

Aurinkotuulen ja heliosfäärin magneettikentän
3-dimensionaalinen rakenne Ulysses-luotaimen
mukaan.

Anni-Maria Miettinen
LuK-tutkielma
Fysiikan tutkinto-ohjelma
Oulun yliopisto

4. kesäkuuta 2020

Sisältö

1 Johdanto	2
2 Yleistä Ulyssksesta	2
2.1 Tavoitteet	2
2.2 Rata ja luotainohjelman eteneminen	2
2.3 Mittauslaitteisto	3
3 Lähtökohdat ennen Ulyssesta	4
3.1 Parkerin aurinkotuulimalli	4
3.2 Auringon magneettikenttä ja aktiivisuussykli	5
3.3 Yhteys: aurinkotuuli ja HMF	6
3.4 Kuva ennen Ulyssesta	7
3.4.1 Toistuvat vuorovaikutusalueet	7
3.4.2 Koronan massapurkaukset	8
3.4.3 Energeettiset hiukkaset	8
4 Ulyssksen tuloksia ja niiden seurauksia - Nykyinen kuva 4D heliosfääristä	9
4.1 Aurinkotuulen koostumus	9
4.2 Minimiajan rakenne (O-I)	11
4.3 O-I vs. O-III	12
4.4 Epäsymmetriat	13
4.5 CIR:t	14
4.6 Fiskin HMF-malli	14
4.7 Maksimiajan rakenne (O-II)	16
4.8 ICME:t	18
4.9 Kosmiset säteet	19
5 Loppupäätelmät	19

1 Johdanto

Tämän tutkielman tarkoituksena on tarjota yleisluontoinen katsaus Ulysses-luotaimen tuloksiin ja sen jälkeiseen kuvaan aurinkotuulesta ja heliosfäärin magneettikentästä kolmessa ulottuvuudessa. Lisäksi tilannetta tarkastellaan ajan funktiona, Auringon aktiivisuussyklin aikaskaalassa (noin 11 vuotta). Tämän tutkielman tarjoama kuva on kaikkea muuta kuin kattava: luotainohjelman vaikutukset ulottuvat erittäin monelle avaruusfysiikan osa-alueelle ja sen tuottamaa dataa hyödynnetään edelleen uusissa tutkimuksissa.

Tutkielmassa keskitytään aurinkotuuleen ja heliosfäärin magneettikenttään globaalissa mittakaavassa, jolloin ulkopuolelle jäävät esimerkiksi tähtienvälisen kaasun ja pölyn tutkimukset, sekä iso osa energeettisten hiukkasten ja magneettikentän mikrotason (aallot, fluktuatiot) tutkimukseen liittyvistä aiheista. Lisäksi rajaudutaan alueeseen, joka ulottuu suunnilleen Auringon fotosfäärin pinnalta noin 5 AU:n etäisyydelle, missä kaukaiseen heliosfääriin ja sen raja-alueisiin liittyvät aiheet eivät vielä tule vastaan.

Luvussa 2 käsitellään yleisesti Ulysses-luotainta ja sen ominaisuuksia. Tämän jälkeen käydään tiivistetysti läpi tutkielman kannalta olennainen pohjateoria ja käsitys heliosfääristä ennen Ulysses-luotainta. Neljännessä luvussa käsitellään valikoiden Ulyssesin tuloksia ja niiden seurauksia. Viimeisessä luvussa pohditaan lyhyesti luotainohjelmaa kokonaisuutena ja sen roolia avaruusfysiikan kehityksessä.

2 Yleistä Ulyssksesta

2.1 Tavoitteet

Ulysses-luotain oli ESA:n ja NASA:n yhteinen hanke. Luotain laukaistiin 6.10.1990 ja se lopetti toimintansa 30.6.2009. ESA vastasi luotaimen rakentamisesta ja NASA puolestaan laukaisusta, luotaimen energialähteen rakentamisesta ja datan keräämisestä. Ohjelman päätavoitteena oli tutkia aurinkotuulen, heliosfäärin magneettikentän ja energeettisten hiukkasten ominaisuuksia, sekä neutraalia kaasua ja pölyä, latitudin funktiona. Tämän lisäksi Ulyssesin erityinen rata mahdollisti mittauksia, joita on vaikea tehdä Maan kiertoradan läheisyydessä. Näihin kuului esimerkiksi pick-up ionien tutkiminen. Myös Jupiterin tutkiminen ja radiotutkimukset Auringon koronasta ja Iosta (plasma torus) kuuluivat ohjelman tavoitteisiin.

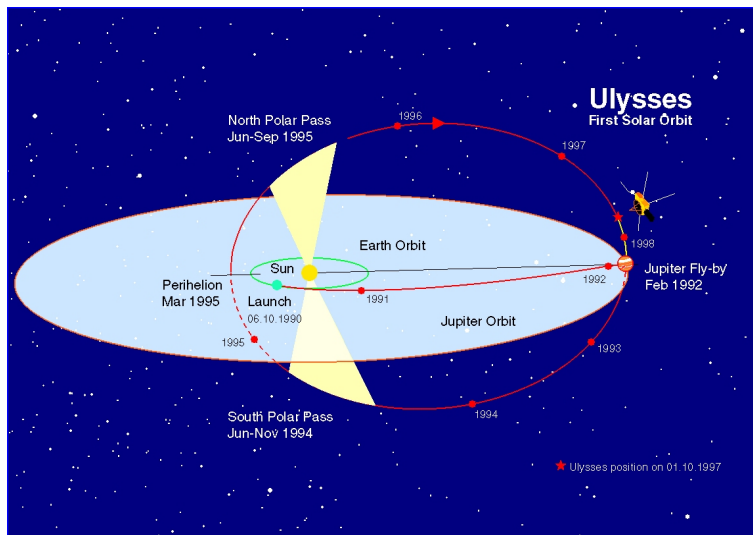
Ulysses vastaa oikeastaan vain puolta alkuperäisestä suunnitelmasta, jossa oli kaksi luotainta. Toinen olisi kiertänyt samaa rataa päinvastaiseen suuntaan, jolloin Auringosta olisi saatu stereokuvaa ja olisi ollut helpompaa eritellä avaruudellisia vaihteluita ajallisista vaihteluista.

2.2 Rata ja luotainohjelman eteneminen

Ulysses-ohjelman ehdottomasti tärkein erityispiirre on luotaimen rata: Ulysses on tähän mennessä ainoa luotain, joka on kiertänyt Auringon sen napojen kaut-

ta. Tästä luotain sai myös nimensä: Ulysses on Odysseuksen latinankielinen nimi. Laukaisun jälkeen Ulysses suuntasi kohti Jupiteria, jonka painovoiman avulla se siirtyi lopulliselle kiertoradalle, joka oli 80 astetta kallellaan Auringon ekvaattoritasoon nähden. Luotaimen kiertoaika oli 6,2 vuotta, sen apheli oli 5,4 AU:n etäisyydellä Auringosta ja periheli 1,3 AU:n etäisyydellä. Luotain suoritti yhteensä 6 napa-alueiden ylitystä ja lähes kolme täydellistä kierrosta Auringon ympäri.

Koska Ulyssesksen rata oli hyvin eksenttrinen, sen nopeus radan eri vaiheissa vaihteli suuresti. Auringon nopeat ohitukset (fast latitude scan, FLS) tapahtuivat etelänavalta pohjoisnavalle ja kestivät alle vuoden. Rata oli suosiollinen Auringon aktiivisuussykliin nähden: nopeat ohitukset tapahtuivat lähellä aktiivisuuden ääriolosuhteita (minimiä ja maksimia) ja kiertoradan hitaammat vaiheet syklin pitkällä laskevalla ja nousevilla kausilla. FLS-I tapahtui syklin 22 myöhäisellä laskevalla kaudella, FLS-II syklin 23 maksimissa ja FLS-III syklin 23 myöhäisellä laskevalla kaudella.



Kuva 1: Ulysses-luotaimen rata laukaisusta ensimmäiseen kierrokseen Auringon ympäri. Keltainen varjostus esittää sitä radan osuutta, jonka aikana luotaimen heliografinen leveysaste oli 70° tai korkeampi. (ESA)

2.3 Mittauslaitteisto

Ulyssesksen mukana kulki mittalaitteita, jotka kykenivät mittaamaan aurinkotuulen plasman ominaisuuksia, heliosfäärin magneettikenttää, energettisiä hiukkasia, kosmisiä säteitä, plasma-aaltoja, tähtienvälistä neutraalia kaasua ja pölyä, sekä radio-, röntgen- ja gammasäteilyä. Luotaimen mukana oli yhteensä

yhdeksän erilaista mittalaitetta.

Tämän tutkielman kannalta olennaisimmat mittalaitteet ovat VHM/FGM (Vector Helium Magnetometer/Flux Gate Magnetometer), joka mittasi magneettikenttää, SWOOPS (Solar Wind Observations Over the Poles of the Sun), joka mittasi aurinkotuulen ioneita ja elektroneja, sekä SWICS (Solar Wind Ion Composition Spectrometer), joka oli ensimmäinen todellinen massaspektrometri planeettojenvälisessä avaruudessa. Aiempien luotaimien massaspektrometrit antoivat massan ja varauksen suhteen m/q , mutta SWICS:llä nämä voitiin erottaa useamman erilaisen mittauksen avulla.

3 Lähtökohdat ennen Ulyssesta

Tämän luvun alussa esitetään hyvin tiiviisti aurinkotuulen ja heliosfäärin magneettikenttään (HMF) liittyvät peruskäsitteet ja teoriat, jotka ovat tämän tutkielman kannalta oleellisia. Viimeisissä kappaleissa käsitellään tarkemmin ennen Ulysses-luotaimen tuloksia ollutta kuvaa aurinkotuulesta ja HMF:stä.

3.1 Parkerin aurinkotuulimalli

Parker kehitti ensimmäisen aurinkotuulimallin 1958. Malli on puhtaasti hydrodynaaminen ja se jättää huomiotta magneettikentät aurinkotuulen syntyalueilla. Se on yksinkertaisuudestaan huolimatta edelleen yleisesti hyväksytty ja useiden luotainten avulla sen on todettu ainakin ensimmäisen approksimaation tasolla vastaavan todellisuutta.

Mallissa oletetaan, että ionien ja elektronien hiukkastiheys, nopeus ja lämpötila ovat kaikkialla samat. Lisäksi oletetaan, että tilanne on aksiaalisymmetrinen, eli suureet riippuvat vain heliosentrisestä etäisyydestä r , lämpötila on vakio ja tilanne ei ole aikariippuvainen. Myös kaikki mahdolliset hiukkaslähteet ja -nielut oletetaan mitättömiksi. Kaikki nämä oletukset voidaan perusteella hyvinä approksimaationa teoriaa rakennettaessa. Ehto ionien ja elektronien samasta nopeudesta edellyttää, ettei aurinkotuulella ole sähkövirtoja. Aurinkotuulen ajatellaan lähtevän kuvitteelliselta pinnalta (ns. source surface), joka asetetaan yleensä noin 2,5 Auringon säteen etäisyydelle. Tällä etäisyydellä sekä aurinkotuuli että magneettikenttä ovat radiaalisia.

Hyödyntämällä massan ja liikemäärän säilymlakeja voidaan johtaa differentiaaliyhtälö nopeudelle etäisyyden funktiona. Yhtälölle löytyy useita erityyppisiä ratkaisuja, joita erottaa niiden suhtautuminen yhtälössä esiintyvään kriittiseen etäisyyteen ja kriittiseen nopeuteen. Ratkaisuista kaksi on fysikaalisesti mahdollisia: 1) "stellar breeze", jossa nopeus ensin kasvaa etäisyyden kasvaessa, saavuttaa kriittisellä etäisyydellä jonkin kriittistä nopeutta pienemmän arvon, jonka jälkeen nopeus alkaa jälleen pienemään, ja 2) aurinkotuuli, jossa nopeus saavuttaa kriittisen nopeuden kriittisellä etäisyydellä ja hiukkasten nopeus jatkaa kasvamistaan muuttuen supersoniseksi.

Suihkuviiva (jetline) yhdistää ne aurinkotuulen hiukkaset, jotka ovat lähtöisin samasta pisteestä Auringon pinnalta. Johtuen Auringon pyörimisestä, suih-

kuviivat muodostavat Arkhimedeen spiraalin, jolle voidaan johtaa yhtälö

$$r(\lambda) \simeq + \frac{u_{sw}}{\Omega_S} (\lambda - \lambda_{ch}), \quad (1)$$

missä u_{sw} on aurinkotuulen nopeus, Ω_S Auringon sideerinen pyörimisnopeus, λ pituusaste ja λ_{ch} se pituusaste, jolta suihkuviiva lähtee. Yhtälö pätee, kun oletetaan nopeus vakioksi, nopeusvektorista jätetään pois pyörimisestä johtuva komponentti, ja ollaan tarpeeksi kaukana Auringosta, jolloin Auringon säde voidaan jättää huomiotta (kuin aurinkotuuli lähtisi pistemäisestä lähteestä). Tätä spiraalia kutsutaan myös Parkerin spiraaliksi ja sen kaareutuminen riippuu aurinkotuulen nopeudesta. Suihkuviivan ja radiaalisen suunnan välistä kulmaa sanotaan spiraalikulmaksi (χ).

3.2 Auringon magneettikenttä ja aktiivisuussykli

Auringon aktiivisuussykli, joka havaitaan 11 vuoden syklinä esimerkiksi auringonpilkkuluvussa, ovat seurausta Auringon magneettisesta dynamosta. Dynamo toimii vaihtelemalla dipolimaisen, pyörimisakselin suuntaisen kentän ja ekvaattoritason toroidaalisen kentän välillä. Minimiaikana kenttä on dipolimainen ja aktiivisuus alhaista (auringonpilkkuja on vähän). Differentiaalinen pyöriminen venyttää dipolin kenttäviivoja leveysasteiden suuntaisiksi, kunnes osa näin syntyvistä kentistä nousee pinnalle aiheuttaen auringonpilkkun ilmestymisen. Lopulta toroidaalinen komponentti kasvaa hallitsevaksi, jolloin kentästä tulee monimutkainen ja aktiivisuus kasvaa suureksi. Tämän jälkeen dynamo palaa uuteen dipolimaiseen kenttään, jonka polariteetti on päinvastainen kuin aiemmin.

Koronassa suurin osa kenttäviivoista on suljettuja. Joissain koronan osissa kenttäviivat kuitenkin ovat avoimia, esimerkiksi koronan aukoissa, jotka ovat laajoja yhden magneettisen polariteetin alueita. Näiltä alueilta lähtee nopeaa aurinkotuulta (600-800 km/s). Hitaan aurinkotuulen (300-400 km/s) syntymekanismi on kiistanalainen, mutta sen tiedetään lähtevän alueilta, joilla kenttäviivat pääsääntöisesti ovat suljettuja. Yleensä tällainen vyöhyke kiertää Auringon ympäri ekvaattorin lähetyvillä (streamer belt). Tällä vyöhykkeellä tyypillisesti on voimakkaita magneettisia rakenteita, kuten silmukoita, jotka näkyvät koronassa kirkkaina niihin varastoituneen plasman takia.

Koronan magneettikenttää voidaan mallintaa olettamalla korona sähkövirratomaksi ja hyödyntämällä fotosfääristä mitattua magneettikenttää. Tätä menetelmää kutsutaan Potential Field Source Surface (PFSS) -malliksi. Mallin avulla voidaan laatia kartta eri polariteetin alueista ja niitä erottavasta neutraaliviivasta aurinkotuulen lähtöpinnalla.

Auringon magneettikenttä voidaan esittää sarjana dipoli-, kvadrupoli- ja oktipolitermejä. Minimiaikana magneettikenttä koostuu dominoivasta dipolista, jonka akseli on lähellä Auringon pyörimisakselia. Maksimiaikana dipolin voimakkuus heikkenee ja kenttää kuvaavat paremmin korkeamman asteen termit. Kaukana Auringon pinnasta magneettikenttää syklin eri vaiheissa voidaan kuvata dipolilla, joka on kallistunut Auringon meridionaaliseen tasoon nähden.

Minimissä sen akseli sijaitsee pyörimisakselin lähellä, maksimissa heliografisella ekvaattorilla.

3.3 Yhteys: aurinkotuuli ja HMF

Heliosfäärin magneettikentän eli HMF:n rakenne voidaan johtaa aurinkotuulen avulla. Tämä johtuu siitä, että ideaalisen magnetohydrodynamiikan teorian mukaan magneettikenttä on "jäätynyt" plasmaan kiinni, kun plasman johtavuus on tarpeeksi suuri. Plasmaelementit, jotka jollain ajanhetkellä ovat olleet samalla magneettisella kenttäviivalla, ovat kaikkina muinakin ajanhetkellä yhteisellä kenttäviivalla. Toinen plasman äärimmäisen suuresta johtavuudesta johtuva tärkeä tulos on se, että magneettivuo plasman mukana liikkuvan suljetun käyrän läpi pysyy vakiona.

Aurinkotuulen plasmaelementit, jotka aluksi liikkuvat tietyn kenttäviivan suuntaisesti, pysyvät samalla kenttäviivalla myöhemminkin. Kun aurinkotuulen dynaaminen paine alkaa kauempana Auringosta hallita plasman liikettä magneettisen paineen sijasta, kenttäviiva taipuu samaan muotoon kuin aurinkotuulen suihkuviivat, eli Parkerin spiraalille. Jälkimmäiseksi mainitun teoreeman perusteella magneettikentän radiaaliselle komponentille saadaan etäisyysriippuvuus $B_r(r) = B(r_0)(\frac{r_0}{r})^2$, missä r_0 on aurinkotuulen lähtöpinnan etäisyys ja $B(r_0)$ on magneettikentän voimakkuus tällä etäisyydellä.

Tietyltä leveysasteelta lähtevä aurinkotuuli muodostaa kartiopinnan. Suihkuviiva ja magneettinen kenttäviiva muodostavat spiraalin tällä pinnalla. Spiraali kiertyy sitä tiukemmin, mitä lähempänä ekvaattoria ollaan. Auringon navalta, pyörimisakselin kohdalta lähtevä kenttäviiva kulkee suorana.

Aurinkotuuli kuljettaa magneettikentän kenttäviivat mukanaan, jolloin ne ovat ekvaattorillakin avoimia. Koska Auringon eri navoilla on eri magneettinen polariteetti, ekvaattoritasossa kulkee lähekkäin vastakkaisen polariteetin kenttäviivoja. Jotta tämä rakenne olisi mahdollinen, on erisuuntaisten kenttäviivojen välissä kuljettava sähkövirta. Seurauksena on virtalevy (heliospheric current sheet, HCS), joka erottaa magneettisesti erimerkkiset alueet toisistaan. Virtalevy on jatke Auringon magneettiselle ekvaattorille. Sähkövirta kulkee jokaisessa pisteessä kenttäviivojen suhteen kohtisuorassa suunnassa, joten sekin muodostaa spiraalirakenteen. Riippuen Auringon polariteetista virta suuntautuu joko Auringosta pois päin tai sitä kohti. Varausta pitää tasapainossa sähkövirta, joka kulkee vastaavasti joko Auringon napoja kohti tai niistä pois.

Koska Auringon dipolikenttä on usein kallellaan pyörimisakseliin nähden, myös virtalevy on kallellaan heliografiseen ekvaattoriin nähden. Ekvaattoritasossa oleva havaitsija on välillä virtalevyn "yläpuolella" ja välillä "alapuolella", jolloin hän on vuorotellen positiivisen (Auringosta pois päin) ja negatiivisen (Aurinkoon päin) magneettisen polariteetin alueella. Näin muodostuu ns. sektorirakenne. Virtalevyssä voi olla myös vääntymiä esimerkiksi epäsymmetrisesti jakautuneiden koronan aukkojen seurauksena. Auringon pyöriessä virtalevy muodostaa rakenteen, jota kutsutaan usein balleriinan hameeksi. Virtalevyn sektorit pyörivät lähes samalla kulmanopeudella Auringon kanssa, joten rakenteen havaitaan Maassa toistuvan kerran synodisen Auringon pyörähdyskunnan aikana.

3.4 Kuva ennen Ulyssesta

Tässä luvussa esitetty kuva heliosfääristä ennen Ulysses-luotainta perustuu teoksen *The Heliosphere through the Solar Activity Cycle* [Suess et al., 2007] viimeiseen lukuun, jossa käsitellään tilannetta noin vuonna 1992, Ulyssoksen Jupiterin ohituksen aikoihin (eli juuri ennen kuin se alkoi lähettää tuloksia ekvaattoritason ulkopuolelta).

Ennen Ulyssesta havainnot esimerkiksi aurinkotuulen latitudivaihteluista perustuvat epäsuoriin havaintoihin, kuten radioskintillaatioon ja komeettojen pyrstöjen tutkimiseen. Suorat mittaukset luotaimilla ekvaattoritasossa alkoivat 1950-luvulla ja ne vahvistivat Parkerin teorian superpersonisesta aurinkotuulesta sekä Arkhimedeeseen spiraalia noudattavan HMF:n. Myös HMF:n sektorirakenne löydettiin. Fotosfäärin magneettikenttää oltiin mitattu jo aiemmin ja esimerkiksi muutokset Auringon koronassa syklin eri vaiheissa tunnettiin auringonpimennyshavainnoista. Pystyttiin myös päättämään, että näiden muutosten tulisi näkyä HMF:ssä.

Tiedettiin, että aurinkotuuli voidaan karkeasti jakaa hitaaseen ja nopeaan tuuleen. Nopea tuuli voitiin yhdistää koronan aukkoihin ja hidas tuuli streamer beltin. Napojen koronan aukoilla tiedettiin olevan vastakkaiset magneettiset polariteetit ja hitaassa tuulessa polariteetin havaittiin olevan sekoittunut.

Aktiivisuussyklin kulku ja sen vaikutukset aurinkotuuleen ja HMF:ään tunnettiin karkeasti. Minimissä Auringon napoja dominoivat laajat koronan aukot ja lähellä virtalevyä sijaitsee streamer belt. Aktiivisuuden noustessa koronan aukot kutistuvat ja lopulta katoavat, ja streamer belt muuttuu epäsäännölliseksi. Maksimissa useat aktiiviset alueet ja joka puolella Aurinkoa esiintyvät pienet koronan aukot tekevät koronan rakenteen hyvin monimutkaiseksi. Syklin jatkuessa napojen koronan aukot ilmestyvät uudelleen, vastakkaisella polariteetilla, mutta ovat aluksi muodoltaan epäsäännölliset.

Avoimia kysymyksiä liittyi vielä aurinkotuulen ja HMF:n tarkempaan kolmiulotteisiin rakenteeseen ja kehitykseen syklin eri vaiheissa. Lisäksi haluttiin tietää, miten aurinkotuulen massavuo ja liikemäärävuo, sekä magneettinen vuo muuttuvat syklin aikana.

3.4.1 Toistuvat vuorovaikutusalueet

Toistuvat vuorovaikutusalueet (corotating interaction region, CIR) ovat seurausta nopean ja hitaan tuulen vuorovaikutuksesta. Etenkin aktiivisuuden laskevalta kaudella, kun koronan aukot ovat vielä epäsäännöllisen muotoiset, matalilla latituteilla vuorottelevat nopean ja hitaan aurinkotuulen alueet. Auringon pyöriessä nopea aurinkotuuli joutuu samalle radiaaliselle linjalle aiemman hitaan tuulen kanssa. Edetessään avaruuteen nopea tuuli alkaa työntää hidasta tuulta tieltään, sillä magneettikentän jäätymisen takia niiden hiukkaset eivät voi sekoittua. Tämä johtaa kahden paineaallon kasaantumiseen ja lopulta kahden shokin muodostumiseen. Shokit muodostuvat tyypillisesti vasta 2 AU:n etäisyydellä tai sitä kauempana. Etushokki (forward shock) etenee hitaaseen tuuleen CIR:n edessä ja takashokki (reverse shock) etenee nopeaan tuuleen CIR:n ta-

kana. Koska shokkien eteneminen on kuitenkin hitaampaa kuin aurinkotuulen supersoninen nopeus, molemmat shokit kulkeutuvat kauemmas Auringosta.

CIR:ien ekliptikatason ominaisuudet tunnettiin hyvin ennen Ulyssesta, samoin kuin niiden kehitys etäisyyden funktiona. Shokkien muodostuminen ja vaikutukset ymmärrettiin. Jopa jonkinasteinen perusymmärrys CIR:ien kolmiulotteisesta rakenteesta oli saavutettu mallien ja runsaiden ekliptikatason mittauksen perusteella.

Kysymykset, joihin kaivattiin vastauksia, liittyivät epäradiaalisiin virtauksiin, CIR:ien vaikutuksiin keskimääräiseen aurinkotuuleen ja shokkien kehittymiseen korkeammilla leveysasteilla. Oli myös epäselvää, miten ylös navoilta CIR:ien vaikutukset ylettyivät, sekä miten tehokkaasti CIR:t kiihdyttävät hiukkasia.

3.4.2 Koronan massapurkaukset

Koronan massapurkauksessa (coronal mass ejection, CME) Auringosta purkautuu noin $10^{12} - 10^{13}$ kg materiaa. Eräs tapa mallintaa koronan massapurkausta on ajatella se magneettisena vuoputkena, joka kiihtyy äkillisen magneettikentän voimistumisen seurauksena ulospäin Auringosta. Noin kolmessa neljäsosassa purkauksista lähde on prominenssi. Koronan massapurkaukset ovat oleellisia etenkin Auringon aktiivisella kaudella, jolloin ne ovat hyvin yleisiä ja vaikuttavat merkittävästi aurinkotuulen ja HMF:n ominaisuuksiin.

CME:n vastine kauempana heliosfäärissä on ICME (interplanetary (manifestation of/counterpart of) coronal mass ejection). ICME:t laajenevat edetessään hyvin voimakkaasti, mikä on seurausta toisaalta paineesta ICME:n sisällä ja toisaalta siitä, että tyypillisesti ICME:n nopeus pienenee sen johtavasta reunasta taaksepäin. Koska ICME:t yleensä esiintyvät matalilla latitudeilla, missä niitä ympäröi hidas aurinkotuuli, niiden nopeus on tarpeeksi paljon suurempi niiden ympäristöön verrattuna, jotta shokki kykenee muodostumaan niiden edelle. Kun ICME:n sisäinen magneettinen paine on suurempi kuin plasman paine, ICME:tä kutsutaan magneettiseksi pilveksi (magnetic cloud, MC).

Magneettikentät ICME:iden sisällä ovat hyvin poikkeuksellisia HMF:n normaalitilaan verrattuna. Toisin kuin aurinkotuulella, missä kenttäviivat ovat avoimia, ICME:issä kenttäviivat ovat suljettuja, joko siten että molemmat päät ovat kiinni Auringossa, tai siten että ne muodostavat suljetun renkaan. Tarkemman tason rakenne on edelleen kiistanalainen.

3.4.3 Energeettiset hiukkaset

Heliosfäärin energeettiset hiukkaset voidaan jakaa viiteen ryhmään: galaktisiin kosmisiin säteisiin (galactic cosmic rays, GCR), anomaalisiin kosmisiin säteisiin (anomalous cosmic rays, ACR), Auringon energeettisiin hiukkasiin (solar energetic particles, SEP), shokeissa ja aurinkotuulen häiriöissä kiihtyneisiin hiukkasiin (esim. CIR:iin liittyvät hiukkaset), sekä planeettojen magnetosfääreissä kiihtyneisiin hiukkasiin. Anomaaliset kosmiset säteet ovat alunperin neutraaleja atomeja tähtienvälisestä aineesta, jotka ionisoituvat Auringon UV-säteilyn vai-

kutuksesta ja kulkeutuvat aurinkotuulen mukana heliosfäärin ulkorajoille, missä ne kiihtyvät suurimmillaan noin 100 MeV:n energioihin ja heijastuvat takaisin sisempään heliosfääriin. Auringon energettisiä hiukkasia syntyy roihupurkausten ja koronan massapurkausten yhteydessä.

Energeettiset hiukkaset ovat tyypillisesti varattuja, joten niihin vaikuttavat sähkö- ja magneettikentät. Kaikkiin edellä mainittuihin hiukkaspopulaatioihin vaikuttavat aurinkotuuli, HMF ja Auringon aktiivisuus, jotka voivat muuttaa hiukkasten vuota latitudin ja/tai etäisyyden funktiona, sekä hiukkasten energiaspektiriä ja koostumusta. Auringosta peräisin olevien hiukkasten etenemiseen vaikuttaa erityisesti heliosfäärin magneettikenttä. Muutokset ja häiriöt magneettikentässä aiheuttavat sekä lyhyen että pitkän aikavälin muutoksia energettisten hiukkasten vuoissa. Näin ollen erilaisten energettisten hiukkasten tutkiminen antaa tietoa myös heliosfäärin globaalista rakenteesta aktiivisuus- syklin eri vaiheissa.

Kosmisten säteiden etenemiseen heliosfäärissä vaikuttavat sekä aurinkotuuli että HMF. Aurinkotuuli aiheuttaa konvektiota ja adiabaattisia energiamuutoksia, HMF diffuusiota ja driftejä. Etenkin alle muutaman GeV:n energioilla heliosfäärin vaikutus kosmisiin säteisiin kasvaa suuremmaksi. Auringosta peräisin olevat häiriöt aiheuttavat lyhyen aikavälin muutoksia. Pidemmällä aikavälillä nähdään hiukkasvuossa antikorrelaatio 11-vuoden aktiivisuus- syklin kanssa ja erimuotoiset huiput aktiivisuuden minimissä riippuen Auringon magneettisesta polariteetista.

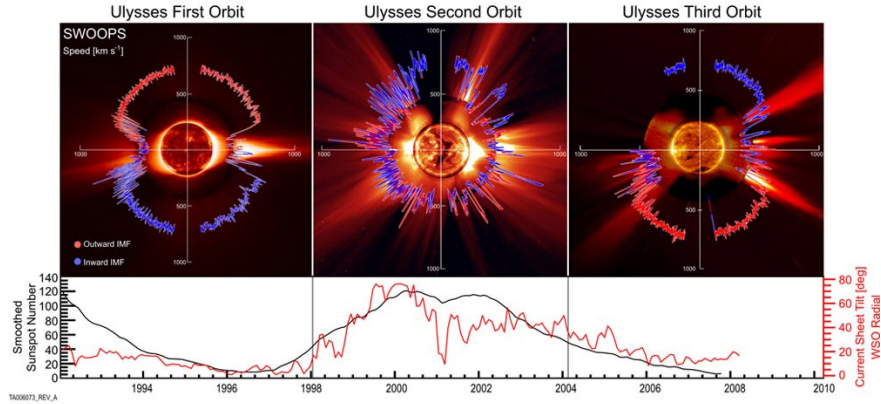
4 Ulyssoksen tuloksia ja niiden seurauksia - Nykyinen kuva 4D heliosfääristä

Ulyssoksen tärkeisiin saavutuksiin lukeutuvat muun muassa aurinkotuulen ja HMF:n kuvaaminen kolmessa ulottuvuudessa ja aktiivisuus- syklin eri vaiheissa, hitaan ja nopean aurinkotuulen ominaisuuksien ja erojen mittaaminen, HMF:n radiaalisen komponentin latitudiriippumattomuuden havaitseminen, sekä yllättävät havainnot energettisten hiukkasten odotettua helpommasta etenemisestä latitudilta toiselle ja merkittävästä epäsymmetriasta, joka löytyi kosmisten säteiden vuosta. Ulyssoksen havainnot vahvistivat Parkerin mallin pätevyyden joitain poikkeamia lukuunottamatta.

4.1 Aurinkotuulen koostumus

Aurinkotuulen hiukkastason koostumusta tutkitaan kahdella tavalla: 1) tutkitaan alkuainekoostumusta, eli eri alkuaineiden suhteellista määrää, ja 2) tietyn alkuaineen eri ionisaatiotilojen suhteellisia määriä. Näiden avulla pystytään selvittämään, millaisista olosuhteista ja prosesseista aurinkotuuli on peräisin.

Koronan alaosissa vallitsee tasapainotila, jossa ionien varaustila riippuu alueen lämpötilasta, sillä ionit ja elektronit törmäilevät jatkuvasti toisiinsa. Kun plasma alkaa kiihtyä aurinkotuuleksi, tiheys alkaa pienentyä samalla kun nopeus



Kuva 2: Aurinkotuulen nopeus latitudin funktiona Ulyssuksen kolmen kierroksen aikana. Punainen väri kuvaa Auringosta pois päin suuntautuvaa magneettista polariteettia, sininen Aurinkoon päin. Alhaalla tasoitettu auringonpilkkuluku (mustalla) ja virtalevyn kallistuskulma (punaisella) ajan funktiona. (*McComas et al.* [2008])

kasvaa, jolloin törmäysten välinen keskimääräinen aika kasvaa. Tietyn korkeuden jälkeen ionien varaustila ei enää muutu. Siten ionien varaustila osoittaa lämpötilan tällä korkeudella. Riippuu alkuaineesta, missä lämpötilassa "jäätyminen" tapahtuu. Tämän avulla voidaan selvittää koronan lämpötilaa eri korkeuksilla, sekä mistä tietynlainen aurinkotuuli on peräisin.

Myös alkuainekoostumus on erilainen hitaassa ja nopeassa aurinkotuulussa, vaikka sen ajatellaankin usein olevan riippumaton lämpötilasta ja aurinkotuulen kiihdytysprosessista. Kyse on ns. FIP-efektistä. Jo ennen Ulyssesta tiedettiin, että alhaisen ensimmäisen ionisaatiopotentiaalin (first ionization potential, FIP) omaavat alkuaineet suhteessa korkean FIP:n omaaviin alkuaineisiin ovat aurinkotuulussa yleensäkin runsaammat verrattuna Auringon fotosfääriin. Ulysses toi kuvaan myös erot hitaan ja nopean tuulen välillä: FIP-efekti on huomattavasti voimakkaampi hitaassa aurinkotuulussa.

Von Steiger et al. [2000] kävivät läpi SWICS-instrumentin dataa valikoituilta aikaväleiltä vuosilta 1991-1998. Heidän tuloksensa vahvistavat käsitystä aurinkotuulen jyrkästä kaksijakoisuudesta: sekä ionisaatiotilassa että alkuainejakaumassa nähdään ero hitaan ja nopean aurinkotuulen välillä. Kun alkuaineiden ionisaatiotilat muutetaan lämpötiloiksi, jotka kyseisen ionisaatiotason saavuttamiseen vaaditaan, nähdään esimerkiksi hiilen ja hapen tapauksessa selvä antikorraatio aurinkotuulen nopeuden kanssa. FIP-efekti on voimakkaampi hitaassa tuulussa noin tekijällä 2 ja lisäksi alkuainekoostumus on paljon vaihtelevampi. Näiden perusteella voidaan sanoa nopean tuulen olevan peräisin viileiltä ja homogeenisilta alueilta (koronan aukot) ja hitaan tuulen kuumemmilta ja

vaihtelevimmilta alueilta (streamer belt).

4.2 Minimiajan rakenne (O-I)

Ulyssesin ensimmäinen kierros (O-I) Auringon ympäri vahvisti näkemyksen, jonka mukaan aurinkotuuli on minimiaikana selkeästi jakautunut (kuva 2). Rakennetta dominoivat kaksi laajaa koronan aukkoa Auringon navoilla, jotka Auringon pinnalla ulottuivat noin leveysasteelle $\pm 60^\circ$ asti. Aukot olivat lähteenä nopealle aurinkotuulelle, joka laajeni hallitsemaan heliosfääriä noin leveysasteelle $\pm 20^\circ$ asti [Gosling *et al.*, 1995]. Kaikkiaan nopea tuuli hallitsi siten noin 60% heliosfääristä minimiaikana. Nopean aurinkotuulen nopeus oli noin 700 – 800 km/s ja kasvoi hyvin hitaasti napoja kohti ($\sim +1$ km/s per leveysaste) [Phillips *et al.*, 1995].

Ekvaattorin lähellä, leveysasteiden $\pm 20^\circ$ välissä kulki kaistale hidasta ja vaihtelevaa aurinkotuulta (streamer belt), missä aurinkotuulen nopeus vaihteli noin välillä 320 – 710 km/s [Gosling *et al.*, 1995]. Suurimmat nopeudet liittyivät alueisiin, joissa napojen koronan aukoilla oli ulokkeita alemmille leveysasteille. Myös aurinkotuulen tiheys vaihteli hitaan tuulen vyöhykkeellä merkittävästi enemmän kuin nopeassa tuulessa, missä tiheys tyypillisesti on alhainen. Ennen Ulyssesta oletettiin, että siirtymä hitaasta nopeaan tuuleen olisi vähittäinen, mutta Ulyssesin mittaukset osoittivat rajan olevan jopa yllättävän terävä.

Magneettikentän rakenne noudatti samoja linjoja kuin aurinkotuuli: lähes koko heliosfääriä dominoivat yhtenäiset ja yksinapaiset alueet koronan aukoista, missä kenttäviivat olivat avoimia. Streamer beltin alueella magneettinen polariiteetti ja magneettikentän voimakkuus vaihtelivat [Smith *et al.*, 1995]. FLS-I:n aikana virtalevyssä havaittiin neljä sektoria ja se rajoittui noin leveysasteiden $\pm 20^\circ$ väliin.

Tärkeä ja odottamaton havainto oli magneettikentän radiaalisen komponentin B_r latitudiriippumattomuus. B_r on tärkeä, sillä se käytännössä määrää Auringosta lähtevän avoimen magneettikentän. Parkerin mallissa magneettikentän toinen, atsimutaalinen komponentti lasketaan B_r :stä, kun tiedetään aurinkotuulen nopeus ja pyörimisen kulmanopeus pisteessä, josta kenttäviiva lähtee.

Yleisesti oletettiin, että radiaalisen komponentin tulisi minimissä olla voimakkaampi korkeilla latituteilla, sillä tällöin magneettikenttää hallitsee dipolikenttä. Ulysses kuitenkin osoitti, ettei näin ole. Kun radiaalisesta komponentista eliminoidtiin etäisyyden muutoksen vaikutus, B_r :n havaittiin olevan käytännössä vakio latitudin funktiona [Smith and Balogh, 1995]. Tällä on useita merkittäviä seurauksia.

Ensinnäkin se tarkoittaa, että kenttäviivojen on kaareuduttava navoilta ekvaattorille päin (superradiaalinen laajeneminen), kunnes jollain etäisyydellä saavutetaan tilanne, jossa magneettikentän voimakkuus on vakio. Tällöin myös aurinkotuulen on kuljettava samanlaista linjaa pitkin, mikä on oleellinen poikkeama Parkerin teoriasta, jossa magneettikenttää ei vaikuta aurinkotuulen radiaaliseen virtaukseen. Aurinkotuulen poikkeaminen radiaalisesta suunnasta napa-alueilla oltiin havaittu jo aiemmin koronan kuvien perusteella, mutta sen oletettiin johtuvan plasman paineesta, ei magneettikentän vaikutuksesta. Epäradiaalinen laa-

jeneminen on otettava huomioon, kun selvitetään, mistä pisteestä Auringon pinnalta jonkin luotaimen mittaama aurinkotuuli ja magneettikenttä ovat peräisin.

Toinen oleellinen seuraus on se, että Auringosta lähtevä avoin magneettinen vuo voidaan määrittää miltä tahansa latitudilta. Koko Auringosta lähtevä vuo voidaan siis määrittää esimerkiksi pelkästään ekvaattoritason mittauksista, joita on tehty jo hyvin pitkään. Näin voidaan tutkia avoimen vuon muutoksia pitkällä aikavälillä.

Ulysses vahvisti spiraalikulman noudattavan pääosin Parkerin spiraalia kaikilla leveysasteilla, mutta löydettiin myös mahdollisia poikkeamia [Forsyth *et al.*, 2002]. Kaikilla nopean aurinkotuulen latituteilla kulman keskiarvo viittasi oletettua vähemmän kiertyvään magneettikentän spiraaliin, mikä johtui kulman jakauman epäsymmetrisyydestä. Toisaalta kulman todennäköisin arvo (moodi) ei poikennut oletetusta arvosta, paitsi korkeilla eteläisillä latituteilla, missä todennäköisin arvo viittasi spiraalin olevan tiukemmin kiertynyt kuin Parkerin spiraali. Forsyth *et al.* kuitenkin päättelivät poikkeamien todennäköisemmin johtuvan magneettikentässä esiintyvistä aalloista (Alfvénin aallot).

Parkerin mallin mukaan magneettikentän pohjois-eteläsuuntainen komponentti B_θ , on nolla. Tämä perustuu oletukseen aurinkotuulen radiaalisuudesta. Ulysses vahvisti mittauksillaan tämän pätevän keskiarvoisesti kaikilla latituteilla [Forsyth *et al.*, 2002]. B_θ muodostaa lähes symmetrisen jakauman nollan ympärille. Korkeilla pohjoisilla leveysasteilla jakaumassa esiintyi kaksi huippua, mutta nämäkin todennäköisesti ovat seurausta Alfvénin aalloista.

4.3 O-I vs. O-III

Ulyssesin kolmas kierros (O-III), joka myös tapahtui lähellä aktiivisuuden minimiä, toi kuvaan monenlaisia kiinnostavia seikkoja. Vaikka O-III tapahtui myöhemmässä vaiheessa sykliä kuin O-I ja sykli 23 on ollut aktiivisuudeltaan paljon heikompi kuin sykli 22, Ulysses havaitsi aurinkotuulirakenteen olevan huomattavasti vaihtelevampi.

McComas et al. [2006] käsittelivät Ulyssesin havaintoja luotaimen ollessa ekvaattoritason lähetyvillä ratansa hitaammalla osiolla. He osoittivat Ulyssesin aurinkotuulimittausten viittaavaan virtalevyn olevan edelleen suuresti kallellaan, ja että säännöllistä stream-rakennetta ei vielä havaittu, toisin kuin O-I:llä. Myös ICME:itä havaittiin edelleen ja aurinkotuulen nopeus vaihteli hitaasti latitudin (ajan) funktiona, mikä mahdollisesti viittaa virtalevyn liikkuneen ja/tai muuttaneen muotoa mitausten aikana. Kaiken kaikkiaan heidän havaintonsa osoittavat heliosfäärin rakenteen voivan vaihdella merkittävästi syklien välillä.

O-III:n napa-alueiden havaintoja *McComas et al.* [2008] käsittelivät myöhemmässä artikkelissa. He havaitsivat merkittäviä eroja O-I:n ja O-III:n välillä: aurinkotuuli napojen koronan aukoista oli hitaampaa, harvempaa ja viileämpää kuin O-I:llä; massavuo, sekä dynaaminen ja terminen paine olivat pienemmät. Vastaava ero aurinkotuulen tiheydessä ja paineessa havaittiin myös ACE-luotaimella ekvaattoritassossa. Muutenkin syklin 23 minimi on vaikuttanut poikkeuksellisesti. Napojen magneettikentät ovat olleet heikommat, koronan aukot

alkoivat ilmestyä myöhemmin ja ne ovat pysyneet heikompina, kuten myös virtalevyyn kallistuskulma on pysynyt suurempana.

Smith and Balogh [2008] osoittivat, että magneettikentän avoin vuo ($r^2 B_r$) väheni tekijällä 0,64 Ulyksen ensimmäiseltä kierrokselta kolmannelle kierrokselle (arvosta $3,6 \text{ nT(AU)}^2$ arvoon $2,3 \text{ nT(AU)}^2$). He myös vertailivat minimihetken magneettikentän voimakkuutta ekliptikan mittauksista neljän syklin ajalta ja havaitsivat laskun alkaneen oikeastaan jo edellisessä syklissä. Aiemmin oletettiin, että minimissä magneettikentän radiaalisen komponentin voimakkuus palautuisi aina vakioarvoon (noin 3 nT). Lisäksi *Liou and Wu* [2016] osoittivat, että sekä hitaan tuulen alue että virtalevyyn liittyvä plasmalevy olivat leveämmät O-III:n aikana kuin O-I:n aikana.

4.4 Epäsymmetriat

Jo pitkään on ollut selvää, ettei Aurinko ole täydellisen symmetrinen missään suhteessa. Lisäksi monet prosessit Auringossa vaikuttavat noudattavan enemmän tai vähemmän kaotettisia lakeja, joten Aurinkoa ei voida pitää mitenkään ideaalisena kappaleena. Auringosta voidaan kuitenkin myös löytää säännöllisiä epäsymmetrioita, jotka näyttävät säilyvän hyvin pitkään tai ehkä jopa olevan pysyviä (mahdollisesti pitkällä jaksonajalla oskilloivia) ominaisuuksia. Nämä liittyvät epäsymmetriaan eteläisen ja pohjoisen hemisfäärin välillä.

Ebert et al. [2013] tutkivat Ulyksen mittauksia O-I:n ja O-II:n ajalta ja löysivät useista nopean aurinkotuulen ja IMF:n parametreista etelä-pohjoisen epäsymmetrioita molemmilta ajanjaksoilta. Suurimmat erot löytyivät aurinkotuulen protonien ja alfahiukkasten tiheyksistä, massavuosta, dynaamisesta paineesta, B_r :n magnitudista ja IMF:n voimakkuudesta. Ebert et al. päättelivät epäsymmetrioiden johtuvan voimakkaammasta ja vaihtelevammasta aurinkotuulesta ja magneettikentästä eteläisillä keskilatituteilla, mikä vastaa aktiivisempaa eteläistä hemisfääriä. Epäsymmetriat vähenivät, pysyen kuitenkin merkittävinä, korkeammille latituteille siirryttäessä.

Epäsymmetriaa voi selittää kaksi eri skenaariota: 1) epäsymmetria hemisfäärien välillä aurinkotuulen ja IMF:n voimakkuudessa laskevan ja minimikauden aikana, tai 2) globaali, koko Auringon kattava ilmiö, jossa koronan aukot vahvistuvat molemmilla navoilla korkeamman aktiivisuuden aikoina. Ensimmäiselle vaihtoehdolle löytyy tukea havaituista epäsymmetrioista magneettikentässä ja auringonpilkkuluvussa. On osoitettu, että Auringon hemisfäärien magneettikentät muuttuvat eri vaiheissa, samoin kuin koronan aukkojen kehittyminen navoille tapahtuu eri aikoina. Toistakaan vaihtoehtoa ei kuitenkaan voida sulkea pois.

Yleisesti ottaen Ulyksen havainnot tarjosivat tukea aiemmille tutkimuksille Auringon epäsymmetriasta, vaikkakin toisen luotaimen puuttuminen vaikeuttaa merkittävästi ajallisten muutosten poissulkemista epäsymmetrian aiheuttajana. Auringon hemisfäärien välinen epäsymmetria oltiin aiemmin löydetty hyödyntämällä esimerkiksi A- ja T-sektorien suhteellisten leveyksien vertailua ja B_r :n etäisyysriippuvuutta. Ulyksen mittauksien jälkeen on tehty myös paljon lisää tutkimuksia aiheesta ja epäsymmetrian olemassaolo on löydetty useista aurinkotuulen ja IMF:n parametreista. Näiden perusteella vaikuttaisi, että vir-

talevy on molemmilla Auringon polariteeteilla siirtynyt eteläiselle hemisfäärille aktiivisuuden minimiaikana [*Mursula and Hiltula, 2003*], ikään kuin Auringon magneettinen dipoli olisi siirtynyt etelään päin. Toisaalta aurinkotuulen nopeuden minimikohta (joka yleensä yhdistetään virtalevyn sijaintiin) vaikuttaa seuraavan magneettista pohjoista hemisfääriä, vuorotellen sijaintiaan syklin polariteetin mukaan [*Mursula et al., 2002*]. Nämä ilmiöt havaittiin myös Ulyssesksen mittauksista [*Crooker et al., 1997*].

4.5 CIR:t

Ulyssesksen ensimmäinen vierailu Auringon korkeilla leveysasteilla noin 5 AU:n etäisyydellä paljasti selkeästi CIR:ien systemaattisia ominaisuuksia näillä alueilla. Noin leveysasteella 26°S , joka oli hieman pienempi kuin virtalevyn kallistuskulma mittaushetkellä, etushokit katosivat lähes kokonaan [*Gosling et al., 1993*]. Takashokkeja sen sijaan esiintyi vielä latitudilla $37,1^{\circ}\text{S}$ asti.

Mittaukset aurinkotuulesta ennen ja jälkeen shokkien osoittivat, että etushokista alavirtaan aurinkotuuli kääntyy pohjoiseen ja länteen (eli planeettojen liikkeen suuntaan), kun taas takashokista alavirtaan tuuli kääntyy etelään ja itään [*Gosling et al., 1993*]. Tulokset vahvistivat ekvaattoritason mittauksista tehdyt johtopäätökset ja tukivat aiemmin kehitettyä teoriaa CIR:ien 3D-olemuksista. Pizzon kehittämä teoria perustuu Auringon geometriaan kallellaan olevana dipolina, yhdistettynä sen pyörimisliikkeeseen.

Hidas ja nopea tuuli kohtaavat toisensa pinnalla, joka on samalla tavoin kallellaan kuin streamer beltkin. Vuorovaikutusalue laajenee paineaaltojen edetessä kahteen eri suuntaan, ja tämä laajeneminen tapahtuu painegradientin suhteen päinvastaiseen suuntaan. Tämän takia paineaaltojen ja shokkien eteneminen alkaa poiketa radiaalisesta suunnasta. Se myös selittää, miksi takashokit etenevät ylemmille leveysasteilla kuin etushokit.

4.6 Fiskin HMF-malli

CIR:t voivat kiihdyttää hiukkasia niihin liittyvissä shokeissa. Yksi Ulyssesksen yllättävistä havainnoista oli se, että vaikka CIR:t rajoittuvat matalille heliografisille leveysasteille, niihin liittyviä energettisiä hiukkasia havaittiin jopa korkeimmalla Ulyssesksen saavuttamalla leveysasteella (80°). Kyseiset hiukkaset voidaan tunnistaa siitä, että niiden esiintymisessä on 26 päivän jaksollisuus. Myös galaktisten kosmisten säteiden vuossa näkyi CIR:iin liittyviä vaihteluita Ulyssesksen korkeimmille leveysasteille asti

Tästä seurasi ongelma, sillä jos magneettikentän oletetaan noudattavan Parkerin mallia, sen kenttäviivat eivät poikkeaisivat latitudisuunnassa ja siten magneettinen yhteys matalien ja korkeiden latitudien välillä ei pitäisi olla mahdollinen. Koska varattujen hiukkasten liike on huomattavasti vaikeampaa kenttäviivoja kohtisuoraan kuin niiden suuntaisesti, myöskään kyseisiä hiukkasia ei pitäisi esiintyä latitudeilla, joille CIR:t itse eivät ulotu.

Ongelmaan on ehdotettu kahta erilaista ratkaisua. Toinen näistä on kenttäviivojen vastainen hiukkasten diffuusioliike. Toinen vaihtoehto, joka on tämän

tutkielman aiheen kannalta kiinnostavampi, on uudenlainen HMF:n rakenne, joka sallisi suoran yhteyden leveysasteelta toiselle. Tätä ehdotti Fisk vuonna 1996.

Fiskin kenttämalli perustuu Auringon differentiaaliseen pyörimiseen, kenttäviivojen epäradiaaliseen laajenemiseen, sekä koronan aukkojen pyörimiseen jäykkään kappaleen tavoin ekvaattoritason nopeudella [Fisk, 1996]. Differentiaalinen pyöriminen on olennaista kenttäviivojen ns. jalansijojen (footpoint) kannalta. HMF:n kenttäviivoilla on ensinnäkin jalansija (kuvitteellisella) pinnalla, josta aurinkotuuli alkaa viedä kenttäviivaa mukanaan (source surface). Toisaalta samalla kenttäviivalla on jalansija fotosfäärin pinnalla, missä se on kiinni ja kokee differentiaalista pyörimistä.

Kuten Ulysseskin osoitti, magneettikenttä kokee voimakkaan epäradiaalisen laajenemisen koronassa. Kolmas oletus, joka liittyy koronan aukkojen jäykkään pyörimiseen, onkin teorian oletuksista kyseenalaisin. Fisk olettaa mallissaan, että navan koronan aukon magneettikenttä voidaan esittää dipolina, joka on kallellaan Auringon pyörimisakselin suhteen ja joka pyörii jäykästi ekvaattorin pyörimisnopeudella. Tällekin oletukselle löytyy kuitenkin sitä tukevia havaintoja.

Differentiaalinen pyöriminen aiheuttaa kenttäviivojen jalansijojen liikkeen latitudi- ja longitudisuunnassa, sekä fotosfäärissä että aurinkotuulen lähtöpinnalla. Tämän seurauksena kenttäviivat voivat poiketa huomattavasti latitudilta toiselle; ne voivat siirtyä sekä alemmille että ylemmille latituteille radiaalisen etäisyyden kasvaessa. Fiskin esittämissä mallilaskelmissa kenttäviivat pystyivät poikkeamaan jopa yli 40 astetta latitudisuunnassa. Malli tarjoaisi myös selityksen sille, miksi Ulysses havaitsi korkeilla leveysasteilla kentän kiertyvän voimakkaammin spiraalille kuin Parkerin mallissa.

Myöhemmässä artikkelissa Fisk et al. [1999] käsittelevät uuden kenttämallin erinäisiä seurauksia. Olennainen seuraus on kenttäviivojen ja magneettivuon kulkeutuminen Auringon puolelta toiselle. Koronan aukoista lähtevien kenttäviivojen jalansijojen liike vie ne lopulta lähelle ekvaattoria. Tämä aiheuttaisi magneettivuon kertymisen Auringon toiselle puolelle ja vähenemisen toiselta puolelta, mikä tuskin voi johtaa kestävään rakenteeseen. Todennäköisesti kenttäviivat rekonnetoituvat streamer beltin suljettujen kenttäviivojen kanssa. Tällöin vastaavasti suljettu kenttäviiva aukeaa ja voi jatkaa rekonnektioiden sarjaa, kunnes tasapainotila saavutetaan Auringon toisella puolella.

Kuten Fisk et al. artikkelissaan osoittavat, Fiskin kentällä on siten huomattavia vaikutuksia koko koronan magneettikentän käyttäytymiseen. Malli tarjoaa mahdollisen selityksen esimerkiksi koronan aukkojen jäykälle pyörimiselle, niiden reunojen sijainnille, hitaan aurinkotuulen synnylle ja sen ominaisuuksille (vaihtelevuus, FIP-efekti), sekä koronan massapurkauksien synnylle ja magneettikentän kääntymismekanismille syklin edetessä. Kaikki nämä seuraukset ovat kuitenkin hyvin spekulatiivisia.

On edelleen kyseenalaista, missä määrin Fiskin malli vastaa todellisuutta. Yksi vaikeus johtuu siitä, että vaikka Fiskin mallin magneettikenttä poikkeaa huomattavasti Parkerin mallista suurilla etäisyyksillä, yksittäisestä luotaimesta havaittuna ero Parkerin ja Fiskin kentän välillä on vain noin kymmenen as-

tetta, mikä on HMF:ssä olevien häiriöiden takia vaikea havaita suoraan. Mallille löytyy kuitenkin epäsuoraa tukea havainnoista: kenttäviivojen ylikiertyminen napa-alueilla Parkerin kenttään verrattuna, magneettikentän jaksollisuudet korkeilla latitudeilla, sekä tietenkin hiukkasten kulkeutuminen latitudien välillä, mikä alunperin innoittikin teorian kehityksen. Kuten aiemmin myös mainittiin, ainoastaan yksi mallin oletuksista voidaan helposti kyseenalaistaa, ja jo muut oletukset sinänsä johtavat jonkinlaisiin poikkeamiin magneettikentässä.

Järkevämpää onkin ehkä kysyä, missä tilanteissa monimutkaisempi magneettikenttämalli on ylipäättään tarpeellinen tai hyödyllinen. Parkerin malli on säilyttänyt asemansa teoriana, joihin mittauksien tuloksia ja muita teorioita verrataan. Ulysses osoitti, että karkealla tasolla Parkerin kenttä pitääkin erinomaisesti paikkansa, ja että se on edelleen hyödyllinen lähtökohta. Fiskin kenttämalli on myös hyvin elegantti ja perustuu oletuksille, joita on vaikea kiistää. Toisaalta se kuitenkin johtaa yhdessä aurinkotuulen vaikutuksen kanssa kenttään, joka on erittäin monimutkainen. Koska Fiskin malli käsittelee lähinnä minimiajan HMF:ää, siinä esitettyjen mekanismien merkityksestä koko syklin aikana ei voida sanoa paljoakaan. Monissa tapauksissa on siten edelleen perusteltua pitäytyä Parkerin mallissa. Ulysses kuitenkin teki selväksi, että Parkerin malliin on tehtävä joitain muokkauksia, jotta se vastaisi paremmin todellisuutta, varsinkin silloin, kun magneettikentän yksityiskohtainen rakenne on kysymysten kannalta oleellinen.

4.7 Maksimiajan rakenne (O-II)

Kun Ulysses aloitti toista kierrostaan (O-II) Auringon ympäri, aurinkotuulen ja HMF:n rakenne oli hyvin erilainen (kuva 2). Aurinkotuuli oli epäsäännöllisempää, tyypillisesti hidasta ja keskinopeaa (350 – 600 km/s), CIR:t olivat epäsäännöllisempiä ja CME:itä havaittiin enemmän [*McComas et al.*, 2000]. Korkeimmalle eteläiselle leveysasteelle saapuessaan Ulysses oli havainnut sekä hitaimman aurinkotuulen nopeuden koko ohjelman aikana (270 km/s) että toisen kierroksen suurimman nopeuden (740 km/s) vain muutaman leveysasteen aikana [*McComas et al.*, 2001]. Ensimmäisen kierroksen aikana havaittua yhtenäistä, laajasta koronan aukosta peräisin olevaa nopeaa aurinkotuulta ei havaittu eteläisellä napa-alueella, sillä aukon reunat siirtyivät luotaimen edellä aukon kadotessa.

FLS-II:n aikana Ulysses havaitsi yleisesti ottaen hitaampaa ja vaihtelevampaa aurinkotuulta useista erilaisista lähteistä (pienistä koronan aukoista, koronan massapurkauksista ja streamereista) ja vaihtelevalla magneettisella polariteetilla [*McComas et al.*, 2002a]. Ainoastaan aivan korkeimmilla pohjoisilla latitudeilla havaittiin nopeaa tuulta uudelleen muodostuvasta koronan aukosta, jonka magneettinen polariteetti oli päinvastainen kuin ensimmäisen kierroksen aikana. Uuden koronan aukon ilmestyminen pian maksimin jälkeen ja vanhojen aukkojen säilyminen hyvin pitkälle nousevan aktiivisuuden kaudelle viittaavat siihen, että aktiivisuusmaksimin aikainen epäjärjestäytynyt rakenne kestää vain muutaman vuoden koko syklistä.

Aurinkotuulen monimutkaisemmasta rakenteesta huolimatta vaikuttaa siltä,

että se voidaan maksimissakin jakaa hitaaseen ja nopeaan tuuleen. Maksimissa havaituista pienistä koronan aukoista peräisin oleva tuuli on yleensä hitaampaa kuin minimiajan suurista koronan aukoista lähtevä tuuli, mutta se kykenee saavuttamaan yli 700 km/s nopeuksia ja sen koostumus ja ominaisuudet ovat vastaavanlaiset kuin suurissa koronan aukoissa [*McComas et al.*, 2002b].

Magneettisten havaintojen perusteella kaksi magneettista sektoria ja niitä erottava yhtenäinen virtalevy säilyvät myös maksimissa [*Smith et al.*, 2001]. Virtalevy on kuitenkin hyvin suuresti kallistunut, lähes kohtisuoraan tasoon ekvaattorin suhteen, ja siinä esiintyy paljon kumpareita ja vääntymiä.

Ulysses havaitsi magneetikentän radiaalisen komponentin olevan riippumaton latitudista myös maksimissa [*Smith et al.*, 2001]. Tämäkin on yllättävää, sillä etenkin ekvaattoritasoa hallitsevat aktiiviset alueet sisältävät voimakkaita kenttiä. Selitys on kuitenkin sama kuin minimissä: epäradiaalinen laajeneminen voimakkaiden kenttien lähettyvillä tasoittaa erot tietylle etäisyydelle mennessä. Tämä tarkoittaa, että superradiaalinen laajeneminen on huomioitava koko syklin ajan. Toisaalta se myös tarkoittaa, että avointa vuota voidaan tutkia koko syklin ajan käyttäen mittauksia miltä tahansa latitudilta.

Smith and Balogh [2003] tutkivat Auringon avointa magneettivuota neljän aktiivisuussyklin ajalta käyttäen ekliptikatason mittauksia 1 AU:n etäisyydeltä. Näiden syklien perusteella vaikuttaa siltä, että avoin magneettinen vuo vaihtelee korkeimmillaan tekijällä 2. Verrattuna suljettuun vuohon, joka muuttuu merkittävästi maksimista minimiin, se on lähestulkoon invariantti. Jos B_r :n (josta avoin vuo lasketaan) vaihtelua kuitenkin tarkastellaan tarkemmin, se noudattaa tiettyä kaavaa. Se on matala minimin aikaan, nousee maksimiin syklin nousevalla kaudella auringonpilkkujen vaikutuksesta, putoaa hieman maksimissa, kun napojen kentät katoavat, nousee suurimpaan arvoonsa syklin laskevalla kaudella aksiaalisen dipolin voimistuessa ekvatoriaalisten kenttien ollessa vielä vahvoja, ja lopulta pienenee taas minimiarvoon kentän tasoituessa dipoliksi. Muutosten voimakkuus vaihtelee syklien välillä.

Polariteetin kääntyminen

Yleisesti on hyväksytty kuva polariteetin vaihtumisesta dipolikentän kääntymisen seurauksena. Dipoli kääntyy kohti ekvaattoria aktiivisuuden kasvavalla kaudella ja virtalevy kääntyy napoja kohti. Ekvaattorin suuntainen komponentti magneetikentässä voidaan ajatella summana auringonpilkkuihin liittyvistä kentistä. Myös magneetikentän voimistuminen tekijällä 2 tukee mallia: kuin mitattaisiin dipolia ensin ekvaattorilta ja sitten navalta.

Yllä kuvattu malli pätee kuitenkin vain avoimille kenttäviivoille kaukana Auringosta (joita avaruusluotaimet mittaavat). Fotosfäärissä, suljettujen magneettisten kenttäviivojen alueella, tilanne on paljon monimutkaisempi. Yksinapaiset alueet hemisfäärien napa-alueilla ovat läsnä koko syklin ajan. Syklin edetessä muodostuvat auringonpilkkut esiintyvät pareittain. Pilkkujen liikkeen suhteen jälkimmäisellä pilkulla magneettinen polariteetti on päinvastainen kuin navalla ja tämä pilkku kulkeutuu kohti korkeampia leveysasteita, neutralisoiden siellä olevaa päinvastaista kenttää ja pienentäen yksinapaista aluetta. Johtavalla

pilkulla polariteetti on sama kuin navalla ja se kulkeutuu matalammille latitudeille. Toisella hemisfäärillä pilkkujen polariteetit ovat päinvastaiset, joten ekvaattorille saapuvat pilkut rekonnektoituvat muodostaen suljettuja kenttäviivoja ja lopulta hävittäen pilkut. Näin navoille vähitellen kertyy päinvastaista polariteettia ja tämän seurauksena yksinapaiset alueet ensin katoavat, kunnes ilmestyvät uudelleen uudella polariteetilla. Tämän mallin perusteella kääntyvä dipoli ei ole millään tapaa todellinen, kyseessä on vain fenomenologinen malli. Ongelma on myös se tosiseikka, että uuden polariteetin navat eivät katoa ja ilmesty samaan aikaan molemmilla hemisfääreillä.

4.8 ICME:t

Ulyssuksen tehtävä ICME:iden tutkimuksessa oli kahdenlainen: 1) kartoittaa ICME:iden esiintymistä eri leveysasteilla, ja 2) lisätä uusia parametreja ICME:iden tunnistamiseen. ICME:iden tuntomerkkejä ovat muun muassa tietynlaiset nopeus- ja tiheysprofiilit, magneettikentän erityiset rakenteet, kahteen suuntaan virtaavat elektronit sekä poikkeamat alkuainekoostumuksessa tai varaustilassa. Esimerkiksi tarpeeksi korkea alfasuhde, eli alfahiukkasten suhde protoniin, on hyvin varma merkki ICME:stä.

Ulyssuksen kannalta juuri koostumukseen tai varaustilaan liittyvät suureet ovat kiinnostavia, sillä ne eivät riipu radiaalisesta etäisyydestä. Edistystä tällä osa-alueella on saavutetty yhdistämällä Ulyssuksen mittauksia muiden luotainten mittauksiin (erityisesti ACE-luotaimen, joka myös käyttää samanlaista SWICS-instrumenttia kuin Ulysses). Yksi tällainen suure on raudan keskimääräinen varaustila $\langle Q \rangle_{Fe}$, joka voi kasvaa merkittävästi ICME:n yhteydessä [Lepri and Zurbuchen, 2004]. Lepri ja Zurbuchen osoittivat, että $\langle Q \rangle_{Fe} > 12$ on hyvin tarkka ICME:n tuntomerkki (toiseen suuntaan tarkkuus ei ole yhtä hyvä: läheskään kaikissa ICME:issä näin korkeaa varaustilaa ei esiinny vaadittavan pitkää aikaa).

Eräs Ulyssuksen tarjoamista suurista yllätyksistä oli uuden ICME-tyypin löytyminen [Gosling et al., 1994], vieläpä aktiivisuuden minimiaikana, täysin koronan aukkojen sisältä, missä tavallisesti ei esiinny aktiivisia alueita. Näistä ICME:istä käytetään englanniksi termiä *overexpanding ICME* (ylilaaajeneva ICME), sillä niissä shokkien muodostuminen tapahtuu suuren sisäisen paineen (suuri tiheys, lämpötila ja/tai magneettikentän voimakkuus) seurauksena. Yleensä ICME:ihin liittyvät shokit syntyvät samoin kuin CIR:iin liittyvät shokit: ICME:n nopeus on suurempi kuin ympäröivän hitaan aurinkotuulen, jolloin sen edelle syntyy lopulta shokki. Näin ei kuitenkaan käy nopeassa aurinkotuulussa. Ylilaaajenevia ICME:itä havaittiin vain muutamia, mutta kuitenkin riittävästi, jotta ne voitiin lukea omaksi ilmiökseen.

Toisin kuin minimiaikana, jolloin ICME:itä esiintyy vähän ja ne rajoittuvat pääosin lähelle ekvaattoria, maksimin aikana niitä esiintyy laajasti joka puolella Aurinkoa. Siten voisi olettaa myös ICME:iden jakauman olevan tällöin lähes pallosymmetrinen. Lepri and Zurbuchen [2004] kuitenkin osoittivat, että vaikka ICME:itä havaittiin kaikilla latitudeilla, niitä havaittiin suhteessa vähemmän korkeilla latitudeilla kuin matalilla latitudeilla. Korkean $\langle Q \rangle_{Fe}$:n ICME:iden

materiaa havaittiin korkeilla latituteilla noin 1/3 vähemmän kuin ekliptikatasolla. He päättelivät tämän johtuvan todennäköisesti siitä, että raudan korkeat varaustilat syntyvät roihupurkausten yhteydessä, jotka maksiminkin aikaan rajoittuvat noin leveysasteiden $\pm 30^\circ$ väliin.

4.9 Kosmiset säteet

Oletettiin, että kosmisten säteiden vuon pitäisi kasvaa latitudin funktiona, ja että paikallisen tähtienvälisen spektrin (local interstellar spectrum, LIS) pitäisi olla lähes muokkaamaton napalatitudeilla. Ulyssesin mittaama spektri kuitenkin osoitti toisin: navoillakin vuo oli pienempi kuin Voyagerin mittaama vuo 63 AU:n etäisyydellä ja voimakkaasti moduloitu [Heber, 2013]. Maksimissa flukтуаatiot olivat suurempia, mutta niiden lisäksi ei havaittu merkittävää latitudigradiienttia. Merkittävä tulos oli myös se, että kummallakin mitatulla minimikaudella sekä latitudigradienit että intensiteettiprofiili ajan suhteen olivat varauksen merkisyydestä riippuvia.

Ennen Ulyssesin laukaisua Jokipii ja Kota ehdottivat, että napa-alueilla supergranulaatiosta johtuva kenttäviivojen lähtöpisteiden satunnainen liike aiheuttaisi kenttäviivoihin flukтуаatioita, jotka vaikeuttaisivat kosmisten säteiden pääsyä sisempään heliosfääriin [Jokipii and Kota, 1989]. Ulysses vahvisti sekä näiden flukтуаatioiden olemassaolon, että sen vaikutukset kosmisiin säteisiin latitudigradienitien puuttumisena.

Galaktisten kosmisten säteiden intensiteettijakaumasta löytyi epäsymmetria heliografisen ekvaattorin suhteen. FLS-I:n aikaan poikkeama oli noin 7-10 astetta etelään päin (> 100 MeV:n protoneille) [Heber, 2013].

5 Loppupäätelmät

Ulysses-ohjelma oli hyvin menestyksenkäs, ja sitä päätettiin pitkittää useita kertoja, kunnes sen lopullinen toiminta-aika oli yli neljä kertaa alkuperäisen suunnitelman mukainen. Luotaimen poikkeuksellinen rata tarjosi aivan uudenlaista tietoa useilta latituteilta ja etäisyyksiltä, mutta myös muut tekijät selittävät luotainohjelman menestystä. Luotaimen mukana kulki monipuolisesti erilaisia mittalaitteita, jotka keräsivät hyvälaatuista dataa jatkuvasti. Myös ohjelman pitkä kesto ja kiertoradan eri vaiheiden ajoitus suhteessa Auringon aktiivisuusykliin auttoivat.

Ekliptikatasossa aurinkotuuleen vaikuttavat merkittävästi Auringon pyöriminen, hitaan ja nopean tuulen välinen vuorovaikutus sekä Auringon magneettinen aktiivisuus (kuten koronan massapurkaukset). Korkeammilla leveysasteilla tuulella on vähemmän häiriöitä. Yksi suurista edelleen auki olevista kysymyksistä avaruustieteessä on aurinkotuulen kiihdytys ja sen energianlähde, joten sen kannalta Ulyssesin tulokset ovat varmasti hyödyllisiä.

Ulyssesin havainnot mahdollistivat nykyisen standardimallin aurinkotuulen kaksijakoisuudesta ja ajallisesta kehityksestä, sekä näiden vaikutuksesta heliosfäärin magneettikenttään. Luotainohjelman tulokset ovat vahvistaneet joi-

tain aiempia teorioita ja oletuksia, mutta myös innoittaneet aivan uusia teorioita odottamattomilla havainnoilla. Myös tulevaisuudessa ohjelmasta peräisin oleva data tulee olemaan hyödyllistä uusia teorioita testatattaessa tai yhdistettäessä muiden luotainten mittauksiin.

Viitteet

- Crooker, N., A. Lazarus, J. Phillips, J. Steinberg, A. Szabo, R. Lepping, and E. Smith, Coronal streamer belt asymmetries and seasonal solar wind variations deduced from wind and ulysses data, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 102(A3), 4673–4679, 1997.
- Ebert, R., M. Dayeh, M. Desai, D. McComas, and N. Pogorelov, Hemispheric asymmetries in the polar solar wind observed by ulysses near the minima of solar cycles 22 and 23, *Astrophysical Journal*, 768(2), doi:10.1088/0004-637X/768/2/160, 2013.
- Fisk, L., Motion of the footpoints of heliospheric magnetic field lines at the sun: Implications for recurrent energetic particle events at high heliographic latitudes, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 101(A7), 15,547–15,553, 1996.
- Fisk, L., T. Zurbuchen, and N. Schwadron, On the coronal magnetic field: Consequences of large-scale motions, *Astrophysical Journal*, 521(2 PART 1), 868–877, cited By 107, 1999.
- Forsyth, R., A. Balogh, and E. Smith, The underlying direction of the heliospheric magnetic field through the ulysses first orbit, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A11), SSH-19, 2002.
- Gosling, J., D. McComas, J. Phillips, L. Weiss, V. Pizzo, B. Goldstein, and R. Forsyth, A new class of forward-reverse shock pairs in the solar wind, *Geophysical research letters*, 21(21), 2271–2274, 1994.
- Gosling, J., et al., The band of solar wind variability at low heliographic latitudes near solar activity minimum: Plasma results from the ulysses rapid latitude scan, *Geophysical research letters*, 22(23), 3329–3332, 1995.
- Gosling, J. T., S. J. Bame, D. J. McComas, J. L. Phillips, V. J. Pizzo, B. E. Goldstein, and M. Neugebauer, Latitudinal variation of solar wind corotating stream interaction regions: Ulysses, *Geophysical Research Letters*, 20(24), 2789–2792, cited By :112, 1993.
- Heber, B., Cosmic rays through the solar hale cycle: Insights from ulysses, *Space Science Reviews*, 176(1-4), 265–278, doi:10.1007/s11214-011-9784-x, cited By 11, 2013.
- Jokipii, J. R., and J. Kota, The polar heliospheric magnetic field, *Geophysical research letters*, 16(1), 1–4, 1989.
- Lepri, S., and T. Zurbuchen, Iron charge state distributions as an indicator of hot icmes: Possible sources and temporal and spatial variations during solar maximum, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 109(A1), 2004.

- Liou, K., and C.-C. Wu, A possible cause of the diminished solar wind during the solar cycle 23–24 minimum, *Solar Physics*, 291(12), 3777–3792, 2016.
- McComas, D., J. Gosling, and R. Skoug, Ulysses observations of the irregularly structured mid-latitude solar wind during the approach to solar maximum, *Geophysical research letters*, 27(16), 2437–2440, 2000.
- McComas, D., R. Goldstein, J. Gosling, and R. Skoug, Ulysses’ second orbit: Remarkably different solar wind, *Space Science Reviews*, 97(1-4), 99–103, 2001.
- McComas, D., H. Elliott, J. Gosling, D. Reisenfeld, R. Skoug, B. Goldstein, M. Neugebauer, and A. Balogh, Ulysses’ second fast-latitude scan: Complexity near solar maximum and the reformation of polar coronal holes, *Geophysical research letters*, 29(9), 4–1, 2002a.
- McComas, D., H. Elliott, and R. von Steiger, Solar wind from high-latitude coronal holes at solar maximum, *Geophysical research letters*, 29(9), 28–1, 2002b.
- McComas, D., H. Elliott, J. Gosling, and R. Skoug, Ulysses observations of very different heliospheric structure during the declining phase of solar activity cycle 23, *Geophysical Research Letters*, 33(9), doi:10.1029/2006GL025915, cited By 43, 2006.
- McComas, D., R. Ebert, H. Elliott, B. Goldstein, J. Gosling, N. Schwadron, and R. Skoug, Weaker solar wind from the polar coronal holes and the whole sun, *Geophysical Research Letters*, 35(18), doi:10.1029/2008GL034896, cited By 287, 2008.
- Mursula, K., and T. Hiltula, Bashful ballerina: Southward shifted heliospheric current sheet, *Geophysical research letters*, 30(22), 2003.
- Mursula, K., T. Hiltula, and B. Zieger, Latitudinal gradients of solar wind speed around the ecliptic: Systematic displacement of the streamer belt, *Geophysical research letters*, 29(15), 28–1, 2002.
- Phillips, J., et al., Ulysses solar wind plasma observations from pole to pole, *Geophysical research letters*, 22(23), 3301–3304, 1995.
- Smith, E., A. Balogh, M. Burton, G. Erdős, and R. Forsyth, Results of the ulysses fast latitude scan: Magnetic field observations, *Geophysical research letters*, 22(23), 3325–3328, 1995.
- Smith, E., A. Balogh, R. Forsyth, and D. McComas, Ulysses in the south polar cap at solar maximum: Heliospheric magnetic field, *Geophysical Research Letters*, 28(22), 4159–4162, doi:10.1029/2001GL013471, 2001.
- Smith, E. J., and A. Balogh, Ulysses observations of the radial magnetic field, *Geophysical research letters*, 22(23), 3317–3320, 1995.

- Smith, E. J., and A. Balogh, Open magnetic flux: Variation with latitude and solar cycle, in *AIP Conference Proceedings*, vol. 679, pp. 67–70, AIP, 2003.
- Smith, E. J., and A. Balogh, Decrease in heliospheric magnetic flux in this solar minimum: Recent ulysses magnetic field observations, *Geophysical Research Letters*, 35(22), 2008.
- Suess, S. T., L. J. Lanzerotti, and A. Balogh, *The Heliosphere Through the Solar Activity Cycle*, Springer Praxis Books, Springer, 2007.
- Von Steiger, R., N. Schwadron, L. Fisk, J. Geiss, G. Gloeckler, S. Hefti, B. Wilken, R. Wimmer-Schweingruber, and T. Zurbuchen, Composition of quasi-stationary solar wind flows from ulysses/solar wind ion composition spectrometer, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 105(A12), 27,217–27,238, 2000.