

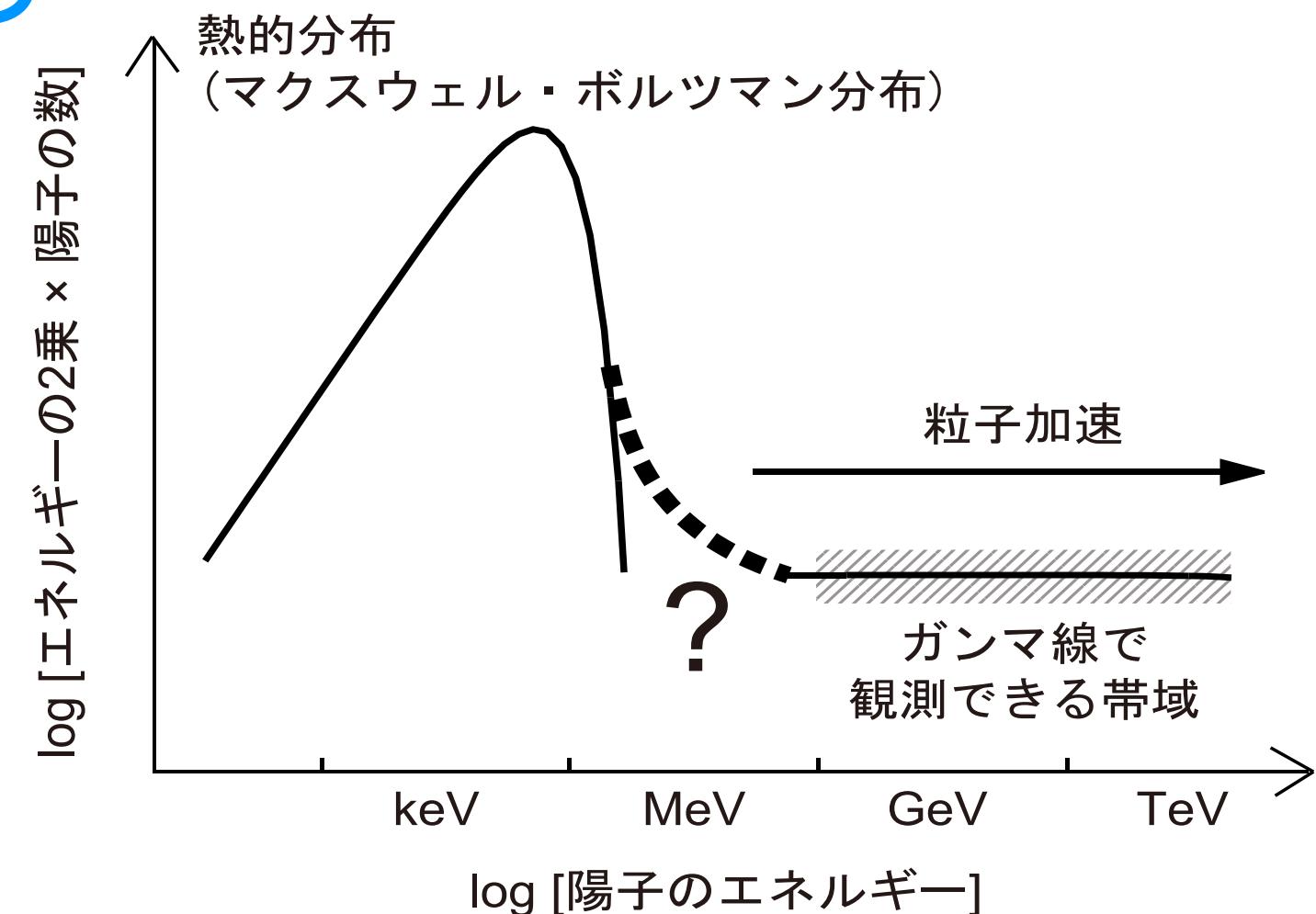
# MeV宇宙線の研究と MeVガンマ線との関連

信川 久実子 (奈良女子大学)

# MeV宇宙線の研究意義

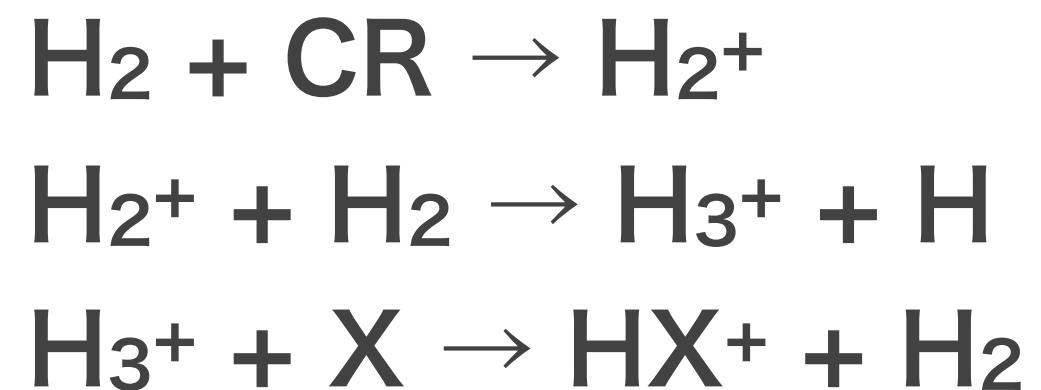
## ①宇宙線の起源解明への手がかり

- ◇ 宇宙線加速において、熱的粒子と高エネルギー側を結びつける  
**ミッシングリンク**
- ◇ GeV-TeV宇宙線に比べ、拡散しにくい  
→ 加速現場をよりトレース



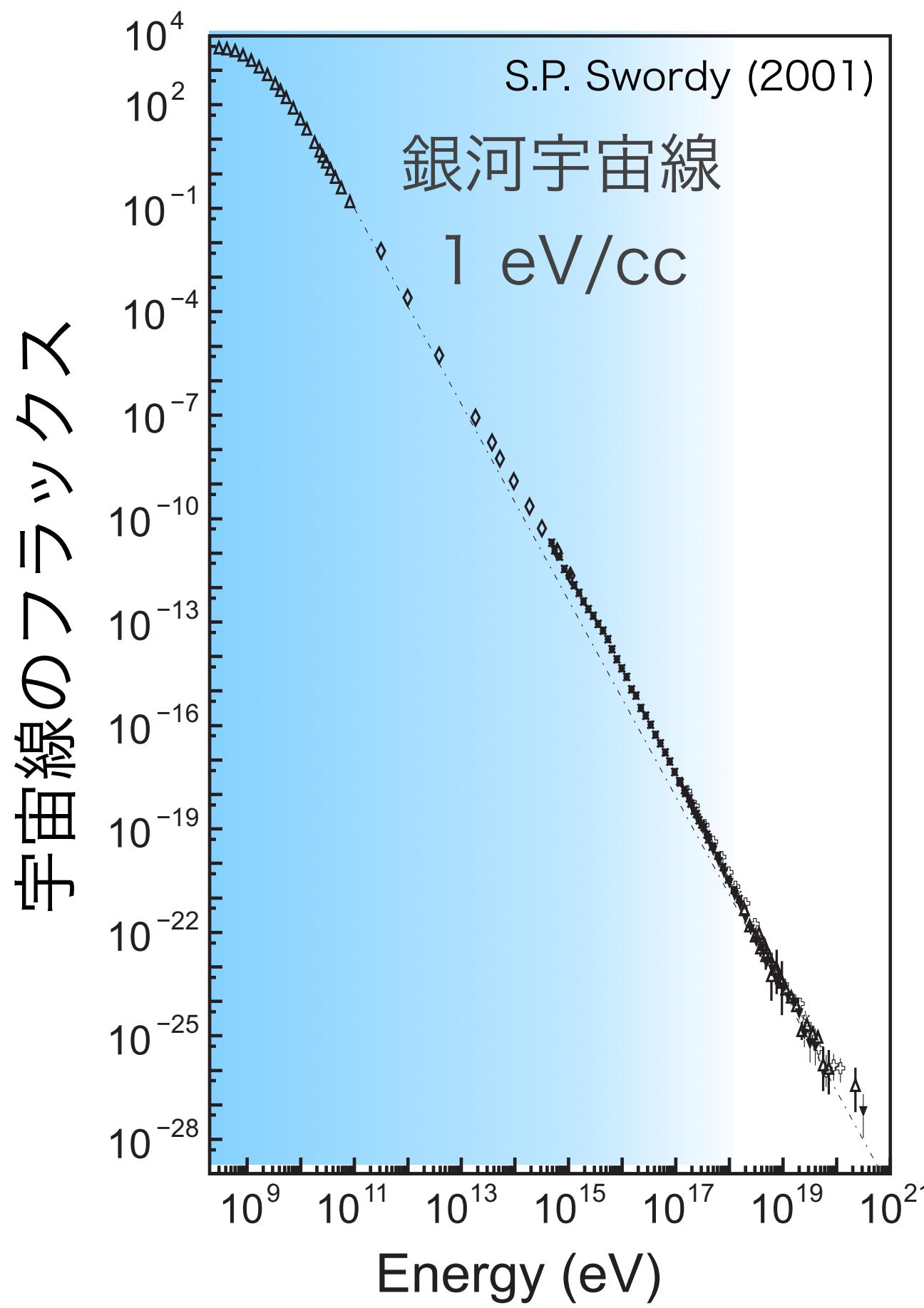
## ②星間物質への影響

- ◇ MeV宇宙線はエネルギーを電離で失うので、**星間物質の加熱**や**化学進化**に影響

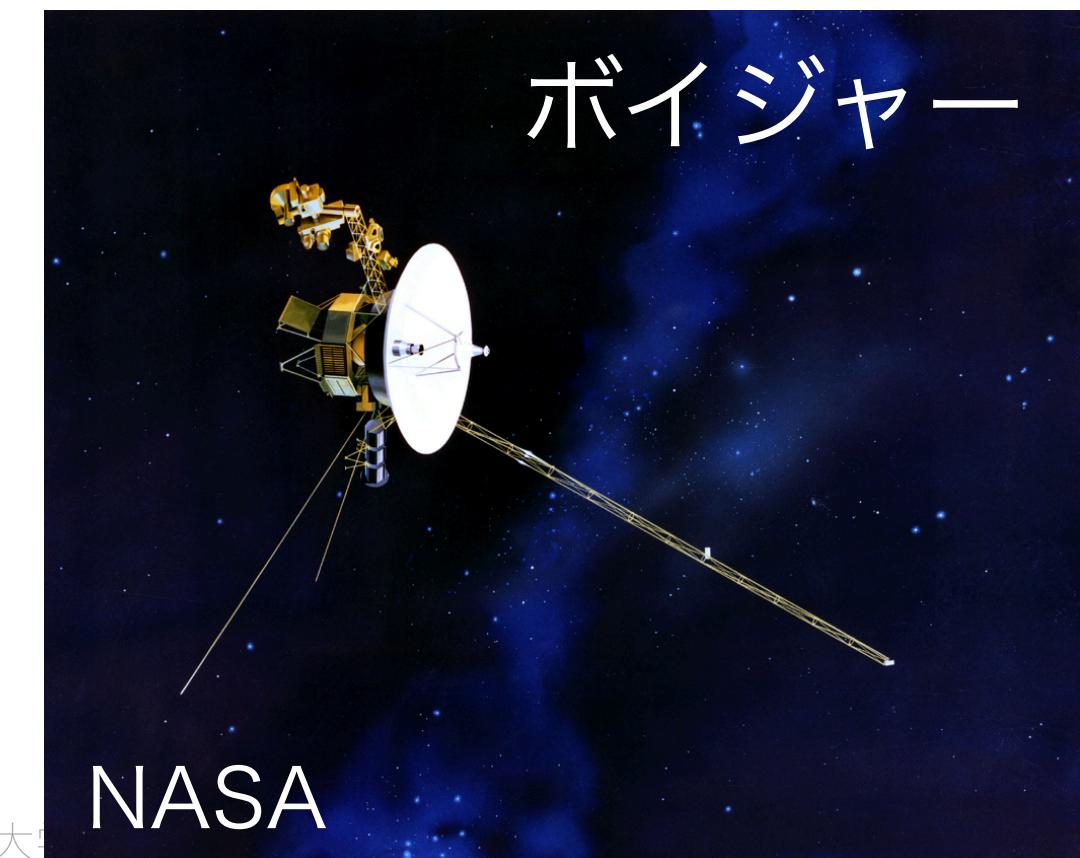


イオン分子生成 => 星の生成

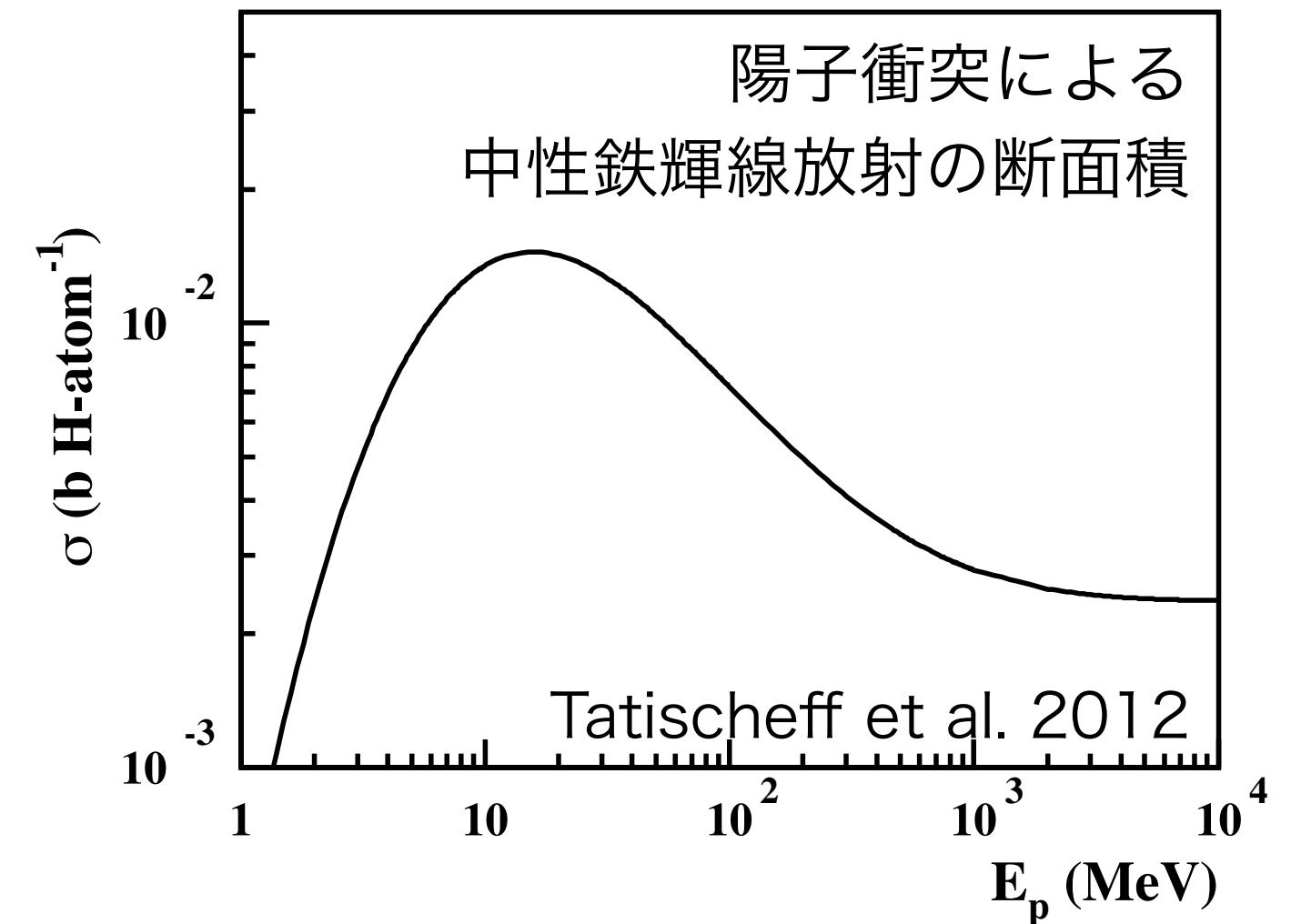
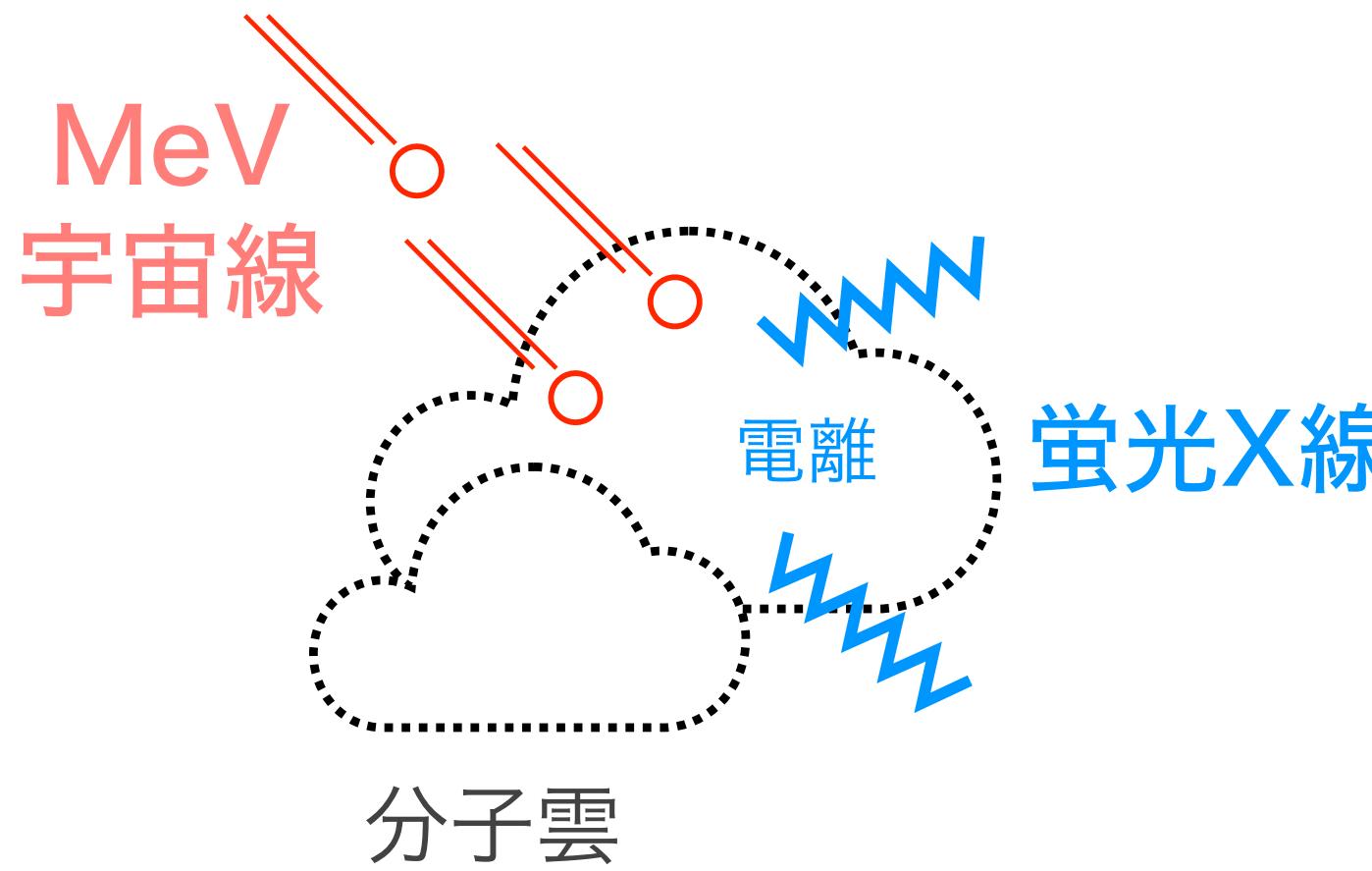
# MeV以下の情報はほぼ無し



- ◆ 太陽磁気圏のため低エネルギー  
宇宙線は太陽系に侵入できない
- ◆ 確実な観測はボイジャーのみ  
(Stone et al. 2013)
- ◆ 有効な間接観測の手法無し
  - 電離率のみ測定
  - 密度・スペクトルの情報無し



# X線を用いたMeV宇宙線探査

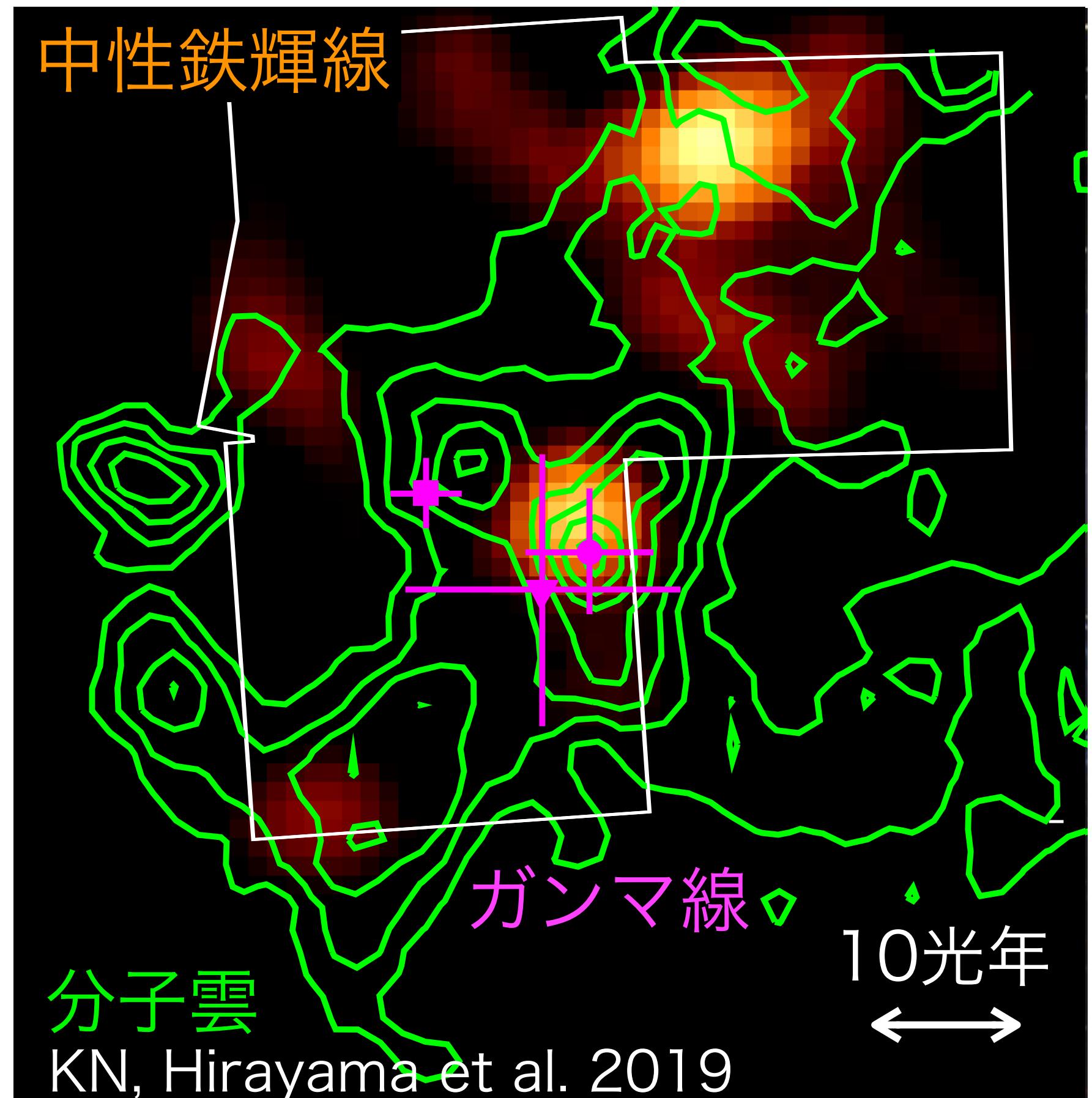


- ◆ 鉄は高アバンダンスで高蛍光収率なので、中性重元素からの蛍光X線の中でもっとも高い強度
  - $[Fe]/[H] = 3.0 \times 10^{-5}$  (Lodders 2003)、 $\omega \sim 0.3$
- ◆ 中性鉄輝線 (@ 6.4 keV) に寄与する陽子はMeV帯域
- ◆ 6 keV付近に、ほかの元素からの明るい輝線は存在しない

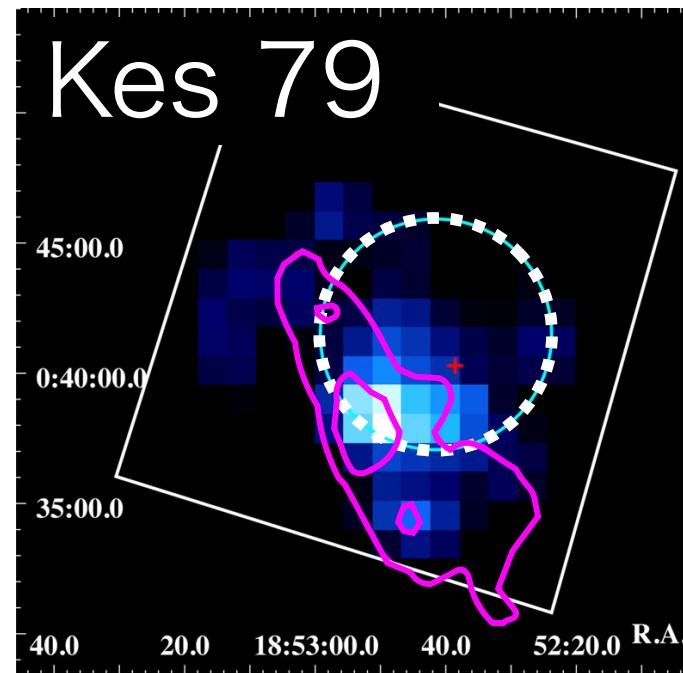
# 超新星残骸でのMeV宇宙線探査

IC443(くらげ星雲)

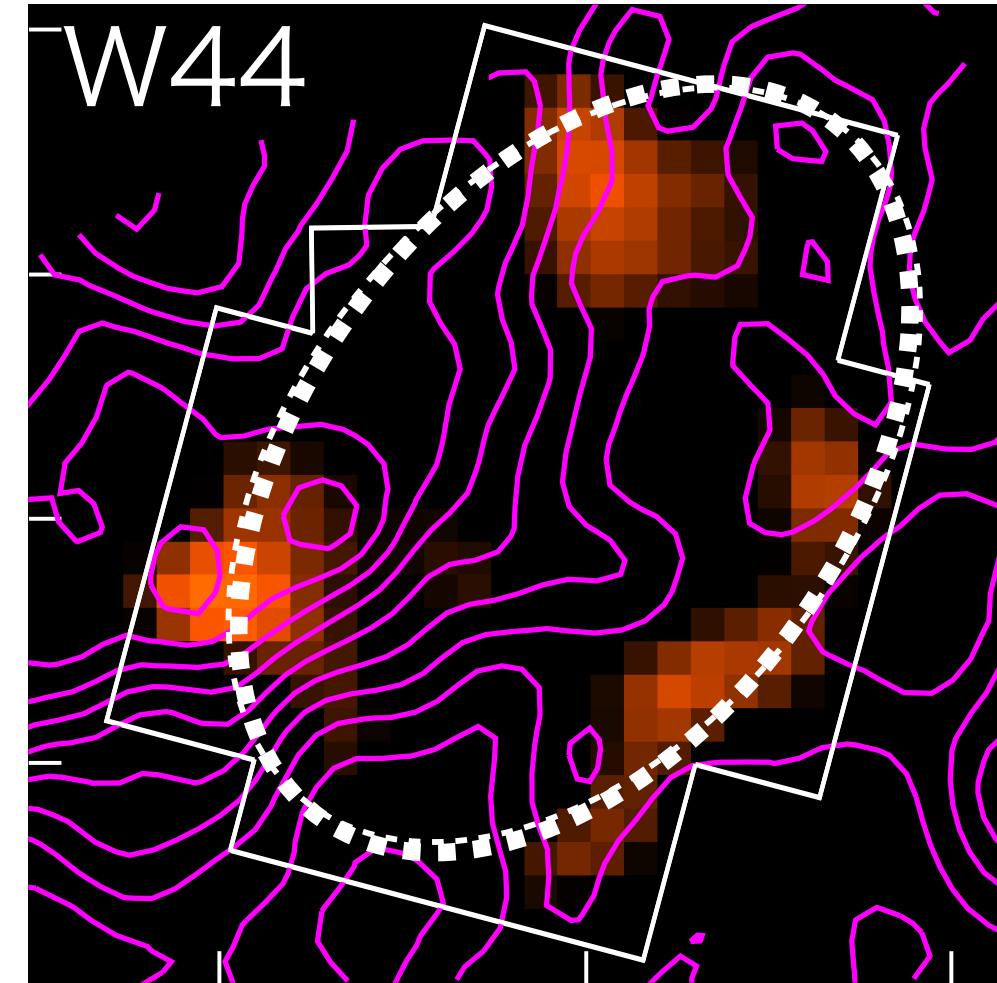
- ◇ 分子雲と相關した  
中性鉄輝線  
 $\Rightarrow$  MeV陽子起源
- ◇ GeV・TeV陽子起源  
のガンマ線と相關
- ◇ MeV宇宙線の密度  
 $10^2\text{--}10^3 \text{ eV/cc}$



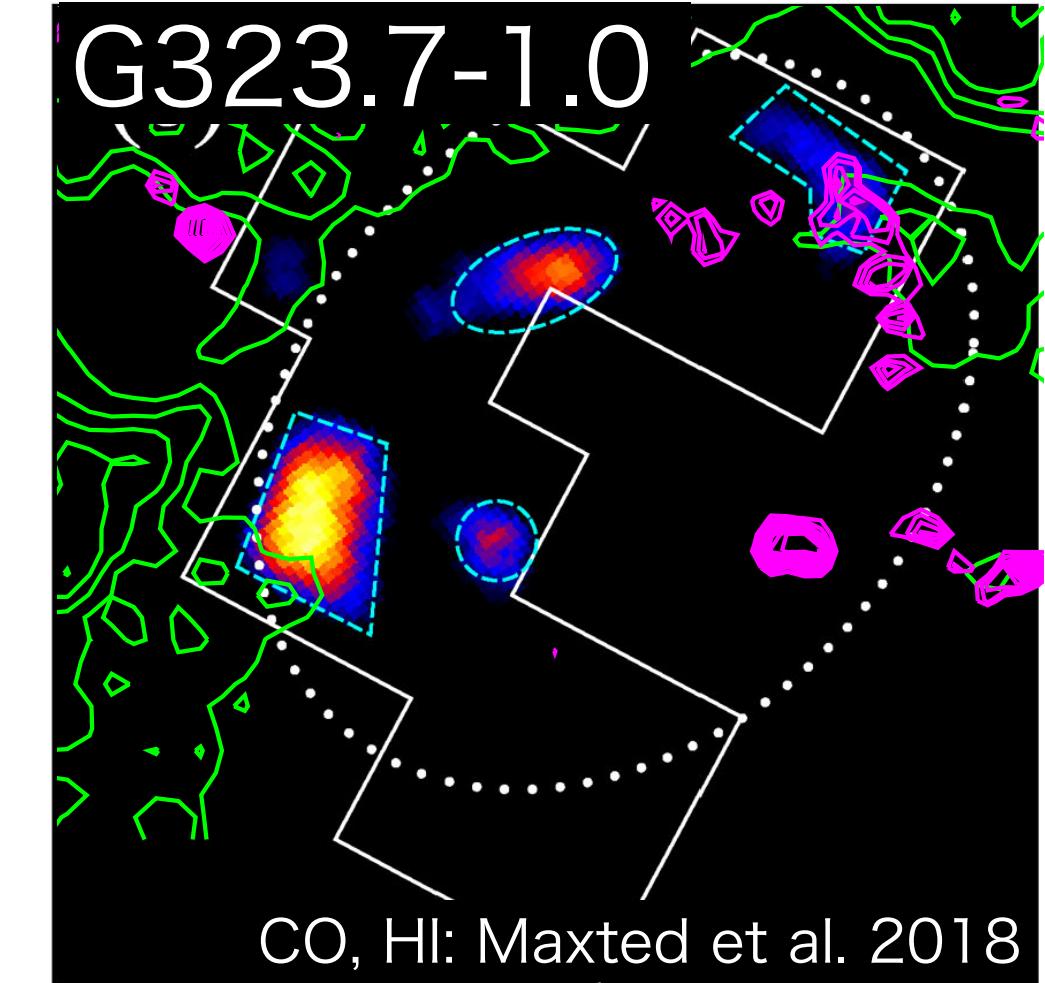
# 超新星残骸でのMeV宇宙線探査



Sato et al. 2016



KN et al. 2018



CO, HI: Maxted et al. 2018  
Saji, KN et al. 2018

- ◇ 10天体ほどのMiddle-aged (or old) SNRから発見
- ◇ いずれも分子雲と相互作用
- ◇ 宇宙線加速の標準的なモデル (逃亡モデル) で  
中性鉄輝線とガンマ線放射を同時に説明可能

(Makino, Fujita, KN, Matsumoto, Ohira 2019, KN et al. 2019)

# 銀河系全体で探査

可視光

天の川＝無数の星の集まり

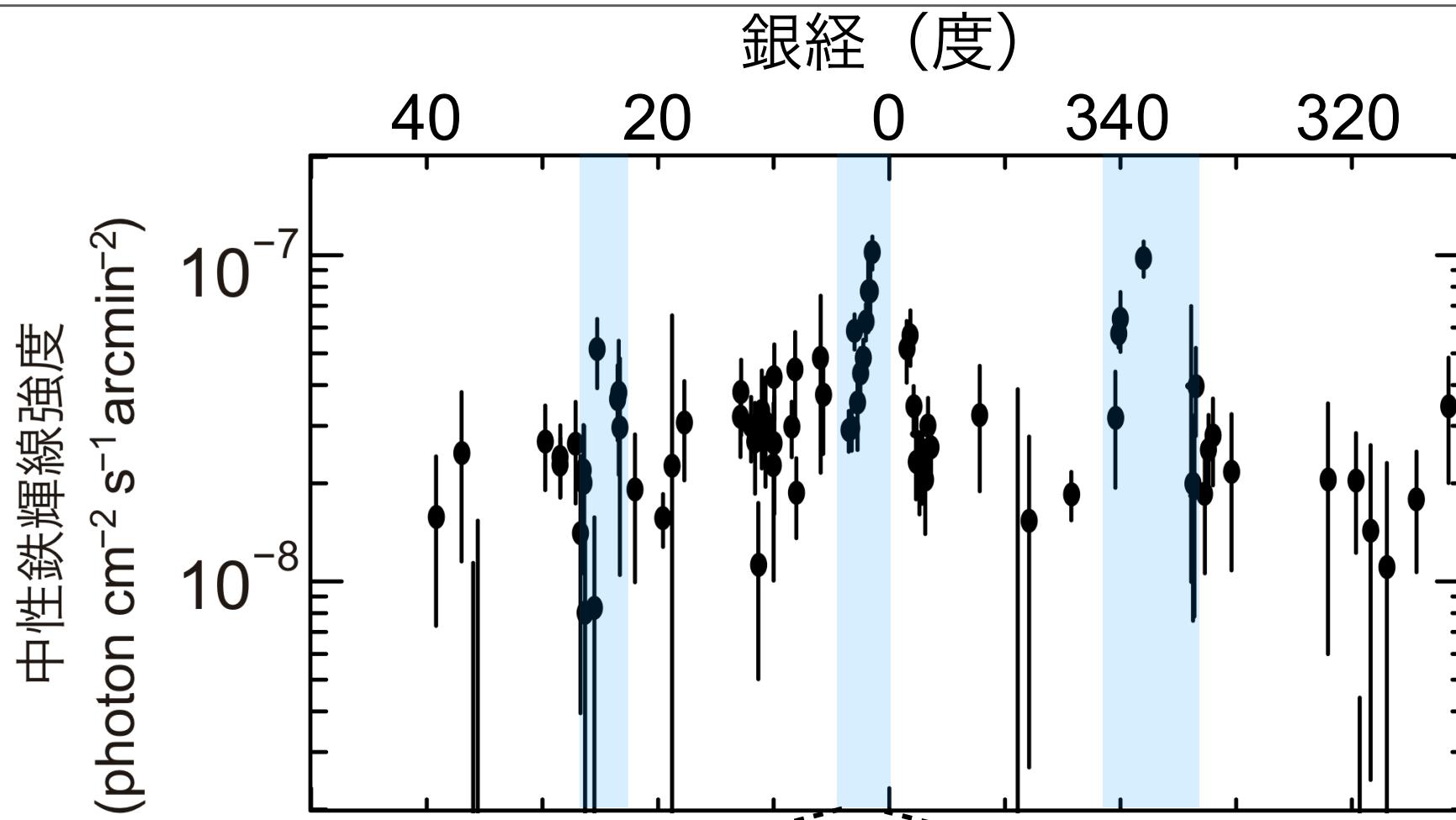
Millinger, 2000

X 線

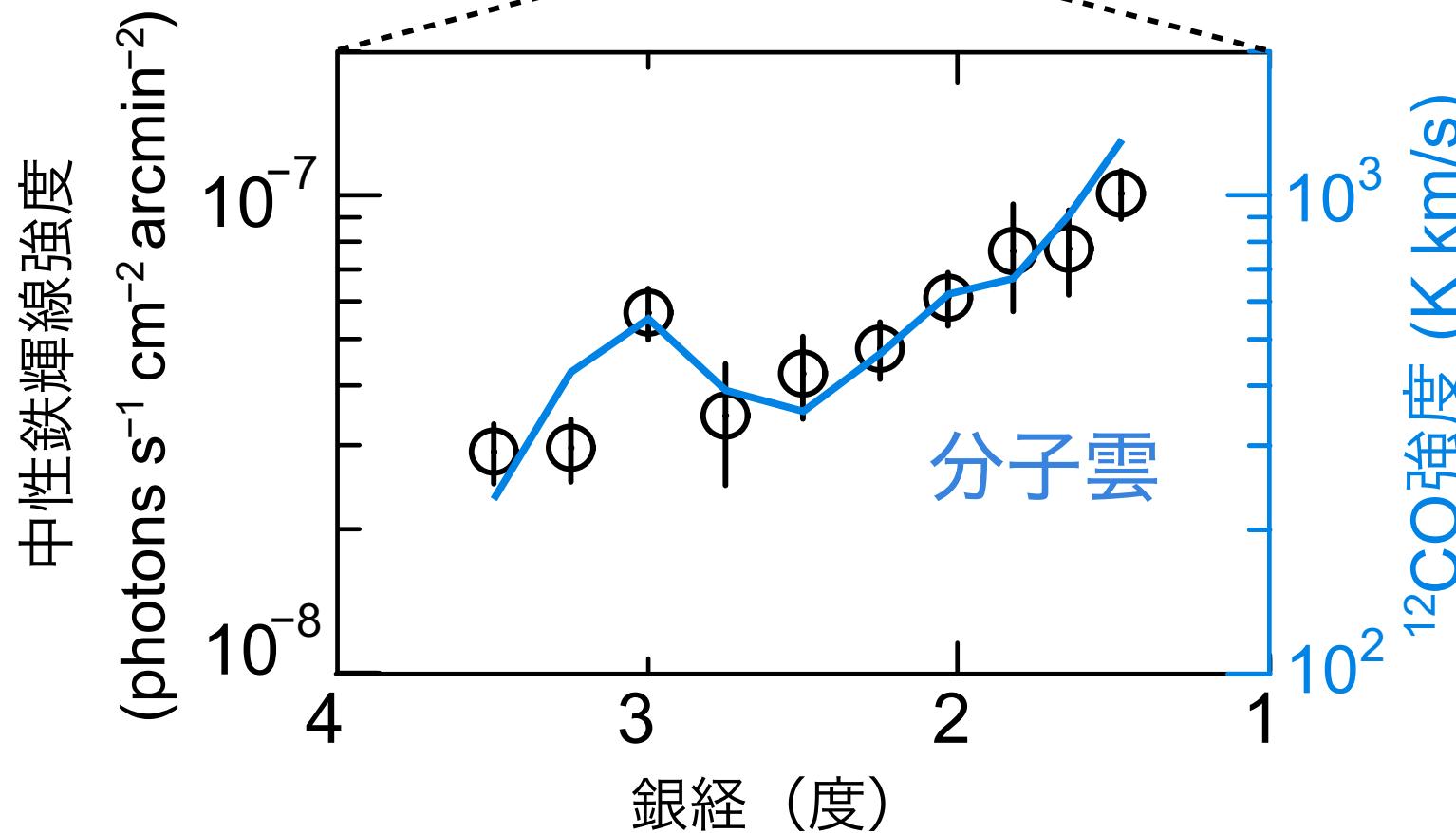
星以外にも広がったX線放射

MAXI/RIKEN

# 銀河面からMeV宇宙線起源の中性鉄輝線

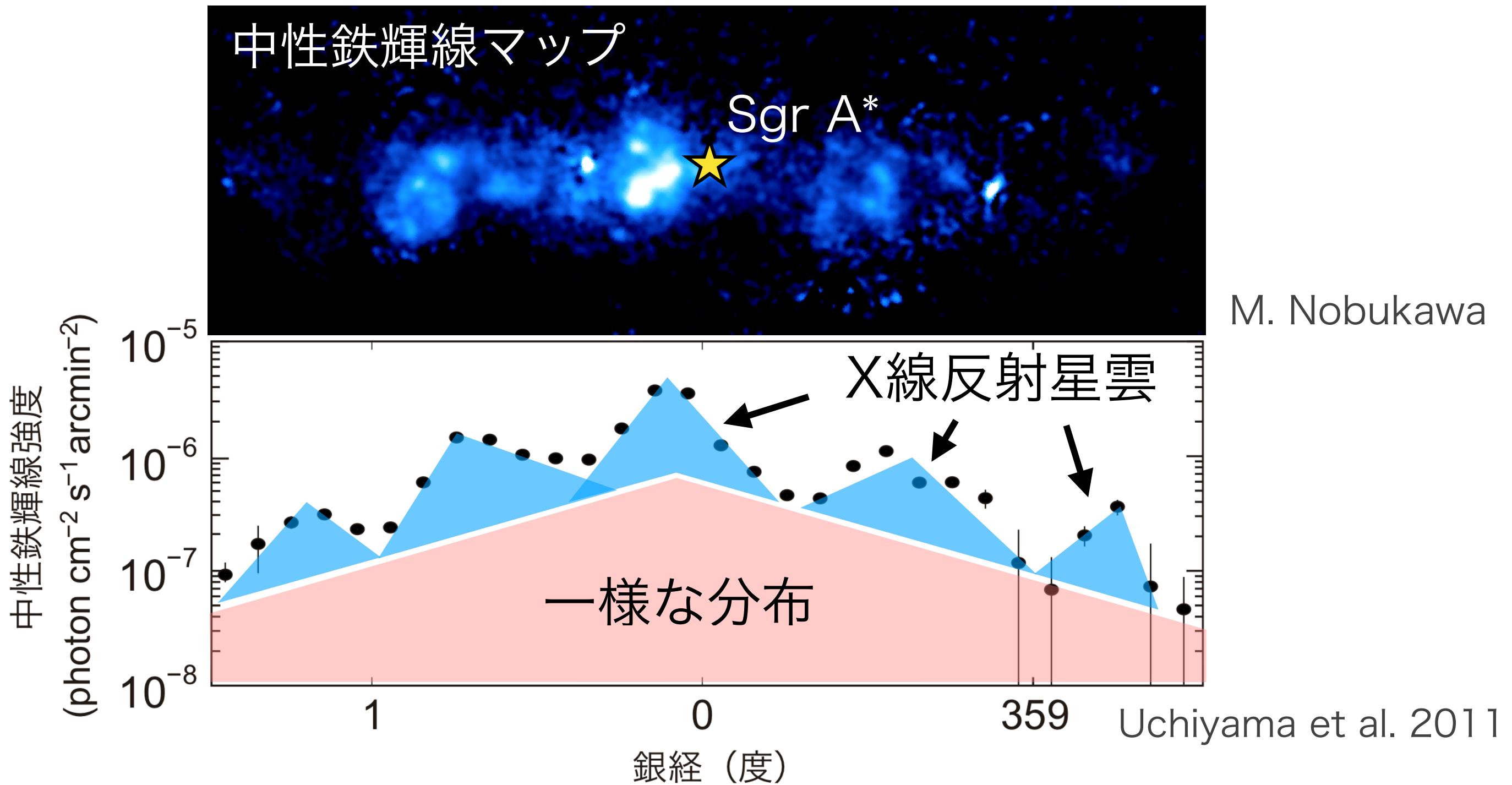


- ◇ 中性鉄輝線が強い領域と分子雲が空間的に相關
- ◇ 近傍に明るいX線を出す天体なし => 宇宙線起源  
(KN et al. 2015)  
(Yamauchi, KN et al. 2016)



- ◇ MeV宇宙線の密度  
10–10<sup>2</sup> eV/cc
  - GeV以上での典型値より1–2桁高い
- ◇ 周囲にSNRなし
  - 未知の加速機構？

# 銀河系の中心領域は？



- ◇ 分子雲と相関 + 数年スケールの時間変動 (c.f. Koyama 2018)
- ◇ Sgr A\*の過去のフレアを分子雲が反射 「X線反射星雲」
- ◇ 一様な分布も存在 => MeV宇宙線が寄与している可能性

# 電離率からの示唆

- ◇ 2000年代から  $\text{H}_3^+$  (Geballe & Oka 1996) の測定が活発化
- ◇ 銀河中心 にある 中心分子雲帯 (CMZ)

- $\zeta = (2-7) \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$  (Oka et al. 2005)
- $\zeta = (1-11) \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$  (La Petit et al. 2016)
- $\zeta = 2 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$  (Oka et al. 2019)  
※  $1 \text{ eV/cc} \Leftrightarrow \zeta \sim 10^{-17} \text{ s}^{-1}$

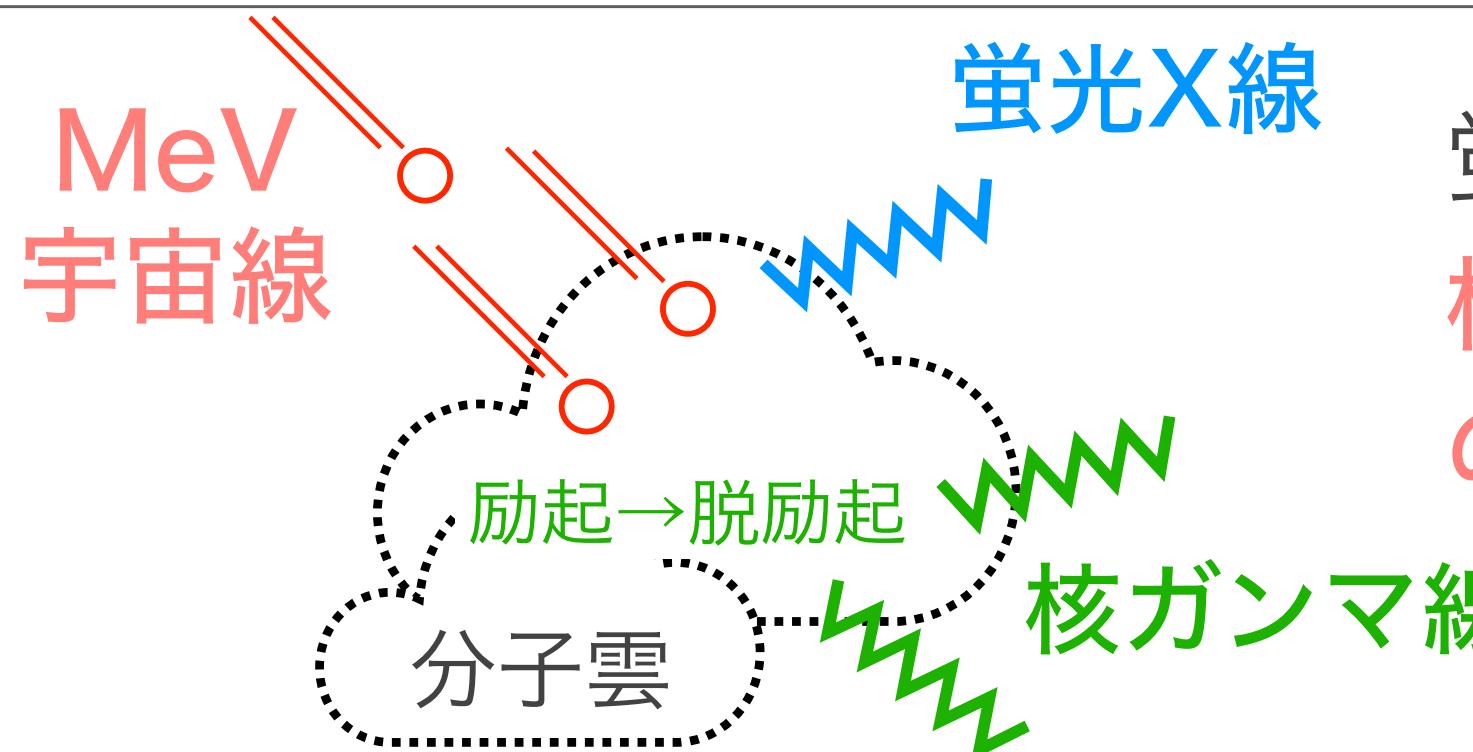
低エネルギー宇宙線の密度  $\sim 10^2 - 10^3 \text{ eV/cc}$

## ◇ 銀河面上

- $\zeta = (3.5^{+5.3}_{-3.0}) \times 10^{-16} \text{ s}^{-1}$  (Indriolo & McCall 2012)
  - 太陽から 2 kpc 以内の 星間物質
- $\zeta = 1.8^{(+1.7)}_{(-0.9)} \times 10^{-16} \text{ s}^{-1}$  (Indriolo et al. 2015)
  - OH<sup>+</sup>、H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>を用いた測定。H<sub>3</sub><sup>+</sup>より広範囲を測定

低エネルギー宇宙線の密度  $\sim 10 \text{ eV/cc}$

# 宇宙線衝突によるMeVガンマ線



蛍光X線は光電離でも出る。  
核ガンマ線の検出でMeV宇宙線  
の存在は決定的になる

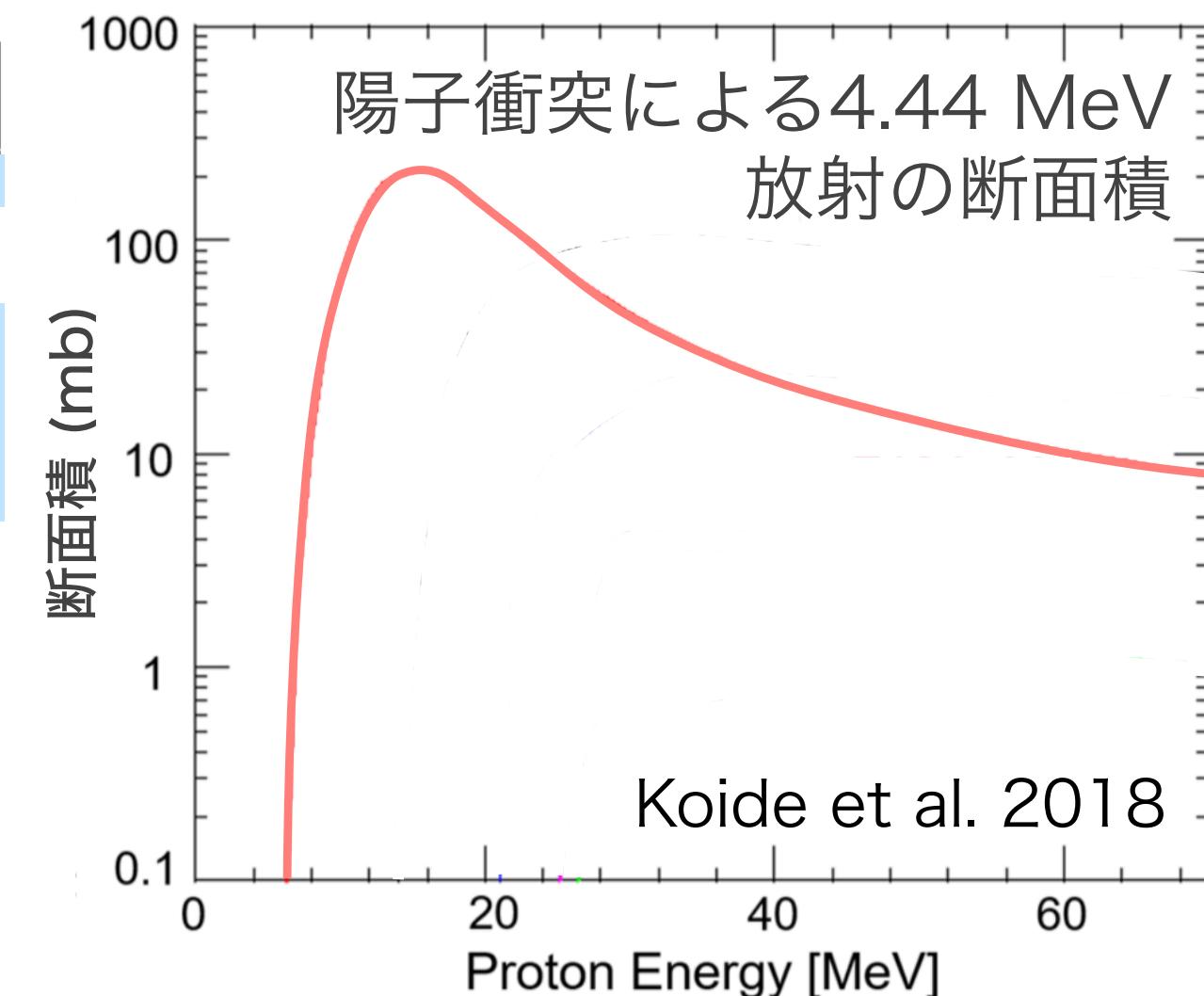
energy (MeV)	source process	astrophysical origin (source type)
1.634	nuclear excitation: $^{20}\text{Ne}$	cosmic ray / ISM interactions
1.809	radioactive decay: $^{26}\text{Al}$	massive-star and ccSN nucleosynthesis
2.230	neutron capture by H	energetic nucleon interactions
2.313	nuclear excitation: $^{14}\text{N}$	cosmic ray / ISM interactions
2.754	nuclear excitation: $^{24}\text{Mg}$	cosmic ray / ISM interactions
4.438	nuclear excitation: $^{12}\text{C}$	cosmic ray / ISM interactions
6.129	nuclear excitation: $^{16}\text{O}$	cosmic ray / ISM interactions

Diehl 2013

宇宙線衝突で出る主な核ガンマ線

$^{12}\text{C}^*$  : 4.438 MeV

$^{16}\text{O}^*$  : 6.129 MeV



# COMPTELによる核ガンマ線探査

- ◆ COMPTELによるinner Galaxyの観測で**3-7 MeVに超過**の兆候

(Bloemen et al. 1997)

- $F_\gamma = 2 \times 10^{-4} \text{ } \gamma/\text{s}/\text{cm}^2$
- 宇宙線衝突による核ガンマ線？
- **INTEGRAL SPIでは確認できず**

(Teegarden & Watanabe 2006)

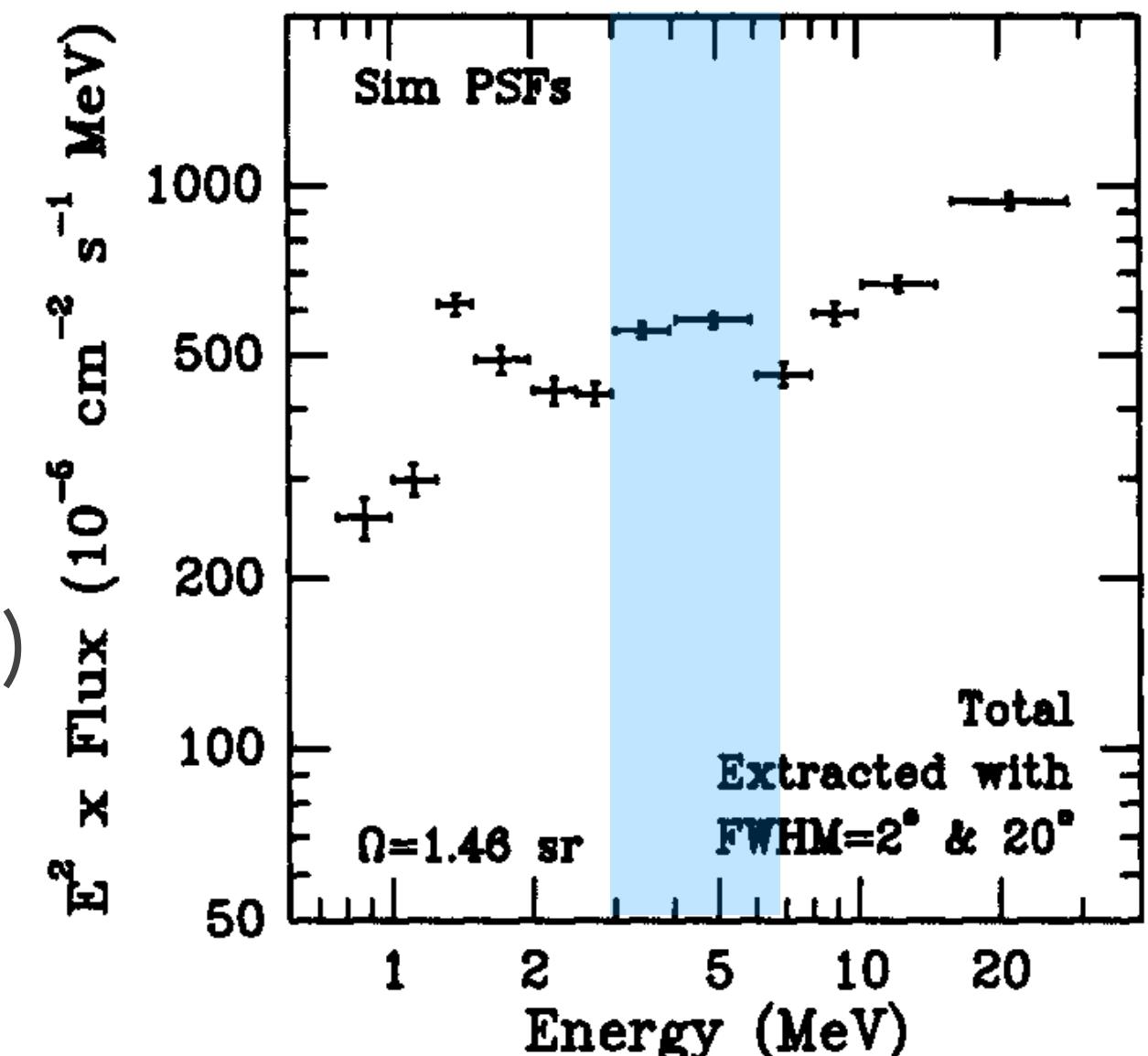
- ◆ Orion領域でも3-7 MeVに超過

( $9\sigma$ ; Bloemen et al. 1997)

- のちに検出器バックグラウンドを見直した結果、超過はなくなる

(Bloemen et al. 1999)

inner Galaxy ( $|l|<60^\circ$ ,  $|b|<20^\circ$ )  
からのスペクトル



Bloemen et al. 1997

# 核ガンマ線の強度予想

## 4.4 MeV 核ガンマ線の強度

(c.f. Benhabiles-Mezhoud et al. 2013)

$$F_\gamma \sim 10^{-3} \times \frac{W_{\text{cr}}}{10^3 \text{ eV/cc}} \quad \text{γ/s/cm}^2/\text{sr}$$

<sup>16Oからの6.1 MeVも  
同程度の強度</sup>

輝線 1 Ms 感度			
E (keV)	FWHM (keV)	e-ASTROGAM sensitivity (ph cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Improvement vs SPI
511	1.3	$4.1 \times 10^{-6}$	13
847	35	$3.5 \times 10^{-6}$	66
1157	15	$3.6 \times 10^{-6}$	27
1275	20	$3.8 \times 10^{-6}$	29
2223	20	$2.1 \times 10^{-6}$	52
4438	100	$1.7 \times 10^{-6}$	65

1σ感度

中澤さん資料 (2017.02.06)

- ◇銀河中心 (CMZ)
  - $3^\circ \times 1^\circ$ 、 $10^3 \text{ eV/cc}$
  - $F_\gamma \sim 10^{-6} \text{ ph/s/cm}^2$
- ◇銀河面 (inner Galaxy)
  - $100^\circ \times 10^\circ$ 、 $10 \text{ eV/cc}$
  - $F_\gamma \sim 10^{-6} \text{ ph/s/cm}^2$
- ◇eASTROGAMなら検出可
- ◇ $10^{-6} \text{ ph/s/cm}^2$ 台の感度があれば  
なにか見えてくる
- ◇実際は連続成分の評価も必要
- ◇検出できなくても上限値は重要

# 核ガンマ線の強度予想

## ◇超新星残骸

-  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 、 $10^2$  eV/cc

-  $F_\gamma \sim 10^{-8}$  ph/s/cm<sup>2</sup>

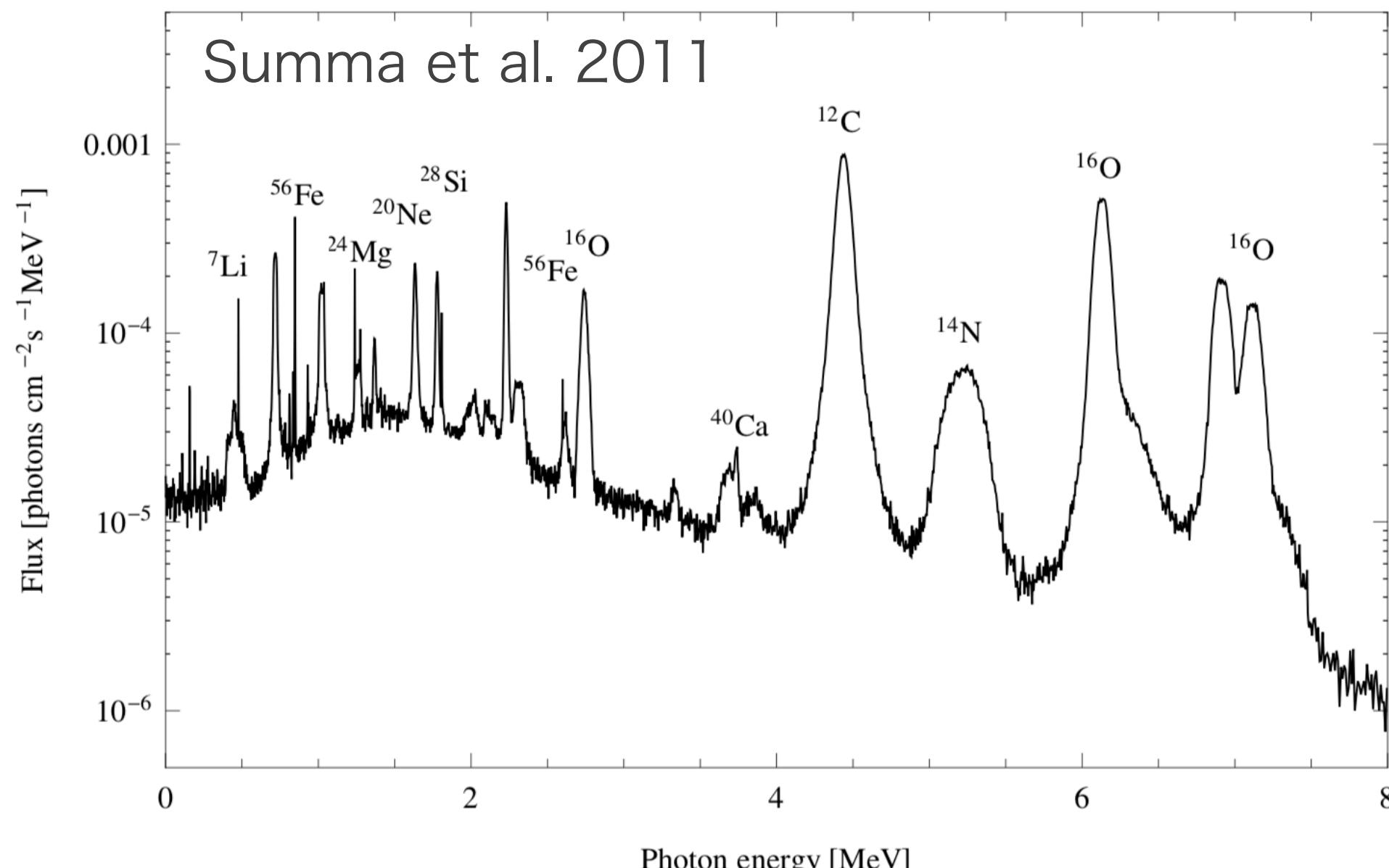
eASTROGAMの2桁下

c.f. Cas Aでの見積もり

$F_\gamma \sim 10^{-6}$  ph/s/cm<sup>2</sup>

炭素密度 $n_C = 10/\text{cc}$ を仮定

(Summa et al. 2011)



# まとめ

---

- ◇ MeV宇宙線は観測が困難なため、情報が非常に少ない
- ◇ X線で、分子雲中にMeV宇宙線が衝突して出た可能性の高い中性鉄輝線を観測
- ◇ 電離率測定も、低エネルギー宇宙線の密度が高いことを示唆
- ◇ 低エネルギー宇宙線の密度の見積もり
  - 銀河面： $10\text{--}10^2 \text{ eV/cc}$
  - 超新星残骸： $10^2\text{--}10^3 \text{ eV/cc}$
- ◇ MeV宇宙線と分子雲の衝突で核ガンマ線が生成
  - MeV宇宙線の存在は核ガンマ線の検出で決定的になる
- ◇ 核ガンマ線強度を見積もった
  - 検出には $10^{-6} \text{ ph/s/cm}^2$ 台の感度が最低条件
  - 第一ステップとして上限を決めることが重要