

Geomagneettisia myrskyjä kuvaavan Dst-indeksin korjaus ja ajallinen jatko

Kalevi Mursula¹, Lauri Holappa¹ ja Arto Karinen²

¹ Oulun yliopisto, Fysikaalisten tieteiden laitos, kalevi.mursula@oulu.fi

² Työterveyslaitos, Helsinki

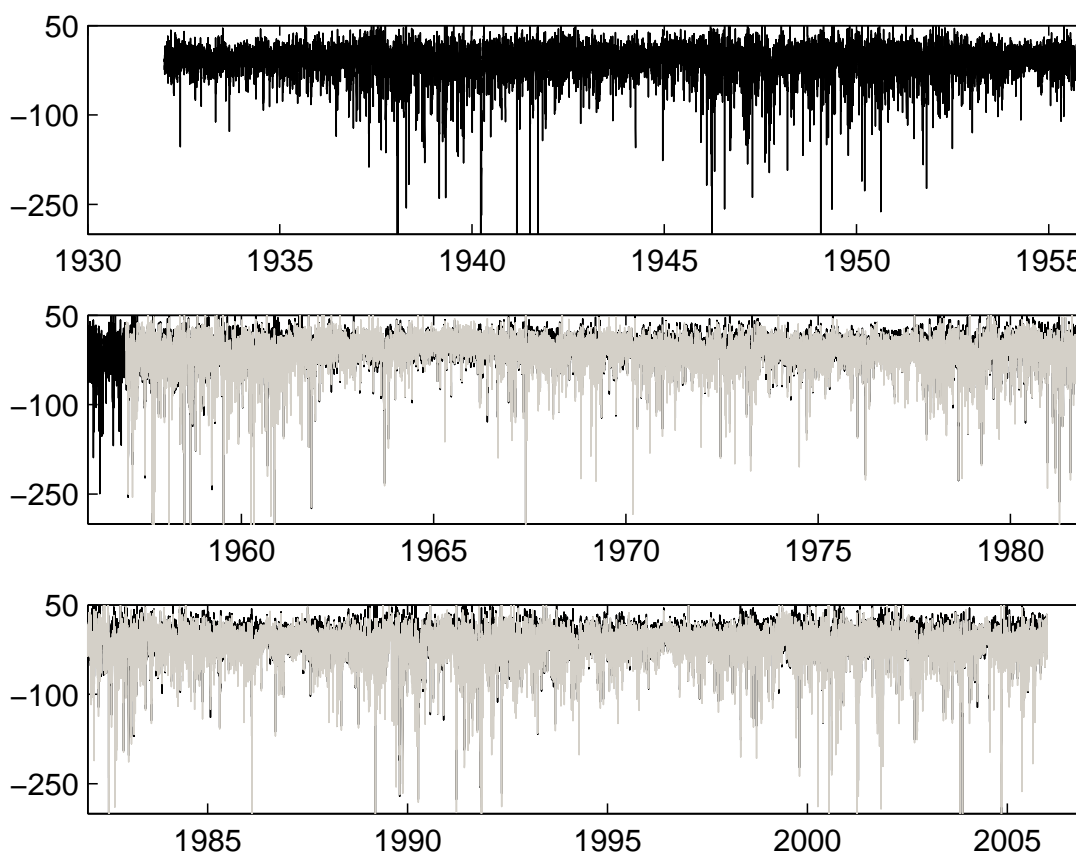
Abstract

Geomagnetic storms are the most dramatic disturbances of the near-Earth space. The international Dst index has been used to monitor the temporal development and intensity of geomagnetic storms and the magnetospheric ring current since 1957. Here we discuss an important systematic error in the definition of the Dst index and calculate a corrected Dcx index. The correction seriously modifies the average level of the Dst index and the relative intensity of storms. We also extend the time interval of the Dst/Dcx index by 25 years to start in 1932. The extended time interval reveals new, interesting long-term changes in the average properties of geomagnetic storms.

1. JOHDANTO

Geomagneettiset myrskyt ovat Maan lähiavaruuden voimakkaimpia häiriötiloja, jotka muokkaavat merkittävästi Maan lähiavaruuden magneettista rakennetta mm. vahvistamalla magnetosfäärissä ja ionosfäärissä kulkevia sähkövirtoja, erityisesti ns. rengasvirtaa. Magnetosfäärin ekvaattorialueella länteenpäin kulkevan rengasvirran voimistuminen aiheuttaa matalilla ja keskileveysasteilla havaittavan magneettikentän horisontaalikomponentin (eli H-komponentin) voimakkaan aleneman, joka kestää tyypillisesti muutaman päivän. Voidaan helposti osoittaa, että maanpinnalla havaittu magneettikentän globaali alenema on suoraan verrannollinen rengasvirran energiasältöön, eli magnetosfäärissä kulkevien energieettisten (n. 30-300keV) ionien lukumäärään. Geomagneettisia myrskyjä aiheuttavat pääasiallisesti Auringon koronan massapurkaukset (CME) sekä aurinkotuulen nopeiden ja hitaiden virtausten toistuvat vuorovaikutusalueet (CIR).

Geomagneettisten myrskyjen ja rengasvirran suuruutta on mitattu IGY-vuodesta 1957 lähtien ns. Dst-indeksillä (Disturbance storm time), joka lasketaan neljän valitun mittausaseman (Hermanus, Honolulu, Kakioka ja San Juan) tunnittaisista H-komponenteista. Dst-indeksi on IAGAn vahvistama kansainvälinen standardi-indeksi, jota on käytetty tuhansissa tutkimuksissa ja jolla on edelleen suuri merkitys avaruusfysiikassa. Dst-indeksi lasketaan Kioton yliopiston ylläpitämässä WDC-C2-keskuksessa, joka on yksi geofysiikan ja avaruusfysiikan kansainvälisiä datakeskuksia. Kuva 1 esittää tunnittaisen Dst-indeksin aikasarjan vuosina 1957-2005. Kuvassa esiintyvät voimakkaat, lyhytaikaiset alenemapiikit vastaavat geomagneettisia myrskyjä.



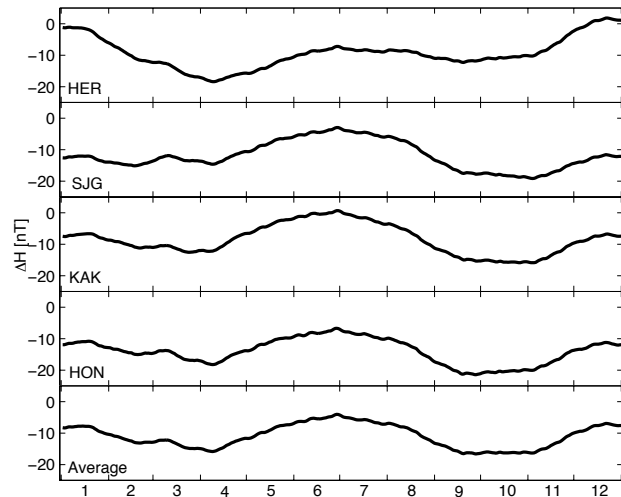
Kuva 1: Dcx-indeksin (musta käyrä) tuntiarvojen aikasarja vuosina 1932-2005 sekä Dst-indeksin (harmaa käyrä) vastaava aikasarja vuosina 1957-2005, jolloin Dcx-indeksi näkyy vain hieman Dst-indeksin takaa.

2. Dxt-INDEKSI JA Dcx-INDEKSI

Vuonna 2005 laskimme Dst-indeksin kokonaan uudelleen (Karinen ja Mursula, 2005) käyttämällä alkuperäisiä mittausaineistoja sekä Dst-indeksin tarkkaa laskumenetelmää (Sugiura, 1964; 1969; 1991). Jatkoimme Dst-indeksin kattamaa aikaväliä 25 vuodella käyttämällä Hermanus-aseman edeltäjän Cape Townin mittauksia vuodesta 1932 lähtien. Kutsumme tätä rekonstruoitua Dst-indeksi nimellä Dxt-indeksi (extended Dst index). (Dxt-indeksin laskussa korjautui joitakin Dst-indeksin sisältämiä pienehköjä ongelmia, jotka ilmeisesti johtuvat virheellisestä datankäsittelystä; ks. esim. Karinen, 2001). Tunnittaisten Dst ja Dxt-indeksien korrelaatiokerroin vuosille 1957-2005 on erittäin suuri (0.987).

Jo hieman aiemmin oli havaittu (Cliver et al., 2001), että Dst-indeksi sisältää aivan liian suuren puolivuosisvaihtelun, josta noin puolet ei liity mitenkään geomagneettisiin myrskyihin, vaan esiintyy myös rauhallisina aikoina. Tämä ns. non-storm-vaihtelu tekee Dst-indeksin puolivuosisvaihtelun laajuuden kaksinkertaiseksi muihin geomagneettista häiriöisyyttä mittaaviin indekseihin verrattuna.

Kuva 2: Neljässä Dst-asemassa havaittu magneettisen H-komponentin keskimääräinen vuosivaihtelu. Alin käyrä antaa niiden keskiarvon. Rauhallisten päivien sisältämä sekulaarivaihtelu on ensin poistettu ja data on tasoitettu 31 päivän liukuvalla keskiarvolla. x-akselilla kuukaudet.



Matalan ja keskileveysasemien havaitseman magneettikentän H-komponentti sisältää Auringon zeniittiaseman ja siitä riippuvasta UV-säteilyn vuosittaisesta muutoksesta johtuvan luonnollisen vuosivaihtelun, jonka vaihe on vastakkainen pohjoisella ja eteläisellä pallonpuoliskolla. Kuva 2 esittää tämän vaihtelun neljässä Dst-asemassa sekä niiden keskiarvossa. Dst/Dxt-indeksi laskeaan siten, että mitatuista arvoista poistetaan sekä pitkäaikainen sekulaarivaihtelu että rauhallisten päivien sisältämä päivä- ja vuodenaikavaihtelu, eli ns. Sq-vaihtelu. Sq-vaihtelusta poistetaan kuitenkin ensin yöaikainen keskimääräinen taso, jolloin tämä taso jää mukaan em. erotukseen ja siten myös Dst-indeksiin (Mursula ja Karinen, 2005). Koska po. yöaikainen taso vaihtelee Kuvan 2 esittämällä tavalla, sisältää myös Dst/Dxt-indeksi kyseisen UV-säteilyn vaihtelusta johtuvan vuosivaihtelun. (Pohjoisen ja eteläisen pallonpuoliskon asemien keskiarvoistus korostaa puolivuosisvaihtelua vuosivaihtelun kustannuksella).

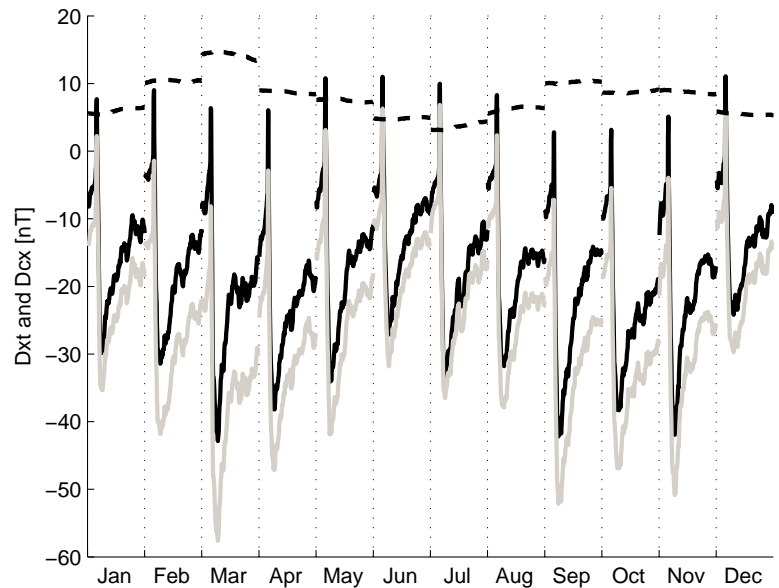
Muuttamalla Dst-indeksin laskuohjetta siten, että yötaso ei poisteta Sq-vaihtelua määritettäessä voidaan Cliverin huomauttama liiallisen puolivuosisvaihtelun ongelma korjata. Näin olemme muodostaneet uuden, korjatun Dst/Dxt-indeksin, jota kutsumme Dcx-indeksiksi (corrected and extended Dst index). Kuva 1 esittää Dcx-indeksin tunnitaisen aikasarjan vuosina 1932-2005. Dcx ja Dst/Dxt korreloivat erittäin hyvin, mutta Dcx on keskimäärin 6 nT korkeammalla kuin Dst-indeksi. (Vain 1960-luvulla Dst-indeksi ulottuu hieman Dcx-indeksin yläpuolelle, mikä johtuu Dst-indeksin virheestä noina vuosina).

Kuten on ilmeistä edellä esitetyn perusteella, Dcx-indeksin ja Dst/Dxt-indeksin välinen tasoero ei ole vakio vaan vaihtelee vuodenajan mukaan. Tämä tulee selvästi esille Kuvasta 3, joka esittää magneettisten myrskyjen keskimääräisen kehityksen eri kuukausina vuosina 1932-2005. Dcx-indeksin ja Dxt-indeksin välinen erotus on suurimmillaan keväällä ja syksyllä (10-15 nT) ja pienimmillään kesällä ja talvella (3-6 nT).

Dst/Dxt-indeksin korjauksen merkitys näkyy selvästi indeksien vuosiarvoissa, jotka on esitetty Kuvassa 4. Dst/Dxtindeksin vuosiarvo on tyypillisesti vain parikymmentä nT, joten keskimääräinen 6 nT:n korjaus merkitsee niissä suurta, n. 25-30%:n suhteellista muutosta.

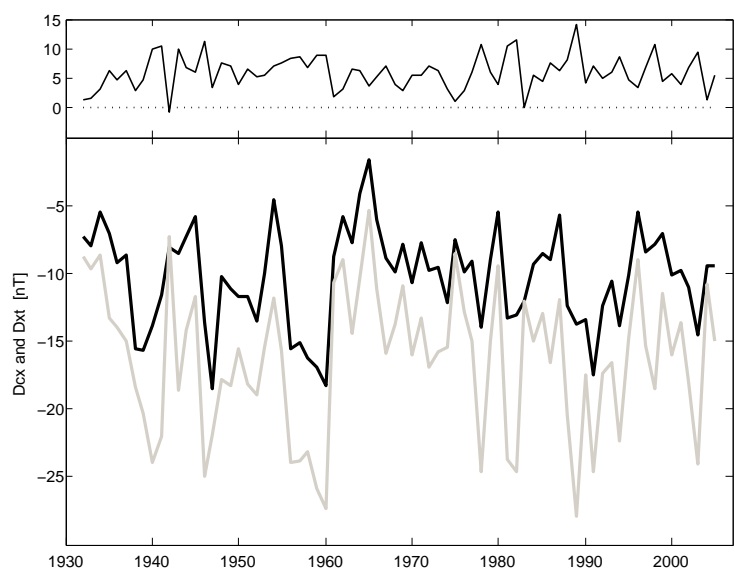
Indeksien merkittävä tasoero näkyy myös Kuvassa 5, jossa on esitetty Dcx- ja Dxt-indeksien

Kuva 3: Dcx-indeksin (musta käyrä) ja Dxt-indeksin (harmaa käyrä) keskimääräinen käyttäytyminen geomagneettisten myrskyjen aikana kuukausittain vuosina 1932-2005. Katkoviiva esittää samojen käyrien erotusta.

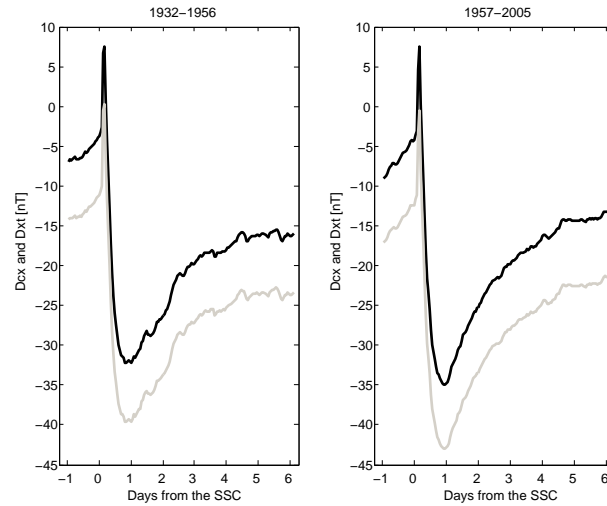


keskimääräinen käyttäytyminen geomagneettisten myrskyjen aikana vuosina 1932-1956 ja 1957-2005 (Karinen ja Mursula, 2006). Vaikka tasoero muuttuu, on myrskyjen päivittäinen kehitys samanlainen kummassakin indeksissä. Toisaalta näyttäisi siltä, että keskimääräinen käyttäytyminen on hieman erilainen viime vuosisadan ensimmäisellä (1932-1956) kuin jälkipuoliskolla (1957-2005). Myrskyt ovat tulleet keskimäärin hieman voimakkaimmiksi ja niiden palautuminen hieman nopeammaksi. On huomattava, että molemmat indeksit osoittavat nämä erot täysin samalla tavalla. Mahdollinen syy näihin eroihin voi olla myrskyjä synnyttävien koronan massapurkausten ja aurinkotuulen nopeiden virtausten suhteellisten osuuksien muutos Auringon toiminnan muuttuessa pitkällä aikavälillä. Tällainen muutos voi olla seurausta Auringon aktiivisuuden kasvusta sadan viime vuoden aikana.

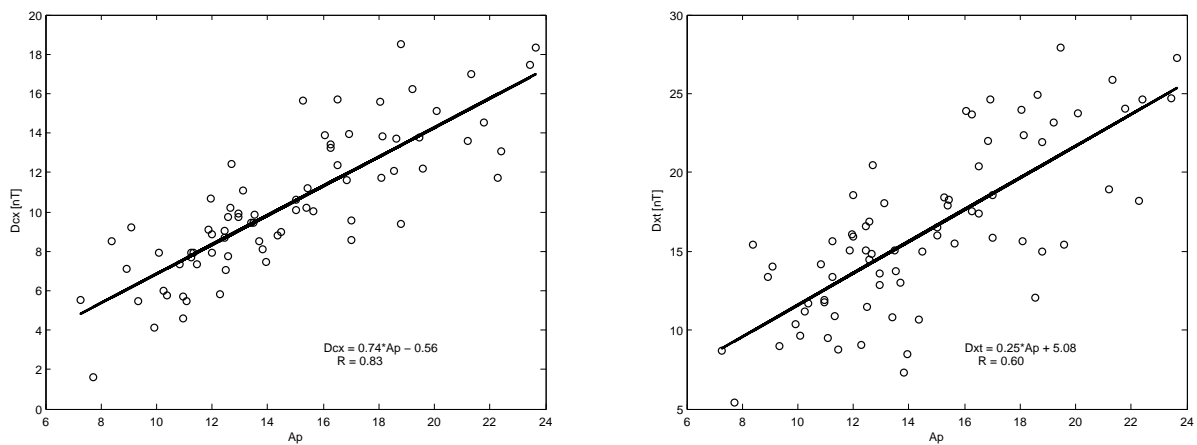
Kuva 4: Alakuva: Dcx-indeksin (musta käyrä) ja Dxt-indeksin (harmaa käyrä) vuosikeskiarvot vuosina 1932-2005. Yläkuva: Samojen indeksien erotus.



Kuva 5: Dcx-indeksin (musta käyrä) ja Dxt-indeksin (harmaa käyrä) keskimääräinen käyttäytyminen geomagneettisten myrskyjen aikana vuosina 1932-1956 (vasen kuva) ja 1957-2005 (oikea kuva).



Dst-indeksin korjaus Dcx-indeksiksi parantaa myös indeksin korrelaatiota moniin muihin Auringon ja lähiavaruuden häiriöisyyttä mittaavien muuttujien kanssa. Kuva 6 esittää geomagneettista aktiivisuutta kuvaavan Ap-indeksin korrelaatiota Dcx-indeksin ja Dxt-indeksin kanssa. Parempi korrelaatio kuvastaa sitä, että Dcx-indeksi on huomattavasti puhtaammin avaruuden häiriötilaa kuvaava suure kuin alkuperäinen Dst-indeksi, joka siis sisältää merkittävän suuren, häiriötilasta riippumattoman komponentin.



Kuva 6: Dcx-indeksin (vasen kuva) ja geomagneettista aktiivisuutta kuvaavan Ap-indeksin välinen korrelaatio ($R=0.83$) on merkittävästi parempi kuin Dxt-indeksin (oikea kuva) ja Ap-indeksin välinen korrelaatio ($R=0.60$).

4. LOPPUSANAT

Geomagneettisiä myrskyjä kuvaava Dst-indeksi sisältää komponentin, joka on riippumaton magneettisesta häiriöisyydestä eikä siten kuulu po. häiriöindeksiin. Sen vuoksi me olemme hieinan muuttaneet Dst-indeksin laskumenetelmää ja laskeneet korjatun Dst-indeksin, eli ns. Dcx-indeksin. Dcx-indeksi korjaa Dst-indeksiä (ja sen pidennettyä versiota, Dxt-indeksiä) keskimäärin noin 6 nT:lla, mikä merkitsee tyypillisesti lähes kolmanneksen muutosta Dst:n vuosiar-

voihin. Yksittäisen myrskyn Dst/Dxt-indeksin taso voi nousta jopa 45 nT, mutta päivittäinen kehitys pysyy samanmuotoisena.

Korjaus vaihtelee vuodenajan mukaan ollen suurimmillaan keväisin ja syksyisin. Se on niin merkittävä, että se muuttaa myrskyjen keskinäistä suuruutta ja jopa myrskyjen intensiteettien perusteella tehtyä luokitusta. Lisäksi korjaus muuttaa Dst-indeksin suhdetta aurinkotuuleen ja interplanetaariseen magneettikenttään.

Dst-indeksin ajallinen jatko 1930-luvulle indikoi, että myrskyjä tuottavissa olosuhteissa, erityisesti CME:iden ja CIR:iden suhteellisissa osuuksissa on tapahtunut merkittävää laadullista muutosta viime vuosisadan aikana. Nämä tulokset motivoivat indeksin jatkamiseen vieläkin aiemmas, ainakin viime vuosisadan alkuun.

LÄHTEET

- Cliver, E. W., Y. Kamide, A. G. Ling, and N. Yokoyama, 2001. Semiannual variation of the geomagnetic *Dst* index: Evidence for a dominant nonstorm component, *J. Geophys. Res.*, *106*, A10, 21297–21304.
- Karinen A., K. Mursula, and Th. Ulich, 2001. An erroneous *Dst* index in 1971, *Proc. of the SOLSPA 2001 Conference*, ESA-SP-477, 443-446.
- Karinen, A., and K. Mursula, 2005. A new reconstruction of the *Dst* index for 1932-2002, *Annales Geophysicae*, *23*, 475–485.
- Karinen, A., and K. Mursula, 2006. Correcting the *Dst* index: Consequences for absolute level and correlations, *J. Geophys. Res.*, *111*, A08207, doi:10.1029/2005JA011299, 8 pages.
- Sugiura, M., 1964. Hourly values of equatorial *Dst* for IGY, *Ann. Int. Geophys. Year*, *35*, 9.
- Sugiura, M., 1969. IAGA Resolution 2, p. 123, in *IAGA Bull.*, *27*, Madrid.
- Sugiura, M., and T. Kamei, 1991. Equatorial *Dst* index 1957-1986, in *IAGA Bull.*, *40*, edited by A. Berthelier and M. Menvielle, ISGI Publ. Off., Saint-Maur-des-Fossés, France, 1–246.