

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

Történelmi napciklusok epocháinak rekonstrukciója proxy adatok alapján

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Készítette:

Magyar Laura Gréta

Témavezető:

Dr. Petrovay Kristóf
egyetemi tanár

ELTE Földrajz- és Földtudományi Intézet
Csillagászati Tanszék



Budapest, 2022

Kivonat

A Földünket érő kozmikus sugárzás fluxusa és a napaktivitás közvetlen mérőszámát jelentő foltcsoportszám közötti antikorreláció jól ismert. A köztük lévő kapcsolat alapot szolgáltat a közel 11 éves periódusidejű napciklusok történelmi időkre vonatkozó rekonstrukciójához. Az alacsony földrajzi szélességeken észlelt sarki fény megfigyelések további adattal szolgálnak ezen rekonstrukciók helyességének ellenőrzésére.

Dolgozatomban különféle proxy adatok felhasználásával megkíséreltem rekonstruálni a Spörer- és Maunder-minimumok közötti hozzávetőlegesen évszázados hosszúságú időszak napciklusainak minimum és maximum epocháit.

Az általam empirikusan meghatározott legjobbnak ígérkező szűrési eljárás alapját ^{10}Be fluxus adatok képezik. A módszer kalibrációját foltcsoportszám adatokkal végeztem az 1700 és 1994 közötti időszakra vonatkozóan.

Ezt követően a rekonstrukció eredményeit összevetettem Usoskin et al. [2021] és Fogtmann-Schulz et al. [2019] ^{14}C adatokon végzett napciklus rekonstrukciójának epocháival, továbbá a Křivský and Pejml [1988] által összegyűjtött alacsony földrajzi szélességeken megfigyelt sarki fény észlelésekkel.

A rekonstruált napciklusok számozásához bevezetem a T_n jelölést, ahol T az első távcsővel megfigyelt napciklust jelenti („teleszkópikus”), míg n az ehhez képesti napciklusok számát.

A 16. századra vonatkozóan 6 darab egymást követő ($T-3$ -tól $T+2$ -ig) napciklus epocháit sikerült rögzítenem, ahol az általam vizsgált proxy adatsorok egyezést mutatnak. Ezenkívül arra a következtetésre jutottam, hogy a főminimumok előtti és utáni időszakokra nézve a napciklus rekonstrukció bizonytalanná válik megnehezítve az önálló Schwabe-ciklusok pontos beazonosítását.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
1.1. A napciklus felfedezése és közvetlen mérőszámai	4
1.1.1. A napfolt-relatívszám	4
1.1.2. A foltcsoportszám	5
1.2. A napciklus jellemzői és időbeli változásai	6
1.3. Proxy adatok	11
1.3.1. Kozmogén radionuklidok	11
1.4. Célkitűzés	15
2. Rekonstrukció	16
2.1. Felhasznált adatok	16
2.1.1. ^{10}Be fluxus	16
2.1.2. Foltcsoportszám (version 1.0)	17
2.1.3. Sarki fény észlelések	18
2.1.4. Szabad szemes napfolt észlelések	20
2.2. Szűrés és kalibráció	21
2.2.1. Csillapított Gauss-szűrő	21
2.2.2. Butterworth-szűrő	25
2.3. Kiértékelés	27
3. Összefoglalás és eredmények	33
4. Köszönetnyilvánítás	34
Irodalomjegyzék	35
Ábrák jegyzéke	37
Táblázatok jegyzéke	38

1. Bevezetés

A napaktivitás hosszú távú változásainak vizsgálata számos tudományterületen nagy fokú jelentőséggel bír. A Nap mágneses aktivitásának domináns ~ 11 éves ciklikussága mögött a Nap belsejében működő oszcilláló dinamó-mechanizmus áll. A háttérben meghúzódó fizikai folyamatok feltárását és megértését szolgálják a különféle dinamó modellek, melyeknek a napciklusok előrejelzésében van még kiemelkedő szerepük. Az olyan modellek, melyek a Nap nagy léptékű mágneses terének tér- és időbeli változásaira fókuszálnak ma már képesek reprodukálni a napaktivitás különböző jellemzőit, így a közel 11 éves periodicitást is [Charbonneau, 2020]. Azonban a napaktivitás korántsem szigorúan periodikus jelenség, mint azt a megfigyelésekből láthatjuk. Lényeges változékonyságot mutat mind rövid, mind hosszú távú időskálán szemlélve, a Schwabe-ciklus hosszának és amplitúdójának ciklusról ciklusra történő változásaitól kezdve az időszakosan megjelenő főminimumok és -maximumok idejére jellemző átlagostól eltérő aktivitási szintig [Usoskin, 2017]. A napciklus időbeli változásaira bővebben a 1.2. fejezetben térek majd ki.

A dinamó modelleknek tehát számos feltételnek kell megfelelniük, melyek közül több a mai napig nyitott kérdés. Ilyen például a fáziskoherencia kérdése is [Usoskin, 2017; Petrovay, 2020]. A főminimumok és főmaximumok előfordulásának statisztikai elemzése arra utal, hogy a Nap rendelkezhet számos ciklust átívelő hosszú távú memóriával. Azonban az, hogy valóban létezik-e ilyen memória és ha igen, milyen hosszú, továbbra is vita tárgyát képezi. Emellett a főminimumokat kiváltó fizikai okok sem ismertek, így az sem teljesen egyértelmű, hogy az ilyen alacsony aktivitású időszakok alatt fennmarad-e a napciklus elsődleges fázisa [Charbonneau, 2020].

A napaktivitás változásának hatása a földi klímára szintén nem tisztázott. Bár az éghajlati tényezők és időjárási folyamatok fő motorja a Nap, a klímaváltozásokban betöltött szerepe legfeljebb másodlagos. Az ipari forradalom előtti időkben a földi klíma változásai természetes eredetűek voltak, így paleoklimatológiai vizsgálatok segíthetnek megérteni, hogy napjaink globális klímaváltozásában a nyilvánvaló antropogén hatás mellett jut-e a napaktivitás változásának bármilyen szerep, illetve általánosságban hogyan jellemezhető a naptevékenység és a földi klíma kapcsolata évtizedes és évszázados időskálán [Bard and Frank, 2006; Usoskin, 2017]. Mindezekhez azonban elengedhetetlenek a minél hosszabb és jobb időbeli felbontású napciklus adatsorok.

Az 1.1. és 1.3. fejezetekben a napaktivitás rendelkezésünkre álló közvetlen és indirekt mérőszámait mutatom be, melyek alapul szolgálnak a történelmi naplicklus rekonst-

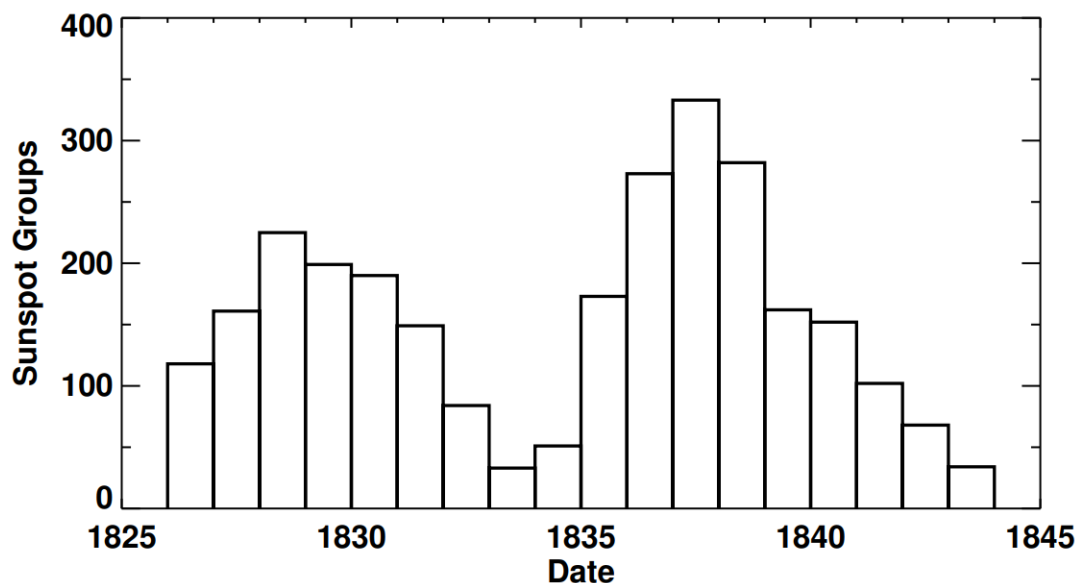
rukciókhoz. Az általam felállított rekonstrukciós módszerről és az elért eredményekről a dolgozat második felében adok számot (2. és 3. fejezet).

1.1. A napciklus felfedezése és közvetlen mérőszámai

1.1.1. A napfolt-relatívszám

A napfoltok dinamikájában megfigyelhető periodikus változásra elsőként Christian Horebow (1718–1776), dán csillagász tett utalást naplójában, amiről azonban a rendszeres napfolt megfigyelések hiányára hivatkozva még csak feltételezésként írt [Hathaway, 2015].

A napciklus tényleges felfedezése S.H. Schwabe (1789–1875), német csillagász nevéhez fűződik, aki 1844-ben számolt be az 1826 és 1843 között végzett megfigyeléseiről (1. ábra), melyek alapján egy közel 10 éves periodicitást állapított meg a napfoltok számának változásában [Vaquero and Vázquez, 2009; Hathaway, 2015].



1. ábra. A Schwabe által évenként feljegyzett napfolt-csoportok száma 1826 és 1843 között (Forrás: Hathaway, 2015, 9. o.)

Ez a felfedezés ösztönözte aztán J.R. Wolf (1816–1893), svájci csillagász munkáját, aki 1850-ben bevezette a napfolt-relatívszámot a naptevékenység mérésére, melyet a következőképpen definiált [Vaquero and Vázquez, 2009]:

$$R = k(10g + f) \quad (1)$$

ahol g a foltcsoportok, f pedig az egyes napfoltok csoportokon belüli darabszámát jelölik. Mivel a napfoltok megfigyelését nagyban befolyásolják az észlelés körülményei, Wolf egy k korrekciós faktorral szorozta meg a kapott eredményt. Ez a kalibrációs állandó, mely többek között függ magától az észlelőtől, az észlelés helyétől, a műszer paramétereitől, a légköri viszonyoktól és a számítás módjától, lehetővé teszi a különböző megfigyelések normalizálását.

A Wolf-féle napfolt-relatívszámot 1848 óta napi rendszerességgel meghatározzák egy kitüntetett „elsődleges” megfigyelő észleléseit alapul véve. Abban az esetben, ha az elsődleges megfigyelő nem tudott adatot biztosítani, a hierarchia szerinti következő megfigyelő észlelését használták fel a számításokhoz.

1981-ig hivatalosan a Zürichi Obszervatórium volt a felelős a napfolt-relatívszám meghatározásáért, mely szerepet aztán a Belga Királyi Obszervatórium vett át [Petrovay, 2020]. A számítás során továbbra is Wolf relatívszám definícióját (1) alkalmazzák, azonban már nem csak egyetlen észlelőre hagyatkoznak, hanem több, mint 20 elfogadott megfigyelő adatainak súlyozott átlagát veszik figyelembe [Usoskin, 2017]. 2015 július elsején a teljes napfolt-relatívszám sorozatot frissítették, mely revízió szükségességére elsőként a Stanford Egyetem kutatója, Leif Svalgaard hívta fel a figyelmet. Svalgaard rámutatott számos, az adatsorban fellépő inhomogenitásra, melyek az alapadatok és a feldolgozás módjában bekövetkező változások folyományaként adódtak [Petrovay, 2020]. Az új adatsor (version 2.0) ezen inhomogenitások korrekcióba vételével készült el és publikusan elérhető a felelős szervezet (WDC-SILSO¹) honlapján ².

1.1.2. A foltcsoportszám

A Wolf által bevezetett napfolt-relatívszám fő problémáját a dokumentáció publikussá tételének hiánya jelentette. A kiindulási adatként szolgáló napfolt megfigyeléseket és a számítás hibáit Rudolf Wolf kézzel írt jegyzetei tartalmazzák, melyek digitalizálására sokáig nem került sor. Ezen grandiózus munkára vállalkozott Hoyt and Schatten [1998], akiknek sikerült a Wolf által használt idősor minőségét feljavítani és bővíteni olyan megfigyelésekkel, melyek nem lettek beszámítva a napfolt-relatívszám konstruálása során. Az így összegyűjtött és a közösség számára is elérhetővé tett adatokat felhasználva létrehoztak

¹World Data Centre for Sunspot Index and Long-term Solar Observations

²<https://www.sidc.be/silso/>

egy új mérőszámot a naptevékenység jellemzésére, melyet a következőképpen definiáltak:

$$R_g = \frac{12.08}{n} \sum_i k'_i g_i \quad (2)$$

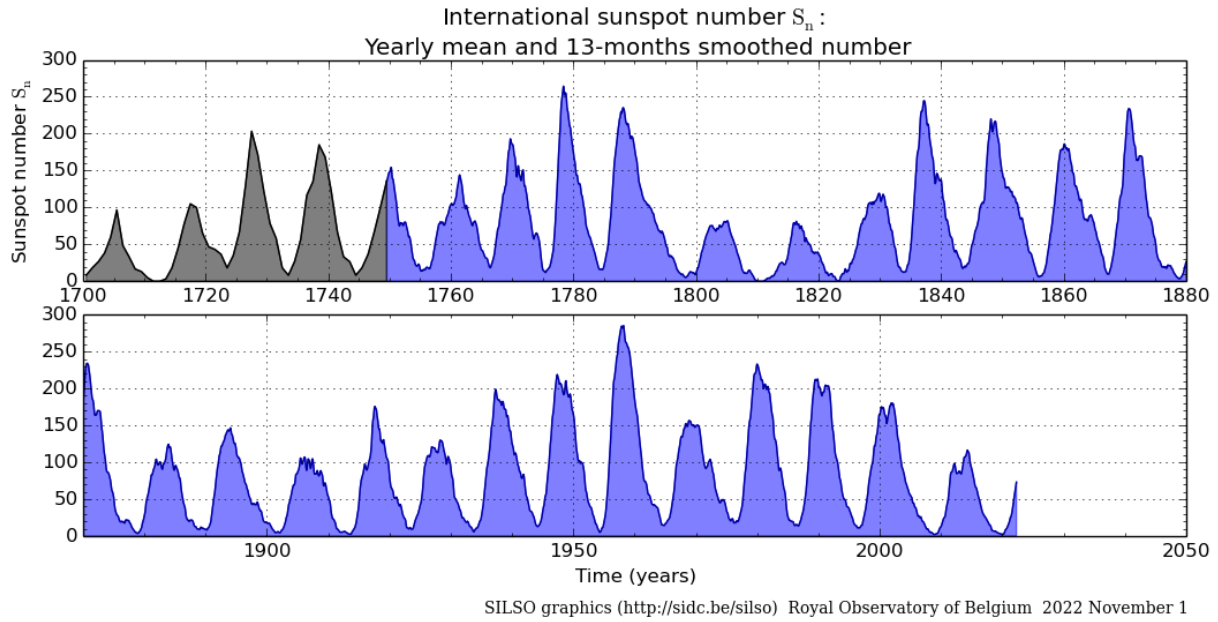
Ez a foltcsoportszám, ahol g_i az i -dik megfigyelő által feljegyzett napfolt-csoportok számát jelöli, k'_i az i -dik megfigyelő korrekciós tényezője, n a napi érték kiszámításához felhasznált megfigyelők száma, a 12.08 pedig egy normalizáláshoz használt szám, melyet úgy választottak meg, hogy az R_g átlaga megegyezzen a Wolf-féle napfolt-relatívszám átlagával az 1874–1976-os periódusra vonatkozóan.

A foltcsoportszám lényegében tehát csak két dologban különbözik a napfolt-relatívszámtól. Az R_g nem veszi figyelembe az egyes foltok számát, minthogy azok meghatározása bizonytalanságokat hordoz, és csak a könnyebben azonosítható foltcsoportokkal számol, valamint nem csak az „elsődleges”, hanem minden rendelkezésre álló megfigyelést felhasznál. Mivel a foltcsoportszám kiszámításához jelentősen több megfigyelés áll rendelkezésre, ezért az idősor egészen 1610-ig, az első távcsöves észlelésekig nyúlik vissza meghaladva a napfolt-relatívszám sorokat [Usoskin, 2017].

Hoyt and Schatten [1998] óta sorra kerülnek elő régi archívumokból elfeledett műszeres napfolt észlelések, rajzok, így idővel a foltcsoportszám revíziójára szintén sor került a napfolt-relatívszáméhoz hasonlóan. Azonban mivel ebben az esetben nincs egy általánosan elfogadott szervezet, mely a revízióért felelne, több kutatócsoport egymástól független munkája eredményeként eltérő idősorok születtek meg [Petrovay, 2020; Usoskin, 2017]. Ezek 2015 óta ugyancsak szabadon letölthetőek a WDC-SILSO honlapjáról.

1.2. A napciklus jellemzői és időbeli változásai

Rudolf Wolf az általa 1850-ben bevezetett napfolt-relatívszám havi átlagait a rendelkezésre álló adatok alapján 100 évre visszamenően, 1749-ig meghatározta. A napciklusok számozása az ezt követő első egészében minimumtól minimumig végigészlelt napciklussal kezdődik. Jelen dolgozat írásakor a Nap a 25-dik ciklusa elején tart, mely a 2019 decemberében bekövetkező minimumtól számítandó. Később Wolf az éves átlagokat még korábbról, a 18. század elejétől is meghatározta (2. ábra).

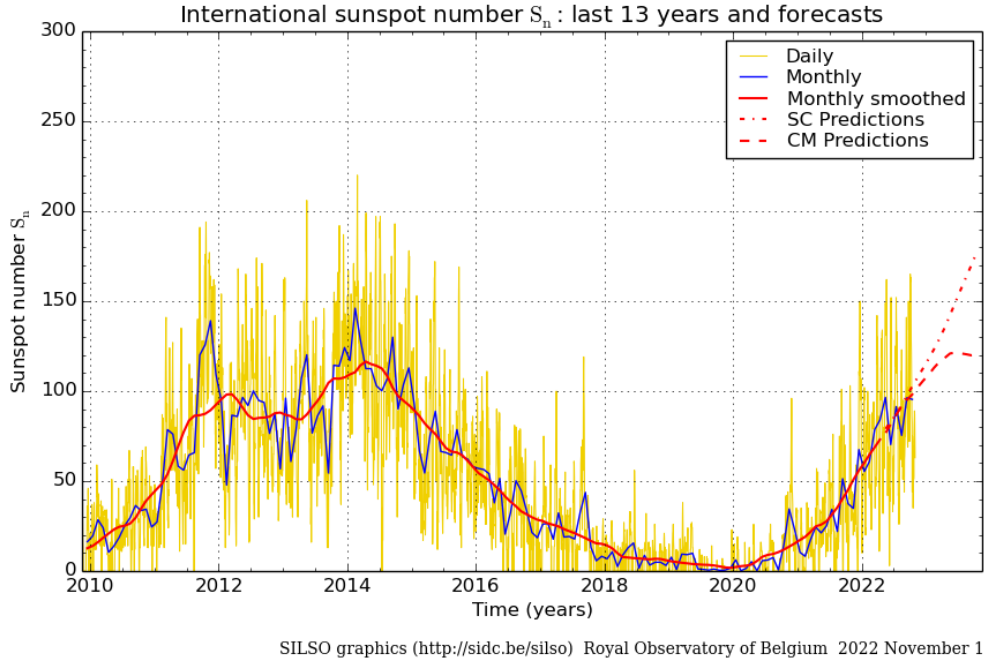


2. ábra. A napfolt-relatívszám évi átlagos (fekete) és simított havi (kék) értékei
(Forrás: <https://www.sidc.be/silso/yearlyssnplot>)

Mivel a napfolt-relatívszám napi és havi szinten is nagy fluktuációkat mutat, a gyakorlatban az idősor 13 hónapos csúszóátlaggal simított havi értékeit (R_s) használják (3. ábra). Ezt úgy számolják, hogy veszik a havi átlagértékek 13 hónapra vonatkoztatott átlagát, ahol az első és utolsó hónapok feleakkora súllyal szerepelnek, mint a többi. Ezt írja le az alábbi képlet [Vaquero and Vázquez, 2009; Petrovay, 2020]:

$$R_s = \frac{1}{24} \left[R_{m-6} + R_{m+6} + 2 \sum_{i=m-5}^{i=m+5} R_i \right] \quad (3)$$

ahol R_m az m -dik hónap havi átlagos napfolt-relatívszáma. Az így kapott görbe maximum- és minimumhelyei jelölik ki a hivatalos naptevékenységi maximumok és minimumok epocháit.



3. ábra. A napfolt-relatívuszám napi értékei (sárga), havi átlagértékei (kék) és a 13 hónapos csúszóátlaggal simított havi értékei (piros) az elmúlt 13 évben
(Forrás: <https://www.sidc.be/silso/dayssnplot>)

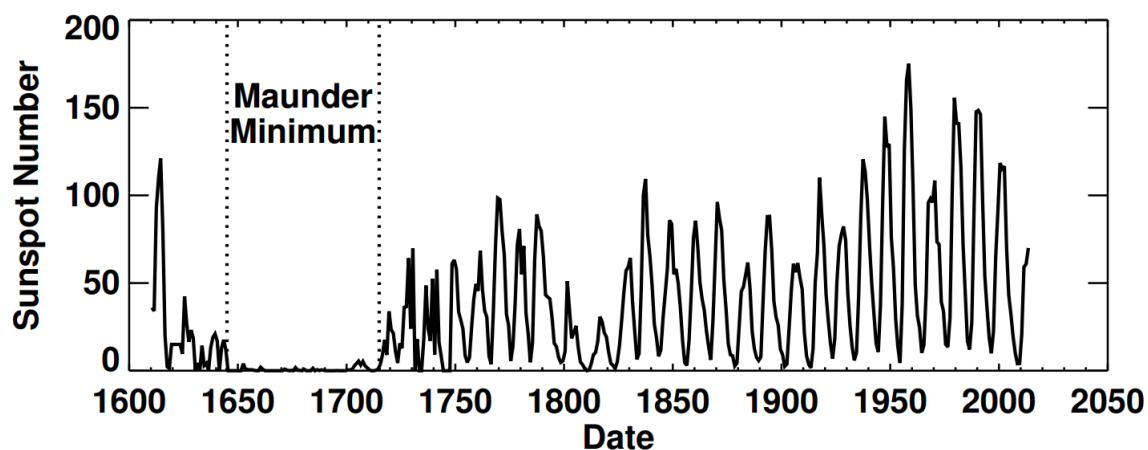
Megnézve a 2. ábrát, a legszembevetőbb jellemző a naptevékenység időbeli változásában a közel 11 éves periódusidejű úgynevezett Schwabe-ciklus. Egy-egy ilyen napciklus mind időtartamban, mind amplitúdóban igen változatos. Egy átlagos napciklus hossza (minimumtól minimumig) 11 év kb. 1,2 éves szórással. Az eddigi legrövidebb ciklus 9 évig, míg a leghosszabb 13,6 évig tartott. Az átlagos amplitúdó a napfolt-relatívuszám szempontjából 179, melynek szórása 57. Az eddigi legkisebb amplitúdó 81, a legnagyobb pedig 285 volt [Usoskin, 2017; Petrovay, 2020].

A 11 éves ciklicitás háttérében egy közel 22 éves periódusidejű változás áll. Ez a Hale-ciklus, melynek során a napfoltok mágneses polaritása megváltozik minden 11 éves ciklus kezdetén, mely jelenség a Nap mágneses terének 11 évenkénti pólusváltásának következménye.

Az egyes napciklusok profilja aszimmetrikus a maximumra nézve. Általában egy ciklus első 4-5 évében erősödik a naptevékenység, majd elérve a maximumot, a leszálló ágban lassabban, általában 7-8 év alatt csökken le ismét a minimumig. Ezen felül antikorreláció figyelhető meg a felszálló ág időtartama és a ciklus amplitúdója között. Ezt az empirikus

szabályszerűséget Waldmeier-relációnak nevezzük. Ugyanakkor míg az erősebb ciklusok felszálló ága így általában rövidebb, addig a ciklus leszálló ágának hossza és az amplitúdó nagysága között nem állapítható meg egyértelmű korreláció [Hathaway, 2015; Petrovay, 2020].

A Schwabe-ciklus amplitúdójában megfigyelhető évszázados periodicitás a Gleissberg-ciklus. Ennek egyik lokális minimuma a 19. század elején bekövetkező Dalton-minimum, mely időszak során három szokatlanul gyenge napciklus követte egymást (szám szerint az 5., 6. és 7. ciklusok). Az ezt követő mérsékelt gyenge lokális minimumot Gleissberg-minimumnak nevezzük, amely a 12. napciklustól tartott a 16-ig felölve a 19. század második és a 20. század első felét. A Gleissberg-minimumot követő szekuláris maximum Modern maximum néven vált ismertté. Ez a 20. század közepétől tartó és a 23-24. ciklussal lezárult időszak az elmúlt néhány közvetlen napmegfigyeléssel lefedett évszázad legerősebb és leghosszabb maximuma. Habár a napciklus rekonstrukció módjától nagyban függ a naptevékenység ezen szekuláris erősödése, kozmogén izotóp adatok arra utalnak, hogy nem volt a Modern Maximumhoz hasonlóan aktív időszak több ezer évre visszamenőleg (5. ábra) [Usoskin et al., 2006]. Az, hogy a Modern Maximum mennyire volt szokatlanul erős hosszú távon, továbbra is nyitott kérdés, melynek megválaszolása olyan egyéb jelenségek megértéséhez járulna hozzá, mint hogy milyen szerepe van a naptevékenység szekuláris erősödésének a globális felmelegedésben [Usoskin, 2017; Petrovay, 2020].

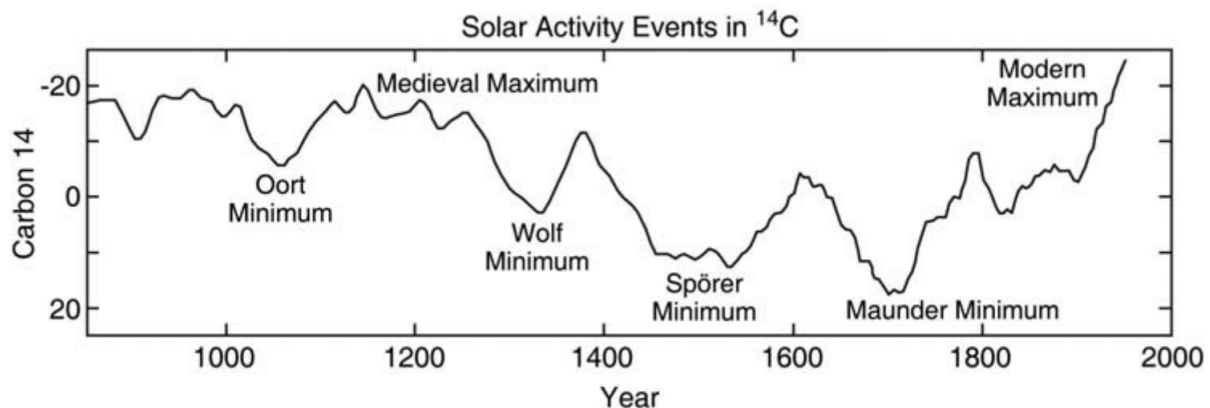


4. ábra. A Maunder-minimum az évi átlagos foltcsoporszám idősorán
(Forrás: Hathaway, 2015, 55. o.)

Az 1.1.2 alfejezetben említett módon, a foltcsoporszám idősorok egészen 1610-ig nyúlnak vissza. Az adatok 1645 és 1715 között a naptevékenység lecsökkent aktivitásáról tanús-

kodnak. Ezt a periódust Maunder-minimumnak hívjuk és főminimumként tartjuk számon (4. ábra). Ezen időszak alatt a napfolt észlelések kis hányada mutatott csak foltokat, melyek főként alacsony naprajzi szélességeken, dominánsan a déli hemiszférán jelentek meg utalva a Nap meggyengült mágneses terére. Ugyanakkor ^{10}Be izotóp adatokból kimutatott gyenge időbeli ingadozás alapján a 22 éves mágneses ciklus jelenlétére lehet következtetni, mely dominált a 11 éves Schwabe-ciklussal szemben [Hathaway, 2015; Usoskin, 2017; Petrovay, 2020].

A Nap történelme során számos egyéb főminimumot sikerült megállapítani kozmogén izotóp adatok segítségével. Erre szolgál például az 5. ábra, amely a teljesség igénye nélkül szemlélteti a Spörer-minimumot, a Wolf-minimumot és az Oort-minimumot. Az ábrán továbbá megfigyelhető, hogy a főminimumok között eltelt idő szisztematikusan 210 év körül van utalva a napaktivitás évszázadokat meghaladó periodicitására. Efféle, inkább intermittens jellegű, szuperszekuláris ciklusok jelenlétére csak nagyon hosszú kozmogén izotóp idősorok vizsgálatából lehet következtetni. Nevezetesen a főminimumok és -maximumok körülbelül 2400 évenként a hallstatti ciklus extrémumaiban csoportosulnak, a csoportosulásokon belül a de Vries-, más néven Suess-ciklus 210 éves periódusát követve [Usoskin, 2017; Petrovay, 2020].



5. ábra. Fák évgyűrűiből kinyert ^{14}C izotóp adatok

(Forrás: Russell et al., 2010, 12. o.; Eredeti ábra: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon14_with_activity_labels.svg)

1.3. Proxy adatok

Az előzőekben tárgyalt napfolt-relatívszámokon és foltcsoportszámokon kívül léteznek más használatban lévő indikátorai is a naptevékenységnek. Azon mérőszámok közül, melyek a Nap közvetlen megfigyelésén alapulnak, illetve közvetlen kapcsolatban állnak a naptevékenységgel, megemlíthetjük példaként a napfolt területet, a flerindexet, az F10.7 indexet (a Nap 10,7 centiméteres hullámhosszon mért radiofluxusa) vagy a teljes szoláris besugárzást. Azonban ezen változókra általában csak a 20. századtól van rendszeres adatunk – csupán néhány napciklust fednek le – így a történelmi napciklus rekonstrukció szempontjából kevésbé relevánsak.

Rendelkezésünkre állnak azonban más mérhető változók, úgynevezett proxy adatok, melyek közvetett indikátorai a naptevékenységnek és jóval az első távcsöves észlelések előtti időig nyúlnak vissza. Ilyenek a geomágneses indexek, a sarki fény észlelések (2.1.3. fejezet) és az előző 1.2 fejezetben már említett kozmogén radionuklidok [Usoskin, 2017; Petrovay, 2020].

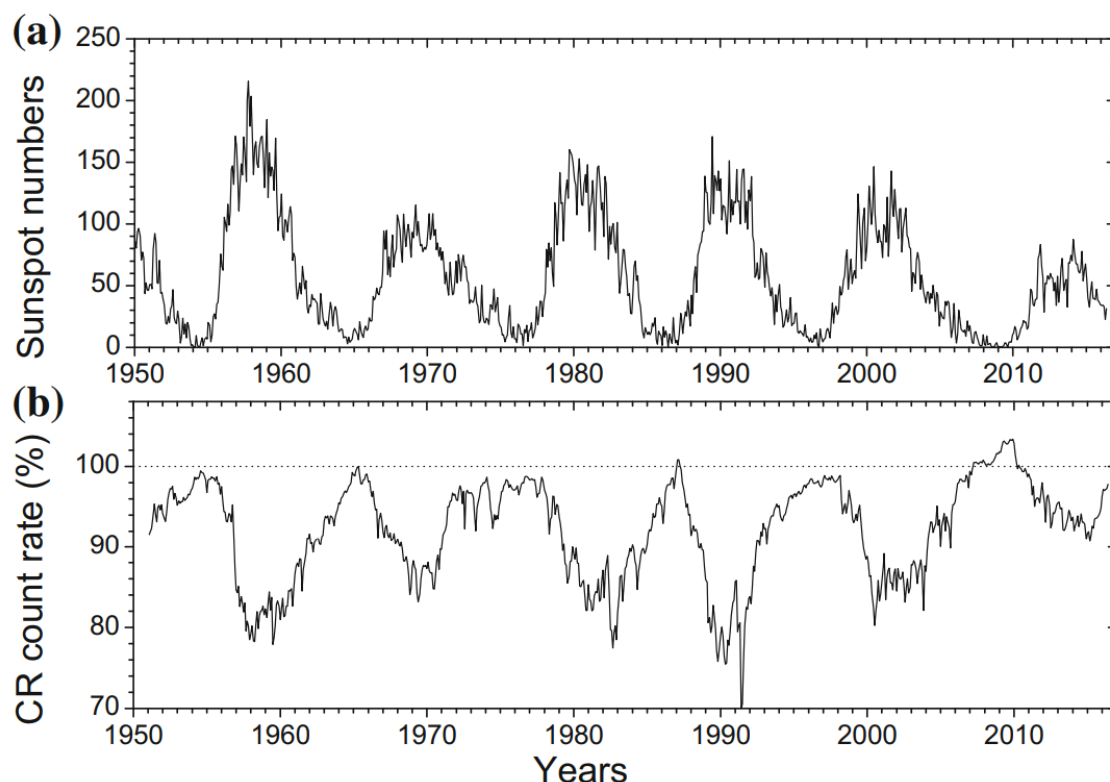
1.3.1. Kozmogén radionuklidok

A napaktivitás hosszú távú változásainak vizsgálatára legáltalánosabban használt és a történelmi napciklusok rekonstrukciójához legalkalmasabb proxy adatok a kozmogén radionuklidok, azok közül is a ^{10}Be és ^{14}C izotópok, melyek kozmikus sugárzás hatására keletkeznek a földi légkörben.

A Föld légkörét elérő nagyenergiájú töltött részecskék fluxusát elsődleges kozmikus sugárzásnak hívjuk. Származhat a Napból (szoláris kozmikus sugárzás) és a Naprendszeren kívülről (galaktikus/extragalaktikus kozmikus sugárzás) is. Összetételét tekintve a kozmikus sugárzás főként protonokból (hidrogén atommag) áll, kis részben pedig alfa-részecskékből, egyéb nehezebb atommagokból, illetve szubatomi (pl. elektronok, neutronok, neutrínók) összetevőkből. Töltött részecskék lévén a mozgásukat a környező mágneses tér határozza meg. A Naprendszeret elérő kozmikus sugárzás fluxusa nagyrészt konstansnak tekinthető, azonban mielőtt a részecskék elérnék a földi légkört, a helioszférában eltérülnek a napszél plazmájába fagyott mágneses tér hatására. A napszél részecskéinél nagyobb energiájú úgynevezett szupratermális részecskék helioszférában való terjedését a Parker transzport egyenlet írja le, mely négy alapvető folyamat kombinációjából áll: (1) a részecskék diffúziója a mágneses tér irregularitásain történő szóródás következtében, (2) konvekció a kifelé áramló napszél által, (3) driftmozgás a mágneses térben, valamint (4)

adiabatikus energiaveszteség a napszél plazmájának expanziója miatt [Usoskin, 2017].

Ilyenformán a Nap mágneses tere modulálja a kozmikus sugarakat, mely moduláció erőssége, és ebből kifolyólag a kozmikus sugárzás intenzitása, nagyban függ a naptevékenységtől. A 6. ábra szemlélteti a kozmikus sugárzás és a naptevékenység kapcsolatát. Látható, hogy a kozmikus sugárzás inverz korrelációt mutat a napfolt-relatívszám 11 éves periodicitásával, a napaktivitásra jellemző Schwabe-ciklussal. Mikor erősebb a naptevékenység, így a Nap mágneses tere, annak a helioszférán kívülről érkező töltött részecskékre gyakorolt árnyékoló hatása erőteljesebben érvényesül. Tehát a naptevékenységi maximum alatt a Földet elérő kozmikus sugarak intenzitása alacsonyabb, míg minimum idején nagyobb. Ezen inverz korrelációt Forbush-effektusnak is nevezik a jelenséget felfedező amerikai fizikus után.



6. ábra. A kozmikus sugárzásban megjelenő 11 éves periodicitás összehasonlítva a naptevékenységgel: (a) A napfolt-relatívszám (version 2.0), (b) Az Oulu-i poláris neutron monitor által detektált neutronok beütési aránya (Forrás: Usoskin, 2017, 25. o.)

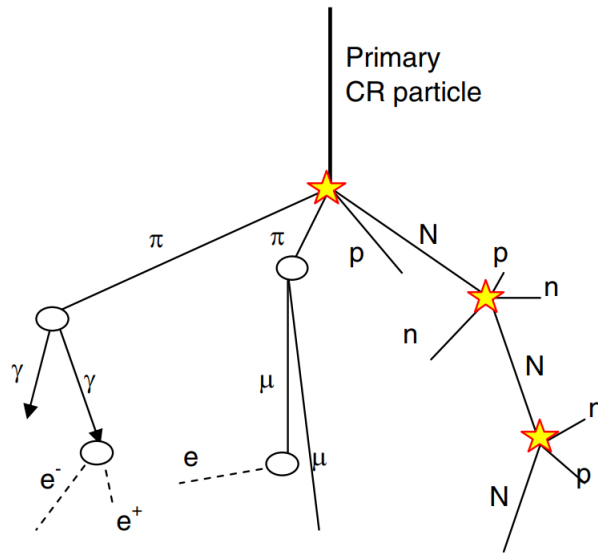
Megfigyelhető továbbá, hogy a kozmikus sugárzás 11 éves ciklusai egy hónaptól két évig terjedő késleltetést mutatnak a napfoltok megjelenésével szemben. Ezen kívül az

egymást követő ciklusok maximumai váltakozva hol élesek, hol laposak, mely háttérben a 22 éves mágneses ciklus áll a töltésfüggő driftmozgásokon keresztül. Az adatsorban rövid távú fluktuációk is megjelennek, melyek a Nap tranziens eruptív jelenségeihez (pl. koronakidobódások, flerek) köthetők [Usoskin, 2017].

A Föld környezetébe érvén az elsődleges kozmikus sugárzás részecskéire a földi mágneses tér is eltérítő hatással van. Csak azon részecskék képesek elérni az atmoszféráig, melyek egy meghatározott energiaszintet meghaladnak, mely küszöbérték a mágneses szélesség függvényében változik. Nevezetesen a Föld mágneses mezejének árnyékoló hatása a geomágneses egyenlítői síkban a legerősebb, míg a pólusok felé csökken. Ezen felül, mivel a Föld mágneses tere évszázados és évezredes időskálán nem állandó, annak hatása a kozmikus sugárzásra megjelenik a mért idősoron. Ilyen módon tehát a helioszférikus moduláció mellett a kozmikus sugárzást a földi mágneses tér is modulálja, melyet az adatok értelmezésénél figyelembe kell venni.

Habár az elsődleges kozmikus sugárzás részecskéi közel fénysebességgel mozognak, mégis csak kis hányaduk éri el a földfelszínt. A részecskék ugyanis a levegő atomjaival és molekuláival ütközve másodlagos részecskéket hoznak létre atmoszférikus részecske kaszkádot elindítva, mely aztán másodlagos kozmikus sugárzás formájában éri el a felszínt. Ugyan bizonyos geomágneses szélességek fölött ($\geq 60^\circ$) a mágneses tér árnyékoló hatása elenyésző, a részecskék energiájának el kell érnie egy olyan küszöbszintet, hogy az elindított részecske kaszkád elérjen a felszínig.

Egy ilyen atmoszférikus kaszkádnak három fő komponense van, melyet a 7. ábra szemléltet. Ezek a (1) hadronikus komponens, ami az elsődleges sugarak és az általuk keltett másodlagos részecskék atmoszférikus atommagokkal való ütközéséből származik és főleg szupertermális protonok és neutronok alkotják, (2) a müonikus komponens, mely főként müonokból áll, illetve az (3) elektronok, pozitronok és fotonok alkotta elektromágneses komponens [Usoskin, 2017].



7. ábra. Elsődleges kozmikus sugárzás által létrehozott atmoszférikus részecske kaszkád sematikus ábrája. A három ág balról jobbra haladva: elektromágneses, müonikus és hadronikus komponens. (N: atommag; p: proton; n: neutron; μ : müon; π : pion; e^- : elektron; e^+ : pozitron; γ : foton; csillag: ütközés; ovális: bomlás) (Forrás: Usoskin, 2017, 30. o.)

A kozmogén radionuklidok, így a ^{10}Be és ^{14}C izotópok is, a hadronikus ág melléktermékeiként jönnek létre. A történelmi napciklus rekonstrukcióhoz legalkalmasabb két izotóp a közel azonos keletkezést követően eltérő transzport folyamatokon megy keresztül az atmoszférában.

A berillium 10-es tömegszámú radioaktív izotópját a hosszú, körülbelül 1,5 millió éves felezési ideje alkalmassá teszi a történelmi naptevékenység vizsgálatára. A ^{10}Be spalláció folyamán jön létre a kozmikus sugárzás nagyenergiájú részecskéi és a légkörben található oxigén és nitrogén atommagok ütközése során. Keletkezése után, mely nagyrészt a sztratoszférában történik, kisebb részben pedig a troposzférában, aeroszolokhoz kapcsolódik, majd kiülepszik a légkörből csapadék hatására. A légköri tartózkodási ideje függ a keletkezési magasságtól, így az néhány héttől (troposzféra) akár 1-2 évig (sztratoszféra) is terjedhet. Ez meghatározza a ^{10}Be légkörből való kiülepedésének helyét, mely történhet lokálisan vagy a légkörben való keveredést, illetve bonyolult dinamikai és transzport folyamatokat követően is. Ezáltal a keletkezést befolyásoló tényezők mellett a ^{10}Be izotóp földfelszínre elérő fluxusát a különböző éghajlati és időjárási körülmények is modulálják [Usoskin, 2017].

A ^{10}Be koncentrációt legkönnyebben a sarkvidékekről származó jégmagokban lehet

mérni. Erre napjainkban az úgynevezett gyorsító tömegspektrometria (Accelerator Mass Spectrometry, AMS) módszerét alkalmazzák, mellyel igen jó mérési pontosság érhető el. A jégmagokat először más kémiai anyagok ülepedése alapján éves rétegekre bontják, mely azonban a mélyebb rétegek esetén nem mindig kivitelezhető, így ez esetben általában csak 10 éves felbontást tudnak elérni, ami a napciklus rekonstrukcióhoz nem elégséges. Ennek ellenére 10 éves felbontású adatsorok tízezer évre visszamenőleg is vannak, mellyel a napciklusnál hosszabb periódusidejű változások tanulmányozhatók.

A ^{10}Be izotóppal ellentétben a kb. 5730 év felezési idővel jellemezhető 14-es tömegszámú szénizotóp az atmoszférában egy neutron nitrogén általi befogása útján keletkezik. Ezt követően vioszonnyal hamar oxidálódik és szén-dioxid formájában részt vesz az atmoszféra, bioszféra és óceánok közti igen bonyolult folyamatokkal leírható karbonciklusban. Koncentrációját fák évgyűrűiből több évezredre visszamenőleg lehet rekonstruálni a dendrokronológia eszközeivel. A légköri tartózkodási ideje a berilliuméhoz képest jelentősen hosszabb, a karbonciklus jellemző időskáláját követve 8-10 év. Ezen időskála összemérhető a napciklussal, így – míg segítségével a naptevékenység hosszú távú változásai reprodukálhatók (5. ábra) – a 11 éves Schwabe-ciklus rekonstrukciója ^{14}C adatokból jóval nehezebb [Usoskin, 2017].

1.4. Célkitűzés

Dolgozatom célja, hogy a Nap aktivitását jellemző 11 éves periódusidejű Schwabe-ciklus maximum és minimum időpontjai (epochái) történelmi időkre vonatkoztatott rekonstrukcióját elvégezzem, illetve arra egy megbízható módszert dolgozzak ki. A lehető legpontosabb rekonstrukció elérése érdekében a grönlandi NGRIP jégmagból kinyert 600 évre visszamenő éves felbontású ^{10}Be adatsort választottam kiindulási alapként, mivel a rendelkezésre álló jégmagok közül ez tekinthető a legmegbízhatóbbnak, amely időben a leghosszabb és ténylegesen éves felbontású adatokat biztosít.

A rekonstrukciós módszer kalibrálásához a ^{10}Be izotóp adatokat a naptevékenység legrégebbre visszanyúló közvetlen mérőszámával, a 1.1.2 fejezetben részletezett foltcsoporthoz számommal vetem össze.

Az adatokat a későbbiekben szeretném kiegészíteni távol-keleti szabad szemes napfolt észlelésekkel, valamint alacsony földrajzi szélességeken feljegyzett sarki fény megfigyelésekkel is.

2. Rekonstrukció

2.1. Felhasznált adatok

2.1.1. ^{10}Be fluxus

A napciklus rekonstrukcióhoz a Berggren et al. [2009] által 2009-ben publikált új ^{10}Be izotóp adatsort vettem alapul. Az adatokat az 1995-ben kezdeményezett North Greenland Icecore Project (NGRIP) nemzetközi mélyfúrási program keretein belül a grönlandi NGRIP területéről³ származó NG 97-S2 számú jégmagból nyerték ki [Dahl-Jensen et al., 2002; Berggren et al., 2009]. A jégmagot $\delta^{18}\text{O}$ izotópos módszerrel éves rétegekre bontották az időszámításunk szerinti 1389 és 1994 közötti időszakra vonatkozóan, majd a GICC05⁴ időskálához szinkronizálták [Svensson et al., 2005; Berggren et al., 2009]. Ez jelenleg a leghosszabb, nagyjából 600 évet lefedő ^{10}Be adatsor, amely éves felbontást szolgáltat.

Az NGRIP jégmagon kívül csak egy másik olyan jégmag létezik, amiből éves felbontású ^{10}Be adatokat tudtak kinyerni. Ez a grönlandi Dye-3 fúrási területéről⁵ származik. Az általa felölelt 1428–1985 közötti periódusból azonban csak az 1780 utáni időszakra vonatkozóan sikerült éves felbontást elérni.

A sarki jégben mérhető ^{10}Be koncentrációját a keletkezési, transzport és ülepedési folyamatok befolyásolják. A radionuklidok keletkezésére a napaktivitás és a Föld mágneses terének változásai, míg a transzport és ülepedési folyamatokra az éghajlati és időjárási tényezők vannak főként hatással. A két nagy időbeli felbontású NGRIP és Dye-3 adatsort összehasonlítva viszont lehetőség van a ^{10}Be izotóp koncentrációjának időbeli változásaiból a lokális és regionális behatásokat elválasztani, emellett pedig ^{14}C adatok és numerikus modellek segítségével elkülöníthetők a különböző eredetű eltérő frekvenciájú változások is. Ezúton sikerült rámutatniuk arra, hogy a ^{10}Be idősorban a domináns jel a keletkezési folyamatokból, így a napaktivitás és a földi mágneses tér változásaiból származik, míg a meteorológiai folyamatokból származó jel gyengébb és inkább helyi jellegű. Megállapították, hogy a ^{10}Be rövid távú változékonysága $\sim 30\%$ -ban meteorológiai eredetű [Berggren et al., 2009].

Az NGRIP jégmagban mért ^{10}Be koncentráció $0,8 \times 10^4$ és $3,9 \times 10^4$ atom/g_{jég} között mozog, átlagos értéke $1,8 \times 10^4$ atom/g_{jég}, míg a ^{10}Be fluxus 0,003 és 0,023 atom/(cm² sec)

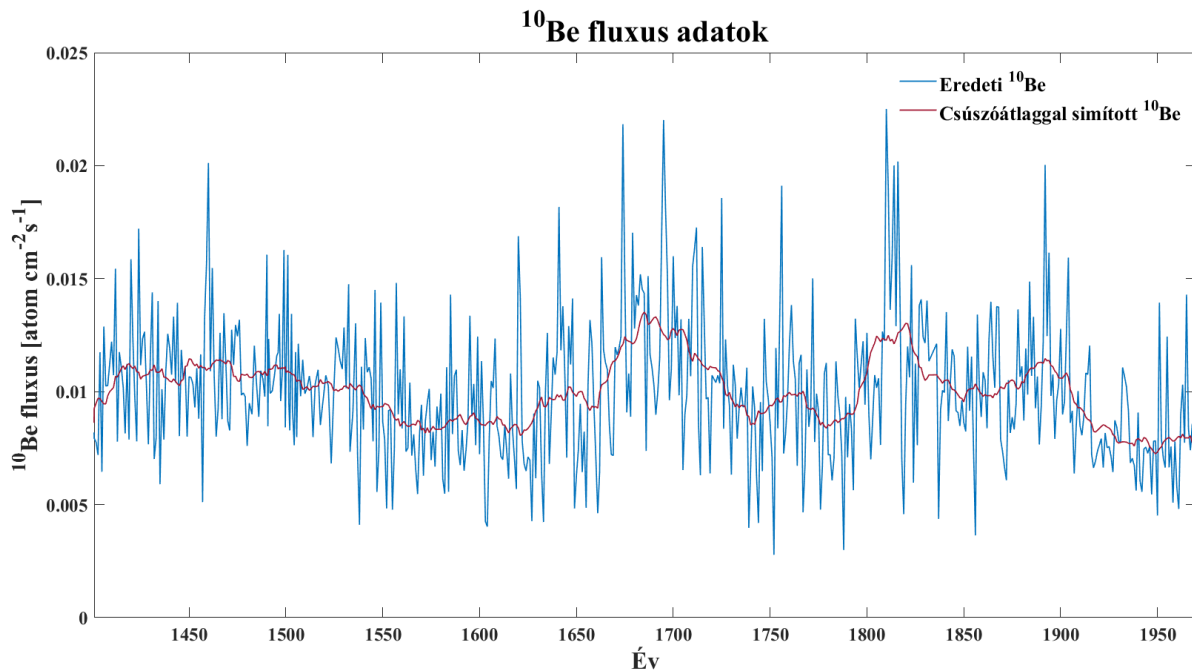
³é. sz. 75.10°, ny. h. 42.32°, 2917 m tengerszint feletti magasság

⁴Greenland Ice Core Chronology 2005: https://www.iceandclimate.nbi.ku.dk/research/strat_dating/annual_layer_count/gicc05_time_scale/

⁵é. sz. 65.18°, ny. h. 43.83°, 2480 m tengerszint feletti magasság

közé esik 0,01 atom/(cm² sec)-os átlaggal. A fluxust úgy számolták ki, hogy a koncentráció értékeket megszorozták a hó adott évre vonatkoztatott felhalmozódásának sebességével (méter_{jég}/év), míg a felszíni fluxus a ¹⁰Be ülepedési rátájával egyenlő [Berggren et al., 2009].

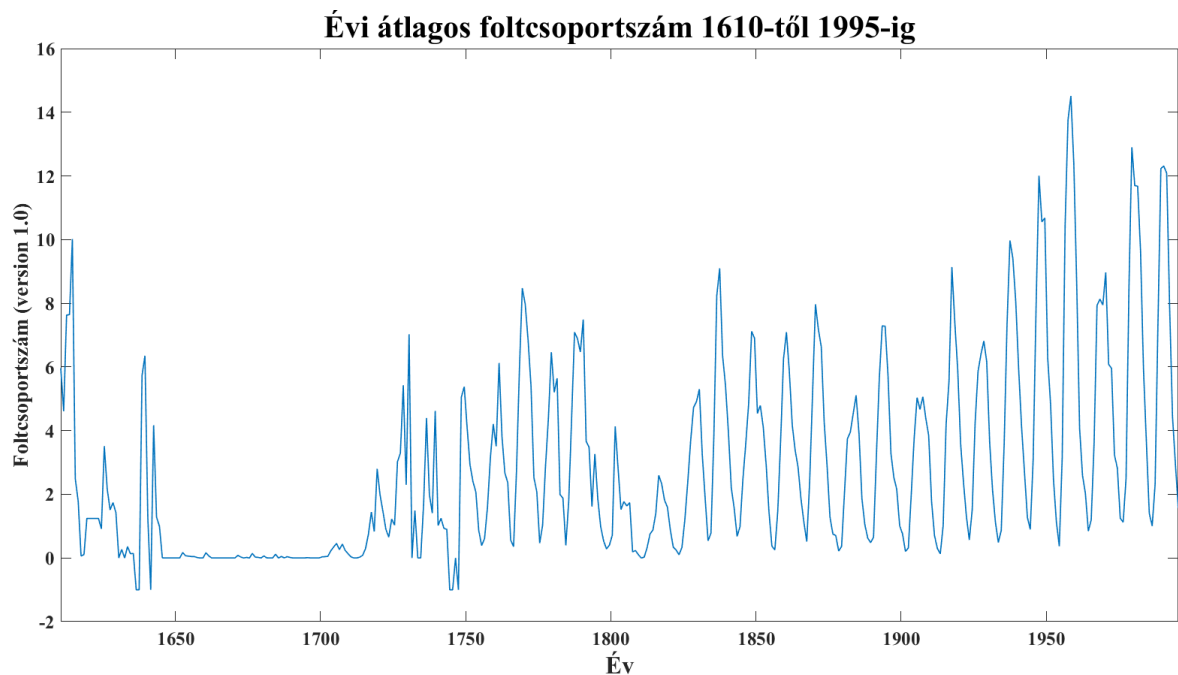
Én a napciklus rekonstrukcióhoz a ¹⁰Be fluxust vettem elsődleges bemenő adatnak (8. ábra).



8. ábra. ¹⁰Be fluxus adatok nyers és 25 pontra vett csúszóátlaggal simított értékei 1401 és 1970 között (Adatok forrása: Berggren et al., 2009)

2.1.2. Foltcsoportszám (version 1.0)

A következőkben tárgyalt szűrési eljárás kalibrációját a foltcsoportszám segítségével végeztem. Mivel a ¹⁰Be fluxus adatok éves felbontásúak, célszerű ugyanilyen időbeli felbontással rendelkező foltcsoportszám adatokat használni az összevethetőség végett. Ehhez a 1.1.2. fejezetben már említett SILSO weboldalról (www.sidc.be/silso/groupnumberv3) letölthető eredeti foltcsoportszám sorozat (version 1.0) évi átlagos értékeit vettem alapul (9. ábra).



9. ábra. Évi átlagos foltcsoportszám adatok 1610 és 1995 között (Adatok forrása: www.sidc.be/silso/groupnumber3)

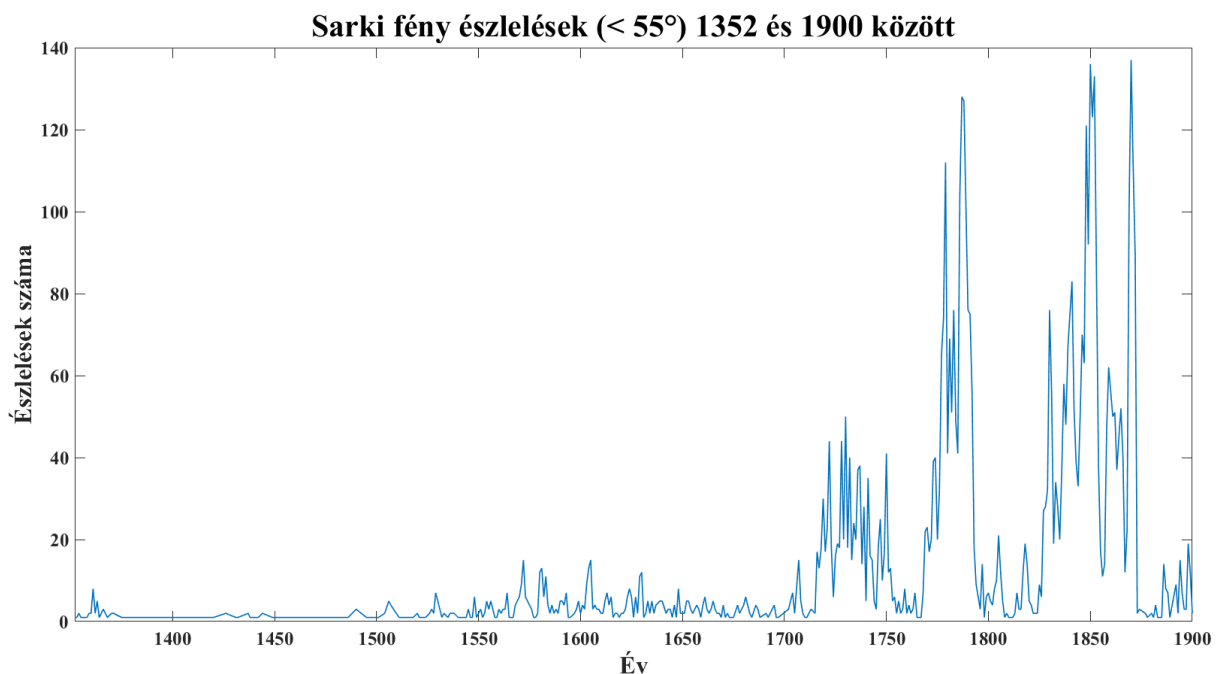
2.1.3. Sarki fény észlelések

A napaktivitás fontos proxy indikátorait képezik a sarki fény észlelések is, melyeket csak említés szintjén hoztam fel a 1.3. fejezetben.

A sarki fény a Föld pólusai környékén az atmoszférába hatoló töltött részecskék és a felsőlégkör semleges részecskéi kölcsönhatása során létrejövő elektromágneses sugárzás. Ugyan a látható sarki fények nem a Nap mágneses terének változásaira reflektálnak közvetlenül, hanem inkább a napkoronához köthető, a bolgyóközi mágneses térben terjedő tranziens jelenségekhez, mégis erős korreláció figyelhető meg a napfoltok megjelenése és a sarki fények előfordulása között [Usoskin, 2017]. Általánosságban elmondható, hogy a nagyobb napviharok a napaktivitási maximumok idején koncentálódnak. A főleg ezek által indukált sarki fények észlelhetők csak igazán alacsony szélességekről. Magasabb szélességeken kisebb mágneses zavarok keltette sarki fények is láthatóak, így azok nem egyértelműen csak a naptevékenység intenzitásától függenek. Ezért jobbak a minél alacsonyabb földrajzi szélességeken megfigyelt sarki fények, amely feljegyzésekből azonban kevesebb is van. Számos egyéb tényező, mint például az időjárás is, befolyásolja a sarki fények észlelhetőségét. Továbbá évszázados időskálán a Föld mágneses pólusainak vándorlása, így a geomágneses

szélességek földrajzi szélességekhez viszonyított elmozdulása is hatással lehet az adatokra. Az észlelések száma a korai időkben a megfigyelések szisztematikusságának hiánya miatt kevesebb, amely civilizációs tényező az adatsorok inhomogenitását eredményezi [Usoskin, 2017].

Dolgozatomban az általam rekonstruált napciklus epochák elemzéséhez a Křivský and Pejml [1988] által összegyűjtött 55° északi szélesség alatti sarki fények listáját használtam fel, melyek letölthetőek a NOAA⁶ oldaláról (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/aeronomy/aurorae.html>). Az 1352 és 1900 közötti évekre vonatkozó sarki fény észlelések éves számát a 10. ábra szemlélteti.



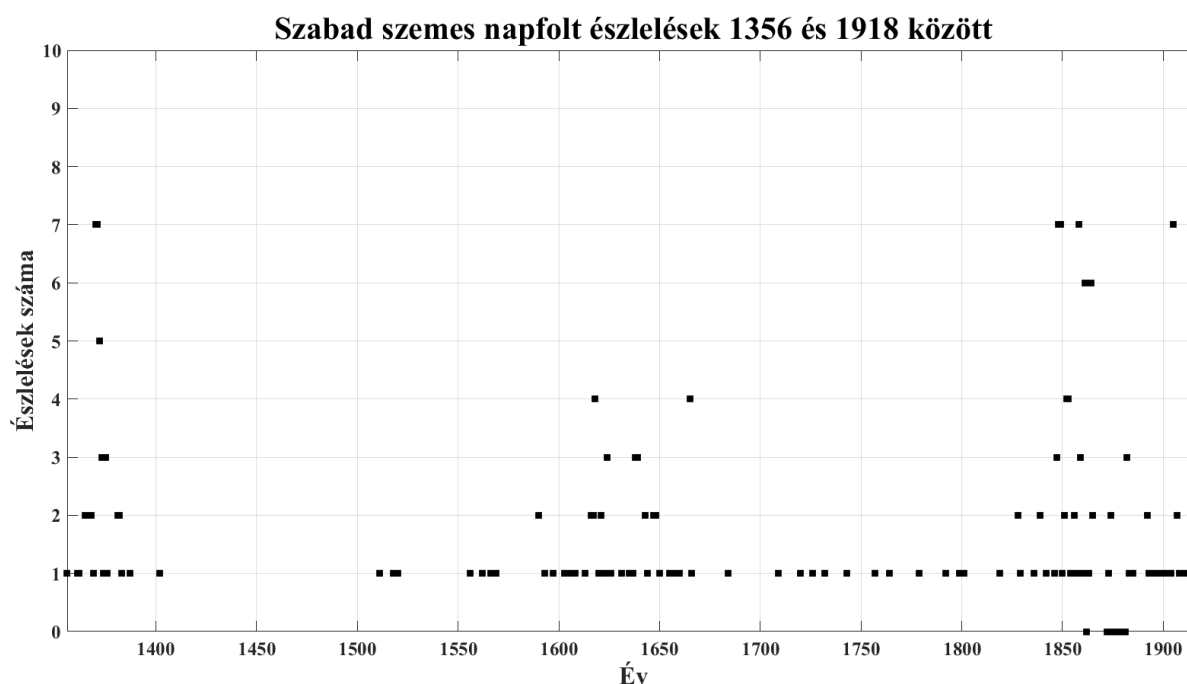
10. ábra. 55° északi szélességnél alacsonyabban észlelt sarki fény megfigyelések 1352 és 1900 között (A sarki fény adatok forrása: [Křivský and Pejml, 1988])

⁶Nemzeti Óceán- és Légtérkutató Hivatal (National Oceanic and Atmospheric Administration)

2.1.4. Szabad szemes napfolt észlelések

A Nap közvetlen megfigyelésén alapuló szabad szemes napfolt észlelések az indirekt proxy adatok mellett szintén eszközül szolgálhatnak a naptevékenység változásainak preteleszkópikus vizsgálatára.

A kellően nagy, szabad szemmel is látható napfoltok előfordulása követi a napaktivitás jellemző változásait. A megfigyeléseket tartalmazó katalógusok túlnyomóan a Távol-Keletről (főleg Kínából és Koreából) kerülnek elő. Az, hogy szinte alig találhatunk a nyugati világból származó hasonló feljegyzéseket, valószínűleg a filozófiai és vallási különbségeknek tudható be. A rendelkezésünkre álló évkönyvek értelmezése azonban nem egyszerű feladat, mivel számos egyéb jelenség is előidézhet látszólagos foltokat a Napon, melyeket aztán tévesen napfoltoknak interpretálnak. Ezenkívül modern kori kísérletek alapján megállapították, hogy a régi krónikák csak egy kis töredékét tartalmazhatják azoknak a napfoltoknak, melyek elméletileg láthatóak lennének a szabad szem számára [Vaquero and Vázquez, 2009; Usoskin, 2017].



11. ábra. Szabad szemes napfolt megfigyelések 1356 és 1918 között Axel D. Wittmann munkája nyomán

A szabad szemes napfoltok legteljesebb listáját Axel D. Wittmann⁷ gyűjtötte össze. A katalógus időszámításunk előtt 165-től az időszámításunk szerinti 1918-as évig tartalmaz megfigyeléseket [Vaquero and Vázquez, 2009].

A. D. Wittmann katalógusából kiindulva a dolgozatomban szempontjából lényeges időszakokra összegeztem az évenkénti szabad szemes napfolt észlelések számát 1356 és 1918 között, melyet a 11. ábra mutat be. Látható, hogy a feljegyzett napfoltok (illetve az azoknak tűnő jelenségek) előfordulása szabálytalan, a megfigyelések nem szisztematikusak, így az adatsor túl töredezett és inhomogén ahhoz, hogy az általam rekonstruált napciklusok epocháival való összevetés során lényeges következtetéseket lehessen levonni belőle.

2.2. Szűrés és kalibráció

A nyers ¹⁰Be fluxus adatok, mint láthatjuk a 8. ábrából, éves szinten nagy fluktuációkat mutatnak. Ahhoz, hogy felfedjük a napaktivitás 11 éves periódusait, a Schwabe-ciklus jellemző hossza körül sávszűrést kell végrehajtanunk, azaz az adatsorból ki kell szűrniünk a főleg éghajlati tényezőkhöz köthető nagyfrekvenciás zajokat, illetve a hosszú időskálájú trendeket.

A napfizikában előszeretettel alkalmazzák a 13 havi csúszóátlagot (1.2. fejezet), amely azonban nem szűri ki kellőképpen a nagyfrekvenciás változásokat. Hasonlóan a 8. ábrán látható simított értékeknél használt 25 pontra vett csúszóátlag sem a legmegfelelőbb a mi esetünkben, annak éles időbeli levágása miatt.

2.2.1. Csillapított Gauss-szűrő

Kedvezőbb átvitelt kapunk, ha a simítást Gauss-szűrővel végezzük. Egy ilyen, a frekvenciatartományban Gauss-görbe alakú profillal rendelkező (és ezzel a nagyfrekvenciás zajokat hatékonyabban eltávolító) $2a$ félértékszélességű csillapított Gauss-szűrőt definiál Hathaway [2015] a következőképpen:

$$G(t) = e^{-t^2/2a^2} - e^{-2(3 - t^2/2a^2)} \quad (4)$$

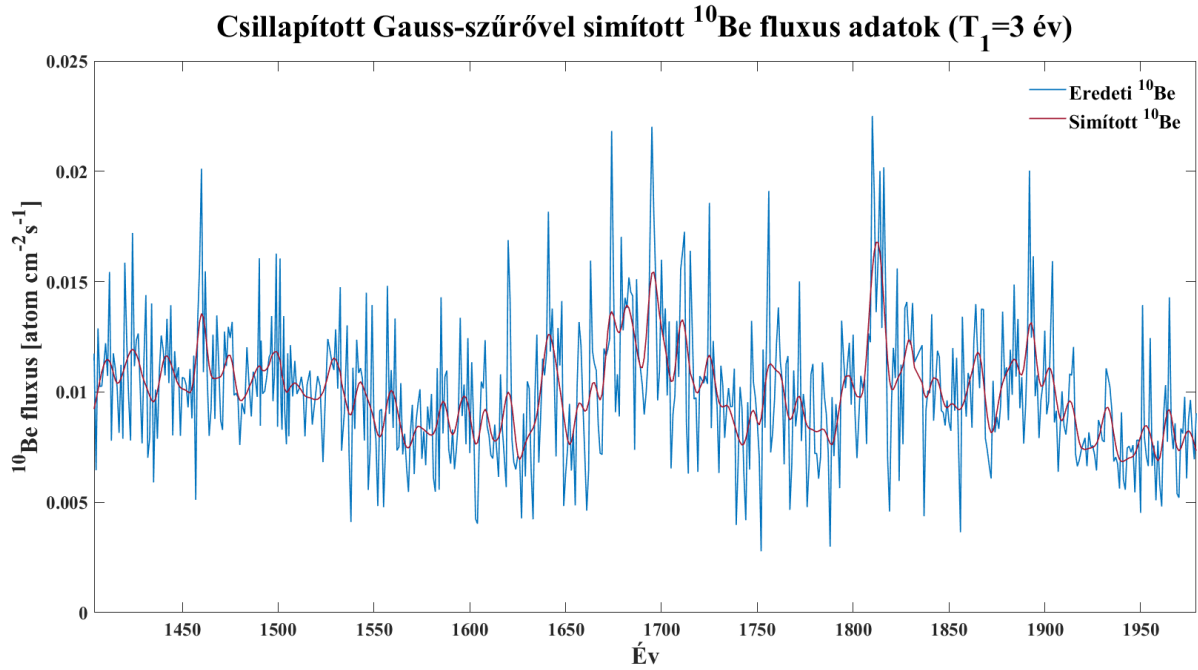
ahol

$$-2a + 1 \leq t \leq +2a - 1$$

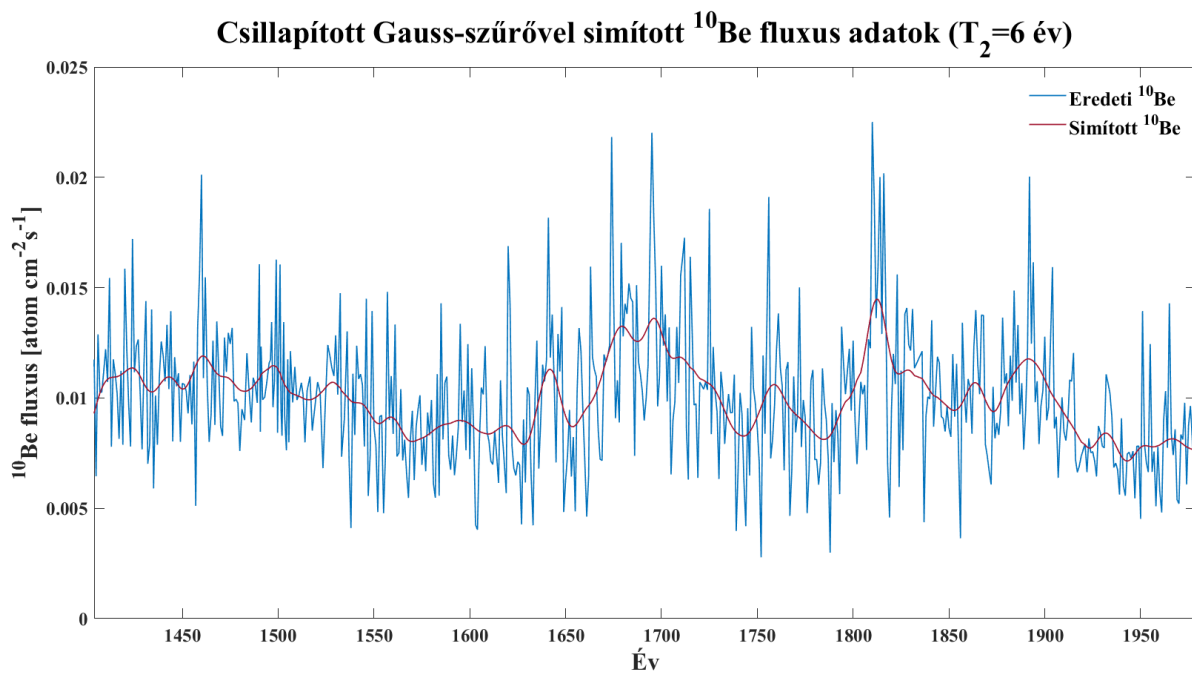
⁷<http://www.astro.physik.uni-goettingen.de/~wittmann/>

Ezt a Hathaway [2015] által megadott szűrőt alkalmaztam a ^{10}Be fluxus adatokon először úgy, hogy $a = T_1$ és $a = T_2$ értékeket megadva elvégeztem a nyers adatok simítását (12. és 13. ábra), majd vettem a simított értékek különbségét (14. ábra). A T_1 és T_2 a felülvágási frekvenciáknak megfelelő periódusidők, ahol $T_1 < T_2$.

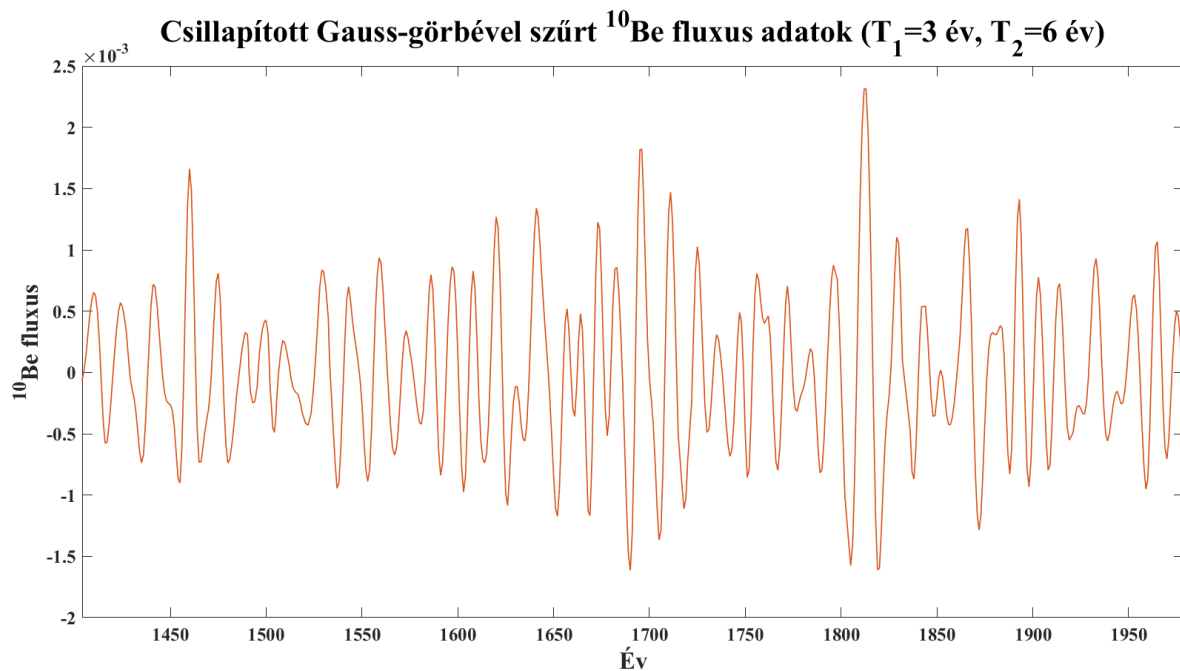
A sávszűrés eredményeként a fluxus idősorában csak a T_1 és T_2 közötti időskálájú változások maradnak. Ezután meghatároztam a szűrt fluxus lokális minimum- és maximumhelyeit, melyeket akkor tekintettem egy-egy önálló napciklus extrémumainak, ha az egymást követő minimum, illetve maximum időpontok között eltelt idő meghaladta a 6,5 évet. Abban az esetben, ha két szomszédos minimum (illetve maximum) epocha nem teljesítette ezt a feltételt, akkor helyettesítettem őket a két időpont amplitúdókkal súlyozott átlagával.



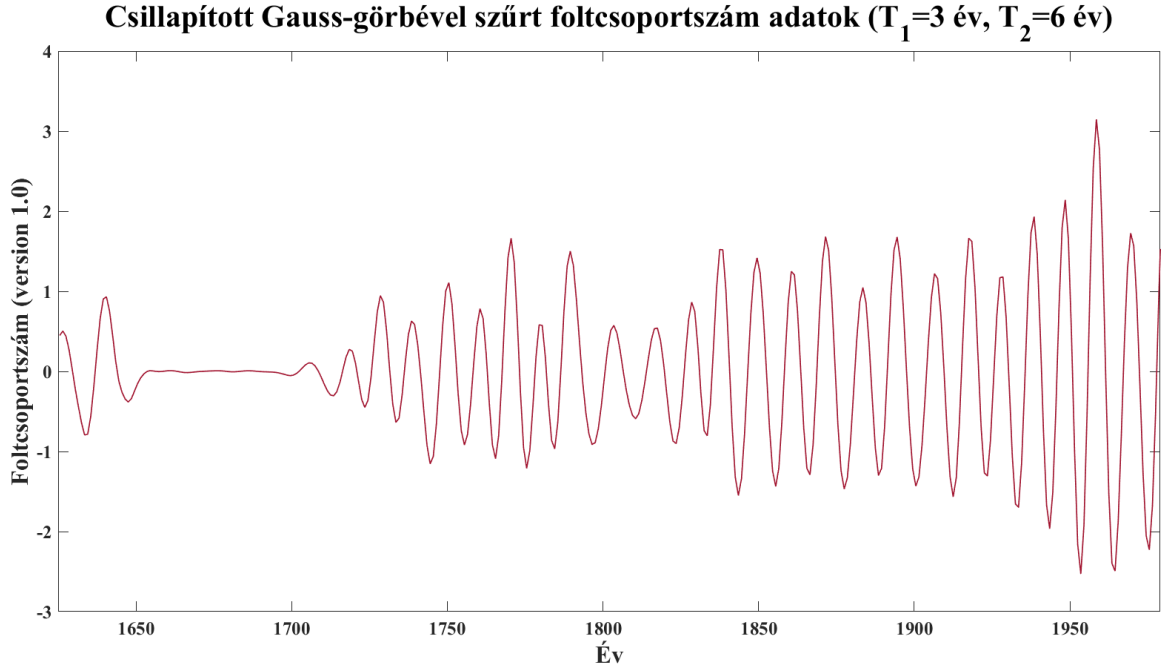
12. ábra. ^{10}Be fluxus adatok és simított értékeik 1404 és 1979 között



13. ábra. ^{10}Be fluxus adatok és simított értékeik 1404 és 1979 között



14. ábra. A csillapított Gauss-szűrővel sávszűrt ^{10}Be fluxus adatok 1404 és 1979 között



15. ábra. A csillapított Gauss-szűrővel sávszűrt foltszoportszám (version 1.0) adatok 1625 és 1979 között

Kalibráció

A módszer kalibrálásához az előzőekben leírt sávszűrést hajtottam végre a napciklus közvetlen mérőszámát jelentő foltszoportszám évi átlagos értékeit tartalmazó adatsorán is (15. ábra). Ezt követően a két frekvenciaszűrt fluxus és foltszoportszám sorozat minimum és maximum epocháit összehasonlítottam és vizsgáltam azok egyezési arányát 1700-ig, azaz nagyjából a Maunder-minimum végéig visszamenően. Természetesen a napaktivitás és a kozmikus sugárzás közti inverz korreláció miatt, a szűrt ^{10}Be fluxus minimumhelyeit a foltszoportszám maximumhelyeivel vettem össze és fordítva. Feltételezvé, hogy a fluxus fázisa kis időkéssel követi a napaktivitást, így a foltszoportszám változásait, két csúcs között az egyezést akkor tekintettem érvényesnek, ha a fluxus minimumhelye (maximumhelye) legfeljebb 0,5 évvel előzi meg a foltszoportszám maximumhelyét (minimumhelyét), valamint a foltszoportszám maximum (minimum) után legfeljebb 2,5 évvel később jelentkezik a fluxus minimum (maximum). Ezzel a feltétellel figyelembe vettem a ^{10}Be átlagosan 1 éves légköri tartózkodási idejét is. Az egyezések találati arányát százalékos formában számítottam ki a fluxusra és a foltszoportszáma nézve külön-külön.

Végezetül a módszer során különböző T_1 és T_2 párokat alkalmazva próbáltam megta-

lálni azokat, amellyel a szűrés a legjobb egyezési arányokat adja. Ennek eredményeként a (4) csillapított Gauss-szűrővel elért legjobb egyezési arányt a $T_1 = 3$ év és $T_2 = 6$ év paraméterekkel kaptam, ahol az egyezés a ^{10}Be fluxus és a foltcsoportszám szélsőérték-helyek között átlagosan $\approx 63,4$ %-nak bizonyult. (Az egyezés a fluxus minimum és a foltcsoportszám maximum összehasonlításánál a fluxusra és a foltcsoportszámra nézve is 60-60 %-nak adódott, míg a fluxus maximum és a foltcsoportszám minimum összehasonlításakor a fluxusra nézve $\approx 69,6$ %-nak, a foltcsoportszámra nézve pedig 64 %-nak.)

2.2.2. Butterworth-szűrő

Szerettem volna a csillapított Gauss-szűrővel kapott eredményeket javítani, így az eljárás optimalizálásához egy kedvezőbb átviteli tulajdonságú sávszűrőt kerestem. Berggren et al. [2009] az adatok könnyebben interpretálható vizualizációjához Butterworth-szűrőt használt, amely ideális jelöltnek bizonyulhat a mi esetünkben is.

A Butterworth-szűrőket úgy tervezték, hogy az átviteli sávban maximális laposságu frekvenciaátmenettel rendelkezzenek. Butterworth sávszűrő definiálása esetén a szűrő fokszáma a frekvencia átmenet meredekségét határozza meg. Minél magasabb fokú a Butterworth-szűrő, annál jobban megközelíti a görbéje az ideális sávszűrő átviteli függvényét. Esetünkben a szűrő fokszámanak a kalibrációban van szerepe.

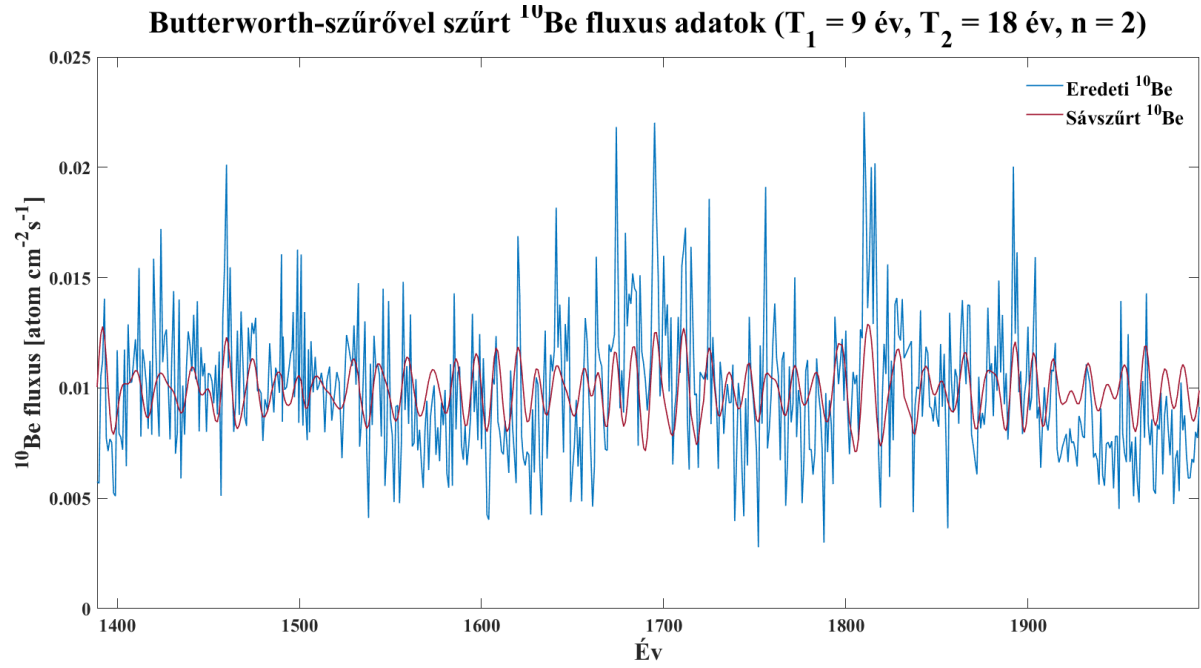
Az eljárást ez esetben is a csillapított Gauss-szűrőnél (2.2.1. alfejezet) leírtak szerint végeztem el. Először sávszűrést hajtottam végre a nyers ^{10}Be fluxus adatokon és a foltcsoportszámon az általam definiált Butterworth-szűrővel (16. ábra), majd a szűrt ^{10}Be fluxus lokális minimum- és maximumhelyeit külön-külön összevontam és helyettesítettem a két időpont amplitúdókkal súlyozott átlagával, ha az évek különbsége meghaladta a 6,5 évet. Ezután a fluxus és foltcsoportszám idősorok megfelelő extrémumainak epocháit összehasonlítottam és vizsgáltam azok egyezőségét (17. ábra). Először szintén akkor tekintettem két csúcsot egyezőnek, ha a foltcsoportszám minimum (maximum) időpontja körül a fluxus maximum (minimum) időpontja $+2,5$ és $-0,5$ éven belülre esett.

A kalibráció során a módszert a különböző vágási frekvenciák, illetve a szűrő fokszámanak variálásával próbáltam finomítani. A tesztelés első eredményeként $\approx 72,65$ %-os átlagos egyezési arányt tudtam elérni a $T_1 = 9$ év, $T_2 = 18$ év és $n = 2$ (n : a Butterworth-sávszűrő fokszámanak fele) paraméterekkel.

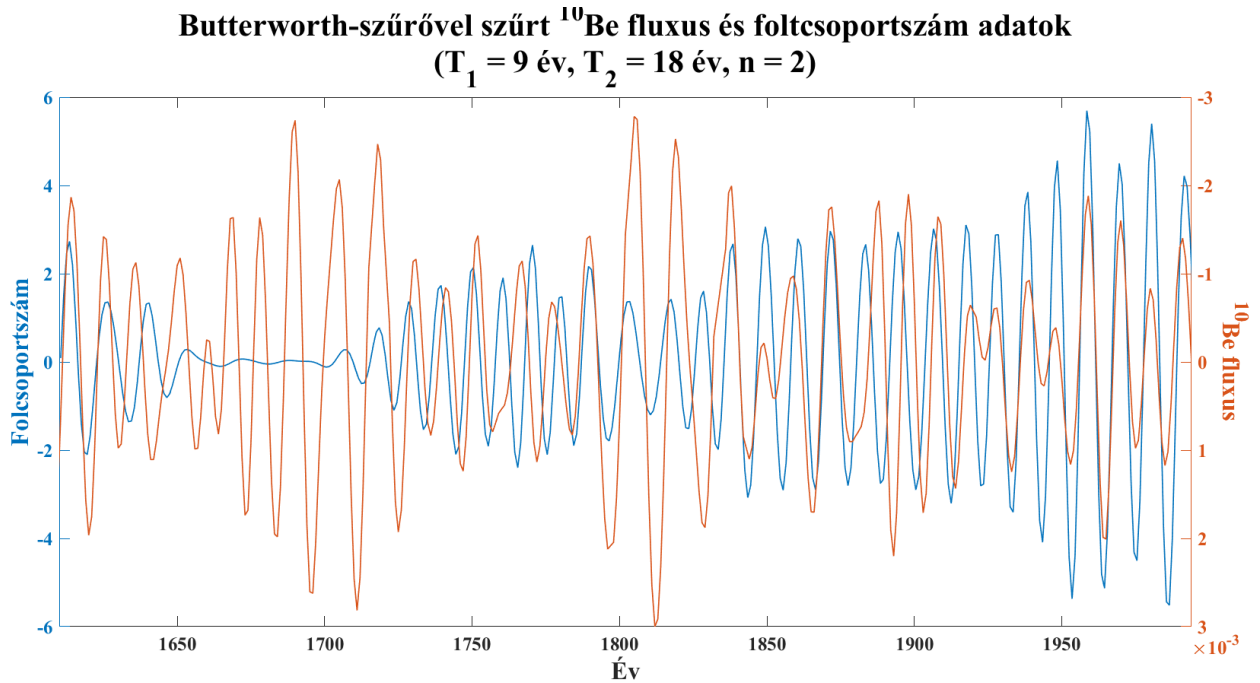
Az eredményt javítandó, a szűrés és kalibráció feltételeit módosítottam úgy, hogy a szűrt ^{10}Be fluxus szélsőértékei közül csak az 5,5 évenél közelebb eső csúcsokat vontam

össze, valamint a foltcsoportszámmal való összehasonlítás alkalmával az egyezést a foltcsoportszám extrémum időpontjaihoz képesti $+3,5$ és $-1,5$ éves időintervallumon belül fogadtam el. Ilyen módon a legjobb egyezést szintén a $T_1 = 9$ év, $T_2 = 18$ év és $n = 2$ szűrőparaméterek adták átlagosan $\approx 81,72$ %-os egyezési aránnyal.

Az ezzel az eljárással rekonstruált napciklusok minimum és maximum epocháit mutatja be az 1. táblázat.



16. ábra. Butterworth-szűrővel sávszűrt ^{10}Be fluxus adatok 1389 és 1994 között



17. ábra. Butterworth-szűrővel sávszűrt ^{10}Be fluxus és foltszoportszám (version 1.0) adatok 1610 és 1994 között (A könnyebb értelmezhetőség kedvéért, a ^{10}Be fluxus tengelye meg van fordítva.)

2.3. Kiértékelés

Az 1. táblázatban összegzett 1392 és 1991 közötti időszak rekonstruált része, így az 1610 előtti évek nagy része főminimumok idejére esik. Ez a rekonstrukció szempontjából problémát jelent, ugyanis az ilyen, alacsony intenzitású napaktivitással jellemezhető periódusok alatt a kozmikus sugárzás naptevékenység általi modulációja kisebb. A rosszabb jel-zaj arány következtében a ^{10}Be fluxus adatokból is nehezebb rekonstruálni a Schwabe-ciklus közel 11 éves periódusait.

Ilyen főminimumok a ^{10}Be fluxus adatok által lefedett 600 éves időszak alatt a Maunder-minimum (~ 1645 – 1715) és a Spörer-minimum (~ 1390 – 1550).

Az általam empirikusan meghatározott legjobbnak ígérkező rekonstrukciós eljárással kapott eredményeket ezért aztán ezen két főminimum közötti időszakra vonatkozólag vizsgáltam. Az elemzéshez Usoskin et al. [2021] és Fogtmann-Schulz et al. [2019] ^{14}C izotóp adatokon alapuló napciklus rekonstrukcióját használtam fel.

Usoskin et al. [2021] fák évgűrűiben felhalmozódott 14-es tömegszámú szénizotóp

¹⁰ Be fluxus alapján rekonstruált napciklusok epochái					
Minimum év	Maximum év	Ciklus hossza	Minimum év	Maximum év	Ciklus hossza
1985	1991	10	1684	1690	11
1975	1980	10	1673	1678	9
1965	1970	12	1664	1669	8
1953	1959	9	1656	1660	15
1944	1948	11	1641	1651	11
1933	1939	9	1630	1636	10
1924	1928	10	1620	1625	12
1914	1919	11	1608	1614	11
1903	1908	10	1597	1603	11
1893	1898	14	1586	1591	13
1879	1888	13	1573	1580	14
1866	1872	13	1559	1566	16
1853	1859	9	1543	1553	13
1844	1849	15	1530	1537	20,2
1829	1838	17	1509,8	1521,9	10,1
1812	1819	16	1499,7	1504,3	10,6
1796	1805	12	1489,1	1494,1	15,1
1784	1790	12	1474	1481,1	14
1772	1777	15	1460	1466	10
1757	1767	10	1450	1455	9
1747	1752	11	1441	1447	17
1736	1741	11	1424	1435	14
1725	1731	14	1410	1417	6
1711	1718	15	1404	1405	12
1696	1705	12	1392	1398	–

1. táblázat. A legjobb egyezést ($\approx 81,72\%$) mutató szűrési módszerrel rekonstruált történelmi napciklusok minimum és maximum időpontjai 1392 és 1991 között, valamint az egyes ciklusok (minimumtól minimumig) hossza években

Ciklus száma	Minimum év		Maximum év		Ciklus hossza (év)	
	¹⁰ Be	¹⁴ C	¹⁰ Be	¹⁴ C	¹⁰ Be	¹⁴ C
T+2	1630	1632	1636	1638	10	12
T+1	1620	1620	1625	1626	12	11
T0	1608	1609	1614	1615	11	14
T-1	1597	1595	1603	1601	11	11
T-2	1586	1584	1591	1591	13	10
T-3	1573	1574	1580	1578	14	9
T-4	1559	1565	1566	1570	16	13
T-5	–	1552	1553	1555	–	10
T-5*	1543	1542	–	1545	13	9
T-6?	1530	1533	1537	1536	20,2	8

2. táblázat. Rekonstruált naptevékenységi minimumok és maximumok epochái a 16. századra. A ¹⁴C adatokon alapuló rekonstrukció Usoskin et al. [2021] munkája.

eddig legprecízebb technikával meghatározott éves felbontású keletkezési rátájából kiindulva határozta meg Monte-Carlo módszerrel a történelmi napciklusok epocháit az elmúlt évezredre vonatkozóan a 971 és 1900 közötti időszakra.

Az általam rekonstruált napciklus epochákat vetettem össze Usoskin et al. [2021] eredményeivel a 16. századra vonatkozóan, melyet a 2. táblázat foglal össze.

A 2. táblázatban felsorolt napciklusokat az általánosan használt számozás szerint (1.2. fejezet) nehéz lenne beazonosítani, ezért – témavezetőm ajánlására – egy másik referenciát követve az első távcsővel észlelt napciklushoz képest adtam nekik jelölést. A T ennek értelmében a teleszkópikus szóra utal, a T0 pedig a számozásom középpontja.

A 2. táblázatból látható, hogy két minimumot (maximumot) egyezőnek tekintettem, ha köztük a különbség legfeljebb két év. Pirossal jelöltem azokat, amelyek nem teljesítik ezt a feltételt.

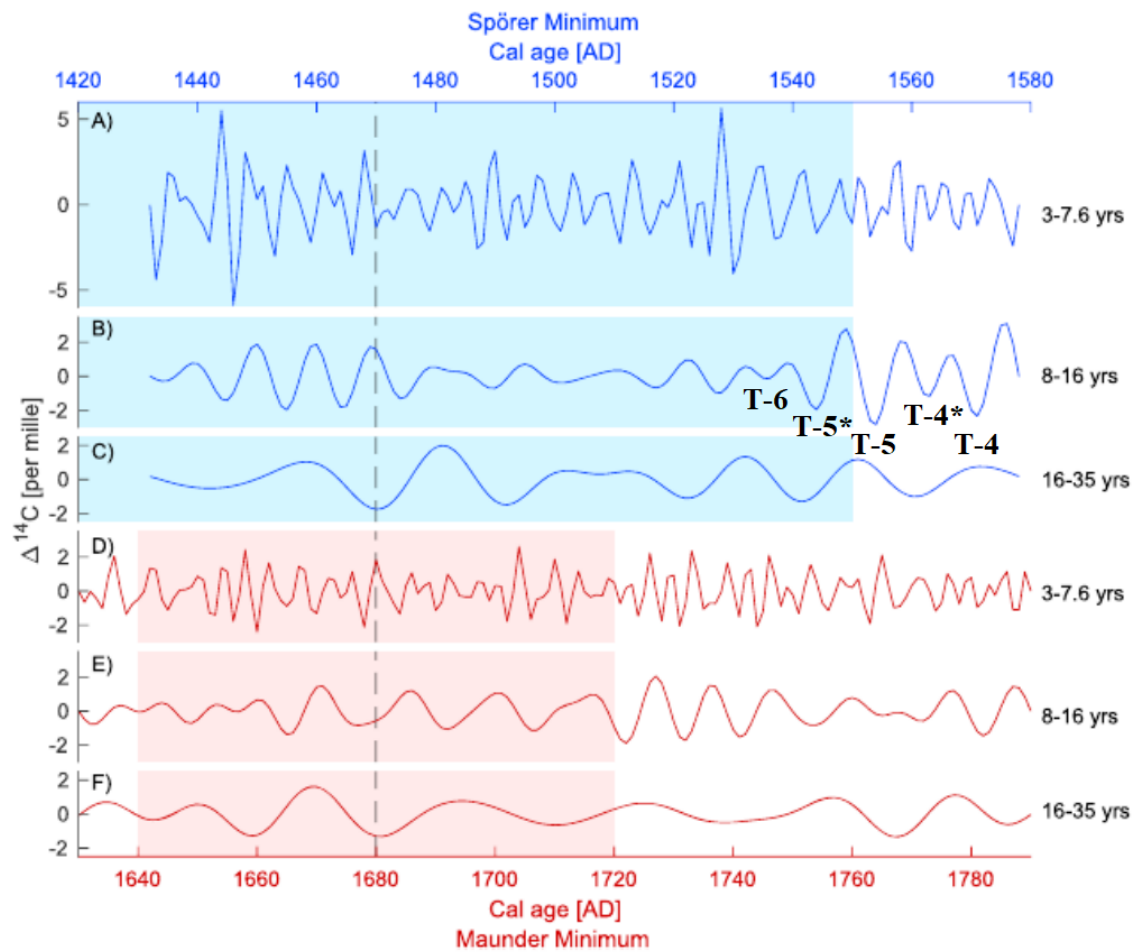
A kétféle rekonstrukció a 16. század első felében mutat bizonytalanságokat. Az 1573 (¹⁰Be)/1574 (¹⁴C)-es minimum, illetve az azelőtti 1543 (¹⁰Be)/1542 (¹⁴C)-es minimum a két rekonstrukció által biztosra mondható. Ezen minimumok közti körülbelül 30 éves periódus alatt azonban nem egyértelmű, hogy hány ciklus fordult elő. Ezen intervallumban a ¹⁰Be adatok két ciklust különböztetnek meg 1553-as és 1566-os maximumokkal, míg a ¹⁴C adatok három egymást követő ciklust jeleznek, melyek maximumai rendre 1545-ben, 1555-ben és 1570-ben voltak. Tehát én az 1543 és 1573-as időszakra két napciklust azonosítottam, ezek a T-4 és T-5 jelölésűek. Az utóbbit előzi meg a T-6-tal jelölt ciklus. Usoskin et al. [2021] ellenben a T-4 és T-5 ciklusok előtt közvetlenül egy általam T-5*-gal

jelölt ciklust is megállapít, amely az én rekonstrukciómban nem szerepel.

Usoskin et al. [2021] napciklus rekonstrukciója mellett további viszonyítási alappal szolgál Fogtmann-Schulz et al. [2019], akik a napaktivitás változásait vizsgálták a Spörer-minimum alatt fák évgyűrűiből kinyert nagy pontosságú radiokarbon adatok alapján. Ugyan az eredményeik nem olyan hosszú időszakra vonatkoznak, mint Usoskin et al. [2021] esetén, de így is lefedi azt az időszakot, amit mi nézünk. Az általuk publikált éves felbontású ^{14}C idősoron sávszűrést hajtottak végre különböző paraméterekkel, melyeket a 18. ábra szemléltet. Az ábrán a 8 és 16 év között sávszűrt idősoron alkalmaztam az általam bevezetett jelölést.

Fogtmann-Schulz et al. [2019] rekonstrukciójukban a T-4-es ciklus (1570 körüli maximummal) nagyjából egybeesik a Usoskin et al. [2021] által leírttal, azonban náluk megjelenik egy általam T-4*-gal jelölt ciklus, mely 1561/1562 tájékán ér el maximumot és semelyik másik rekonstrukcióban nem szerepel. A T-5-ös ciklus a 1553/1555-ös maximummal viszont összhangban van mindhárom rekonstrukció esetén. Fogtmann-Schulz et al. [2019]-nál megmutatkozik az a T-5*-gal jelölt ciklus is, ami szintén szerepel Usoskin et al. [2021] rekonstrukciójában 1545 körüli maximummal, amit azonban az általam rekonstruált epochák nem tartalmaznak. Tehát Fogtmann-Schulz et al. [2019] erre a kérdéses, közel 30 évet átfogó időintervallumra négy napciklust is rekonstruáltak a T-4-et, a T-4*-ot, a T-5-öt és a T-5*-ot.

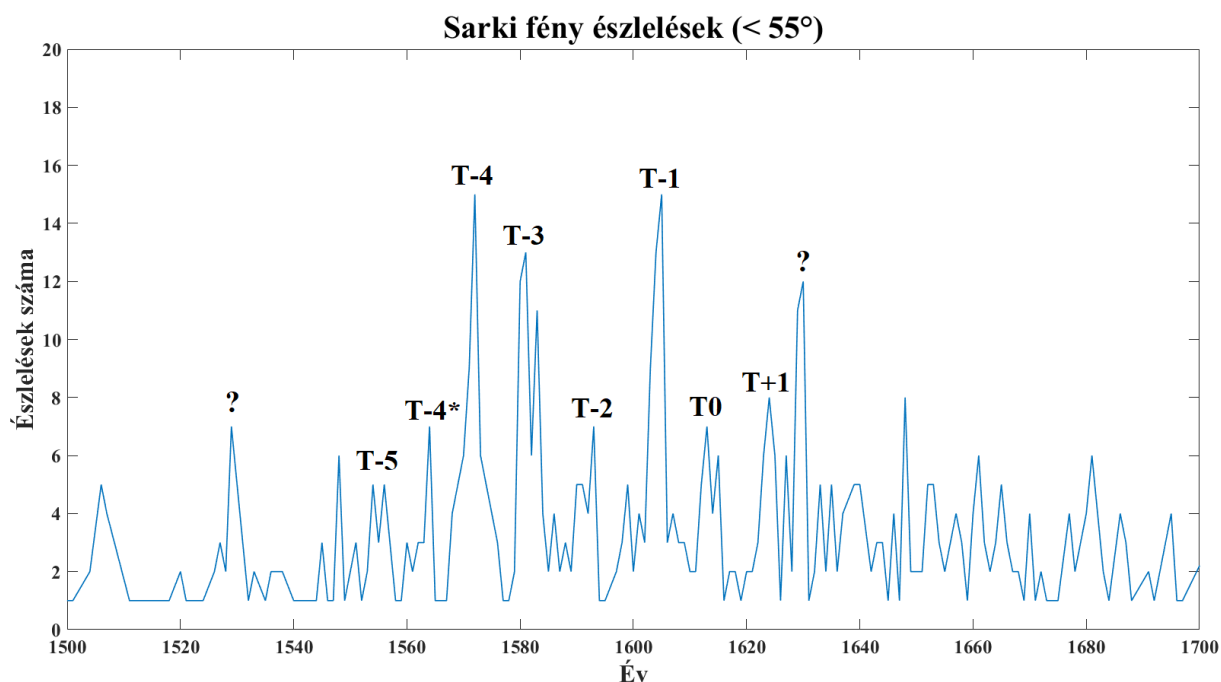
Összességében tehát a három rekonstrukció a 16. század első felére nem mutat egyezést.



18. ábra. A Fogtmann-Schulz et al. [2019] által sávszűrt éves ^{14}C adatok. A kék háttér a Spörer-, a piros a Maunder-minimumot jelenti. (Forrás: Fogtmann-Schulz et al., 2019)

Sarki fény észlelések

Az eredmények kiértékeléséhez a ^{10}Be és ^{14}C izotóp adatok mellé hozzávettem egy másik proxy-t, az alacsony északi földrajzi szélességeken észlelt sarki fény megfigyeléseket is. A 19. ábra az 55° -os északi szélességeknél alacsonyabban megfigyelt sarki fény észleléseket mutatja be az általam vizsgált 16. század körüli időszakban.



19. ábra. 55°-os északi földrajzi szélességnél alacsonyabban észlelt sarki fény megfigyelések 1500 és 1700 között (A sarki fény adatok forrása: [Křivský and Pejml, 1988])

A sarki fény adatokon három ciklus látszik a 16. század problematikus első felében, azonban Usoskin et al. [2021]-hoz képest egy másik három ciklus kombinációja. Ezek a T-4, a T-4* és a T-5.

Az általam rekonstruált későbbi T-3, T-2, T-1, T0 és T+1 ciklusokat az Usoskin et al. [2021] által leírtakon kívül a sarki fény észlelések is megerősítik.

További két csúcsot jelöltem kérdőjellel a sarki fény adatsoron. Ezek közül a későbbi közvetlenül a Maunder-minimum elején bukkan fel, ahol naptevékenységi minimumnak kellene lennie, amit a ^{10}Be fluxuson alapuló rekonstrukció is alátámaszt. A másik kérdőjeles csúcs a Spörer-minimum végén, annak lecsengő szakaszában jön elő. Az előzőekben leírt elemzés alapján a T-4-es ciklus előtt nem lehet biztosra mondani, hogy pontosan hány napciklus követte egymást. Ehhez hasonló probléma merült már fel a távcsöves észlelések idején is. Erre egy példa a Dalton-minimumot közvetlenül megelőző 4-es számú napciklus esete, mellyel kapcsolatban még a mai napig nem tisztázott, hogy egy vagy két ciklusról volt szó [Petrovay, 2020].

3. Összefoglalás és eredmények

Összegzésként két konklúziót vonhatunk le az előző fejezetben diszkutált elemzés eredményeként.

Az általam optimalizált szűrési eljárással 1573 és 1630/1640 között egy hat ciklusból álló sorozatnak ± 1 -2 év pontossággal rögzíteni tudtam az epocháit, melyeket Usoskin et al. [2021] és Fogtmann-Schulz et al. [2019] ^{14}C izotópon alapuló rekonstrukciója és a sarki fény észlelések is megerősítenek. Ezek a T-3-tól T+2-ig tartó ciklusok, melyek mindegyik adatsoron közel megegyeznek.

Továbbá elmondható, hogy a főminimumok előtt és után közvetlenül (jelen esetünkben a Spörer-minimum végén és a Maunder-minimum kezdetén) bizonytalanná válik a 11 éves periódusidejű napciklusok rekonstrukciója. A különböző proxy adatsorok (^{10}Be , ^{14}C és sarki fény) nem egybevágó eredményre utalnak, ami valószínűleg csak részben magyarázható azzal, hogy a gyengébb intenzitású naptevékenység miatt kisebb a jel és emiatt a napciklusok azonosítása is nehezebb, vagy akár fizikai ok is állhat ennek hátterében (mint például az elveszett napciklus esetén a 18. század végén).

A pontosabb rekonstrukció elérése érdekében több adatra lenne szükség, így kulcsfontosságú lenne több helyről minél jobb adatokat biztosító rétegzett jégmintákat venni, valamint érdemes folytatni a kutatást archív történelmi feljegyzések után sarki fény, illetve szabad szemes napfolt észlelésekről.

4. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőmnek, Dr. Petrovay Kristóf tanár úrnak a lehetőséget, hogy betekintést nyerhettem ebbe a témába, továbbá a mérhetetlen türelmet, amit irányomban tanúsított a munka folyamán és a rengeteg segítséget, amivel támogatta dolgozatom elkészülését.

A munkámhoz továbbá az NKFI K-128384 pályázatból kaptam támogatást.

Irodalomjegyzék

Bard, E. and Frank, M. [2006], Climate change and solar variability: What's new under the sun?', *Earth and Planetary Science Letters* **248**(1), 1–14.

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X06004328>

Berggren, A.-M. et al. [2009], 'A 600-year annual 10be record from the NGRIP ice core, greenland', *Geophysical Research Letters* **36**(11).

URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2009GL038004>

Charbonneau, P. [2020], Dynamo models of the solar cycle', *Living Reviews in Solar Physics* **17**(1), 4.

URL: <https://doi.org/10.1007/s41116-020-00025-6>

Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N. S., Miller, H., Watanabe, O., Johnsen, S. J., Steffensen, J. P., Clausen, H. B., Svensson, A. and Larsen, L. B. [2002], The northgrip deep drilling programme', *Annals of Glaciology* **35**, 1–4.

URL: <https://www.cambridge.org/core/article/northgrip-deep-drilling-programme/3F6E47B82CFDD5ED9A369C9F95A88793>

Fogtmann-Schulz, A., Kudsk, S. G. K., Trant, P. L. K., Baittinger, C., Karoff, C., Olsen, J. and Knudsen, M. F. [2019], 'Variations in solar activity across the spörer minimum based on radiocarbon in danish oak', *Geophys. Res. Lett.* **46**(15), 8617–8623.

URL: <https://doi.org/10.1029/2019GL083537>

Hathaway, D. H. [2015], The solar cycle', *Living Reviews in Solar Physics* **12**(1).

Hoyt, D. V. and Schatten, K. H. [1998], Group sunspot numbers: A new solar activity reconstruction', *Solar Physics* **179**(1), 189–219.

URL: <https://doi.org/10.1023/A:1005007527816>

Křivský, L. and Pejml, K. [1988], Solar activity, aurorae and climate in central europe in the last 1000 years.', *Publications of the Astronomical Institute of the Czechoslovak Academy of Sciences* **75**.

URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1988PAICz..75....K>

- Petrovay, K. [2020], Solar cycle prediction', *Living Reviews in Solar Physics* **17**(1), 2.
URL: <https://doi.org/10.1007/s41116-020-0022-z>
- Russell, C. T., Luhmann, J. G. and Jian, L. K. [2010], 'How unprecedented a solar minimum?', *Reviews of Geophysics* **48**(2).
URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2009RG000316>
- Svensson, A., Andersen, K., Clausen, H., Johnsen, S., Rasmussen, S., Steffensen, J. and Vinther, B. [2005], The greenland ice core chronology 2005 (gicc05)', *AGU Fall Meeting Abstracts* .
- Usoskin, I. G. [2017], 'A history of solar activity over millennia', *Living Reviews in Solar Physics* **14**(1), 3.
URL: <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0006-9>
- Usoskin, I. G., Solanki, S. K. and Korte, M. [2006], Solar activity reconstructed over the last 7000 years: The influence of geomagnetic field changes', *Geophys. Res. Lett.* **33**(8).
URL: <https://doi.org/10.1029/2006GL025921>
- Usoskin, I. G., Solanki, S. K., Krivova, N. A., Hofer, B., Kovaltsov, G. A., Wacker, L., Brehm, N. and Kromer, B. [2021], Solar cyclic activity over the last millennium reconstructed from annual 14c data', *AA* **649**.
URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140711>
- Vaquero, J. M. and Vázquez, M. [2009], *The Sun Recorded Through History*, Springer New York.

Ábrák jegyzéke

1.	A Schwabe által évenként feljegyzett napfolt-csoportok száma 1826 és 1843 között (Forrás: Hathaway, 2015, 9. o.)	4
2.	A napfolt-relatívszám évi átlagos (fekete) és simított havi (kék) értékei (Forrás: https://www.sidc.be/silso/yearlyssnplot)	7
3.	A napfolt-relatívszám napi értékei (sárga), havi átlagértékei (kék) és a 13 hónapos csúszóátlaggal simított havi értékei (piros) az elmúlt 13 évben (Forrás: https://www.sidc.be/silso/dayssnplot)	8
4.	A Maunder-minimum az évi átlagos foltcsoportszám idősorán (Forrás: Hathaway, 2015, 55. o.)	9
5.	Fák évgűrűiből kinyert ^{14}C izotóp adatok (Forrás: Russell et al., 2010, 12. o.; Eredeti ábra: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon14_with_activity_labels.svg)	10
6.	A kozmikus sugárzásban megjelenő 11 éves periodicitás összehasonlítva a naptevékenységgel: (a) A napfolt-relatívszám (version 2.0), (b) Az Oulu-i poláris neutron monitor által detektált neutronok beütési aránya (Forrás: Usoskin, 2017, 25. o.)	12
7.	Elsődleges kozmikus sugárzás által létrehozott atmoszférikus részecske kaskád sematikus ábrája. A három ág balról jobbra haladva: elektromágneses, müonikus és hadronikus komponens. (N: atommag; p: proton; n: neutron; μ : müon; π : pion; e^- : elektron; e^+ : pozitron; γ : foton; csillag: ütközés; ovális: bomlás) (Forrás: Usoskin, 2017, 30. o.)	14
8.	^{10}Be fluxus adatok nyers és 25 pontra vett csúszóátlaggal simított értékei 1401 és 1970 között (Adatok forrása: Berggren et al., 2009)	17
9.	Évi átlagos foltcsoportszám adatok 1610 és 1995 között (Adatok forrása: www.sidc.be/silso/groupnumberv3)	18
10.	55° északi szélességnél alacsonyabban észlelt sarki fény megfigyelések 1352 és 1900 között (A sarki fény adatok forrása: [Křivský and Pejml, 1988])	19
11.	Szabad szemes napfolt megfigyelések 1356 és 1918 között Axel D. Wittmann munkája nyomán	20
12.	^{10}Be fluxus adatok és simított értékeik 1404 és 1979 között	22
13.	^{10}Be fluxus adatok és simított értékeik 1404 és 1979 között	23
14.	A csillapított Gauss-szűrővel sávszűrt ^{10}Be fluxus adatok 1404 és 1979 között	23

15.	A csillapított Gauss-szűrővel sávszűrt foltcsoportszám (version 1.0) adatok 1625 és 1979 között	24
16.	Butterworth-szűrővel sávszűrt ^{10}Be fluxus adatok 1389 és 1994 között . . .	26
17.	Butterworth-szűrővel sávszűrt ^{10}Be fluxus és foltcsoportszám (version 1.0) adatok 1610 és 1994 között (A könnyebb értelmezhetőség kedvéért, a ^{10}Be fluxus tengelye meg van fordítva.)	27
18.	A Fogtmann-Schulz et al. [2019] által sávszűrt éves ^{14}C adatok. A kék háttér a Spörer-, a piros a Maunder-minimumot jelenti. (Forrás: Fogtmann-Schulz et al., 2019)	31
19.	55° -os északi földrajzi szélességnél alacsonyabban észlelt sarki fény megfi- gyelések 1500 és 1700 között (A sarki fény adatok forrása: [Křivský and Pejml, 1988])	32

Táblázatok jegyzéke

1.	A legjobb egyezést ($\approx 81,72\%$) mutató szűrési módszerrel rekonstruált tör- ténelmi napciklusok minimum és maximum időpontjai 1392 és 1991 között, valamint az egyes ciklusok (minimumtól minimumig) hossza években . . .	28
2.	Rekonstruált naptevékenységi minimumok és maximumok epochái a 16. századra. A ^{14}C adatokon alapuló rekonstrukció Usoskin et al. [2021] munkája.	29