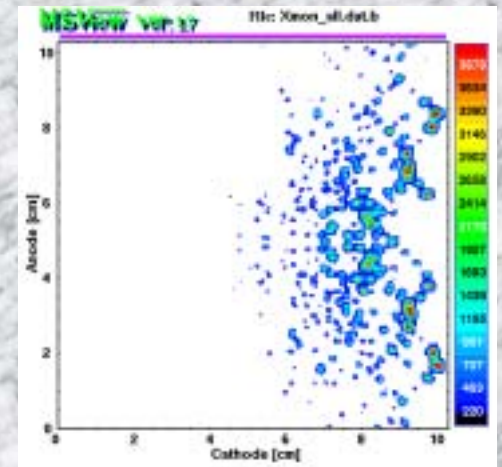
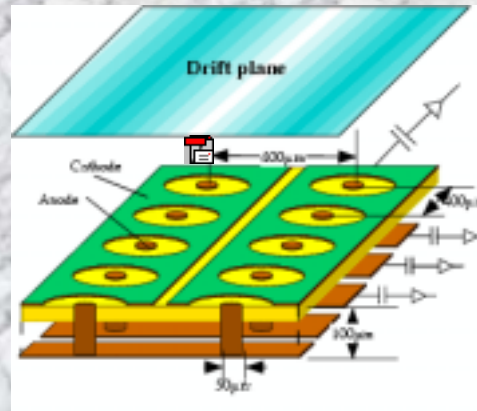


μ PICを用いた検出器開発のReview

- ◆ MSGC,MPGC
- ◆ X-ray Analysis
- ◆ Gamma, Neutron Imaging



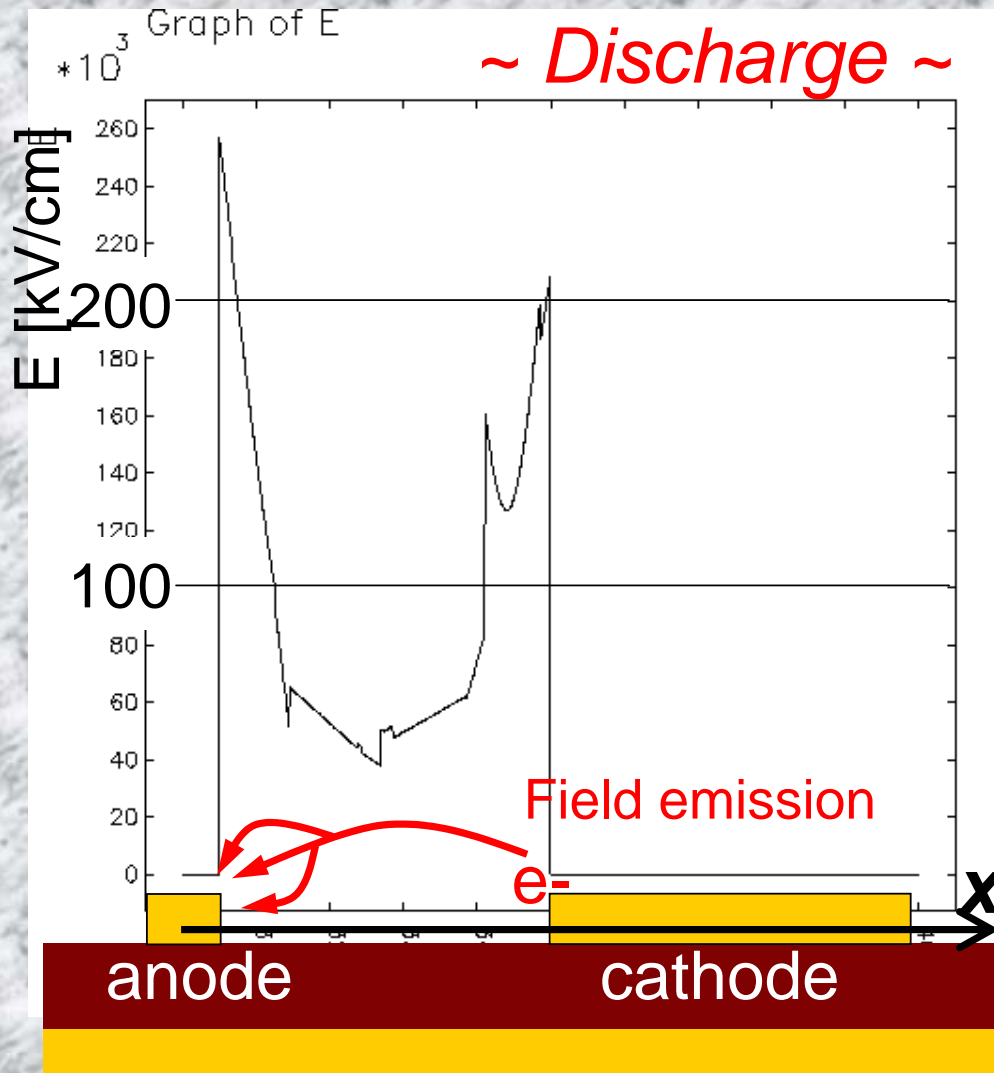
京都大学大学院理学研究科 物理第二

谷森達 他 宇宙線ガンマ線グループ

プ

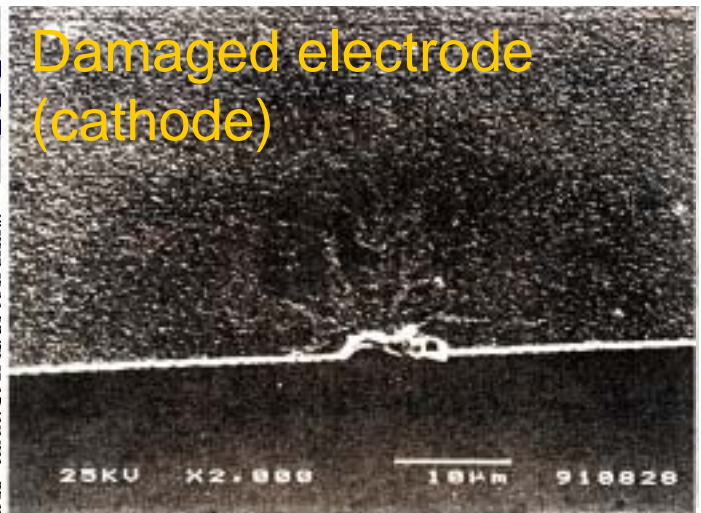
25/01/06 「マイクロパターン検出器の開発と展望」@RCNP

Problem of MSG



Damaged electrode
(cathode)

Picture of 14-02-22 on 18/10/03 with scanfield version 7.03.



Damaged electrode
(anode)

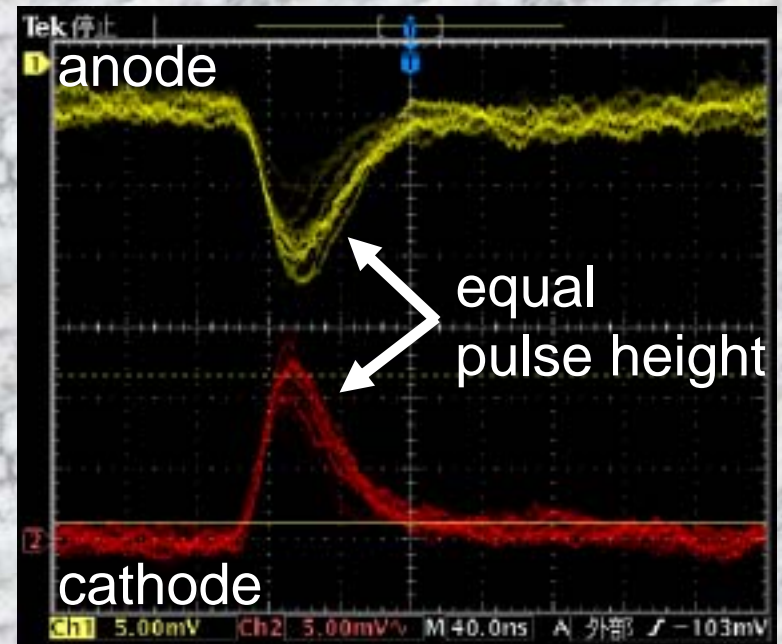
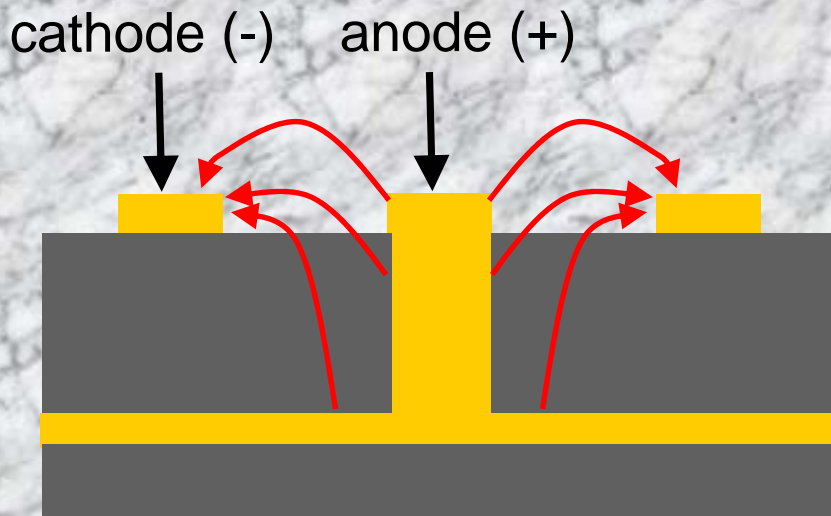


Nagae et al.,
NIM A 323 (1992) 236

To avoid discharge:
Weak field
@ cathode edge

Feature of μ -PIC (体内君)

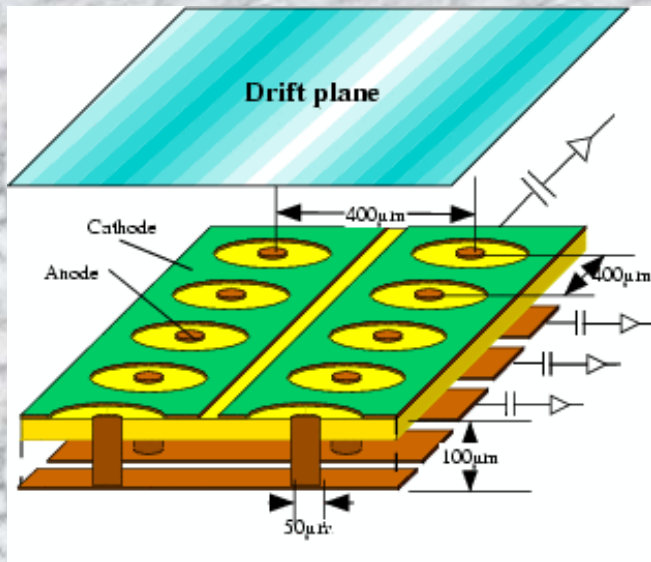
- Direct collection of charge
→ Equal signal from anode and cathode
- Upward electric field
→ No charge-up



MSGC to MPGC

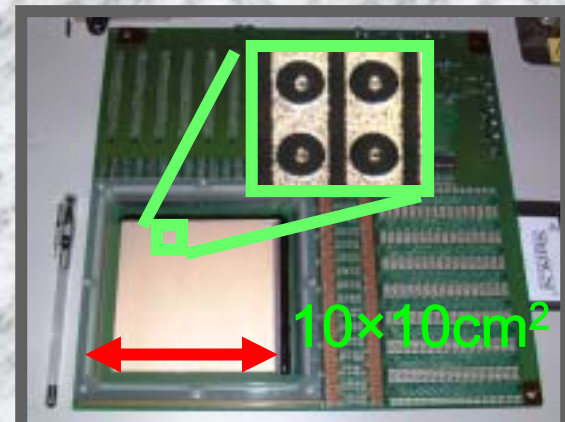
MPGC

- MPGC: micro pixel gas chamber
- Large area with PCB tech.
- pitch : $400\ \mu\text{m}$
- high gas gain
- small discharge damage



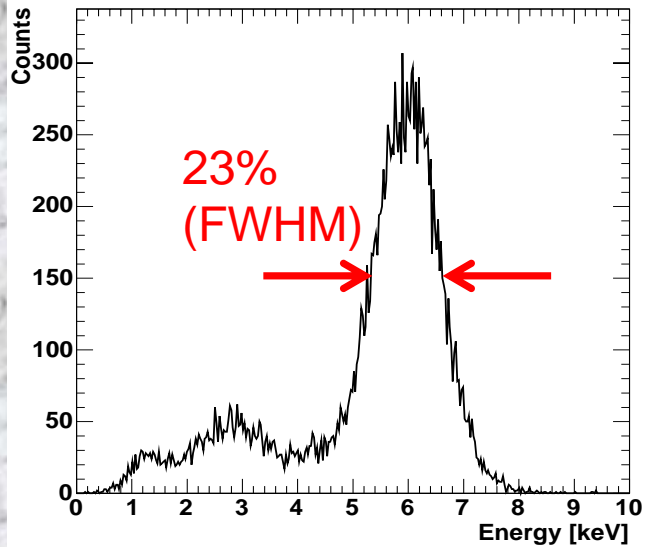
| | MSGC | MPGC |
|--------------|---------------------------|--|
| Maximum gain | 1700(with capillary) | 15000 |
| Stable Gain | 1000 | 7000 |
| Long time | | >30 days |
| Area | $10 \times 10\text{cm}^2$ | $30 \times 30\text{cm}^2$ |
| Pitch | $200\ \mu\text{m}$ | $400\ \mu\text{m}$ ($300\ \mu\text{m}$ possible) |
| uniformity | ~35% | 4% |

()

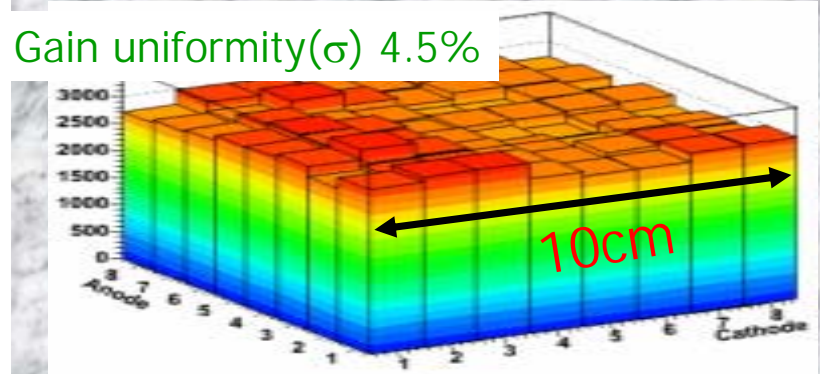


Performance of m-PIC8

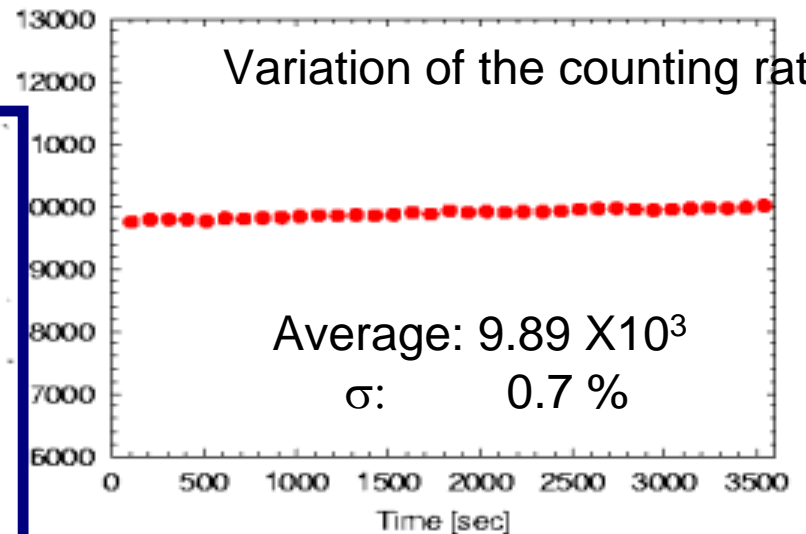
⁵⁵Fe Spectrum



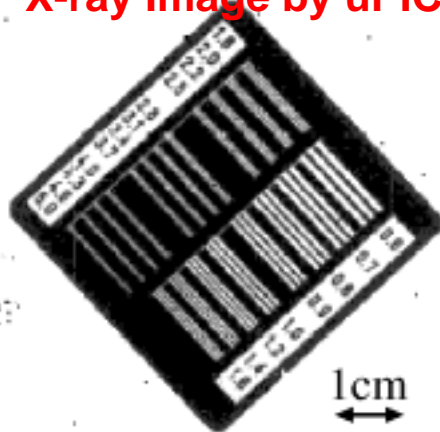
Gain uniformity(σ) 4.5%



Variation of the counting rate



X-ray Image by uPIC



position res.
=120 μ m



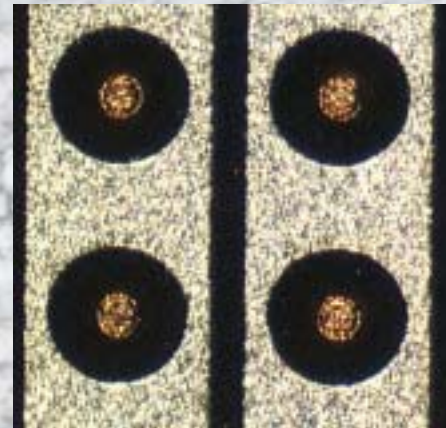
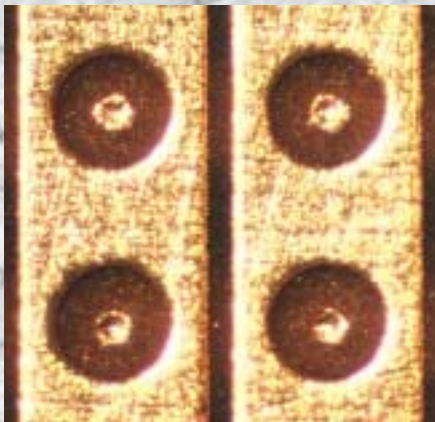
μ PIC精度の進化(継続性)

➔ 電極の製作精度向上 2001 - 2005

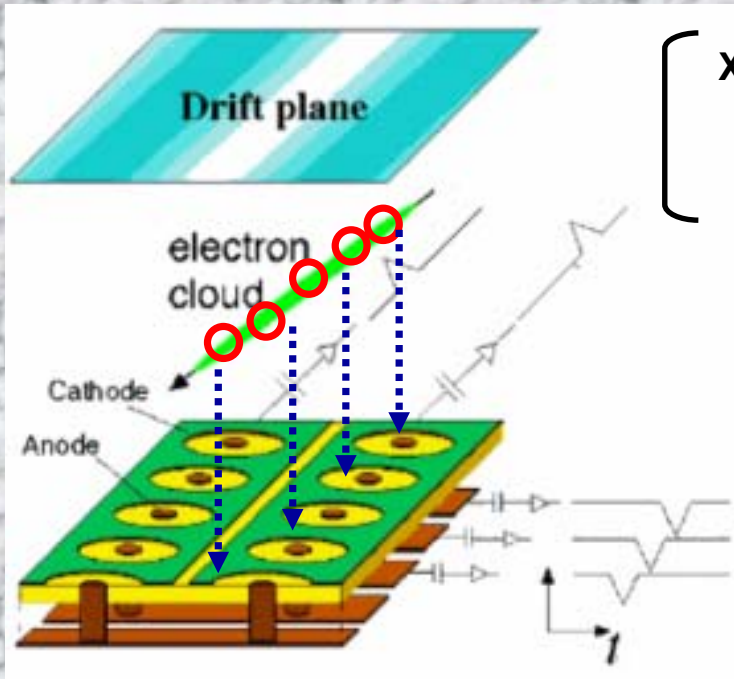
一様性 30% - > 4%

利得 3倍以上

サイズ 3x3cm - > 10x10cm - > 30x30cm



TPC based on μ -PIC (μ -TPC)



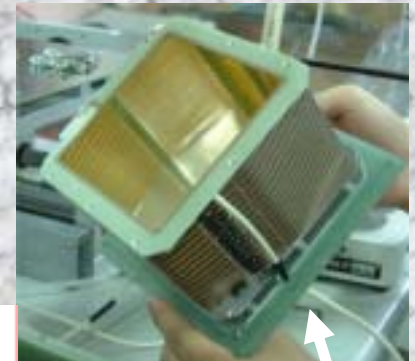
X, Y from μ -PIC
+
Z from timing

In one clock

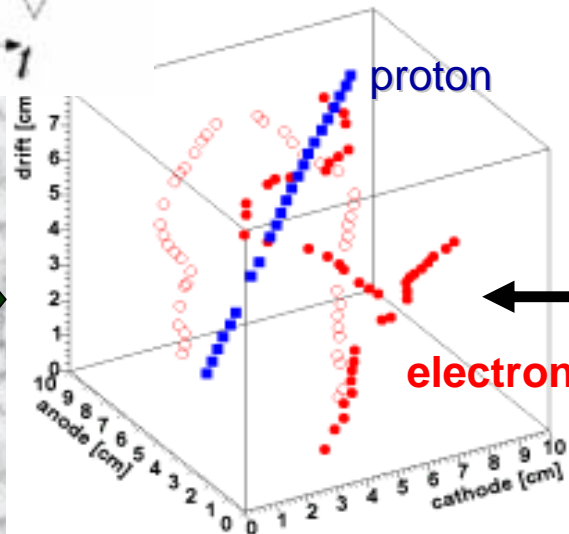
Several successive hit points



3D Track



From Track images,
100 % separation
between **e** and **neutron**



μTPCでとらえられるものと応用

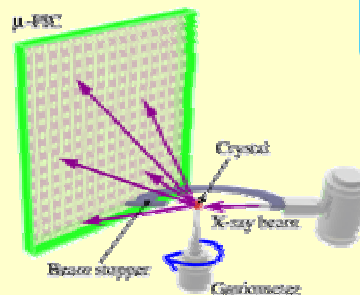
Charged Particles

- Charged Lepton (e, μ, ?)
- Heavy Charged Particle

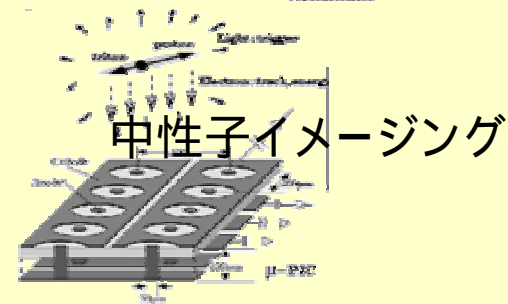
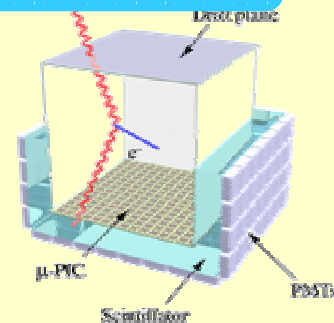
Neutral Particles

- Photon (X, γ) recoil electron
- Neutron recoil nucleus
- Neutrino recoil electron
- Neutralino recoil nucleus

X線結晶構造解析

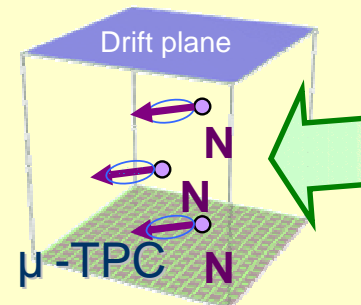


MeV 線カメラ



中性子イメージング

暗黒物質探索



MPGDの特性

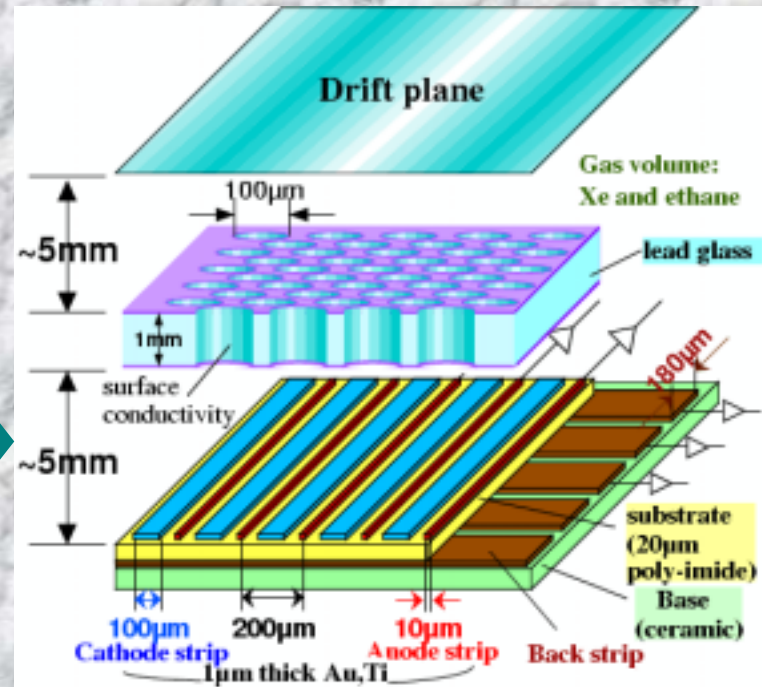
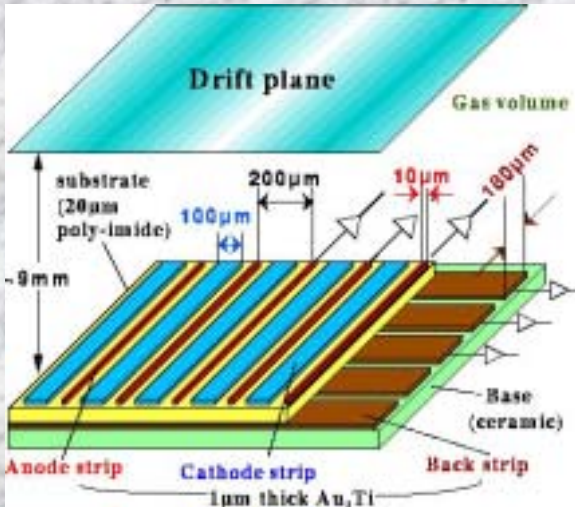
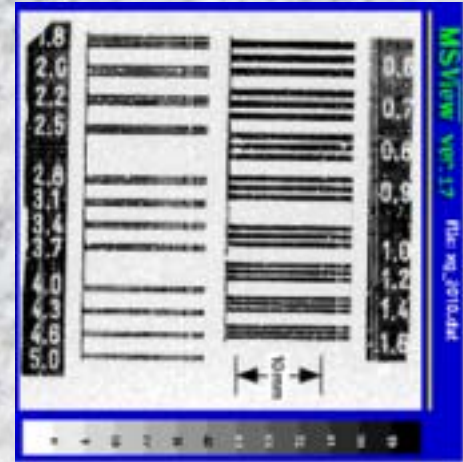
- 高い2次元位置検出能力(100 μm)のイメージング
- 耐放射線特性、従来のガス検出器の1000倍以上(10⁷mm⁻²)
- 常温で動作、低電力、
- 簡単な回路で信号処理が可能、デジタル処理。
- 任意の電極配置、曲面構造が可能
- 30cm平方以上の大面積
- 画像歪が無い、高い感度一様性(~ 5 %)
- **利得>10000; 安定動作、 放電に強い**
- プリント基板技術による量産性、大きな量産効果ができる。
- **これらの特性は今後の放射線、粒子線計測には不可欠な要素**

**フォトン計測を生かした新しいX線解析法
時分割計測！**

1 What is MSGC ?

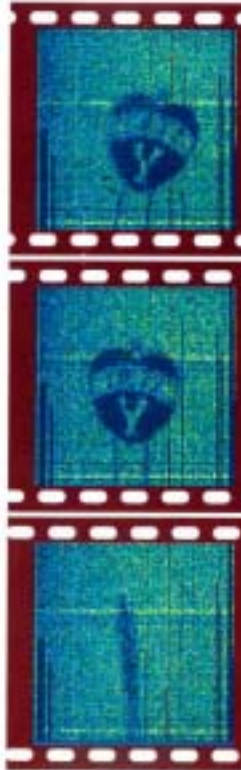
◆ Micro Strip Gas Chamber

- Since 1991 @TIT
- 2-D imaging with $100\mu\text{m}$ resolution
- High counting rate (x1000 of MWPC)
- Digital readout
- Gain ~ 1000



Realtime X-ray Imaging

40msec/frame ~75kevt/frame



gas package slot for pre-u

MPGDを実用化するには？

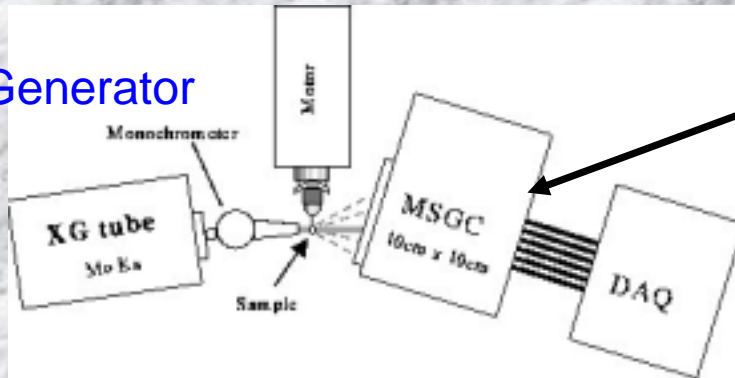
- ◆ 製作施設（製作を請け負う会社と技術）
- ◆ 電極設計法（手探りで出来ない）
- ◆ 信号の読み出し法と回路との接続法
（読み出し基板およびMPGDとの接続）
- ◆ 回路数の問題、サイズ、電力、コスト（LSI化）
- ◆ 形状、電極設計の任意性の高さ（構造の単純さ）
- ◆ 生産、開発の迅速性・継続性！！

高い応用力と実用力が不可欠！！！！

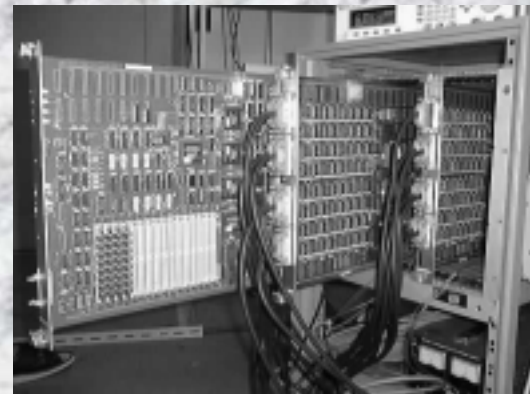
X-ray Rotating Crystal Analysis (MSGC1999)

Rotor of Crystal

Xray Generator



MSGC+AMP. Box

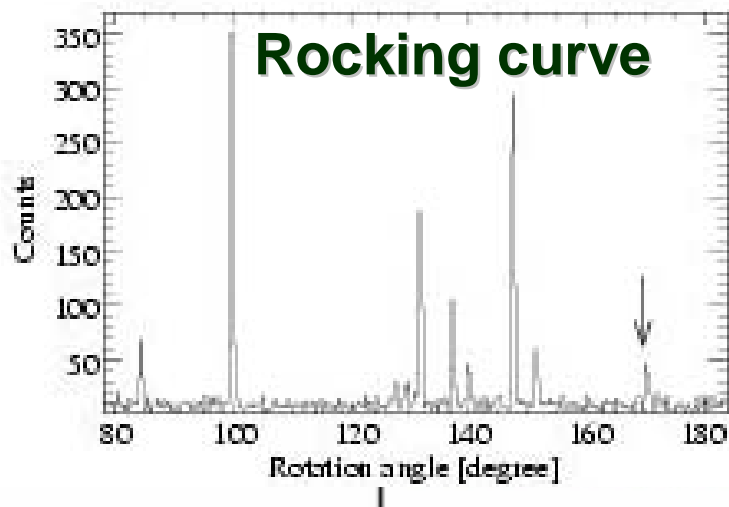
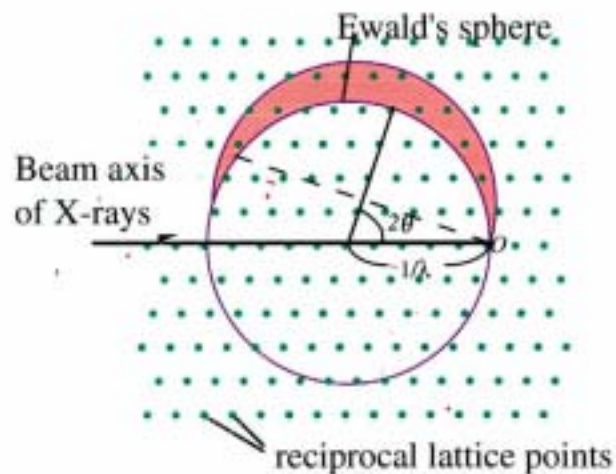


Data Acquisition System

時間情報を用いた新しい測定法の実証

- ◆ X線到来時間を回転角情報へ (Rocking curveの同時測定)
- ◆ 振動回転から連続回転で、高速化

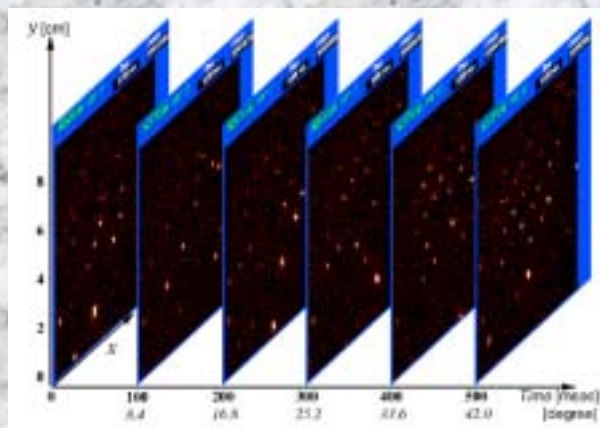
RCP (Rotation continuous photograph) method



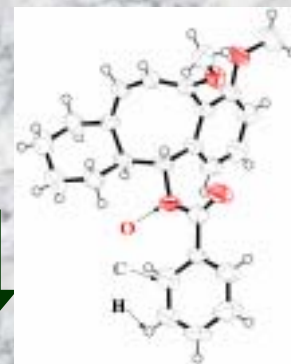
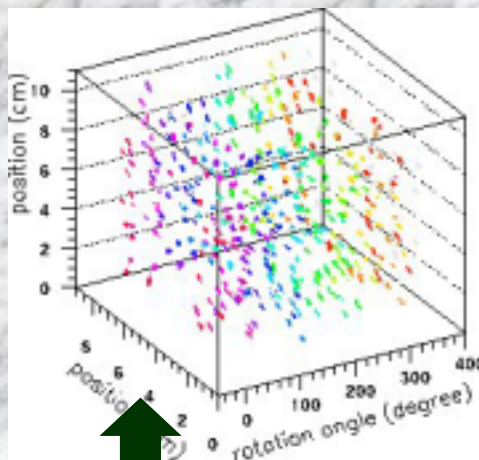
Time Resolved X-ray Crystal Structure Analysis(1999)

東工大化学科大橋グループ
との共同実験

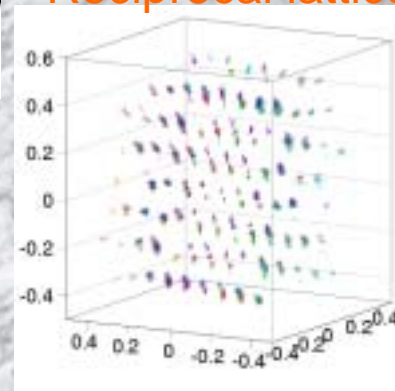
| Crystal | Ref. # | R-factor ($I > 2\sigma$) | time (sec.) |
|------------------------|--------|-------------------------------|----------------|
| $C_4H_9NO_6$ | 1,406 | 7.9% | 2.1 |
| $C_{20}H_{37}CoN_6O_4$ | 4,361 | 9.8% | 300 |
| $C_{25}H_{26}O_4$ | 4,565 | 8.4% | 80 |



Time



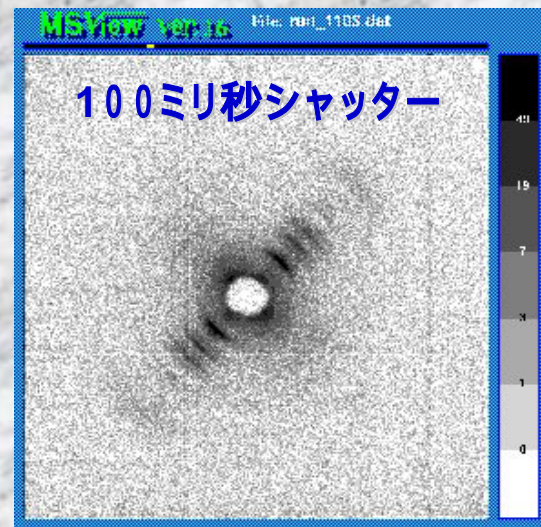
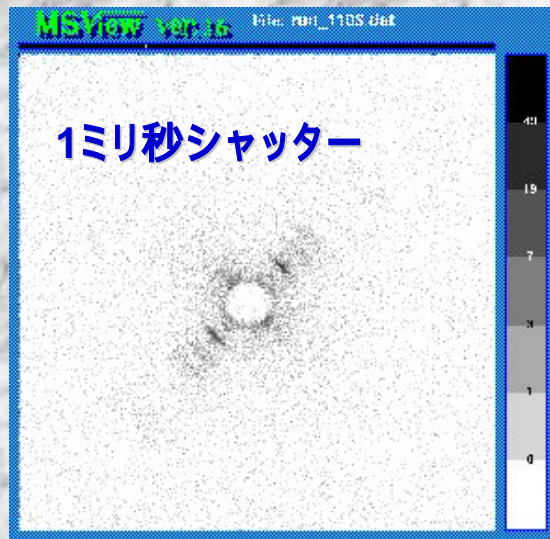
Reciprocal lattice



Movie varying 2θ continuously
Time resolution of ~ 100 ns for each X-ray
Much Information \rightarrow quick online analysis

高速連続撮影

- 短時間での変化を捉える。
各X線の到来時間を記録しているので、データ収集後、任意の時間幅のシャッターの連続画像に変換できる。



コラーゲンの小角散乱の短時間測定

小角散乱実験

➤ フォトン計測とダイナミックレンジの試験

MSGC $> 10^6$ CCD $\sim 10^{3-4}$ IP $\sim 10^{5-6}$

➤ 時分割能力 500 μ S

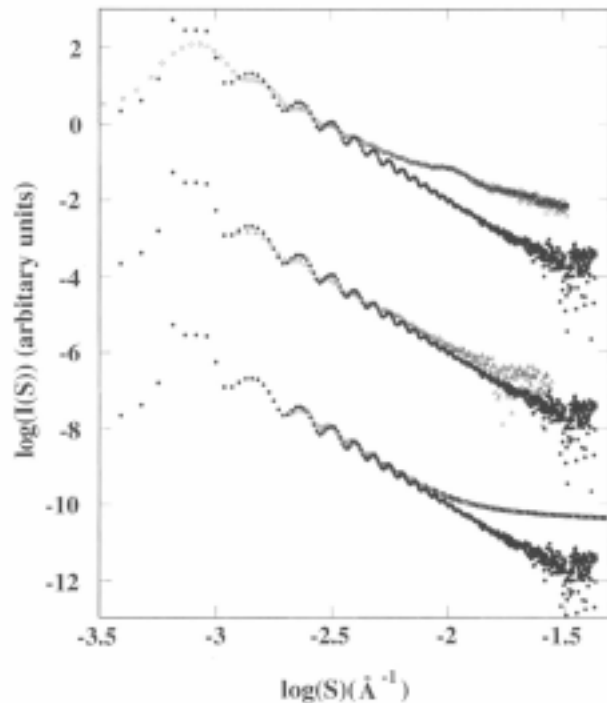


Fig. 1. Solution scattering patterns from polystyrene latex measured with MSGC (filled circle), XR-II+CCD (open circle), PSPC (triangle) and IP (box). The sample was dispersed in 52.1 wt% glycerol. The buffer image was subtracted.

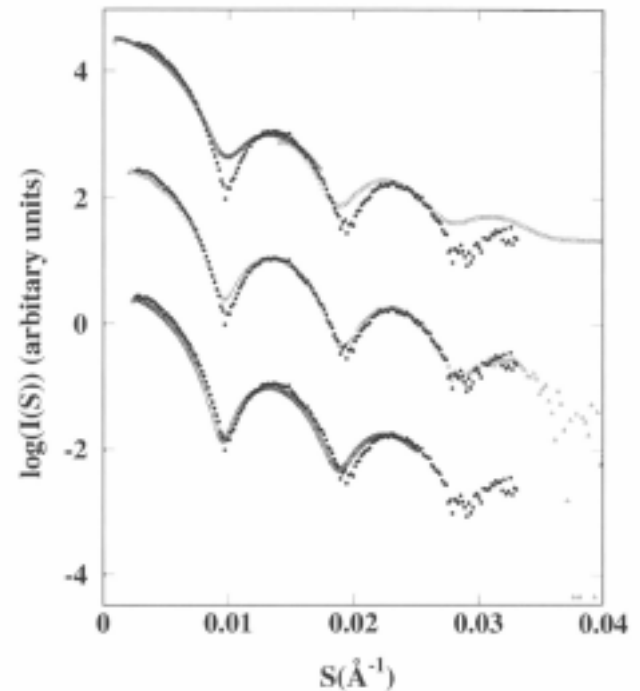


Fig. 2. Solution scattering patterns from an apoferritin solution (11 mg/ml) measured with MSGC (filled circle), XR-II+CCD (open circle), PSPC (triangle) and IP (box). The buffer image was subtracted.

フォトン計測X線二次元検出器の条件

1. 安定した高利得(3000以上)
2. 大面積 最低でも10cm角、20cm角以上、不感部分が無い(つぎはぎ、接合部など)
3. 感度の一様性 (1%以下、量子計測で)、画像歪みが無い。
4. 強度による感度変化が小さい。
5. Parallaxが小さい。
6. メンテナンスが簡単、安い(複数台が必要)

ガスMPGDは5以外実現出来た、6は高圧化と回転角情報で対応できる。

半導体Pixel, 1, 2, 3, 6の実現が大変である。

解析ソフト開発も大変(ピクセル境界領域処理の開発)!

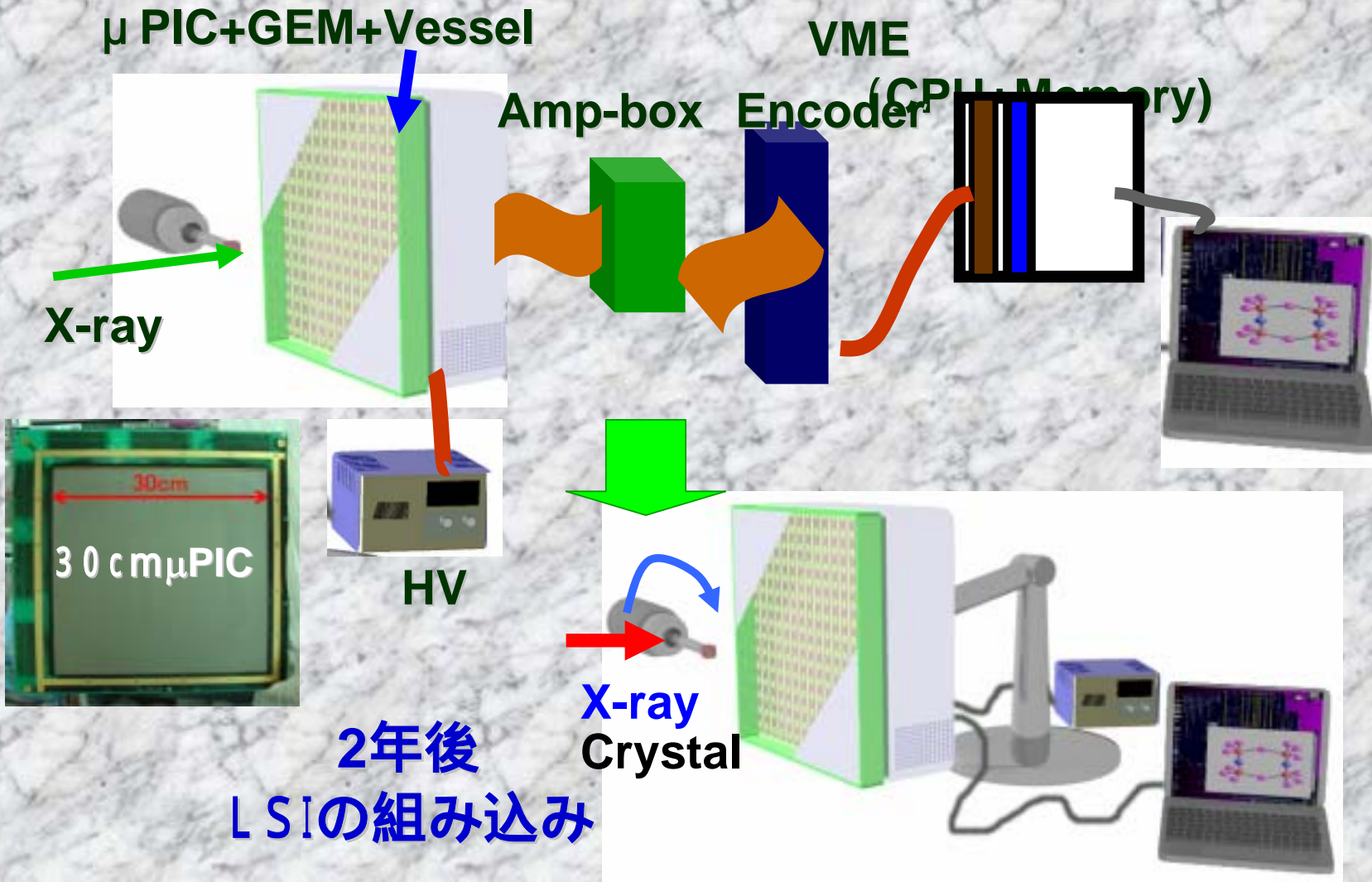
達成目標

- ◆ 10cm角および30cm角、量子計測型X線画像装置を実現。
- ◆ $1 \sim 3 \times 10^7$ cpsを実現。
- ◆ 結晶解析、無機結晶で100ミリ秒以下、高分子で数分のデータ収集時間を実現。
- ◆ 1時間の測定でダイナミックレンジ 10^8 を実現。
- ◆ 結晶解析精度 R値 1 - 2%を実現

企業との協力

- ◆ ガス封じ込め技術、結晶構造解析ソフト開発 - > Rigaku (メンテナンス、製品化?)
 - ◆ MPGD製造、基板 - > DTサーキット(多様な技術)
 - ◆ 圧力容器、信号取り出し - > 日立メディコ
 - ◆ 医療画像、製品化 - > 日立メディコ
 - ◆ 信号処理回路 - > 日立関連各社
 - ◆ LSI製造、??
-
- ◆ 先端技術の導入には不可欠、
 - ◆ 継続性・コスト面の配慮が必要！

PF用時分割X線画像装置開発 (17年度開始加速器支援事業)



μ PICによる新しいタンパク質解析法

- ▶ 構造解析、ブラッグ反射強度から位相決定が問題！

金属をドーブし、異常分散を利用する。

- ▶ たんぱく質に自然にある硫黄の吸収端(2.3keV)の前後の強度変化による異常分散法による位相の導出。(京大 理学部化学、三木教授より)



2 keV

Ar, 200e.

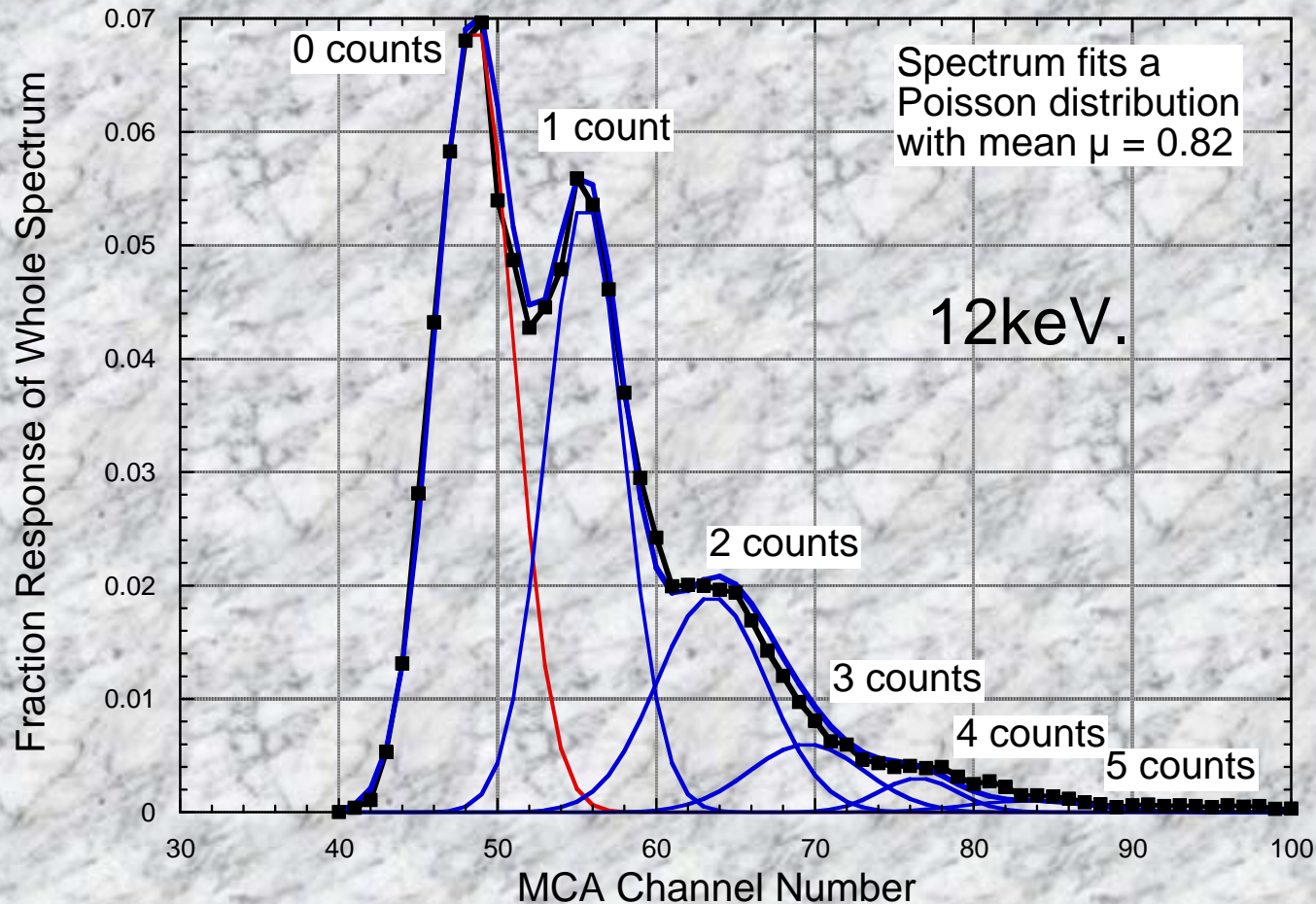
Si, 800e

利得が必要！

Direct X-ray beam response: Poisson distribution of counts in each pixel

From E. M. Westbrook
¹Molecular Biology Consortium Inc.

Spectrum in a Multichannel Analyzer



◆ たんぱく質構造解析 ～究極型～

全方向の散乱点の同時計測。

- 放射光施設で世界最高の「たんぱく質解析工場」
大規模生体分子の秒オーダーの高速構造解析

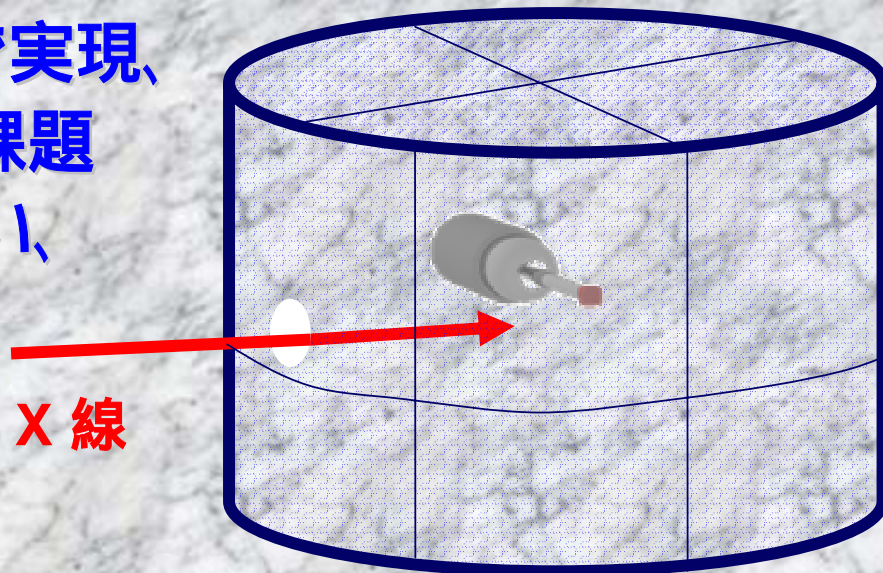
- ミリ秒の時分割

30cm平方MPGC 6～10枚程度を

組み合わせることで実現、

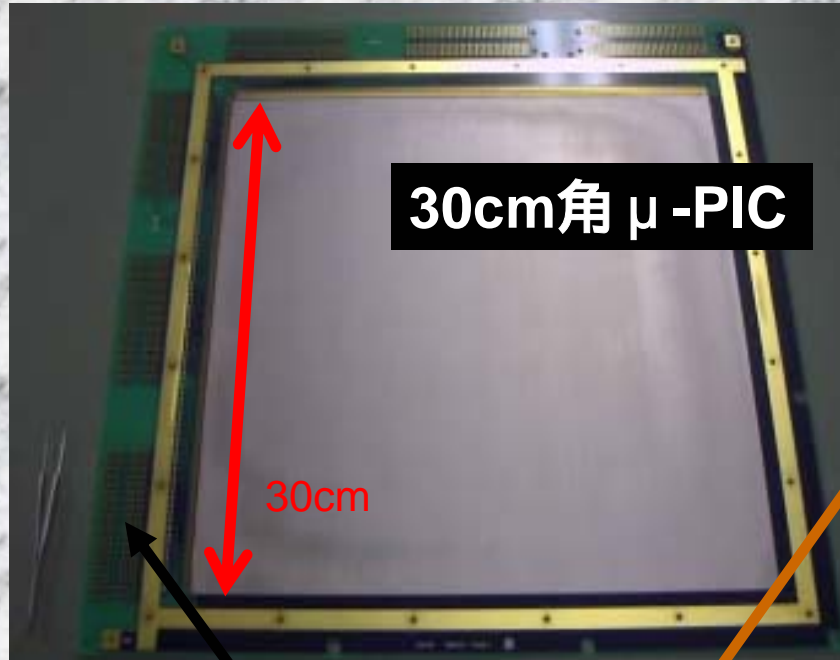
回路のより小型が課題

技術的問題は小さい、



X線

μ-PICと回路の接続性



10cmMPGC

768x768

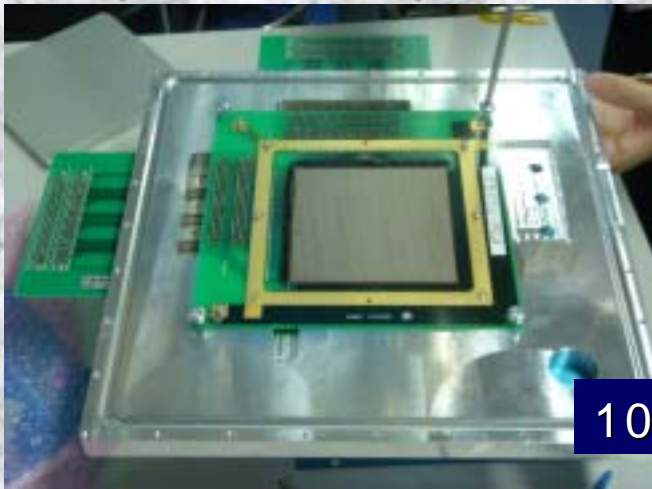
共通コネクタ

コスト

- μPIC本体
- 接続基板
- **ボンディング**

新型圧力容器開発(日立と共同)

- ▶ 容器からの信号取り出し、基板引き出し型(日立)
数千チャンネル以上に対応！
- ▶ 信号減衰の低減、耐圧性の大幅な向上
- ▶ 10cm μ PIC用実用，現在30cm μ PIC用、試験中



10cm角用



30cm角用

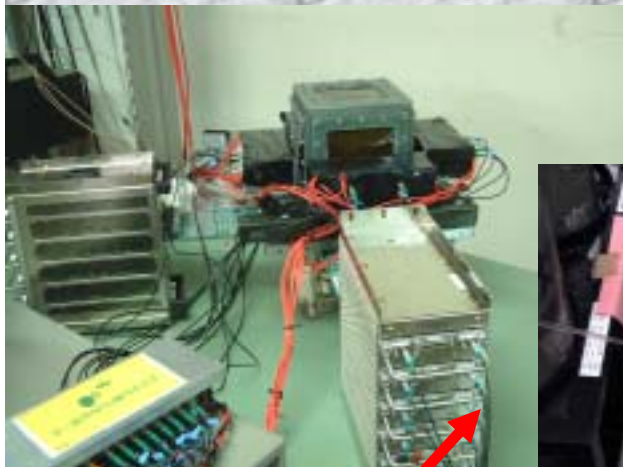


回路のモジュール化、低ノイズ化

30cm μ PIC



10cm μ PIC



16 ASD chips / board



30cm対応

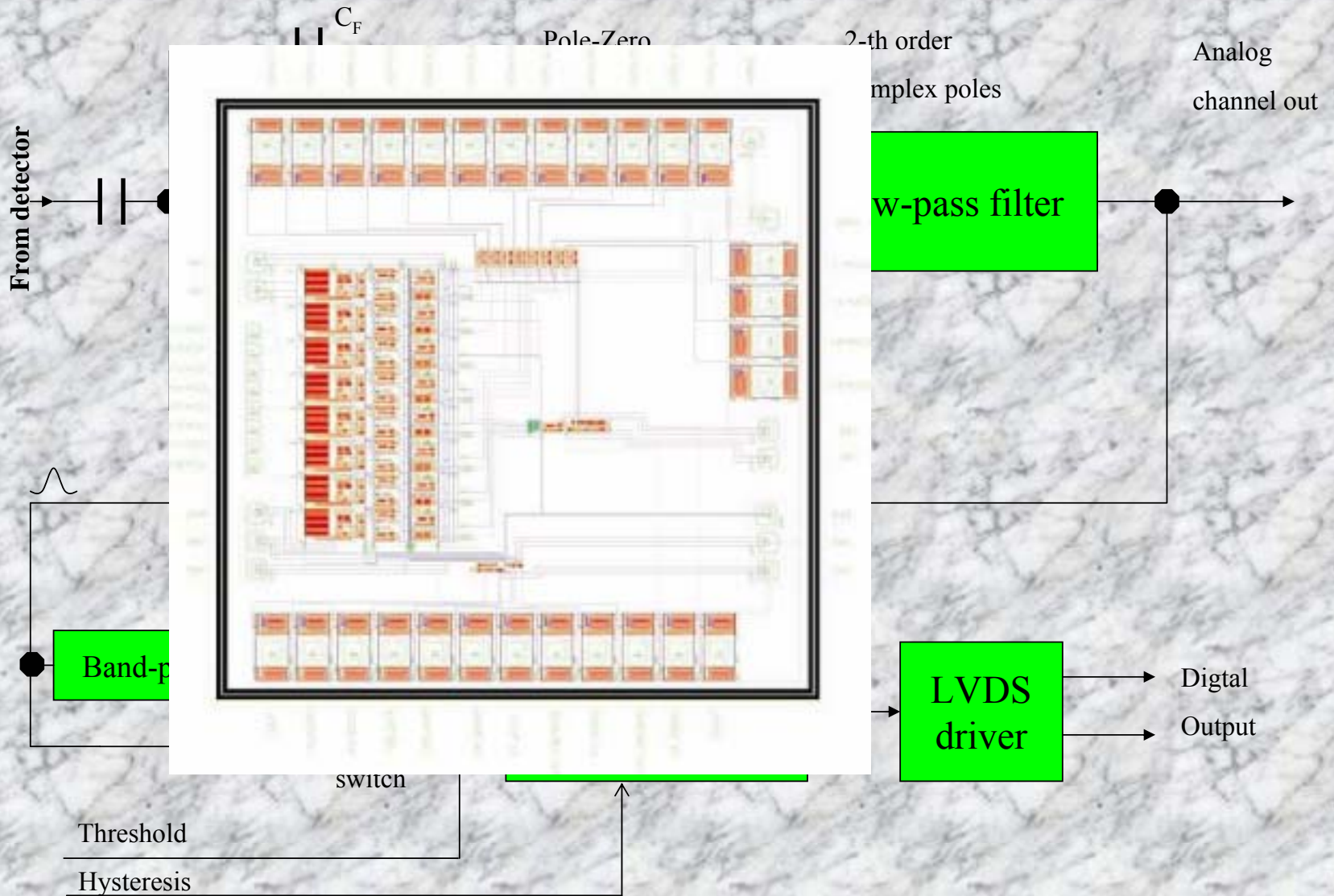
100MHz

座標演算装置

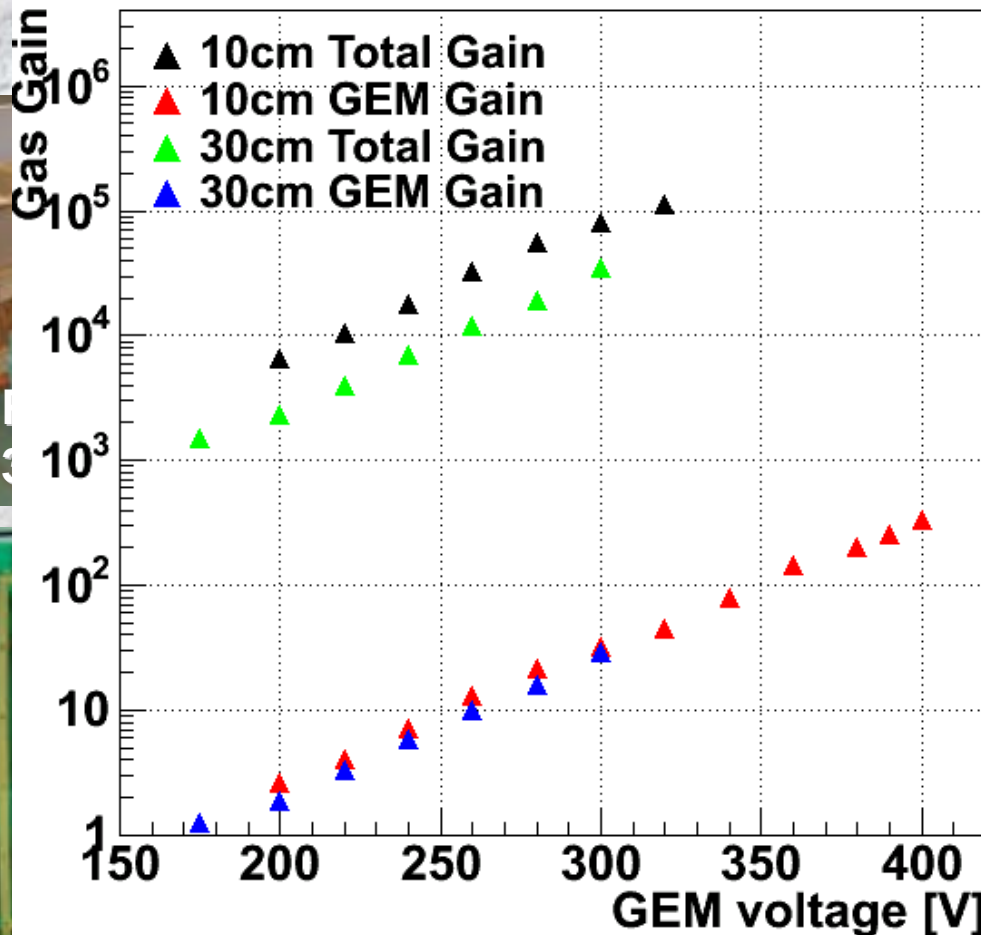
(900x900入力、

1800x1800出力)

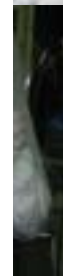
CMOS-AMP(KEK)



Meidcal 30cm-TPC Camera



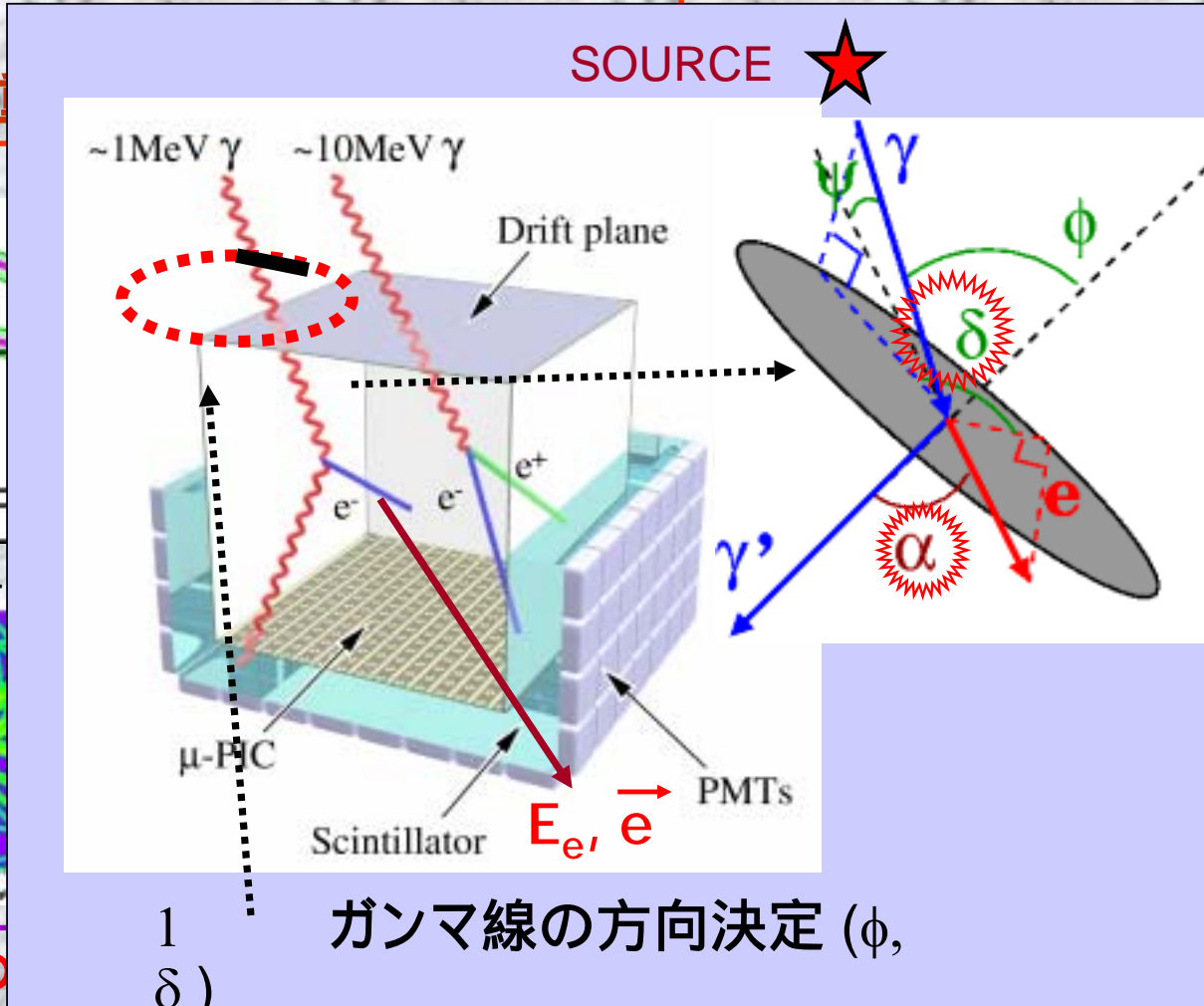
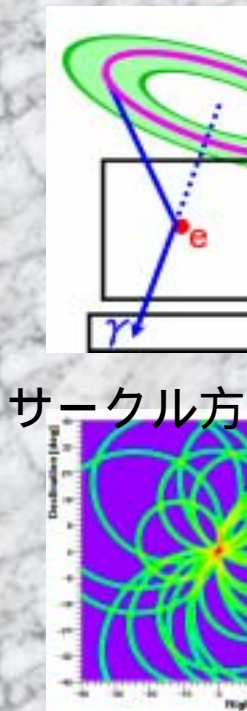
ve been



約40倍の効率 (10cmTPCとの比)

電子飛跡型コンプトンカメラの開発（高田君）

感度向上
が非常に



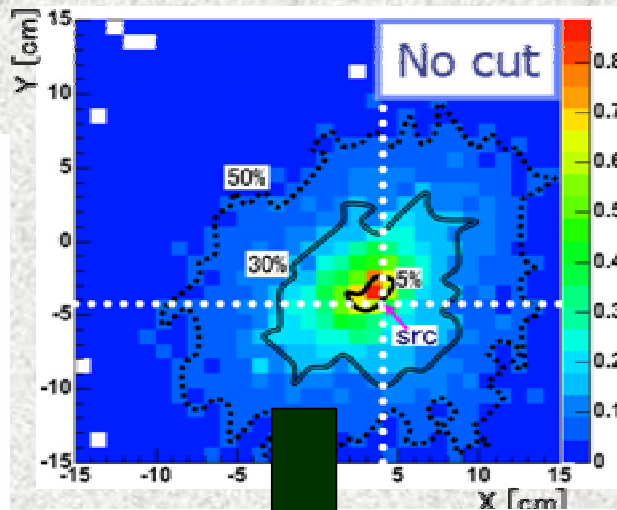
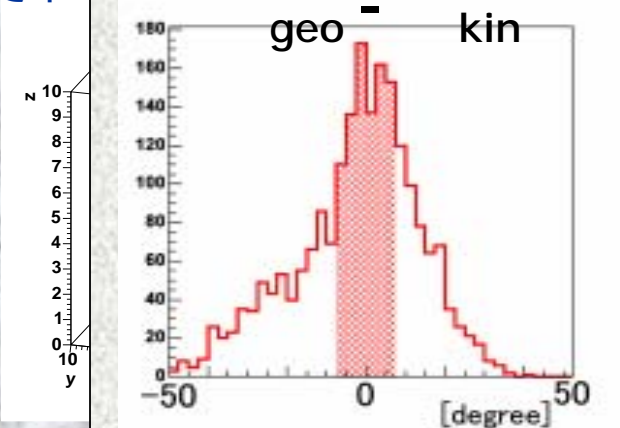
電子の
散乱体にガスを充てる！

電

α 角を用いたバックグラウンド除去

の改善

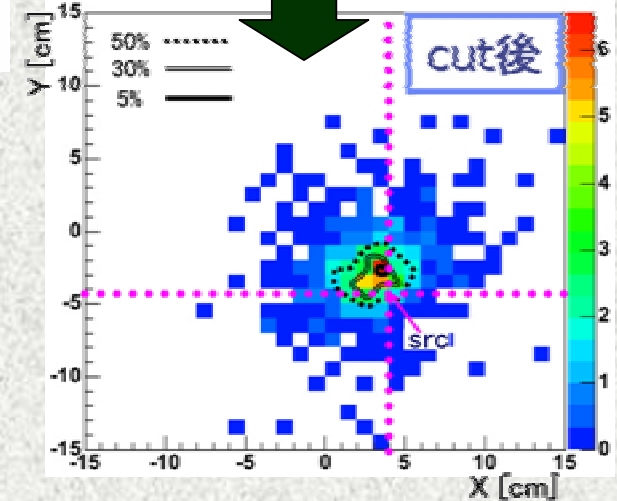
従来の



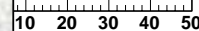
ルギーの
ンマ線源



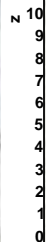
マ線
ラ



線



電子



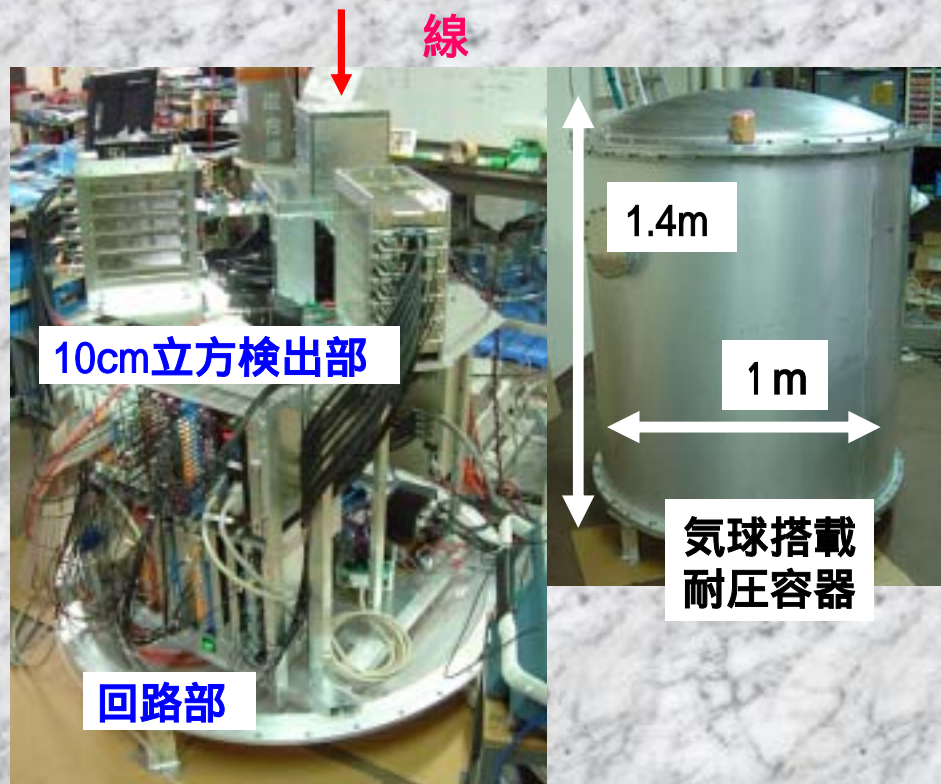
-50 -40 -30 -20 -10 0 10 20 30 40 50

宇宙MeV線気球実験

- 2006年に三陸沖で6時間の観測を希望。
- 10cm TPC +GSO 6mm-pixel
- 100keV-1MeV **新しい観測領域の開拓**

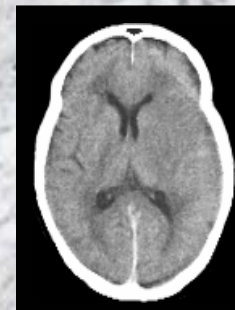
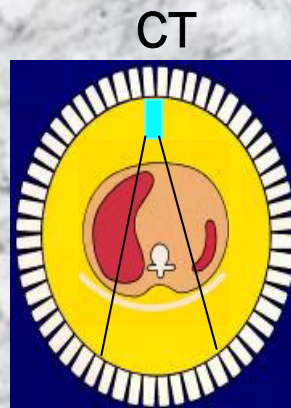
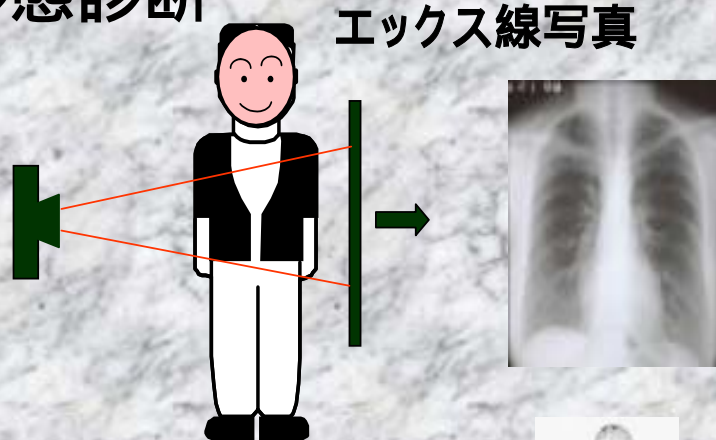


三陸 JAXA気球
in 2006

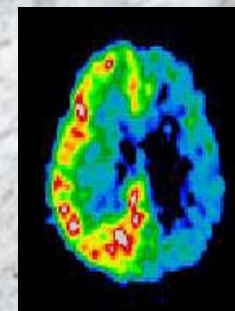
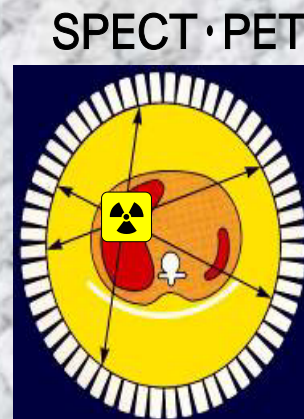
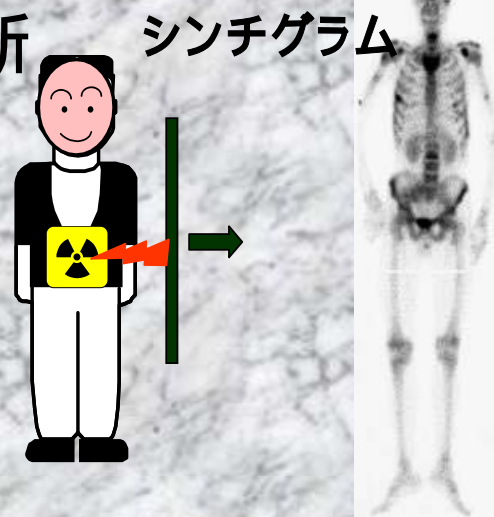


核医学（形態画像と機能画像）

形態診断

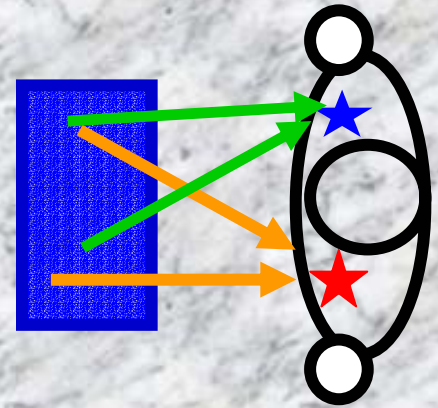


機能診断



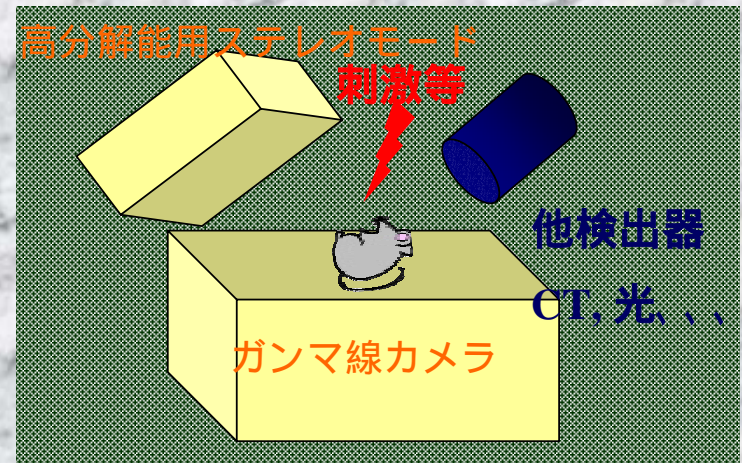
ガンマ線医療 3Dイメージ

- 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



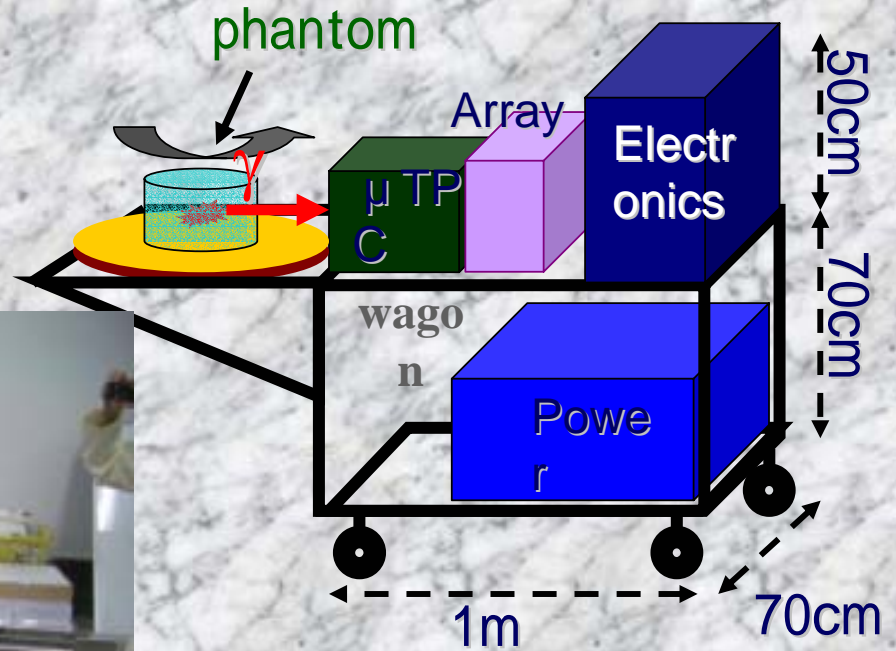
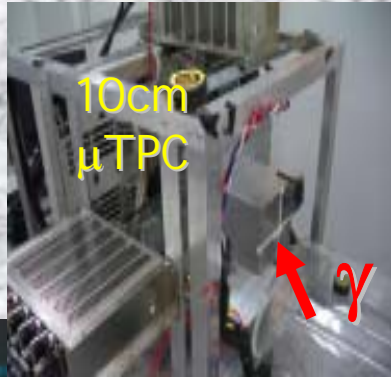
慶応大医、福井大医

JST (先端分析機器開発事業)
京大医、薬学部、日立メディコ、



Mobile Compton Camera

10cm μ TPC+Pixel Array



10cm μ TPC to 30cm μ TPC in 2006

低圧でのDM実験 (貞内 君)

● 10x

30cm

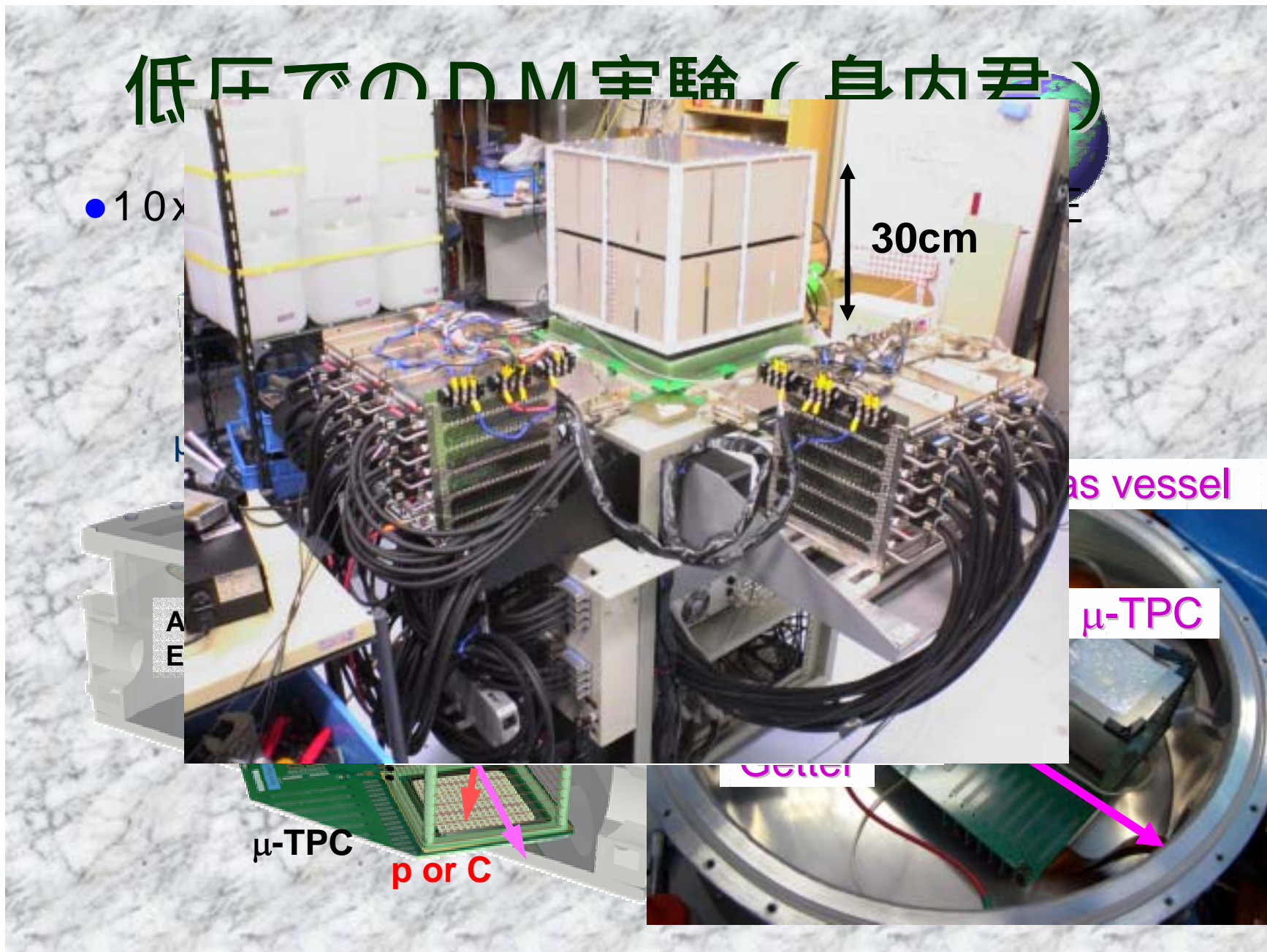
gas vessel

μ -TPC

μ -TPC

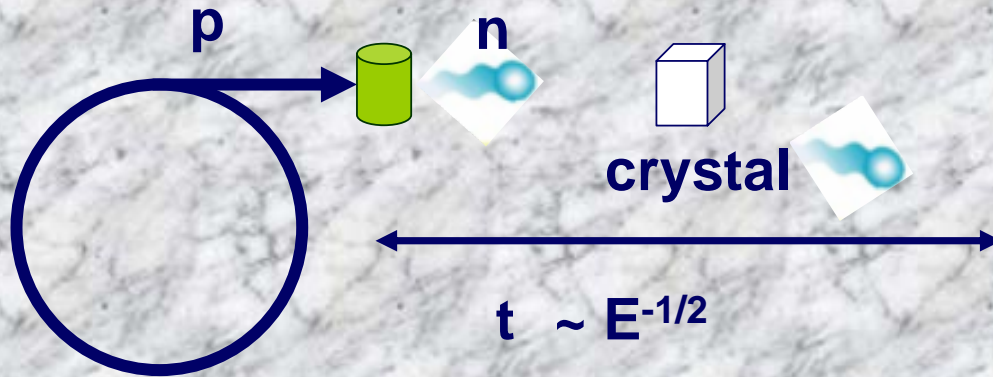
p or C

cell



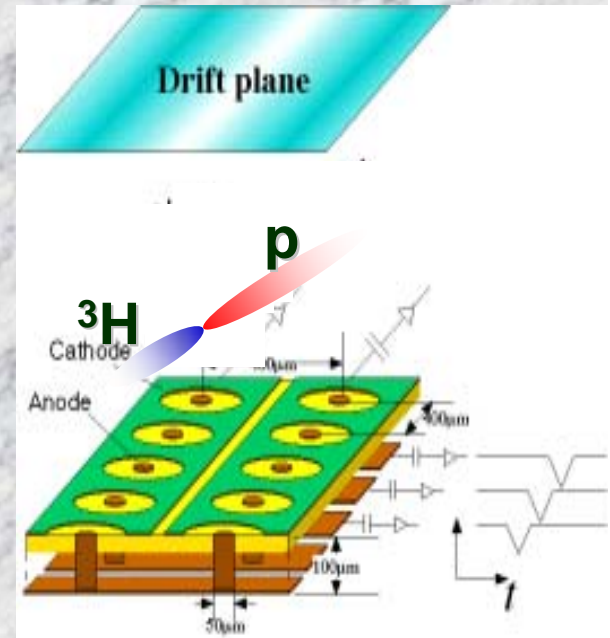
Time-resolved neutron imaging

Pulsed neutron beams by proton synchrotron

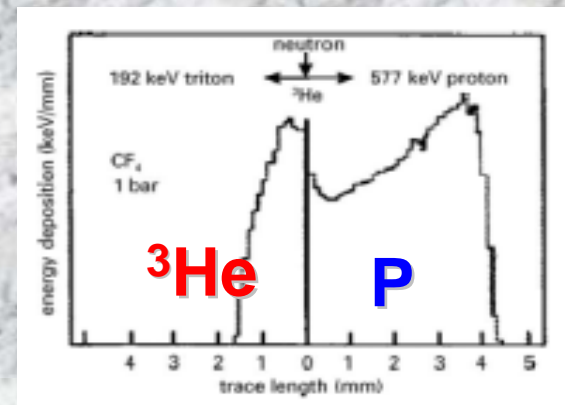
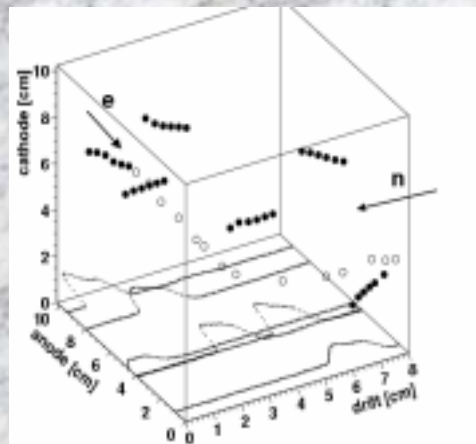


Timing resolution ($< 1 \mu s$)
Rapid Laue method

energy of neutrons



3-D proton tracks
detected by MPGC

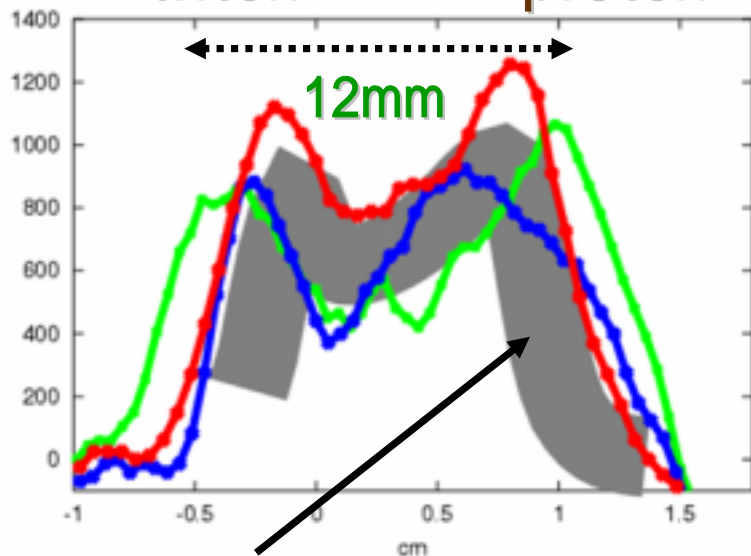


Measurement of ^3He decay (preliminary)

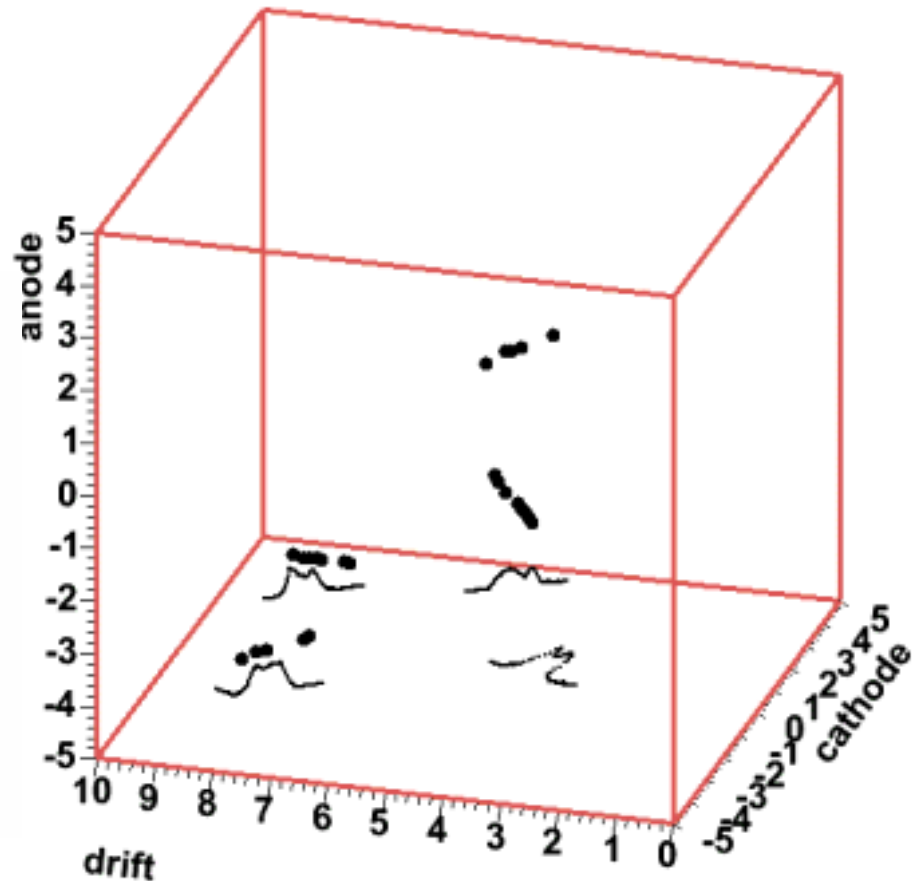
Ar(80%)+CF₄(20%)+ ^3He (2%) 1.1atm

Obtained by low gain μPIC (1000)

triton proton



gray: simulation



まとめ

◆ 継続的・系統的開発

◆ 検出器の特徴を活かした新分野の開拓！！

京大ガンマ線での開発

MeVガンマ線
イメージング（天文学、医療）

中性子検出

ダークマター検出

X線結晶解析

偏光X線検出

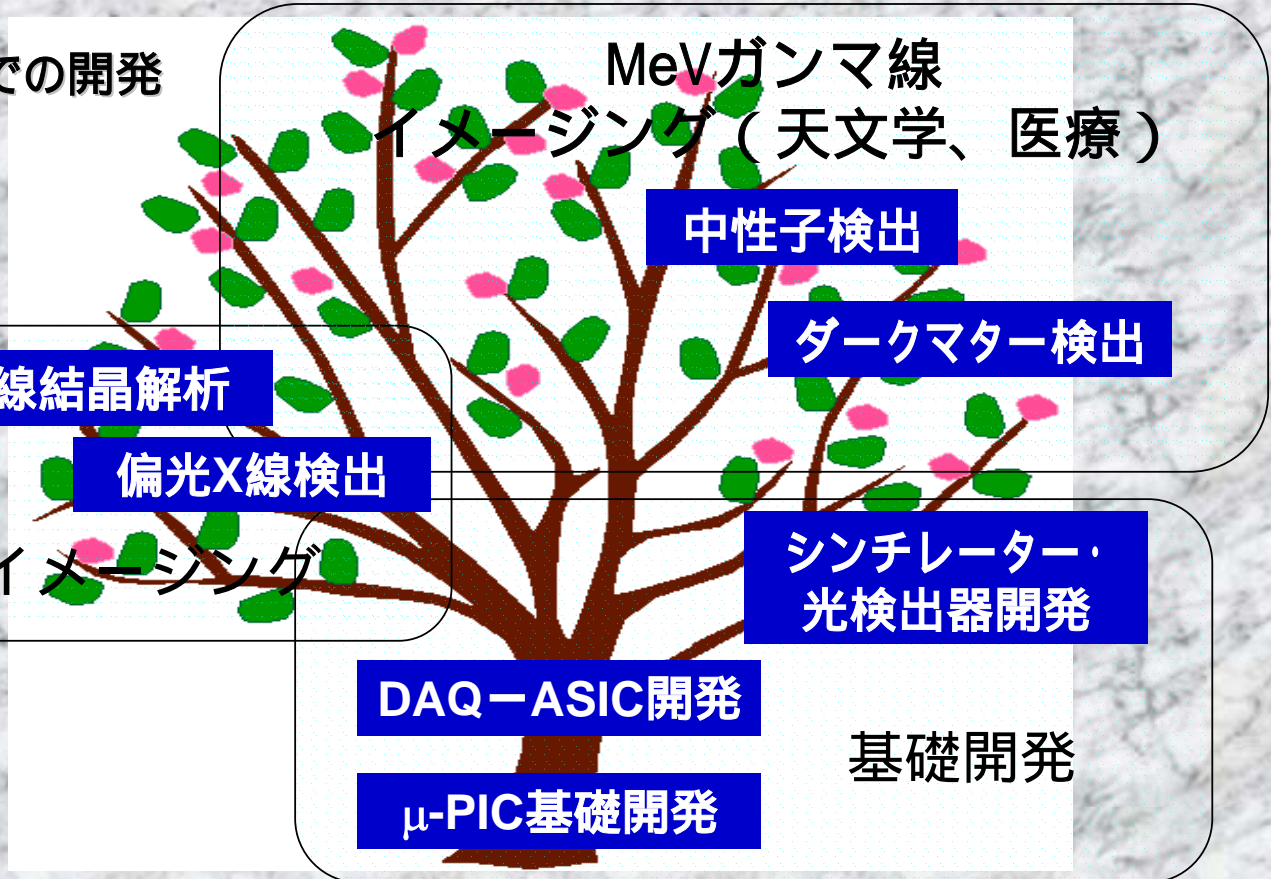
X線イメージング

シンチレーター・
光検出器開発

DAQ-ASIC開発

μ -PIC基礎開発

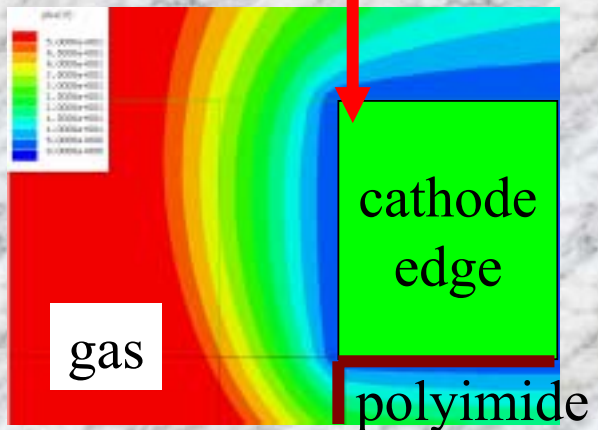
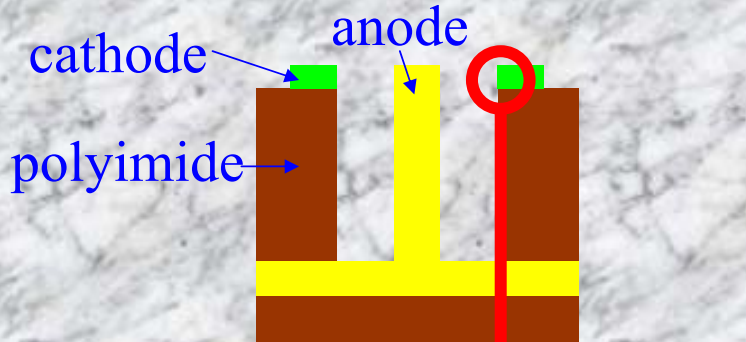
基礎開発



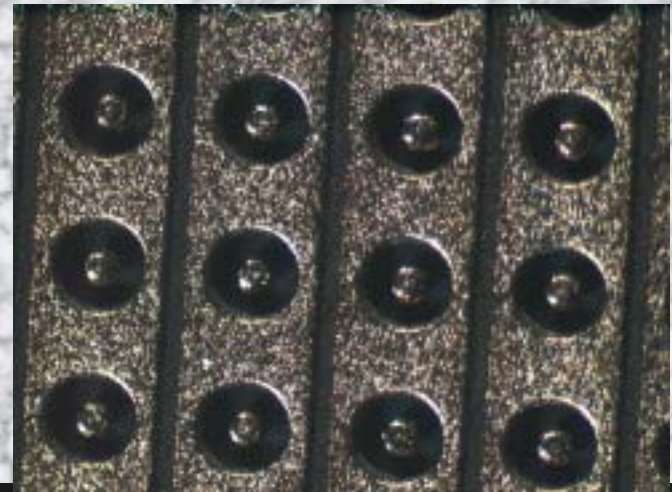
放電防止のための電極構造改良 (日立と共同)

放電 Field Emission 対策
Cathode edgeの電場を弱くする

anode-cathode間の
ポリイミドを除去



等電位面の様子(Maxwell 3D)



3次元計測顕微鏡像



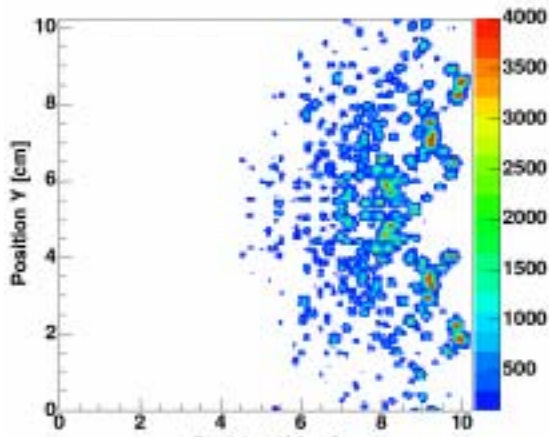
μ -PIC: X線分野応用

- 時分割X線結晶構造解析

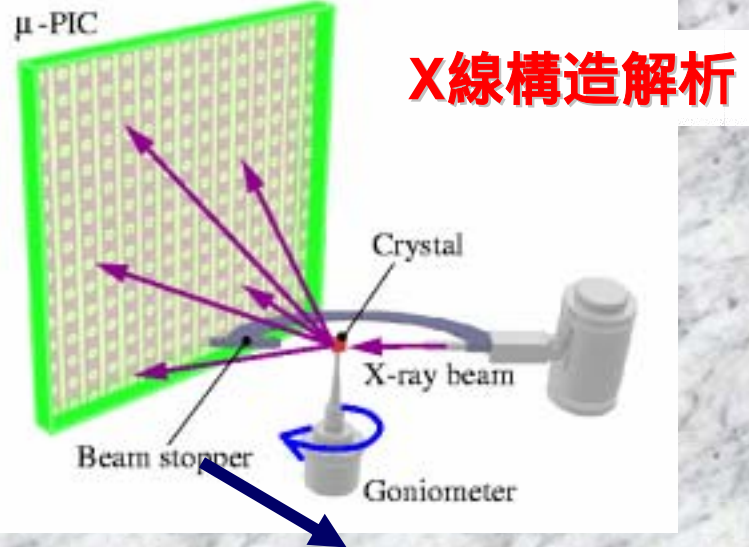
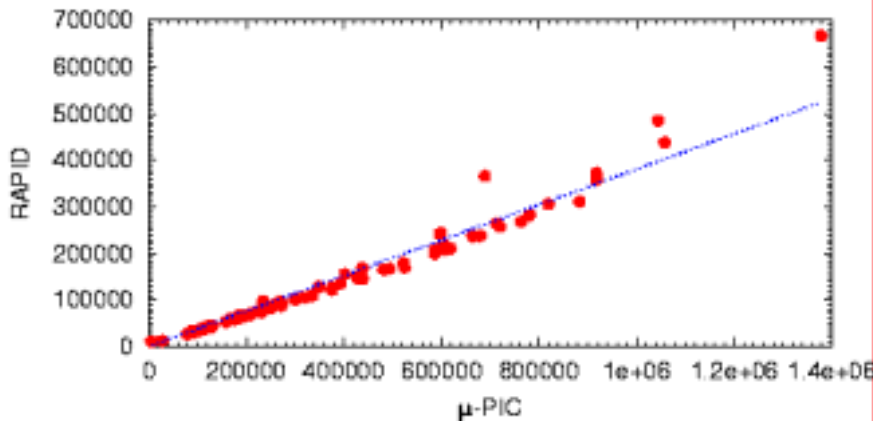
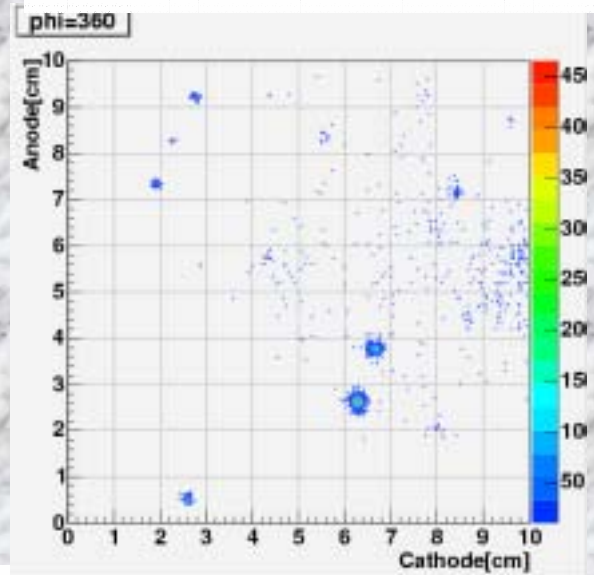
Rint <3% -> 1%

(Journal of Synch. Takeda et al. 2005)

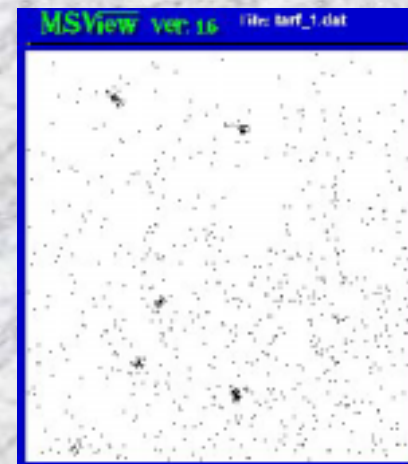
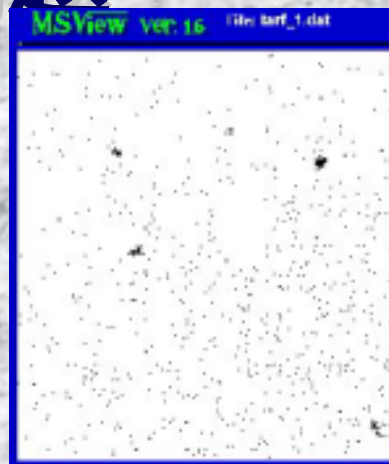
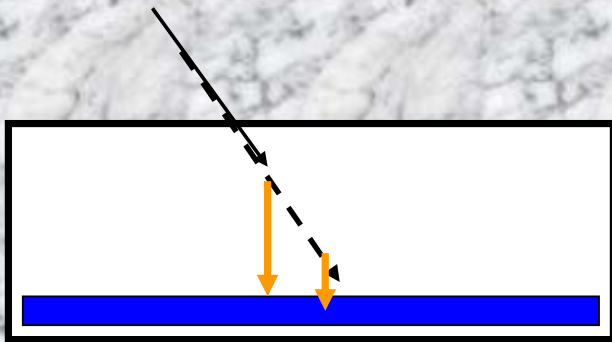
- Obtained rotational image with 10cm square μ -PIC



μ -PICで撮られた連続写真

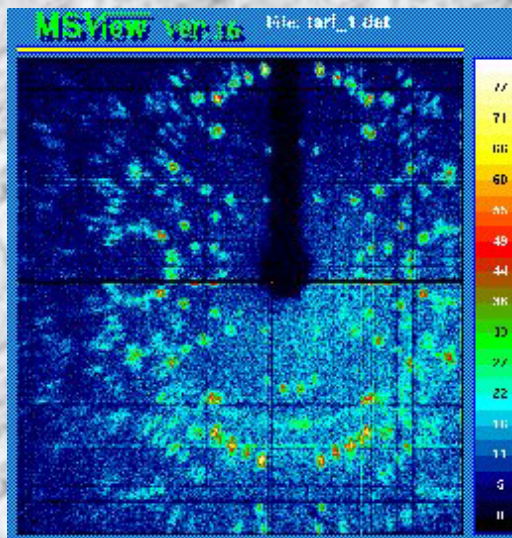


Parallax問題

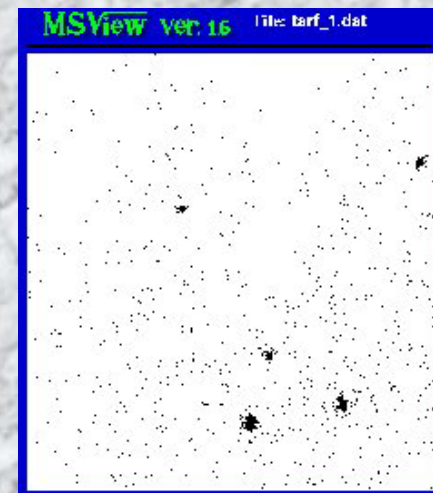


対応手法

- 加圧ゼノン(3気圧程度; 薄いガス層)
- 連続回転
(ロッキングカーブ)



積分画像



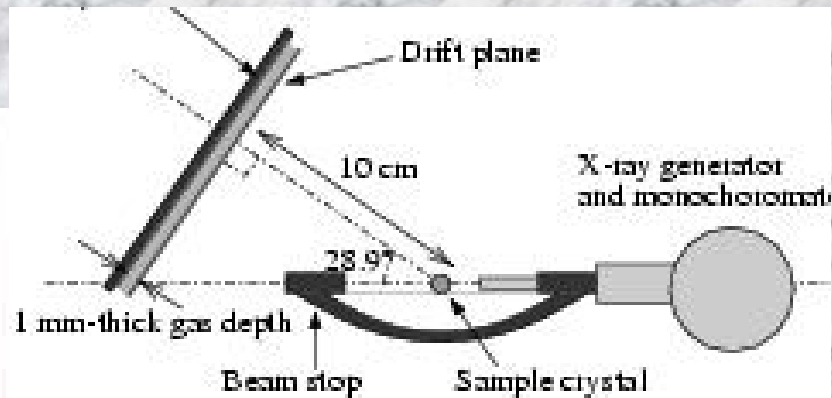
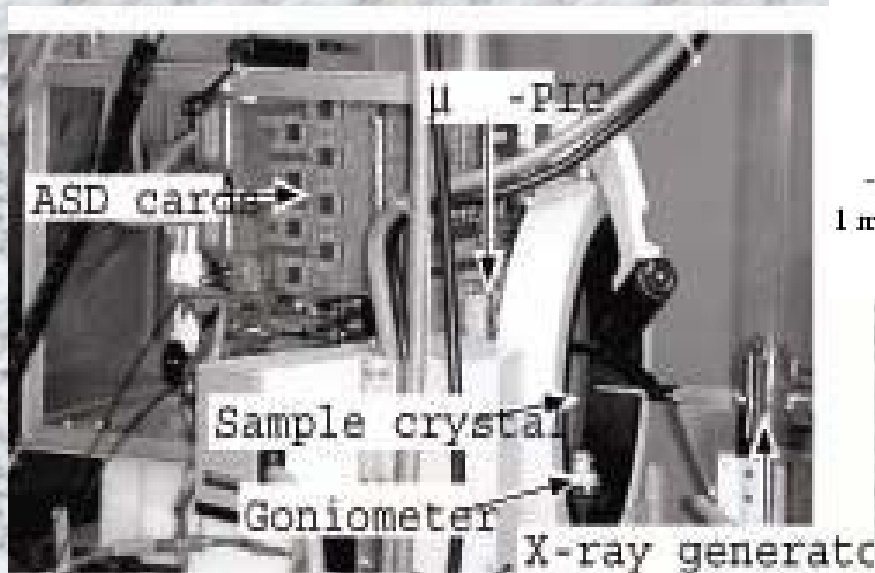
微分画像

新しい物質構造解析を目指して！

KEK大学支援連携事業

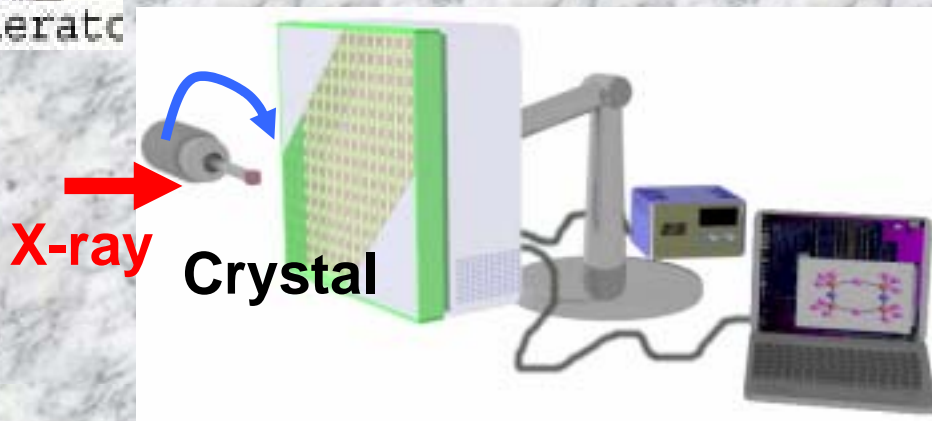
- ◆ **高速**、 巨大分子(たんぱく質)、創薬、材料
タンパク質を数分で！
- ◆ **高精度**(ダイナミックレンジ) たんぱく質
 10^{4-6} を 10^8 以上に！
- ◆ **時分割** 反応のダイナミクス、 光反応、
酵素反応、 など多数の過程
完全構造決定、連続変化を測定
(マイクロ秒スライスで)

X-ray Crystal Structure Analysis



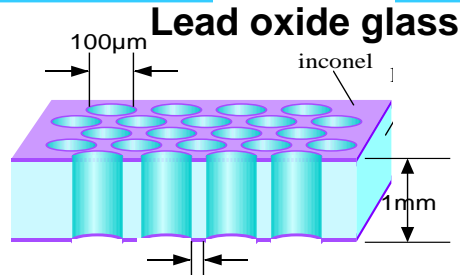
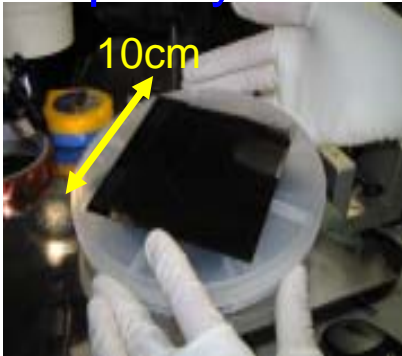
$10 \times 10 \text{ cm}^2$ μ PIC

装置全体を市販X線発生装置上に設置！



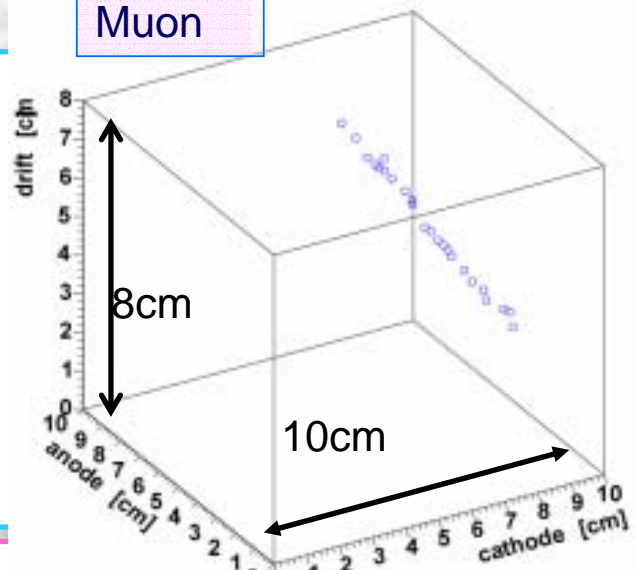
中間増幅器による μ PIC高利得化

Capillary Plate

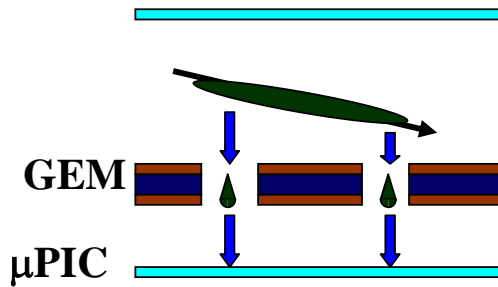


| | |
|------------|-------|
| Total gain | 50000 |
| μ PIC | 1000 |
| Capillary | 50 |

Muon



GEM



| | |
|------------|-----------------|
| Total gain | 2×10^5 |
| μ PIC | 2000 |
| GEM | 100 |

e^- from ^{90}Sr (Q~2MeV)

