

Tähtitieteelliset anomaliat Lapin puiden vuosirenkaissa

6.5.2025
Joonas Uusitalo

Email: joonas.uusitalo@helsinki.fi

Taustaa

- Helsingin yliopisto, tähtitiede, FT 10/2025
- Väitöskirja Ajoituslaboratoriossa, jossa työskennellyt ~10 vuotta
- Osa Helsingin yliopiston Luonnontieteellistä keskusmuseota (Luomus)
- Perustettu v. 1968, Sijainti: Kumpula (Physicum), Helsinki
- Fokus: ajoitusmittaukset (radiohiili, termoluminesenssi) ja stabiili-isotooppimittaukset
- ~10 hengen tiimi, tutkimus erittäin monitieteellistä: geotieteet, arkeologia, bio- ja ympäristötieteet, tähtitieteet, teollisuus

Esityksen sisältö

- Pohjautuu väitöskirjaan (<https://helda.helsinki.fi/items/65e513f9-efec-400f-8ca4-5971f4bd80ff>)
- Radiohiilen perusteet: synty, hajoaminen ja ajoitusmenetelmä
- Miten tieto menneistä radiohiilipitoisuuksista tallentuu puihin
- Näytteiden esikäsittelystä ja mittaamisesta
- Radiohiilianomaliat puiden vuosirenkaissa: vuosi 774/775 ("Miyake-tapahtuma"), vuoden 1054 supernova, vuoden 1859 Carringtonin aurinkomyrsky
- Esittääkää kysymyksiä!

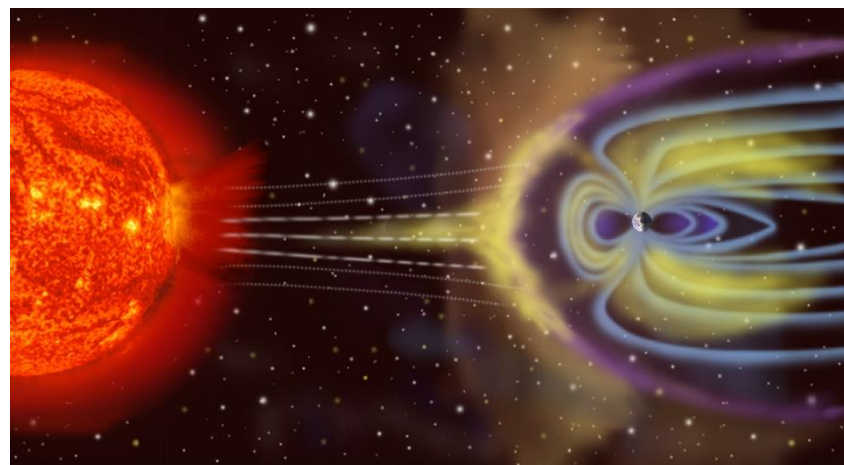
Perusteet: radiohiilen synty

- Radiohiili on hiilen isotooppi
- Määritelmä: Isotooppi on saman alkuaineen atomi, jolla on **sama määrä protoneja** (eli sama järjestysluku), mutta **eri määrä neutroneja** atomiytimessä.
- Maapallolla valtaosa ^{12}C :tä, noin 1% ^{13}C :tä, yksi biljoonasosa ^{14}C :tä
- Radiohiili syntyy yläilmakehän ydinreaktioissa (enimmäkseen galaktiset kosmiset säteet, mutta myös auringosta tulevat)
- $n + ^{14}\text{N} \rightarrow ^{14}\text{C} + p$
- Ilmakehässä syntynyt ^{14}C yhtyy nopeasti happeen ja muodostuu hiilidioksidia ($^{14}\text{CO}_2$) -> päätyy osaksi hiilen kiertoa

Isotooppi	Z	N	M	Osuus	Tyyppi
^{12}C	6	6	12	0,99	Pysyvä eli stabiili
^{13}C	6	7	13	0,01	Pysyvä eli stabiili
^{14}C	6	8	14	10^{-12}	Rad.akt.

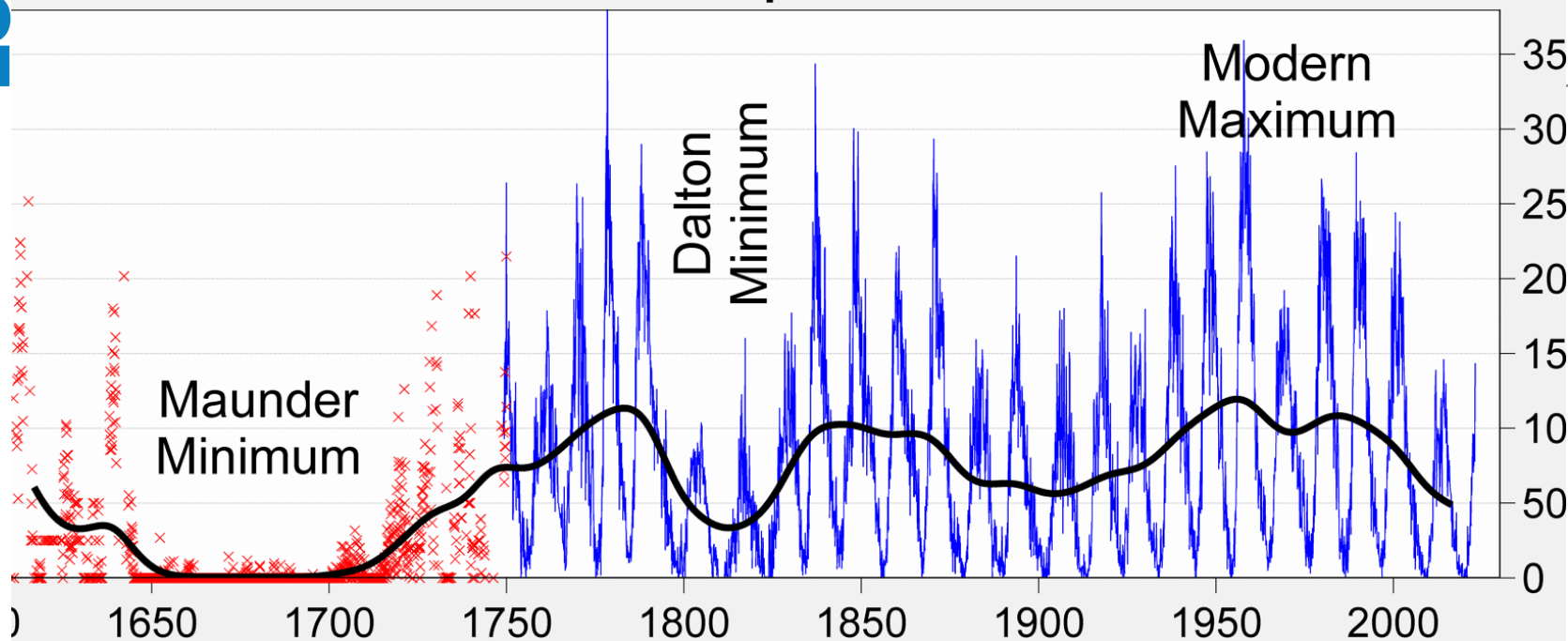
Perusteet: radiohiilen synty

- Radiohiilen syntyä säätelee: maan magneettikenttä (pitkä), 11 vuoden aurinkosykli (lyhyt)
- Voimakas aurinkotuuli -> vähemmän galaktisia kosmisia säteitä -> vähemmän ^{14}C -tuotantoa
- Maan magneettikenttä vaikuttaa myös tuotannon jakaumaan: auringosta purkautuvat energiset hiukkaset (protonit) ohjautuvat navoille (korkeaenergiset kosmiset säteet välittävät vähemmän)
- -> tärkeä seikka Lapin puiden kannalta

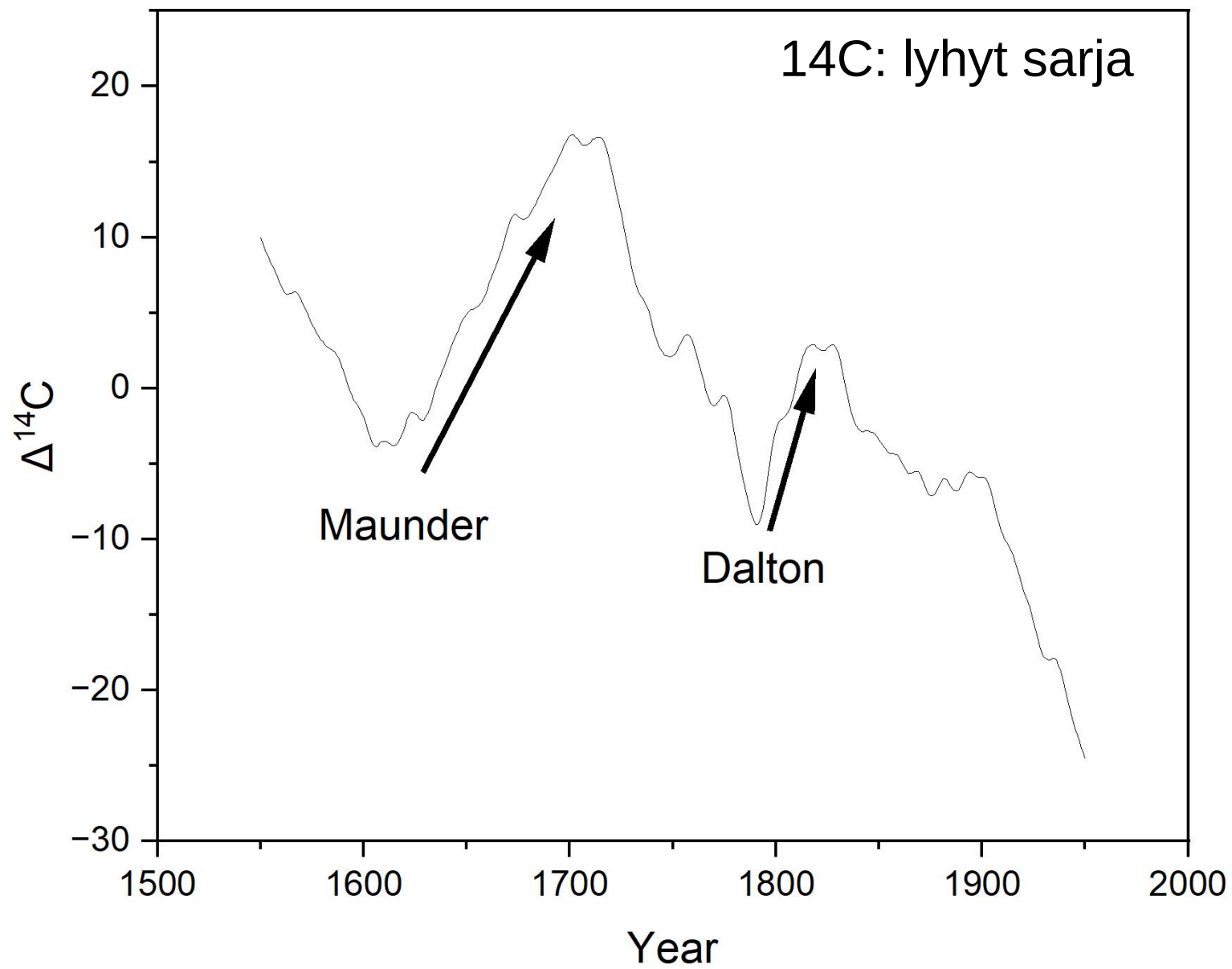


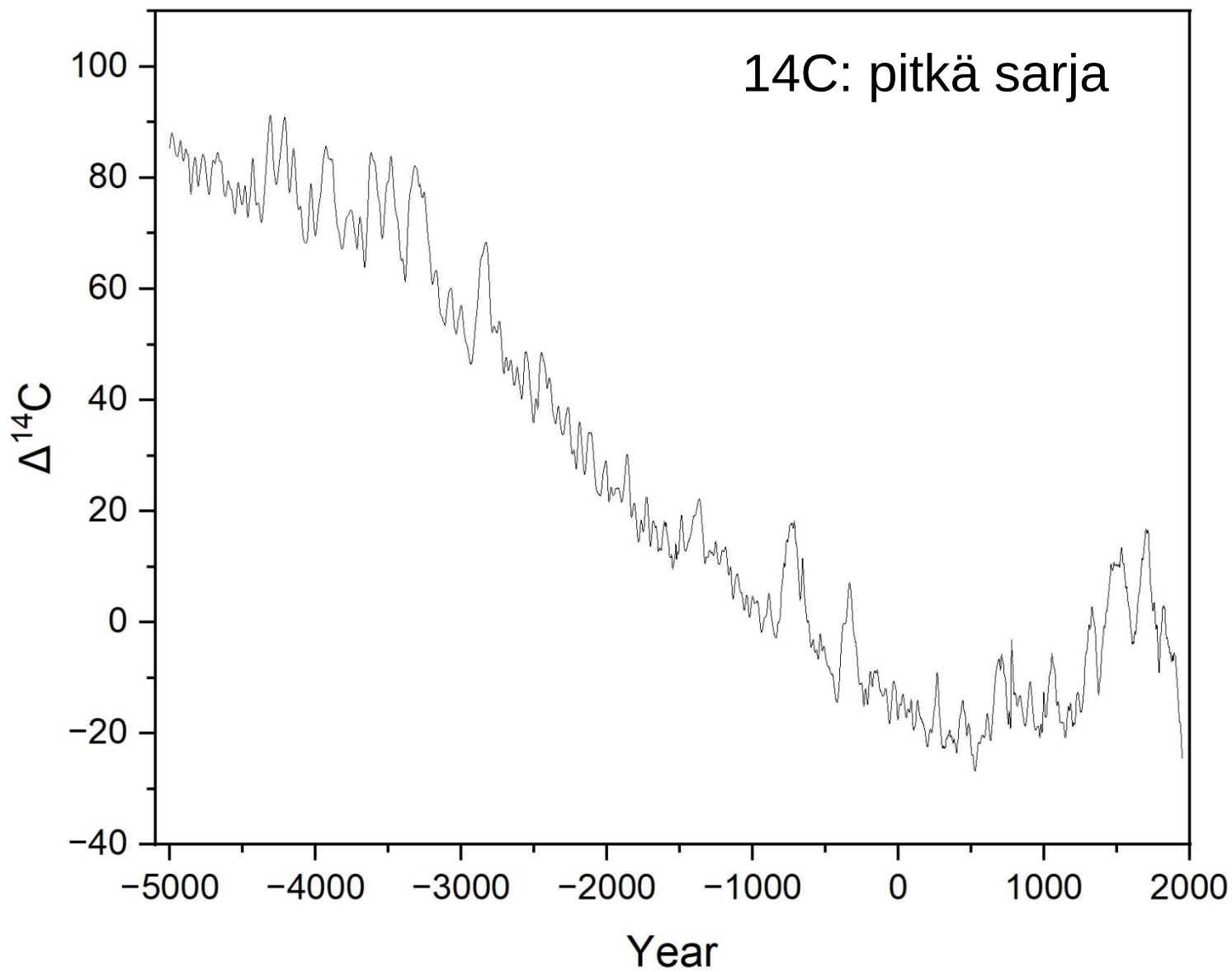
Lähde:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetosphere>

400 Years of Sunspot Observations



Lähde: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cycle



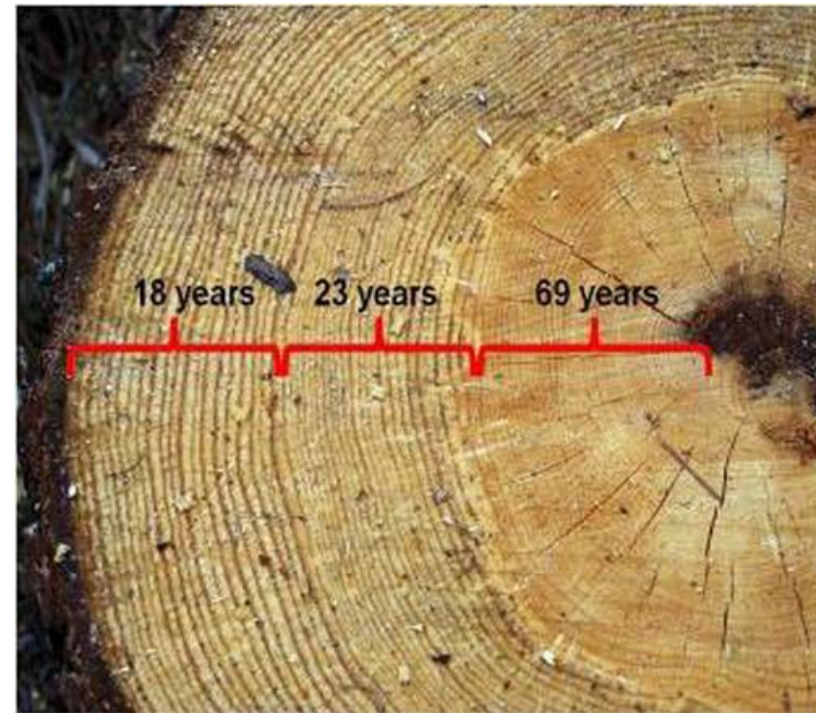


Perusteet: hajoaminen ja ajoitus

- Radiohiili on radioaktiivinen isotooppi ja sillä on puoliintumisaika: 5730 vuotta
- Kun organismi kuolee, se lakkaa vaihtamasta hiiltä ympäristön kanssa: ei uutta hiiltä, ^{14}C :n määrä alkaa tippua -> ikä voidaan laskea matemaattisesti
- Pitoisuudet mitataan hiukkaskiihdyttimellä
- Teoreettinen maksimi noin 50000 vuotta

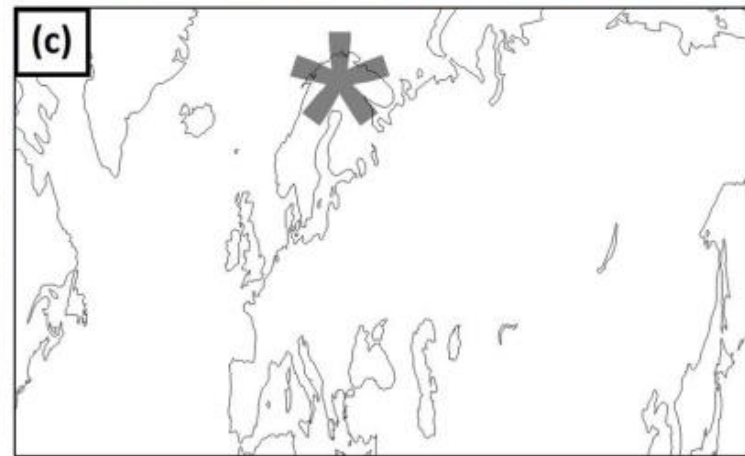
Perusteet: fotosynteesi

- Puut tallentavat tietoa ympäristöstä mm. fotosynteesin kautta
- $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{valo} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$
- Siis hiilidioksidi+vesi+energia -> rakennusaineet (hiilihydraatit, selluloosa)
- Ilmakehän kasvukauden radiohiilipitoisuus siis tallentuu puun puussa vuosirenkaina.
- Oleellista: kasvukauden olosuhteista tallentuu tietoa tietyn vuoden vuosirenkaaseen atomitasolla (eri isotoopit)
- Ei pelkästään ^{14}C , vaan myös ^{13}C , ^{18}O ym.

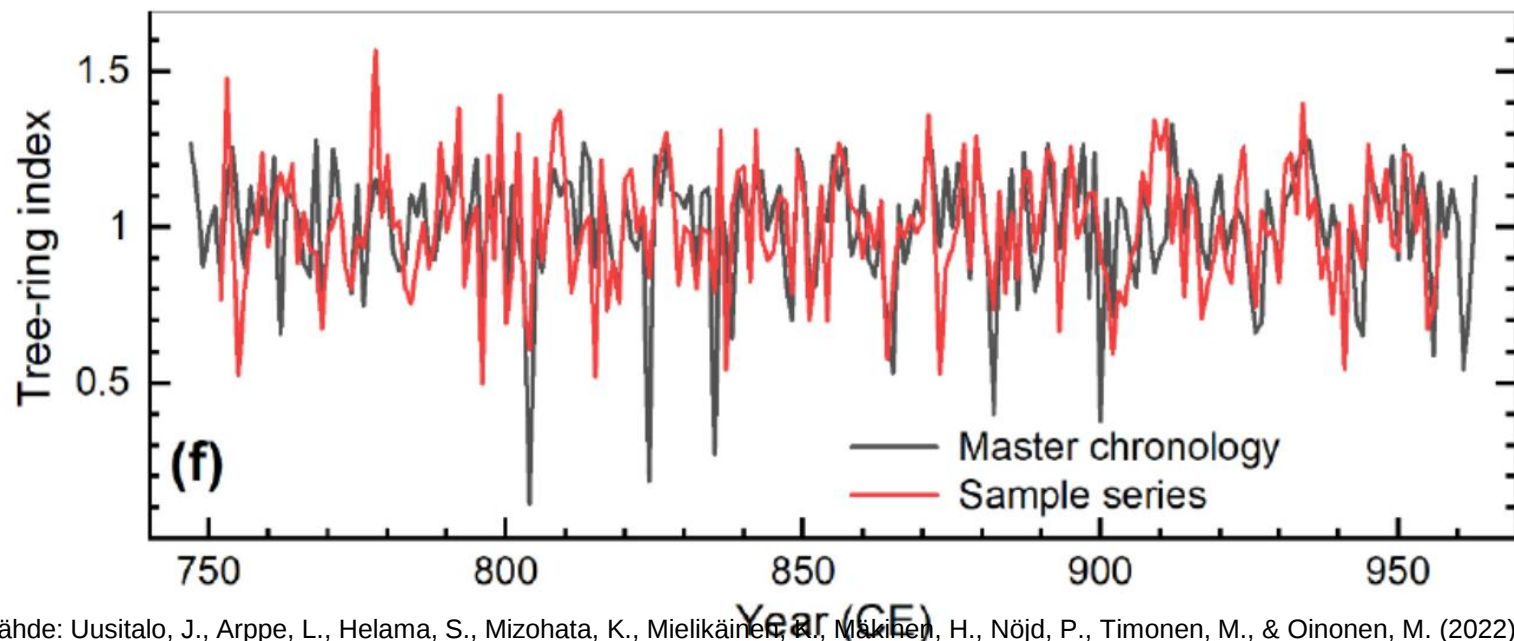


Perusteet: dendrokronologia

- Vuosirenkaita voi laskea yksitellen menneisyyteen, leveysvaihtelut kertovat ilmasto-olosuhteista (leveä rengas: lämmintä; kapea rengas: kylmää)
- Ongelma: puut (Suomessa) elävät enimmillään joitain satoja vuosia (männyt 200-400 vuotta).
- Mutta: Lapin järvissä puut voivat säilyä tuhansia vuosia hapettomissa olosuhteissa
- Ratkaisu: ristiinajoittaminen.



Lähde: Helama, S., Arppe, L., Uusitalo, J. *et al.* Volcanic dust veils from sixth century tree-ring isotopes linked to reduced irradiance, primary production and human health. *Sci Rep* **8**, 1339 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19760-w>



Lähde: Uusitalo, J., Arppe, L., Helama, S., Mizohata, K., Mielikäinen, A., Mäkinen, H., Nöjd, P., Timonen, M., & Oinonen, M. (2022). From lakes to ratios: 14C measurement process of the Finnish tree-ring research consortium. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 519, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.03.013>

- Puiden vuosirenkaiden leveysvaihteluista löytyy yhteisiä pätkiä ja siten voidaan ratkaista vuosituhansia kattava ”palapeli” ja luoda jatkuva aikasarja
- Löydä puu -> mittaa vuosirenkaiden leveydet -> etsi tilastollisesti yhteensopiva puu
- Yhteistyökumppanimme Luonnonvarakeskus (LUKE) on rakentanut 7600 vuotta jatkuvan sarjan
- -> mistä tahansa ajankohdasta vuodentarkkuudella tietoa

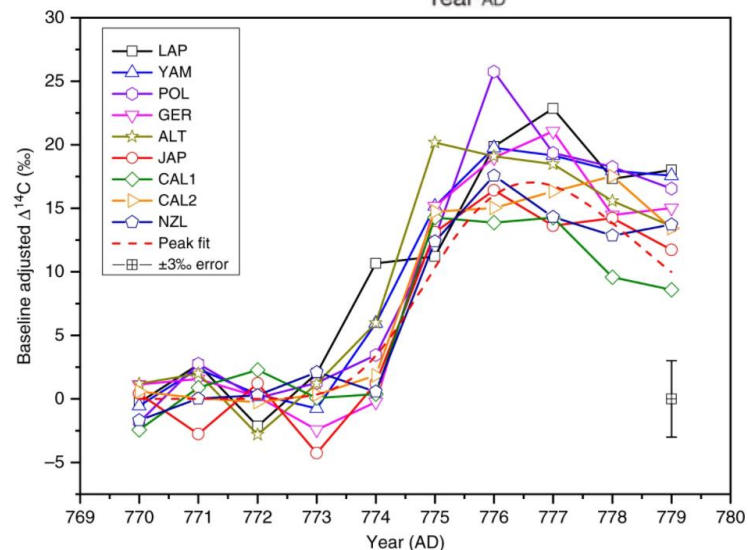
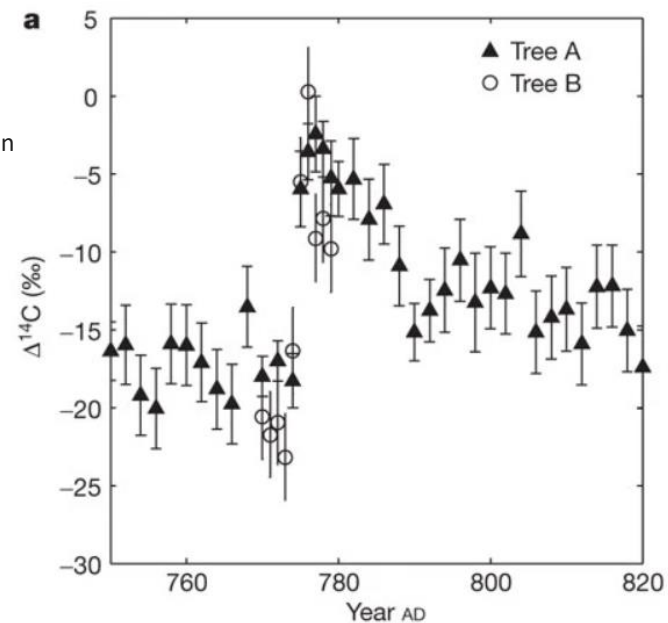
Kertausta

- Radiohiiltä syntyy ilmakehän yläkerroksissa (stratosfäärissä)
- Radiohiili yhtyy happeen ($14\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 14\text{CO}_2$) ja virtaa ja sekoittuu laajemmin myös alailmakehään (stratosfääri $\rightarrow$ troposfääri).
- Radiohiilen pitoisuuksien muutokset tallentuvat puiden vuosirenkaisiin fotosynteesin kautta. Muutokset voidaan mitata puiden vuosirenkaista vuoden tarkkuudella.
- Kysymyksiä?

Vuoden 774/775 Miyake-anomalia

Lähde: Miyake, F., Nagaya, K., Masuda, K. *et al.* A signature of cosmic-ray increase in AD 774–775 from tree rings in Japan. *Nature* **486**, 240–242 (2012).
<https://doi.org/10.1038/nature11123>

- Vuonna 2012 japanilainen tutkimusryhmä havaitsi äkillisen piikin puiden vuosirenkaista mitatuissa radiohiilipitoisuuksissa
- Syy oli aluksi mysteeri, ehdotuksia vuosien varrelta: komeetta maahan, supernovaräjähhdys, lyhyt gammapurkaus, komeetta aurinkoon...
- Löytö oli jokseenkin vallankumouksellinen radiohiilialalla
- Sittemmin löytynyt lisää: 1279 jaa., 1052/1054 jaa., 993 jaa., 660 eaa., 800 eaa., 5259 eaa., 5410 eaa., 7176 eaa. ja 12351 eaa.
- Oma hypoteesimme: jos syy auringonpurkaus, tuloksissa voisi näkyä paikallista vaihtelua



Lähde: Uusitalo, J., Arppe, L., Hackman, T. *et al.* Solar superstorm of AD 774 recorded subannually by Arctic tree rings. *Nat Commun* **9**, 3495 (2018).
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-05883-1>

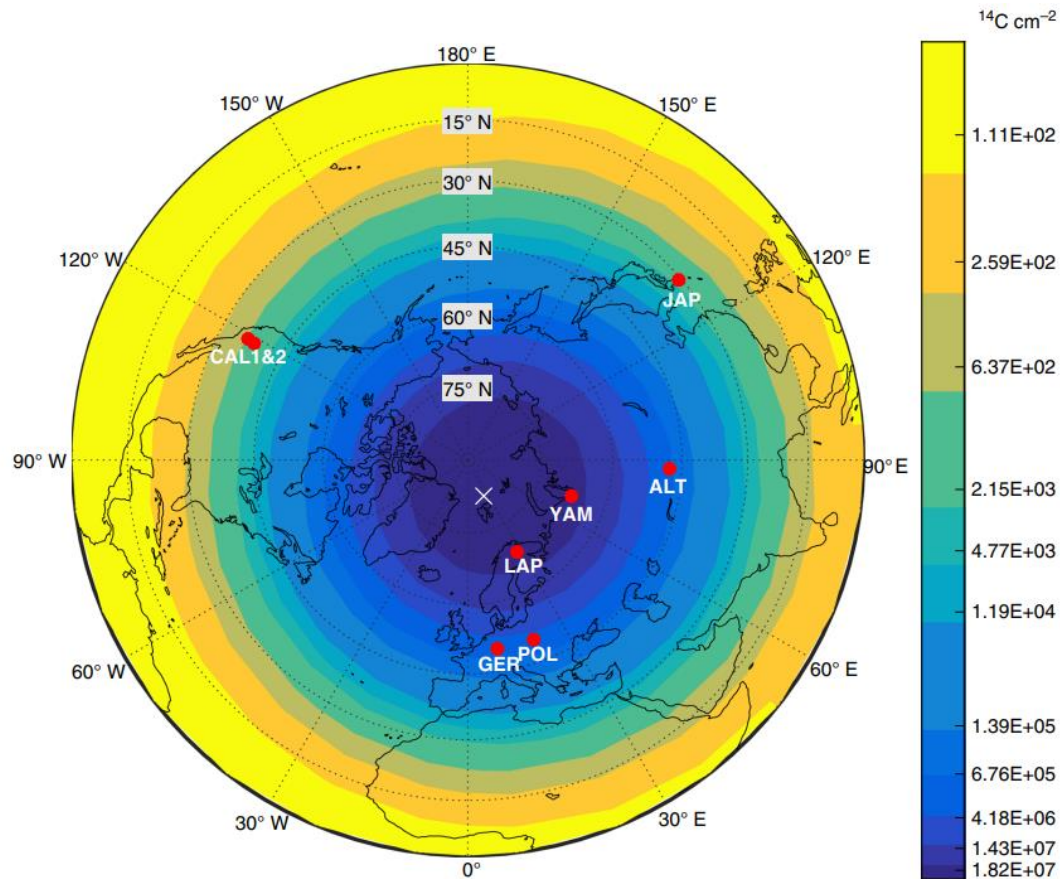
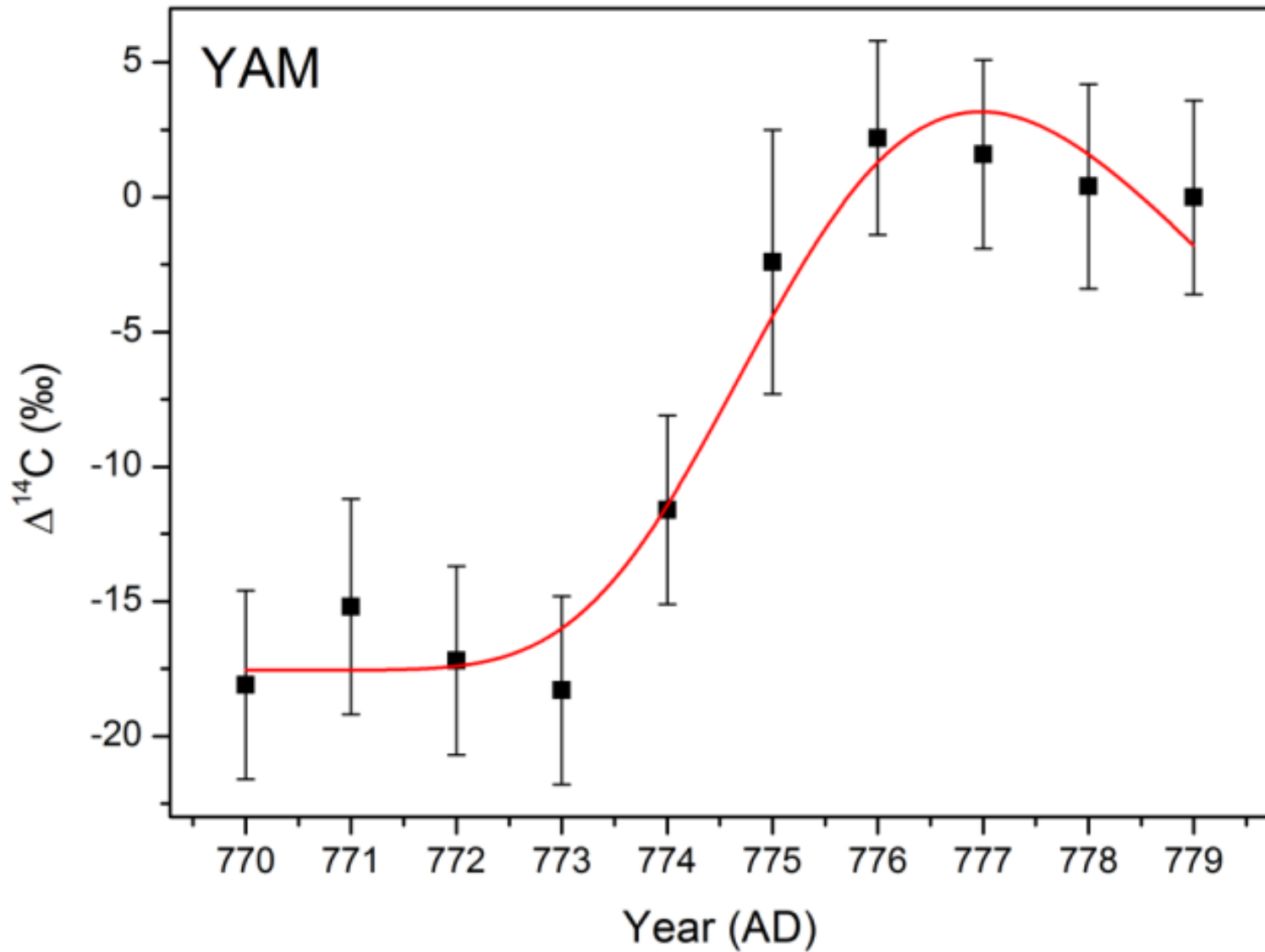


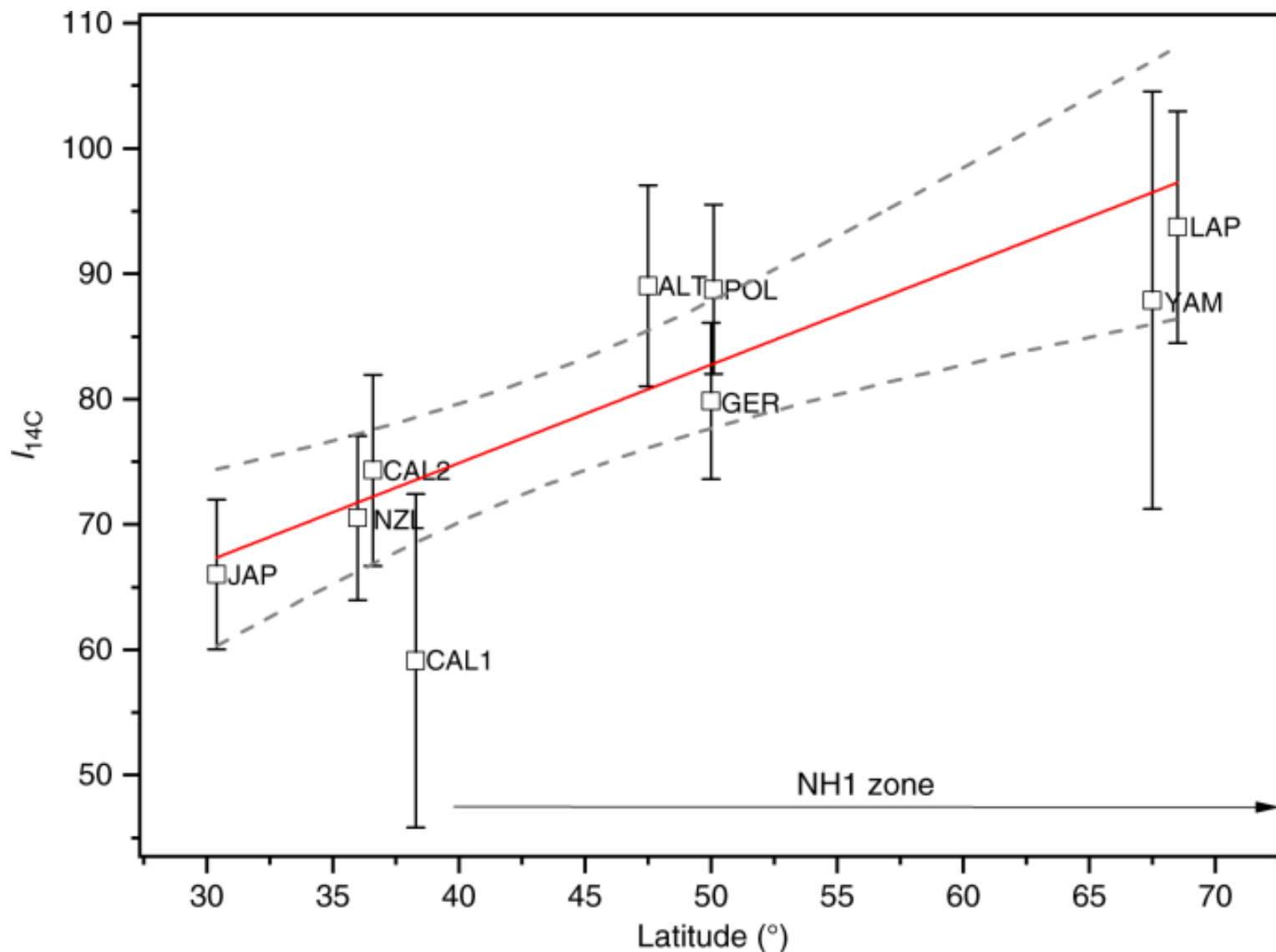
Fig. 1 Map of the study region. The colour codes show the latitudinal differences of ^{14}C production rate ($^{14}\text{C cm}^{-2}$) for a typical strong SPE (such as 23 February 1956, the strongest directly observed event, Supplementary Table 2). The ^{14}C production model³⁶ is described in the Methods section. The red full circles with three-letter coding show the measurement locations for ^{14}C intensities (see text). The cross illustrates the location of the Geomagnetic North Pole in AD 775

- Valtaosa auringonpurkauksen tuottamasta radiohiilestä tuotetaan korkeilla leveysasteilla (Maan magneettikenttä ohjaa)

Lähde: Uusitalo, J., Arppe, L., Hackman, T. *et al.* Solar superstorm of AD 774 recorded subannually by Arctic tree rings. *Nat Commun* 9, 3495 (2018).
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-05883-1>



Lähde: Uusitalo, J., Arppe, L., Hackman, T. *et al.* Solar superstorm of AD 774 recorded subannually by Arctic tree rings. *Nat Commun* 9, 3495 (2018).
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-05883-1>

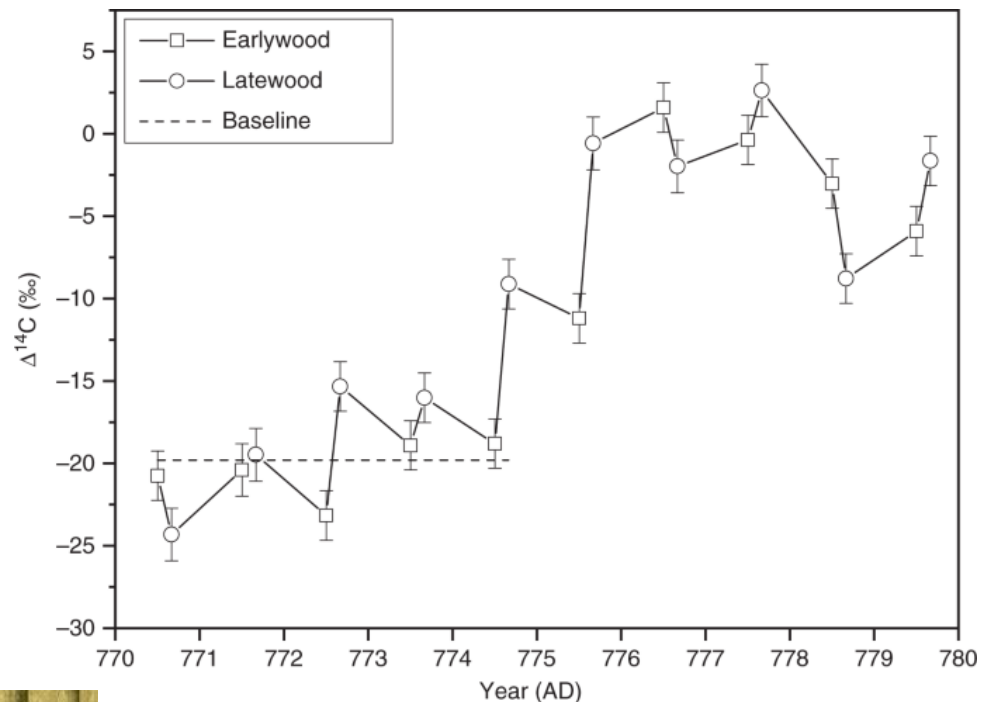


- Tapahtuman intensiteetti vs. leveysaste: korrelaatio! Tukee aurinkohypoteesia

Lähde: Uusitalo, J., Arppe, L., Hackman, T. *et al.* Solar superstorm of AD 774 recorded subannually by Arctic tree rings. *Nat Commun* 9, 3495 (2018).
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-05883-1>

Vuoden 774 Miyake-tapahtuma

- Lapin data näyttää nousevan jo ennen muita
- Hiilenkiertomalli ennusti tapahtuman ajankohdaksi vuoden 774 keskikesän
- Vuosirenkaat voi erotella kevätkasvuun (kevät-keskikesä) ja kesäkasvuun (keskikesä-syksy): voisimmeko nähdä eroa ^{14}C -pitoisuuksissa?
- Kevätkasvu pysyy samalla tasolla, mutta kesäkasvu nousee!
- Rajaa tapahtuman keväälle 774

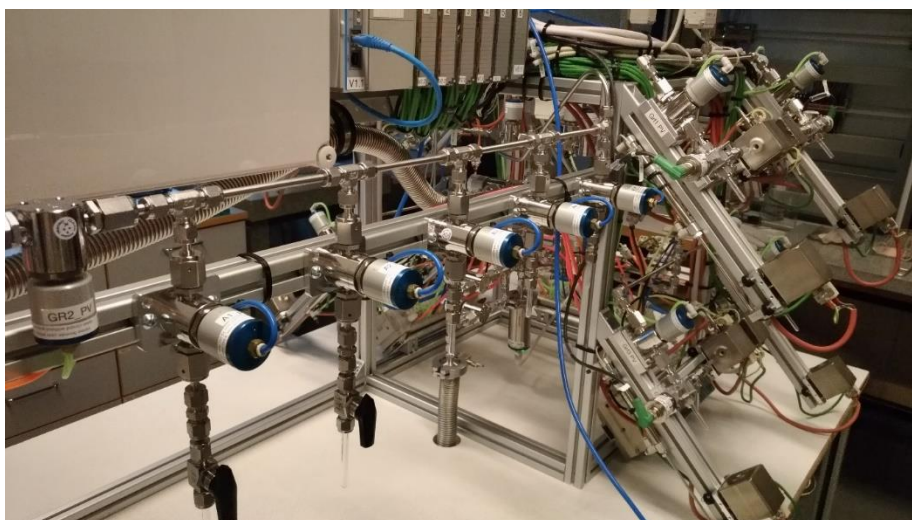


Lähde: Uusitalo, J., Arppe, L., Hackman, T. *et al.* Solar superstorm of AD 774 recorded subannually by Arctic tree rings. *Nat Commun* **9**, 3495 (2018).
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-05883-1>



Kuvat ottanut: Hannu herva, Joonas Uusitalo

Näytteiden esikäsittely & mittaaminen



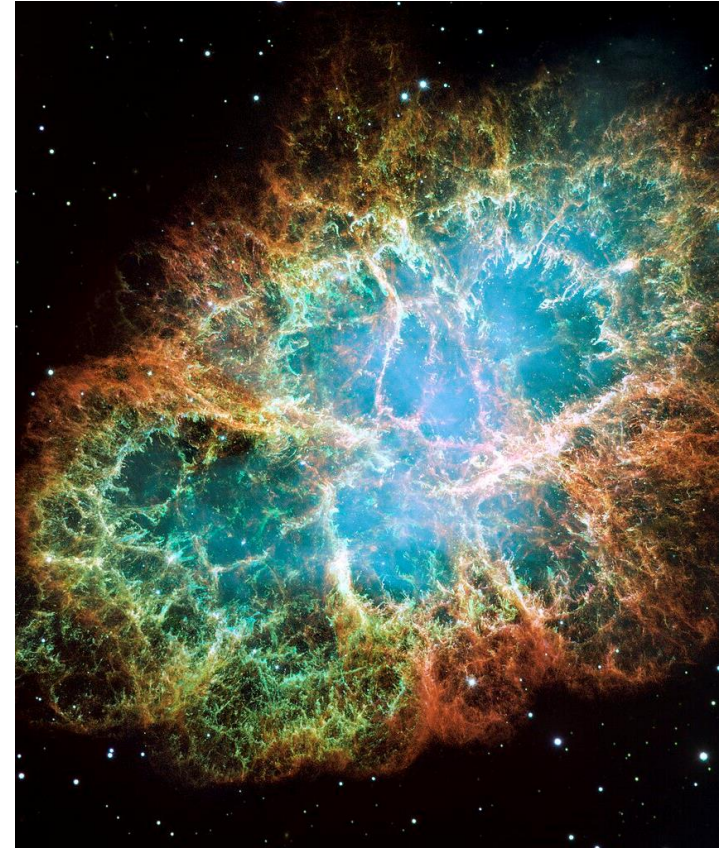
- Kemiallinen esikäsittely
-> selluloosa ->
poltetaan CO₂:ksi ->
pelkistetään kiinteäksi
hiileksi (grafiitti) ->
lähetetään
hiukkaskiihdyttimelle
mitattavaksi -> tulosten
koostaminen -> analyysi

Lähde: Uusitalo, J., Arppe, L., Helama, S., Mizohata, K., Mielikäinen, K., Mäkinen, H., Nöjd, P., Timonen, M., & Oinonen, M. (2022). From lakes to ratios: 14C measurement process of the Finnish tree-ring research consortium. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 519, 37–45.

<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.03.013>

Supernova SN1054: taustaa

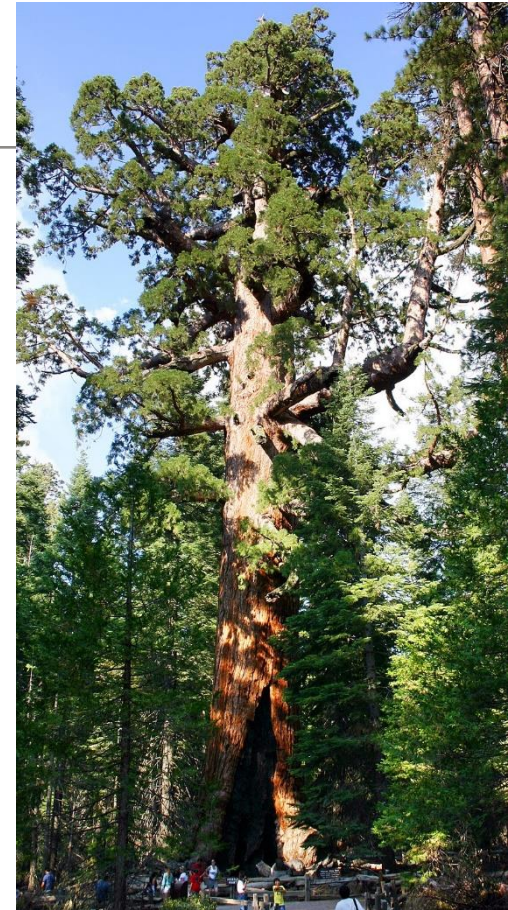
- Kun riittävän iso tähti ”kuolee”, se räjähtää supernovana. Supernovaräjähdyksissä vapautuu nopeasti valtava määrä energiaa.
- SN1054 on yksi tunnetuimmista supernovaräjähdyksistä, se havaittiin mm. Kiinassa ja Lähi-idässä v. 1054. Taivaalle syntyi uusi ”tähti”, joka näkyi siellä yli vuoden.
- Teoriassa supernovaräjähdyksen gammasäteet voisivat äkillisesti lisätä radiohiilen tuotantoa Maan ilmakehässä
- Tällaista signaalia ei ole kuitenkaan koskaan havaittu 14C-aineistossa.



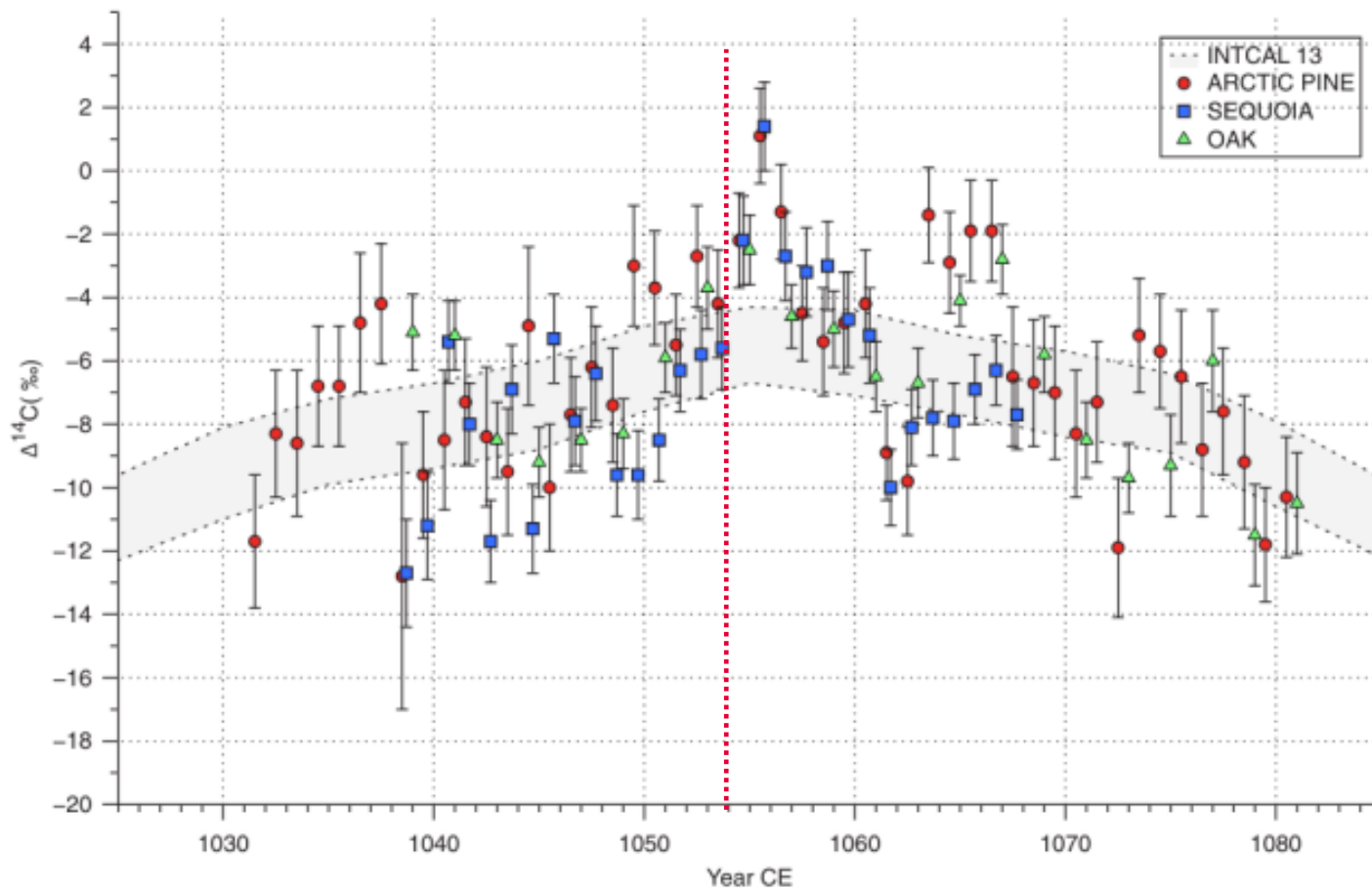
Rapusumu. Supernova SN1054:n jäännne

Vuoden 1054 supernova: taustaa

- Idea mitata radiohiili supernova SN1054:n vaikutuksesta sai alkunsa tieteellisissä konferenssissa
- Italialainen Prof. Filippo Terrasi ehdotti yhteistyötä (omisti alustavaa dataa)
- Ajatus oli, että supernovan tapauksessa ei pitäisi näkyä leveysastevaikutusta
- Alettiin puuhata yhteistyötä Ajoituslaboratorion, LUKEn, CIRCE:n ja Debrecenin yliopiston kanssa.
- Lapin puiden osuus: Luke leikkasi näytteitä vuosirenkaista, me keitimme selluksi, mittaukset CIRCEssä ja Debrecenissä
- Lisäksi kevät-kesäpuumittaukset Sierra Nevadan mammuttipetäjästä (*Sequoiadendron giganteum*)



Mammuttipetäjä. Kuva: Wikipedia

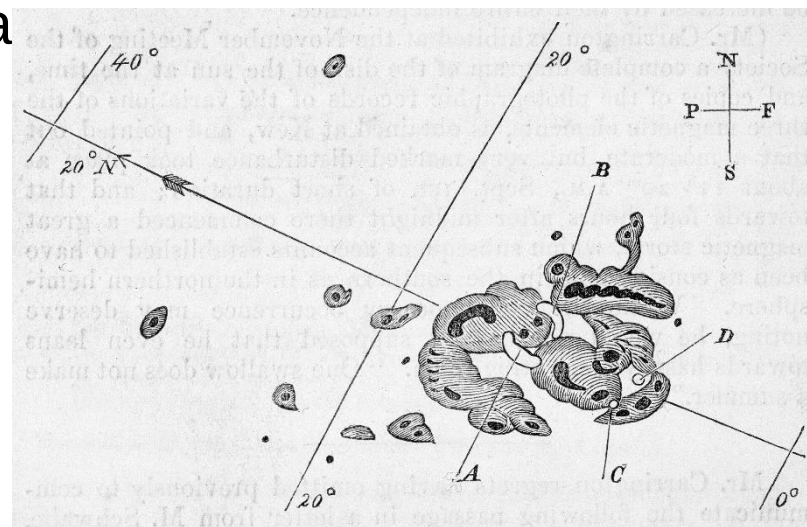


Lähde: Terrasi, F., Marzaioli, F., Buompane, R., Passariello, I., Porzio, G., Capano, M., ... Usoskin, I. (2020). CAN THE 14C PRODUCTION IN 1055 CE BE AFFECTED BY SN1054? *Radiocarbon*, 62(5), 1403–1418. doi:10.1017/RDC.2020.58

- 14C-pitoisuudet nousevat havaitun supernovan jälkeen!
- Mutta: auringon 11 vuoden aktiivisuussykli aiheuttaa myös vaihtelua, voisiko johtua siitä?
- Syklin "siivoamisen" jälkeen edelleen signaali (mutta siivoaminen hankalaa)

Carringtonin tapahtuma

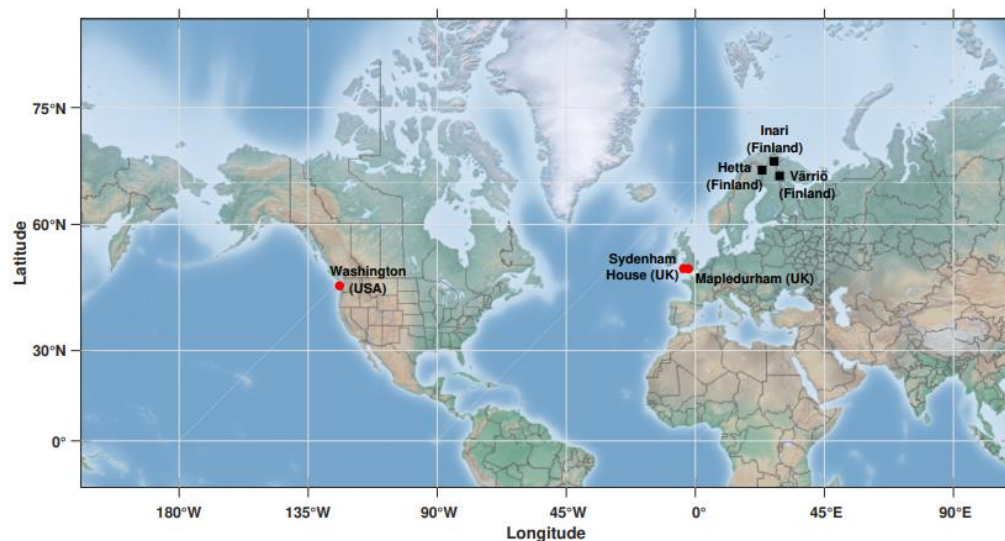
- 1.9.1859 Richard Carrington havaitsi valtavan auringonpurkauksen.
- Revontulia jopa Karibialla ja Havaijilla
- Lennätinjärjestelmissä häiriöitä, kipinöitä, tulipaloja
- Voisi häiritä sähköverkkoja, satelliitteja, GPS:ää, tietoliikennettä
- Mahdolliset globaalit vahingot nykyään biljoonia euroja
- Silti: vuoden 774 Miyake-tapahtuma 10X suurempi!



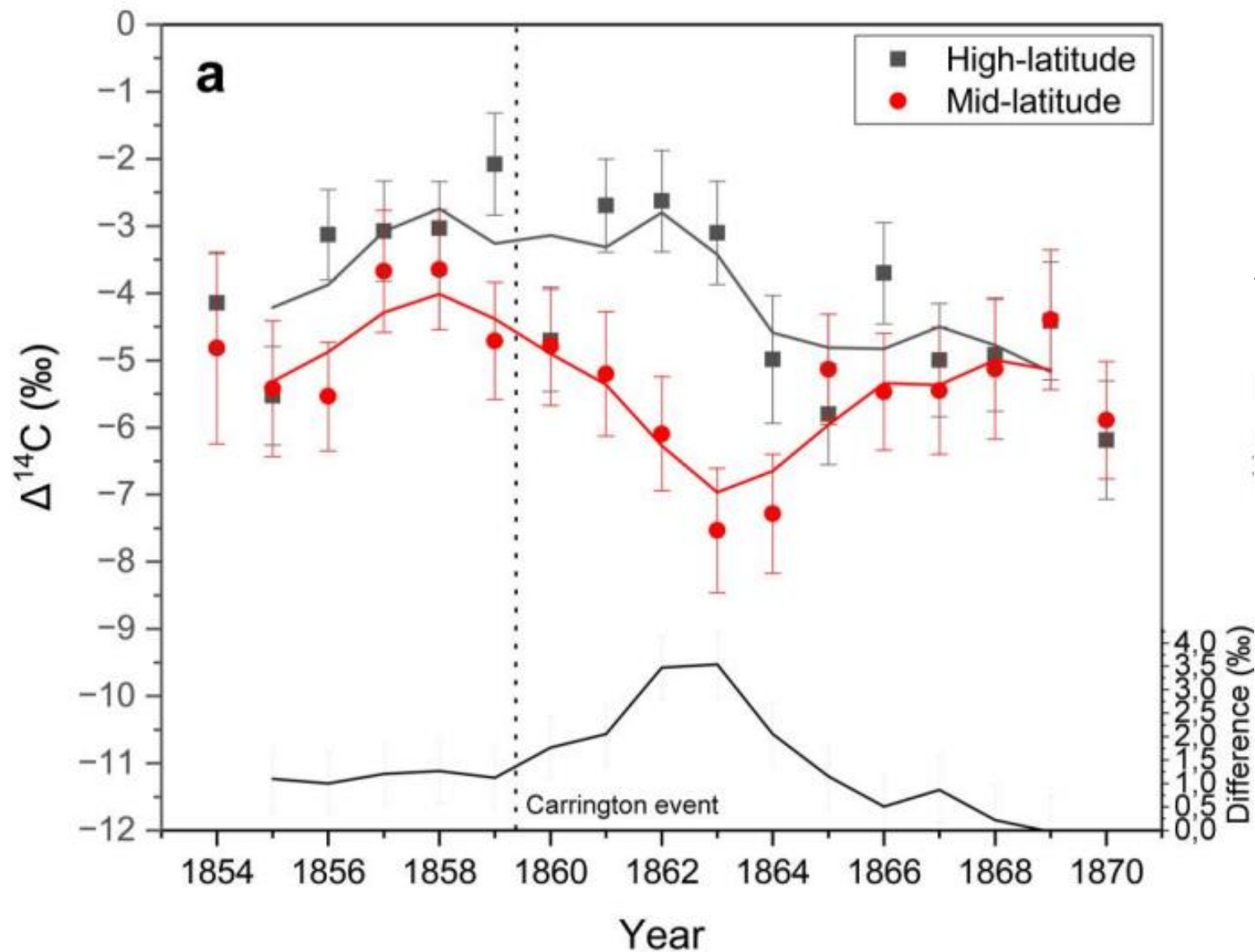
Lähde: https://en.wikipedia.org/wiki/Carrington_Event

Carringtonin tapahtuma

- Carringtonin tapahtumaa ei kuitenkaan ole jättänyt merkkiä ^{14}C -aineistoihin (eikä jääkairauksiinkaan)
- Toisaalta, kaikki aikaisemmat mittaukset ovat olleet alemmilla leveysasteilta
- Ajatus: ehkä pohjoisen puut ovat tallentaneet jotain, mitä ei näy muualla
- Kattava koejärjestely: Kolme puuta (Inari, Värriö, Hetta), kolme laboratoriota (Suomi, Japani, Sveitsi) -> virhelähteet ja vinoumat minimiin



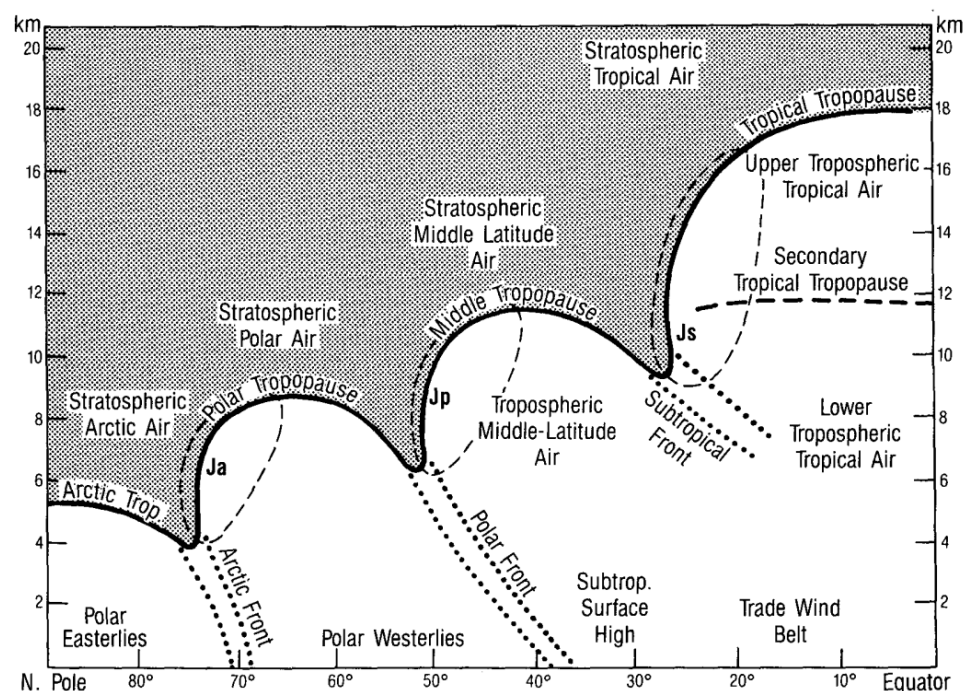
Lähde: Uusitalo, J., Golubenko, K., Arppe, L., Brehm, N., Hackman, T., Hayakawa, H., et al. (2024). Transient offset in ^{14}C after the Carrington event recorded by polar tree rings. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL106632. <https://doi.org/10.1029/2023GL106632>



Lähde: Uusitalo, J., Golubenko, K., Arppe, L., Brehm, N., Hackman, T., Hayakawa, H., et al. (2024). Transient offset in ^{14}C after the Carrington event recorded by polar tree rings. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL106632. <https://doi.org/10.1029/2023GL106632>

Carringtonin tapahtuma: tulkintaa

- 14C tuotetaan pohjoisten alueiden yläilmakehässä
- Polaaripyörre eristää ylimäärää, hajoaa keväisin
- Ylimäärä näkyy ensimmäisenä Arktisilla alueilla, liukenee suuremmissa tilavuuksissa

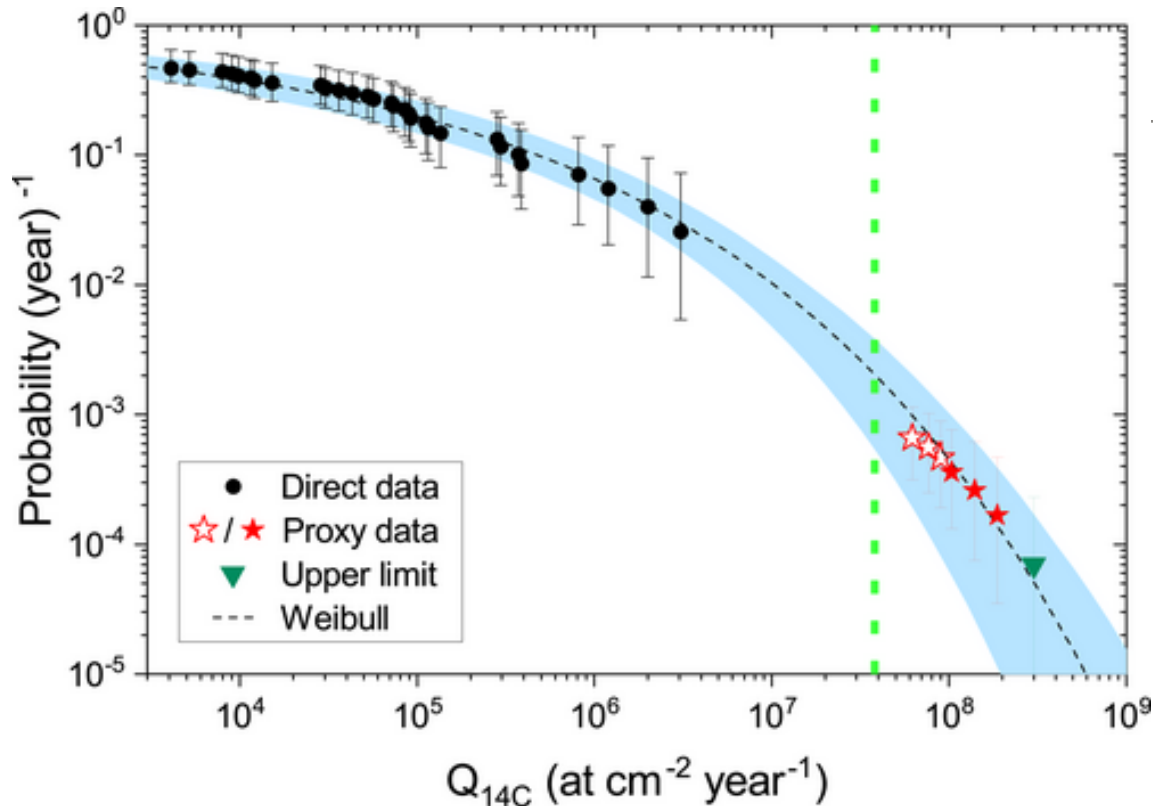


Lähde: Shapiro, M. A., T. Hampel, and A. J. Krueger, 1987: The Arctic Tropopause Fold. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 444–454,

Carringtonin tapahtuma: tulkintaa

- Vaihtoehtoisia selityksiä:
- 1) Aurinkosykli aiheuttaa paikkakohtaisia eroja (olisi itsessään kiinnostava ja uusi tulos)
- 2) Ilmakehän kierron ilmiö
- Miten tutkia lisää? Tarvitaan laadukkaita lisämittauksia. Mahdollisia kandidaatteja vuosilta 1582, 1730 and 1770 (historiallisia kuvauksia)

Miksi tärkeää tutkia?



Lähde: Usoskin, I. G., & Kovaltsov, G. A. (2021). Mind the gap: New precise ^{14}C data indicate the nature of extreme solar particle events. *Geophysical Research Letters*, 48(17), e2021GL094848. doi:10.1029/2021GL094848

Saamme parempaa tietoa pienemmistä, mutta mahdollisesti vaarallisista auringon aiheuttamista uhista

Yhteenveto

- Lapin männyt tarjoavat erinomaisen ja tarkan aineiston radiohiilen pitoisuuksien historialliseen tarkasteluun.
- Radiohiili paljastaa kosmisia tapahtumia: Miyake-tyylisiä massiivisia auringonmyrskyjä, mutta mahdollisesti myös supernovaräjähdyksiä ja Carrington-tyyppisiä, Maata moukaroineita myrskyjä.
- Pohjoiset alueet ovat erityisroolissa Maan magneettikentän ja ilmakehän kiertoliikkeen vuoksi.
- Mitä tulevaisuudessa: Lapin mäntyjen vuosirenkaista saatavat satojen vuosien katkeamattomat radiohiiliaikasarjat ja niiden vertailu muihin aineistoihin avaisi uusia ovia