

# MeVガンマ線全天観測で拓く 宇宙核物理

高田淳史 (京大理)

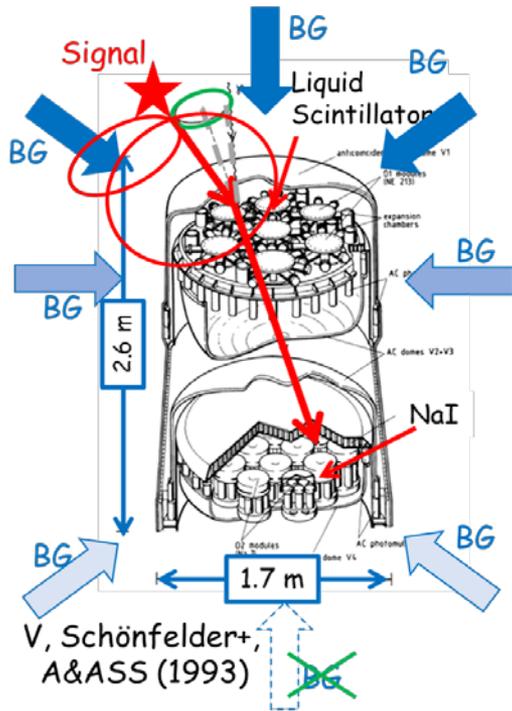
- ETCCの有効面積・PSF
- 銀河面拡散核ガンマ線
- Ia型超新星爆発に伴うガンマ線
- まとめ

# 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

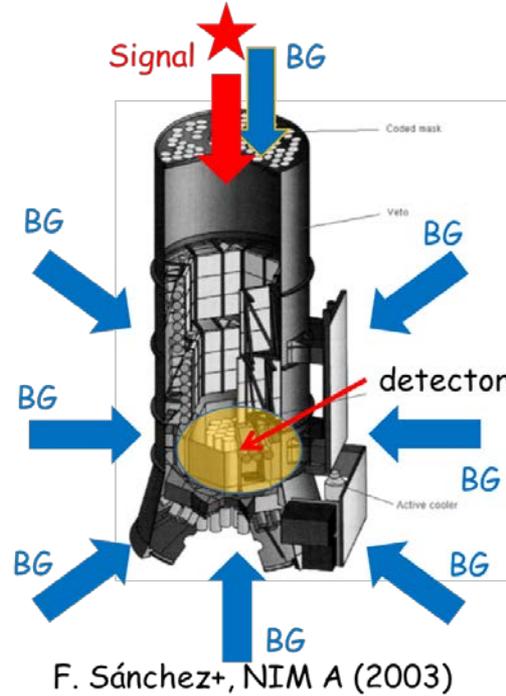
# MeVガンマ線観測の現状打開へ

COMPTEL



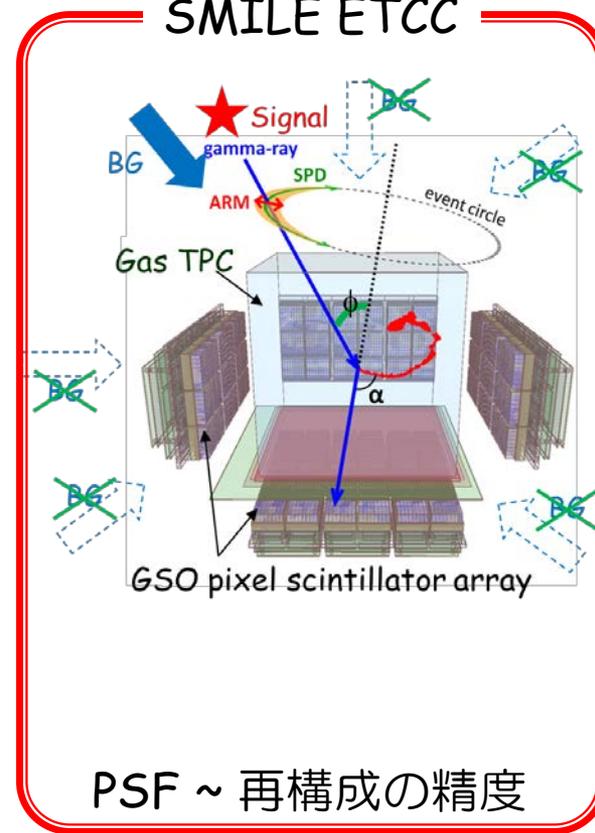
PSF ~ 平均的な散乱角

SPI/INTEGRAL



BGを含む統計量で方向検出

SMILE ETCC



PSF ~ 再構成の精度

3σの有意度で検出できる最小flux

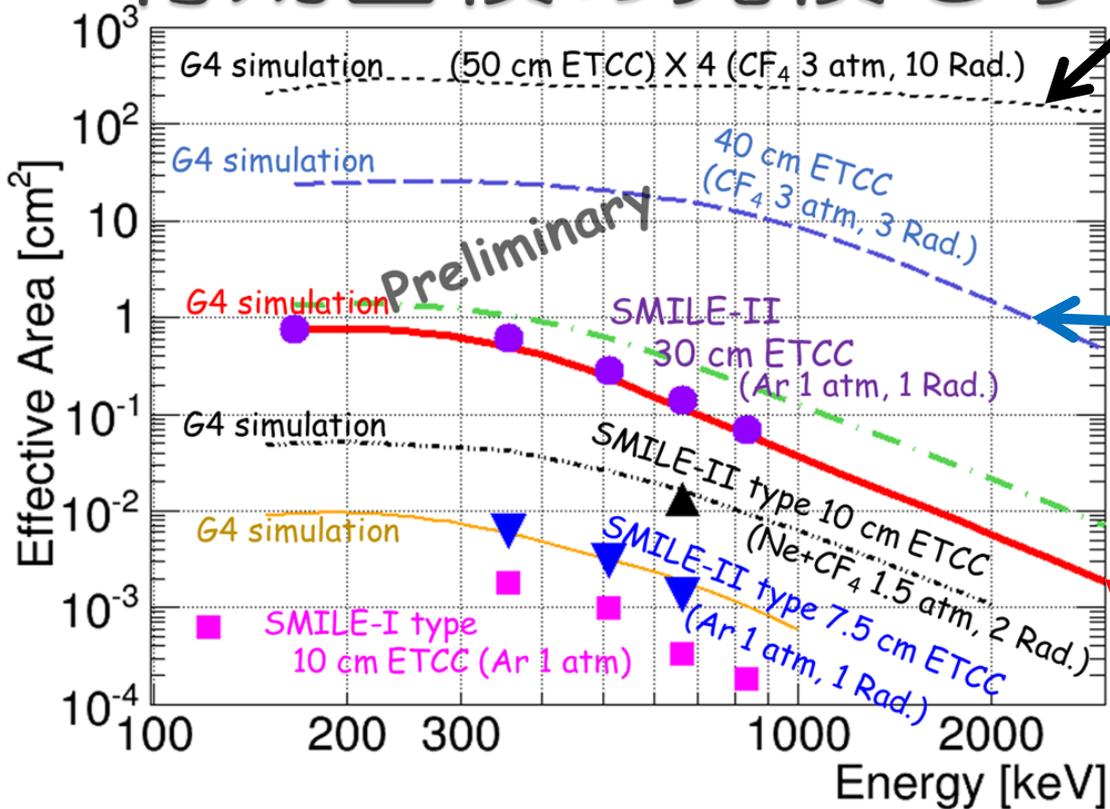
$$\text{検出感度} = 3 \times \sqrt{\frac{f_B \Delta\Omega \Delta E}{AT}}$$

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

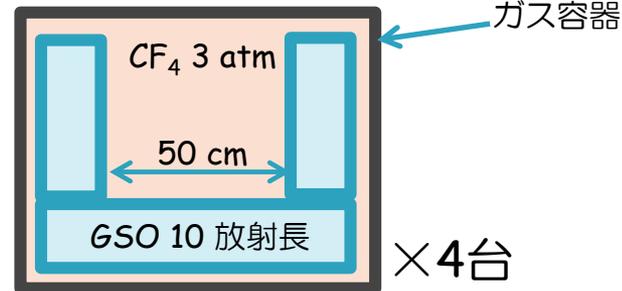
シミュレーション・計算で算出可能

PSFの広がり小さければ、視線方向のBGが主

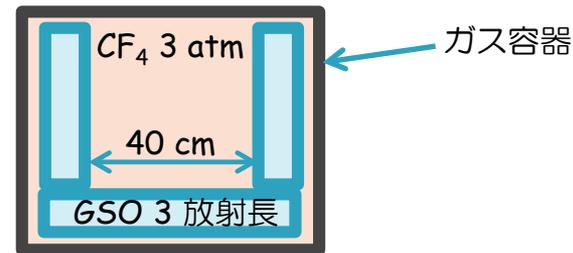
# 有効面積の見積もり



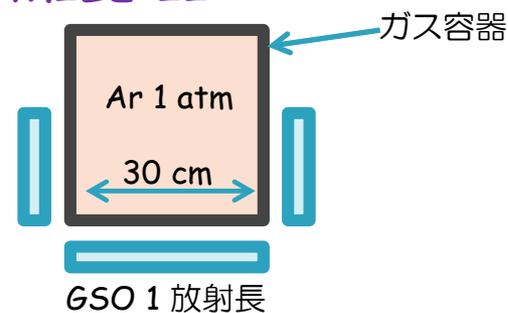
satellite



SMILE-III



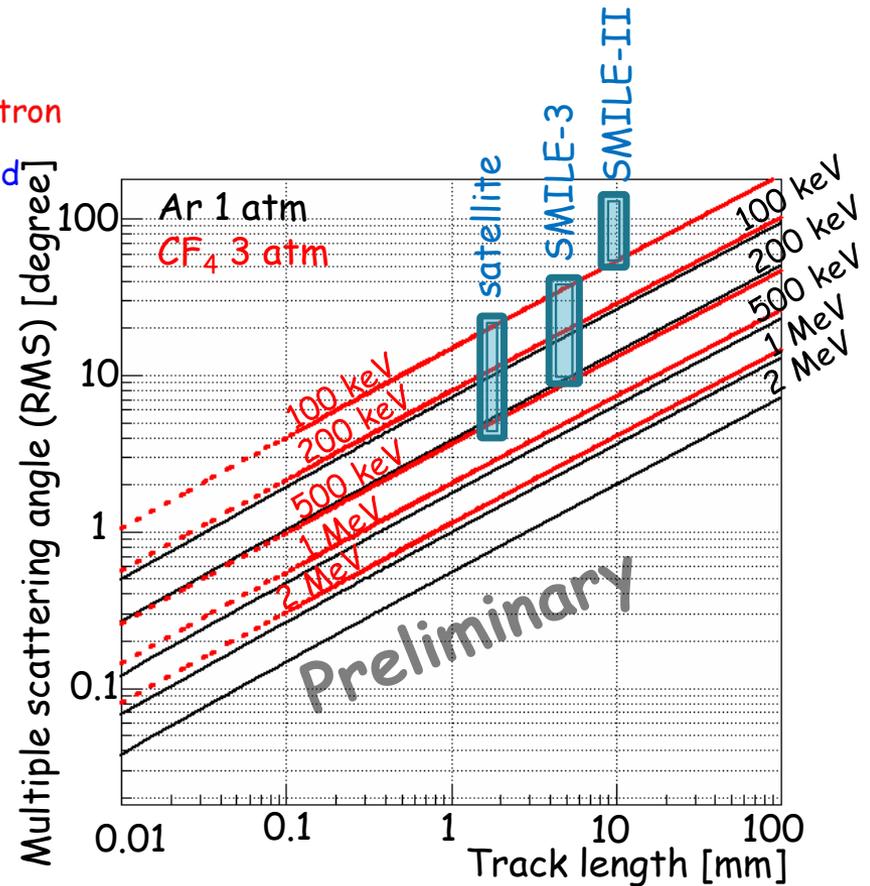
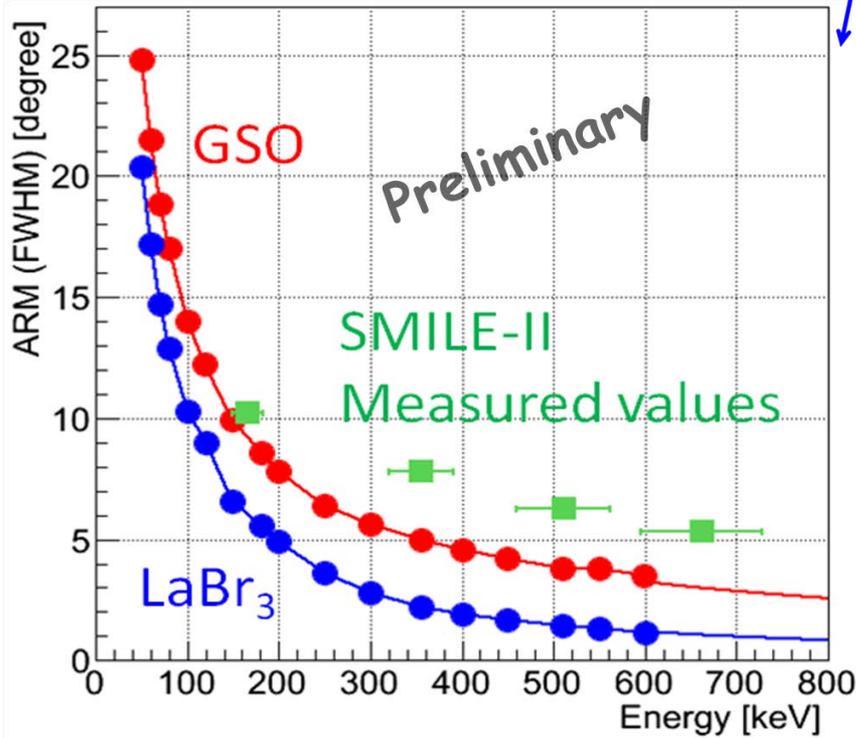
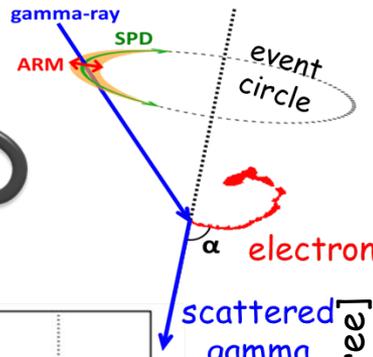
SMILE-II



- 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

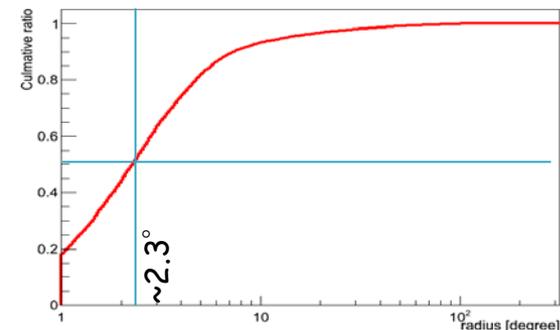
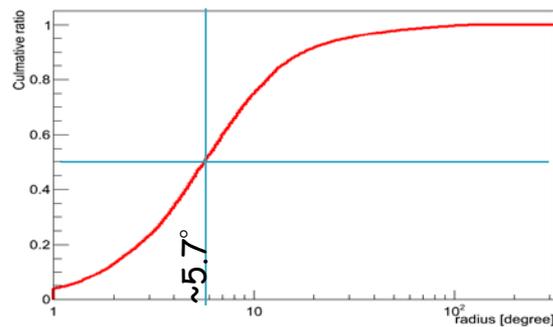
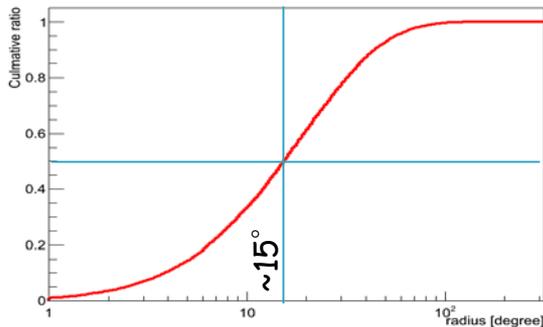
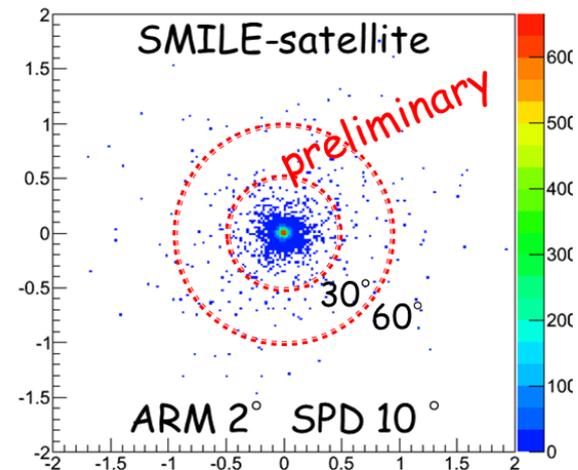
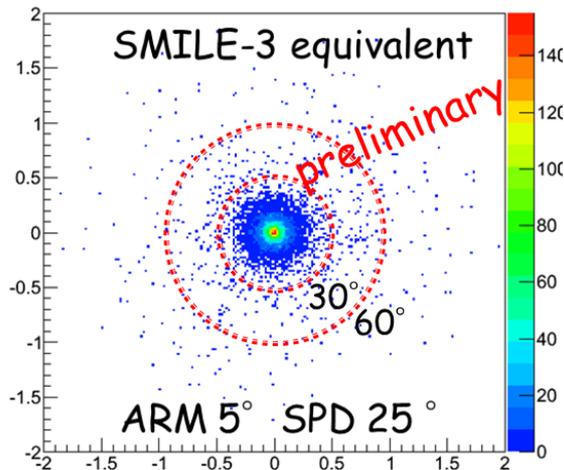
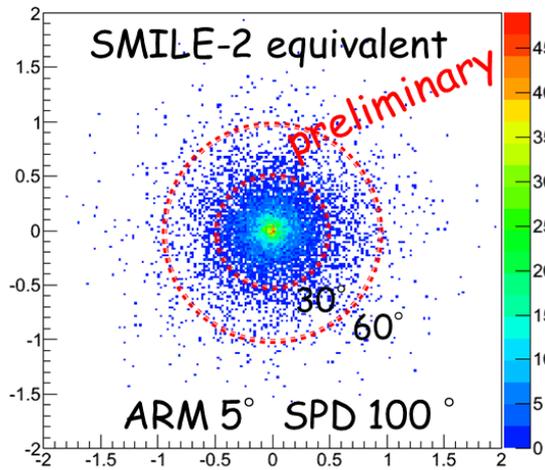
# ARM & SPD



- SMILE-II:  $5.3^\circ$  (662 keV)
- SMILE-3:  $5^\circ$  (511 keV)
- Satellite:  $3.5^\circ$  (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

## ◆ $^{26}\text{Al}$ (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)



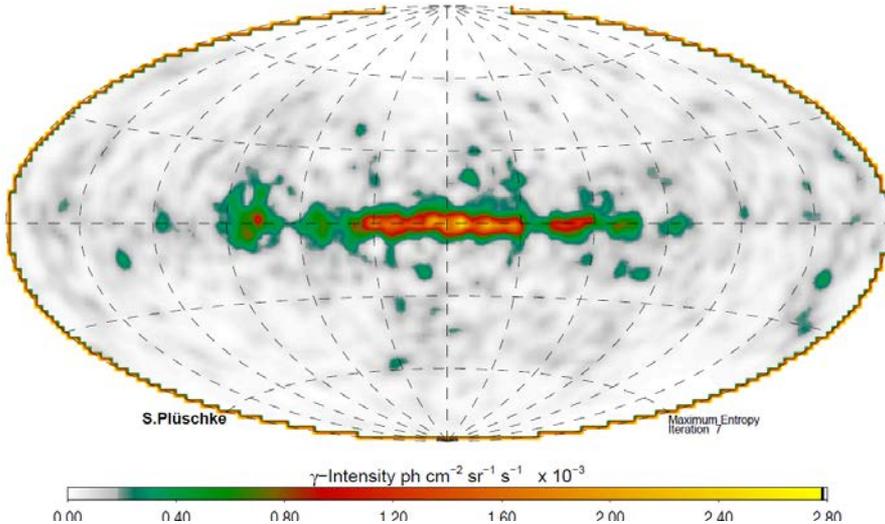
半減期  $7 \times 10^5$  年

HEAO-Cで発見後, SMMでも確認

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

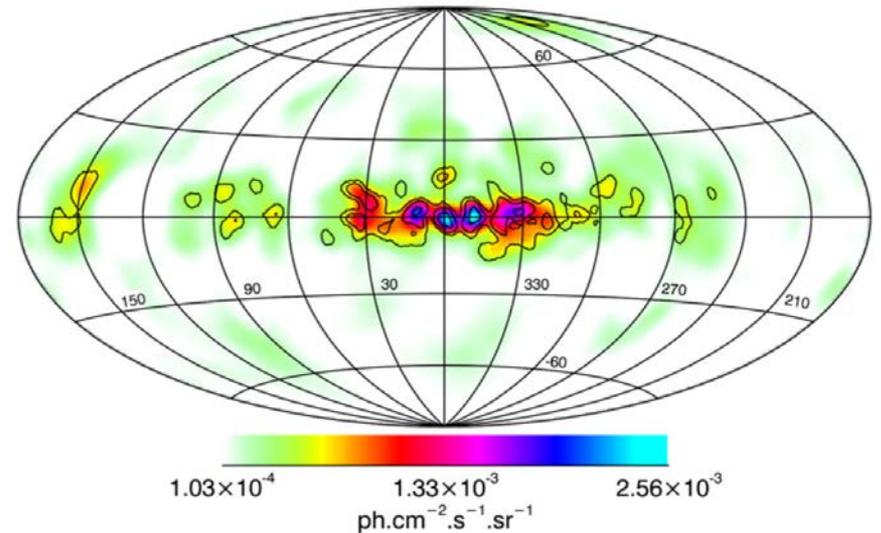
### COMPTEL

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



$^{60}\text{Fe}$  (1.173 MeV, 1.333 MeV)

半減期  $3 \times 10^6$  年

- SPI/INTEGRALとRHESSIで観測
- $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al} \sim 0.15$

$^{60}\text{Fe} \rightarrow ^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + \gamma$  (1.173, 1.333 MeV)

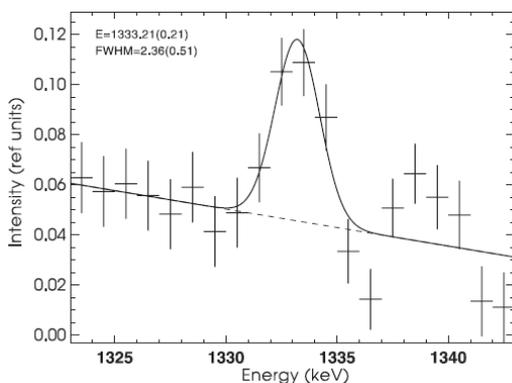
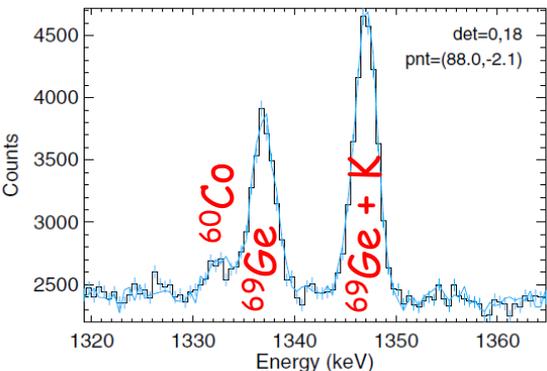
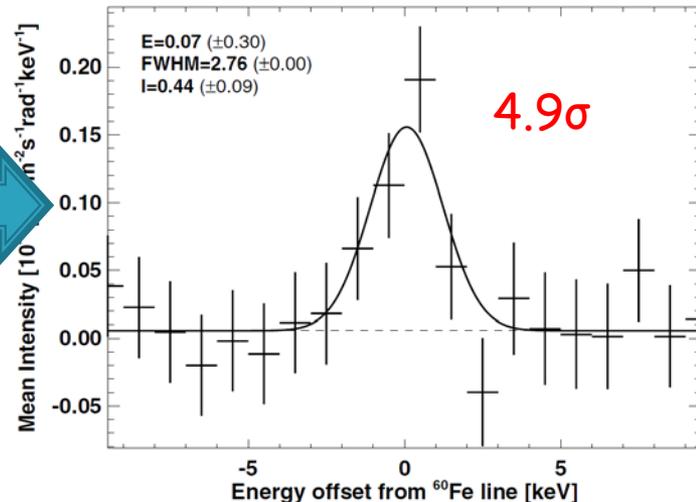
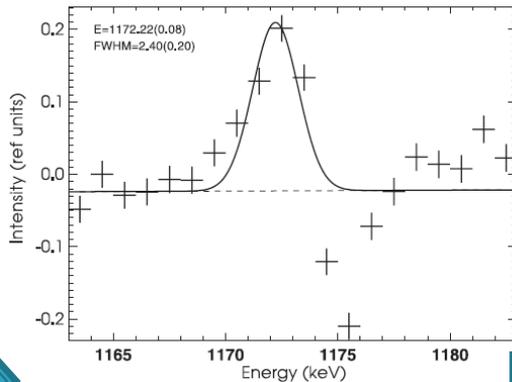
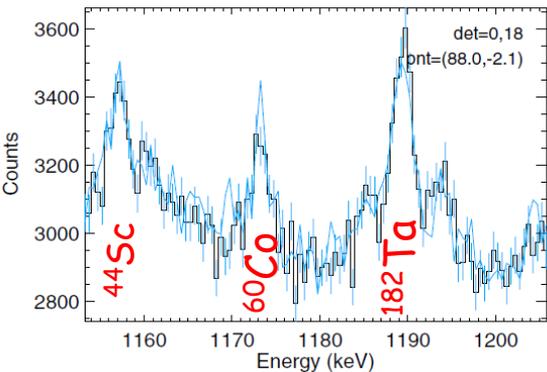
半減期 5.3 年

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



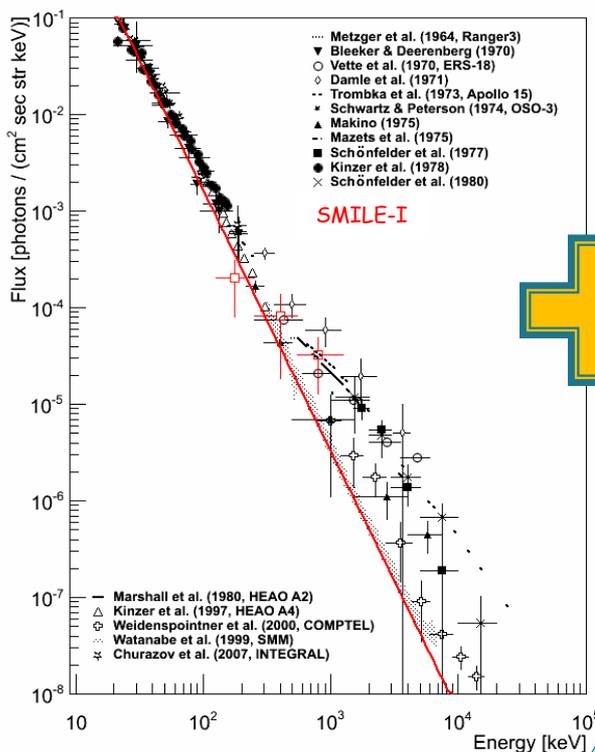
W. Wang+, A&A (2007)

# 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

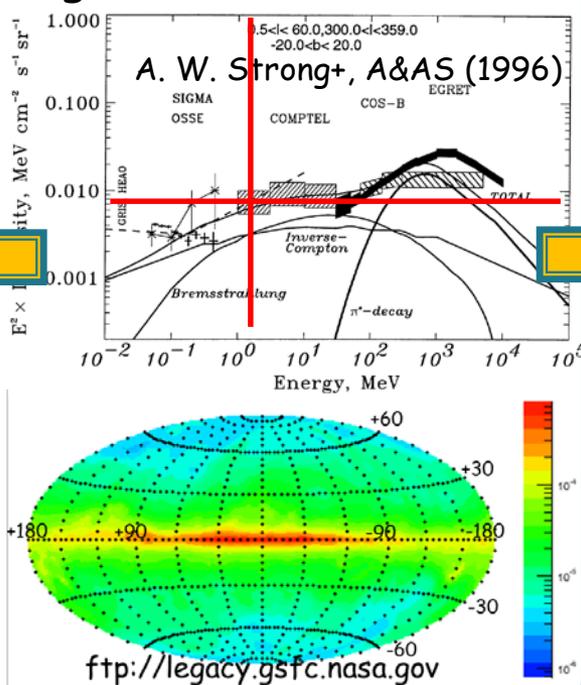
分布：一様・等方を仮定



## 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



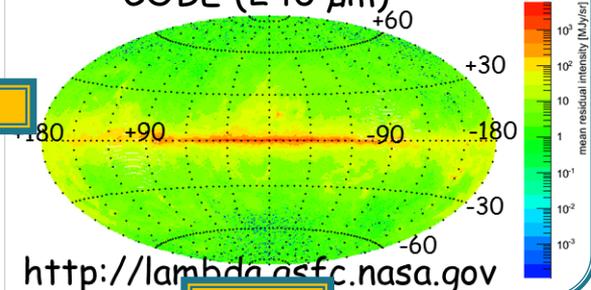
## <sup>26</sup>Al 1.8 MeV

強度：SPI/INTEGRAL  
 $3.5 \times 10^{-4}$  ph/cm<sup>2</sup>/s

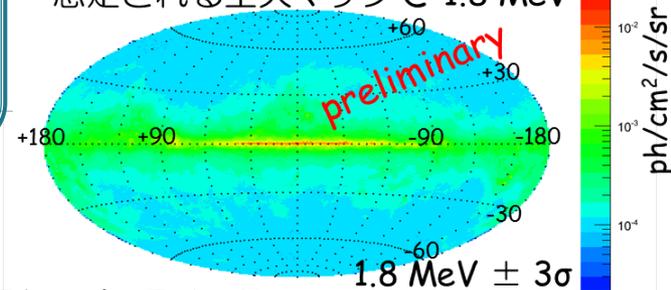
$|l| \leq 30^\circ$   $|b| \leq 10^\circ$   
L. Bouchet+, ApJ (2015)

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

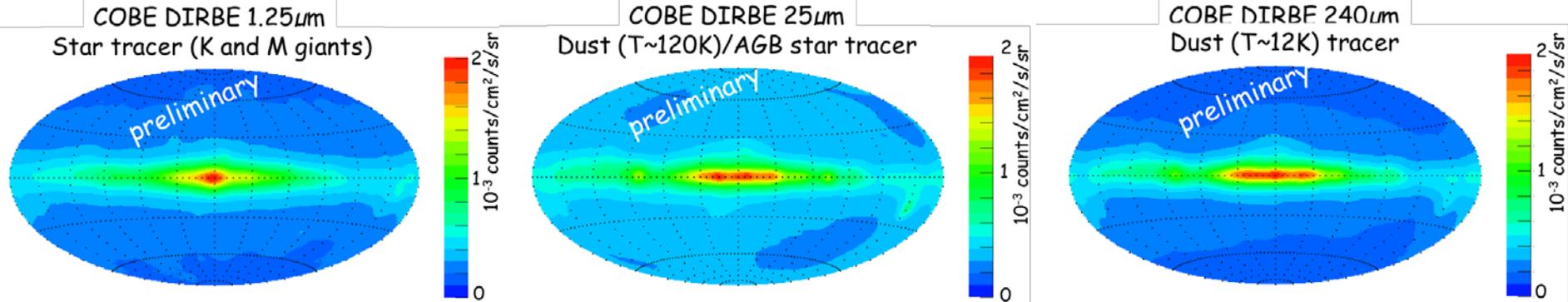
<sup>26</sup>Alの分布をtemplateで仮定

⇒ 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

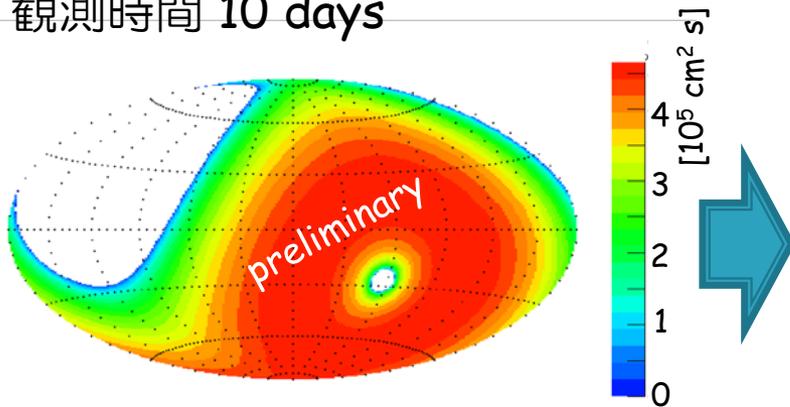
SMILE-3のPSFでぼかした1.8 MeV全天イメージ

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

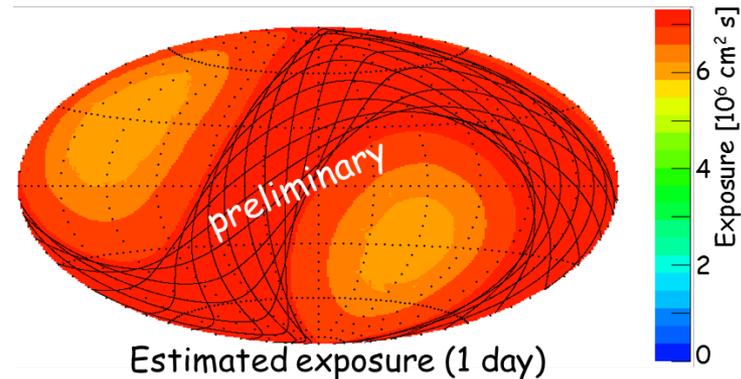
Exposure map @ Alice Springs (Australia)  
有効面積 1.5  $\text{cm}^2$ , FoV  $\sim \pi$  sr,  
観測時間 10 days



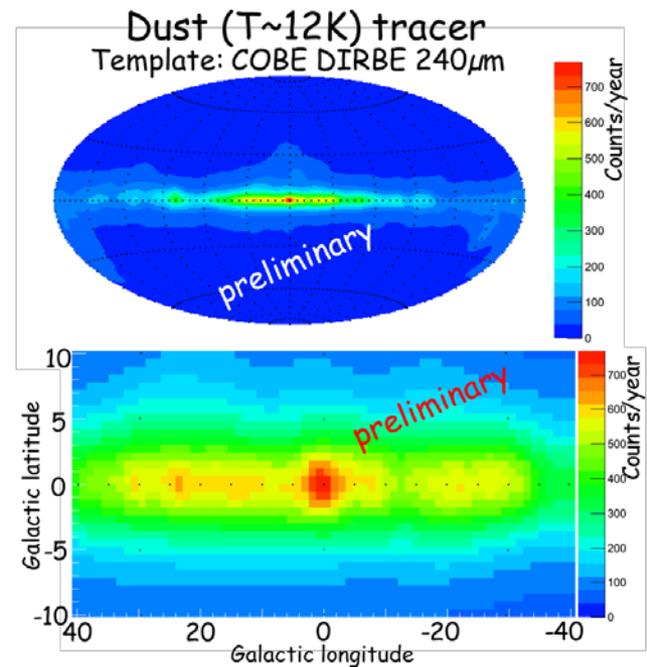
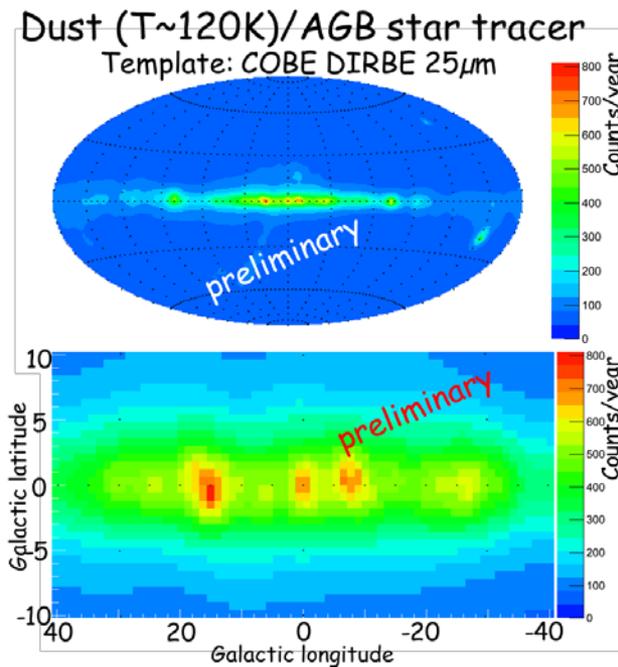
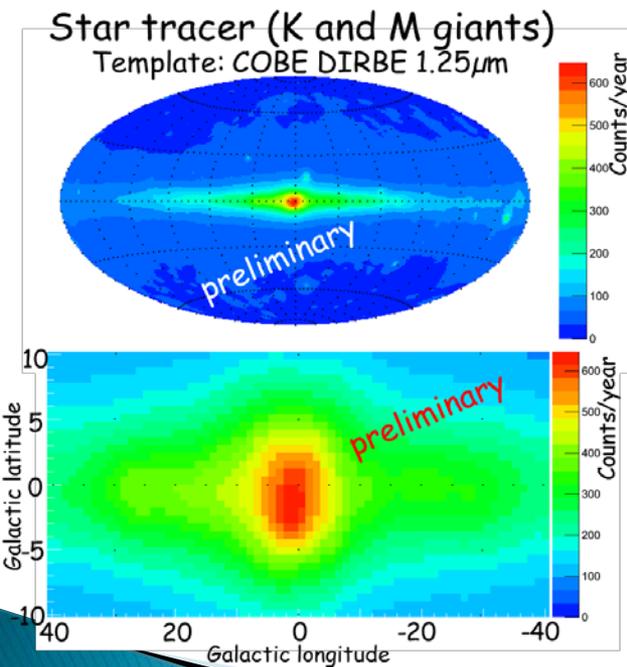
	1.25 $\mu\text{m}$	25 $\mu\text{m}$	240 $\mu\text{m}$
$-30^\circ \leq l \leq 30^\circ$ $-6^\circ \leq b \leq 6^\circ$	120 counts	120 counts	120 counts
$-30^\circ \leq l \leq 30^\circ$ $-32^\circ \leq b \leq 20^\circ$	24 counts	29 counts	20 counts
$-120^\circ \leq l \leq -60^\circ$ $-6^\circ \leq b \leq 6^\circ$	50 counts	56 counts	49 counts

5 $\sigma$ 程度の有意度で銀河中心の超過を検出可能

# 衛星では？

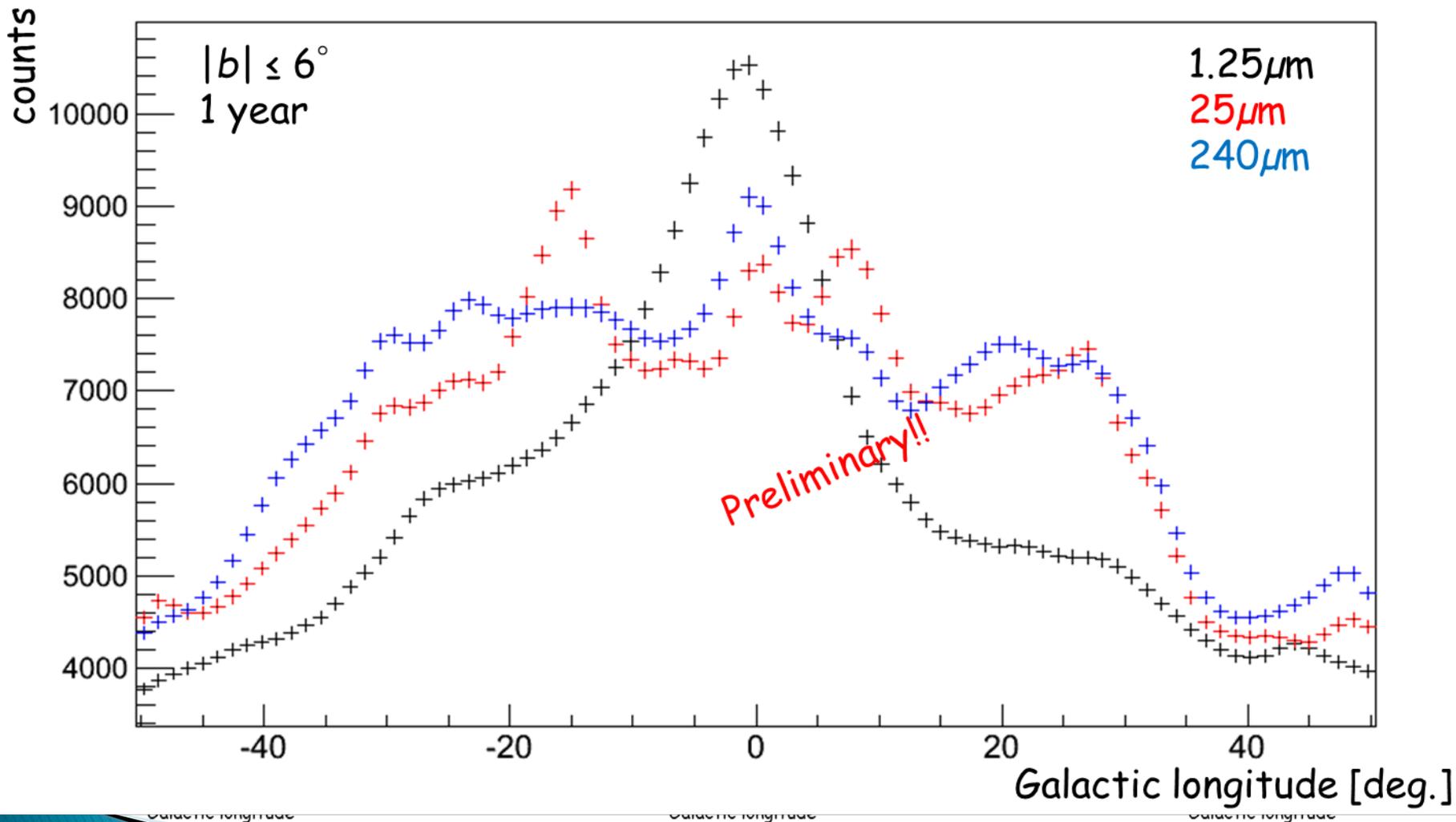


有効面積：  $200 \text{ cm}^2$  (天頂方向)  
FoV：  $2\pi \text{ sr}$   
PSF：  $\sim 2.3^\circ$  (ARM:  $2^\circ$  & SPD:  $10^\circ$ )  
Energy res.:  $2.4\%$  @  $1.8 \text{ MeV}$  (FWHM)  
energy cut:  $\pm 3\sigma$  @  $1.8 \text{ MeV}$   
軌道: Fermiと同じ軌道を仮定



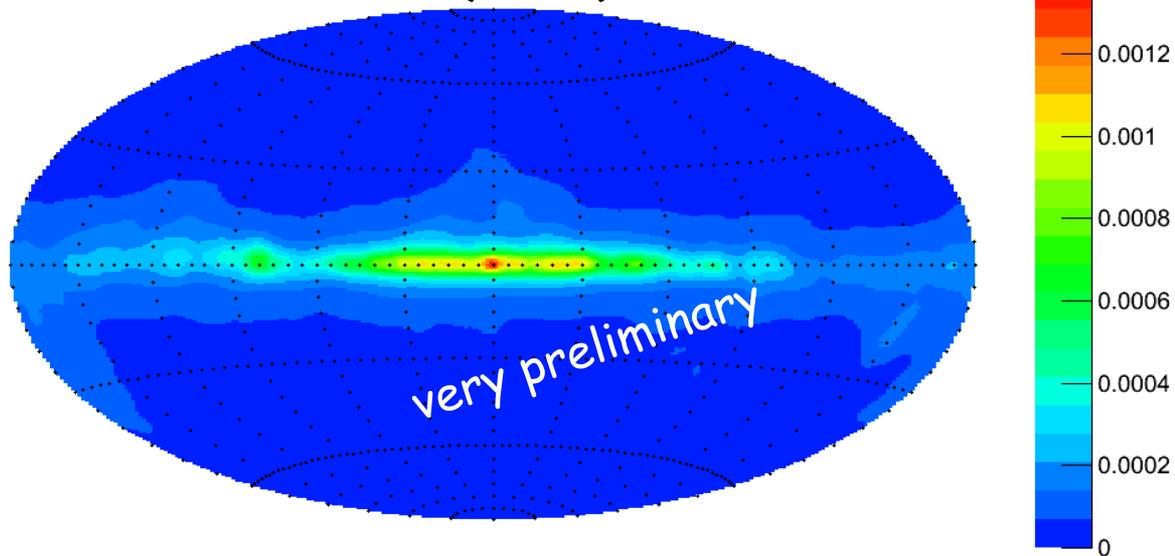
1年間の観測で明瞭な分布が測定可能

# 衛星では？

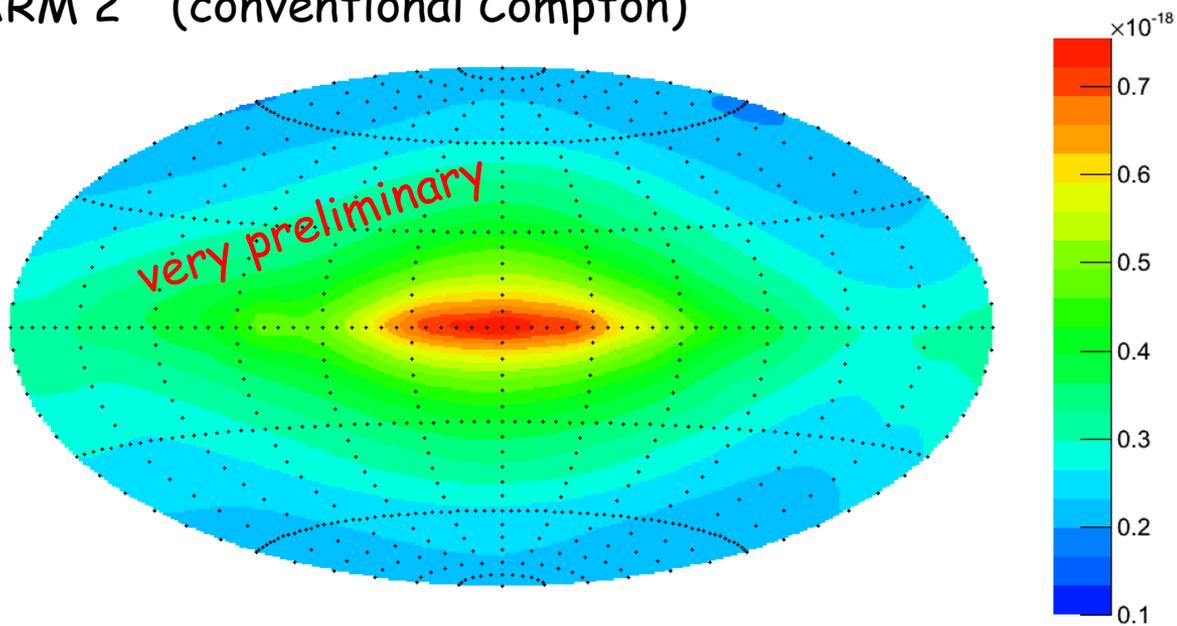


1年間の観測で明瞭な分布が測定可能

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 cm<sup>2</sup>

PSF：

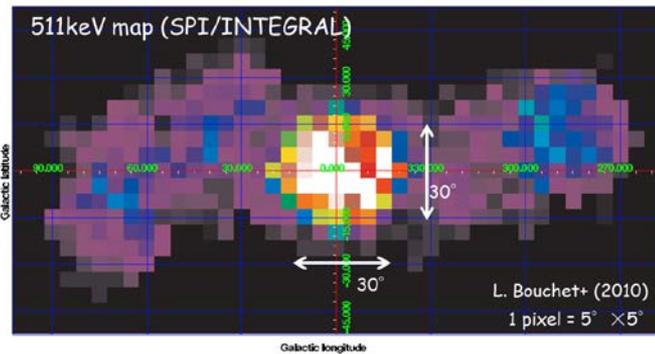
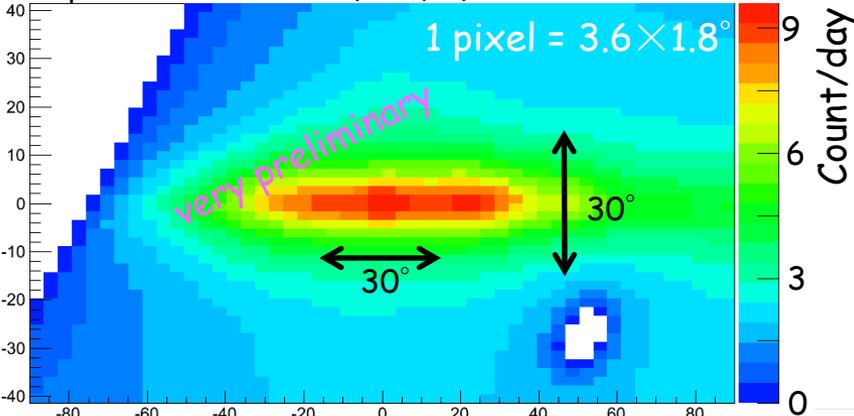
6.7°

ARM: 5° SPD: 30°

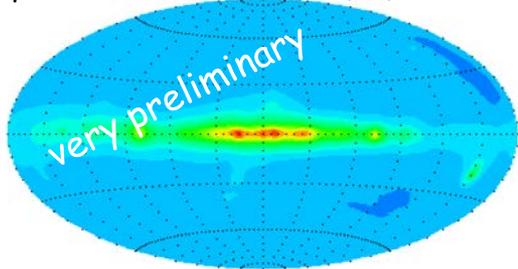
大気減衰：

3.5 g/cm<sup>2</sup>

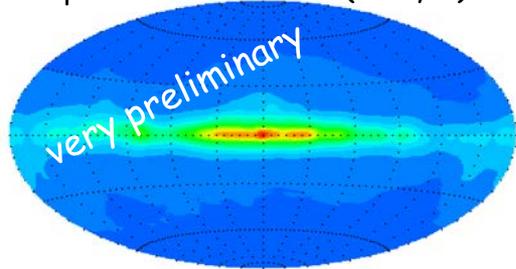
Template: DIRBE/COBE (240 μm)



Template: DIRBE/COBE (25 μm)



Template: DIRBE/COBE (240 μm)

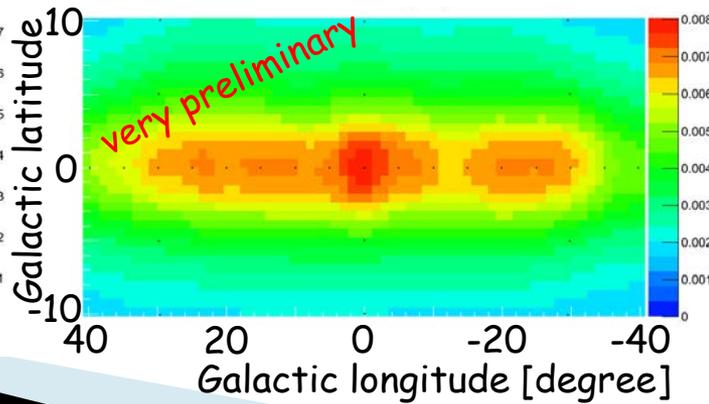
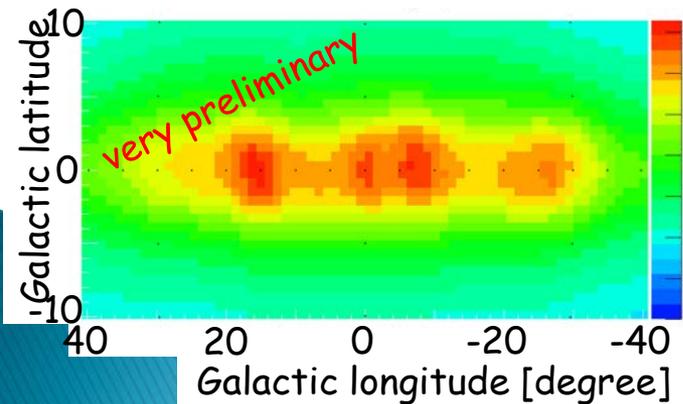


satellite

PSF: 4.5°

ARM: 3.5° SPD: 20°

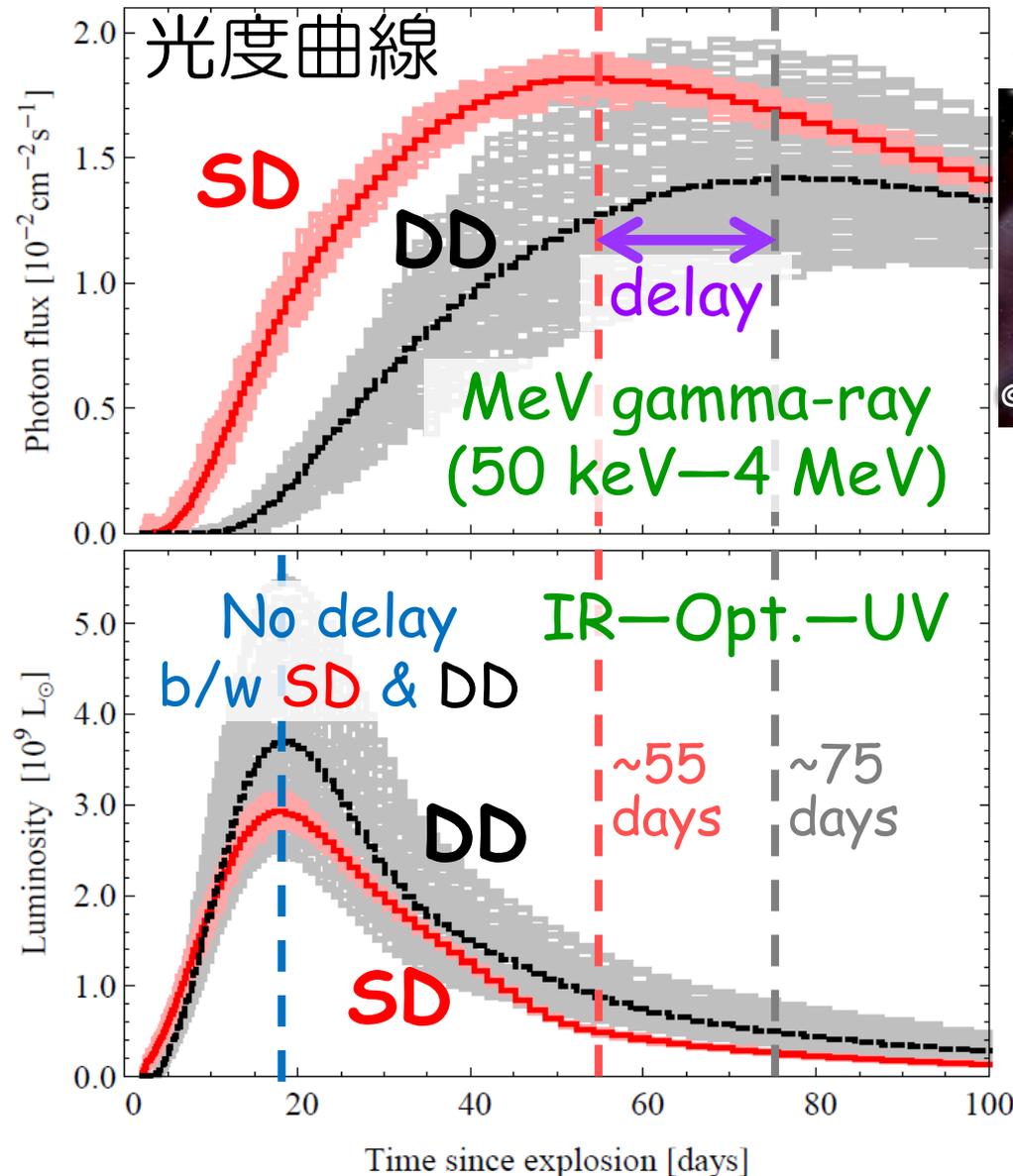
e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>対消滅線の  
詳細な分布も  
取得可能



# 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

**$^{56}\text{Ni}$**  lines: (158 & 812 keV)

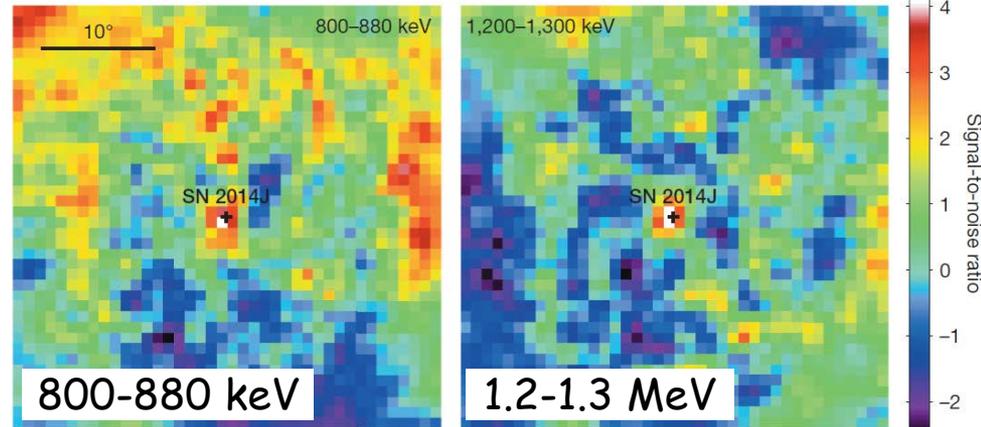
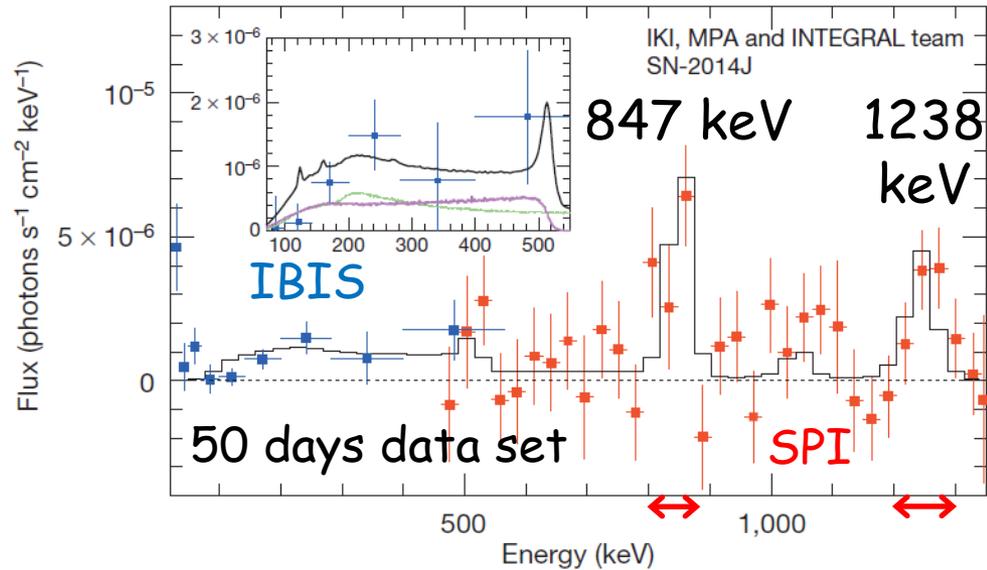
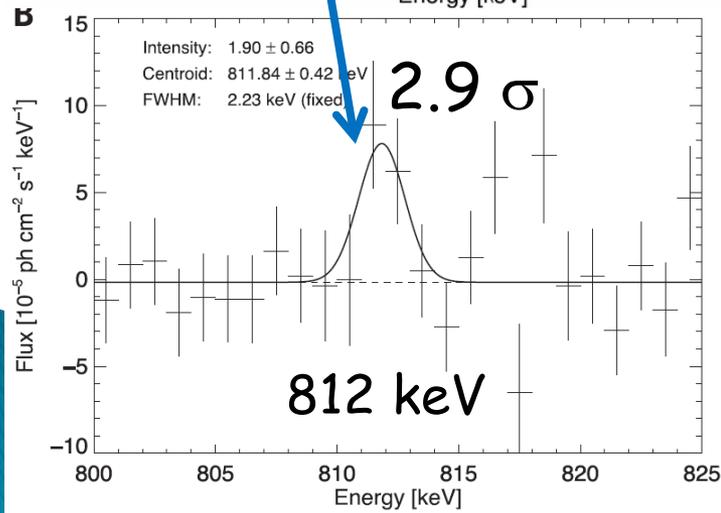
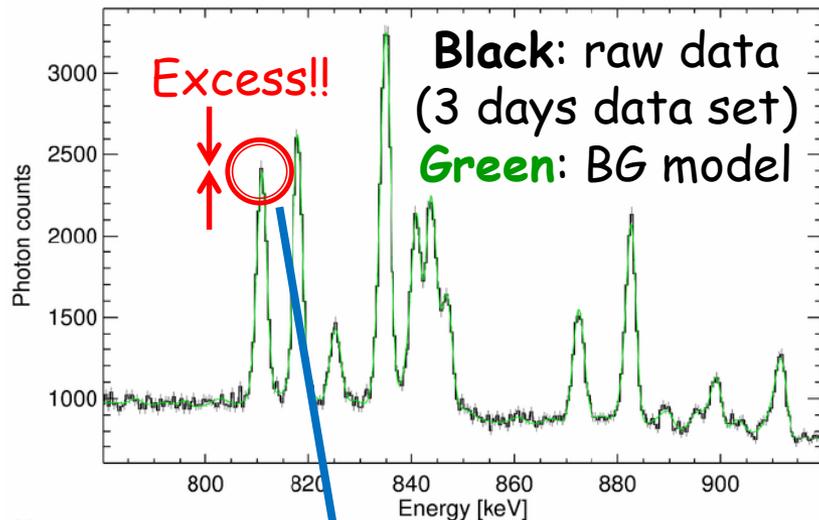
3 days around 17.5d after SN

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

**$^{56}\text{Co}$**  lines: (847 & 1238 keV)

50 days during 50-100d

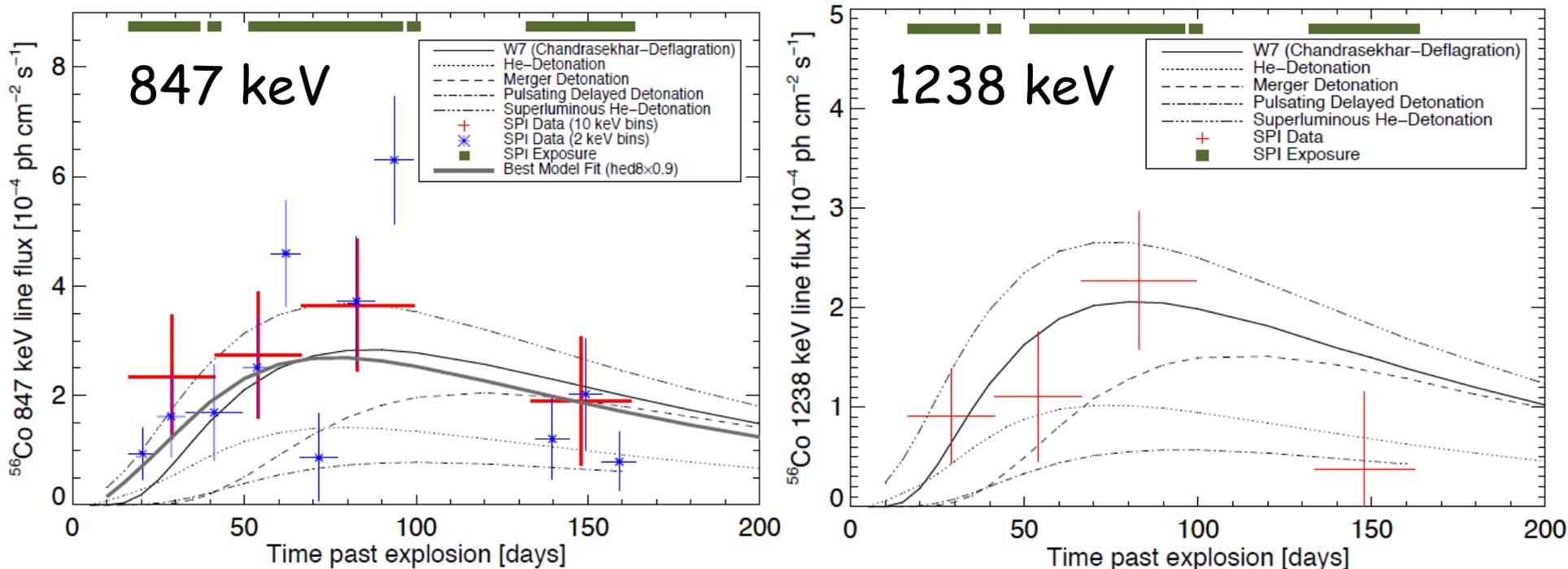
E. Churazov+, 2014, Nature, 512, 406



# INTEGRAL's lightcurves of SN2014J

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

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

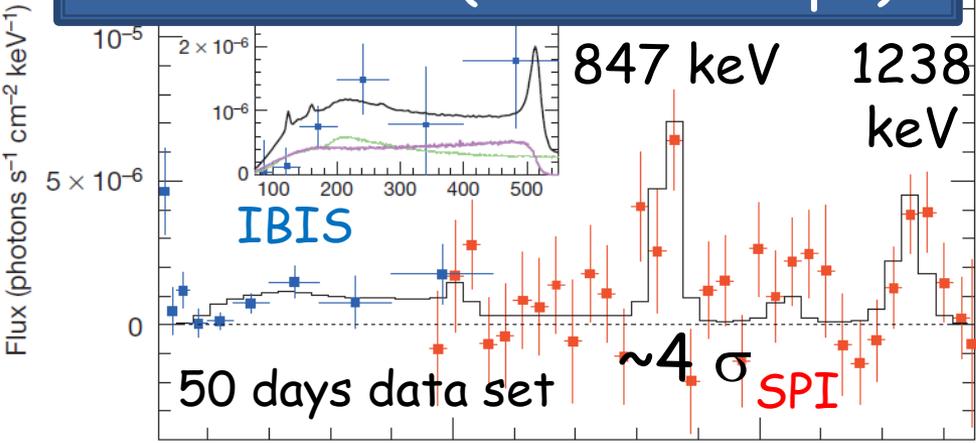


R. Diehl+, 2015, *A&A*, 574, A72

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

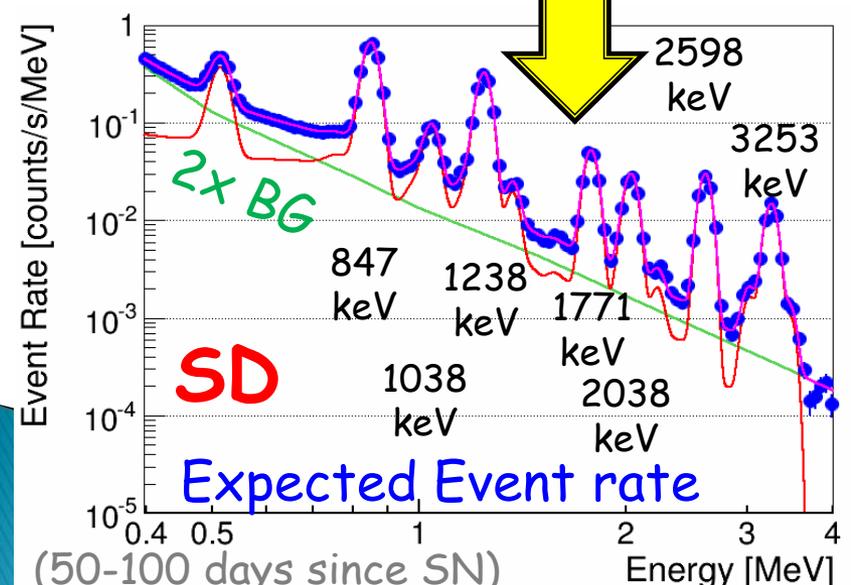
# イメージング核分光の世界が変わる！！

## INTEGRAL(SN@3.5 Mpc)

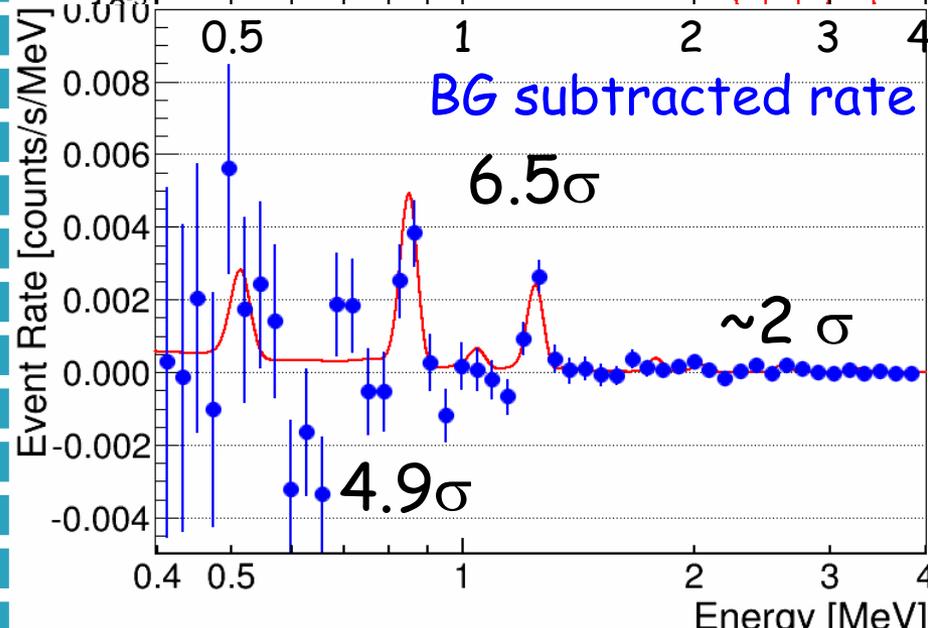
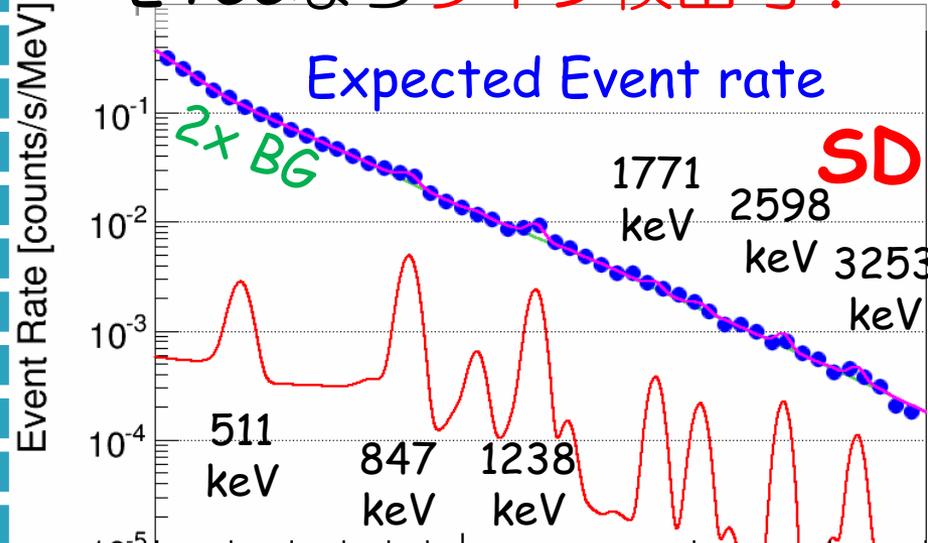


E. Churazov+ (2014) 500 Energy (keV) 1,000

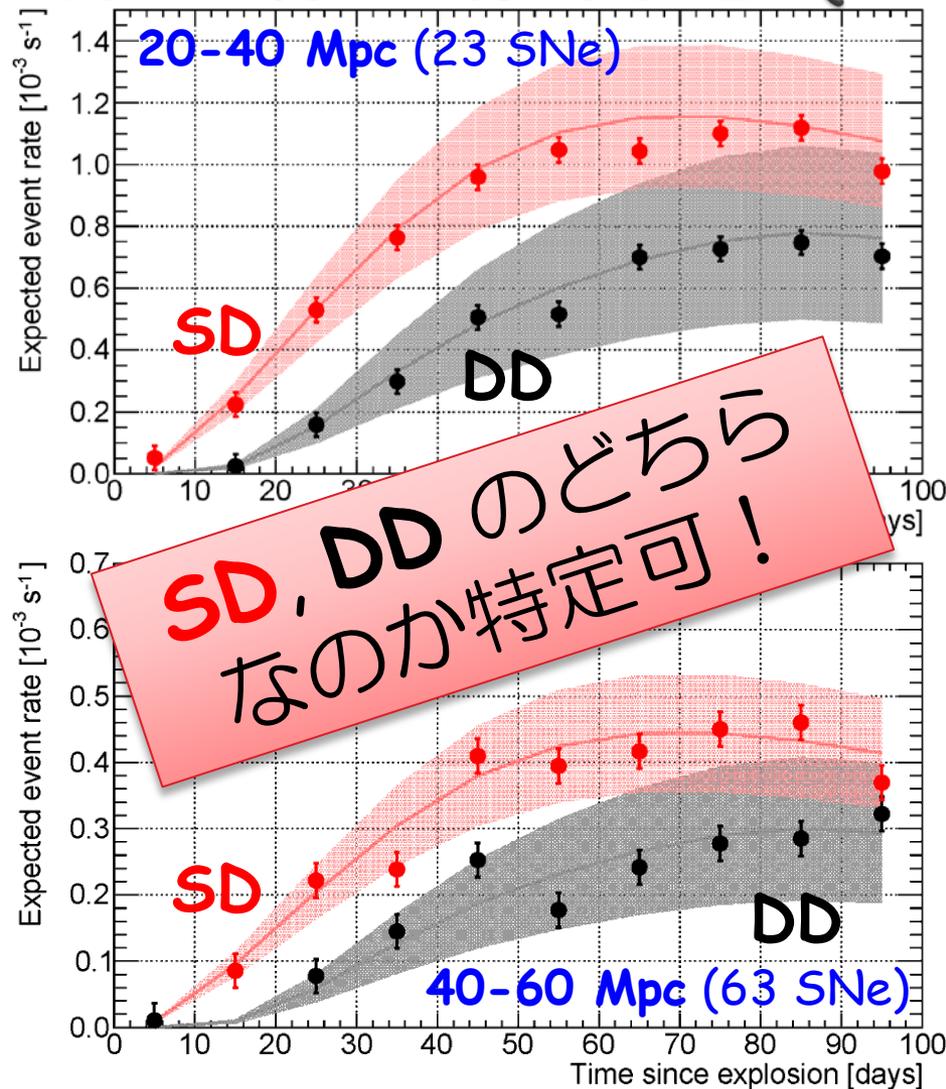
## ETCC衛星(SN@3.5 Mpc)



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

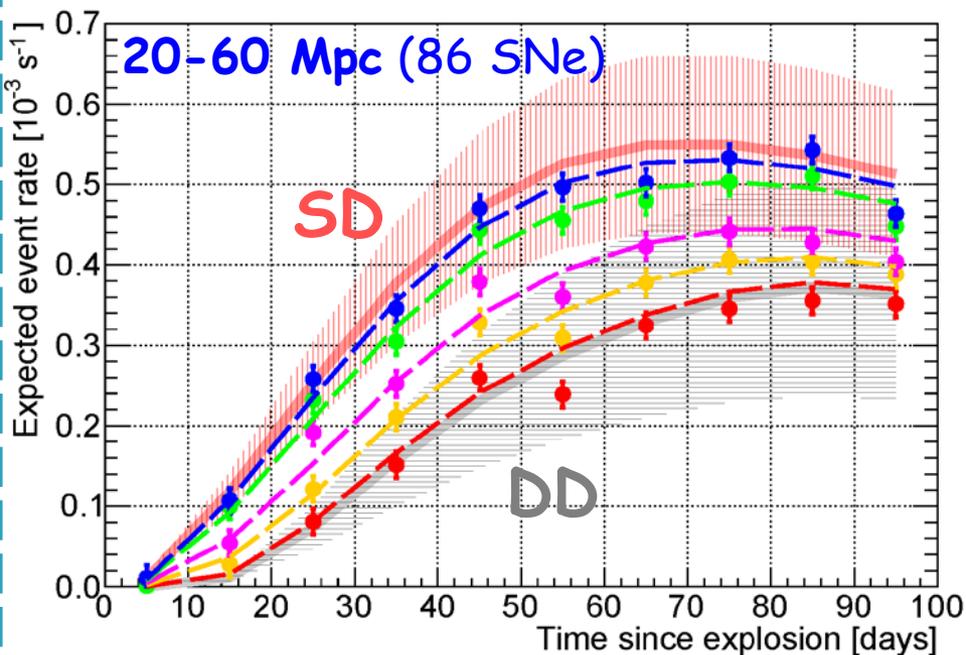


# 光度曲線の観測予想 (Energy: 0.7–4.0 MeV)



SD, DD のどちら  
なのか特定可!

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  $\sim 20 \text{ cm}^2$   
 $^{26}\text{Al}$ 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