

2007年度

P6課題研究

On 2008/3/7

PART1: (基本編)

Geant4

~10分 by劉

PART2: (応用①)

RX J1713.7-3946vs分子雲仮想のX線スペクトルのシミュレーション

~15分 by
芝原

PART3: (応用②)

宇宙線による検出器BGシミュレーション

~15分 by劉

PART1

Geant4

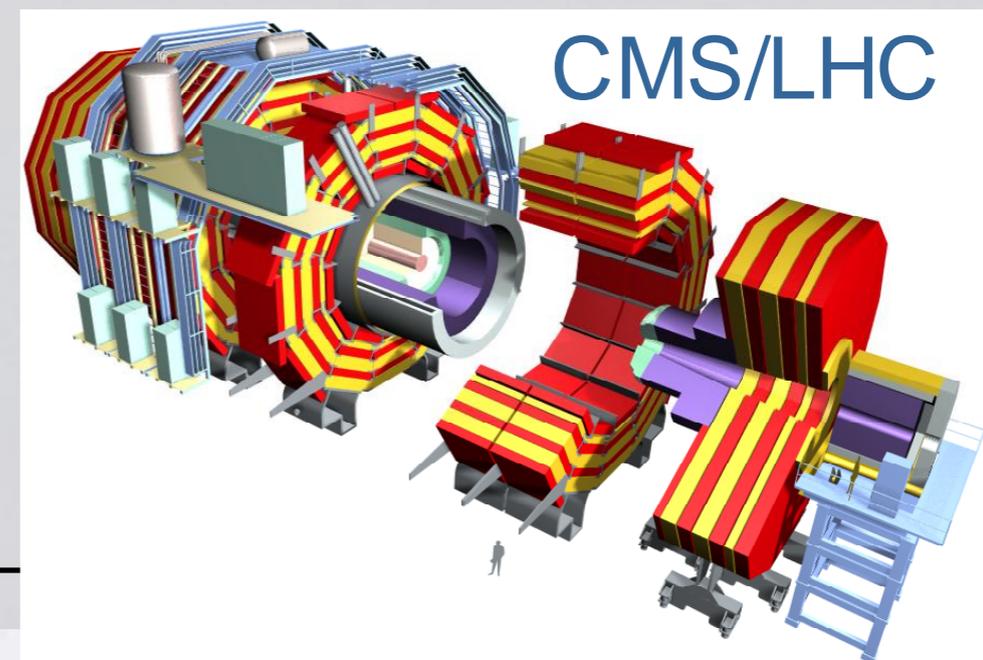
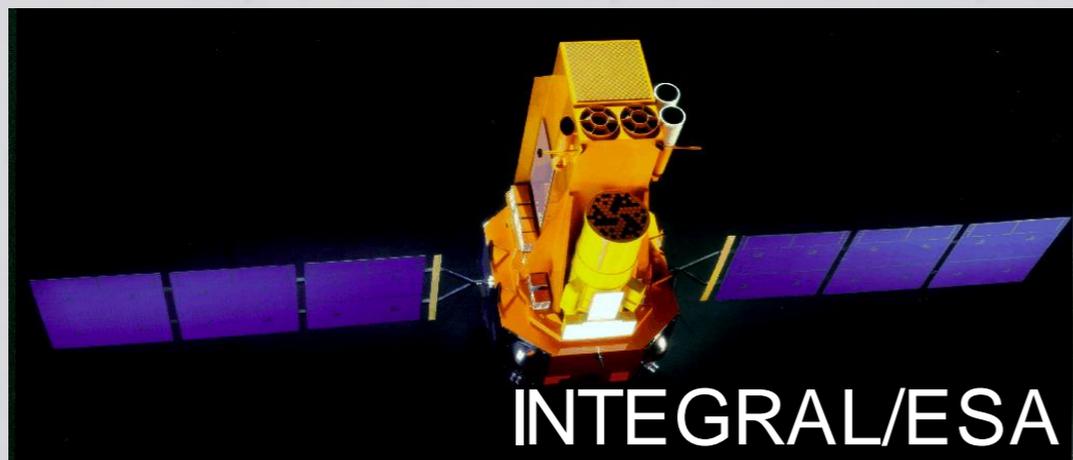
前半 : Geant4の簡単な説

後半 : Geant4の確認実験



Geant4とは GEometry ANd Tracking 4

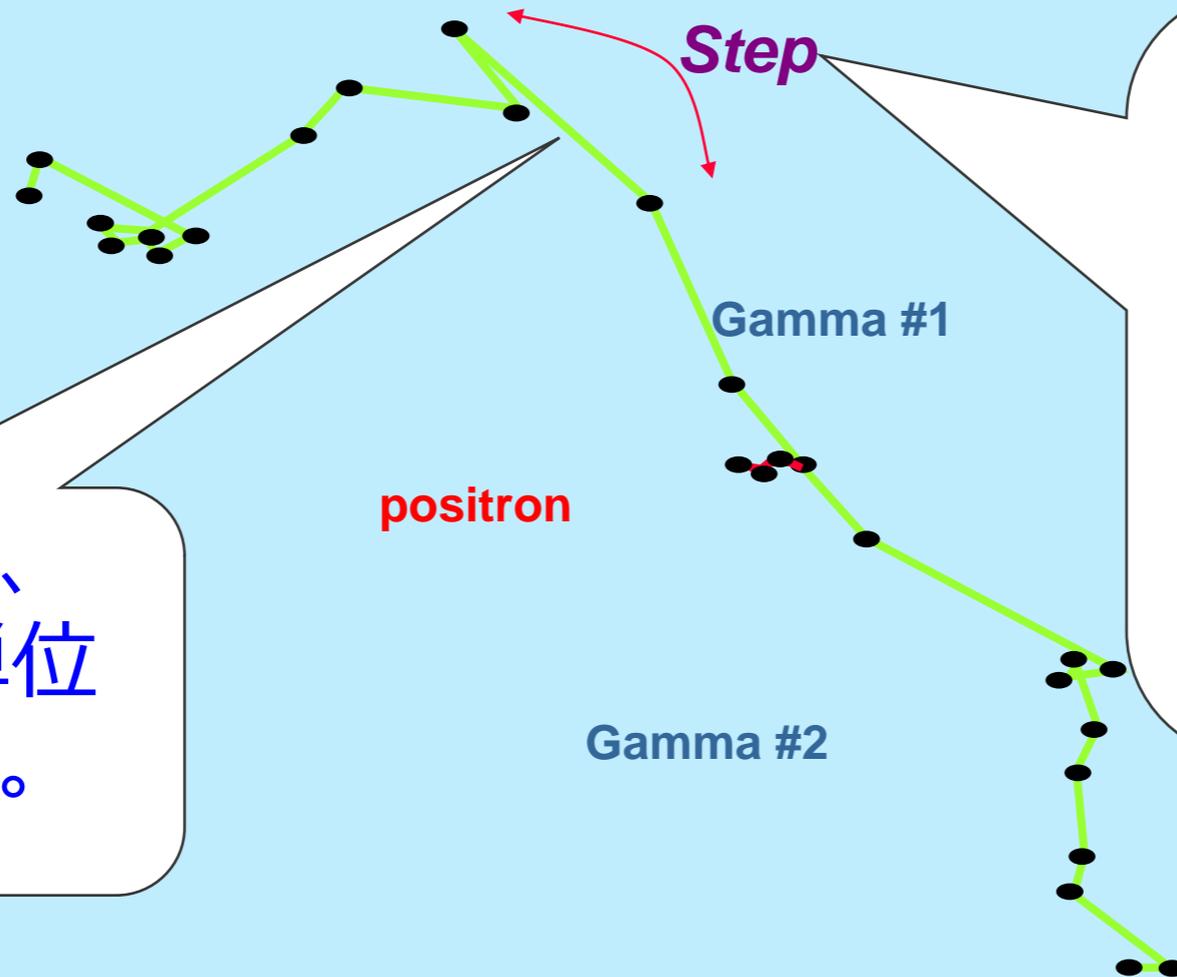
- * 物質を通過する粒子の過程をモンテカルロシミュレーションするTOOLKITである。
- * 高エネルギー物理、宇宙線物理、放射線医療などの分野で広く使用されている。
- * Userは目的に応じGeant4が提供したC++言語のLIBRARY群から必要なもの実装し、自分でProgramを書かなければならない。



Geant4の モンテカルロシミュレーション

* モンテカルロ法とは、乱数を用いた統計的なサンプリングによって問題の近似解を求める数学的手法である。

粒子の軌跡は、
Stepという単位
で区切られる。



乱数を用い、反応
断面積や物質の性
質を対応させるこ
とにより粒子と物
質の相互作用が決
定される。

Geant4
シミュレーションの構築(1)
最小構成

Detector Construction

- 物理環境(Geometry)
- 有感部分(Sensitive Detector)

Physics List

- 粒子の種類
- 必要な物理相互作用
- 生成粒子Cut Value

Primary Generation

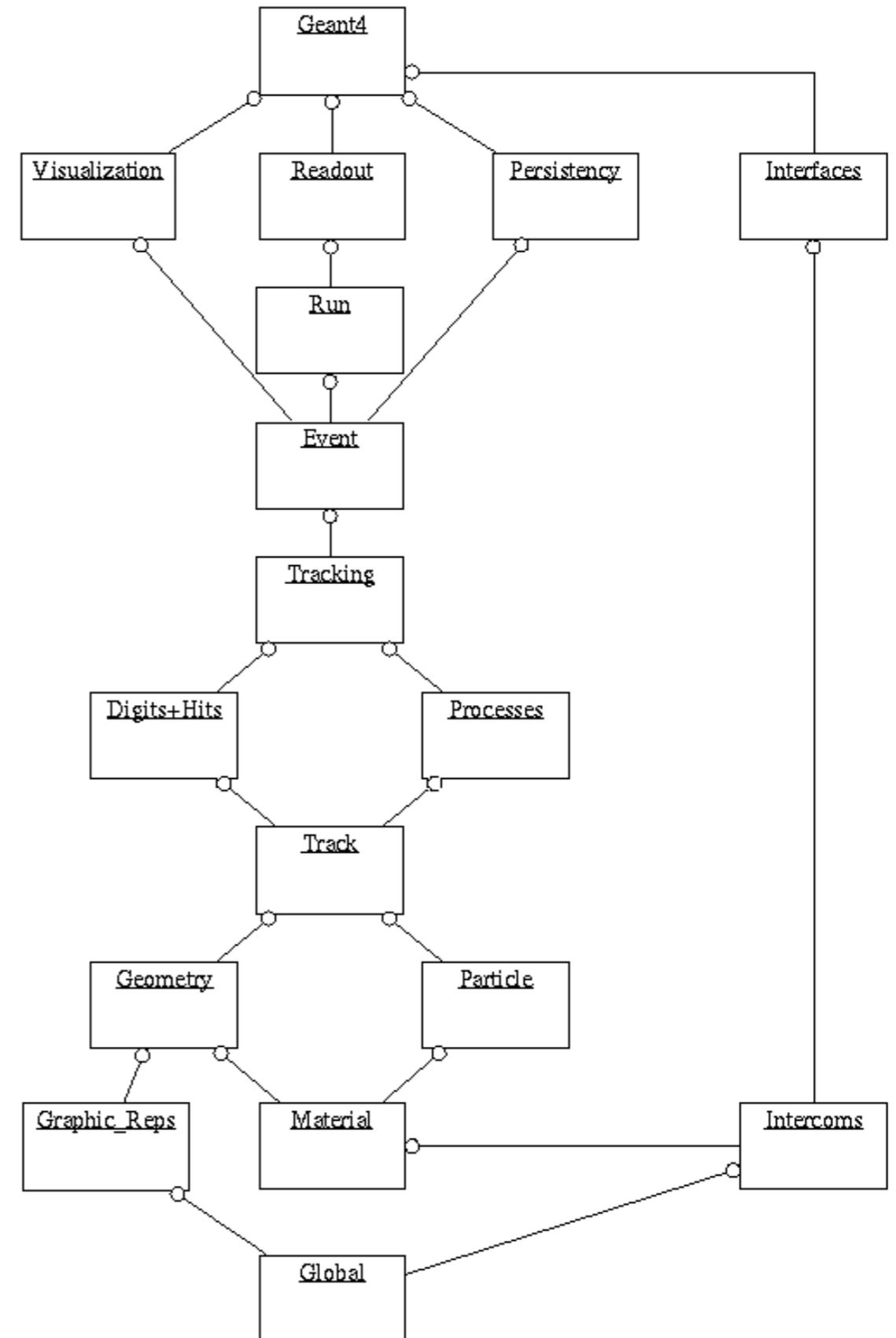
- 初期粒子の情報
(種類、位置、運動エネルギー、方向など)

Geant4 シミュレーションの構築(2) 管理階層とUserAction

G4のシミュレーションはRun、Event、Track、Stepの順に管理階層が細かくなっていく。

Userは各階層に対して、各G4UserActionクラスでシミュレーションを制御したり、情報を取り出すことができる。

Hitを定義し、検出応答も可能



Geant4シミュレーションの流れ



LOOP

進行中

- 粒子を StepbyStepを追跡
- 各階層で情報をメモリーに保存

UserAction

- Hitの場合
- 情報を書き出し

初期化

- Run-Manager
- Geometry
- Physics

Run開始

- 初期情報を読み込む
- BeamOnでSTART

Run終了

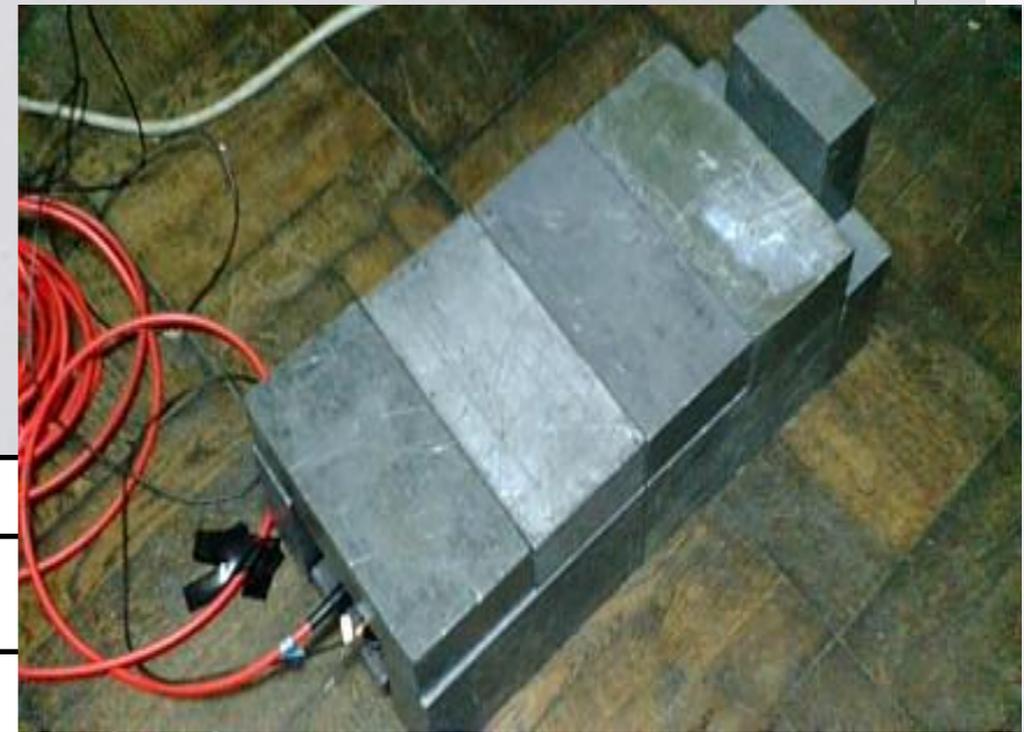
- メモリー解放

以上はGeant4の簡単な説明

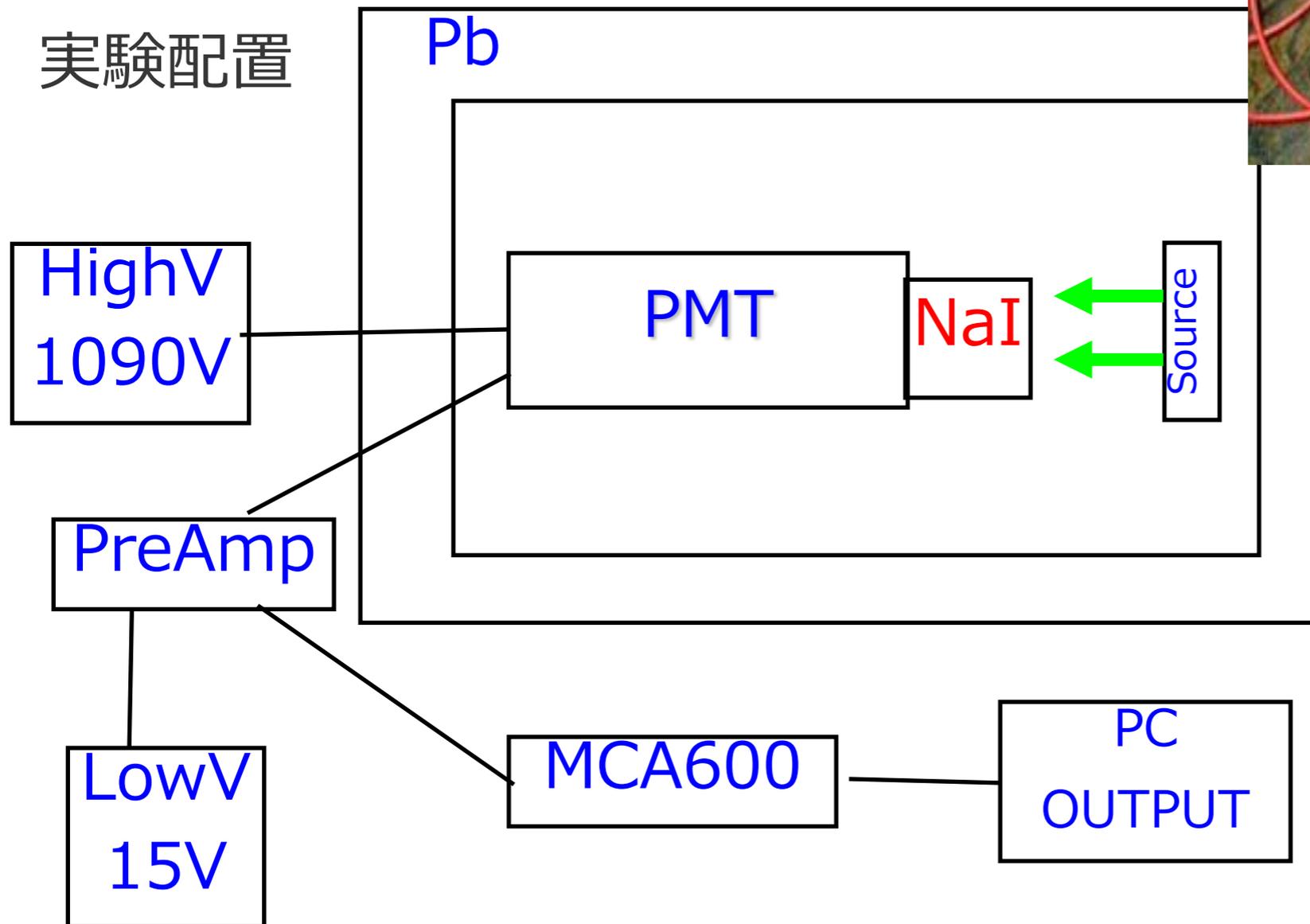
次は、G4の確認実験のお話

Geant4の確認実験をした

NaIシンチレータによる γ 線の測定
2007/12/29



実験配置



線源は

- ^{137}Cs (662keV)
- ^{22}Na (511keV & 1275keV)

測定時間は

LT=1500Sec

Geant4でNaI実験を再現した

- **PhysicsList :**

光電効果、Compton散乱、電子対生成、電離損失、制動放射などの相互作用をG4に取り入れた。

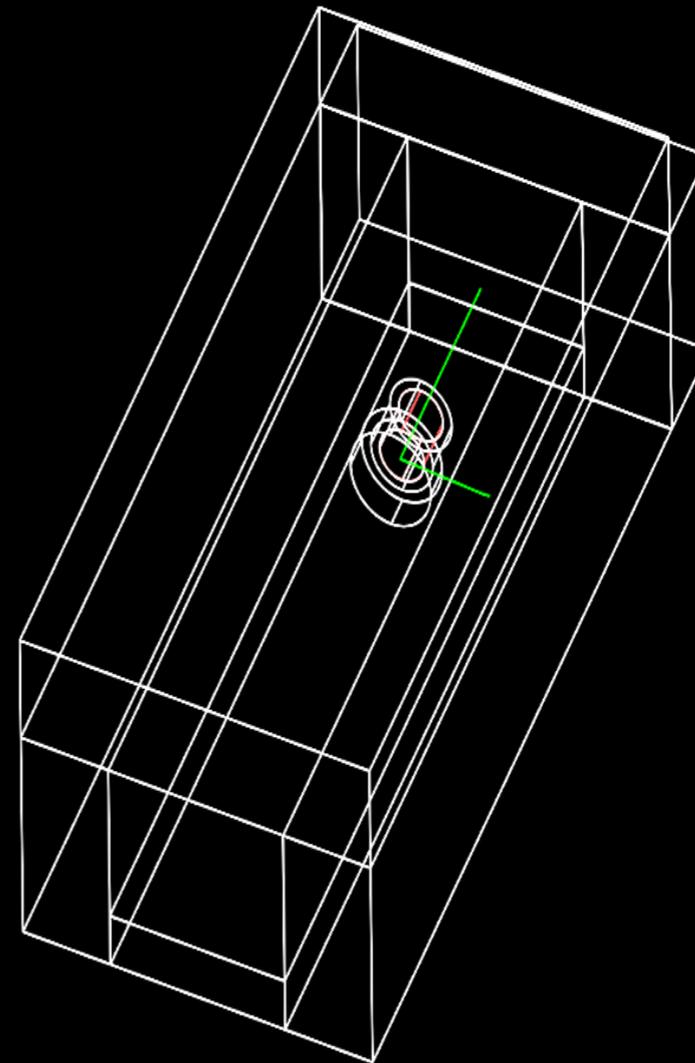
- **DetectorConstruction :**

NaI、PMT、Pbブロック、空気密度 etc

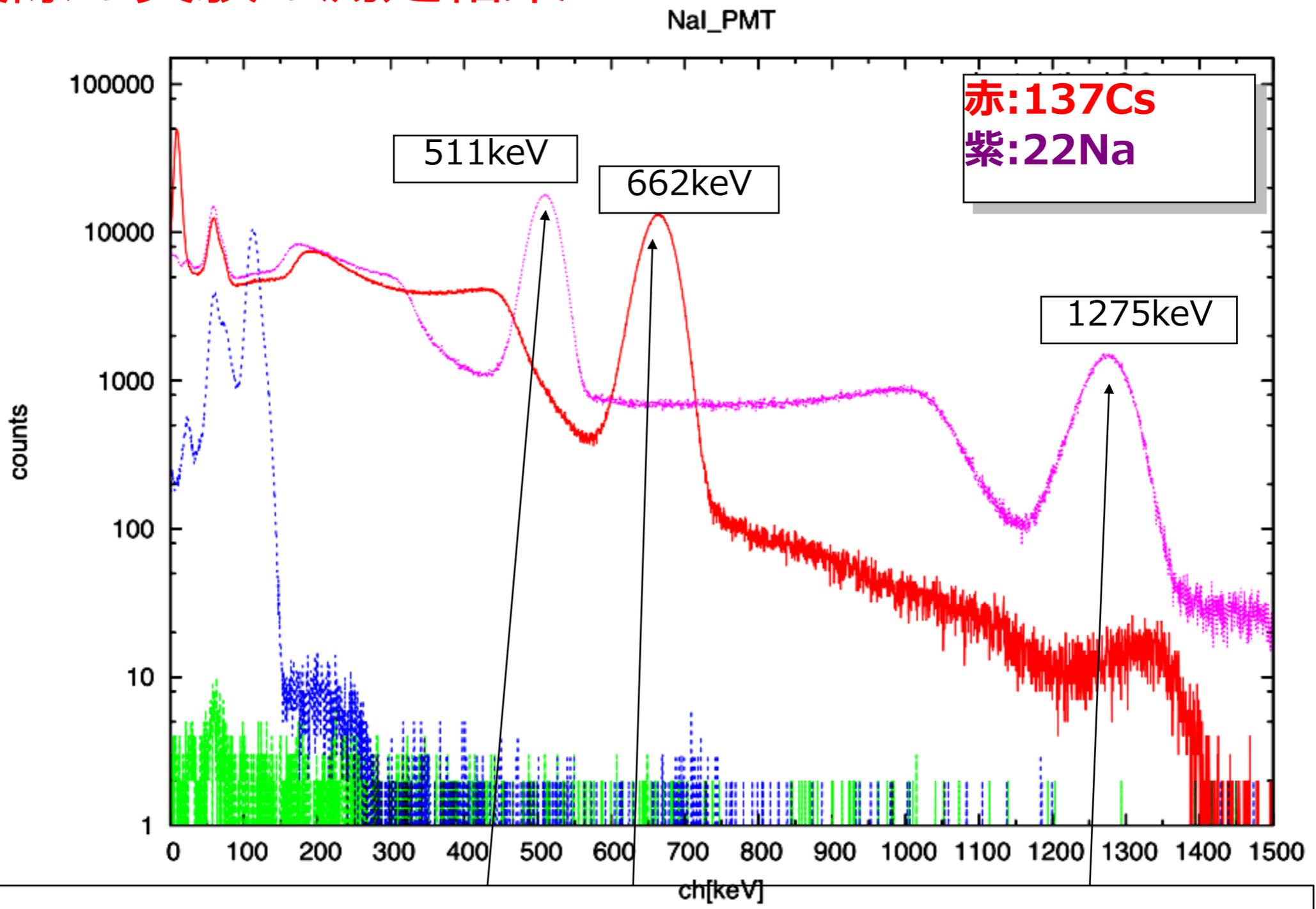
- **PrimaryGeneration**

線源から出る各々の光子エネルギーと強度比を考慮した。

by Geant4

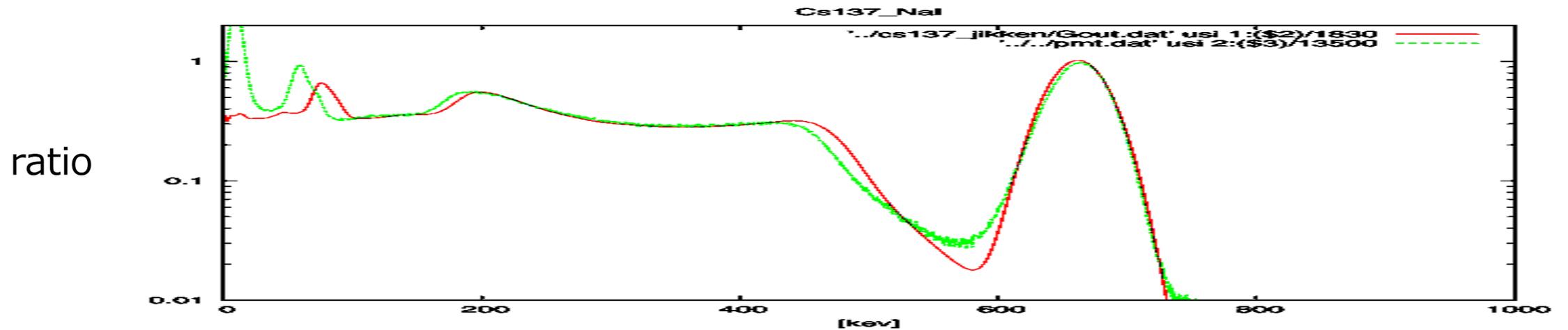
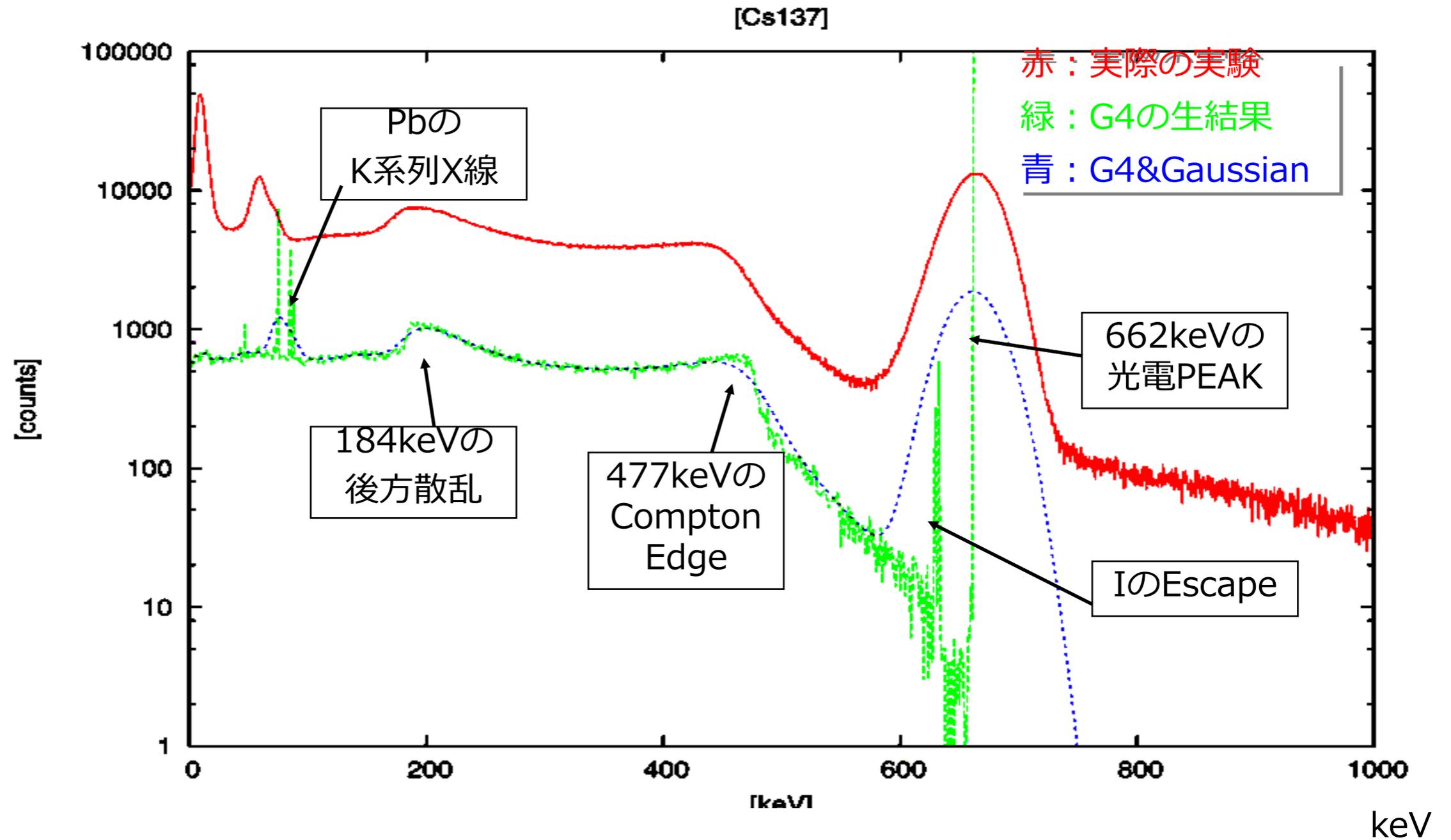


実際の実験の測定結果

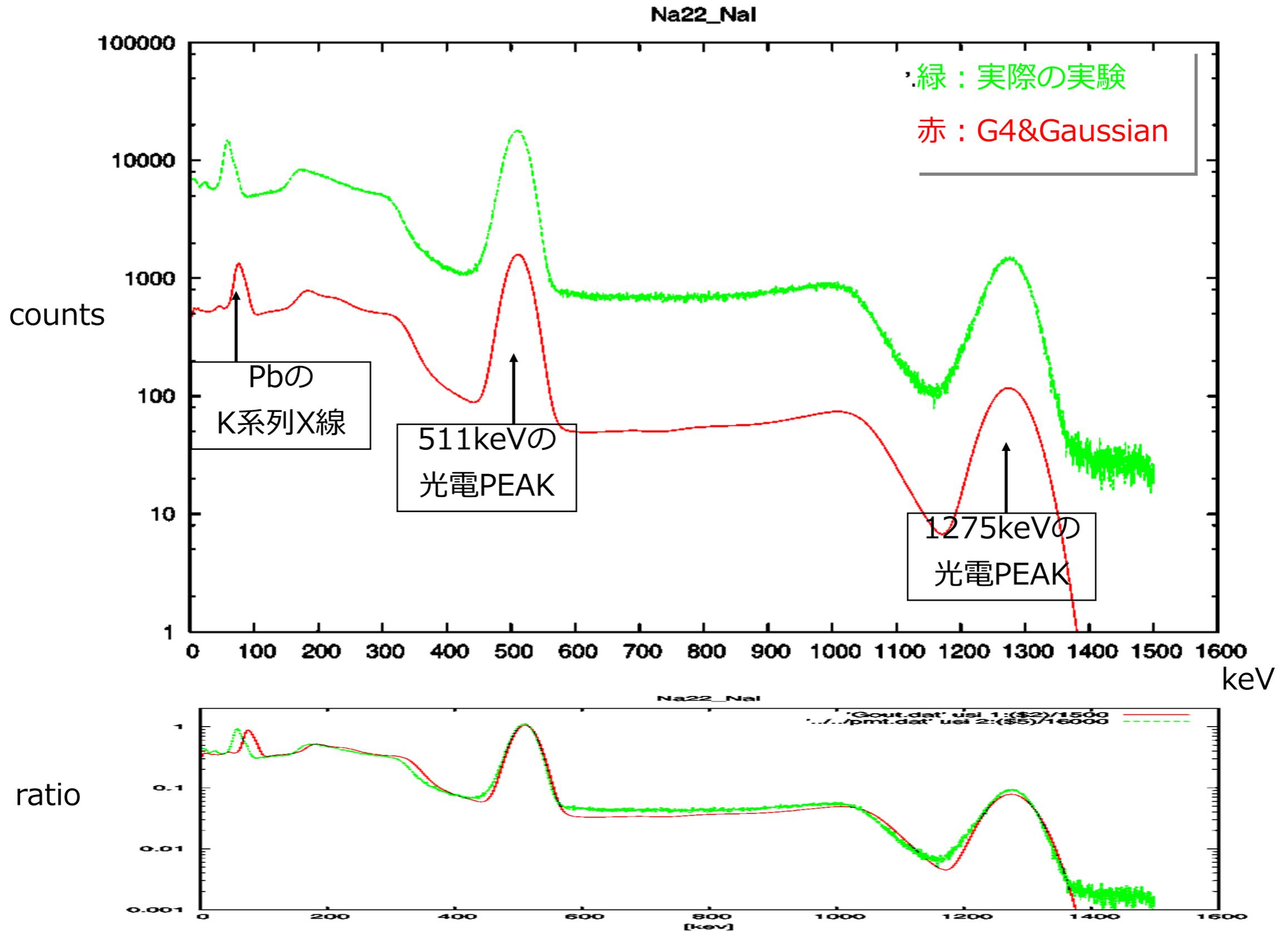


各ピークの分解能を解析し、G4の生データの解析に使用した

G4シミュレーションの結果 (Cs137)



G4シミュレーションの結果 (Na22)



Part1のまとめ

完全再現とはいえないが、物質と粒子の相互作用をよく再現できた。

Geant4は検出器の性能をUserが設定できるため、実際の検出装置が見えないものを予測できる。

PART2

◇ RX J1713.7-3946 vs 分子雲
仮想のX線スペクトルシミュレーション

P6松本班

芝原光樹

目次

1. 動機・目的

2. RX J1713.7-3946について

3. 方法～シミュレーション～

3-1. シミュレーションのために

3-2. 予備シミュレーション

3-3. γ 、 p 、 e^- の相対値はいくらくらい？

4. シミュレーション結果

4-1. 揭示

4-2. 陽子由来の6.4keV～再考

5. まとめ

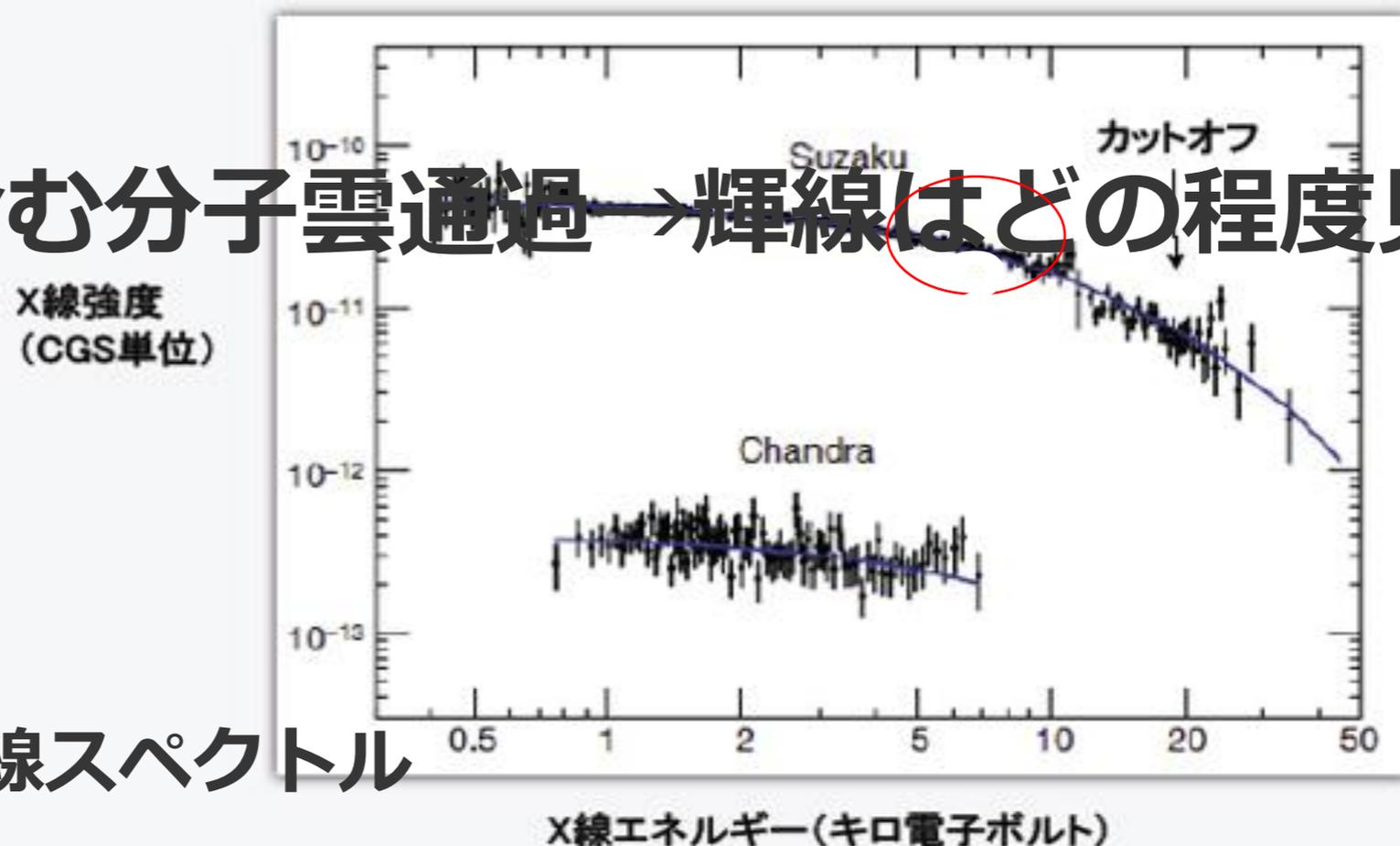
1. 動機・目的

- 超新星残骸RX J1713.7-3946
- Feなどの輝線が見られない。

→ほんと？

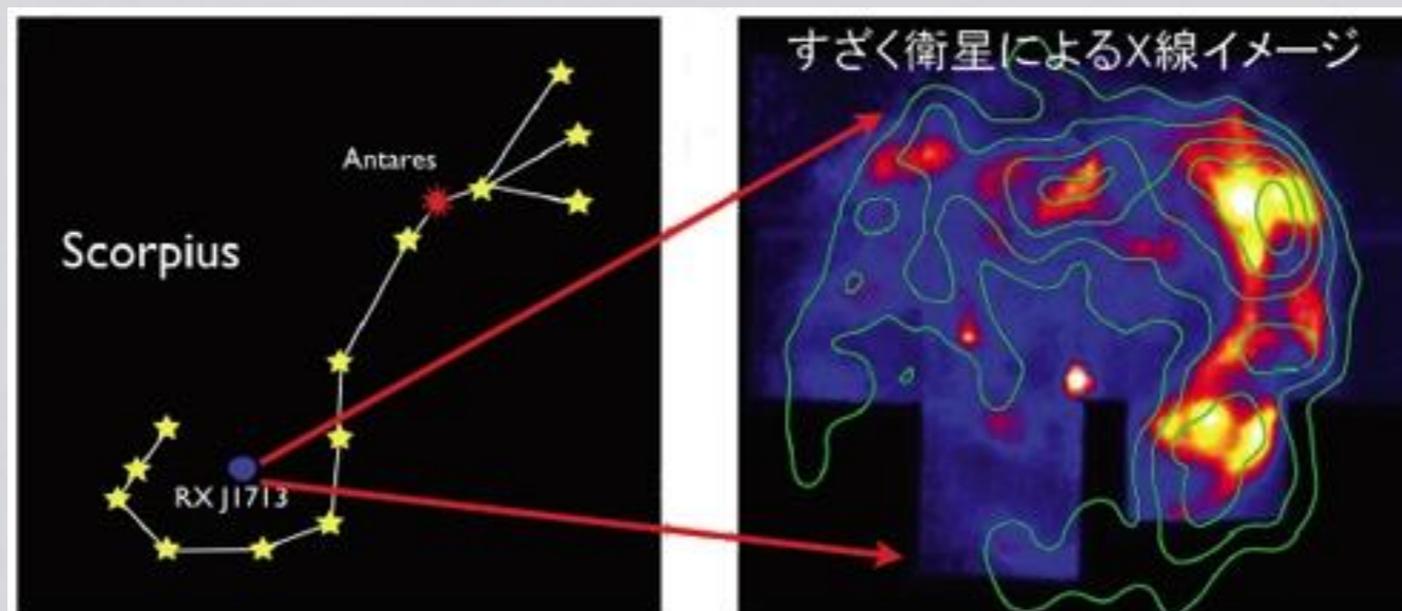
もしFeを含む分子雲通過→輝線はどの程度見える？

南西部のX線スペクトル



2. RX J1713.7-3946について

- さそり座の尾の中付近に見られる（目では見えませんが）超新星残骸
 - 距離 ~ 1 kpc
- 年齢 ~ 1600 yr（中国の文献に載っている！）
- ROSAT All-Sky Surveyにより発見
- ASCAによりその北西部からのシンクロトロン放射によるX線スペクトルを確認（Koyama et al. 1997）

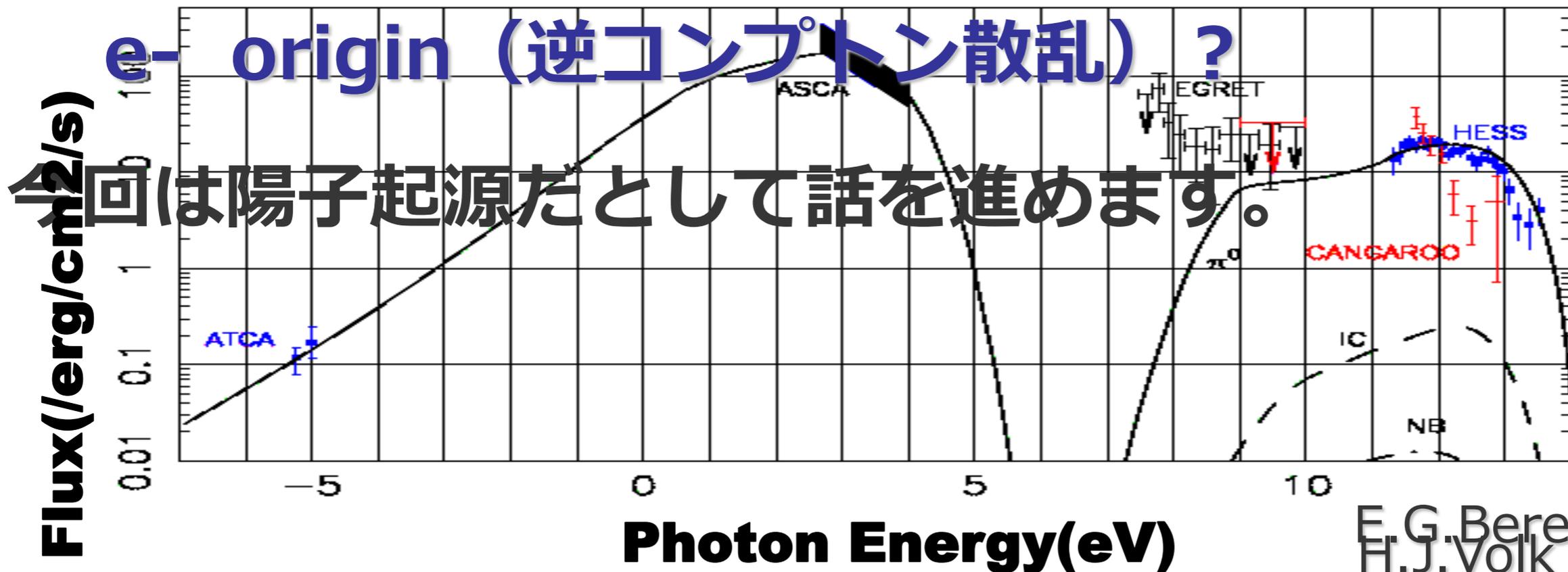


• photon強度スペクトル

~keV : 熱的放射 < 非熱的放射

~TeV : keV領域に匹敵するほどの強度

→ p origin (n^0 崩壊) ?



F.G.Berezhko
H.J.Volk 2006

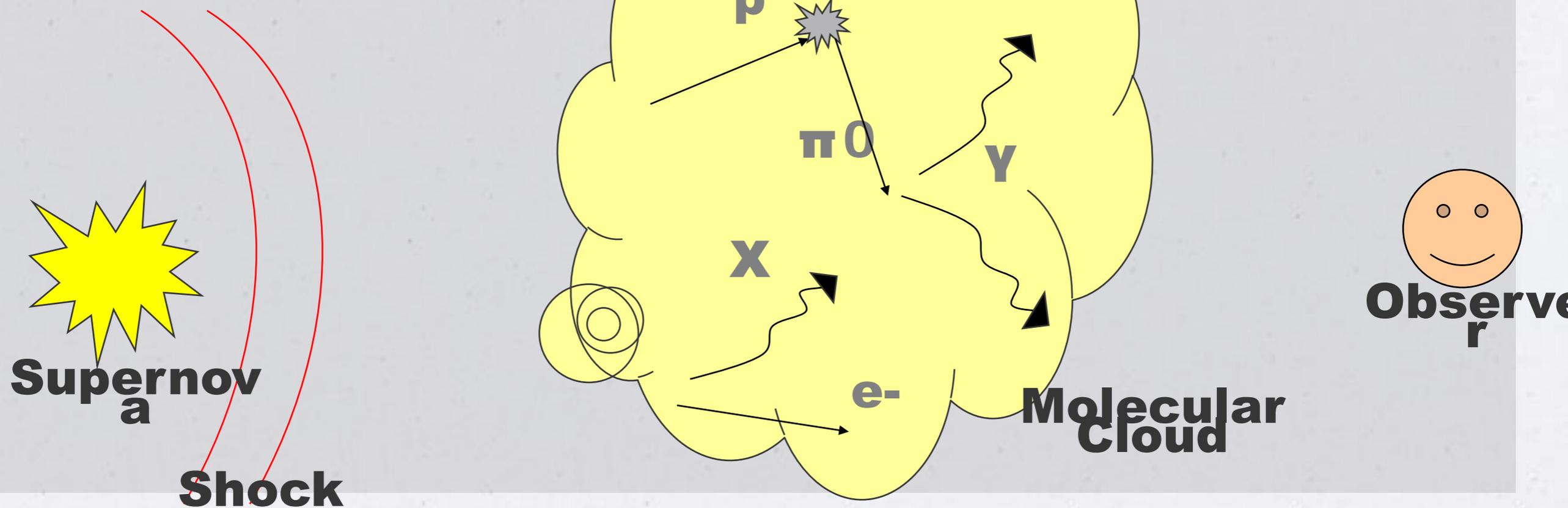
3. 方法～シミュレーション

～

- 1～10keV付近の強度スペクトルをシミュレーションする

。

- 想定している状況は . . .



検出方法は . . .

- 球形の分子雲に中心からpなどを打ち込

- 組成比 (個数比) :

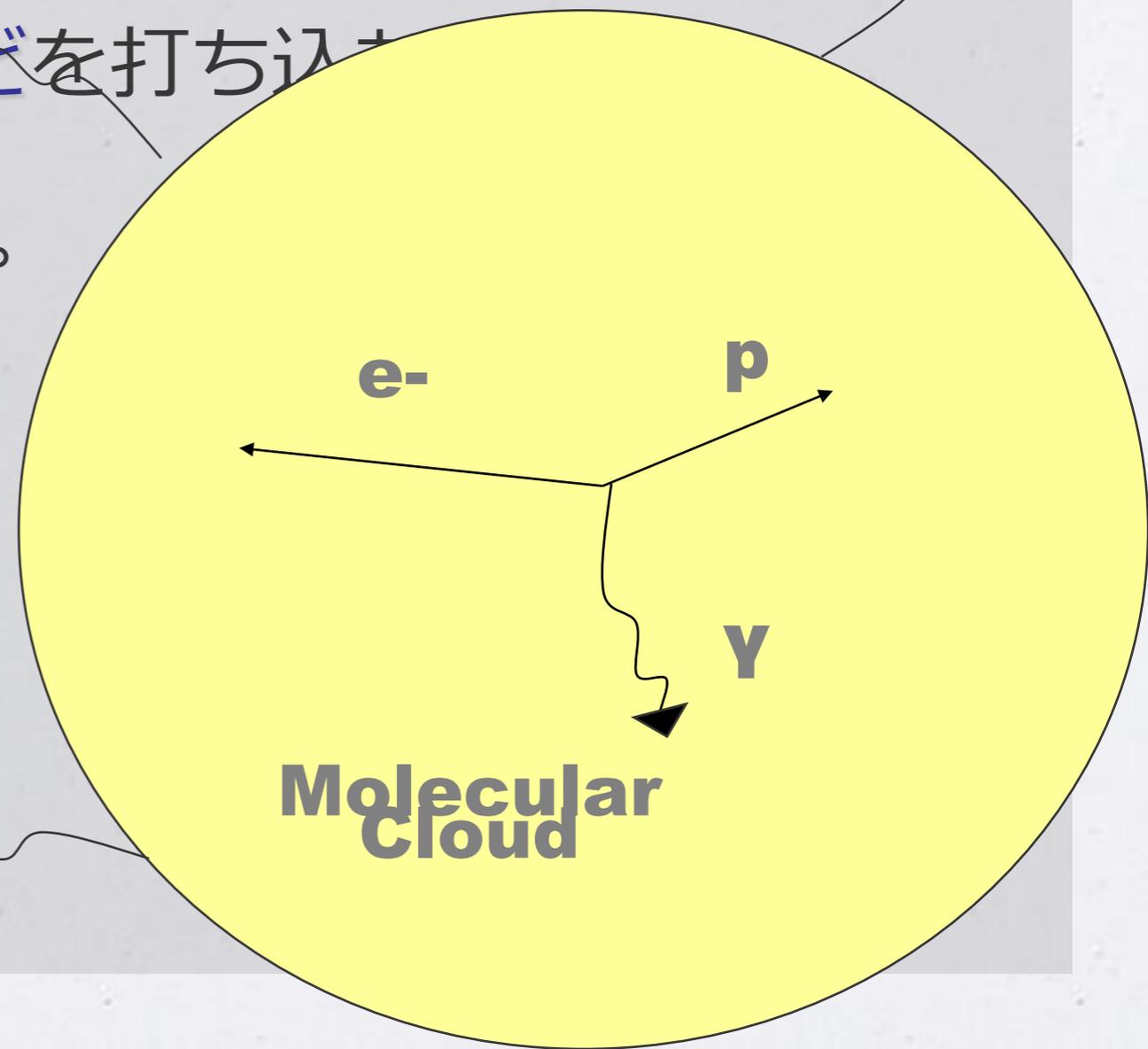
- 出てきたH 85%, He 14% 検出する。

C 0.6%, O 0.3%, Fe 0.1%

- その他

R~1pc T~10K

density~100/cc



シミュレーションのために

- Geant4では「Kinetic Energyが○MeVの陽子を△本打つ」というような設定。

→何を何本打つか？

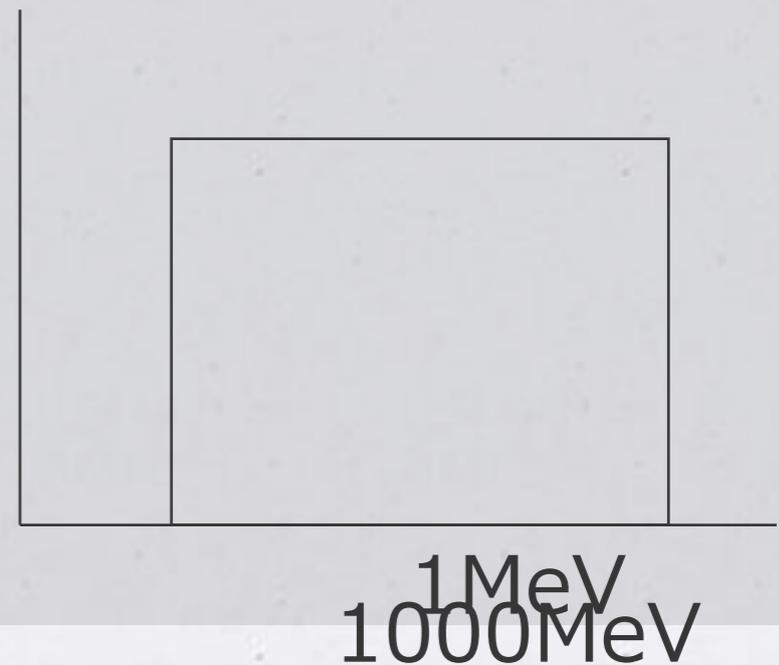
- ~10keV X線を出さないものをやたら打ってもムダ。
- 各粒子の応答性を見るために予備シミュレーションをしました。

予備シミュレーション～**数keV X線**を生むのは!?

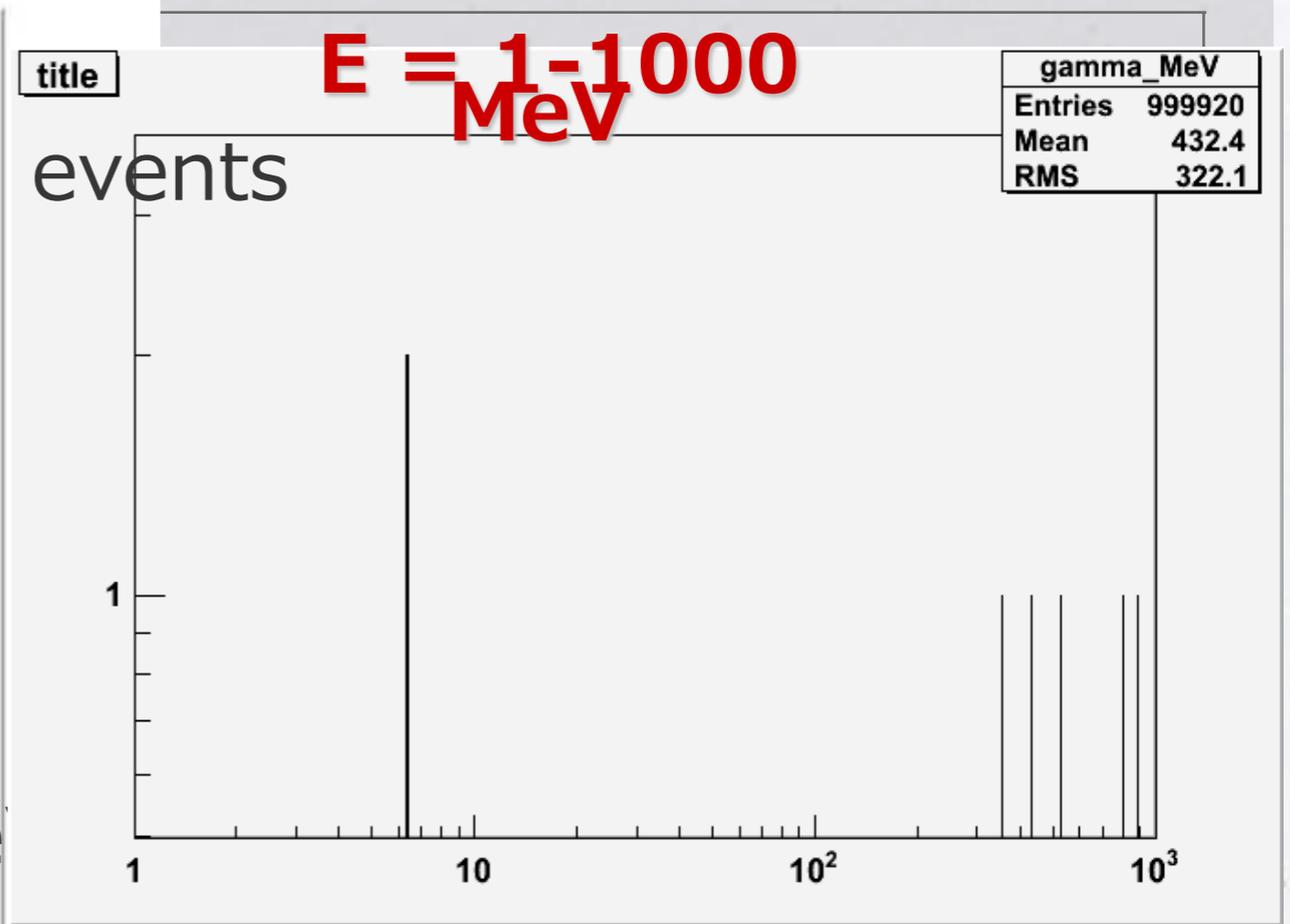
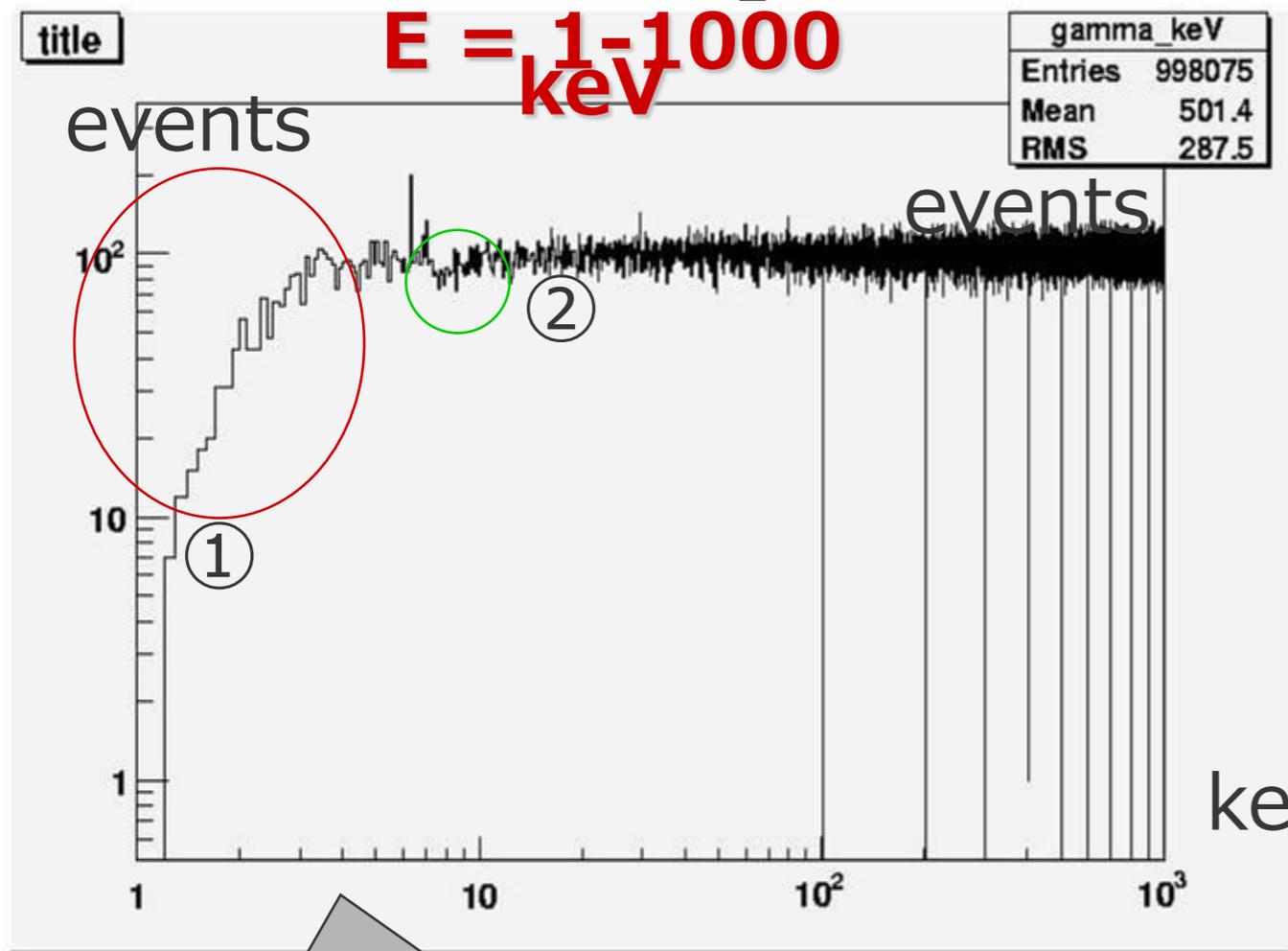
打ち込むエネルギーレンジ

	1-1000keV	1-1000MeV	1-1000GeV	1-100TeV
e-			?	
p				
拳	○ or ×			

- それぞれ 10^6 本ずつ
- 一様確率密度で1-1000[MeVなど]を0.1刻みで打ってみる
- 出てきた1-1000keV光子を図にしました。



photonの応答性

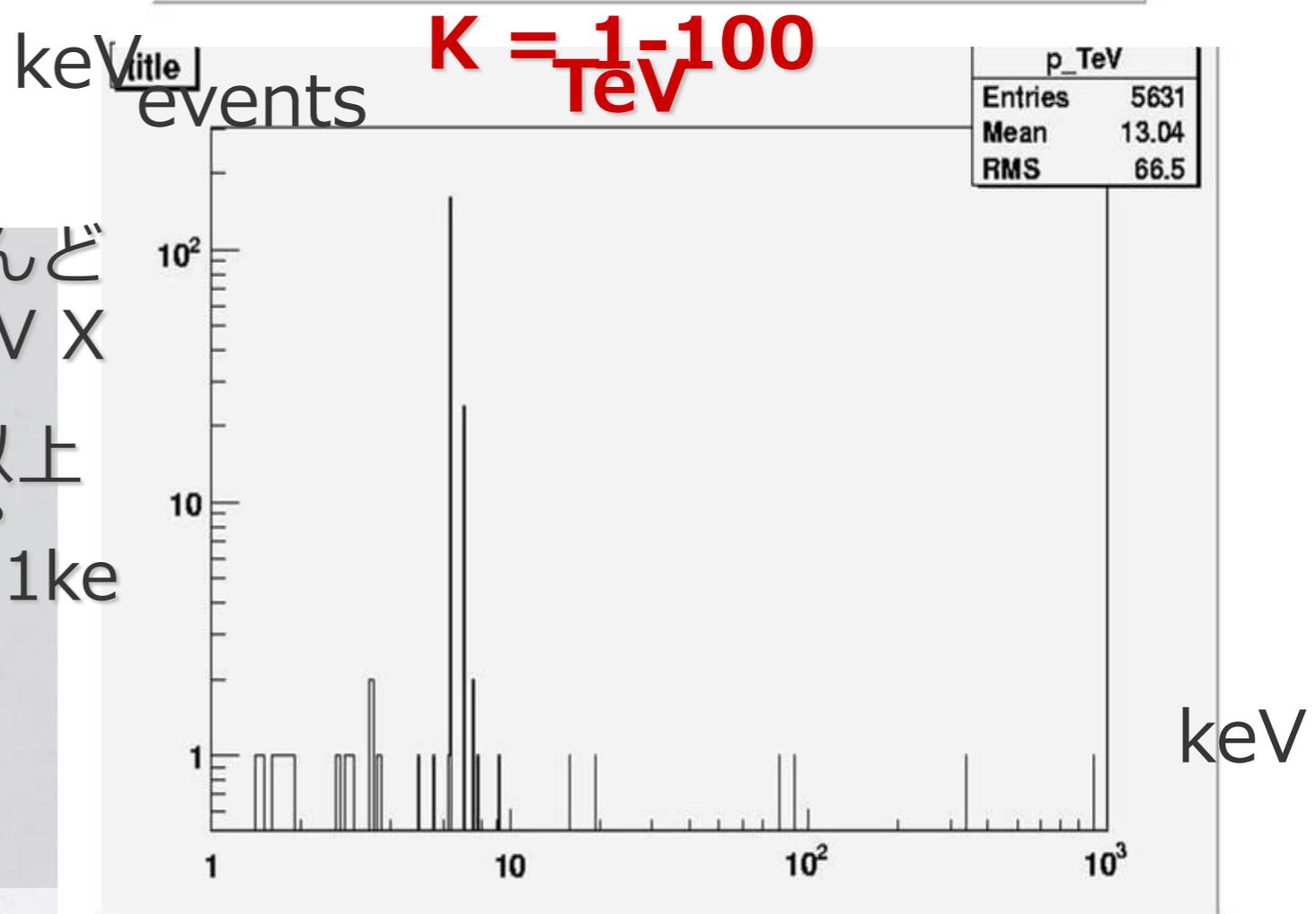
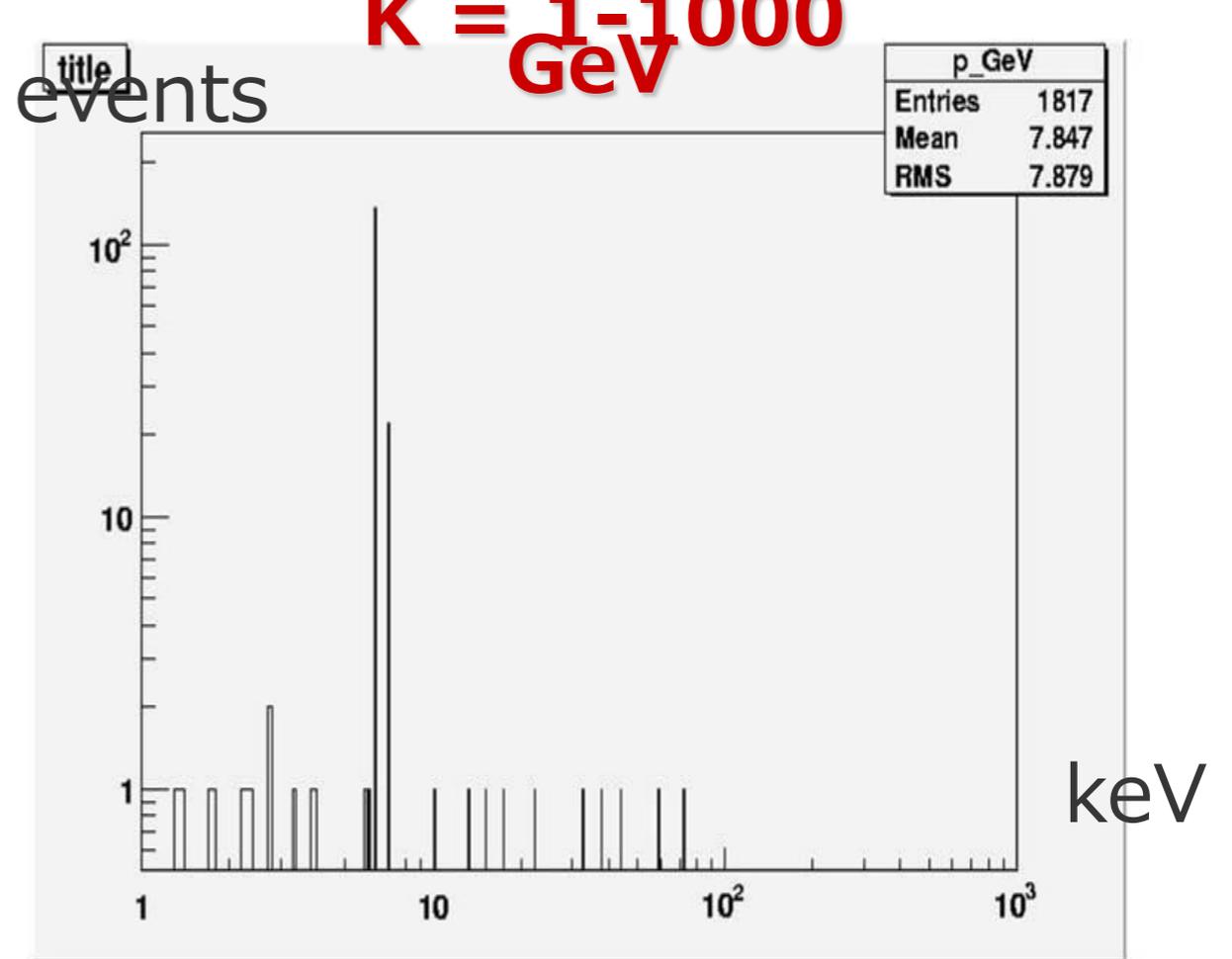
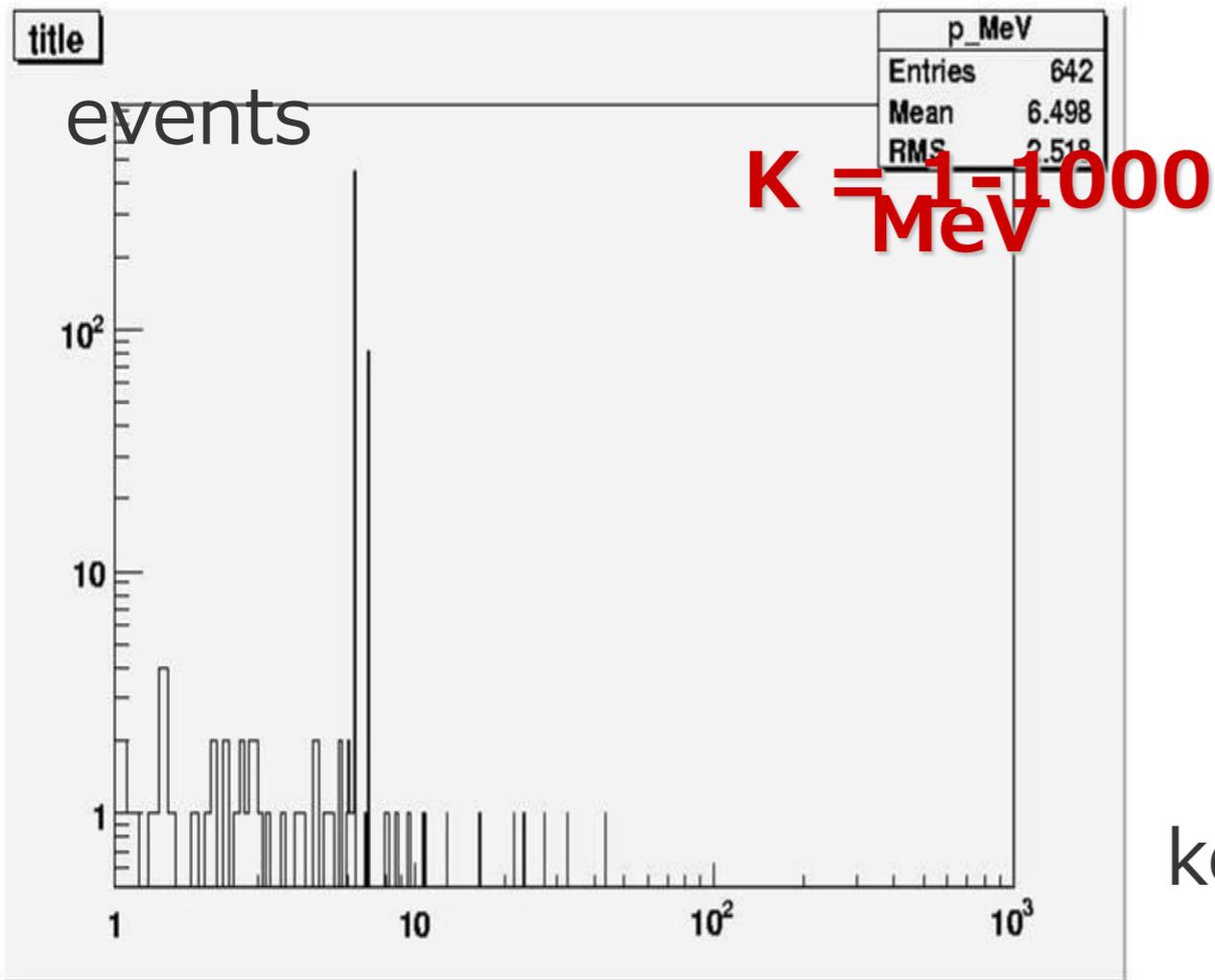


① 1-3 keV のかなりの光子は光電効果、コンプトン散乱を受ける

② 7 keV あたりに鉄のエッジが見られる

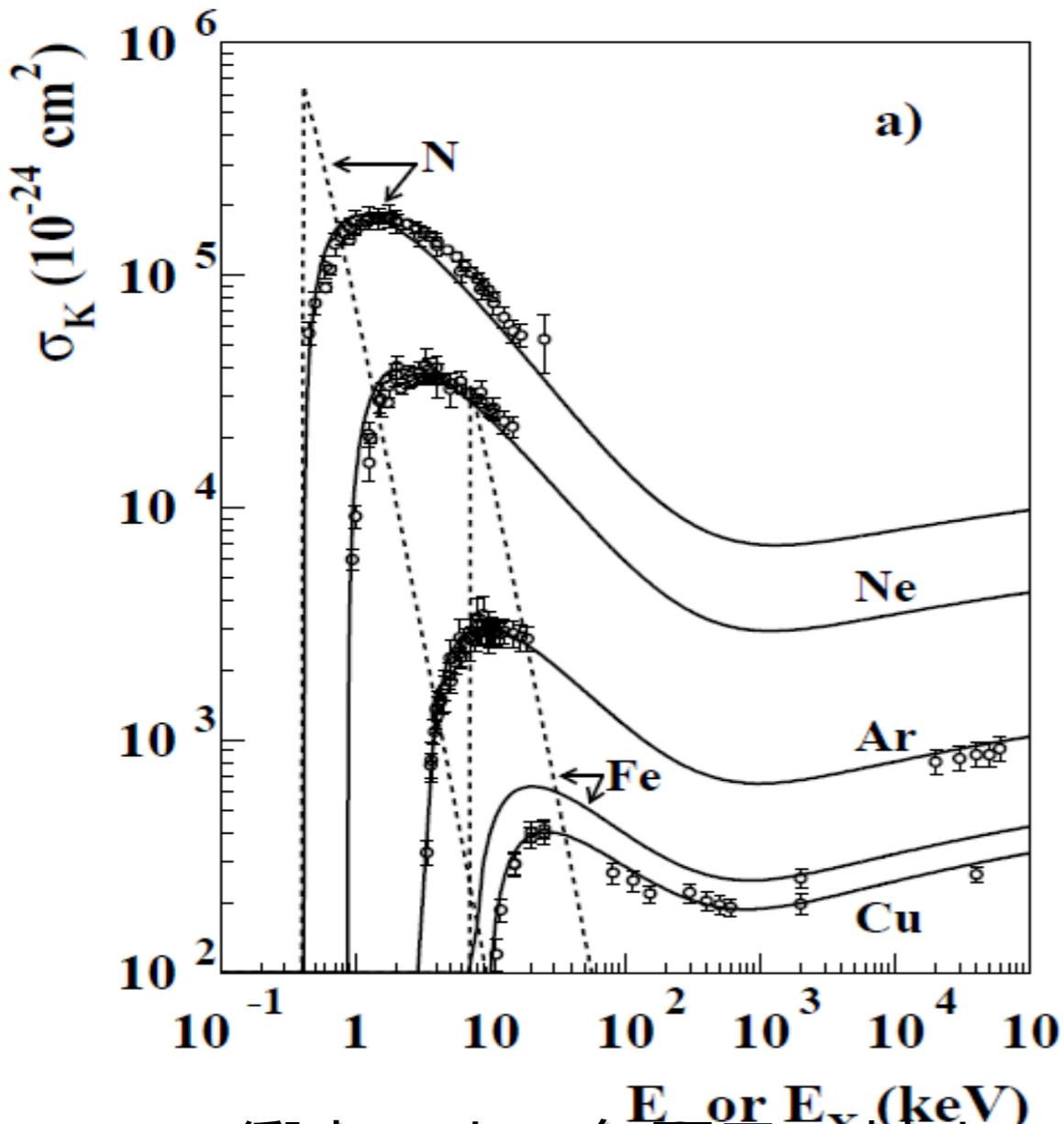
• 1-1000 [GeV] は 1-100 [TeV] は 6.4 keV がそれぞれ 2 event だけありました。他は何もなし。

pの応答性

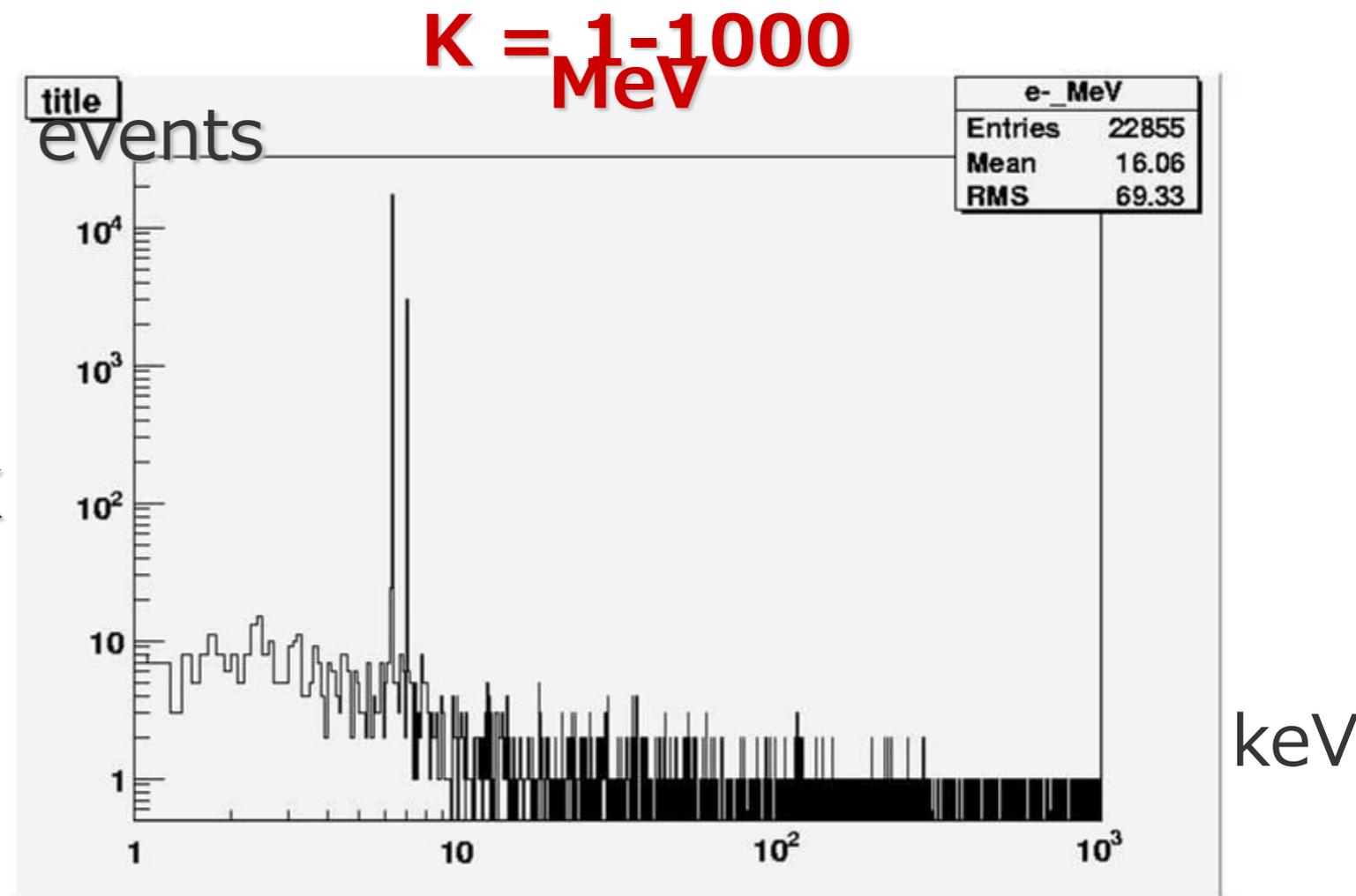
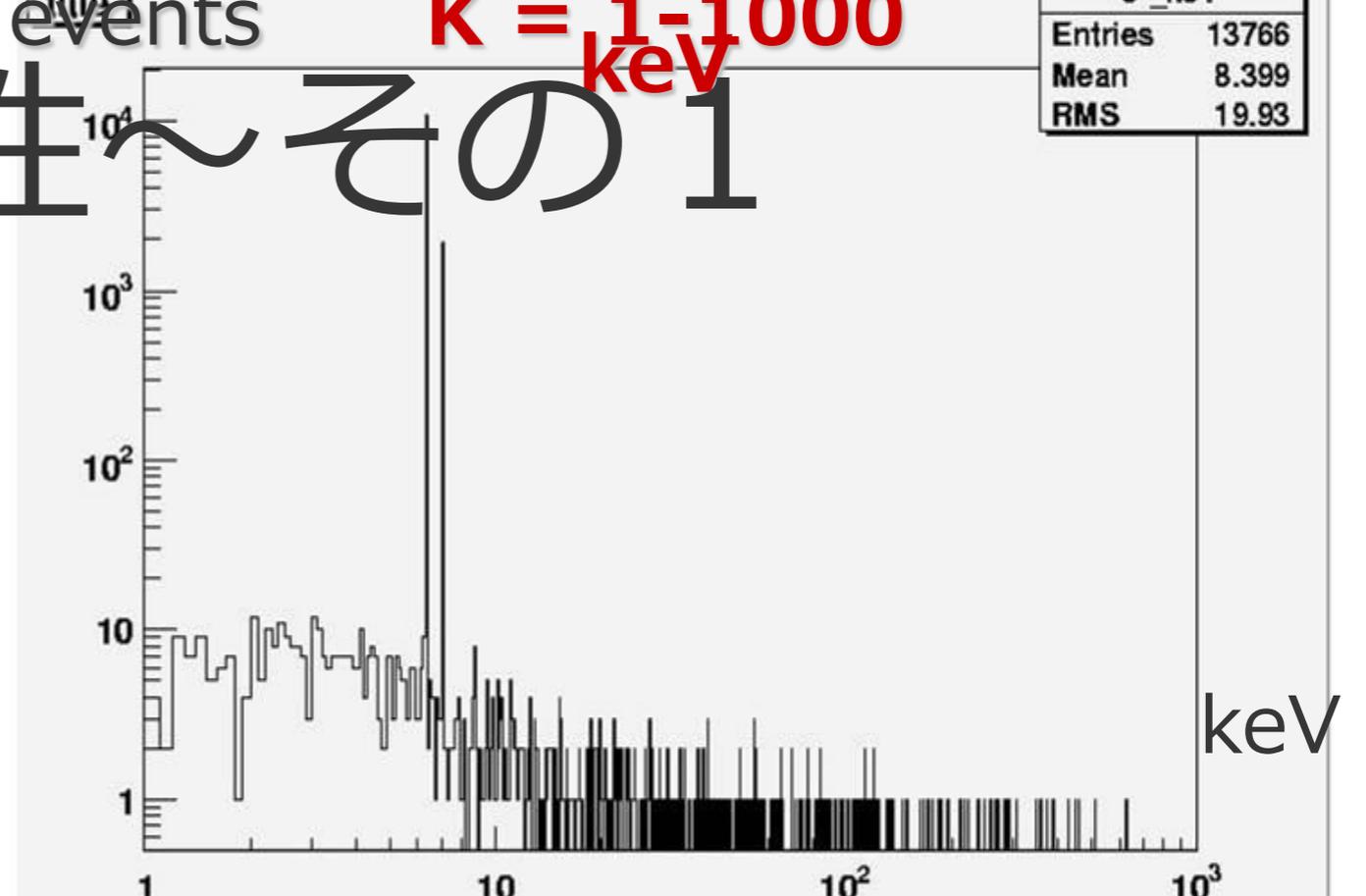


- 衝突電離による6.4keVがほとんど
- どのレンジでも出てくる6.4keV X線はほぼ同じイベント数
- 1-1000keVのpでは(1keV以上の) X線は出てきませんでした。
(SetCutForSecondaryPhotons=1keVのせい(おかげ?))

e-の応答性〜その1

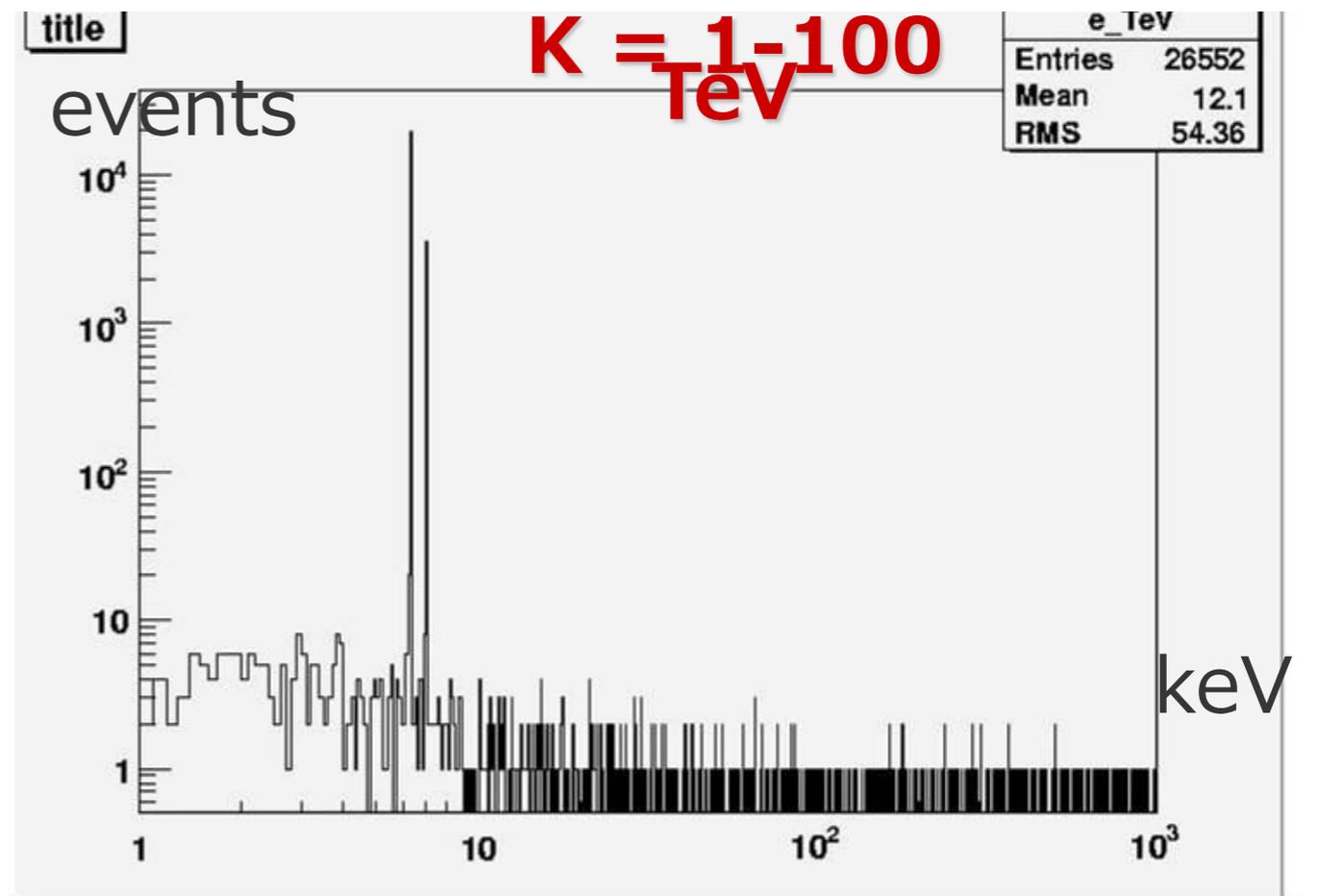
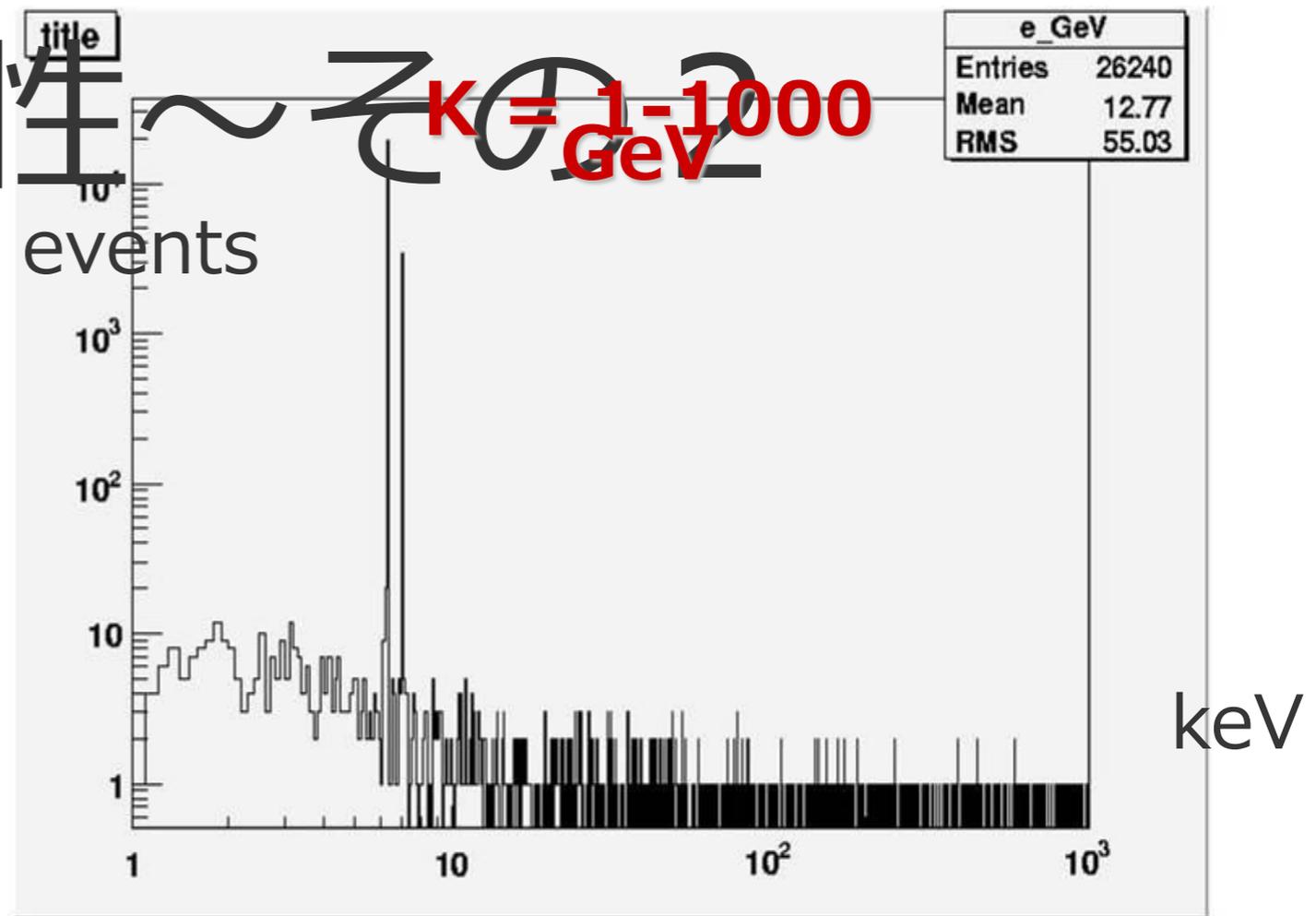


e-衝突による各原子に対するK殻電子電離断面積 (実線)
(V.Tatischeff 2002)



e-の応答性 ~ その2

- 衝突電離による6.4keVがほとんど
- 制動放射による成分も見られる
- 出てくる6.4keV X線ほどのレンジでもほぼ同じイベント数



予備シミュレーションまとめ ~ 10 keVのX線を生

ものは、打ち込んだエネルギーレンジ

	1~1000 keV	1~1000 MeV	1~1000 GeV	1~100 TeV
e-	◎	◎	◎	◎
p	×	○	○	○
拳	○	× (透過)	× (透過)	× (透過)

- e- : どのレンジでも出てくる1-10keV X線は同じくらい

- p : どのレンジでも出てくる1-10keV X線は同じくらい

本シミュレーションの前に残念な話が1

磁場とe-から^つシンクロトロンX線を
再現したかった。

→計算機の計算時間都合上と僕のカ不
足で無理でした。

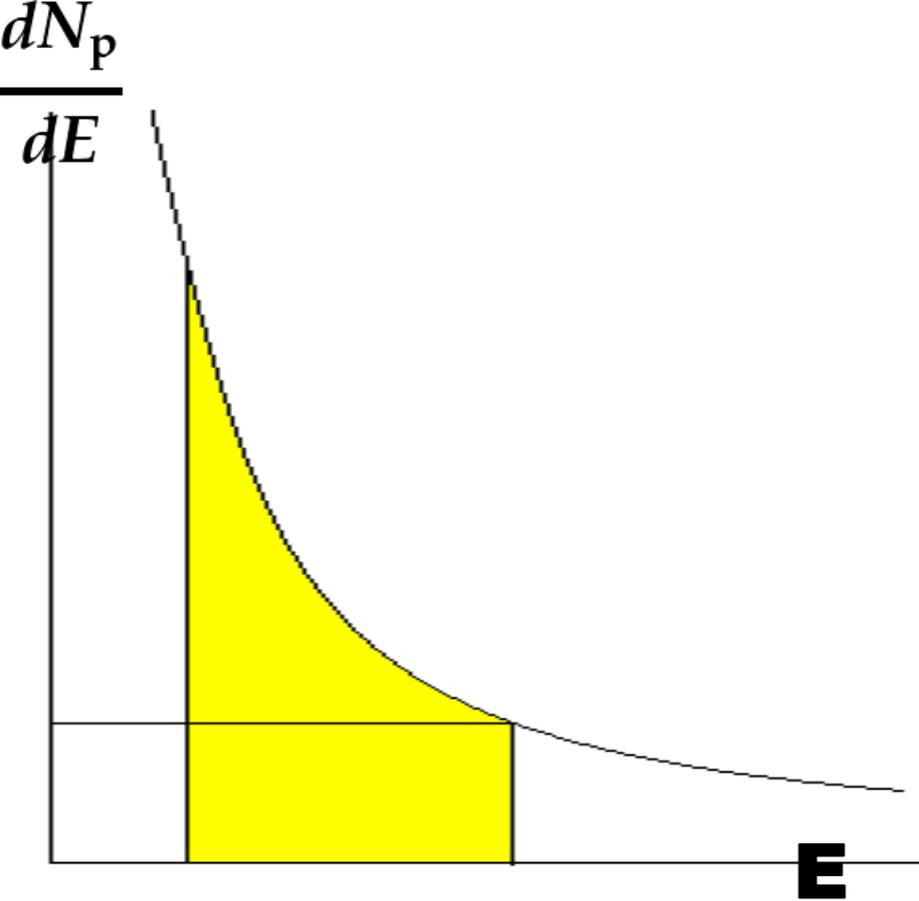
難しかったです・・・。



★今回は磁場はかけずにシン
クロトロンX線はすでにできた
ものとして打ち込むことにし
ます。

各粒子の相対量は？

種類	相対量の決め方	分配関数の形
陽子	$\frac{dN_p}{dE} \propto E^{-2} \exp[-E/100\text{TeV}]$	TeVγ線fluxとシンクロトロンflux比 (観測量より0.07) (Yamazaki et al. 2006)
電子	$\frac{dN_e}{dE} \propto E^{-2} \exp[-E/10\text{TeV}]$	陽子の~10 ⁻³ 倍 (Yamazaki et al. 2006)
シンクロトロン線	$\frac{dF_{\text{syn}}}{d\epsilon} \propto \epsilon^{-3/2} \exp[-\sqrt{\epsilon/0.7\text{keV}}]$ (Uchiyama et al. 2003)	観測量



$$\frac{dN_p}{dE} \quad \frac{dN_e}{dE} \quad \frac{dF_{\text{syn}}}{d\epsilon}$$

が決定した実際の打ち込みは反応するシから。

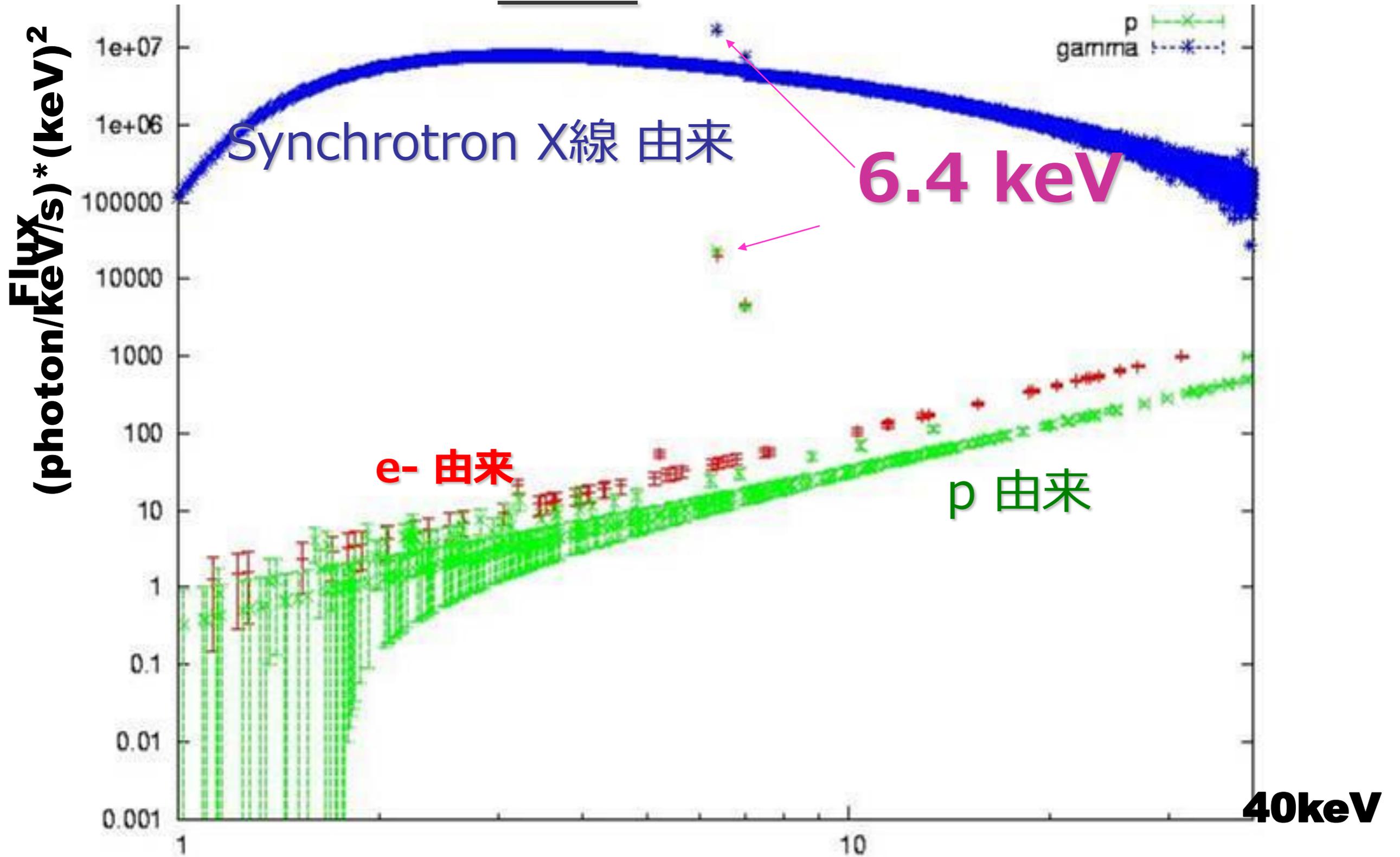
その結果 . . .

p → 1 MeV~を 1.3×10^9 本

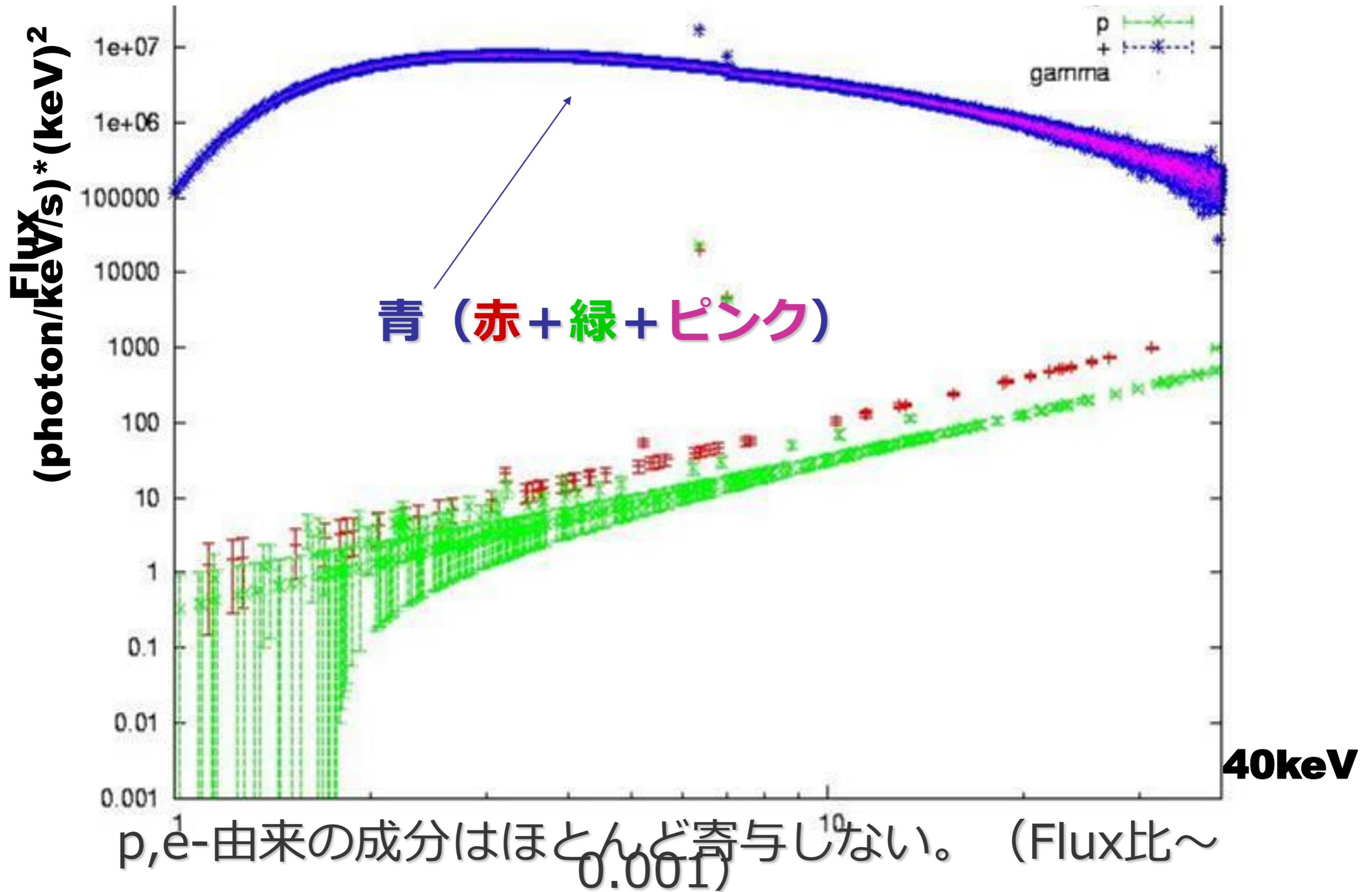
e- → 1 keV~を 2.5×10^9 本

Synchrotron X-ray 10^{12} 本 → 1 keV~ を

4. 結果 1-40 keV のX線フラックス

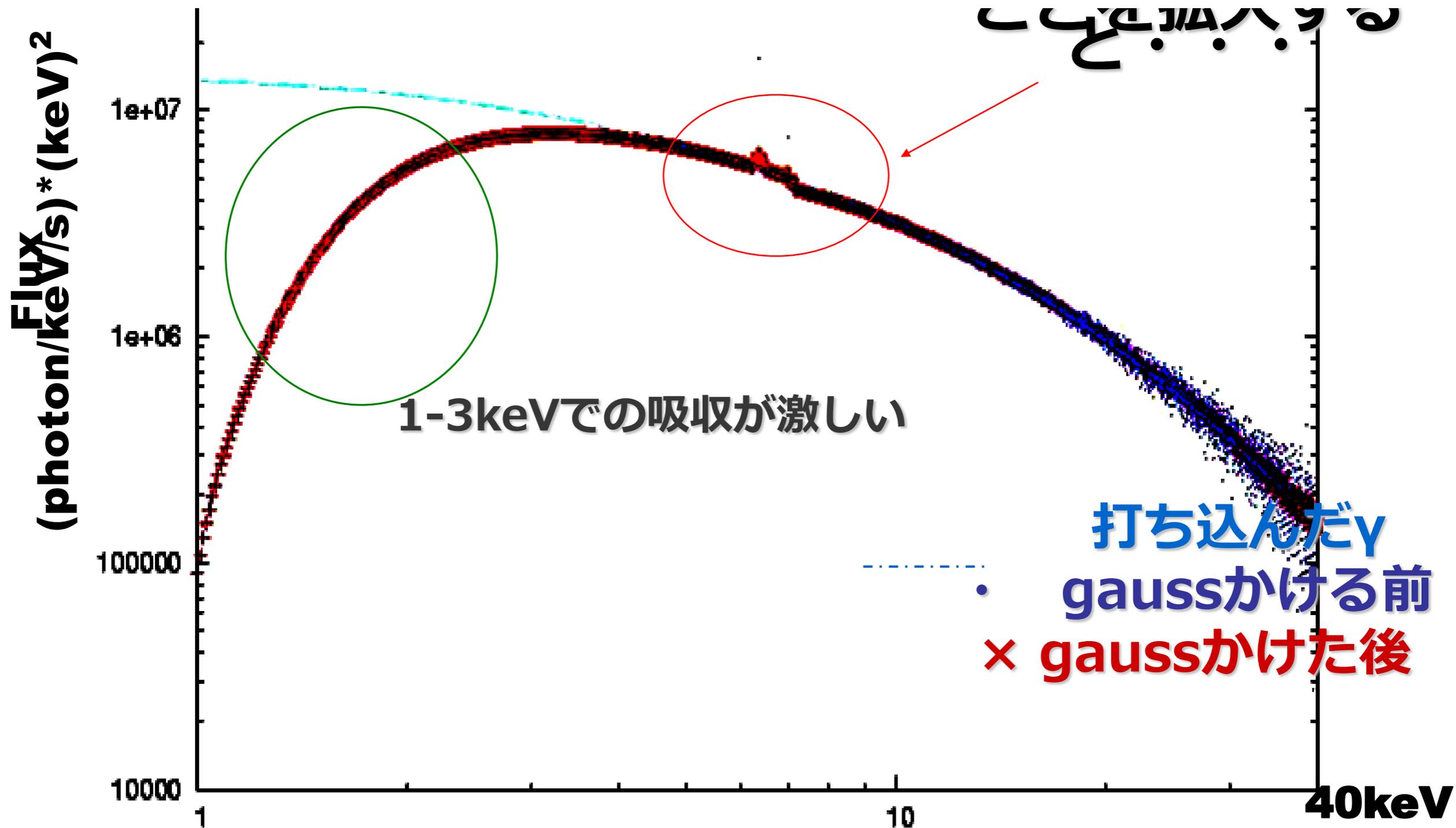


重ね合わせる

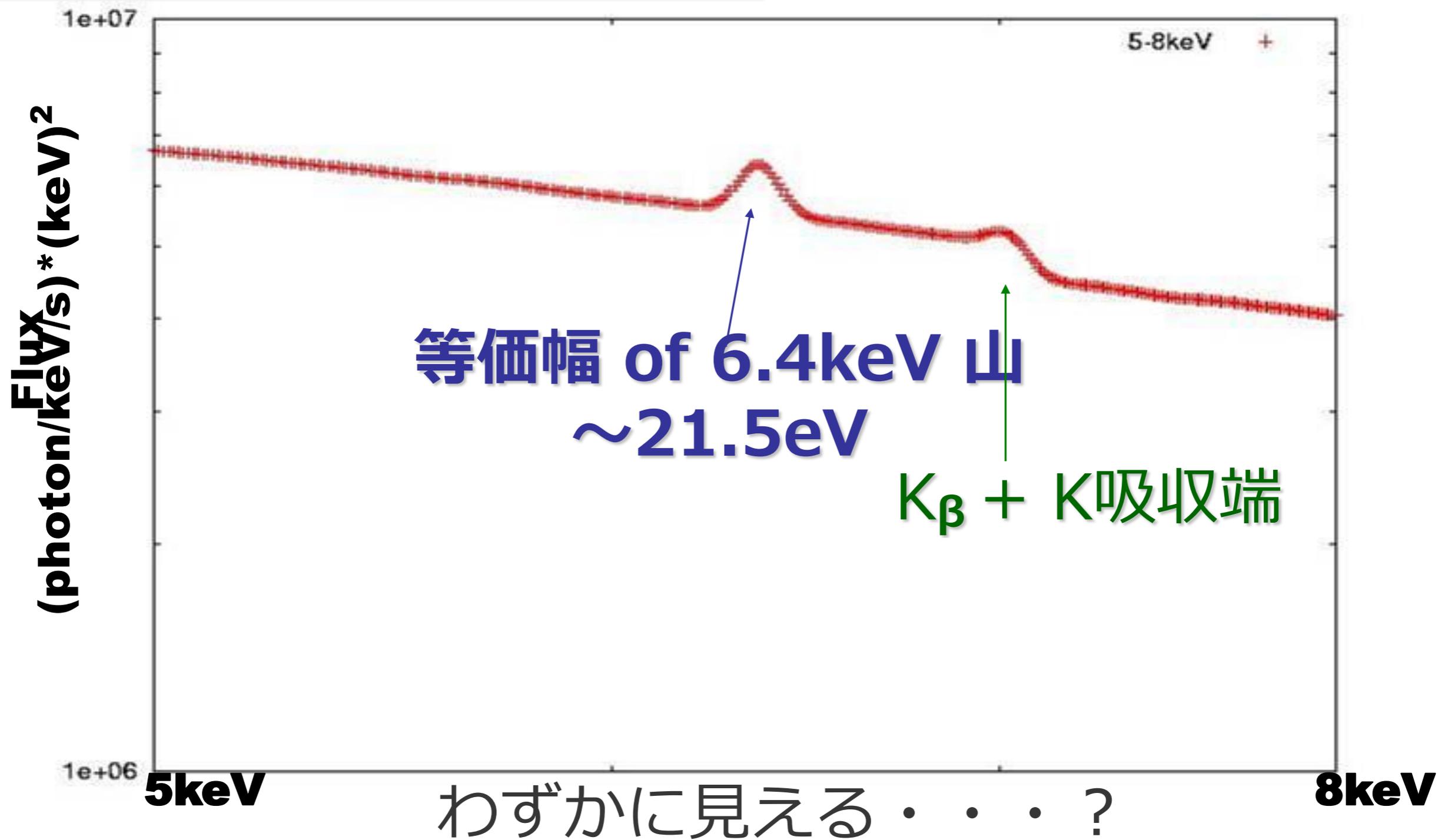


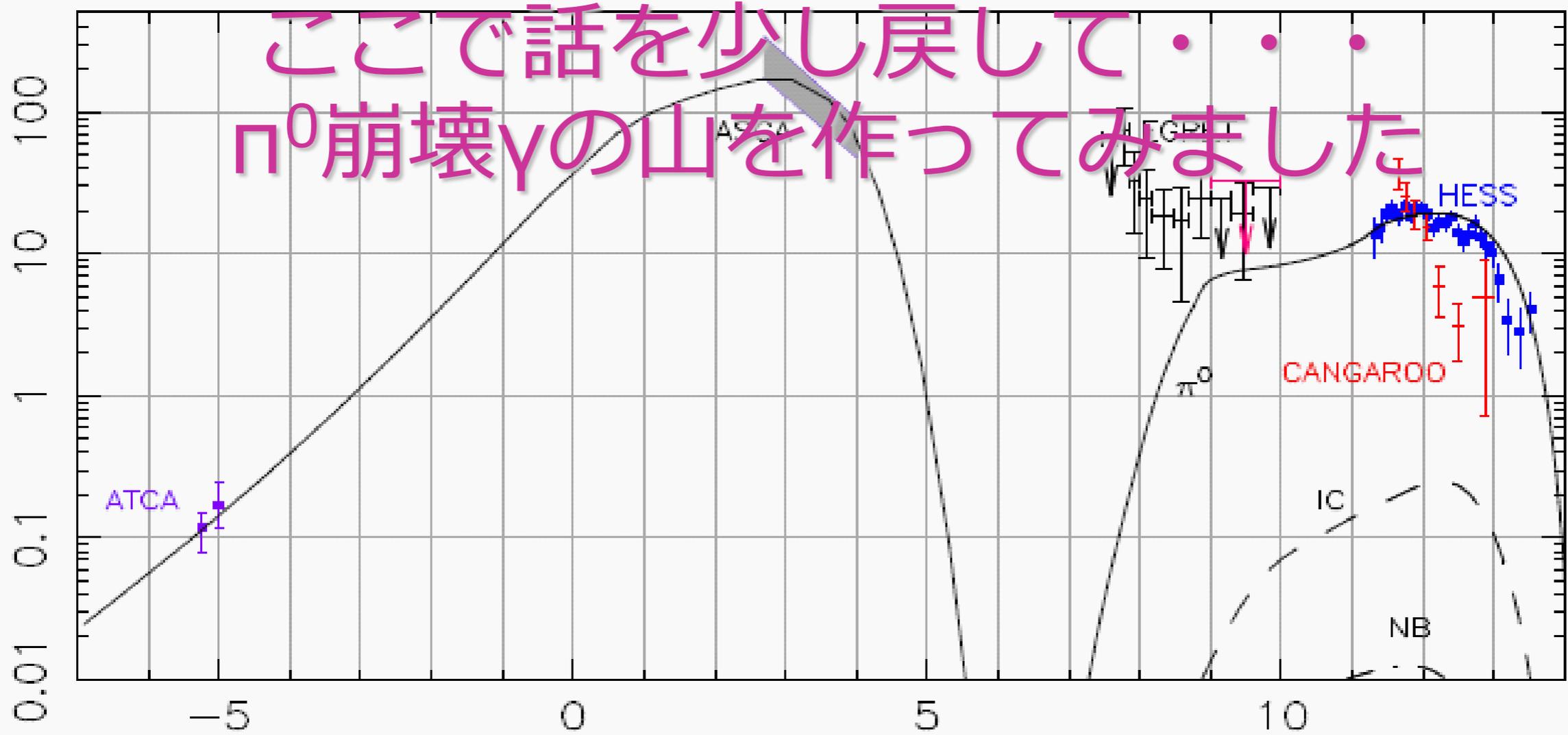
Gaussianをかけ

すざく る のXISは分解能が $\sim 130\text{eV}$
(FWHM)

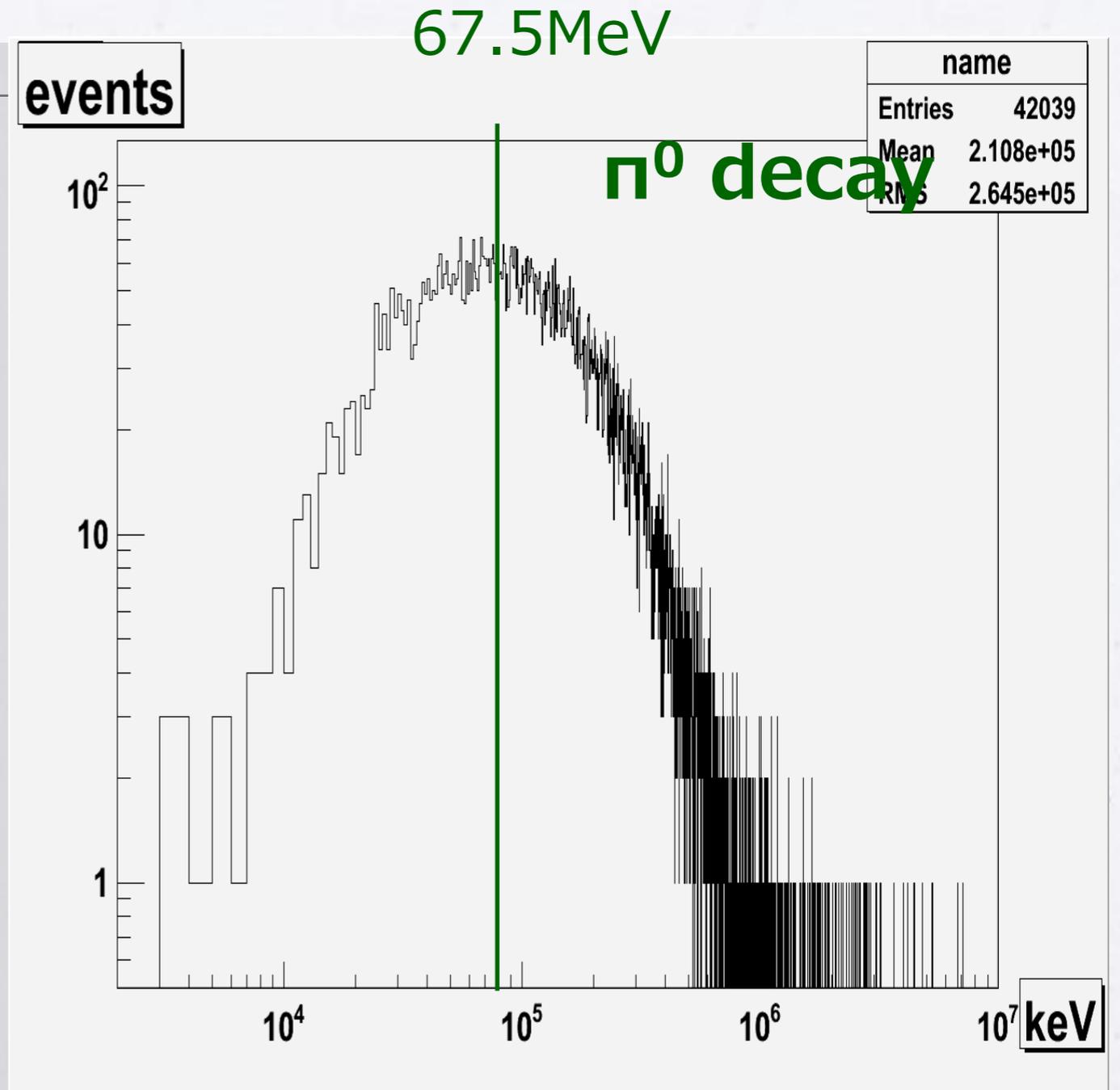
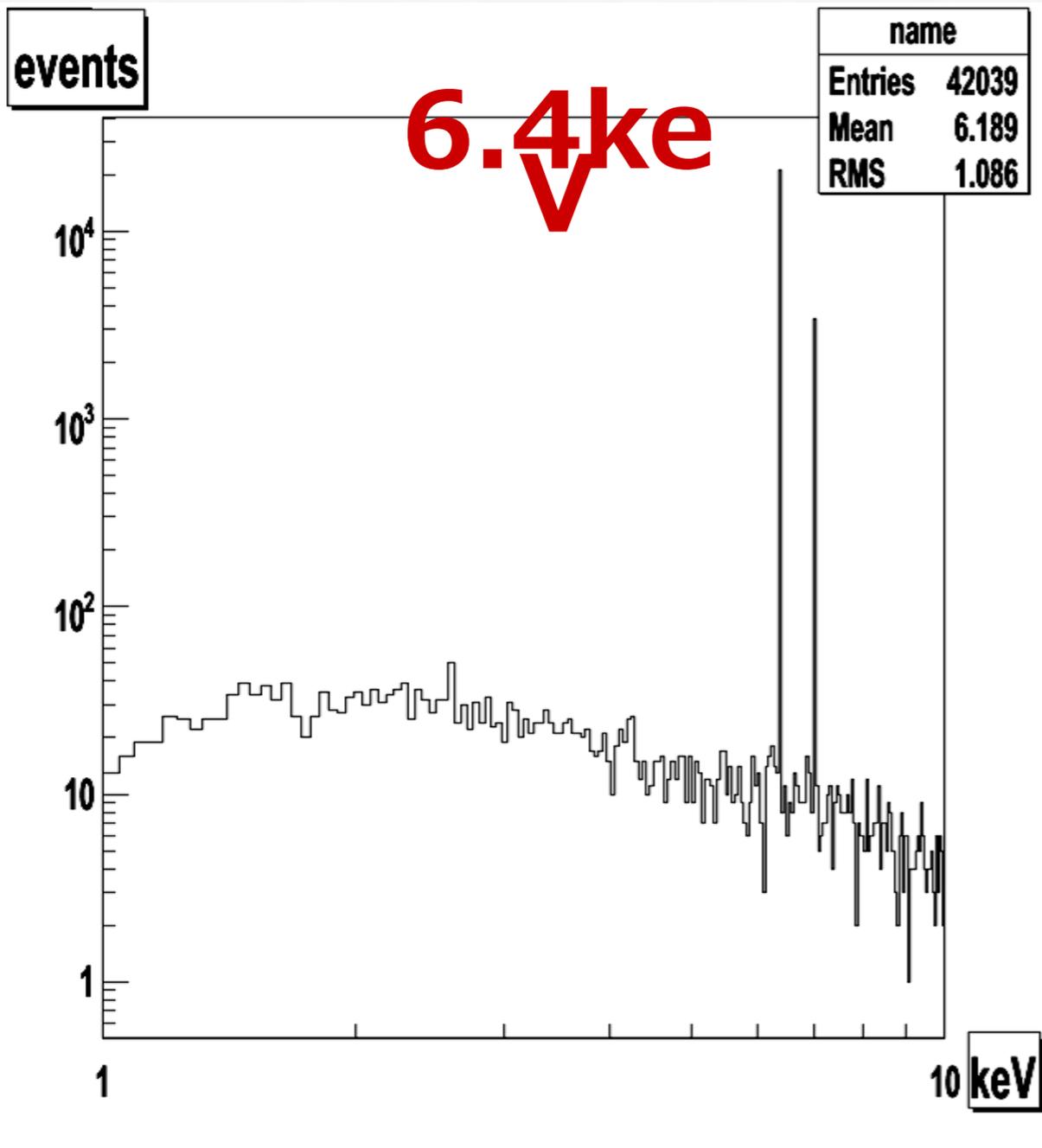


5-8keVの拡大図





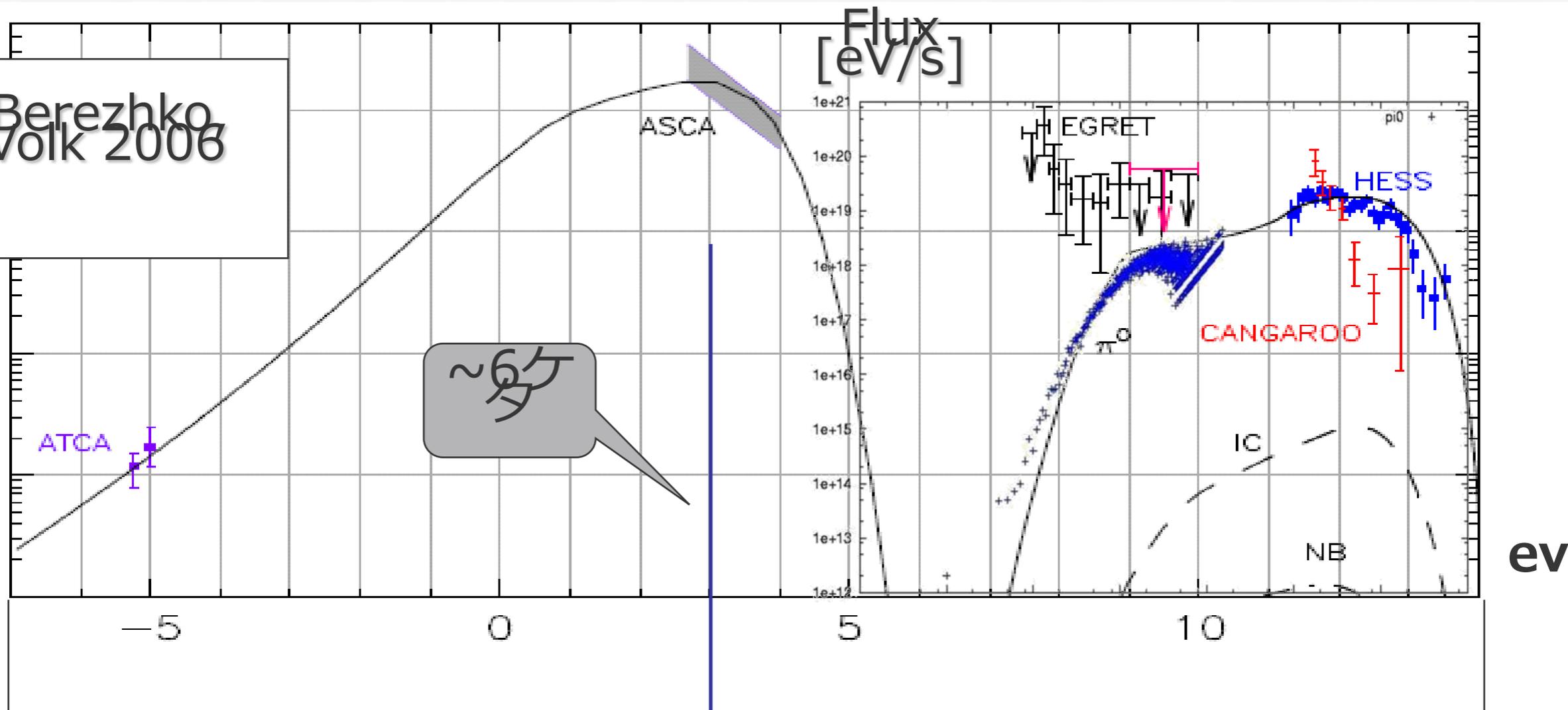
目的 **実際の図を利用して、陽子**
由来の6.4keV Fluxがどの程度を
もつ もう一度別の視点から評価する。



21261 events @ 6.4keV
 → p origin, 6.4 keV Fluxは
 8.7×10^{11} [eV/s]

Event数は π^0 の静止エネルギーの約半分までピークフラックスの図を作る

F. G. Berezhko
H. J. Volk 2006



π^0 崩壊 γ の肩は
 $\sim 10^{18}$ [eV/s]。
→ p origin
6.4keV Flux と約
6ケタの差がある。

p origin 6.4keV
Flux

p由来 6.4keV はやはりシンクロ
トロン山に完全に埋もれてしま
う。

☆全体のまとめ☆

- p,e-（二次的なものも含む）の衝突電離による6.4keVは無視できる程度である。
- 連続成分X線の、主に光電効果による6.4keV輝線はわざわざ見える。
- しかし、「もし今回想定したような分子雲を通過したら」1-3keVでの吸収が著しいスペクトルが輝線と同時に観測されるはずである。

PART3

宇宙線による観測器のBackGroundの シミュレーション

内容

- 1.シミュレーションの背景
- 2.シミュレーションの目標
- 3.シミュレーションモデルの構築
- 4.シミュレーションの手順
- 5.シミュレーションの結果と分析

その一

宇宙空間の人工衛星は常に宇宙線を浴びている。

宇宙線とは、高いエネルギーを持つ

- * 光子(Photon)
- * 電子(Electron)
- * 陽子(Proton)

など。



- 宇宙空間の人工衛星は常に宇宙線を浴びているので、衛星搭載の観測器は宇宙線による放射損傷を受ける。
- また、宇宙線が直接あるいは間接的に検出器によって観測されてしまうことがBackGroundの原因になっている。

その二

観測スペクトル全体

Target天体の情報 (貴重なデータ)

宇宙線BackGround (ノイズ)

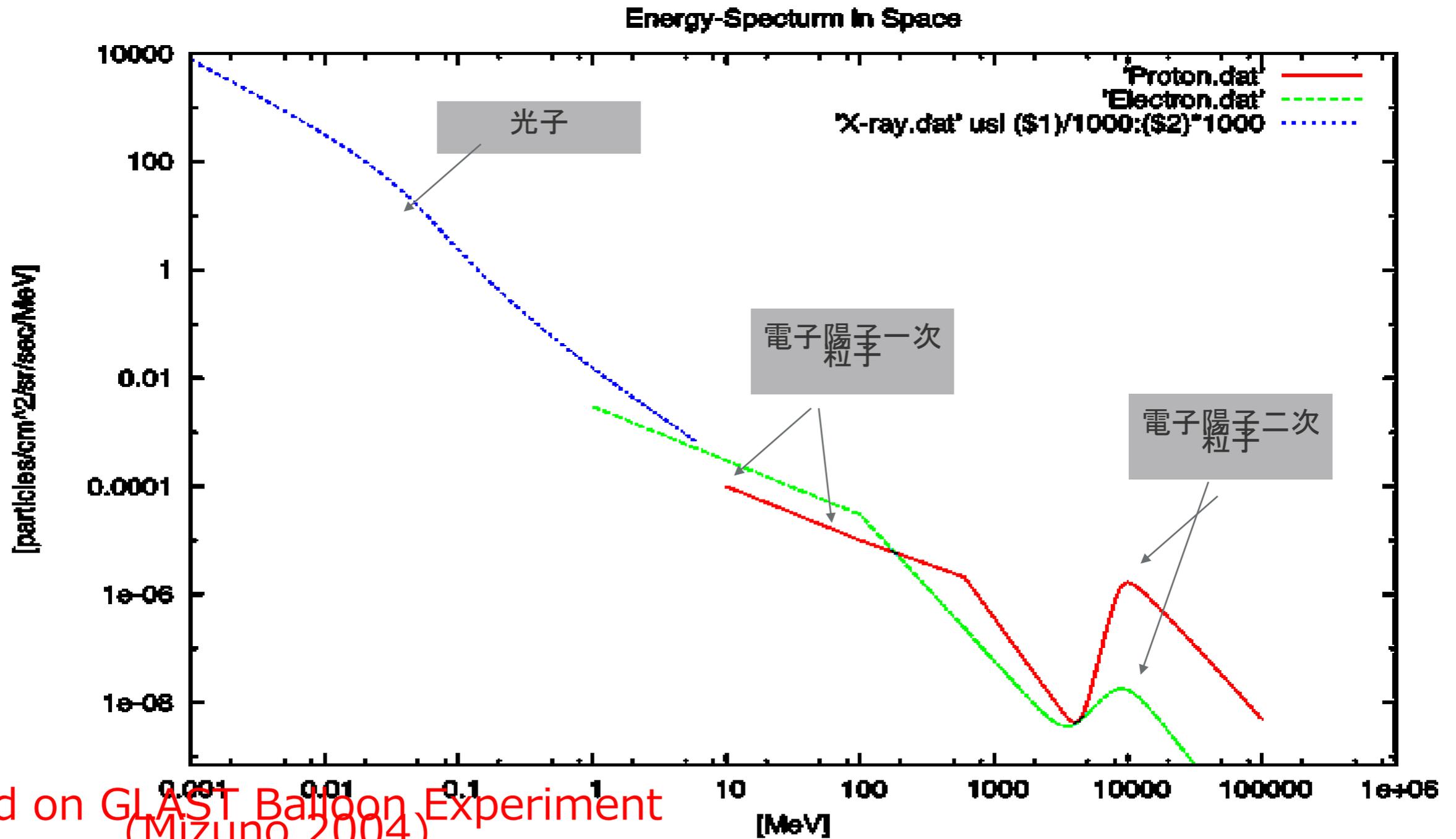
BGの影響を取り除くには、

1. ~~宇宙線BGを細かく再現し、観測スペクトルを再現したBGで処理する方法。~~ (Anada.2005)
2. ~~検出器の周囲をシールドし、宇宙線BGを直接減らす方法。~~ (今回のテーマ)

シミュレーションの目標

- ★ 現役のX線天文衛星SUZAKUをモデルとして、次期X線天文衛星を想定し、そのXIS検出器と宇宙線の相互作用をGeant4でシミュレートし、BGを大域的に再現する。
- ★ いくつかのシールドに変えながらシミュレーションを繰り返し、各々の宇宙線が作るBGの性質を調べ、結果をまとめる。

太陽光を除くために、夜の地球を想定し、地表から600kmの宇宙空間では

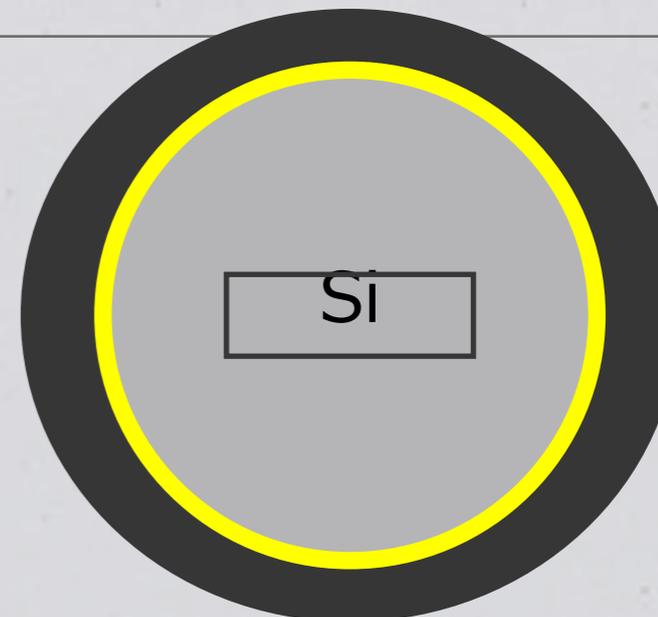


Based on GLAST Balloon Experiment
(Mizuno.2004)

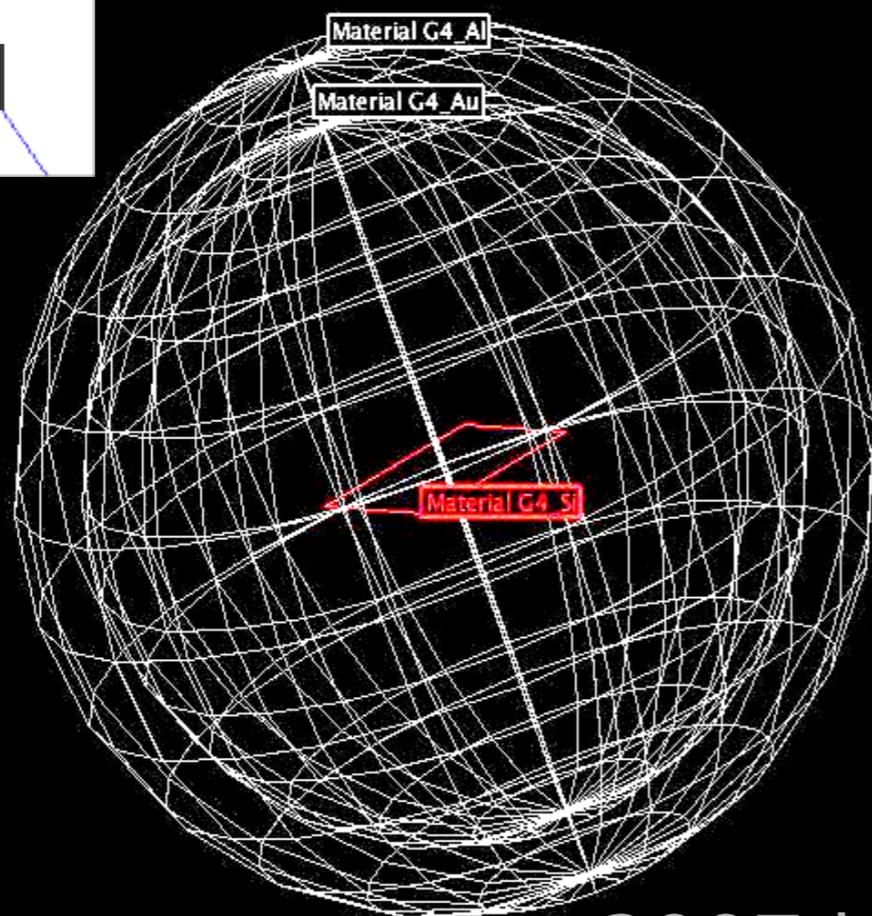
シミュレーション モデルの構築

検出器環境の再現

XISを想定して検出器
モデルを単純化した



2005by穴田



2007 by p6

* CCDカメラ

100mm×100mm (面積)
×100μm (空乏層の厚み)

シリコン板

* 周りの機材 :

球殻シールド

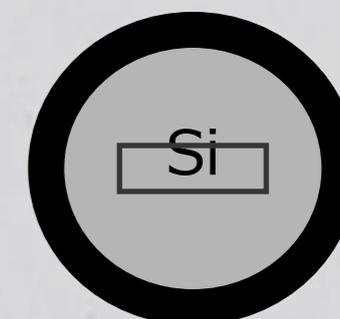
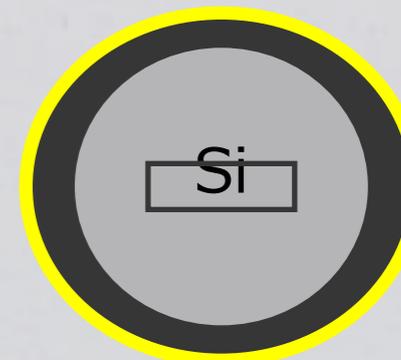
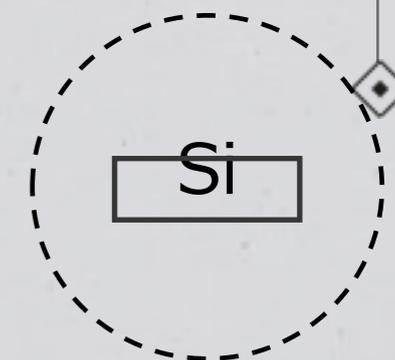
(物質層の厚さ~10g/cm²)

の金属

シミュレーション モデルの構築

検出器シールドのTYPE

	外殻物質	内殻物質	物質厚さ
TYPE0 視野方向 を想定	なし	なし	0
TYPE1 XISを想定	Al37mm	Au0.5 μ m	10g/cm ²
TYPE2 お試し	Au0.5 μ m	Al37mm	10g/cm ²
TYPE3 おまけ	Pb37mm	なし	42g/cm ²

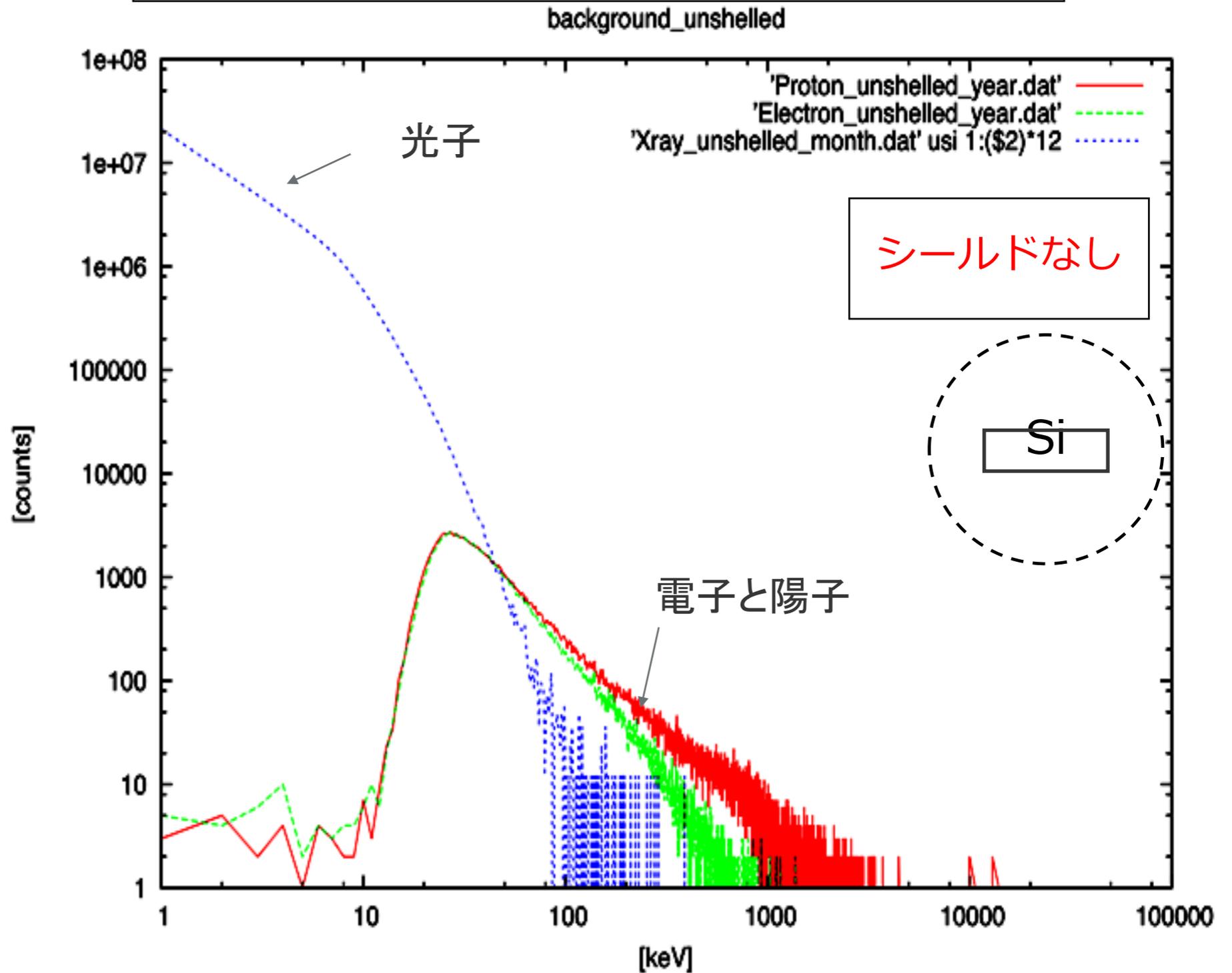


シミュレーションの手順

- 1) 打ち込む粒子の種類（光子、電子、光子）と観測時間（粒子数）を決める。
- 2) Geant4シミュレーション開始。
- 3) 作ったエネルギースペクトルから粒子の運動エネルギーとCount数を読み取る。
- 4) 天球（ 4π ）からランダムに選んだ点を発射位置として、中心のSi板に向かって粒子を打ち込む。
- 5) Si板が吸収したエネルギーを外部Data-fileに書き出す。
- 6) Geant4シミュレーション終了。
- 7) 最後は、Date-fileを処理し、スペクトルとしてグラフ化する。

シミュレーション の結果と分析

全体のBG (TYPE0で一年間分)



- **光子:**
1~100keVに渡ってcount数が減少する。
- **電子:**
10~1000keVに渡って、山を作った。
- **陽子:**
10~1000keVに渡って、電子より緩やかな山を作った。

シミュレーション の結果と分析

解釈の準備

荷電粒子の阻止能 Stopping Power
荷電粒子は電離損失が主要反応である

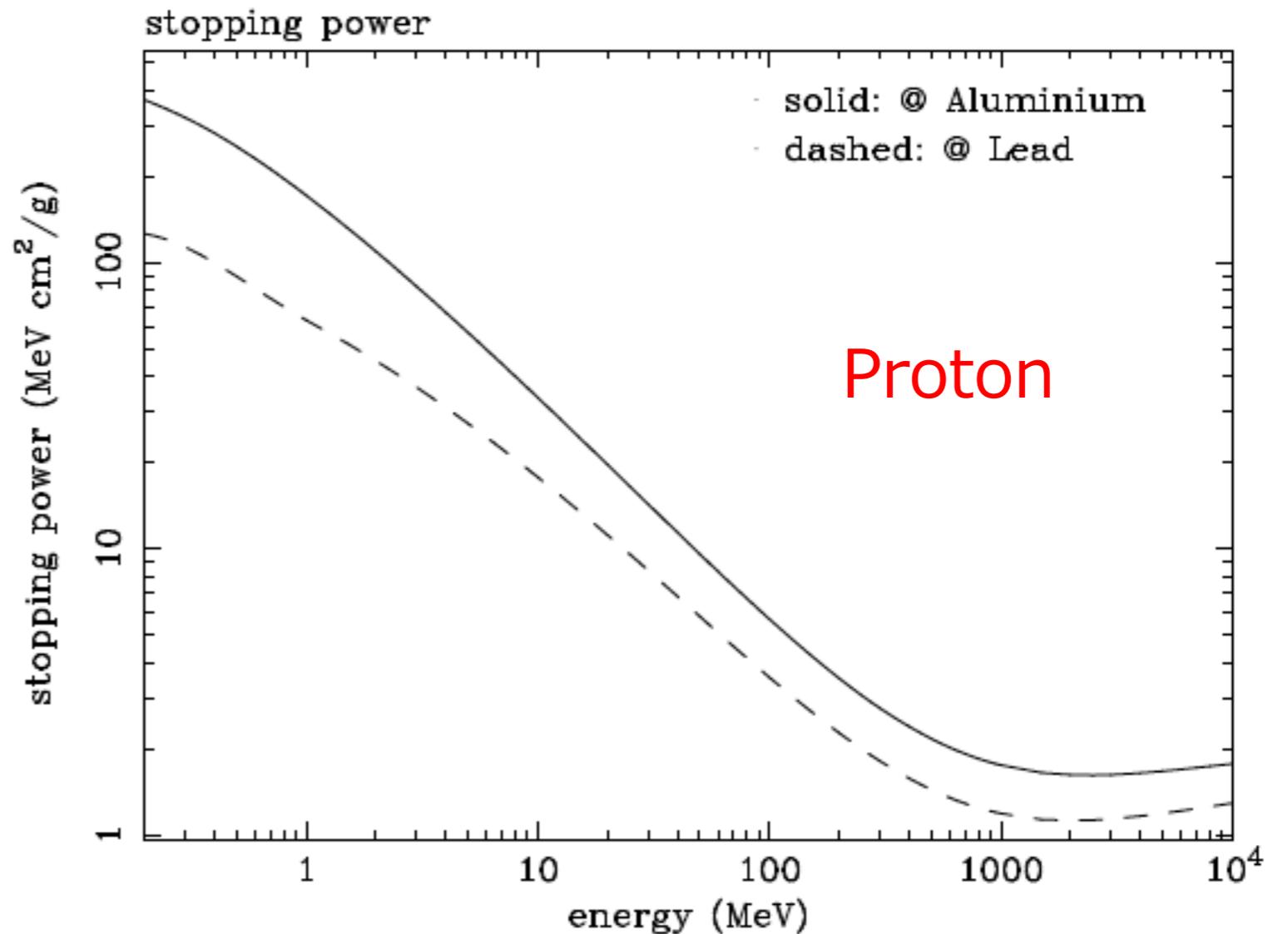
電離損失による

単位物質長 [g/cm²] あたり
エネルギー損失 dE/dx
は

Betheの式で与えられる。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_e v^2} N B$$

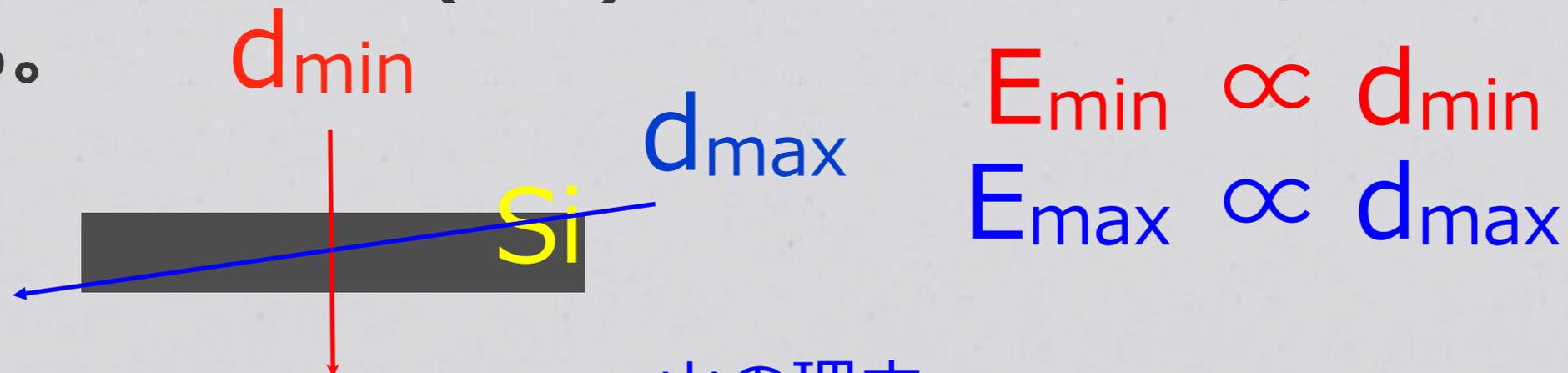
$$B \equiv Z \left[\ln \left(\frac{2m_e v^2}{I} \right) - \ln (1 - \beta^2) - \beta^2 - \frac{C}{Z} - \frac{1}{2} \delta \right]$$



高エネルギー荷電粒子がSi板に落とすエネルギーは

吸収エネルギー $\Delta E = (\text{阻止能 } dE/dx) \times (\text{有感部の中で通過した距離 } d)$

高エネルギー粒子($v \sim c$)に対して、**阻止能 dE/dx がほぼ一定**になる。



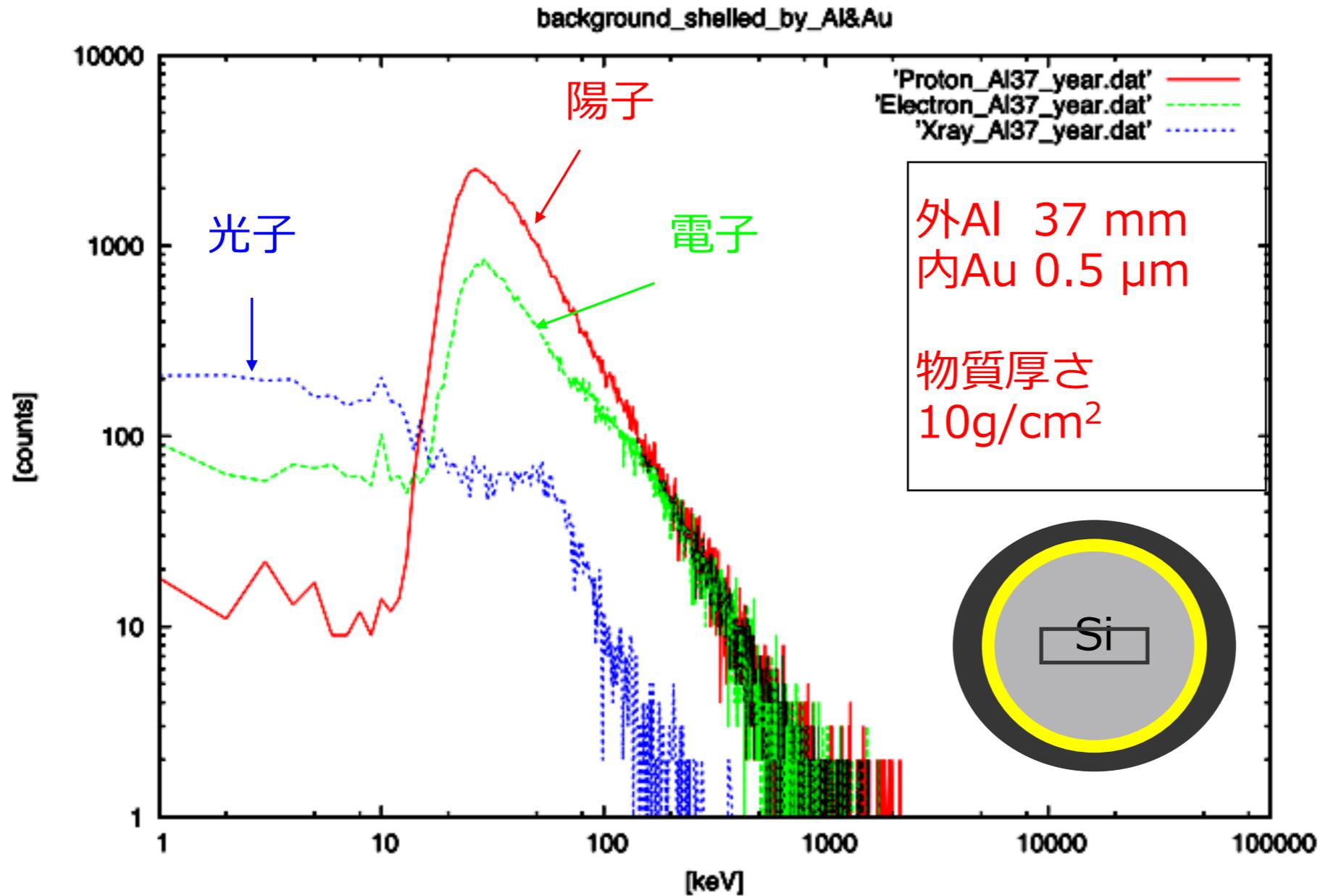
山の理由:

- スペクトルには最大と最小吸収端がある。
- 幾何的な理由から、その間にはPEAKが現れる。
- PEAKは $2\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$ から 40keV 程度である。

シミュレーション の結果と分析

全体のBG (シールドTPYE1で一年間分)

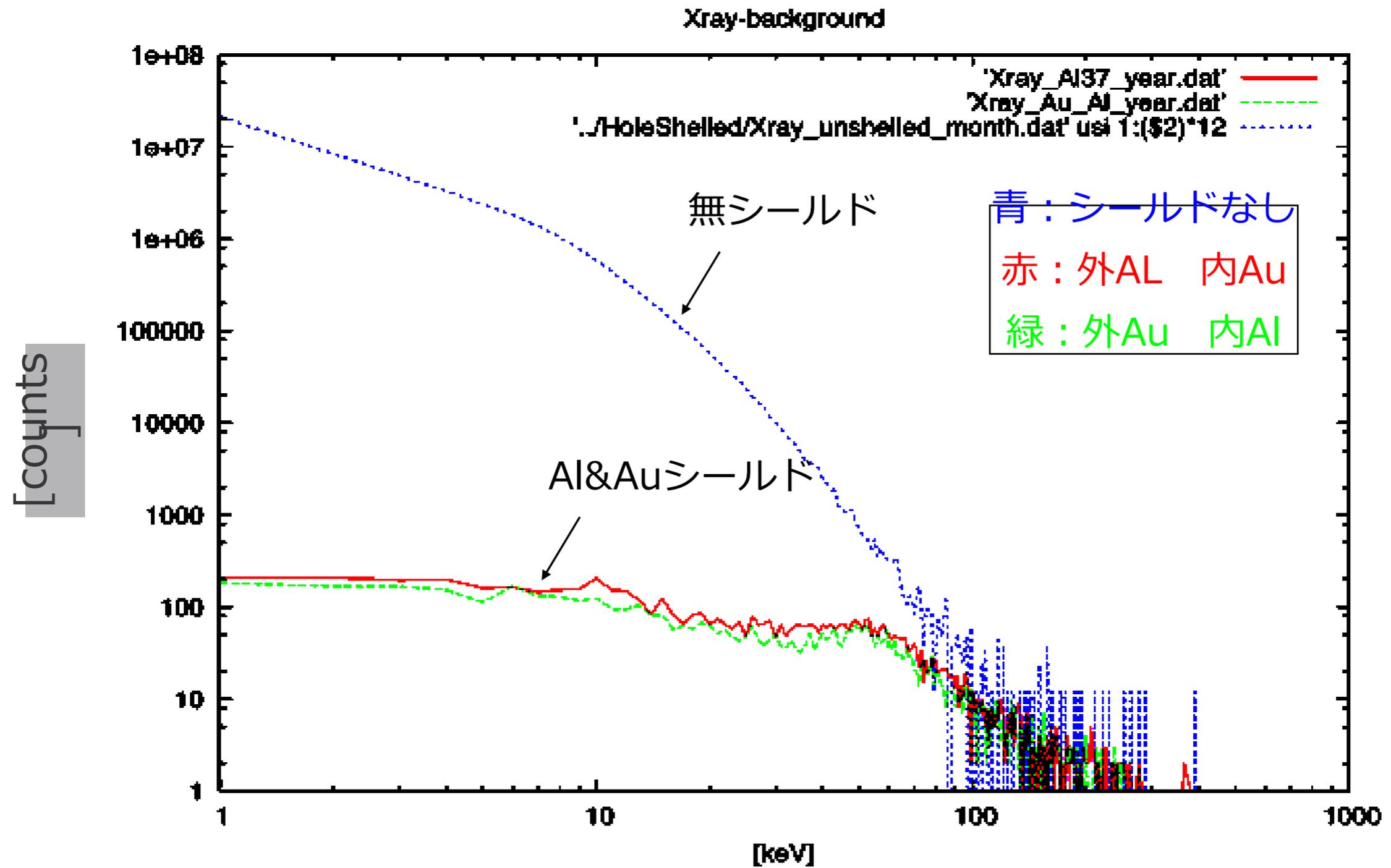
SUZAKUのXISモデル



●20keV以下で
は光子と電子
が作るBGが主
要

●20keV以上で
は陽子と電子
が作るBGが主
要

光子の各シールドTYPEの比較

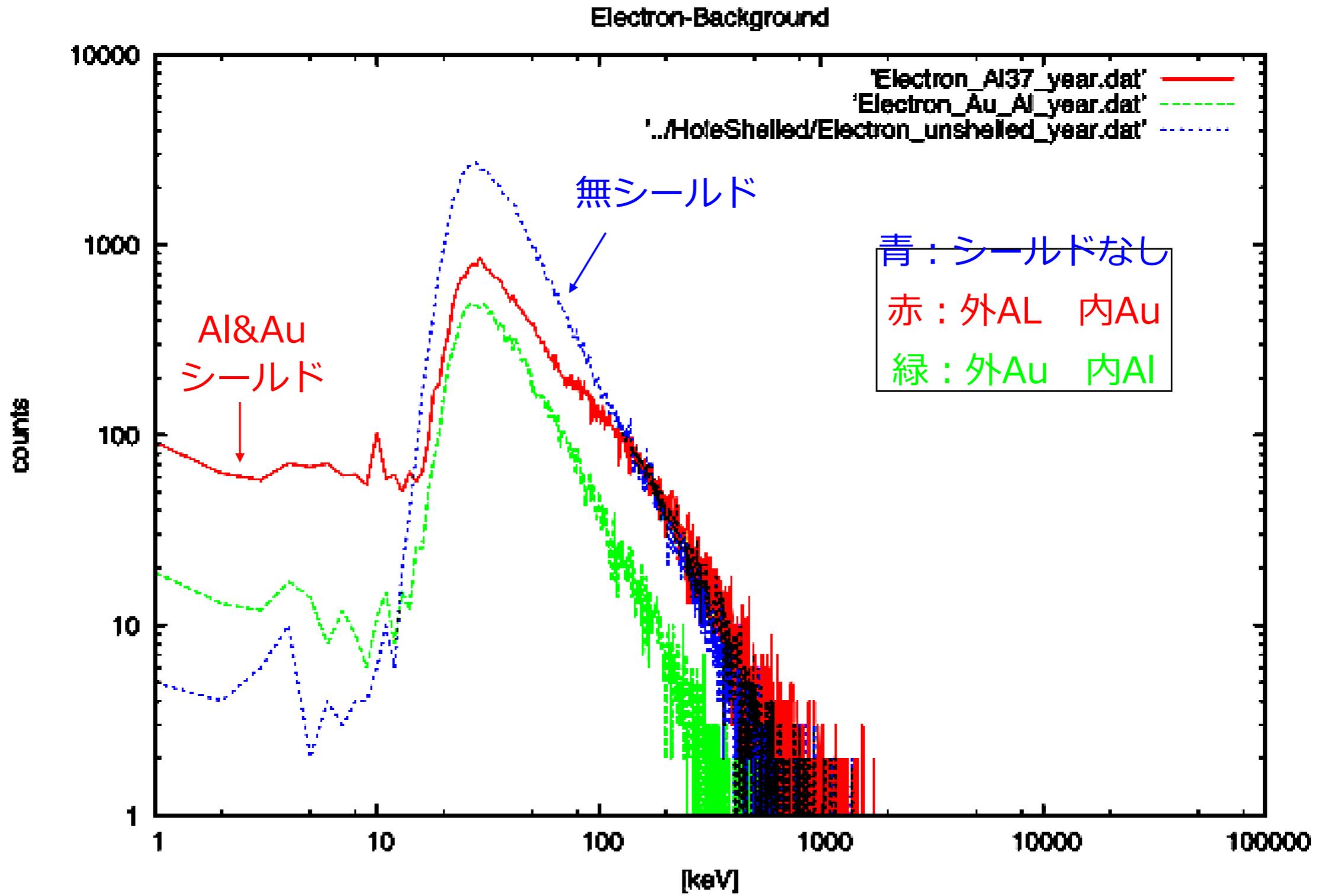


- * シールドAlとAuの影響で、光電吸収やCompton散乱で入射光子が吸収／散乱され、**無シールドの時と比べて全体的BGが4～5桁減少**した
- * シールドの構成（TYPE1とTYPE2）は、BGに殆ど影響がなかった
- * [**particles/cm²/sr/sec/keV**]単位に換算すると、**10の-5乗**というオーダーになる。

BG低減の一般対策

当たり前のことであるが、光電吸収とCompton散乱が主要反応なので、より原子番号Zの大きいシールドを使うのが効果的であろう。

電子の各シールドTYPEの比較

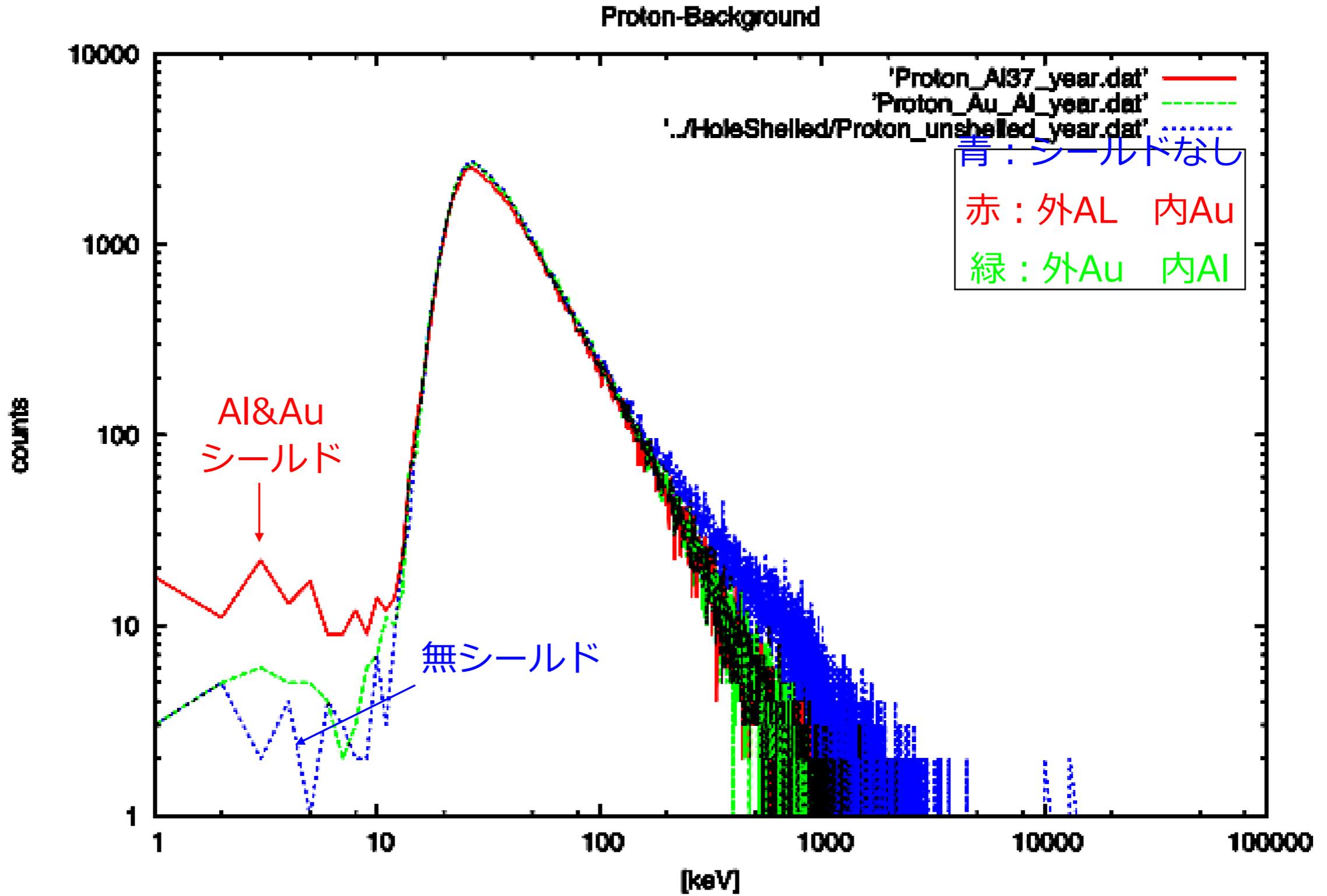


- * シールドの影響で、20keV以上のBGが少し減少したが、20keV以下ではBGが劇的に増加した。これは、宇宙線電子とシールドの相互作用で作られた多数の二次粒子に由来するものと考えられる。
- * シールドの構成（TYPE1とTYPE2）に依存性があった。外Au内Alは外Al内AuよりBGが少ない。
- * [particles/cm²/sr/sec/keV]単位に換算すると、20keV以下では~10の-5乗、20keV以上では10の-4乗というオーダーになる。

BG低減の一般対策

- 電離損出 (Z) と制動放射(Z²)が主要反応なので、原子番号Zの大きいものが必要であろう。
- 原子番号大のものを外に、原子番号小のものを内にしたシールドの方がBGがやや少ない。

陽子の各シールドTYPEの比較



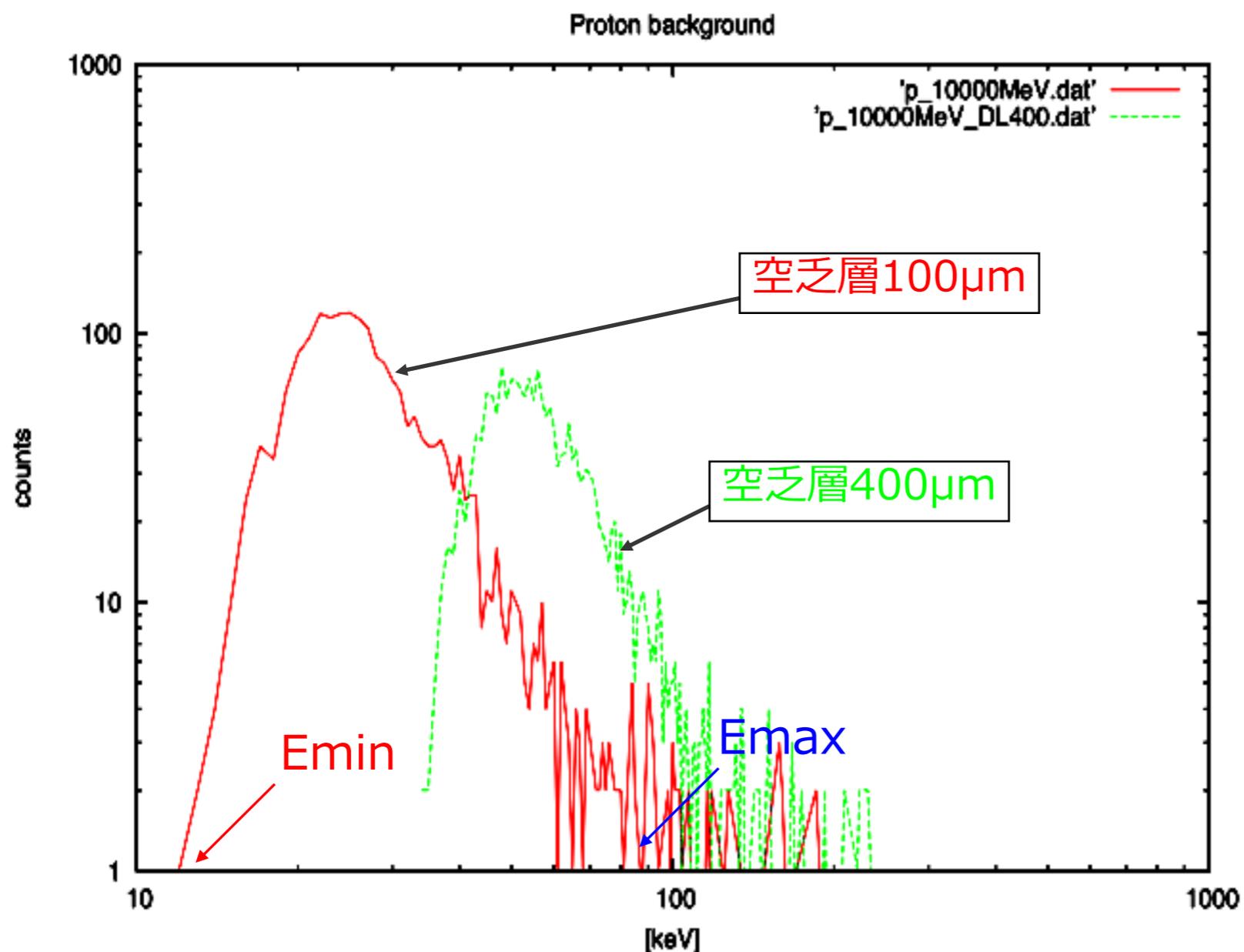
- * シールドの影響を全く受けず、高エネルギー陽子のBGは殆ど変わらない（多少エネルギーを失うのも進路を変えずに貫通した）。
- * 逆に、シールドによる二次粒子のせいで、20keV以下のBGが一桁増えた。シールドがない方がよいではないか!?
- * しかし、シールドの構成を変えることで（Auを外に置く）、20keV以下のBGを無シールドのときと同じレベルに押さえることが出来る。

BG低減の難点

- 20keV以上のBG山は、普通のシールド（AL、Au、Pbにも！）影響されない。
- 磁場シールドにしても、高エネルギー陽子(1000MeV)のため、ラモニア半径を小さく(1cm)するにはかなり強い磁場(1000G)はをかけざるを得ない。

陽子対策

ここで、考え方を変えて、BGを減らすのではなく、
山を観測範囲[1~100keV]から移動させる方法を試した。



$$E_{min} \sim dE/dx \times d_{min}$$

$$E_{max} \sim dE/dx \times d_{max}$$

空乏層を厚くすれば、

E_{min} と E_{max} は大きくなり、

BG山は右（エネルギー高い方）へ移動する。

全体	20keV以下では、光子が主要なBGを作る。 20keV以上では、陽子が山型のBGを作る。 電子によるBGはそれぞれの半分程度だった。
光子	金属シールドは有効であった。 現在XISのシールド (10g/cm²) は無シールド時と比べて、BGを5桁減少させた。
電子	20keV以上では、BGの山をやや (一割程度) 押さえたが、20keV以下では、シールドによる二次粒子でBGが逆に増えた。Auを外に置くことで多少改善される。
陽子	金属シールドは殆ど無効果でした。逆に、20keV以下のBGが増えた。 20keV以上のBG山はかなり堅い、普通のシールドではBG低減が無理。 BGの山を空乏層を厚くすることで移動させることが可能。