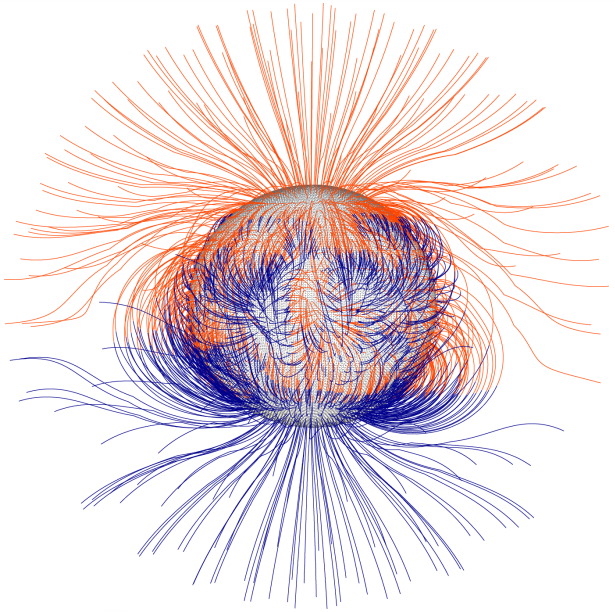
Amenomori et al.,
Physical Review Letters, 111, 011101 (2013)



チベットでの太陽の影のモジュレーション

川田 和正 (東大宇宙線研)
For the Tibet ASγ Collaboration

Fermi-LATの太陽ガンマ線の観測

ディスク成分
→ 宇宙線による太陽大気ガンマ線

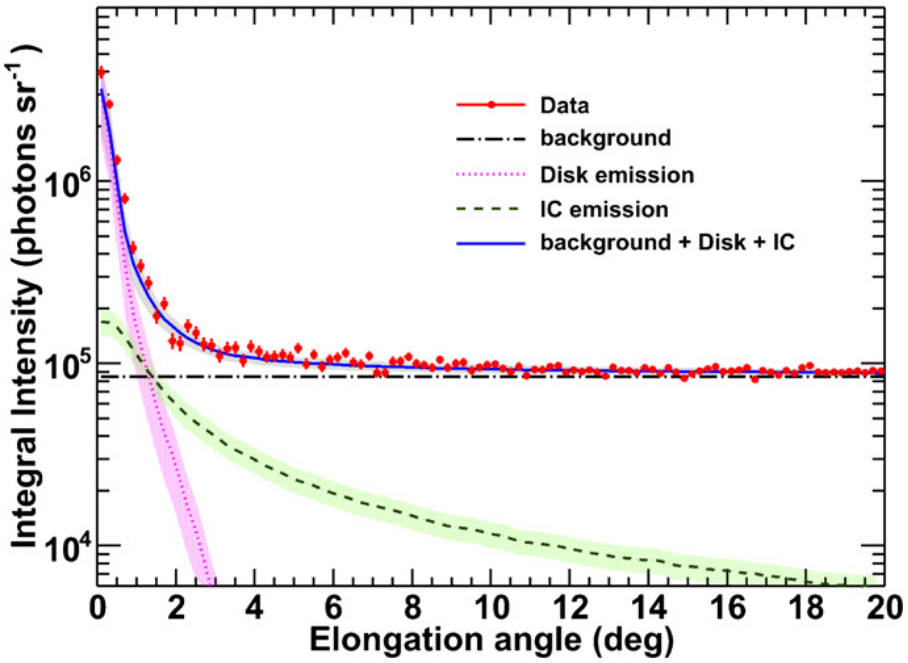


Figure 5. Integral intensity profiles above 500 MeV for elongation angles $\leqslant 5^\circ$ (top) and $\leqslant 20^\circ$ (bottom). Points (red) are the observed counts, dash-dotted horizontal (black) line is the background, dotted (magenta) and dashed (green) lines are the point-like and extended components of the emission, correspondingly. The solid (blue) line is the sum of the background and the two components of the emission. The shaded areas around the lines show total error estimates. See the text for details.

ディスク成分とモデル比較
→ ２桁以上の不定性

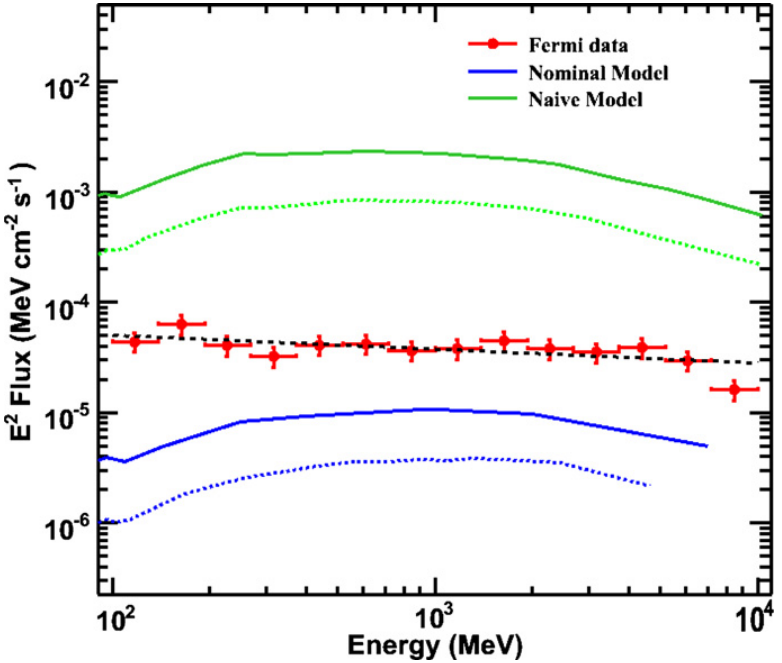
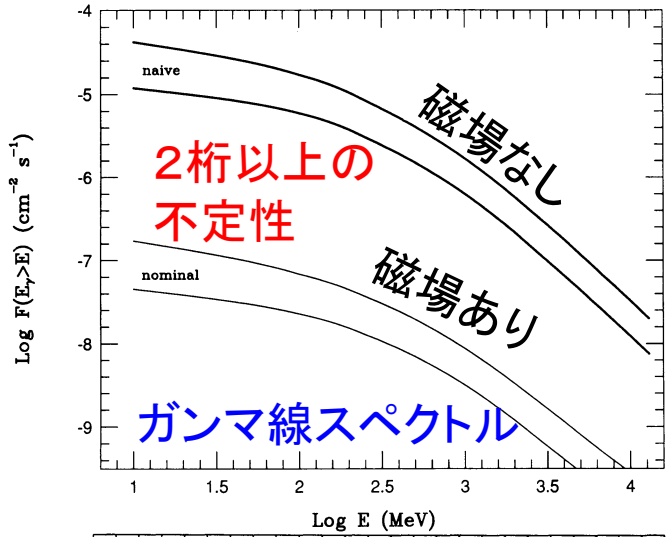


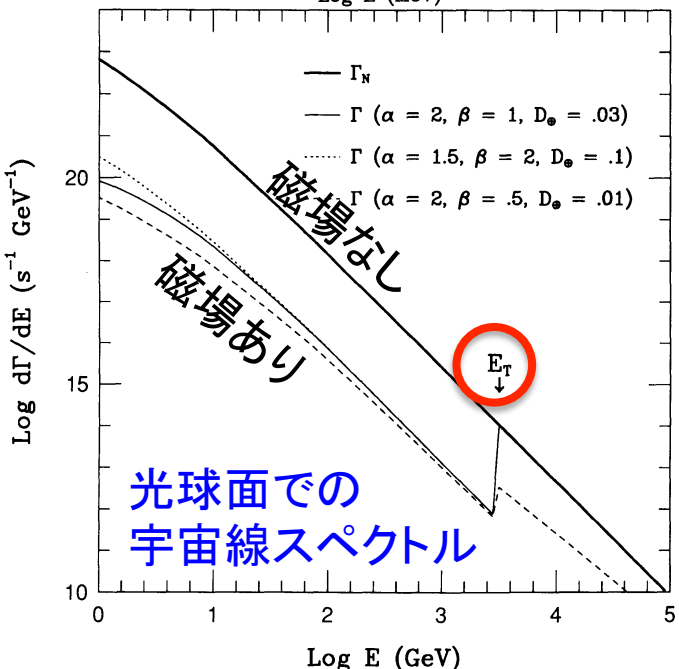
Figure 9. Energy spectrum for the disk emission as observed by the *Fermi*-LAT. The curves show the range for the "nominal" (lower set, blue) and "naive" (upper set, green) model predictions by Seckel et al. (1991) for different assumptions about CR cascade development in the solar atmosphere (see the text for details). The black dashed line is the power-law fit to the data with index 2.11 ± 0.73.

(A color version of this figure is available in the online journal.)

太陽大気ガンマ線(ニュートリノ)の理論計算

Seckel, Stanev & Gaisser, ApJ (1991)





- ✓ 太陽大気を仮定
- ✓ 惑星空間磁場(パーカー)を仮定
- ✓ 光球面付近のシンプルな磁場構造を仮定

↓

宇宙線の太陽磁場中での拡散を計算し、
光球面上での宇宙線スペクトルを算出

↓

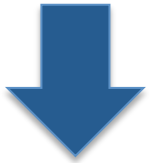
太陽大気中での粒子カスケードを計算し、
二次ガンマ線、ニュートリノのスペクトルを算出

The field strengths in the corona are not well known: "*Since it is so difficult to measure coronal magnetic fields, solar astronomers have resorted to calculating them,*" (Zirker 1981). We will assume that the field strengths in the upper corona diminish to ~1 G, eventually matching onto the IMF.

太陽コロナ磁場の構造は無し

Motivation

- 太陽コロナ磁場は宇宙線モジュレーションにおいて重要な役割(10TeV宇宙線も影響を受ける)
- 太陽コロナ磁場による宇宙線の Rigidity cutoff
- 太陽活動周期でコロナ磁場は変化



Fermi観測による太陽ガンマ線が宇宙線起源であれば、
太陽大気ガンマ線フラックスは太陽活動周期に相関

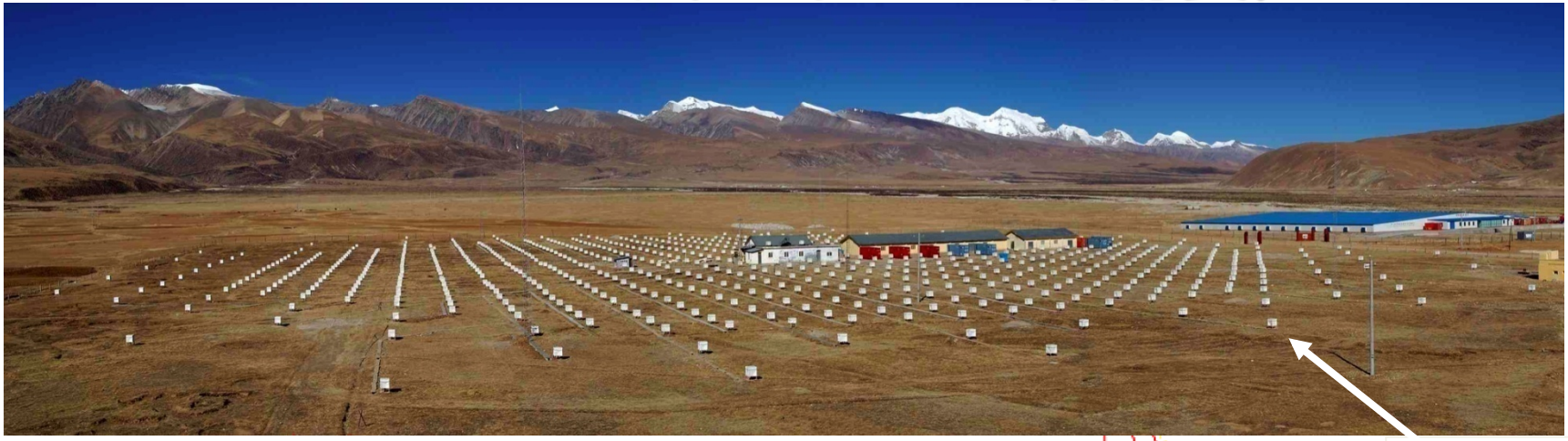
ダークマター探索のバックグラウンドである太陽大気
ニュートリノのフラックスも太陽活動周期に相関

The Tibet ASγ Collaboration

M.Amenomori(1), X.J.Bi(2), D.Chen(3), S.W.Cui(4), Danzengluobu(5), L.K.Ding(2), X.H.Ding(5), C.Fan(6), C.F.Feng(6), Zhaoyang Feng(2), Z.Y.Feng(7), X.Y.Gao(8), Q.X.Geng(8), Q.B.Gou(2), H.W.Guo(5), H.H.He(2), M.He(6), K.Hibino(9), N.Hotta(10), Haibing Hu(5), H.B.Hu(2), J.Huang(2), Q.Huang(7), H.Y.Jia(7), L.Jiang(8, 2), F.Kajino(11), K.Kasahara(12), Y.Katayose(13), C.Kato(14), K.Kawata(3), Labaciren(5), G.M.Le(15), A.F.Li(6), H.C.Li(4, 2), J.Y.Li(6), C.Liu(2), Y.-Q.Lou(16), H.Lu(2), X.R.Meng(5), K.Mizutani(12, 17), J.Mu(8), K.Munakata(14), A.Nagai(18), H.Nanjo(1), M.Nishizawa(19), M.Ohnishi(3), I.Ohta(20), S.Ozawa(12), T.Saito(21), T .Y.Saito(22), M.Sakata(11), T.K.Sako(3), M.Shibata(13), A.Shiomi(23), T.Shirai(9), H.Sugimoto(24), M.Takita(3), Y.H.Tan(2), N.Tateyama(9), S.Torii(12), H.Tsuchiya(25), S.Udo(9), B.Wang(2), H.Wang(2), Y.Wang(2), Y.G.Wang(6), H.R.Wu(2),L.Xue(6), Y.Yamamoto(11), C.T.Yan(26), X.C.Yang(8), S.Yasue(27), Z.H.Ye(28), G.C.Yu(7), A.F.Yuan(5), T.Yuda(9), H.M.Zhang(2), J.L.Zhang(2), N.J.Zhang(6), X.Y.Zhang(6), Y.Zhang(2), Yi Zhang(2), Ying Zhang(7, 2), Zhaxisangzhu(5) and X.X.Zhou(7)

(1)Department of Physics, Hirosaki University, Japan.
(2)Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, China.
(3)Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Japan.
(4)Department of Physics, Hebei Normal University, China.
(5)Department of Mathematics and Physics, Tibet University, China.
(6)Department of Physics, Shandong University, China.
(7)Institute of Modern Physics, SouthWest Jiaotong University, China.
(8)Department of Physics, Yunnan University, China.
(9)Faculty of Engineering, Kanagawa University, Japan.
(10)Faculty of Education, Utsunomiya University, Japan.
(11)Department of Physics, Konan University, Japan.
(12)Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Japan.
(13)Faculty of Engineering, Yokohama National University, Japan.
(14)Department of Physics, Shinshu University, Japan.
(15)National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, China.
(16)Physics Department and Tsinghua Center for Astrophysics, Tsinghua University, China.
(17)Saitama University, Japan.
(18)Advanced Media Network Center, Utsunomiya University, Japan.
(19)National Institute of Informatics, Japan.
(20)Sakushin Gakuin University, Japan.
(21)Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, Japan.
(22)Max-Planck-Institut fur Physik, Deutschland.
(23)College of Industrial Technology, Nihon University, Japan.
(24)Shonan Institute of Technology, Japan.
(25)RIKEN, Japan.
(26)Institute of Disaster Prevention Science and Technology, China.
(27)School of General Education, Shinshu University, Japan.
(28)Center of Space Science and Application Research, Chinese Academy of Sciences, China.

チベット空気シャワー観測装置

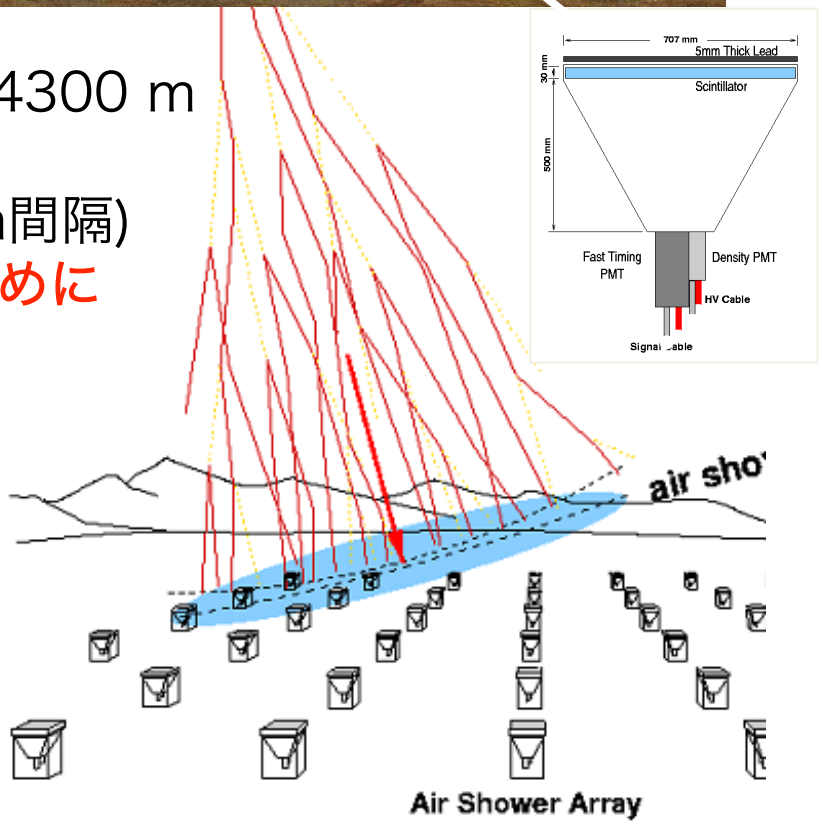


- チベット (90.522°E, 30.102°N) 標高4300 m

- シンチ検出器数　0.5 m^2 x 789 (7.5m間隔)

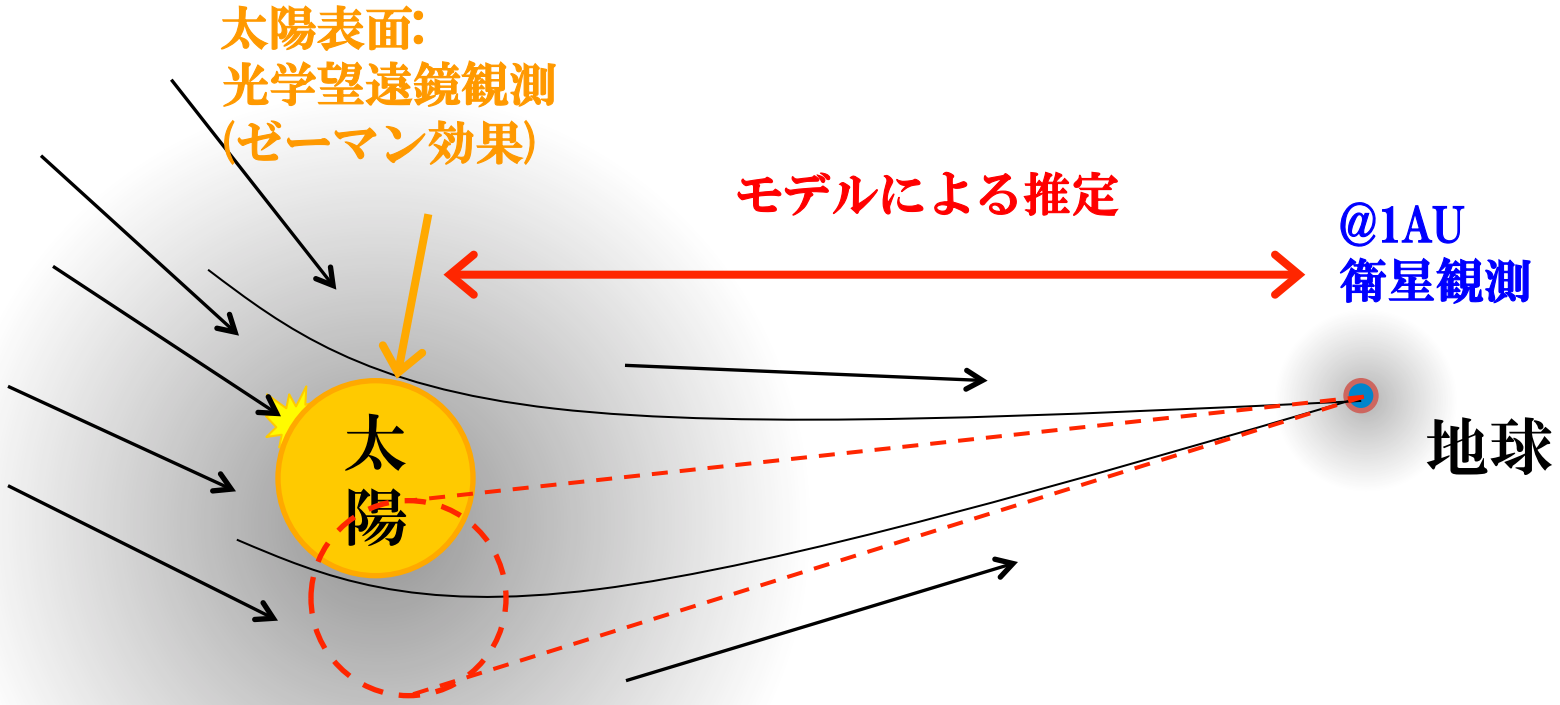
→1996年からのデータの一貫性を保つために
その当時の221台(15m間隔)
のみを用いて、全期間を解析

- 最頻エネルギー　～10TeV
- 角度分解能　～0.9°



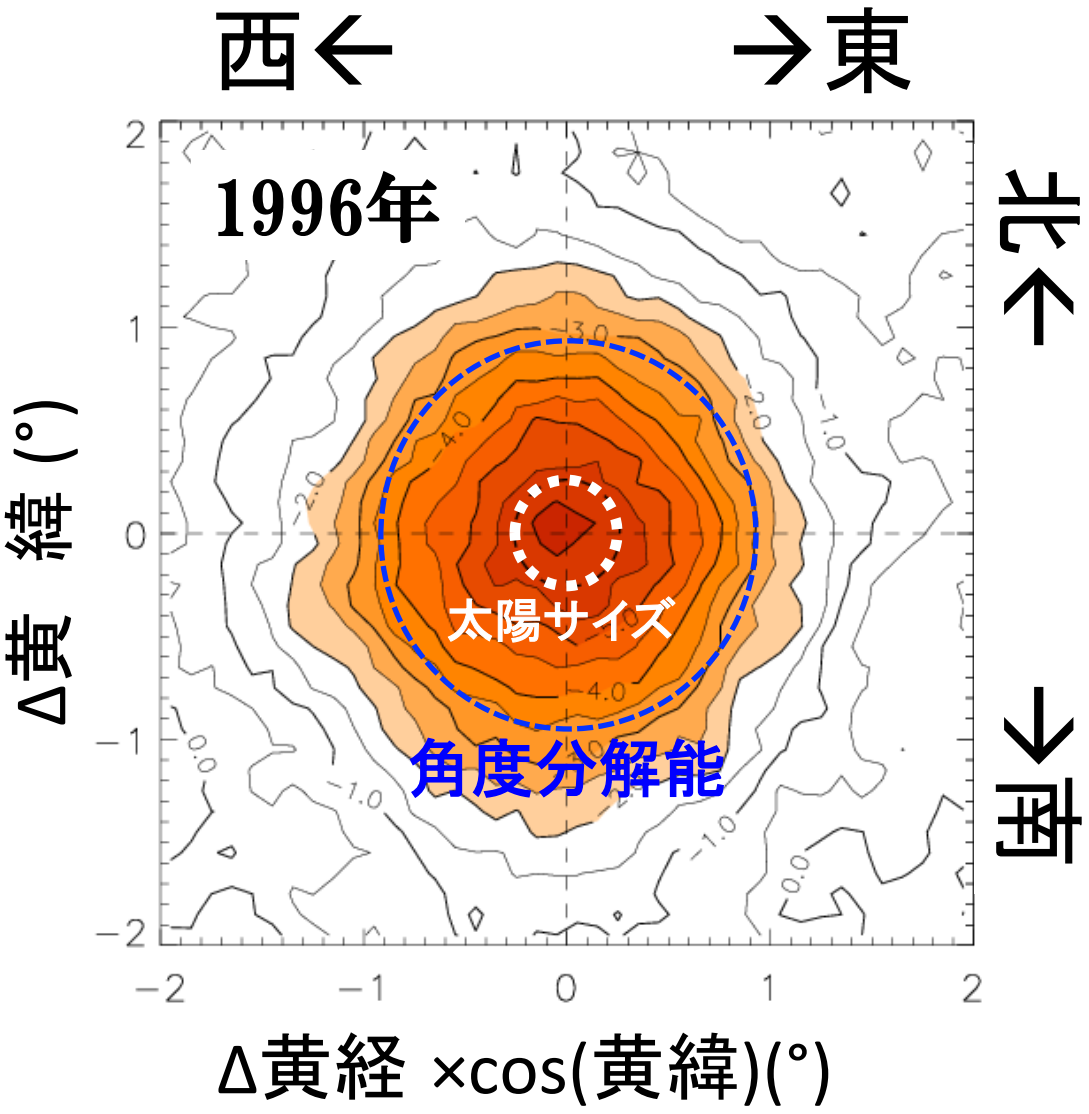
「太陽の影」

太陽による宇宙線の遮蔽



１０TeV宇宙線（陽子）
ラーモア半径
～74AU　(B=30μG 地球近辺)
～1.6R。(B=300mG 太陽近辺)
太陽圏磁場構造のプローブ！

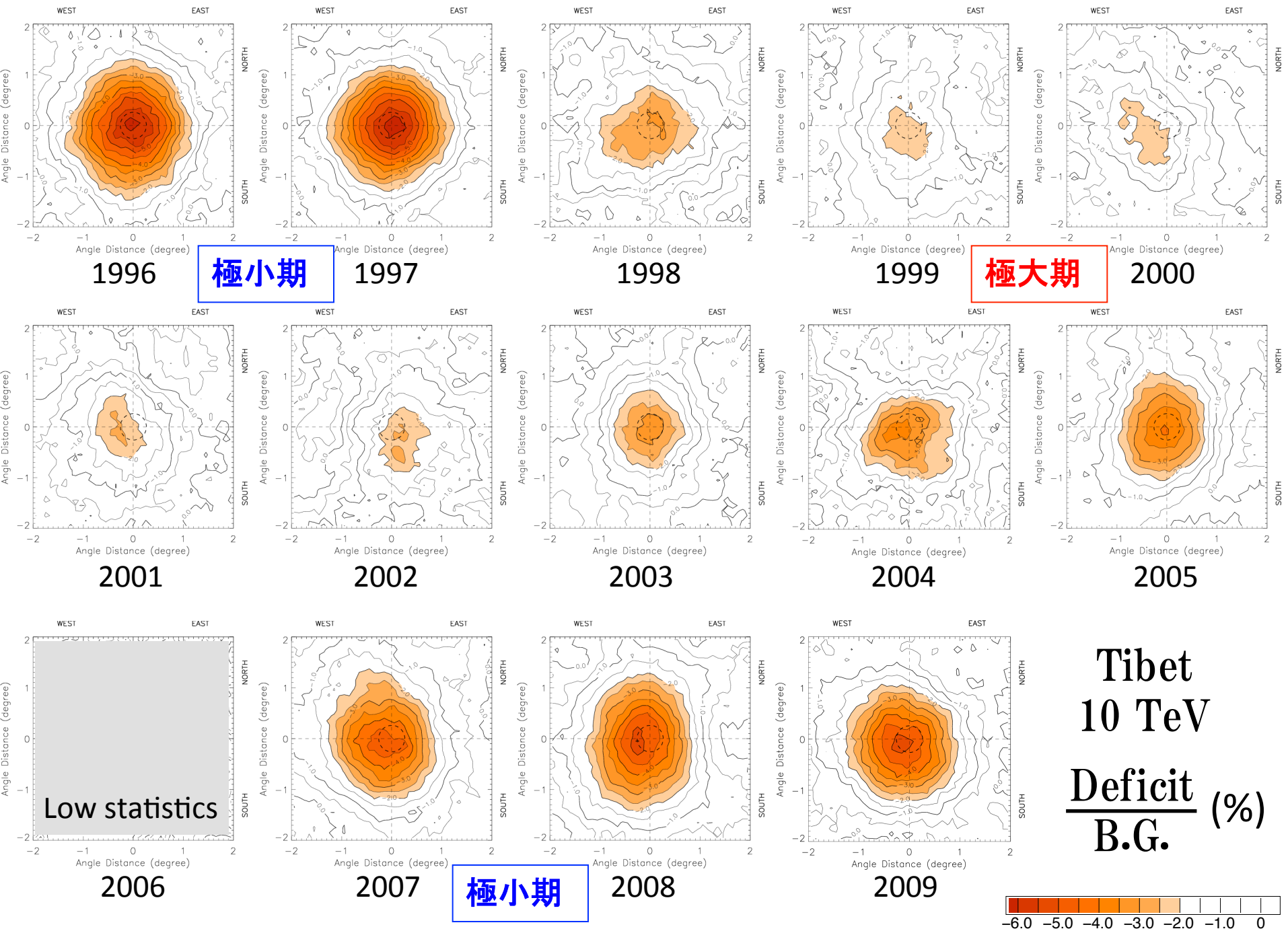
10TeV 太陽の影の観測



太陽の視位置を中心とした
4°×4°の宇宙線強度マップ
等高線: 宇宙線の遮蔽量

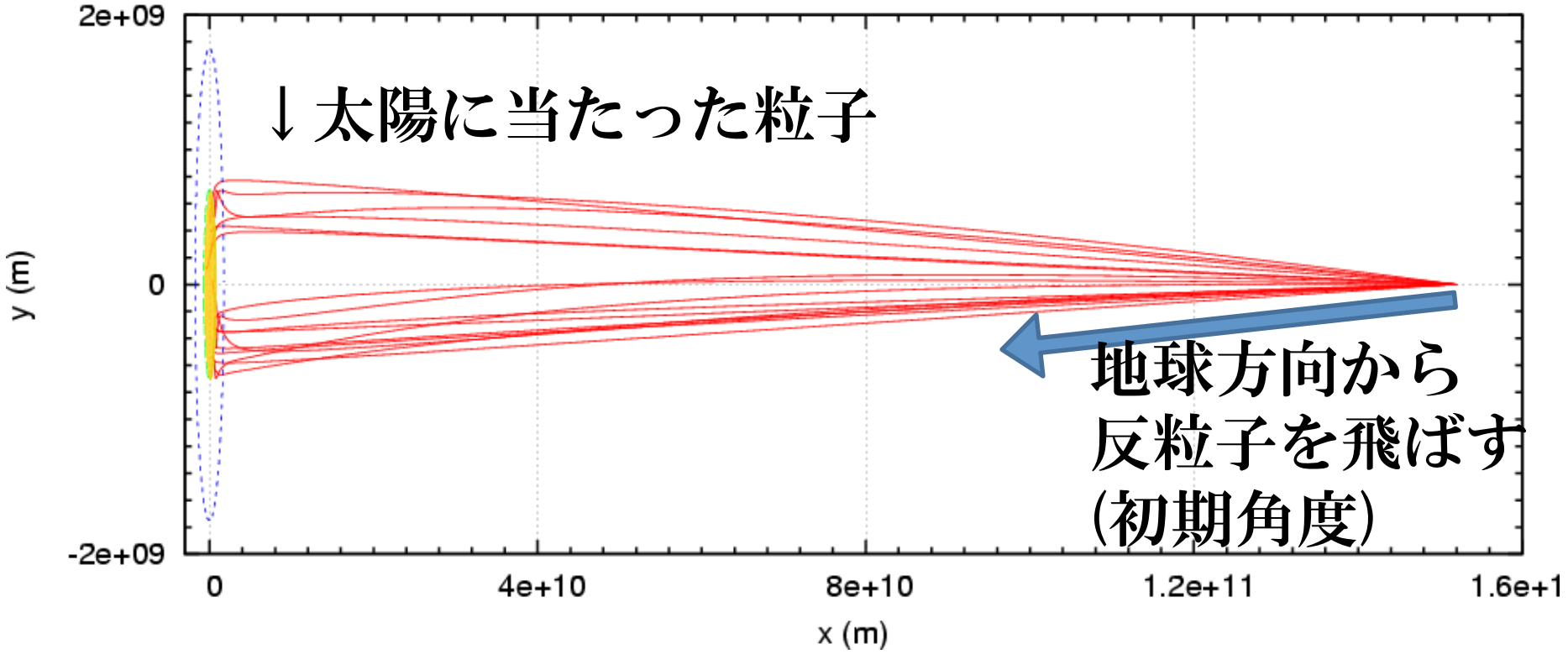
装置の角度分解能(～0.9°)
のために実際の太陽の
視半径(～0.26°)より広がる

宇宙線の平均頻度に
対して～6%の宇宙線遮蔽
が見られる。

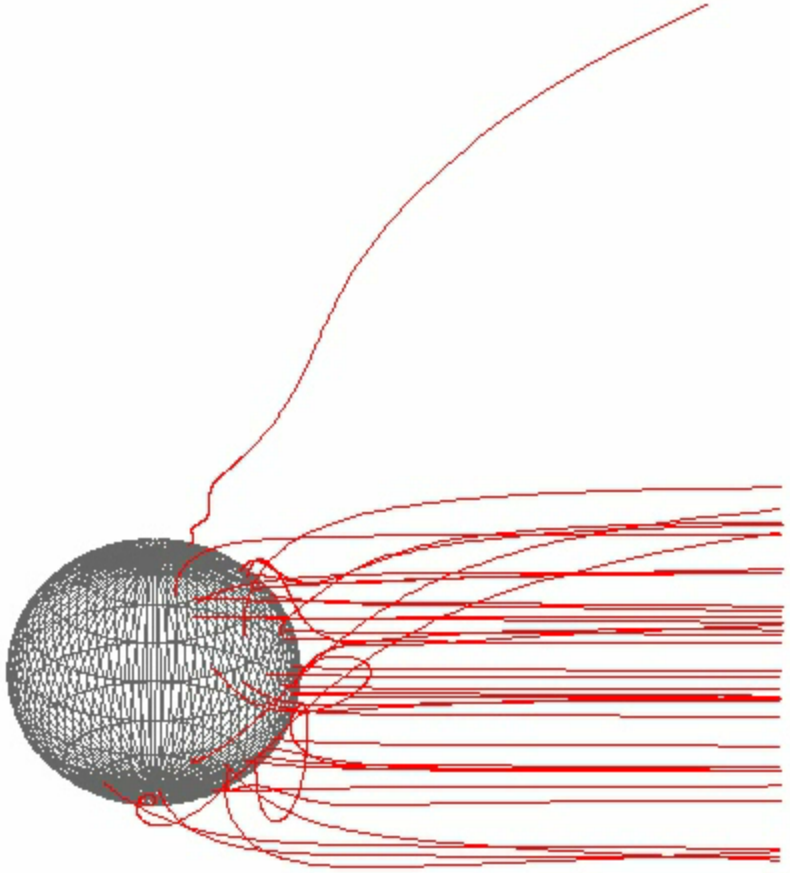

WEST
EAST
NORTH
SOUTH
Angle Distance (degree)
1996
極小期
1997
1998
1999
極大期
2000
2001
2002
2003
2004
2005
Low statistics
2006
2007
極小期
2008
2009
Tibet
10 TeV
Deficit / B.G. (%)
−6.0 −5.0 −4.0 −3.0 −2.0 −1.0 0

「太陽の影」のMCシミュレーション

太陽圏の磁場モデルを仮定し
宇宙線の軌道（地球から太陽へ）を計算
→ 太陽に当たった粒子が太陽の影を構成



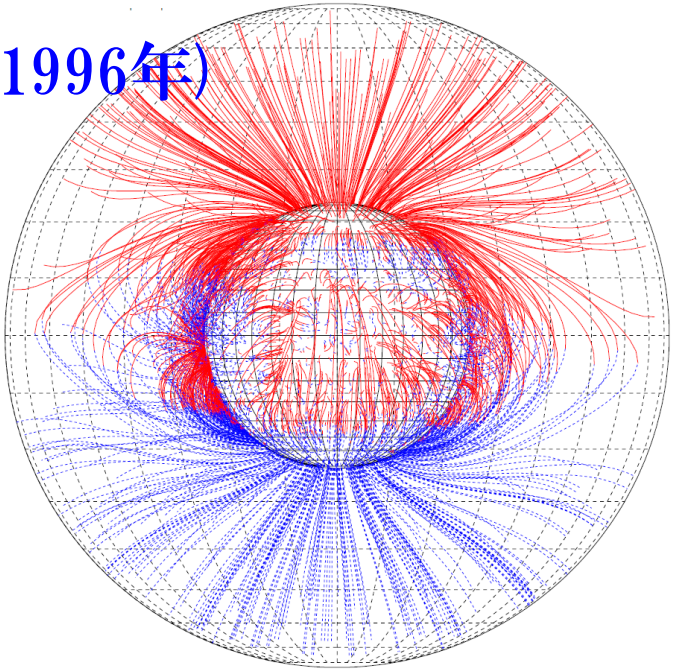
約10TeV宇宙線
太陽近傍での軌道



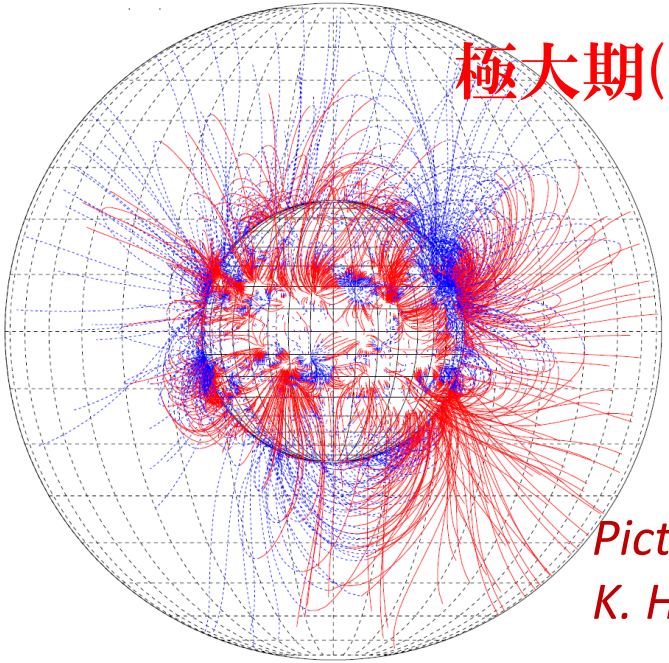
仮定する太陽圏の磁場

コロナ磁場 → Source Surface モデル (PFSS / CSSS)
Kitt Peak の太陽表面磁場の観測から推測する
太陽の１自転周期(～27日)ごとの平均モデル
惑星間磁場 → パーカー・スパイラルモデル
太陽風速度は名大IPS観測の緯度依存を考慮
地磁気 → 双極子磁場モデル

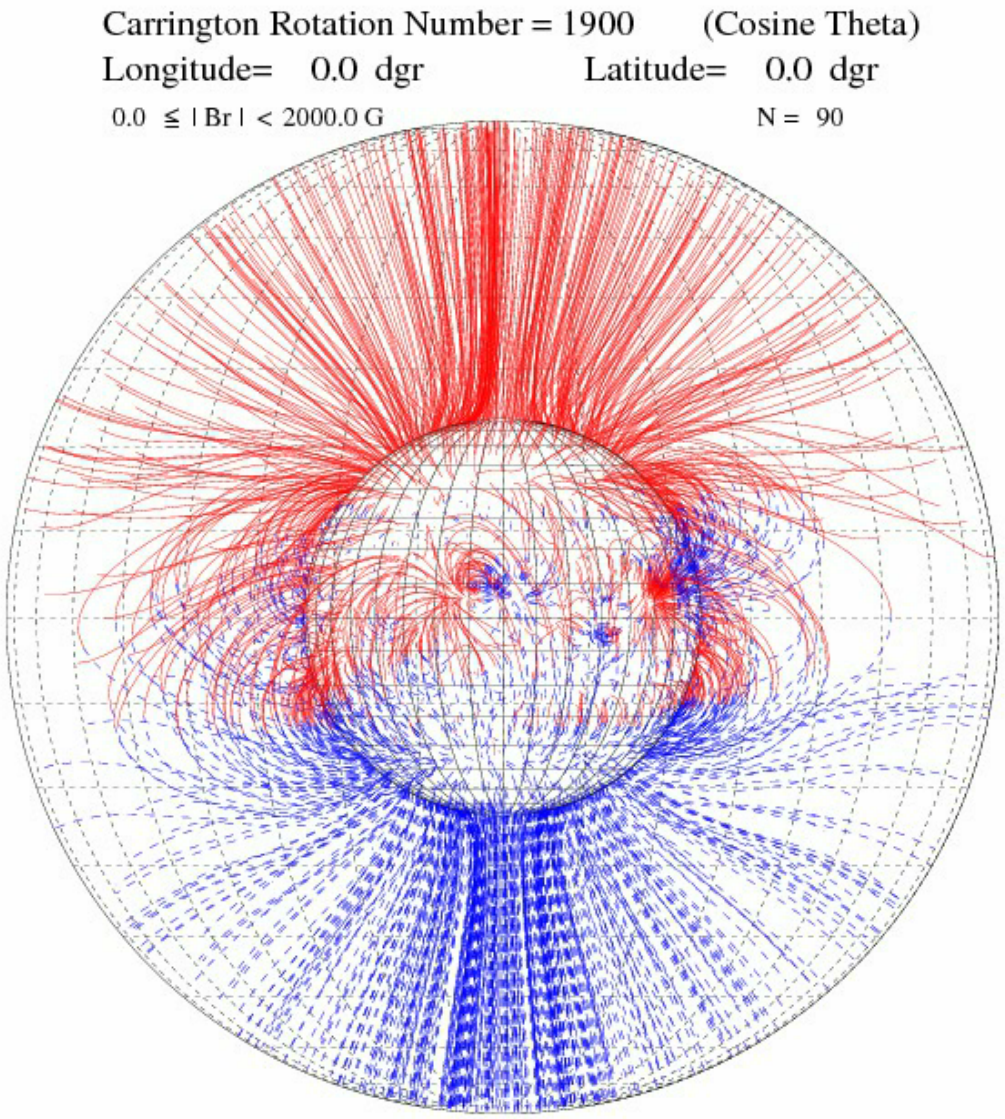
極小期(1996年)
PFSS



極大期(2000年)
PFSS



Pictures from
K. Hakamada



Year 1996-2010

1 frame = ~1 month

Red: Outward

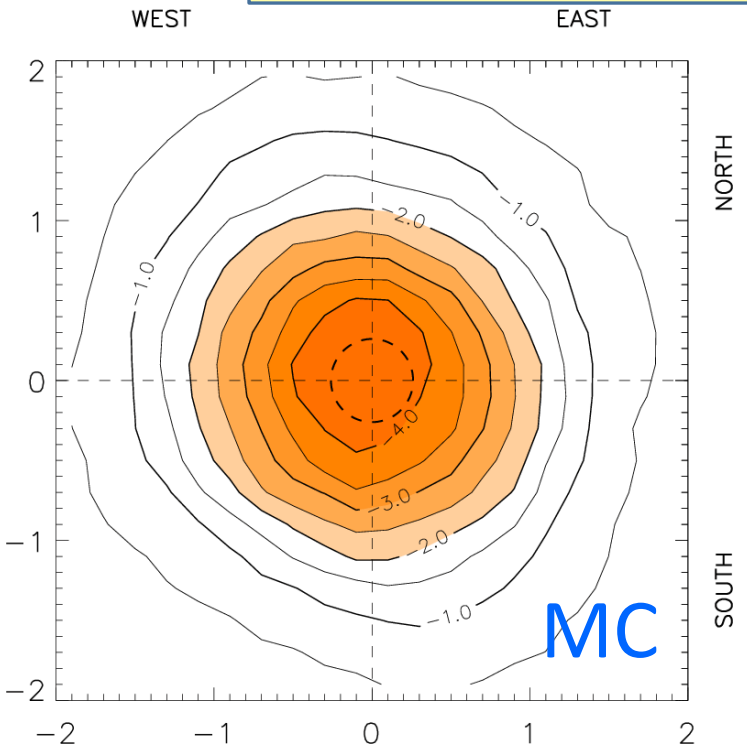
Blue: Inward

PFSS model

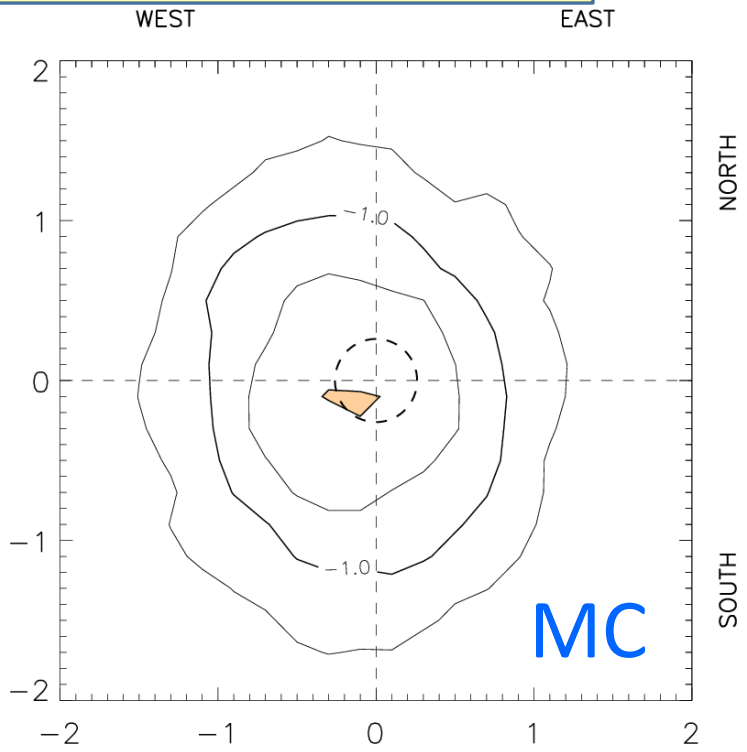
Pictures from K. Hakamada

MCシミュレーション結果(PFSSモデル)

宇宙線の組成、エネルギースペクトル
角度分解能などの検出器レスポンス
空気シャワー解析の過程　もすべて考慮

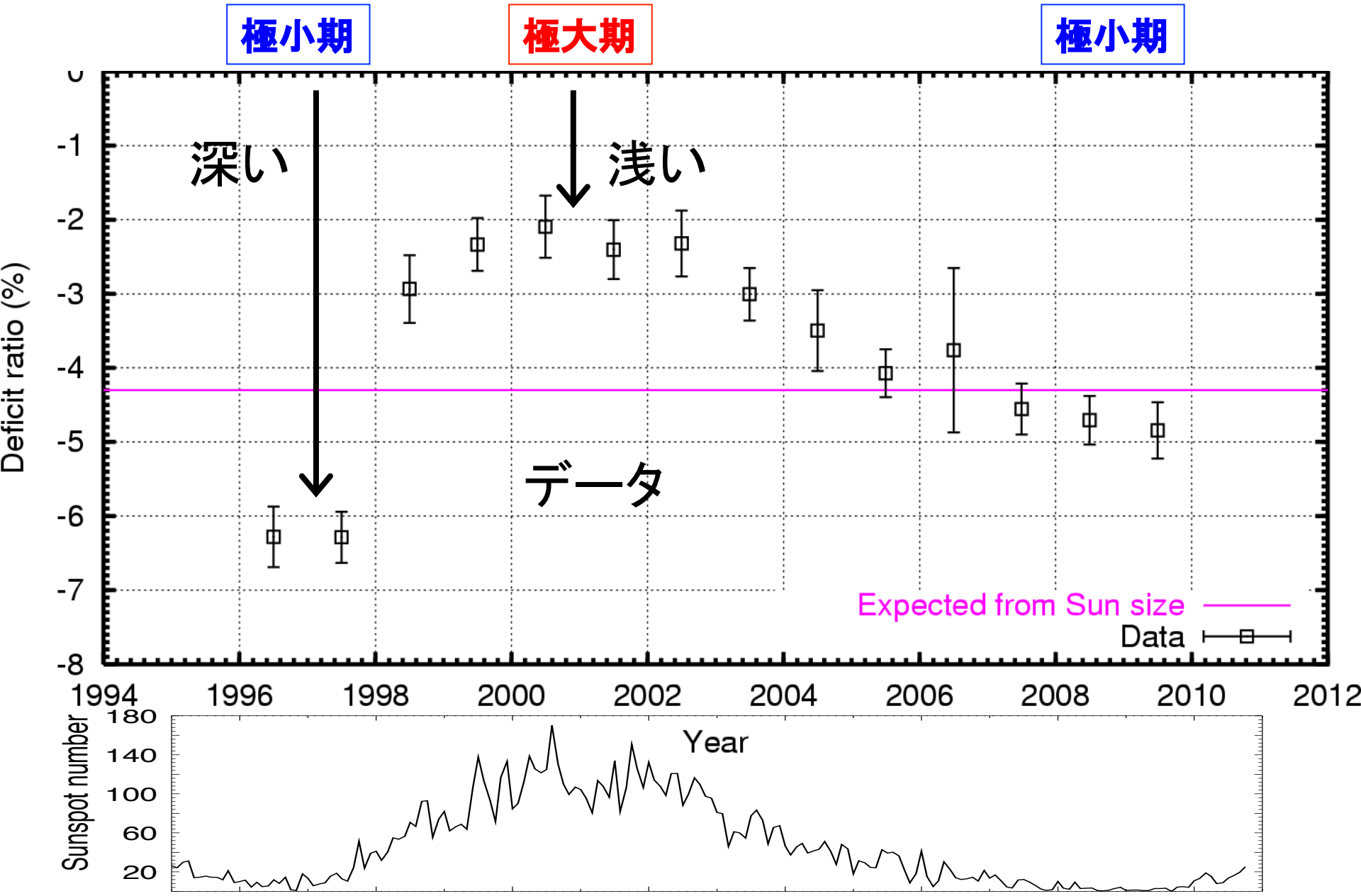


極小期
1996年(CR1910)

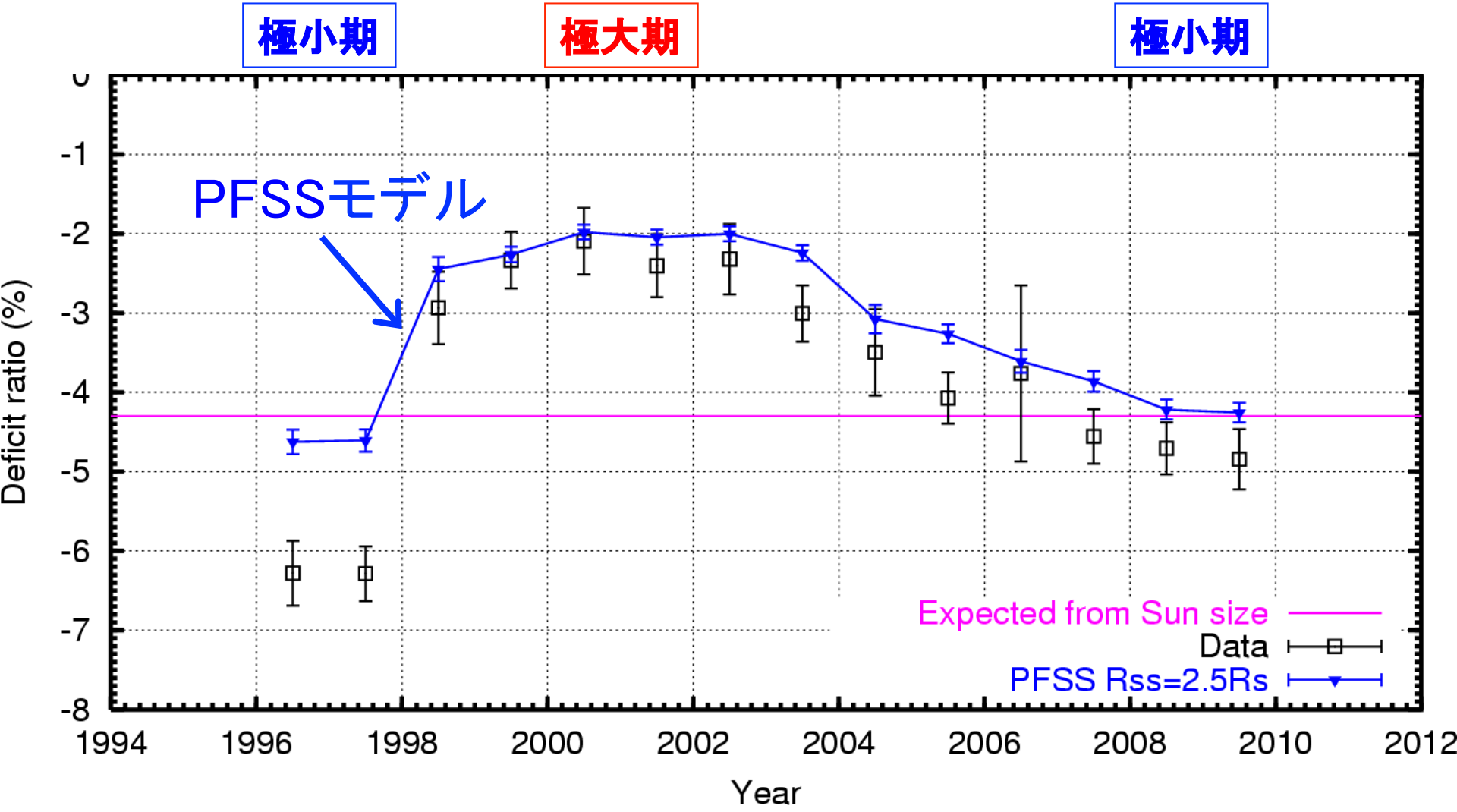


極大期
2001年(CR1978)

チベット実験データ (10TeV)



PFSSモデル 再現結果 (10TeV)



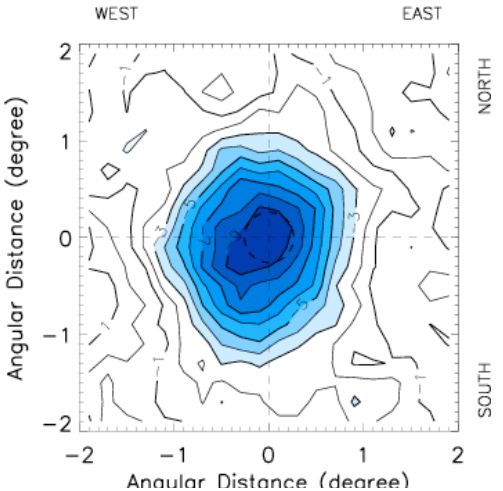
Data − MC $\chi^2/\mathrm{dof} = 55.2/14\ (7.9\times10^{-7})$

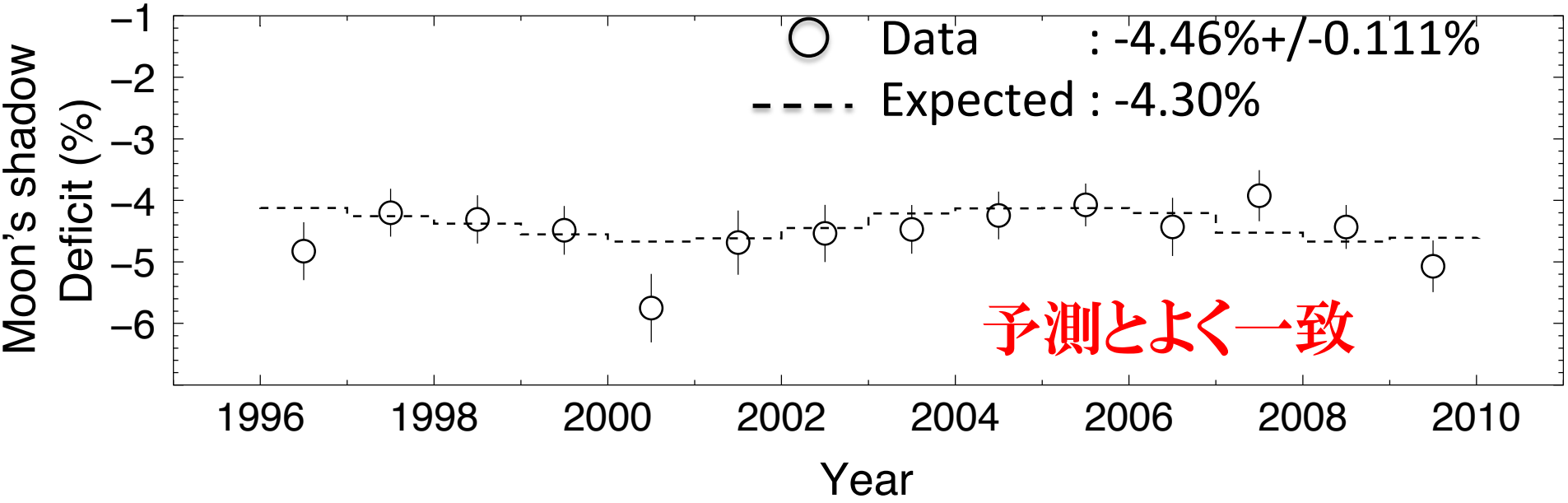
傾向は再現

月の影による系統誤差

- ✓ 月と太陽は視直径がほぼ同じ
- ✓ 月には磁場は無し、地磁気は安定

→良いキャリブレーションソース





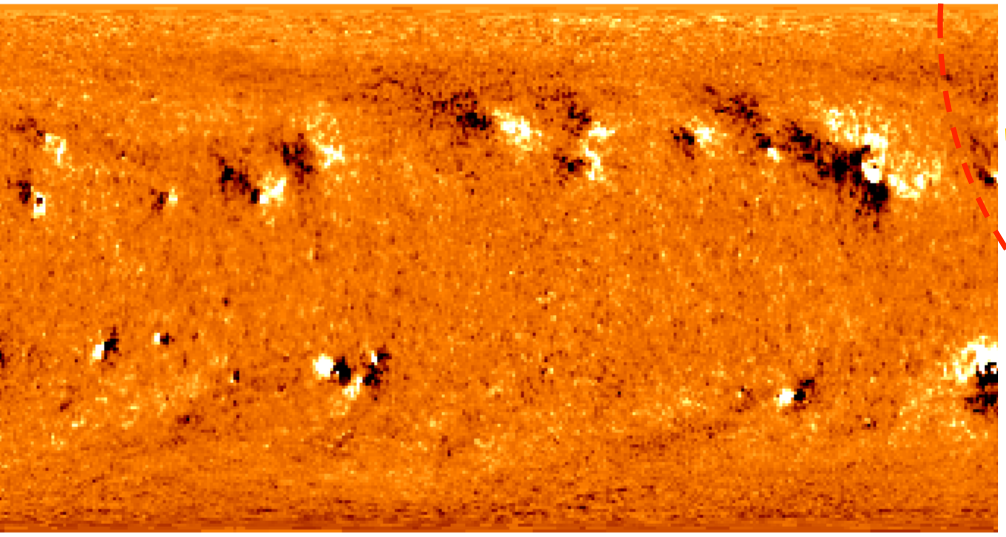
Quadratic sum:

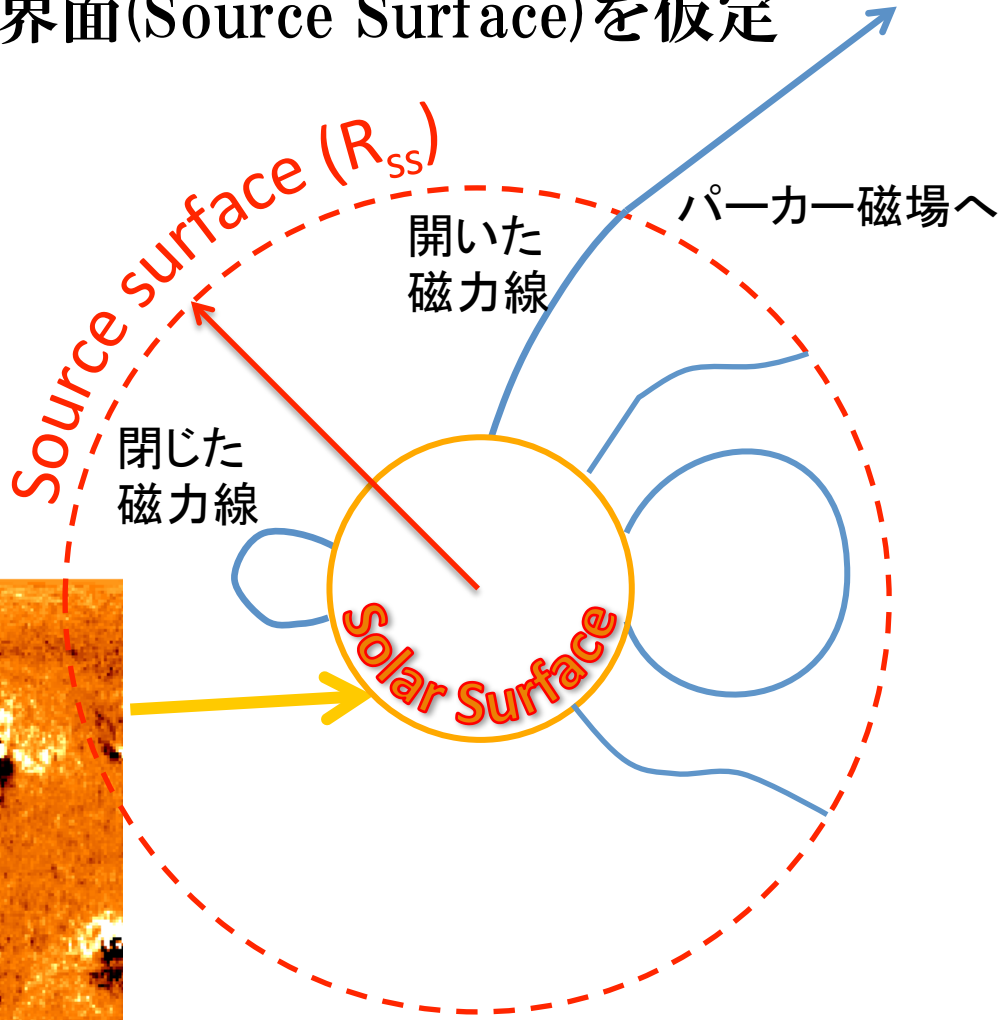
$$\sigma_{\mathrm{sys}} = \sqrt{(D_{\mathrm{data}} - D_{\mathrm{expected}})^2 + \sigma_{\mathrm{data}}^2} = \sqrt{(4.46 - 4.30)^2 + (0.111)^2} = 0.19\%$$

Source Surface コロナ磁場モデル

太陽表面磁場からコロナ磁場を推測
磁力線が動径方向を向く境界面(Source Surface)を仮定
通常はR_{ss}=～2.5$R_{\odot}$

マグネトグラム　太陽表面
ゼーマン効果
The Kitt Peak Vacuum Telescope
(FeI 868.8, 630.1 and 630.2nm)





2つのSource Surface コロナ磁場モデル

1. PFSS (Potential Field Source Surface)

コロナ中の電流は磁場構造に影響しない

$\nabla \times \mathbf{B} = 0 \rightarrow \mathbf{B} = -\nabla \Psi$

Force-free $\quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

ラプラス方程式

$\nabla^2 \Psi = 0$

Hakamada, Solar Physics (1995)

2. CSSS (Current Sheet Source Surface)

コロナ中の水平方向の電流を考慮する

$$\frac{1}{4\pi}(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} - \nabla \mathbf{p} - \rho \frac{GM}{r^2}\hat{\mathbf{r}} = 0$$

磁気静水圧平衡

$$\mathbf{J} = \frac{1}{\mu_0 r}[1-\eta(r)]\left[\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial^2\Psi}{\partial\phi\partial r}\hat{\theta} - \frac{\partial^2\Psi}{\partial\phi\partial r}\hat{\phi}\right]$$

$$\mathbf{B} = -\eta(r)\frac{\partial\Psi}{\partial r}\hat{r} - \frac{1}{r}\frac{\partial\Psi}{\partial\theta}\hat{\theta} - \frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial\Psi}{\partial\phi}\hat{\phi}$$

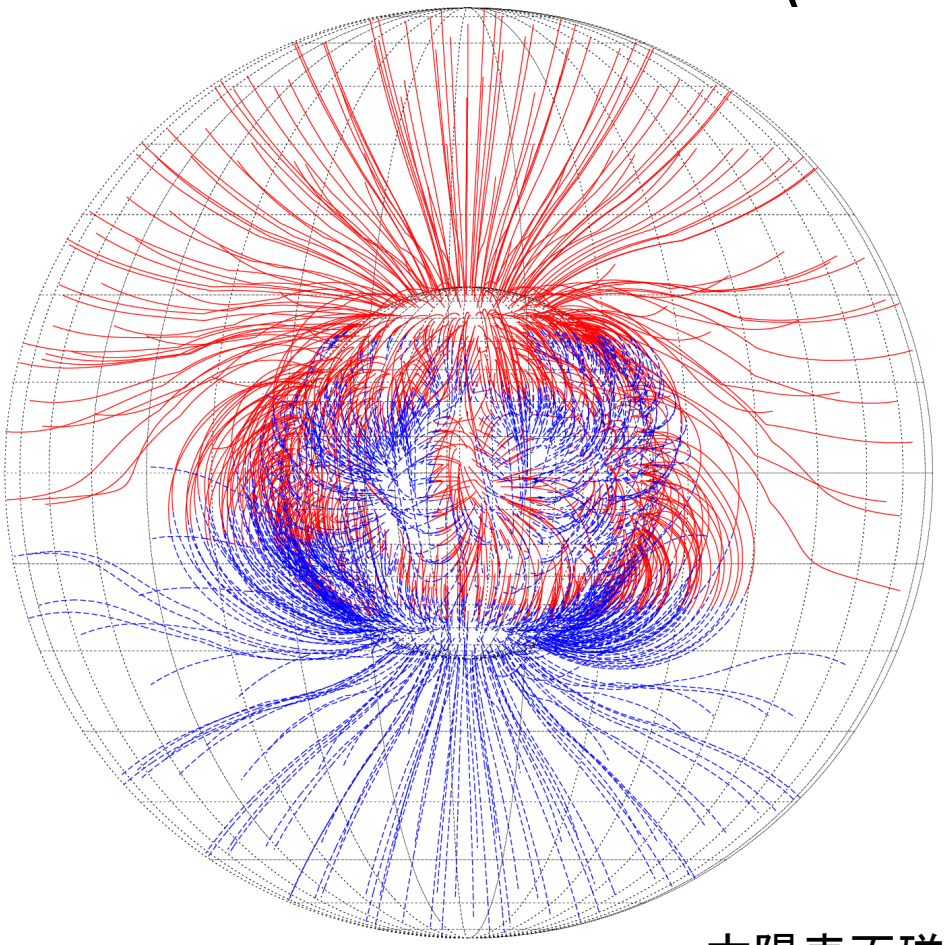
Zhao & Hoeksema, JGR (1995)

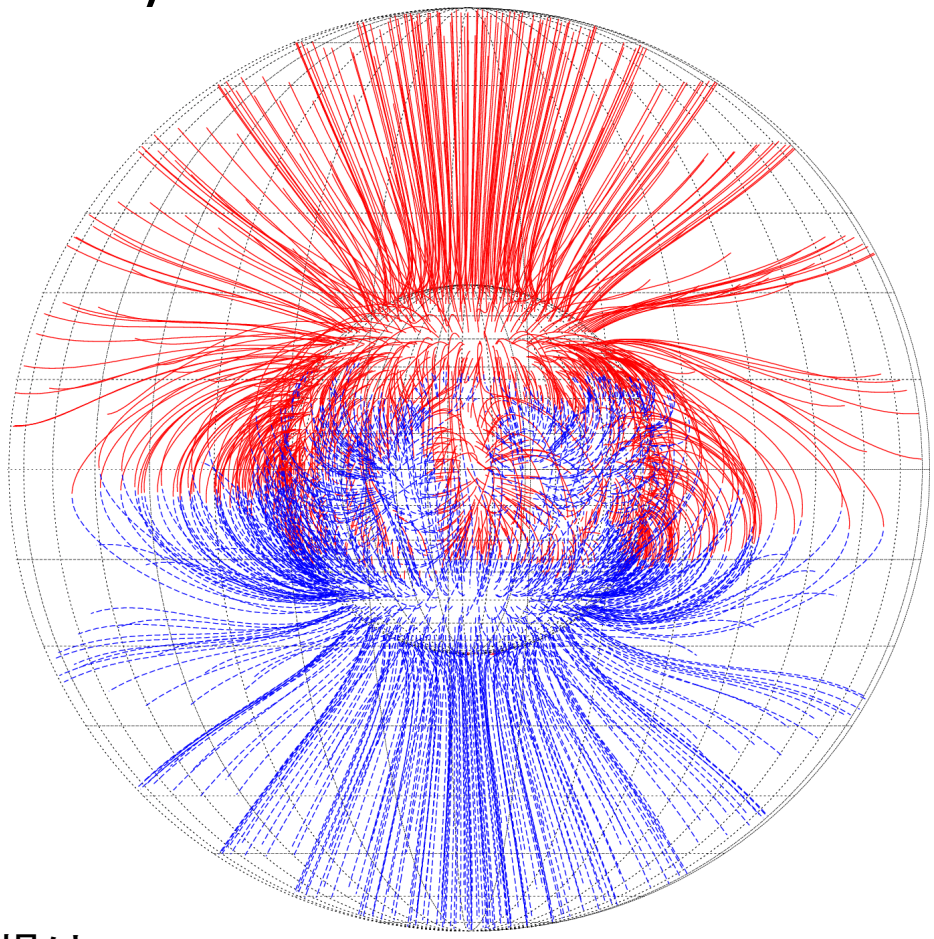
コロナ磁場モデルの比較

CSSS

CR1910
(Year1996)

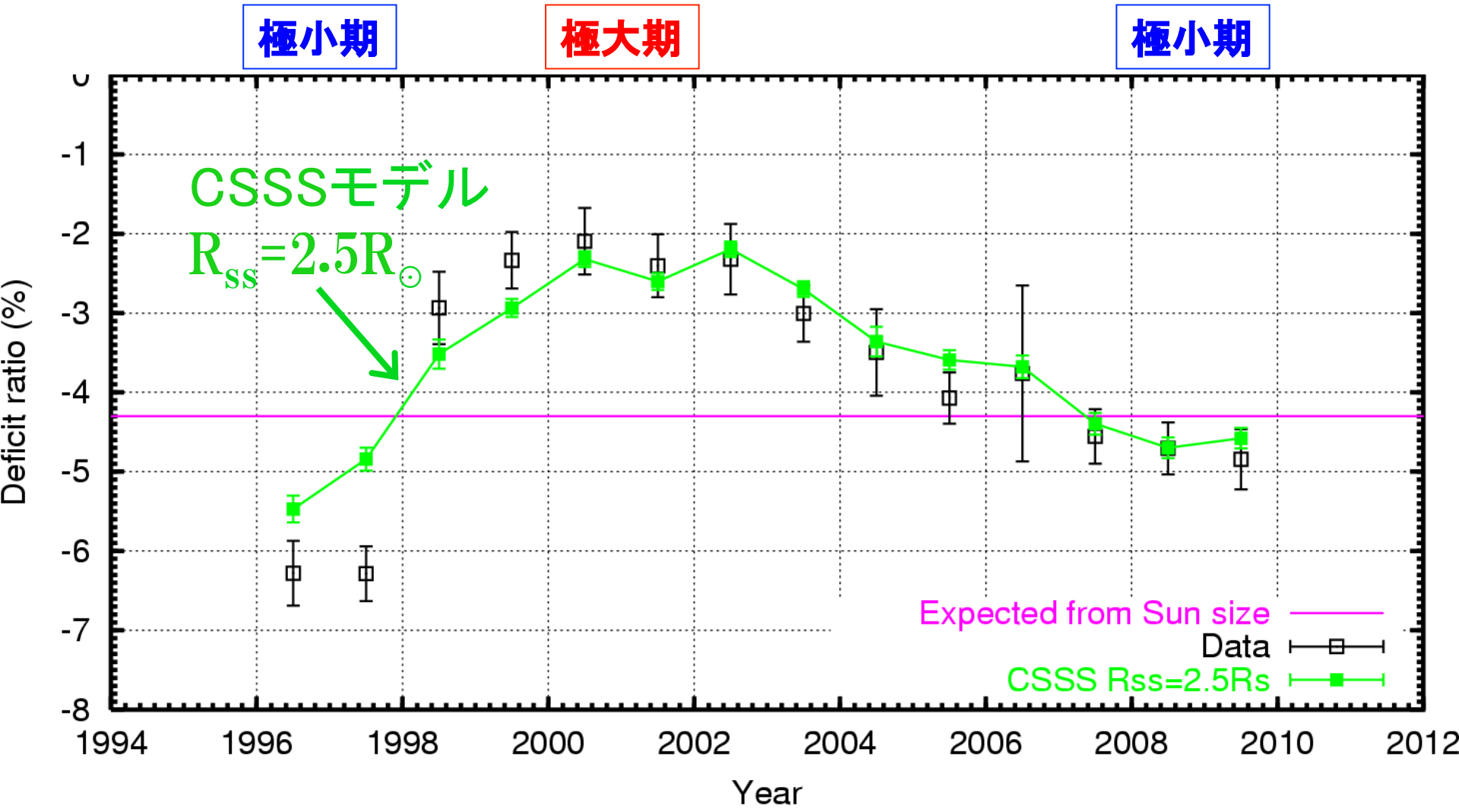
PFSS





太陽表面磁場はKitt Peak
球面調和関数の次数　N=10

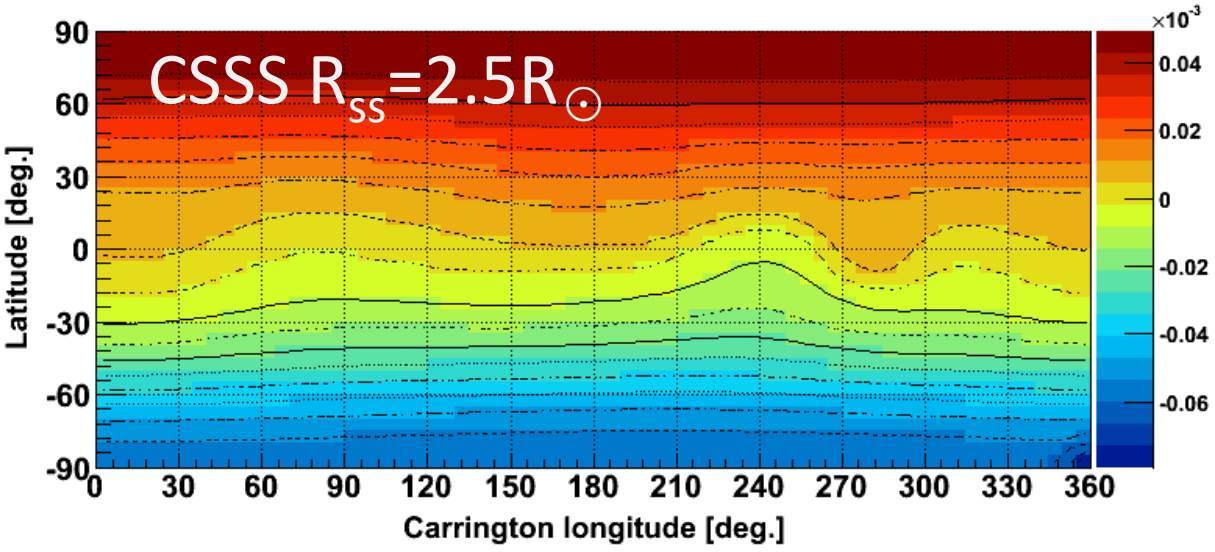
CSSSモデル 再現結果 (10TeV)

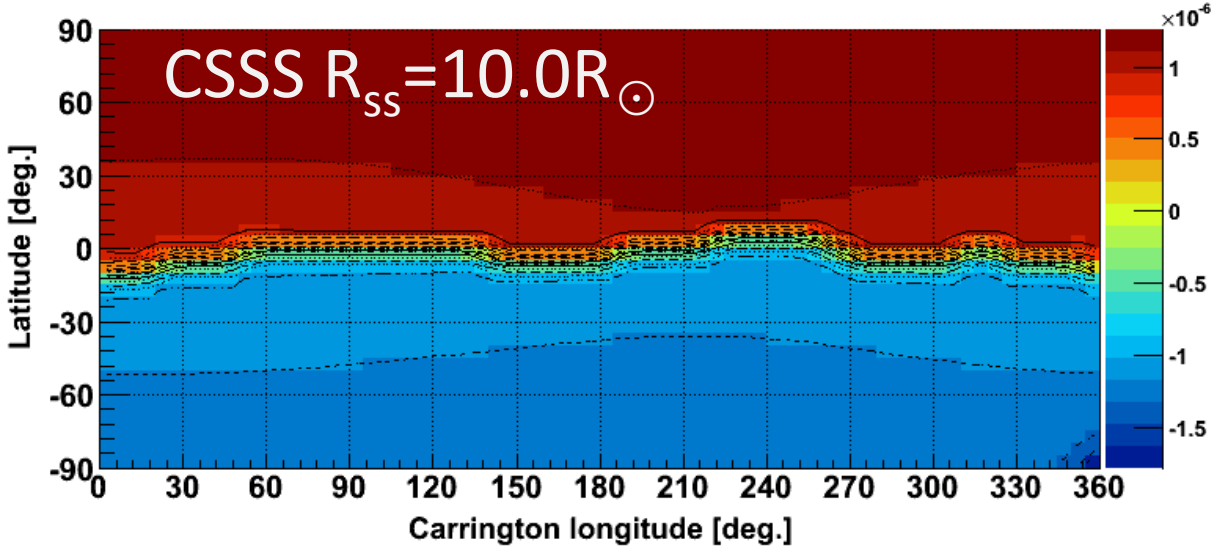


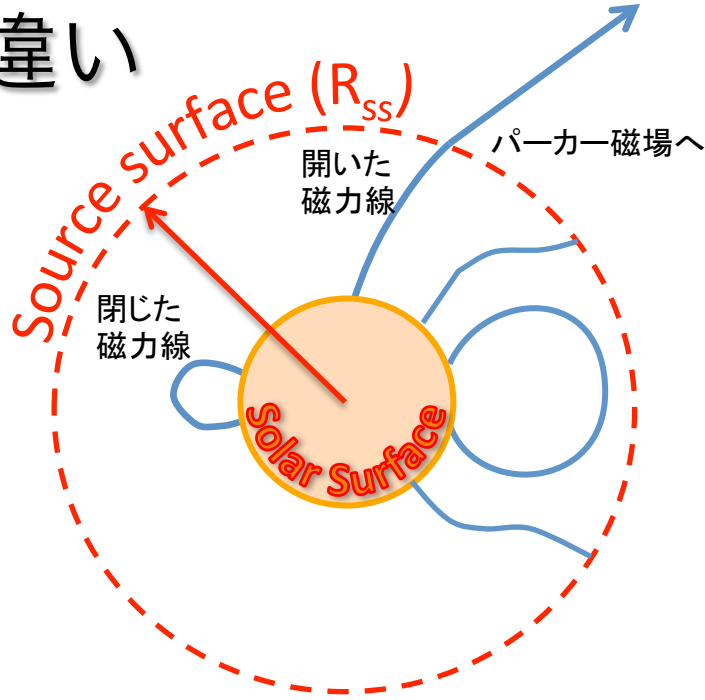
Data − MC χ^2/dof = 26.2/14 (0.024)

統計誤差の範囲で一致

CSSS ソース面の距離R_{ss}の違い







R_{ss} : ソース面までの距離

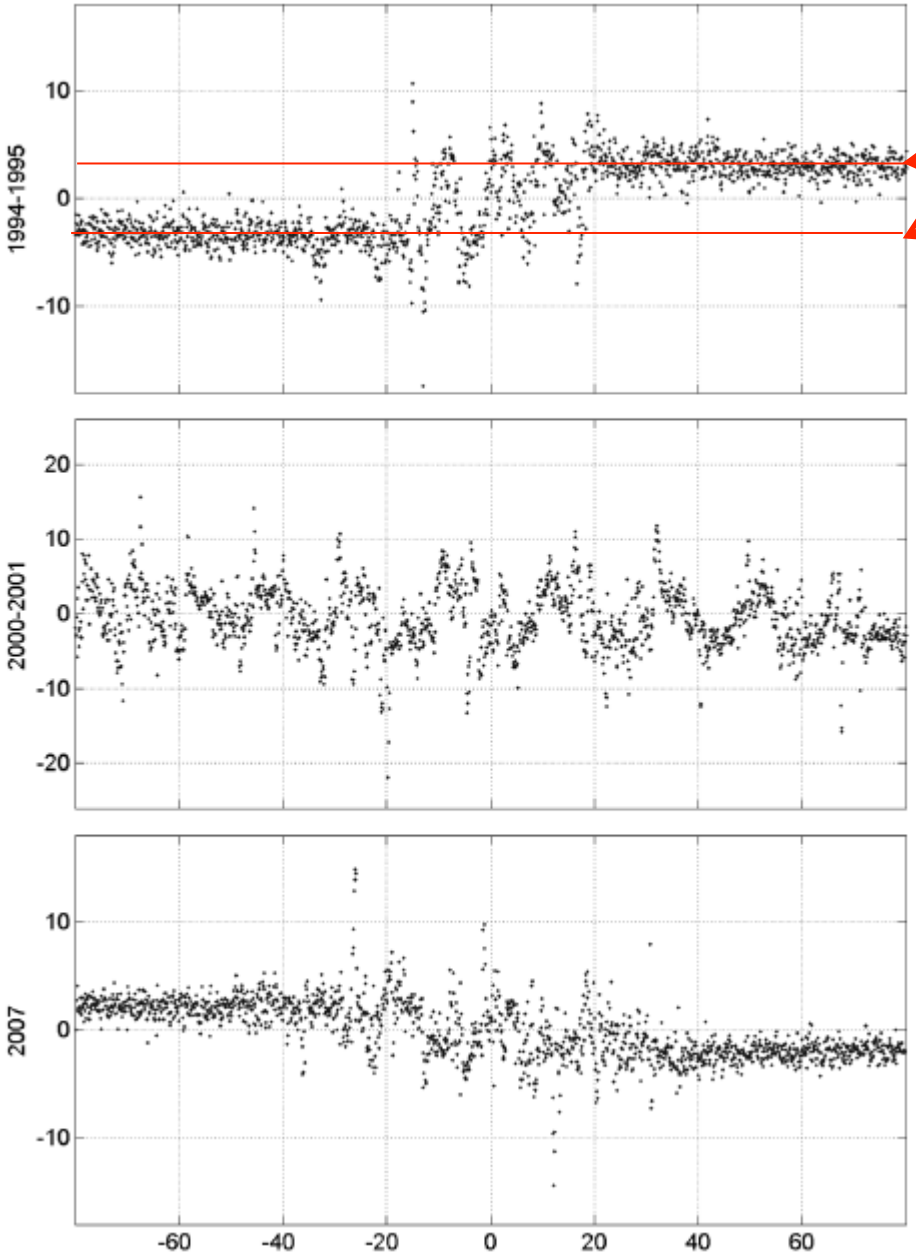
ソース面に対して磁場が垂直と仮定

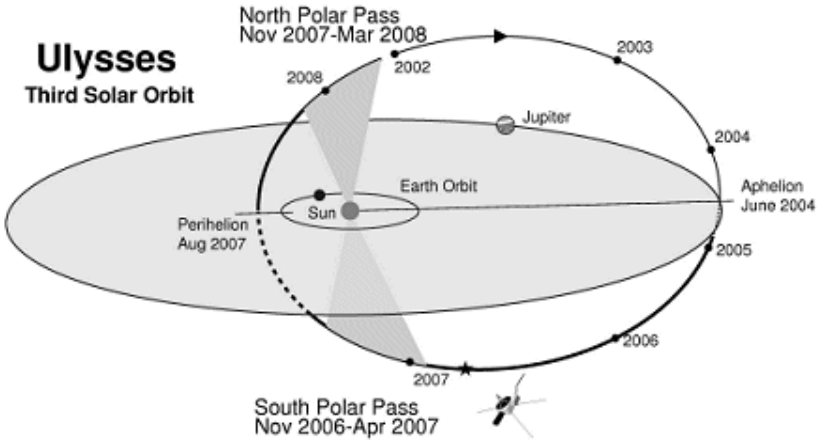
→ 太陽圏に伸びる開いた磁場（太陽風）を再現

→ アルフベン波が超音速に達し磁力線が伸びきる

Ulysses観測

"Split monopole" Structure





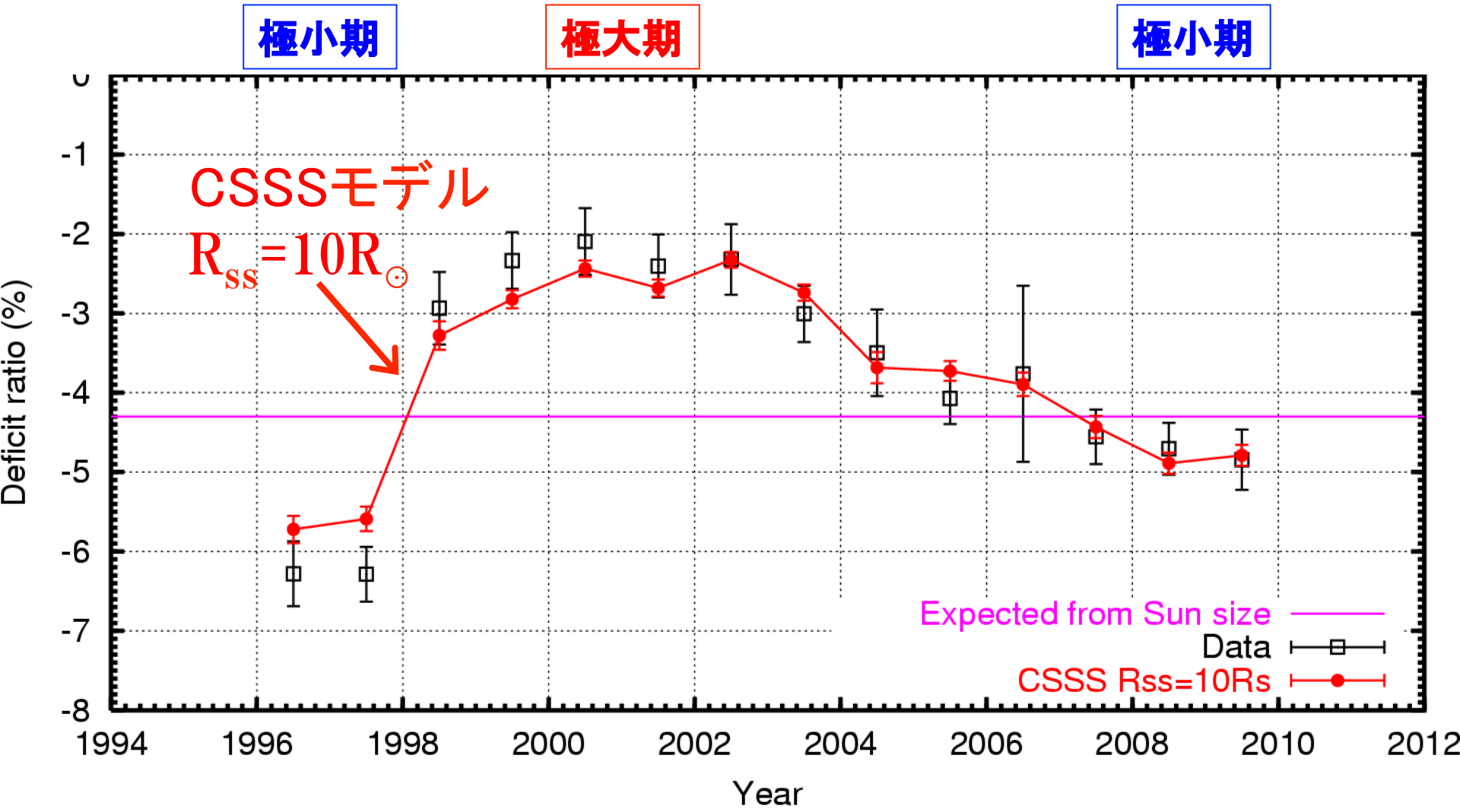
Ulysses data

Perihelion 1.3AU

Aphelion 5.4AU

Virtanen and Mursula, JGR, 115, A09110 (2010)

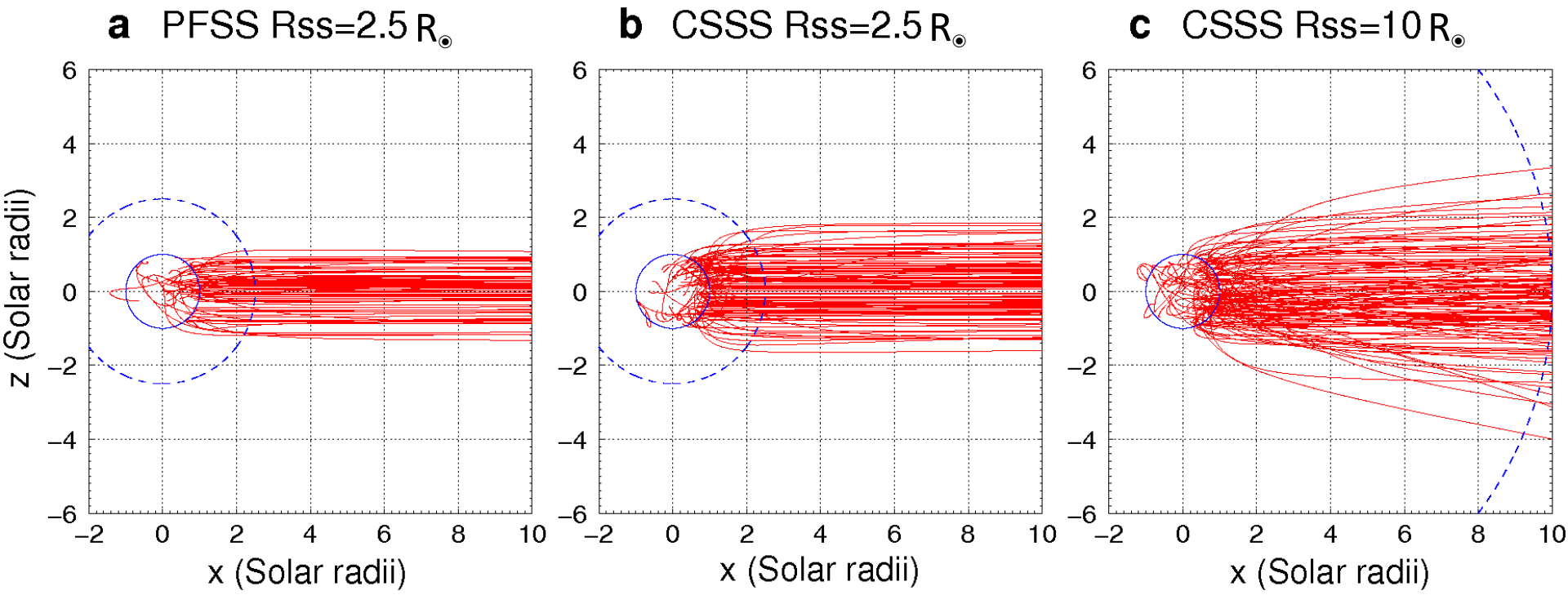
CSSSモデル Rss=10 再現結果 (10TeV)



Data − MC χ^2/dof = 10.3/14 (0.74)

さらに良く再現

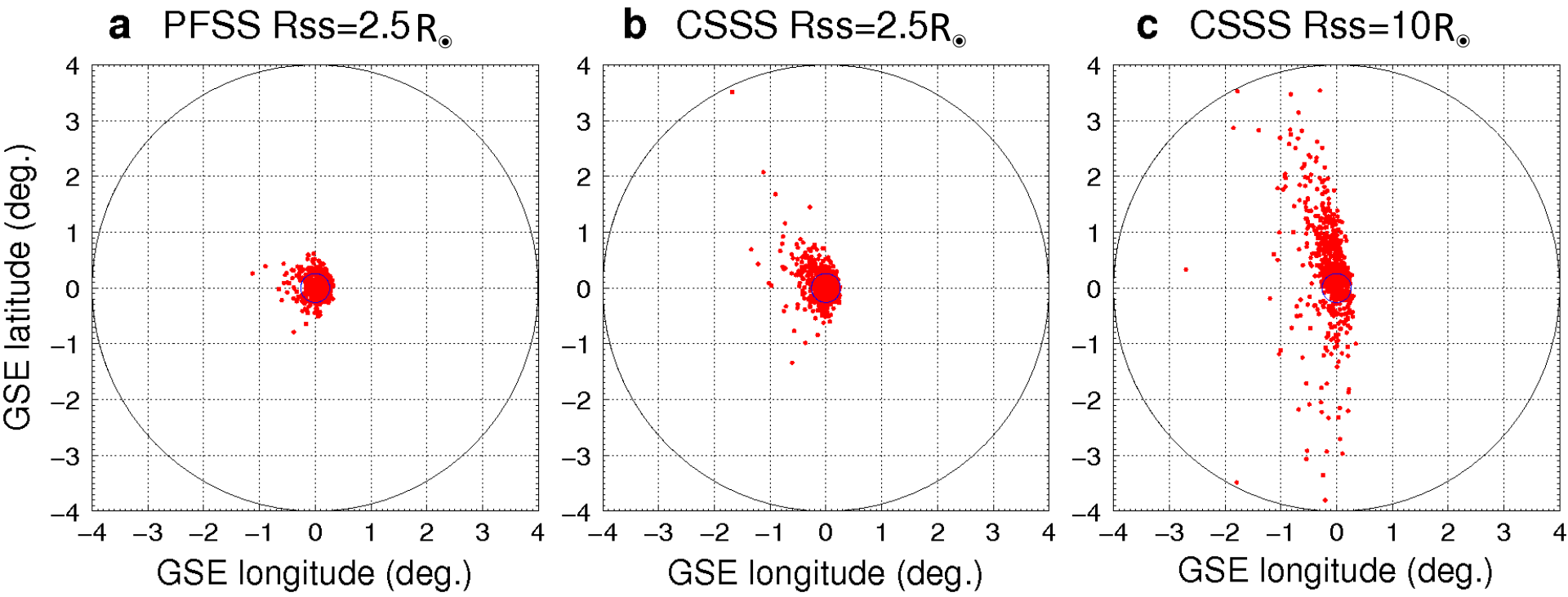
太陽付近の宇宙線の軌道　～10TeV
1996年 (CR1910)



CSSSモデルは宇宙線が太陽に収束
磁力線に沿って粒子が太陽近傍に侵入し易い

太陽の影の形　～10TeV
1996年 (CR1910)

※ 角度分解能 考慮前



CSSSモデル(R_{ss}=10$R_{\odot}$)は南北方向に伸びる
高緯度からでも粒子が侵入可能

「太陽の影」まとめ

- 1996年～から2009年に至る
  第23太陽活動周期の「太陽の影」の連続観測に成功

  → 11年周期の太陽活動周期変動

- 複数の磁場モデルを取り入れた「太陽の影」の
  数値シミュレーションを開発

  → 太陽の影は太陽コロナ磁場構造に感度あり
  → コロナ大気中の電流を取り入れた
  CSSSモデルが太陽の影の周期変動を良く再現
  → Source Surfaceの位置を $R_{ss}=10R_{\odot}$ とすると
  影の深さ・形に関してさらに良い再現

「太陽大気ガンマ線」について

- 太陽表面に到達するTeV領域宇宙線のフラックスは太陽活動に伴い大きな変動が予想される
- 宇宙線と太陽大気との相互作用による太陽ガンマ線(とニュートリノ)は太陽活動周期と相関があるはず

- 太陽光球面上に到達する宇宙線のエネルギースペクトルを太陽活動を追って計算することが可能
- どこまで低いエネルギーの宇宙線を計算できるか？計算する必要があるか？