

チベット高原での 高エネルギー宇宙線の研究

川田和正 東京大学宇宙線研究所

平成23年度共同利用成果発表会

@宇宙線研究所 2011.12.17

(For the Tibet ASyCollaboration)

本日の内容

- 共同利用研究課題の内訳と経費の用途
- チベット実験について
- 水チェレンコフ型ミューオン検出器の建設の現状
- 今年度のデータ解析のトピック（太陽の影）

平成23年度チベット実験関係 共同利用研究採択課題一覧

1. チベット高原での高エネルギー宇宙線の研究
(瀧田正人 東京大学宇宙線研究所)
2. Knee領域一次宇宙線組成の研究
(柴田楨雄 横浜国立大学大学院工学研究院)
3. 銀河拡散ガンマ線の研究
(日比野欣也 神奈川大学工学部)
4. 宇宙線による太陽の影を用いた太陽周辺磁場の時間変動の研究
(西澤正己 国立情報学研究所人間・社会情報研究系)
5. チベット空気シャワーアレイによる10TeV宇宙線強度の恒星時日周変動の観測
(宗像一起 信州大学理学部)

チベットグループ共同利用研究 経費執行状況

研究費：申請額 600万円 → 配分額 **200万円**

2002年に完成したTibet-IIIの維持・運転及び
水チェレンコフ型地下ミューオン観測装置の建設
に必要な経費の一部に使用。

旅費：申請額 1273.8万円 → 配分額 **415万円**

宇宙線研での研究打ち合わせや中国出張海外旅費
に使用。

ご支援、どうもありがとうございます！

The Tibet ASy Collaboration

Papers (in refereed journals):

1. Cosmic-ray energy spectrum around the knee obtained by the Tibet experiment and future prospects
Advances in Space Research, **47**, 629-639 (2011)
2. Cosmic-ray energy spectrum around the knee observed with the Tibet air-shower experiment
Astrophysics and Space Sciences Transactions, **7**, 15-20 (2011)
3. Observation of the Fermi pulsar catalog at TeV energies with the Tibet air shower experiment
Astrophysics and Space Sciences Transactions, **7**, 211-215(2011)

国際会議(全17講演)

1. 32nd ICRC (Beijing, China, August 2011), [16 presentations](#)
2. 14th Workshop on Elastic and Diffractive Scattering(Qui Nhon, Vietnam, December 2011), [1 presentation](#)

研究目的

- ★ 大気チエレンコフ望遠鏡と相補的な広視野(約2sr)連続観測高エネルギー宇宙線望遠鏡
- 3～100 TeVの高エネルギーガンマ線放射天体の探索、 $10^{14} \sim 10^{17}$ eV の宇宙線の観測から、宇宙線の起源、加速機構の研究を行う
- 太陽活動期における“太陽の影”(太陽による宇宙線の遮蔽効果)を観測し、太陽近傍および惑星間磁場の大規模構造を知る。



The Tibet AS γ Collaboration



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

(9)Faculty of Education, Utsunomiya University, Japan

(10)Department of Physics, Konan University, Japan

(11)Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Japan

(12)Faculty of Engineering, Yokohama National University, Japan

(13)Department of Physics, Shinshu University, Japan

(14)School of Information Science and Engineering, Shandong Agriculture University, China

(15)Saitama University, Japan

(16)National Institute of Informatics, Japan

(17)Sakushin Gakuin University, Japan

(18)Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, Japan

(19)Max-Planck-Institut für Physik, Deutschland

(20)College of Industrial Technology, Nihon University, Japan

(21)Shonan Institute of Technology, Japan

(22)RIKEN, Japan

(23)School of General Education, Shinshu University, Japan

Yangbajing Cosmic Ray Observatory

1.5 hours from Lhasa

Yangbajing

Lhasa

Beijing

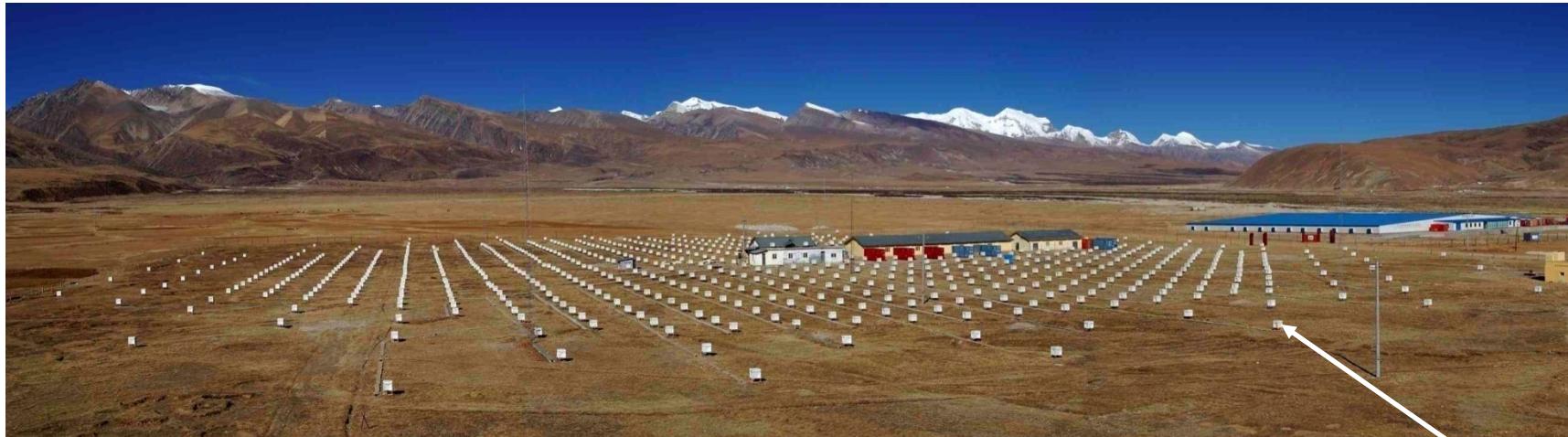
Chengdu



中国西藏自治区羊八井

90° 522E, 30° 102N, 4,300 m a.s.l. (606g/cm²)

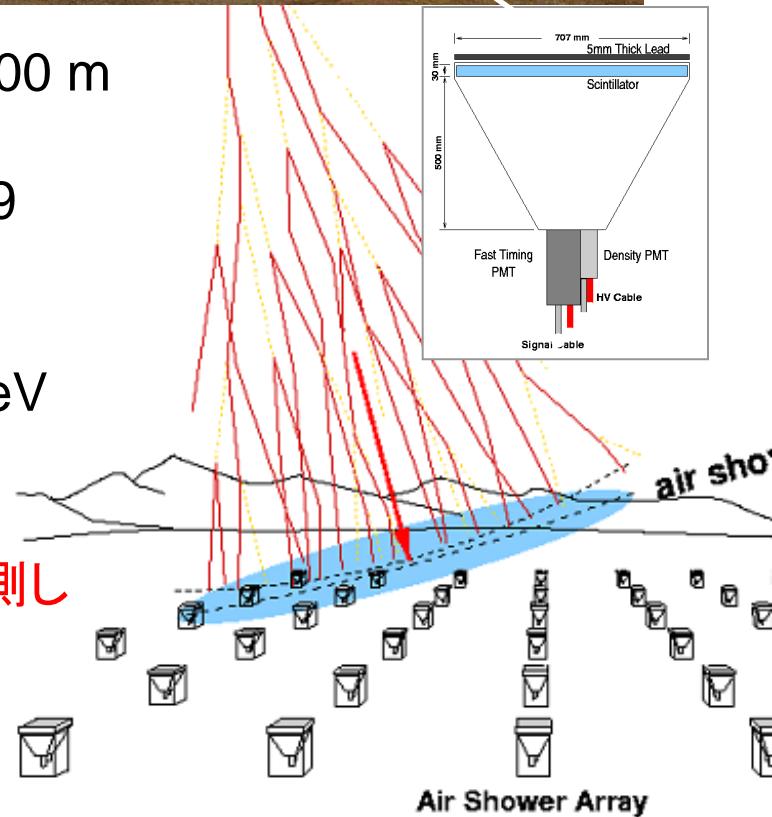
チベット空気シャワー観測装置 (Tibet AS)



□ 中国チベット (90.522°E , 30.102°N) 標高4300 m

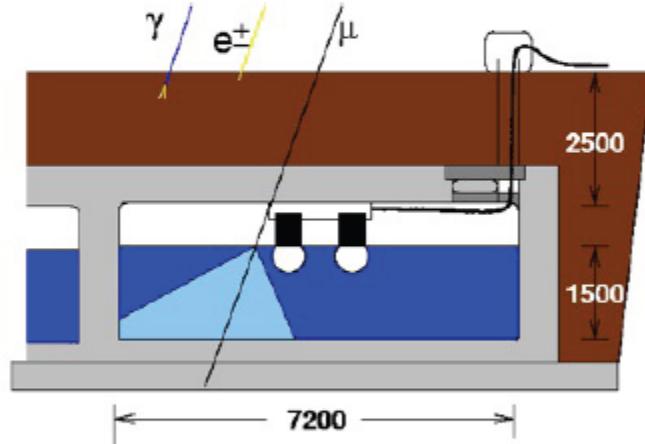
□ シンチレーション検出器数	$0.5 \text{ m}^2 \times 789$
□ 空気シャワー有効面積	$\sim 37,000 \text{ m}^2$
□ 最頻エネルギー	$\sim 3 \text{ TeV}$
□ 角度分解能	$\sim 0.9^{\circ} @ 3 \text{ TeV}$
□ 視野	$\sim 2 \text{ sr}$

→ 空気シャワー中の二次粒子(主に $e^{+/-}, \gamma$)を観測し
一次宇宙線エネルギー、方向を測定

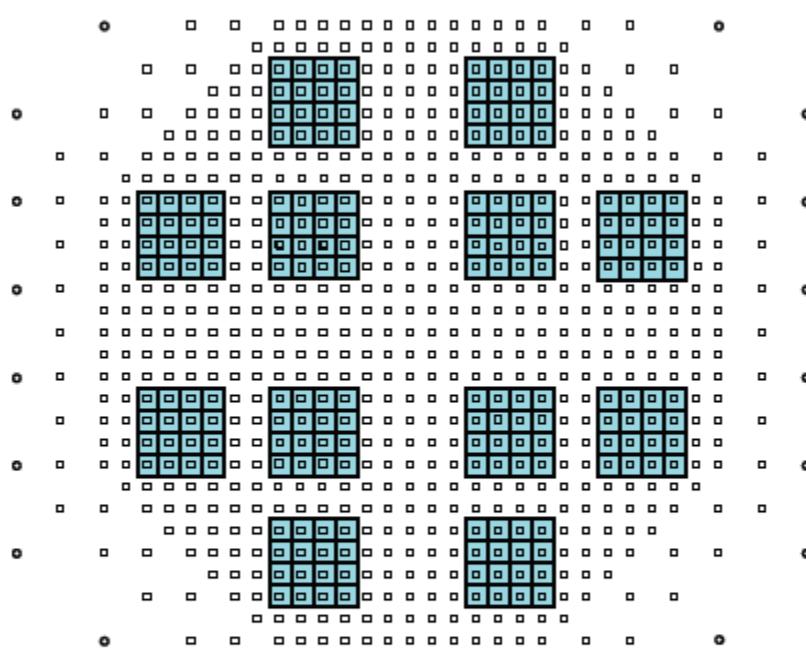


Tibet Muon Detector(MD) Array

- 7.2m x 7.2m x 1.5m depth Water cell
- 20"ΦPMT x 2 (HAMAMATSU R3600)
- 地下 2.5m ($\sim 515\text{g/cm}^2 \sim 19\text{r.l.}$)
- 材質：コンクリート(表面:白色防水材)



・ 1プール = 16セル。



full MD : 192セル(12プール)

Total ~10,000 m²

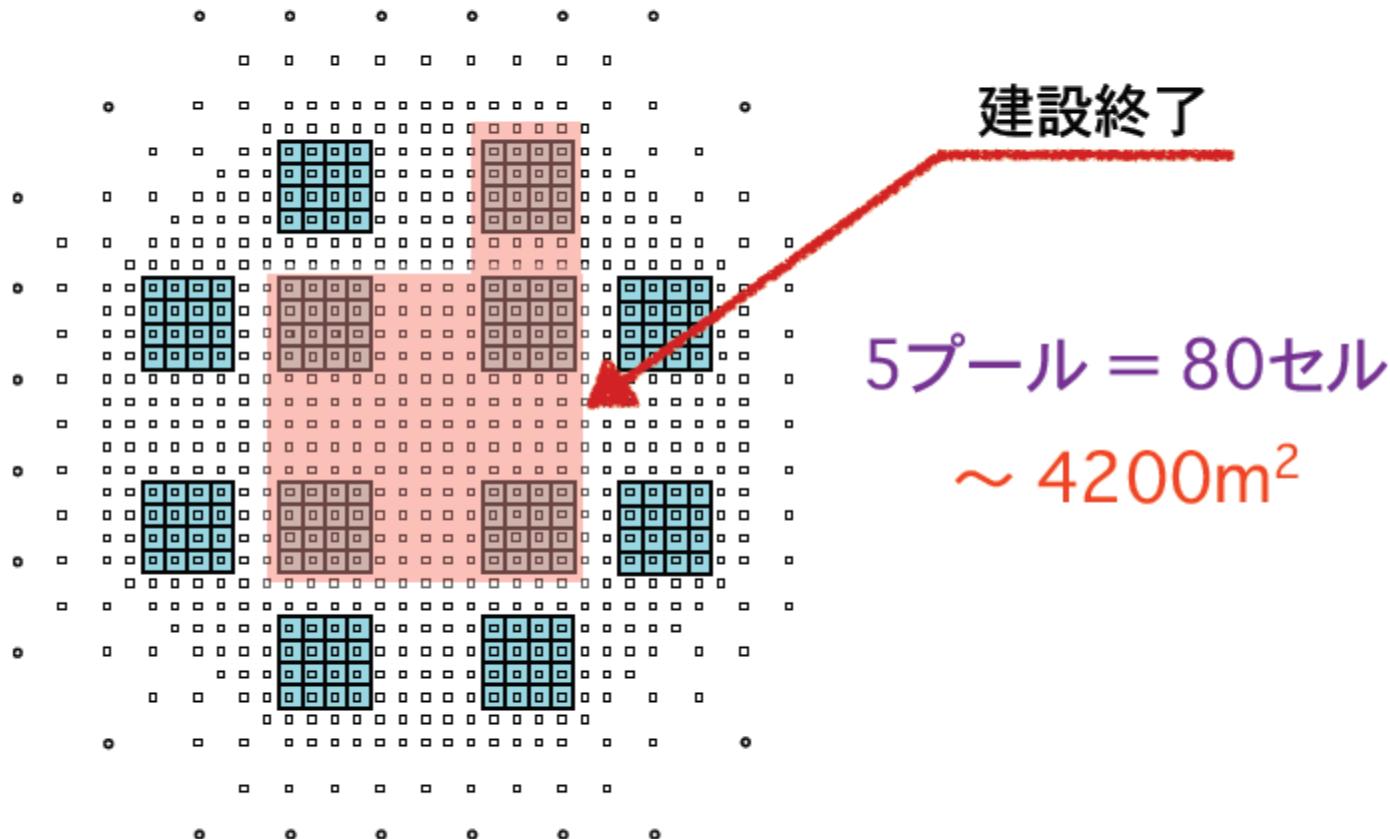
ASアレイ + MD

原子核起源空気シャワーを99.9%以上除去(>~20TeV)

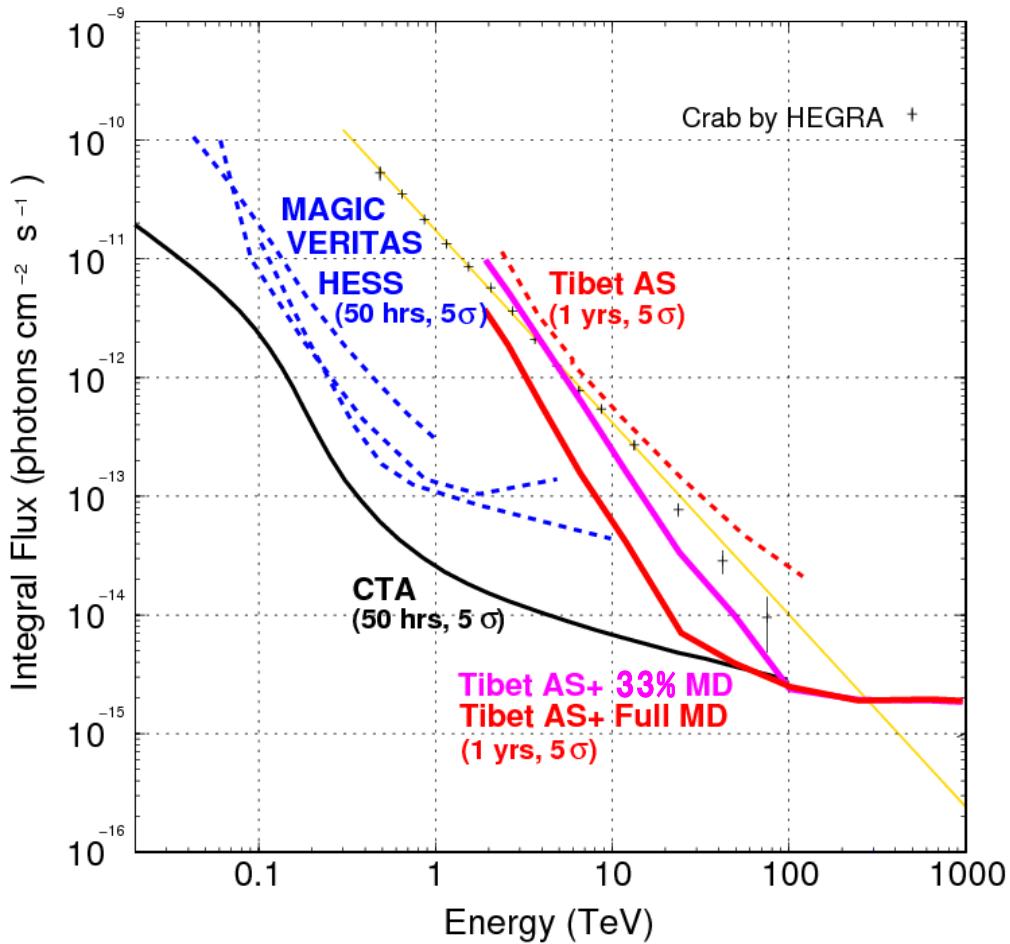
ガンマ線起源の空気シャワーにはミューオンが少ないことを利用

2011 Tibet Muon Detector (MD)

水チェレンコフ型ミューオン検出器の建設の現状



γ 線点源検出予想感度 (1yr or 50hrs, 5 σ)



+Full MD

~10倍 @10TeV
~15倍 @100TeV

+33% MD

3~4 倍 @10TeV
6~7倍 @100TeV

2010年 11/29 コンクリート打設終了



No.2プール



No.1プール



No.4プール



No.3プール

2011年 建設状況



土盛量の測定



埋戻し作業



ケーブルドレインのブロック

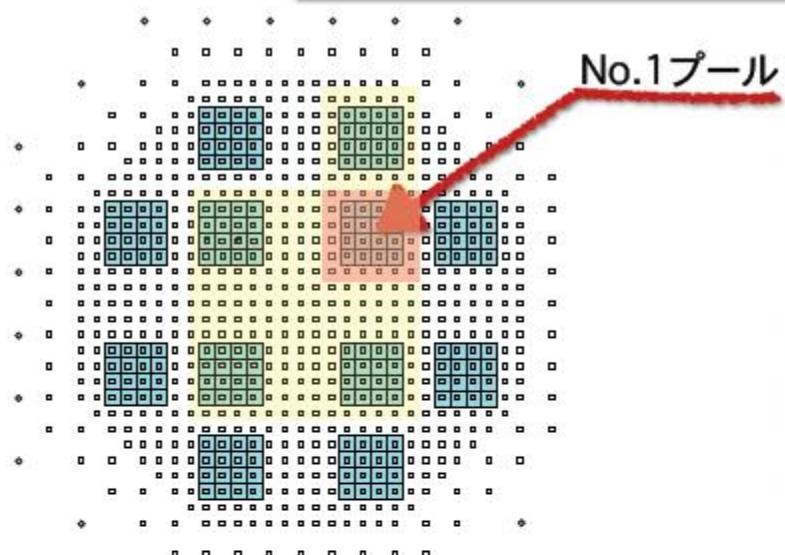


ファンの取付

空気シャワーアレイの回復



MD No.1プールのPMTインストール





支持金具の取り付け



天井への取り付け



PMT取り付け完了(1)



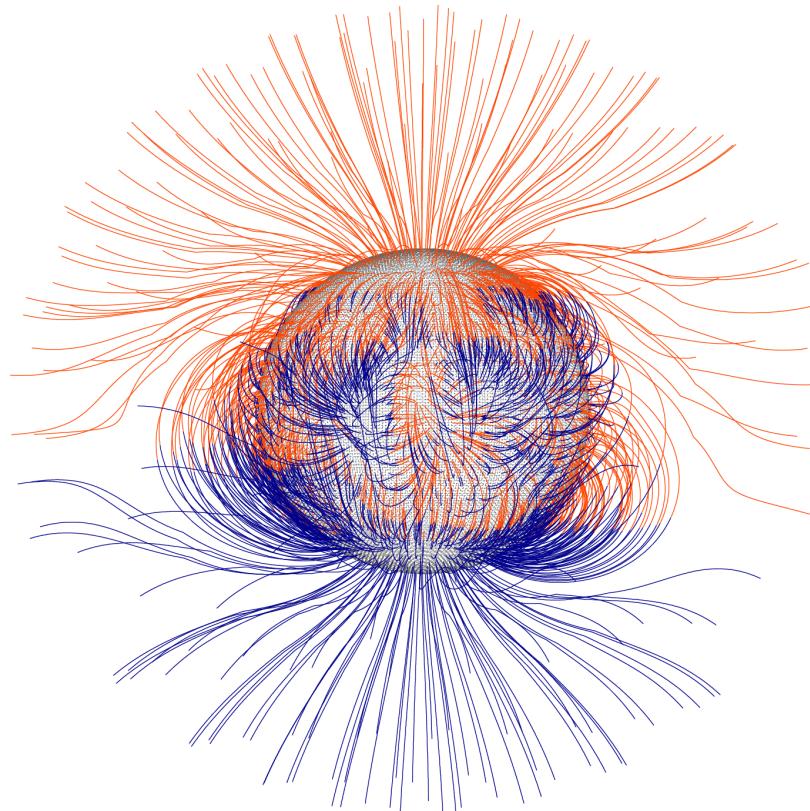
PMT取り付け完了(2)

今後の予定

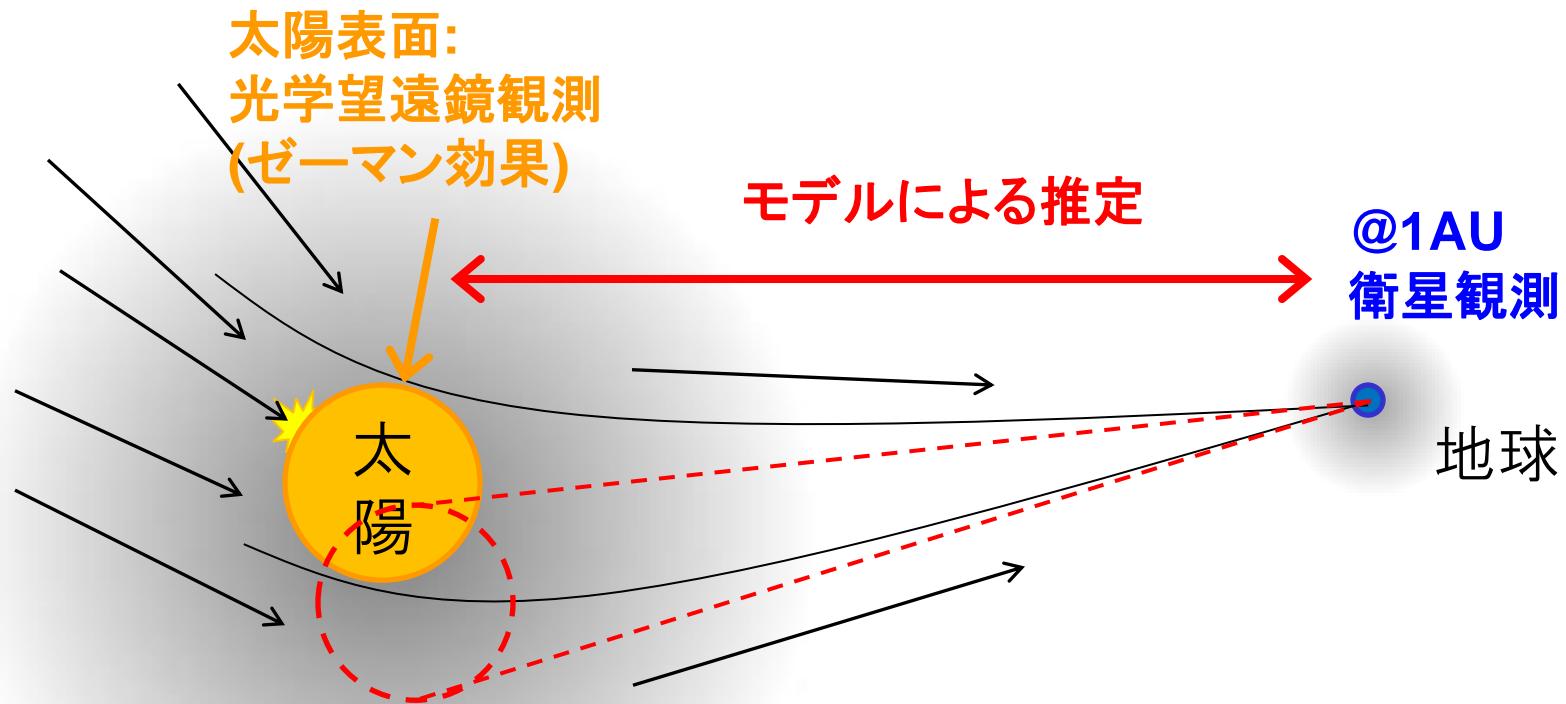
- ・残りのMD内部作業(PMTインストール等)の完了と注水
- ・近々(半年後程度をめどに)観測開始予定

最近のデータ解析のトピック

「太陽の影」による太陽磁場構造の研究



「太陽の影」



宇宙線の遮蔽
「太陽の影」

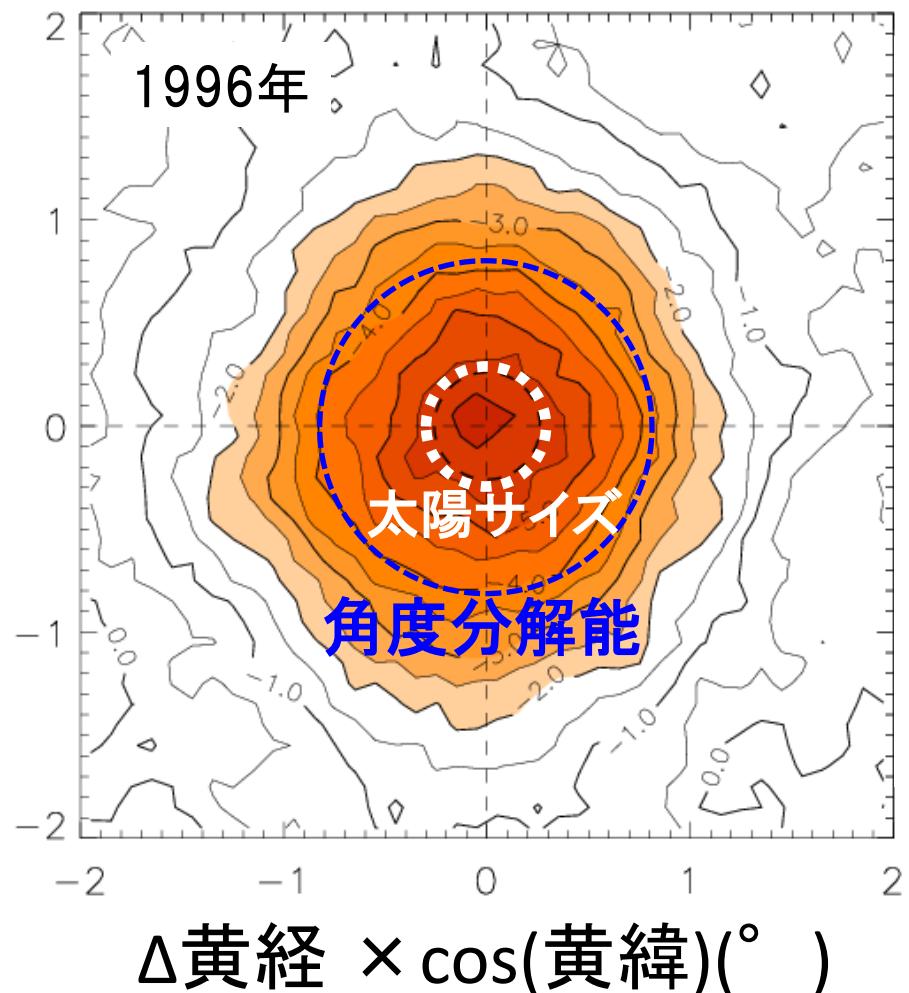
TeV宇宙線(陽子) → 荷電粒子
ラーモア半径
~7.4AU ($B=30\mu G$ 地球近辺)
~0.16 R_{\odot} ($B=300mG$ 太陽近辺)
太陽圏磁場構造のプローブ！

10TeV 太陽の影の観測

西←

→東

北↑
南↓

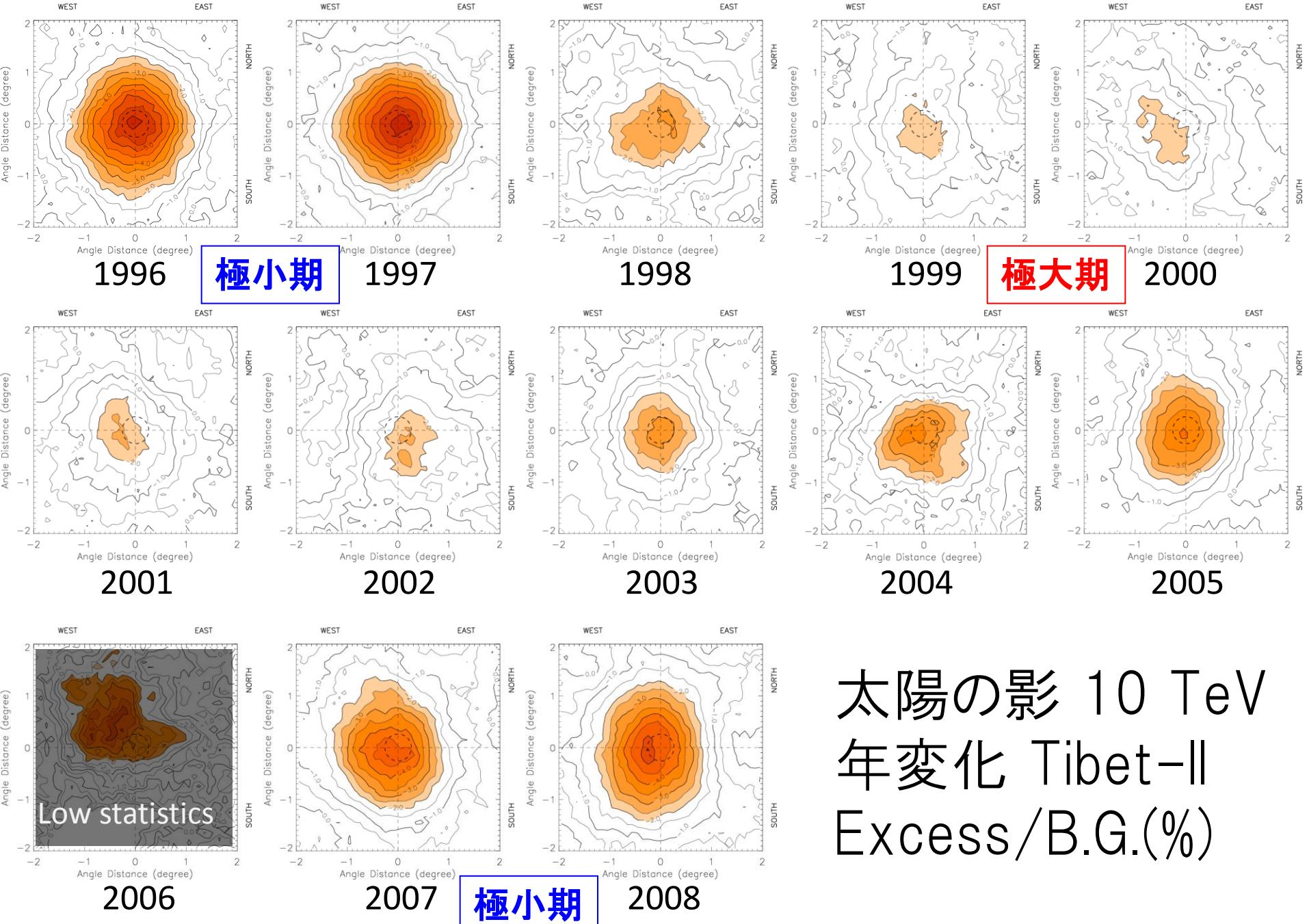


太陽の視位置を中心とした
 $4^\circ \times 4^\circ$ の宇宙線強度マップ

装置の角度分解能($\sim 0.9^\circ$)
のために実際の太陽の
視半径($\sim 0.26^\circ$)より広がる

宇宙線の平均頻度に
対して $\sim 6\%$ の宇宙線遮蔽
が見られる。

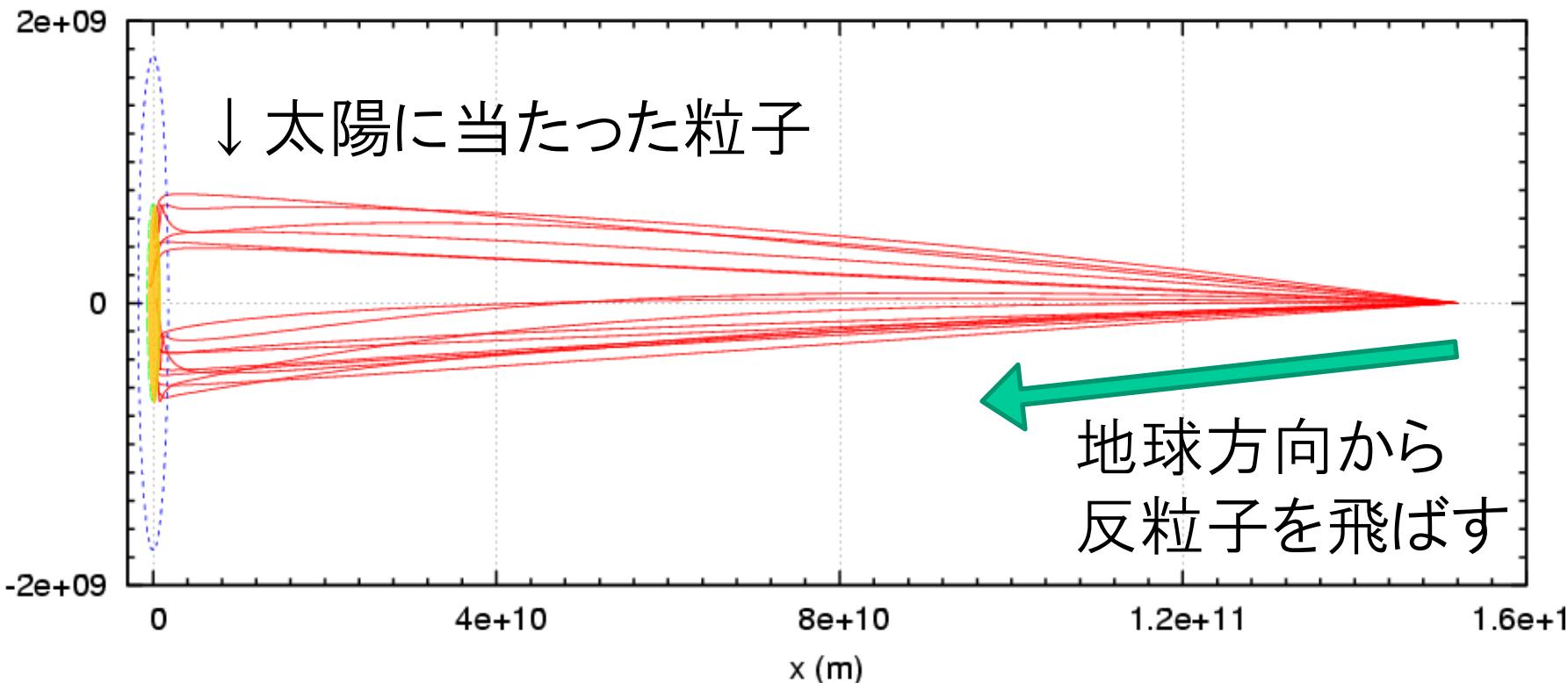
位置、遮蔽量を観測
太陽磁場をどれだけ
知ることが可能か？



太陽の影 10 TeV 年変化 Tibet-II Excess/B.G.(%)

「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



仮定する太陽圏の磁場

コロナ磁場($< 2.5R_{\odot}$)

→ PFSS モデル または CSSS モデル

Kitt Peak の太陽表面磁場の観測を元にした
太陽の1自転周期(～27日)ごとの平均モデル

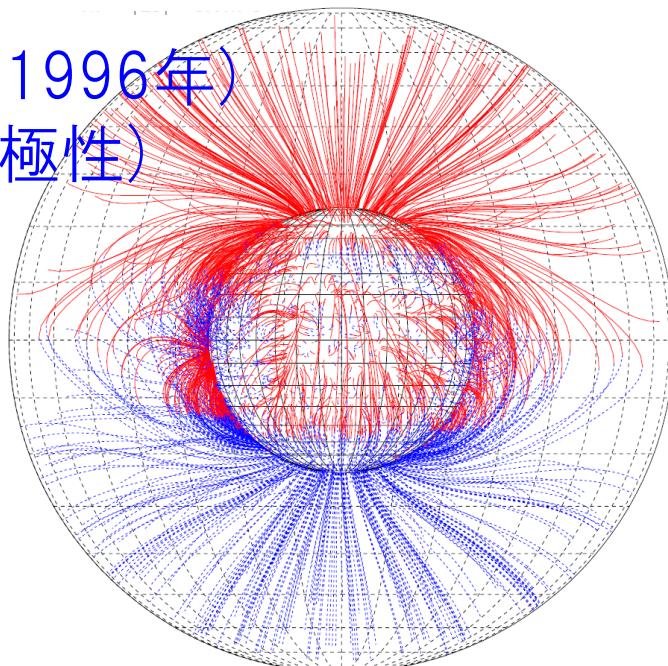
惑星間磁場($> 2.5R_{\odot}$)

→ パーカー・スパイラルモデル

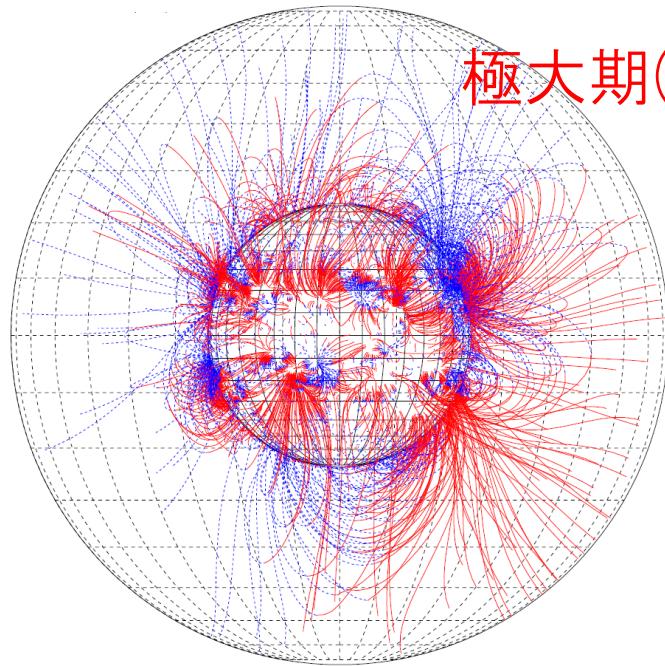
地磁気

→ 双極子磁場モデル

極小期(1996年)
 $qA > 0$ (+極性)

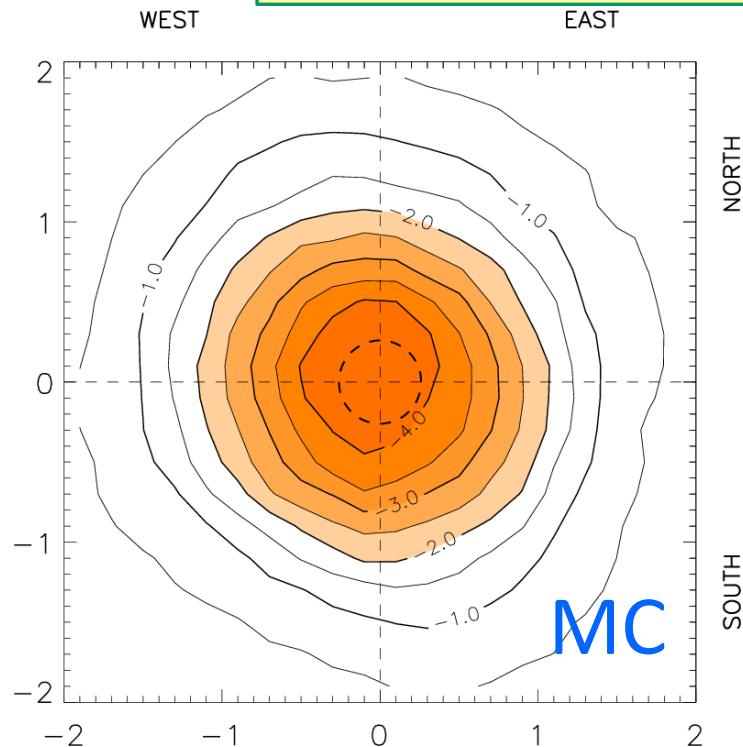


極大期(2000年)



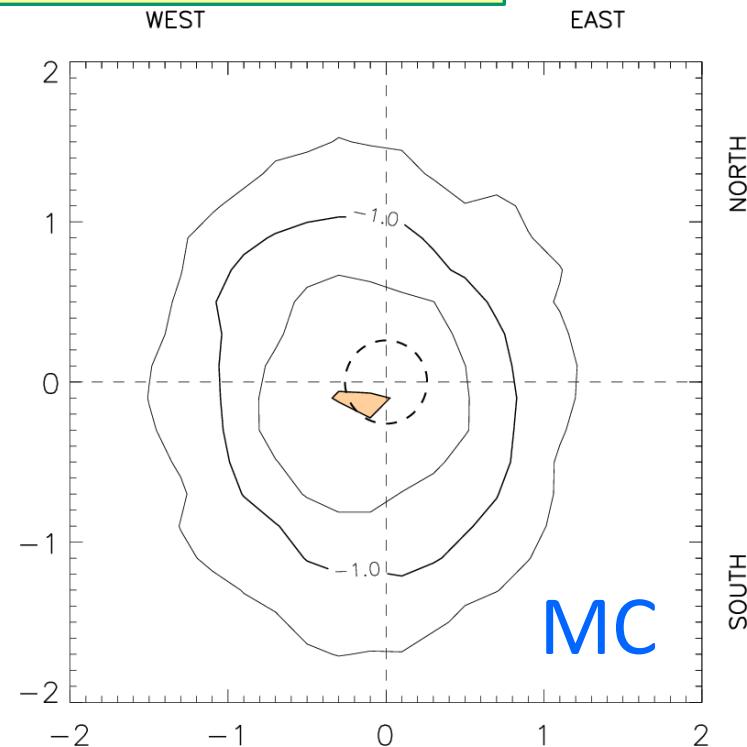
MCシミュレーション結果

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

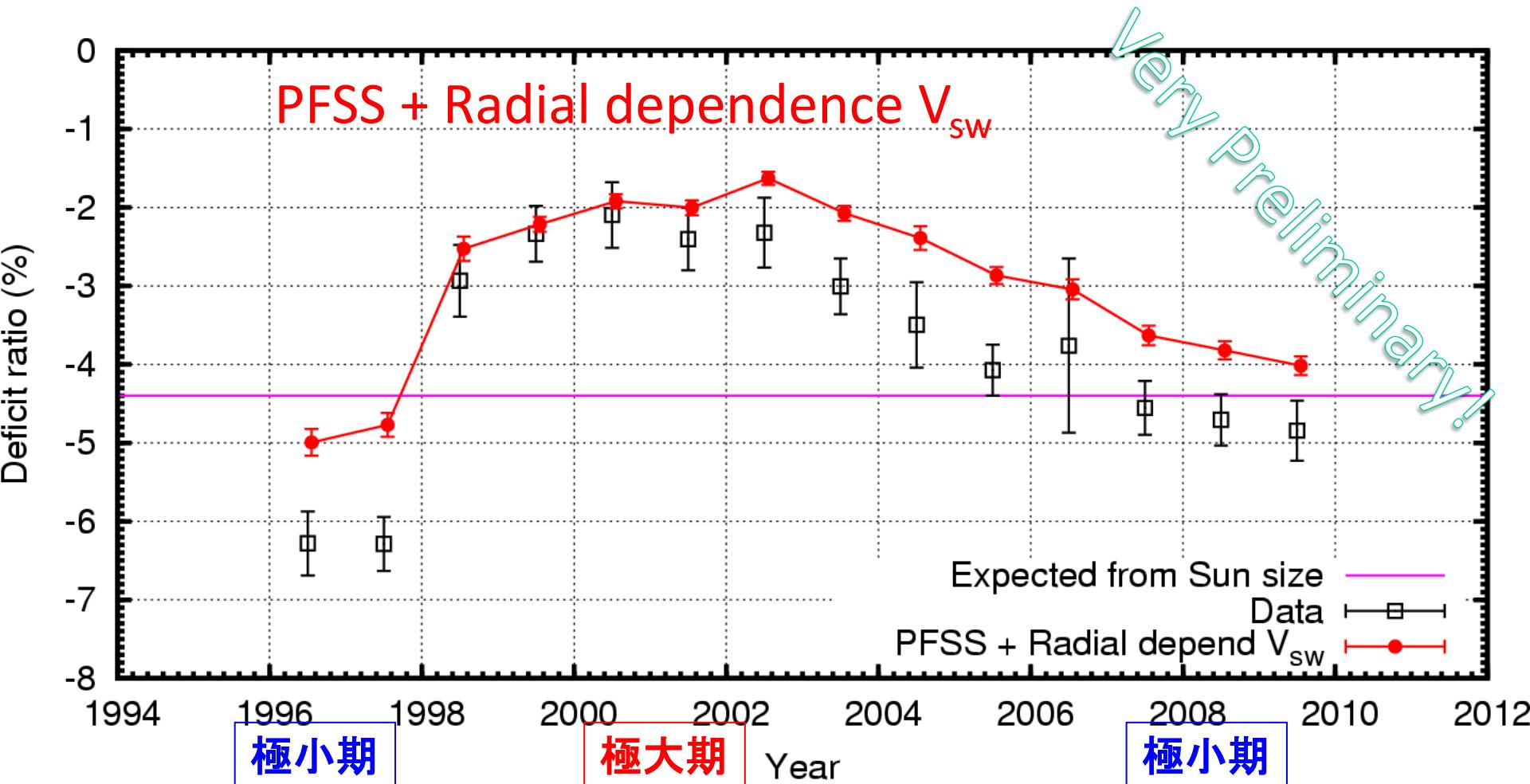
1996年(CR1910)



極大期

2001年(CR1978)

Including the Solar Wind Properties



Data - MC $\chi^2/dof = 68.7/14 (5.7\sigma)$

Potential Field Source Surface (PFSS) Model

Altschuler and Newkirk, Solar Physics, 9, 131 (1969)
Hakamada, Solar Physics, 159, 89 (1995)

Plasma velocity is small ($\beta/c \ll 1$) $\rightarrow \frac{\partial E}{\partial t} \ll j$

Local and short-lived electric currents are ignored $\rightarrow j = 0$

Maxwell equations

Current-free

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

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Scalar potential Ψ has to satisfy the Laplace equation

$$\nabla^2 \Psi = 0$$

Scalar potential Ψ can be expanded to spherical harmonic series

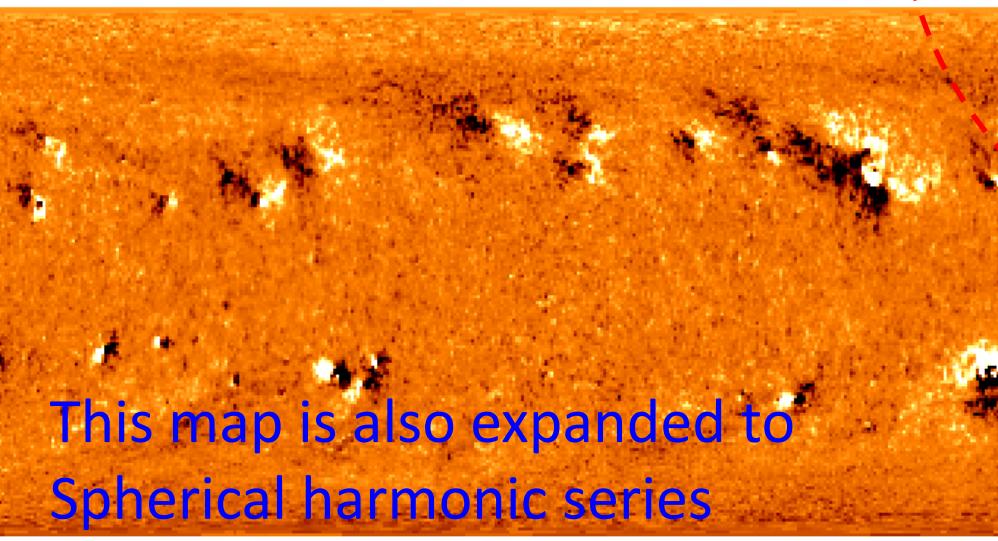
Spherical Harmonic Series

$$\Psi(r, \theta, \phi) = r_{\odot} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_n^m(\theta) \times$$
$$\times \left[\left\{ c_n^m \left(\frac{r}{r_{\odot}} \right)^n + (1 - c_n^m) \left(\frac{r_{\odot}}{r} \right)^{n+1} \right\} g_n^m \cos m\phi + \right.$$
$$\left. + \left\{ d_n^m \left(\frac{r}{r_{\odot}} \right)^n + (1 - d_n^m) \left(\frac{r_{\odot}}{r} \right)^{n+1} \right\} h_n^m \sin m\phi \right],$$

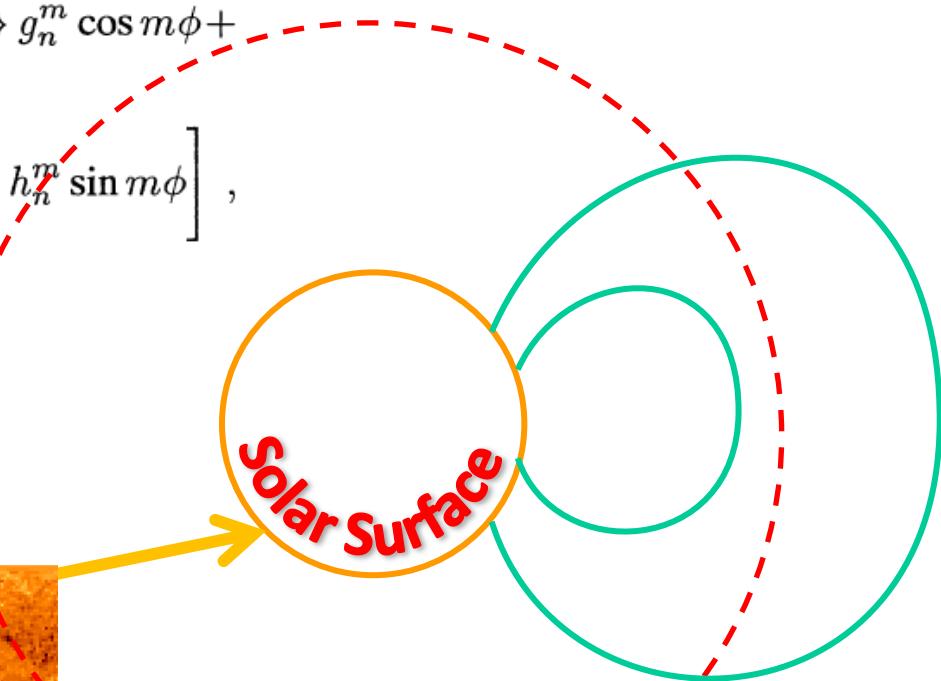
Boundary condition at R_{ss}

$$\Psi(R_{ss}, \theta, \phi) = 0$$

$$\rightarrow B_r \neq 0, B_{\theta} = 0, B_{\phi} = 0$$



This map is also expanded to Spherical harmonic series



Solar surface magnetograph
with the Kitt Peak Vacuum Telescope
utilizing the Zeeman effect
(FeI 868.8, 630.1 and 630.2nm)

Spherical Harmonic Series

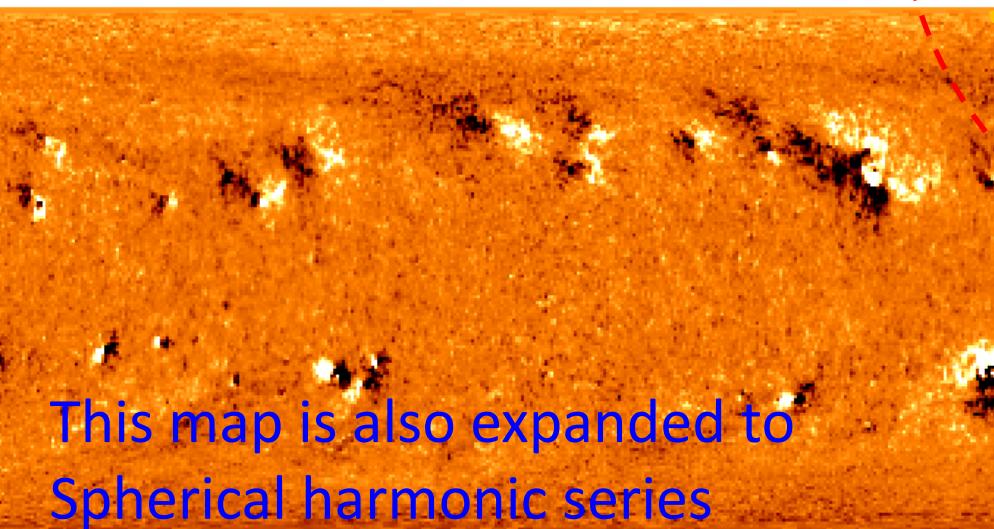
$$\Psi(r, \theta, \phi) = r_{\odot} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_n^m(\theta) \times$$

$$\begin{aligned} & \times \left[\left\{ c_n^m \left(\frac{r}{r_{\odot}} \right)^n + (1 - c_n^m) \left(\frac{r_{\odot}}{r} \right)^{n+1} \right\} g_n^m \cos m\phi + \right. \\ & \left. + \left\{ d_n^m \left(\frac{r}{r_{\odot}} \right)^n + (1 - d_n^m) \left(\frac{r_{\odot}}{r} \right)^{n+1} \right\} h_n^m \sin m\phi \right], \end{aligned}$$

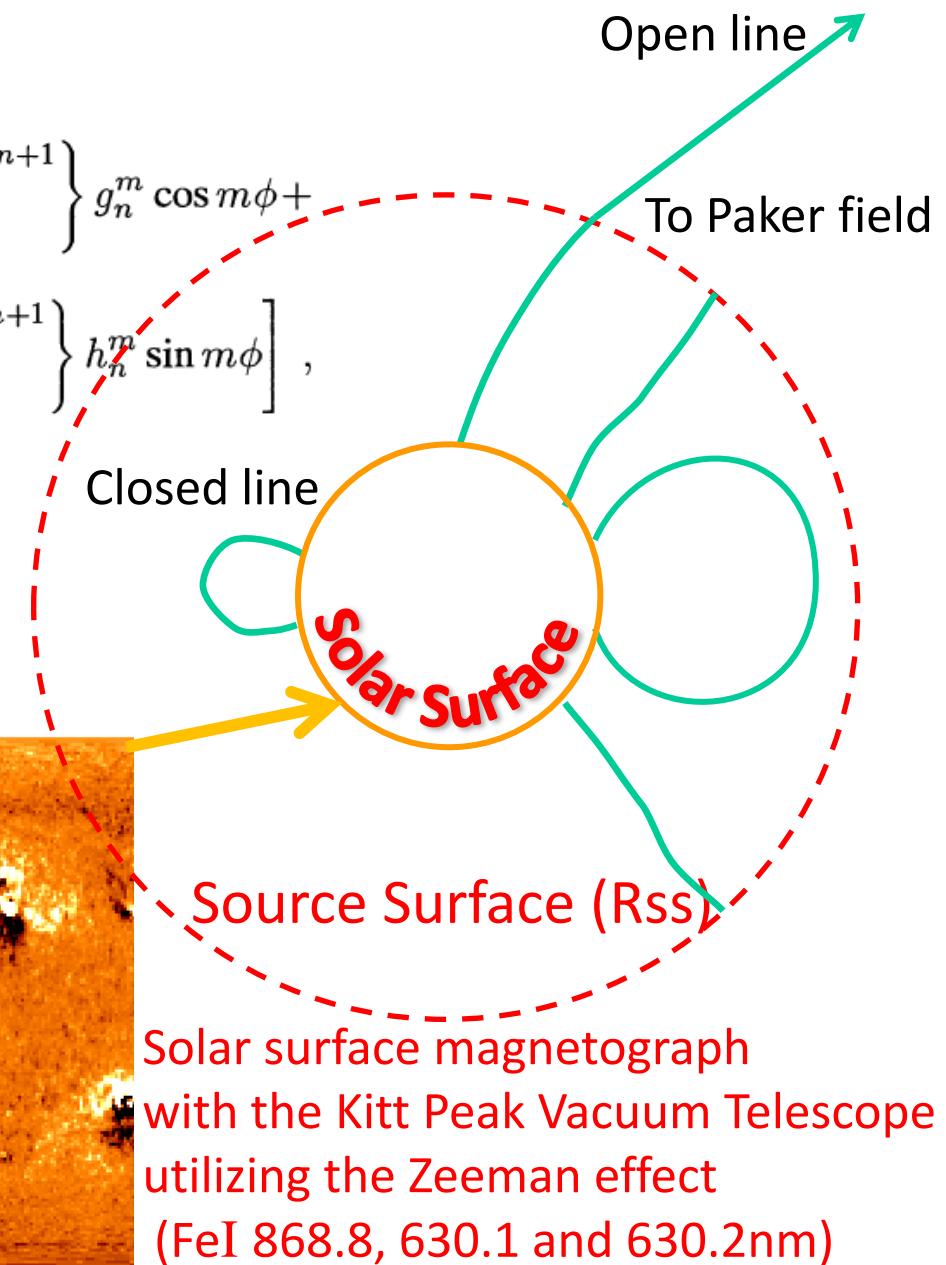
Boundary condition at R_{ss}

$$\Psi(R_{ss}, \theta, \phi) = 0$$

$$\rightarrow B_r \neq 0, B_{\theta} = 0, B_{\phi} = 0$$



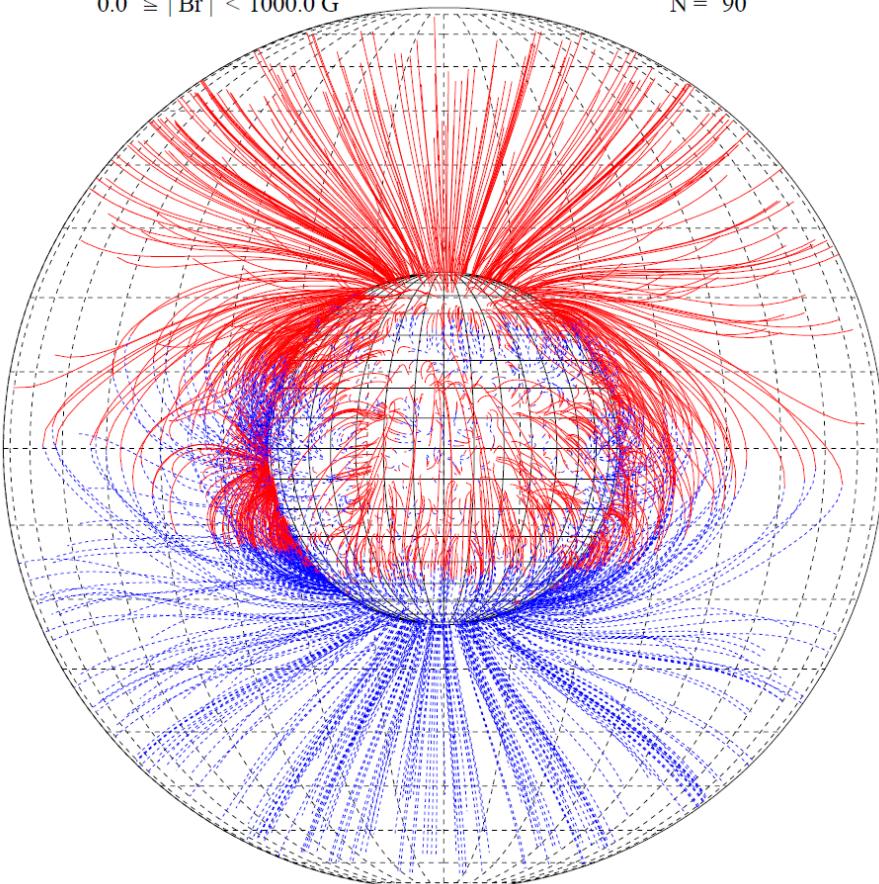
This map is also expanded to Spherical harmonic series



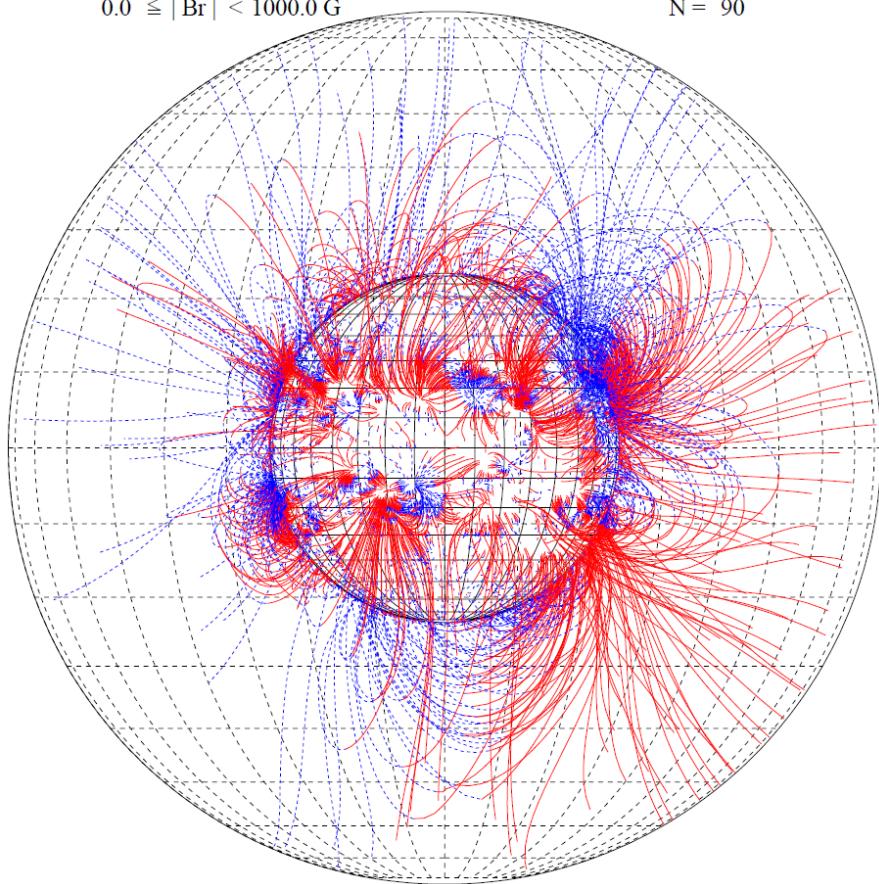
Solar surface magnetograph
with the Kitt Peak Vacuum Telescope
utilizing the Zeeman effect
(FeI 868.8, 630.1 and 630.2nm)

Magnetic Field Lines by PFSS Model

Carrington Rotation Number = 1909 (Cosine Theta)
Longitude= 0.0 dgr Latitude= 0.0 dgr
 $0.0 \leq |Br| < 1000.0$ G N = 90



Carrington Rotation Number = 1963 (Cosine Theta)
Longitude= 0.0 dgr Latitude= 0.0 dgr
 $0.0 \leq |Br| < 1000.0$ G N = 90



Courtesy: K. Hakamada

White light image



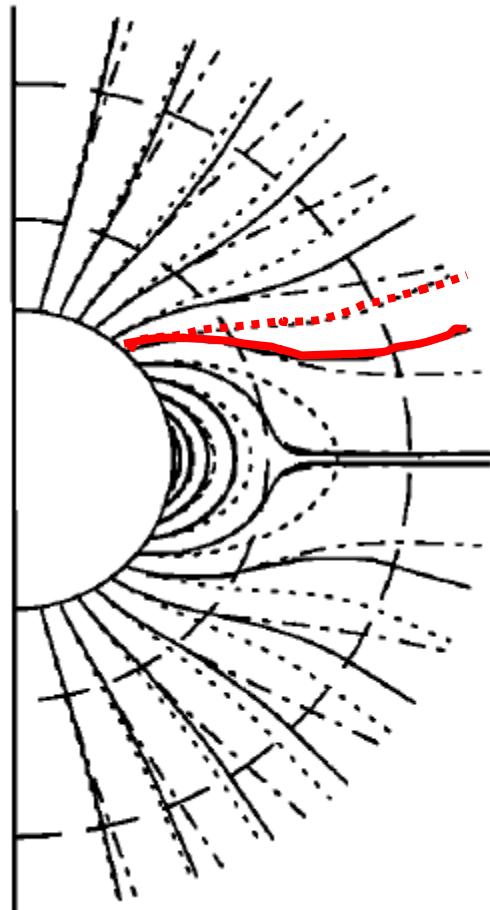
This photograph of a total solar eclipse was taken by Miloslav Druckmüller and colleagues from Brno University of Technology, Czech Republic, during an eclipse on July 22, 2009.

Current Sheet Source Surface (CSSS) Model

Xuepu Zhao & Todd Hoeksema, JGR, 100, 19 (1995)

— CSSS
..... PFSS
- - - PFCS

$R_{cp} = 1.6$
 $R_{ss} = 2.5$
 $a = 0.0$



Abstract:

The model **includes the effects of the large-scale horizontal electric currents flowing in the inner corona** of the warped heliospheric current sheet in the upper corona, and of volume currents flowing in the region where the solar wind plasma totally controls the magnetic field.

The model matches the MHD solution for a simple dipole test case better than earlier source surface and current sheet models

磁氣靜水壓平衡

Bogdan & Low, ApJ, 306, 271 (1986)

Magnetostatic force balance

Low, ApJ, 293, 31 (1985)

current (J)

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

Magnetic force, gas pressure and gravity

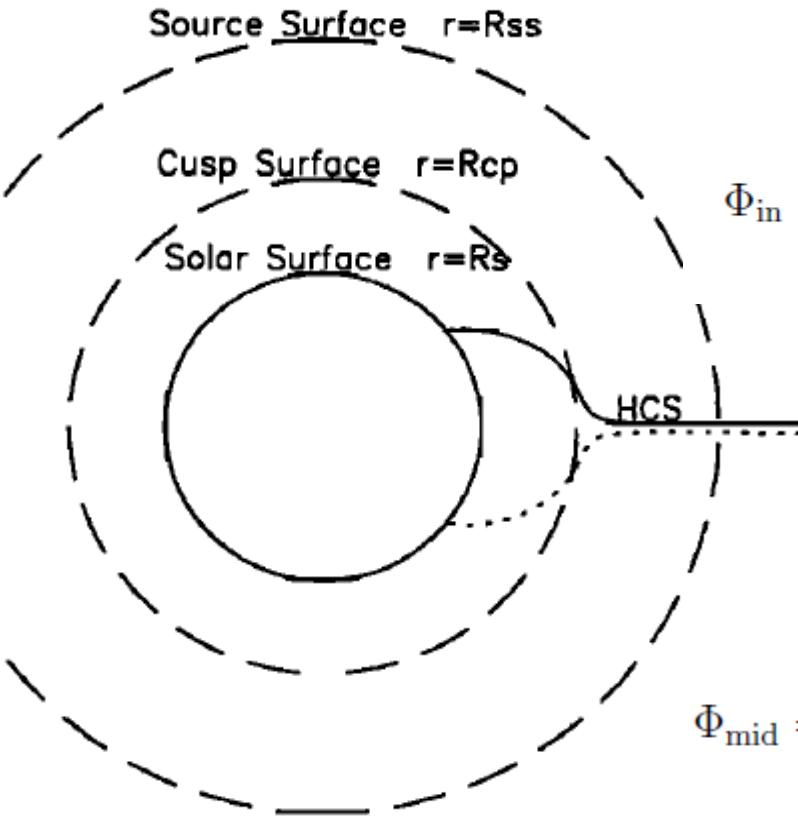
Analytical solutions

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

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

$$\eta(r) = \left(1 + \frac{a}{r} \right)^2$$

a : length scale of horizontal electric currents in the corona



Inner region ($R_s < r < R_{cp}$)

$$\Phi_{in} = \sum_{l=1}^{N_\odot} \sum_{m=0}^l R_l^\odot(r) P_l^m(\cos \theta) (g_{lm}^\odot \cos m\phi + h_{lm}^\odot \sin m\phi),$$

$$R_l^\odot(r) = \frac{R_\odot (1+a)^l}{(l+1)(r+a)^{l+1}}$$

Middle region ($R_{cp} < r < R_{ss}$)

$$\Phi_{mid} = \sum_{l=0}^{N_\odot} \sum_{m=0}^l R_l^c(r) P_l^m(\cos \theta) (g_{lm}^c \cos m\phi + h_{lm}^c \sin m\phi),$$

$$R_l^c(r) = R_\odot \left[\frac{l+1}{R_{cusp}^2 (R_{cusp}+a)^l} + \frac{l(R_{cusp}+a)^{l+1}}{R_{cusp}^2 (R_{ss}+a)^{2l+1}} \right]^{-1} \times \left[\frac{1}{(r+a)^{l+1}} - \frac{(r+a)^l}{(R_{ss}+a)^{2l+1}} \right]$$

Free parameters

a : length scale

R_{cp} : cusp surface

R_{ss} : source surface

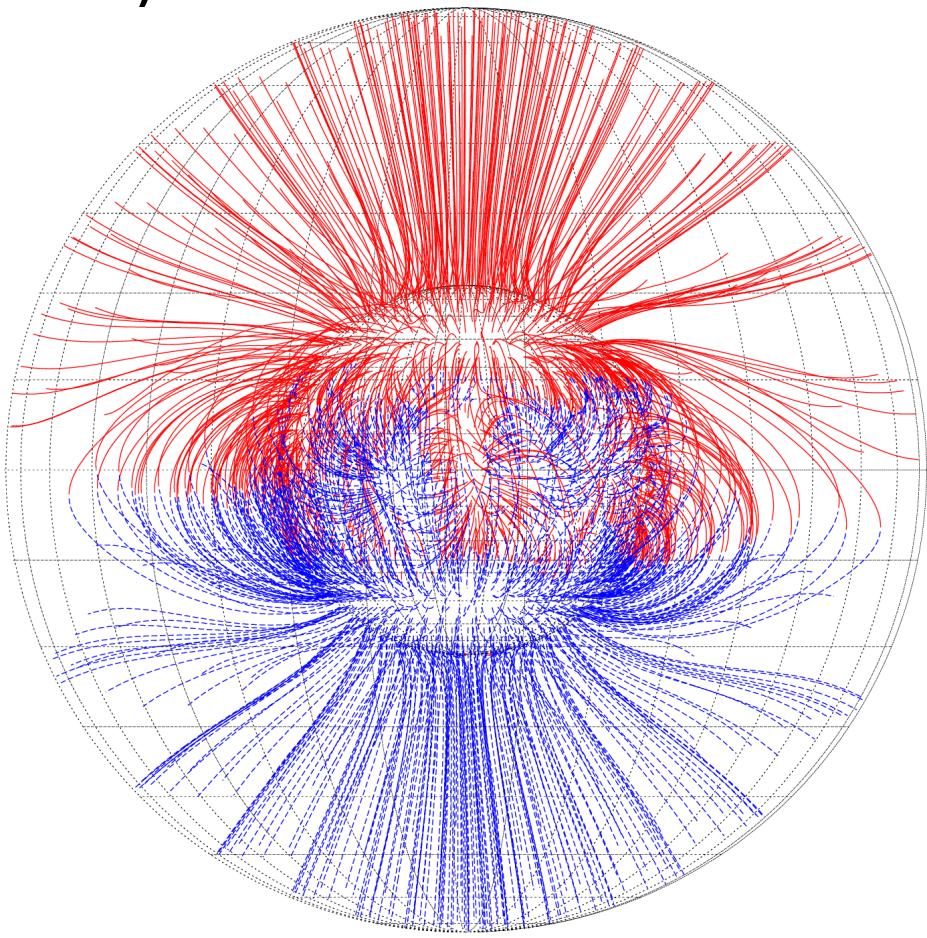
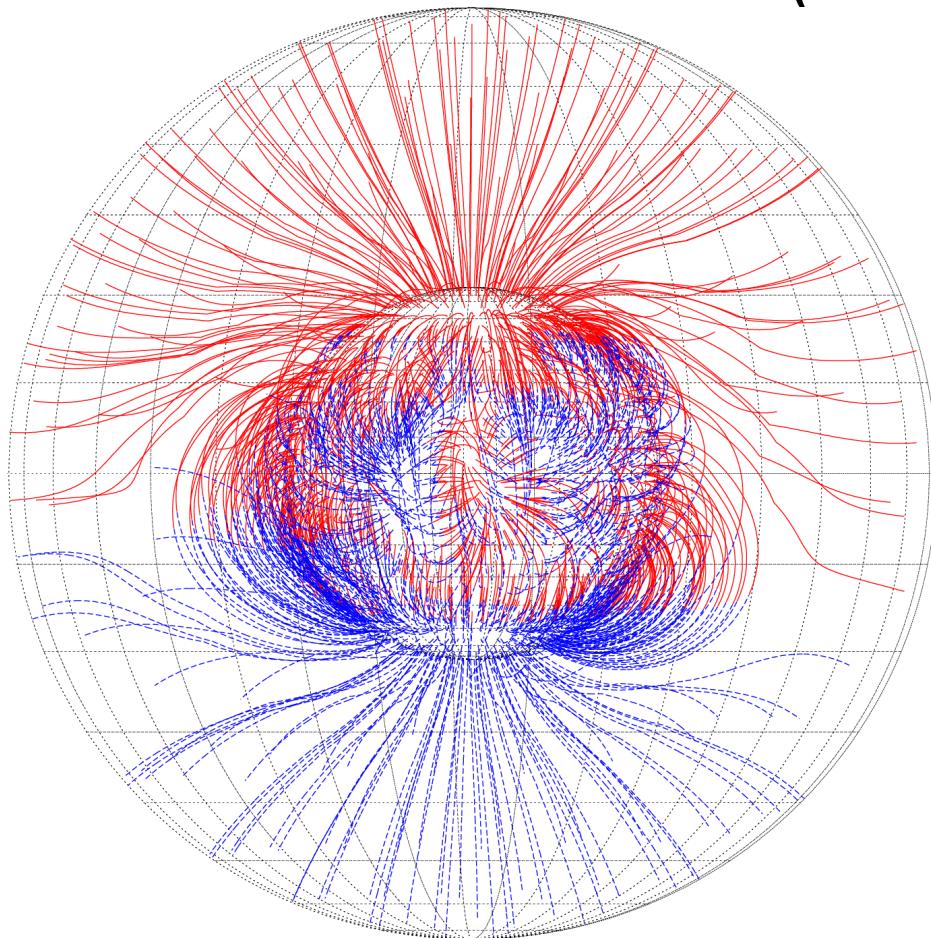
N : Maximum principal index

Coronal Magnetic Field at the Solar Minimum

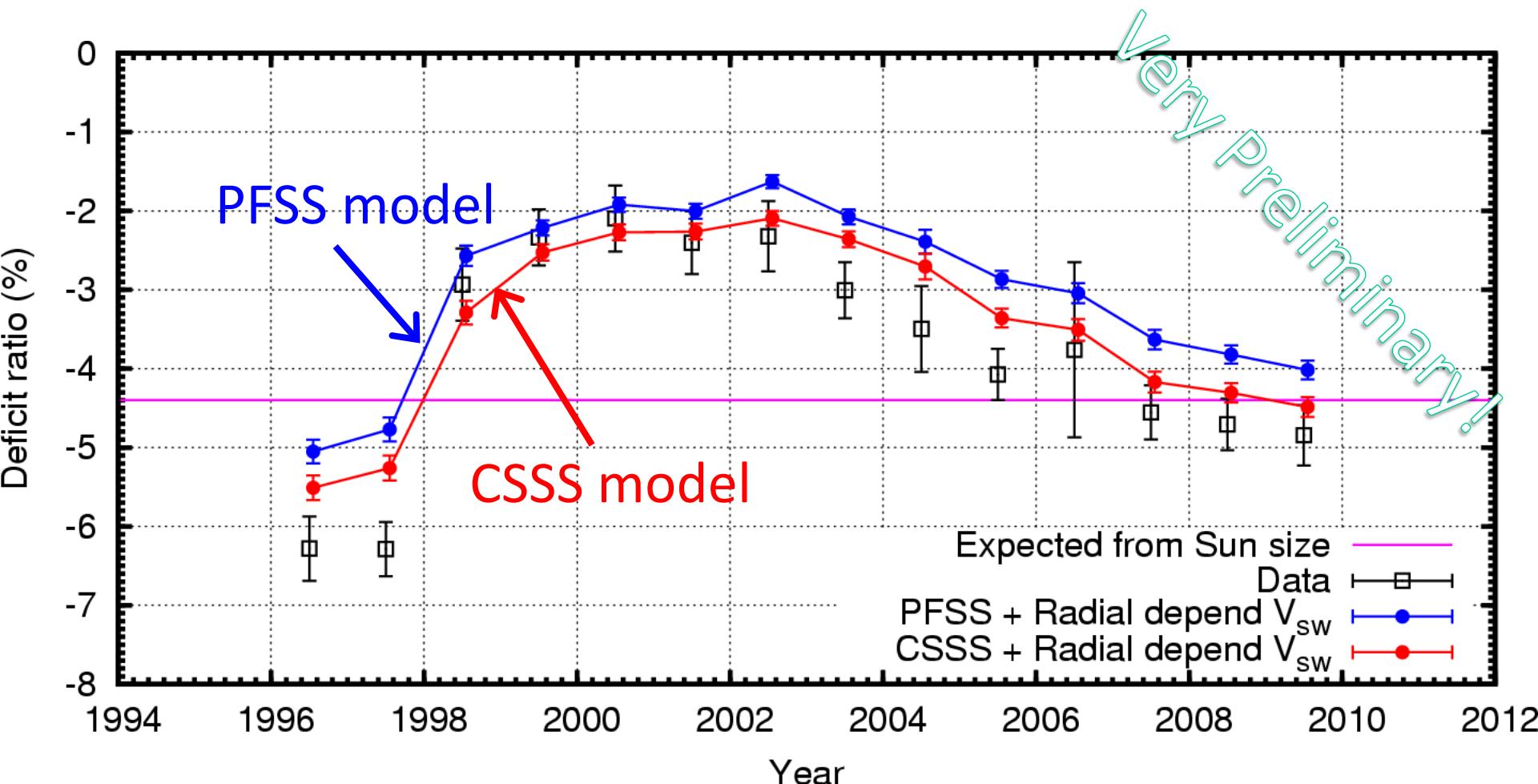
CSSS

CR1910
(Year1996)

PFSS



Comparison between **CSSS** and **PFSS**



Data – MC(PFSS) $\chi^2/\text{dof} = 68.7/14 (5.7\sigma)$
Data – MC(CSSS) $\chi^2/\text{dof} = 24.3/14 (1.7\sigma)$

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」の連續観測に成功
→ 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中
→ 太陽の影は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磁場モデルが
実験データを依り良く再現