

第10回 森羅万象学校
「太陽の変動性と地球・惑星」
2010年2月22-24日
北海道 支笏湖

最近の太陽は異常か？

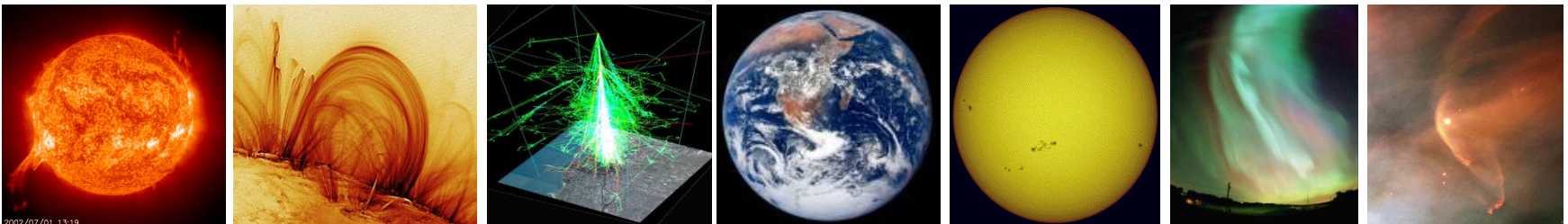
常田佐久
(国立天文台)

Are cold winters in the UK associated with low solar activity?

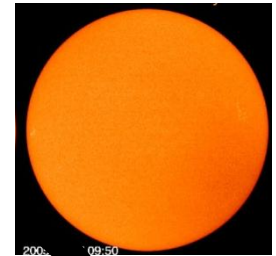
Mike Lockwood

*(University of Reading,
& Space Science and Technology Department,
STFC/Rutherford Appleton Laboratory)*

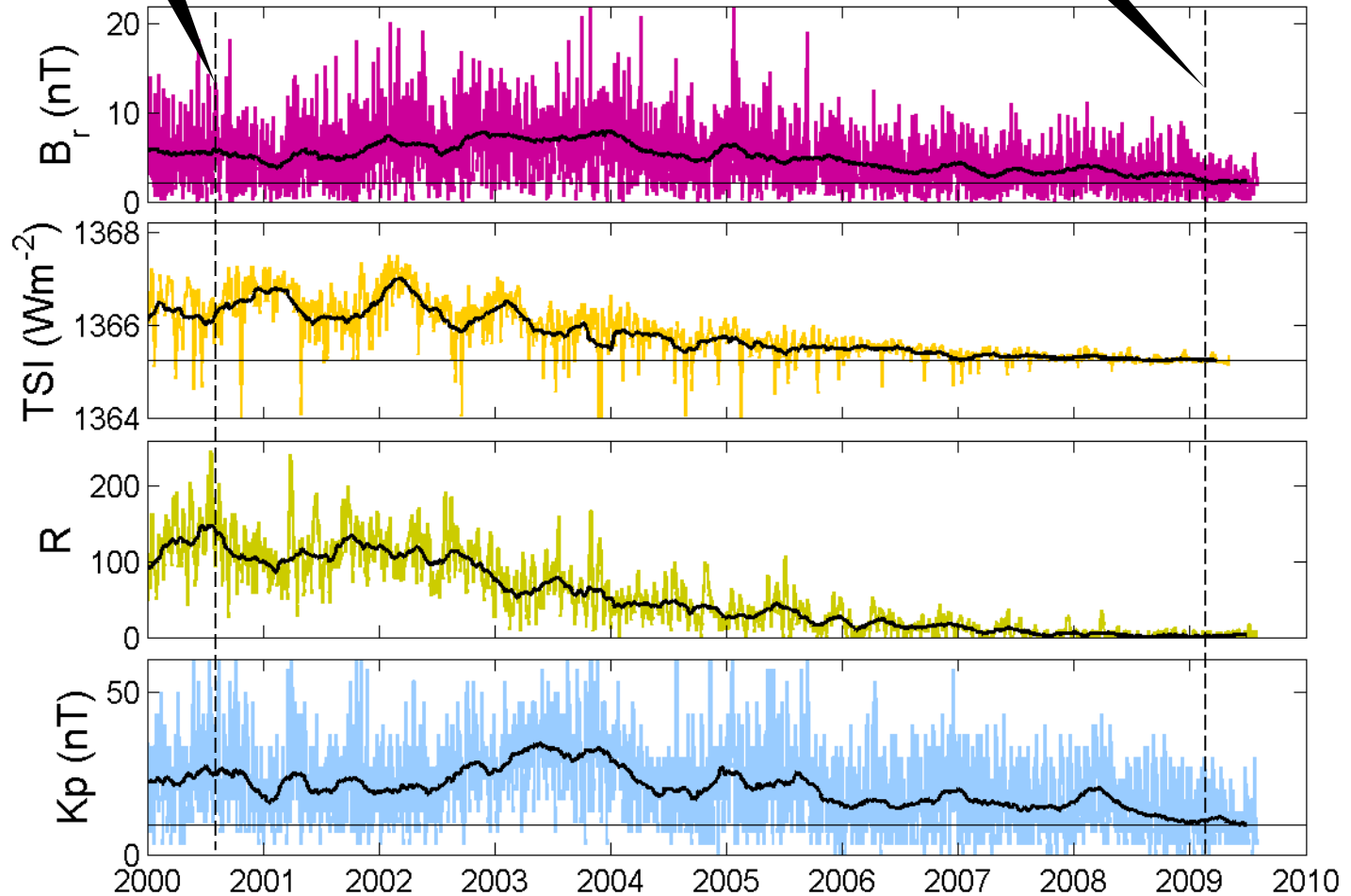
Seminar, MSSL, 16 February 2010



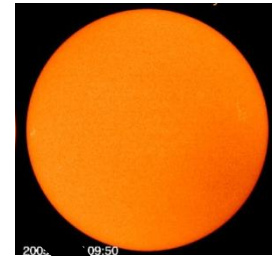
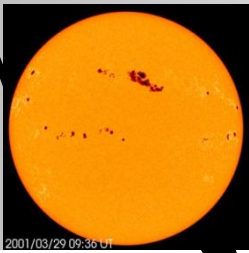
Recent Data



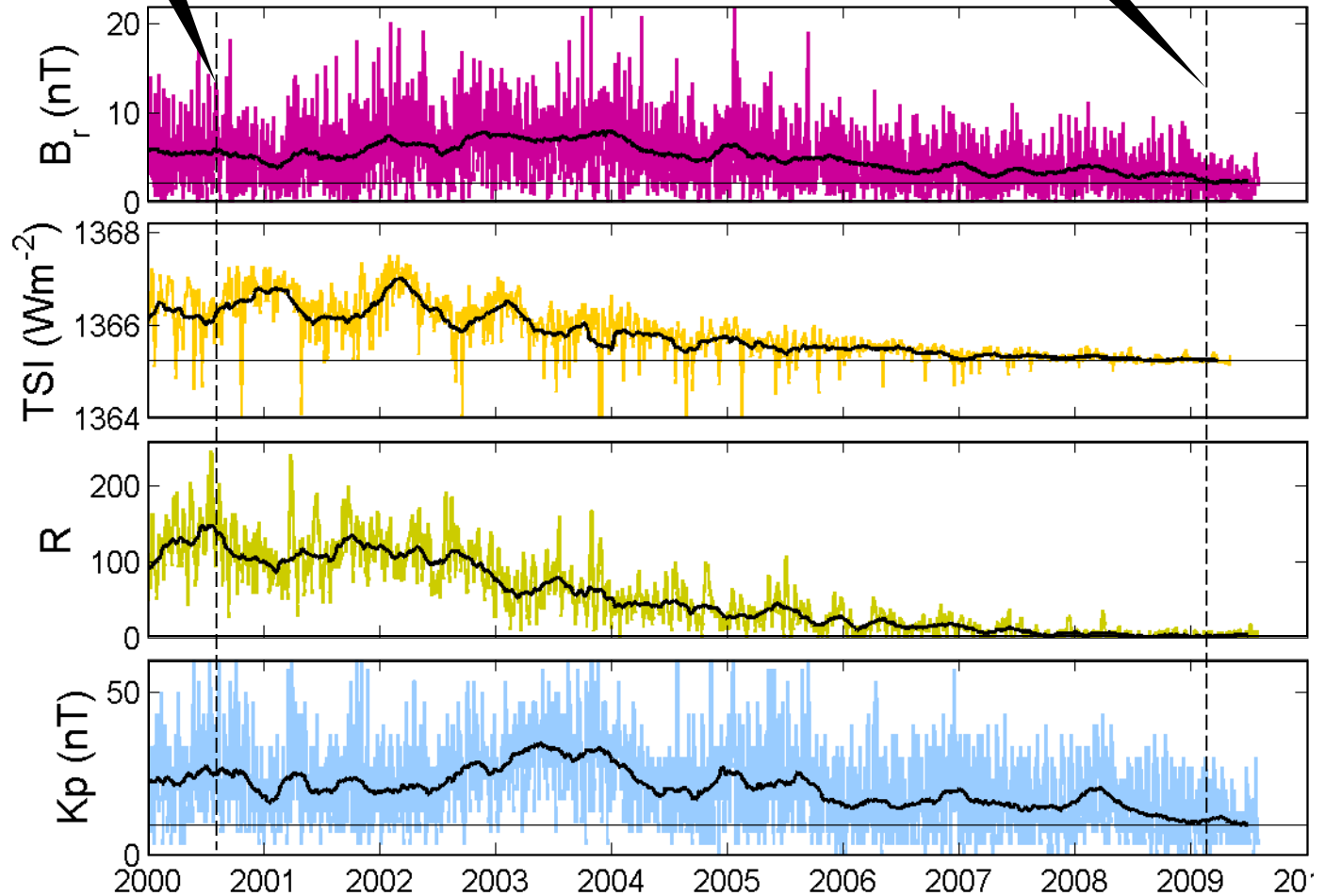
- ▶ radial IMF, $|B_r|$
- ▶ PMOD composite of TSI
- ▶ sunspot number, R
- ▶ Kp geomagnetic index

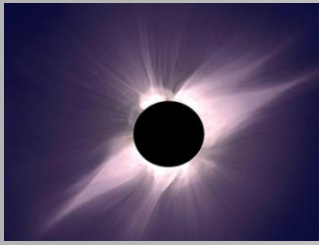


Space Data



- ▶ radial IMF, $|B_r|$
- ▶ PMOD composite of TSI
- ▶ sunspot number, R
- ▶ Kp geomagnetic index

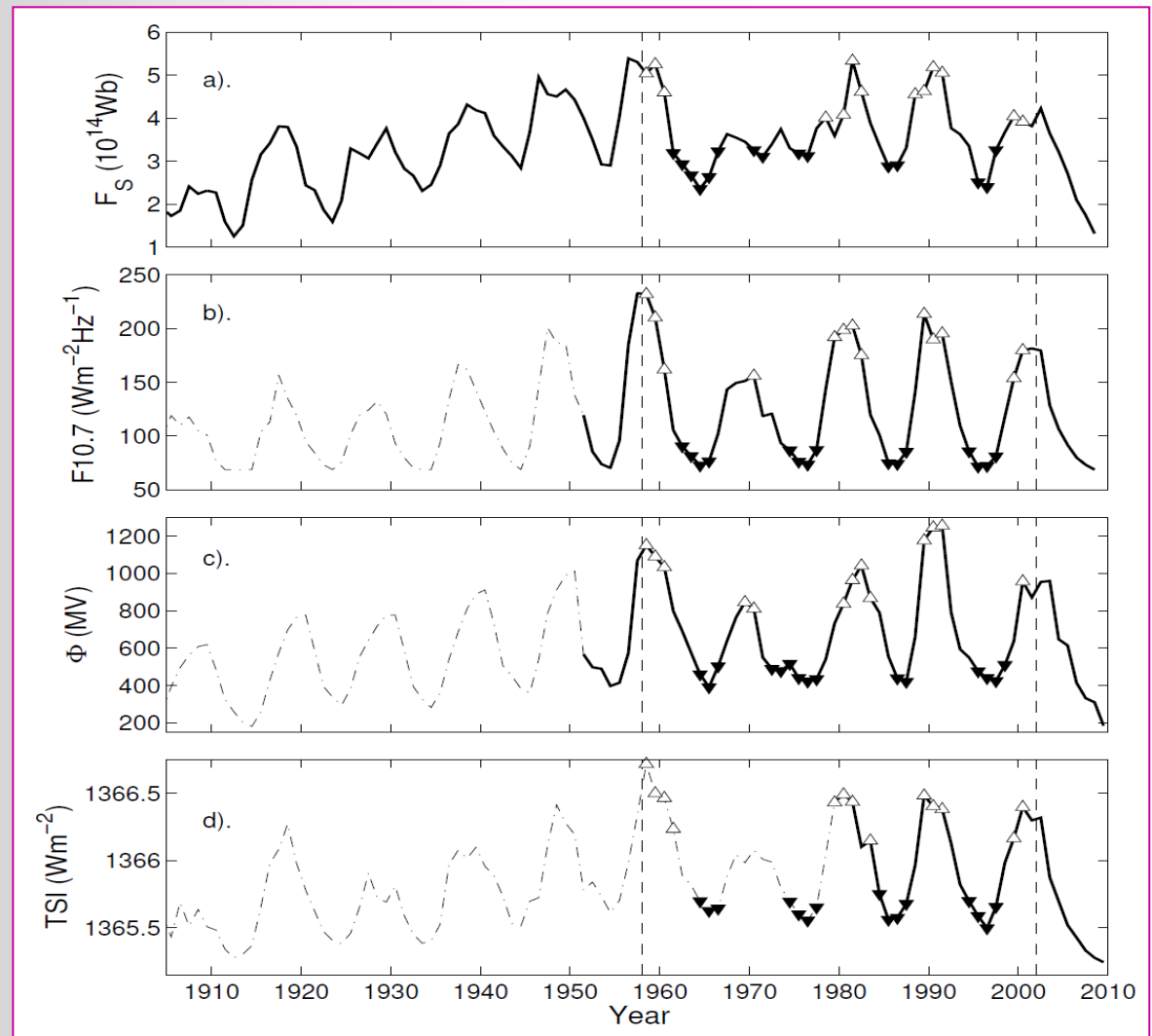




Decadal and Centennial Solar Variations



- ▶ open solar flux
- ▶ F10.7 radio flux
- ▶ GCR modulation parameter
- ▶ Total Solar Irradiance (TSI) (PMOD Composite)



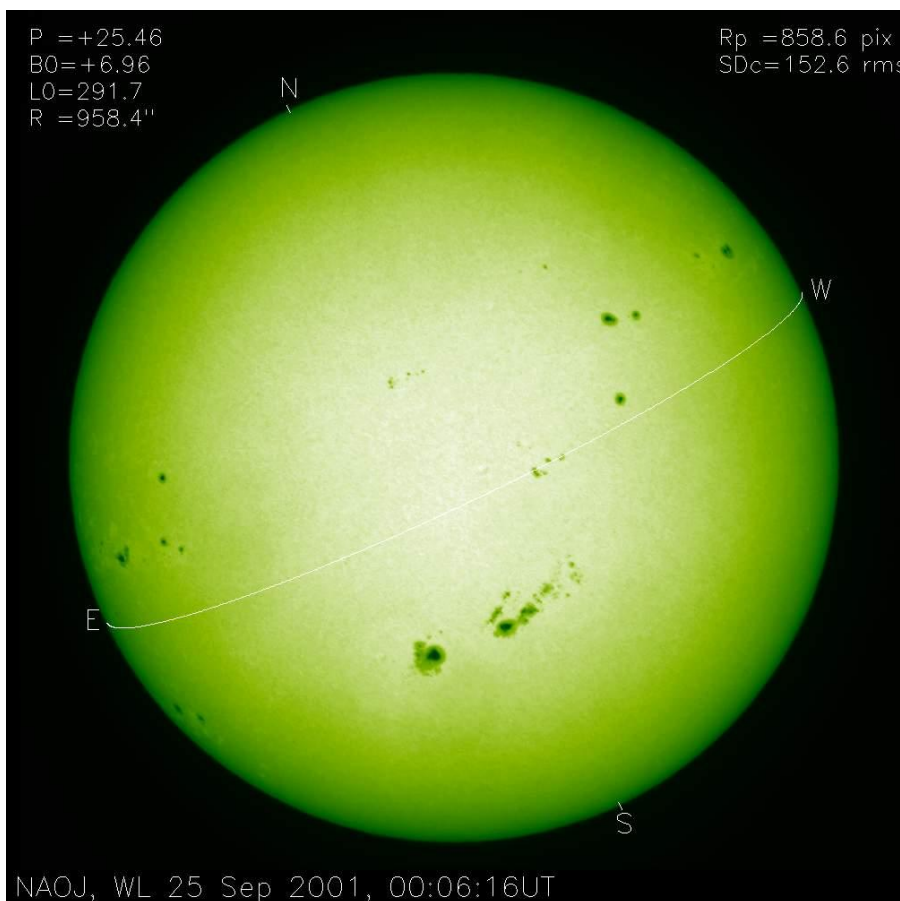
予報の修正を繰り返すNOAA (米国国立海洋大気局)

Sunspot number and prediction by NOAA

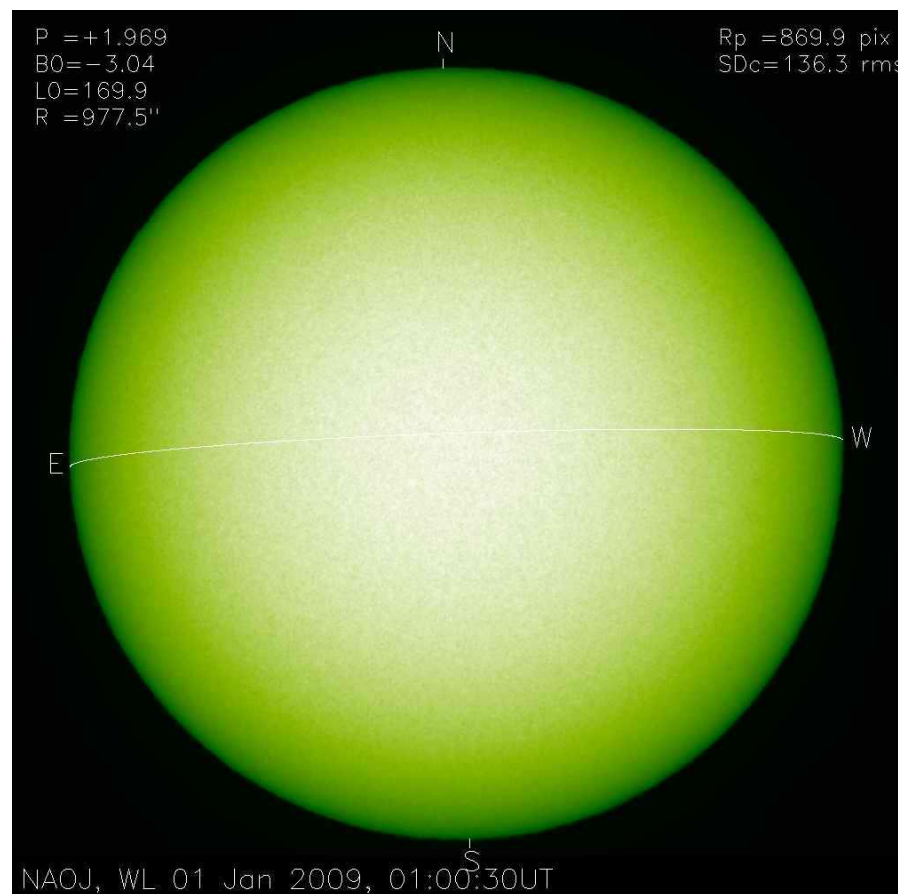


イントロダクション 変動する太陽

可視光でみる太陽の変化

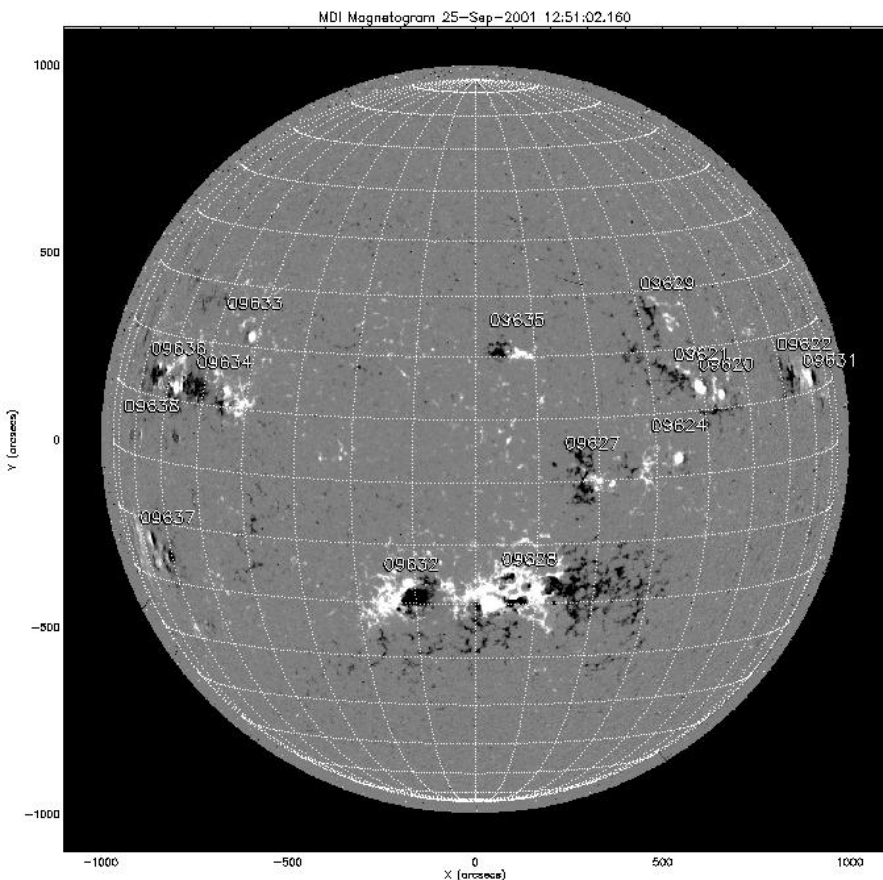


極大期付近： 2001年9月25日

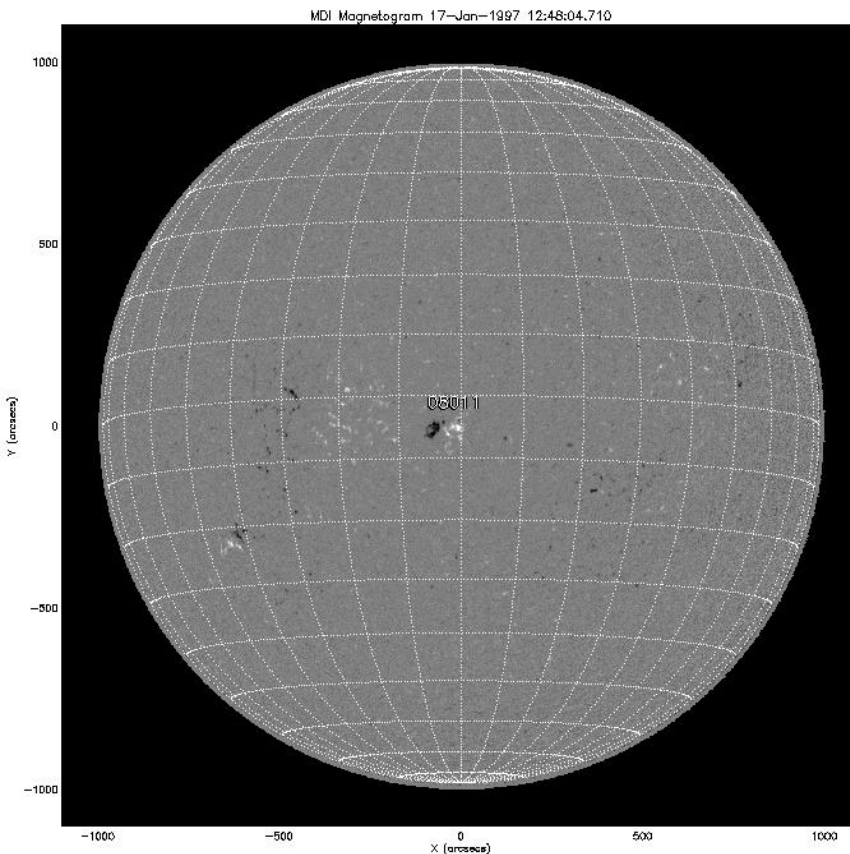


極小期付近： 2009年1月1日

太陽表面の磁場



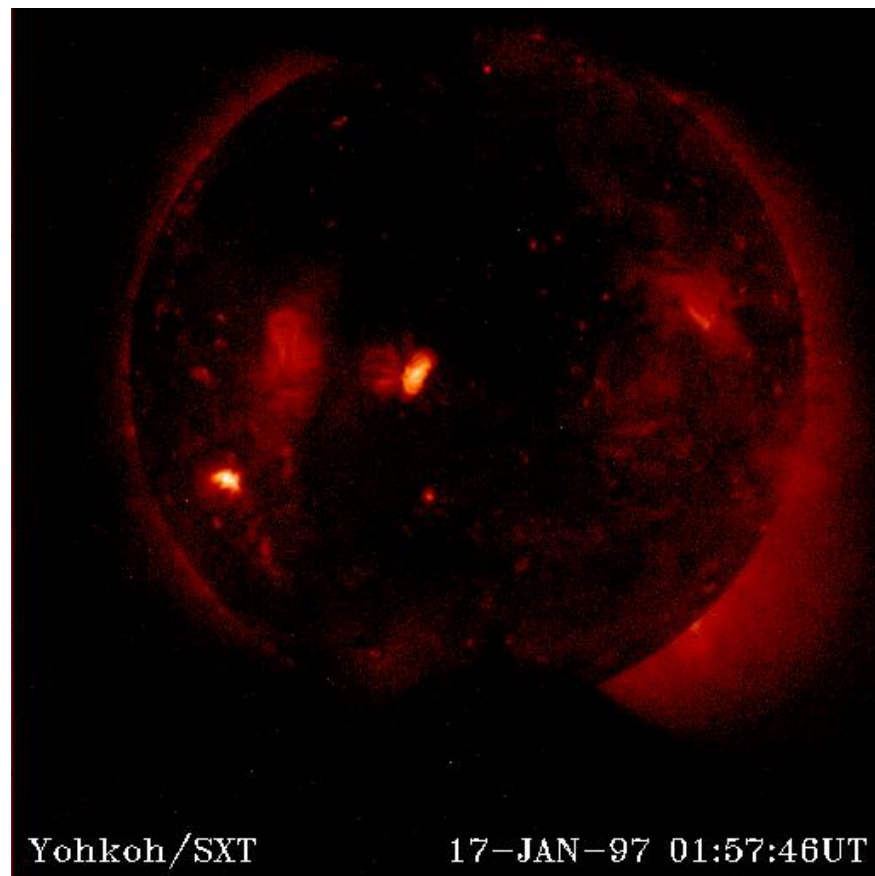
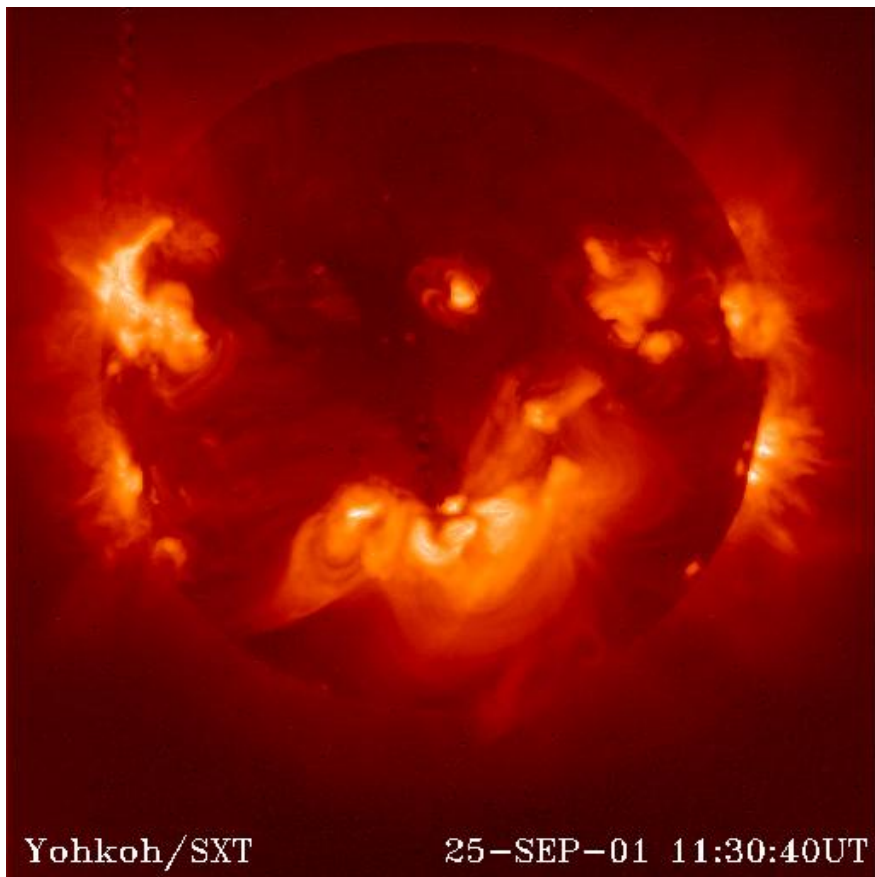
極大期付近: 2001年9月25日



極小期付近: 1997年1月17日

SOHO衛星/MDIにて撮影 (NASA/ESA)

「ようこう」のみた太陽10年 (軟X線)

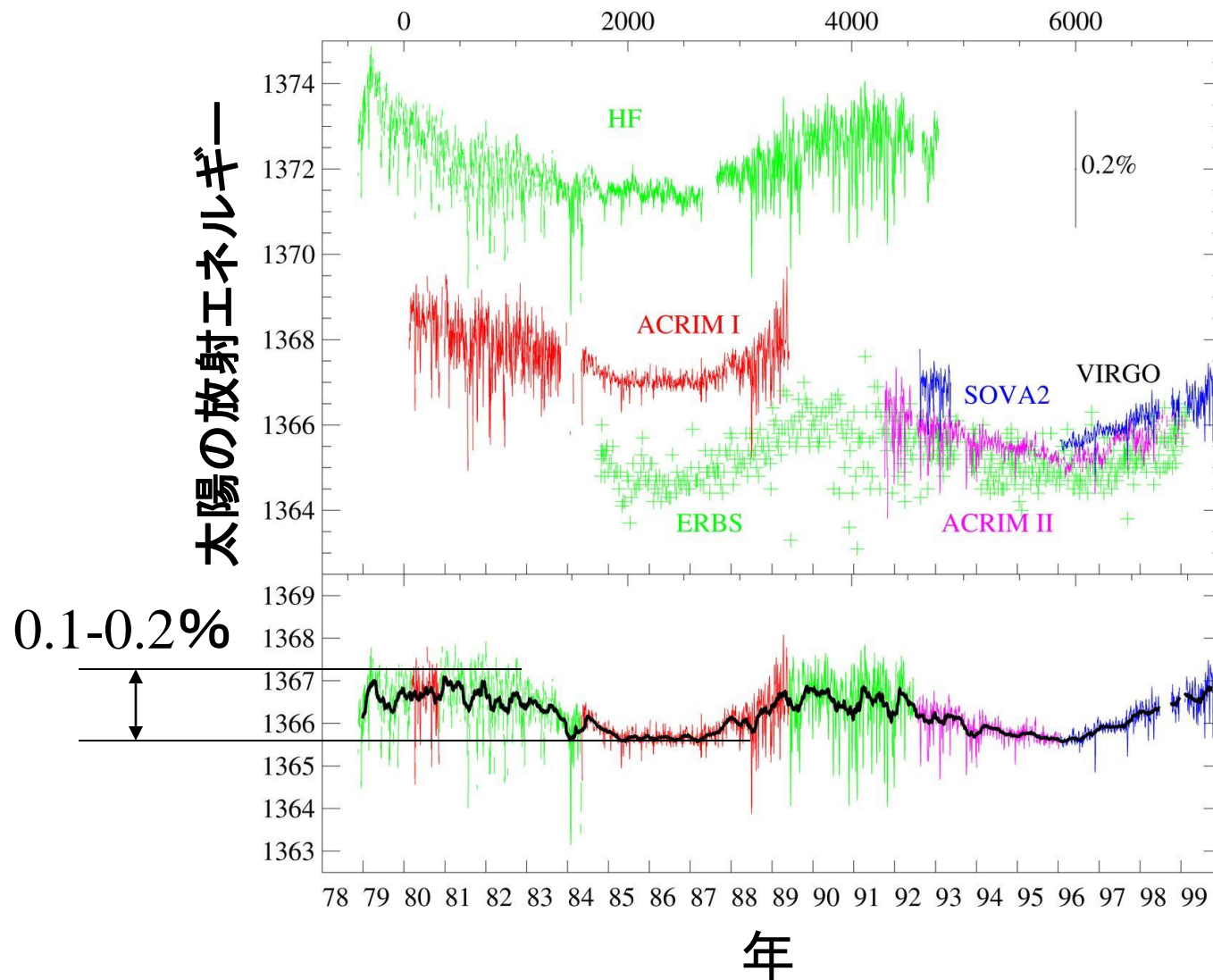


極大期付近： 2001年9月25日 極小期付近： 1997年1月17日

太陽観測衛星ようこう/軟X線望遠鏡にて撮影 (JAXA/NAOJ)

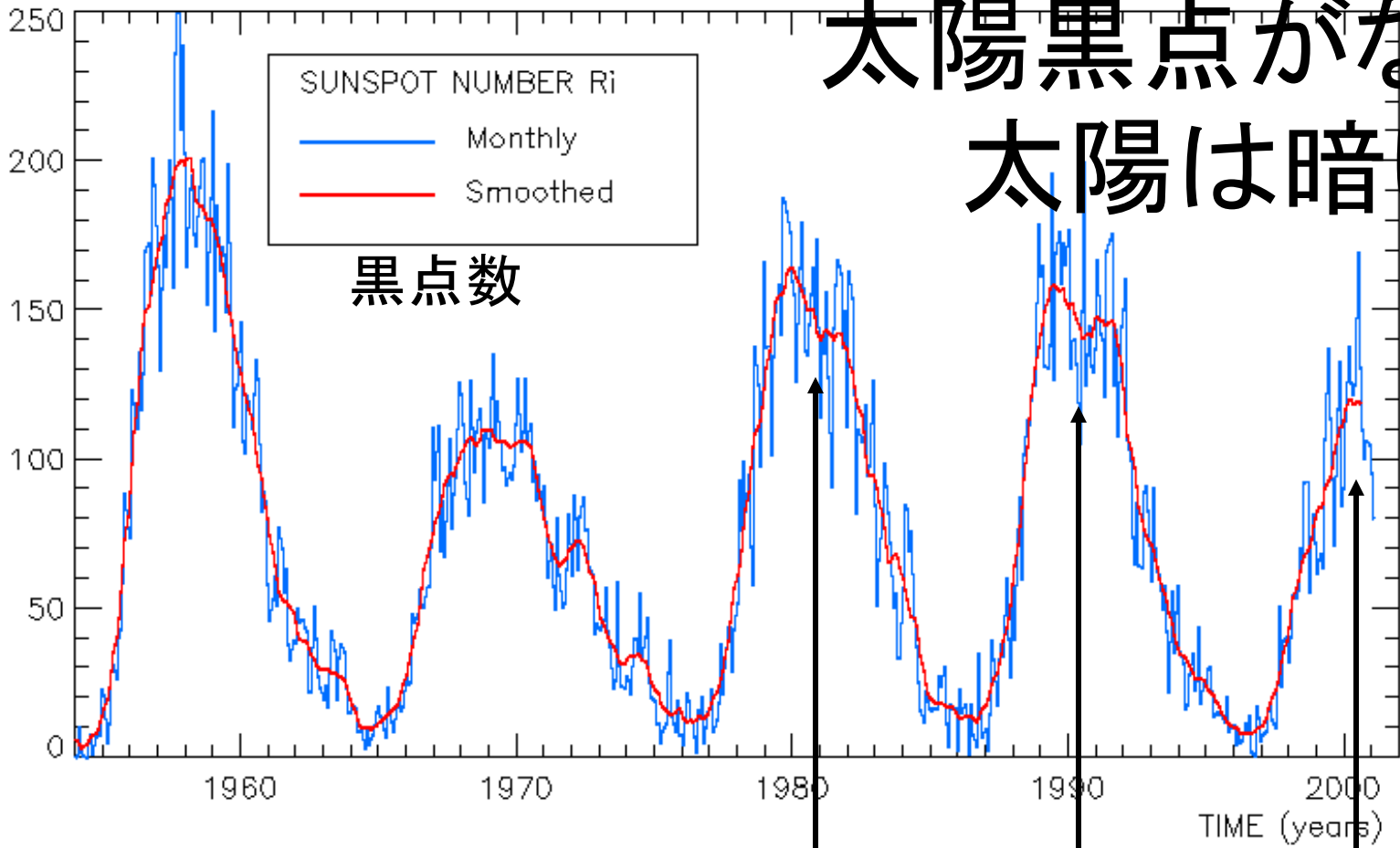
太陽定数は定数？

太陽定数の変動の大発見

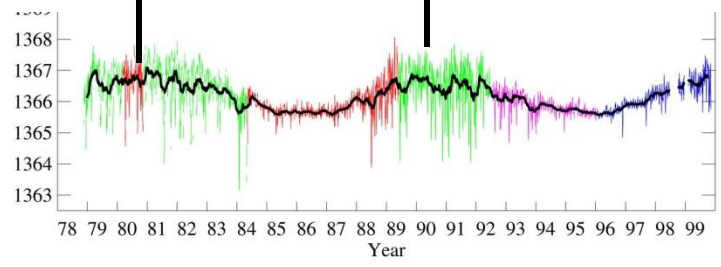


太陽黒点がないと 太陽は暗い

(<http://sidc.oma.be>, Apr 1, 2001)

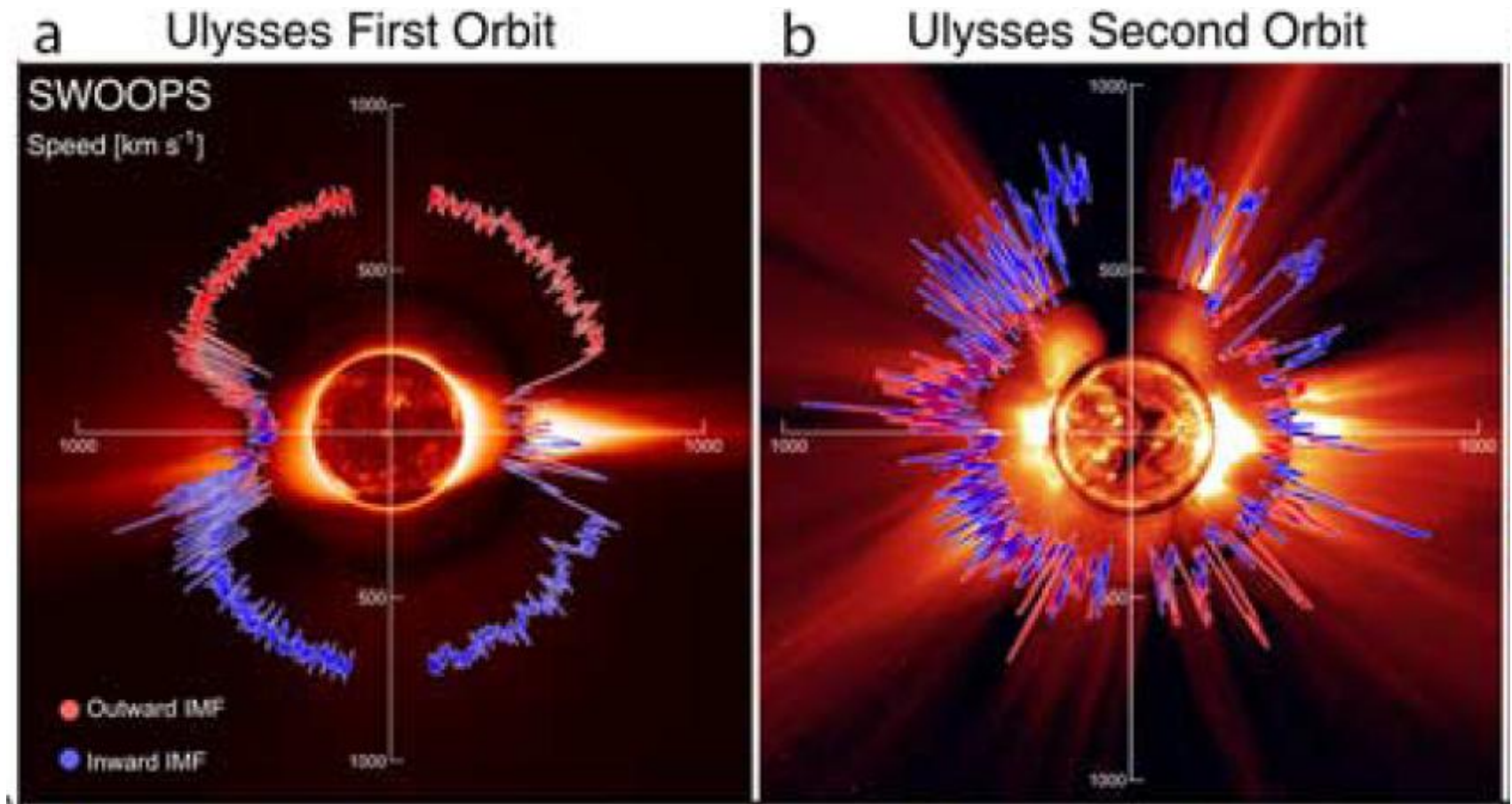


太陽定数



太陽周期に伴って太陽風も変化

太陽風: 太陽コロナから宇宙空間へ流れ出るプラズマの流れ(速度200~800km/s)



極小期: 極近くは高速・赤道
付近は低速

極大期: 速度構造が複雑

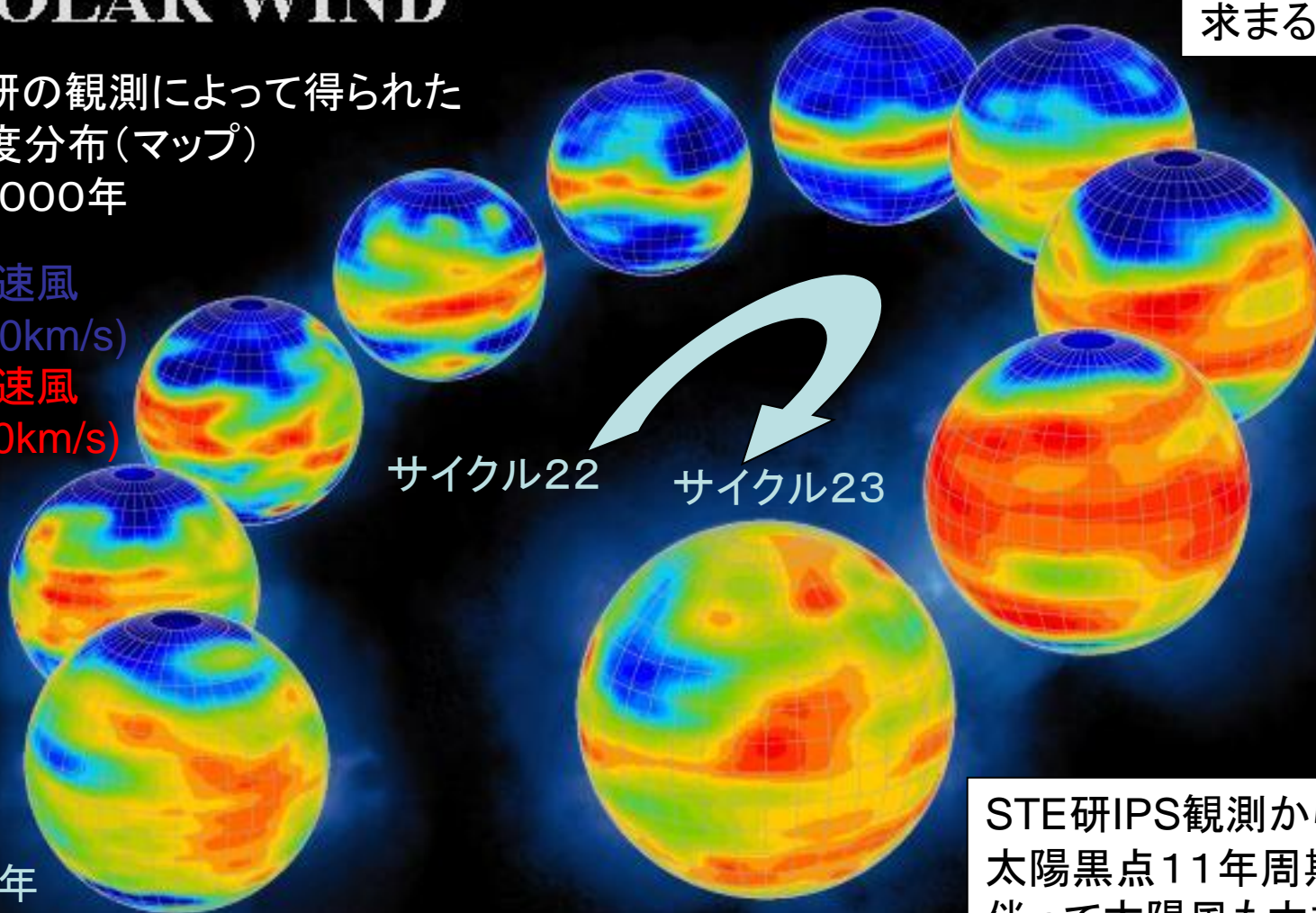
THE SOLAR CYCLE IN SOLAR WIND

STE研のIPS観測からは、太陽風の全球分布が求まる。

1996年(極小期)

名大STE研の観測によって得られた
太陽風速度分布(マップ)
1991~2000年

青色: 高速風
(700-800km/s)
赤色: 低速風
(300-400km/s)



1991年
(極大期)

サイクル22 サイクル23

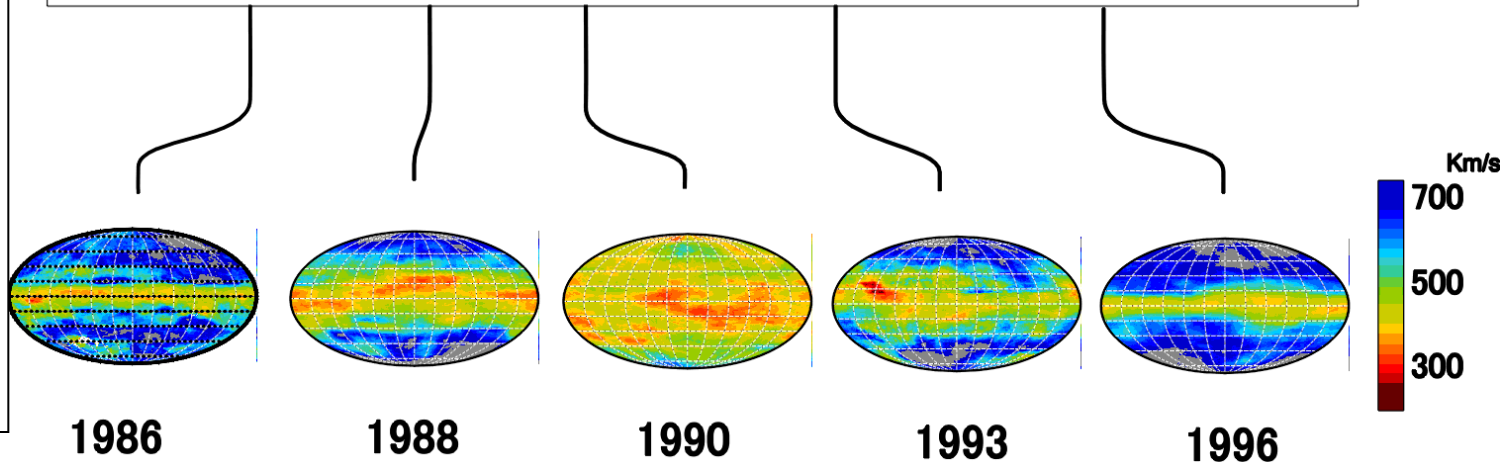
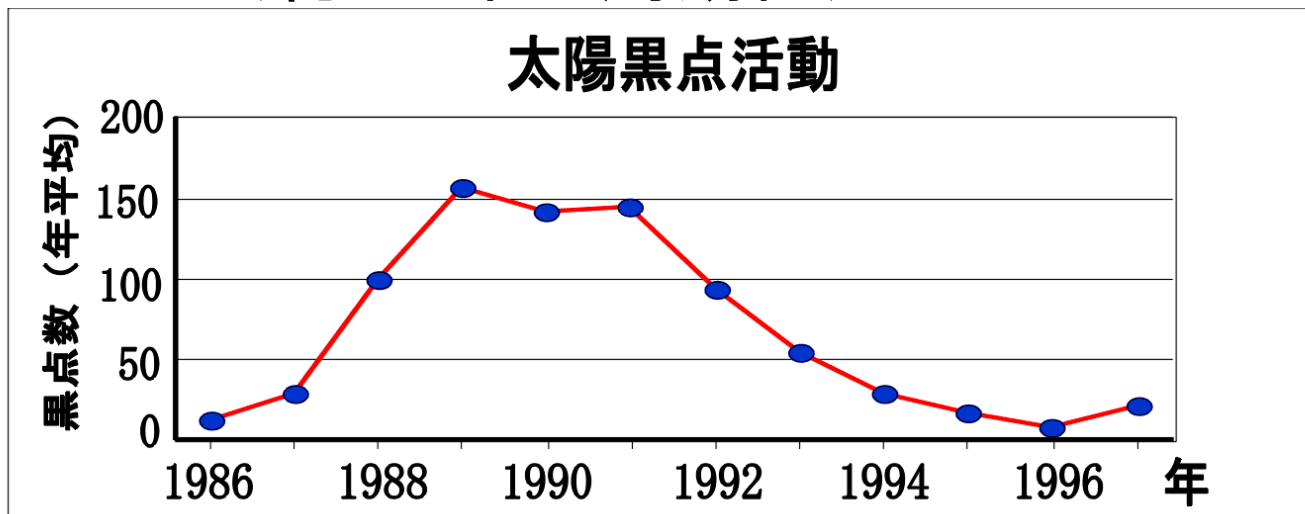
2000年
(極大期)

STE研IPS観測からは、太陽黒点11年周期に伴って太陽風も大きく変化していることが判った。



サイクル22(1986-1996)における 太陽風と太陽黒点の関係 (約11年の周期性)

- 極小期には、**高速風(700 - 800km/s)**が極域を中心に発達し、**低速風(~400km/s)**は赤道付近に分布
- 極大期には、全面を**低速風**が占める
- この傾向は、サイクル21でも同じ
- ところが、今極小期は違っていた!

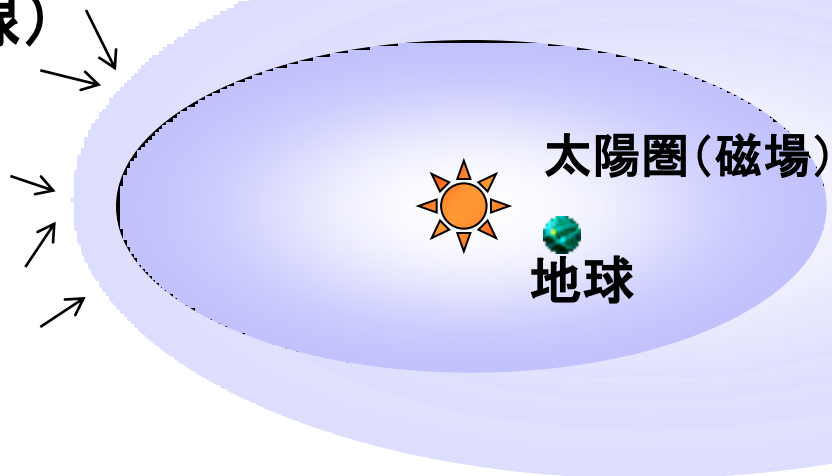


太陽風速度分布

太陽圏(太陽の磁場とプラズマの広がり)

が宇宙放射線を遮蔽

宇宙放射線
(宇宙線)



宇宙には超新星残骸で
加速された高エネルギー
の宇宙線がとびかっている

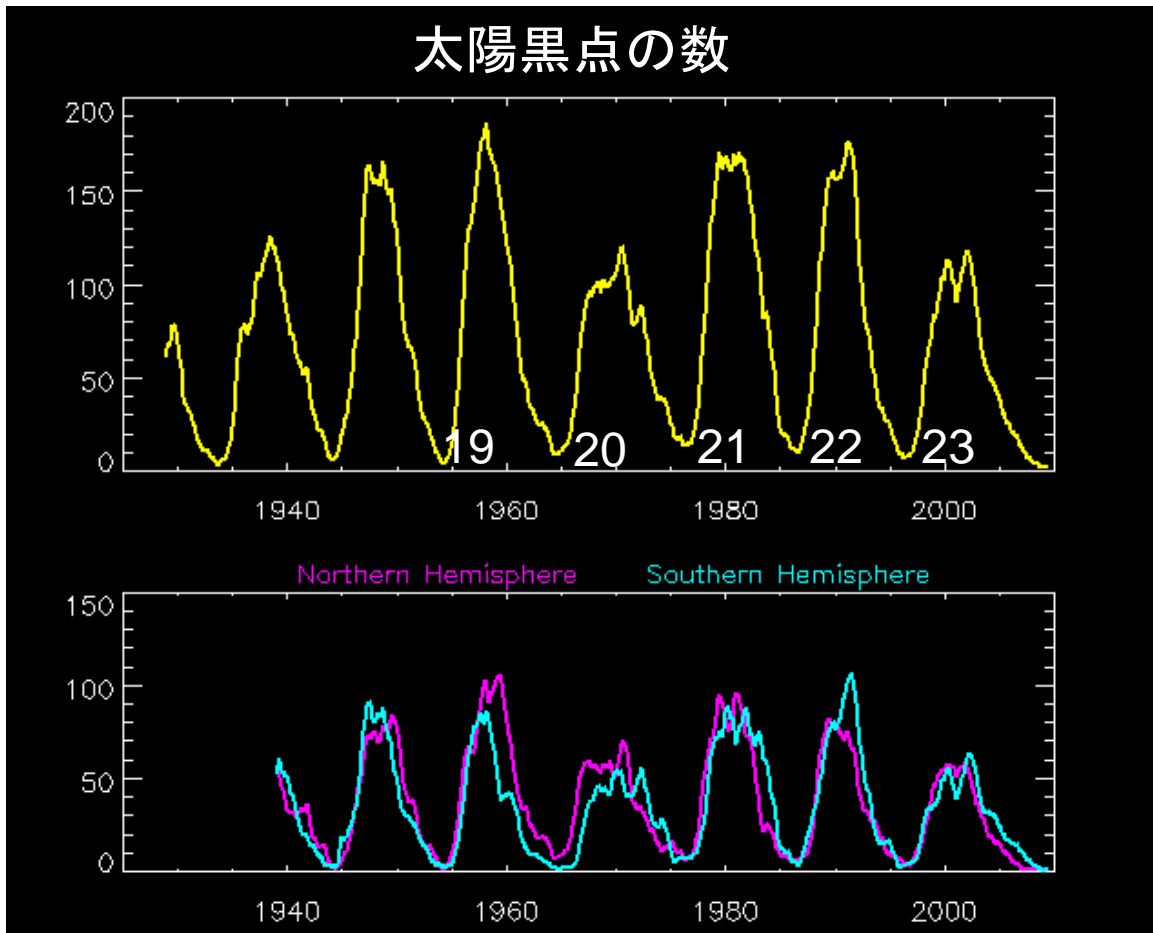
太陽活動が活発化

- ⇒ 太陽風の強度が増加, 太陽風磁場の乱れが増加
- ⇒ 太陽圏の磁場が、より多くの宇宙線を遮蔽
- ⇒ 地球に飛んでくる**宇宙線(陽子)量が減少**

最近の太陽活動について 最新の観測結果

直近(2009年4月)

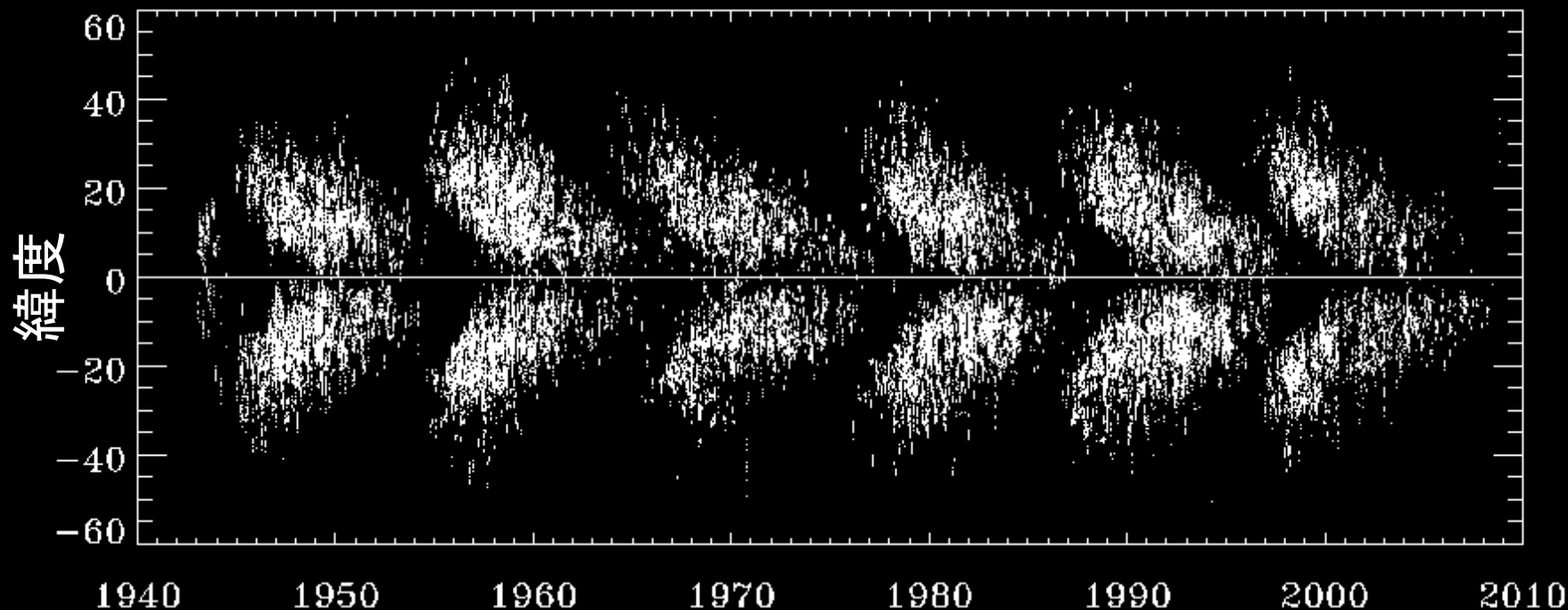
までの黒点相対数の時間変化



- 各サイクルの周期
 - 19: 10年6ヶ月
 - 20: 11年8ヶ月
 - 21: 10年3ヶ月
 - 22: 9年8ヶ月
 - 23: 12年+ α
- 23期が異常に長い
 (注意)まだ黒点数が増えないため、23期の周期は確定していない。

直近まで(2009年4月)の蝶形図

国立天文台で観測した太陽黒点の位置

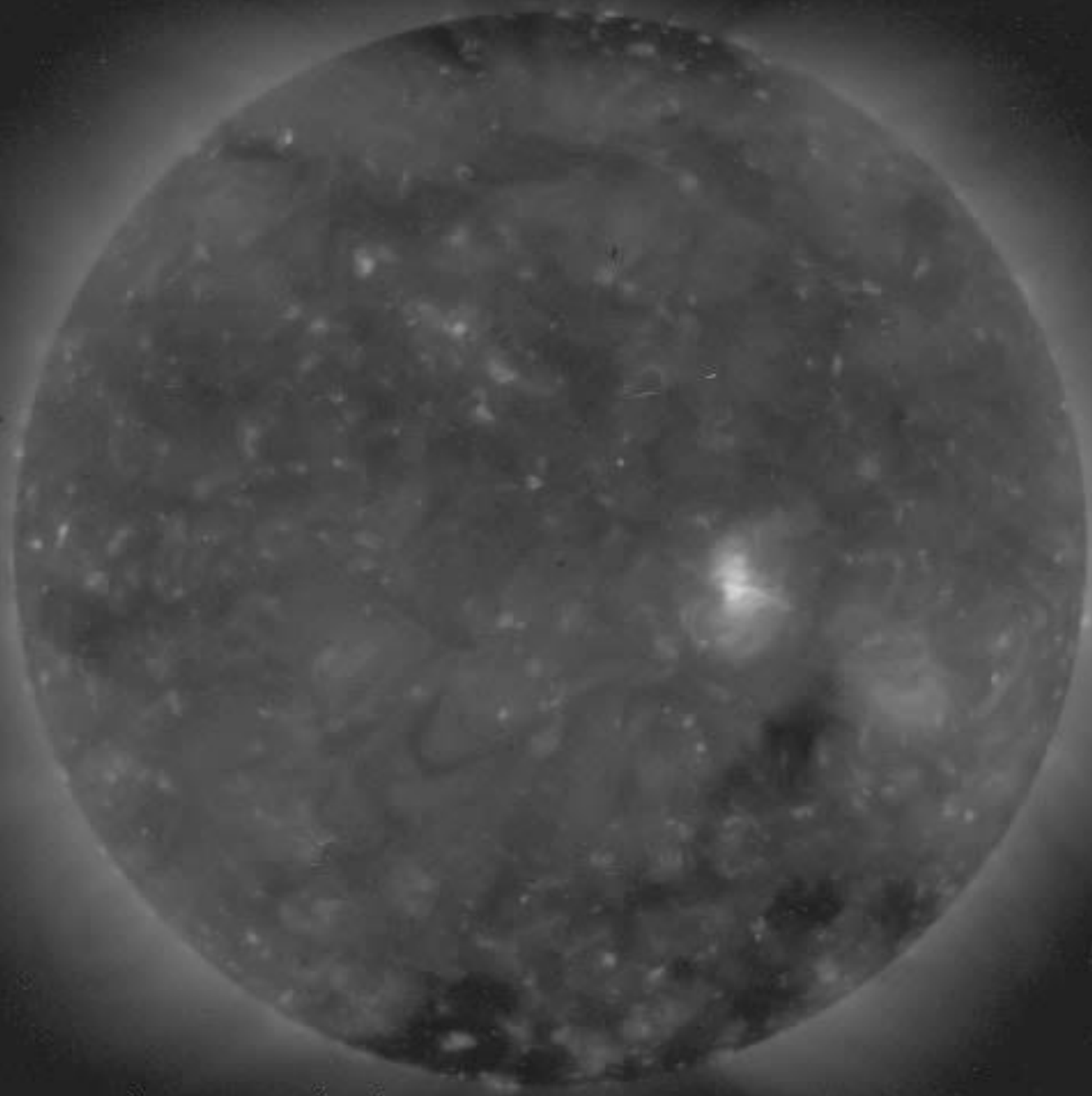


国立天文台・太陽観測所 黒点観測望遠鏡によるデータ

- 北半球では新しいサイクルの黒点出現、一方南半球ではいつまで古いサイクルの黒点が続いている。

年別無黒点日数(過去約100年間)

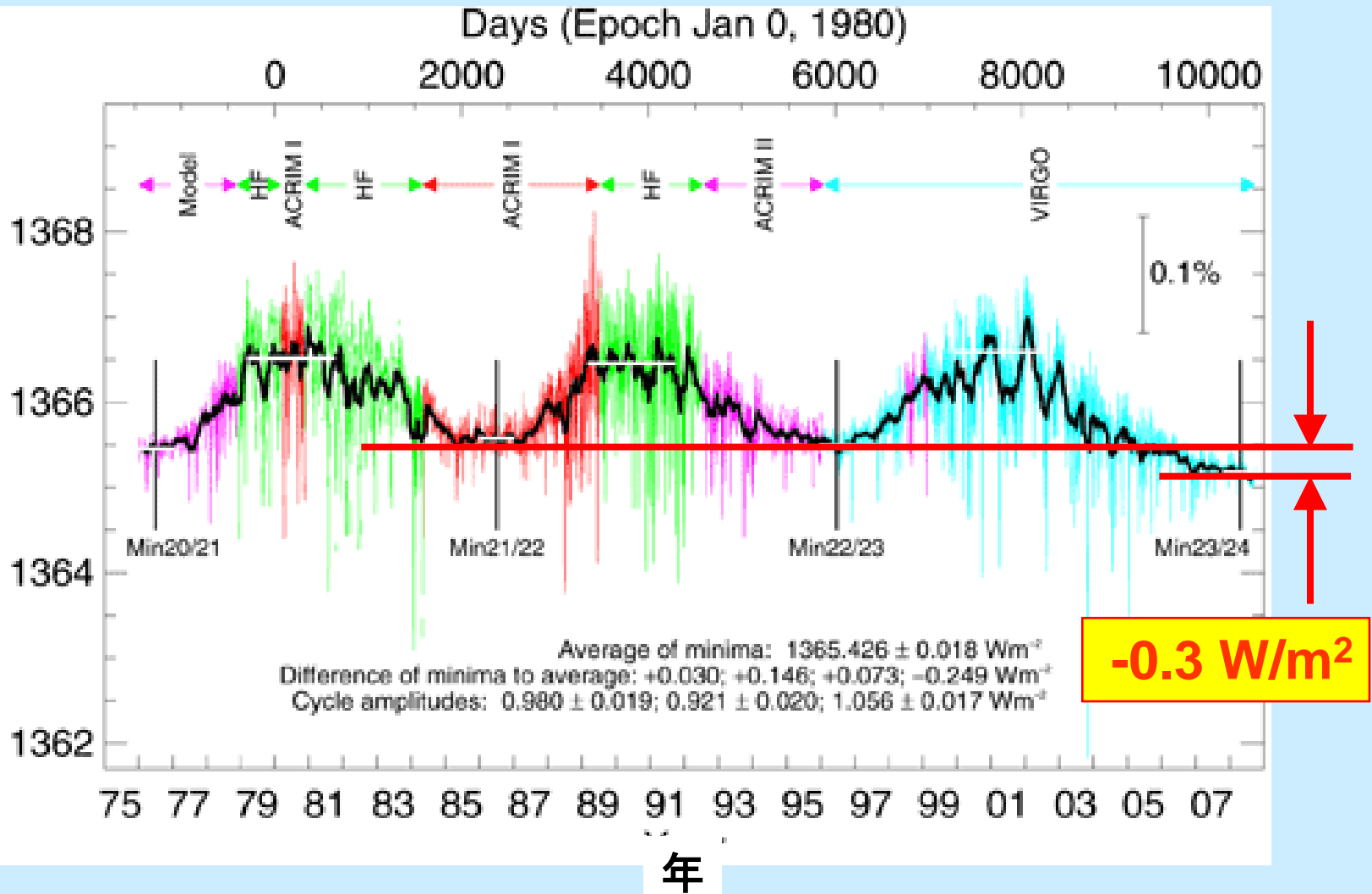
- 1年間に無黒点の日があったかの統計
- 元データは、三鷹も協力しているSIDC(ベルギー)のデータ。
- 2008年は、356日中265日間黒点がないという、過去50年ぶりの状況であるが、極小期の累積無黒点日数で見ると、2009年4月現在で610日と、約100年前の極小期(1018日、1913年頃)に近づく黒点数の少ない状況である。



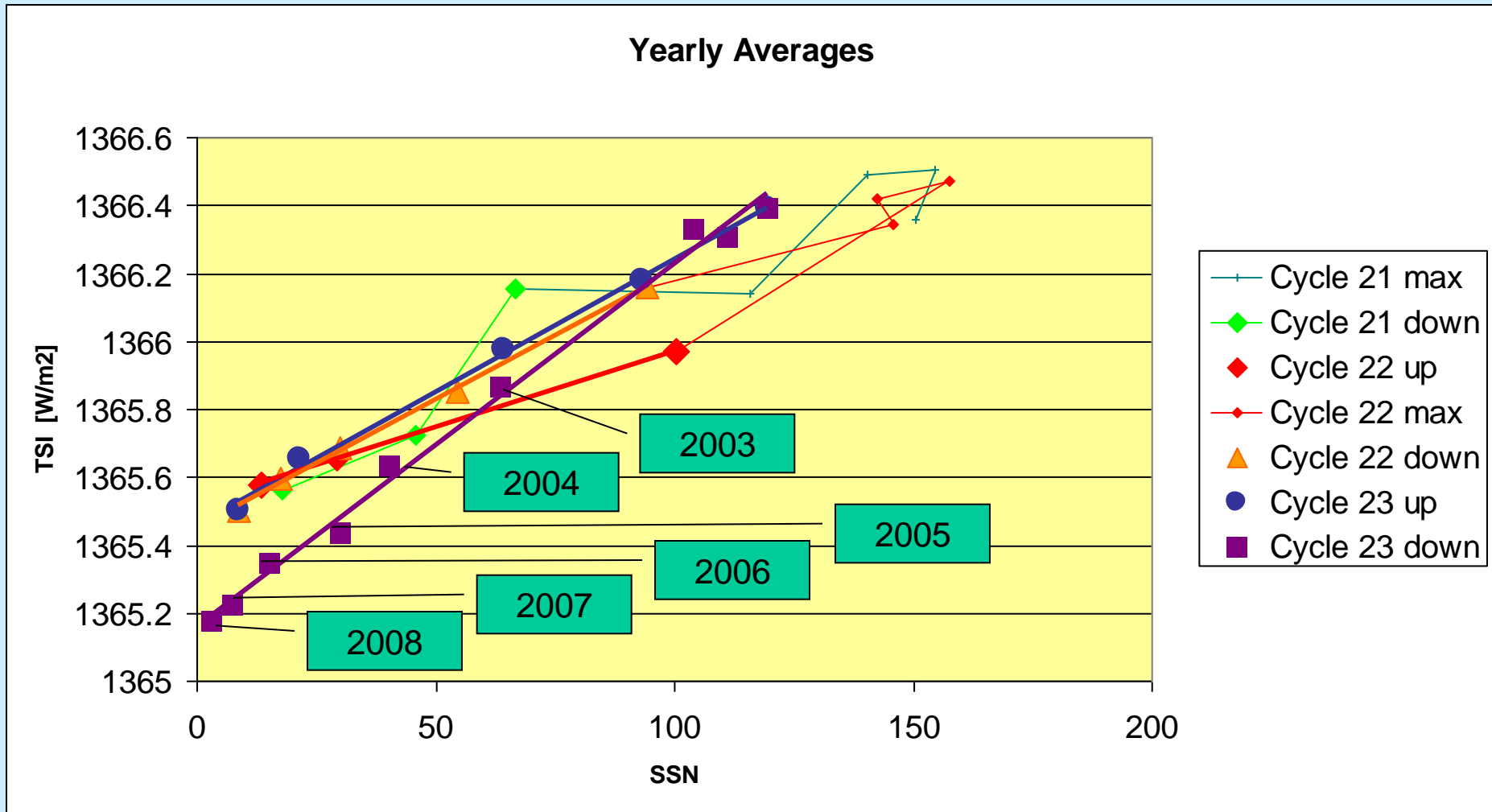
ひのでによる3年間の 太陽X線強度の変化

太陽全体から来る総エネルギー量がわずかに減少

太陽からの総エネルギー量



年平均総放射量と黒点数



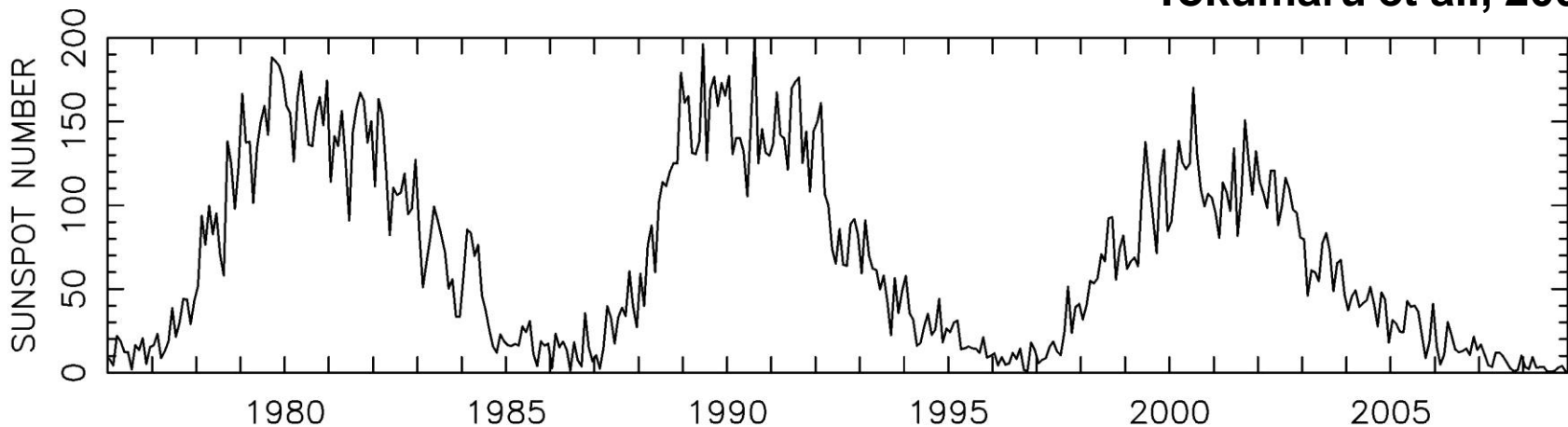
従来と異なる相関直線に移行している



弱い極磁場

Tokumaru et al., 2009

太陽黒点数



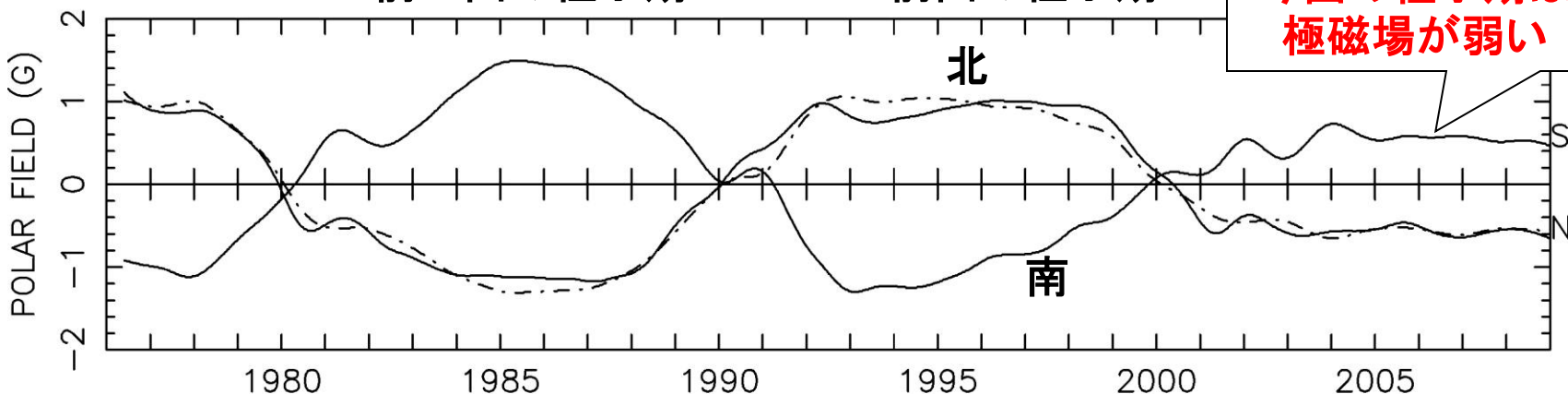
前々回の極小期

YEAR

前回の極小期

今回の極小期は
極磁場が弱い

太陽の北極・南極の
磁場強度(ガウス)



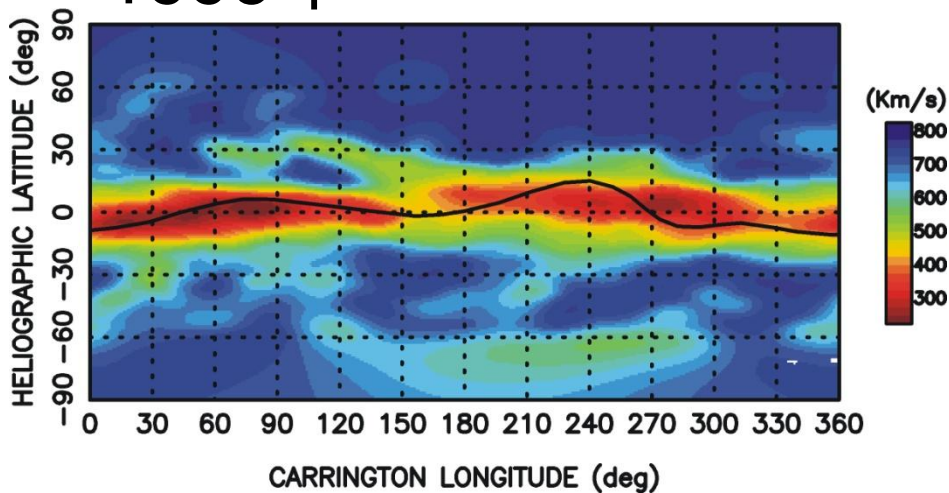
太陽極磁場は22年周期で極性が反転し、極小期には強くなる。前、前々サイクルの極小期に比べ、今サイクルの極磁場の強度は約半分程度しかない。これが特異な太陽風と密接に関連していると考えられる。



1996年 (CR 1910) と2008年 (CR 2070) の太陽風速度マップ

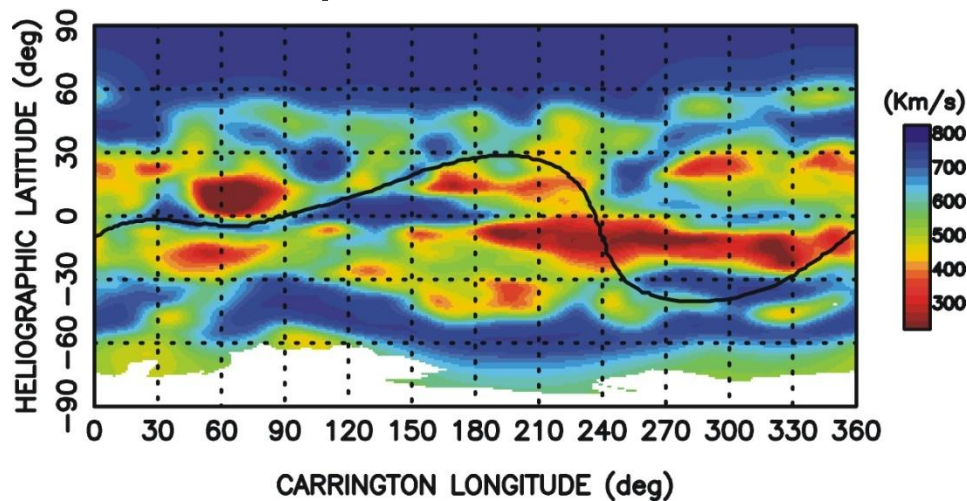
Tokumaru et al., 2009

1996年 CR 1910



高速風 = 青色
低速風 = 赤色

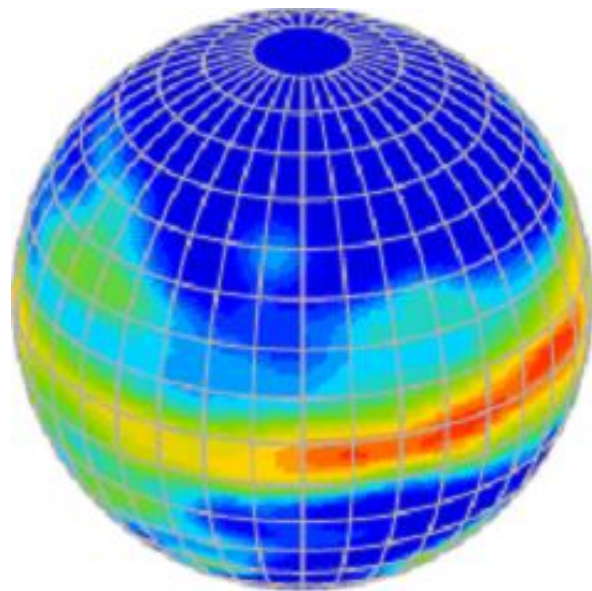
2008年 CR 2070



1996年(左)と2008年(右)の1太陽自転に対する太陽風速度マップ。横軸はキャリントン経度、縦軸は太陽緯度。色で太陽風速度を示す。実線は磁気中性線(米Wilcox観測所による)。

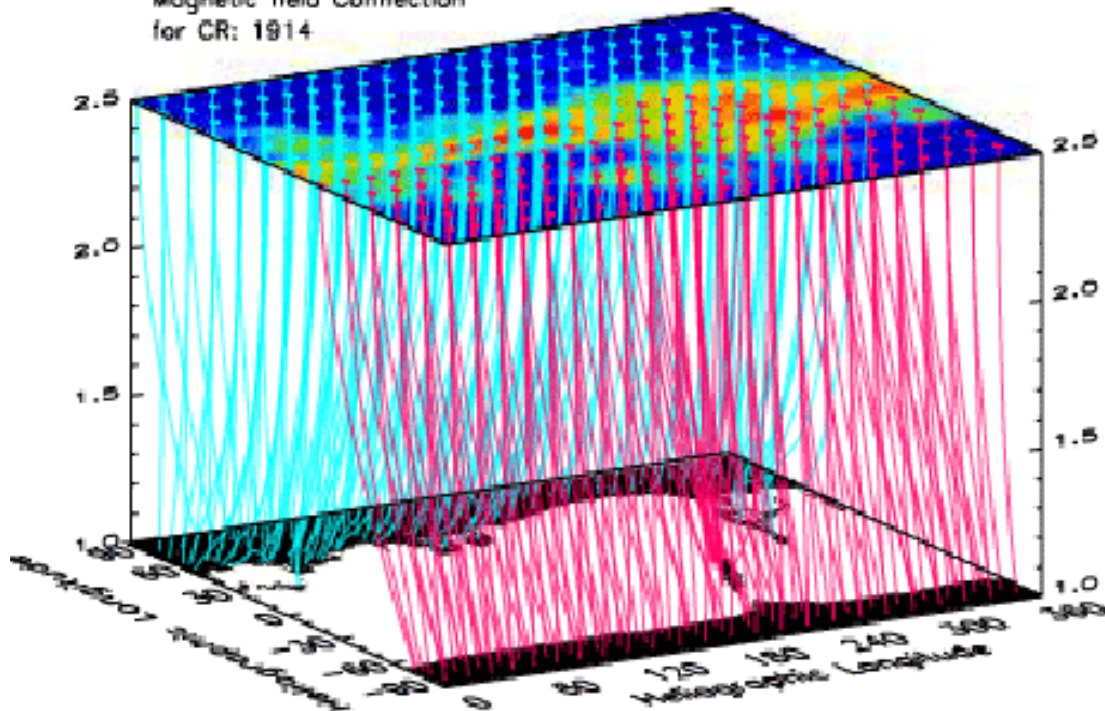


太陽風データと 太陽光球面磁場との対応



STE研IPS観測から得られた太陽風速度マップ(1996年のデータ)。この図は、太陽風が吹き出す仮想的な**流源面Source Surface**に投影したもの。よって、太陽光球面と対応するには、コロナ磁場をたどってやる必要がある。

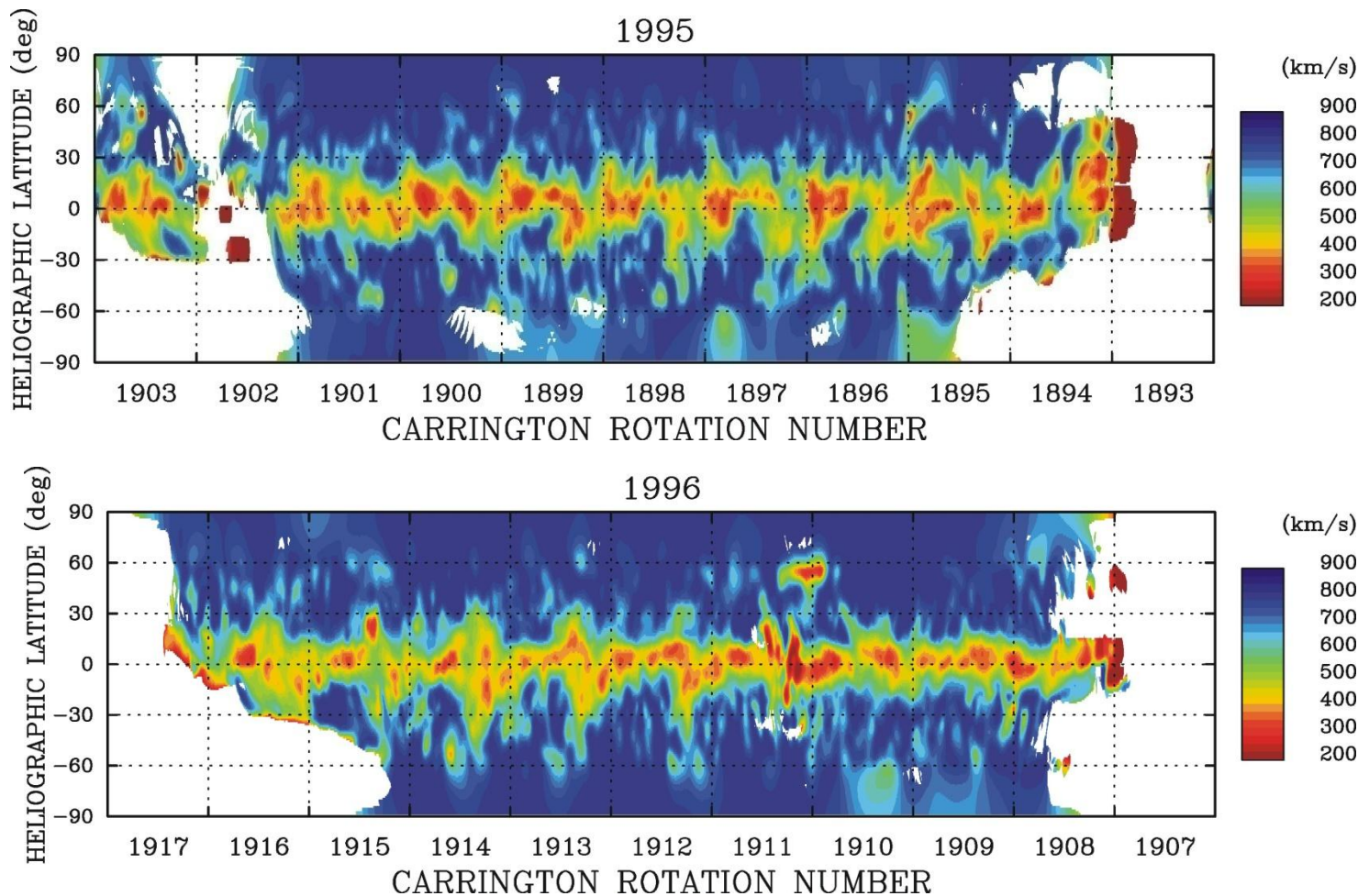
Magnetic field Connection
for CR: 1914



図中、上が太陽風の**流源面(太陽半径の2.5倍の距離)**。下が**太陽光球面**。黒色の領域はコロナホール。両者をつないでいるのは、米Kitt Peak観測所の観測データから計算したコロナ磁場。ここで、赤道付近の低速風は極域コロナホールの境界や低緯度コロナホールに対応することに注意。



前サイクル極小期(1995-1996) における太陽風速度マップ

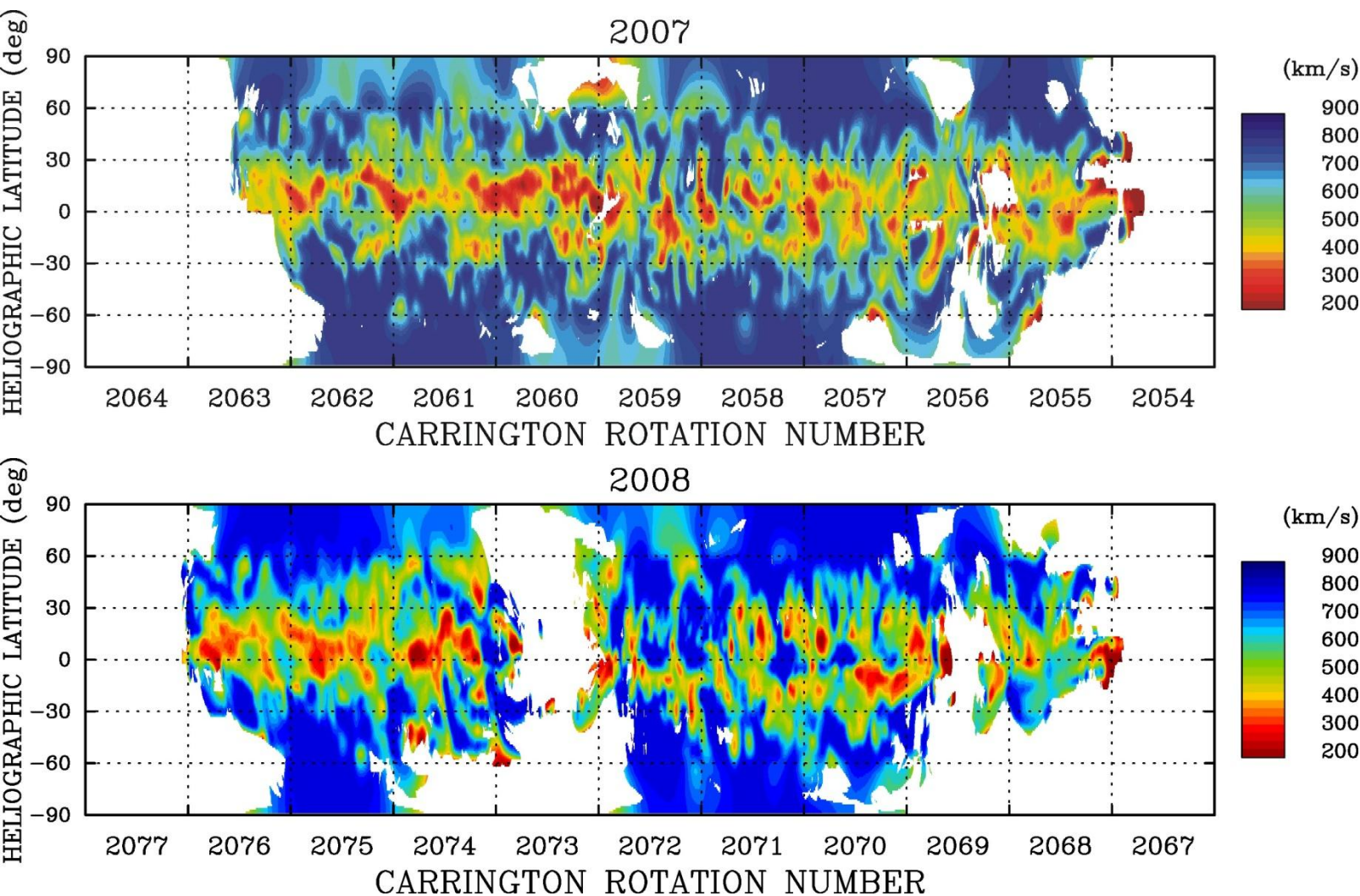


1年間のデータを使って作成した太陽風速度マップ(上:1995年、下:1996年)。前サイクルの極小期では、太陽風の構造は安定し、太陽自転に伴って繰り返し観測された。前々サイクル極小期でも基本的にこれと同じ様相を示す。



2007、2008年の太陽風速度マップ

Tokumaru et al., 2009



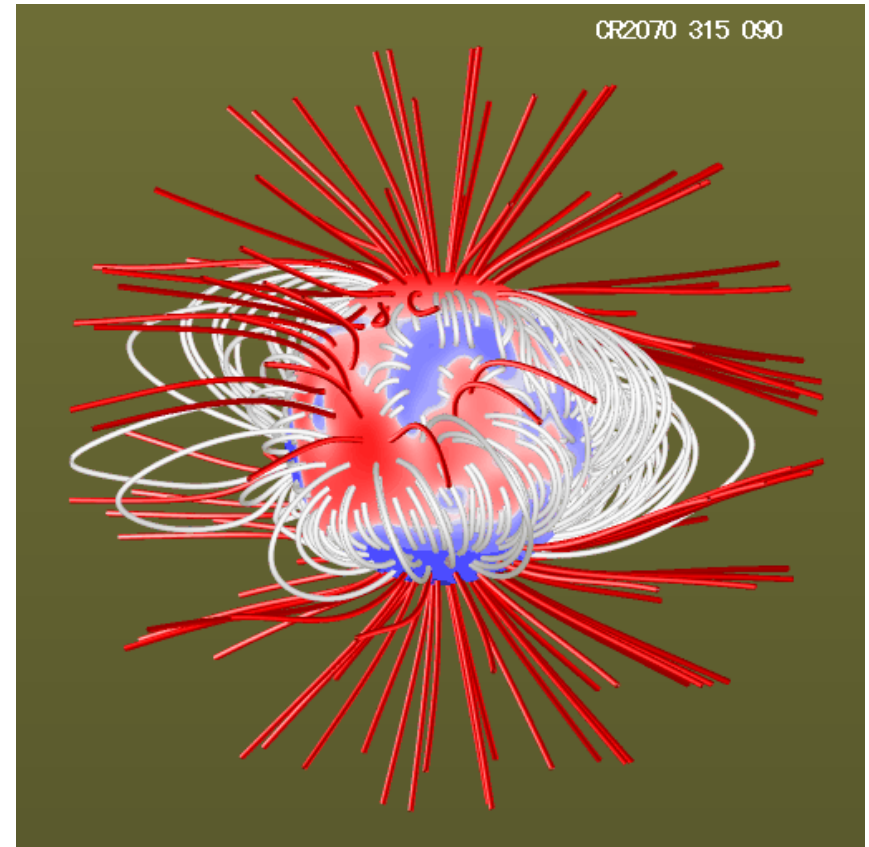
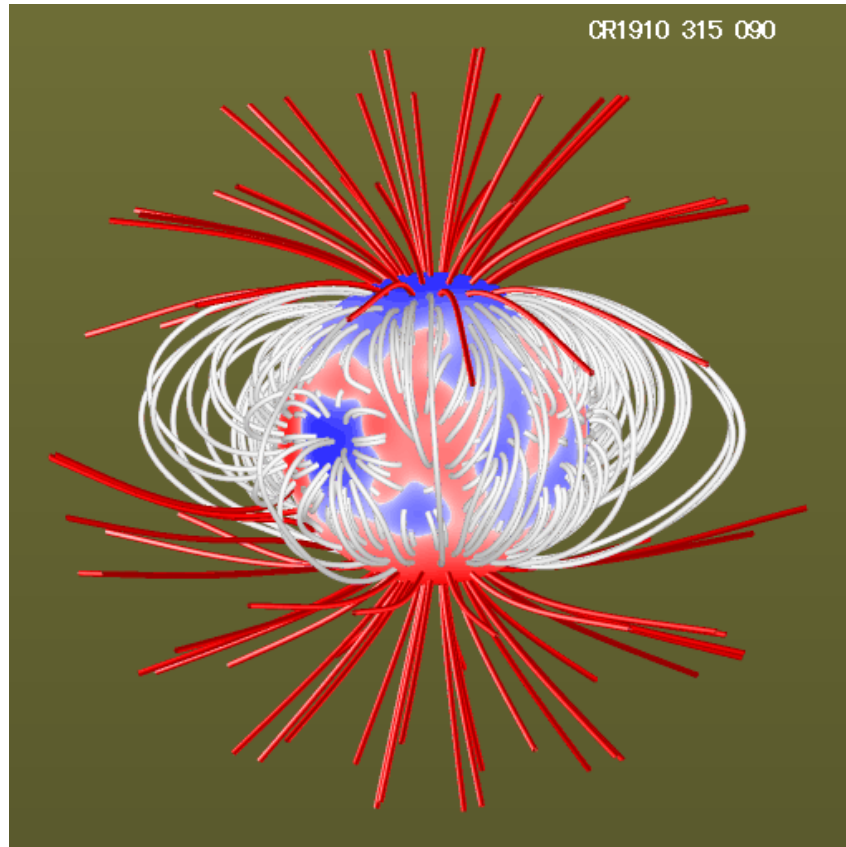
1年間のデータを使って作成した太陽風速度マップ（上：2007年、下：2008年）。横軸は太陽自転数、縦軸は緯度。太陽風構造が激しく変化していることに注目。赤道付近の高速風は、2008年の夏頃（CR2070-2072）明瞭に見られた。



コロナ磁場のモデル計算結果：

1996年 (CR1910) と2008年 (CR2070)

太陽観測衛星SOHOに搭載された太陽磁場測定装置MDIの観測データを用いたもの
赤い線は太陽風が吹き出す“開いた”磁力線、白い線はコロナで“閉じた”磁力線を示す



1996年は主に両極が太陽風の流源となっているが、2008年の場合、赤道付近にも太陽風の流源となる“開いた”磁力線が多数あることに注目。

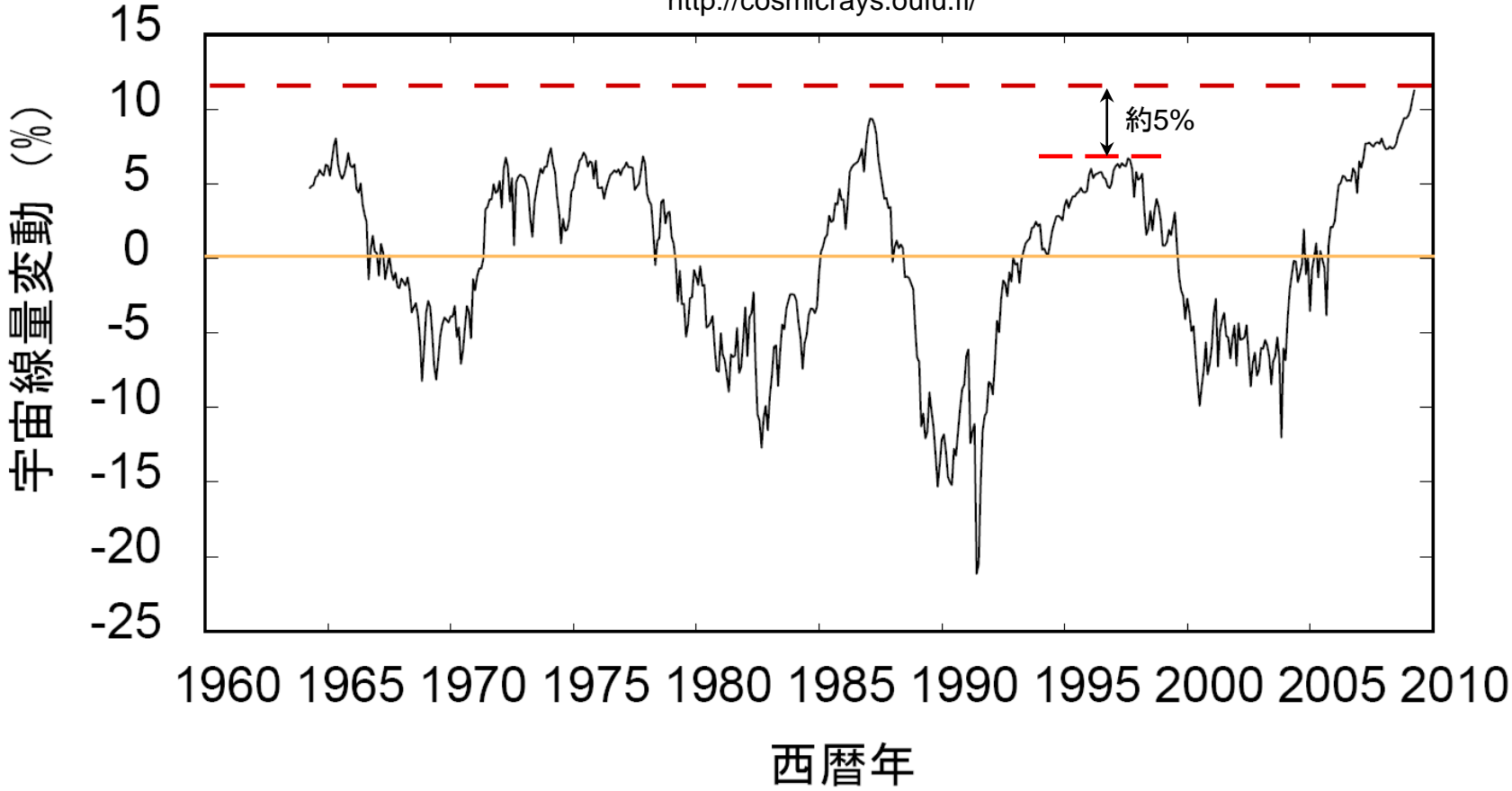


太陽風まとめ

- 2008年太陽極小期では、従来の極小期とは異なる太陽風構造が見られた
 - 赤道帯の高速風、中緯度の低速風、極域の高速風
 - 太陽風構造の速い変化
- 地球軌道付近の探査機で観測された太陽風にも、高速成分の増加が見られる。
- 今極小期における弱い太陽極磁場と密接に関連していると考えられる。
 - Ulysses探査機の観測により、極域太陽風の圧力が減少しているとの報告がある(McComas et al., 2007)
- これからの11年周期において、太陽風は過去50年とは異なる発展をたどる可能性がある。
 - 今後、観測の強化が必要

過去45年間の観測史上最多の宇宙放射線量

オウル大学の中性子モニターによる過去45年間の宇宙線量の変化
<http://cosmicrays oulu.fi/>



太陽風活動の低下により宇宙放射線が太陽圏内に進入しやすくなり
宇宙線の地球への到来量が過去45年間で最多を記録
前回の極小期と比較して、**宇宙線量は約5%増加**している

宇宙線まとめ

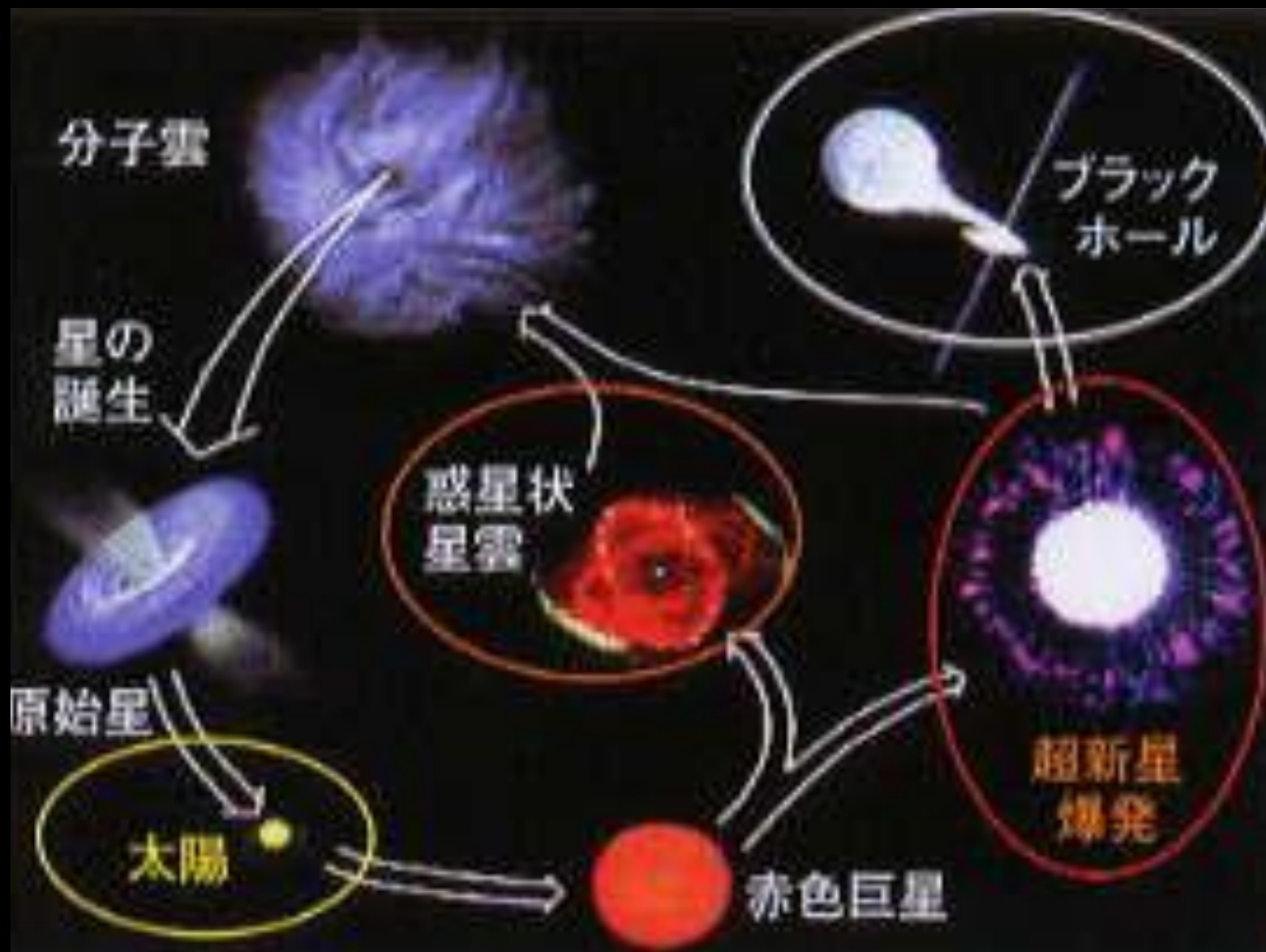
- 太陽圏(太陽の磁場とプラズマのひろがり)は、荷電粒子である宇宙線を遮蔽し、地球を放射線から守る役割を果たしている。
- 地球に到来する宇宙線の量は、太陽活動の活発さによって変化する。
- 今極小期の宇宙線量は、前極小期と比べて5%ほど増加しており45年の観測史上、もっとも多かった。
- 宇宙線は太陽磁場の極性によっても地球への来やすさが変わるため、太陽の極性が異なる前回の極小期とは、直接は比較できないが、極性が今極小期と同じであった前々回の極小期と比べても、宇宙線量は際立って増えている。

観測事実のまとめ

- 太陽周期が長くなっている(12年6カ月)以上
- 極小期の累積無黒点日数で見ると、約100年前の極小期に近づく黒点数の少ない状況
- 北半球では新しいサイクルの黒点出現、一方南半球ではいつまで古いサイクルの黒点が続いている。
- 太陽全体から来る総エネルギー量が、過去2回の極小期に比べてわずかに減少。
- 今サイクルの極磁場の強度は約半分程度。
- 従来の極小期とは異なる太陽風構造。
- 太陽風の圧力が低下している。
- 宇宙線量が、45年の観測史上、もっとも多い。

太陽ダイナモ 標準理論とその矛盾

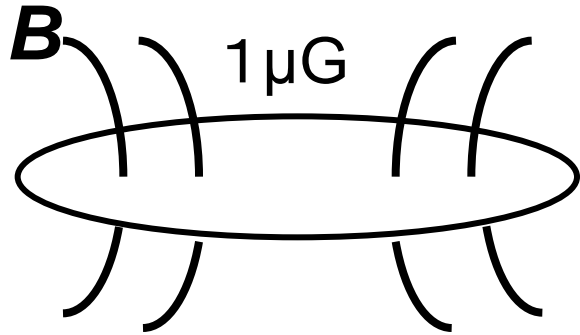
星の進化と磁場



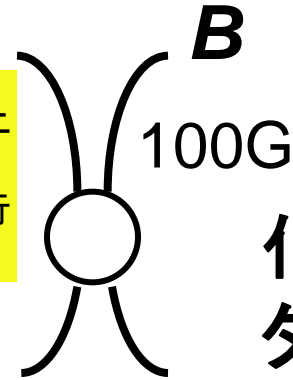
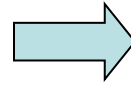
初期宇宙(37万年)

$10^{-15}G$

化石磁場かダイナモか？



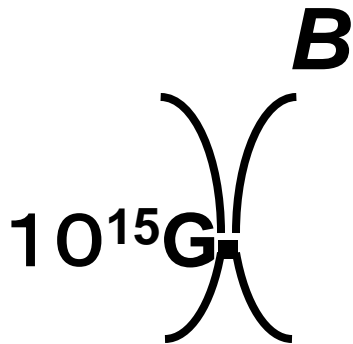
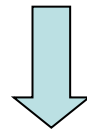
$B^2/8\pi > \rho v^2$ 星形成の停止
 $B^2/8\pi < \rho v^2$ 星形成の進行



化石磁場or
ダイナモ？

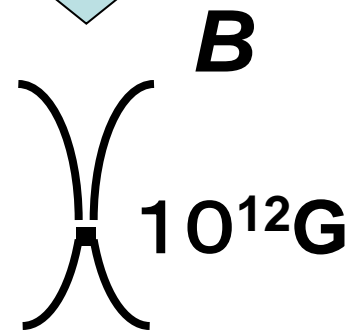
原始惑星円盤 半径 $\sim 1000AU$

星 半径 $\sim 7 \times 10^{10}cm$



マグネター

ダイナモ？



中性子星

誘導方程式

- 黒点を平均場で表す

誘導方程式(磁場とプラズマの凍結)

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{V} \times \mathbf{B} + \eta \Delta \mathbf{B}$$

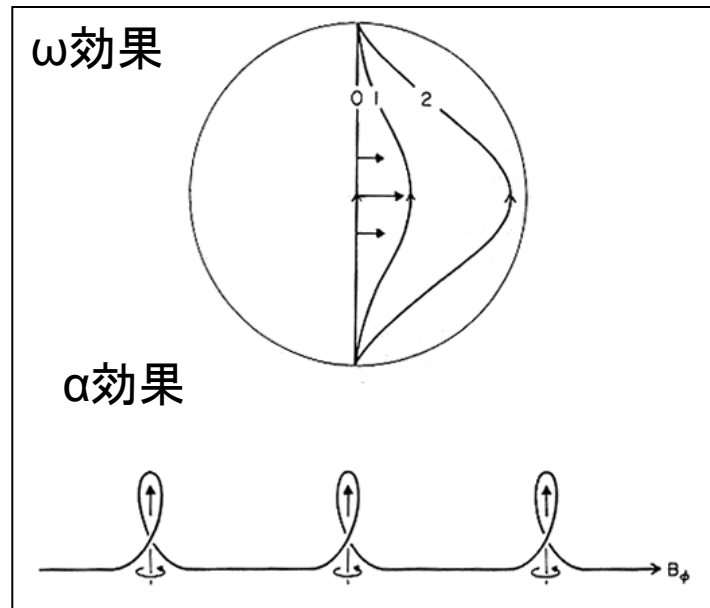
この式の意味するところ

- 速度場があると磁場は変化する
- 磁場は拡散する

(通常、磁場が速度場に与える影響は無視するが、
実際は重要な働きをしている可能性がある)

$\alpha\omega$ ダイナモ

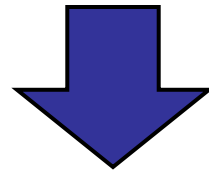
- 磁場を次の2成分に分けて考える
 - トロイダル磁場の時間微分 = ポロイダル磁場を $\nabla\Omega$ で増幅するソース項 + 散逸項
 - ポロイダル磁場の時間微分 = 散逸項 + α 効果によるトロイダル磁場によるソース項



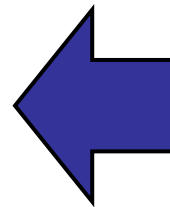
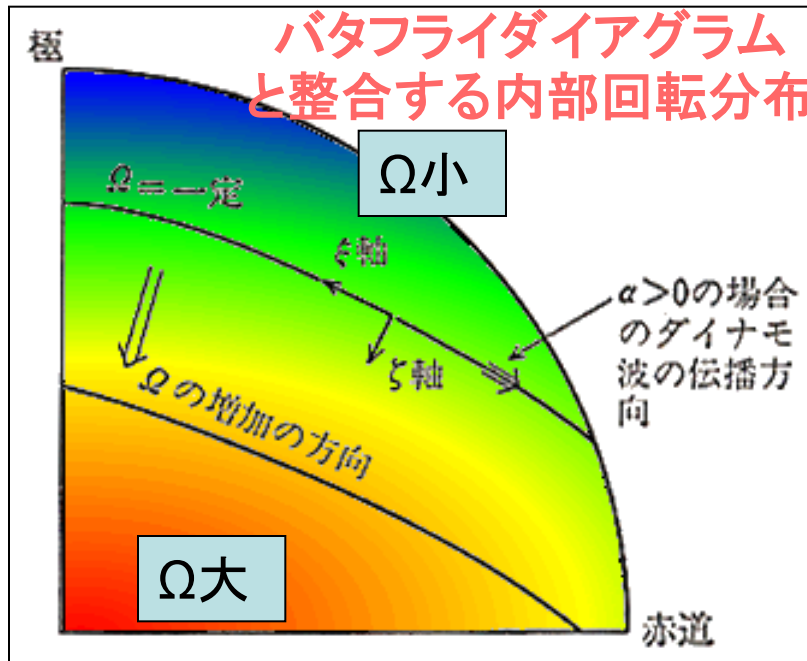
パーカー $\alpha\omega$ ダイナモの限界

誘導方程式の波動解

バタフライダイアグラム＝ダイナモ波

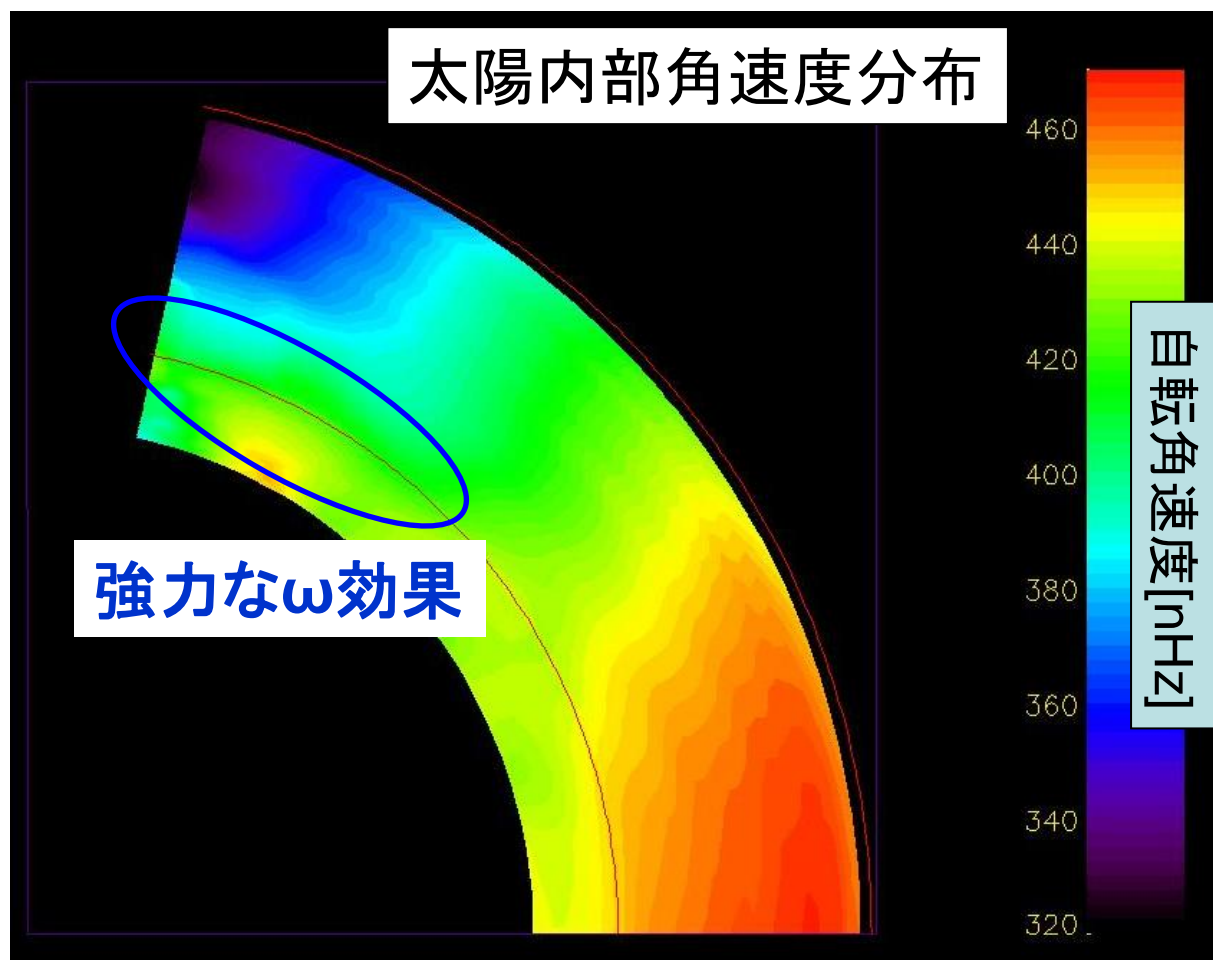


$\alpha\omega$ ダイナモの解として、太陽内部回転が**ある特定の形**をしているときは磁場が赤道方向へ移動していく(ダイナモ波)



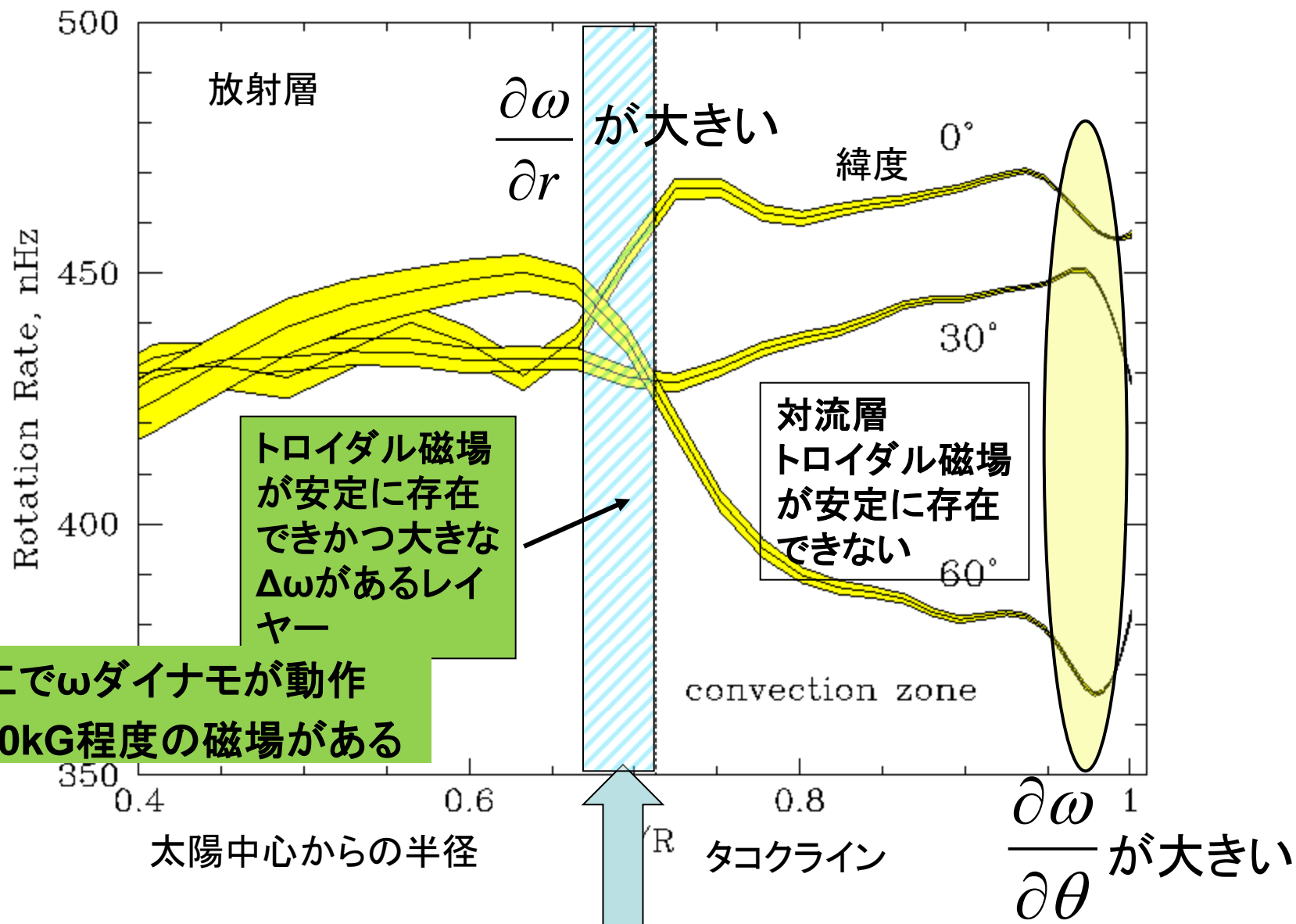
日震学の結果得られた太陽内部角速度分布と矛盾

日振学による革命 太陽内部回転分布が分かる



太陽内部の角速度分布：どこでダイナモが起きるか？

Tachocline: 対流層底部付近で自転角速度が急激に変わる層

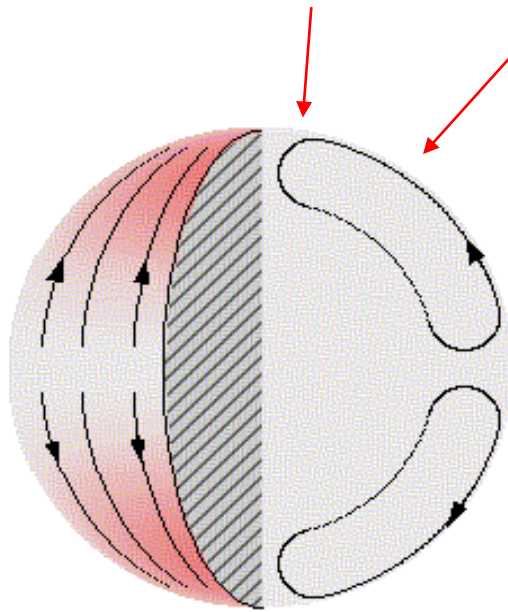


子午面流の重要性

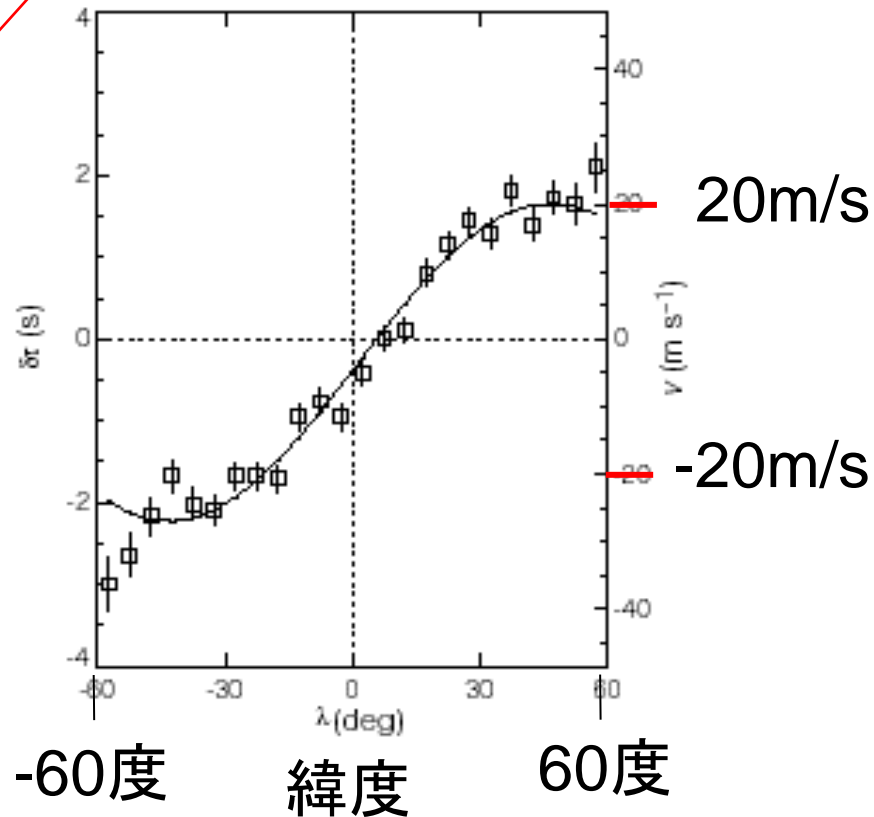
磁場の沈み込み？

表面磁場の輸送

子午面流速



子午面流

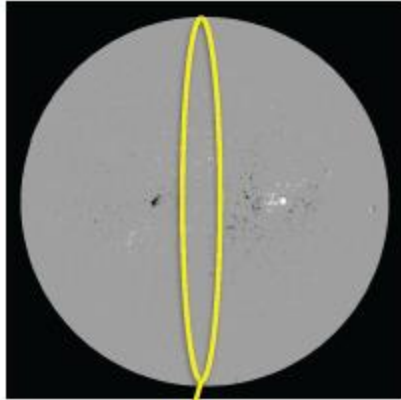


-60度

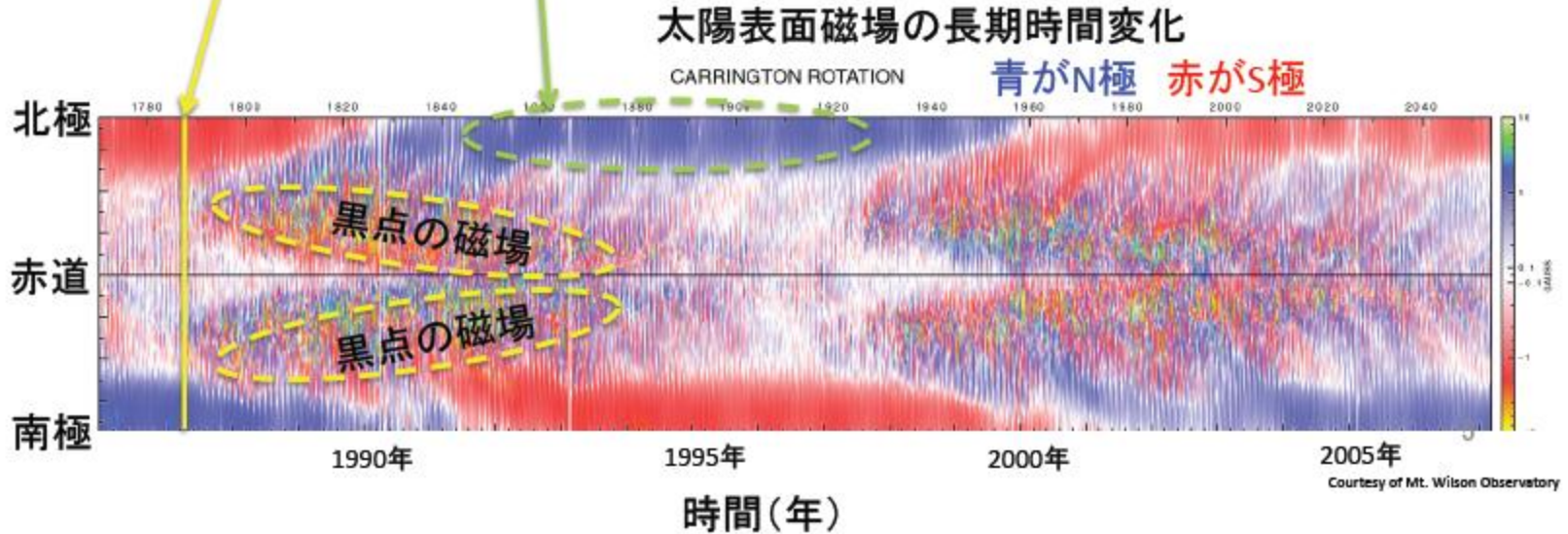
緯度

60度

太陽磁場の長期変化

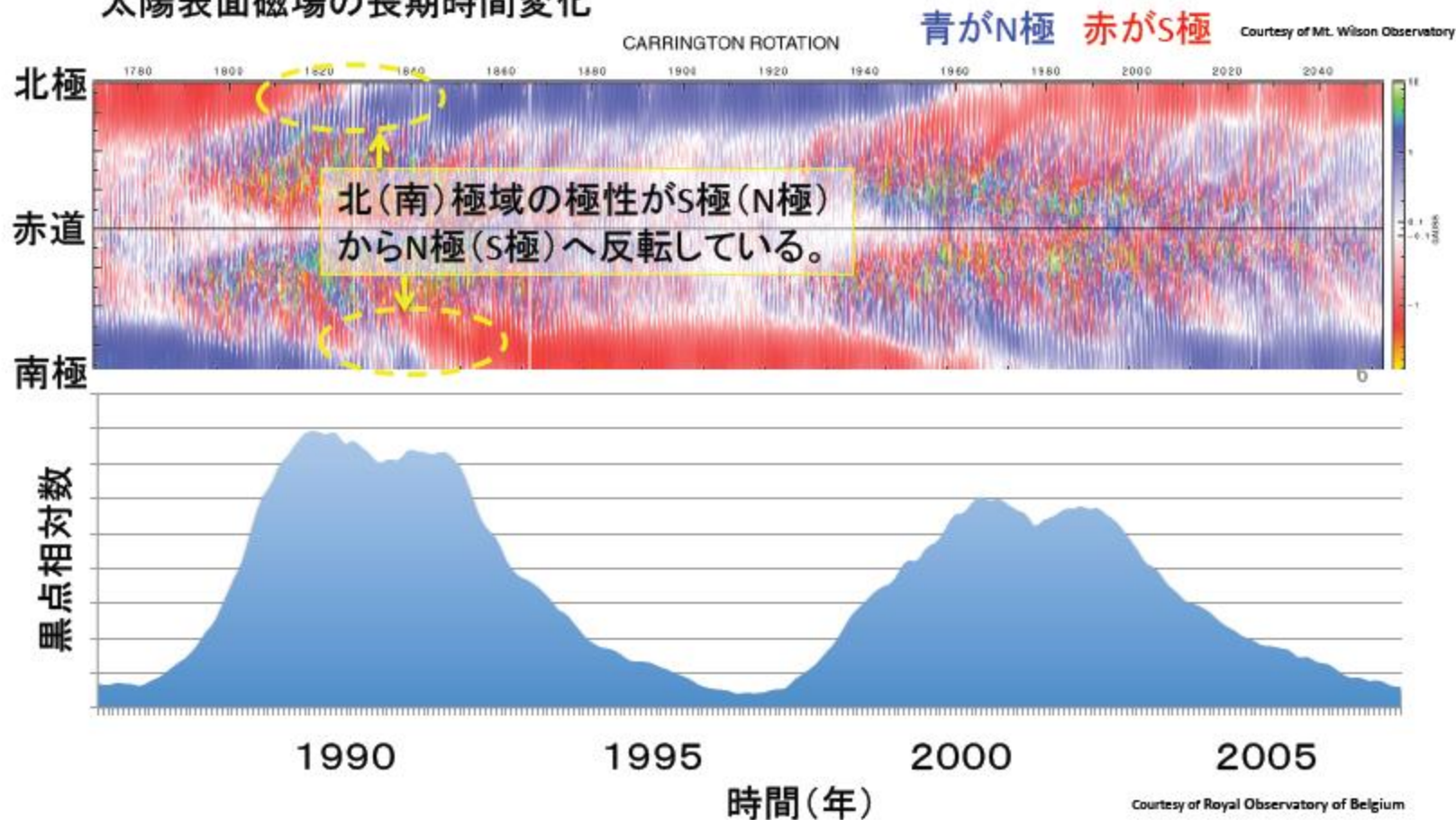


- 毎日の太陽磁場観測データの子午線沿いの磁場分布を並べると、太陽の磁場変動を見ることができる。
- 極域は弱い磁場(数ガウス)で埋め尽くされている様に見える。



太陽周期ごとに反転する極域磁場

太陽表面磁場の長期時間変化



子午面還流が重要な働き

ポロイダル磁場

↓ 子午面環流

タコクラインへ種になる磁場が供給される

↓ Ω 効果

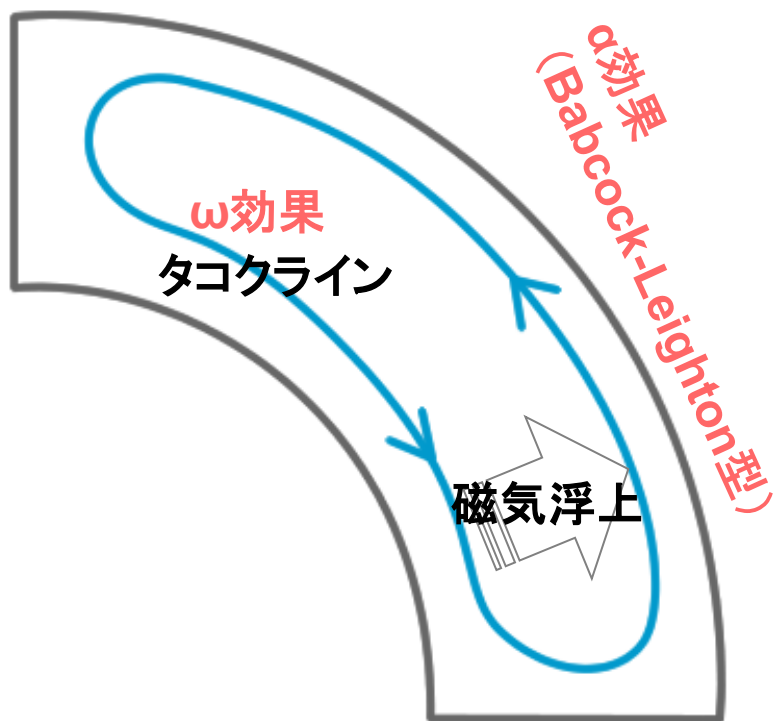
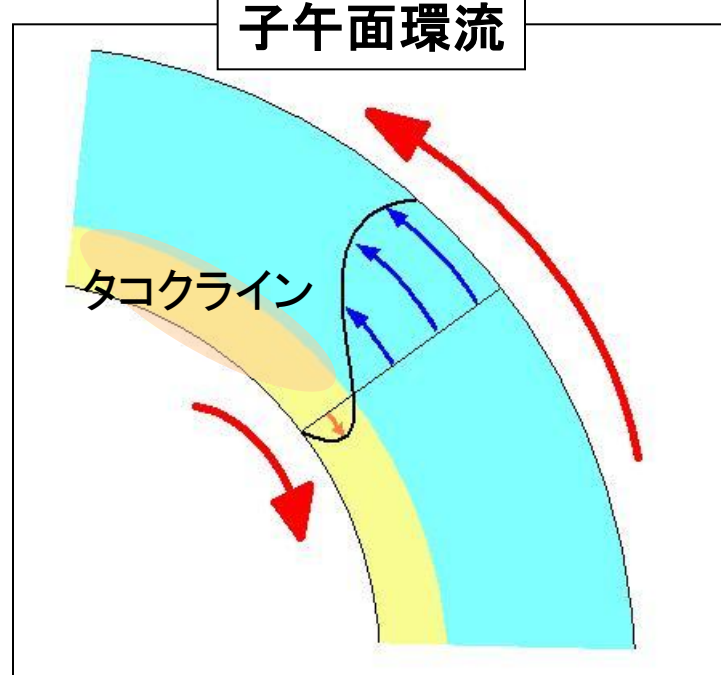
トロイダル磁場

↓ 子午面環流

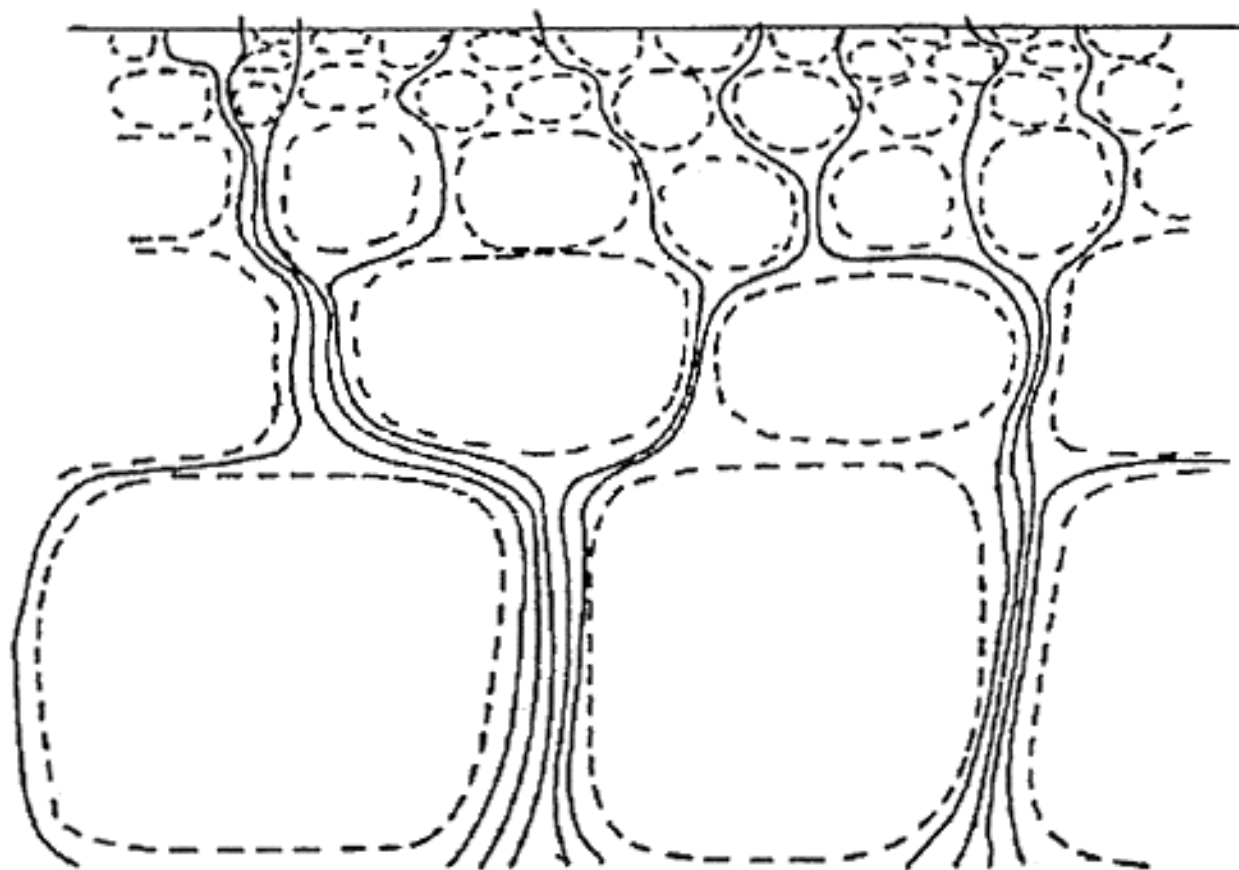
黒点帯の移動

↓ 磁気浮上 + α 効果
(ソースターム)

ポロイダル磁場



磁場はフラックスチューブ



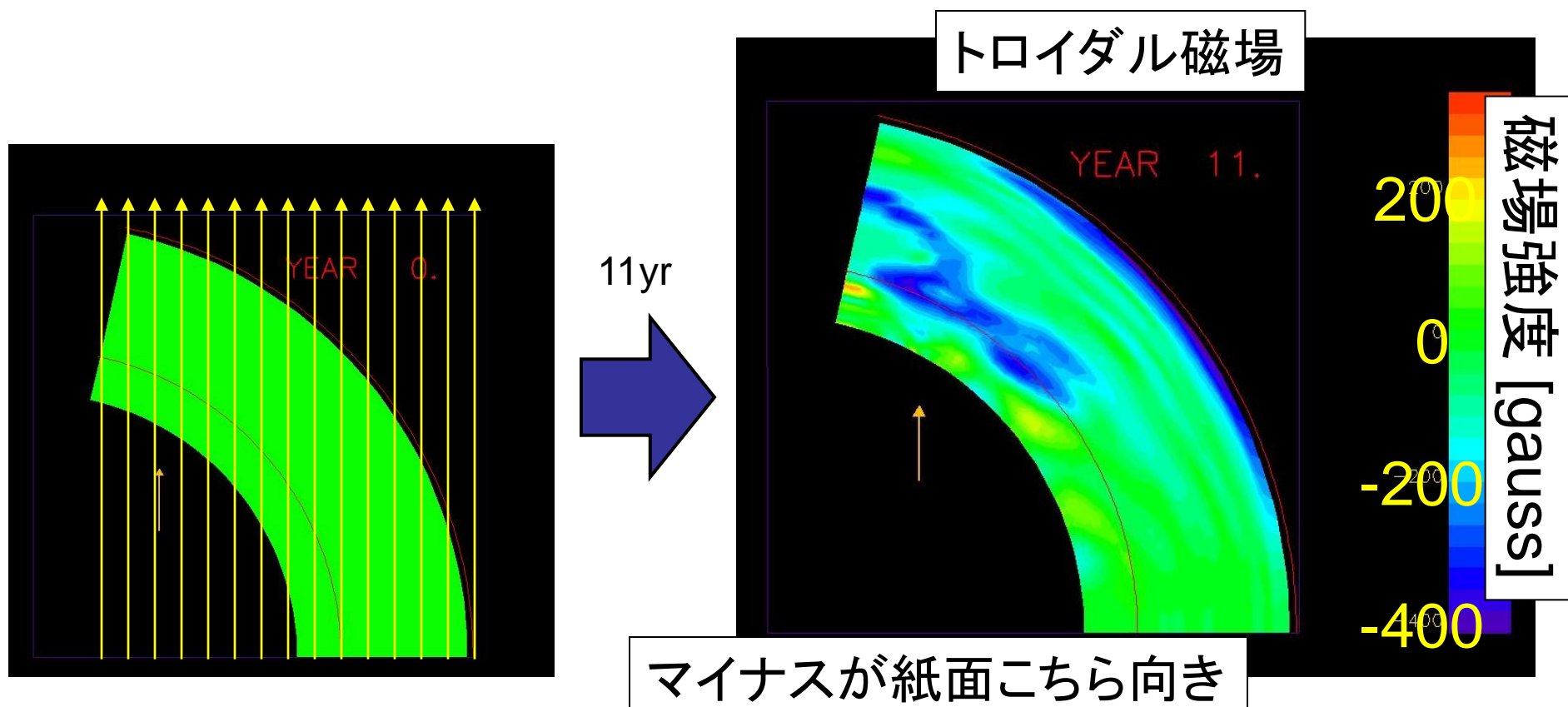
タコクラインによるトロイダル磁場の増幅

初期条件：

太陽内部を1ガウスの一様なトロイダル磁場が満たしている

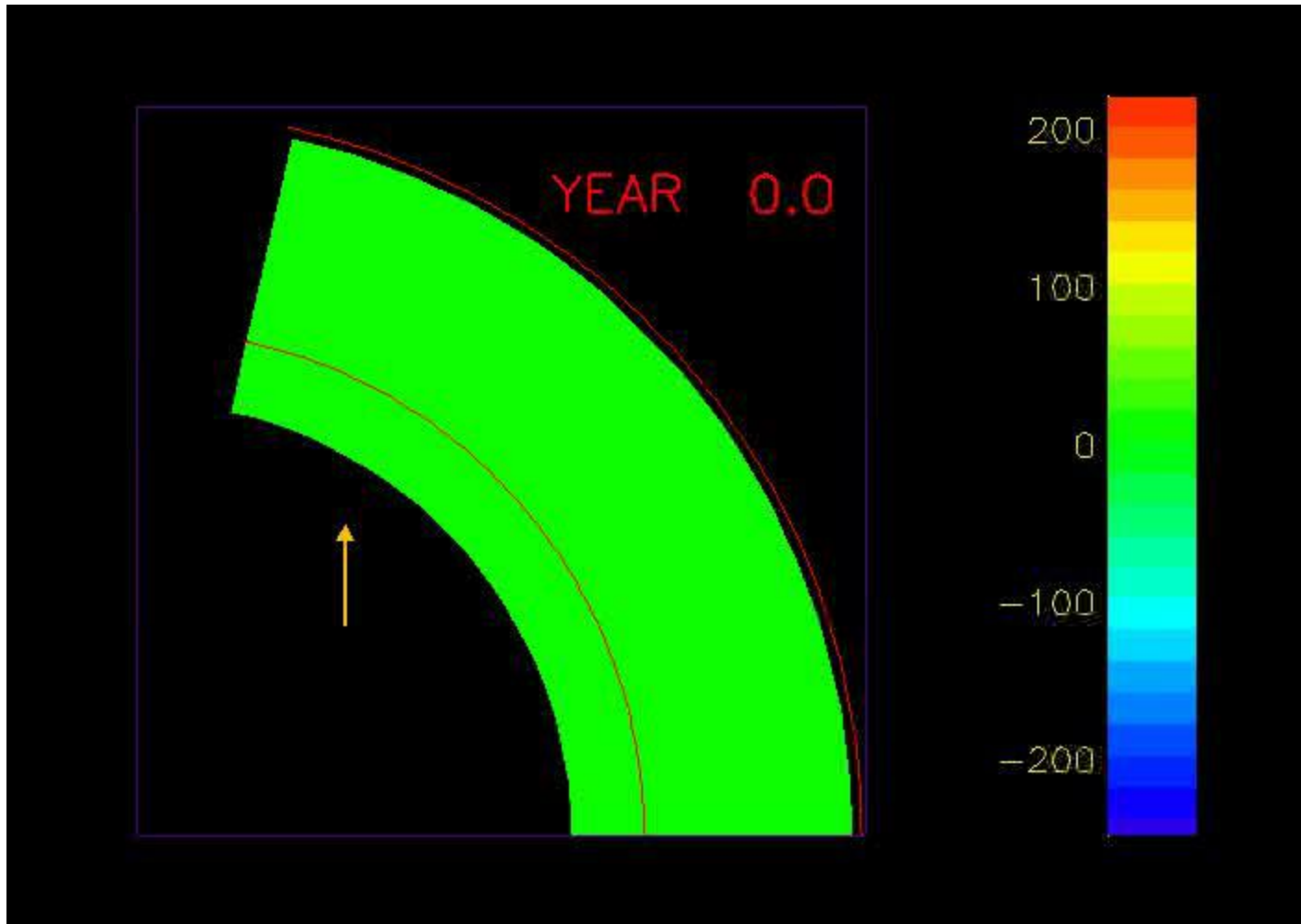
結果：

11年後、タコクラインで200-300ガウスのトロイダル磁場が発生

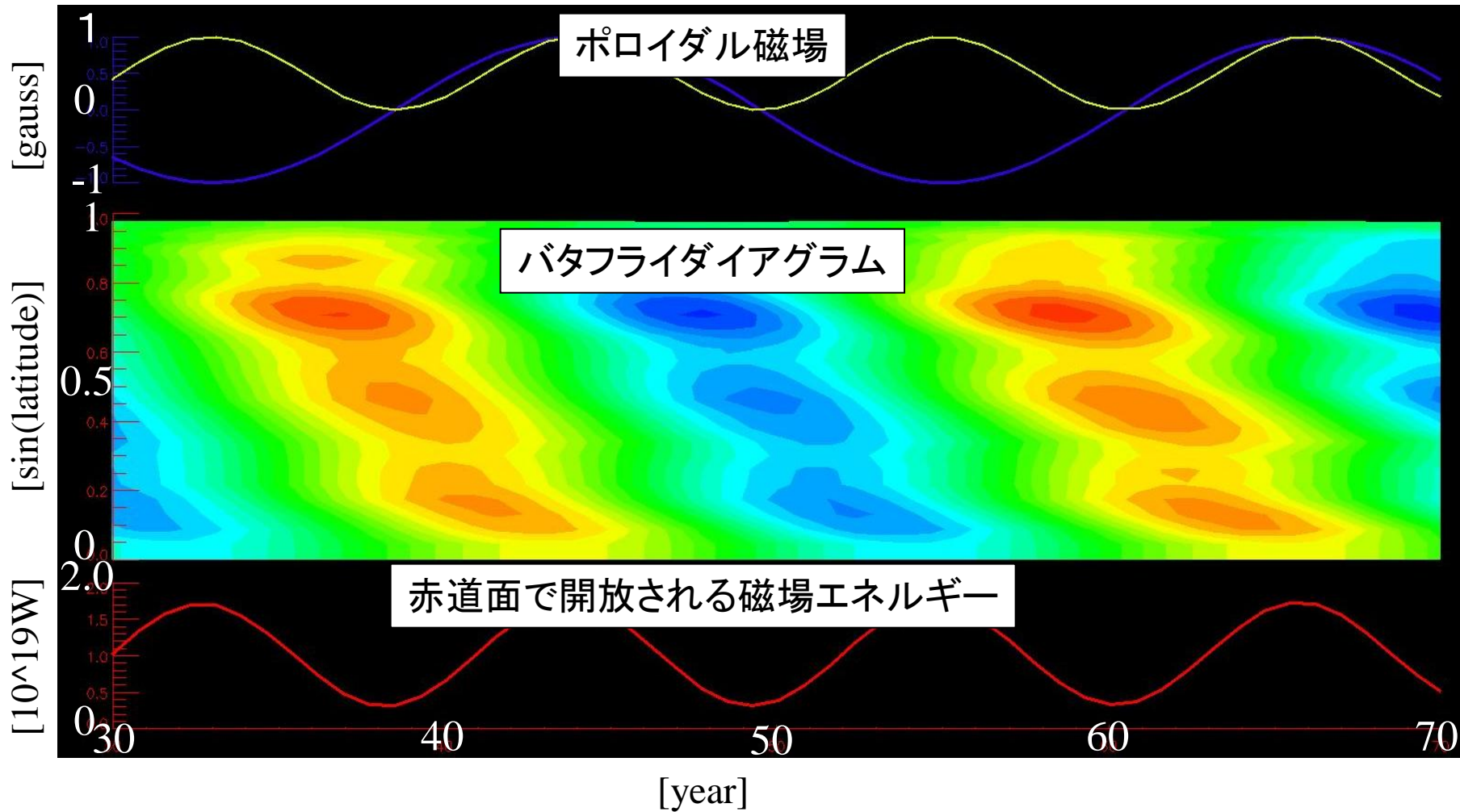


ダイナモシミュレーション

トロイダル磁場がタコラインで増幅されながら子午面環流で運ばれていく様子

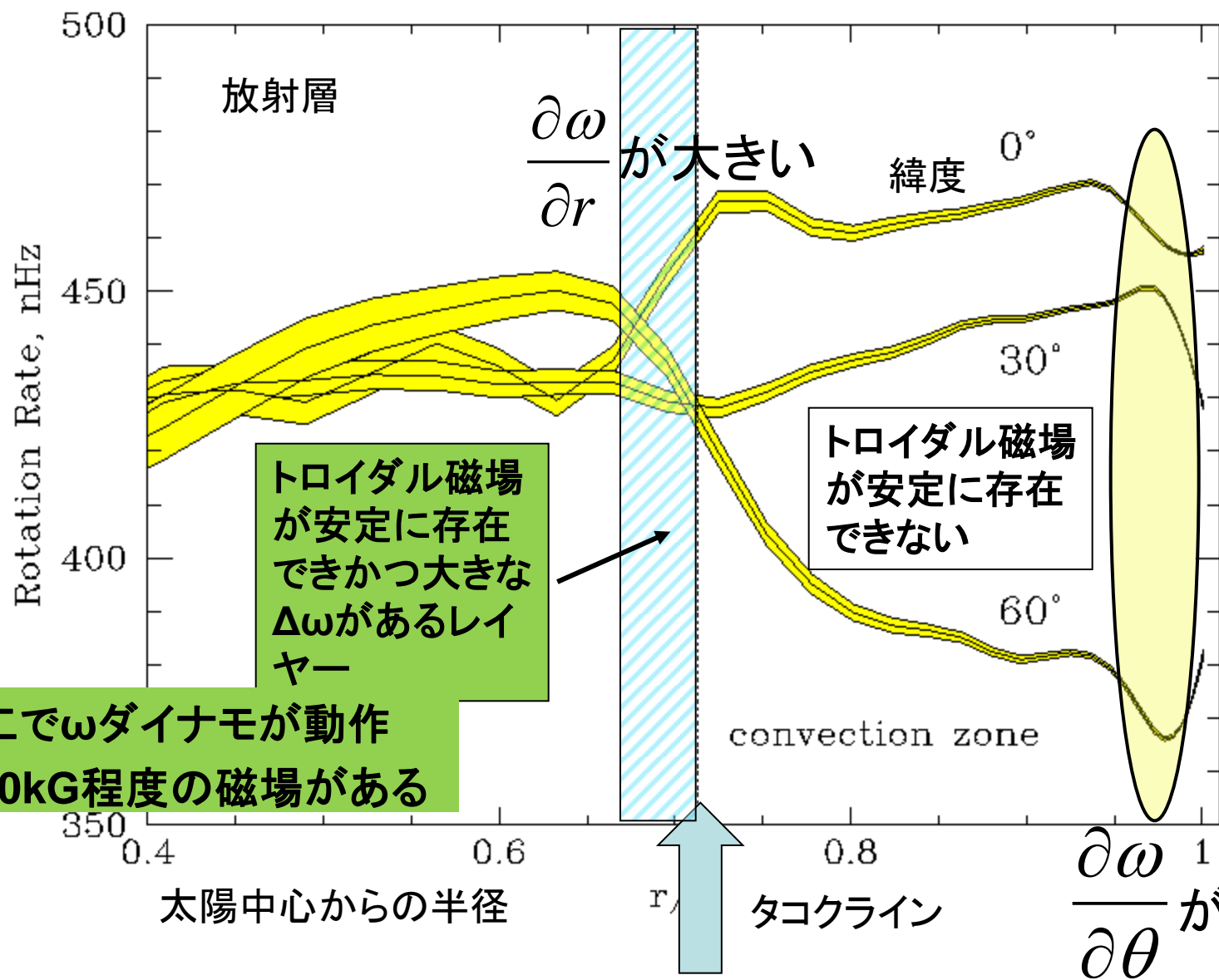


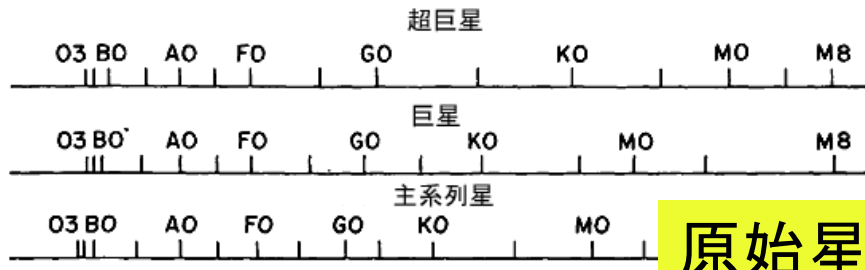
バタフライダイアグラム



太陽内部の角速度分布: どこでダイナモが起きるか?

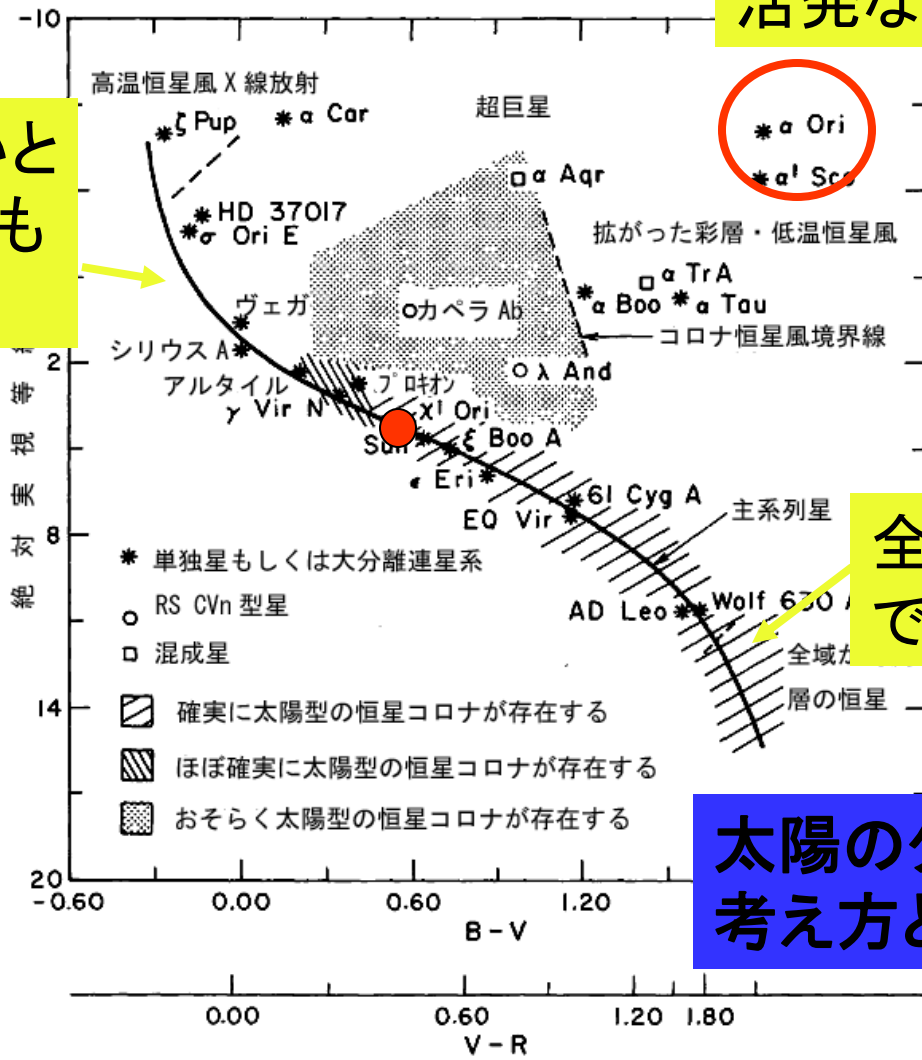
Tachocline: 対流層底部付近で自転角速度が急激に変わる層





原始星 (対流が発達)
活発なコロナ活動

対流層がないと
通常のコロナも
ない



全域が対流層
でもコロナがある！

太陽のダイナモの標準的
考え方と整合しない

最近の太陽活動とダイナモ

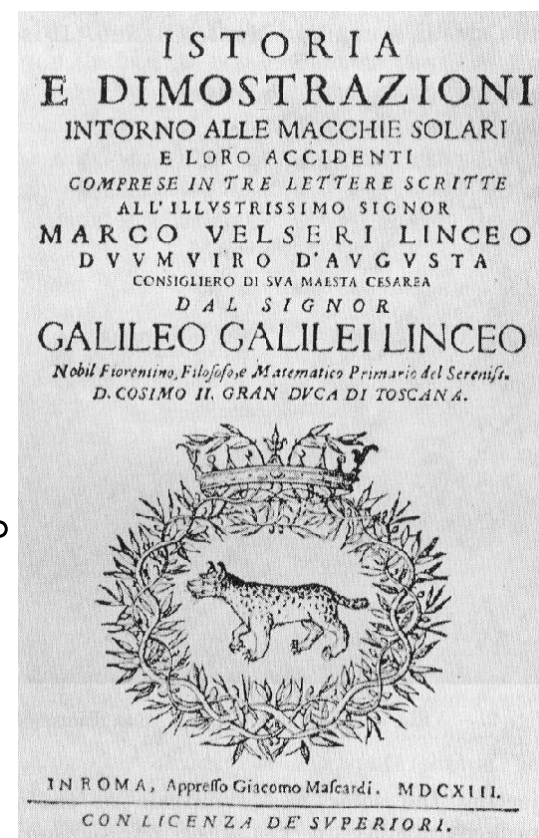
ザ・コア



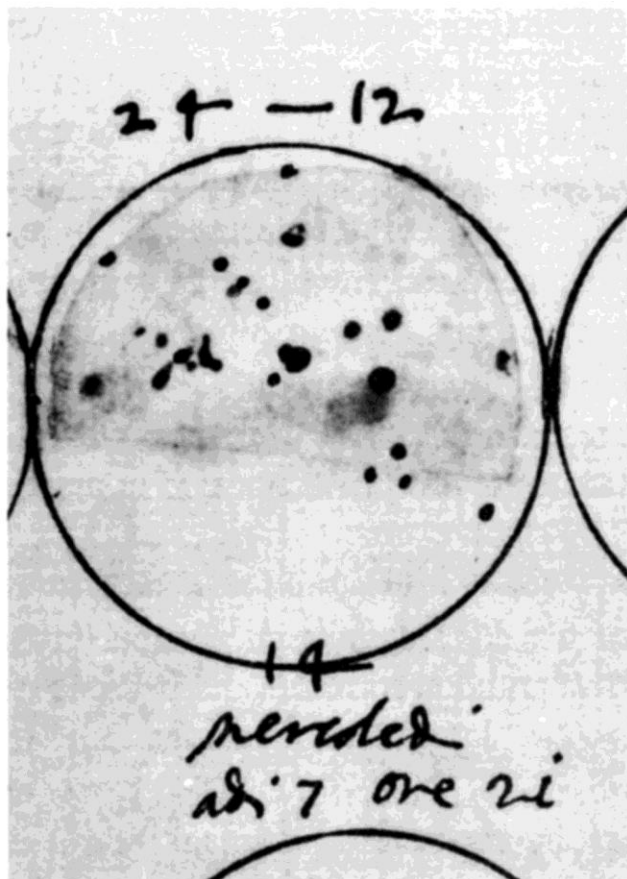
科学者たちは地球の中心である核(ザ・コア)が停止しかかっていることを発見した。コアは、地球の自転でダイナモのように発電して、強い磁場を地球の周りに発生させ、太陽や宇宙からの有害なイオン粒子から地球を守っている。もしコアが停止したら、それは人類が一年以内に滅亡することを意味していた。SF映画です。。。

ガリレオ「太陽黒点に関する書簡」(1613年)

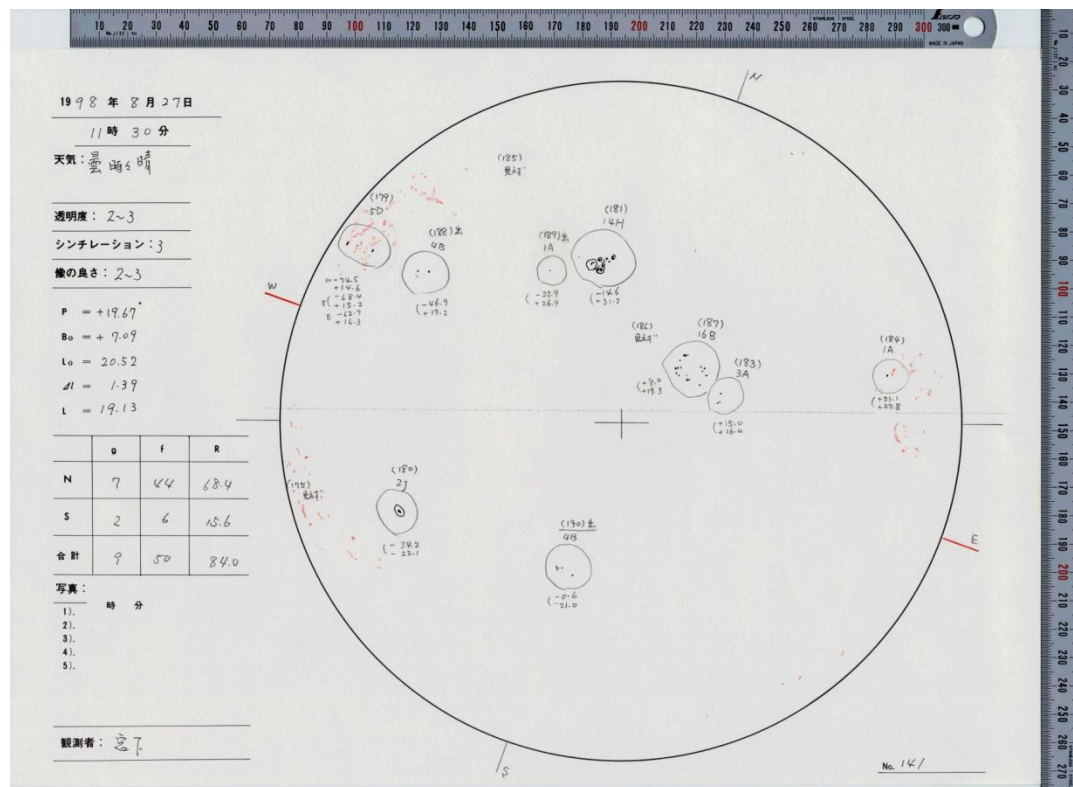
- 太陽に黒点があり、それらが移動する様を克明に報告し、かつそれについての理論的な解釈が展開されている。ガリレオが観測した結果を描いた図も豊富にある。
- 汝、フィレンツェのヴィンチェンツィオ・ガリレイの子、ガリレオ、70歳は、あるものどもによって教えられた誤った学説。。。『太陽黒点について』と題する、いくつかの手紙を印刷したため、。。。。1615年、この聖省に告訴された。そしてそのさい、汝より汝の弟子に宛てて書かれたといわれる手紙の形式の書きものの写しが提出され、これにはコペルニクスの命題に従って、聖書の真の意味と権威とに反する様々な命題が含まれていた。



太陽黒点の数はどうやって数える？

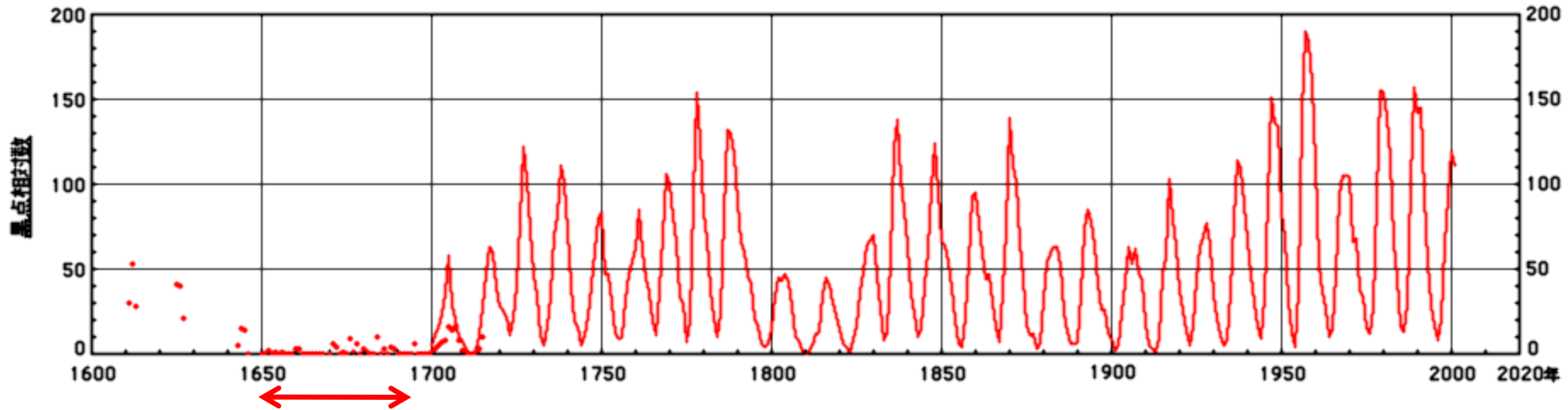


ガリレオガリレイ (1612)



国立天文台 (1998)

1650～1700年黒点がなくなる 太陽のダイナモが停止？



マウンダー極小期を説明できる理論はない

- ある極小期から次の極小期まで平均11年(太陽周期)
- マウンダー極小期など、時々50~100年程度黒点が少なくなる時期が現れる。
- 1700年代からサイクルが数えられ始め、2001年頃最大となった前回のサイクルを、第23サイクル(周期)と呼ぶ。

太陽活動のプロキシである宇宙線生成核種の分析による過去の太陽活動の復元

炭素14

^{14}C

半減期 = 5730 年

宇宙線と大気との相互作用により生成され $^{14}\text{CO}_2$ として循環
⇒光合成により樹木年輪にとりこまれる



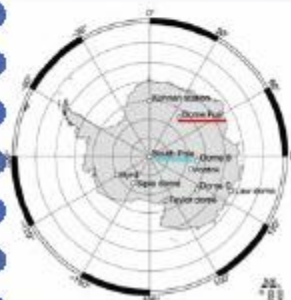
屋久杉

ベリリウム10

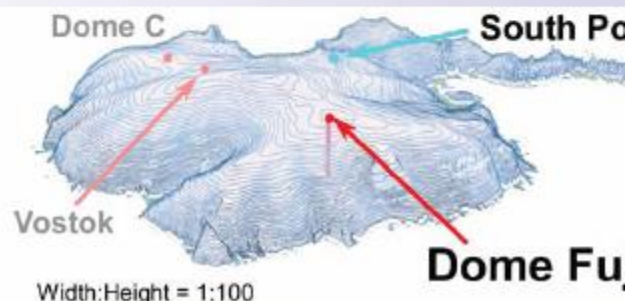
^{10}Be

半減期 = 150万年

宇宙線と大気との相互作用により生成され ^{10}BeO となり降雪により氷床中に堆積する



南極氷床



(a) 太陽圏(太陽の磁場が広がる空間)が宇宙を飛びかう高エネルギー粒子をさえぎる



太陽活動が活発化

⇒ 太陽(圏)の磁場が宇宙線をバリア

⇒ 地球に飛んでくる**宇宙線(陽子)量**が減少

⇒ 宇宙線(陽子)が作る**炭素14**の量が減少

⇒ 樹木年輪に取り込まれる**炭素14の濃度**が減少

(b) 宇宙線によって炭素14が生成される

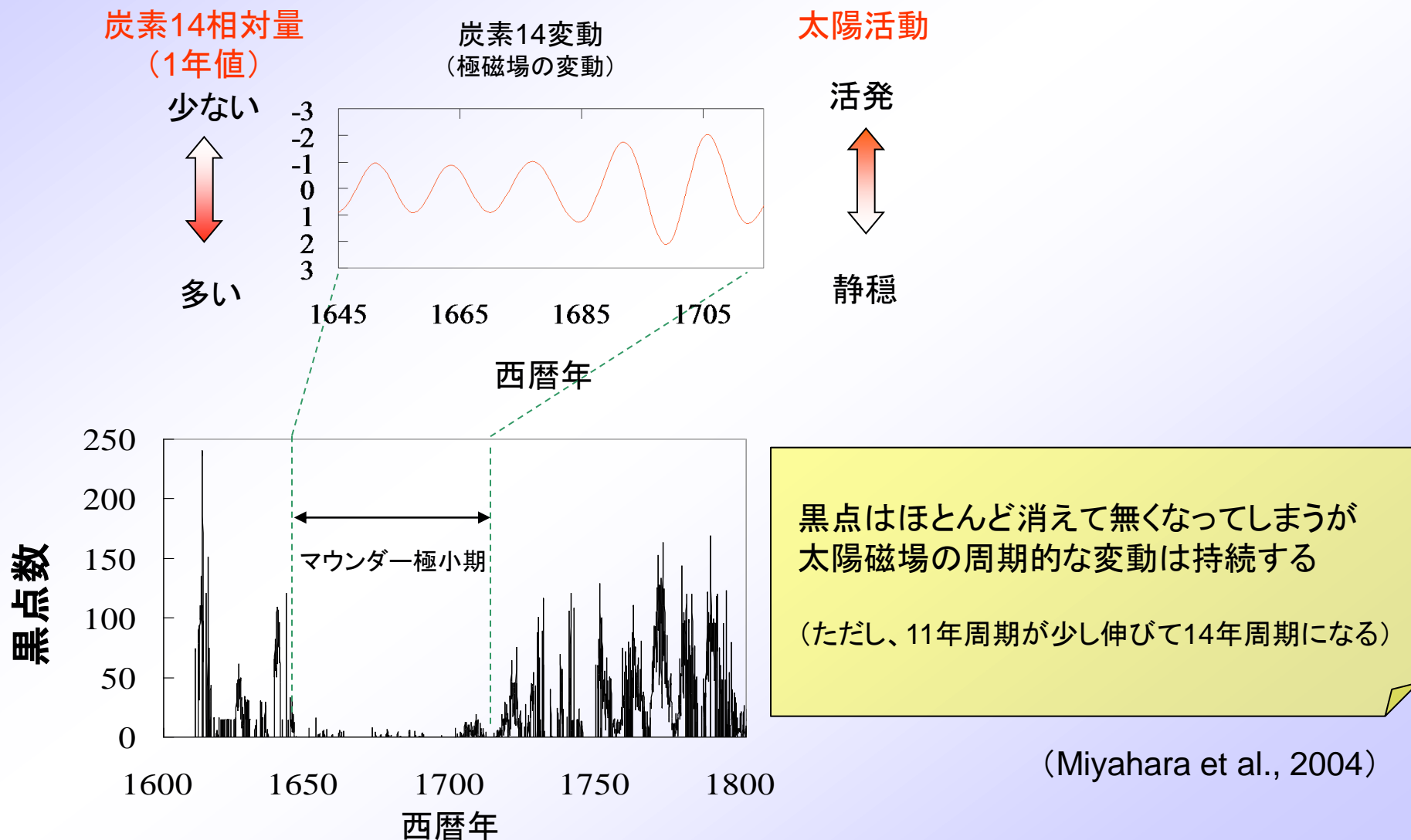


光合成により年輪に取り込まれる

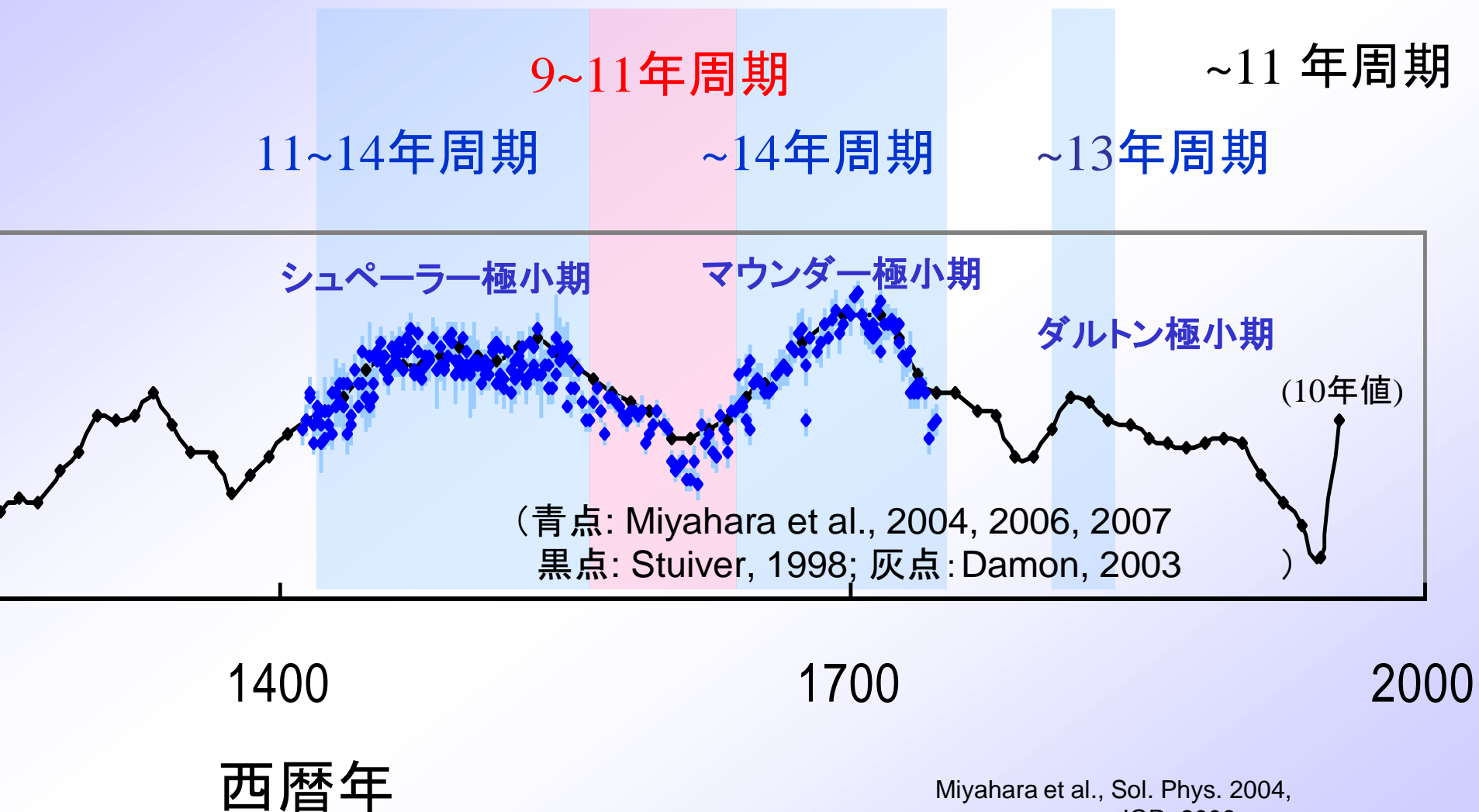


マウンダー極小期における太陽の”11年”周期変動

年輪をさらに細かく分離して、1年輪毎に分析すると、11年周期も復元することができる

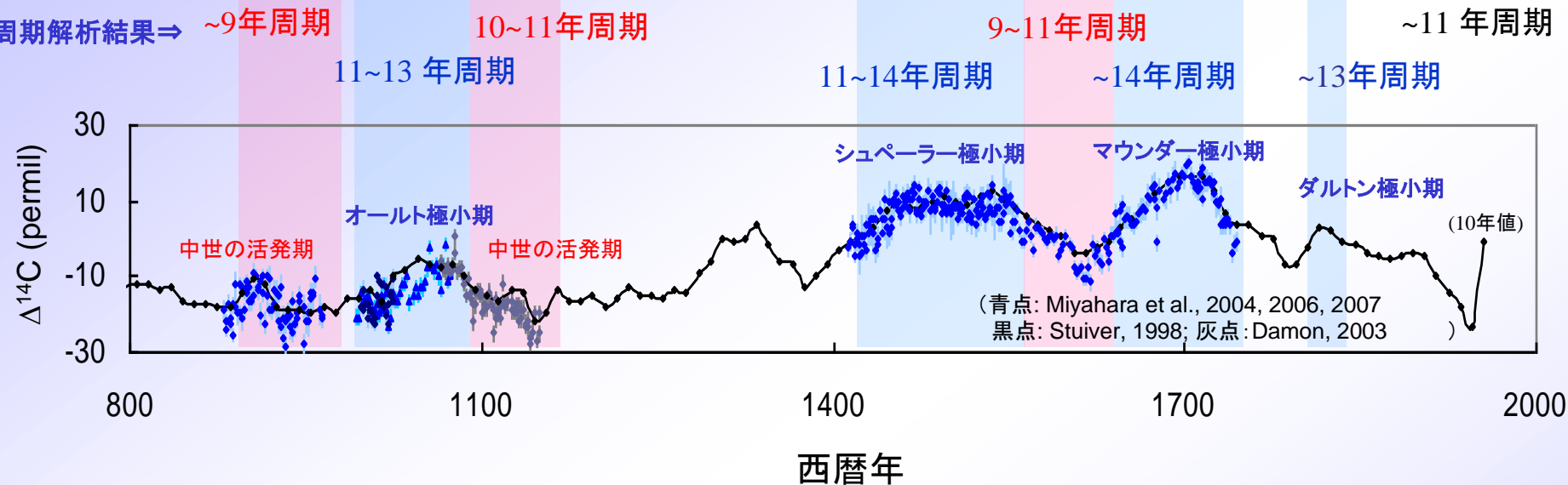


これまでの測定結果と周期解析結果： 過去1100年間における太陽”11年”周期の変遷



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

これまでの測定結果と周期解析結果： 過去1100年間における太陽”11年”周期の変遷



太陽11年周期は
太陽活動の長期変動と関連して
伸び縮みしている

- ・活発なとき ⇒ 9年周期
- ・静穏なとき ⇒ 14年周期

⇒太陽11年周期の伸び縮みを検出することで
過去の太陽活動レベルの変遷を厳密に復元
できる可能性がある。
それぞれの極小期の“違い”も議論できる。

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

これまでの観測から経験的に言えること

- 太陽周期が伸びており、これは次の太陽活動極大期が低調であることを予想させる。
 -
- 太陽周期だけでなく、その他の観測データも従来にないフェーズを示しており、近代的観測が始まって以来太陽が新しいダイナモ的フェーズに入っている可能性を示唆する。

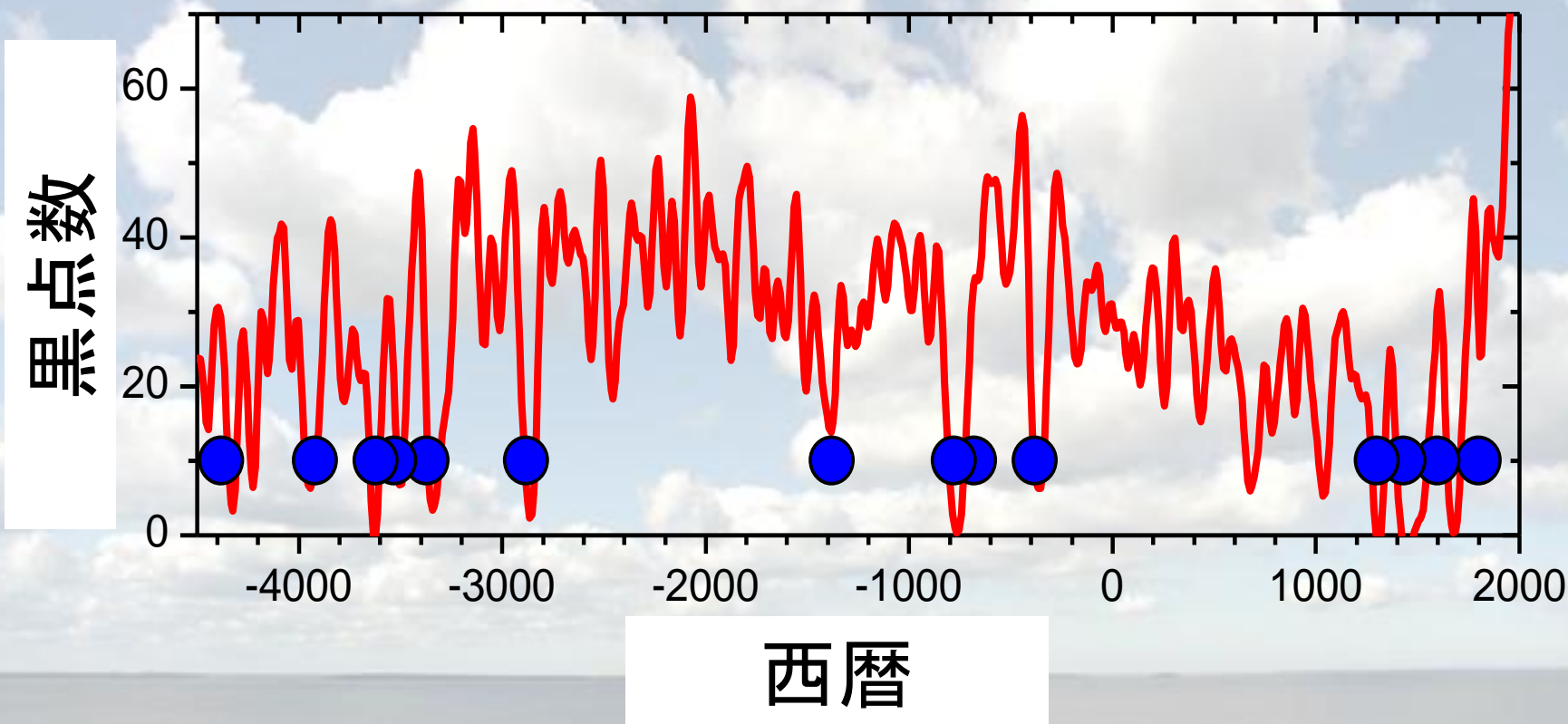
マウンダーミニマム私見

- ダイナモ機構に決定論的に決まらない部分がある。それが、ゆらぎ＝活動の高低を生む。
- 統計的プロセス＋閾値があり、ダイナモ(黒点の生成)が on/offしているように見える。
- トロイダル磁場を作る ω 機構に統計的過程はない。
- ポロイダル磁場を作る α 機構に統計的過程がある。
 - それにより極磁場の強度に差が出ている。
 - 極磁場が小さいとトロイダル磁場が十分大きくなりず浮上不安定にならない(閾値の存在)。

地球環境への影響？

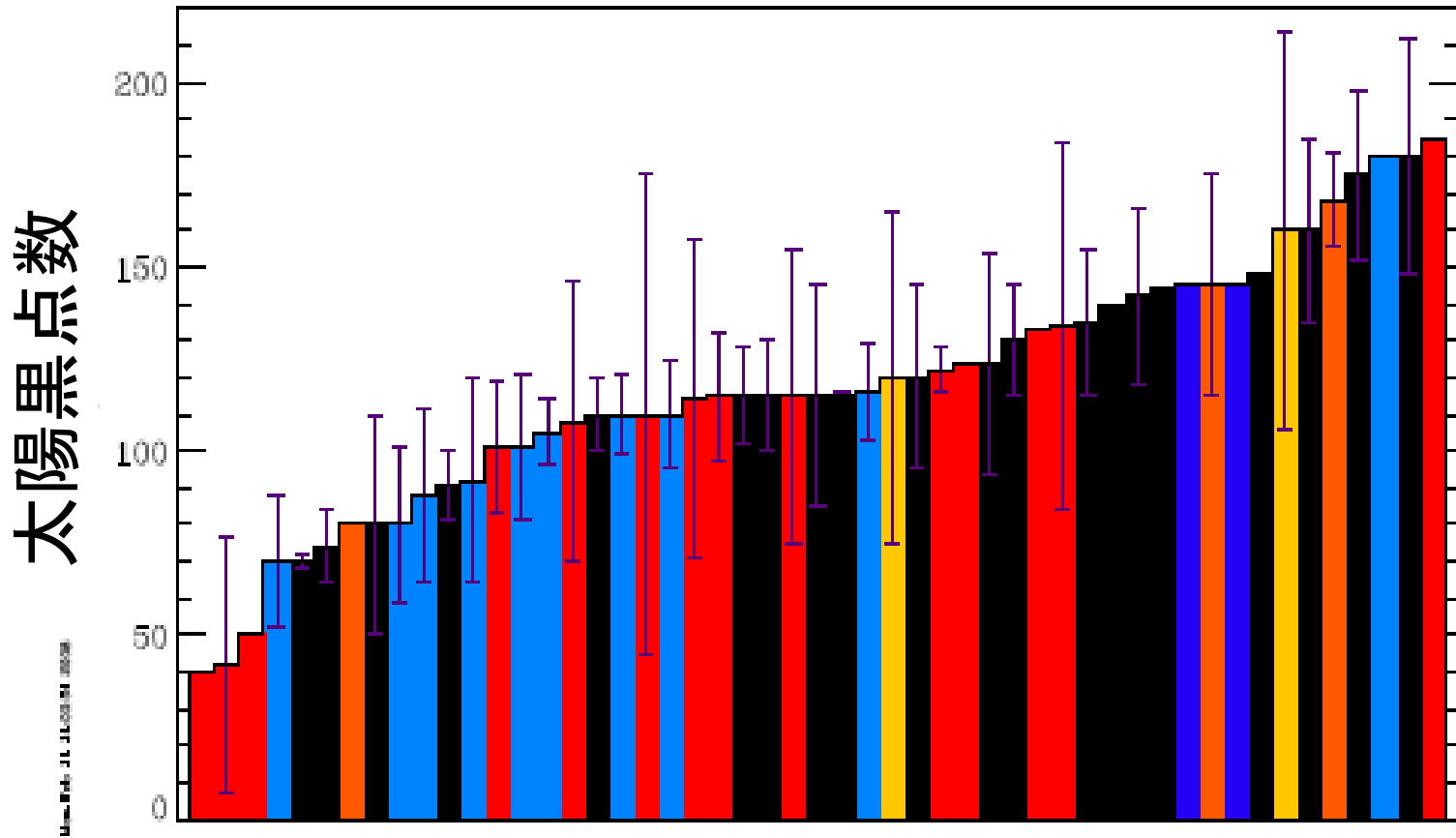


黒点数と地球の寒かった時期



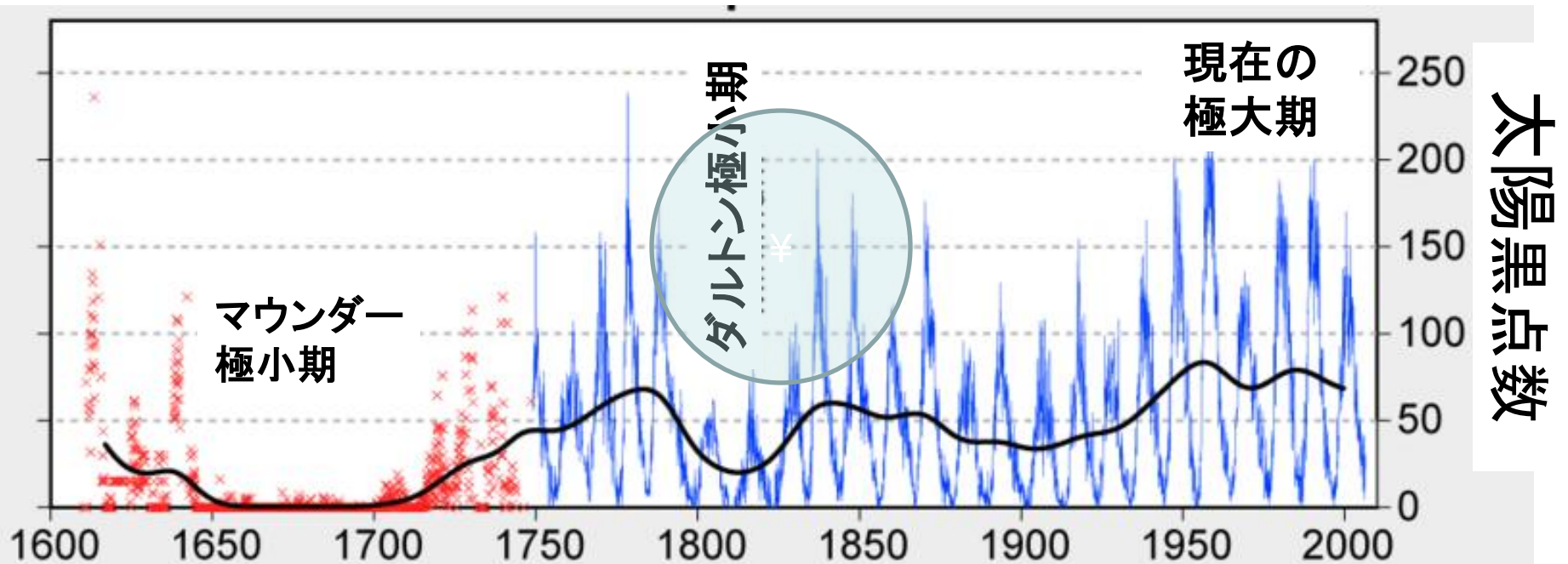
過去6500年で、黒点数の極端に小さい15回のうち、12回がヨーロッパで気温が低かった時期に一致している。

専門家による太陽活動の予測 はほとんどはずれた！



非常に低い太陽活動 → 非常に高い太陽活動

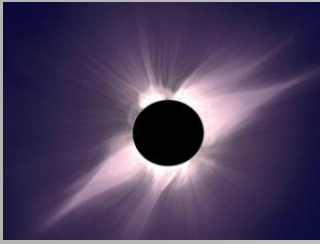
太陽は活動の停滞期に入ろう としているのか？



1800年頃のダルトン極小期あたりは、小氷期として、
20世紀後期に比べて約0.6度寒冷化していた。

太陽活動の予測

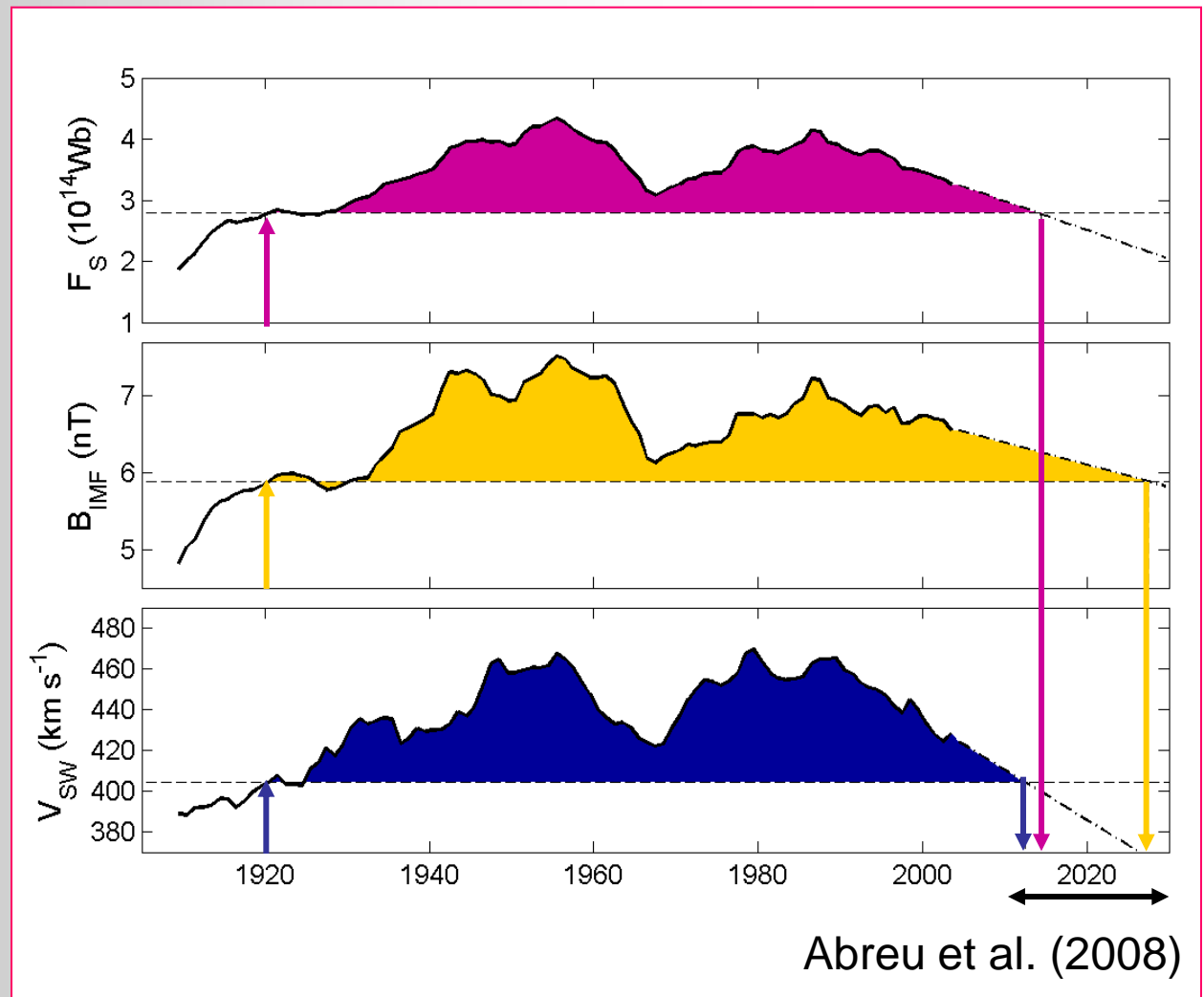
- 太陽活動を予測する信頼できる電磁流体力学的理論は、現在のところ存在しない。
 - ダイナモ理論は天文学・太陽物理学の中でも難解な分野
- 次の太陽活動期について、多くの理論的・経験的予想が行われているが、その予想の幅はたいへん大きい。現在の太陽の状況は、予想の下限に近い。
- 研究者の大方の見解は、次の太陽活動極大期は、
 - 存在するであろう
 - しかし、その時期は遅れるであろう
 - さらに、その活動は低調に推移するであろう
- 太陽は活動低調期に入りつつある？

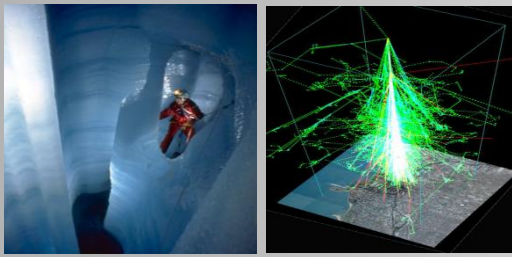


Centennial Variations: the rise and fall of the current grand maximum (GSM)

- solar cycle running means
- defining start of Grand Solar Maximum as 1920
- linear extrapolation gives end dates consistent with GSM durations

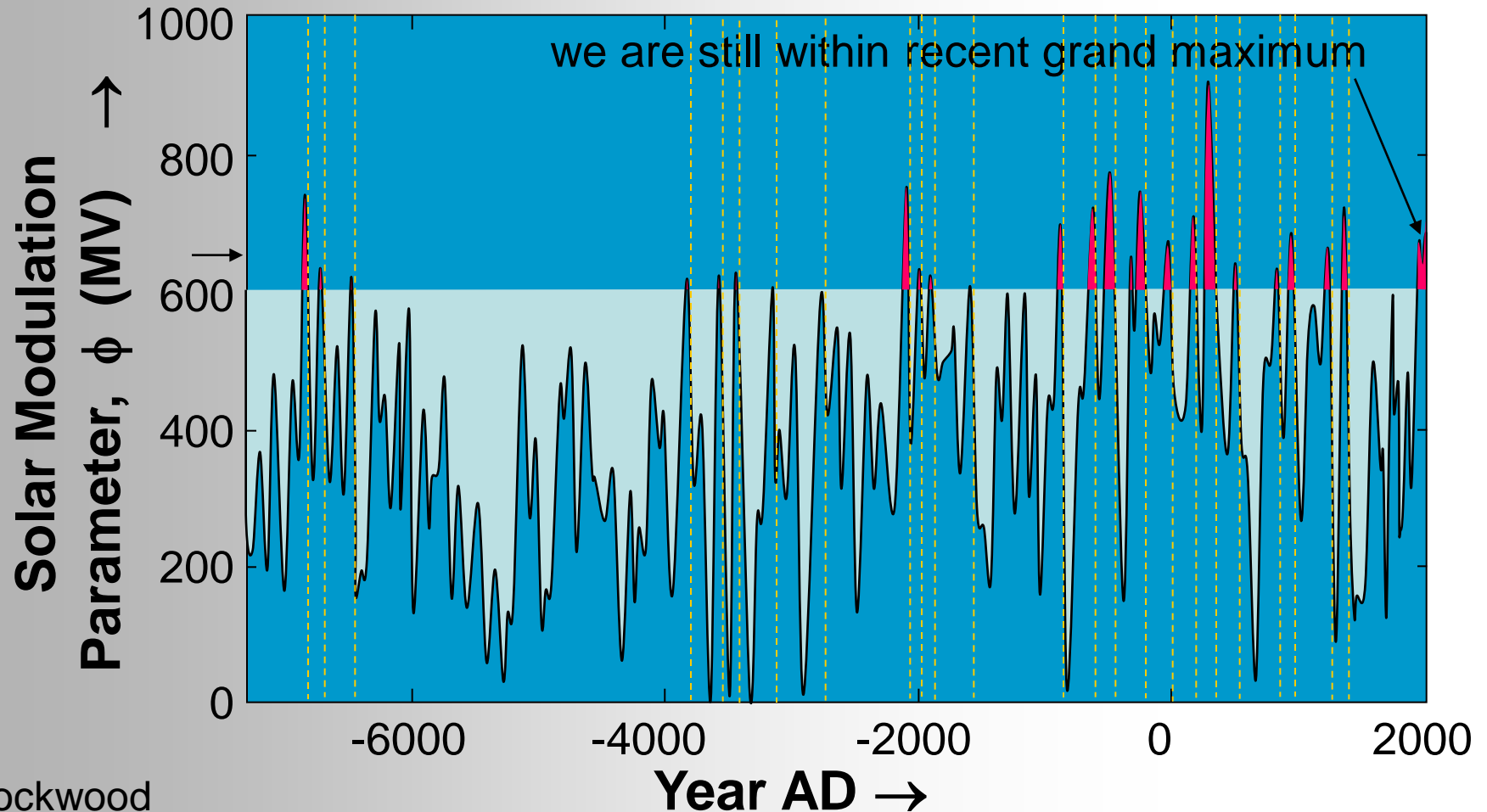
Lockwood



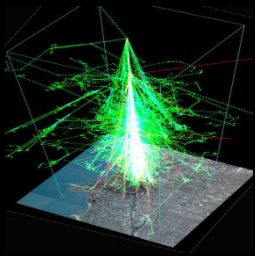


Millennial Variation

ϕ composite (25-year means) from cosmogenic isotopes ^{14}C & ^{10}Be by Steinhilber et al. (2008)



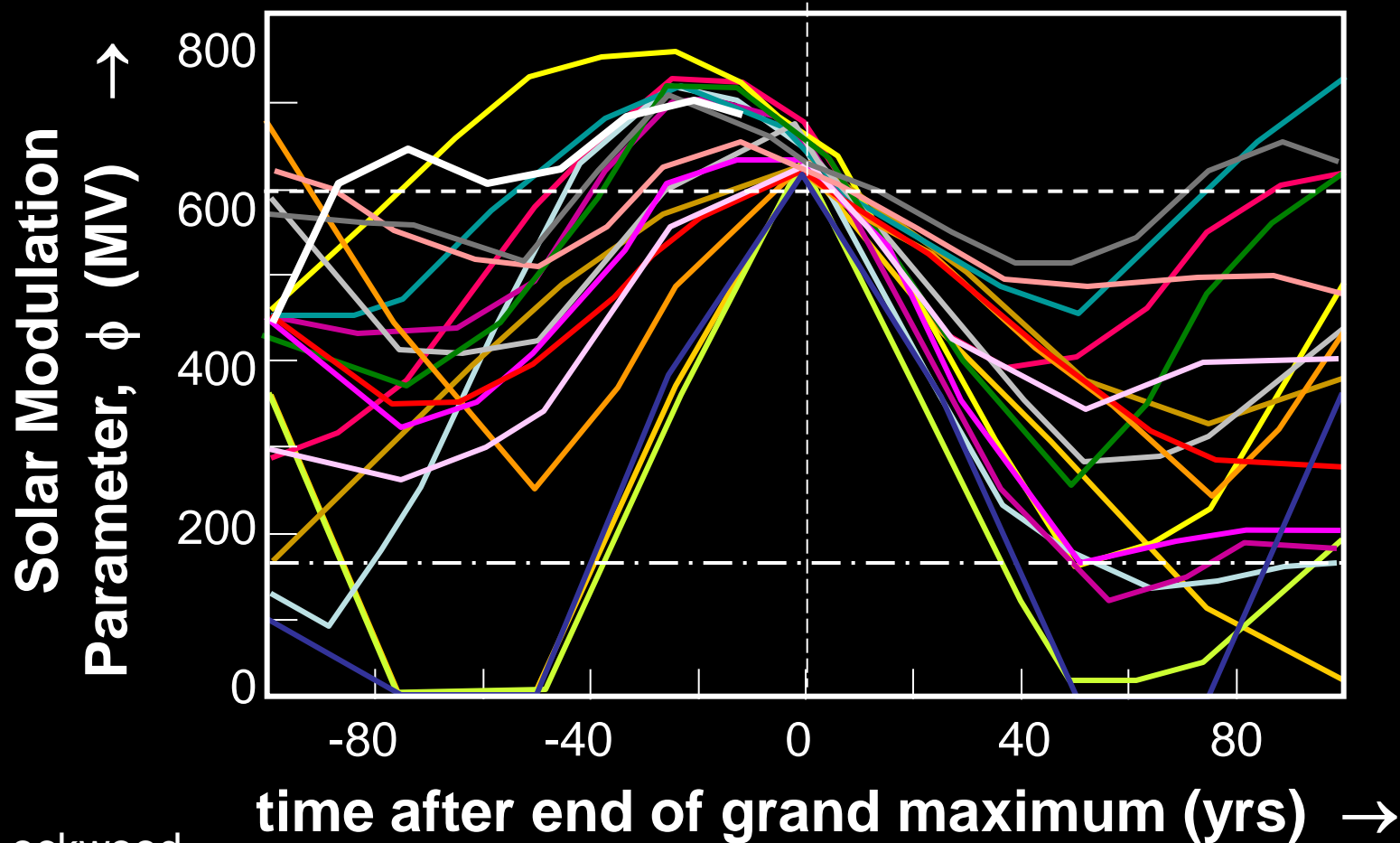
composite from Solanki et al., 2004; Vonmoos et al., 2006 & Muscheler et al., 2007

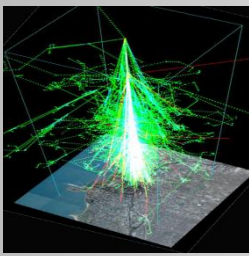


Superposed epoch study of the end of grand maxima

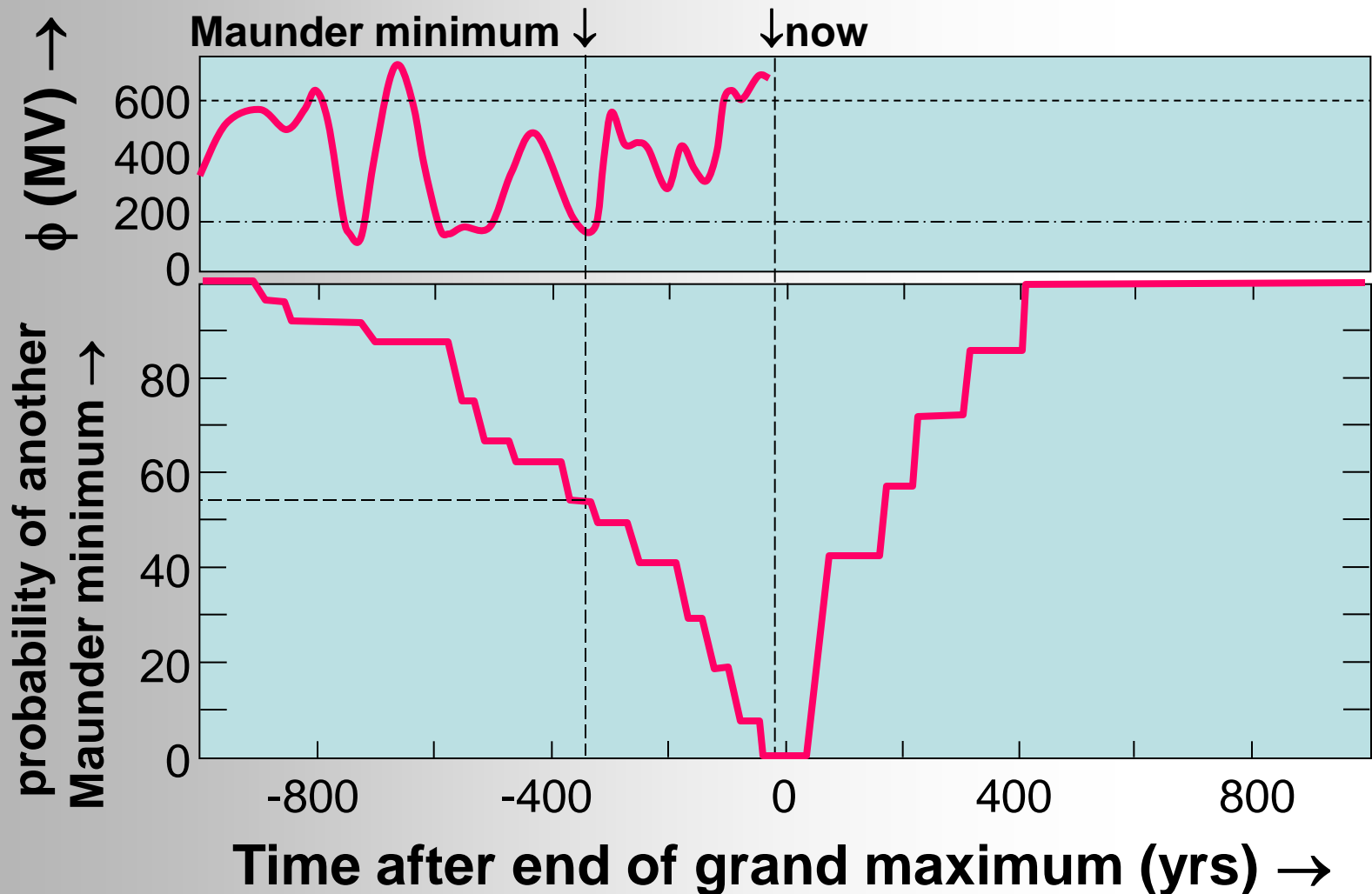
(24 events in 9000 yrs)

↓ end of grand solar maximum





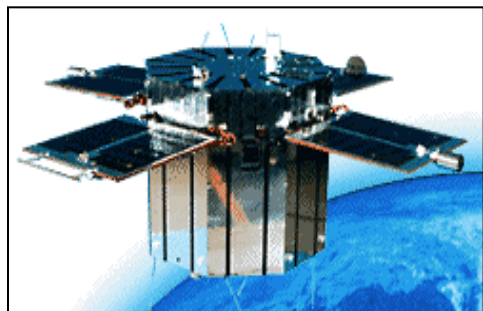
How Long Before the Next Maunder Minimum?



天文学的意義と社会的影響

- 近代的観測が始まって以来、太陽活動を表す諸量がそろって従来にない値を示している
- より長い年月で見れば、このレベルの太陽活動の変動は何度も起きている証拠があり、天文学的には異常な現象でない。
- 太陽のダイナモが少し違った挙動を示すという自然の提供してくれた絶好の機会であり、観測および研究体制の強化により、基礎的過程の解明を進める必要がある。
- 基礎研究の推進を通じてのみ、太陽活動の予報アルゴリズムを構築することができ、国民の安心・安全に貢献できる。

衛星による太陽観測で世界の最先端を行く日本 太陽活動の変動を解明するSOLAR-C衛星



ひのとり/ASTRO-A (1981-1982)

フレア観測

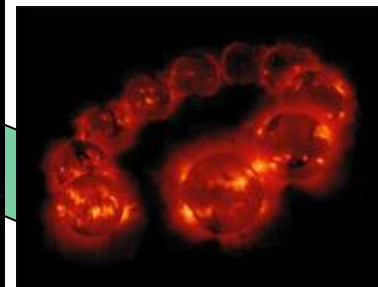
X線、 γ 線 ($E > 10$ keV)



ようこう/SOLAR-A (1991-)

フレア、コロナ観測

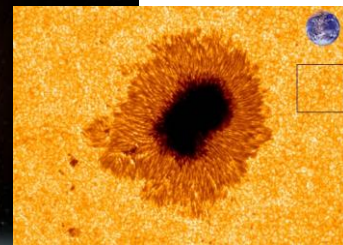
X線、 γ 線 ($E > 0.1$ keV)



ひので/SOLAR-B (2006-)



光球、彩層、遷移層、コロナ、フレア
可視光、極紫外線、X線



次期太陽ミッション
SOLAR-C
2017年度打上予定
目的: 太陽活動現象
の総合的解明と予報
アルゴリズムの構築

参考文献

- Mccomas et al.(2008) GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 35, L18103, 5 PP., 2008
doi:10.1029/2008GL034896
- http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp/jpg/solar_cycle_SW.jpg
- Tokumaru et al.(2009) Journal of Physics: Conference Series, Volume 191, Issue 1, pp. 012021 (2009).
- <http://cosmicrays.oulu.fi/>
- Parker(1955) Astrophysical Journal, vol. 121, p.491
- Miyahara et al. (2004) Solar Physics, Volume 224, Issue 1-2, pp. 317-322
- Miyahara et al. (2006) Journal of Geophysical Research, Volume 111, Issue A3, CiteID A03103
- Miyahara et al. (2008) Earth and Planetary Science Letters, Volume 272, Issue 1-2, p. 290-295.

参考文献

- Abreu et al. (2008) Geophysical Research Letters, Volume 35, Issue 20, CiteID L20109
- Solanki et al.(2004) Nature, Volume 431, Issue 7012, pp. 1084-1087 (2004)
- Steinhilber et al. (2008) Astrophysics and Space Sciences Transactions, Volume 4, Issue 1, 2008, pp.1-6
- Vonmoos et al. (2006) Journal of Geophysical Research, Volume 111, Issue A10, CiteID A10105
- Muscheler et al.(2007) Quaternary Science Reviews, Volume 26, Issue 1-2, p. 82-97.