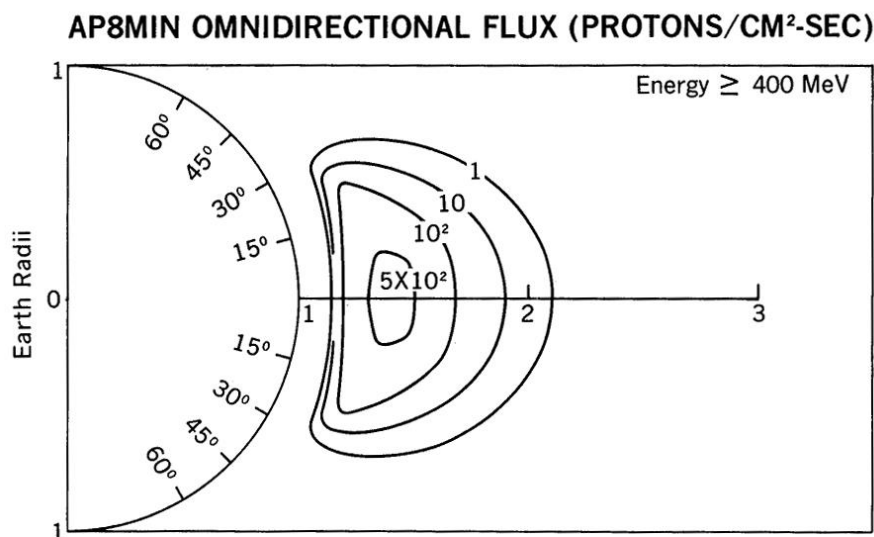
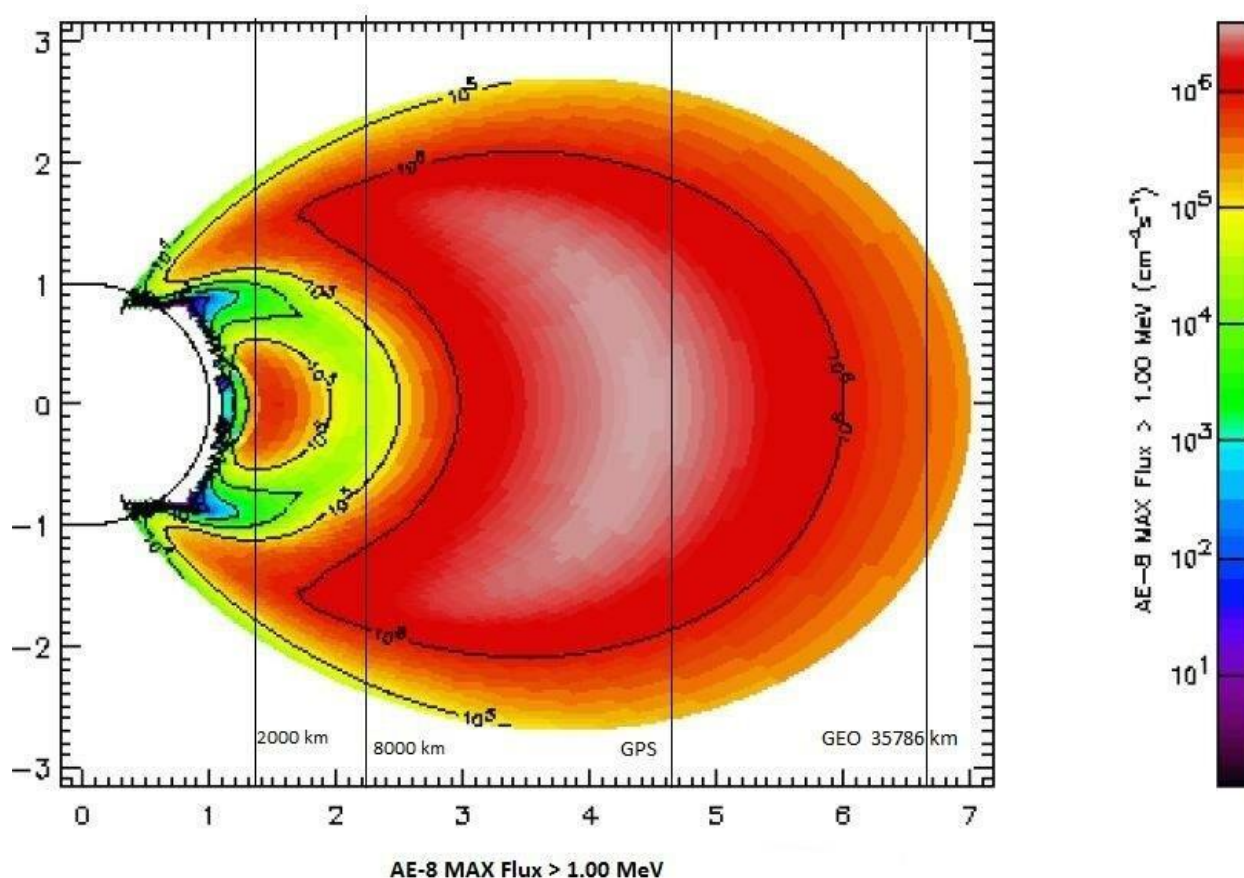


Figure 70. AP8MIN R- $\lambda$  Plot of Constant Intensity Flux Contours with an Energy of  $\geq 400$  MeV

*Kuvat 7-9: Eri energiaisten protonien vuot säteilyvöissä. Kuvien lähde: Sawyer, D M, and Vette, J I. Ap-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum. [AP8MAX and AP8MIN]. United States: N. p., 1976. Report Number: NASA-TM-X-72605.*



Kuva 10:  $>1$  MeV elektronien vuo säteilyvöissä. Kuvan lähde: Oz, Ibrahim. (2018). Comparative Analysis of Sub GTO, GTO and Super GTO in Orbit Raising for All Electric Satellites. Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences. 1. 58-64.

Aurinkotuuli ja ionosfääri eivät kuitenkaan ole ainoat säteilyvöiden hiukkasten lähteet. CRAND-mekanismissa ("Cosmic Ray Albedo Neutron Decay") Maan ilmakehään osuva, suurimmaksi osaksi protoneista ja alfahiukkasista koostuva kosminen hiukkassäteily (21) törmää ilmakehän hiukkasiin synnyttäen vapaita neutroneita. Vapaat neutronit eivät ole stabiileja, vaan ne hajoavat protoneiksi, elektroneiksi, ja antineutriinoiksi beetahajoamisen myötä. Näin syntyneet hiukkaset ovat varattuja, joten ne jäävät ansaan Maan magneettikenttään ja ajautuvat säteilyvöihin (1, s. 176,177; 19; 20; 22).

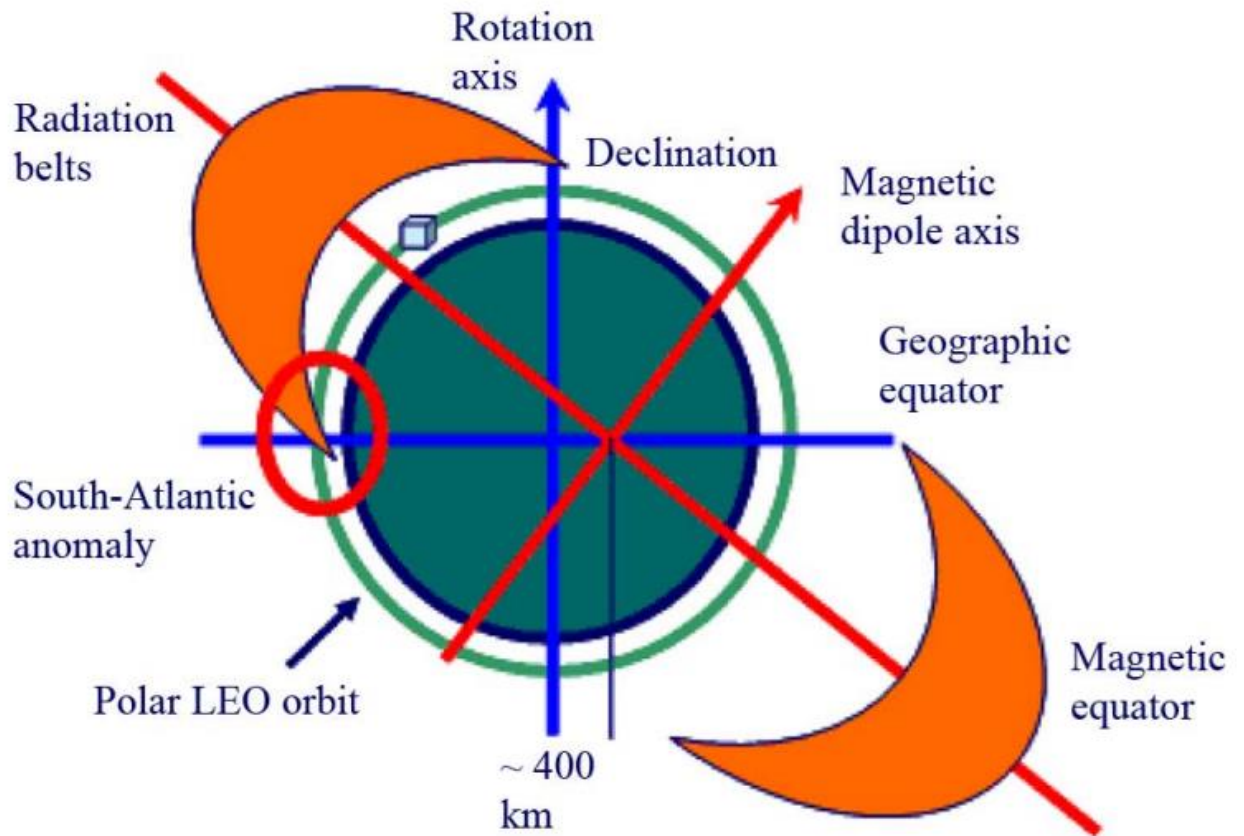
## 6 Rengasvirran ja säteilyvöiden vaikutukset

Rengasvirran voimakkuus riippuu magnetosfäärin myrskyisyydestä. Myrskyisinä aikoina rengasvirtaan vuotaa varattuja hiukkasia, joiden myötä rengasvirran voimakkuus kasvaa. Tällöin myös rengasvirran indusoima geomagneettiseen kenttään nähden vastakkaisuuntainen magneettikenttä voimistuu, jonka seurauksena voidaan myrskyisinä aikoina havaita Maan magneettikentän heikkeneminen (1 s.11,12; 13). Muuttuva magneettikenttä indusoi jännitteen Maan pinnalla olevissa johtimissa (Faradayn induktiolaki), mikä voi erittäin voimakkaiden geomagneettisten myrskyjen aikana vaurioittaa sähköverkkoa.

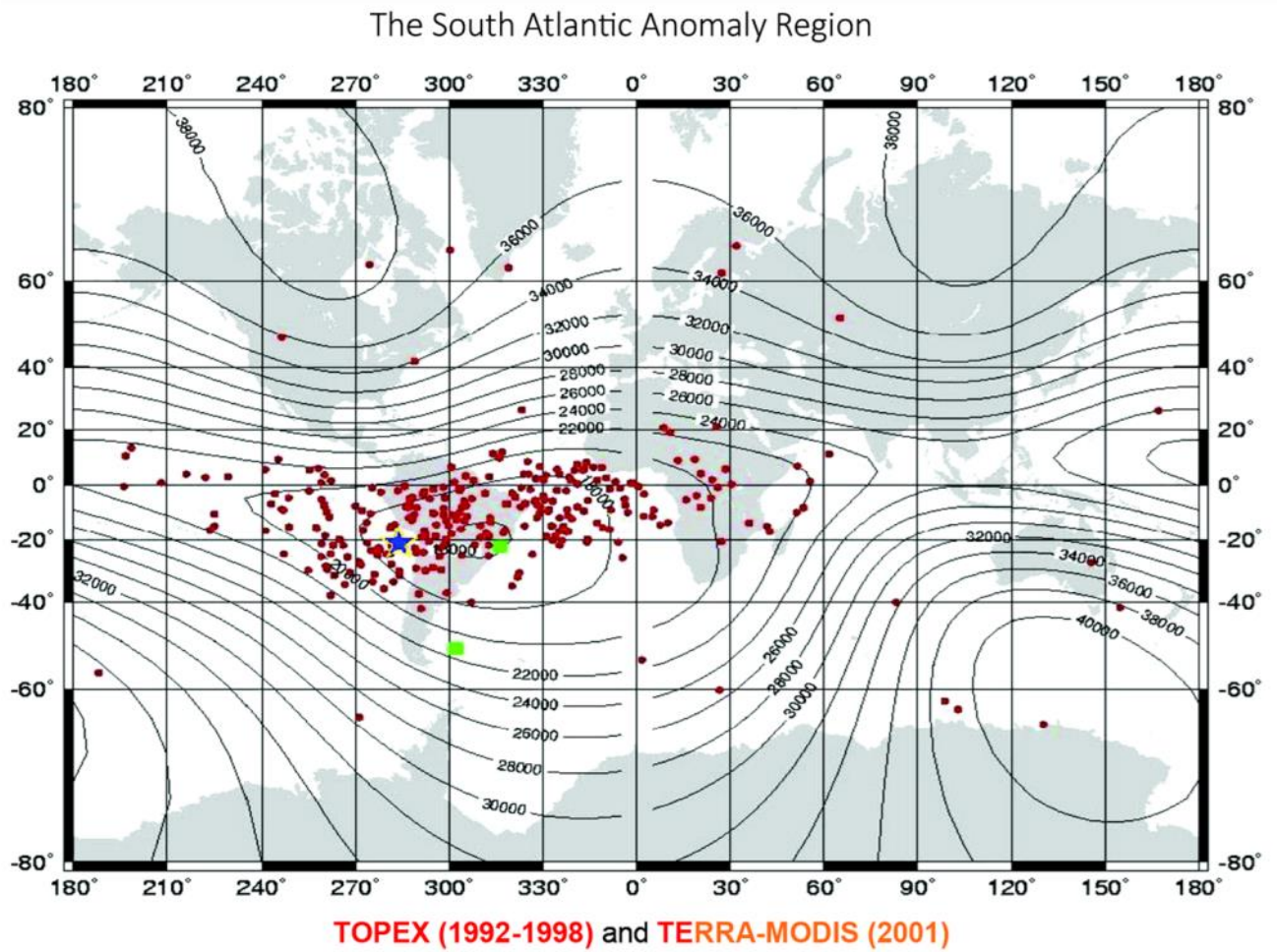
Säteilyvöiden hiukkaset puolestaan ovat aktiivinen vaaratekijä maata kiertäville satelliiteille, johtuen korkeaenergiaisten hiukkasten kyvystä tunkeutua syvälle satelliitin runkoon ja vahingoittaa ionisoivalle säteilylle herkkiä komponentteja (23, s.4,5; 24). Yhtäläillä, korkeaenergiaiset hiukkaset vaurioittavat biologisia mekanismeja ihmiskehossa, mikä tekee säteilyvöistä vaaratekijän astronauteille.

Historialliset säteilyvauriot ja säteilystä johtuvat häiriöt keskittyvät vahvasti Etelä-Amerikan ja eteläisen Atlantin yllä olevalle alueelle, jossa sisempi Van Allenin säteilyvyö pääsee lähimmäksi Maan pintaa. Tämä alue, jota kutsutaan Etelä-Atlantin anomaliaksi (Engl. ”South Atlantic Anomaly”, vastedes tässä tekstissä lyhennettynä ”SAA”) muodostuu siitä, että maapallon magneettisen dipolin keskipiste ei ole maapallon keskipisteessä (Ks. kuva 11) (23, s. 4; 25).

Säteilyvyöt ovat tietenkin kolmiulotteisia rakenteita, mitä on vaikea havainnollistaa kaksiulotteisilla kuvilla. SAA:n kolmiulotteinen luonto tulee esiin hieman paremmin kuvaa 12 tarkastelemalla; erityisesti kannattaa kiinnittää huomiota magneettikentän voimakkuutta kuvaaviin tasa-arvo käyriin SAA:n ympäristössä ja pitää mielessä että tällaiset käyrät kuvaavat magneettikentän voimakkuutta vain tietyllä poikkileikkauksella (tässä tapauksessa Maan pinnalla). Kolmiulotteisessa avaruudessa nämä käyrät muodostavat siis tasa-arvopintoja.



Kuva 11: Hieman liioiteltu mutta erittäin havainnollistava poikkileikkauskuva SAA:n muodostumismekanismista. Kuva lähteestä (25).



*Kuva 12: Kartta magneettikentän voimakkuudesta maapallon pinnalla. Viivat ovat magneettikentän voimakkuuden tasa-arvokäyriä. SAA:ssa pinnalla mitattava magneettikenttä on heikoimmillaan. Punaiset pisteet kuvaavat alueita joissa TOPEX ja TERRA-MODIS satelliitit kärsivät säteilyperäisistä häiriöistä ja vaurioista. Värilliset pisteet helposti vievät huomion pois itse SAA:n ovaalimaista muotoa kuvaavista linjoista. Kuva lähteestä (23).*

## 7 Yhteenveto

Yksittäinen varattu hiukkanen päätyy maapallon magnetosfääriin joko aurinkotuulesta tai ionosfääristä joko geomagneettisen myrskyn injektoimana tai kosmisen säteilyn ja ilmakehän välisestä vuorovaikutuksesta CRAND-mekanismiin kautta. Olettaen, että hiukkanen ei välittömästi karkaa magneettikentästä tai absorboitu ionosfääriin, tulee se osaksi jotakin maan lähiavaruuden hiukkasjoukkoa.

Hiukkasen liikkeen määräävät maapallon magneettikentän paikalliset ominaisuudet, kuten voimakkuuden gradientti ja suunta, sekä hiukkaseen vaikuttavat ei-magneettiset voimat ja vallitsevat sähkökentät.

Hiukkasella on pääosin kolme eri liikkumistyyppiä. Nämä ovat:

**Gyroliike**, jossa hiukkanen kiertää kehää johtokeskuksen ympärillä. Tämä liike syntyy magneettikentän vaikutuksesta hiukkasen olemassaolevaan liikkeeseen.

**Ponnahdusliike**, jossa hiukkanen liikkuu maapallon magneettikentän kenttäviivojen mukaisesti pohjois-etelä suunnassa. Hiukkanen jatkaa gyroliikettään ponnahdusliikkeen aikana, jolloin hiukkasen liikeradaksi tulee heliksi. Hiukkanen heijastuu edestakaisin peilipisteistä, joiden paikka määräytyy hiukkasen nousukulmasta ja magneettikentän voimakkuudesta magneettisella ekvaattorilla.

**Ajautumisliike**, jossa hiukkanen liikkuu joko itään tai länteen riippuen sen varauksesta, vallitsevasta sähkökentästä, magneettikentän gradientista ja siihen vaikuttavista ei-magneettisista voimista. Magneettikentän gradientista johtuva ajautuminen ohjaa positiivisesti varatut hiukkaset länteen ja negatiivisesti varautuneet itään. Sähkökenttä ohjaa hiukkaset suunnastaan riippuen eri suuntiin.

Näistä kolmesta liiketyypistä voidaan yleistämällä muodostaa intuitiivinen käsitys geomagneettisen kentän eri hiukkaspopulaatioiden kokonaisvaltaisesta liikkeestä. Rengasvirta muodostuu pääosin ajautumisliikkeen kautta, kun taas säteilyvyöt muodostaa yhdistelmä ponnahdusliikettä ja ajautumisliikettä. Gyroliikkeen itsensä voi suurella skaalalla unohtaa, koska on yksinkertaisempaa käsitellä hiukkasen liikettä johtokeskusapproksimaation kautta.

On kuitenkin muistettava, että todellisuudessa gyroliike jatkuu koko ajan ja ponnausliike sekä ajautumisliike ovat molemmat gyroliikkeestä riippuvaisia.

Rengasvirran voimakkuus on riippuvainen sen muodostavien hiukkasten määrästä ja energioista. Geomagneettisten myrskyjen aikana rengasvirtaan injektoidaan ioneita ionosfääristä, mikä saa rengasvirran voimistumaan. Voimistuva rengasvirta indusoi geomagneettiseen kenttään nähden vastakkaisuuntaisen magneettikentän, joka haivataan maapallon pinnalla magneettikentän väliaikaisena heikkenemisenä. Rauhallisina aikoina rengasvirrasta poistuu energiaa maapallon ilmakehään varauksen vaihdon ja monien muiden vuorovaikutusten myötä.

Säteilyvöitä on yleensä kaksi; korkeaenergisistä ioneista koostuva sisempi vyö, ja korkeaenergisistä elektroneista muodostuva ulompi vyö. Väiden välillä on rakoalue, jossa hiukkasia ei ole yhtä tiiviisti kuin väiden sisällä. Rakoaueellakin on kuitenkin huomattava määrä hiukkasia. Säteilävöiden paikka ja niiden täyttämisen alueen suuruus riippuu maapallon magneettikentän myrskyisyydestä. Myrskyisinä aikoina vöyt kasaantuvat lähemmäs maapallon pintaa ja niiden hiukkaspopulaatiot kasvavat huomattavasti.

Rengasvirta sekä säteilävöyt ovat uhkatekijöitä astronauteille ja maata kiertäville satelliiteille. Erityisesti geomagneettisten myrskyjen aikana, sekä alueissa, joissa sisempi säteilävöy ulottuu (magneettikentän skaalalla) lähelle maapallon pintaa, voi satelliittien kokemat säteilystä johtuvat vauriot olla huomattavat. Säteilävauriot eivät ole ainoastaan kalliita avaruustutkimuksen kannalta, vaan ne voivat myös johtaa erinäisiin vaaratilanteisiin satelliittien navigointi- ja ohjausjärjestelmien vahingoittuessa. Tästä johtuen siis säteilävöiden ja maapallon lähiavaruuden ionisoivan säteilyn tutkimus ja ihmisen sekä elektronisten järjestelmien säteilyltä suojaamisen kehittäminen on tärkeää.

## Lähteet

- [1] H. E. J. Koskinen ja E. K. J. Kilpua, *Physics of Earth's Radiation Belts: Theory and Observations*. teoksessa Astronomy and Astrophysics Library. Cham: Springer International Publishing, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-82167-8
- [2] Bilitza, D., Pezzopane, M., Truhlik, V., Altadill, D., Reinisch, B. W., & Pignalberi, A. (2022). *The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark*. Reviews of Geophysics. doi: 10.1029/2022RG000792
- [3] Heelis, R. A., & Maute, A. (2020). *Challenges to understanding the Earth's ionosphere and thermosphere*. Journal of Geophysical Research: Space Physics. doi: 10.1029/2019JA027497
- [4] Pfaff, R. F. (2012). *The Near-Earth Plasma Environment*. Space Science Reviews. doi:10.1007/s11214-012-9872-6
- [5] Spreiter, J., & Stahara, S. (1995). *The location of planetary bow shocks: A critical overview of theory and observations*. Advances in Space Research. doi:10.1016/0273-1177(94)00128-n
- [6] Keiling, A., Jackman, C. M., & Delamere, P. A. (Eds.). (2015). *Magnetotails in the Solar System. Geophysical Monograph Series*. doi:10.1002/9781118842324
- [7] Ness, N. F. (1965). *The Earth's magnetic tail*. Journal of Geophysical Research. doi:10.1029/jz070i013p02989
- [8] Matemaattisten Aineiden Opettajien Liitto MAOL ry. & Kustannusosakeyhtiö Otava, *MAOL-taulukot*, Otavan kirjapaino 2014 1.-3 painos, ISBN 978-951-1-26270-1
- [9] Ganushkina, N. Y., Liemohn, M. W., & Dubyagin, S. (2018). *Current Systems in the Earth's Magnetosphere*. Reviews of Geophysics. doi:10.1002/2017rg000590
- [10] Tsurutani, B. T., & Lakhina, G. S. (1997). *Some basic concepts of wave-particle interactions in collisionless plasmas*. Reviews of Geophysics. doi:10.1029/97rg02200
- [11] H. Alfvén. *Cosmical Electrodynamics*. H. Alfvén. New York: Oxford Univ. Press, 1950.
- [12] Burgess, D., Möbius, E., & Scholer, M. (2012). *Ion Acceleration at the Earth's Bow Shock*. Space Science Reviews. doi:10.1007/s11214-012-9901-5



- [13] Daglis, I. A., Thorne, R. M., Baumjohann, W., & Orsini, S. (1999). *The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay*. *Reviews of Geophysics*. doi:10.1029/1999rg900009
- [14] Daglis, I. A. (1997). *Terrestrial agents in the realm of space storms: Missions study oxygen ions*, *Eos Trans. AGU*, doi:10.1029/97EO00162
- [15] Ganushkina, N. Y., I. Dandouras, Y. Y. Shprits, and J. Cao (2011), *Locations of boundaries of outer and inner radiation belts as observed by Cluster and Double Star*, *J. Geophys. Res.* doi:10.1029/2010JA016376.
- [16] Williams, D. J. (1987). *Ring current and radiation belts*. *Reviews of Geophysics*. doi:10.1029/rg025i003p00570
- [17] Dessler, A. J., & Parker, E. N. (1959). *Hydromagnetic theory of geomagnetic storms*. *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/jz064i012p02239
- [18] Thorne, R. M., Bortnik, J., Li, W., & Ma, Q. (2021). *Wave–Particle Interactions in the Earth’s Magnetosphere*. *Geophysical Monograph Series*. doi:10.1002/9781119815624.ch6
- [19] Zhang, K., Li, X., Zhao, H., Schiller, Q., Khoo, L.-Y., Xiang, Z., et al. (2019). *Cosmic Ray Albedo Neutron Decay (CRAND) as a source of inner belt electrons: Energy spectrum study*. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2018GL080887>
- [20] Selesnick, R. S., Looper, M. D., & Mewaldt, R. A. (2007). *A theoretical model of the inner proton radiation belt*. *Space Weather*, 5. doi:10.1029/2006sw000275
- [21] Mewaldt, R. A. (1994). *Galactic cosmic ray composition and energy spectra*. *Advances in Space Research*, 14(10). doi:10.1016/0273-1177(94)90536-3
- [22] Lazarenko, V. R. (1966). *Double beta decay and the properties of the neutrino*. *Usp. Fiz. Nauk*. 90, 601–622
- [23] Baker, D. N., Erickson, P. J., Fennell, J. F., Foster, J. C., Jaynes, A. N., & Verronen, P. T. (2017). *Space Weather Effects in the Earth’s Radiation Belts*. *Space Science Reviews*, 214(1). doi:10.1007/s11214-017-0452-7
- [24] Hands, A. D. P., Ryden, K. A., Meredith, N. P., Glauert, S. A., & Horne, R. B. (2018). *Radiation effects on satellites during extreme space weather events*. *Space Weather*, 16, <https://doi.org/10.1029/2018SW001913>
- [25] Ecoffet, R. (2013). *Overview of In-Orbit Radiation Induced Spacecraft Anomalies*. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 60(3). doi:10.1109/tns.2013.2262002