

Solar Neutron Events Associated with Large Solar Flares in Solar Cycle 23

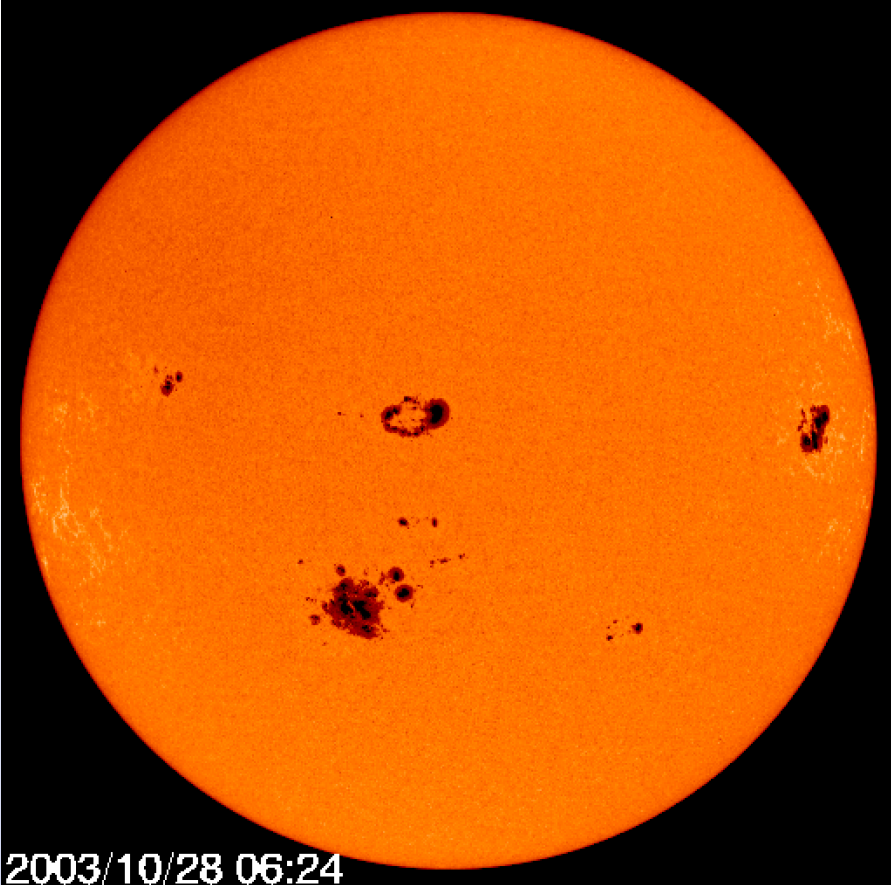
第23太陽活動期に観測された太陽中性子イベント

名古屋大学太陽地球環境研究所 渡邊 恭子

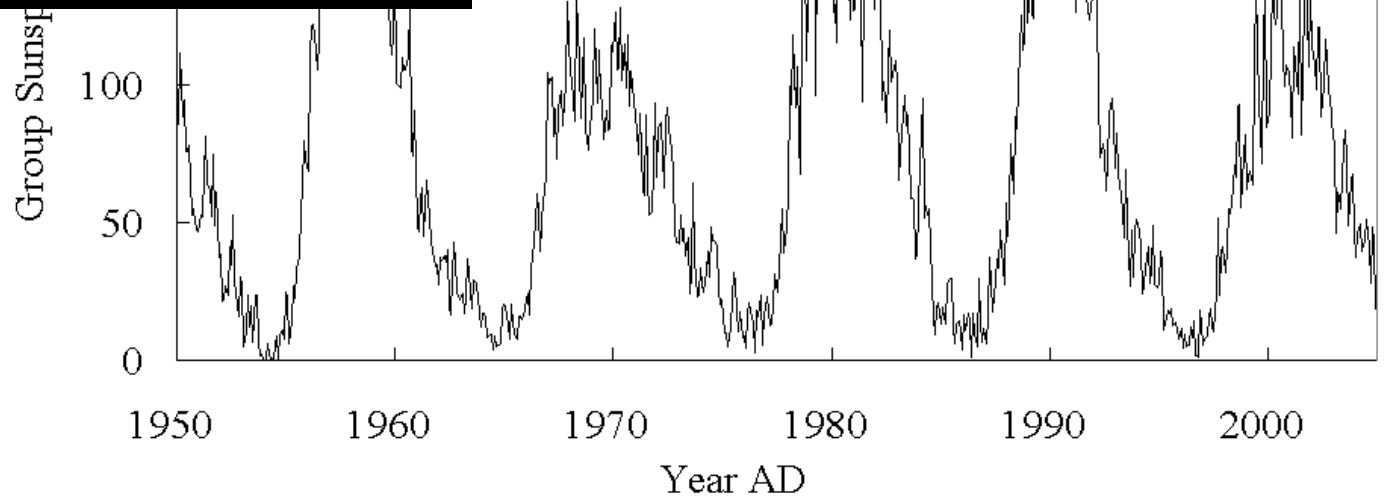
— 目次 —

- はじめに
- 太陽中性子観測装置
- 第23太陽活動期に観測された太陽中性子イベント
2003年10月28日：Tsumeb 中性子モニター
- 太陽中性子イベントの傾向
- まとめ
- 最新太陽中性子イベント：2005年9月7日

太陽黒点数の変動

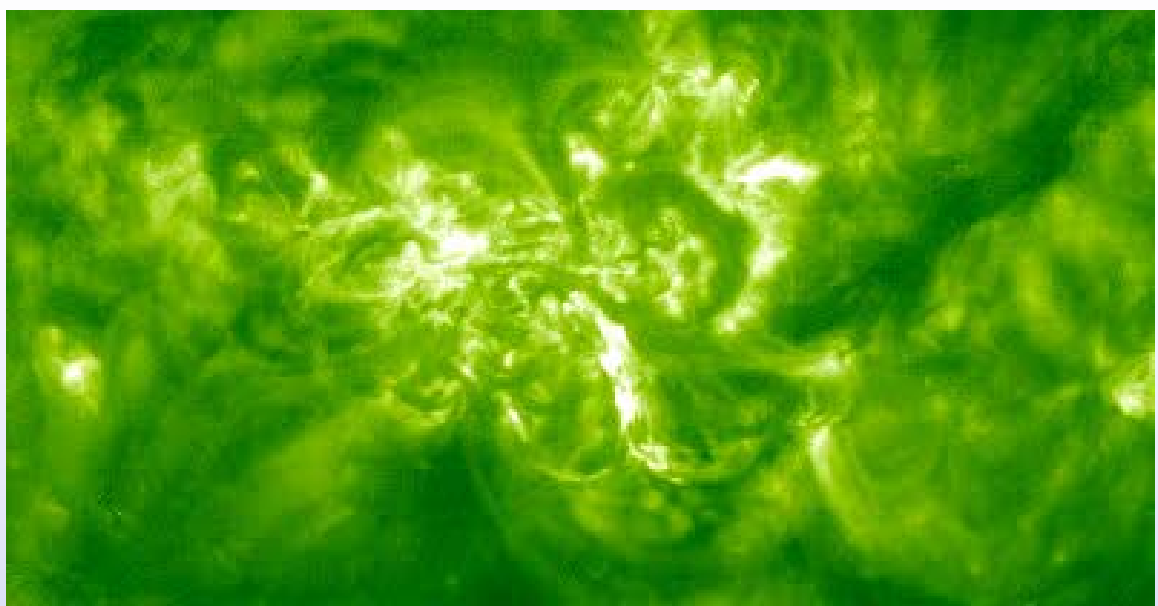


第23太陽活動期

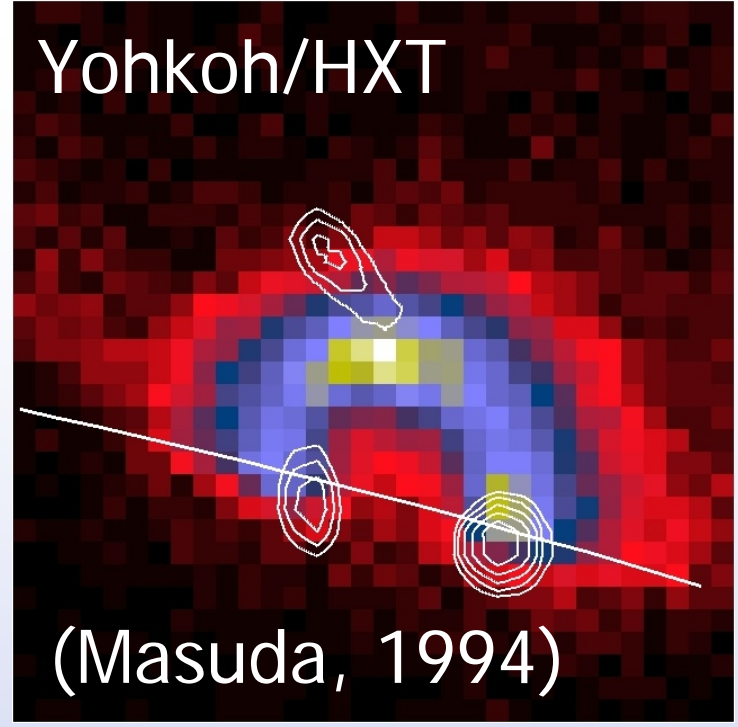


太陽フレア

SOHO/EIT



Yohkoh/HXT

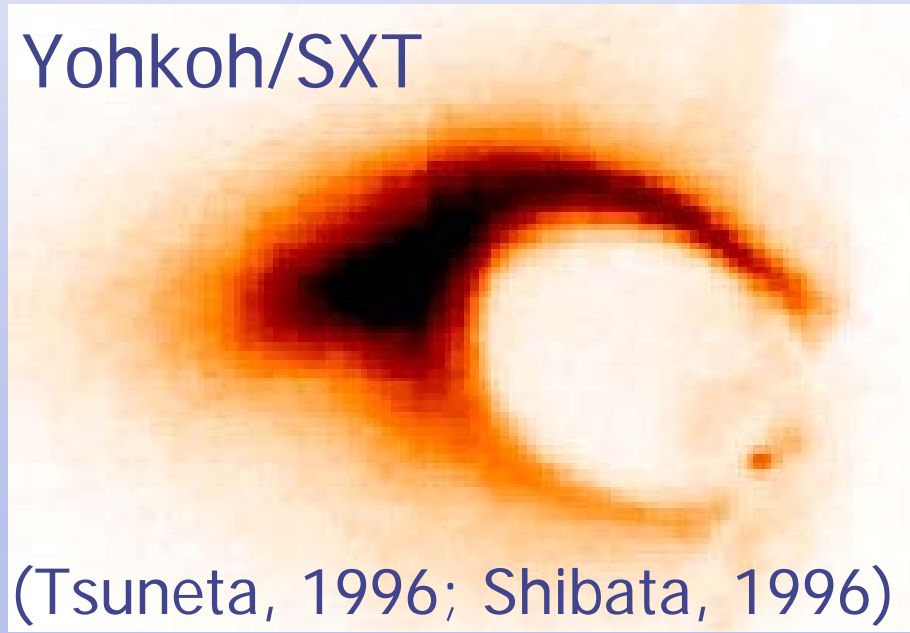


(Masuda, 1994)



TRACE

Yohkoh/SXT



(Tsuneta, 1996; Shibata, 1996)

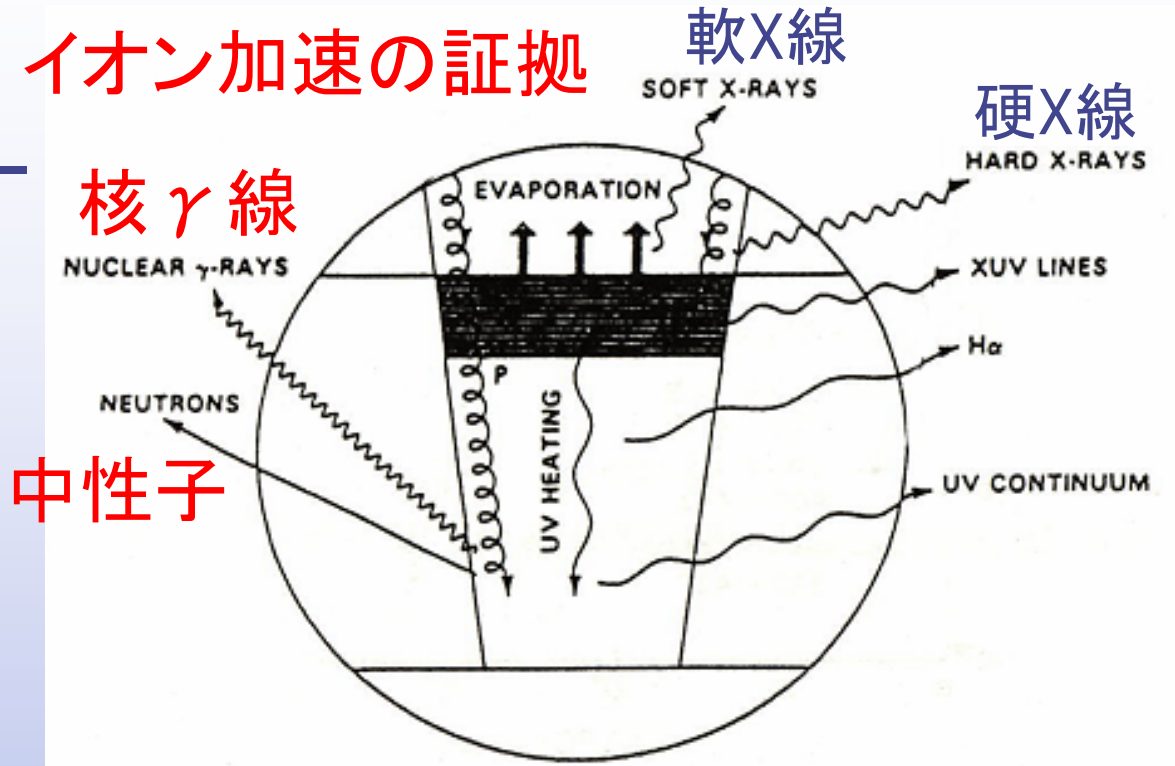
太陽フレア

全放出エネルギー
 $10^{29} - 10^{33}$ erg
($10^{22} - 10^{26}$ J)

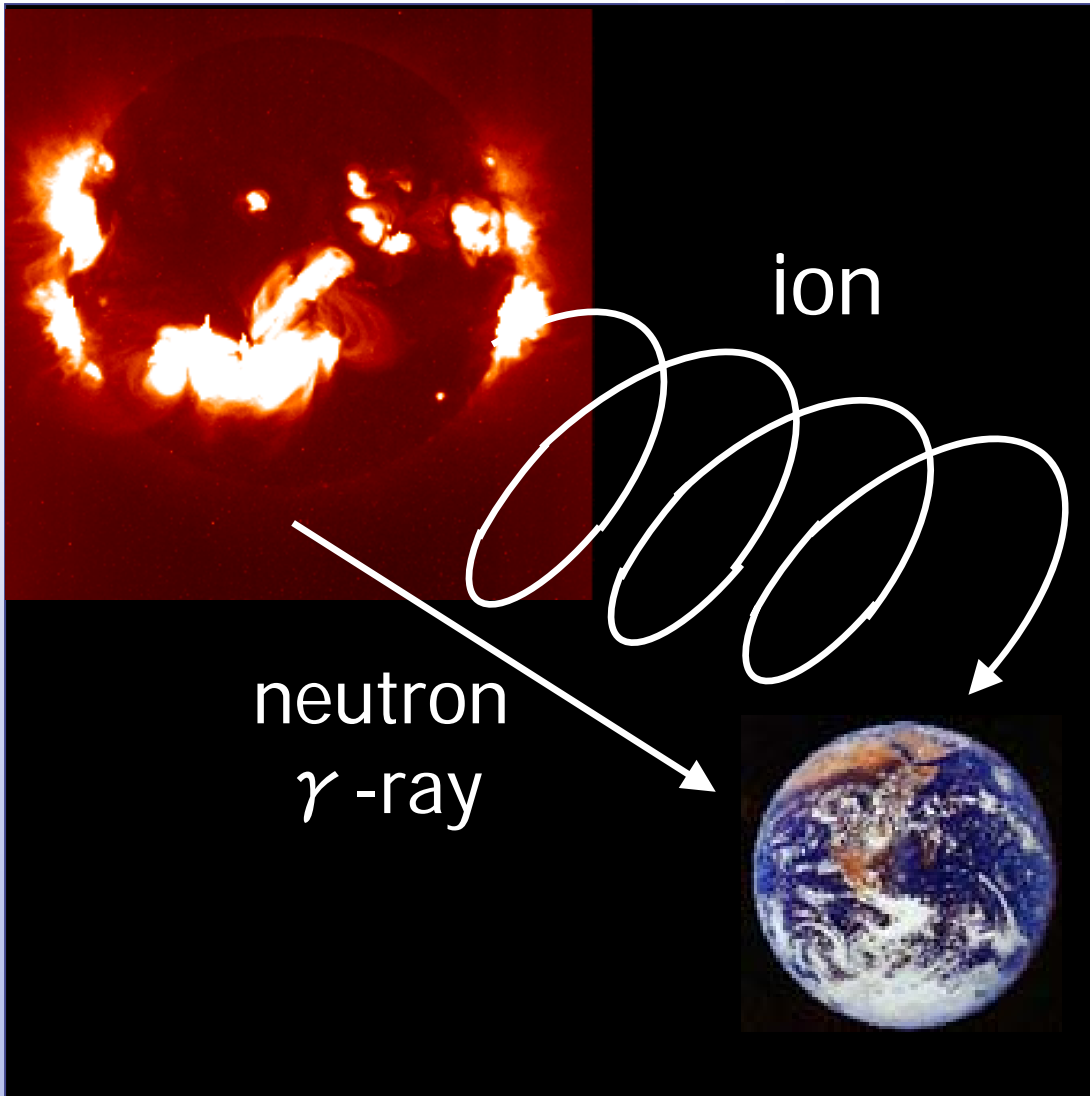
- 電磁波放射
- プラズマ加熱
- 粒子加速

✓ 電子加速・・・制動放射 X線・ γ 線

✓ イオン加速・・・核 γ 線・中性子



太陽フレア現象におけるイオン加速機構の解明



太陽フレア現象により
イオンが加速



加速イオンと太陽大気
との相互作用

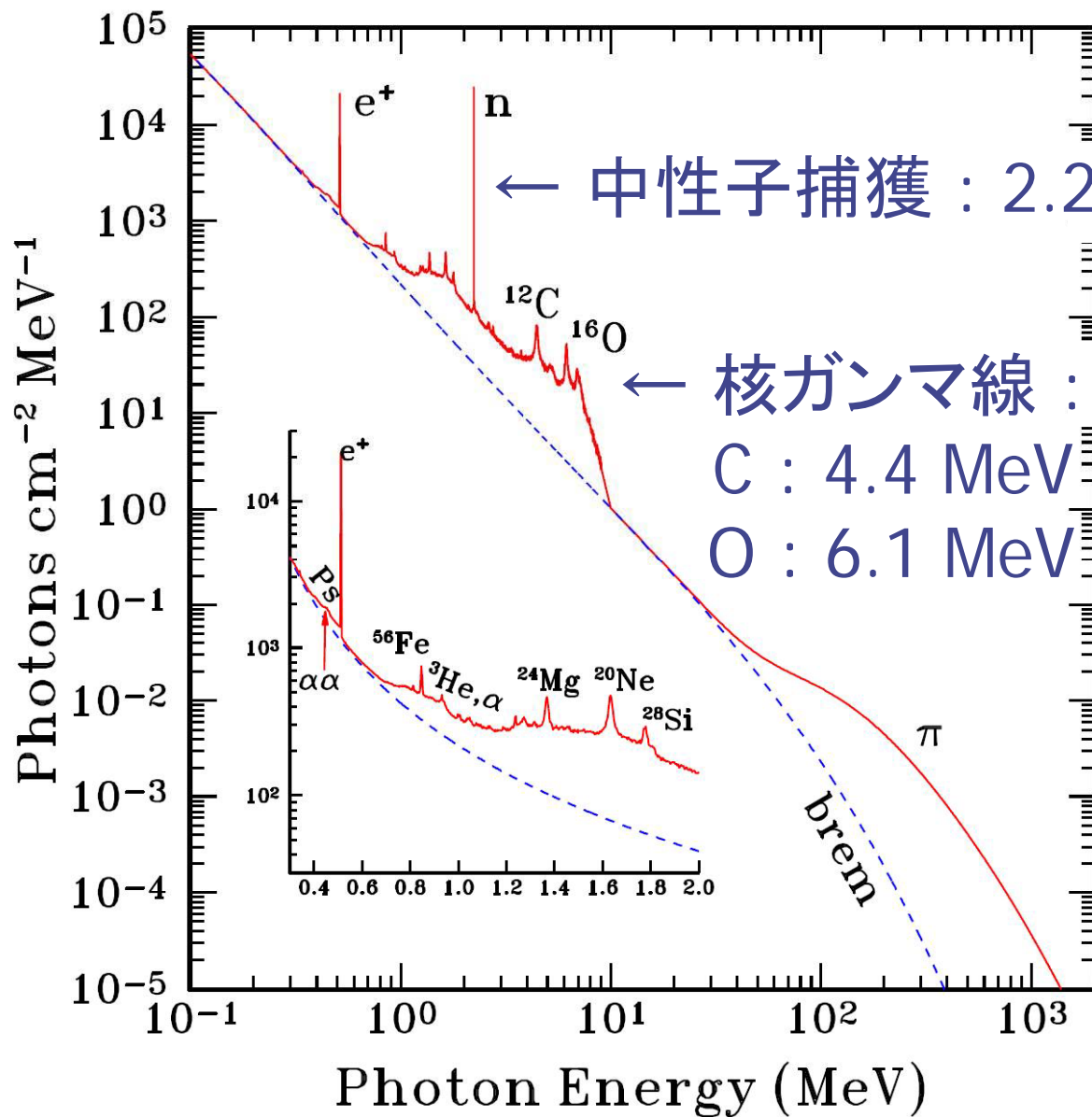
太陽中性子・核 γ 線

- 時刻
- エネルギー
- 方向



磁場の影響を受けずに
まっすぐ地球に到達

ガンマ線スペクトル @ 太陽フレア



← 中性子捕獲 : 2.223 MeV

← 核ガンマ線 : 4 – 7 MeV

C : 4.4 MeV

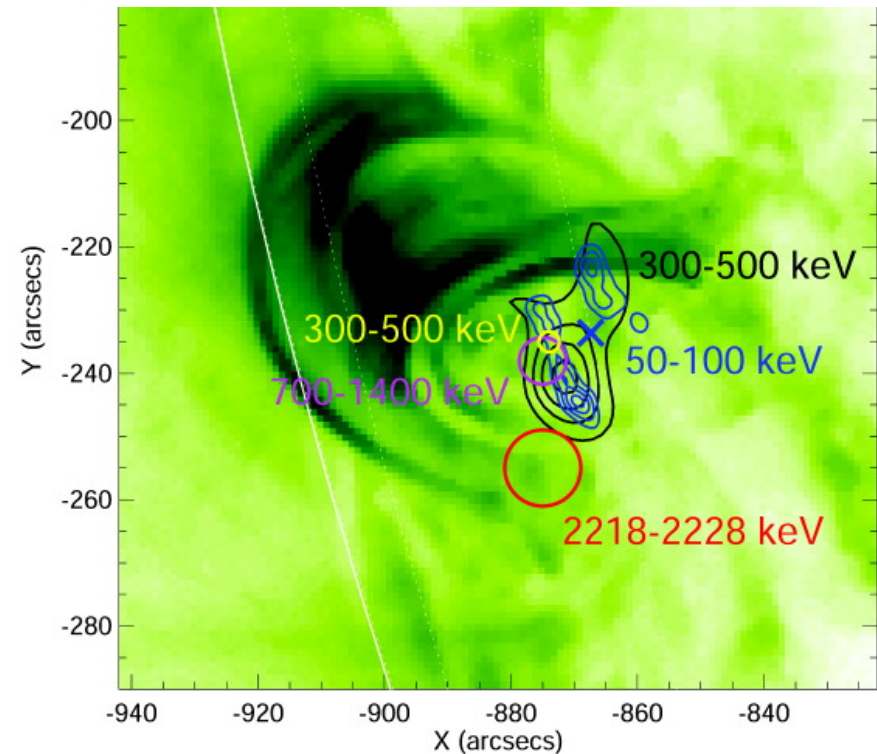
O : 6.1 MeV

太陽フレアガンマ線観測衛星

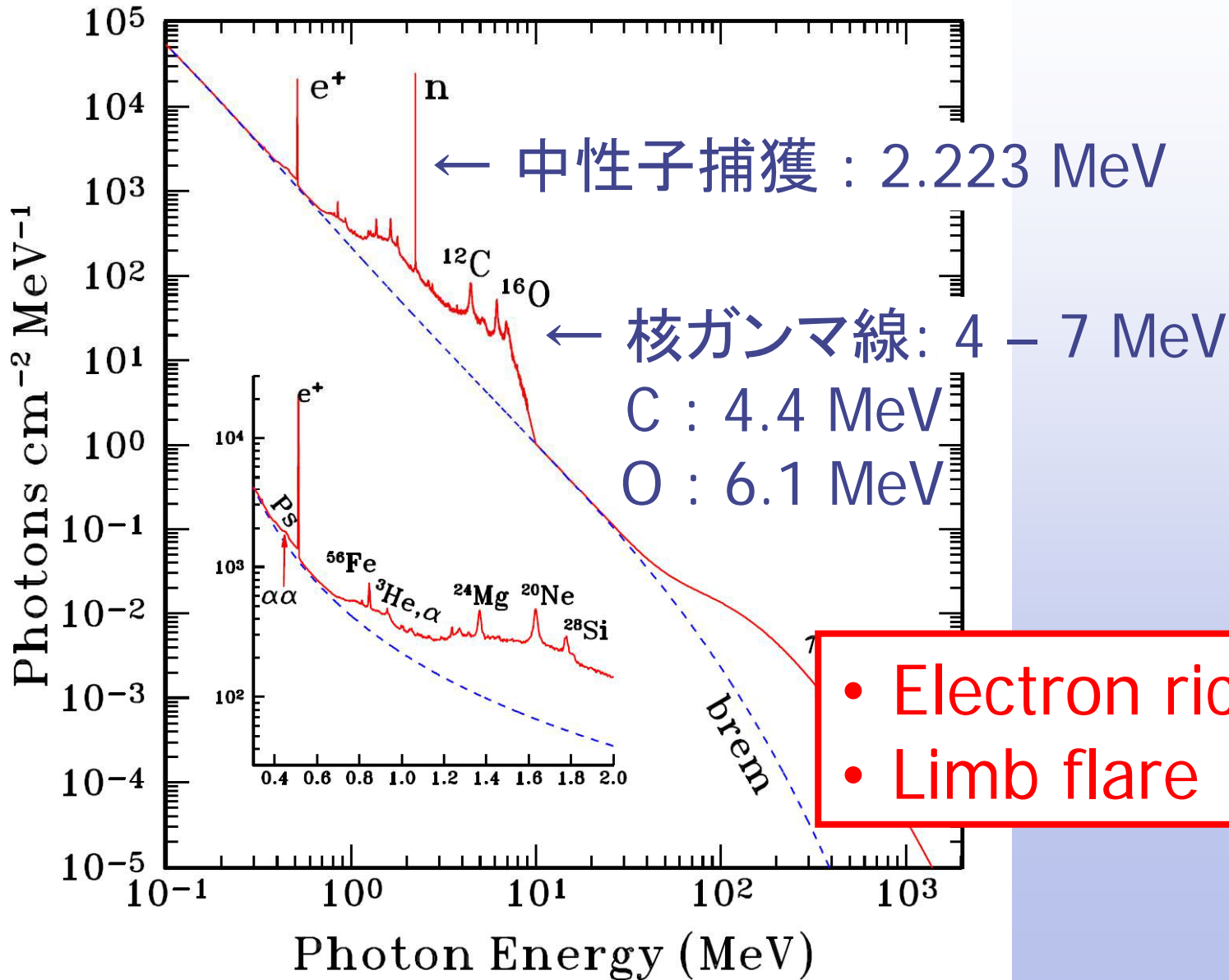
- 1980 – 1989 SMM/GRS
- 1991 – 2000 CGRO/BATSE,COMPTEL,OSSE,EGRET
- 1991 – 2000 Yohkoh/SXT,HXT,GRS
- 2001/07/30 – CORONAS-F
- 2002/02/05 – RHESSI
- 2002/10/17 – INTEGRAL
- GEOTAIL/LEP
- すざく/HXD-WAM



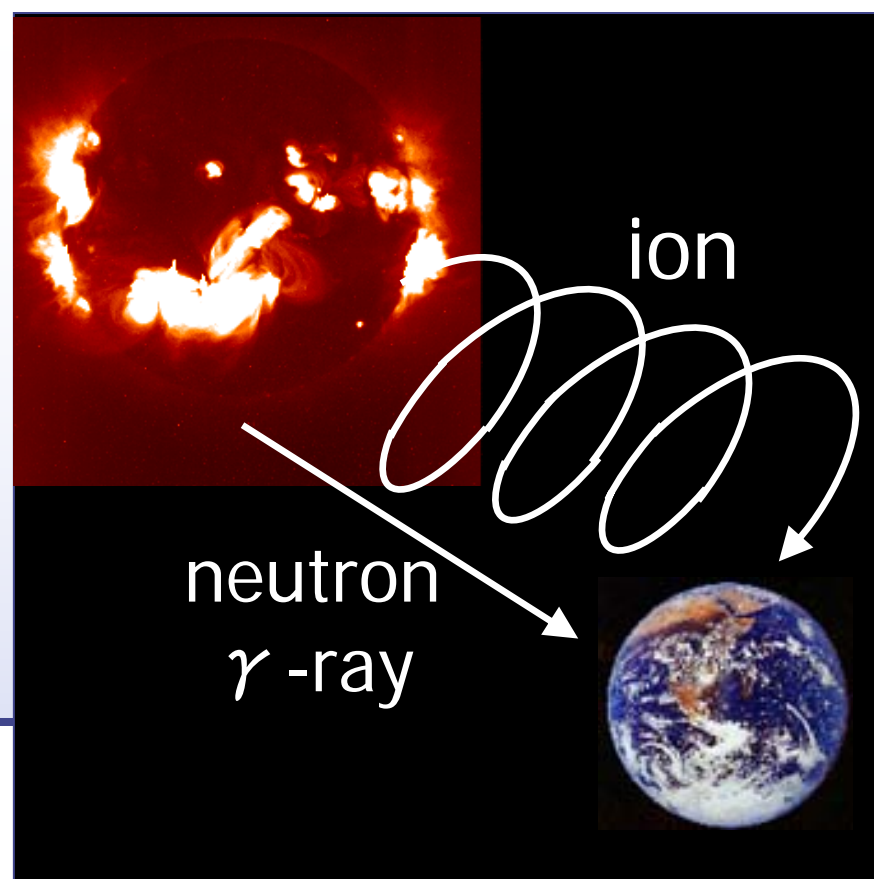
2002/07/23 RHESSI (Lin et al., 2003)



ガンマ線スペクトル @ 太陽フレア



太陽フレア時における
イオン加速機構の
解明には
太陽中性子が有用



太陽中性子観測の歴史

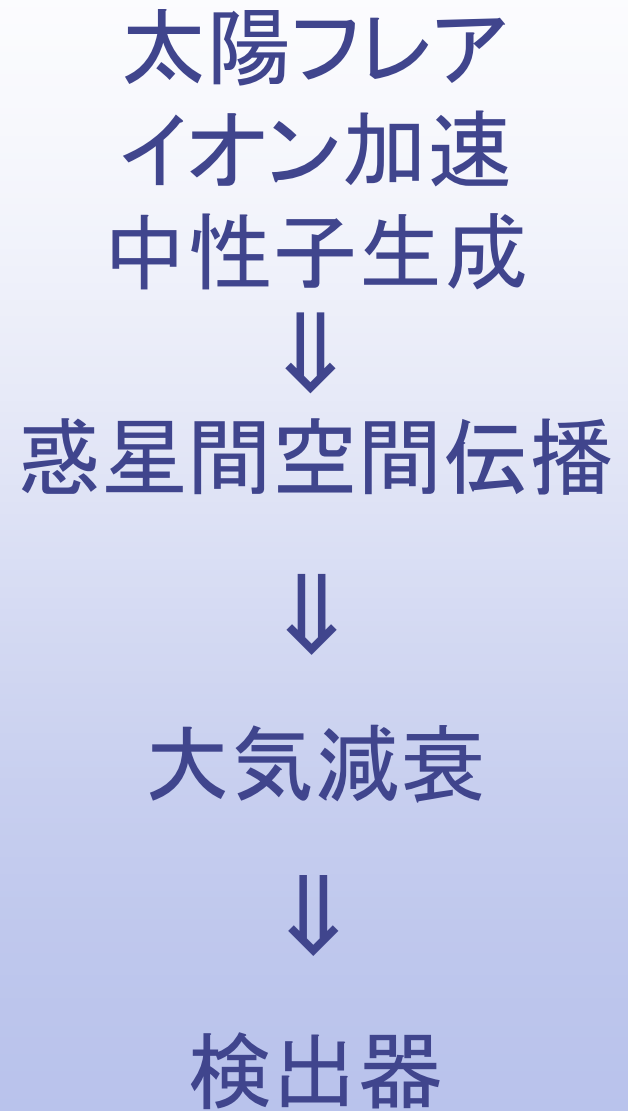
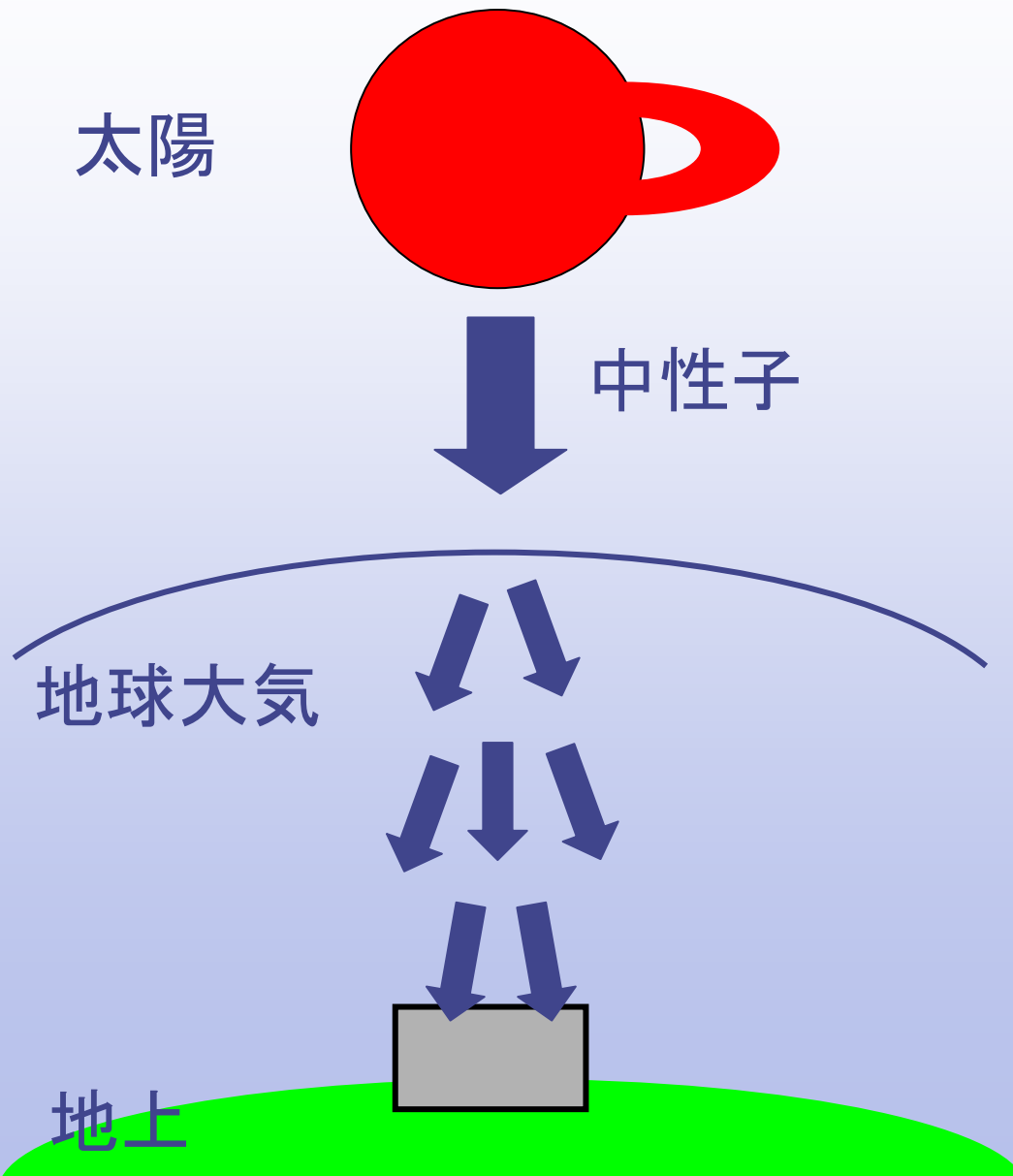
1951年 太陽中性子は地球近傍で観測可能

Biermann et al. (1951)

1980年6月21日 SMM/GRS

1982年6月03日 SMM/GRS &
Jungfraujoch neutron monitor

太陽中性子観測



粒子加速モデル

- 統計加速 (Miller et al., 1990; Ramaty & Murphy, 1987)

$$\frac{dN}{dE} = \frac{6q}{p_0 c \alpha} I_2(x_0) K_2(x) \quad (E_0 < E \ll mc^2)$$

$$\frac{dN}{dE} = \left[\frac{3q}{\alpha E_0 (9 + 12/\alpha T)^{1/2}} \right] \left(\frac{E}{E_0} \right)^{\frac{1}{2} - \frac{1}{2}(9 + 12/\alpha T)^{1/2}} \quad (mc^2 \ll E_0 < E)$$

ベッセル関数

- ショック加速 (Ellison & Ramaty, 1985)

$$\frac{dN}{dE} \propto n_0 (E_0^2 + 2E_0 m_0 c^2)^{3/[2(r-1)]} \times (E^2 + 2E m_0 c^2)^\Gamma$$

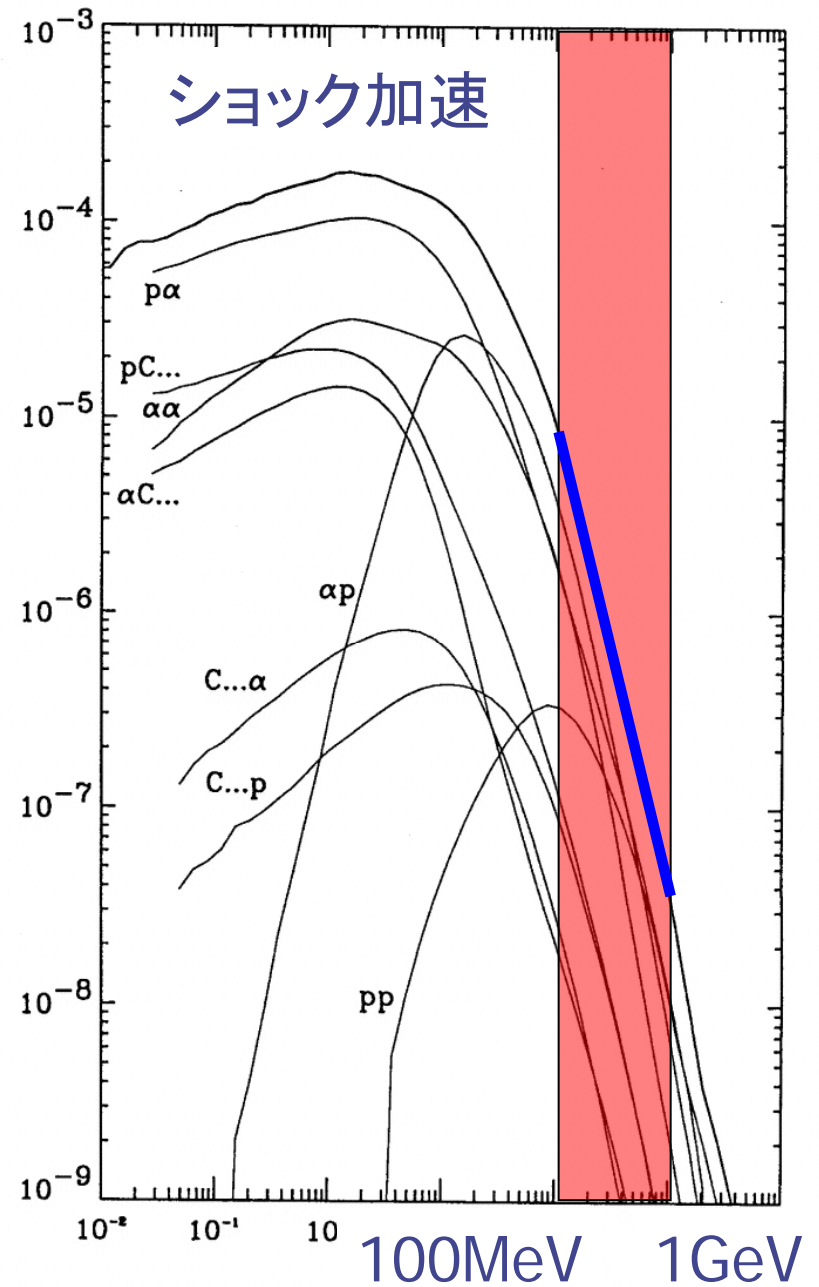
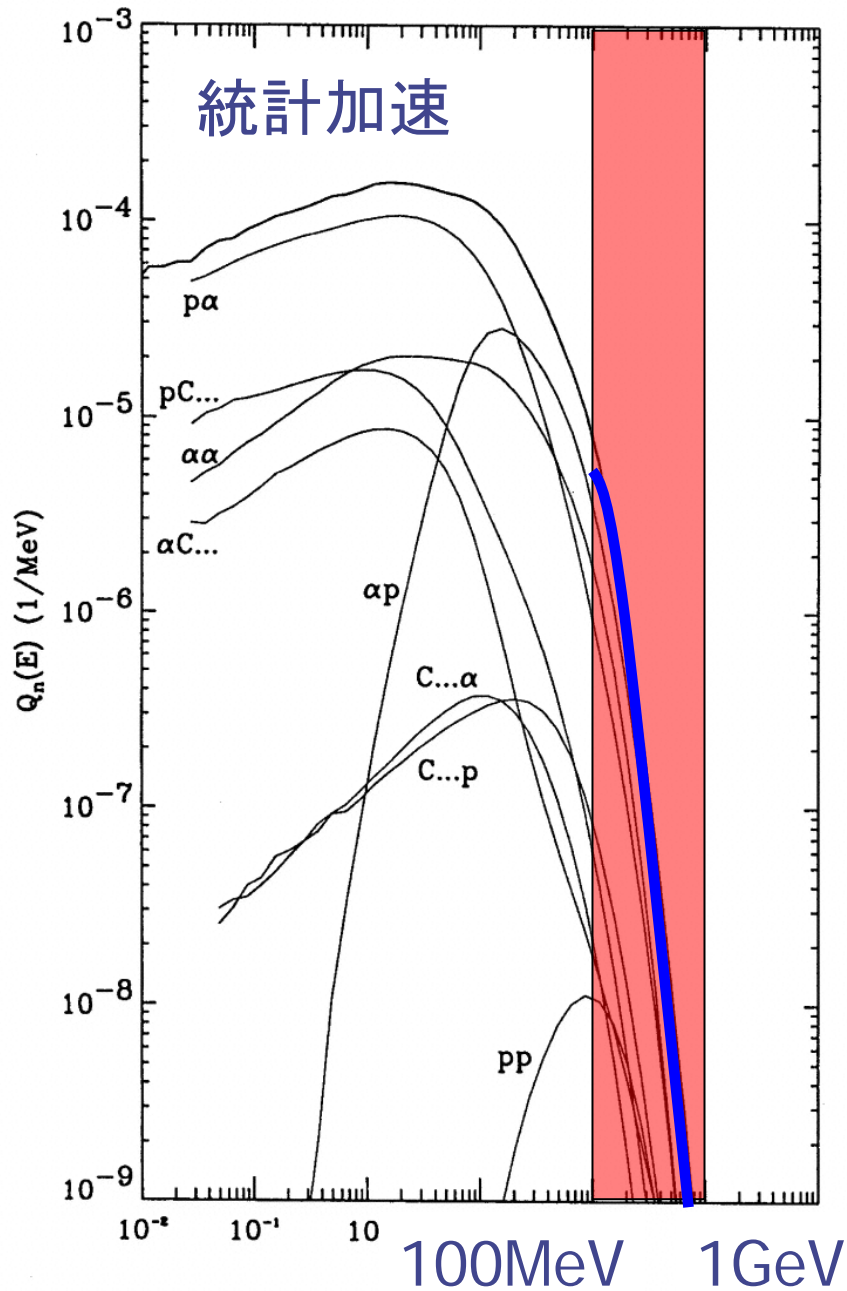
$$\Gamma = \frac{1}{2} \frac{r+2}{r-1} \quad (E_0 < E \ll mc^2)$$

$$\Gamma = \frac{r+2}{r-1} \quad (mc^2 \ll E_0 < E)$$

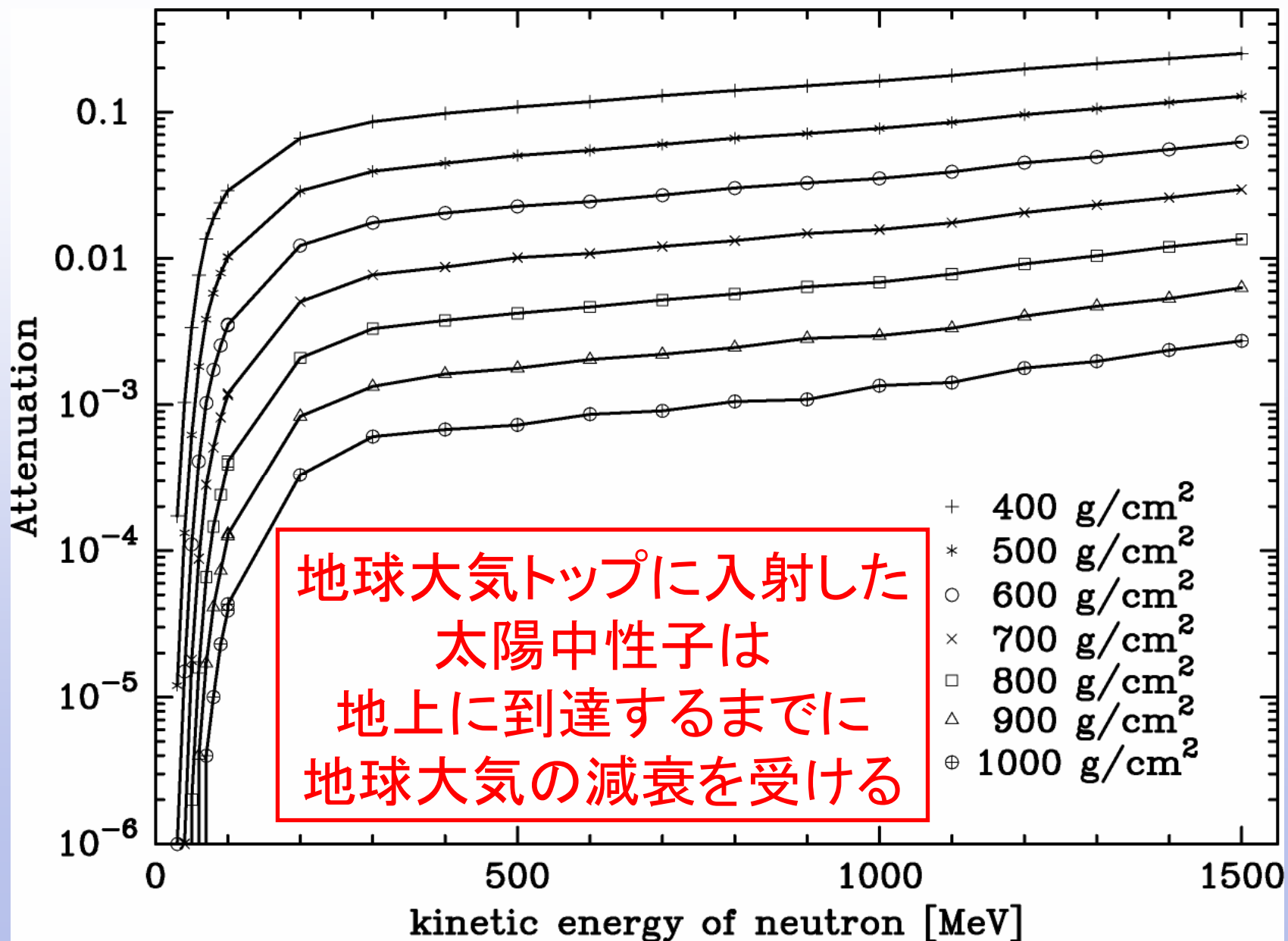
べき関数

- DC加速
- 共鳴加速etc.

太陽中性子のスペクトル(太陽表面)

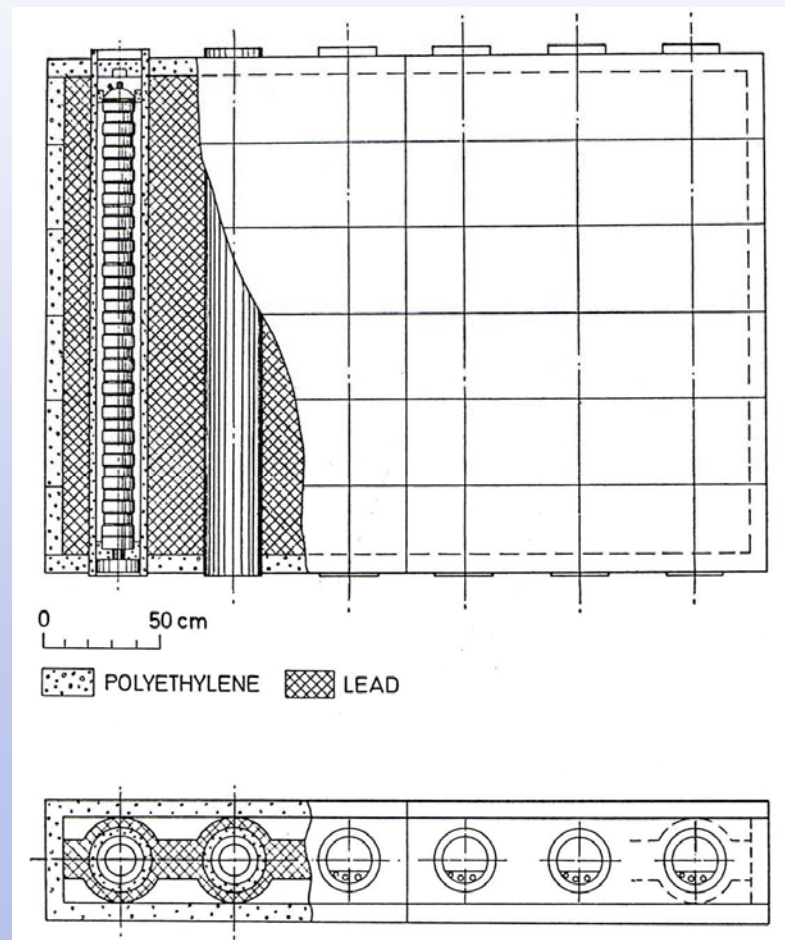


太陽中性子の大気伝播: Shibata model

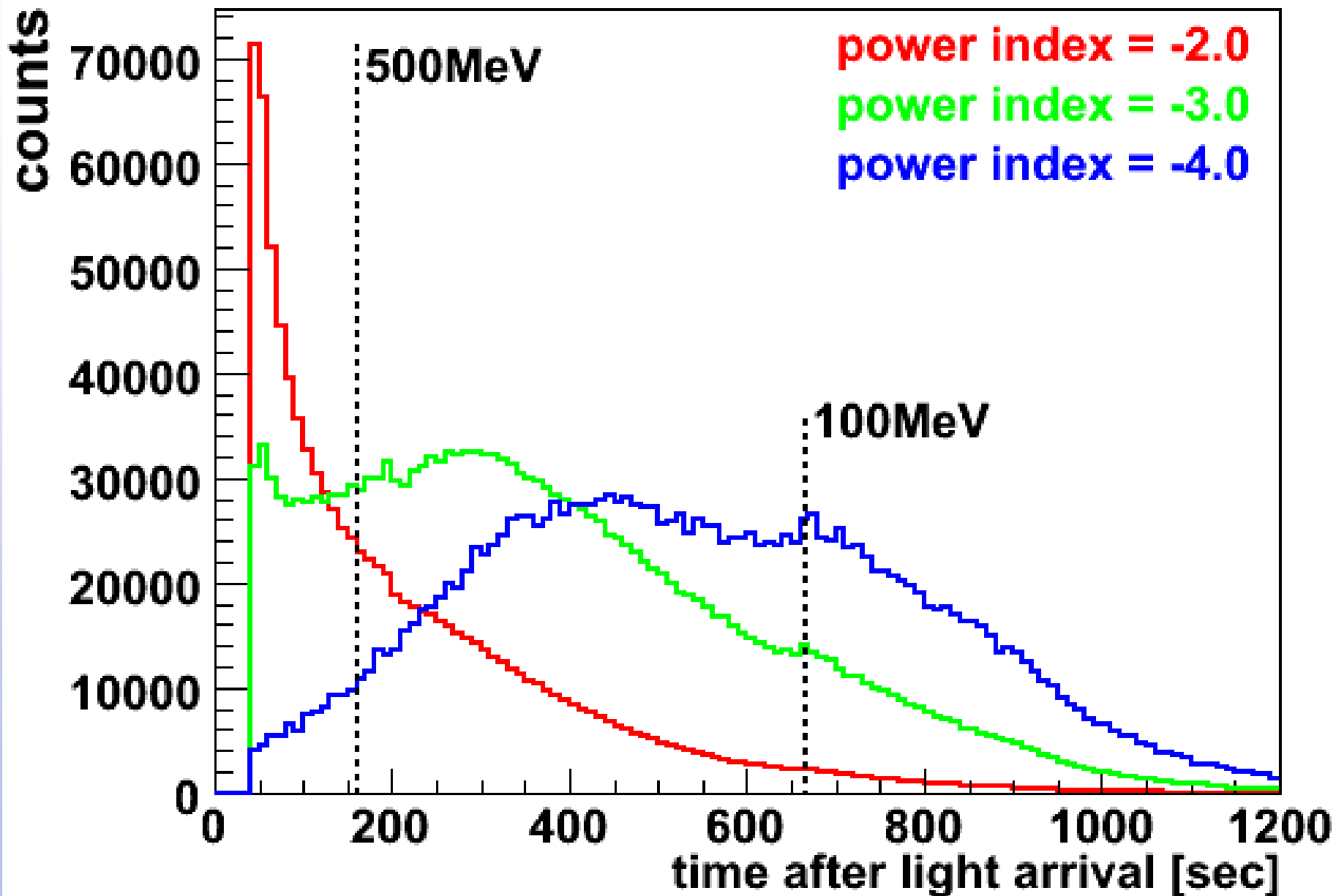


太陽中性子観測装置

- 太陽中性子望遠鏡
- ニュートロンモニター
 - 宇宙線変動観測装置
 - エネルギー測定不可能
太陽表面での中性子
発生時刻を仮定
↓
TOF法を用いて
エネルギー測定可能

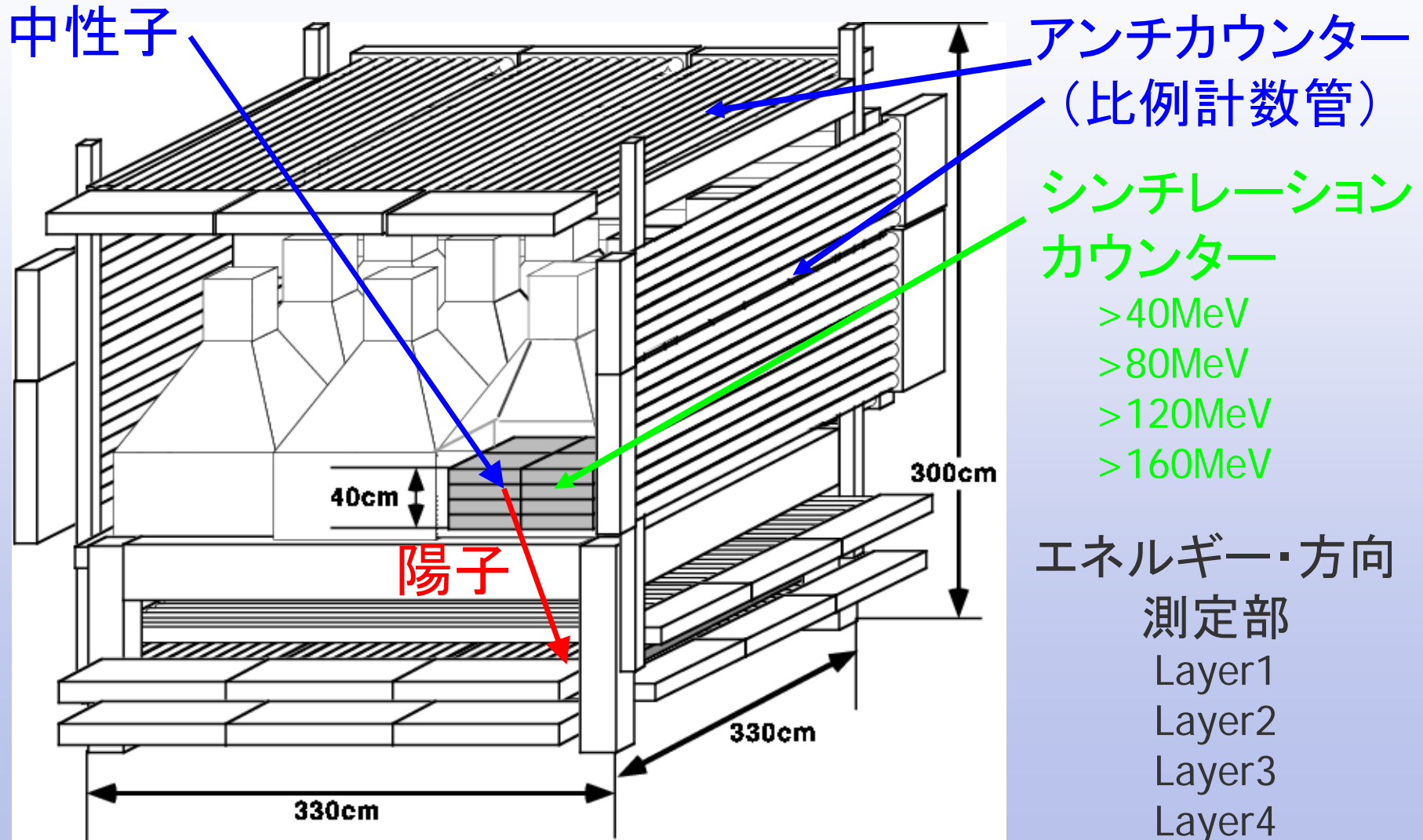


中性子タイムプロファイル(中性子モニター)

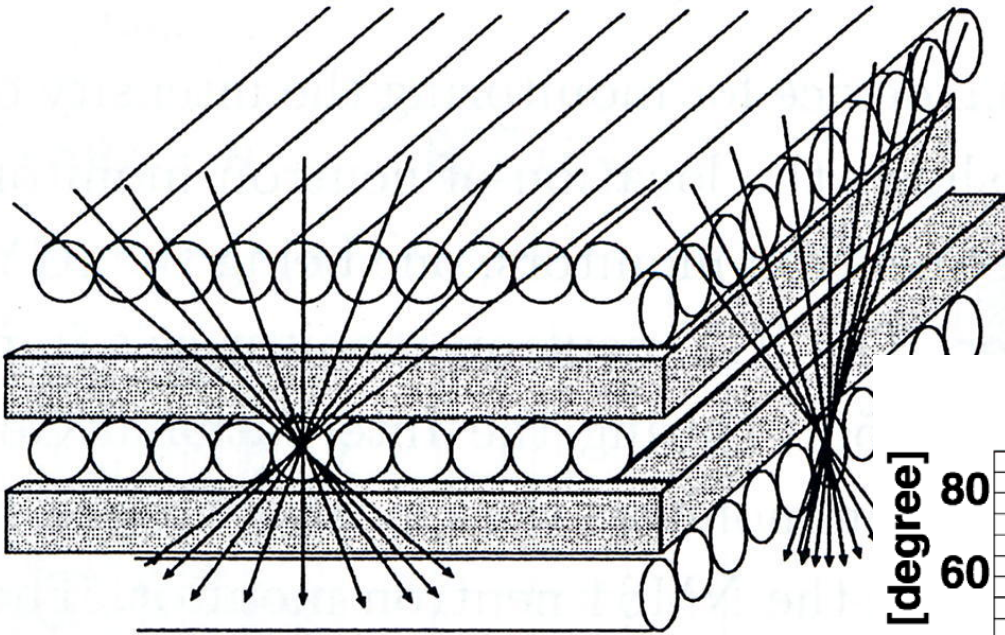


太陽中性子望遠鏡（チベット）

エネルギー測定・中性子到来方向測定可能

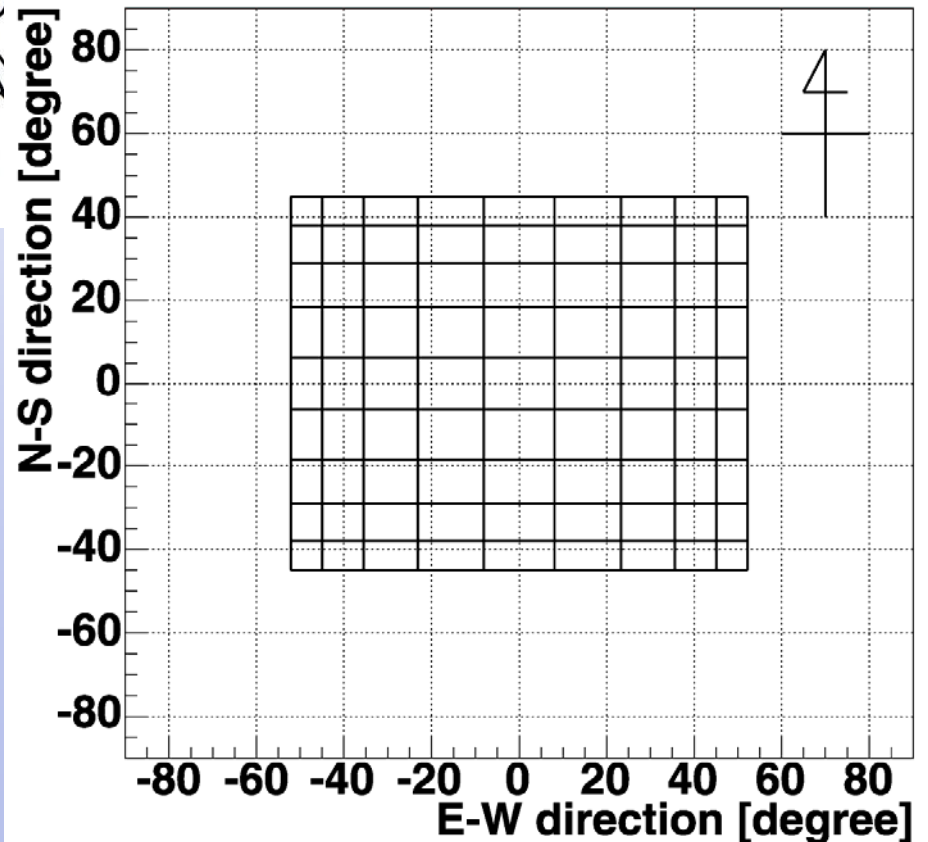


太陽中性子望遠鏡 (チベット)



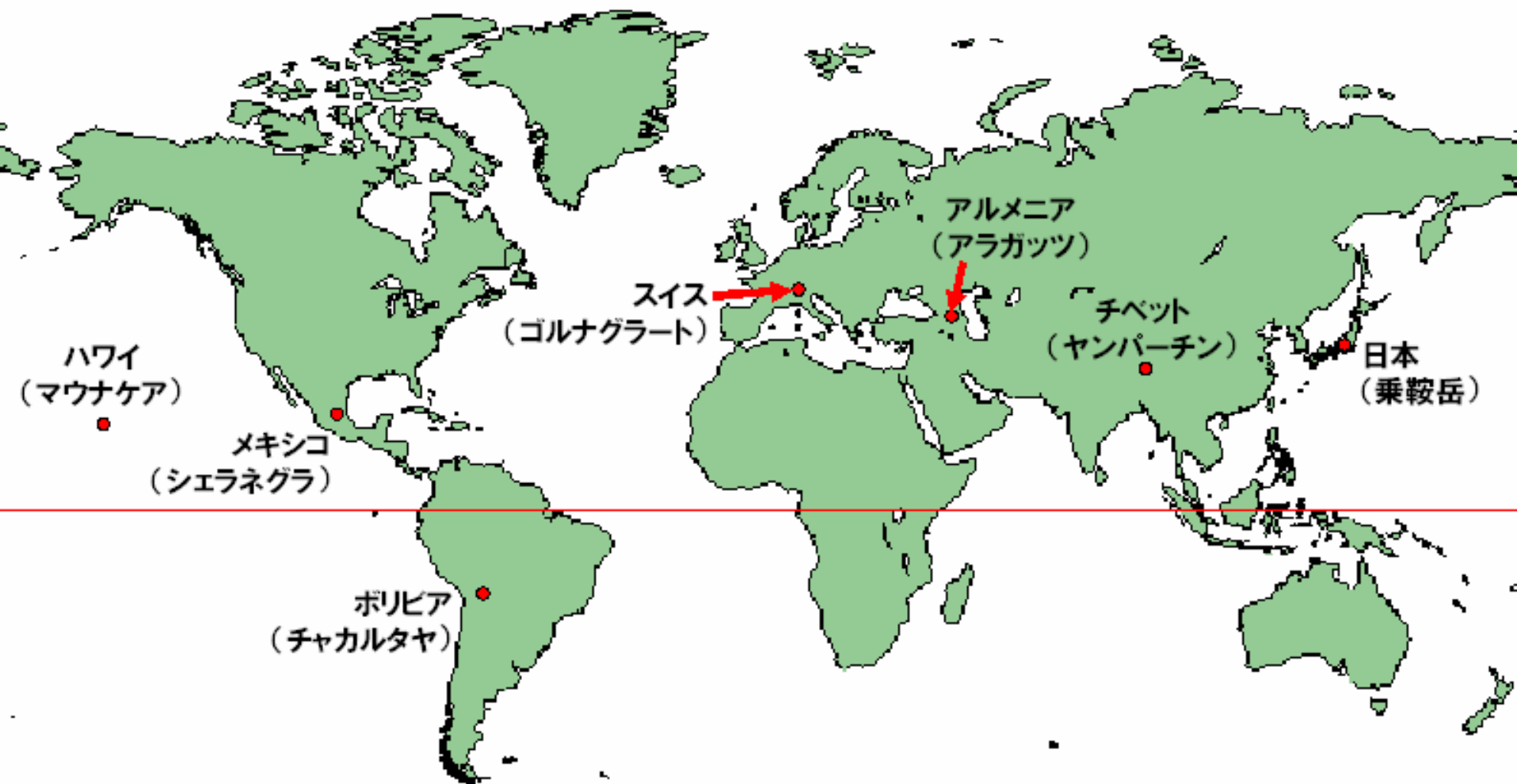
N

Tibet FOV



東西方向: 9 方向
南北方向: 9 方向
⇒ 全 81 方向

太陽中性子望遠鏡国際ネットワーク



過去に地上で観測された 太陽中性子イベント

Date	Time [UT]	Observatory	X-ray class	Sunspot Location
1982/06/03	11:43	Jungfrauoch	X 8.0	S09 E72
1990/05/24	20:48	Climax	X 9.3	N36 W76
1991/03/22	22:44	Haleakara	X 9.4	S26 E28
1991/06/04	03:37	Mt.Norikura	X12.0	N30 E70
1991/06/06	00:58	Mt.Norikura Haleakara	X12.0	N33 E44

第23太陽活動期に観測された 太陽中性子イベント

- 2000年11月24日 14:51UT X2.3 (Watanabe et al., ApJ, 2003)
Chacaltaya (Bolivia) ニュートロンモニター
- 2001年08月25日 16:23UT X5.3 (Watanabe et al., ICRC, 2003)
Chacaltaya (Bolivia) ニュートロンモニター
- 2003年10月28日 9:51UT X17.2 (Watanabe et al., ApJ, 2006;
Birber et al., 2005, GRL)
Tsumeb (Namibia) ニュートロンモニター
- 2003年11月02日 17:03UT X8.3 (Watanabe et al.,
ASR, ICRC, 2005)
Chacaltaya (Bolivia) ニュートロンモニター
- 2003年11月04日 19:29UT X28 (Watanabe et al.,
ASR, ICRC, 2005; ApJ, 2006)
Haleakala (Hawaii) ニュートロンモニター

2003/10/28 太陽フレア

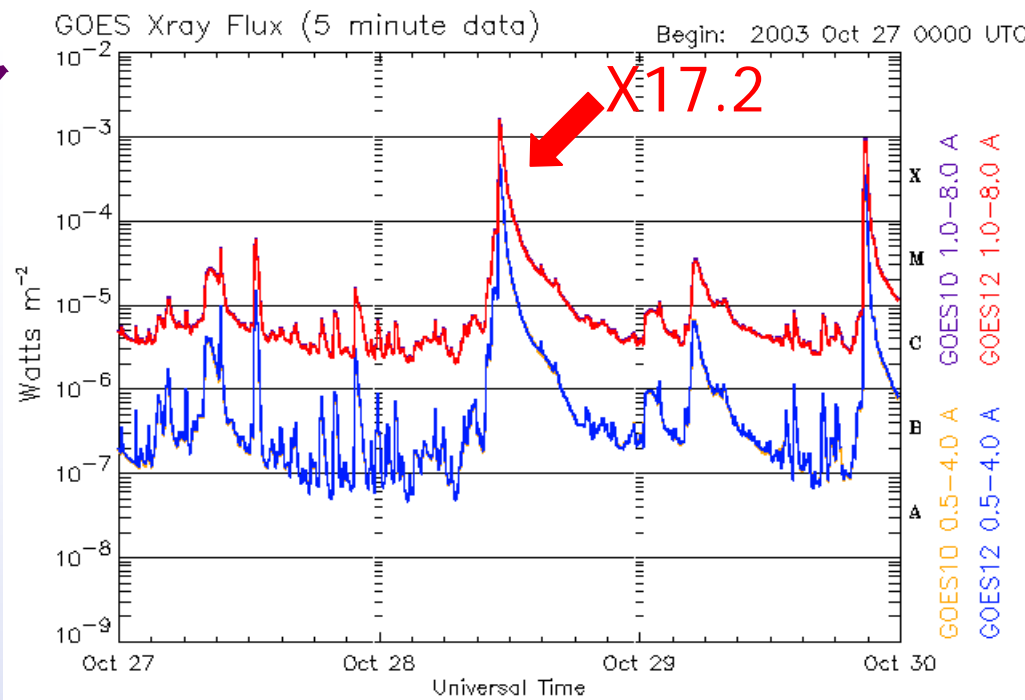
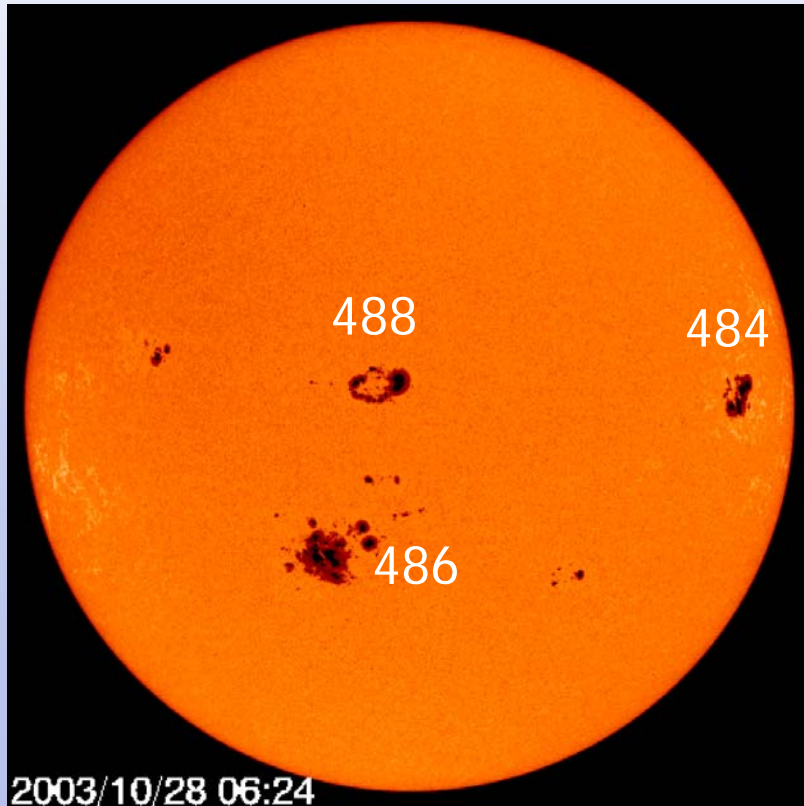
GOES : X17.2/4B

start - 09:51 UT

max - 11:10 UT

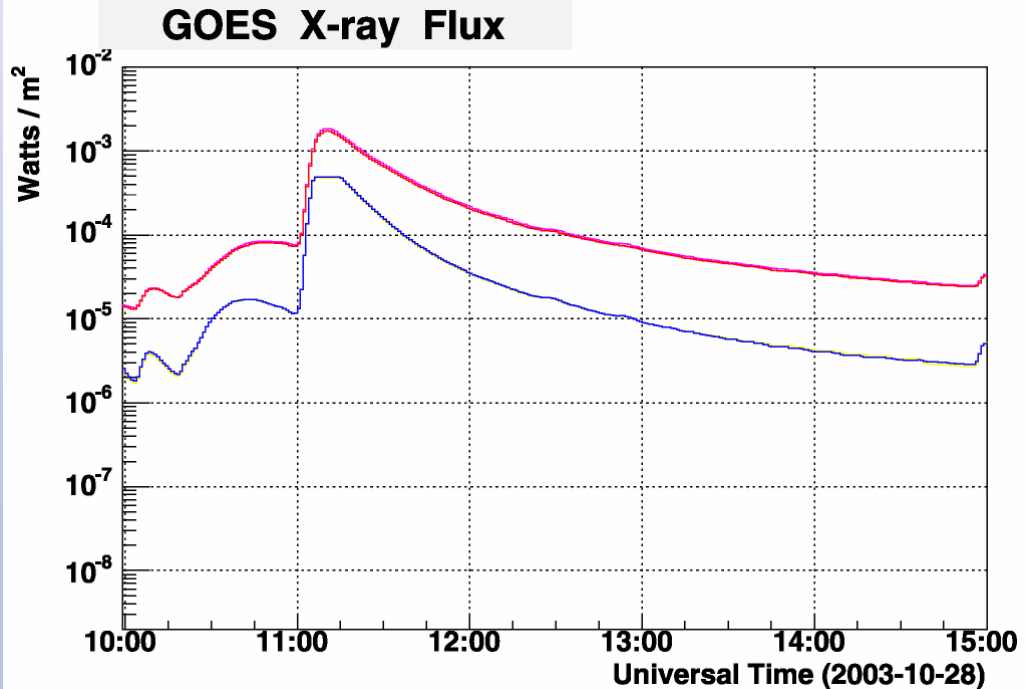
end - 11:24 UT

Region: 486 (S16 E08)

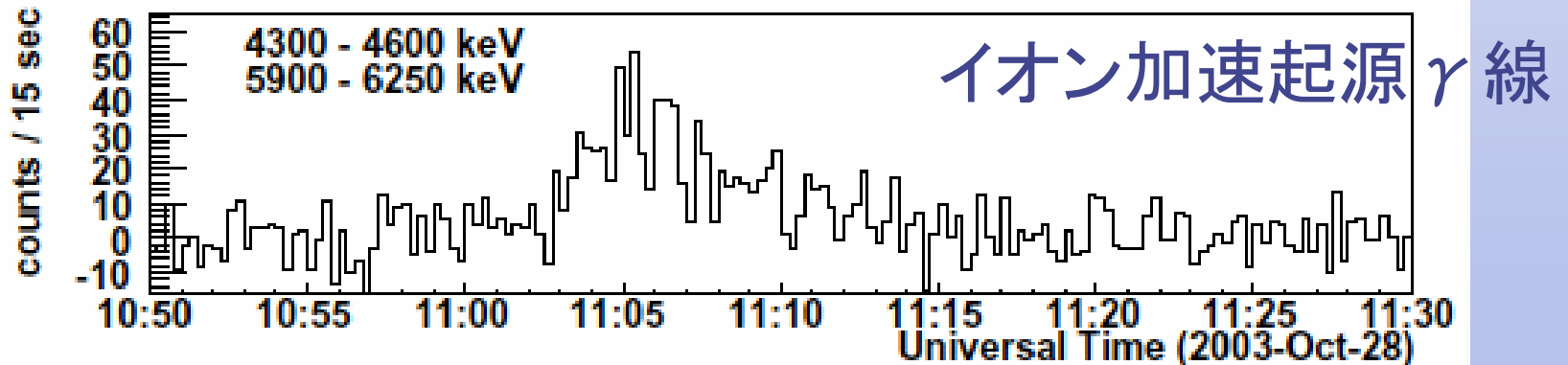
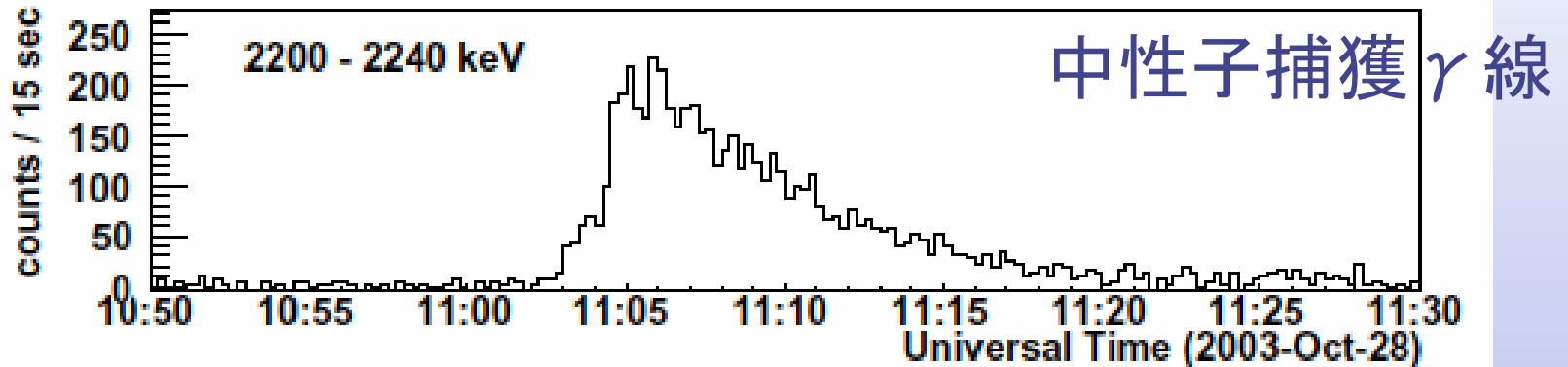
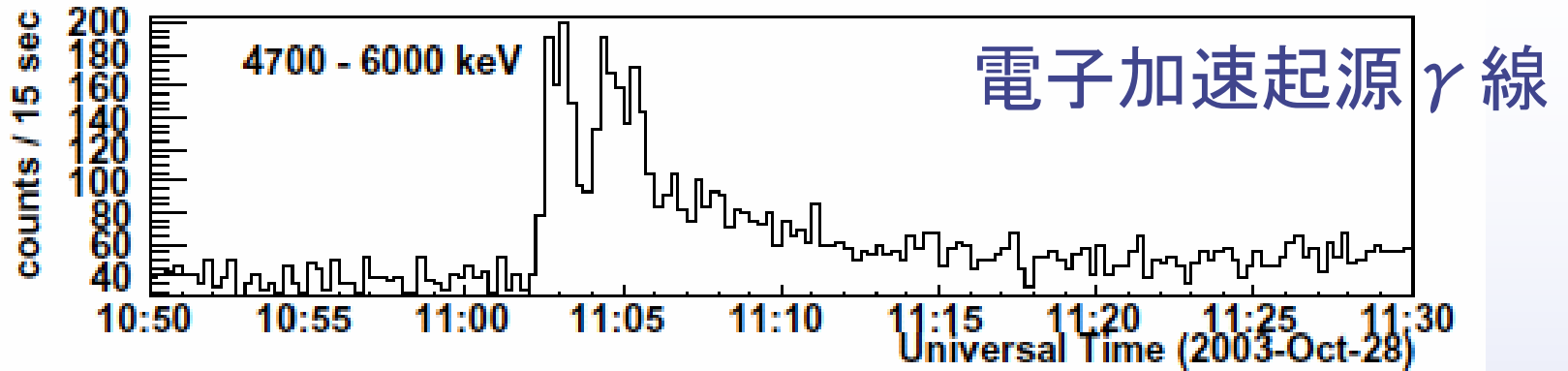


Updated 2003 Oct 29 23:56:02 UTC

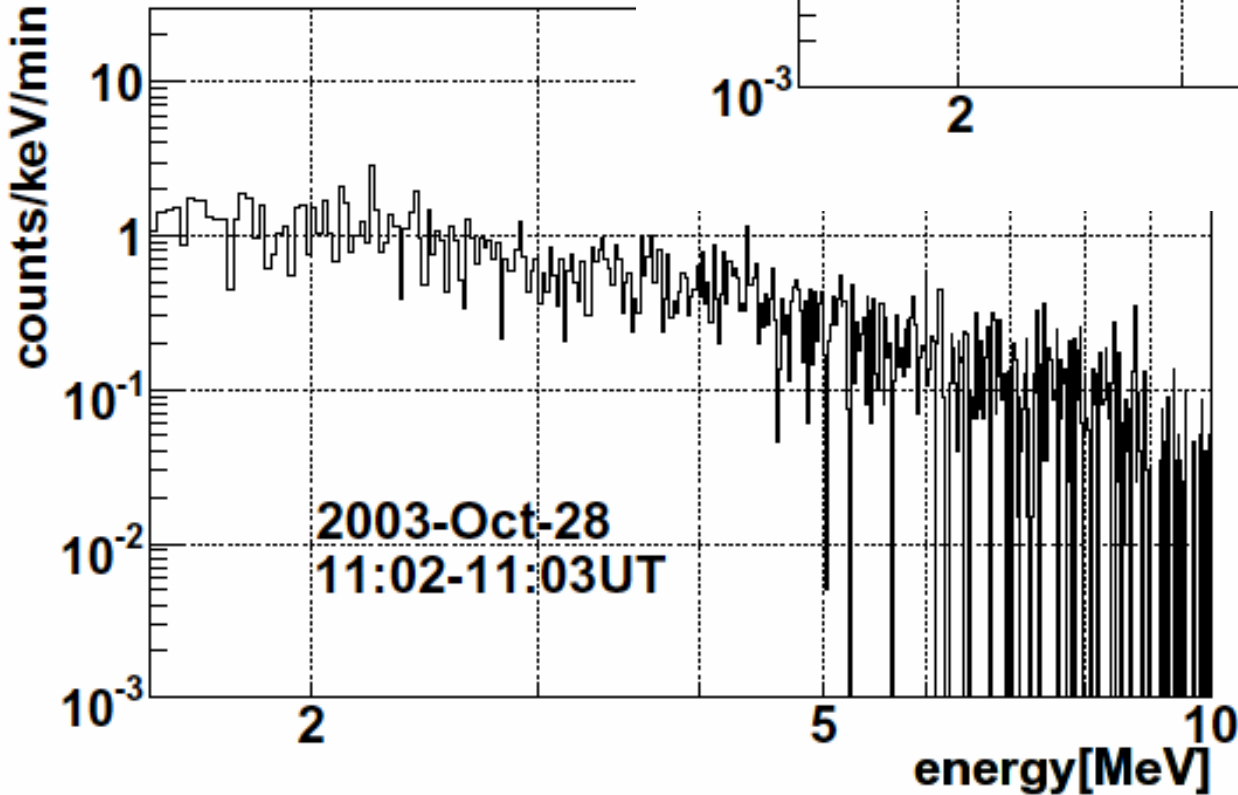
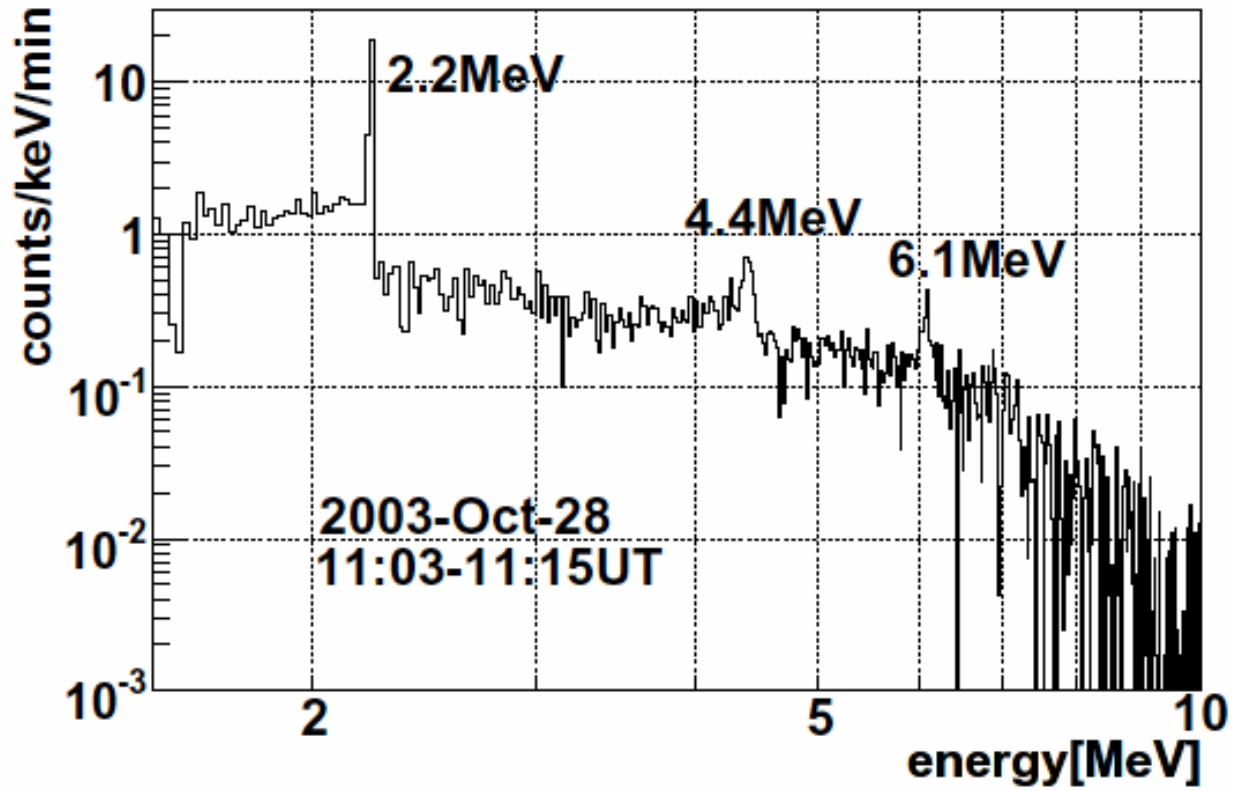
NOAA/SEC Boulder, CO USA



2003年10月28日 INTEGRAL衛星

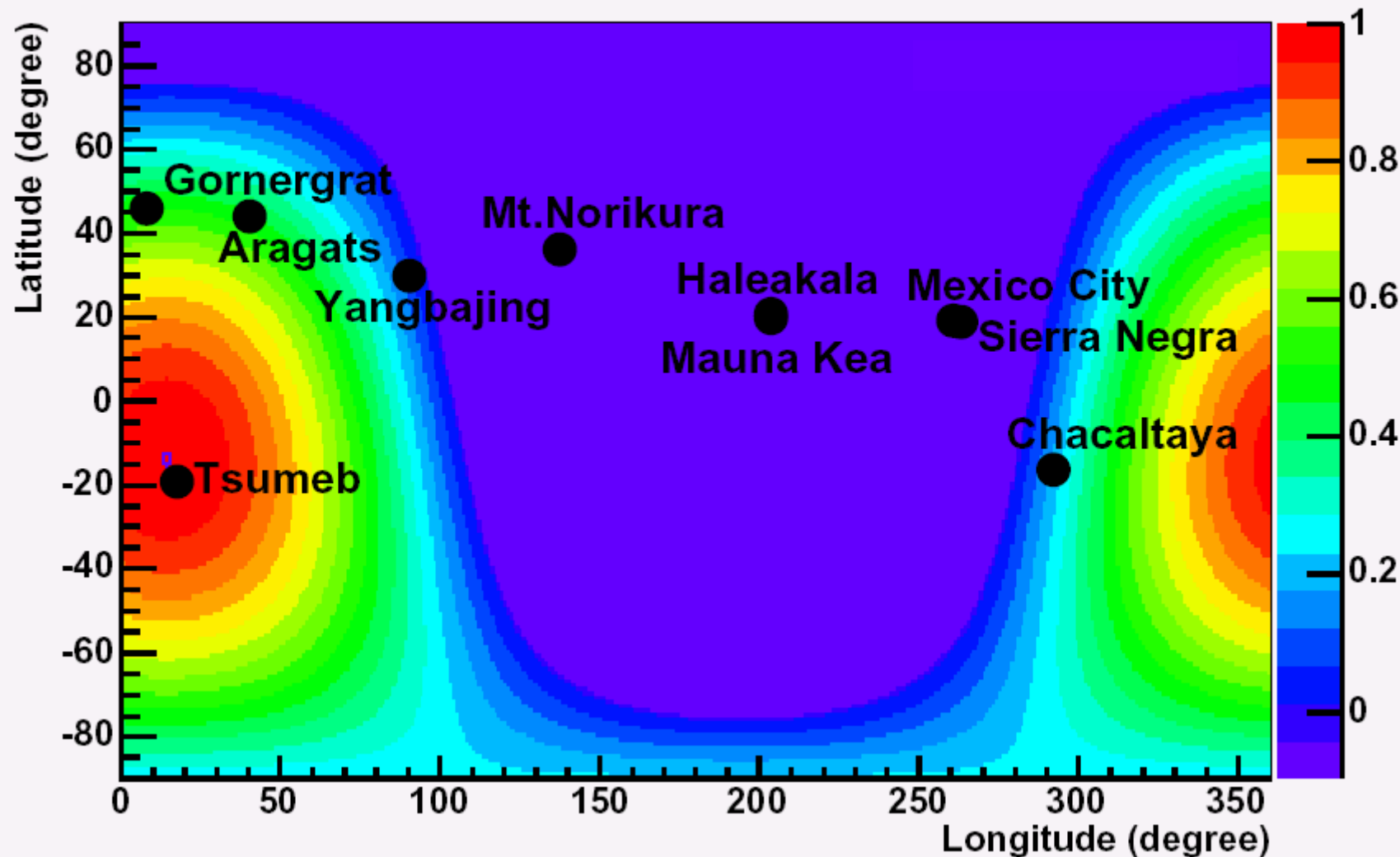


2003年10月28日
INTEGRAL衛星



(Watanabe et al.,
ApJ, 2006)

Solar Cos(ZenithAngle)



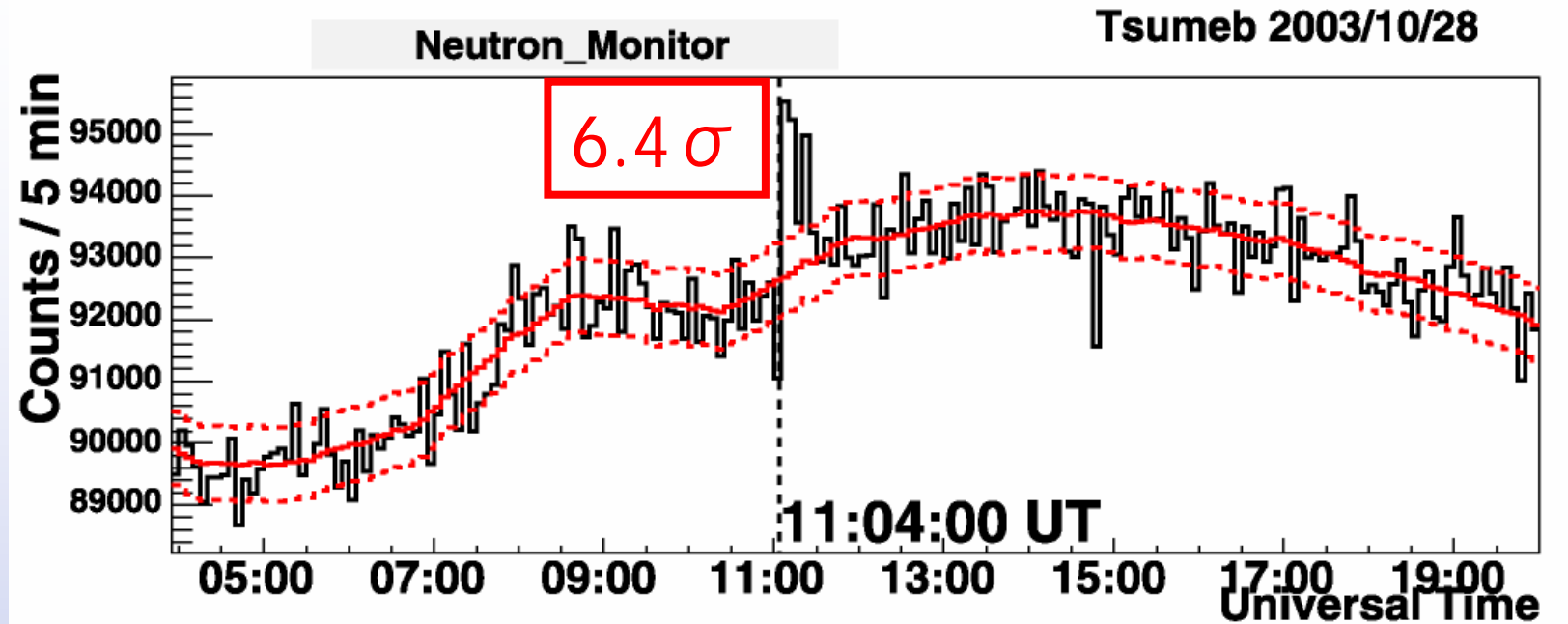
Tsumeb, Namibia

17.6E, 19.1S, 1240m,
air mass : 890 g/cm²

2003年10月28日 11:05UT

▪ 天頂角 : 9.5°
▪ air mass : 902 g/cm²

2003年10月28日 Tsumeb Neutron Monitor



11:05 – 11:15 UT に信号の増加を観測 : 6.4 σ

11:05 UT に δ 関数的に太陽中性子が発生したと仮定
太陽中性子のエネルギー : >100MeV

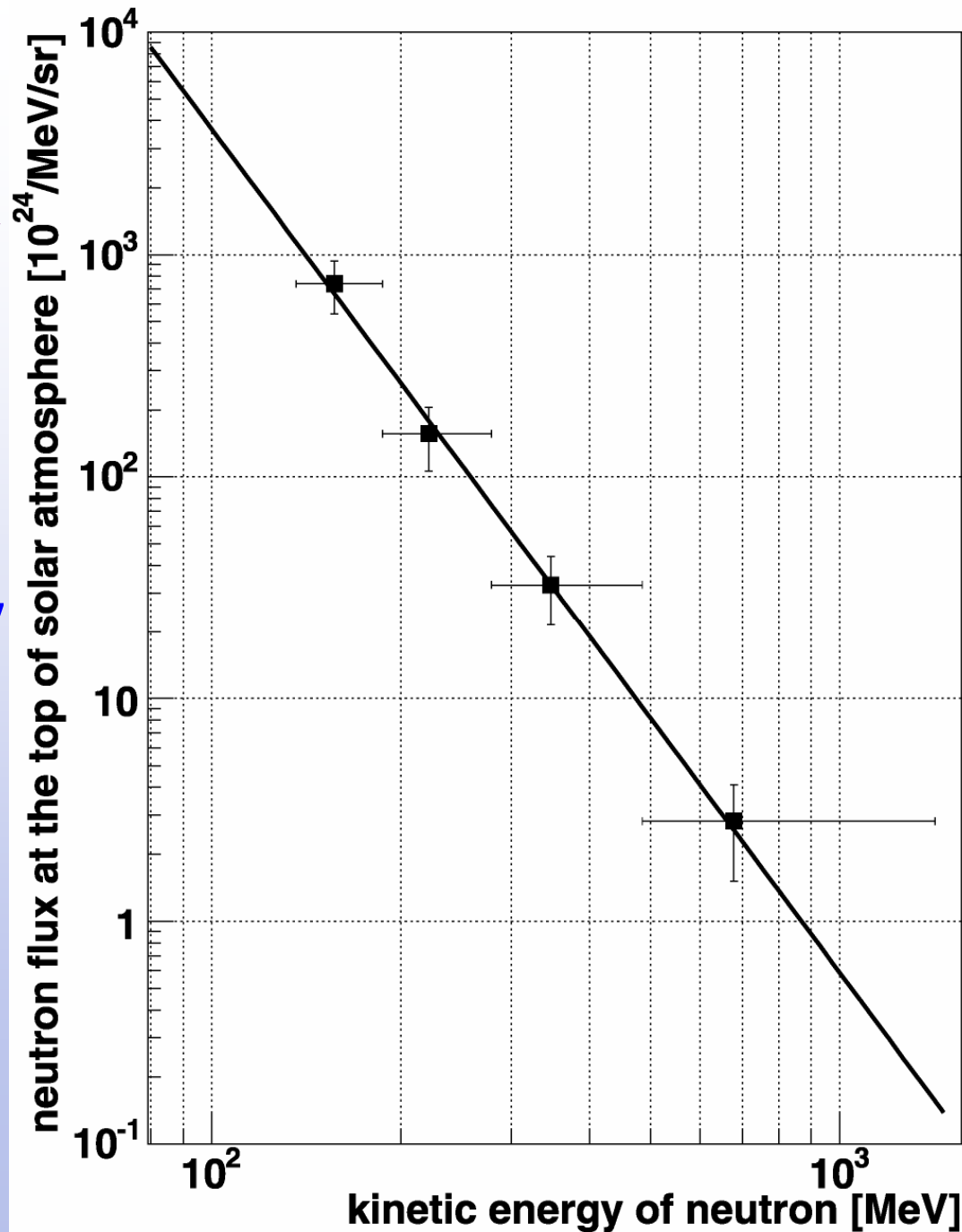
太陽表面上での太陽中性子のスペクトルを求める

- 中性子大気減衰率 : Shibata program (Shibata et al., 1994)
- 中性子モニター検出効率 : Clem & Dorman (2000)

2003年10月28日 太陽中性子スペクトル

- Power index
= -3.6 ± 0.3
- Flux @ 100MeV
= $(3.1 \pm 1.0) \times 10^{27}$
[$/\text{MeV}/\text{sr}$]

太陽中性子の全流量
($>100\text{MeV}$) :
 3.1×10^{25} [erg/sr]



第23太陽活動期に観測された 太陽中性子イベント

Date	Time [UT]	Observatory	X-ray class	Sunspot Location
2000/11/24	14:51	Chacaltaya	X2.3	N22 W07
2001/08/25	16:23	Chacaltaya	X5.3	S17 E34
2003/10/28	09:51	Tsumeb	X17.2	S16 E08
2003/11/02	17:03	Chacaltaya	X8.3	S14 W56
2003/11/04	19:29	Haleakala	X28	S19 W83

- 強い強度の γ 線が衛星で観測
- 太陽中性子が γ 線の発生時刻に同時に発生と仮定
⇒ 太陽中性子のスペクトルはべき関数

太陽中性子イベント (neutron monitor)

Date	Time [UT]	Observatory	X-ray class	Sunspot Location
1982/06/03	11:43	Jungfraujoch	X8.0	S09 E72
1990/05/24	20:48	Climax	X9.3	N36 W76
1991/03/22	22:44	Haleakara	X9.4	S26 E28
1991/06/04	03:37	Mt.Norikura	X12.0	N30 E70
1991/06/06	00:58	Mt.Norikura	X12.0	N33 E44
2000/11/24	14:51	Chacaltaya	X2.3	N22 W07
2001/08/25	16:23	Chacaltaya	X5.3	S17 E34
2003/10/28	09:51	Tsumeb	X17.4	S16 E08
2003/11/02	17:03	Chacaltaya	X8.3	S14 W56
2003/11/04	19:29	Haleakala	X28	S19 W83

太陽中性子イベント：エネルギースペクトル

Neutron spectrum

$$\alpha_n = -3 \sim -4$$

Flux @ 100MeV
[/MeV/sr]

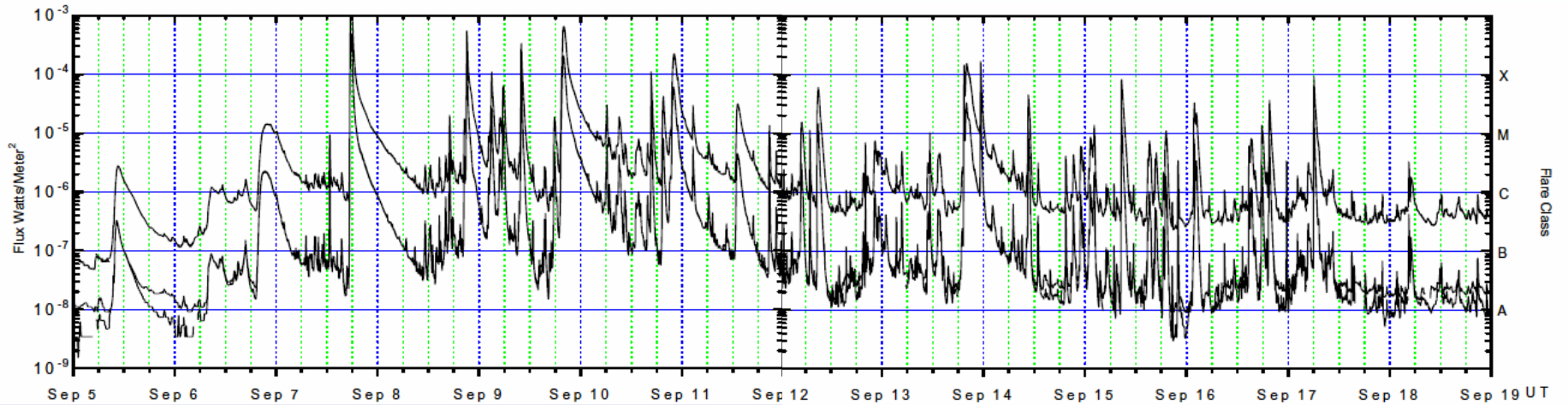
Date	Flare class			Flux @ 100MeV [/MeV/sr]
1982/06/03	X8.0	Jungfraujoch	-4.0 ± 0.2	$(2.6 \pm 0.7) \times 10^{28}$
1990/05/24	X9.3	Climax	-2.9 ± 0.1	$(4.3 \pm 0.4) \times 10^{28}$
1991/03/22	X9.4	Haleakala	-2.7 ± 0.1	$(6.0 \pm 1.0) \times 10^{26}$
1991/06/04	X12.0	Norikura	-4.9 ± 0.6	$(1.9 \pm 0.2) \times 10^{27}$
1991/06/06	X12.0	Norikura	-4.1 ± 1.0	-----
2000/11/24	X2.3	Chacaltaya	-4.2 ± 0.5	$(4.0 \pm 1.3) \times 10^{26}$
2001/08/25	X5.3	Chacaltaya	-3.1 ± 0.4	$(2.4 \pm 1.3) \times 10^{26}$
2003/10/28	X17.4	Tsumeb	-3.6 ± 0.3	$(3.1 \pm 1.0) \times 10^{27}$
2003/11/02	X8.3	Chacaltaya	-7.0 ± 1.3	$(2.8 \pm 1.6) \times 10^{26}$
2003/11/04	X28	Haleakala	-3.9 ± 0.5	$(1.5 \pm 0.6) \times 10^{28}$

まとめ

第23太陽活動期に発生したXクラスの太陽フレア 約100例について太陽中性子イベントを探索

- 5例の太陽中性子イベントが 5σ 以上の統計的有意性を持って neutron monitor で観測
⇒ 太陽中性子イベント:10例
- 強い強度の γ 線が衛星で観測(中性子捕獲・核 γ 線)
- 太陽中性子が γ 線の発生時刻に同時に発生と仮定
⇒ 太陽中性子のスペクトルはべき関数
- 太陽中性子のスペクトル : $\alpha_n = -3.0 \sim -4.0$

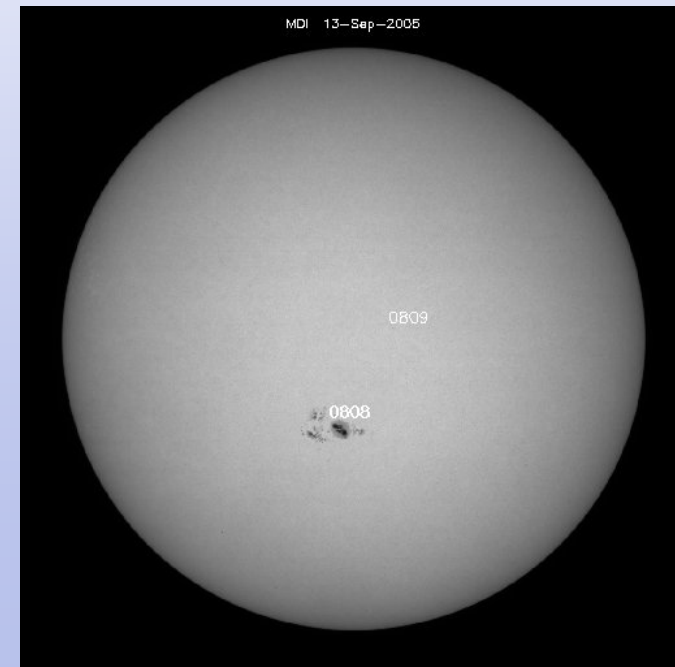
September 2005 GOES X-ray flux

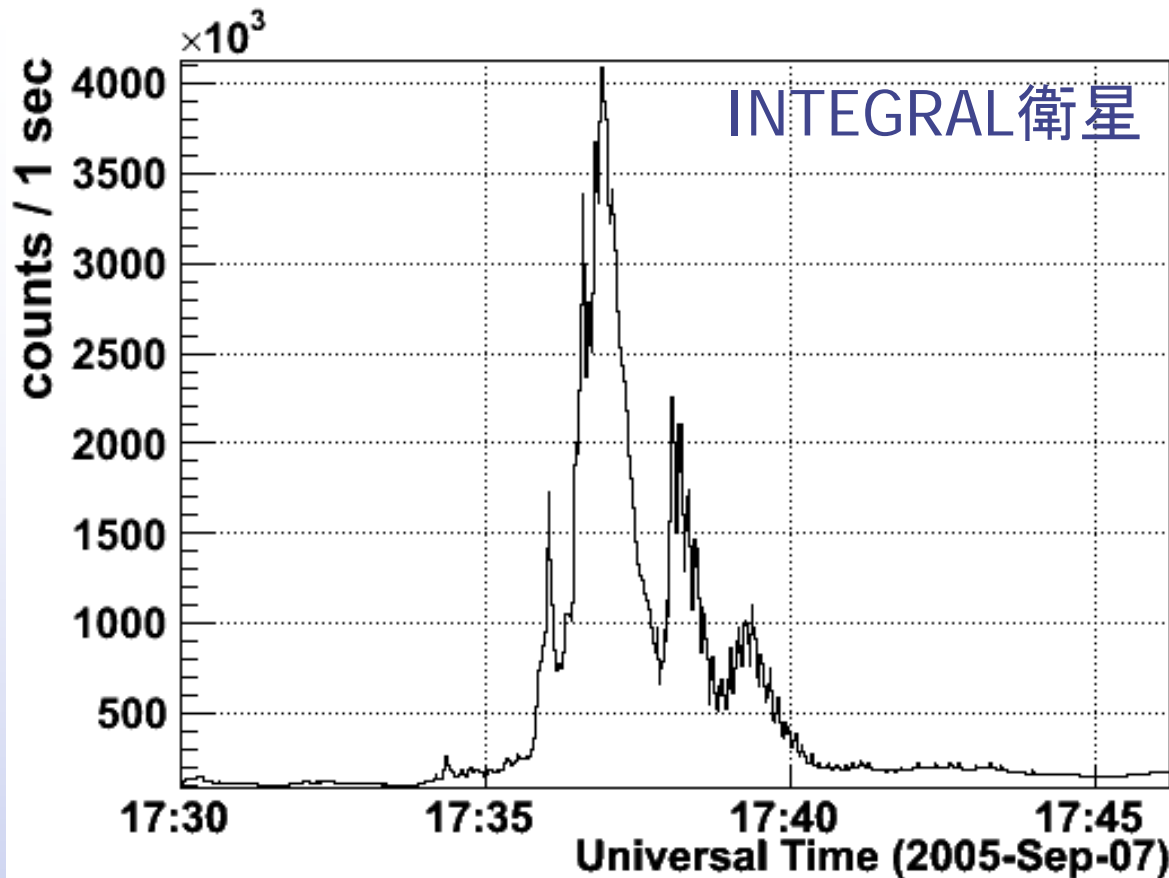


Active Region 10808

07 Sep 2005	17:17UT	X17.0/3B	S06 E89
08 Sep 2005	20:52UT	X5.4/2B	S11 E74
09 Sep 2005	02:43UT	X1.1	
09 Sep 2005	09:42UT	X3.6	
09 Sep 2005	19:13UT	X6.2/2B	S10 E58
10 Sep 2005	16:34UT	X1.1	
10 Sep 2005	21:30UT	X2.1	
13 Sep 2005	19:19UT	X1.5/2B	S09 E10
13 Sep 2005	23:15UT	X1.7	
15 Sep 2005	08:30UT	X1.1/2N	S12 W14

SOHO/MDI



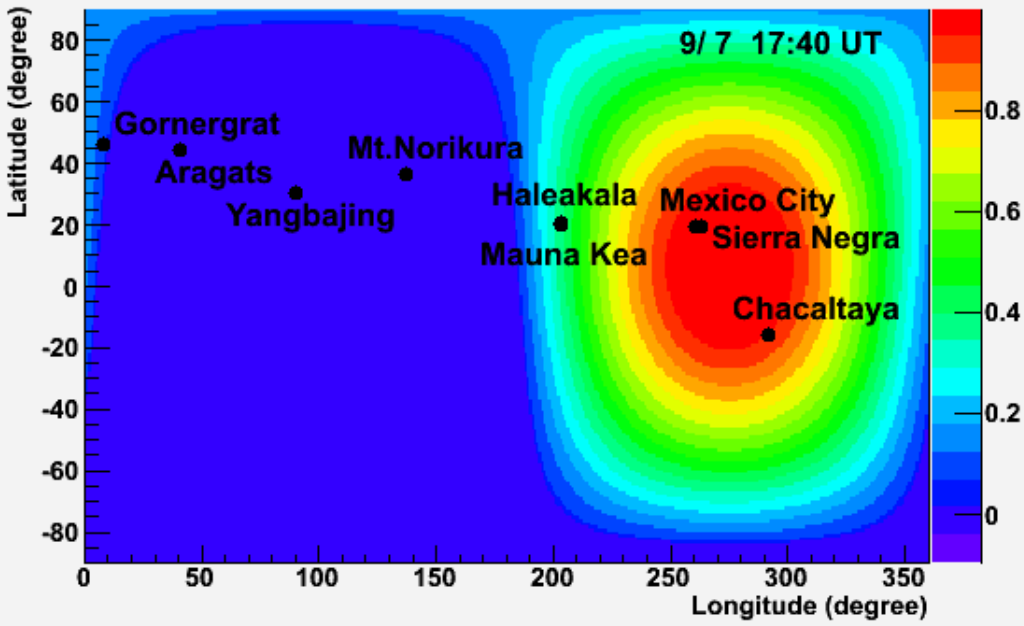


2005/9/7
 γ 線データ



太陽中性子
 発生時刻
 17:36:40UT

Solar Cos(ZenithAngle)



Mexico City, Mexico

260.8E, 19.3N, 2274m, 780g/cm²
6m² Neutron Monitor

2005/9/7 17:40UT

- zenith angle : 18.9°
- air mass : 825 g/cm²

Sierra Negra, Mexico

262.7E, 19.0N, 4580m, 575g/cm²
4m² Solar Neutron Telescope

2005/9/7 17:40UT

- zenith angle : 17.5°
- air mass : 603 g/cm²

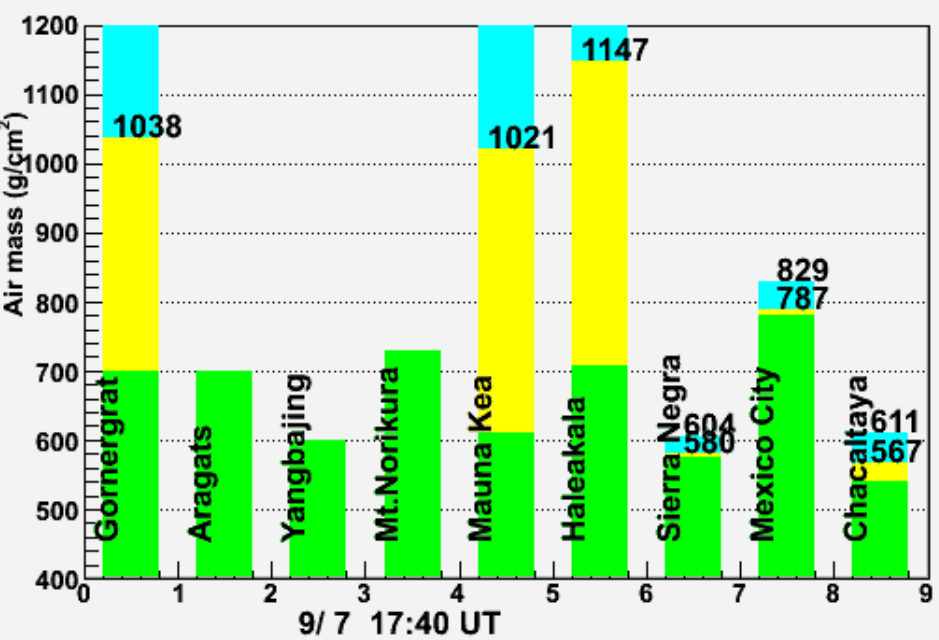
Chacaltaya, Bolivia

292.0E, 16.2S, 5250m, 540g/cm²
12m² NM & 4m² SNT

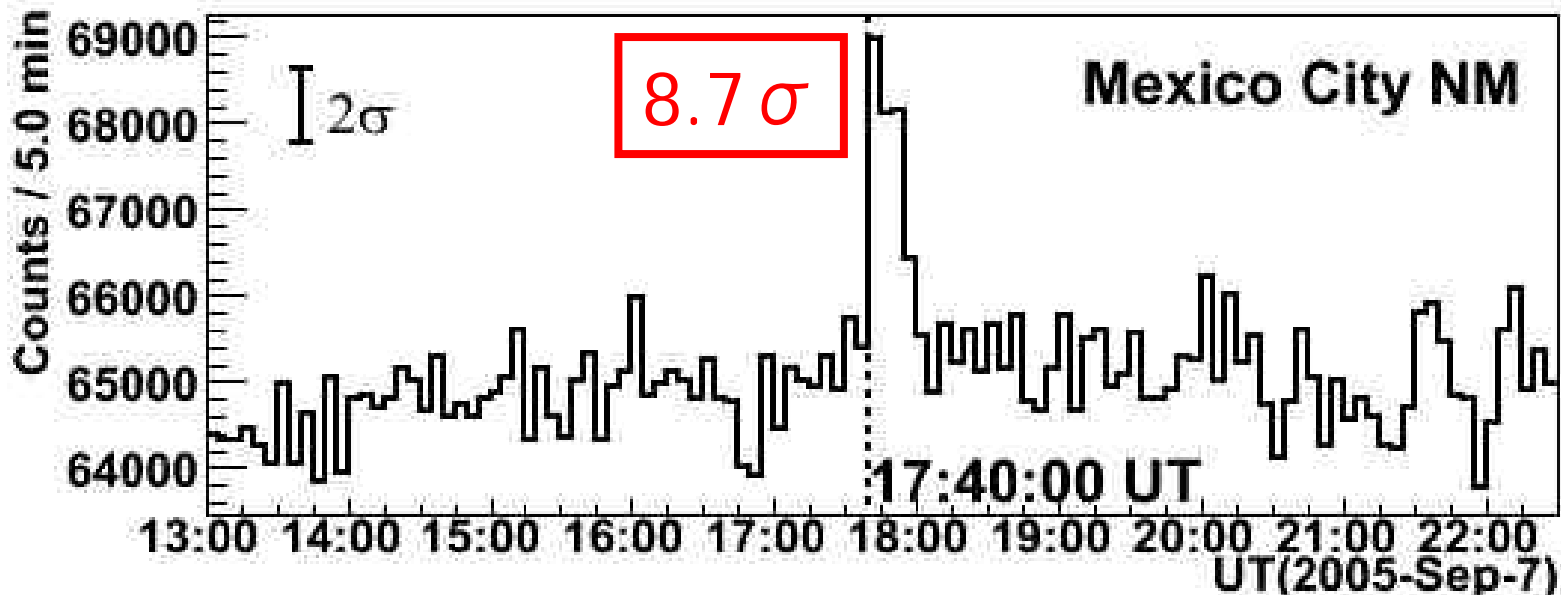
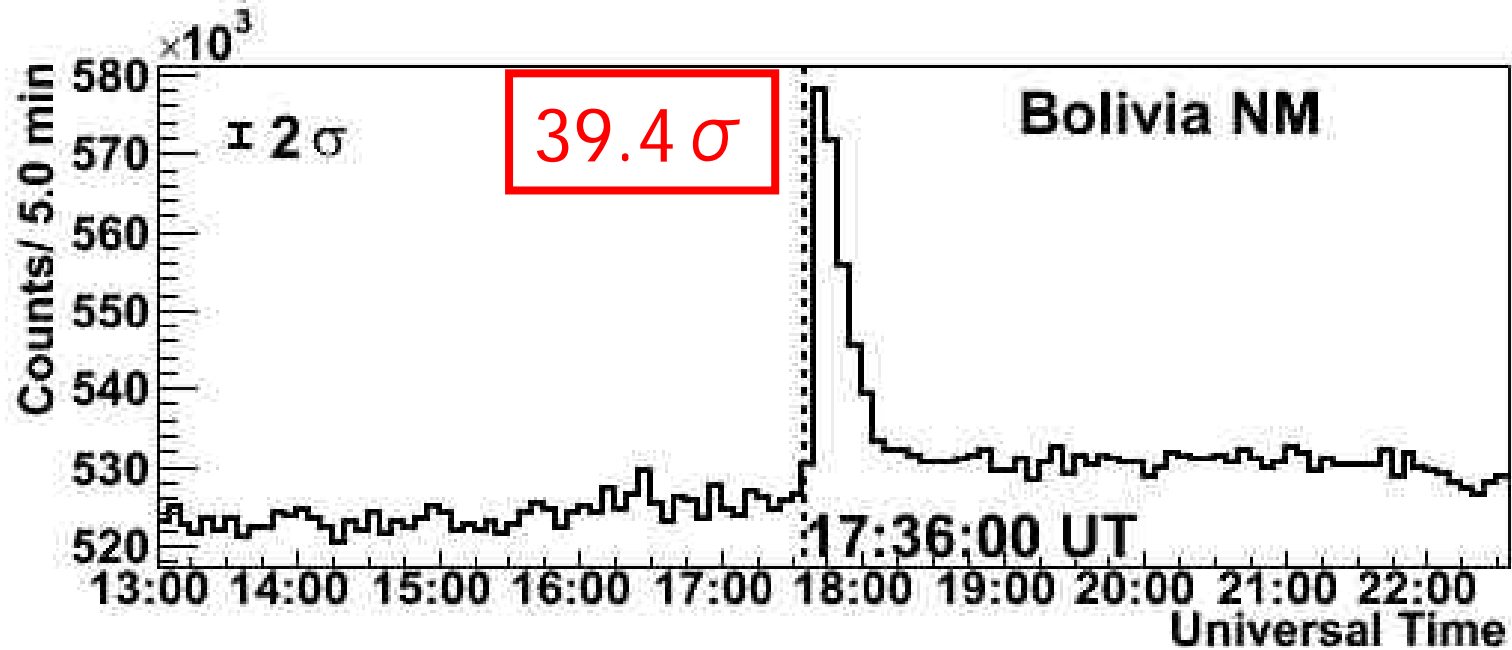
2005/9/7 17:40UT

- zenith angle : 28.0°
- air mass : 612 g/cm²

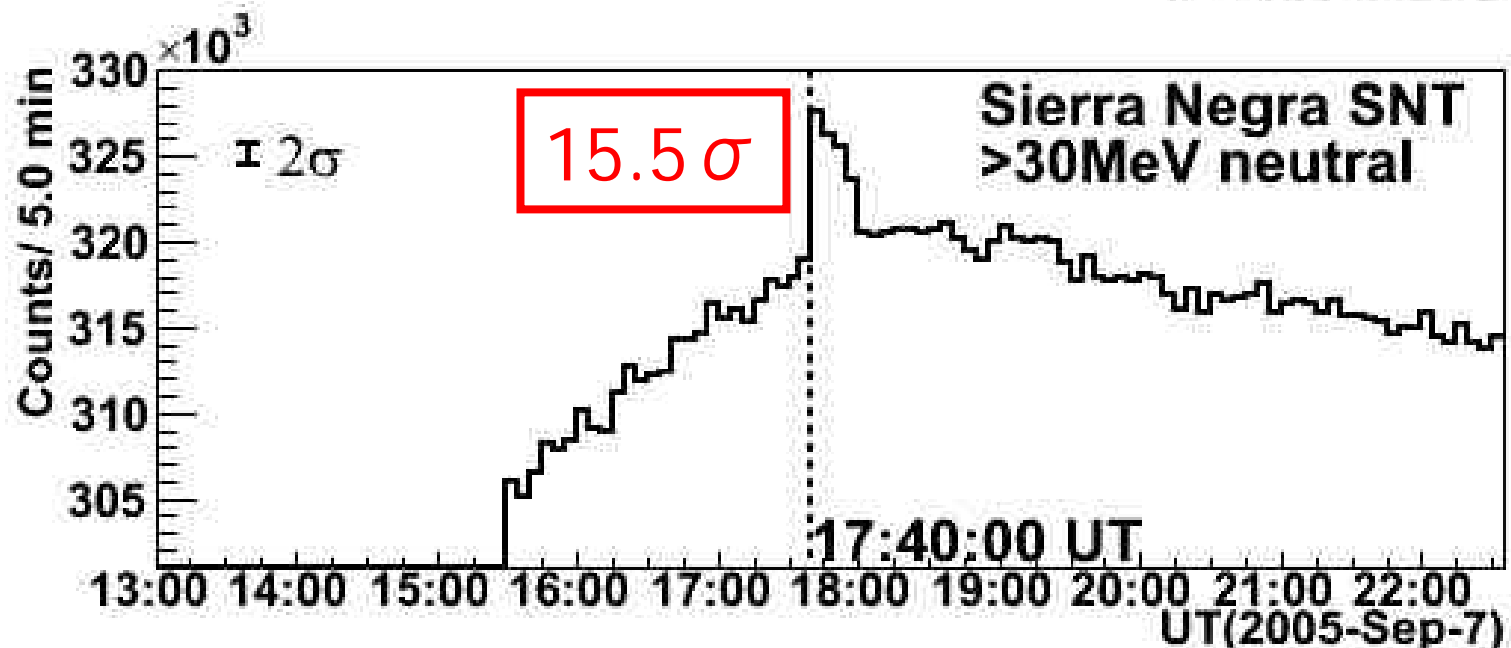
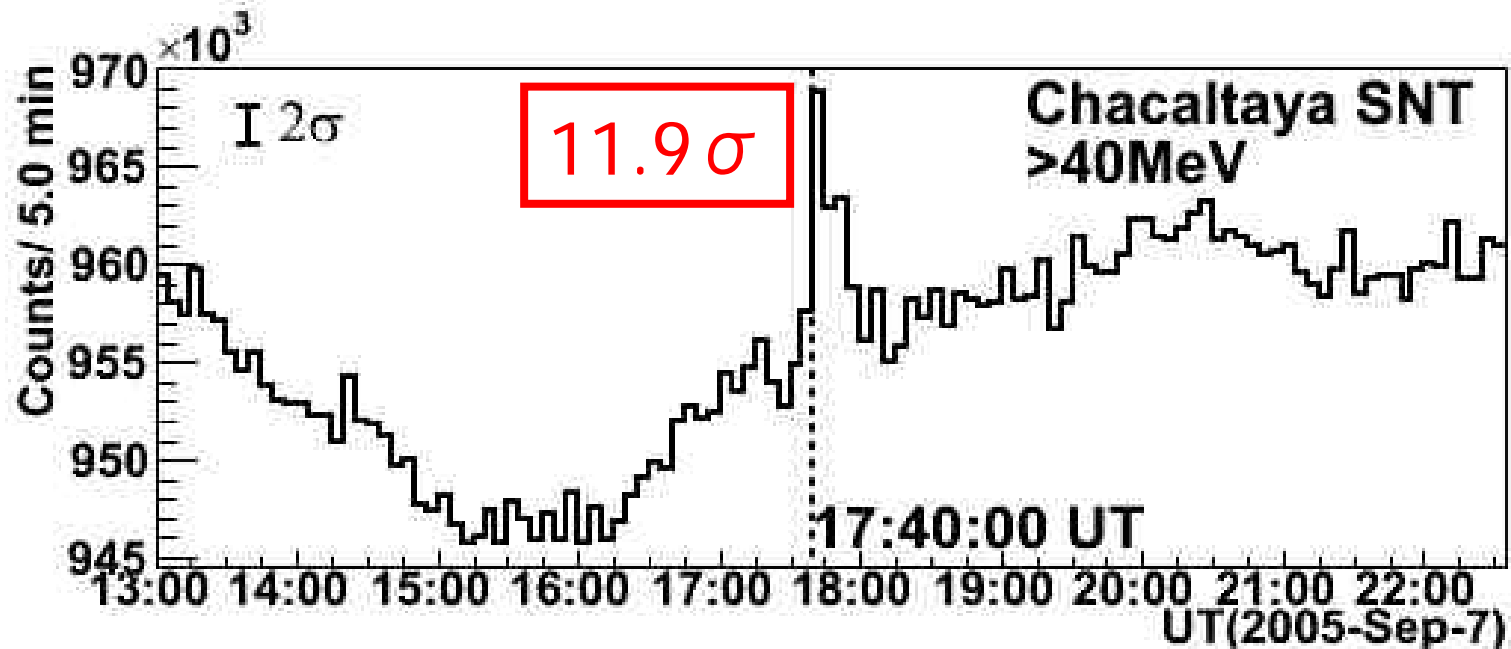
Air Mass



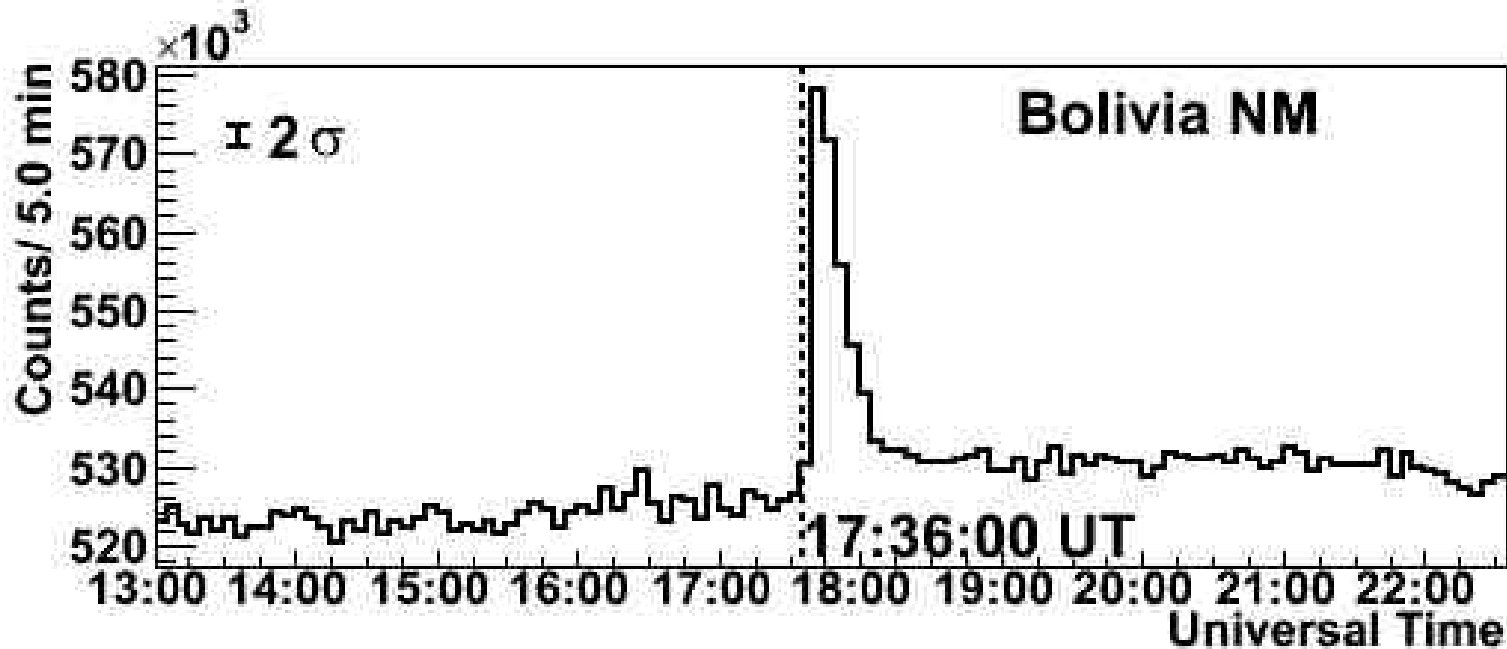
2005/9/7 中性子モニタ一



2005/9/7 太陽中性子望遠鏡



2005/9/7 Bolivia 中性子モニター



17:40 – 18:05 UT に信号の増加を観測
増加の統計的有意性は $>100\sigma$

17:36:40 UT に δ 関数的に太陽中性子が発生したと仮定して
太陽表面上での太陽中性子のスペクトルを求める

- 中性子大気減衰率 : Shibata program (Shibata et al., 1994)
- 中性子モニター検出効率 : Clem & Dorman (2000)

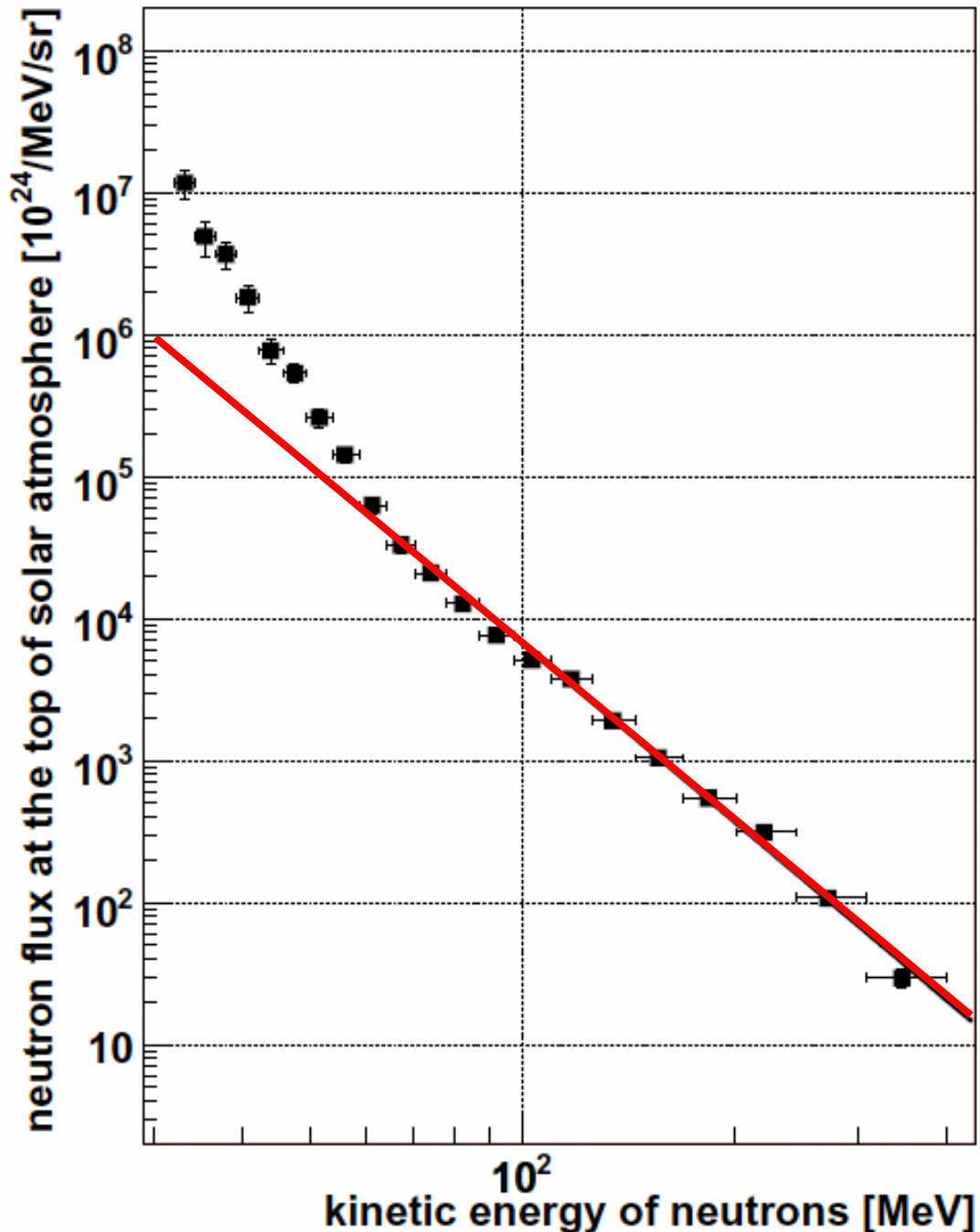
2005/9/7

太陽中性子スペクトル (Chacaltaya NM)

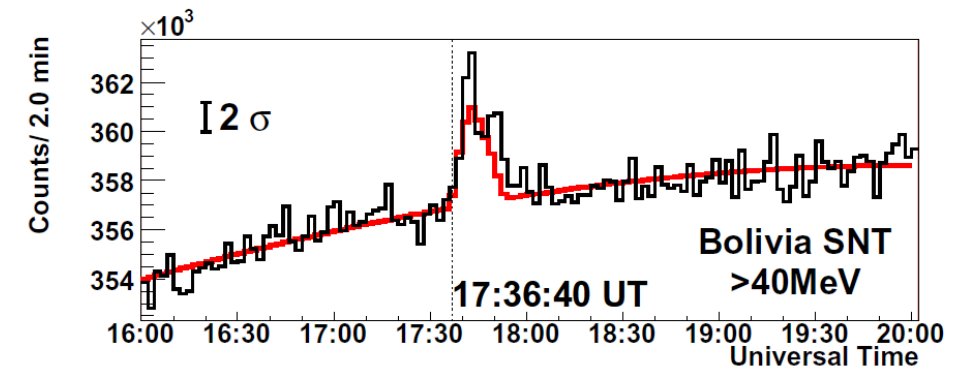
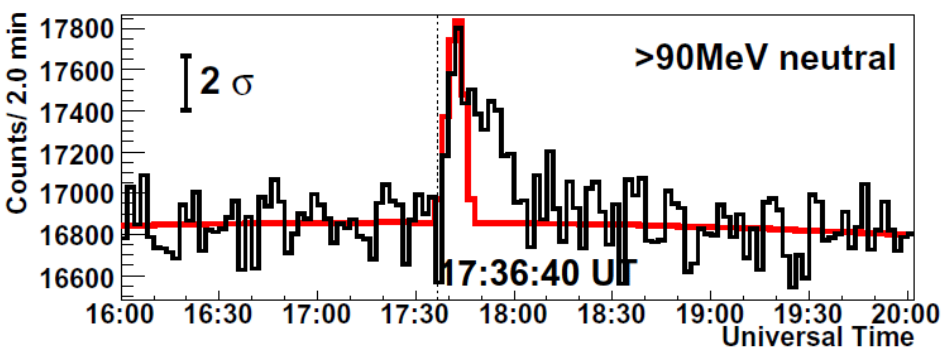
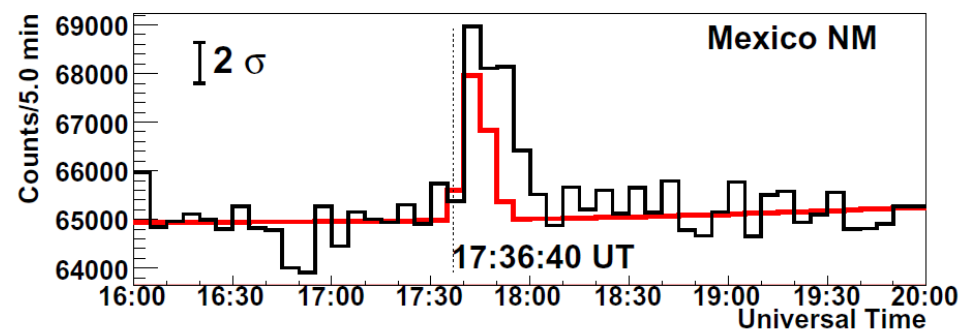
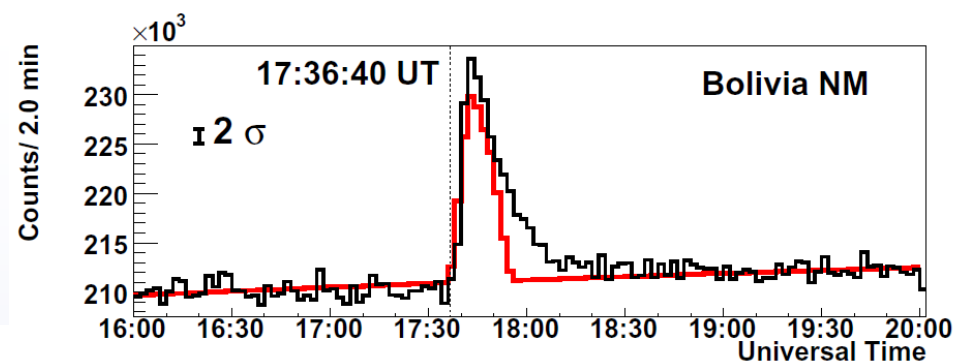
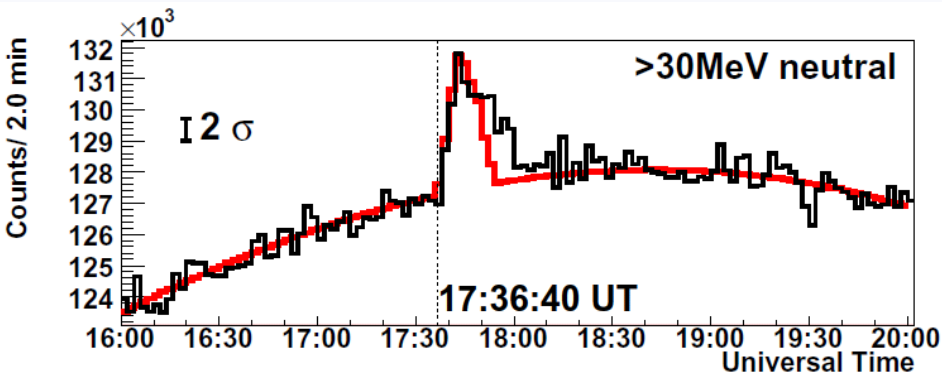
100MeV以下でスペクトルの
折れ曲がりが見られる

>100MeVで

- Power index
= - 3.8
- Flux at 100MeV
= 5.6×10^{27}
[/MeV/sr]



2005/9/7 太陽中性子イベント



長時間 (~30分) 続く全増加の説明は不可能

- 中性子が時間幅を持って発生していた
- 時間によって中性子のスペクトルが変化

まとめ

第23太陽活動期に発生したXクラスの太陽フレア 約100例について太陽中性子イベントを探索

- 5例の太陽中性子イベントが 5σ 以上の統計的有意性を持って neutron monitor で観測
⇒ 太陽中性子イベント:10例
- 強い強度の γ 線が衛星で観測(中性子捕獲・核 γ 線)
- 太陽中性子が γ 線の発生時刻に同時に発生と仮定
⇒ 太陽中性子のスペクトルはべき関数
- 太陽中性子のスペクトル : $\alpha_n = -3.0 \sim -4.0$

まとめ

第23太陽活動期に発生したXクラスの太陽フレア 約100例について太陽中性子イベントを探索

- 5例の太陽中性子イベントが 5σ 以上の統計的有意性を持って neutron monitor で観測
⇒ 太陽中性子イベント:10例 ⇒ 11例
- 強い強度の γ 線が衛星で観測(中性子捕獲・核 γ 線)
- 太陽中性子が γ 線の発生時刻に同時に発生と仮定
⇒ 太陽中性子のスペクトルはべき関数
⇒ γ 線の発生時刻だけでは説明できない
- 太陽中性子のスペクトル : $\alpha_n = -3.0 \sim -4.0$

謝辞

- 村木綏教授、伊藤好孝教授、松原豊助教授、さこ隆志助手をはじめ、太陽地球環境研究所宇宙線研究室の方々
- 太陽中性子望遠鏡・中性子モニターの開発・設置・メンテナンスに携わっているの方々
- YOHKOH・RHESSI・INTEGRAL・GEOTAIL・その他太陽観測衛星のミッションに携わっているの方々
- その他、私を支えてくださった大勢の皆様

ありがとうございました

END