



2

KOSMINEN SÄTEILY

Eija Vartiainen

SISÄLLYSLUETTELO

2.1	Mitä kosminen säteily on	38
2.2	Maan magneettikenttä suojaa kosmiselta säteilyltä	41
2.3	Ilmakehässä syntyy sekundaarisäteilyä	43
2.4	Kosmogeeniset radionuklidit	45
2.5	Ihminen altistuu kosmiselle säteilylle	46
2.6	Lentohenkilöstön säteilyaltistus on määritettävä	53

Vuosina 1908–1912 havaittiin maanpinnalla suoritetuissa kokeissa, että jossakin – maankuoressa tai ilmakehässä – oli tuntematon säteilylähde, joka sai aikaan sähköisiä varauksia ionisaatiokammion kaasussa. Yhdes- sä kuutiosenttimetrissä kaasua havaittiin joka sekunti 10–20 uutta ioni- paria. Tuntemattoman säteilyn todettiin olevan luonteeltaan erittäin läpi- tunkevaa.

Vuonna 1912 itävaltalainen fyysikko Viktor F. Hess nousi ilmapallolla runsaan 5 000 metrin korkeuteen mukanaan ionisaatiokammioita. Hän havaitsi, että tuhannen metrin yläpuolella ionisaationopeus alkoi kasvaa, ja 5 000 metrin korkeudessa ionisaationopeus oli maanpinnan tasoon nähden lähes kolminkertainen.

Hess päätteli, että lennon tulos oli selitettävissä olettaen, että ylhäältä tulee ilmakehään erittäin läpিতunkevaa säteilyä. Saapuva säteily kykenee Hessin mukaan ionisoimaan merkittävässä määrin kaasua ilmakehän alemmissakin kerroksissa. Myöhemmin Hessille myönnettiin Nobelin palkinto kosmisen säteilyn löytämisestä.

2.1 | Mitä kosminen säteily on

Kosmiseksi eli avaruussäteilyksi kutsutaan auringosta ja muualta avaruu- desta tulevaa hiukkassäteilyä. Auringosta tulevilla hiukkasilla on harvoin niin suurta energiaa, että ne pääsevät maan ilmakehään asti. Sitä vastoin aurinkokuntamme ulkopuolelta tuleva galaktinen säteily voi päästä ilma- kehään ja synnyttää siinä sekundaarisäteilyä. Koska Maan oma sekä auringosta emittoituneiden hiukkasten aiheuttama magneettikenttä suojaavat Maata, vain suurienergisimmät hiukkaset pääsevät ilmakehään asti. Myös ilmakehä, joka vastaa noin kymmenen metrin paksuista vesikerrosta, suojaa osaltaan kosmiselta säteilyltä.

Ilmakehässä kosminen säteily kokee vuorovaikutuksia ilman atomiydin- ten kanssa. Kosmisten hiukkasten vuorovaikutukset ilmakehässä saavat aikaan suuren määrän uusia hiukkasia sekä radioaktiivisia aineita, joita kutsutaan kosmogeenisiksi radionuklideiksi. Näistä tunnetuimpia ovat ^3H ja ^{14}C .

Kosmisen säteilyn annosnopeuden suuruus ilmakehässä riippuu korkeu- den lisäksi geomagneettisesta leveys- ja pituusasteesta sekä auringon aktiivisuudesta, joka muuttuu 11 vuoden jaksoissa. Auringosta emittoitu- neiden hiukkasten magneettikenttä vaikuttaa annosnopeuteen siten, että

auringon ollessa aktiivisimmillaan ilmakehässä havaittava kosmisen säteilyn annosnopeus on pienimmillään.

Galaktinen kosminen säteily

Suurin osa ilmakehään saapuvasta kosmisesta säteilystä on peräisin omasta galaksistamme, Linnunradasta. Galaktinen säteily koostuu atomytimistä (98 prosenttia) ja elektroneista (2 prosenttia). Atomytimet ovat pääasiassa protoneja (88 prosenttia), alfahiukkasia (11 prosenttia) ja loput raskaampia ytimiä. Primaarihiukkasten energia vaihtelee 10^8 elektronivoltista (eV) jopa yli 10^{20} elektronivoltiin. Kaikkein suurienergiaisimmat, lähes valonnopeudella liikkuvat hiukkaset ovat kuitenkin harvinaisia, ja niitä saapuu ilmakehään yhden neliökilometrin alueelle vain muutama vuosisadassa.

Galaktisen hiukkassäteilyn alkuperää ei ole tarkkaan pystytty selvittämään. Oletetaan, että se olisi pääasiassa peräisin kaukaa oman aurinkokuntamme ulkopuolelta. Hiukkaset ovat todennäköisesti syntyneet supernovaräjähdyksissä. On myös mahdollista, että osa hiukkasista olisi peräisin läheisistä galakseista tai niissä olevista mustista aukoista, kvasaareista tai jopa alkuräjähdyksestä. Vaeltaessaan tähtien välisissä muuttuvissa magneettikentissä hiukkasten liike-energia voi kasvaa hyvin suureksi. Galaktisen säteilyn hiukkasia tulee lähes tasaisesti joka suunnasta (isotrooppisesti), ja niiden hiukkaskertymänopeus on ajan suhteen lähes vakio.

Galaktisen kosmisen säteilyn ikä eli viipymisaika Linnunradassa on noin 27 miljoonaa vuotta ja keskimääräinen hiukkaskertymänopeus (katso kirja 1, Säteily ja sen havaitseminen, luku 2.2) on $4\text{--}10\text{ cm}^2\text{s}^{-1}$. Kosmisen säteilyn ikä on arvioitu muun muassa galaktisessa säteilyssä havaittujen ^{10}Be -ytimien avulla.

Aurinkotuuli

Auringosta jatkuvasti virtaavaa plasmaa kutsutaan aurinkotuuleksi. Plasma koostuu elektroneista, protoneista, helium-atomin ytimistä ja vähäisessä määrin raskaampien alkuaineiden ytimistä. Protonien energia on keskimäärin 500 eV ja elektronien 0,25 eV. Ulospäin plasma on sähköisesti neutraalia, koska positiivisia ja negatiivisia varauksia on käytännössä yhtä paljon. Maan etäisyydellä aurinkotuulen nopeus on keskimäärin 450 kilometriä sekunnissa ja tiheys 5–10 hiukkasta kuutiosenttimetrissä.

Auringon pinnalla tapahtuvat purkaukset aiheuttavat aurinkotuulussa voimakkaita vaihteluita.

Aurinkotuuli kuljettaa mukanaan heikkoa magneettikenttää, jonka voimakkuus on muutamia kymmenestuhannesosia maapallon magneettikentän voimakkuudesta. Aurinkokuntaan tulevat galaktisen kosmisen säteilyn hiukkaset vuorovaikuttavat aurinkotuulen magneettikentän kanssa. Magneettikenttä hidastaa hiukkasia ja muuttaa niiden ratoja.

Auringon aktiivisuuden muutosten vuoksi aurinkotuulen hiukkastiheys, sen magneettikentän voimakkuus ja edelleen Maan ilmakehään tulevan galaktisen kosmisen säteilyn intensiteetti eli energiakertymänopeus (kirja 1 luku 2.2) vaihtelee. Aktiivisuuden ollessa suurimmillaan eli auringonpilk-kumaksimin aikana aurinkotuulen kantaman magneettikentän voimakkuus on suurimmillaan ja ilmakehään tulevan galaktisen säteilyn intensiteetti pienimmillään. Vastaavasti auringonpilkkuminimin aikana kosmisen säteilyn intensiteetti ilmakehässä on suurimmillaan. Auringon aktiivisuus ja Maahan tulevan galaktisen säteilyn intensiteetti vaihtelee noin 11 vuoden jaksoissa (kuva 2.1).

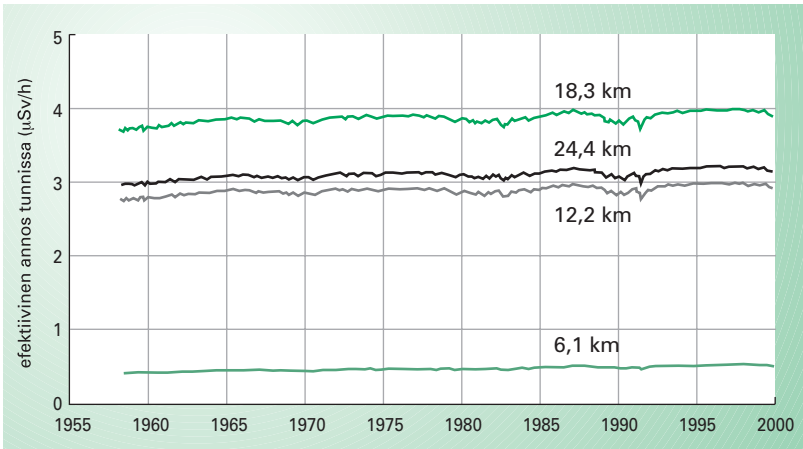
Auringonpurkaukset

Auringon pinnan lähellä tapahtuvat magneettiset häiriöt saavat aikaan aurinkotuulen lisäksi auringonpurkauksia. Purkauksissa syntyvät hiukkaset ovat pääasiassa protoneita, joiden energia on yleensä alle 100 MeV ja vain erittäin harvoin yli 10 000 MeV. Syntyvät hiukkaset voivat aiheuttaa merkittävän annosnopeuden kasvun korkealla ilmakehässä, mutta energialtaan vain kaikkein suurimmat Maan pinnalla.

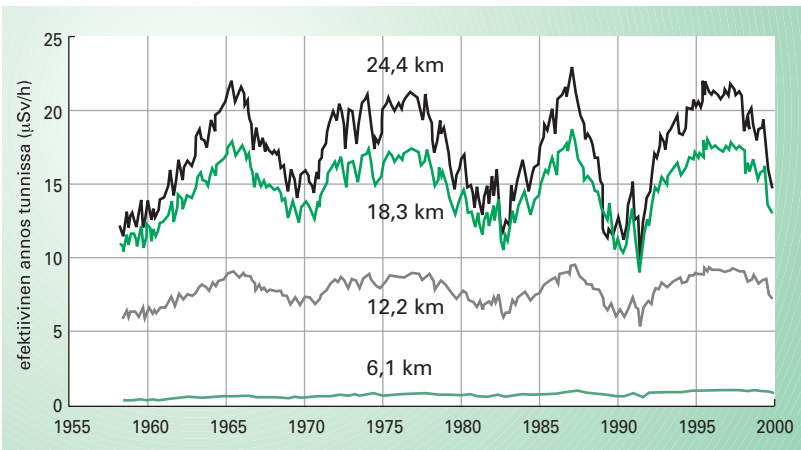
Auringonpurkaus voi häiritä Maan magneettikenttää aiheuttaen muutoksen ilmakehään tulevien galaktisten hiukkasten määrässä. Poikkeuksellisen suuret purkaukset kestävät tyypillisesti muutamia tunteja ja niiden voimakkuus vaihtelee suuresti. Pienemmät purkaukset, jotka tuottavat 1–100 MeV hiukkasia, voivat kestää noin viikon.

Auringonpurkauksia havaitaan keskimäärin kerran kuukaudessa. Voimakkaita purkauksia, joita kutsutaan myös roihupurkauksiksi, esiintyy keskimäärin vain kerran vuodessa. Yksi kaikkien aikojen suurimmista purkauksista havaittiin toukokuussa 1978. Tuolloin auringosta saapuvan kosmisen säteilyn intensiteetti avaruudessa oli kymmenien minuuttien ajan suurempi kuin galaktisen säteilyn intensiteetti.

Päiväntasaaja (0°, 20° E)



Pohjoinen napa-alue (80°N, 20° E)



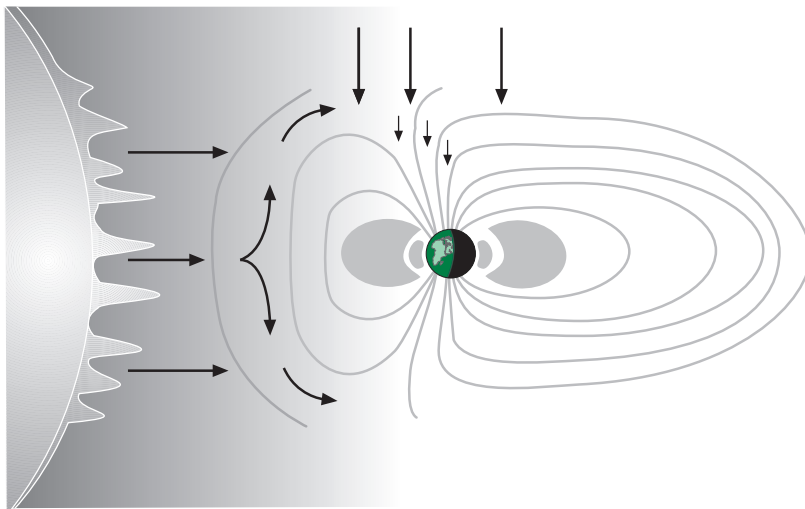
KUVA 2.1 Galaktisen säteilyn aiheuttama efektiivinen annos tunnissa eri korkeuksilla päiväntasaajalla (0°, 20°E) ja napa-alueella (80°N, 20°E) vuosina 1955–2000 (Friedberg et al. 2000)

2.2 | Maan magneettikenttä suojaa kosmiselta säteilyltä

Maapalloa ympäröi magneettikenttä, jonka ulkoreuna ulottuu noin 65 000 kilometrin etäisyydelle Maasta. Päästäkseen ilmakehään kosmisen säteilyn hiukkasten täytyy läpäistä magneettikenttä. Ilmakehään pääsy on sitä epätodennäköisempää, mitä lähempänä päiväntasaajan alueita hiukkanen saapuu ja mitä pienempi hiukkasen energia on.

Liikkuessaan magneettikentässä varauksiset hiukkaset säilyttävät energiansa, mutta muuttavat suuntaa. Lähellä päiväntasaajaa, missä magneettikentän voimaviivat ovat lähes yhdensuuntaisia Maan pinnan kanssa, hiukkaset saapuvat pääasiassa kohtisuoraan magneettikentän voimaviivihin nähden ja suuri osa hiukkasista heijastuu takaisin avaruuteen (kuva 2.2). Lähellä magneettisia napoja magneettiset voimaviivat kaartuvat kohti maanpintaa, ja magneettisia voimaviivoja seuraavat pienienergisemmät hiukkaset saavuttavat ainakin ilmakehän ylimmät kerrokset. Tästä johtuen hiukkaskertymänopeus kasvaa päiväntasaajalta aina 50. leveysasteelle asti. Koska pienienergisimmät hiukkaset kuitenkin absorboituvat ilmakehän ylimmissä kerroksissa 50. leveysasteen jälkeen, lähellä magneettisia napoja hiukkaskertymänopeus on lähes vakio. Lähellä maanpintaa erot kosmisen säteilyn annosnopeudessa magneettisten napojen ja päiväntasaajan välillä ovat pienempiä kuin ylempänä ilmakehässä.

Auringosta emittoituvilla hiukkasilla ei yleensä ole riittävästi energiaa läpäisemään Maan magneettikenttää. Vain hyvin harvinaisten, voimakkaiden auringonpurkausten aiheuttamat suurienergisäiset hiukkaset voivat päästä Maan ilmakehään asti.



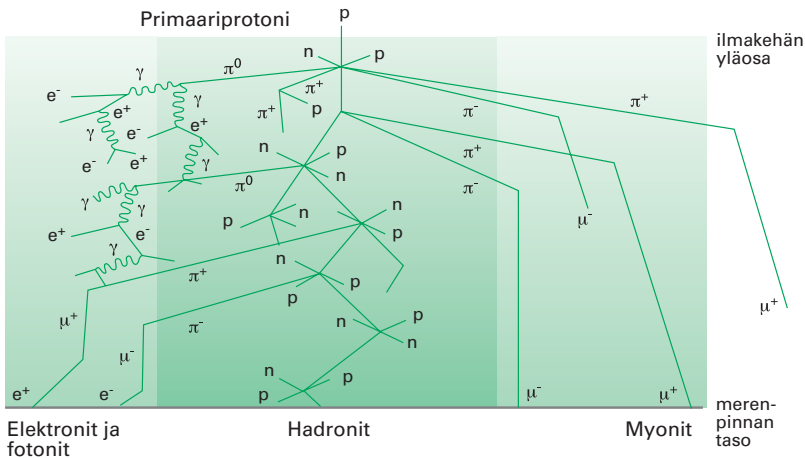
KUVA 2.2 Maan magneettikenttä suojaa kosmiselta säteilyltä paremmin päiväntasaajalla kuin napa-alueilla

Hiukkaset poikkeavat eniten alkuperäiseltä radaltaan päiväntasaajan yläpuolella ja vähiten Maan magneettisten napojen yläpuolella. Pohjoisen pallonpuoliskon magneettinen napa sijaitsee Kanadan pohjoisosassa (78 °N, 104 °W) noin 1 000 km maantieteellisestä pohjoisnavasta.

2.3 Ilmakehässä syntyvä sekundaarisäteilyä

Ilmakehään saapuva kosminen säteily on pääasiassa galaktista säteilyä. Ilmakehässä suurienergiaiset hiukkaset kokevat vuorovaikutuksia ilman atomien ja molekyylien kanssa. Vuorovaikutuksissa syntyy erilaisia varauksellisia ja varauksettomia sekundaarihiukkasia kuten protoneja, neutroneja, pioneja ja pienen varausluvun ytimiä (kuva 2.3). Syntyneet sekundaarinukleonit – protonit ja neutronit – synnyttävät lisää protoneja ja neutroneja aiheuttaen ilmakehässä hadronikaskadin. On arvioitu, että yksi ilmakehään saapuva primaariprotoni voi aiheuttaa jopa miljoona sekundaarihiukkasta. Vuorovaikutusten seurauksena neutroneiden energiaspektriin muodostuu piikki välille 50–500 MeV. Kun vuorovaikutuksissa voimakkaasti viritettyjen ytimien viritystilat purkautuvat, ytimistä lähtevät neutronit aiheuttavat energiaspektriin pienemmän piikin noin yhden megaelektronivoltin kohdalle.

Vuorovaikutuksissa syntyneet pionit aiheuttavat suurimman osan kosmisen säteilyn muista komponenteista. Varauksettomat pionit (π^0 -mesonit) hajoavat ilmakehässä suurienergiaisiksi fotoneiksi. Fotonien vuorovaiku-

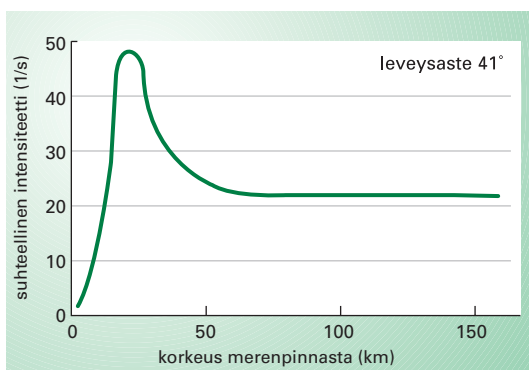


KUVA 2.3 Kaaviokuva sekundaarihiukkasten kaskadin muodostumisesta ilmakehässä (EC Rad. Prot. 85, 1997)

Kaskadi muodostuu elektroneista (e^+ ja e^-), fotoneista (γ), hadroneista (n , p , π^0 , π^- ja π^+) ja myoneista (μ^- ja μ^+). Kun primaariprotonit tai neutronit vuorovaikuttavat ilman kanssa, syntyy pääasiassa sekundaarineutroneja (n) ja -protoneja (p) sekä kolmenlaisia pioneja (π^0 , π^- ja π^+). Varauksiset pionit hajoavat myoneiksi ja neutriinoiksi. Ne harvat myonit, jotka kokevat vuorovaikutuksia ilmakehässä, hajoavat elektroneiksi ja neutriinoiksi. Neutraalit pionit hajoavat fotoneiksi. Reaktioista kaksi viimeistä saavat aikaan sähkömagneettisen kaskadin.

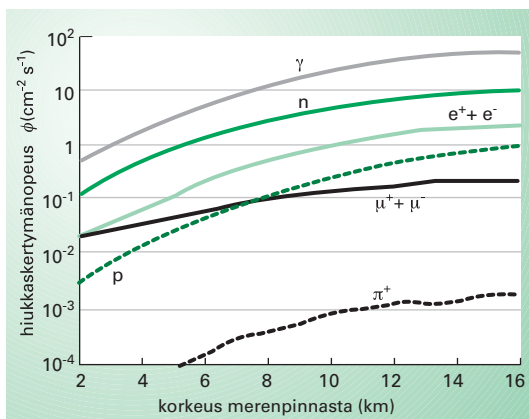
tuksista ilman kanssa syntyy suurienergiaisia elektroneja ja edelleen esimerkiksi fotoneita muodostaen siten sähkömagneettisen kaskadin. Elektronit ja positronit muodostavat suurimman osan varauksisten hiukkasten kertymänopeudesta matkustajakoneiden tyypillisellä lentokorkeudella. Varauksiset pionit (π^- - ja π^+ -mesonit) puolestaan hajoavat myoneiksi ja edelleen elektroneiksi. Koska myonit kulkevat pitkiäkin matkoja kokematta vuorovaikutuksia, niillä on suuri todennäköisyys läpäistä ilmakehä ja päästä maanpintaan asti. Myonit muodostavatkin suurimman osan varauksisten hiukkasten kertymänopeudesta maanpinnalla.

Hiukkaskertymänopeus on suhteellisen vakio 150–50 km korkeudessa ollen noin yksi hiukkanen sekunnissa neliösenttimetriä kohden. Sekundaarihiukkasia, pääasiassa elektroneja, neutroneja ja protoneja, alkaa muodostua 50 km korkeudessa. Hiukkaskertymänopeus kasvaa ja saavuttaa maksiminsa, kymmenen hiukkasta sekunnissa neliösenttimetriä kohden, noin 20 kilometrissä ja alkaa sen jälkeen absorptio vuoksi pienentyä (kuva 2.4).



KUVA 2.4 Varauksisten hiukkasten suhteellinen intensiteetti korkeuden funktiona (EC Rad. Prot. 85, 1997)

Suurinta intensiteettiä noin 20 km korkeudessa kutsutaan Pfozterin maksimiksi.



KUVA 2.5 Hiukkasten (neutronit n, protonit p, pionit π^+ , myonit μ^+ ja μ^- , elektronit e^+ ja e^-) ja fotonien (γ) määrä ilmakehässä (Roesler et al. 1998)

Lähellä maanpintaa neutroneja esiintyy enemmän kuin protoneja, koska varauksettomina hiukkasina ne kulkevat protoneja pidemmän matkan väliaineessa ilman vuorovaikutuksia (kuva 2.5). Neutronit ovatkin vallitsevin hiukkaskomponentti 3–25 km korkeudessa. Napa-alueilla neutronikertymänopeus on suurimmillaan 18 km ja päiväntasaajalla 15 km korkeudessa.

2.4 Kosmogeeniset radionuklidit

Kosmisen säteilyn hiukkasten kokemat vuorovaikutukset ilmakehässä saavat aikaan uusia radionuklideja kuten ^3H , ^7Be , ^{14}C ja ^{22}Na (taulukko 2.1). Kaikki sellaiset ytimet, jotka ovat kevyempiä kuin kohtioytimet (ensisijaisesti typpi, happi ja argon) syntyvät suurienergiaisten spallaatiovuorovaikutusten (katso kirja 1 luku 1.3) seurauksena.

Radionuklideja syntyy eniten stratosfäärin yläosassa (stratosfääri napa-alueilla 8–50 km, päiväntasaajalla 18–50 km korkeudessa). Suurienergiaiset neutronit ja protonit saavat aikaan kosmogeenisiiä radionuklideja

Radio-nuklidi	Tuottonopeus		Kokonais-määrä ilma-kehässä (PBq)	Osuus tropo-sfäärissä	Aktiivisuus-troposfäärissä (mBq/m ³)
	Pinta-ala-yksikköä kohden (atomeja/(m ² s))	Vuosittainen määrä (PBq/a)			
^3H	2 500	72	1 275	0,004	1,4
^7Be	810	1 960	413	0,11	12,5
^{10}Be	450	$64 \cdot 10^{-6}$	230	0,0023	0,15
^{14}C	25 000	1,54	12 750	0,016	56,3
^{22}Na	0,86	0,12	0,44	0,017	0,0021
^{26}Al	1,4	$1 \cdot 10^{-6}$	0,71	$7,7 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$
^{32}Si	1,6	$870 \cdot 10^{-6}$	0,82	0,00011	0,000025
^{32}P	8,1	73	4,1	0,24	0,27
^{33}P	6,8	35	3,5	0,16	0,15
^{35}S	14	21	7,1	0,08	0,16
^{36}Cl	11	$13 \cdot 10^{-6}$	5,6	$6 \cdot 10^{-8}$	$9,3 \cdot 10^{-8}$
^{37}Ar	8,3	31	4,2	0,37	0,43
^{39}Ar	56	0,074	28,6	0,83	6,5
^{81}Kr	0,01	$1,7 \cdot 10^{-8}$	0,005	0,82	0,0012

TAULUKKO 2.1 Kosmogeenisien radionuklidien tuotto ilmakehässä (UNSCEAR 2000)

myös alempana ilmakehässä. Tuotannon määrä riippuu korkeuden lisäksi myös geomagneettisesta leveysasteesta ja vaihtelee auringon aktiivisuuden 11 vuoden jaksoissa ollen suurimmillaan auringonpilkkinimimin aikana.

Stratosfäärissä syntyneet kosmogeeniset radionuklidit kulkeutuvat ilmakehän alimpaan osaan – troposfääriin – pääasiassa 40.–50. leveysasteiden välille riippumatta siitä, miltä alueelta ne ovat peräisin. Tropopausissa (troposfäärin yläraja) on tällä kohdalla epäjatkuvuuskohta, josta aineita kulkeutuu troposfääriin erityisesti keväisin. Säteilyvaikutusten kannalta tärkeimmän kosmogeenisen nuklidin ^{14}C aktiivisuuspitoisuus on muutamia kymmeniä millibecquerelejä kuutiometrissä (mBq/m^3) pintailmaa. Tavallisen hiilen ^{12}C tavoin myös ^{14}C osallistuu maapallon hiilikiertoon, ja ^{14}C :stä onkin vain pari prosenttia ilmakehässä. Toisaalta esimerkiksi ^7Be :sta yli puolet esiintyy stratosfäärissä, koska suurin osa siitä ei lyhyen puoliintumisajan (53 vuorokautta) vuoksi ehdi kulkeutua troposfääriin asti.

^{14}C :ää lukuunottamatta kosmogeenisilla radionuklideilla ei ole kovinkaan suurta merkitystä säteilyaltistuksen kannalta. ^{14}C :stä aiheutuva vuotuinen efektiivinen annos on keskimäärin 12 mikrosievertiä (μSv) ja ^3H :stä ja ^{22}Na :sta yhteensä alle $0,2 \mu\text{Sv}$.

2.5 | Ihminen altistuu kosmiselle säteilylle

Maan magneettikenttä ja ilmakehä suojaavat maapallon elollisia olentoja avaruudesta tulevalta hiukkassäteilyltä. Siitä huolimatta ihmiset altistuvat kosmiselle säteilylle niin maanpinnalla kuin lentokoneissakin. Altistuksen aiheuttaa pääasiassa galaktisen säteilyn ilmakehässä tuottama sekundaarisäteily. Avaruudessa ihminen altistuu galaktisen säteilyn lisäksi myös auringosta tulevalle hiukkassäteilylle ja maan kiertoradoilla Maata ympäröiviin säteilyvyöhykkeisiin loukkuuntuneille varauksisille hiukkasille.

Altistus maanpinnalla

Ihmiset saavat kosmisesta säteilystä keskimäärin $0,38$ millisievertin (mSv) suuruisen efektiivisen annoksen vuodessa. Annokseen vaikuttavat auringon aktiivisuus ja asuinpaikan sijainti sekä asuinrakennuksista saatava suoja.

Päiväntasaajalla kosmisen säteilyn annosekvivalenttinopeus on noin 34 nanosievertiä tunnissa (nSv/h) ja napa-alueilla 43 nSv/h. Auringon aktiivisuuden 11 vuoden jaksosta johtuva annosnopeuden vaihtelu on noin kymmenen prosenttia, ja päivittäinen vaihtelu noin 10–15 prosenttia kuukauden keskiarvosta. Lähellä maanpintaa auringon aktiivisuuden jaksottainen vaihtelu vaikuttaa annosnopeuteen vähemmän kuin ilmakehän ylemmissä osissa.

Ihmisen säteilyaltistusta arvioitaessa kosminen säteily jaetaan energiansiirtokyvyn perusteella harvaan ja tiheään ionisoivaan säteilyyn. Harvaan ionisoivien varauksisten hiukkasten ja fotonien absorptioannosnopeus merenpinnan tasolla on keskimäärin 31 nanograyta tunnissa (nGy/h). Tämä vastaa annosekvivalenttinopeutta 31 nSv/h, koska vähäisen energiansiirtokyvyn vuoksi harvaan ionisoivan säteilyn keskimääräinen laatutekijä Q on yksi.

Tiheään ionisoivan neutronisäteilyn annosekvivalenttinopeus merenpinnan tasolla on pienimmillään päiväntasaajalla, noin 4 nSv/h. Kun lähestytään napa-alueita, 60. geomagneettisen leveyspiirin jälkeen neutronien annosekvivalenttinopeus merenpinnan tasolla on noin 11 nSv/h.

Rakennukset vaimentavat kosmista säteilyä. Sisätiloissa annosnopeus on keskimäärin 80 prosenttia ulkona mitatusta kosmisen säteilyn annosnopeudesta. Vankat betonirakenteet suojaavat huomattavasti enemmän kuin puurakenteet. Suomessa kosmisen säteilyn annosekvivalenttinopeus merenpinnan tasolla ulkona on keskimäärin 43 nSv/h ja sisällä 34 nSv/h.

Korkealla sijaitseissa kaupungeissa annosnopeus on suurempi kuin merenpinnan tasolla (taulukko 2.2). Esimerkiksi Bolivian La Pazissa, joka sijaitsee 3,9 km korkeudella, kosmisesta säteilystä aiheutuva efektiivinen annos on noin 2 mSv vuodessa eli lähes kymmenkertainen merenpinnan tasoon verrattuna. Näin korkealla neutronien osuus efektiivisestä annoksesta on 45 prosenttia, kun se merenpinnan tasolla on vain 11 prosenttia.

Altistus lentokoneissa

Matkustajakoneet lentävät noin kymmenen kilometrin korkeudessa, missä kosmisen säteilyn annosnopeus on monikymmenkertainen maanpinnan tasoon nähden. Useimmat lentomatkustajat altistuvat kosmiselle säteilylle vain satunnaisesti ja lyhyitä aikoja kerrallaan, jolloin esimerkiksi vuositasolla lisäys säteilyaltistukseen on vähäistä. Sen sijaan lehtohenkilöstön altistusajat voivat olla pitkiä, jopa 800 tuntia vuodessa.

Sijainti	Korkeus merenpinnasta (m)	Efektiivinen annos vuodessa ($\mu\text{Sv/a}$)
Korkealla sijaitsevat kaupungit		
La Paz, Bolivia	3 900	2 020
Lhasa, Kiina	3 600	1 710
Quito, Ecuador	2 840	1 130
Mexico City, Meksiko	2 240	820
Nairobi, Kenia	1 660	580
Denver, USA	1 610	570
Merenpinnan tasolla		270
Maailmassa keskimäärin		380

TAULUKKO 2.2 Esimerkkejä kosmisen säteilyn aiheuttamista annoksista Maan pinnalla (UNSCEAR 1993)

Kosmisesta säteilystä lennon aikana saatu annos riippuu lentoajasta, -korkeudesta ja -reitistä sekä kääntäen verrannollisesti auringon aktiivisuudesta (taulukko 2.3). Lentokoneen rakenteet eivät juurikaan vaimenna kosmista säteilyä.

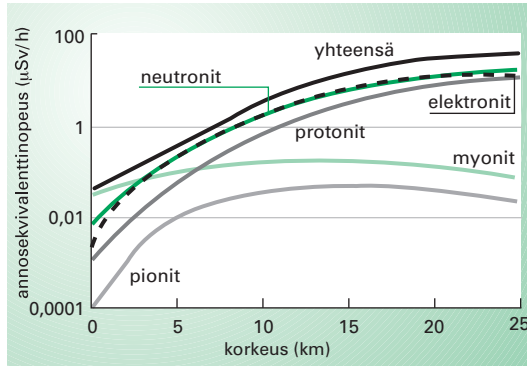
Lentoreitti	Lennon kesto (min)	Efektiivinen annos (μSv)
Helsinki-Frankfurt	160	10
Tukholma-Wien	140	8,2
Tukholma-Tokio	605	51
Bryssel-Singapore	675	30
Amsterdam-Vancouver	645	70

TAULUKKO 2.3 Lennon aikana saatu laskennallinen efektiivinen annos eräillä reiteillä auringonpilkkuminimin aikana (EC Rad. Prot. 88, 1997)

Tavanomaiset suihkukoneet lentävät 9–13 km korkeudessa, pienet yleensä yksityiskäytössä olevat suihkukoneet noin 15 km ja yliaänikoneet noin 18 km korkeudessa. Mitä korkeammalla lennetään, sitä suurempi on kosmisen säteilyn annosekvivalenttinopeus (kuva 2.6). Yhdeksän kilometrin korkeudessa se on 3–4 $\mu\text{Sv/h}$ ja 12 km korkeudessa jo kaksinkertainen (6–8 $\mu\text{Sv/h}$).

Lennettäessä päiväntasaajalta kohti napa-alueita annosekvivalenttinopeus kasvaa 50.–60. leveysasteille asti pysyen tämän jälkeen suhteellisen vakiona (kuva 2.7). Napa-alueilla tiheään ionisoivan protoni- ja neutro-

KUVA 2.6 Kosmisen hiukkas-säteilyn annosekvivalenttinopeudet ilmakehässä 55. leveysasteella auringonpilkuminimin aikana (EC Rad. Prot. 88, 1997)

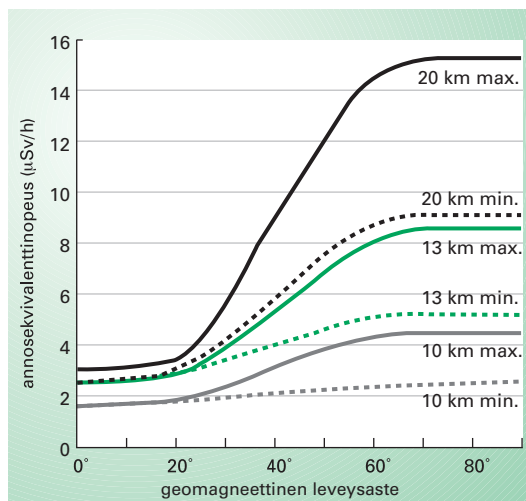


nisäteilyn annosekvivalenttinopeus on 3–5-kertainen päiväntasaajaan nähden. Harvaan ionisoivien varauksisten hiukkasten ja fotonien annosekvivalenttinopeus on noin kaksinkertainen napa-alueilla päiväntasaajaan nähden.

Voimakas auringonpurkaus voi lyhytaikaisesti nostaa annosnopeutta ilmakehässä. Helmikuussa 1956 tapahtui voimakkain koskaan havainnointu purkaus. Sen aikana annosekvivalenttinopeudeksi arvioitiin 20 km korkeudessa yksi millisievert tunnissa, hetkellisesti jopa noin 30 mSv/h ja kymmenen kilometrin korkeudessakin vielä 10 mSv/h. Näin suuren annosnopeuden voi aiheuttaa vain poikkeuksellisen suuri auringonpurkaus, jossa sekä hiukkasten energia (yli 1 000 MeV) että hiukkaskertymänopeus ovat hyvin suuria.

KUVA 2.7 Kosmisen säteilyn annosekvivalenttinopeus geomagneettisen leveysasteen funktiona eri korkeuksilla (EC Rad. Prot. 85, 1997)

Annosekvivalenttinopeus on suurimmillaan (max.) auringonpilkuminimin ja pienimmillään (min.) auringonpilkumaksimien aikana.



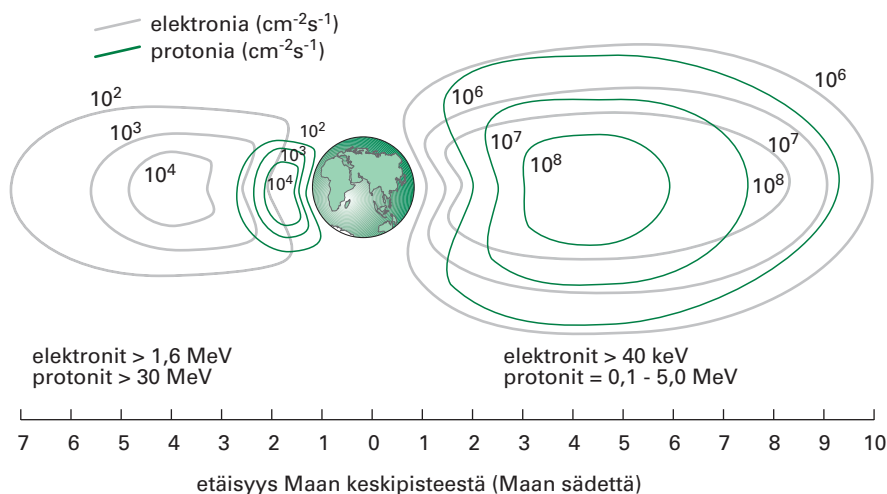
Auringonpurkausten vaikutusta kosmisen säteilyn annosnopeuteen lentokoneissa on aiemmin arvioitu maanpinnalla tai avaruudessa tehtyjen havaintojen perusteella. Purkausten aiheuttama lisäys kosmisen säteilyn annoskvivalenttinopeuteen on pitkällä aikavälillä arvioitu olevan noin 3 prosenttia 12 kilometrin ja 7 prosenttia 18 kilometrin korkeudessa.

Ensimmäinen auringonpurkaus, joka taltioitiin lentokoneessa olleella mittalaitteella, havaittiin huhtikuussa 2001 lennolla Prahasta New Yorkiin. Purkauksen aikana kosmisen säteilyn annoskvivalenttinopeus kasvoi noin kaksinkertaiseksi. Yhdentoista kilometrin korkeudessa se oli hetkellisesti yli 10 $\mu\text{Sv/h}$.

Altistus avaruudessa

Avaruudessa ilmakehän ja kauempana myös magneetikentän suojaava vaikutus puuttuu. Tämän vuoksi ihmiset altistuvat avaruudessa galaktisen kosmisen säteilyn lisäksi myös auringosta tulevalle hiukkassäteilylle. Näiden lisäksi on otettava huomioon Maata ympäröivät kaksi Van Allenin säteilyvyöhykettä.

Van Allenin vyöhykkeet ovat syntyneet, kun auringosta ja aurinkokuntamme ulkopuolelta saapuvat varauksiset hiukkaset ovat joutuneet Maan magneetikentän vangitsemiksi (kuva 2.8). Vyöhykkeet sijaitsevat kahdella rengasmaisella alueella, joista sisempi on noin 2,8 ja ulompi noin 2,8–12 Maan



KUVA 2.8 Varauksiset hiukkaset ovat joutuneet Maan magneetikentän vangitsemiksi Van Allenin säteilyvyöhykkeissä (Wilson 2000).

säteen päässä päiväntasaajan yläpuolella. Sisemmässä vyöhykkeessä on pääasiassa protoneja, joiden energia on 10–100 MeV. Ulompi vyöhyke koostuu pääasiassa noin yhden megaelektronivoltin elektroneista.

Avaruudessa ihmisen säteilyaltistuksen suuruuteen vaikuttaa muun muassa avaruusaluksen kiertoradan inkliinaatio ja korkeus maanpinnasta, auringon aktiivisuus, avaruuslennon kesto ja aluksen rakenteen suojaavat ominaisuudet.

Maan kiertoradoilla, joiden inkliinaatio – eli radan ja päiväntasaajan välinen kulma – on suuri, noin puolet astronauttien säteilyaltistuksesta aiheutuu galaktisesta ja toinen puolet loukkuuntuneista hiukkasista. Sitä vastoin pienen inkliinaation kiertoradoilla säteilyaltistus johtuu pääasiassa säteilyvyöhykkeisiin loukkuuntuneista hiukkasista, ja ennen kaikkea sisemmän Van Allenin vyöhykkeen protoneista ja niiden aiheuttamasta sekundaarisäteilystä. Kiertoradoilla arvioitu annos on 0,04–1,0 millisievertiä vuorokaudessa.

Säteilyaltistus rajoittaa osaltaan pitkiä miehitettyjä avaruuslentoja. Ensimmäinen pysyvästi miehitetty avaruusasema oli venäläinen Mir. Sen rata kiersi maata 52 asteen inkliinaatiossa 380–460 km korkeudessa. Asemalla mitattu annosekvivalenttinopeus oli 0,7–1,1 mSv vuorokaudessa. Mir toimi vuosina 1986–2001, ja pisimpään asemalla oleskellut astronautti oli siellä yhtäjaksoisesti 438 vuorokautta.

Kansainvälisen avaruusaseman (ISS) rata kulkee 370–470 km korkeudessa ja sen inkliinaatio on 52 astetta. Ennen avaruusaseman miehittämistä säteilyannoksia arvioitiin aseman kiertoradalle tehdyillä sukkulalennoilla. Mittaukset tehtiin auringon aktiivisuuden eri vaiheissa vuosina 1995–2000. Annosekvivalenttinopeudeksi mitattiin 0,36–0,77 millisievertiä vuorokaudessa, mistä vajaa kolmannes aiheutui säteilyvyöhykkeen hiukkasista.

Ensimmäisen miehistönsä Kansainvälinen avaruusasema sai vuonna 2000. Saman vuoden syyskuussa avaruusasemalla havaittiin auringonpurkauksen aiheuttama annosnopeuden nousu. Kahden vuorokauden aikana mitattu keskimääräinen annosnopeus oli 67 mikrosievertiä tunnissa, josta 47 $\mu\text{Sv/h}$ aiheutui auringonpurkauksesta, 11 $\mu\text{Sv/h}$ Van Allenin vyöhykkeen hiukkasista ja 9 $\mu\text{Sv/h}$ galaktisesta säteilystä.

Maan magneettikentän ulkopuolelle suuntautuvilla lennoilla galaktisen kosmisen säteilyn annokseksi on arvioitu keskimäärin 300 millisievertiä vuodessa. Lisäksi auringonpurkaukset voivat vuositasolla aiheuttaa sa-

man suuruisen annoksen. Miehitetyllä Mars-lennolla saatavaa säteilyaltistusta on arvioitu olettaen, että suurin mahdollinen annosekvivalenttinopeus auringonpilkkuiminimin aikana olisi aluksessa 450 mSv/a ja Marsin pinnalla 120 mSv/a. Tällöin kolme vuotta kestävä matkan aikana, josta kaksi vuotta kuluu edestakaiseen lentoon ja vuosi Marsissa, verta muodostavien elinten annos olisi 1 Sv. Arviossa ei ole otettu huomioon auringonpurkauksia.

Auringonpurkaukset aiheuttavat säteilyhaittojen kannalta suurimman vaaran. Hyvin voimakkaasta purkauksesta aiheutuva annos voi olla jopa kuollettava. Esimerkiksi syyskuussa 1972 tapahtuneen poikkeuksellisen suuren auringonpurkauksen aikana aluksen ulkopuolella oleva astronautti olisi voinut saada noin 10 Sv efektiivisen annoksen. Näin voimakkaita purkauksia tapahtuu ehkä kerran vuosisadassa. Syyskuussa 1989 Mir-avaruusasemalla mitattu annosekvivalenttinopeus oli auringonpurkauksen aikana 30 mSv/h. Kun auringossa havaitaan purkaus, avaruusaseman ulkopuolella olevalla astronautilla on suojautumisaikaa vain joitakin kymmeniä minuutteja. Auringonpurkauksia ei osata vielä luotettavasti ennustaa, mutta käynnissä on useita tutkimusohjelmia, joissa havainnoidaan avaruussäätä ja kehitetään malleja purkausten ennustamiseksi.

Yhdysvalloissa kansallinen säteilysuojeluneuvosto NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements) suosittelee lähellä maata olevilla kiertoradoilla astronautteille annosrajoja, jotka on esitetty taulukossa 2.4. Annosrajat ovat huomattavasti suurempia kuin ICRP:n suositukseen perustuvat väestön tai työntekijöiden annosrajat (taulukko 2.6).

Ikä altistuksen alkaessa (vuotta)	Efektiivisen annoksen raja (mSv) 10 vuodessa	
	Naiset	Miehet
25	400	700
35	600	1 000
45	900	1 500
55	1 700	3 000

TAULUKKO 2.4 Yhdysvaltojen kansallisen säteilysuojeluneuvoston (National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP 2000) suosittelemat efektiivisen annoksen rajat kymmenvuotisen uran aikana.

Efektiivisen annoksen annosrajojen tarkoitus on estää säteilyn aiheuttaman syövän ja muiden stokastisten eli satunnaisten haittojen syntymistä.

Koska avaruuslennolla annosnopeudet voivat olla hyvin suuria, myös determinististen eli suorien haittojen välttämiseksi on annettu annosrajoja (taulukko 2.5).

	Luuydin (Gy-Eq)	Iho (Gy-Eq)	Silmän mykiö (Gy-Eq)
Koko uran aikana	–	6,0	4,0
Vuodessa	0,50	3,0	2,0
Kuukaudessa	0,25	1,5	1,0

TAULUKKO 2.5 Yhdysvaltain kansallisen säteilysuojeluneuvoston NCRP suosittelemat annosrajat suorien säteilyhaittojen estämiseksi

Annosrajat on annettu suureena gray-ekvivalentti (yksikkö Gy-Eq), mikä on elimen absorboitunut annos (yksikkö gray) kerrottuna RBE-kertoimella (suhteellinen biologinen tehokkuus, katso kirja 1 luku 2.4). Kosmisen säteilyn RBE-kertoimet ovat neutroneille 6,0 (energia 1–5 MeV) ja 3,5 (energia 5–50 MeV), raskaille ioneille kuten helium, hiili, neon ja argon 2,5 ja yli 2 MeV:n protoneille 1,5.

2.6 | Lentohenkilöstön säteilyaltistus on määritettävä

Kansainvälinen säteilysuojelutoimikunta ICRP suositteli vuonna 1991, että lentohenkilöstön altistuminen kosmiselle säteilylle tulee määrittellä työperäiseksi säteilyaltistukseksi. Viisi vuotta myöhemmin Euroopan neuvoston säteilysuojelun perusnormidirektiivissä esitettiin vaatimukset lentohenkilöstön suojelemiseksi. Suomessa asiasta on säädetty säteilylaissa ja -asetuksessa, missä on annettu määräykset esimerkiksi henkilökohtaisen säteilyaltistuksen määrittämisestä ja raskaana olevan henkilöstön suojelemisesta. Lentohenkilöstöä koskevat säteilytyötä tekevien henkilöiden annosrajat (taulukko 2.6)

Lentohenkilöstön säteilyannosten mittaamiseen ei ole olemassa yksinkertaisia menetelmiä. Ensiksikin kosminen säteily koostuu useista eri säteilylaaduista, minkä vuoksi on käytettävä useita, kullekin säteilylajille ja energia-alueelle soveltuvia ja kalibroituja annosmittareita. Jos muu kuin mitattava säteilylaji aiheuttaa mittarissa häiriötä, häiriön vaikutus pitää tuntea ja pystyä korjaamaan. Toiseksi altistuksen määrittäminen hankaloittaa eri säteilylajeille soveltuvien mittareiden erilaiset mittaussuureet. Esimerkiksi fotoneilla yleisesti käytetty mittaussuure on annosekvivalentti ja neutroneilla taas hiukkaskertymä.

Mittausten asemesta henkilöstön lennonaikaisia säteilyannoksia määritetään matemaattisilla laskentaohjelmilla. Laskentaohjelmia varten on tar-

vittu yksityiskohtaista tietoa kosmisen primaarisäteilyn spektristä ja ydinvuorovaikutusten vaikutusalasta Maan ilmakehässä sekä tietoa aurinkotuulen kantaman magneettikentän ja Maan magneettikentän vaikutuksista. Tämän vuoksi kosmisen säteilyn intensiteettiä ilmakehässä on mitattu viime vuosina entistä yksityiskohtaisemmin. Mittausten ja sopivien interpolaatioiden tai vaihtoehtoisesti säteilyn kuljetusyhtälöiden avulla on saatu aikaan kartasto kosmisen säteilyn kentistä ja annoksista ilmakehässä ajan funktiona.

Rajoituksen kohde	Annosraja (mSv vuodessa)	
	Säteilytyötä tekevät henkilöt	Muu väestö
Efektiivinen annos		
• keskiarvo viiden vuoden aikana	20	–
• yhden vuoden aikana	50	1
Ekvivalenttiannos		
• silmän mykiö	150	15
• iho	500	50
• kädet ja jalat *	500	–**

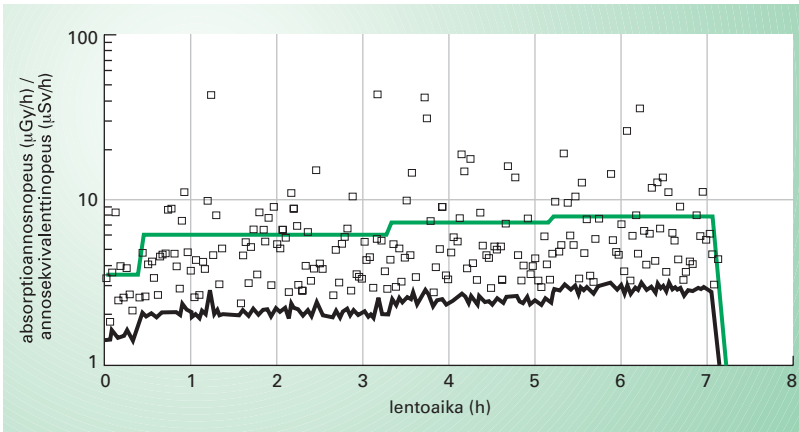
* Kädet ja kyynärvarret sekä jalkaterät ja nilkat.
 ** Annosrajaa ei ole erikseen säädetty, mutta ihon ekvivalenttiannoksen annosraja koskee myös käsien ja jalkojen ihoa.
 Lisäksi raskaana olevaa naista koskee säteilyasetuksen 5 §:ssä sikiön suojaamiseksi säädetty erillinen annosraja 1 mSv.

TAULUKKO 2.6 Säteilyasetuksessa (1512/1991, muutos 1143/1998) säädetty annosrajat säteilytyötä tekeville ja väestölle

Laskentaohjelmat perustuvat joko suurienergiaisten nukleonien ja ytimien törmäyksiä kuvaavaan malliin, jota sovelletaan yleiseen analyytiseen kuljetusteoriaan, tai Monte Carlo -ohjelmiin. Monte Carlo -ohjelmat kuvaavat hiukkaskaskadien tuotantoa mallintamalla vuorovaikutusten todennäköisyyksiä ja seuraamalla yksittäisten hiukkasten vuorovaikutustapahtumia. Ohjelmien luotettavuutta on selvitetty vertaamalla laskettuja annoksia reittikohtaisiin mittaustuloksiin. Kosmista säteilyä on mitattu esimerkiksi kudosekvivalenteilla verrannollisuuslaskureilla (TEPC, Tissue-Equivalent-Proportional-Counter), rem-laskureilla, ionisaatiokammioilla ja tuikeilmäsimillä. TEPC on näistä mittareista ainoa, joka mittaa sekä absorboitunutta annosta että säteilyn laatua.

TEPC on pallon tai sylinterin muotoinen ilmaisin, joka on rakennettu absorptio-ominaisuuksiltaan kudoksenkaltaisesta muovista ja täytetty kudosekvivalentilla kaasulla. Jos työskennellään matalassa paineessa (pari prosenttia ilmakehän paineesta) tämänkaltainen mittalaite määrittää yk-

sittäisten, kaasuntelon läpi kulkevien primaarihiukkasten ja/tai niiden sekundaarihiukkasten energianluovutuksesta aiheutuvan pulssinkorkeusspektrin sekä edelleen kudokseen absorboituneen annoksen. Mittari on yleensä kalibroitu näyttämään lineaalista energiaa, mikä on verrannollinen energiansiirtokykyyn. Niinpä sen avulla voidaan arvioida säteilyn keskimääräistä laatutekijää Q säteilykentässä, jossa on energialtaan erilaisia neutroneja, fotoneita ja varauksisia hiukkasia. Annosekvivalentti saadaan absorboituneen annoksen ja keskimääräisen laatutekijän Q tulona (kuva 2.9).



KUVA 2.9 TEPC:llä mitattu lennonaikainen annosprofiili reitillä Helsinki–New York vuonna 1998 (Lindborg et al. 1999)

Lentokorkeudet olivat nousun jälkeen 8,5 km, 9,4 km ja 10,1 km. Alaosan musta viiva kuvaa absorptioannosnopeutta ($\mu\text{Gy/h}$) ja pisteet annosekvivalenttinopeutta ($\mu\text{Sv/h}$). Vihreä viiva kuvaa keskimääräistä annosekvivalenttinopeutta kullakin lentokorkeudella. Mitattu annosekvivalentti 7 tuntia kestäneen lennon aikana oli $35 \mu\text{Sv}$.

KIRJALLISUUTTA

Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996 laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionizing radiation. Official Journal of the European Communities No L 159, 29.6.1996 p. 41.

Exposure of air crew to cosmic radiation. Radiation Protection 85, European Communities, Luxembourg, 1996.

Friedberg W, Copeland K, Duke F E, O'Brien K, Darden E B. Radiation exposure during air travel: Guidance provided by the Federal Aviation Administration for air carrier crews. Health Physics 2000; 79:591–595.

International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Pergamon Press 1991.

Lindborg L, Kyllönen J-E, Beck P, Bottollier-Debois J F, Gerdung S, Grillmaier R E, Schrewe U. The use of TEPC for reference dosimetry. Radiation Protection Dosimetry 1999; 86: 285–288.

National Council on Radiation Protection and Measurements. Radiation protection guidance for activities in low-earth orbit on radiation received in space activities. Bethesda, MD, NCRP Report No. 132, 2000.

Recommendations for the implementation of Title VII of the European Basic Safety Standards Directive (BSS) concerning significant increase in exposure due to natural radiation sources. Radiation Protection 88, European Communities, Luxembourg, 1997.

Roesler S, Heinrich W, Schraube H. Monte Carlo Calculation of the radiation field at aircraft altitudes. Radiation Protection Dosimetry 2002; 98:367–388.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2000 Report. New York: United Nations, 2000.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 1993 Report. New York: United Nations, 1993.

Wilson JW. Overview of radiation environments and human exposures. Health Physics 2000; 79: 470–494.