

MeVガンマ線全天観測で拓く 宇宙核物理

高田淳史 (京大理)

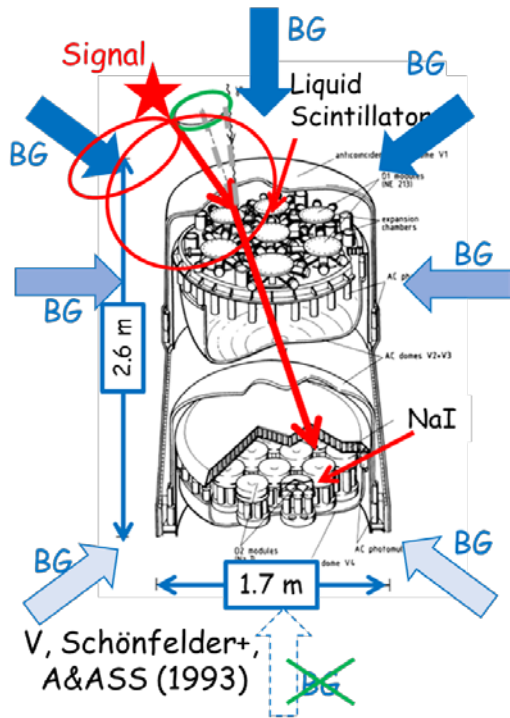
- ETCCの有効面積・PSF
- 銀河面拡散核ガンマ線
- Ia型超新星爆発に伴うガンマ線
- まとめ

核ガンマ線

- ▶ RIや励起原子核から放射
 - ⇒ 時間軸という特徴的な情報を持つ
- ▶ 半減期によって異なる物理
 - ~10 days :
freshなRIからのガンマ線
 - ⇒ 元素合成のプロセス
 - ~数万年 :
銀河内の拡散の時間スケールと同程度
 - 即発ガンマ線 :
宇宙線による励起原子核からの放射
 - ⇒ 低エネルギー宇宙線のプローブ

MeVガンマ線観測の現状打開へ

COMPTEL

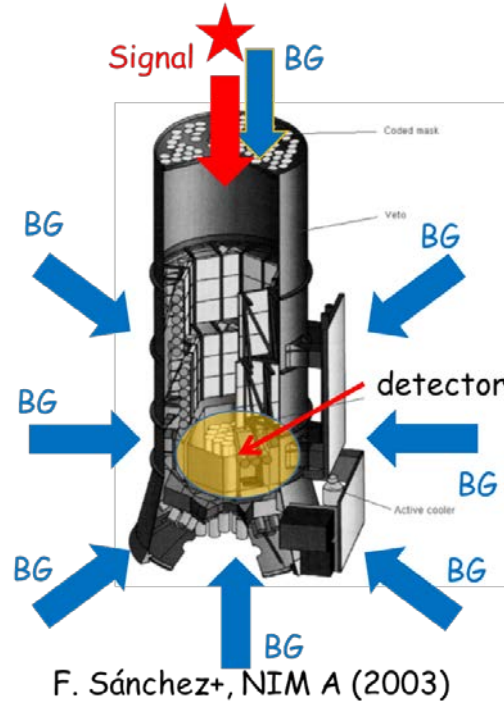


PSF ~ 平均的な散乱角

3σの有意度で検出できる最小flux

$$\text{検出感度} = 3 \times \sqrt{\frac{f_B \Delta\Omega \Delta E}{AT}}$$

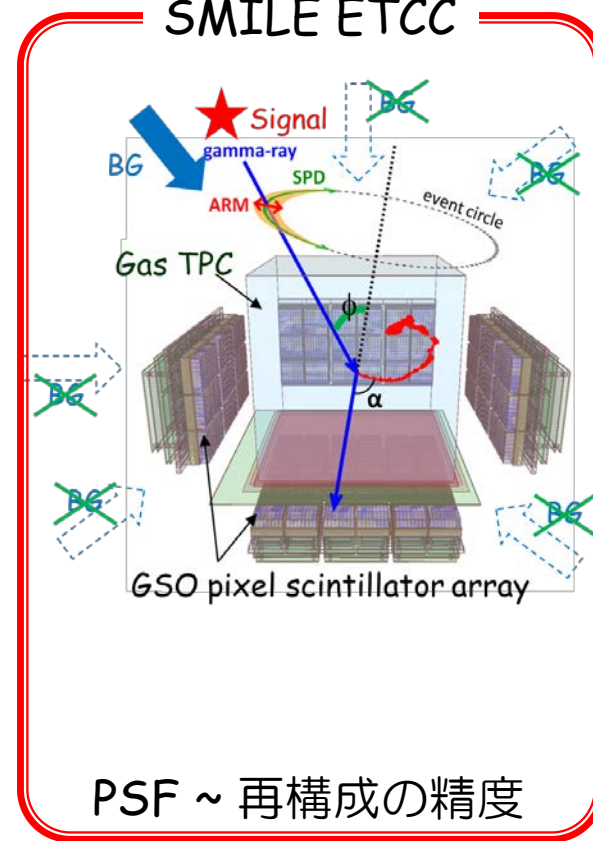
SPI/INTEGRAL



BGを含む統計量で方向検出

f_B : 雑音量 A : 有効面積 $\Delta\Omega$: PSF

SMILE ETCC

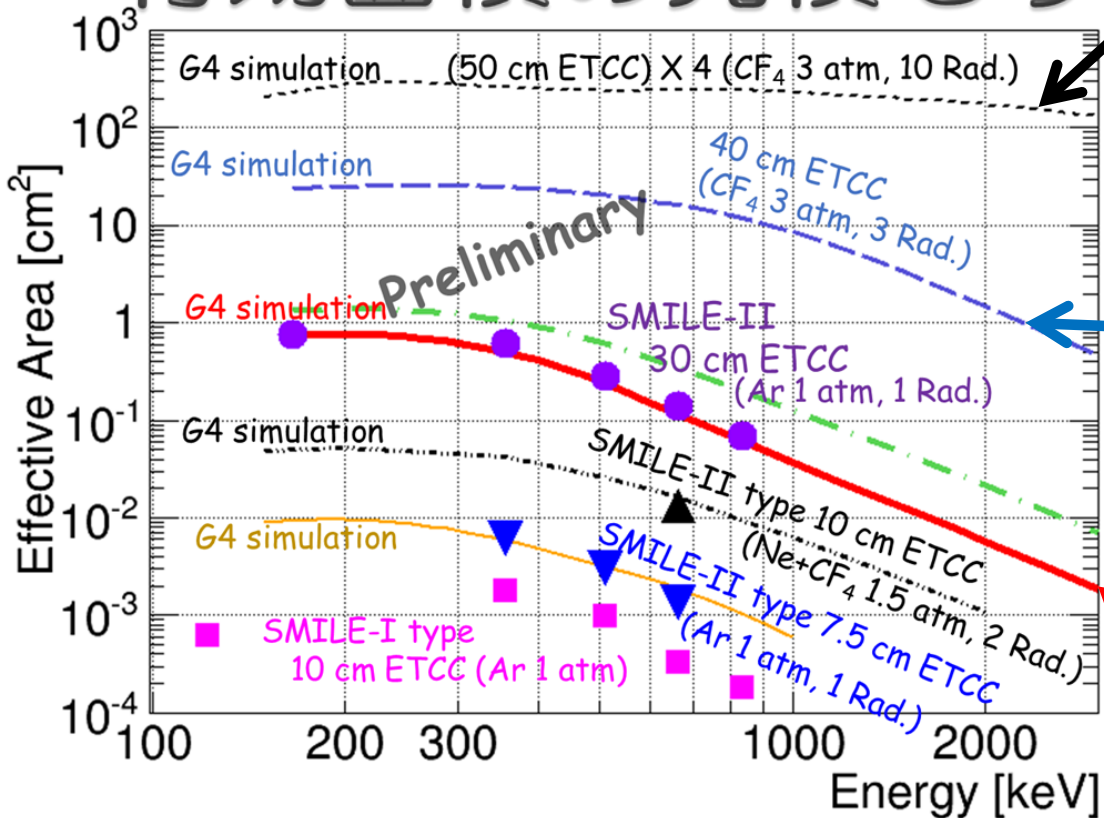


PSF ~ 再構成の精度

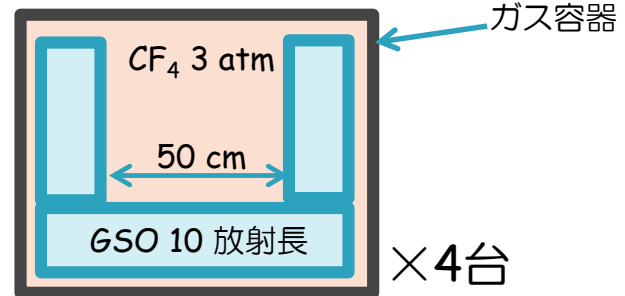
シミュレーション・計算で算出可能

PSFの広がり小さければ、視線方向のBGが主

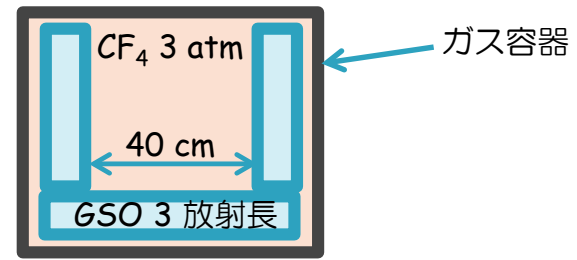
有効面積の見積もり



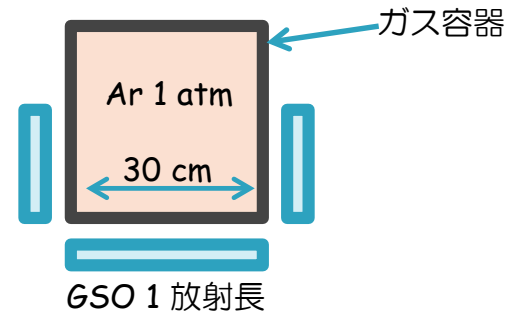
satellite



SMILE-III



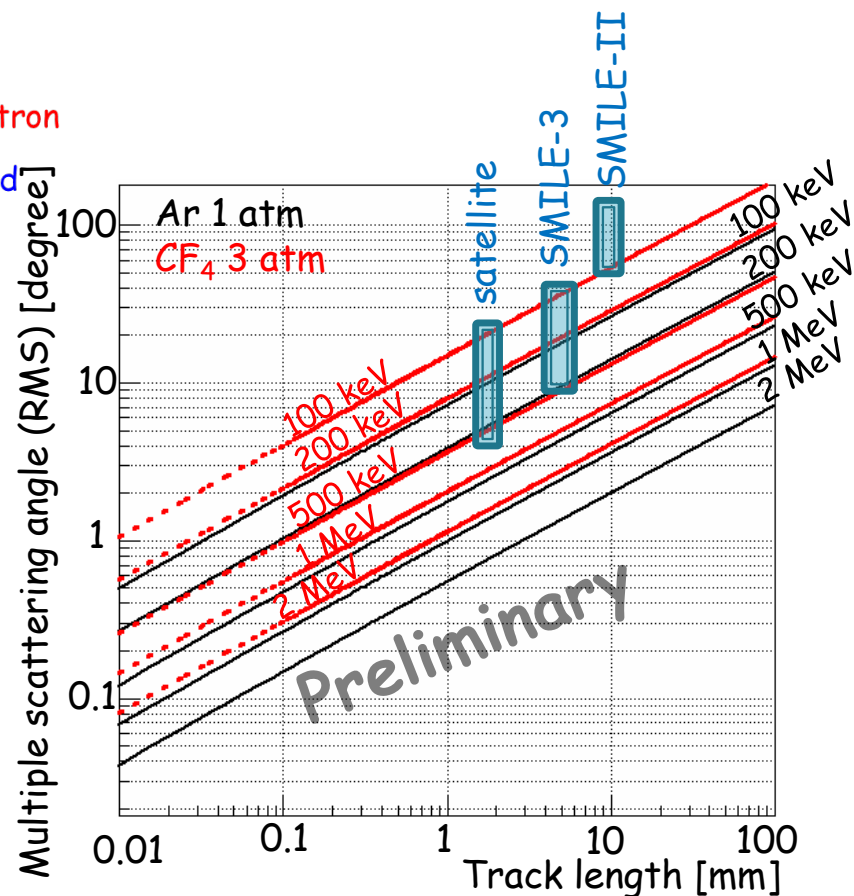
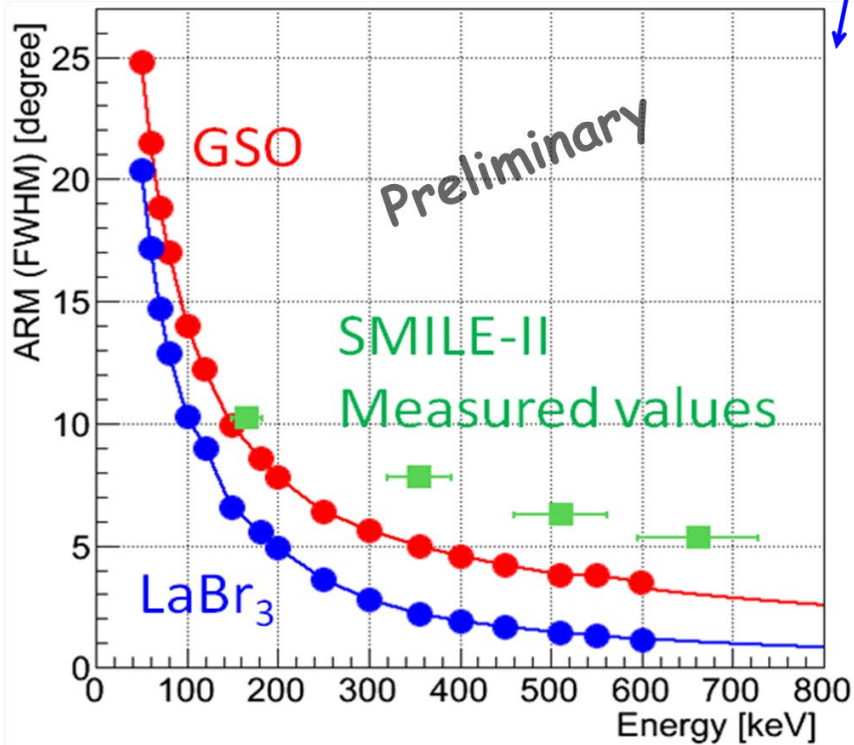
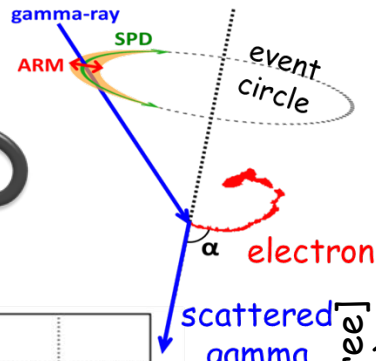
SMILE-II



- SMILE-II:
再構成されたeventのefficiency (全てのcut考慮後)
≈ Geant4 simulationから得たefficiency

- Gas中でCompton
+ 検出器内でenergyを落とし切るefficiency
⇒ SMILE-III・衛星のefficiencyとして定義

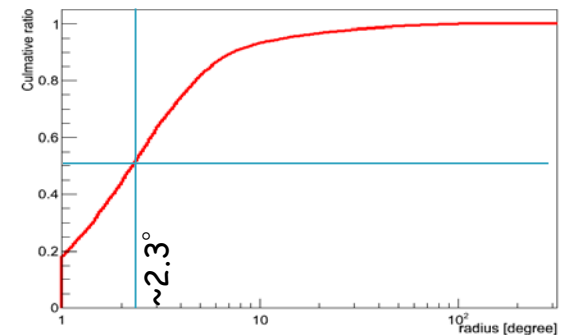
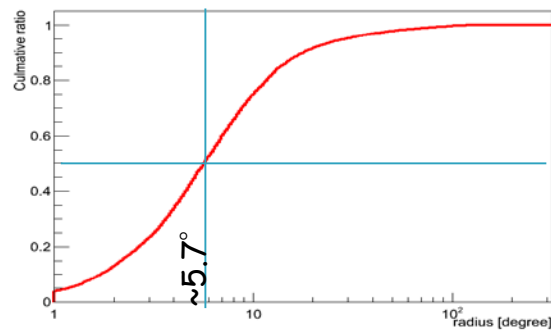
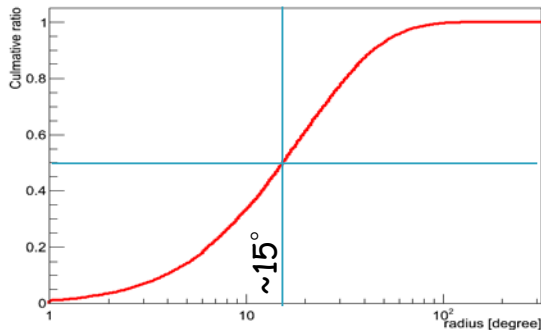
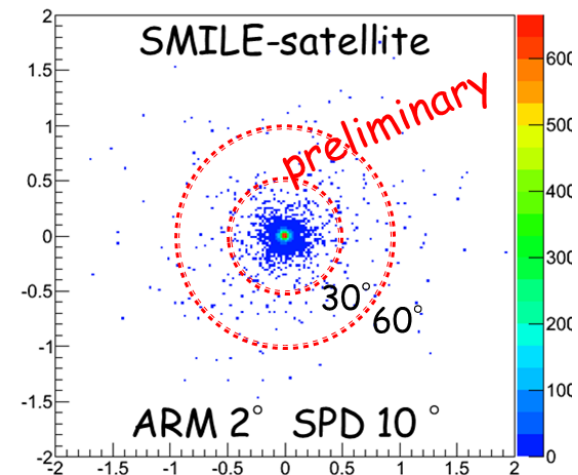
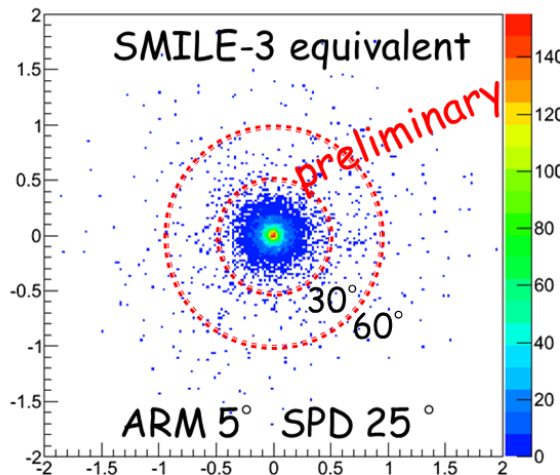
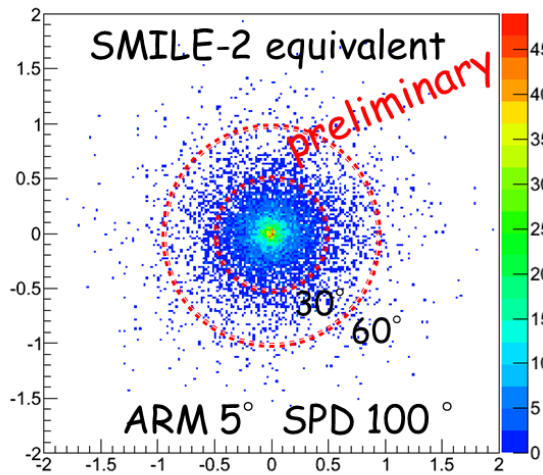
ARM & SPD



- SMILE-II: 5.3° (662 keV)
- SMILE-3: 5° (511 keV)
- Satellite: 3.5° (511 keV)

- SMILE-II: 10 mm で方向決定 (現在)
 $\langle Ke \rangle$ 30-50 keV \Rightarrow SPD $\sim 100^\circ$
- SMILE-3: 5 mm で決定と仮定
 $\langle Ke \rangle$ 50-100 keV \Rightarrow SPD $\sim 20-30^\circ$
- Satellite: 2 mm で決定と仮定
 $\langle Ke \rangle$ 200 keV \Rightarrow SPD $\sim 10^\circ$

PSFの見積もり



ARM・SPDを仮定
⇒ ガンマ線画像の
広がり度でPSFを定義

50%の事象が含まれる
半径をPSFとおく



SMILE-2

⇒ PSF ~15°

SMILE-3 @ 1.8 MeV

⇒ PSF ~5.7°

satellite

⇒ PSF ~2.3°

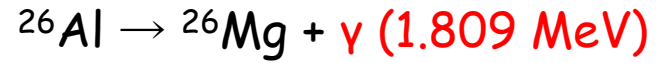
銀河面拡散核ガンマ線

銀河面拡散核ガンマ線観測の現状

◆ ^{26}Al (1.809 MeV)

- AGB星
 - Wolf-Rayet星
 - 重力崩壊型超新星爆発
 - 新星のアウトフロー
- 等で生成

N. Prantzos & R. Diehl, Physics Reports (1996)



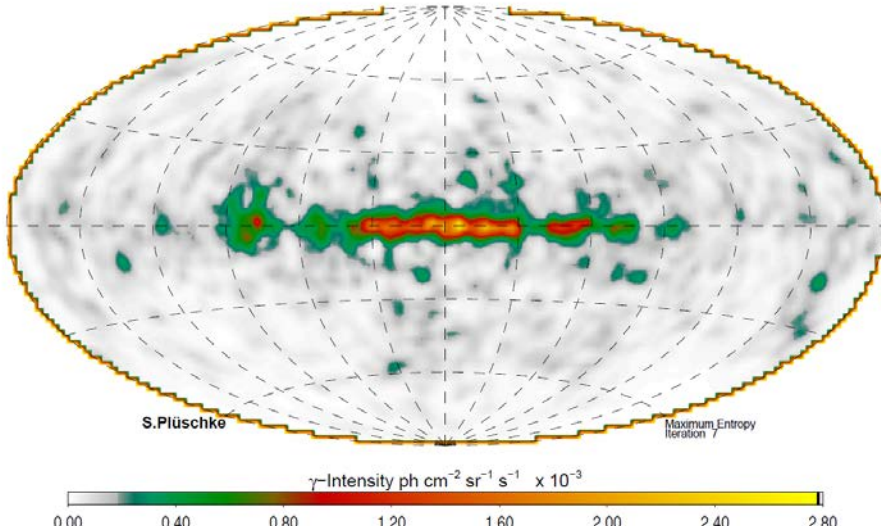
半減期 7×10^5 年

HEAO-Cで発見後, SMMでも確認

W. A. Mahoney+, ApJ (1982),
G. H. Share+, ApJ (1985)

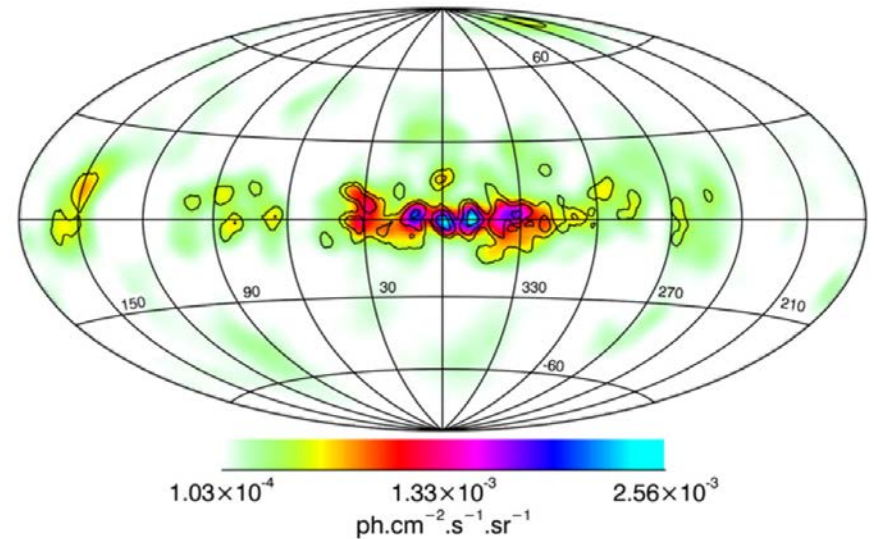
COMPTEL

S. Plüschke+, ESASP (2001)
J. Knödseder+, A&A (1999)



SPI/INTEGRAL

L. Bouchet+, ApJ (2015)



- 銀河面に広く分布
- X線やNIRとは良い一致は見られない
- マイクロ波やFIR (DIRBE $240 \mu\text{m}$)とは粗い一致が見られる

- マイクロ波やFIRとは粗い一致
- 他にもMIRとも矛盾しない

銀河面拡散核ガンマ線観測の現状

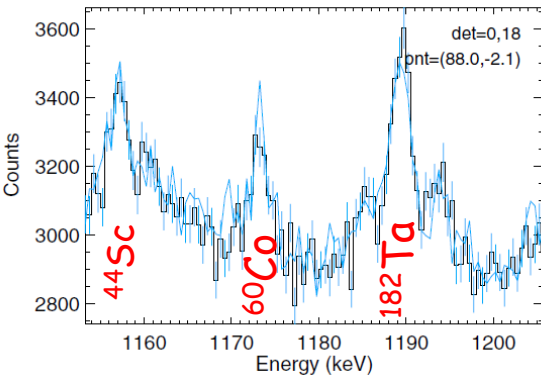
◆ ^{60}Fe (1.173 MeV, 1.333 MeV)

半減期 3×10^6 年

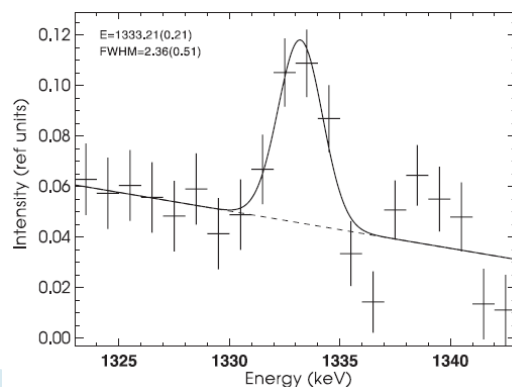
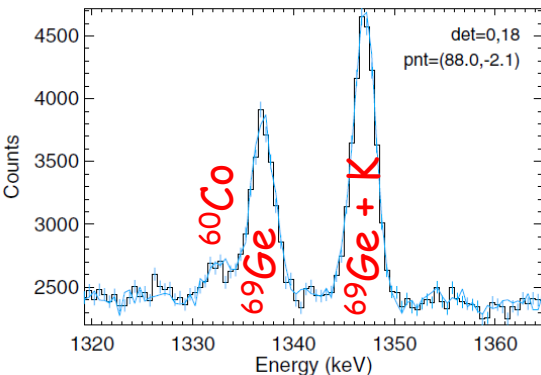
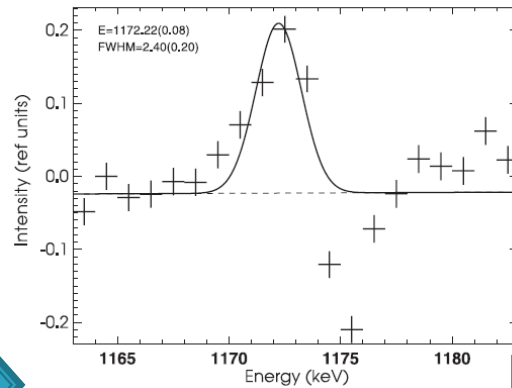
- SPI/INTEGRALとRHESSIで観測 $^{60}\text{Fe} \rightarrow ^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + \gamma$ (1.173, 1.333 MeV)
- $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al} \sim 0.15$ 半減期 5.3 年

D. M. Smith, ESASP (2004), M. J. Harris+, A&A (2005)

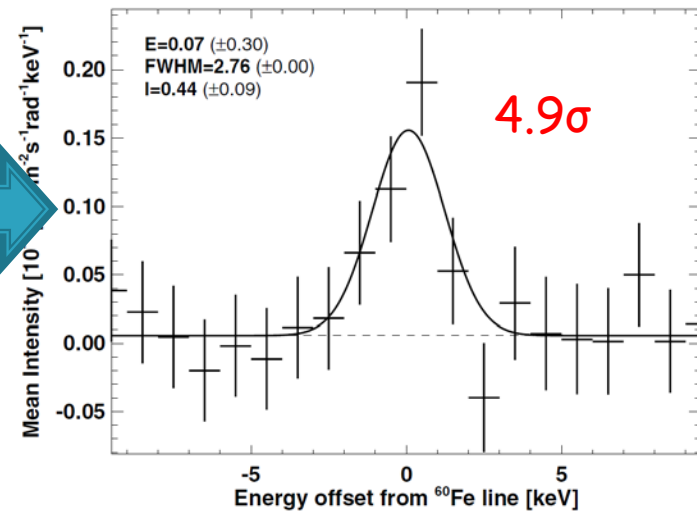
Raw (SPI/INTEGRAL)



BG model差し引き後



2つを足し合わせ



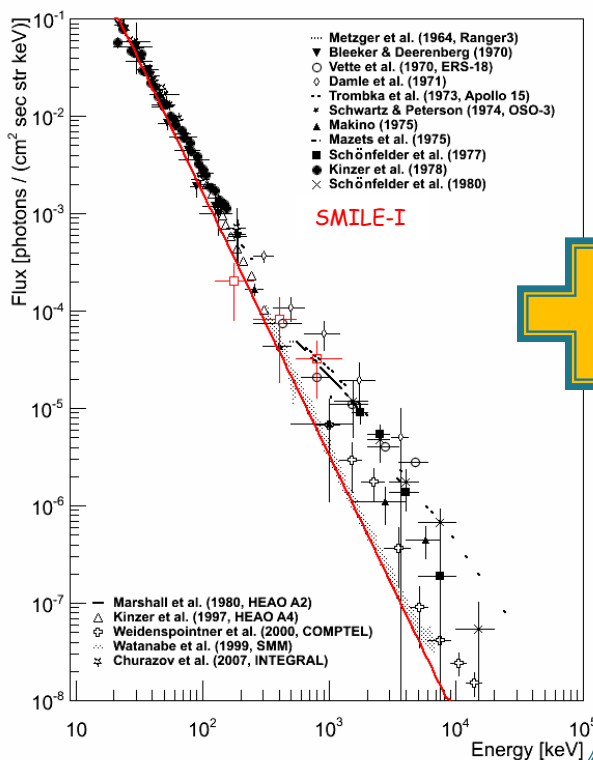
W. Wang+, A&A (2007)

1.8 MeV全天マップの見積もり

系外拡散ガンマ線

強度：SMMの観測結果を
べき関数で近似

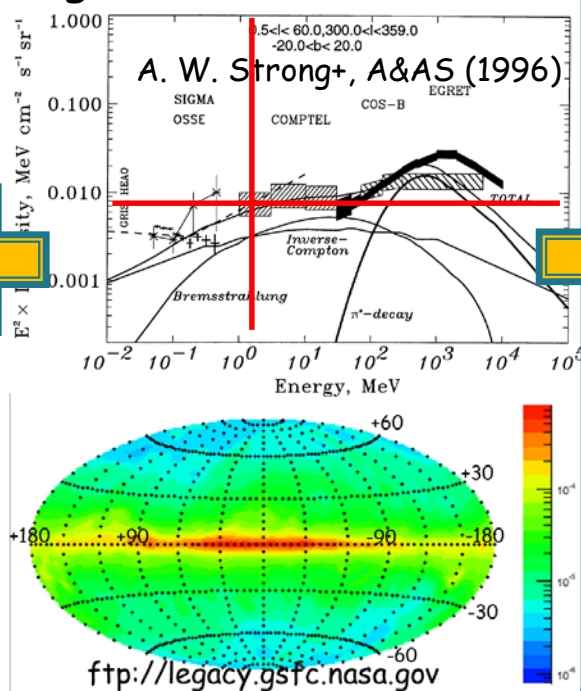
分布：一様・等方を仮定



系内拡散ガンマ線

強度：COMPTELの
観測結果で仮定

分布：EGRETの
galactic diffuse model



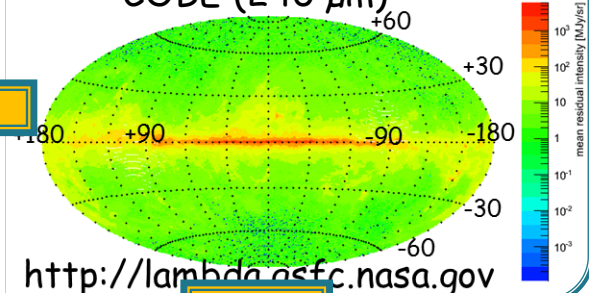
²⁶Al 1.8 MeV

強度：SPI/INTEGRAL
 3.5×10^{-4} ph/cm²/s

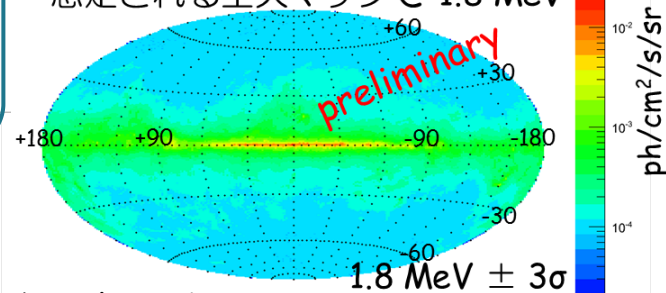
$|l| \leq 30^\circ$ $|b| \leq 10^\circ$
L. Bouchet+, ApJ (2015)

分布：他波長の全天観測を
templateとして使用

COBE (240 μm)



想定される全天マップ @ 1.8 MeV



視線方向のBG：系内・系外拡散ガンマ線を考慮

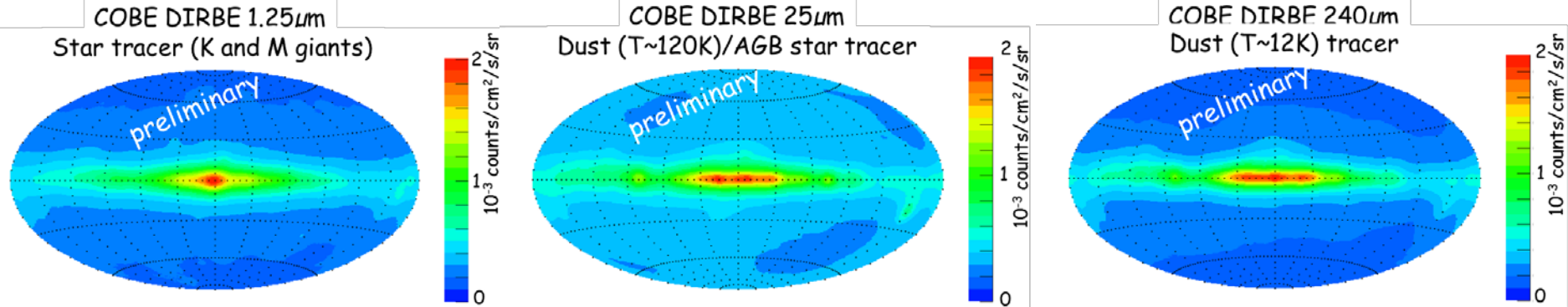
²⁶Alの分布をtemplateで仮定

⇒ 想定されるPSFと有効面積でどのように観測できるか？

気球実験SMILE-3での1.8 MeV観測

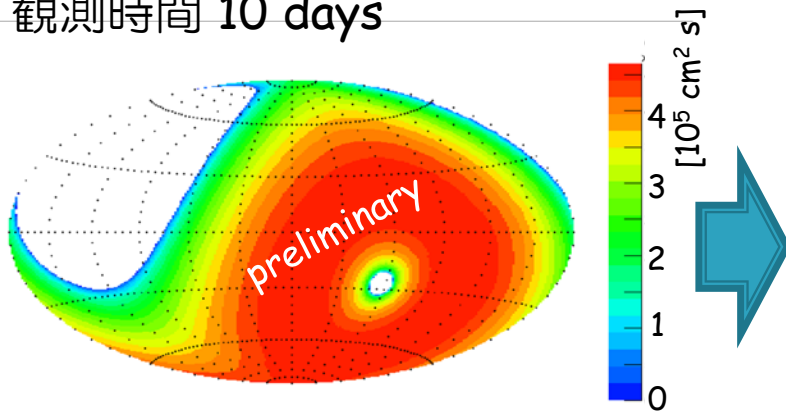
SMILE-3のPSFでぼかした1.8 MeV全天イメージ

エネルギー分解能: 6% (FWHM)
エネルギー積分範囲: $\pm 3\sigma$



大気減衰: $\times 0.85$ @ 40km

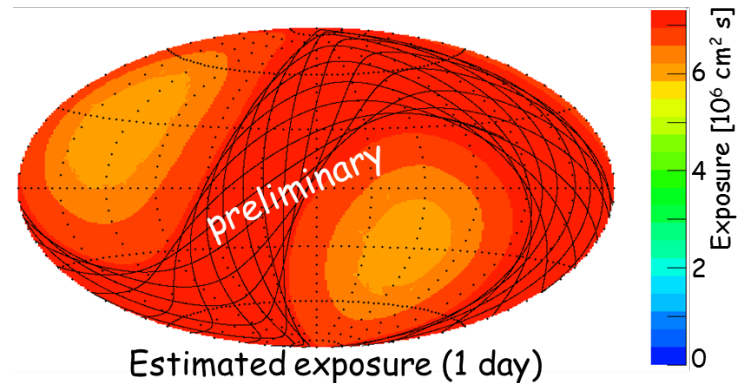
Exposure map @ Alice Springs (Australia)
有効面積 1.5 cm^2 , FoV $\sim \pi$ sr,
観測時間 10 days



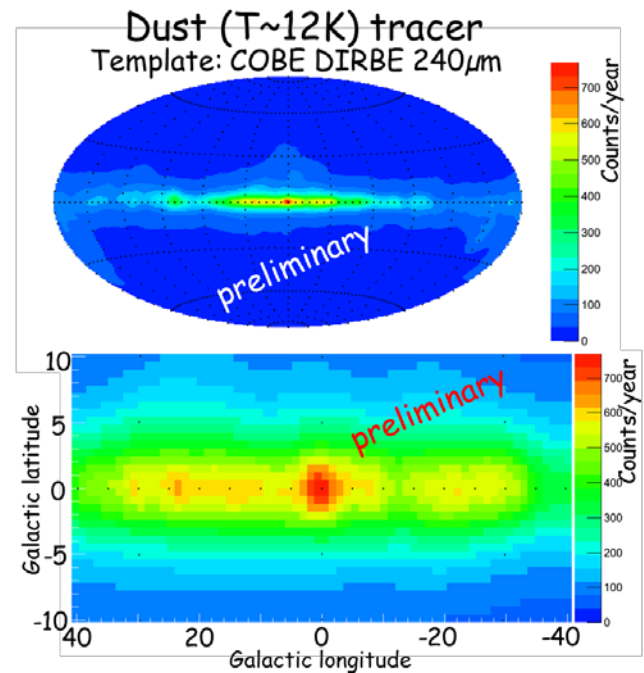
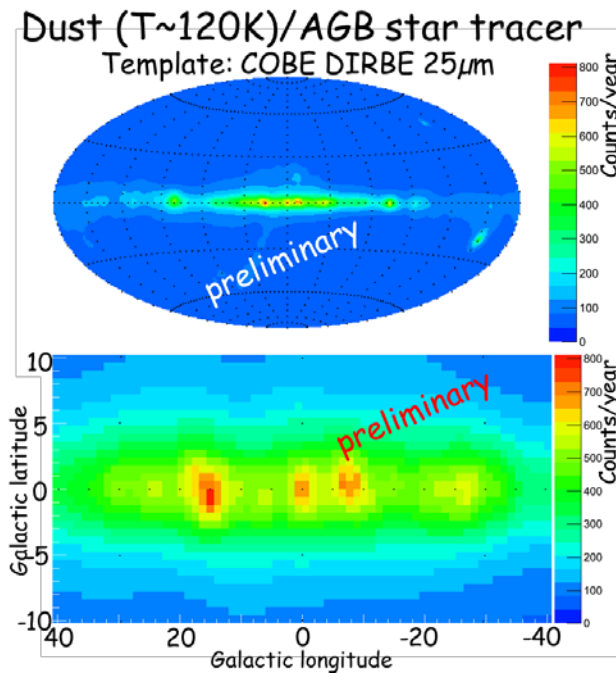
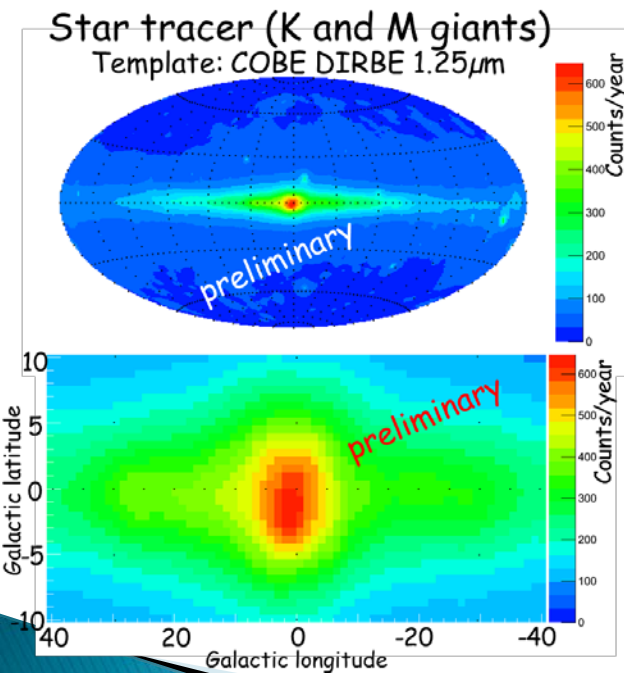
	1.25 μm	25 μm	240 μm
$-30^\circ \leq l \leq 30^\circ$ $-6^\circ \leq b \leq 6^\circ$	120 counts	120 counts	120 counts
$-30^\circ \leq l \leq 30^\circ$ $-32^\circ \leq b \leq 20^\circ$	24 counts	29 counts	20 counts
$-120^\circ \leq l \leq -60^\circ$ $-6^\circ \leq b \leq 6^\circ$	50 counts	56 counts	49 counts

5 σ 程度の有意度で銀河中心の超過を検出可能

衛星では？

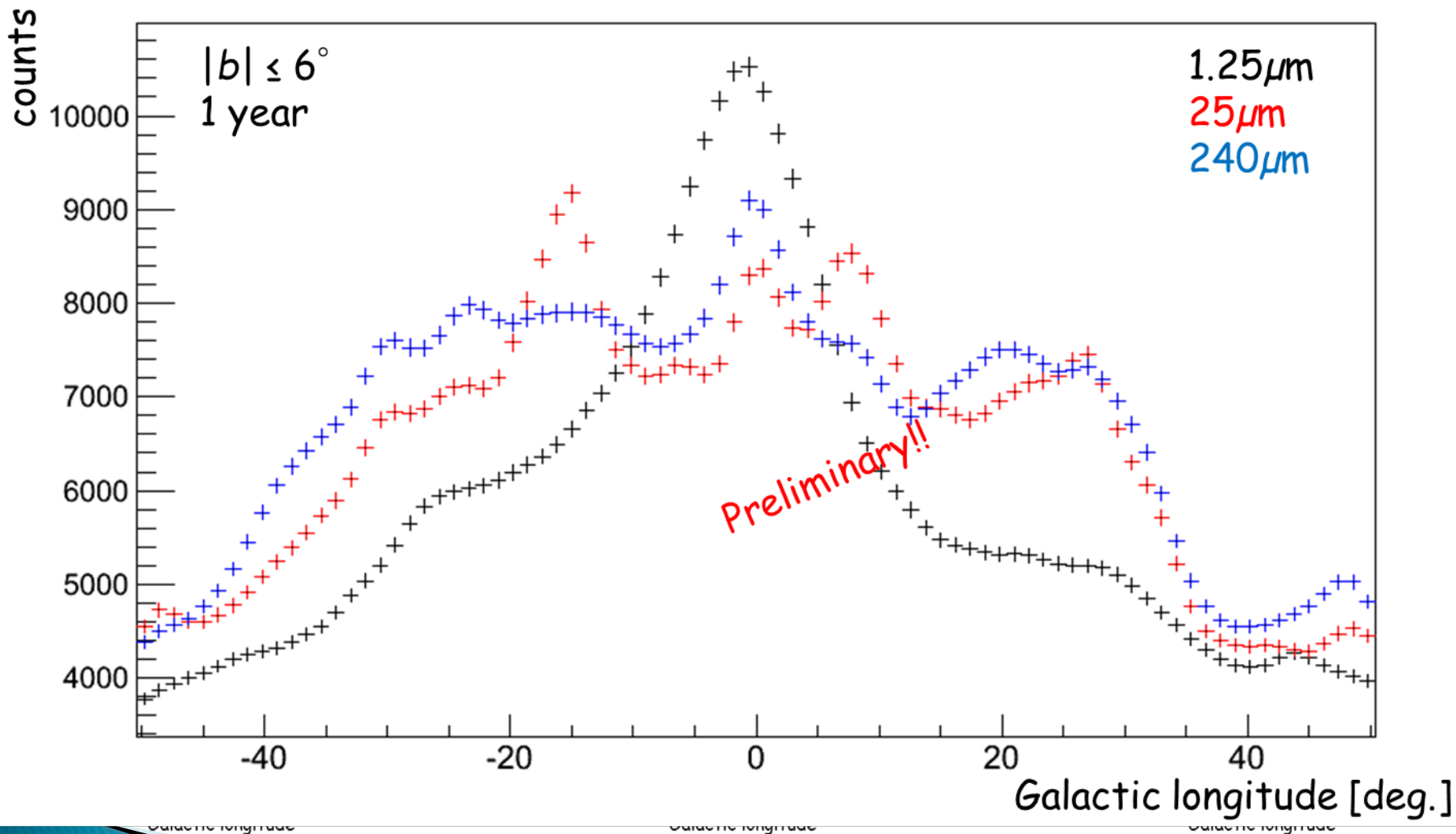


有効面積： 200 cm^2 (天頂方向)
FoV： $2\pi \text{ sr}$
PSF： $\sim 2.3^\circ$ (ARM: 2° & SPD: 10°)
Energy res.: 2.4% @ 1.8 MeV (FWHM)
energy cut: $\pm 3\sigma$ @ 1.8 MeV
軌道: Fermiと同じ軌道を仮定



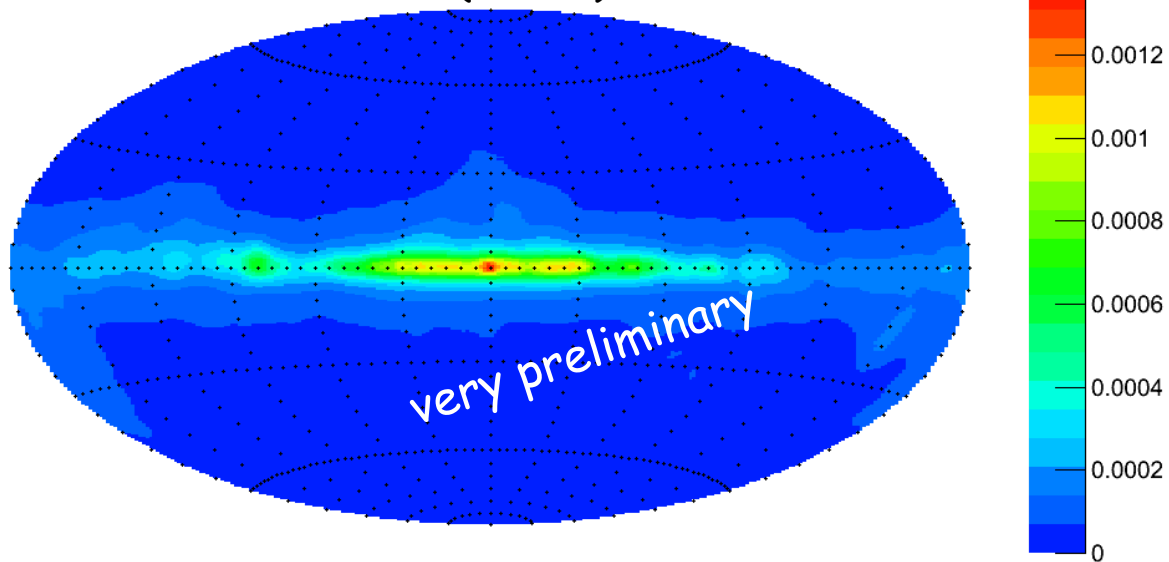
1年間の観測で明瞭な分布が測定可能

衛星では？

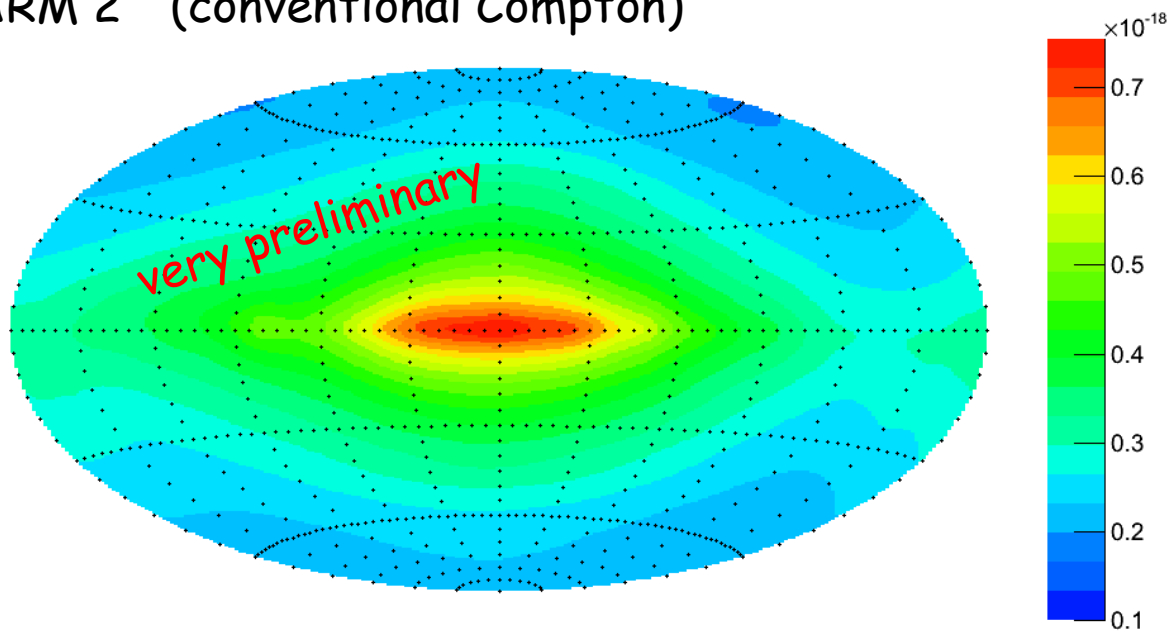


1年間の観測で明瞭な分布が測定可能

ARM 2° SPD 10° (ETCC)



ARM 2° (conventional Compton)



電子・陽電子対消滅線

SMILE-3

有効面積：

20 cm²

PSF：

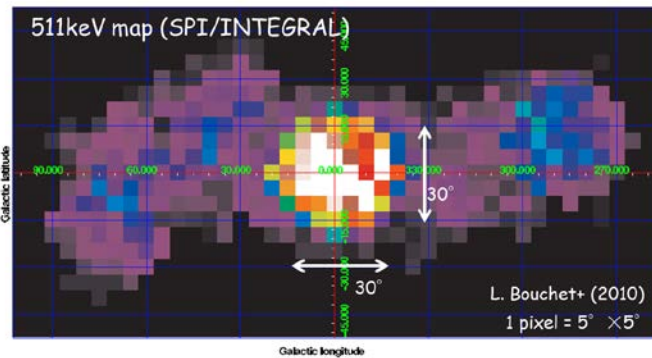
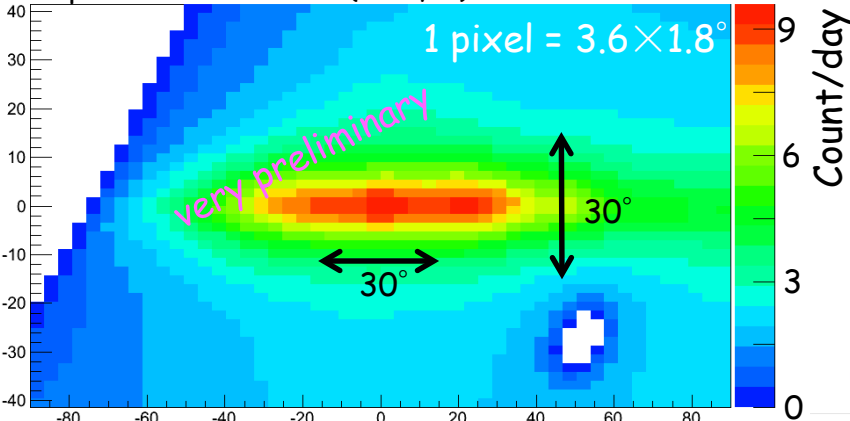
6.7°

ARM: 5° SPD: 30°

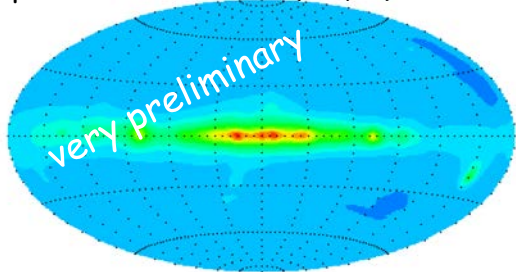
大気減衰：

3.5 g/cm²

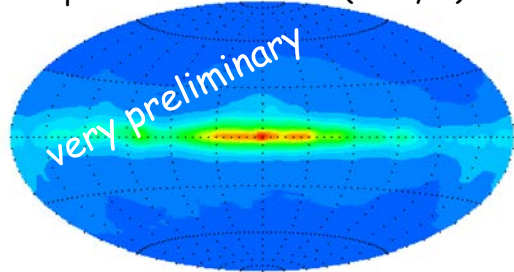
Template: DIRBE/COBE (240 μm)



Template: DIRBE/COBE (25 μm)



Template: DIRBE/COBE (240 μm)

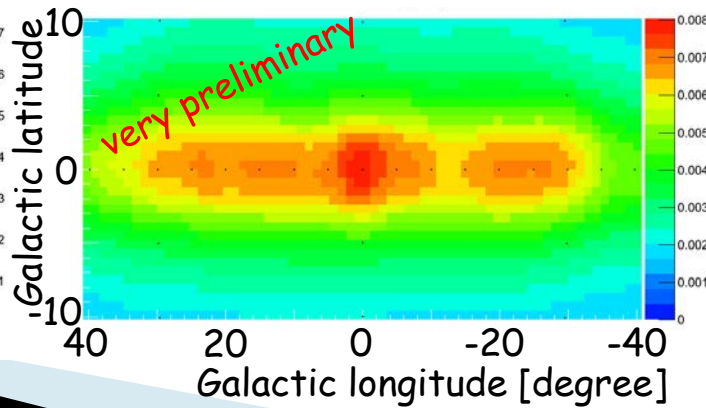
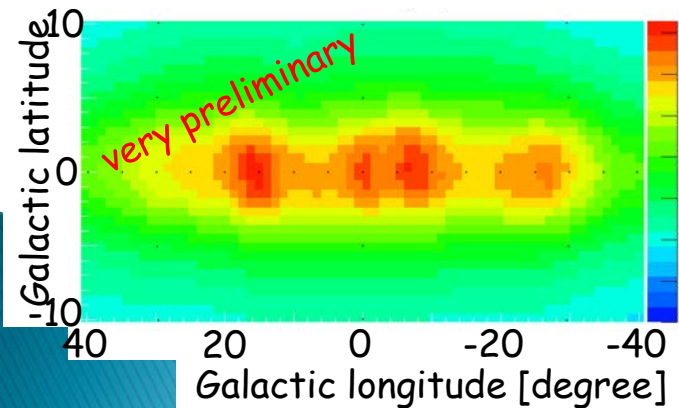


satellite

PSF: 4.5°

ARM: 3.5° SPD: 20°

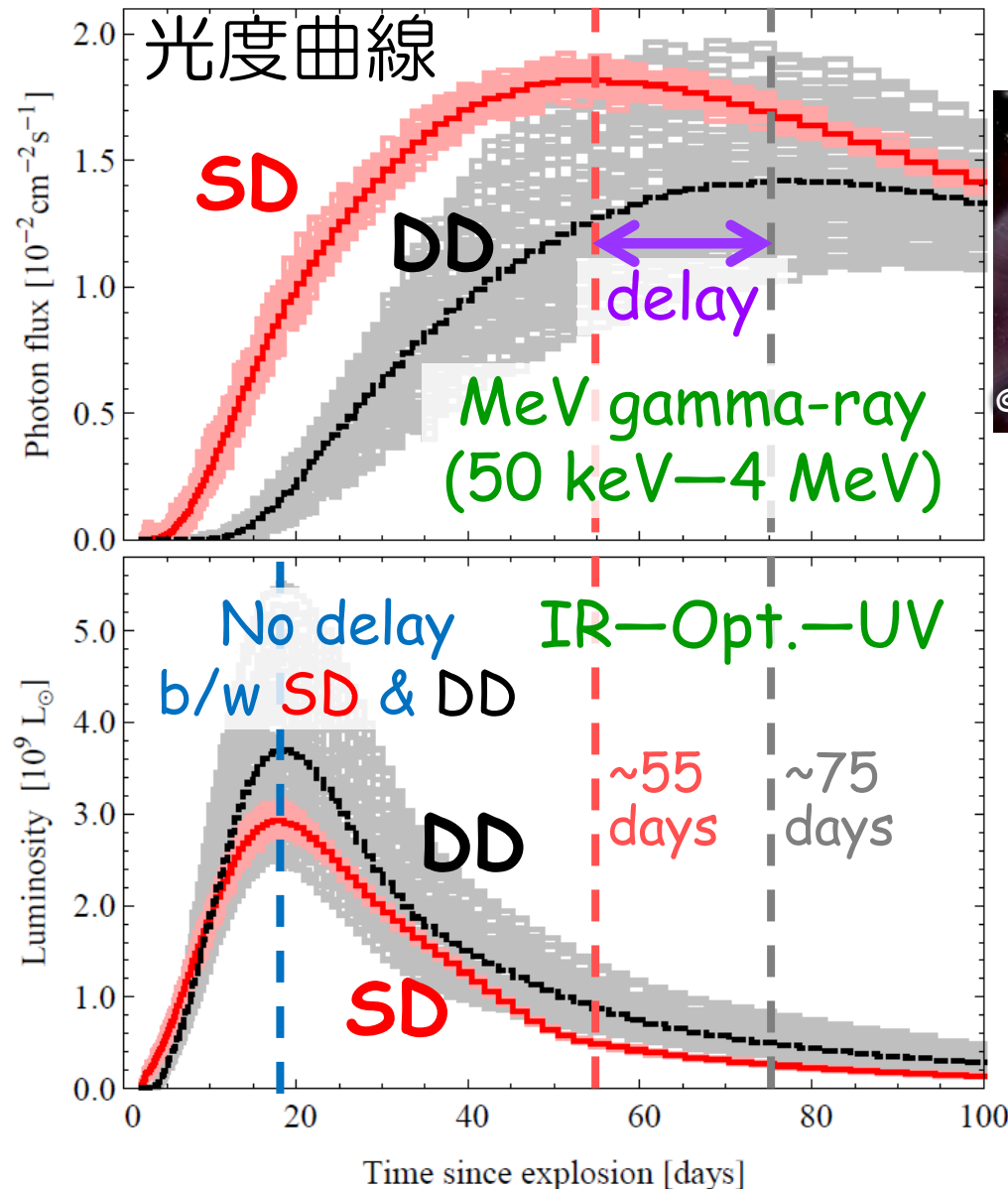
e⁺e⁻対消滅線の
詳細な分布も
取得可能



Ia型超新星爆発に伴うガンマ線

Ia型超新星の爆発過程診断方法

A. Summa, ..., K. Maeda, et al., A&A 554, A67 (2013)



伴星からの質量降着 白色矮星同士の合



**MeVガンマ線観測は
Ia型超新星爆発の
重大なヒントをもたらす**

観測機器に要求される項目

- 良い点源角度分解能 (PSF)
- 効率的な雑音事象の抑制
- 広い視野 (FoV)

SN2014J(@3.5 Mpc) by SPI/INTEGRAL

^{56}Ni lines: (158 & 812 keV)

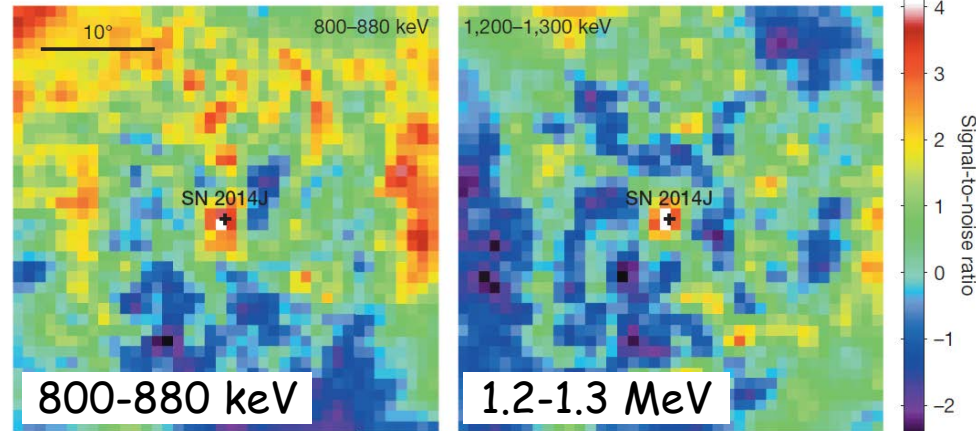
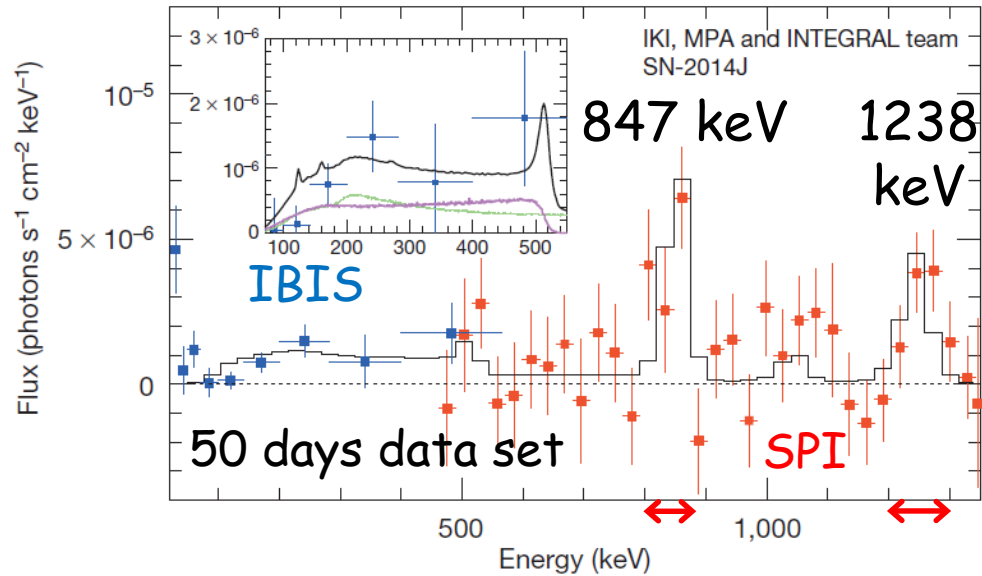
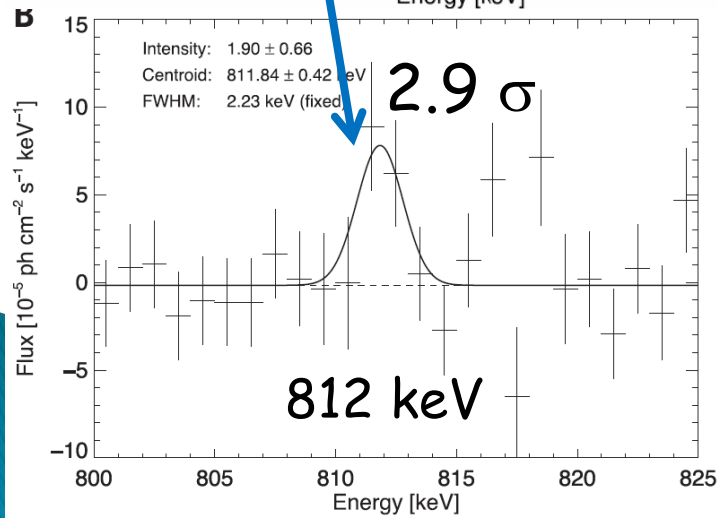
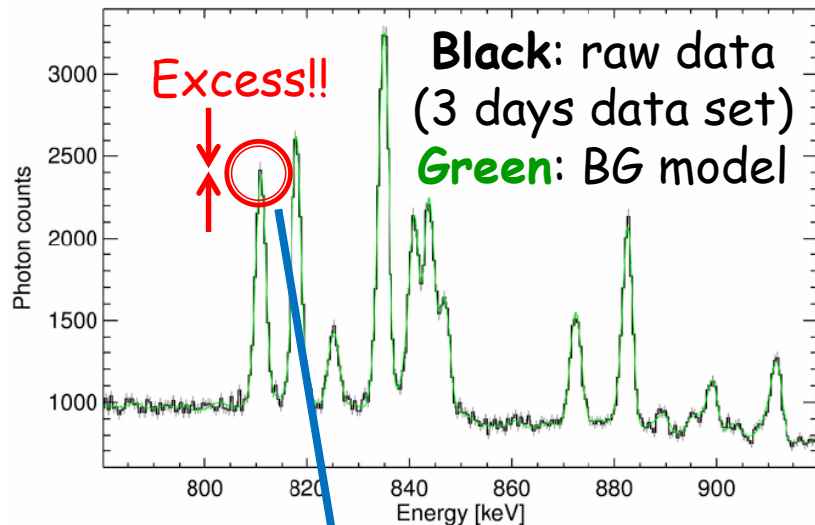
3 days around 17.5d after SN

R. Diehl+, 2014, Science, 345, 1162

^{56}Co lines: (847 & 1238 keV)

50 days during 50-100d

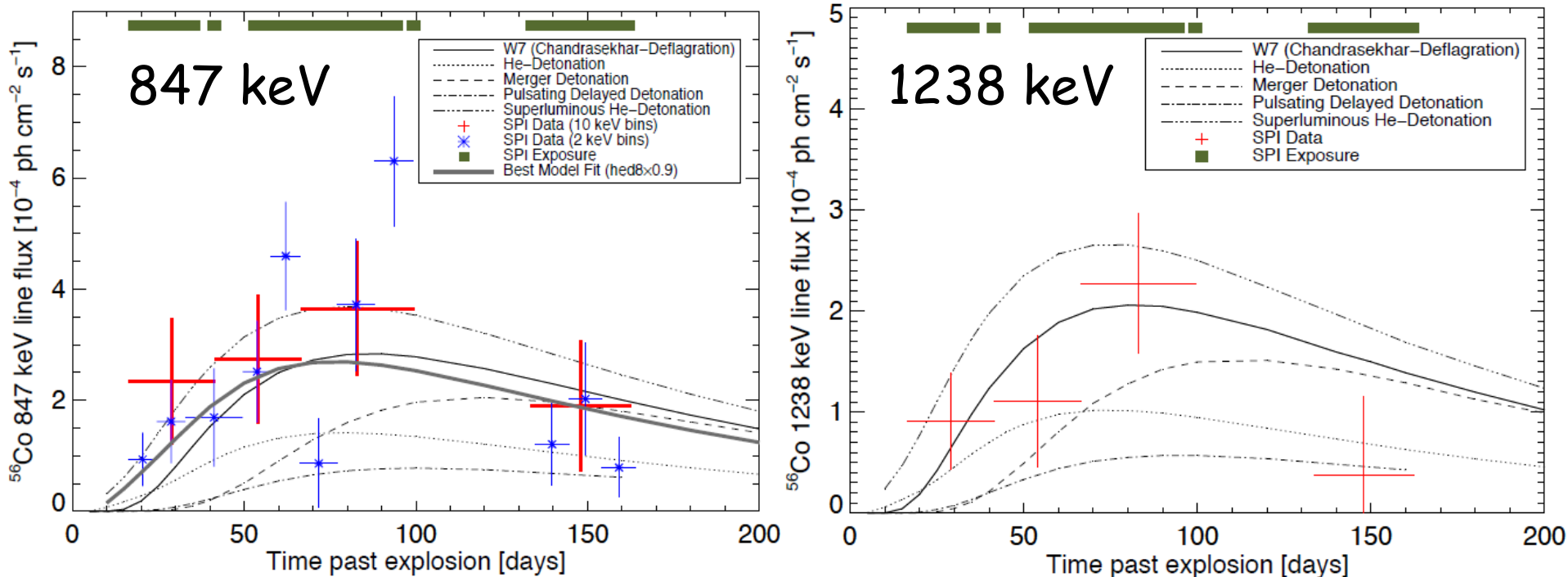
E. Churazov+, 2014, Nature, 512, 406



INTEGRAL's lightcurves of SN2014J

Time profiles of two bright ^{56}Co lines (847 & 1238 keV) are successfully obtained.

These are consistent with both of **SD** & **DD** scenarios



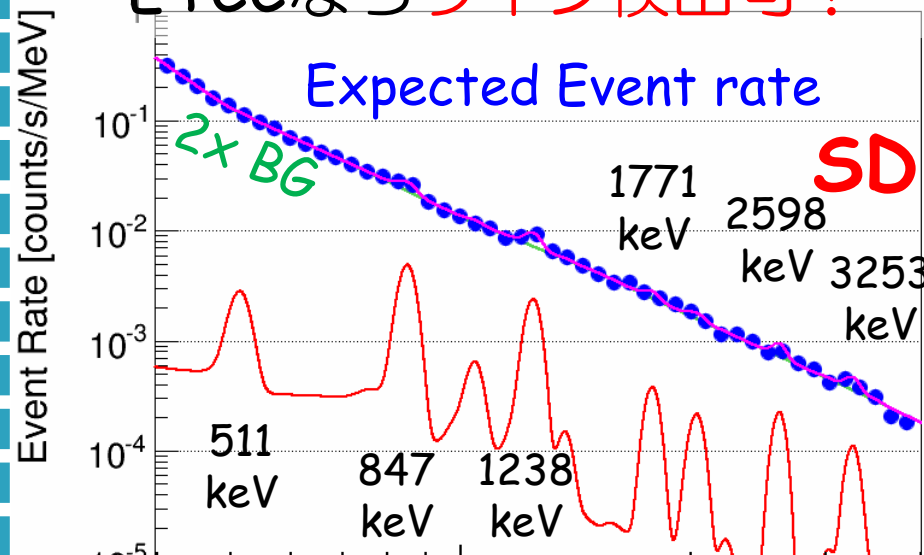
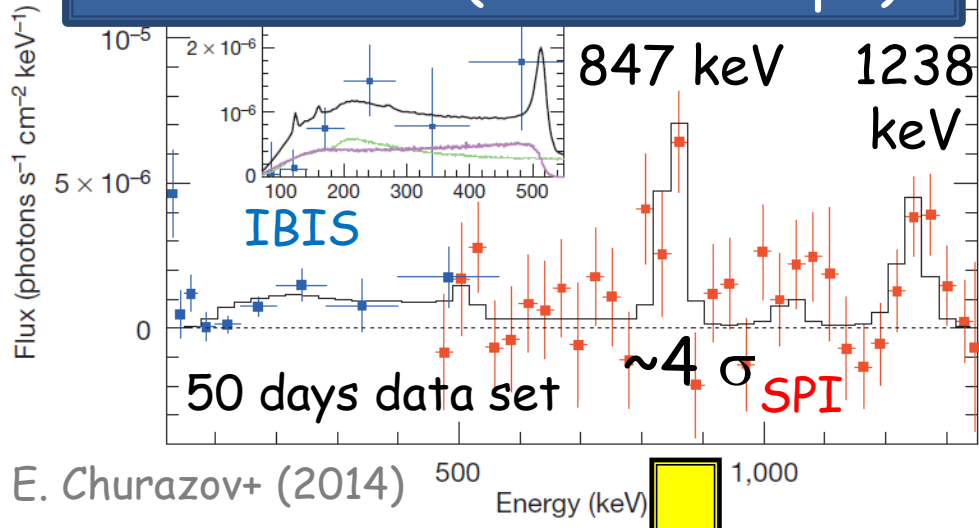
R. Diehl+, 2015, *A&A*, 574, A72

Even for the closest SN Ia (~ 3.5 Mpc) in the last 40 years, current large satellite suffers huge background.

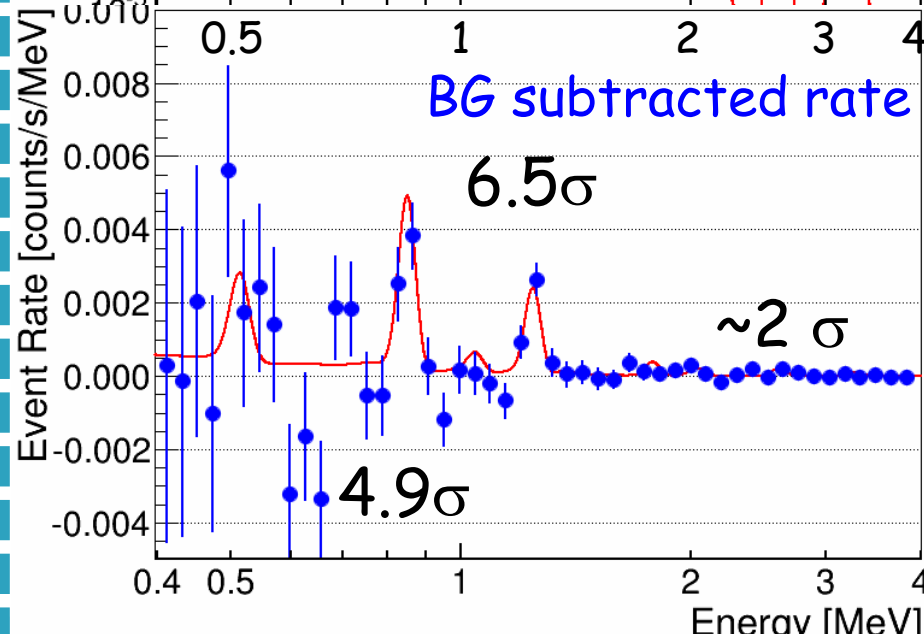
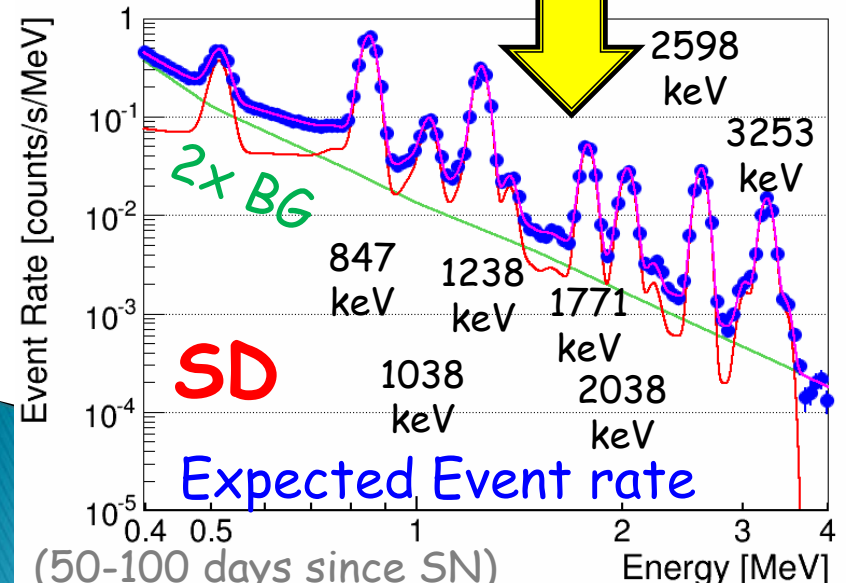
イメージング核分光の世界が変わる！！

INTEGRAL(SN@3.5 Mpc)

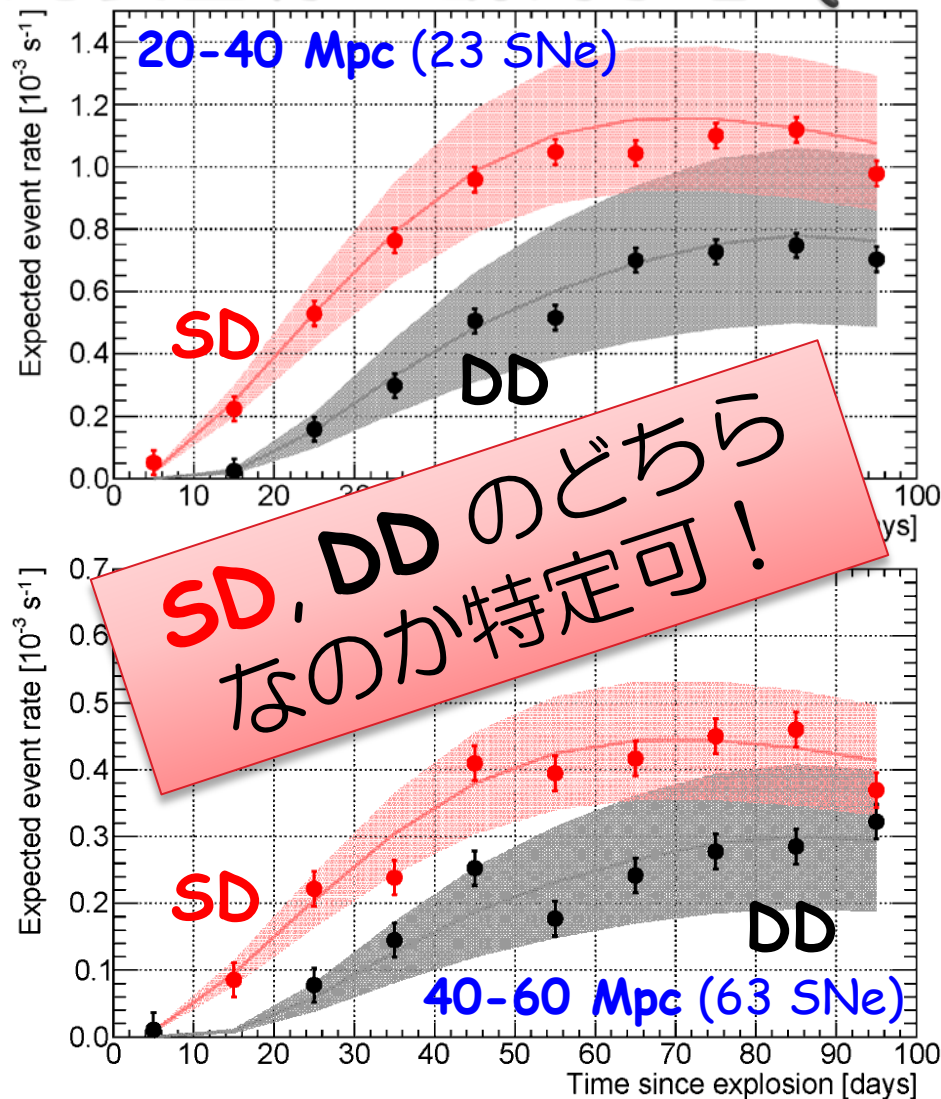
40 Mpc (~5.4 SNe/yrs) できさえ
ETCCならライン検出可！



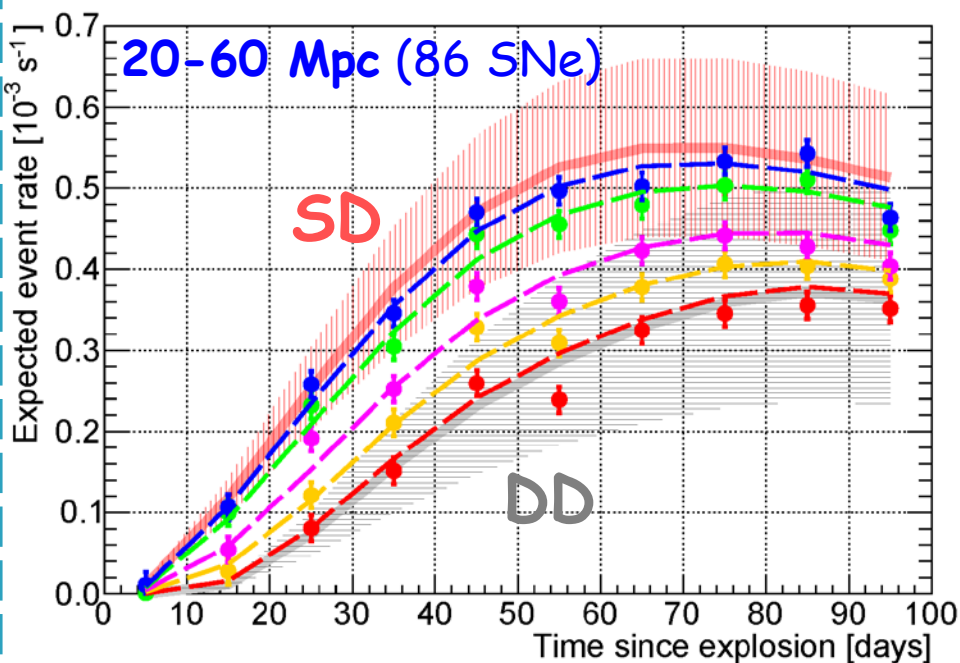
ETCC衛星(SN@3.5 Mpc)



光度曲線の観測予想 (Energy: 0.7–4.0 MeV)



SD & DDシナリオの
共存比を特定できるか!?



- SD (20-60 Mpc)
- DD (20-60 Mpc)
- SD ratio 0%
- SD ratio 25%
- SD ratio 50%
- SD ratio 75%
- SD ratio 100%

5年間の衛星観測で、
20%程度の不定性で
共存比がわかる!

SNの個性(Flux, 軸不定性など)を
多数のSN観測で抑える事が有効!

--> All-Sky Survey

まとめ

- ▶ ETCCによる電子飛跡を用いたCompton再構成
⇒ より鋭いPSFと優れたS/N
- ▶ PSF $\sim 5^\circ$ と有効面積 $\sim 20 \text{ cm}^2$
 ^{26}Al の銀河中心領域の超過
511 keVの大まかな分布
⇒ 10日程度の気球実験で観測可能
- ▶ PSF $\sim 2^\circ$ と有効面積 $\sim 200 \text{ cm}^2$
26Alの詳細な銀河面分布
511 keVの詳細な分布
⇒ 1年の衛星観測で詳細なマップが取得可能
超新星爆発に伴う核ガンマ線の観測
⇒ 40 Mpc程度まで観測可能
Ia型SNのlight curve観測
⇒ 5年で爆発機構の解明へ