

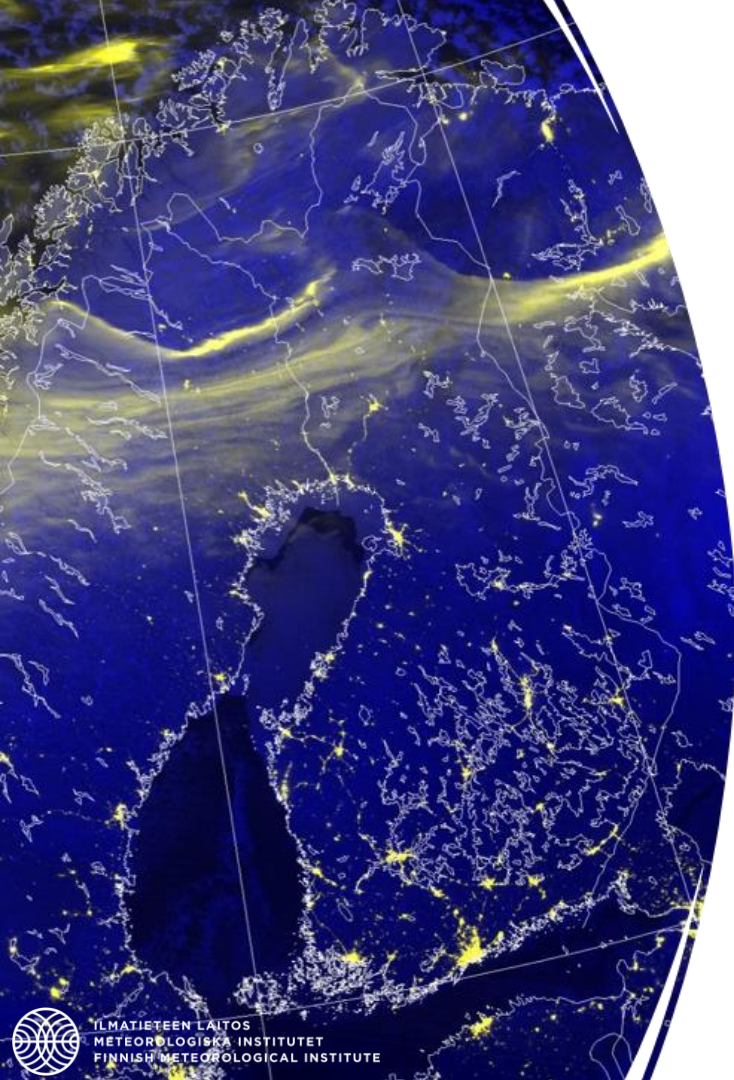


Ilmakehään saapuvien kappaleiden ratalaskennan ongelmat

Harri Haukka
Kehityspäällikkö
Avaruustutkimus ja havaintoteknologiat



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE



Avaruustilannetietoisuus



Avaruustilannetietoisuus -osatekijät

- **Avaruustilannetietoisuus (SSA – Space Situational Awareness):** pyrkimys muodostaa mahdollisimman reaaliaikainen kokonaiskuva avaruuden käytön tilanteesta. Kehittämällä kyvykkyyksiä avaruudessa sijaitsevien esineiden ja kappaleiden tarkkailuun sekä ennustamalla avaruussään ilmiöitä voidaan pienentää avaruuden käytöstä sekä ihmisille että omaisuudelle aiheutuvia vahinkoriskejä
- **SSA = SWE + SST + NEO**
- **SWE (Avaruussää):**Seurataan Auringon ja Maan yläilmakehän vuorovaikusta. Aurinkomyrskyjen vuoksi yhteiskunnan tärkeät palvelut saattavat häiriintyä tai jopa vaurioitua mm. navigaatio ja paikkatieto, HF-kommunikaatio, lentoliikenne (säteilytasotlentokorkeuksissa), sähköverkot (suuret GIC-loisvirrat). Erittäin suuri vaikutus mahdollinen (Carrington).
- **SST (Space Surveillance and Tracking):**Lähiavaruuden kappaleita, mm. satelliitit ja avaruusromu, seurataan ja arvioidaan mahdollisia törmäystodennäköisyyksiä ja niiden seurauksia (STM – Satellite Traffic Management). Avaruusromun iskeytyessä Maahan, maahan osumisen paikkaa ja ajankohtaa arvioidaan reaaliajassa.
- **NEO (Near Earth Objects):**Aurinkoa kiertävän komeetan, asteroidin tai muun kappaleen rata saattaa muuttua (mm. gravitaatiohäiriö), mikä voi aiheuttaa eksistentiaalisen uhan Maapallolle.

1957



0 kohdetta

1990



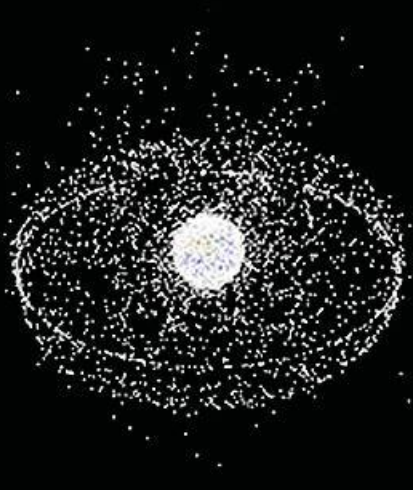
Noin 6 000
seurattavissa olevaa
kohdetta

2020

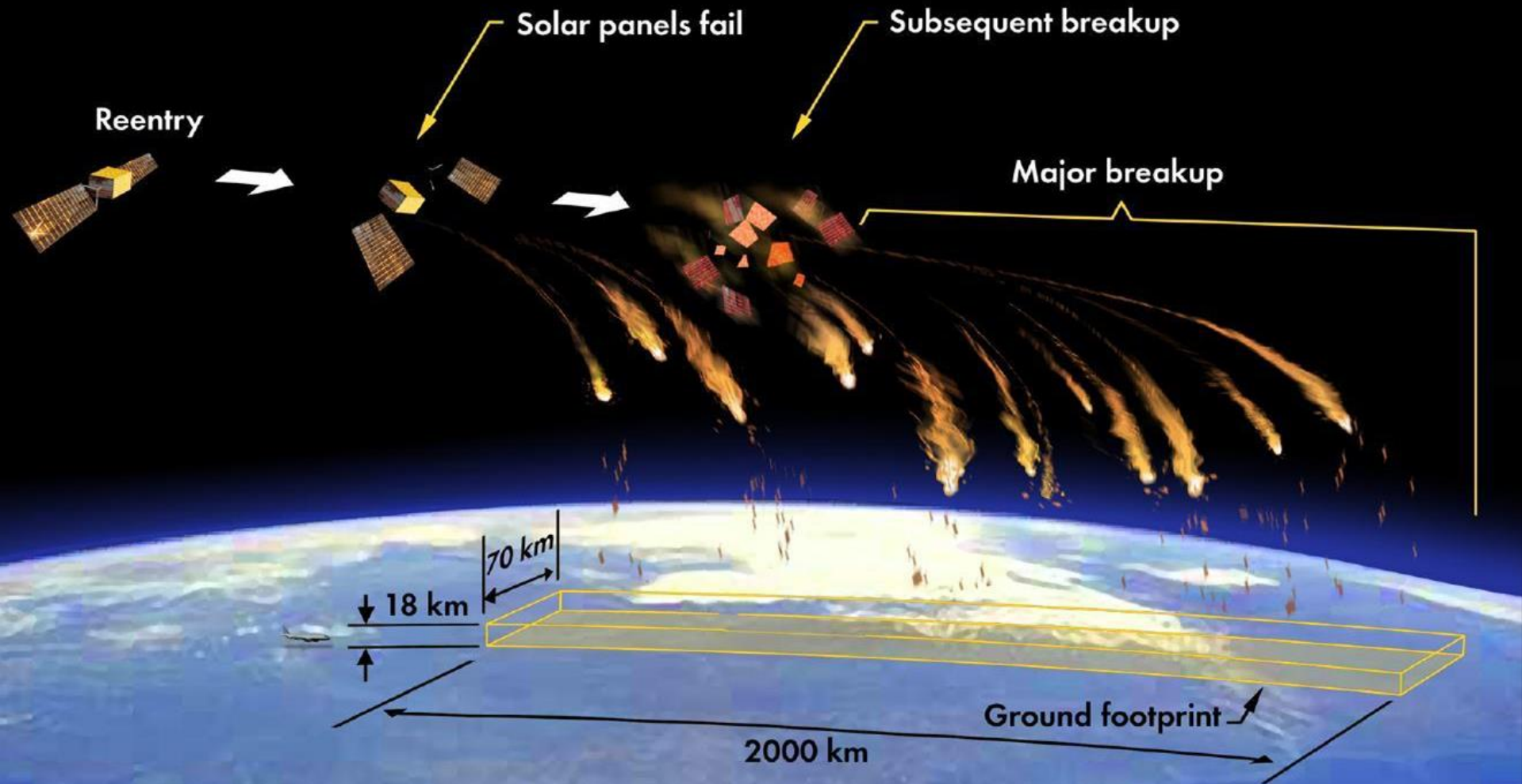


Yli 22 000
seurattavissa olevaa
kohdetta

2023



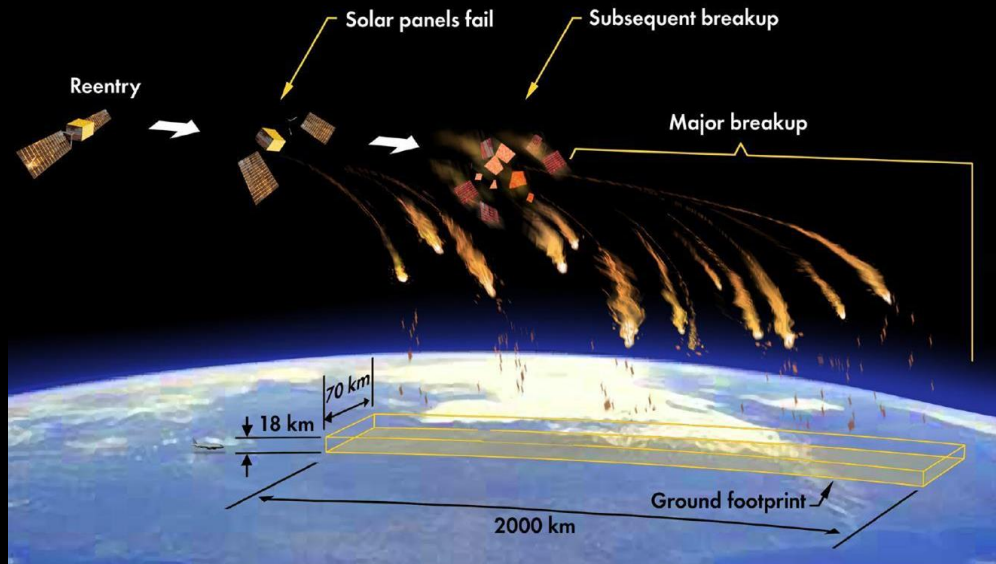
Noin 32 300
seurattavissa olevaa
kohdetta



Rataennusteiden haasteet

Miksi ennustaminen on niin hankalaa?

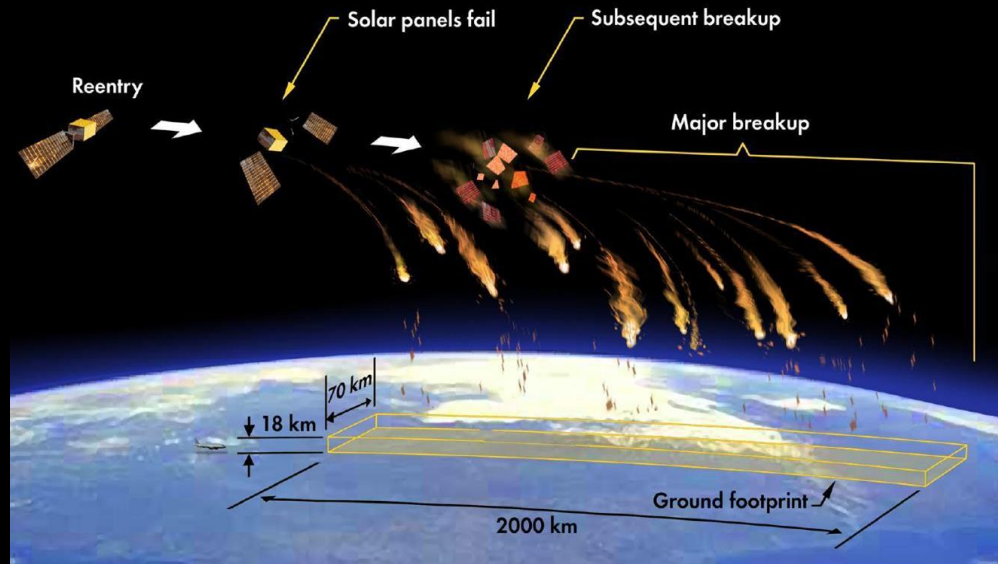
- Maan ilmakehä ei ole todellisuudessa "pyöreä"
- Satelliitit eivät ole "optimaalisia"
- Satelliitin massa ei ole tarkasti tiedossa
- Satelliitin nopeus on suuri ja vaikeasti seurattavissa
- Ilmakehään saapumiskulma vaikuttaa merkittävästi alaspudotukseen



Rataennusteiden haasteet

Miksi ennustaminen on niin hankalaa?

- Maan ilmakehä ei ole todellisuudessa "pyöreä"
- Satelliitit eivät ole "optimaalisia"
- Satelliitin massa ei ole tarkasti tiedossa
- Satelliitin nopeus on suuri ja vaikeasti seurattavissa
- Ilmakehään saapumiskulma vaikuttaa merkittävästi alas tulemiseen

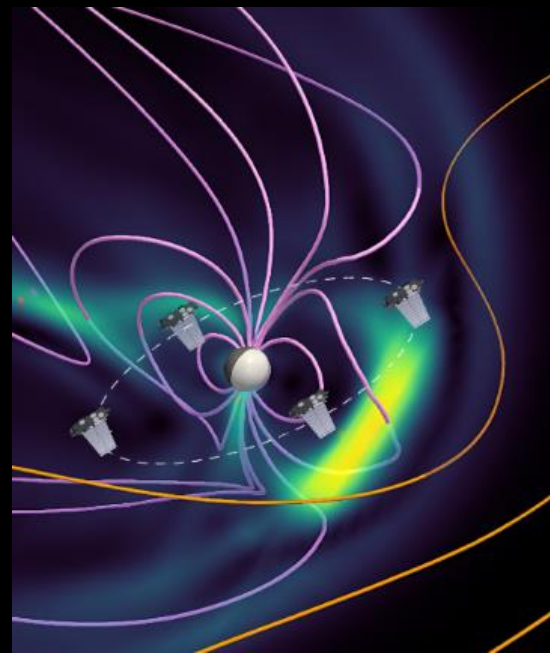
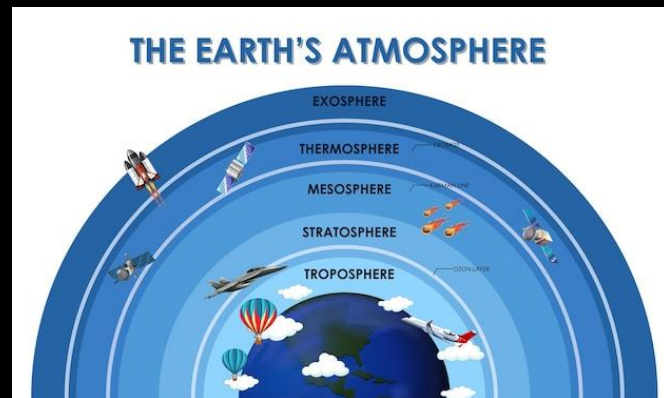


Ilmakehän epäsäännöllisyys

- Mallit olettavat usein, että ilmakehä on suunnilleen pyöreä
- Tämä toimii useimmissa tapauksissa, mutta ei satelliittien alasajon ennustamisessa
- Avaruussää aiheuttaa merkittäviä muutoksia yläilmakehän koostumuksessa ja korkeudessa
- Nykyiset ilmakehämallit eivät huomioi kaikkia piirteitä
- Lisäksi avaruussään ennustaminen ja sen vaikutusten mallintaminen on vaikeaa

Esimerkki:

Helmikuussa 2022 laukaistiin 49 Starlink-satelliittia, joista 38 putosi lievän avaruussääilmiön seurauksena

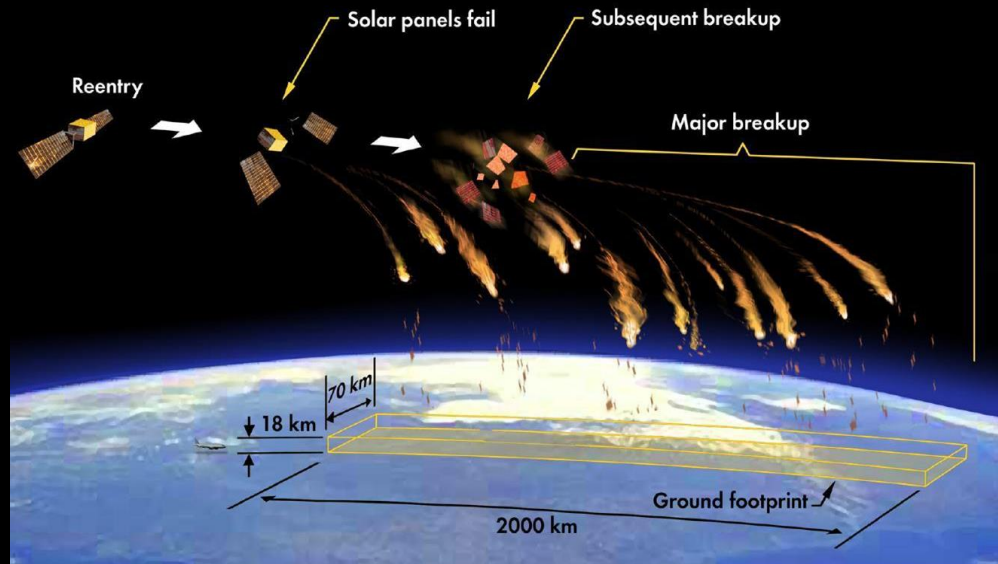




Rataennusteiden haasteet

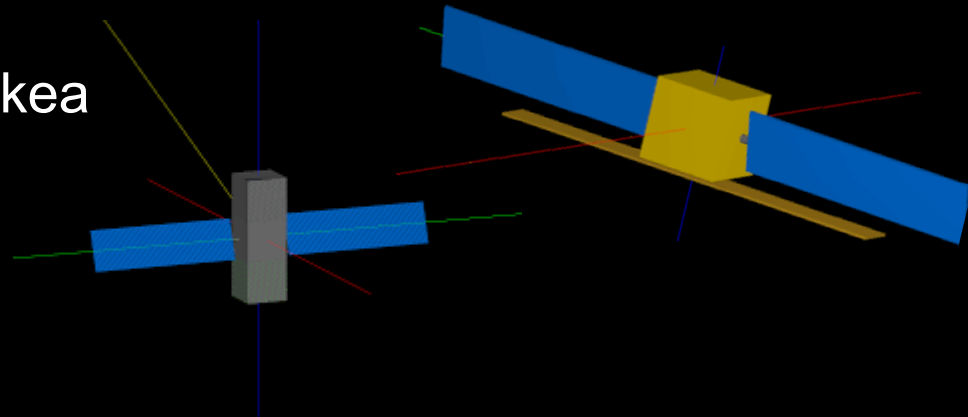
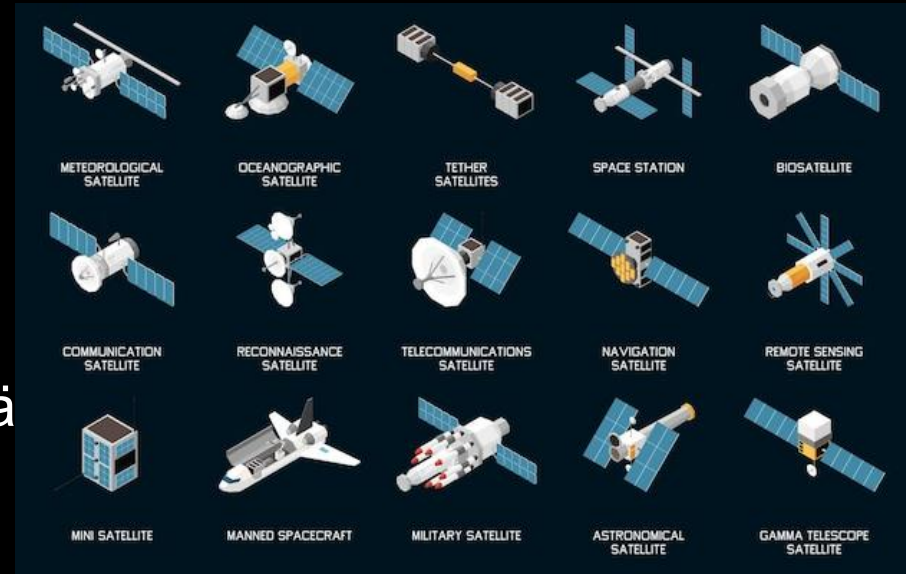
Miksi ennustaminen on niin hankalaa?

- Maan ilmakehä ei ole todellisuudessa "pyöreä"
- **Satelliitit eivät ole "optimaalisia"**
- **Satelliitin massa ei ole tarkasti tiedossa**
- Satelliitin nopeus on suuri ja vaikeasti seurattavissa
- Ilmakehään saapumiskulma vaikuttaa merkittävästi alaspudotukseen



Satelliittien muoto ja massa

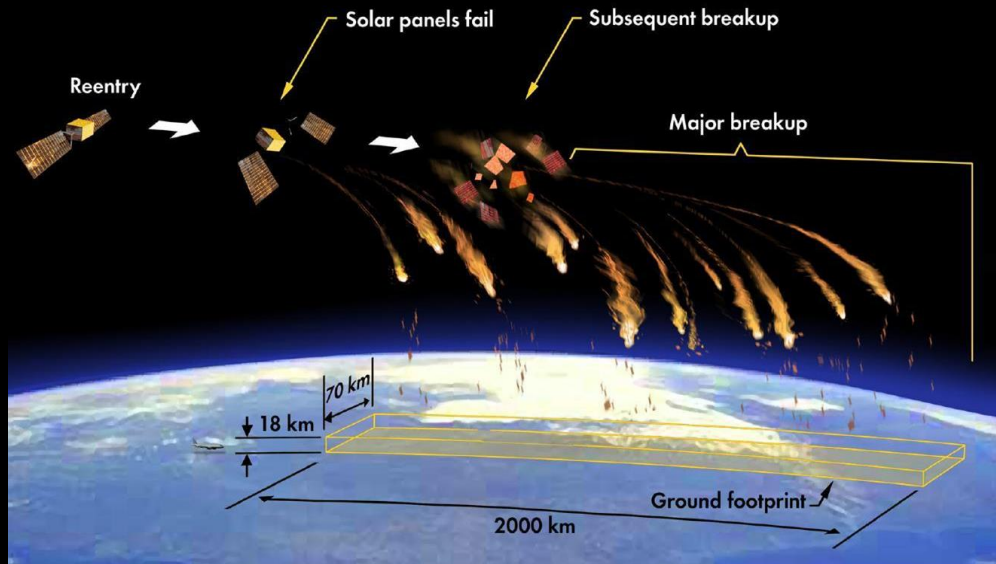
- Alastulemismallit yksinkertaistavat satelliitin muotoa ja pinta-alaa
- Esim. ESA:n DRAMA-työkalu käyttä hyvin yksinkertaistettuja malleja
- Todellisuudessa satelliitit ovat monimutkaisen muotoisia
- Satelliitin tarkkaa massaa on vaikea arvioida
- Useimmat satelliitit hajoavat ilmakehään tullessaan



Rataennusteiden haasteet

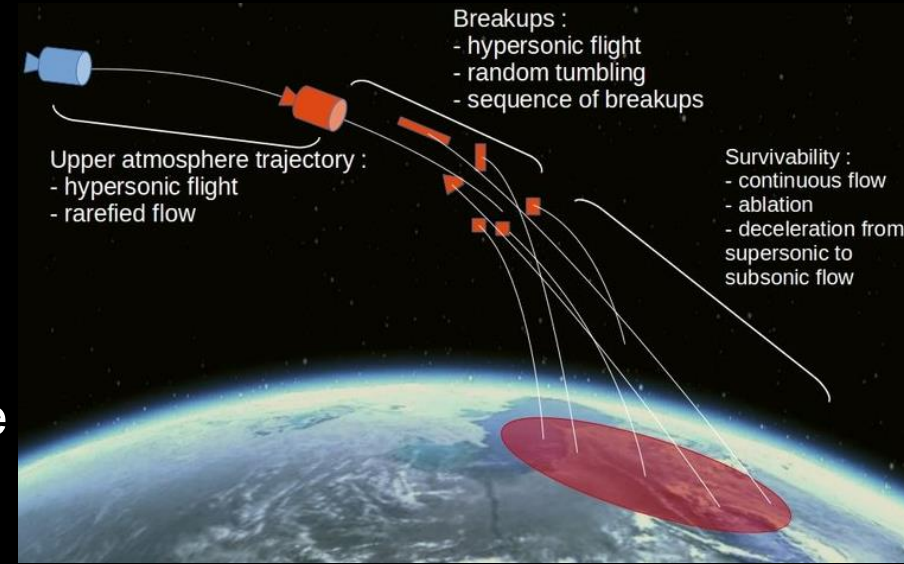
Miksi ennustaminen on niin hankalaa?

- Maan ilmakehä ei ole todellisuudessa "pyöreä"
- Satelliitit eivät ole "optimaalisia"
- Satelliitin massa ei ole tarkasti tiedossa
- **Satelliitin nopeus on suuri ja vaikeasti seurattavissa**
- **Ilmakehään saapumiskulma vaikuttaa merkittävästi alas tulemiseen**



Nopeus ja asento

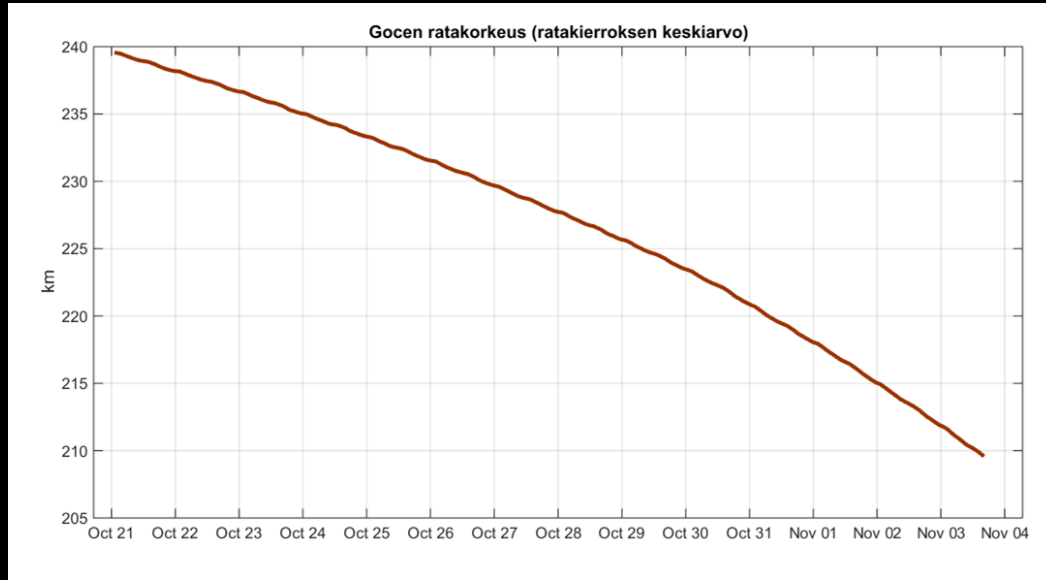
- Kaikilla alas tulevilla satelliiteilla on suuri nopeus
- Ne voivat pyöriä ja niiden asento ei ole tarkasti tiedossa
- Ilmakehään saapumiskulma ja -aika eivät ole tarkasti tiedossa
- Ei ole riittävästi tutkia seuraamassa satelliitteja
- Pitkiä havaintokatkoksia viimeisten 48 tunnin aikana ennen alasajoa



Seuraus:

- Ennusteiden epävarmuus aiheuttaa suuren laskeutumisalueen

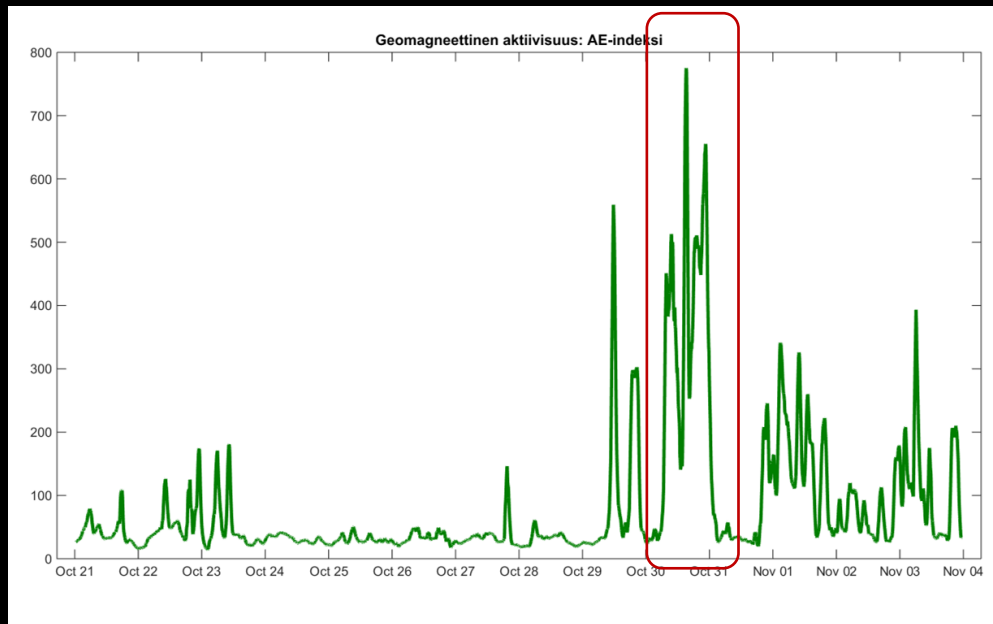
Goce -satelliitin viimeiset viikot



- ESan GOCE -satelliitin polttoaine loppui 21. lokakuuta 2013. Sen jälkeen ilmakehän vastus alkoi laskea kiertorataa. Lopulta GOCE tippui valtameren lähellä Falklandin saaria.
- Tapahtuman aikana Geodeettinen laitos ja Ilmatieteen laitos seurasivat yhdessä GOCE:n kiertoradan loppuvaiheita. Ilmatieteen laitos analysoi avaruussään vaikutusta ennustaakseen todellisen paluupisteen ja -ajan.

GOCE-avaruussää: enimmäkseen tyyntä

- Kahden viimeisimmän GOCE-viikon aikana avaruussää enimmäkseen tyyntä
- 30.10. suurin häiriö
 - $\text{Max(AE)} \sim 800$
 - $\text{Max(Kp)} = 4$
- AE-indeksi (Auroral Electrojet) kuvaa ionosfäärin virtojen voimakkuutta.
 - Virta lämmittää ionosfääriä
 - Ionosfääri laajenee
 - Ilmakehän yläosa nouseellman tiheys kasvaa GOCE-radalla

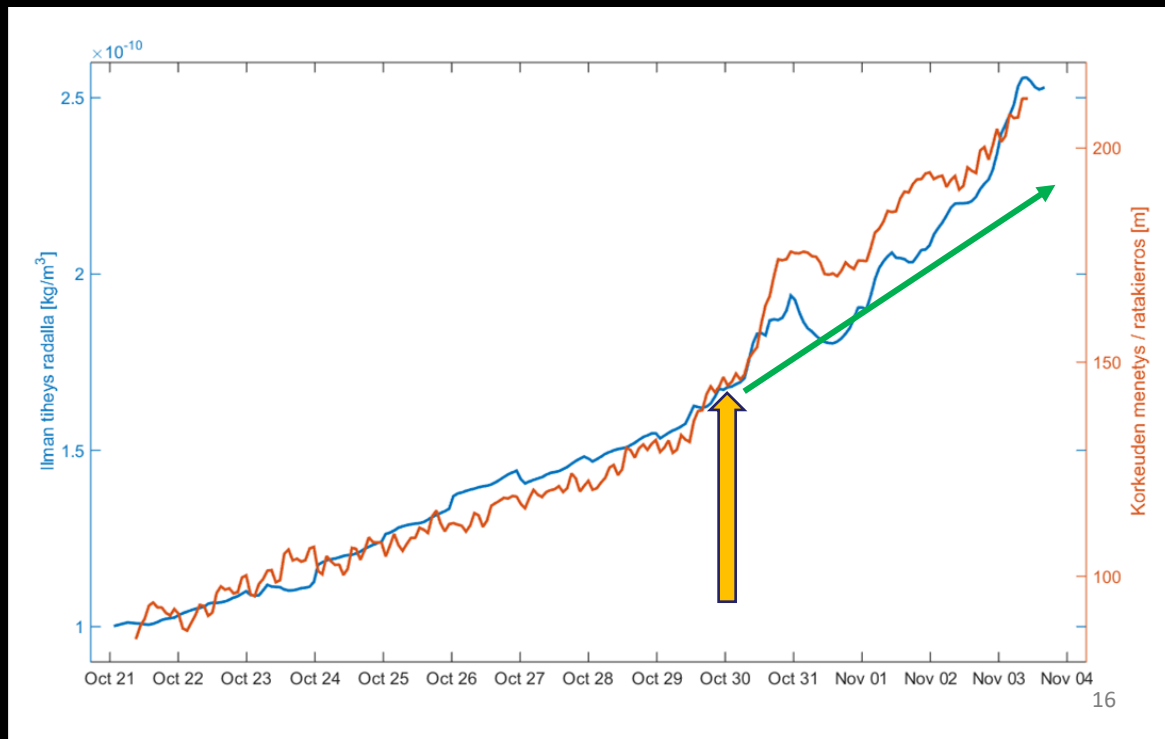


Kp 4 -luokan avaruussäähäiriö.

Kp-indeksin arvo 4 tapahtuu noin 100 kertaa vuodessa. Se voi tuottaa heikkoja revontulia, jotka ulottuvat 60:lle leveysasteelle. Tämä on siis melko leuto ja tavallinen avaruussäätapahtuma.

Ilmatieteen laitoksen malliennuste avaruussään vaikutuksesta GOCE:n kiertoradalle

- Sininen käyrä: SWE-vaikutteinen ilman tiheys GOCE-radalla (keskiarvo yhdellä kiertoradalla)
- Oranssi käyrä: GOCE-radan korkeushäviö per kiertorata (8 kiertoradan liikkuva keskiarvo)
- 31. lokakuuta: Avaruussää äkillisesti (ja tilapäisesti) nopeuttaa GOCE:n kiertoradan korkeuden menetystä



Tulevaisuuden suunnitelmat ja tutkimus

- FSSAC aikoo **kehittää menetelmiä, joilla arvioidaan Maan ilmakehään saapuvien avaruusesineiden vaikutusalueita ja -vaikutuksia**. Tarkat rataparametrit ovat olennaisia törmäyspisteiden määrittämisessä, mutta julkisesti saatavilla olevat tiedot, kuten TLE:t (Two-Line Elements), joita käsitellään SGP4/SDP4-mallilla, eivät ole riittävän tarkkoja. Näitä tietoja päivitetään harvoin, ja ne eivät sisällä esimerkiksi sotilassatelliitteja.
- Tämän ratkaisemiseksi **FSSAC yhdistää lisätietoja, kuten kovarianssimatriiseja, SGP4-XP-, CPF- ja Sp3c-tuotteita sekä satelliittilaseretäisyyksmittauksia (SLR). Metsähovin SLR-teleskooppia päivitetään uudella laserlähettimellä, jotta voidaan laajentaa seurattavien avaruusesineiden (RSO) kattavuutta ja parantaa ratamallien tarkkuutta**. Luotettavat ilmakehämallit ovat myös välttämättömiä, mutta nykyiset vaihtoehdot, kuten NRLMSISE-00, ovat vanhentuneita ja voivat aiheuttaa 20–30 % virheitä voimakkaan aurinkoaktiivisuuden aikana.
- **FSSAC kehittää uusia ilmakehämalleja ja ratapropagointityökaluja tukeakseen tarkkoja uudelleentuloennusteita**. Näiden toimien tavoitteena on tarjota ajoissa varoituksia korkean riskin avaruusesineistä, etusijalla kansalaisten turvallisuus.

Kiitokset

