

Rytmikkäät revontulet

■ Lokakuussa kannattaa suunnata katse yötaivaalle. Hyvällä onnella voi päästä ihailemaan Suomessa hiljattain löydettyä harvinaista luonnonilmiötä: dyynirevontulia.

KALEVI RANTANEN

Suomalaiset revontulibongarit alkoivat muutama vuosi sitten tehdä havaintoja valoilmioista, joka ei mahtunut mihinkään tunnettuun revontulikategoriaan.

Erikoiset taivaanvalot muistuttivat muodoltaan hiekkarannan peräkkäisiä ”aaltoja”, joten he antoivat ilmiölle nimen *dyynirevontulet*.

Harrastajien laajasti käyttämien digikameroiden ansiosta tuntemattomista revontulista alkoi vähitellen kertyä kuva-aineistoa myös tieteentekijöiden käyttöön.

Lopulta Helsingin yliopiston, Oulun yliopiston ja Ilmatieteen laitoksen

tutkijat organisoivat bongarien kanssa yhteisen havaintokampanjan mittauksiin.

Kun harrastajat lokakuun 7. päivänä vuonna 2018 taas äkkäsivät taivaalta rytmikkään dyynimuodostelman, he kuvasivat sen yhtä aikaa Laitilassa ja Ruovedellä ja hetken päästä vielä Hankasalmella ja Siilinjärvellä.

Kuvissa näkyvät samat leiskuvat tulet ja tähtikuviot niiden taustalla. Loppu oli trigonometriaa.

Tähtiä viitepisteinään käyttäneet tutkijat laskivat, että dyynit loistavat mesosfäärin yläosassa noin sadan kilo-

metrin korkeudella maasta. Lisäksi he selvittivät, että dyynien aallonpituus on suunnilleen 45 kilometriä.

Satelliittinavigoinnin radiosignaalien ja magneettikentän mittausten avulla määritettiin dyynien elektronitiheys.

Happiatomien aalto ja elektronipommitus

Dyynirevontulet muodostavat säännöllisen, monokromaattisen aallon, joka liikkuu taivaalla vaakasuoraan. Suomalaistutkijoiden mukaan kysees-



sä on niin sanottu *bore* eli happiatomien vuoksiaalto.

Bore-termille ei ole vakiintunutta suomenkielistä käännöstä, mutta siitä on käytetty myös nimeä vuorovesiporras, joka kuvaa ilmakehän aaltoilun alkuperäistä maanpäällistä vastinetta.

Siellä täällä maapallolla voimakas merellinen vuoksiaalto synnyttää kapenevassa joessa tai lahdessa nousevan aaltosarjan. Amazonin suulla *bore*-aaltojen korkeus voi olla neljä metriä.

Ilmakehässä *bore*-aaltoja syntyy, kun kylmät ja lämpimät ilmassat tör-

>>>

Dyynit ovat noin sadan kilometrin korkeudessa hyökyviä happiatomien aaltoja, jotka aurinkotuuli virittää revontuliksi. Viher-tävien dyynien muodostama toistuva kuvio on samanlainen kuin hiekkarannoilla.

määvät toisiinsa. Pystysuoraan nouseva aalto voi kääntyä vaakasuoraan sadan kilometrin korkeudessa, jossa mesopauhin alapuolelle joskus muodostuu inversiokerros.

Täälläkin vaikuttavat lämpötilan erot. Inversiokerroksessa lämpötila alkaa taas nousta. Inversiokerroksen ja mesopauhin välissä on ympäristöä lämpimämpi kanava, jota myöten boreaalto kulkee.

Jotta myös näkisimme aallon, tarvitaan vielä elektroneja. Tieteen slangissa puhutaan elektronipresipitaatiosta, joka tarkoittaa ilmakehään lankeavaa elektronisadetta tai elektronipommitusta.

Bore-aallot ja elektronipommitukset esiintyvät yhtä aikaa melko harvoin, joten dyynejä näkyy harvemmin kuin tavallisia revontulia. Osittain siksi ne löytyivät niin myöhään.

Paras mahdollisuus taivaallisen dyyniaallon bongaamiseen on lokakuussa.

Dyynien hankala kotikenttä

Suomalaistutkijoiden ja kansalaistieteilijöiden ryhmä julkaisi kuvauksen dyynirevontulista Amerikan geofysikaalisen unionin AGU Advances -lehdessä

ILMAKEHÄN KERROKSET

- Eksosfääri: 500–1 000 km maanpinnasta
- Termosfääri: 100–500 km
– Ionosfääri: 100–400 km
- Mesopausi: 100 km
- Mesosfääri: 50–100 km
- Stratosfääri: 10–50 km
- Troposfääri: 0–10 km

Lähde: Ilmatieteen laitos

tämän vuoden tammikuussa.

Harvinaislaatuinen löytö kaipaavie lä vahvistusta, ja sitä on myös tulossa.

”Nyt kun asia on ollut laajasti esillä mediassa, olen saanut uusia havaintoja aina Uutta-Seelantia myöten. Jatkoartikkeleita siis seuraa”, kertoo tutkija **Minna Palmroth**.

Helsingin yliopistossa avaruustieteen professorina toimiva Palmroth on tammikuun tutkimusartikkelin ensimmäinen kirjoittaja. Hänen tiiminsä on rakentanut maailman tarkimman aurinkotuulen mallin, Vlasiatorin.

Yhdessä revontulikuvaaja **Jouni Jusilan** ja tietokirjailija **Markus Hotakai-**

sen kanssa Palmroth on myös kirjoittanut kirjan *Revontulibongarin opas*, joka ilmestyi vuonna 2018.

Palmroth sai ensimmäiset harrastajien raportit taivaallisista dyyneistä kirjaa työstäessään, mutta siihen ne eivät vielä ehtineet mukaan.

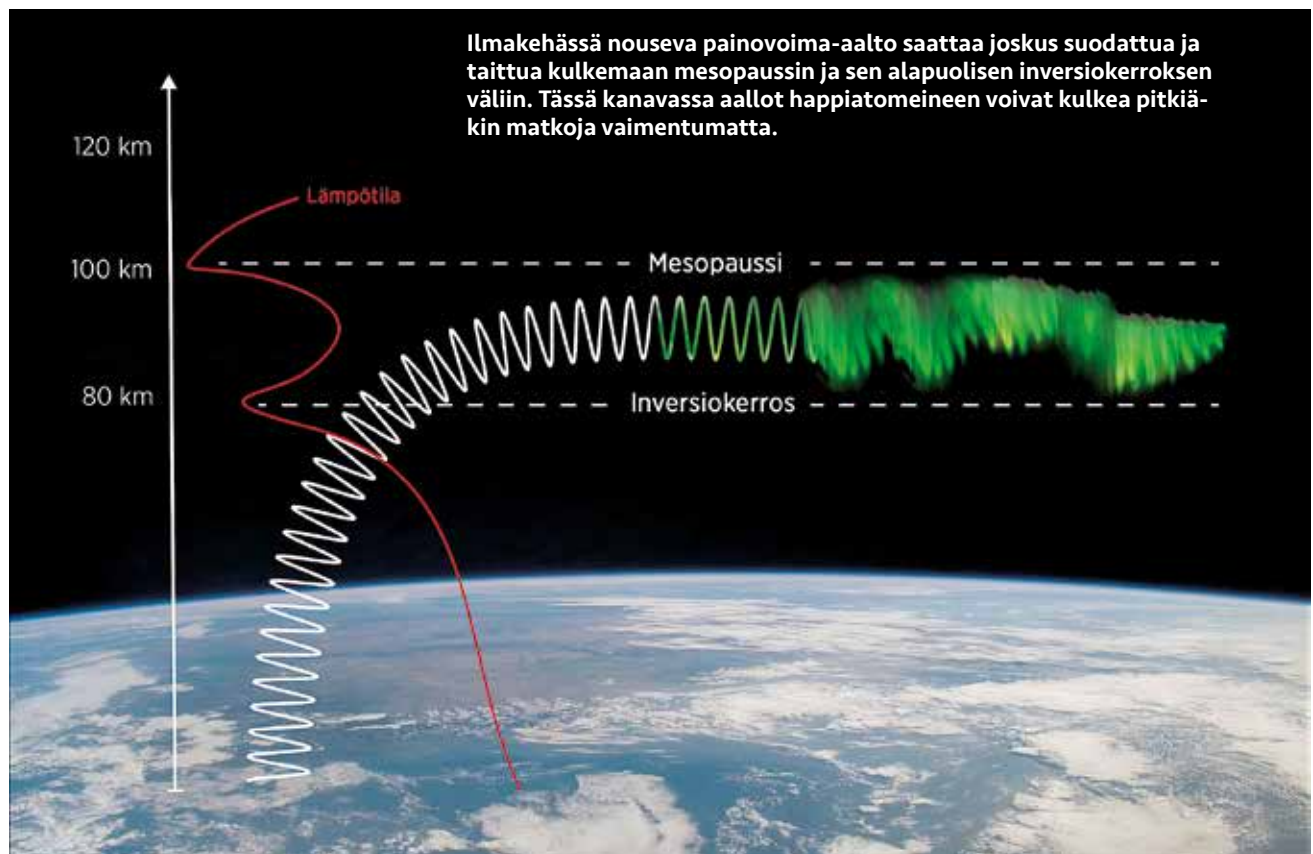
Nykyisin tiedetään, että leveysasteet, joilla dyynirevontulia esiintyy, ovat tavallisten revontulien valtakuntaa etelämpänä. Alueella on vain vähän tutkia ja kuvauslaitteita, joilla päästään tarkkailemaan revontulia maasta käsin.

Lisäksi dyynien koti sijoittuu 80–120 kilometrin korkeuteen eli tilaan, jota puolileikkisästi kutsutaan ”ignorosfääriksi”, niin huonosti stratosfääriin ja termosfääriin välinen alue tunnetaan.

Alempaa stratosfääriä on mahdollista tutkia sääpaloilla, ylempää termosfääriä satelliiteilla.

Ignorosfääri on kuitenkin liian kaukana sondeille ja muille laitteille, joilla ilmakehää tavallisesti tutkitaan. Satelliiteille se on taas liian matalalla. Ilma on siellä yhä niin tiheää, että satelliitti joutuisi kuluttamaan energiaa pysäköseen oikealla korkeudella.

Tutkimuskohteena ignorosfääri on muutenkin sotkuinen. Neutraali ilmakehä ja sähköisesti varautunut ionosfääri kohtaavat, ja auringon läm-



Dyynit esiintyvät samanaikaisesti ja samassa paikassa, jossa avaruudesta tullut sähkömagneettinen energia siirtyy ionosfääriin. Energia voisi siten olla yhteydessä mesosfäärin aaltokanavan syntymiseen.

”Fysiikan kannalta löydös olisi järeisyttävä. Se olisi uusi vuorovaikutusmekanismi ionosfäärin ja ilmakehän välillä”, Minna Palmroth sanoo.

tysvaikutus vaihtelee vuorokauden ja vuodenajan mukaan. Aurinkotuuli ja magneettikentän vaihtelut tuovat omat lisämausteensa.

Siirtymien sävyt ovat vihreitä

Myös ionosfäärin kemialliset ilmiöt voivat olla sotkuisia. Lähtöoletus kuitenkin on, että uusissa revontulissa esiintyy samaa kemialla kuin jo tunnetuissa.

Dyynirevontulen kemia on periaatteessa sama kuin vihreän revontulivallan (557,7 nanometriä), Minna Palmroth vahvistaa. >>>

Helsingin yliopisto



Moni kysymys yhä avoin

Tähtitieteellinen yhdistys Ursa julkaisi vuonna 1998 Oulun yliopiston dosentin **Kari Kailan** teoksen *Revontulet*. Kirjoittaja luetteli lopuksi joukon avoimia tutkimuskysymyksiä. Professori **Pekka Verronen** kertoo, millaisia vastauksia on 22 vuodessa löydetty.

1. Kysymys vuonna 1998: Mitkä ovat ionosfäärissä tapahtuvien kemiallisten reaktioiden nopeusvakioiden lukuarvot? Useat tunnetaan, mutta ei kaikkia.

Pekka Verrosen vastaus 2020: On totta, että ionikemiallisten reaktioiden nopeusvakiot tunnetaan huonommin kuin vaikkapa otsonikemian. Siinä suhteessa 20 vuodessa ei ole tapahtunut suurta edistystä, ja laboratorio-kokeet ovat olleet harvassa. Sanoisin silti, että tärkeimpien reaktioiden vakiot tunnetaan suhteellisen hyvin, sillä esimerkiksi ionosfäärin mallinnus vastaa aika hyvin mittauksia.

2. Kysymys 1998: Ovatko reaktiot riippuvaisia lämpötilasta?

Vastaus 2020: Reaktiot ovat varmasti lämpötilariippuvaisia, toki jotkut voivat olla sitä heikosti. Lämpötilariippuvuus on ehkä suurin epävarmuustekijä. Kaikkia nopeusvakioita ei ole mitattu kattavasti eri lämpötiloilla.

3. Kysymys 1998: Kuinka ihmisen toiminta vaikuttaa reaktioihin?

Vastaus 2020: Tässä ajatellaan varmaan yläilmakehän kylmenemistä kasvihuonekaasujen määrän kasvaessa. Tällä on merkitystä nopeusvakioiden lämpötilariippuvuuden takia. Tietääkseni tätä ei ole juuri tutkittu.

4. Kysymys 1998: Miten voimme mitata luotettavasti happiatomien pitoisuuden ionosfäärissä?

Vastaus 2020: Happiatomien määrä on yhä mittaamatta pidemmällä ajanjaksolla. Tieto olisi tärkeä paitsi revontulten ja ionireaktioiden myös otsonikemian kannalta. Lisäksi happiatomit vaikuttavat termosfäärin lämpötasapainoon. Suora mittaaminen on vaikeaa, koska happiatomeja on niin vähän. Epäsuorat tavat vaativat mallinnusta, jossa on nykyisellään suuria epävarmuuksia.

5. Kysymys 1998: Vaikuttavatko kasvihuonekaasut revontuliemissioihin tulevaisuudessa? Muuttuuko siis revontulien väri ihmisen toimien seurauksena ajan kuluessa?

Vastaus 2020: Varmaankin kysymyksessä revontulten värin muuttumisesta on yhteys happiatomin rooliin, jota kasvihuonekaasut voisivat muuttaa. Suoralta kädeltä en osaa sanoa enempää.

”Me fyysikot tosin kuittaamme kemian siten, että atomi virittyy ja viritystila laukeaa, ja siitä tulee valoa.”

Elektronit antavat happiatomeille energiasysäyksiä eli virittävät niitä. Virittynyt atomi pyrkii palaamaan viritystilasta perustilaan.

Viritystä voi verrata pallon sysäämiseen ylös kaltevaa tasoa. Noustuaan se vierii taas alas ja kuluttaa saamansa energiasysäyksen kitkahäviöihin.

Myös happiatomi kuluttaa nopeasti saamansa lisäenergian. Tiheässä ilmassa lisäenergia häviää törmäyksiin toisten happiatomien kanssa.

Harvassa ilmassa 80 kilometrin korkeudesta ylöspäin törmäyksiä on vähän, mutta energian on mentävä jonnekin. Viritysentergiaa vapautuu valonvälähdyksinä. Valon väri riippuu atomin ominaisuuksista.

Happiatomilla on useita energiatasoja ja mahdollisia siirtymiä tasolta toiselle. Siirtymissä syntyy punaisen ja erityisesti vihreän eri sävyjä.

Revontulien fysiikkaa on tutkittu tieteellisesti 1700-luvulta lähtien. Tieto niiden kemiallisista tapahtumista tarkentui viime vuosisadalla, etenkin

VOIMAA KANSALAISTIETEESTÄ

Artikkeli, jossa ensimmäisen kerran kerrottiin tiedeyhteisölle dyynirevontulista, on epätavallisen kirjoittajakunnan työn tulos. Mukana on myös kansalaistutkija **Matti Helin**.

Tutkijat ovat valokuvanneet revontulia 1890-luvulta alkaen. Saksalainen fyysikko **Martin Brendel** otti ensimmäisen käytökelpoisen kuvan revontulista Pohjois-Norjassa.

Tutkimuskäyttöön sopivat kamerrat olivat pitkään liian kalliita harrastajille. Digitekniikka on muuttanut tilanteen. Kuluttajalaitteilla saa myös tieteellisiin tarkoituksiin riittävän tarkkoja kuvia ja videoita. Siksi ammattitutkijoiden kumppaneiksi on tullut paljon kansalaistieteilijöitä.

1970-luvulla.

Havainnot otsonikerrosta hävittävästä reaktioista stratosfäärissä lisäsivät

kiinnostusta myös siihen, mitä tapahtuu ylempänä termosfäärissä, revontulien kotialueella.

Pieni vaikutus otsonikerrokseen

Oulun yliopiston ja Ilmatieteen laitoksen professori **Pekka Verro**nen on tutkinut revontulia myös kemian näkökulmasta. Hän valottaa ensin revontulien kemiallisia ilmiöitä.

”Kun elektronit ionisoivat ilmakehän molekyyleja, pääasiassa typpi- ja happimolekyyleja, syntyy ionikemiallisissa reaktioissa muun muassa vedyn ja typen oksideja, jotka toimivat katalyytteina otsonia tuhoavissa reaktioissa.”

Revontulien otsonivaikutus näkyy hänen mukaansa noin 85 kilometrin korkeudelta aina ylästratosfääriin eli 30–50 kilometrin korkeuteen saakka.

”Polaaritalven aikaan typen oksidit ovat kemiallisesti pitkäikäisiä ja kulkeutuvat sinne ilmakehän kiertoliikkeen mukana.”

Kulkeutuminen kestää viikkoja, jopa kuukausia.

”Varsinaiseen otsonikerrokseen, joka on hieman alempana, vaikutus on kuitenkin vain prosenttiluokkaa”, Verronen kertoo.

Revontulien korkeudella ilmakehässä on lähes kaikkia samoja molekyyleja kuin alempanakin, suurin osa tietysti typpeä ja happea.

Ilmakehämallinnuksessa otetaan silti yleensä huomioon kymmenet eri kaasut, vaikka niiden pitoisuus onkin pieni. Kaasuilla on kuitenkin iso merkitys auringon säteilyn absorptiossa ja ilmakehän lämpötasapainossa.

”Hyvä esimerkki tärkeästä pienkaasusta on otsoni, joka suojaa meitä ultraviolettisäteilyltä. Yleisesti tärkeimmät ovat hapen, hiilen, vedyn ja typen yhdisteet.”

”Se, millaisia ionikemiallisia reaktioita hapen, typen ja vedyn välillä esiintyy revontulien vaikutuksesta, riippuu muun muassa ilmakehän koostumuksesta sillä korkeudella, jolla elektronipresipitaatio luovuttaa energiansa törmäyksissä ilmamolekyylien kanssa.” □



Pekka Verroksen tutkimuskohteena ovat etenkin ilmakehän ylemmät kerrokset ja niihin liittyvien prosessien vaikutus ilmakehän alempiin kerroksiin.

Kirjoittaja on tiedetoimittaja.
kalevi.rantanen@kolumbus.fi