



宇宙線起源核種による過去1200年間の太陽活動と宇宙線変動

- 宇宙線(～数GeV)の太陽変動と ^{14}C の振る舞い
- ^{14}C の測定により目指すサイエンス
- これまでの研究成果の紹介
- まとめと今後の展望

¹宮原ひろ子 hmiya@icrr.u-tokyo.ac.jp

²横山祐典, ³松崎浩之

⁴増田公明, ⁴永治健太郎, ⁵中村俊夫, ⁶北川浩之,

⁷村木綏

¹ 宇宙線研 (宇宙基礎物理研究部門)

² 東大・海洋研 ³ 東大・原子力

⁴ 名大・STE ⁵ 名大・年測センター ⁶ 名大・環境学

⁷ 甲南大・理工

Monitoring cosmic ray flux using ^{14}C

Galactic Cosmic Rays



Modulation by Solar Magnetic Field



Modulation by Geomagnetic Field



Cosmic Ray Air Shower in the Atmosphere



Secondary neutron

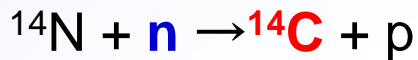
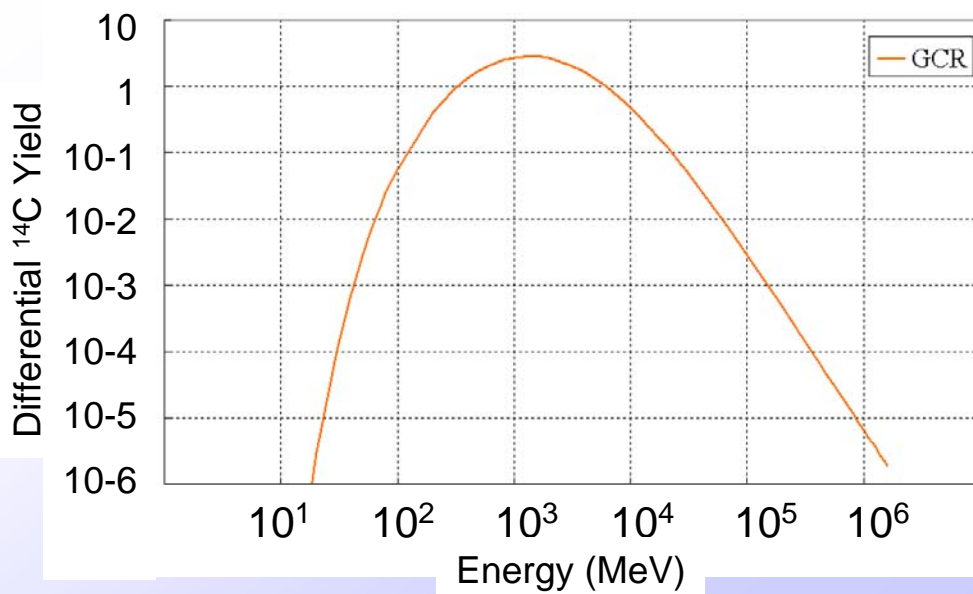
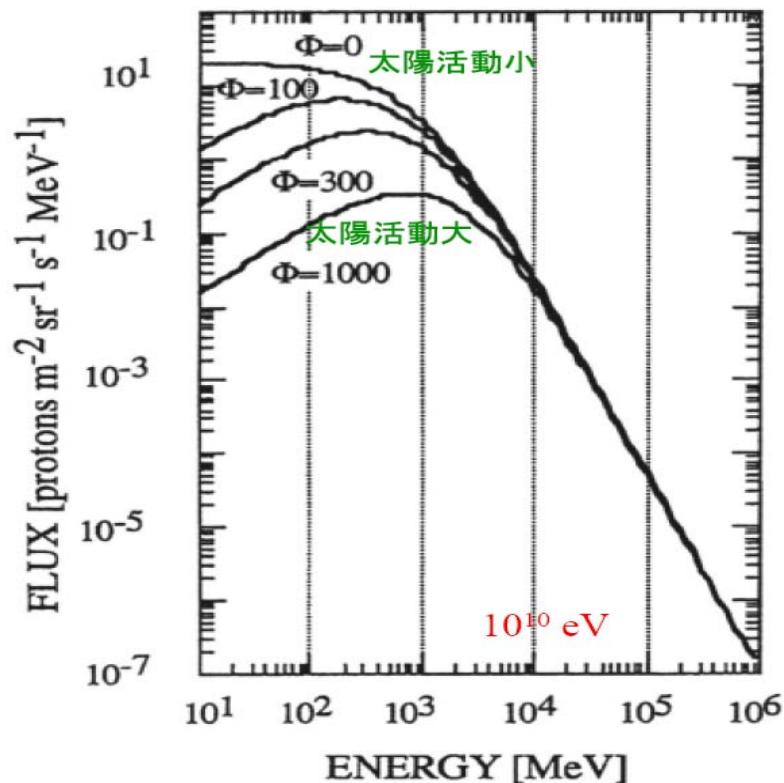
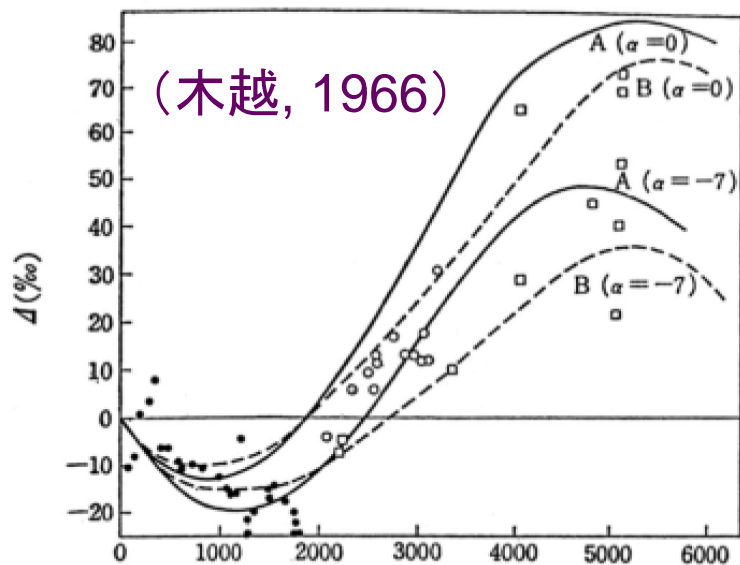


Photo synthesis

Tree-rings



地磁気変動による年輪中¹⁴Cの経年変化



(現在) 年 (B.P.)

A : 図 12 の曲線 A に基づく計算値

B : 図 12 の曲線 B に基づく計算値

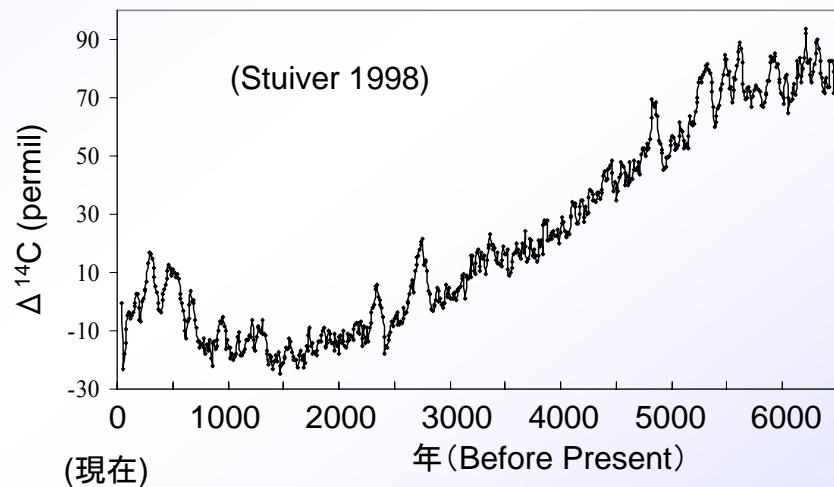
● : 屋久杉についての実測値

○ : カリフォルニアおよびアリゾナ産樹木年輪
についての実測値

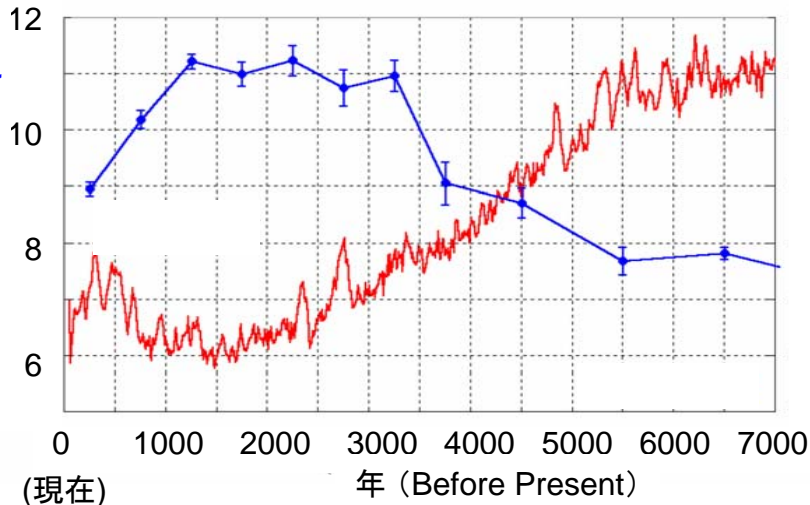
□ : エジプトの木材試料による実測値

図 14 大気中の ¹⁴C 濃度の地磁気変動に基づく
計算値および実測値

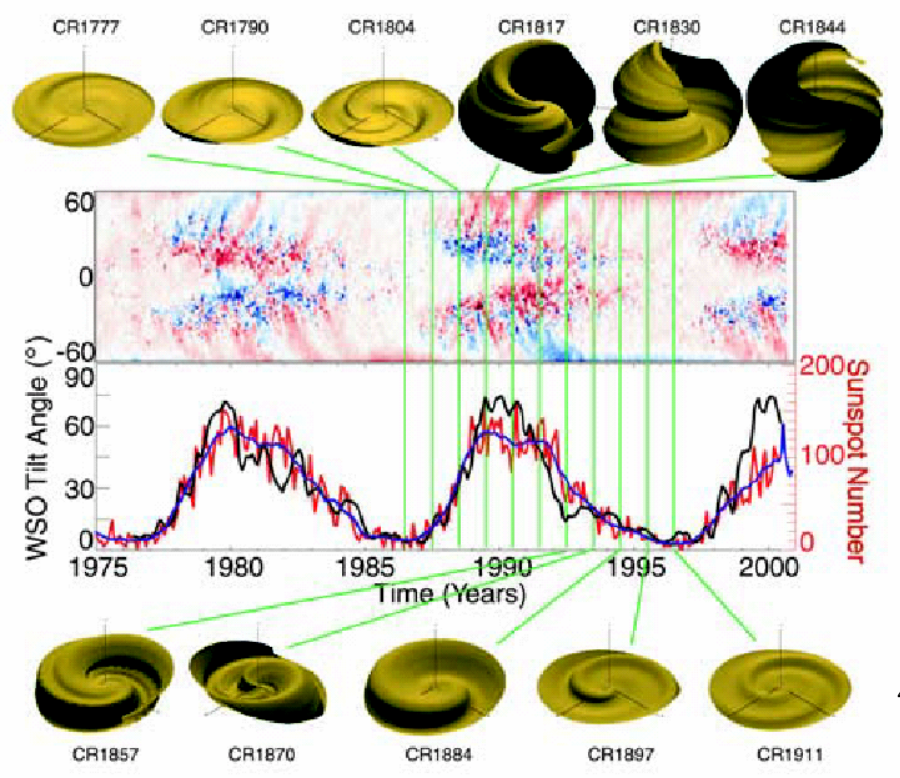
Compiled ¹⁴C data (5~10yr resolution) (back to ~14000 years ago)



地磁気双極子モーメント (10^{22}Am^2)



太陽圏磁場構造の11年変動と宇宙線の太陽変調



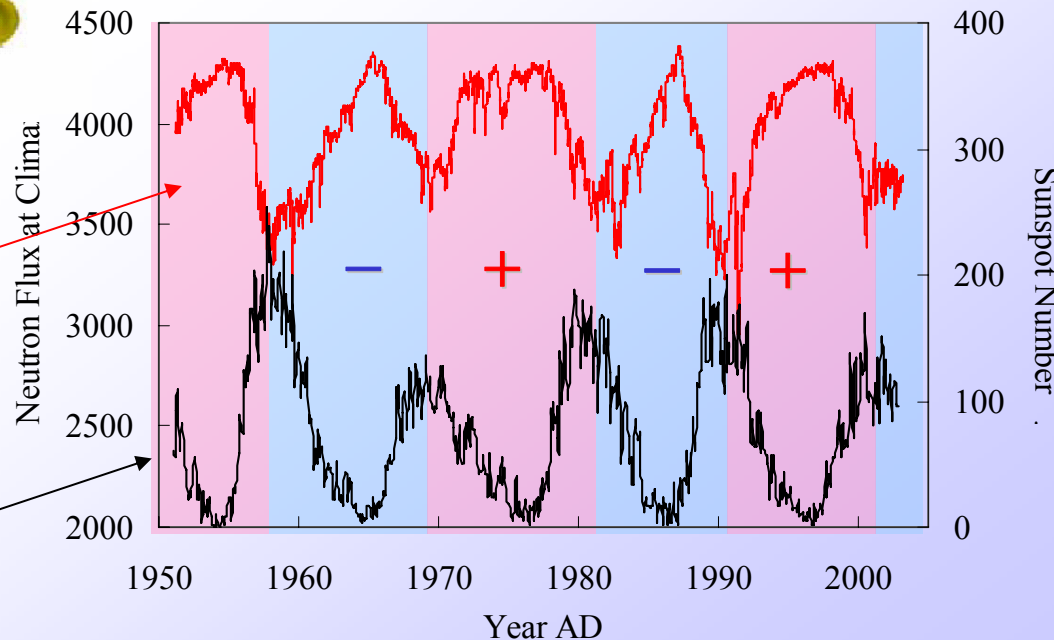
← Latitudinal solar magnetic profile

Sunspot number

P. Riley et al., JGR 2002

Neutron data

Sunspot number



Drift model (Jokipii et al., ApJ, 1977; Kota & Jokipii, 2001)

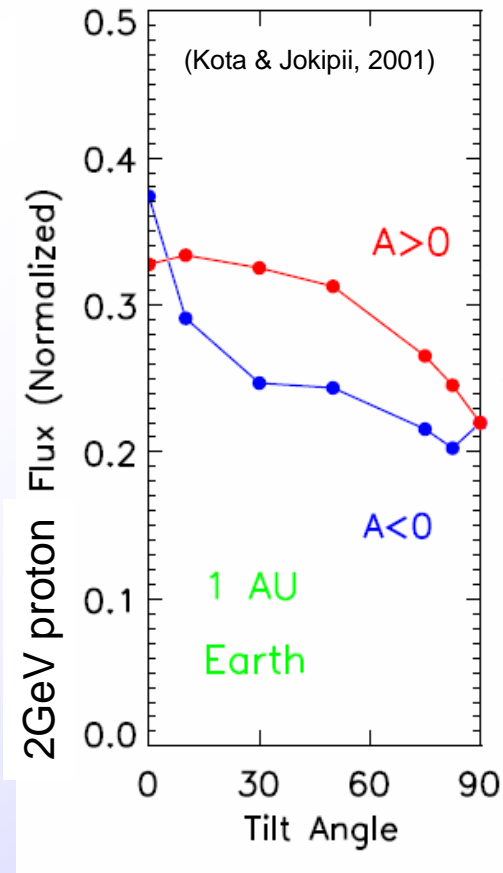
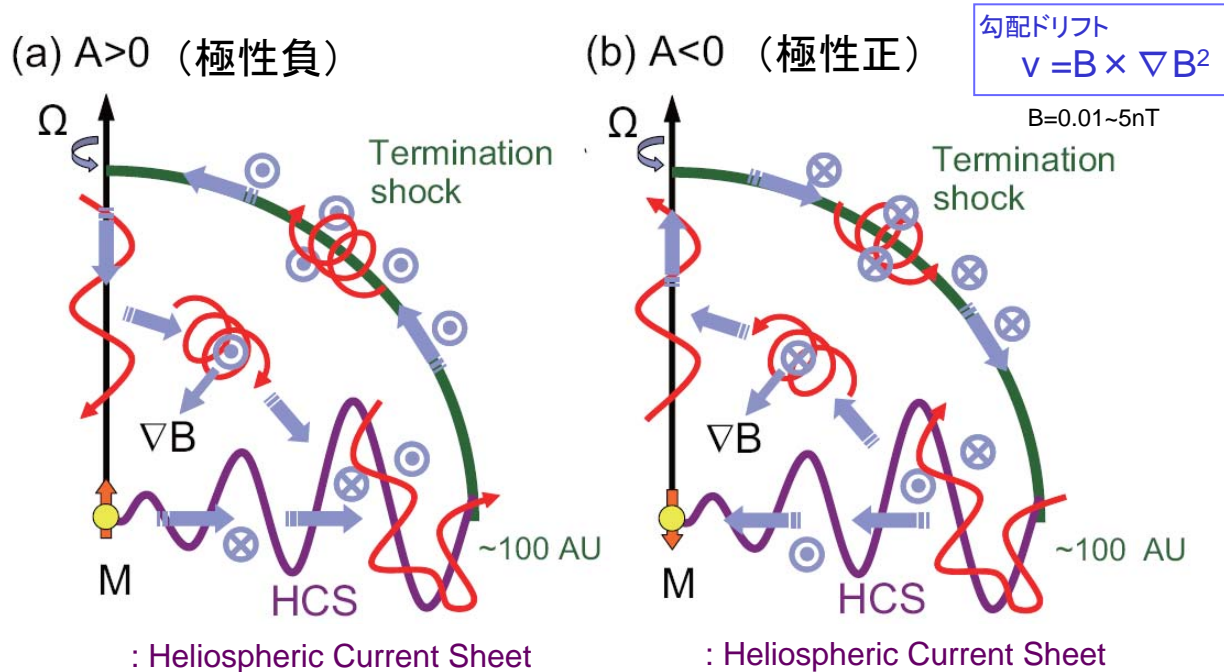


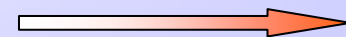
Fig. 太陽圏の断面図 (from Okazaki, 2007)



(Small tilt = solar min)



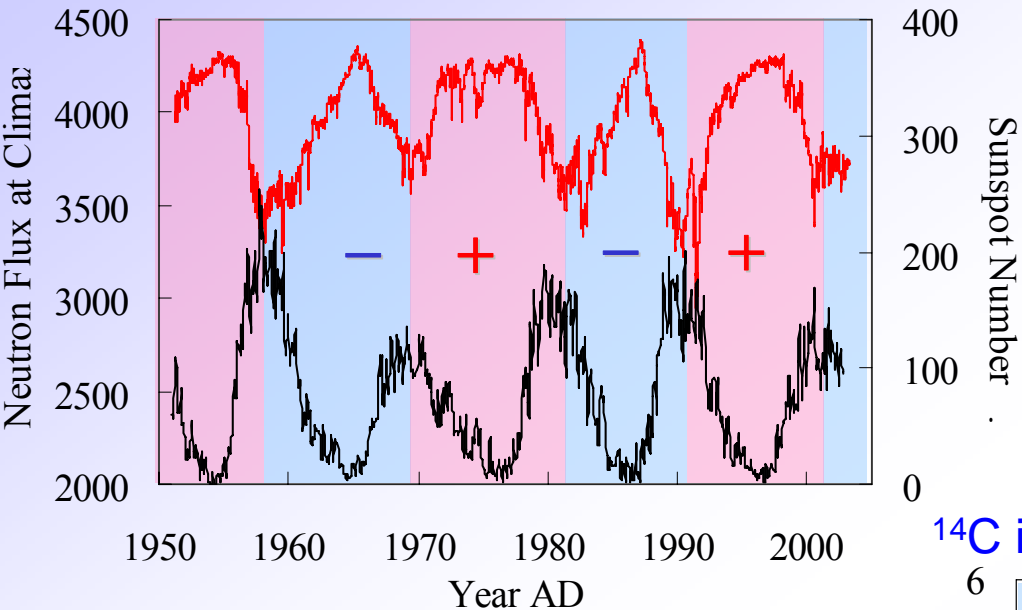
(Large tilt = solar max)



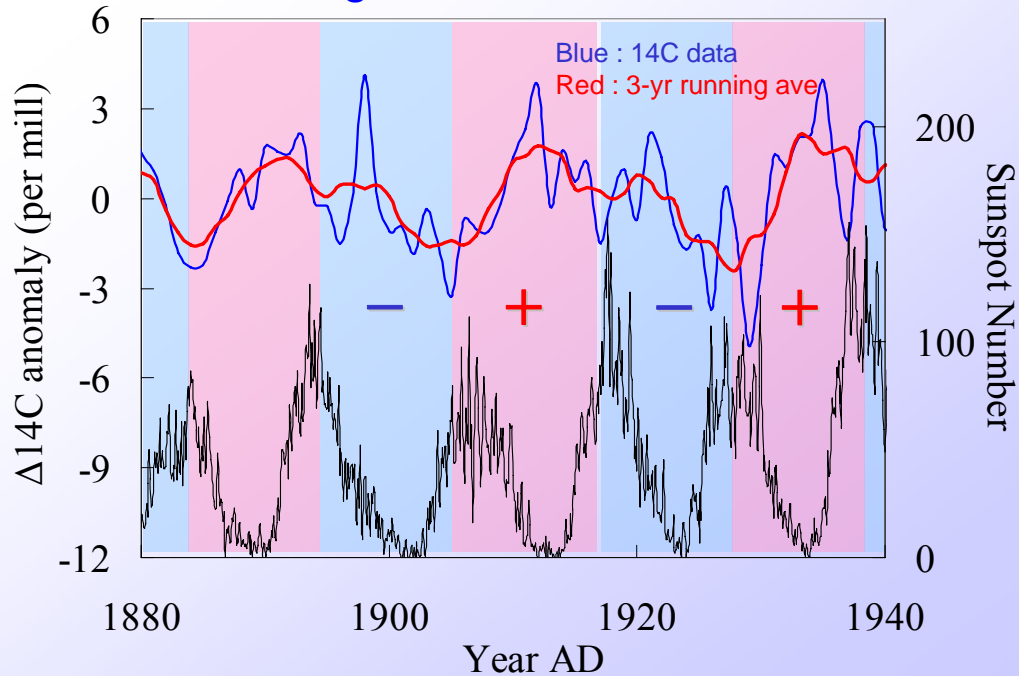
Magnetic activity
at solar surface

太陽変動による年輪中 ^{14}C の経年変化

Neutron flux



^{14}C in tree-rings (shifted by 3yrs according to the residence time)



◎太陽周期の平均的な周期長



分析機器の高精度化により
1サイクル毎の周期長の検出可

○太陽双極子磁場の反転(極性)



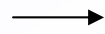
双極子消失時(四重極構造)の場合については
今後、宇宙線変調の数値シミュレーションが必要

△太陽圏磁場構造
(tilt angle)



大気循環を介さない他の核種(¹⁰Beなど)との組み合わせにより
より詳細な磁場構造を探ることが可能

×太陽活動レベル



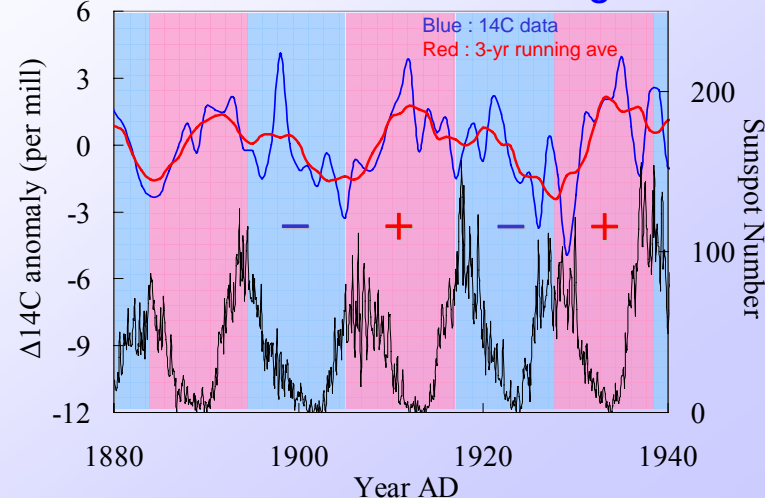
11年周期の周期長と
活動度の逆相関関係が
確立されれば◎

問題点

¹⁴Cの変動幅 0.5~0.6%
加速器質量分析計の誤差 ~0.3%

2010年に海洋研に加速器質量分析計が導入される予定
0.3% ⇒ 0.12%

¹⁴C in tree-rings

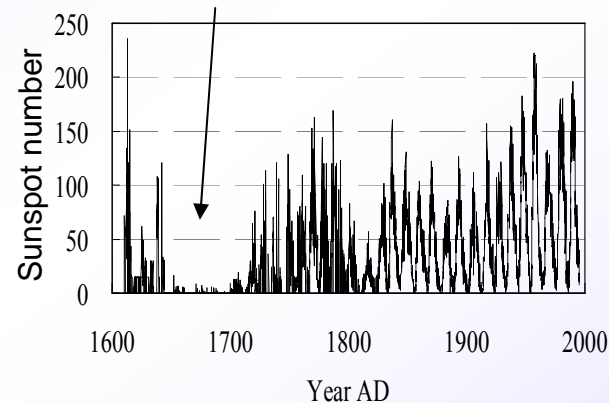


^{14}C 量の測定(分解能1年)により目指すサイエンス

▶ 太陽ダイナモモデルに観測的制約

- ◇ 太陽11年、200年、2400年周期の変遷史
- ◇ 約200年に1度の黒点消失期(マウンダー極小期など)の発生メカニズムとダイナモの変動特性
- ◇ 黒点消失の前兆現象に関する情報⇒予測へ
- ◇ 11年周期の伸縮により太陽活動度レベルの経年変化をモニター

The Maunder Minimum(1645-1715AD)



▶ 銀河宇宙線の太陽変調の物理

- ◇ 太陽の11~2400年周期にともなう太陽圏磁場の変化と宇宙線の変調

南極アイスコア中 ^{10}Be の測定データを加えることにより
より詳しい宇宙線モジュレーションの基礎データを得る

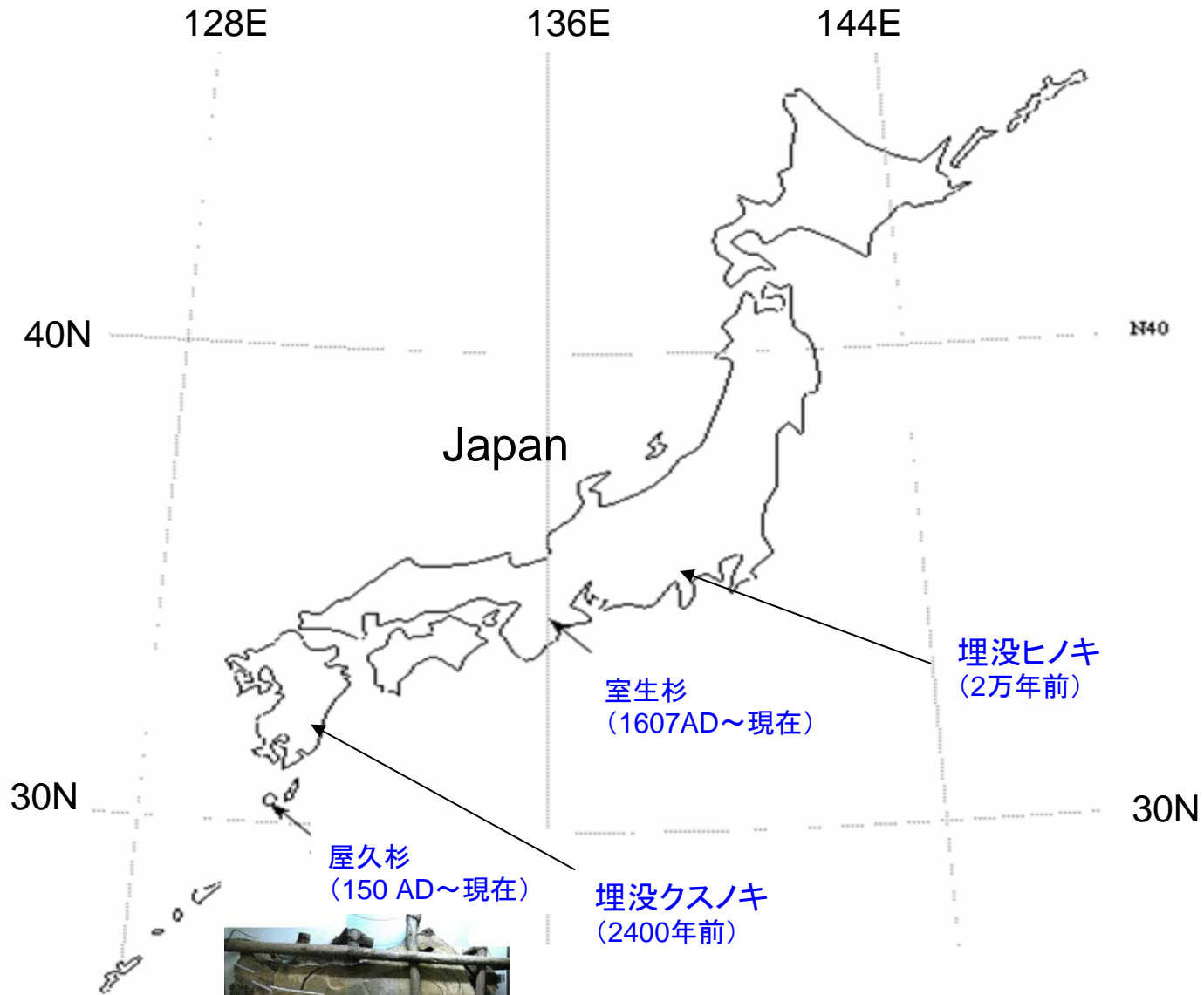
(^{14}C の11年変動のシグナルとの比較により年代決定精度が向上)

▶ 宇宙線の気候(雲形成)への影響を探る

- ◇ 宇宙線の11年/22年周期の気候への影響を調べる基礎データ

(「宇宙線が雲核を増やして地球を冷やす」スベンスマルク仮説の検証)

年輪試料の採取地

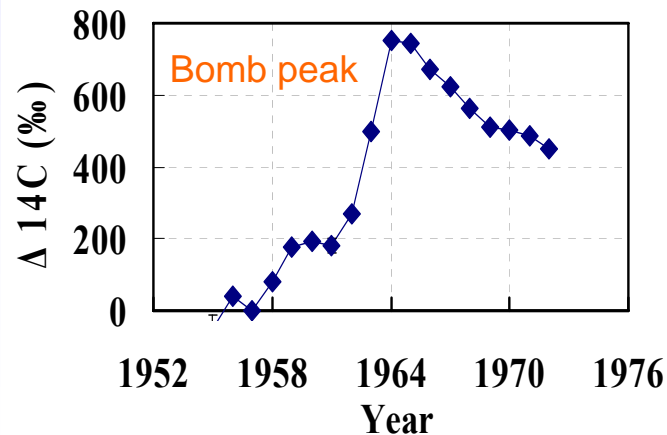


試料調整・測定手法

① 年輪の絶対年代の決定

核実験による ^{14}C ピーク(1964年)の検出

年輪幅パターンマッチングによる年代決定



② 年輪の剥離と化学洗浄

塩酸-水酸化ナトリウム-塩酸(AAA) 処理



③ グラファイト合成

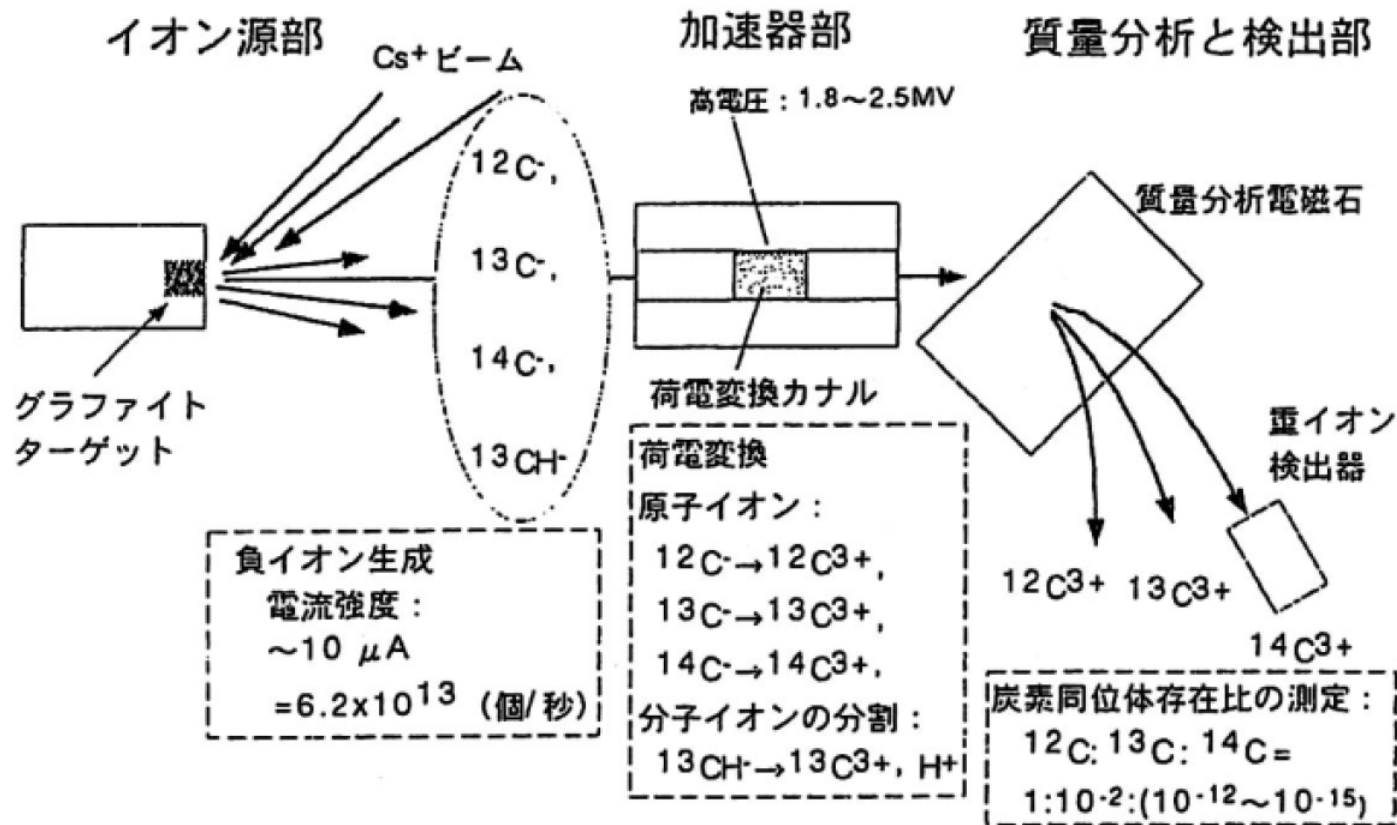
年輪試料の燃焼 \Rightarrow CO₂ガスの純化 \Rightarrow 水素還元 \Rightarrow グラファイト

④ 加速器質量分析計 (Accelerator Mass Spectrometer)

による $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の測定



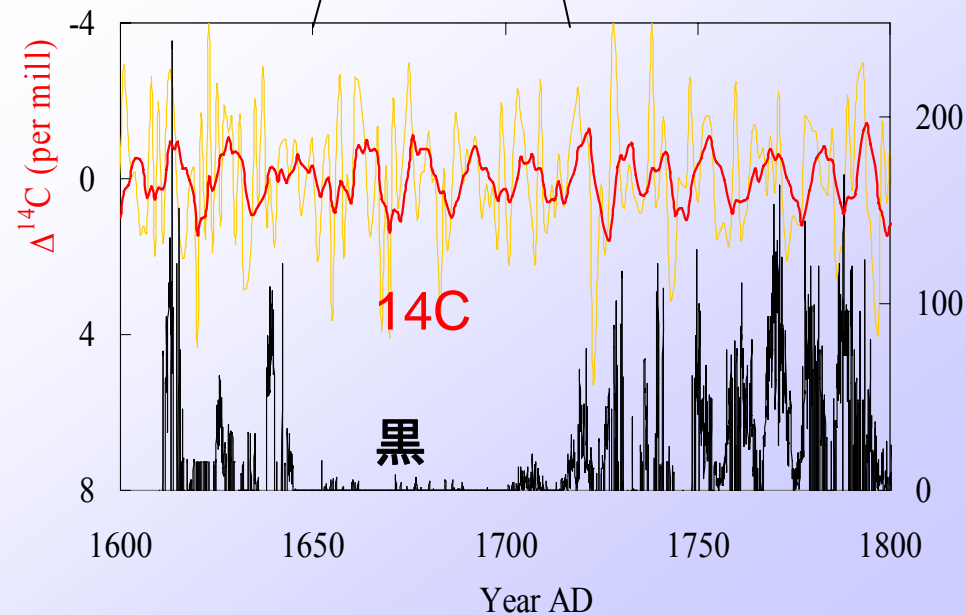
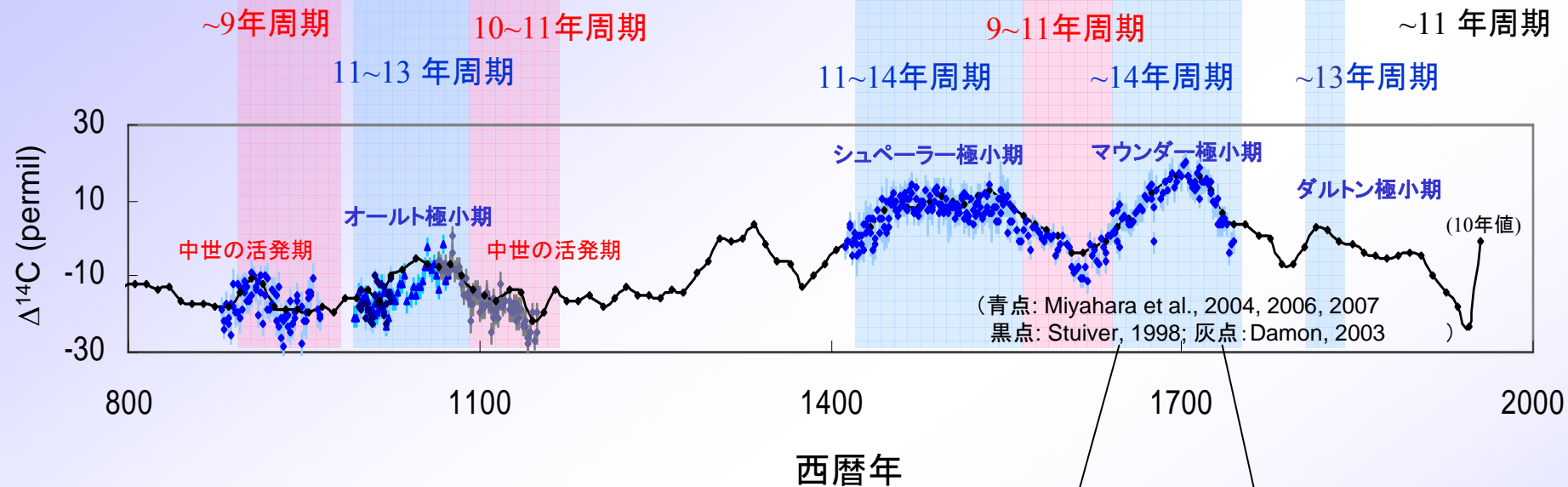
加速器質量分析計の原理



存在比

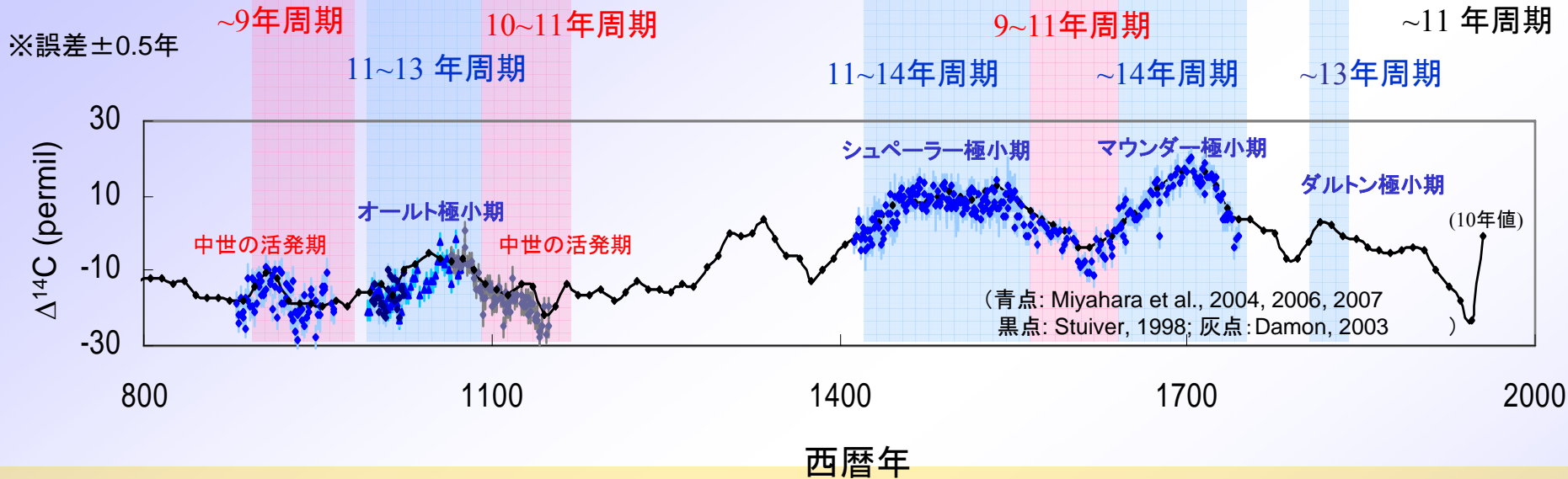
$$^{12}\text{C} : ^{13}\text{C} : ^{14}\text{C} = 0.989 : 0.011 : 1.2 \times 10^{-12}$$

測定結果：過去1100年間における太陽“11年”周期の変遷



Miyahara et al., Sol. Phys. 2004,
 JGR, 2006,
 EPSL, 2008

測定結果： 過去1100年間における太陽"11年"周期の変遷

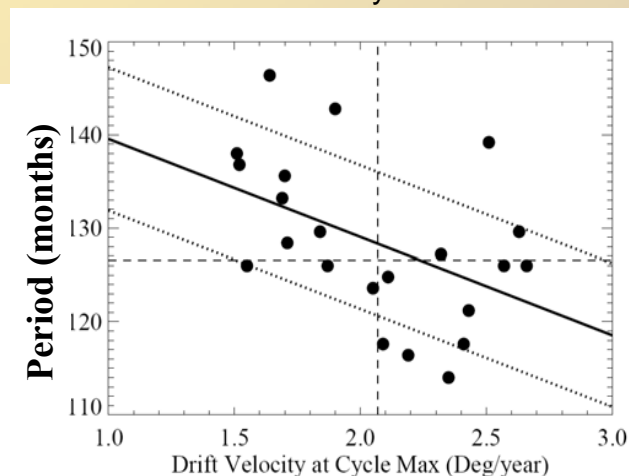
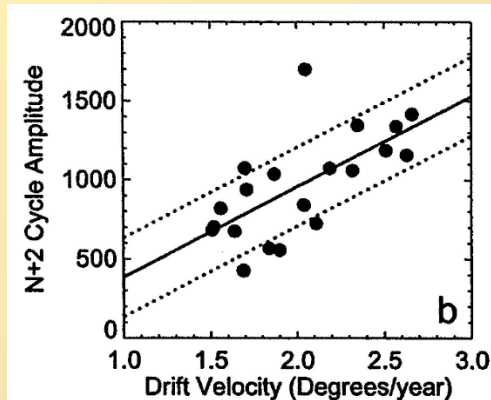


➤ 周期長と活動度に逆相関の傾向

(Solanki, 2002; Hathaway, 2003; 2004らの結果を支持)

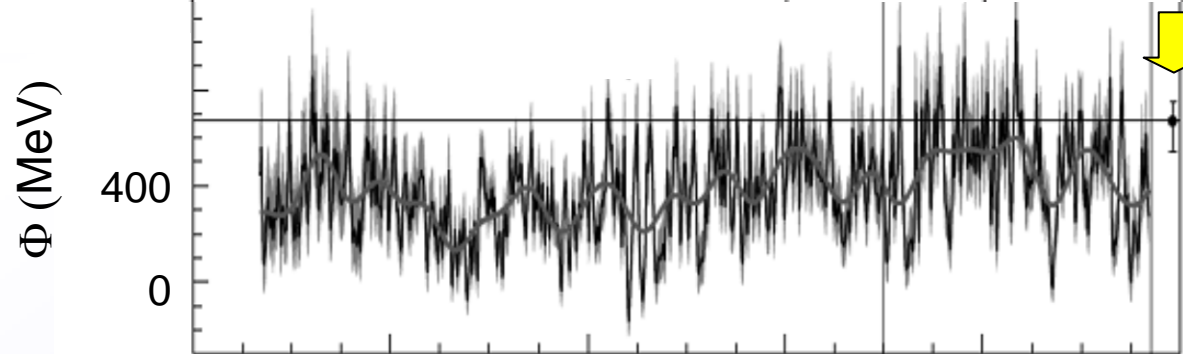
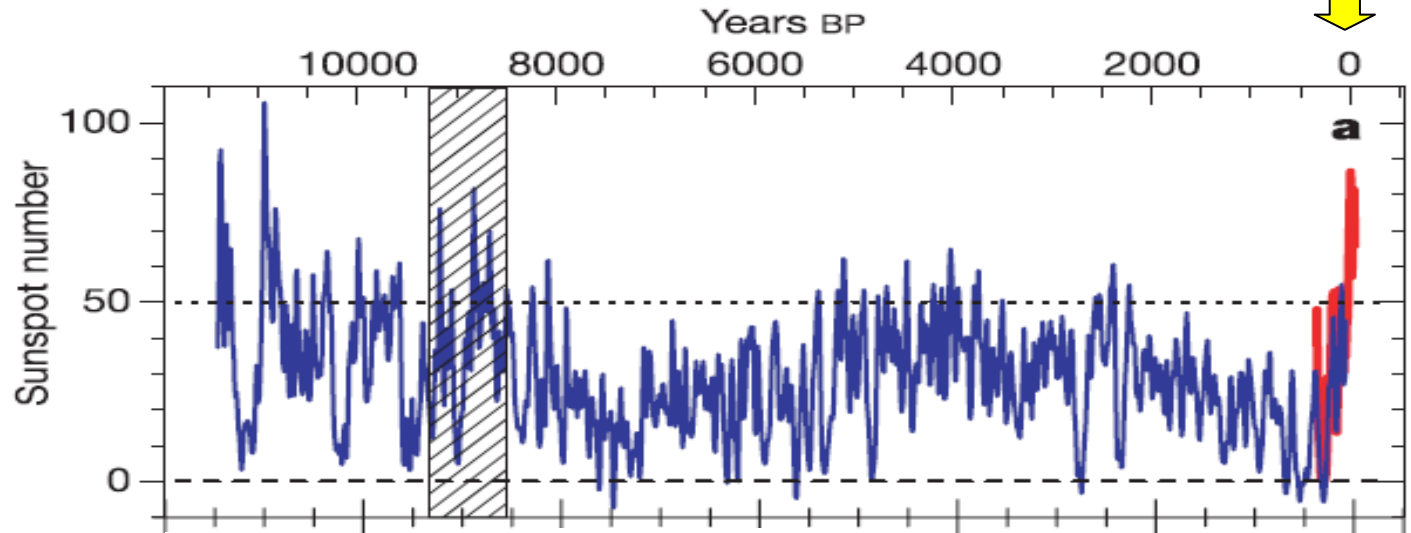
14yr=168 months
9yr=108 months

マウンダー極小期の黒点消失は
太陽内部の対流速度の
低下に起因??



Long-term trend of solar activity level : Contradicting features of ^{14}C and ^{10}Be

Present



Based on ^{14}C



(Solanki, 2004;
2005)

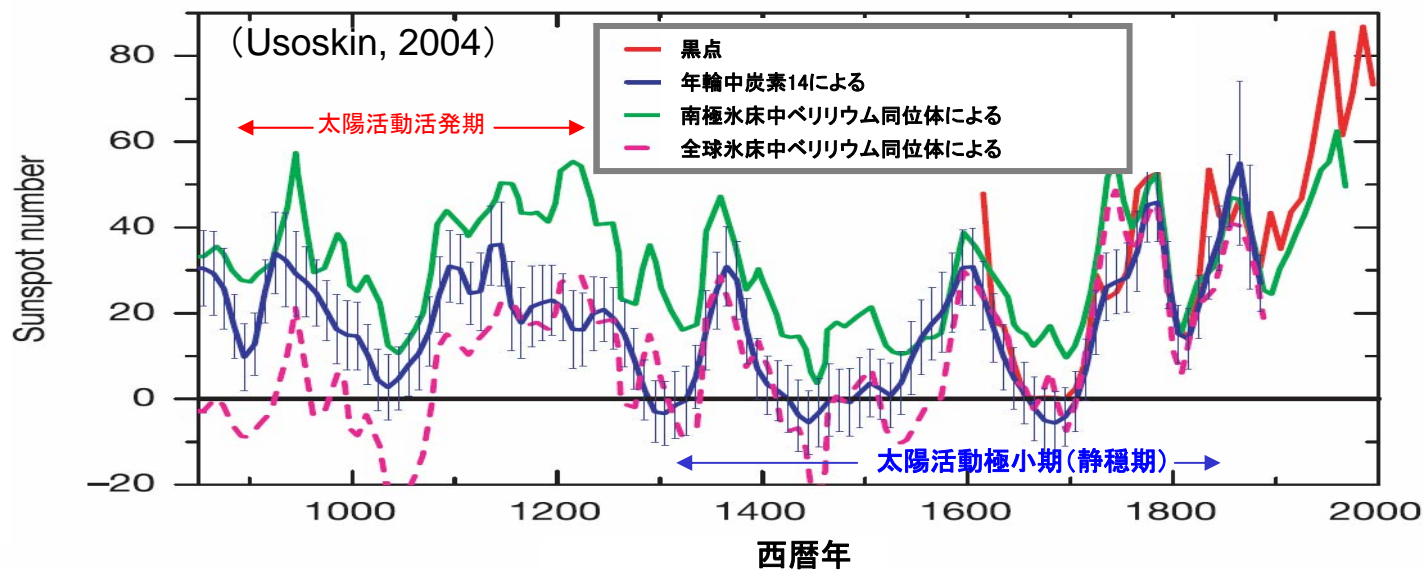
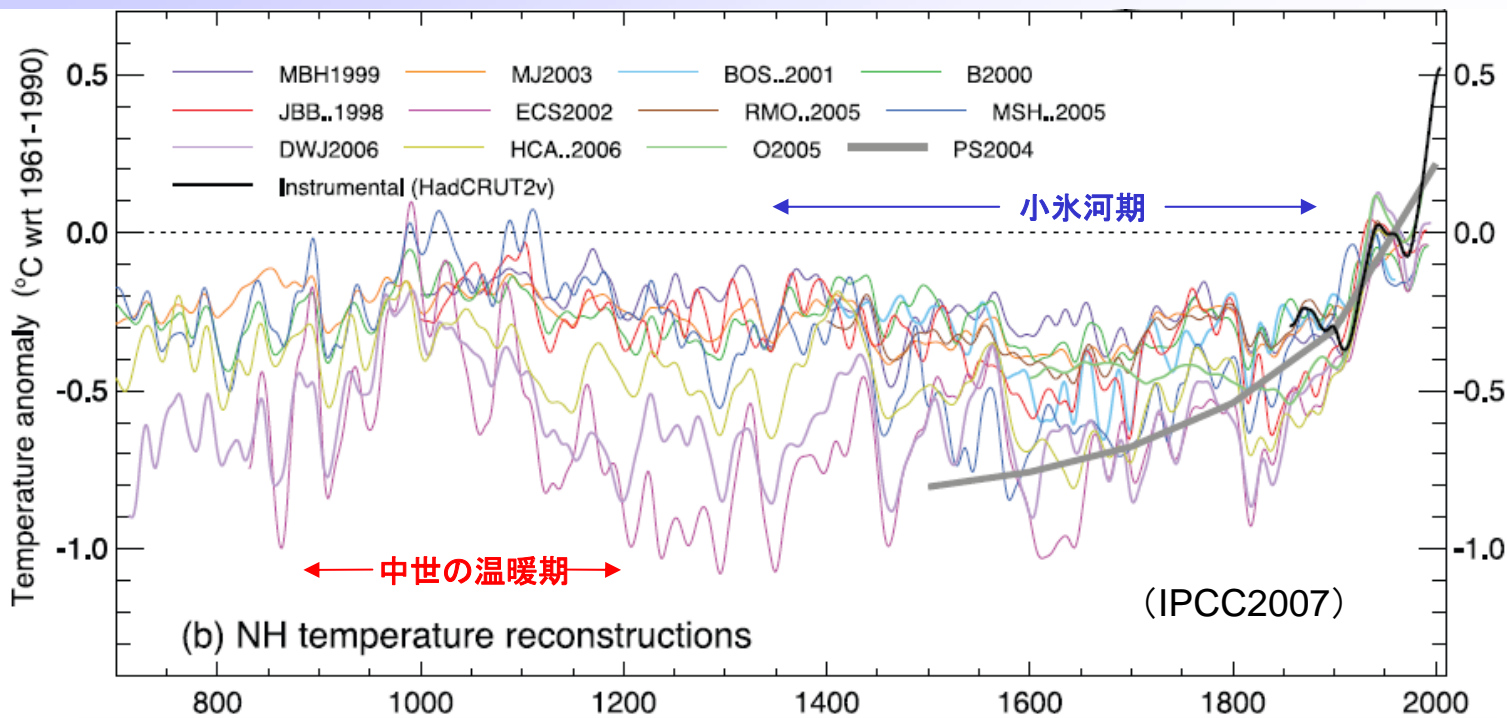
Based on ^{10}Be



(Vonmoos, 2006)

宇宙線と気候

過去1200年間における気温変化と太陽活動



太陽活動と気候変動には似たような変動や周期性が多数報告されている

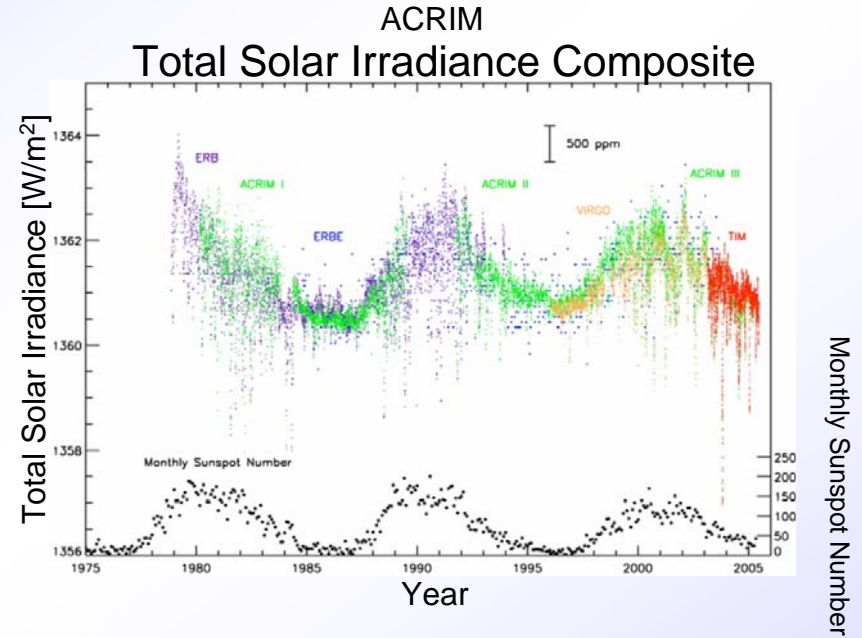
気候変動の外的要因の主要な候補

日射，紫外線

simple “11-year” variation

銀河宇宙線

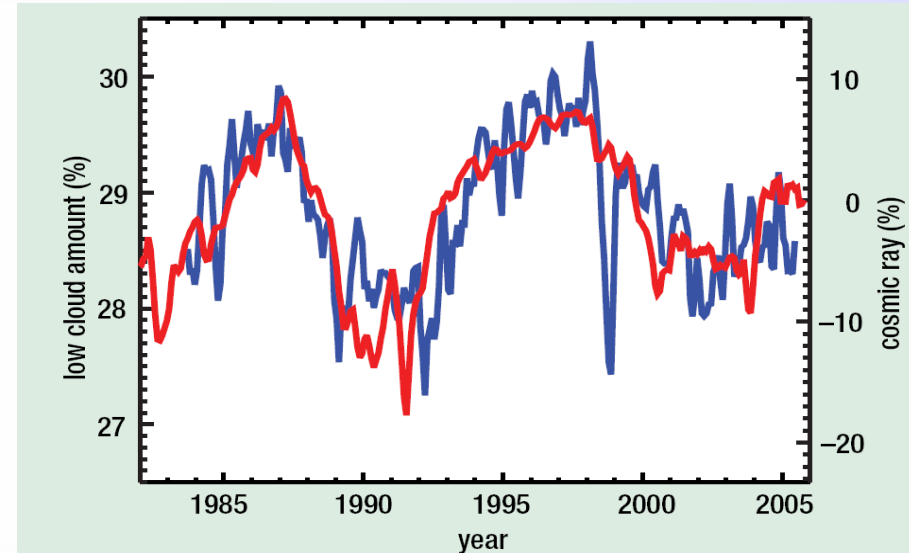
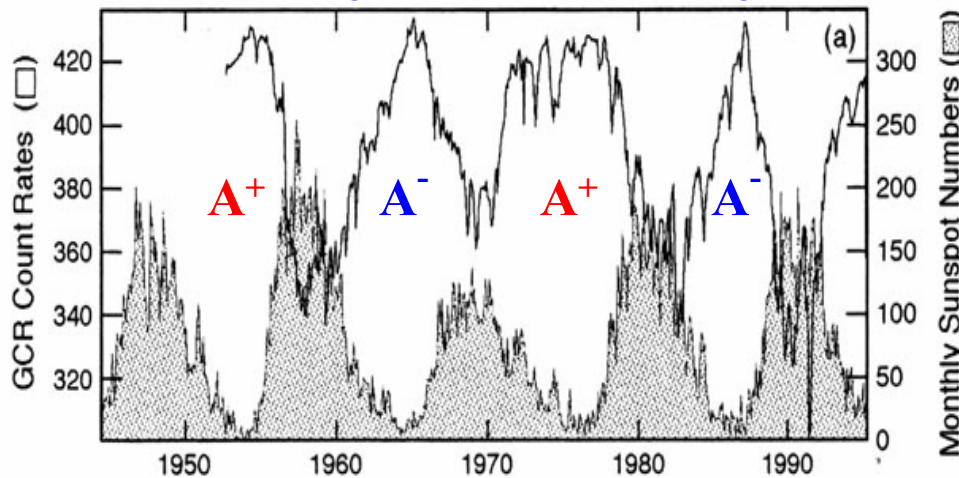
“11-year” / “22-year” cycles



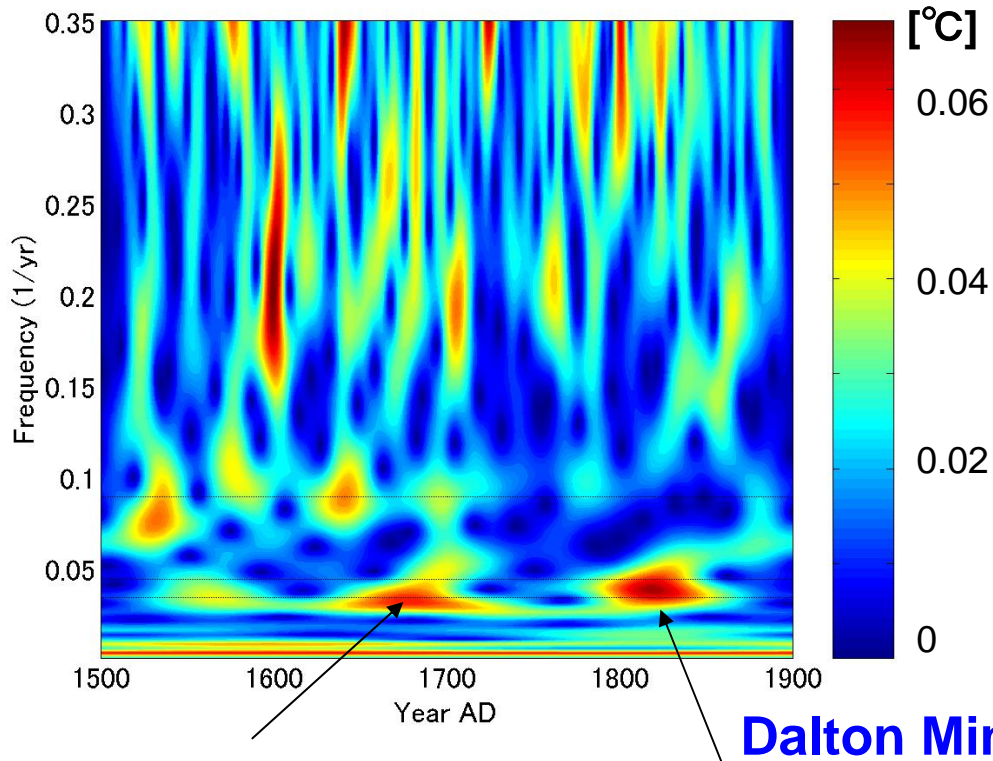
(Svensmark, 2007)

Polarity of the Sun

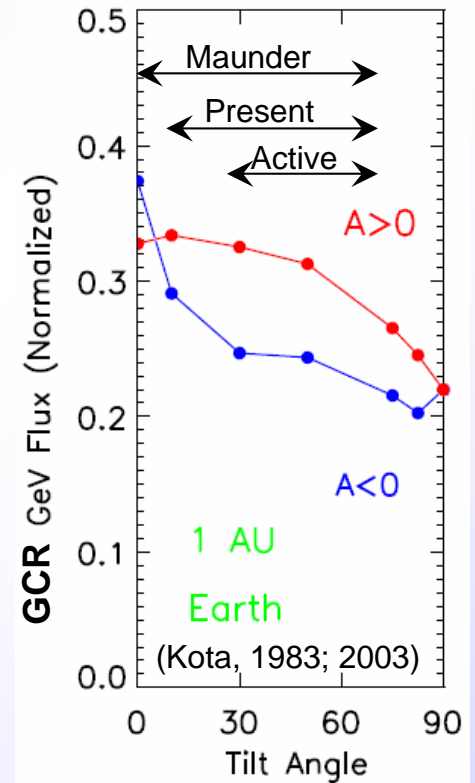
positive negative positive negative



22-year cycle detected in tree-ring width (proxy of temperature)



Climate cycle = ~26 years

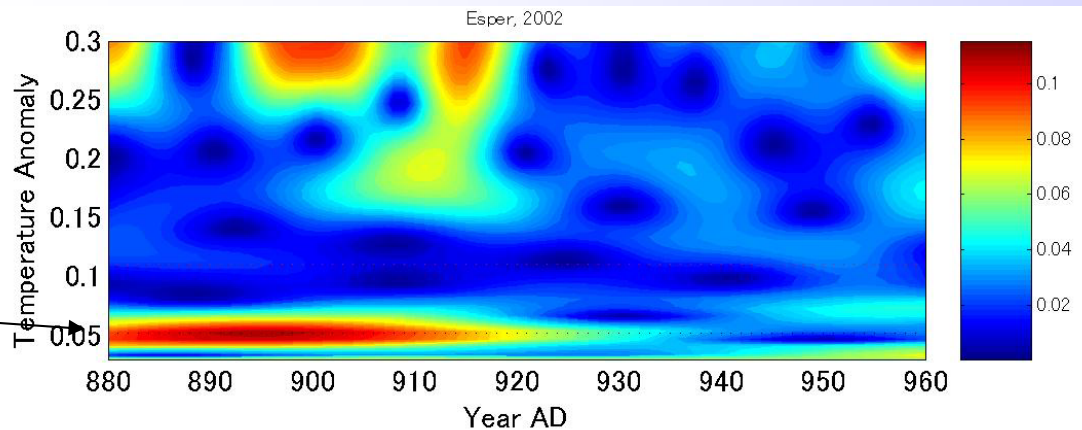


Maunder Minimum

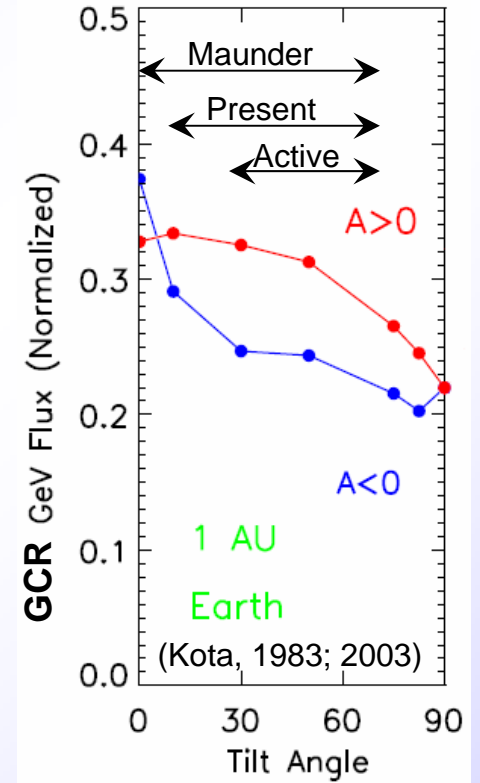
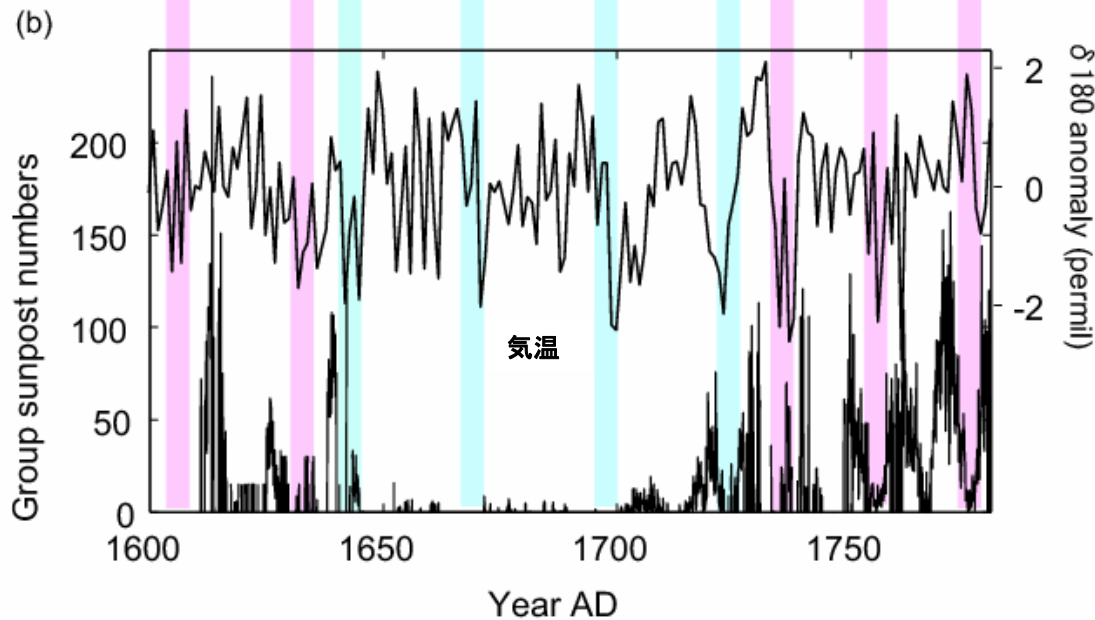
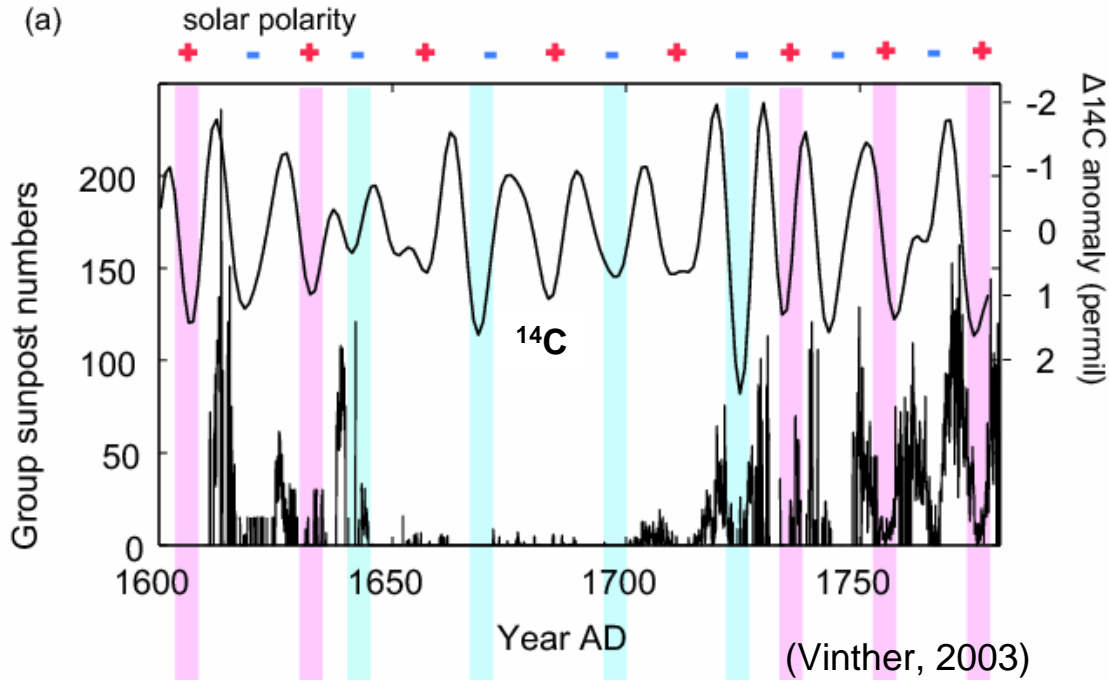
Climate cycle = ~28 years

Medieval Maximum

Climate cycle = ~19 years



Solar forcing of climate during the Maunder Minimum (Miyahara, et al., EPSL, 2008)



太陽活動度が下がると
 極性負の solar minimum
 で寒くなる

まとめと展望

- ^{14}C の1年分解能での測定により、太陽、太陽圏、宇宙線、気候の変動の物理を理解するために必要な基礎データが得られる
 - 既知の太陽周期が網羅できる過去2万年間をターゲットにする
 - データの高精度化、高効率化が必要（2010年頃から可能になる予定）
- 今後、南極氷の ^{10}Be 等の分析を組み合わせることによりさらに様々なサイエンスが可能
 - 宇宙線の長期的変化・可変性に関して、より詳細な情報
- 宇宙線が気候を左右するメカニズムの解明に向けて
 - 素過程 …… CERNでの基礎実験(SKY、CLOUD実験)
 - 気候システムに与える影響……neutron データと雲データの解析
 - 氷河期(生物起源エアロゾル,水蒸気の欠乏時)における宇宙線と気候