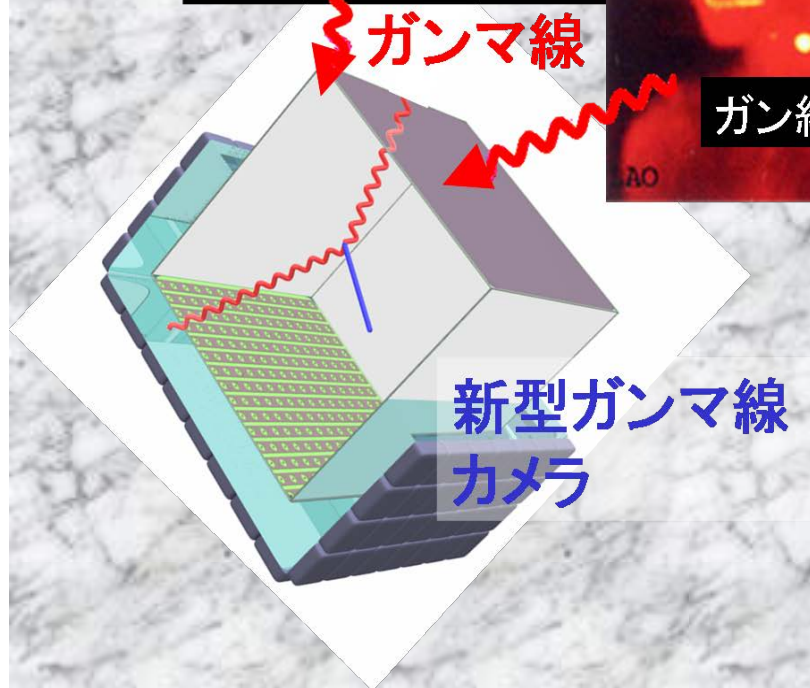
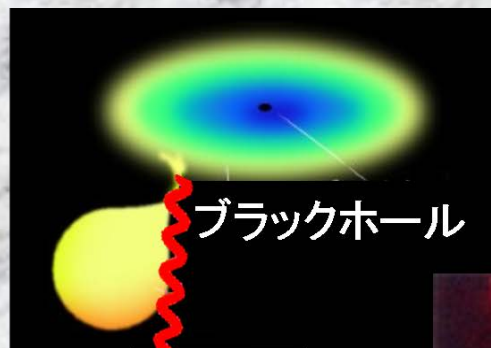


# 見えない世界をガンマ線で見ると (ブラックホールからがん細胞まで)

1. 光(電磁波)で見るとは？
2. ガンマ線とは？
3. ガンマ線で見ると高エネルギー宇宙
4. 京大オリジナル新型ガンマ線カメラ
5. ガンマ線でがん細胞を探す！



京都大学理学研究科  
物理第二 谷森 達

2005年11月20日@21COE市民講座

# 光と波

電磁波 = 磁場と電場の波

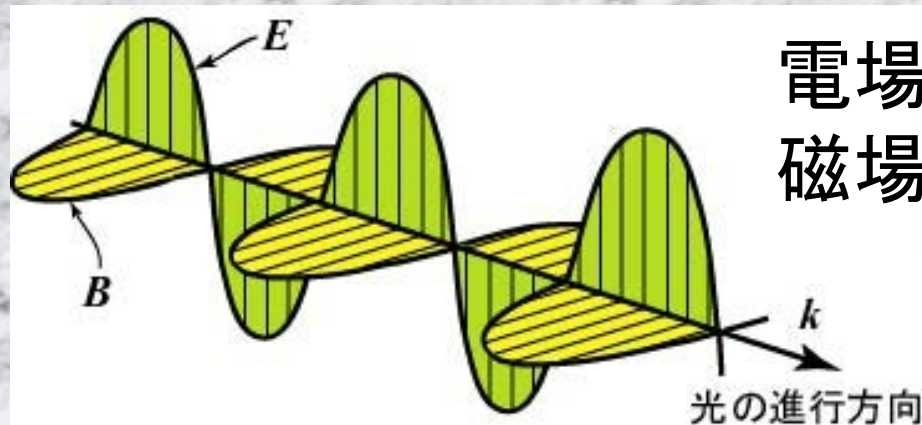
電波、赤外線、光、紫外線、X線、ガンマ線

速度 = すべて光速  $C = \text{毎秒}30\text{万キロ}$

違い; 波長  $\lambda$  (振動数  $\nu$ )  $\nu = C / \lambda$

エネルギー  $E = h\nu = h(C / \lambda)$

$h$ : プランク定数



電場  $E_x(z, t) = E_0 \sin(\omega t - kz),$

磁場  $B_y(z, t) = \left(\frac{E_0}{v}\right) \sin(\omega t - kz)$

# 電磁波の範囲

エネルギー

keV ( $10^3 \text{eV}$ )   MeV ( $10^6$ )   GeV ( $10^9$ )   TeV ( $10^{12}$ )

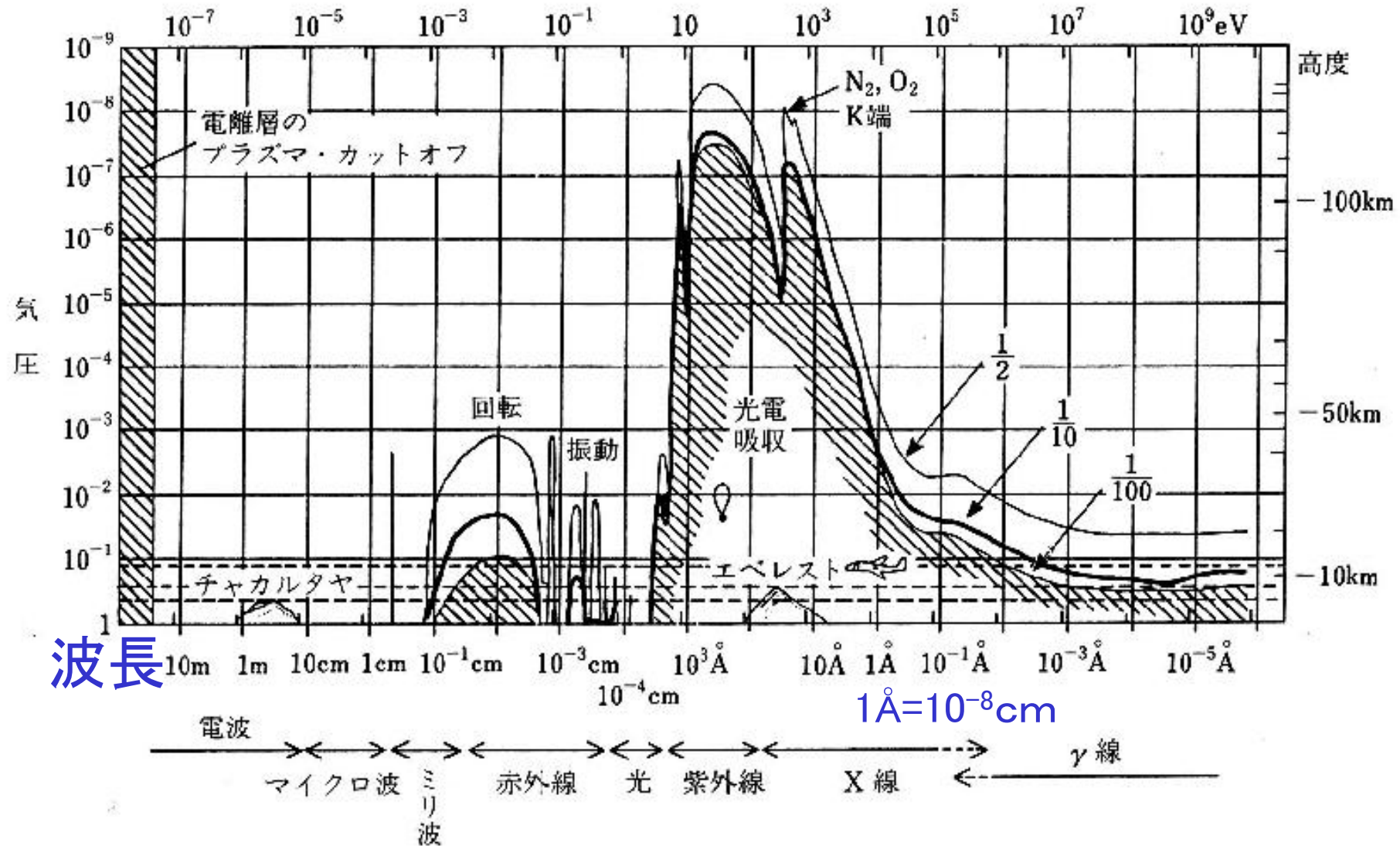
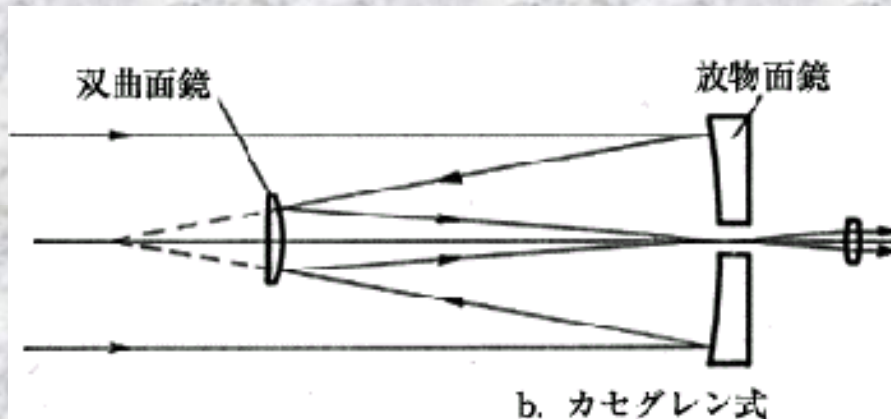


図 2 いろいろな電磁波が地球大気で吸収される様子。

# 波とイメージ

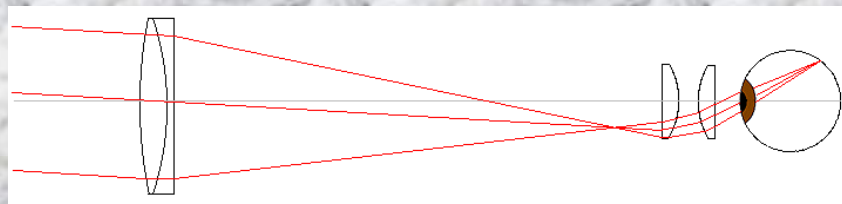
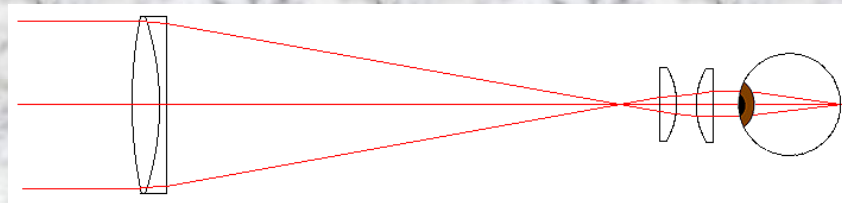
- 電磁波、電波～X線、波として振舞う、  
**屈折OK** 光学がOK

**反射、**

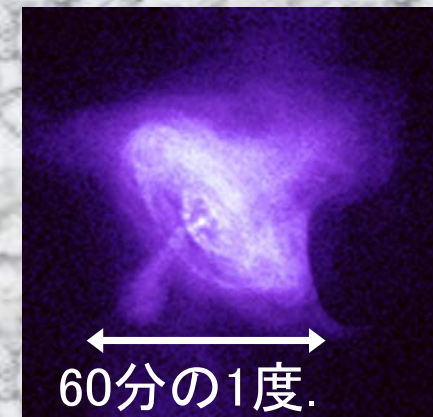


反射

**反射、屈折で  
光の方向が位置  
に変換**



屈折

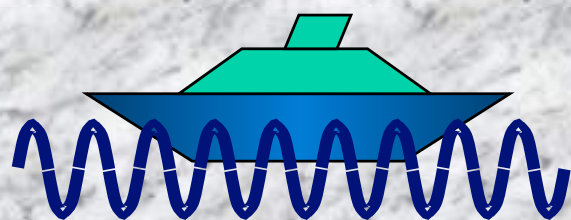


かにパルサーX線画像

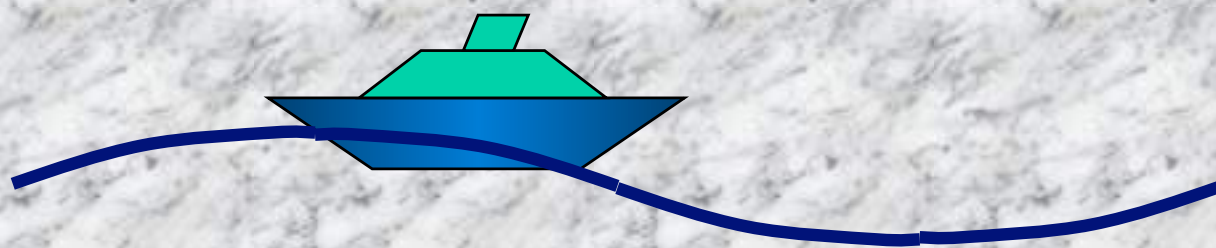
## 波の散乱(波の透過性)

- 波の散乱、
- 波の方向、エネルギーが変化する。

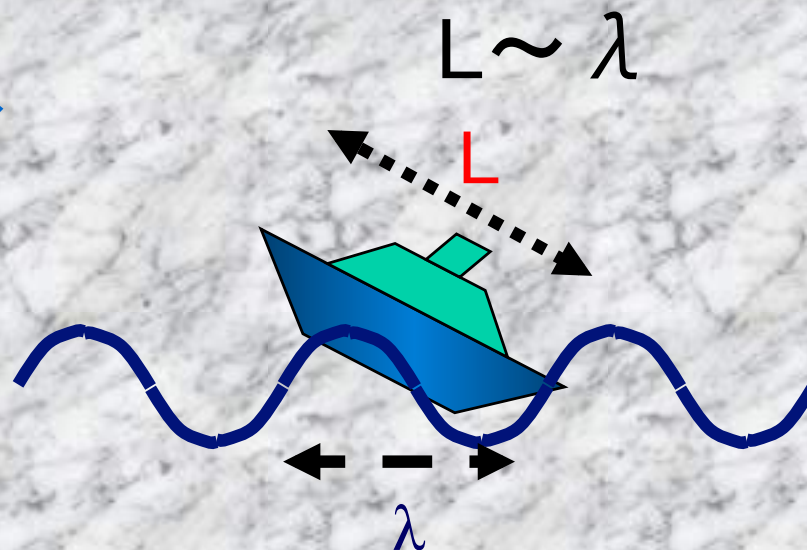
**L**: 物質(物体ではない!)の大きさ、結晶構造など



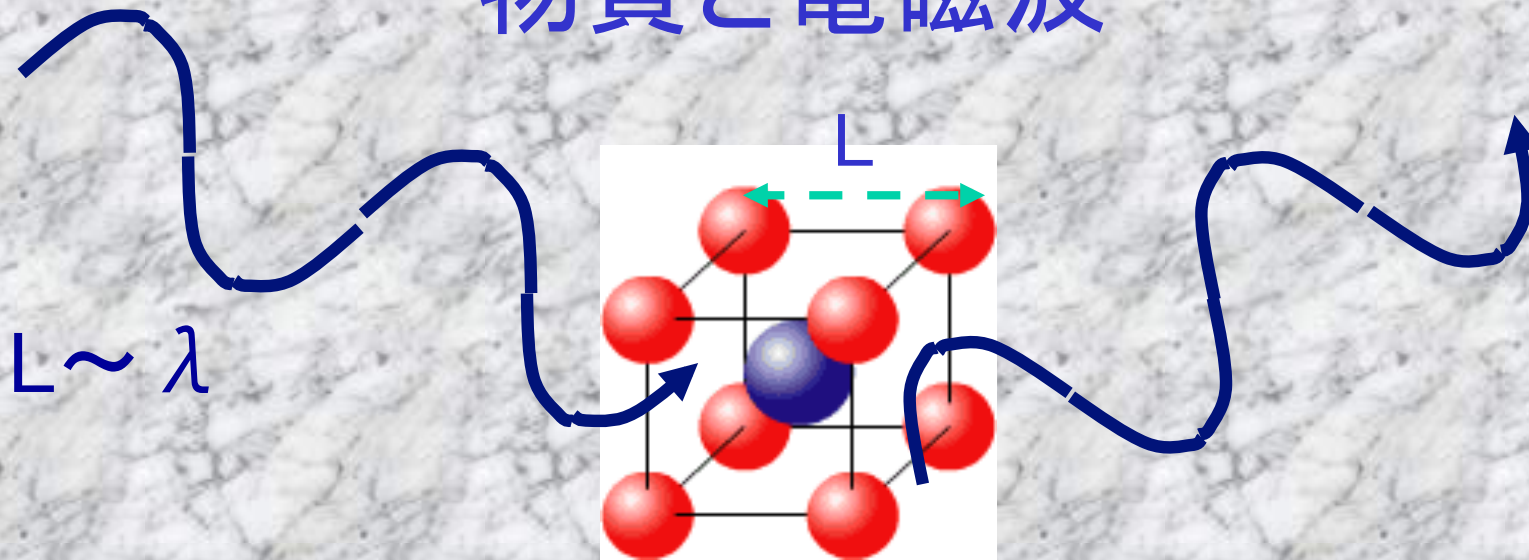
$$L \gg \lambda$$



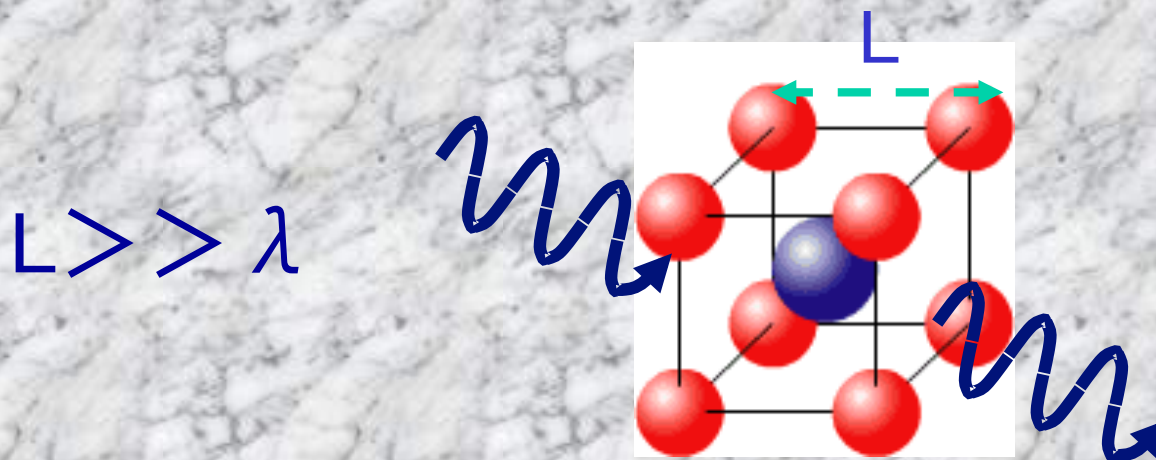
$$L \ll \lambda$$



# 物質と電磁波

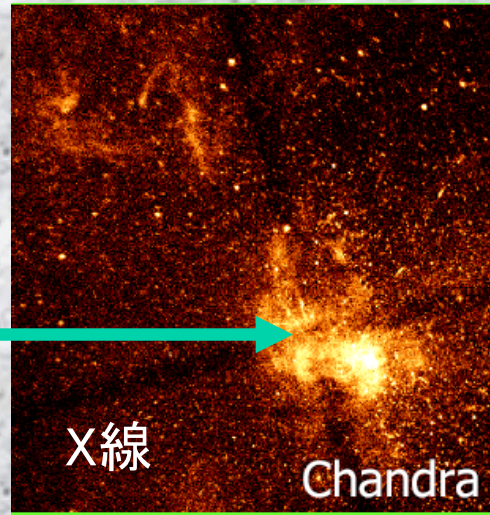


- 物質での反射・屈折(光、紫外線、低エネルギーX線、)



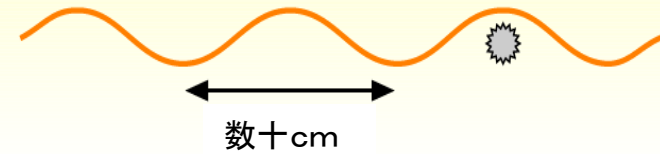
透過 (高エネルギーX線とガンマ線) 波から粒子へ!

# 宇宙は透明？

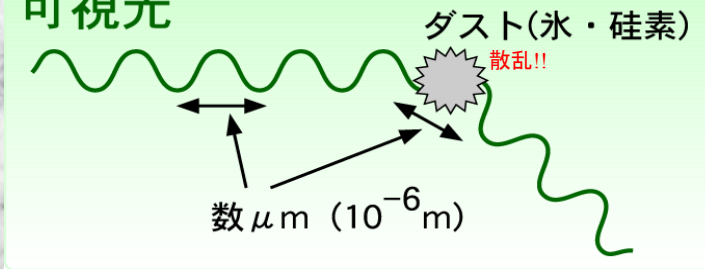


宇宙は光には意外と不透明！  
銀河空間内ダスト。

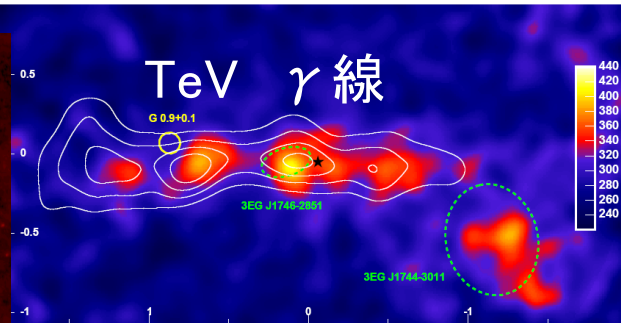
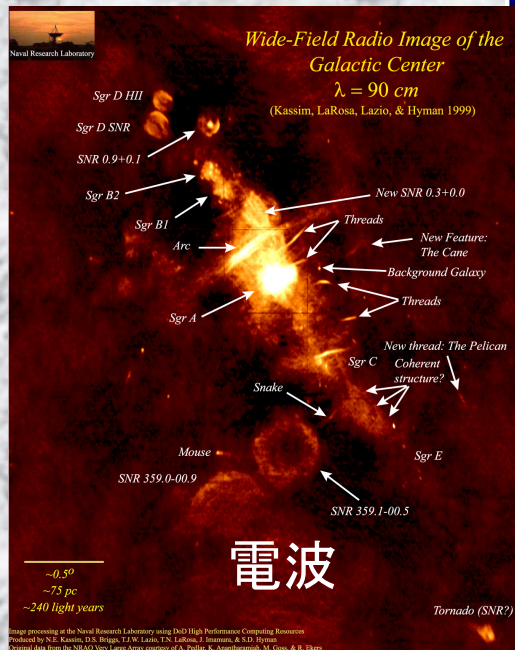
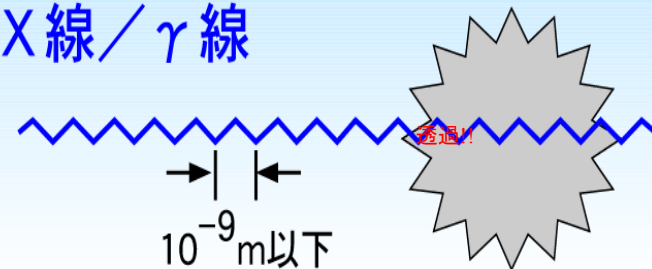
電波



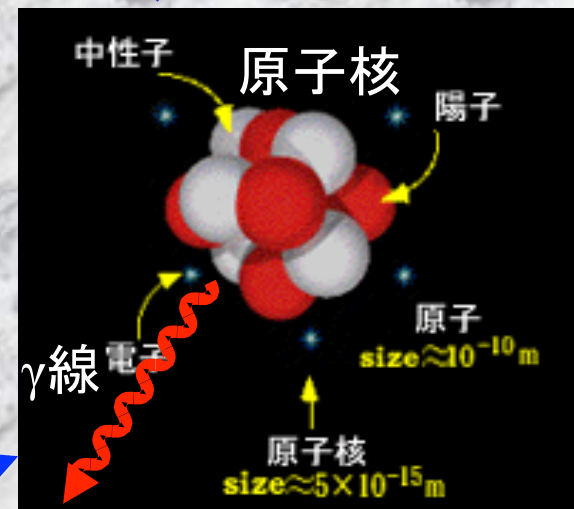
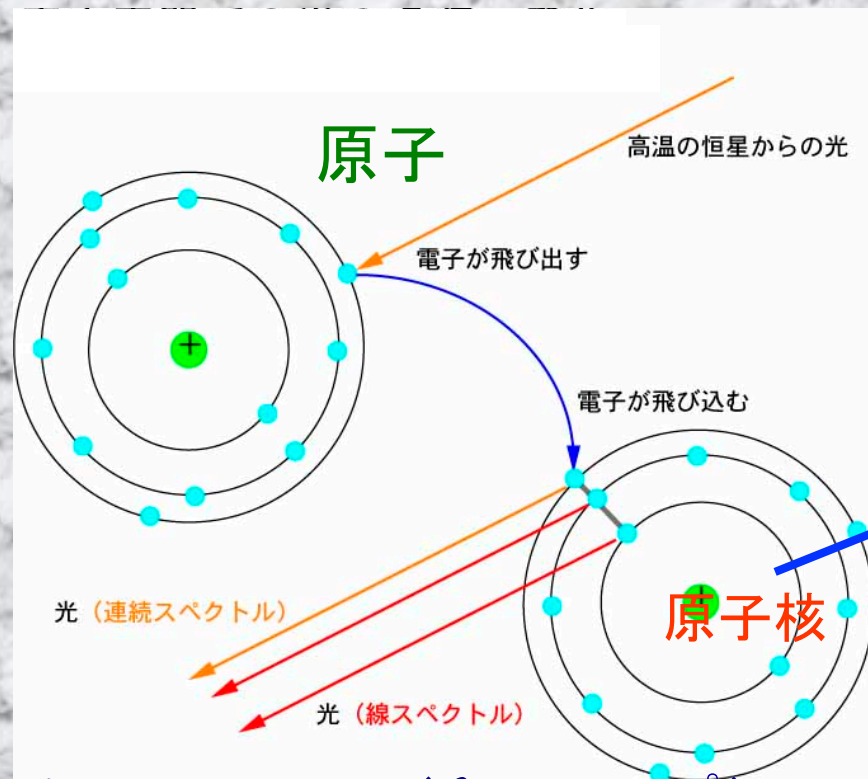
可視光



X線/γ線

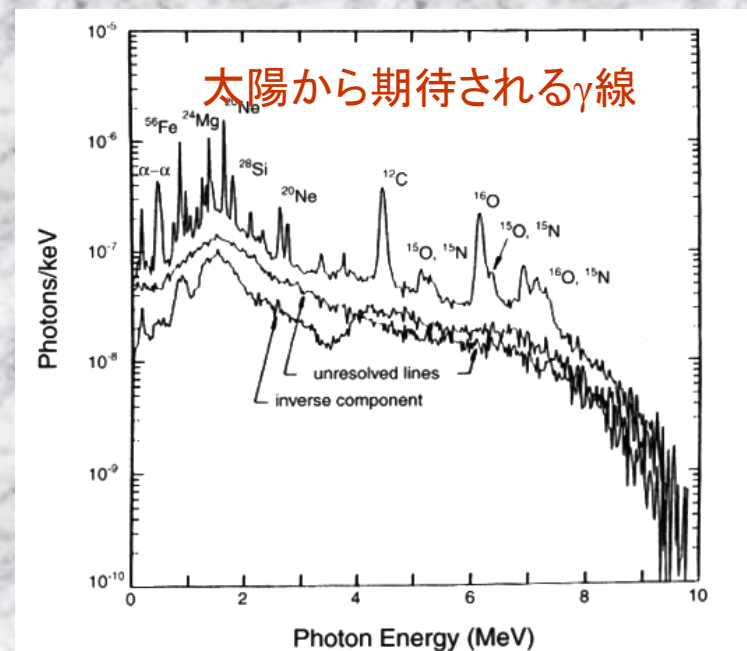
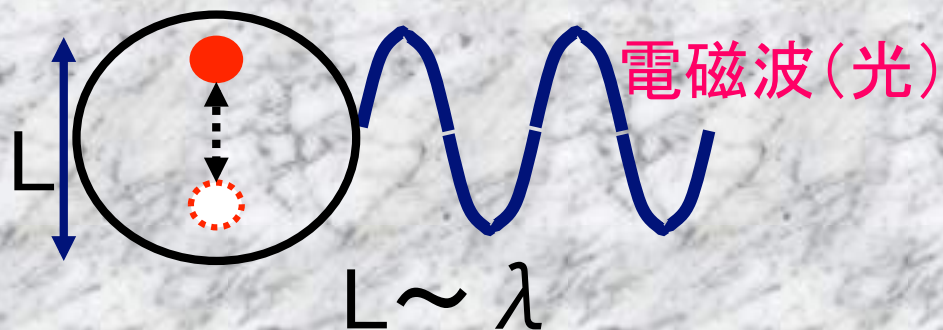


# X, $\gamma$ 線放射(原子、原子核から)



$\gamma$ 線 0.1 ~ 10 MeV ( $\lambda \sim 10$ fm)  
 原子核内の核子からのガンマ線 (線スペクトル)

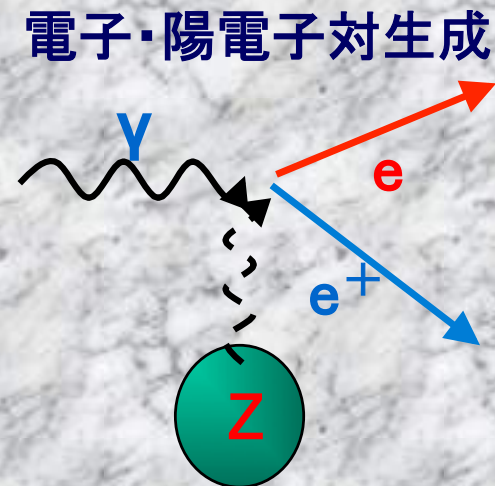
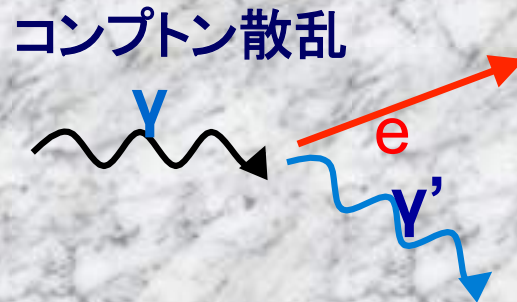
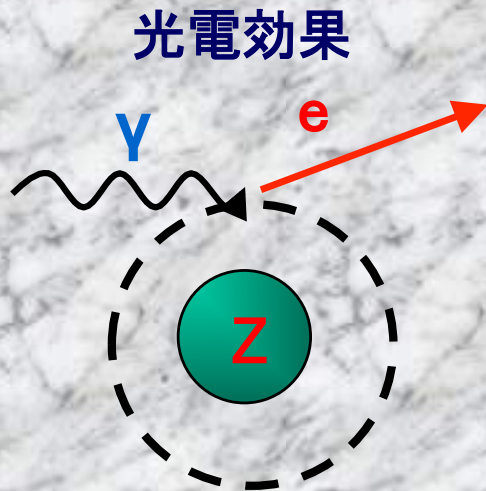
X線 0.1 ~ 100 keV ( $\lambda \sim 0.1 - 10 \text{\AA}$ )  
 原子起因 蛍光X線 (線スペクトル)



# ガンマ線と物質の相互作用

- ・ 光電効果  $< \sim 100\text{keV}$
- ・ コンプトン散乱  $100\text{keV} \sim \text{数 MeV}$
- ・ 電子・陽電子対生成  $> \text{数 MeV}$

- ・ ~~ガンマ線 波としての性質は使えない(反射、屈折)。~~  
波ではなく粒子(量子) ← 量子力学  
コンプトン散乱、対生成は量子効果！！



# ガンマ線と物質の相互作用

- ・ 光電効果 <  $\sim 100$  keV
- ・ コンプトン散乱  $100$  keV  $<$
- ・ 電子・陽電子対生成  $>$  数 MeV

- ・ **ガンマ線** 波としての性質  
波ではなく粒子(量子)  
コンプトン散乱、対生成は

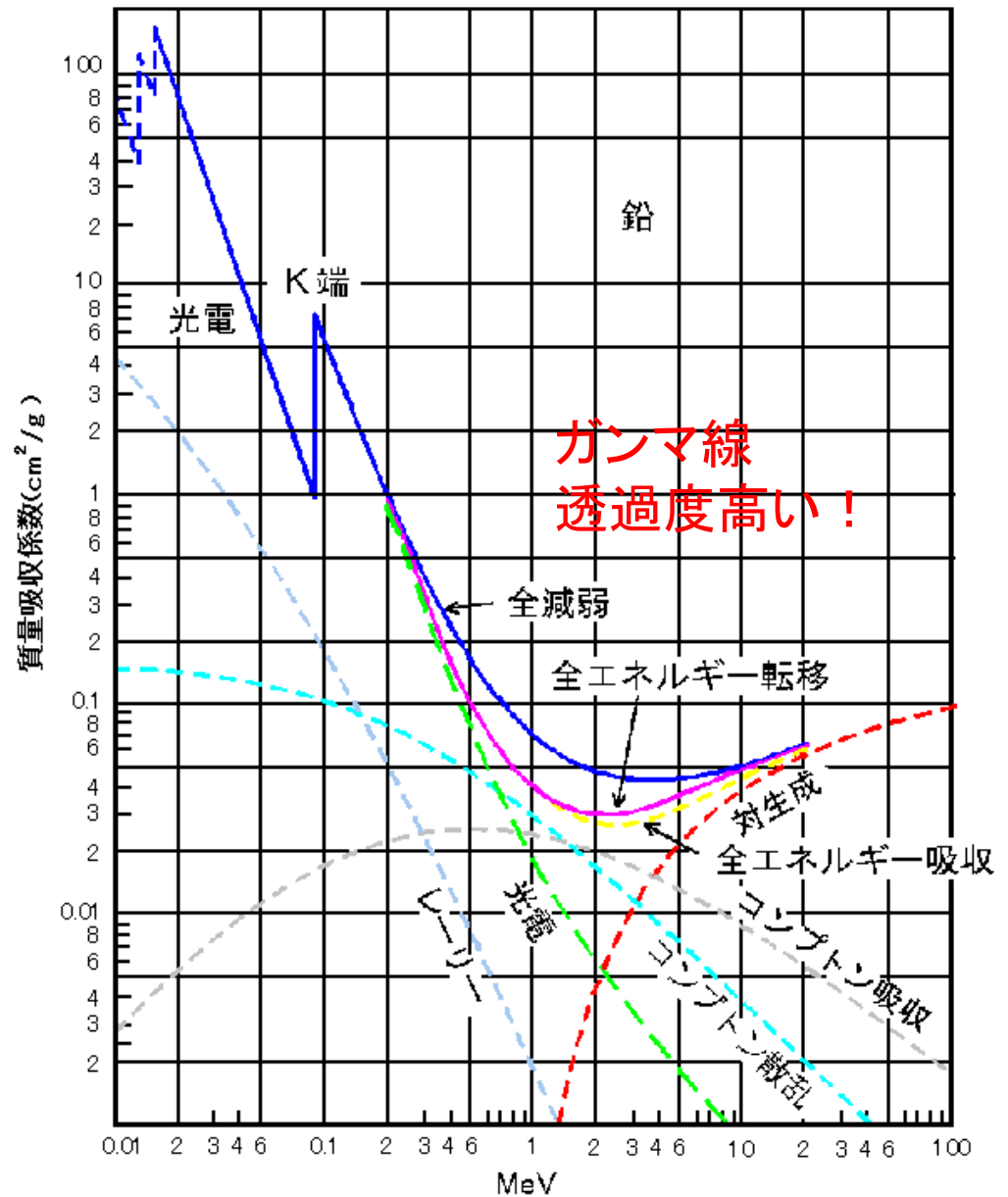
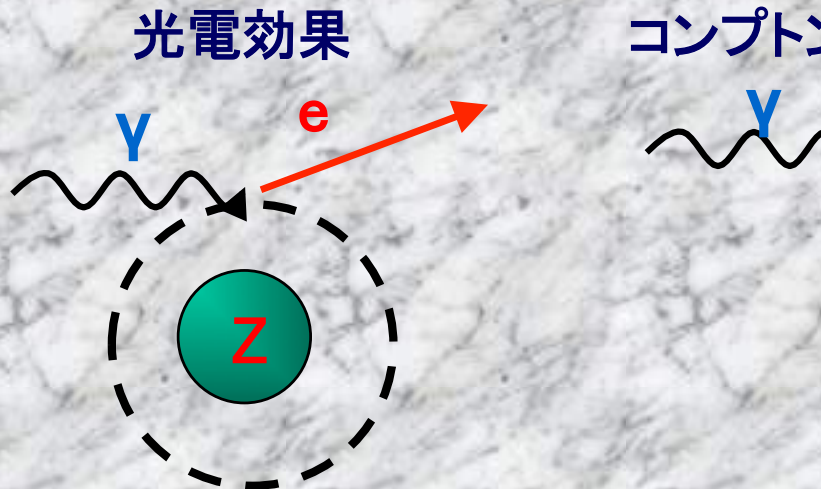


図1 鉛に対する光子の質量吸収係数

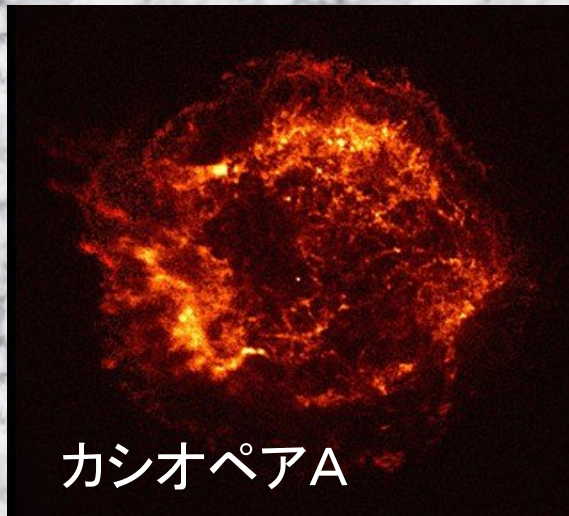
[出典] 石川友清(編): 放射線概論、通商産業研究社(1996年1月)、p.100

# ガンマ線で見える宇宙

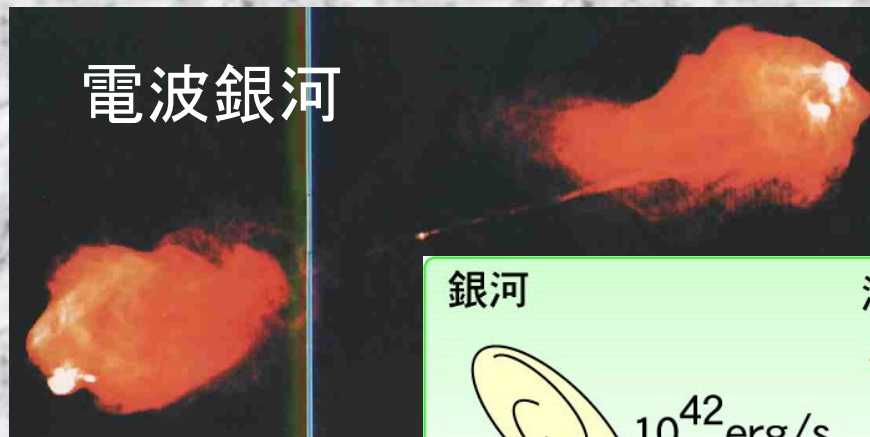
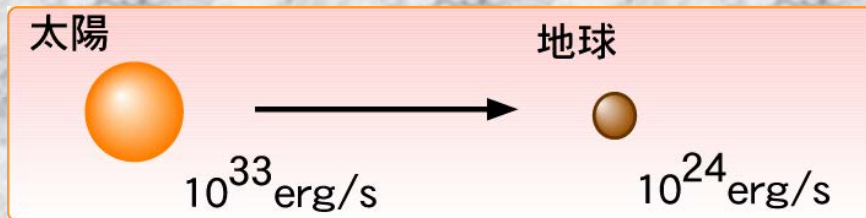
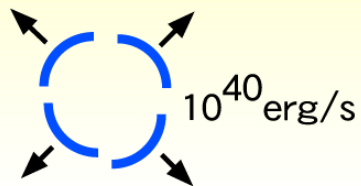
- 光では見えない超高温、高エネルギー宇宙  
超高温プラズマ（1億度以上）  
高エネルギー粒子加速（宇宙の加速器）
- 透過度が高い！ 遠方宇宙、銀河中心、ブラックホール
- 核 $\gamma$ 線による宇宙の元素合成の直接観測  
超新星残骸

しかし、画像化が大変困難！

# 高エネルギー宇宙現象天体



超新星残骸



超新星爆発



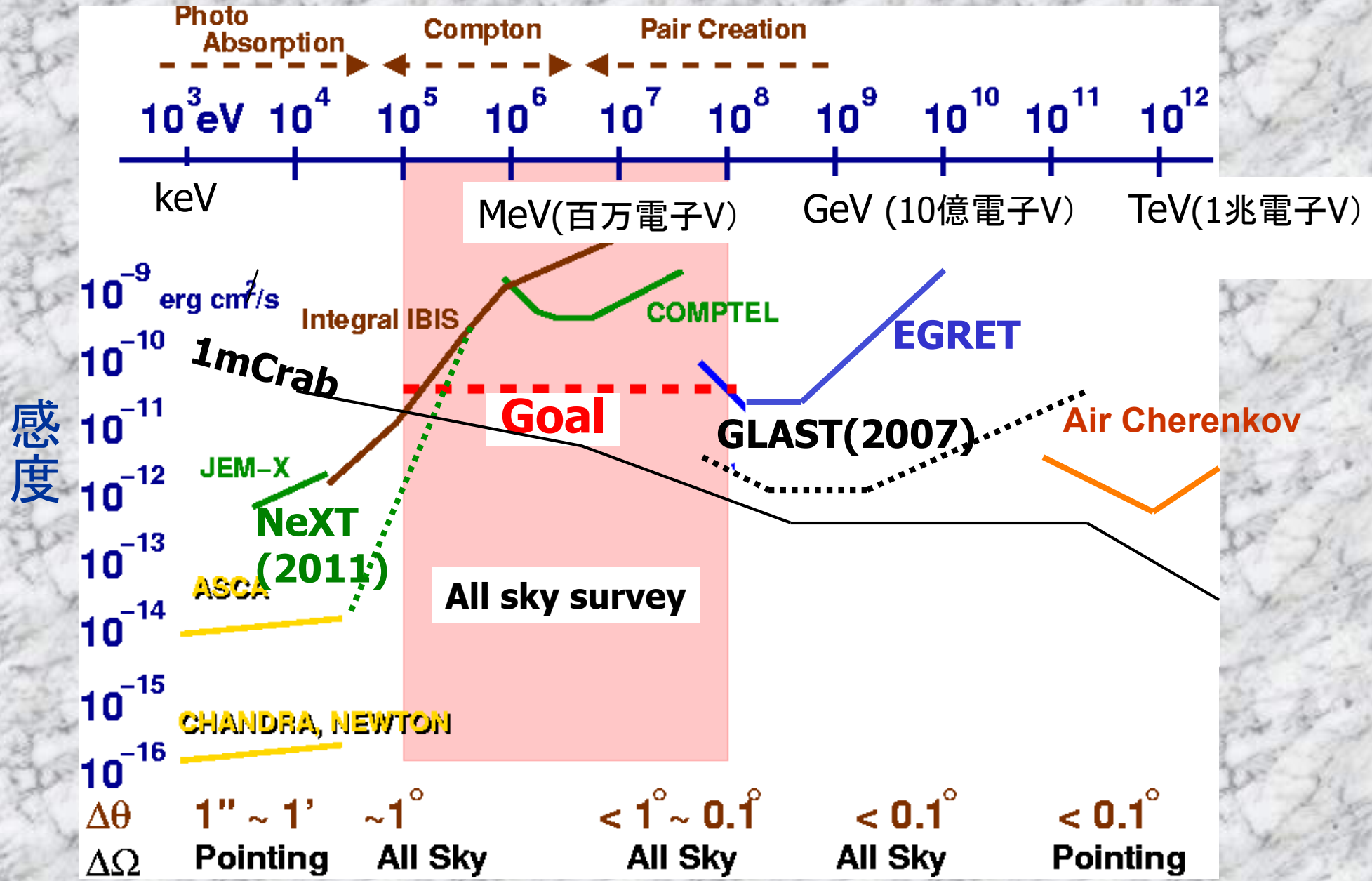
$10^{52}$  erg/s

$\gamma$ 線バースト

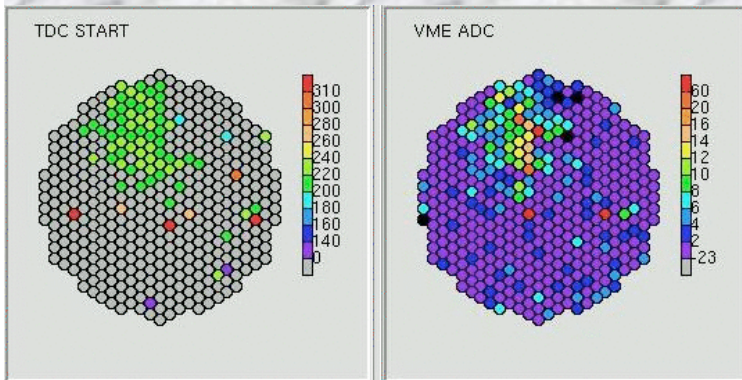
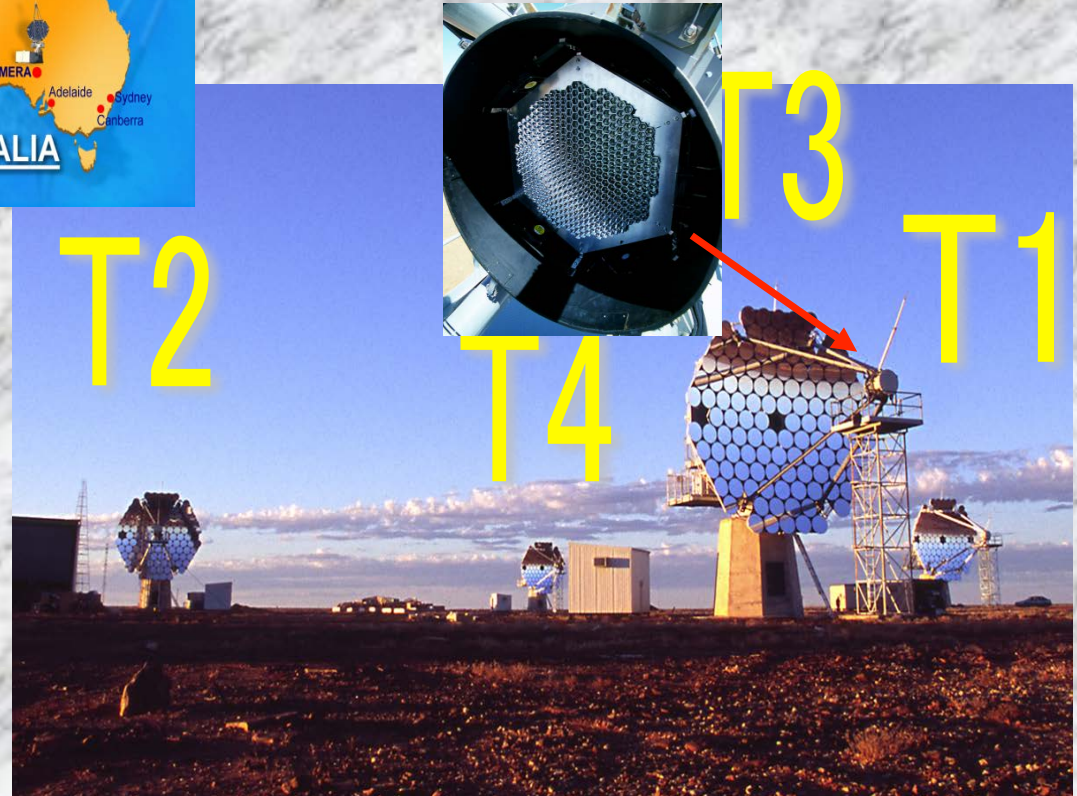
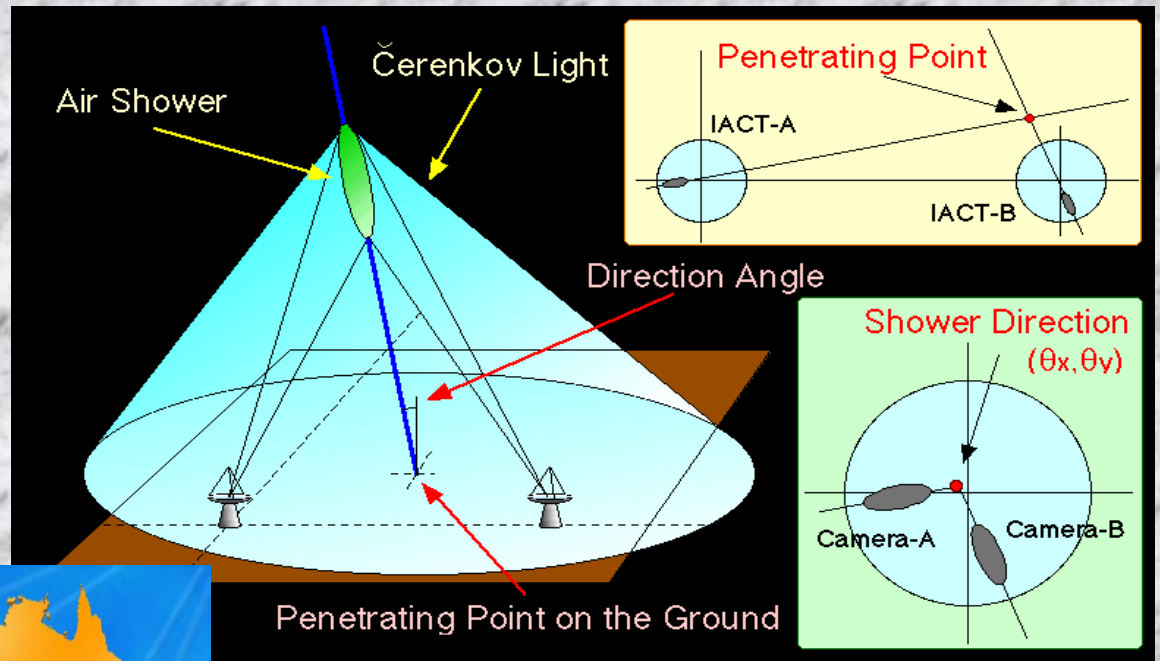
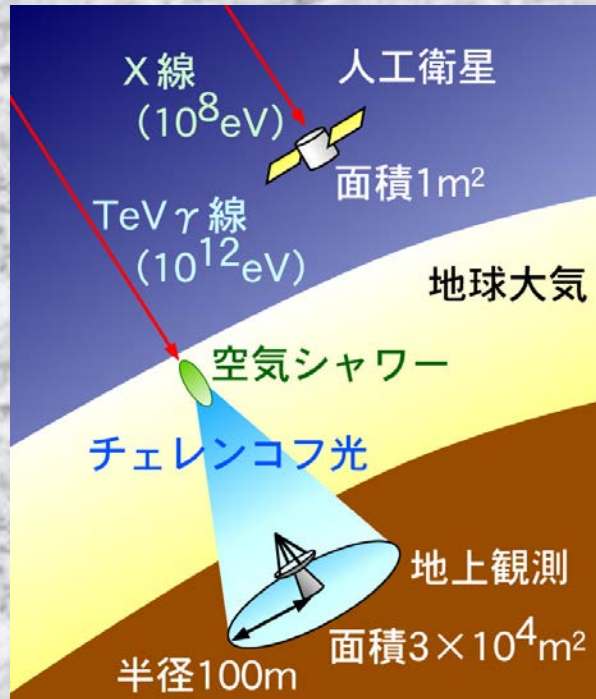


$10^{53}$  erg/s以上?

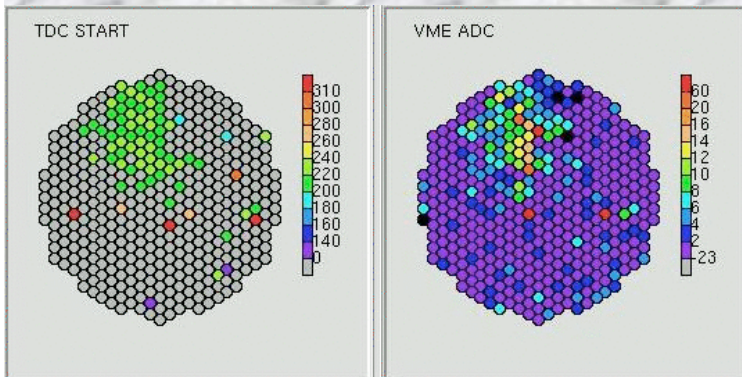
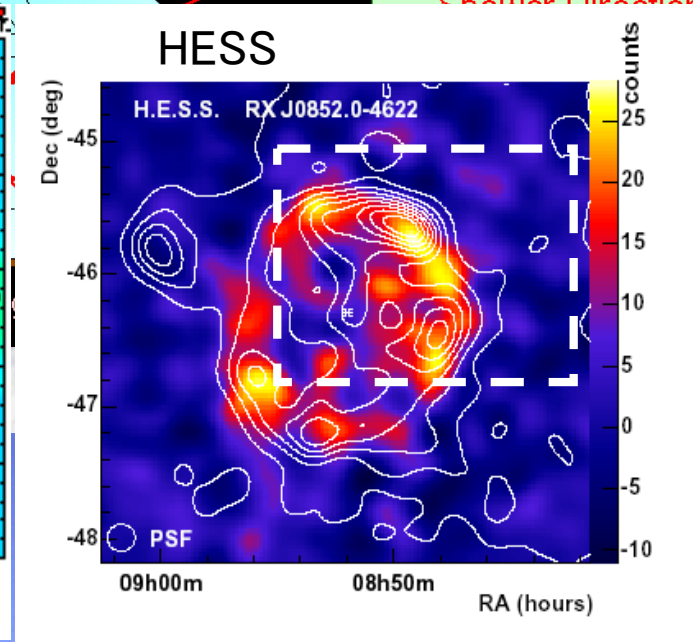
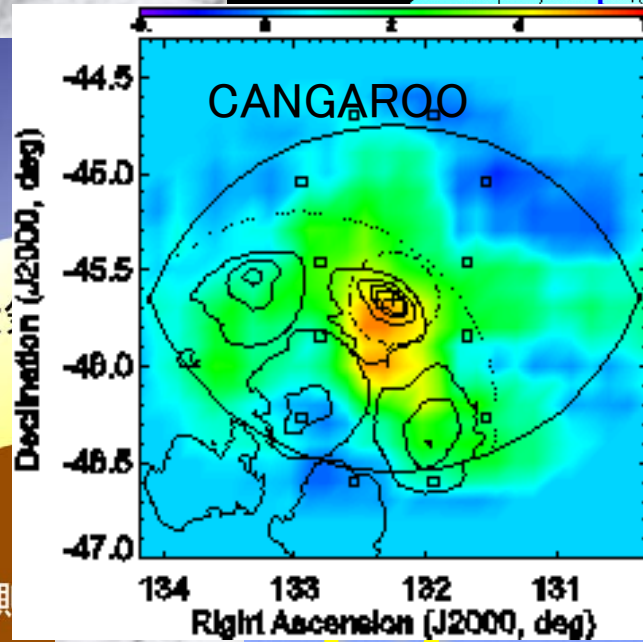
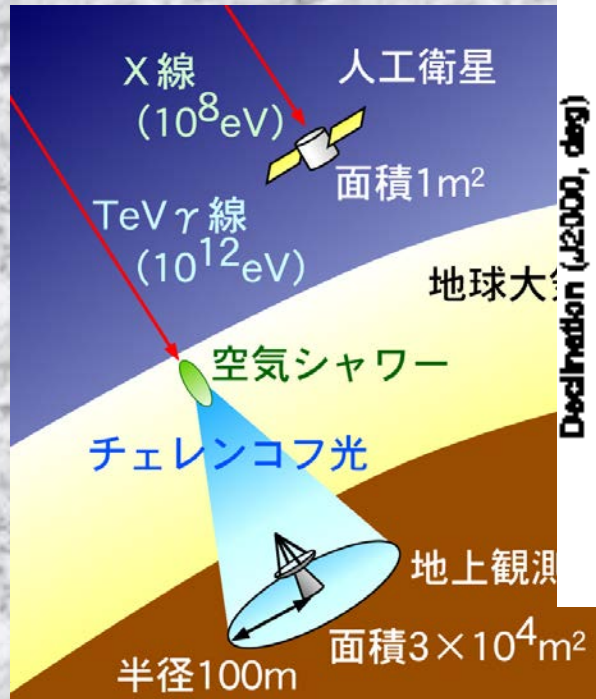
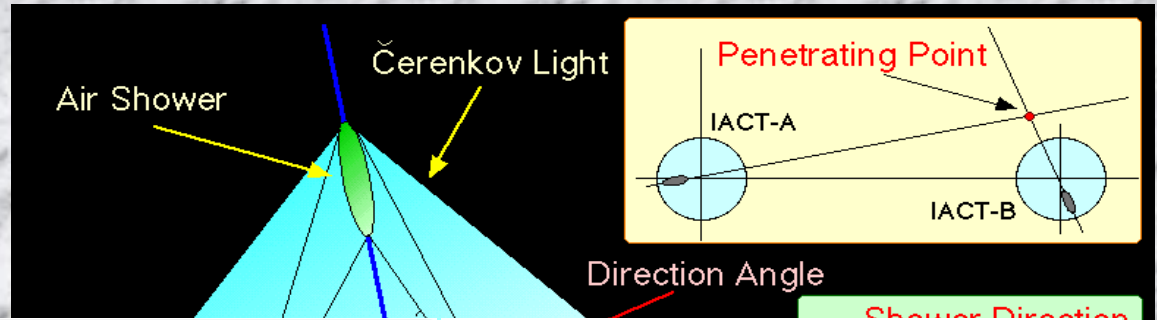
# X線、 $\gamma$ 線天文学のエネルギー領域



# TeVガンマ線観測



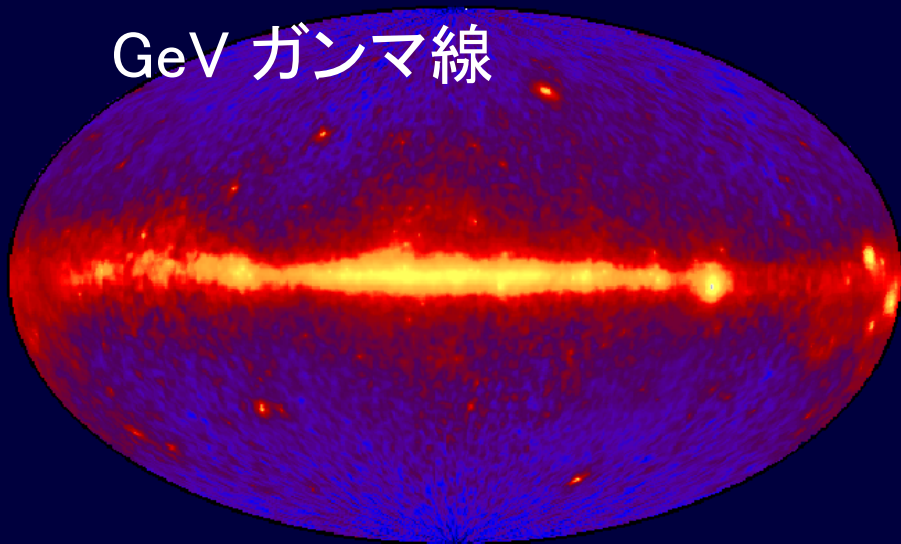
# TeVガンマ線観測



# 衛星による高エネルギーガンマ線観測(90年代)

EGRET All-Sky Gamma Ray Survey Above 100 MeV

GeV ガンマ線



コンプトン宇宙天文台



EGRET

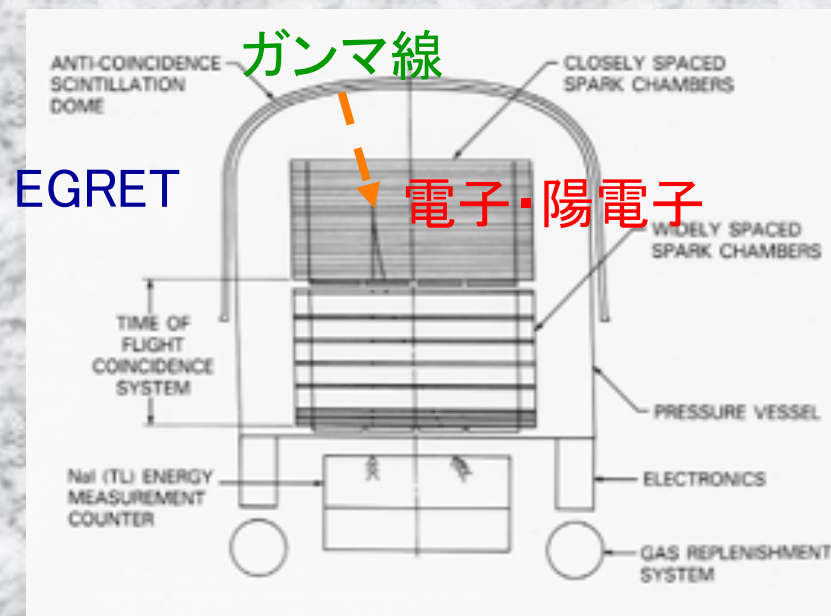
COMPTEL

200以上のガンマ線天体  
発見

活動銀河核 ~70

パルサー 6

未同定天体 100以上



# 宇宙MeVガンマ線マップ

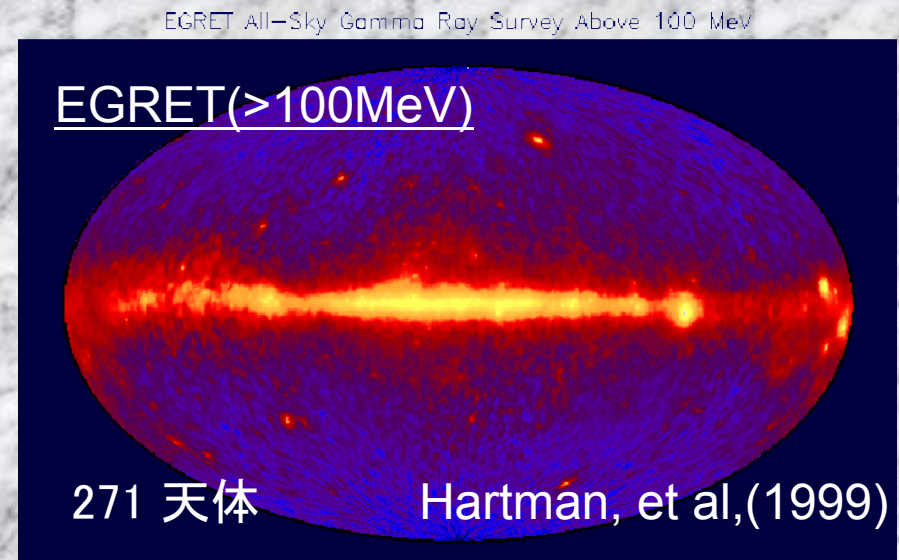
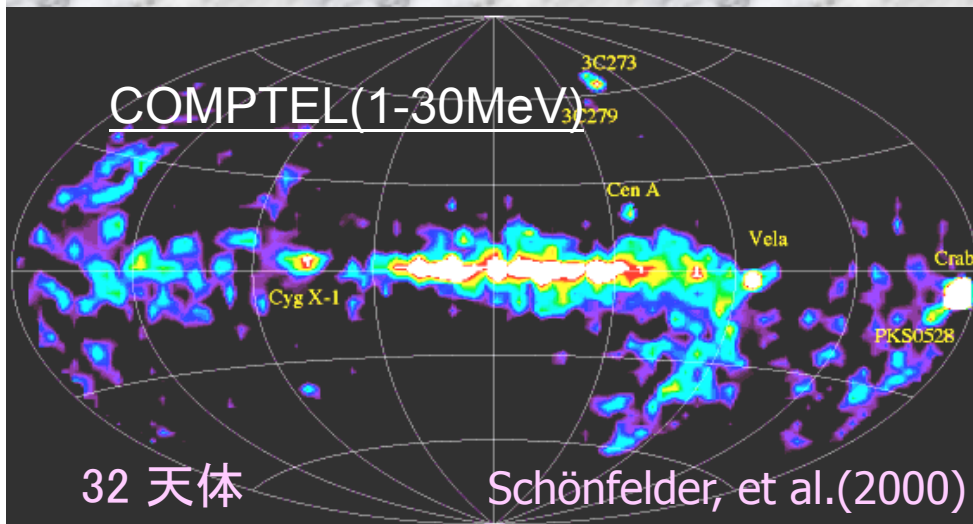
COMPTEL(1-30MeV) 検出器 (コンプトン衛星 (1991-2000))  
MeVガンマ線天体 32天体を発見

活動銀河核 10

ガンマ線ライン放射 超新星残骸 7 + かに星雲 1

パルサー 3

ブラックホール天体候補 2 多未同定天体 9



# ブラックホールからのMeVガンマ線

ブラックホール近傍の  
超超高温環境

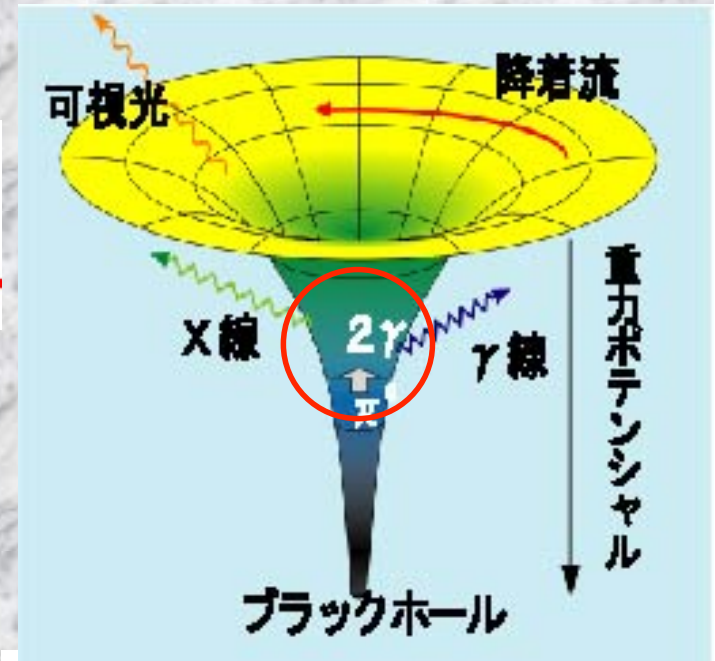
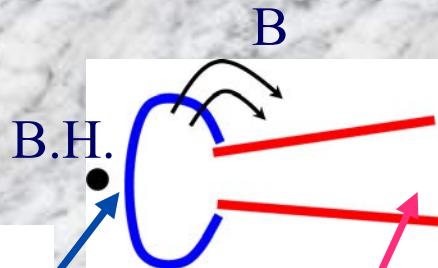
$$T_e \sim 10^9 \text{K}$$

$$T_{ion} \sim 10^{12} \text{K} \quad (\geq 100 \text{MeV})$$

$$\sim \frac{1}{10} m_p$$

$$= \frac{GMm_p}{r_{sw}}$$

$r_{sw} \sim 3 \text{km}$   
 $M \sim 1 \text{太陽質量}$



降着円盤 (X線)

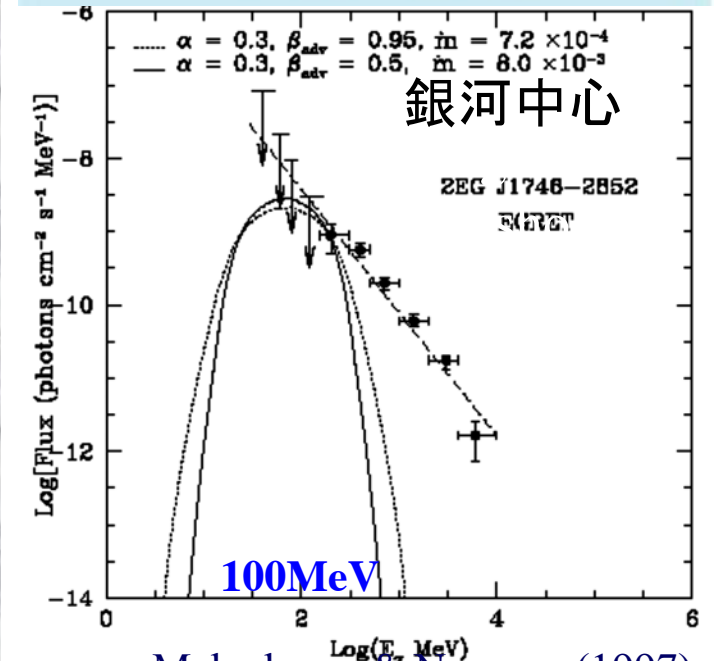
$$T_{e,i} \quad 10^5 \sim 10^7 \text{K}$$

巨大ブラックホール; 銀河中心, M87

・数十MeVの熱的ガンマ線放射

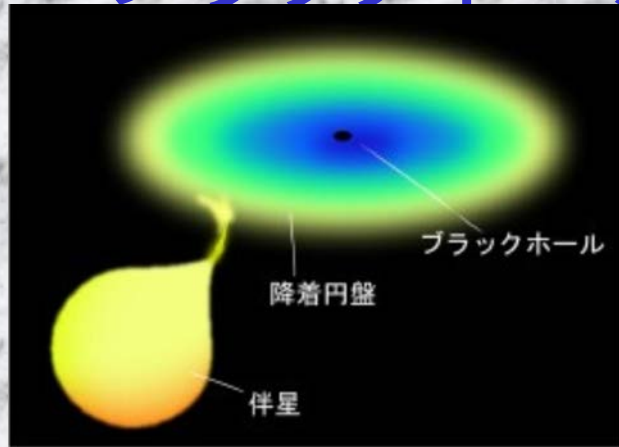


一般相対論の世界の観測

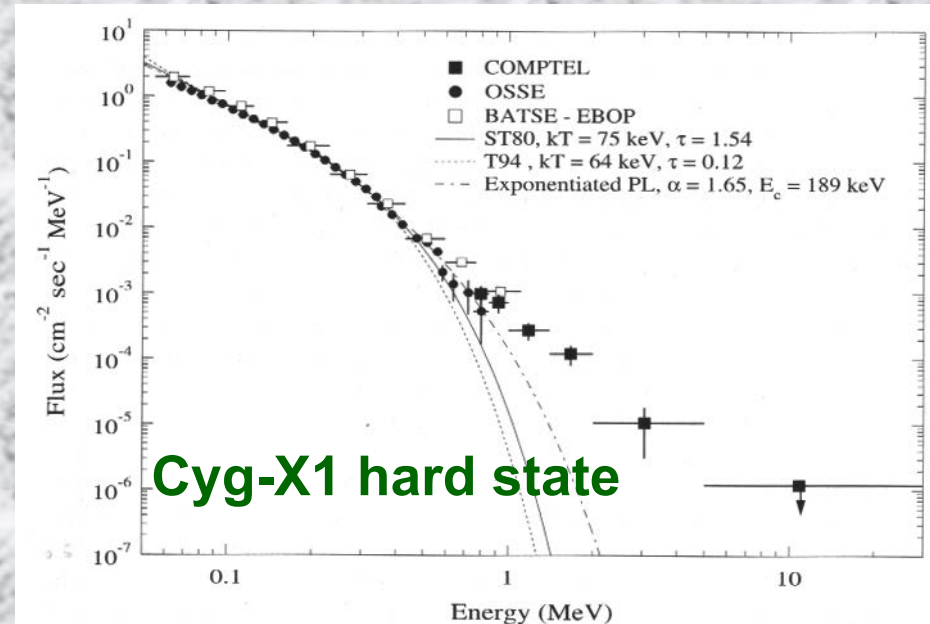
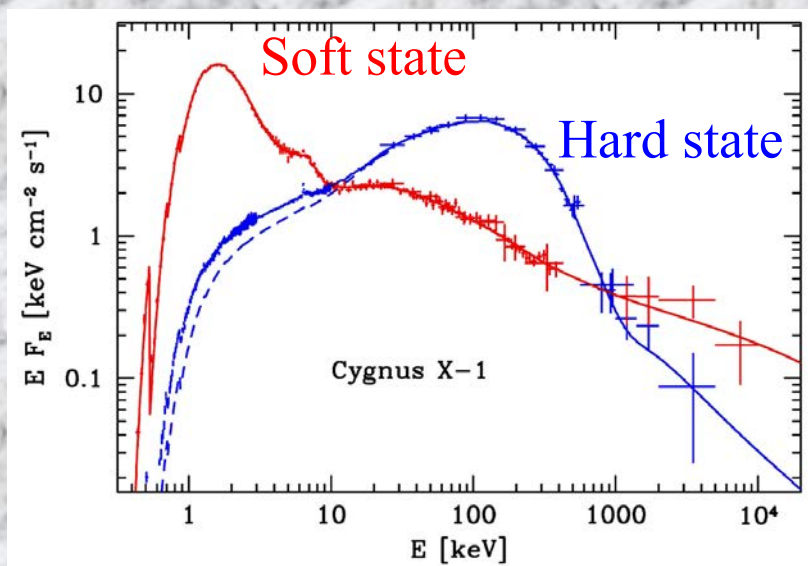
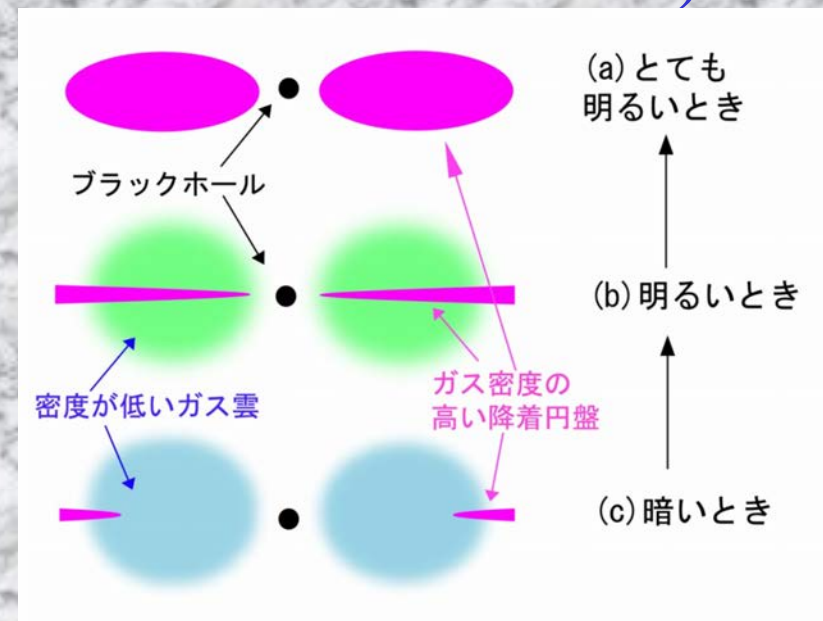


Mahadevan & Narayan (1997)

# ブラックホール候補天体(白鳥座X-1)



コンパクト星  $> 10M_{\odot}$   
X線、激しく変動



# ビッグバンでの元素合成 (宇宙の最初の3分間)

(分)

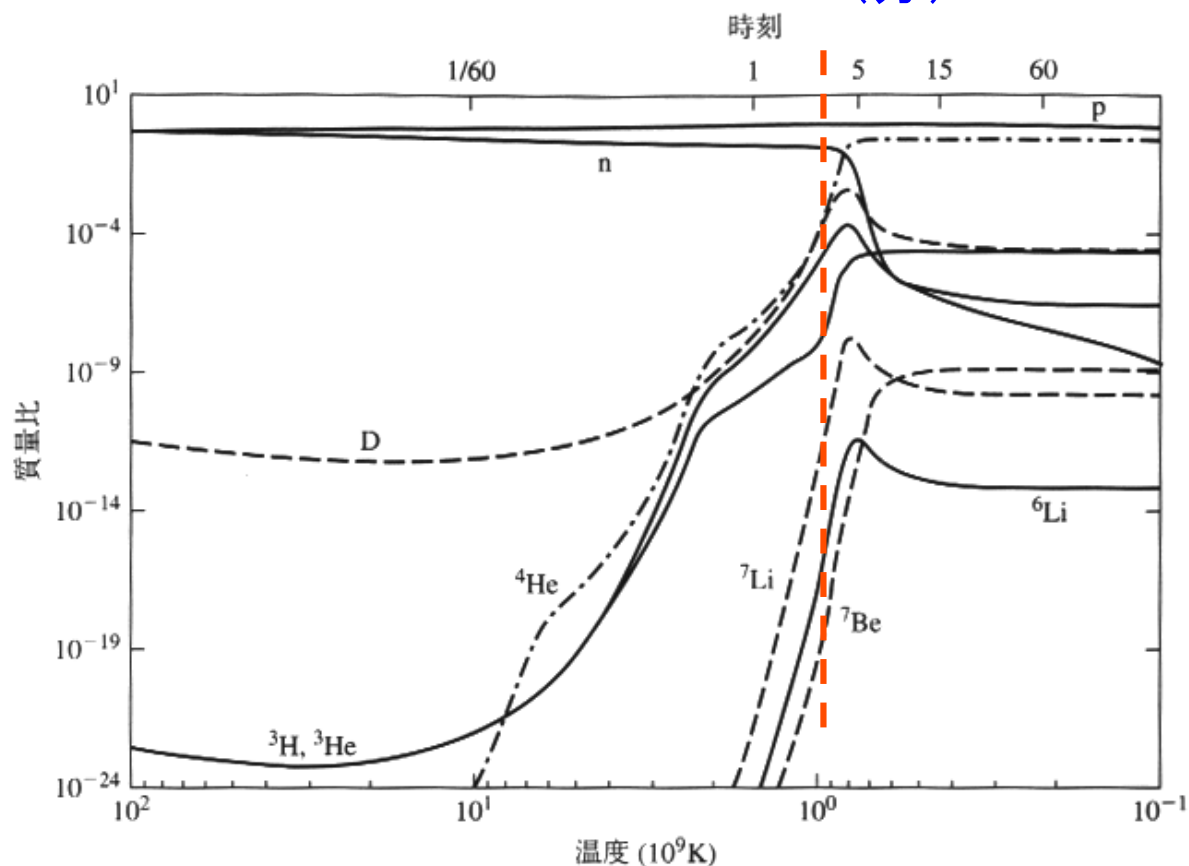


図 10.4 元素合成期における原子核の質量比率。時間の関数として表してある。  
バリオン-光子比を  $\eta = 5.1 \times 10^{-10}$  と仮定している。

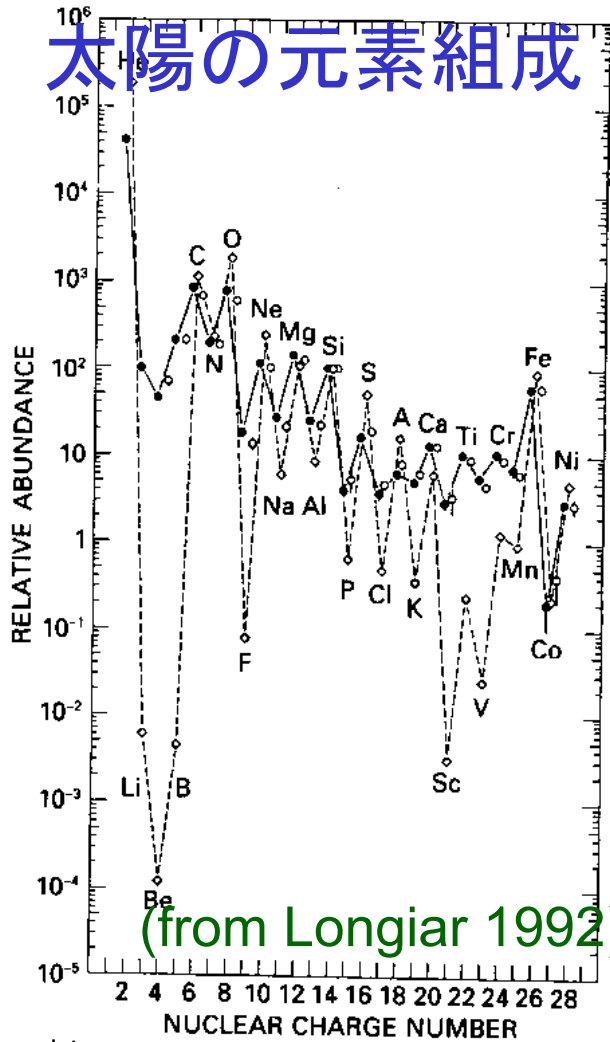
ビッグバン 1分後  
陽子(p)、中性子(n)、  
電子(e)のみ存在

3分後  
から p,n  
 $^4\text{He}$ ,  
Li, Be など軽元素が合成

しかし、これ以上の重元素は  
できない！  
(膨張がはやすぎる)

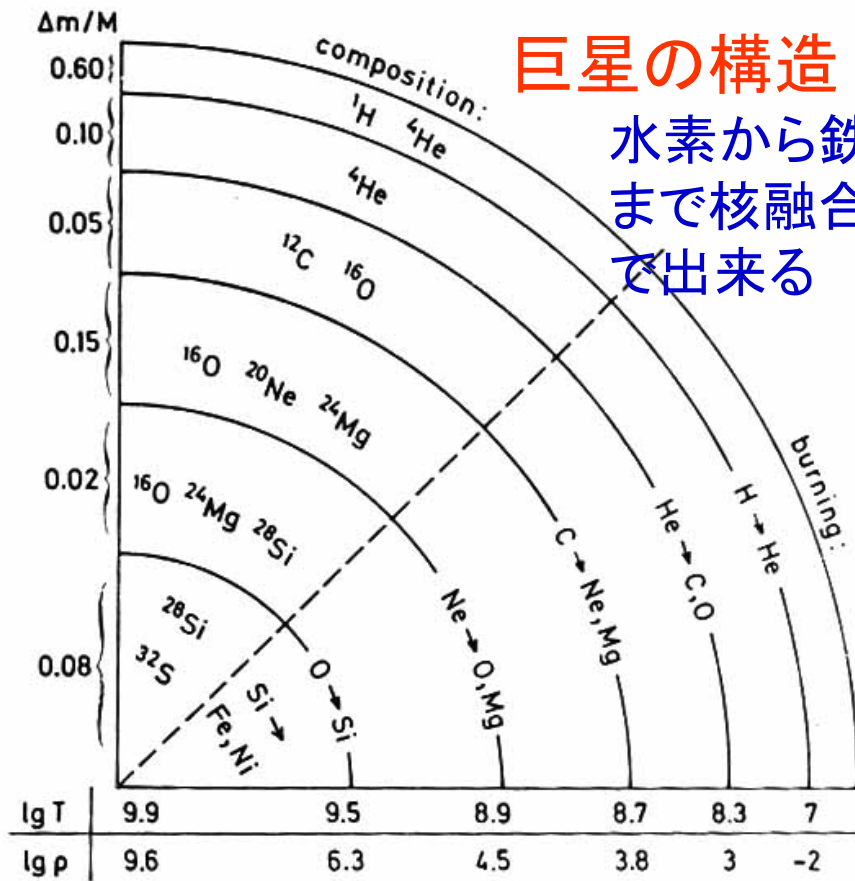
炭素以上は星の内部で生  
成！

# 太陽の元素組成



# 巨星の構造

水素から鉄  
まで核融合  
で出来る

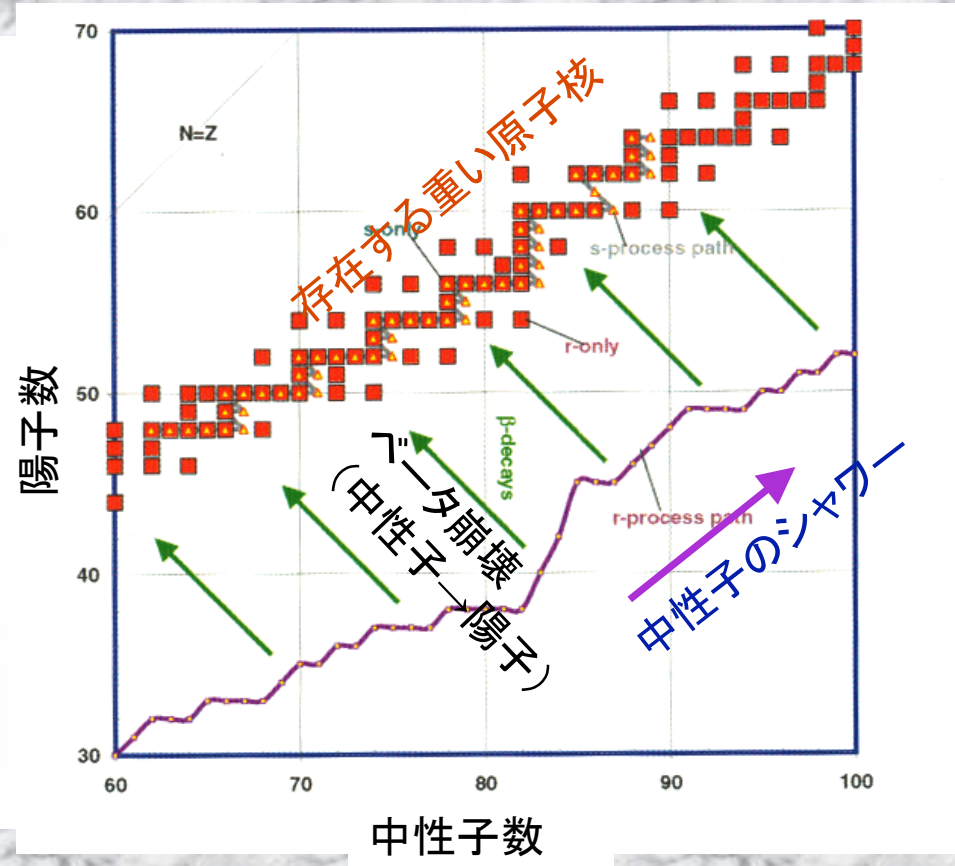
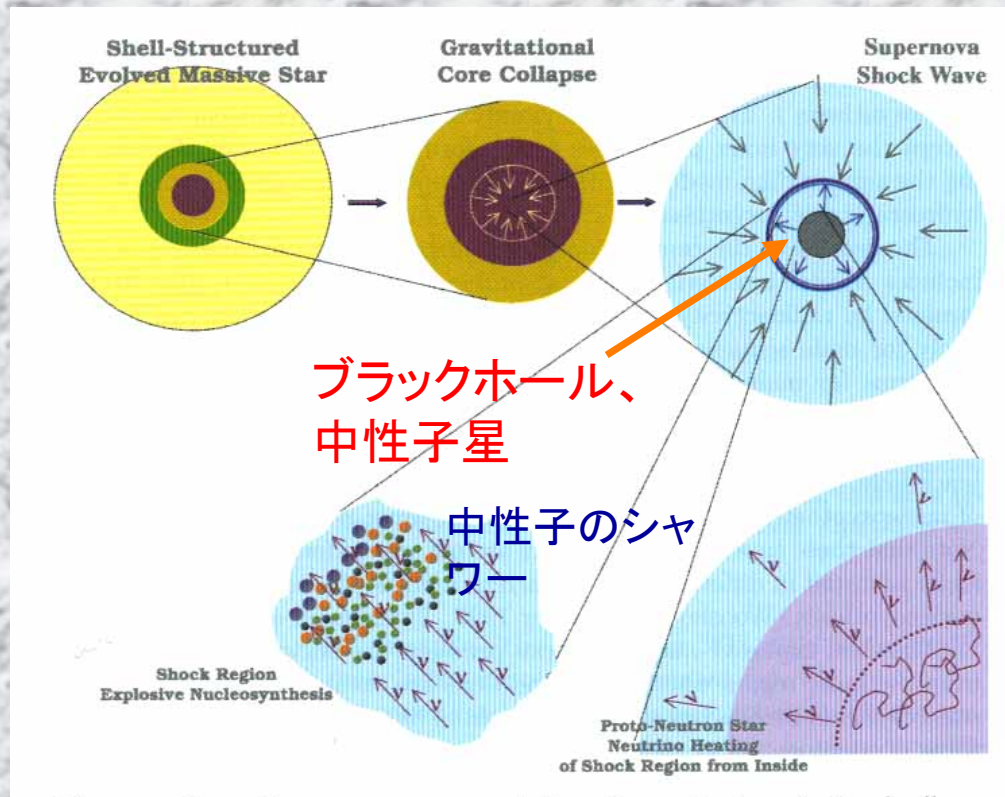


炭素以上は星の内部で生成！

図 10.4 元素合成期における原子核の質量比率。時間の関数として表してある。バリオン-光子比を  $\eta = 5.1 \times 10^{-10}$  と仮定している。

# 元素合成 in 超新星爆発

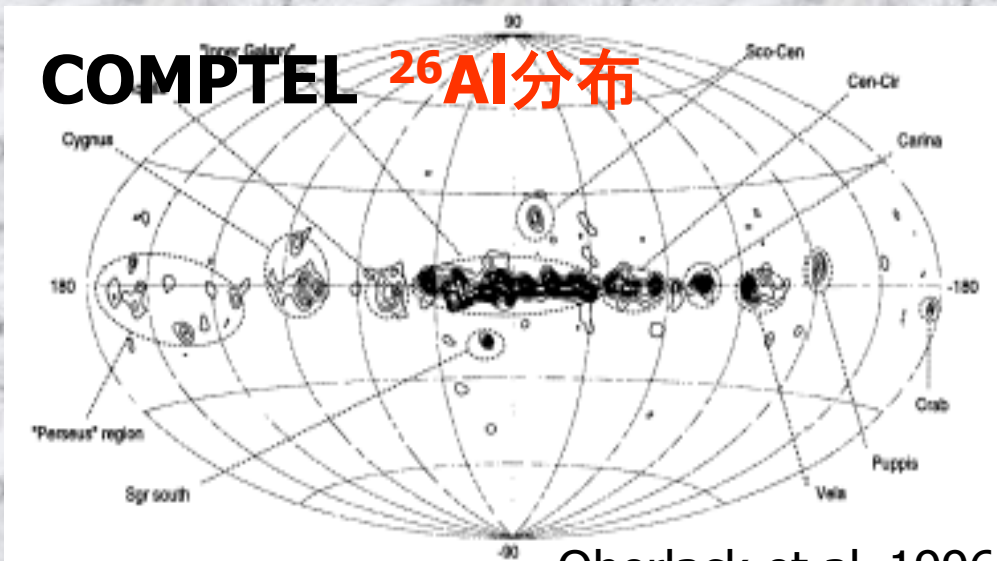
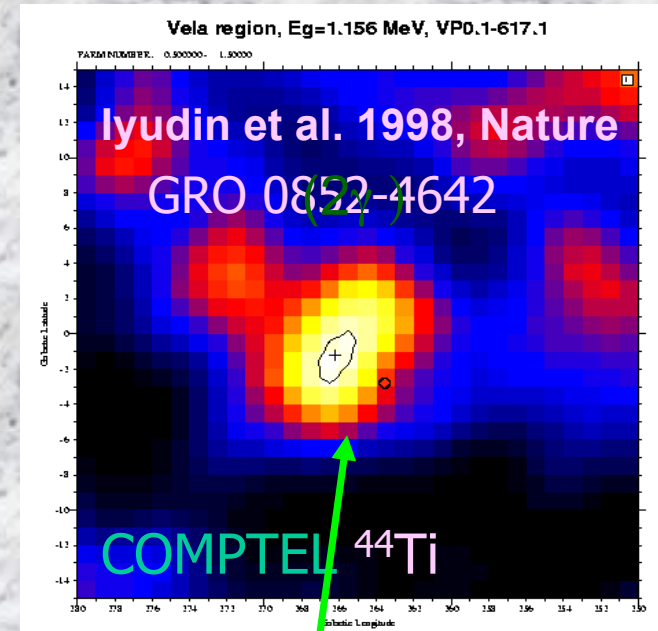
鉄より重い元素は重力崩壊方超新星爆発の一瞬に合成される。



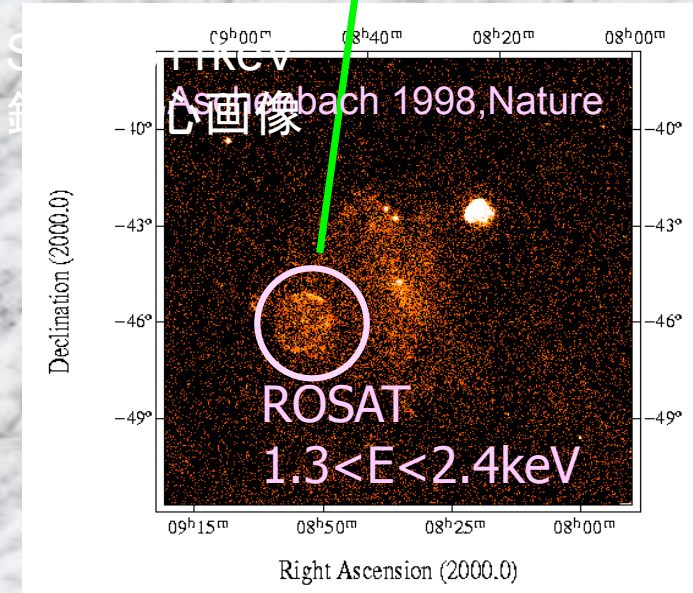
From Deihl, in The Universe in Gamma Rays (2000)

# 宇宙の物質起源のトレーサ(核ガンマ線)

	Energy [keV]	Decay
$^{56}\text{Ni}$	158,270,480,759,812	6.10d
$^{56}\text{Co}$	847,1238,2598	77.2d
$^{57}\text{Co}$	122,136	271.7d
$^{44}\text{Ti}$	1157	63 year
$^{26}\text{Al}$	1809	$7.4 \times 10^5$ year



Oberlack et al., 1996



# 宇宙の物質起源の

Energy [keV]

$^{56}\text{Ni}$  158,270,480,759,81

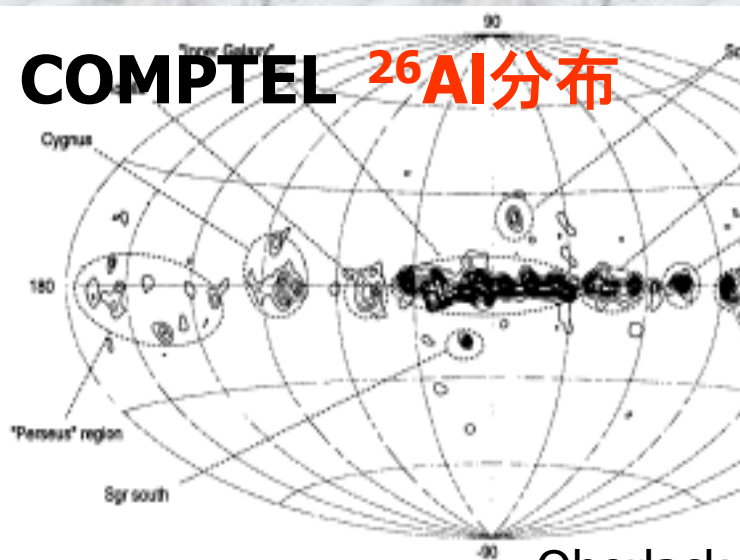
$^{56}\text{Co}$  847,1238,2598

$^{57}\text{Co}$  122,136

$^{44}\text{Ti}$  1157

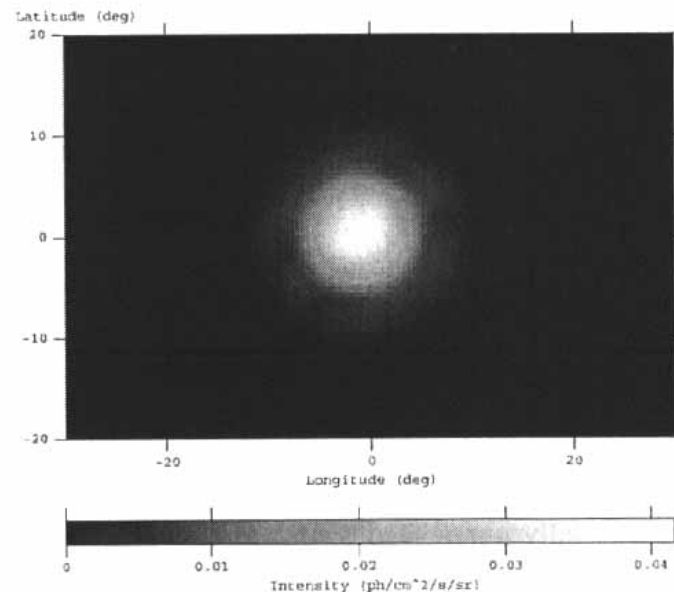
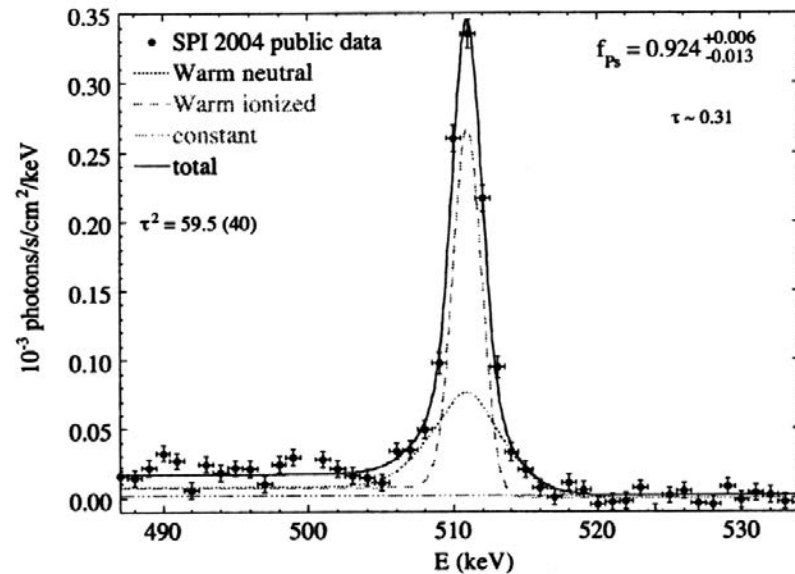
$^{26}\text{Al}$  1809 7.4x

## COMPTEL $^{26}\text{Al}$ 分布



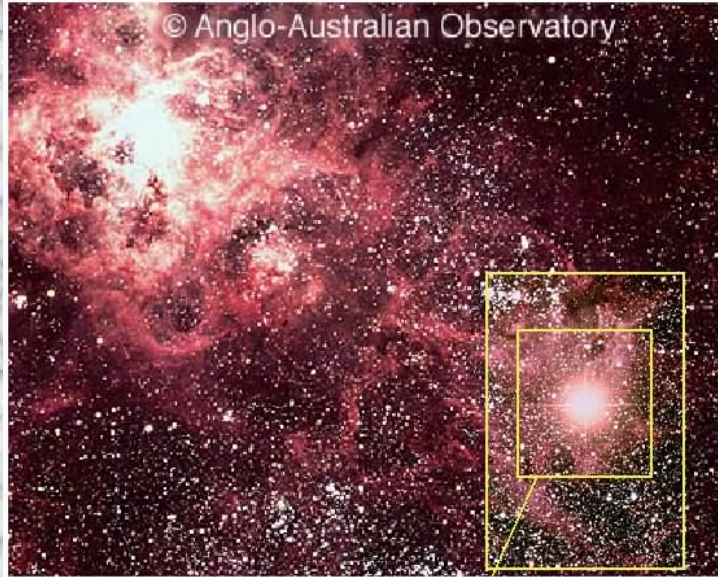
## 511keV ( $e^+ e^-$ )

### SPI ( $\Delta E/E = 3\%$ ) 511keV スペクトル



# 1987Aからのガンマ線観測

大マゼラン星雲の超新星1987A

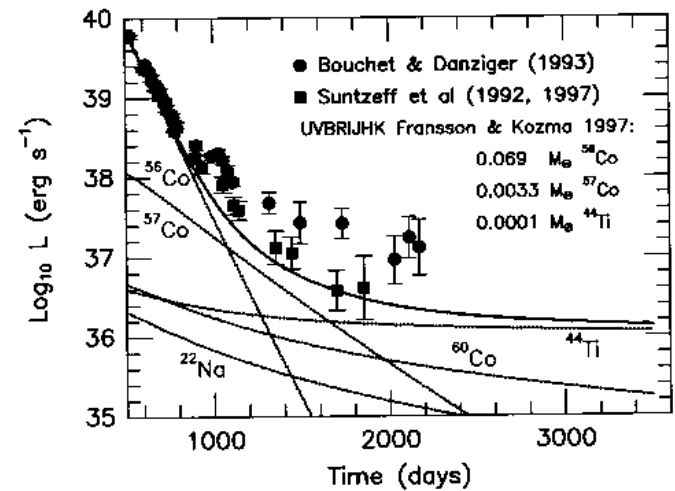
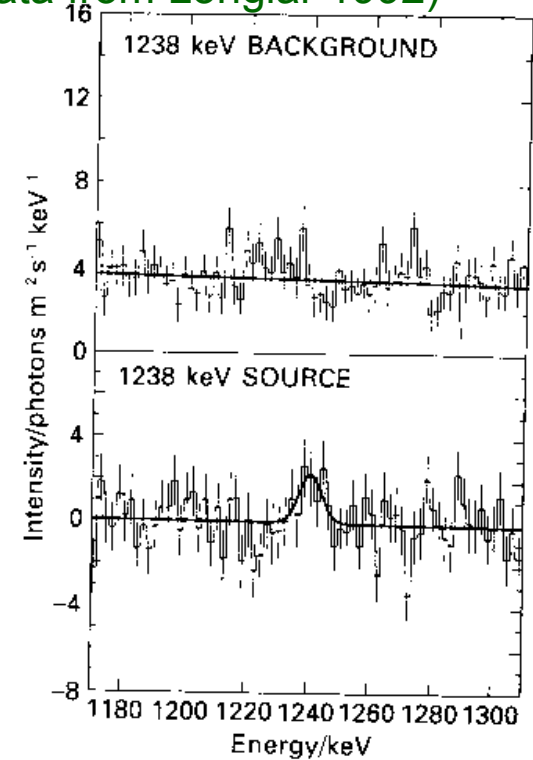
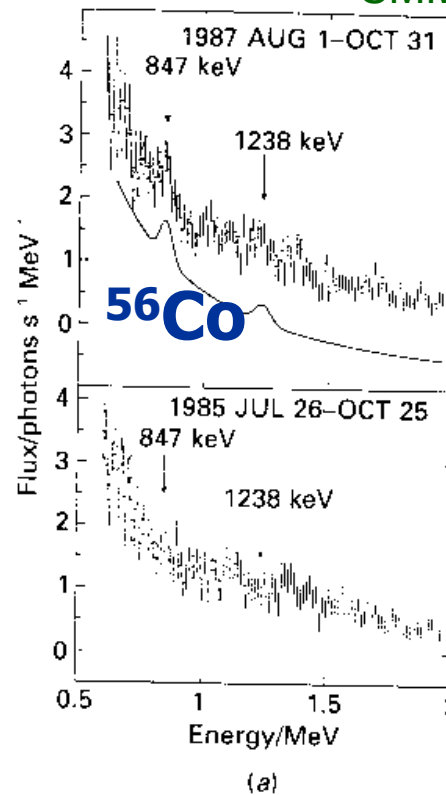


この超新星は1987年2月24日、毒ぐも(タランチュラ)星雲の近くに現れた(上)。肉眼で見える超新星は、ケプラーの超新星以来300年ぶりであった。白矢印で示されているのが、爆発前に超新星の位置にあった青色超巨星Sk-69 202で(右下)、この星が爆発したと考えられる。爆発後しばらくして、ライトエコー(下左)が見られた。これは超新星から470光年と1800光年のところにあるガスシートで反射されて、遅れて届いた超新星の光である。(アングロオーストラリアン天文台撮影)



次ページのハッブル望遠鏡の写真の範囲

SMM data from Longiar 1992)



10年後程度からTiが見えるはず！

# MeV $\gamma$ 線イメージング



## 1. コリメータ+位置検出器 (例 OSSE)

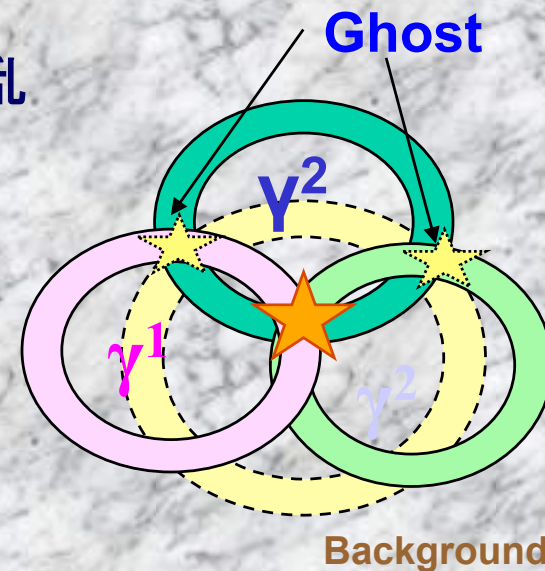
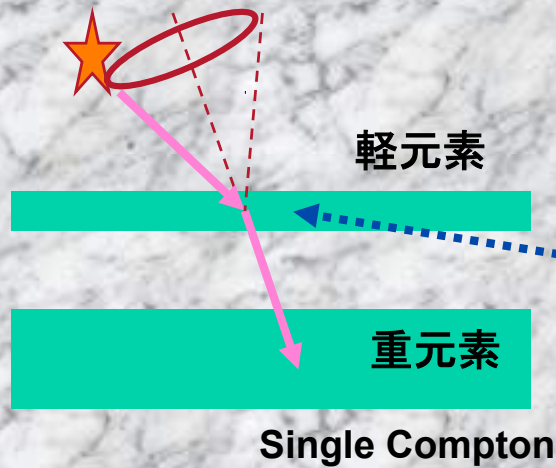
狭視野、バックグラウンド多い

Energy <  $\sim 500\text{keV}$

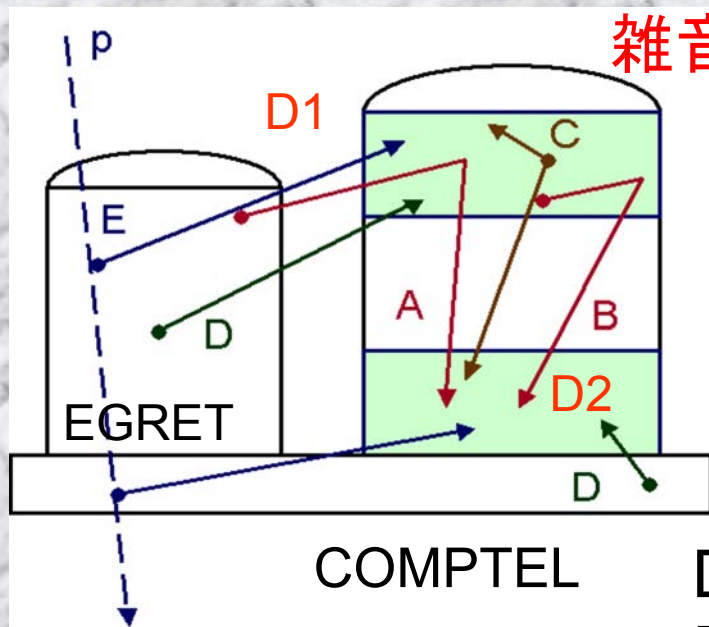
## 2 Comptonカメラ (例 COMPTEL)

方向決定に3イベント必要

入射



# COMPTEL検出器

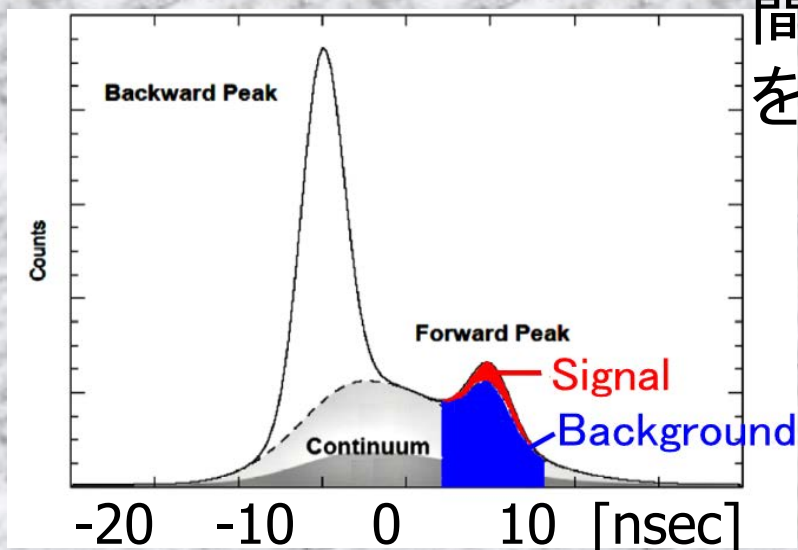
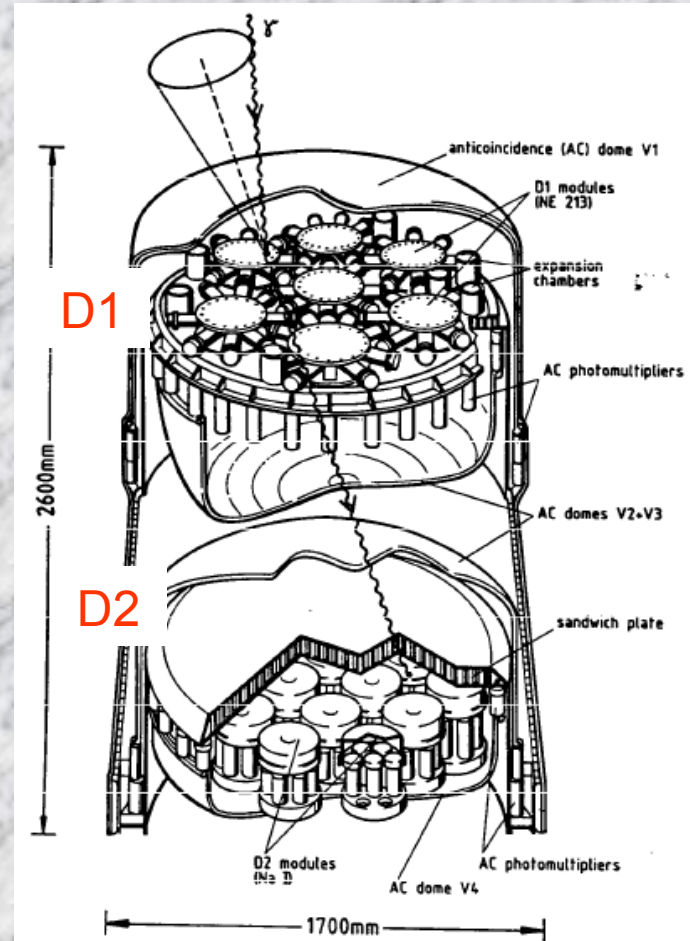


雑音ガンマ線



COMPTEL

D1, D2の到来時間差のみで雑音を除去。



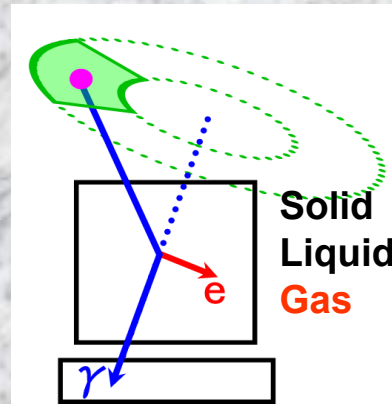
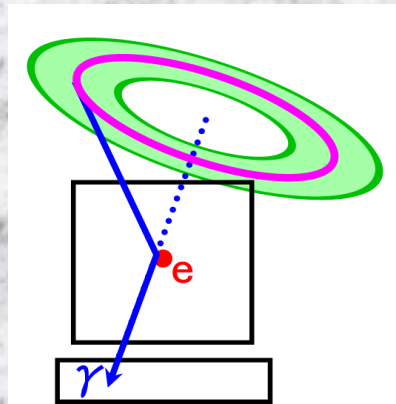
Weidenspointner, et.al. 2001

非常に雑音γ線が多い。  
MeV領域では雑音の量で感度が決る。

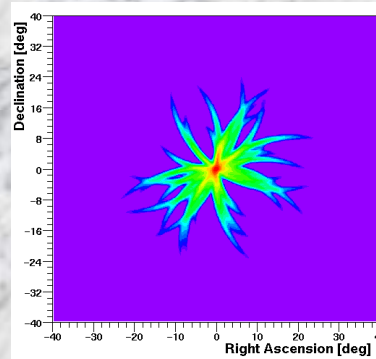
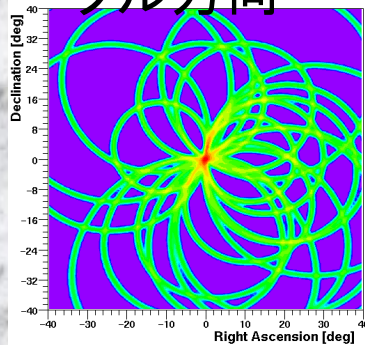
# ガンマ線方向再構成法

感度向上には散乱電子トラック  
検出が非常に重要！！

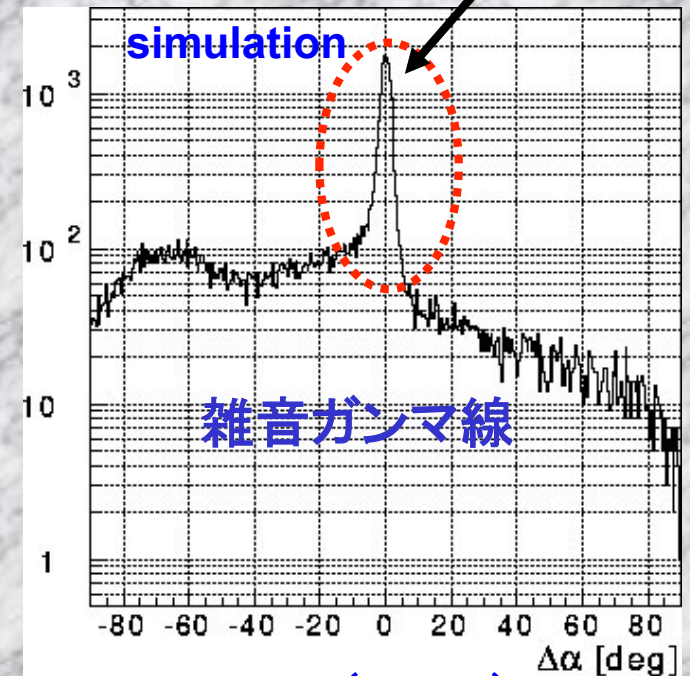
$\alpha$ 角を用いた雑音除去。



サークル方向



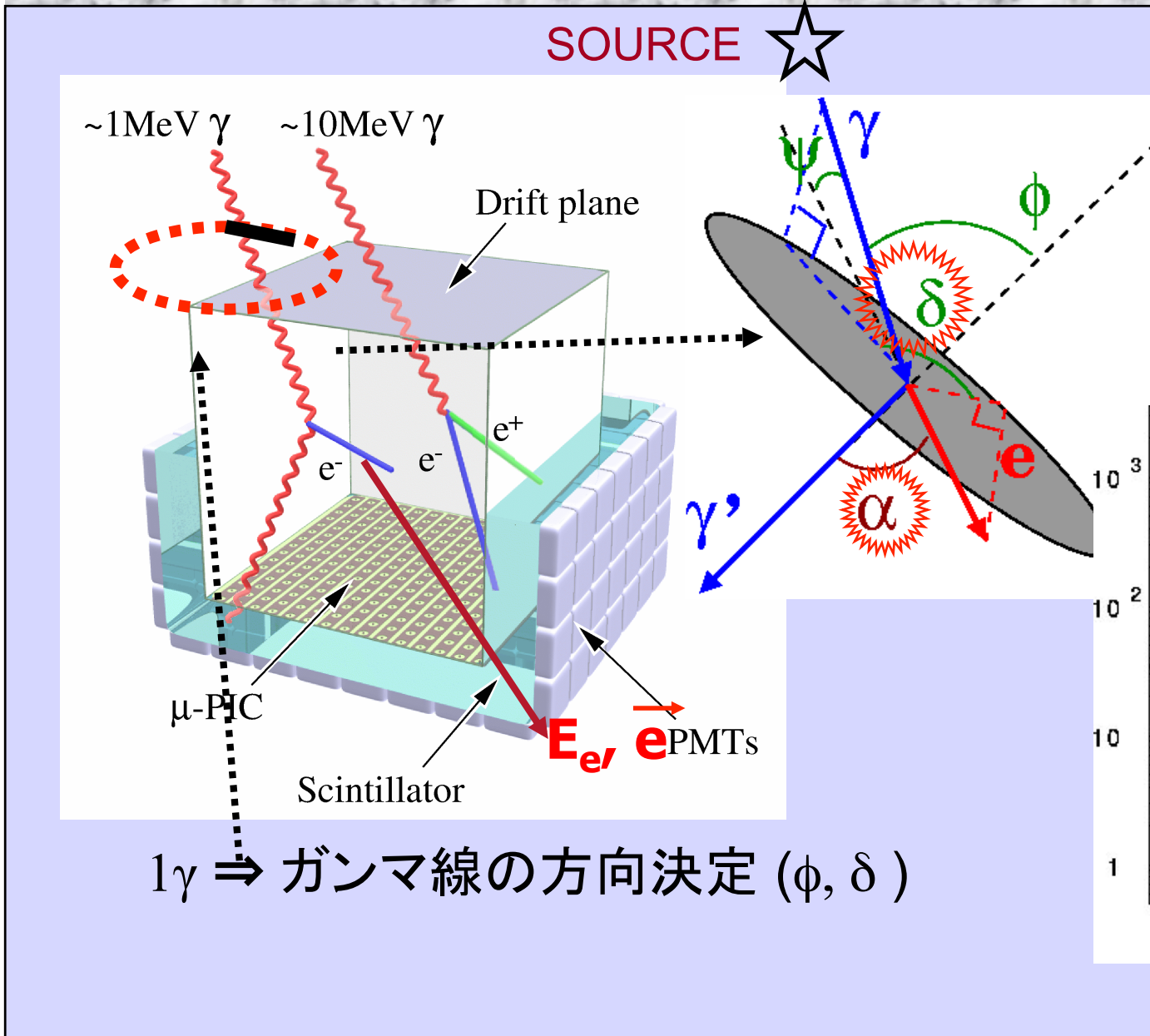
真のガンマ線  
 $\alpha - (\phi + \psi) = 0$



$\alpha - (\phi + \psi)$

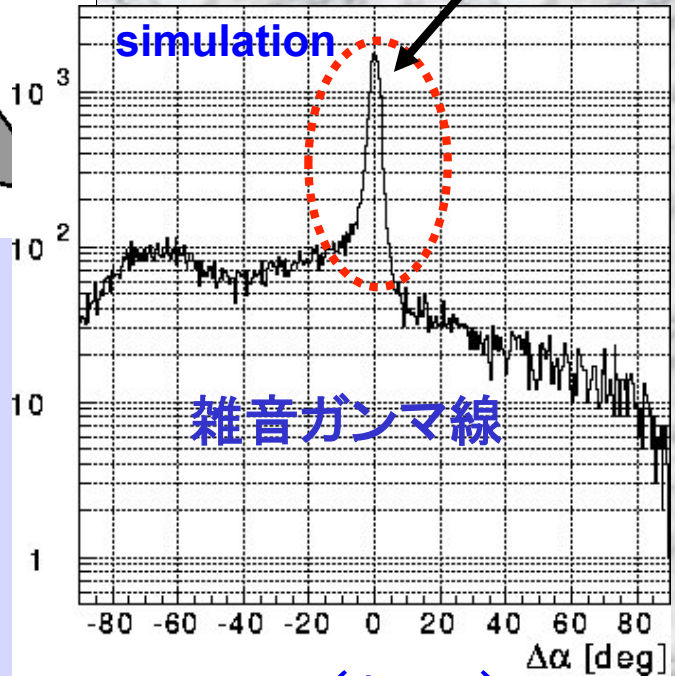
電子の散乱を最小減に！  
散乱体にガスを用いる！

# ガンマ線方向再構成法



$\alpha$ 角を用いた雑音除去。

真のガンマ線  
 $\alpha - (\phi + \psi) = 0$

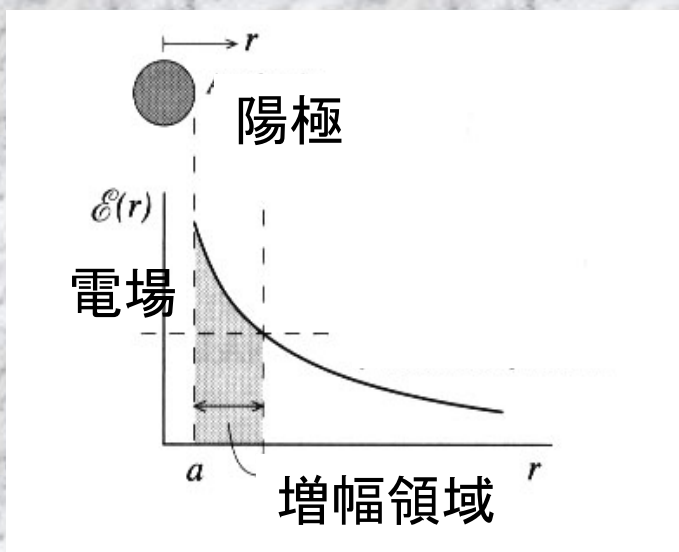
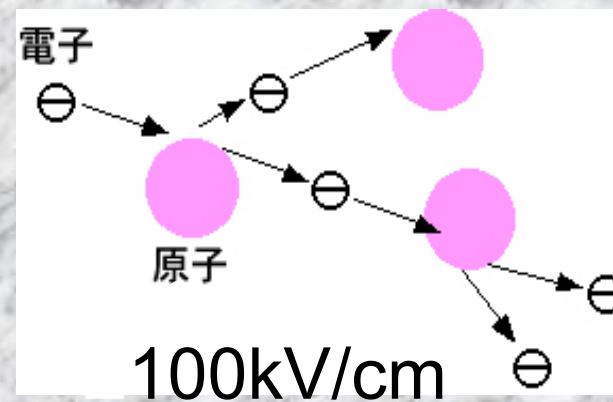
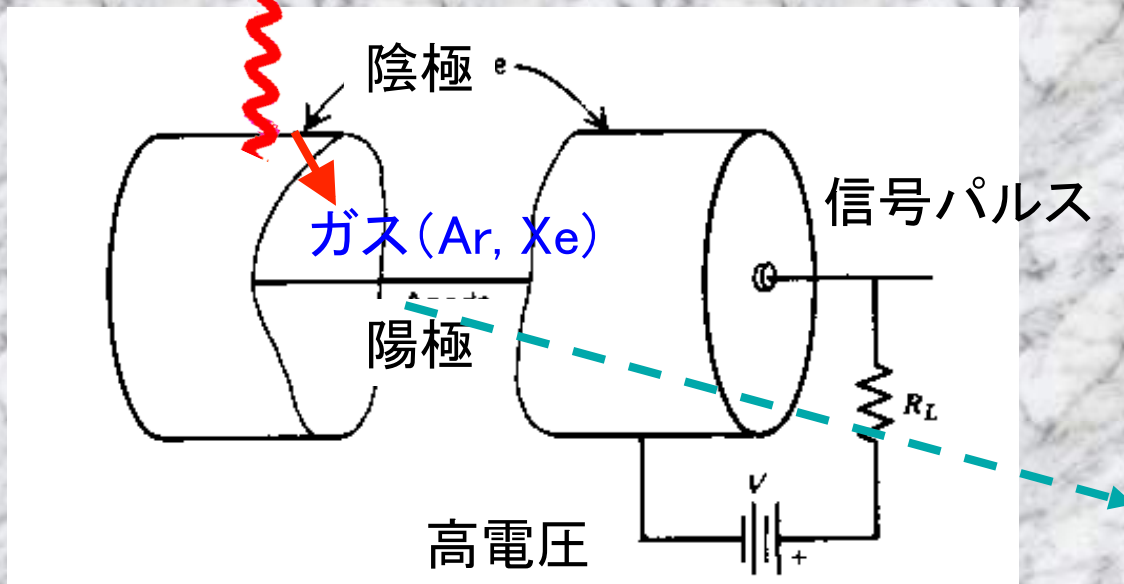


$\alpha - (\phi + \psi)$

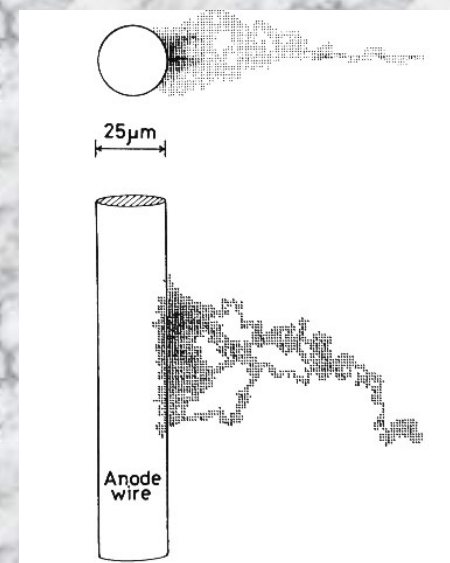
散乱体にガスを充てる！

# 放射線を捉える (ワイヤー比例計数管)

X,ガンマ線

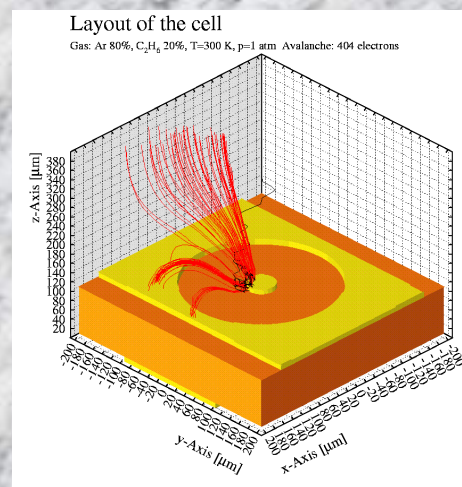
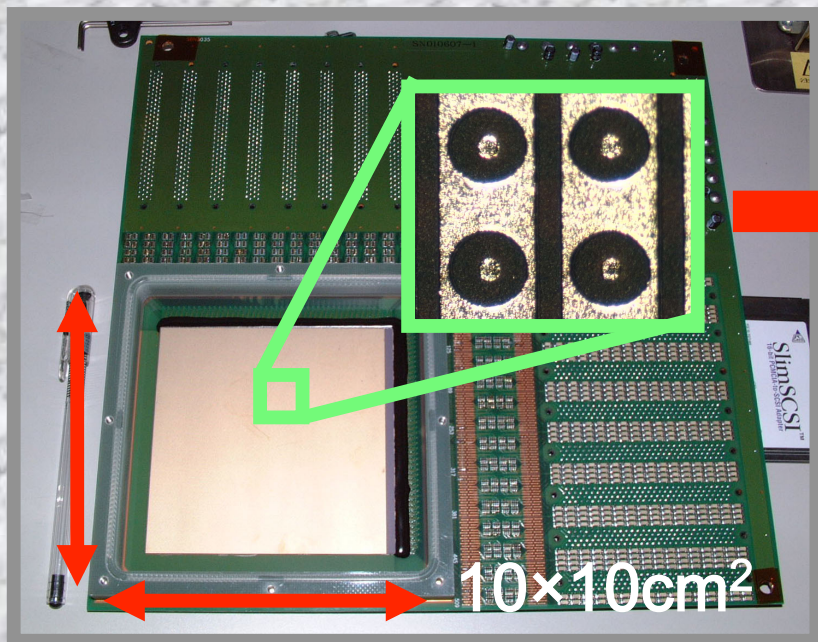
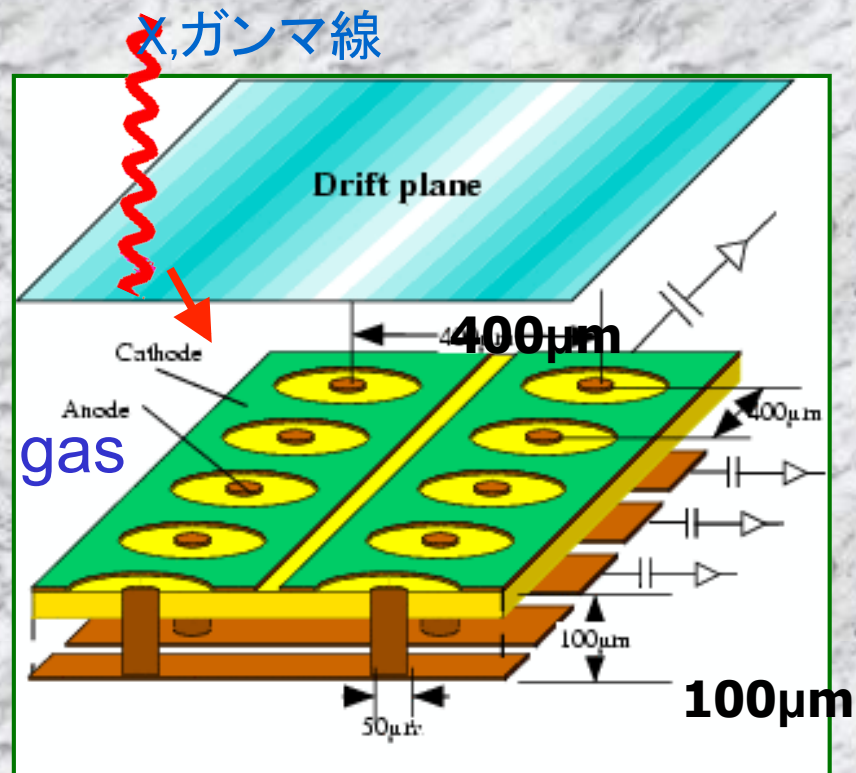


なだれ現象  
電子の数が数万  
倍以上に増化

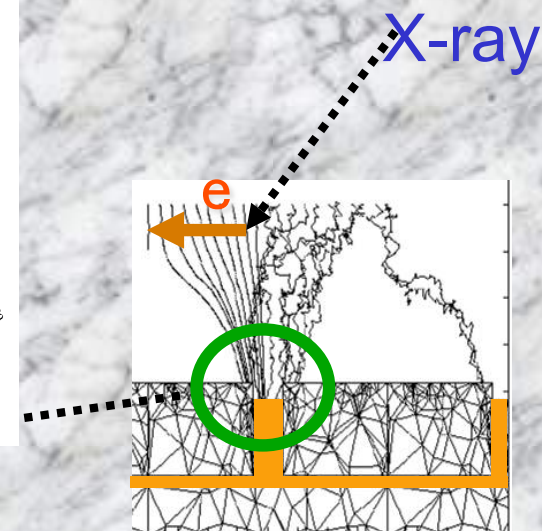


# New Technology $\mu$ -PIC Detector

- Micro Pixel Chamber
- 高位置分解能 ( $100 \mu\text{m}$ )
- 高増幅率 ( $\sim 10000$ )
- プリント基板製法
- 大強度放射線での動作可能  
京大オリジナル!



電子増幅



# New Technology

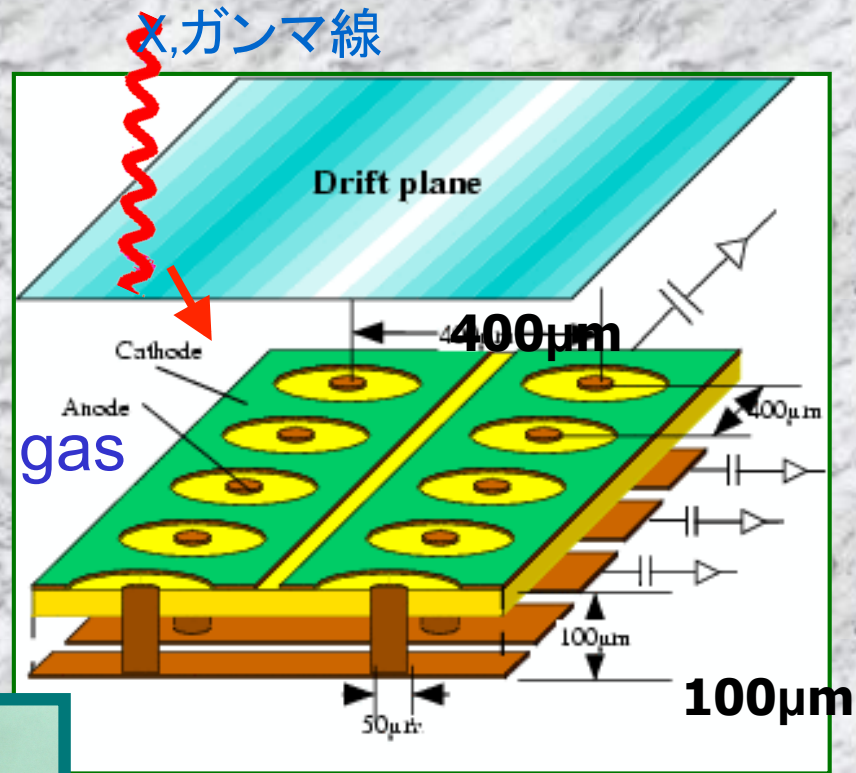
ector

er

( $\mu\text{m}$ )

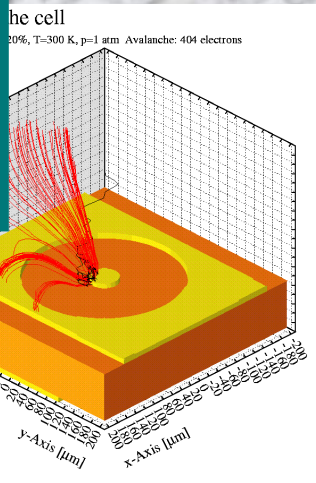
probe

動作可能

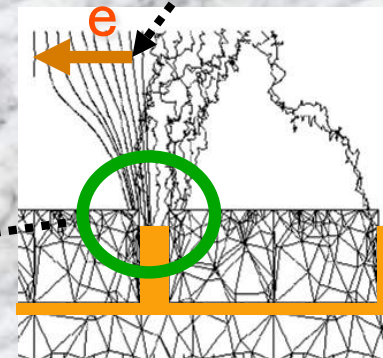


1cm

banana plug



X-ray

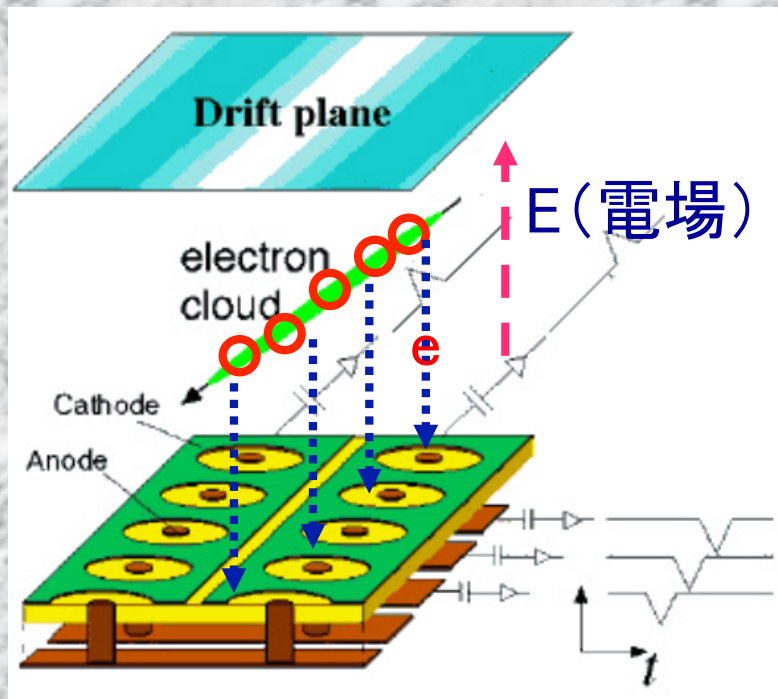


1cm

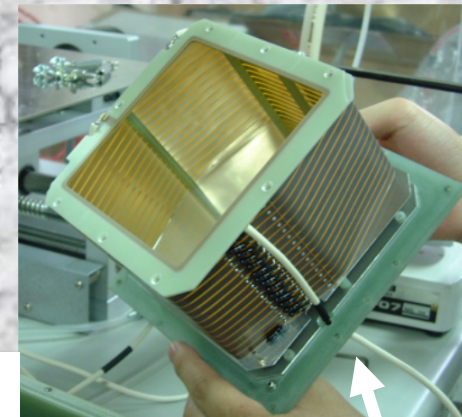
Xe:C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 70:30

電子増幅

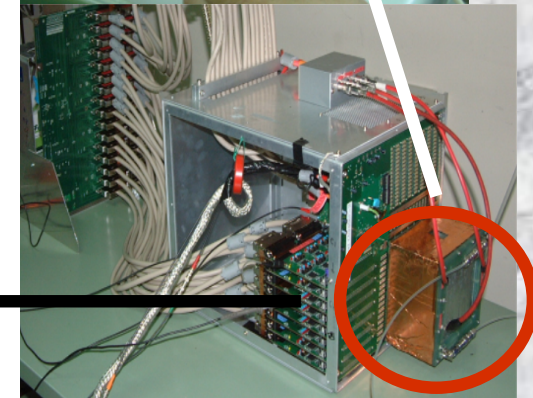
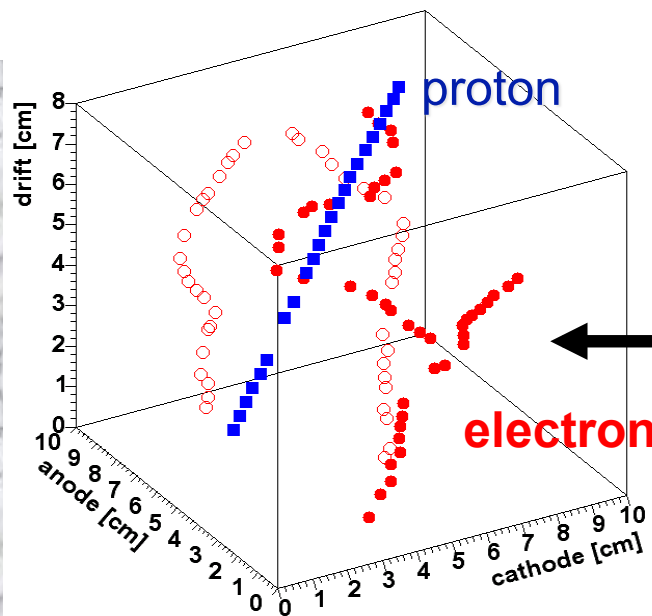
# m-TPC (電子霧箱: 電子の3D画像測定)



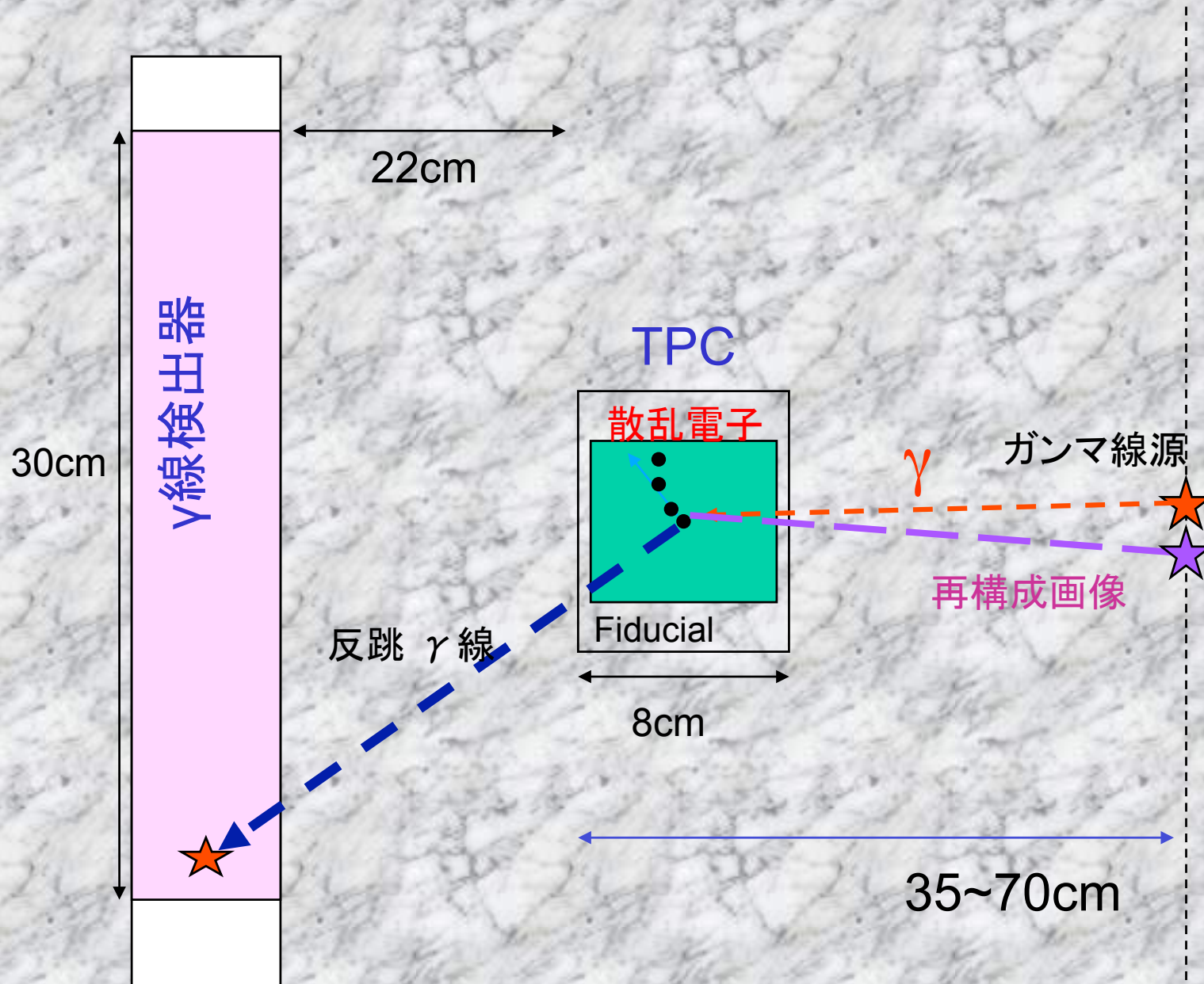
X, Y from  $\mu$ -PIC  
+  
Z from timing  
↓  
3D Track



コンプトン散乱電子の  
3D画像測定

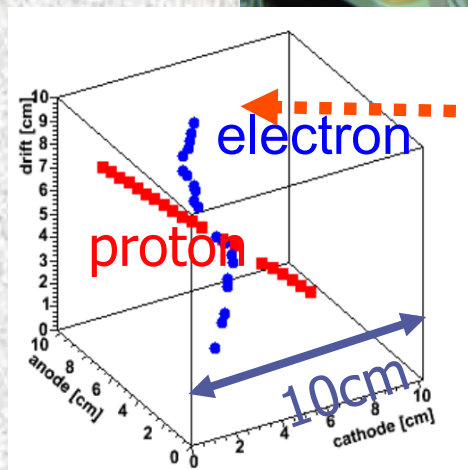
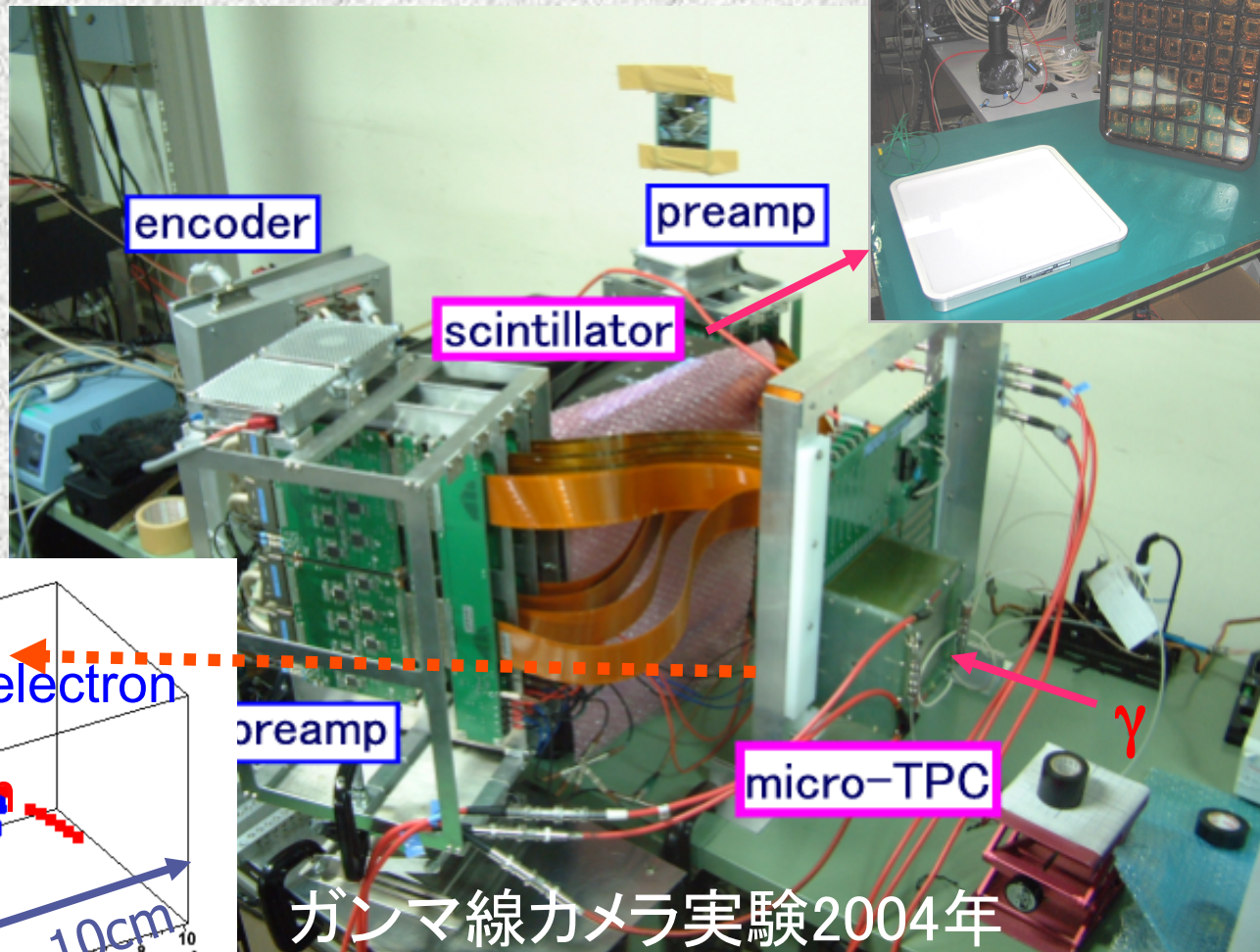


# カメラ構成図



# カメラ構成図

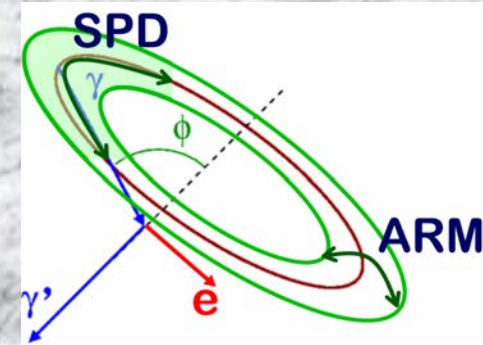
## プロトタイプ試験風景



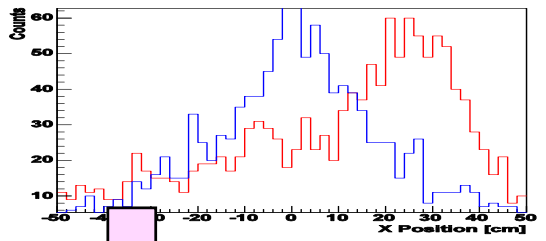
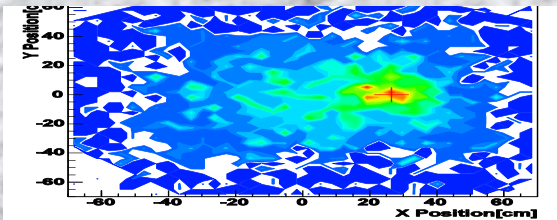
ガンマ線カメラ実験2004年

# 雑音ガンマ線除去能力

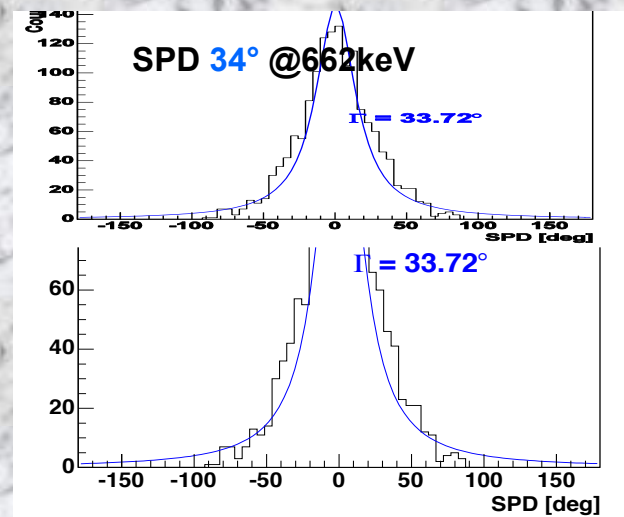
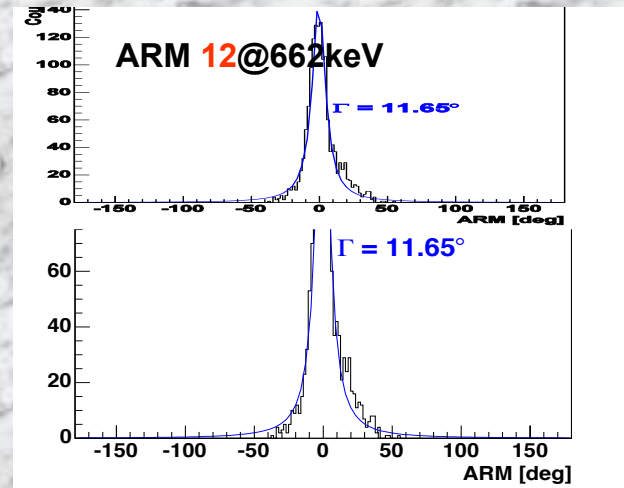
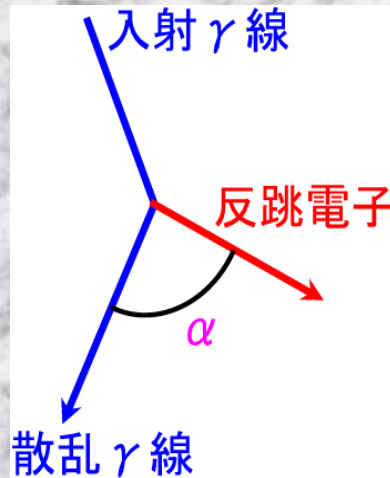
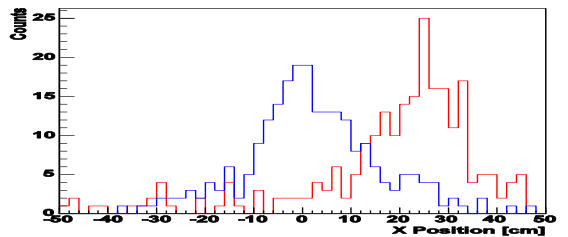
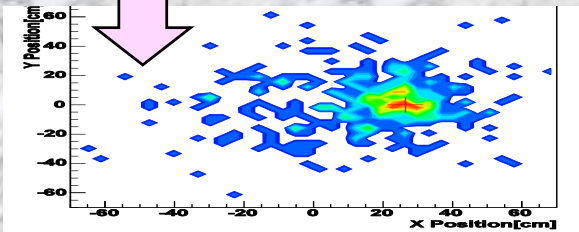
$$|\alpha_{\text{measure}} - \alpha_{\text{kin}}| < \sim 20^\circ$$



No kinematical cut

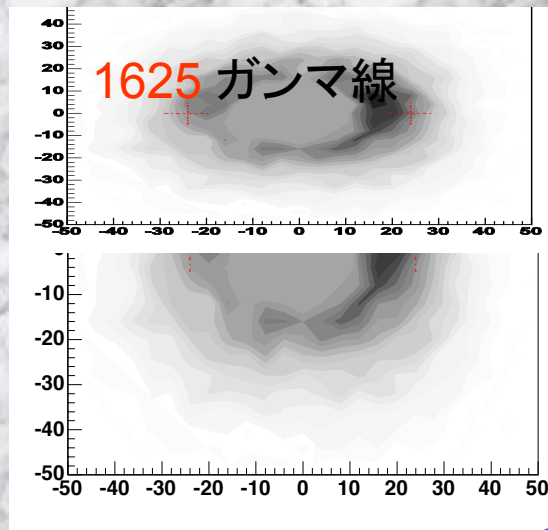
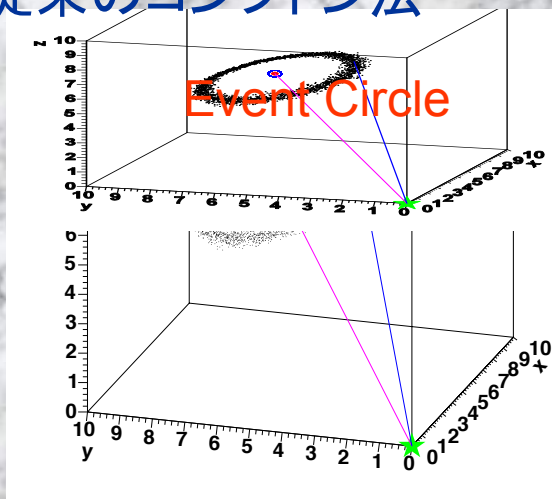


Kinematical cuts!

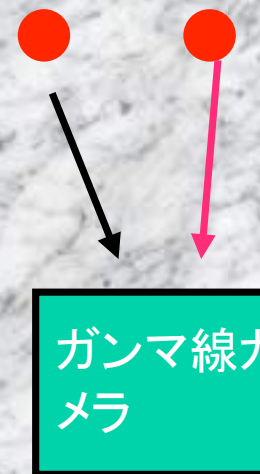


# 電子飛跡コンプトン法による画像の改善

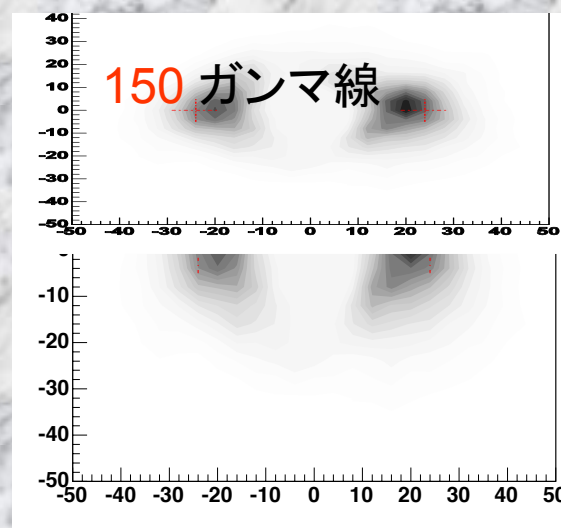
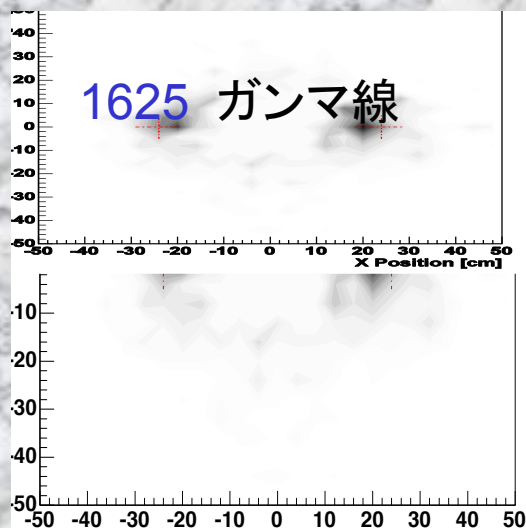
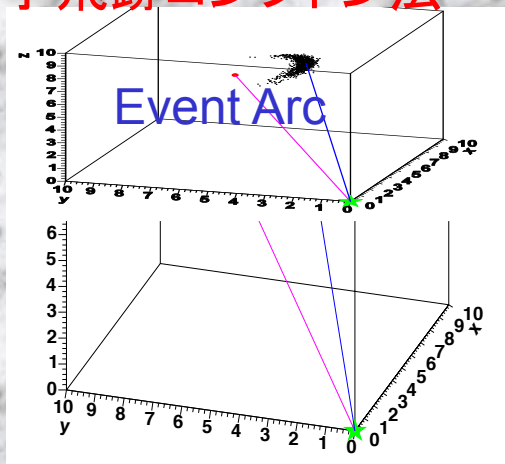
## 従来のコンプトン法



同じエネルギーの2つのガンマ線源

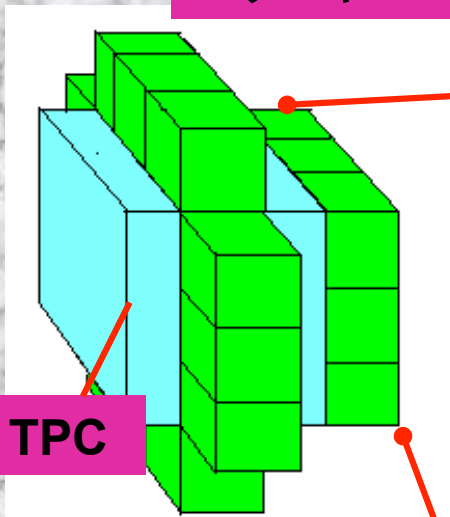


## 電子飛跡コンプトン法

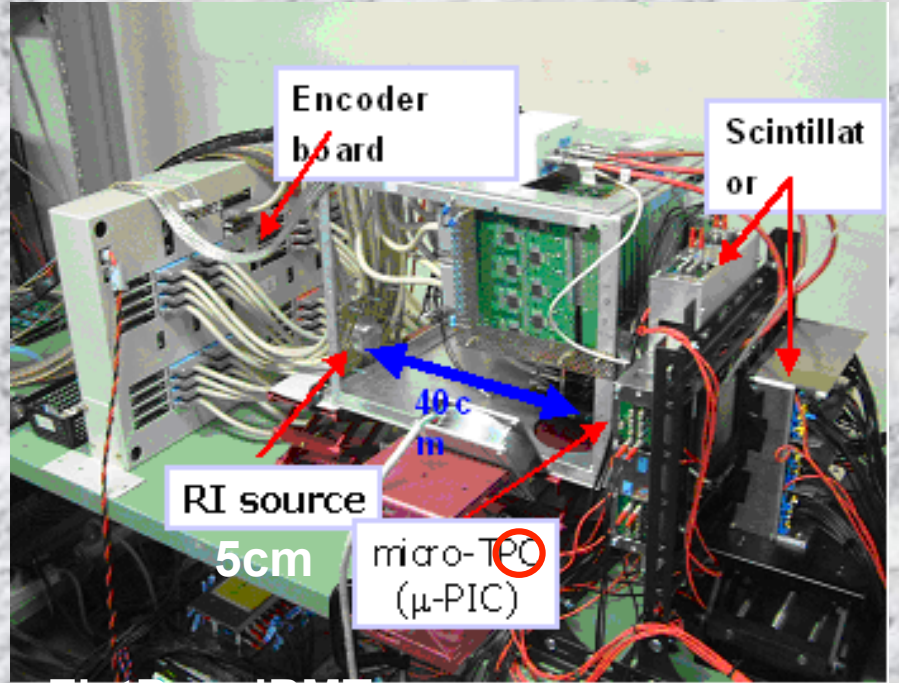
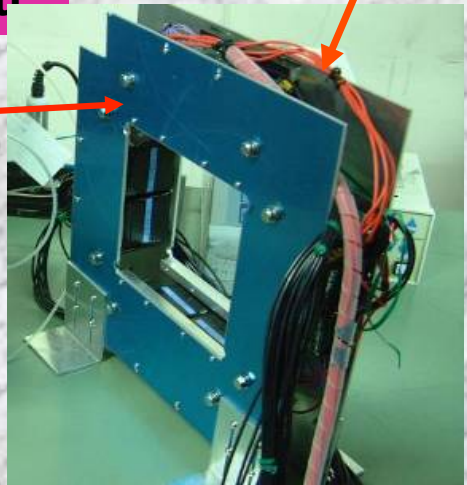
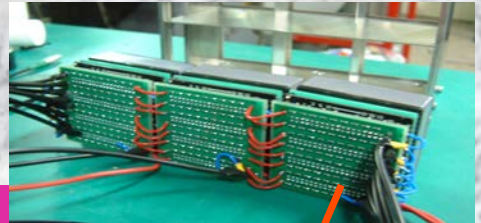


# カメラの改良

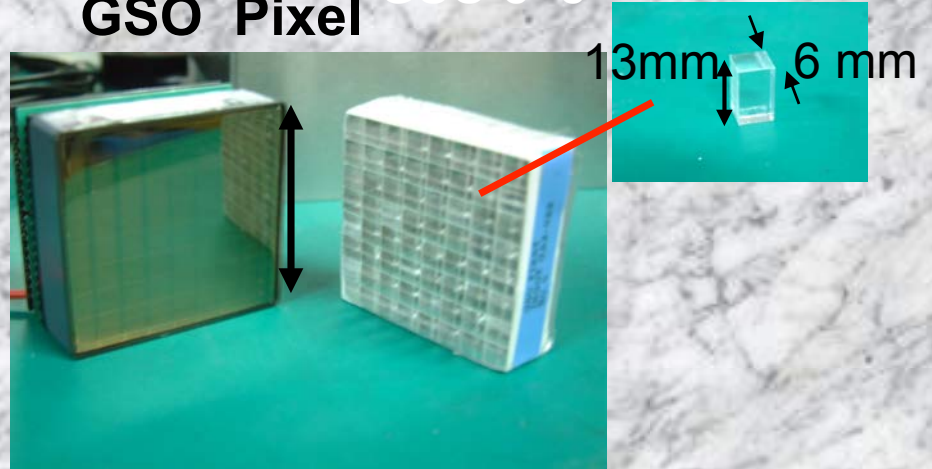
エリマキScinti



底面  
Scinti

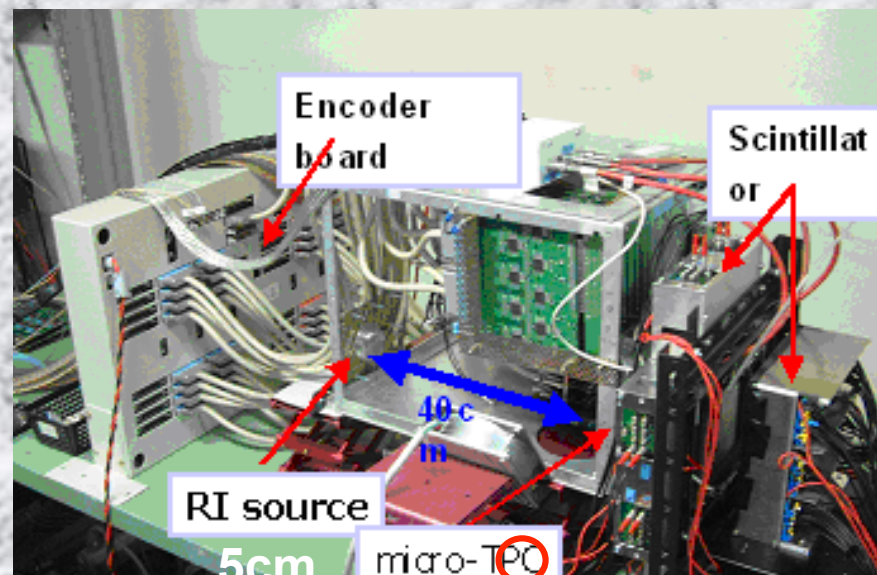
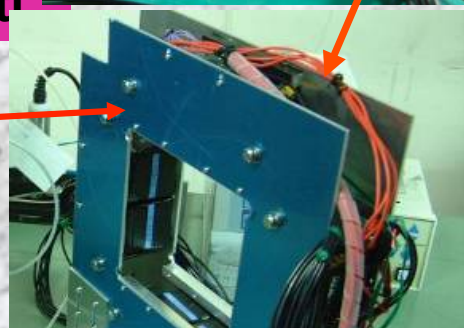
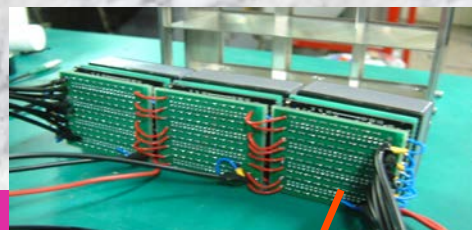
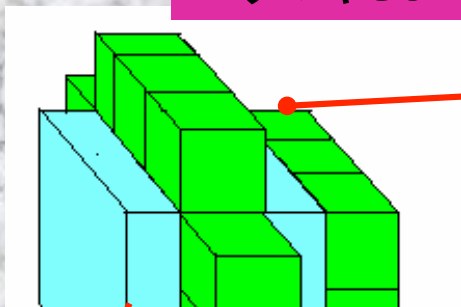


FlatPanelPMT  
H8500  
GSO Pixel GSO 8x8



# カメラの改良

エリマキScinti

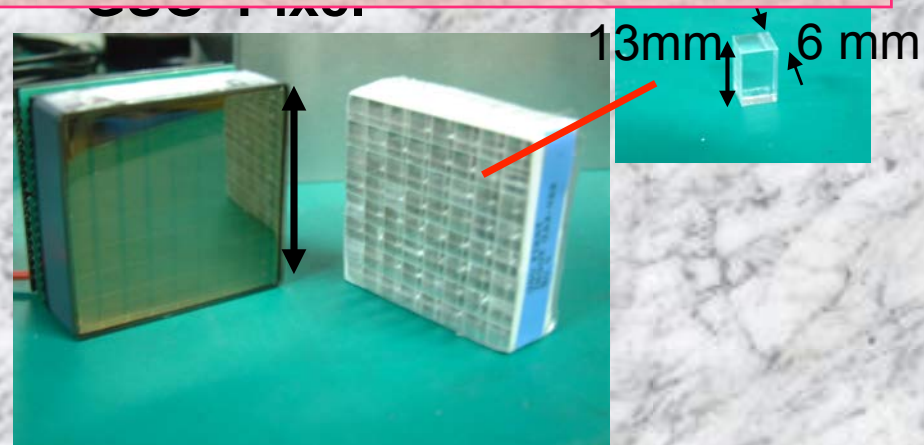


来年初め30cm  $\mu$  TPCガンマ線カメラが完成予定！

底面  
Scinti

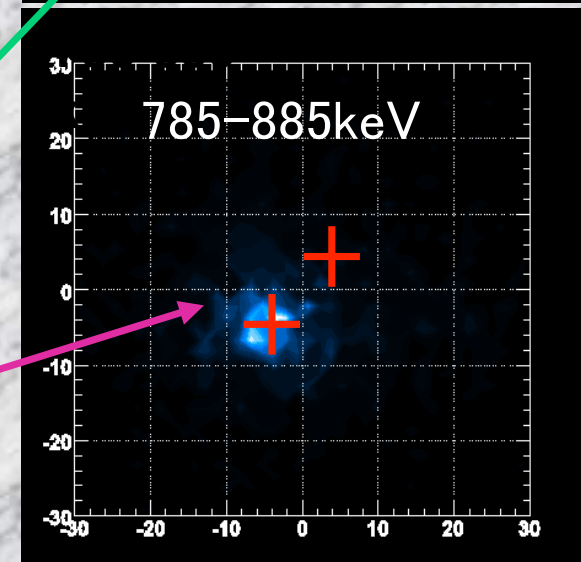
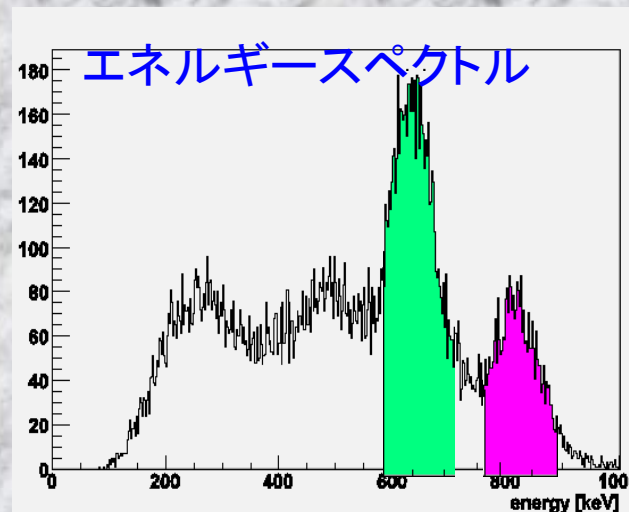
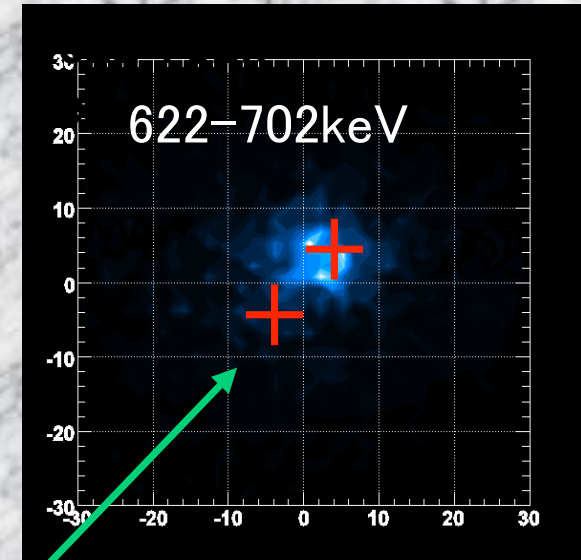
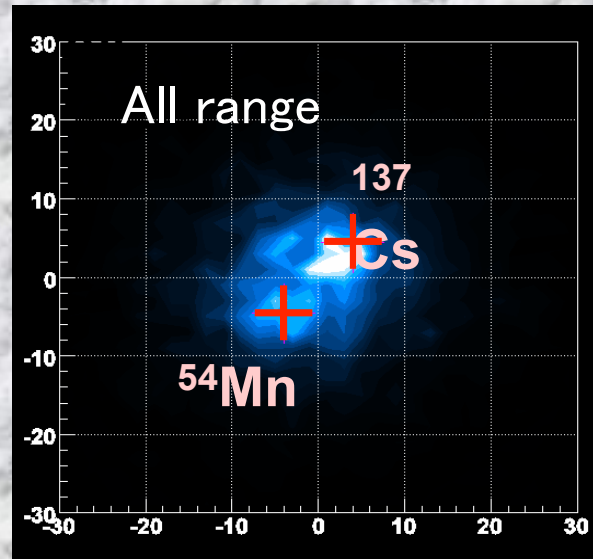


3x3 array



# 異なるエネルギーのガンマ線同時撮影 (改良型カメラ)

$^{137}\text{Cs}$  : 662keV,  
0.89MBq  
 $^{54}\text{Mn}$ : 835keV,  
0.65MBq

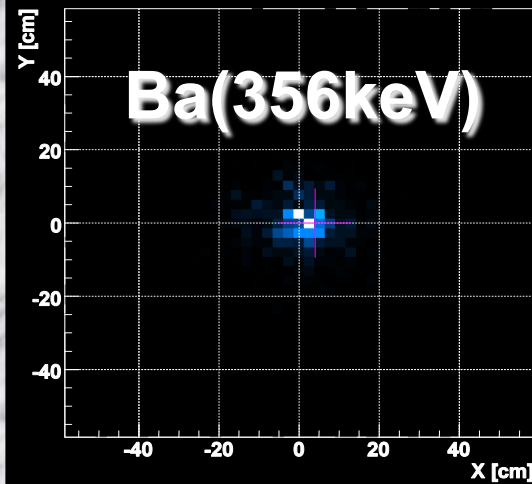


# 異なるエネルギーのガンマ線同時撮影 (改良型カメラ)

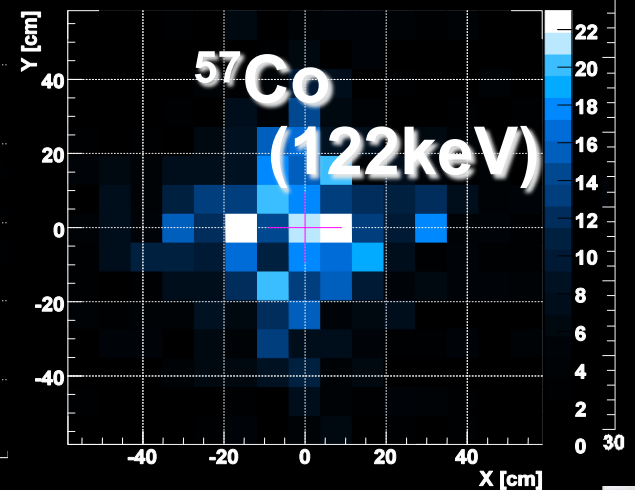
RI source 40cm from TPC

$^{137}\text{Cs}$  : 662keV,  
0.89MBq  
 $^{54}\text{Mn}$ : 835keV,  
0.65MBq

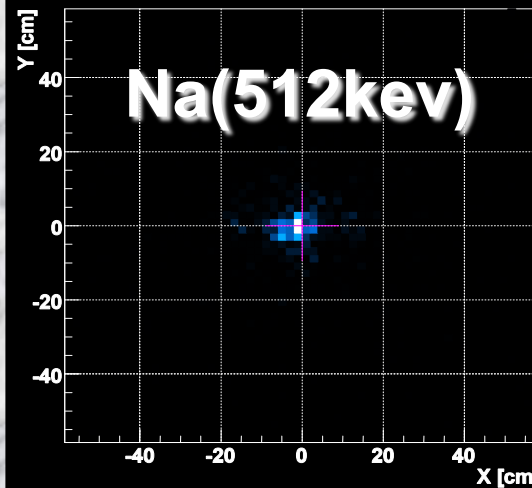
uPIC12\_2/20050818/per15



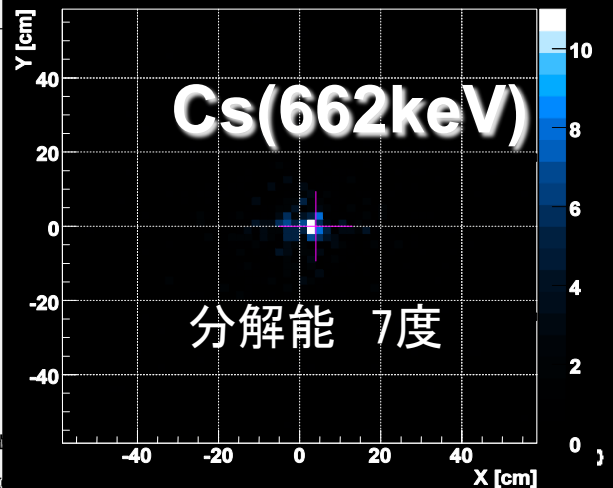
uPIC12\_2/20050818/per2



uPIC12\_2/20050818/per5



uPIC12\_2/20050818/per6



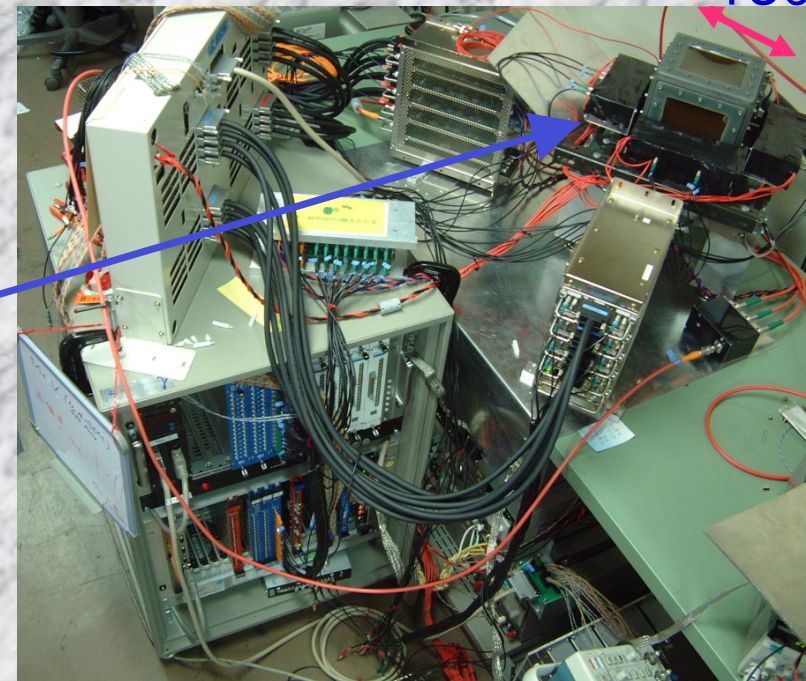
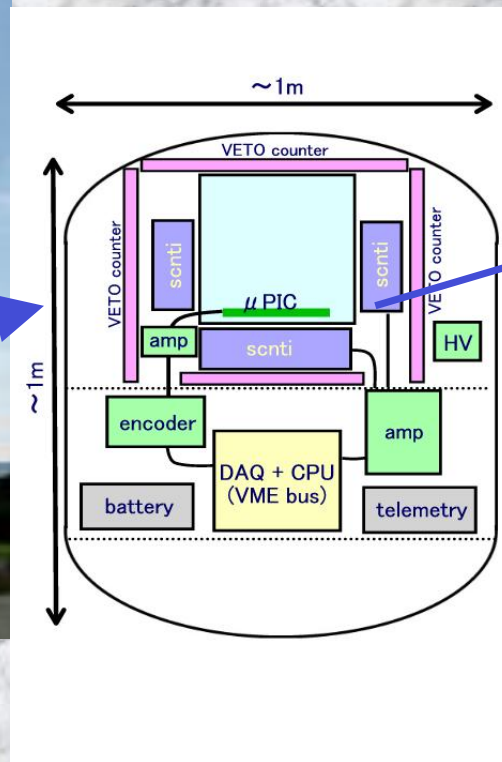
# 気球実験を目指して！

来年 試験装置を用いた気球実験を予定。

- ・ 6時間の観測
- ・ 10cm TPC +GSO 6mm-pixel
- ・ 100keV-1MeV **新しい観測領域の開拓**



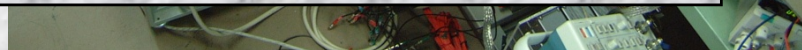
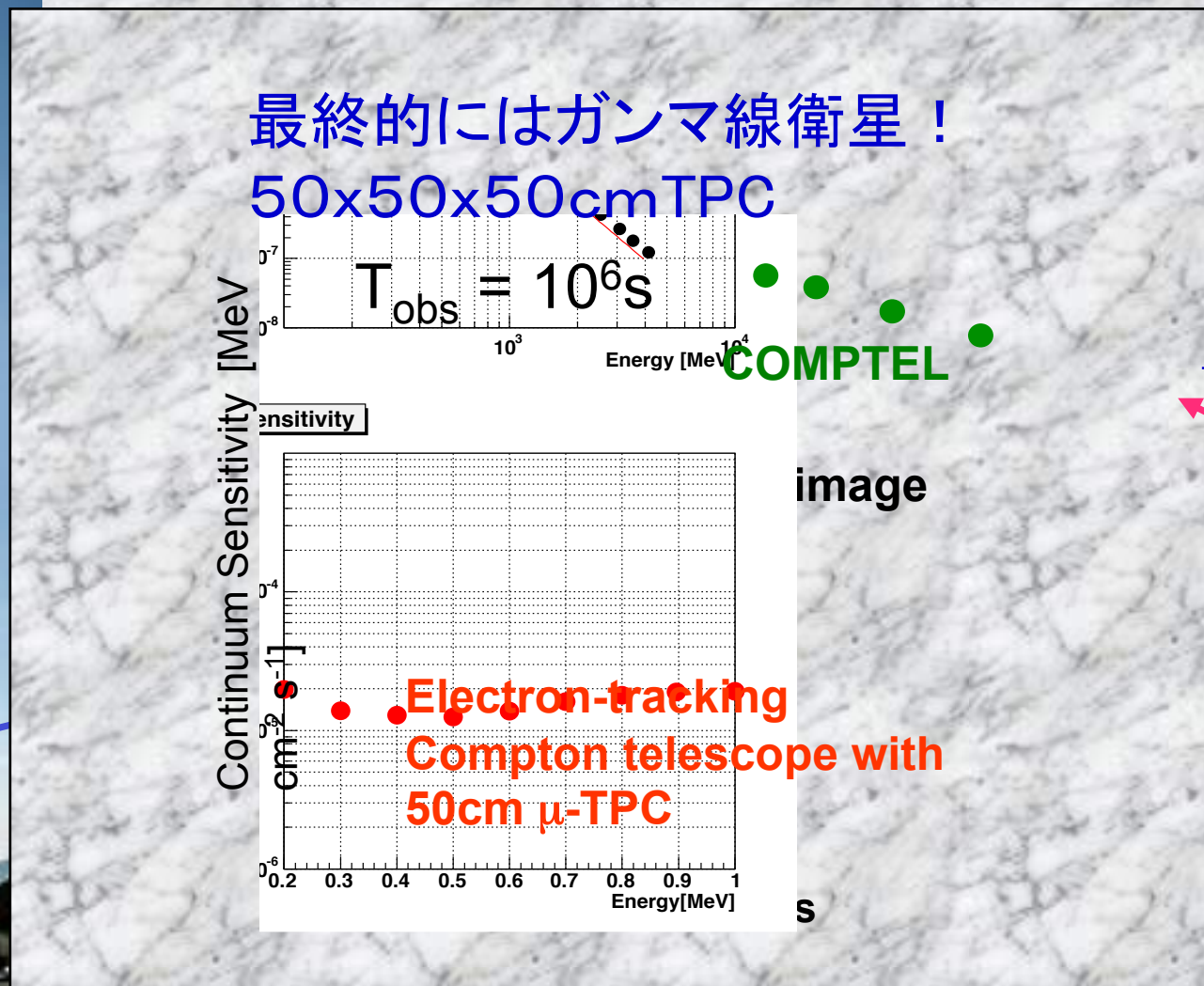
三陸 JAXA気球  
in 2006



# 気球実験を目指して！

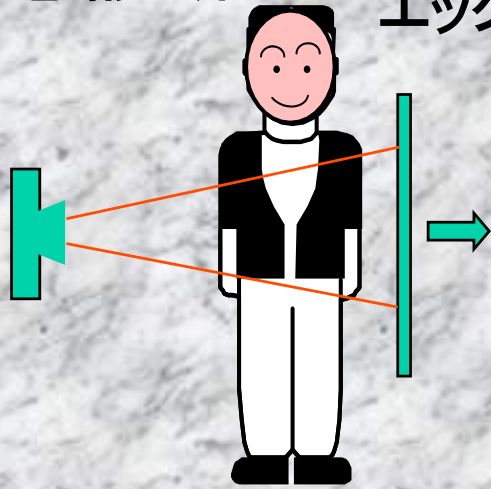


三陸 JAXA気球  
in 2006

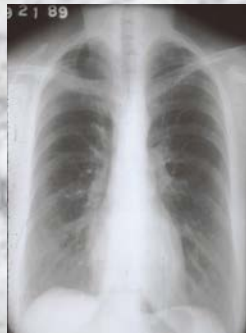


# 核医学(形態画像と機能画像)

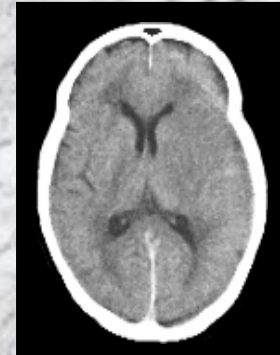
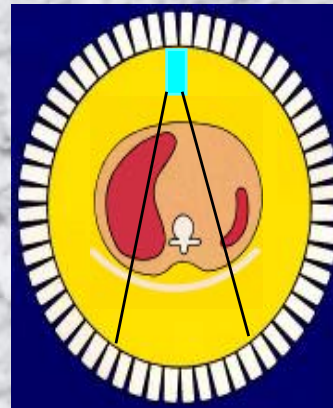
形態診断



エックス線写真



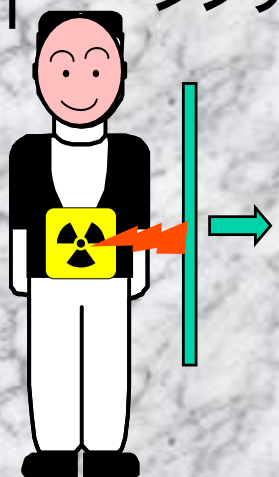
CT



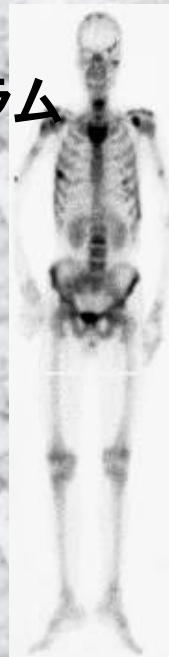
MRI



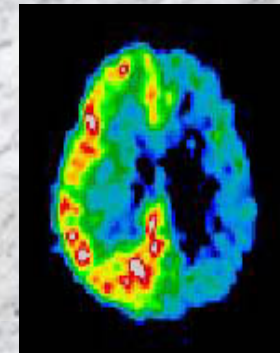
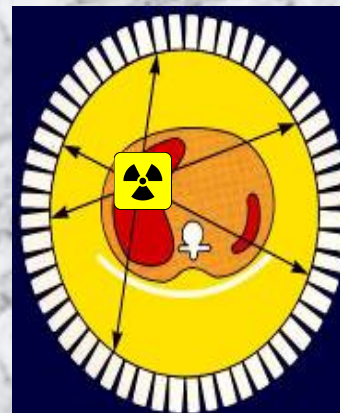
■ 機能診断



シンチグラム

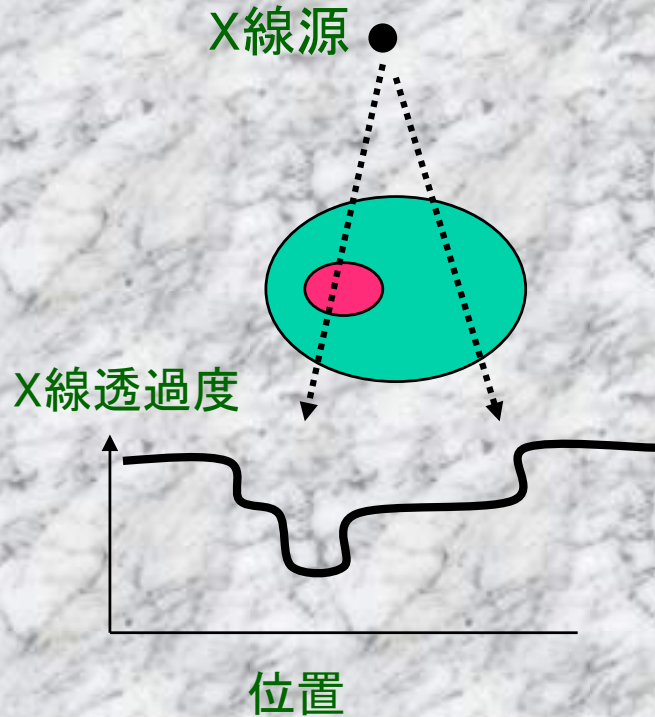


SPECT・PET



福井大 米倉教授の資料を改変

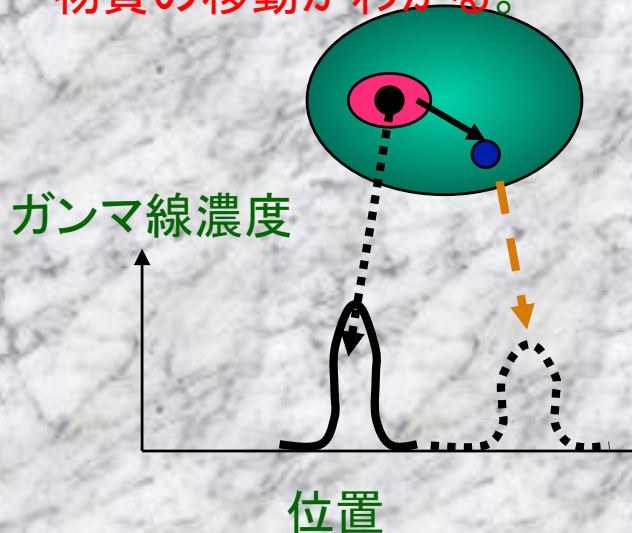
# X線とガンマ線診断



- ・X線撮影は体内の密度差が見える。
- ・密度差の小さい物質の移動（体内代謝）が見えない。
- ・がんは死んだ細胞の塊として見える。

高画質“！！”

特定物質にマーキング、  
物質の移動がわかる。

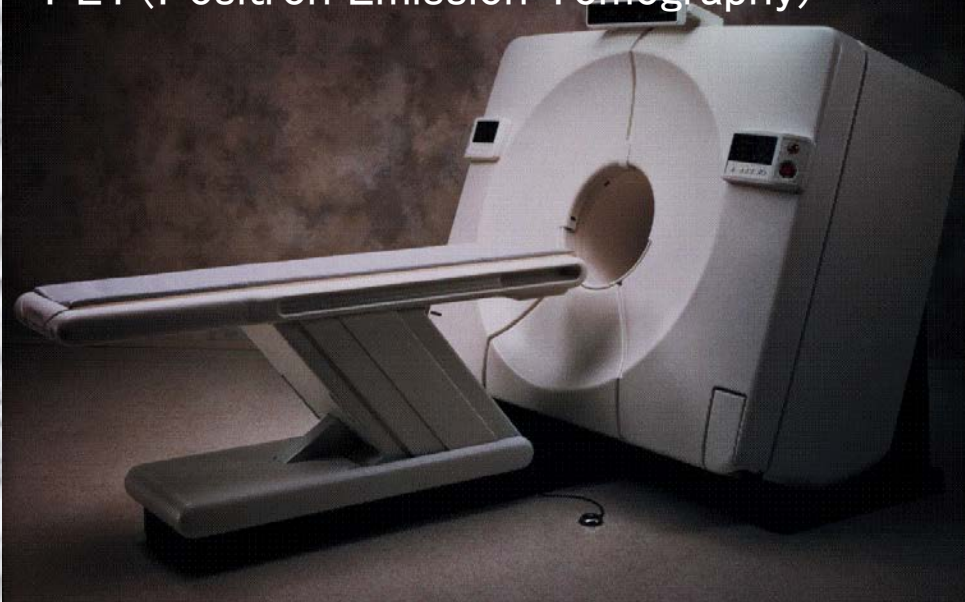


- ・ 特定物質にガンマ線源で印(トレーサ)
- ・ トレーサの体内代謝の観測が可能、  
(がん細胞の新陳代謝が直接観測)
- ・ 分子単位の体内移動の観測。  
(原理的に数ガンマ線で位置測定可能)

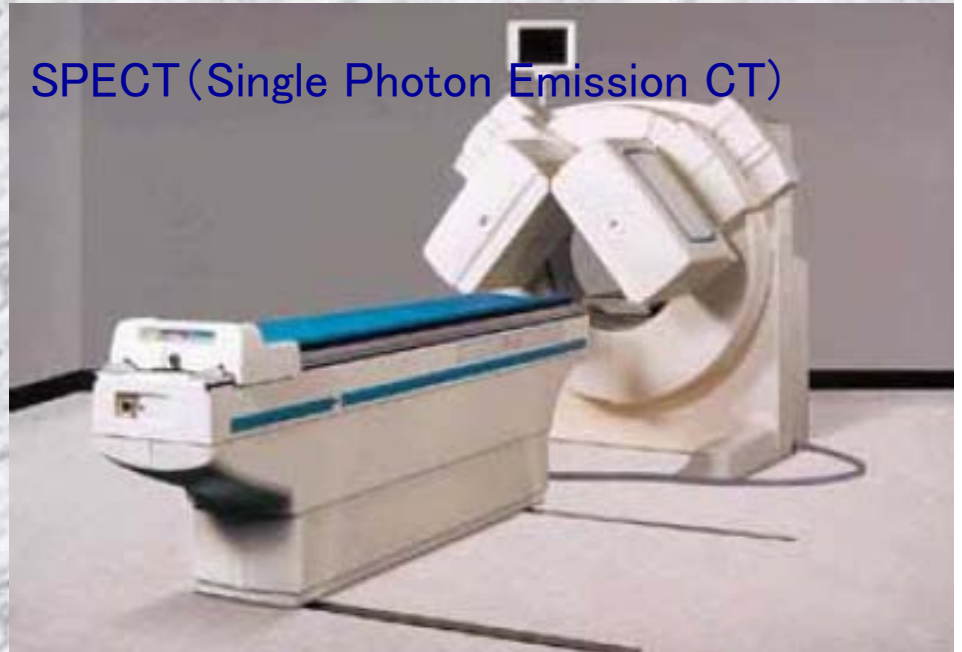
分子イメージング！！

# 医療用ガン線 画像装置

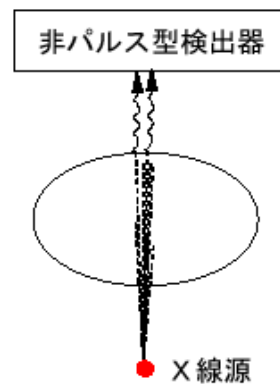
PET (Positron Emission Tomography)



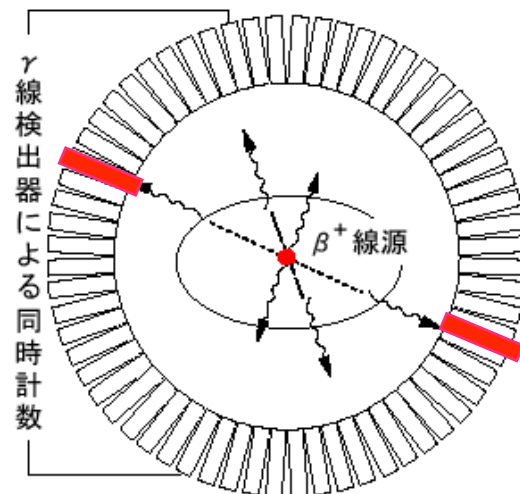
SPECT (Single Photon Emission CT)



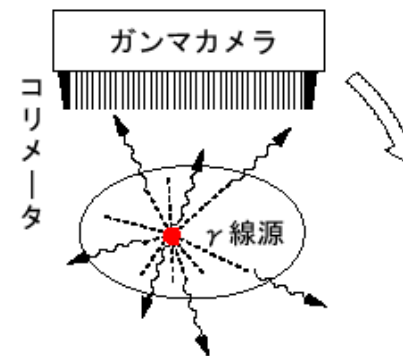
# 医療用ガン 画像装置



(A) X線イメージング



(B) PET

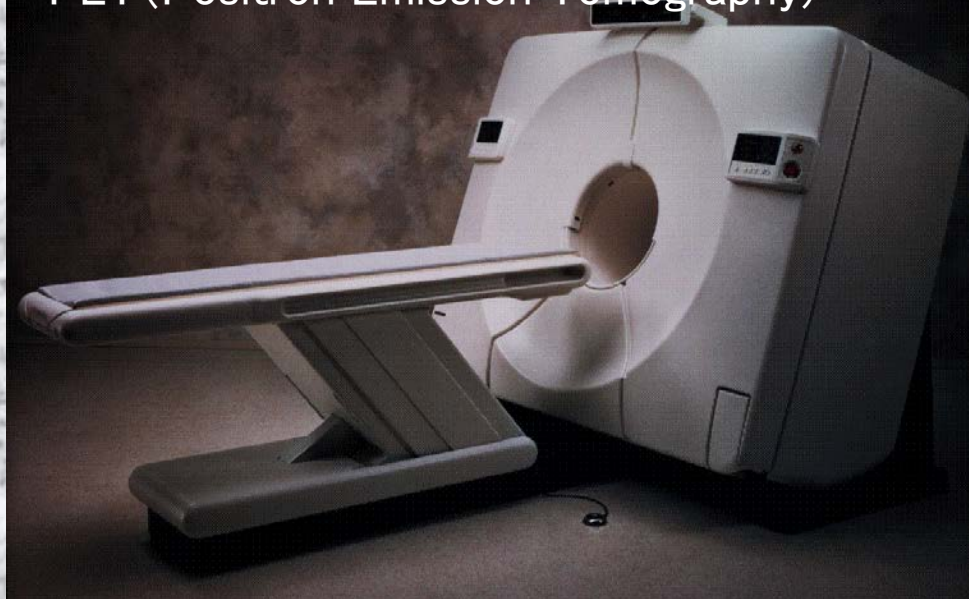


(C) SPECT

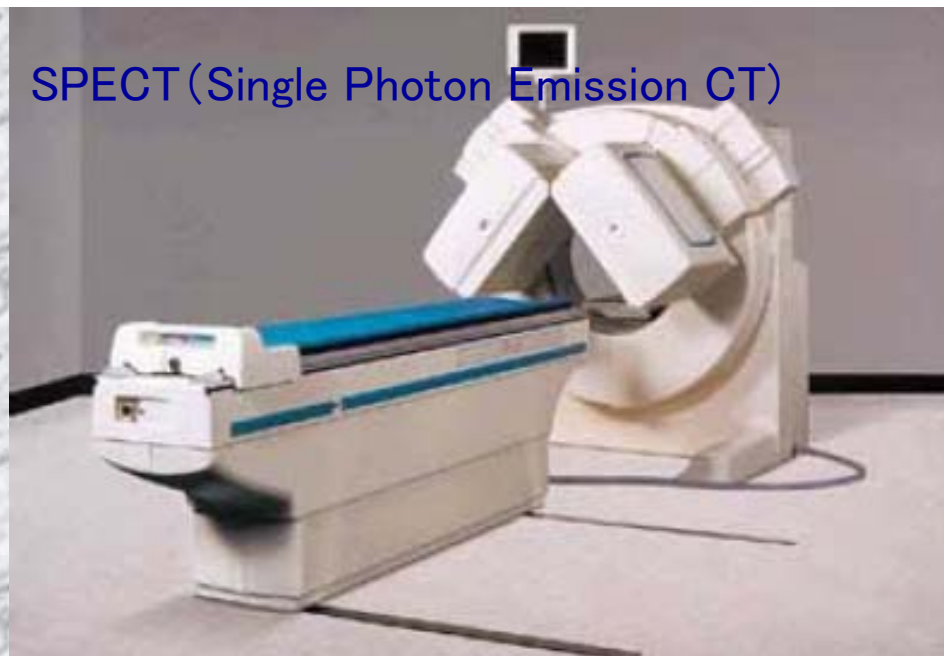
図1 X線イメージングと核医学イメージングの比較

[資料提供]放射線医学総合研究所

PET (Positron Emission Tomography)



SPECT (Single Photon Emission CT)



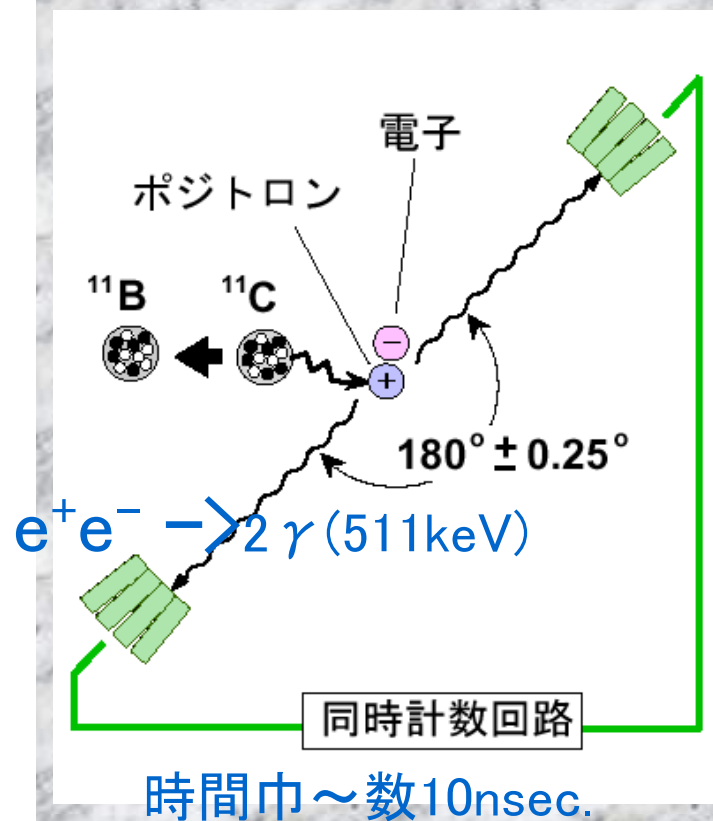
# PET

同位体(アイソトープ)

表1 主なPET用放射性医薬品  
(日本で臨床使用されているもの)

放射性核種	半減期	化合物	測定機能
炭素-11	20分	<sup>11</sup> C 標識 一酸化炭素 二酸化炭素 メチオニン 酢酸 N-メチルスピペロン	血液量 pH 腫瘍、肺機能 心筋 ドーパミン
窒素-13	10分	<sup>13</sup> N 標識 アンモニア	心筋、腫瘍
酸素-15	2分	<sup>15</sup> O 標識 酸素 <sup>15</sup> O 標識 水	酸素代謝 血流量
フッ素-18	110分	<sup>18</sup> F 標識 フルオロデオキシ グルコース(FDG) フルオロドーパ	糖代謝、腫瘍 ドーパミン

[資料提供] 放射線医学総合研究所



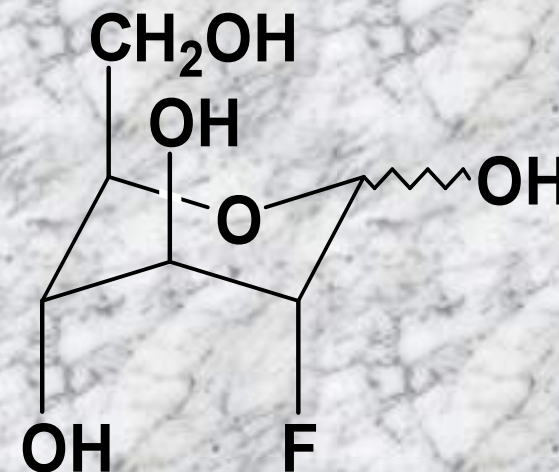
- ・炭素(C)、酸素(N)など体に必要な元素が使える
- ・ブドウ糖など代謝に密接に関係した物質が可能
- ・短寿命核 サイクロトロンが必要 ⇒ 高価

# フルオロデオキシグルコース **FDG**

2-<sup>[18F]</sup>**F**luoro-2-**D**eoxy-**D**-**G**lucose

- ・ ブドウ糖に類似した挙動
- ・ ブドウ糖代謝を反映した取り込み
- ・ 細胞の代謝活性を評価できる

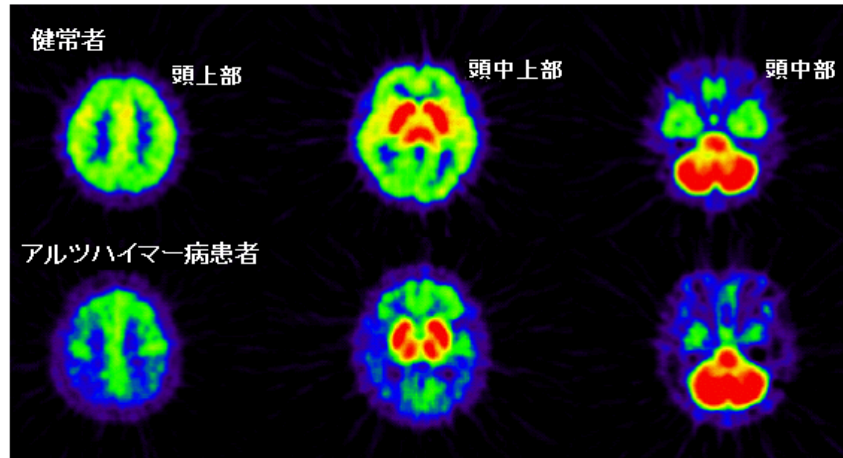
フッ素18(半減期110分)で標識



ブドウ糖代謝の盛んな組織  
能、心臓 悪性腫瘍

# PET画像

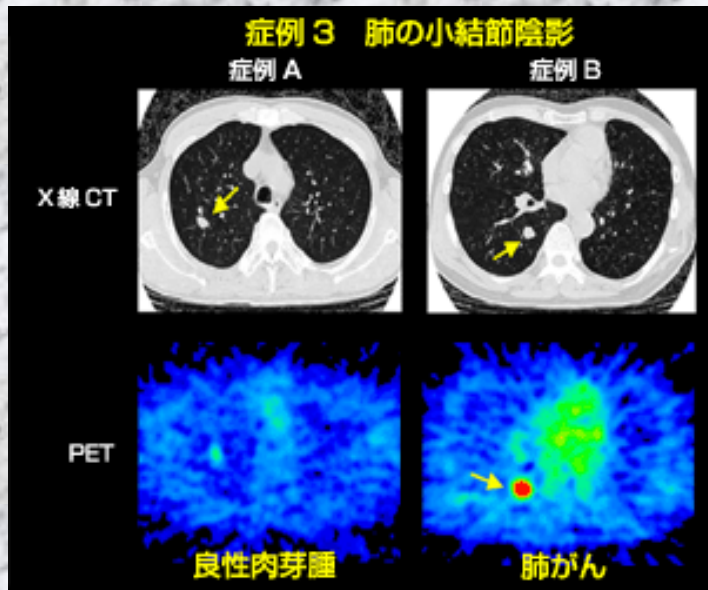
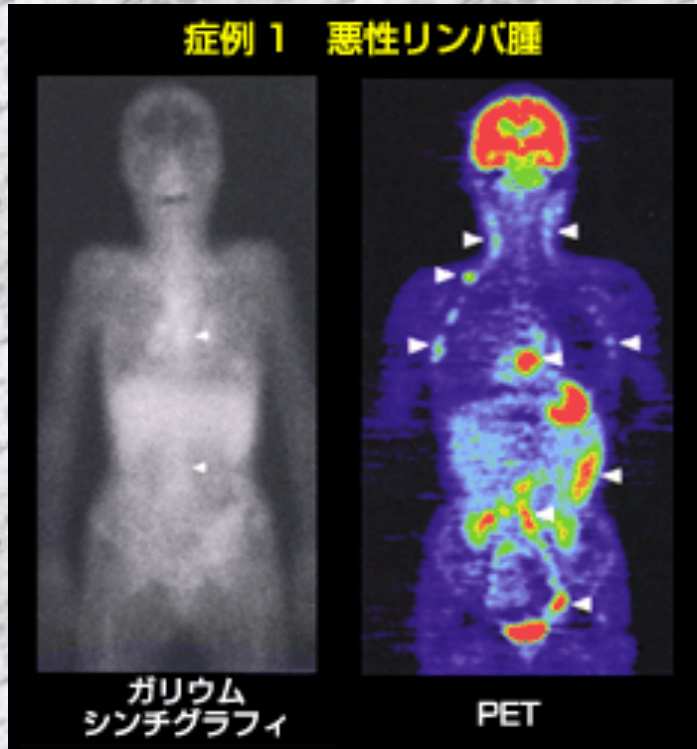
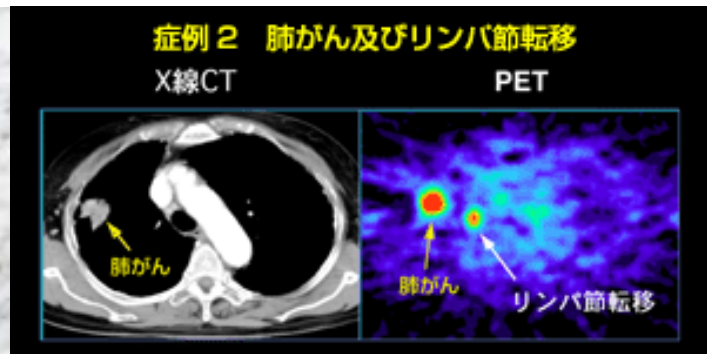
ブドウ糖； 活動性の高い部位  
に集中(能、ガン)



<sup>11</sup>C-MP4A(脳内局所のアセチルコリンエステラーゼ活性の測定用薬剤)  
によるPET画像:放射能集積;赤(高い)⇨黄⇨緑⇨青(低い)  
酵素活性 ;赤(高い)⇨黄⇨緑⇨青(低い)

図9 頭部PET検査により再構成した神経伝達物質  
アセチルコリンの分解酵素活性を示す画像

[資料提供]放射線医学総合研究所

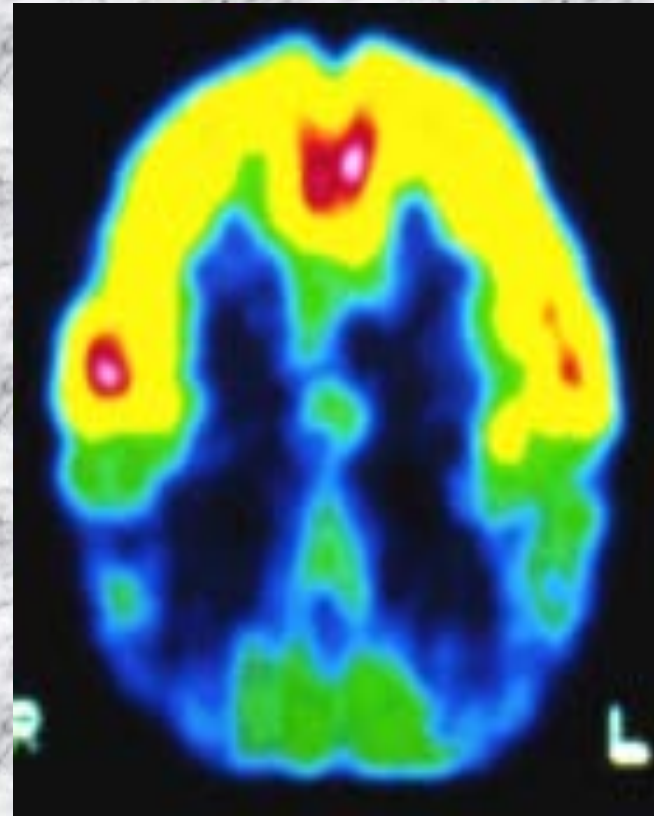


浜松ホトニクス資  
料

# アルツハイマー病



エックス線CT



ブドウ糖代謝

福井大 米倉教授の資料を改変

# 機能画像診断

- 非侵襲性(低侵襲性)
  - 外来でも安全にできる検査
- 早期診断
  - 機能障害 → 形態変化
- 定量的測定
  - 治療方針の決定
  - 経過観察, 治療効果の追跡

# 分子イメージングとは？

- 分子 – 構造・動態 – の画像？

“molecule imaging”

- 生体内における分子挙動の画像化

“molecular imaging”

– 酸素・ブドウ糖代謝 (PET)

– 神経伝達機能 (PET・SPECT)

– 遺伝子発現の画像化

• DNA → mRNA → タンパク → 機能

福井大 米倉教授の資料を改変

# 分子イメージングとは？

- 分子 – 構造・動態 – の画像？

“molecule imaging”

- 生体内における分子挙動の画像化

“molec

もっと多くの物質を！  
同時に異なる機能測定！

- 酸素・ブドウ糖代謝 (PET)
- 神経伝達機能 (PET・SPECT)
- 遺伝子発現の画像化

• DNA → mRNA → タンパク → 機能

福井大 米倉教授の資料を改変

# ガンマ線医療3Dイメージ

□3次元CT(1ガンマ線線源でもOK)

□低線量、低被爆

□異なる試薬の同時測定

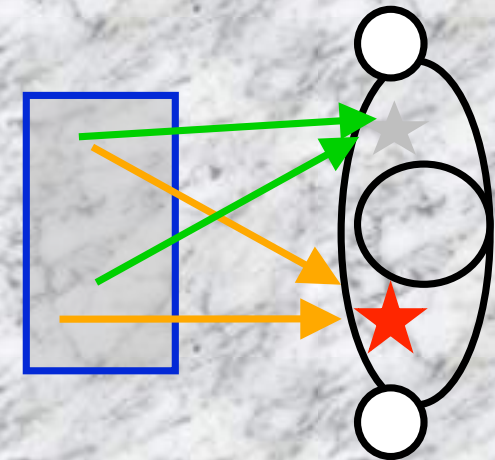
(フッ素:512keV, ヨウ素:358eV)

□核物質を選ばない!

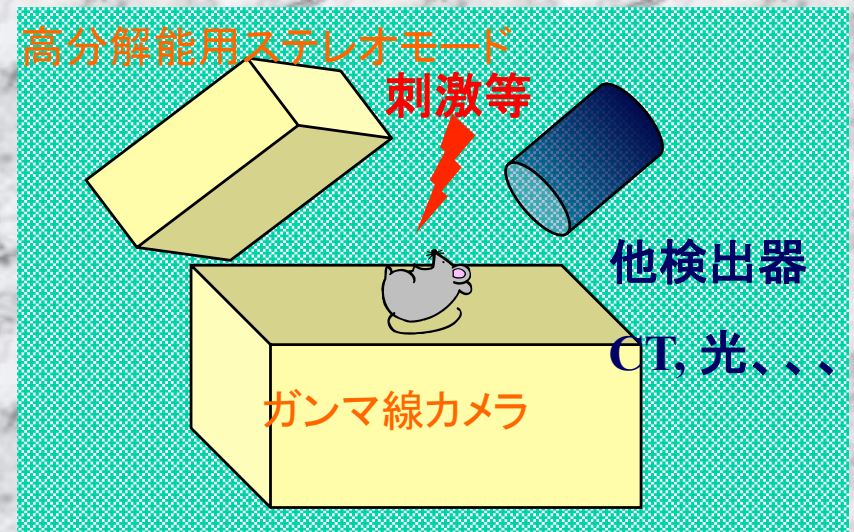
40以上の核種 (分子イメージング)

Ca, Fe, Na, Zn, Cu, Mn, S,

□安価

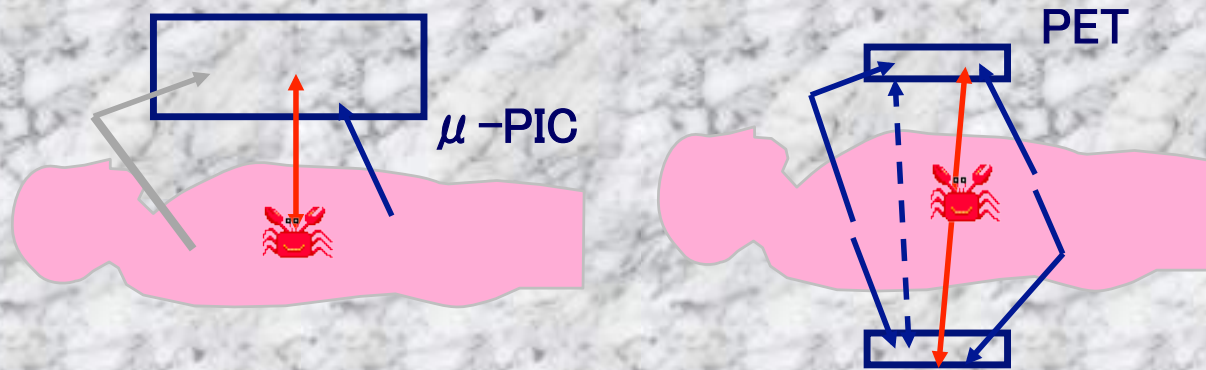


JST(先端分析機器開発事業)  
京大医、薬学部、日立メディコ、

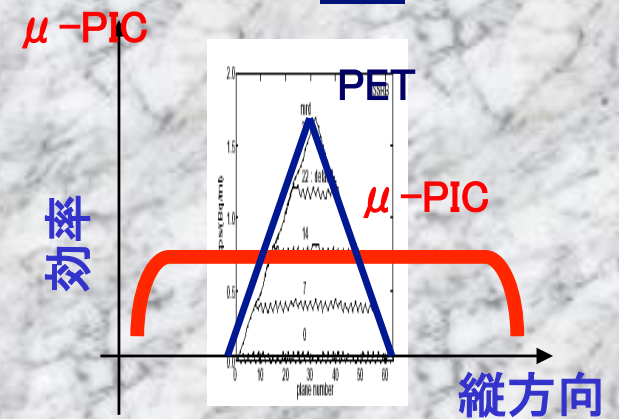
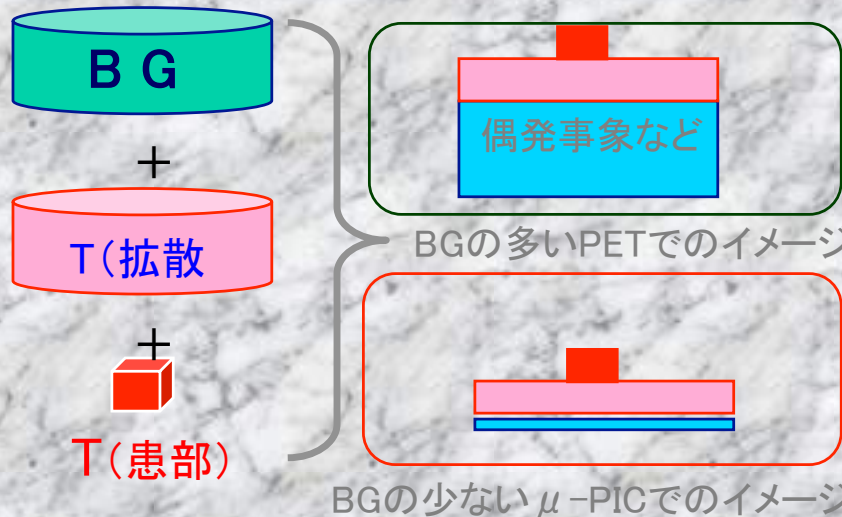
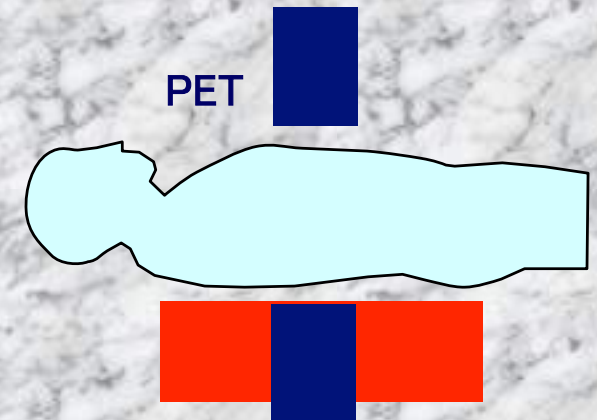


# バックグラウンドの比較

- 広視野の新型カメラでは拡散起源と認識可能

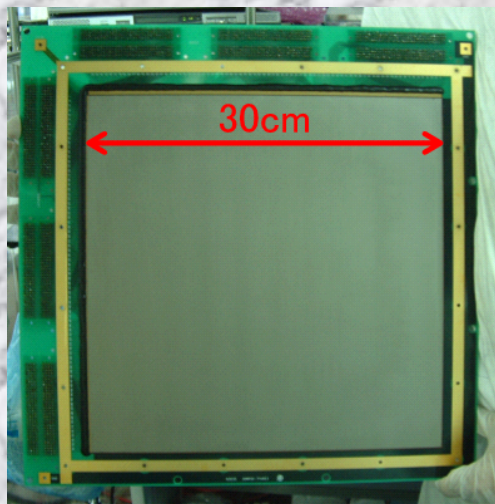


## 画像の一様性

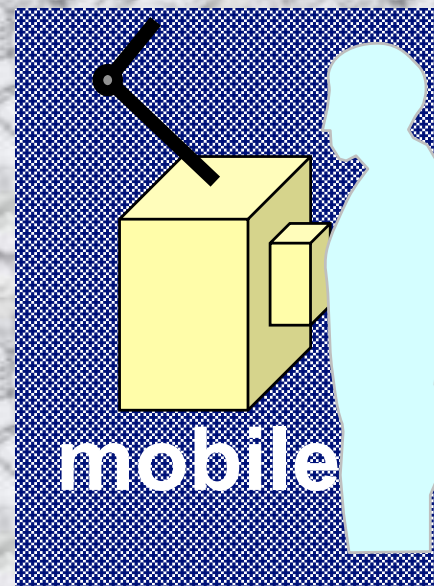
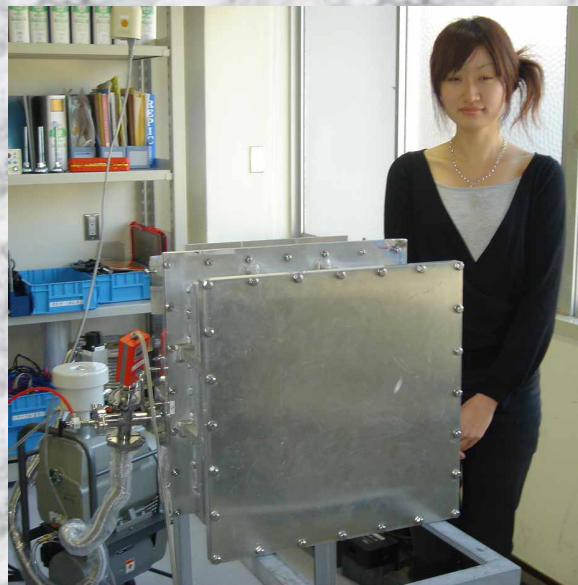


(長谷川智之「次世代のPET装置」より)

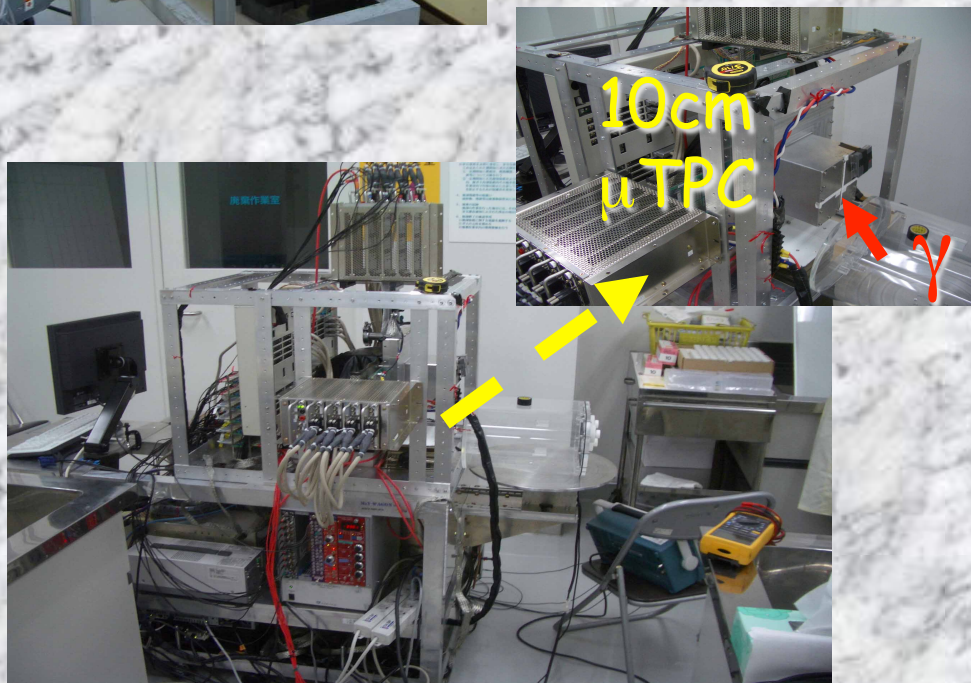
# 大型実用機実機を目指して！



30cm角  $\mu$  PIC



10cm移動型カメラ  
(慶応大医で実験)



# まとめ

- イメージング技術は今後の科学の発展の鍵
- ガンマ線は高エネルギー宇宙を探索する新たな目。
- 新イメージング手法でMeV $\gamma$ 線天文学を開拓！
- 新型 $\gamma$ 線医療イメージング  
多くの物質を使った新薬、診断が可能  
低バックグラウンド診断→ガンマ線一般検診へ！！
- $\mu$ PIC オリジナルな検出器、

夢が沢山！！！！