

ガス検出器

計測と制御

~放射線計測と実例に現場の技を学ぶ~

2020.7.27

KEK/総研大 宇野彰二

自己紹介

- 宇野 彰二 61歳
- 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)・素粒子原子核研究所 (IPNS)・教授・副所長、総研大・教授
- Belle/Belle II グループのメンバー
 - 大学院生になった時から、一環としてKEKにある電子・陽電子衝突型加速器を使った素粒子実験を行ってきた。
TRISTAN/TOPAZ、KEKB/Belle, SuperKEKB/Belle II
- ガス検出器の専門家
 - TOPAZのエンドキャップガスサンプリングカロリメーターとトリガーチェンバーの設計・製作
 - Belle/Belle IIのCDCの設計・製作を担当
 - GEMを使った検出器の開発も行っている。

ガス放射線検出器

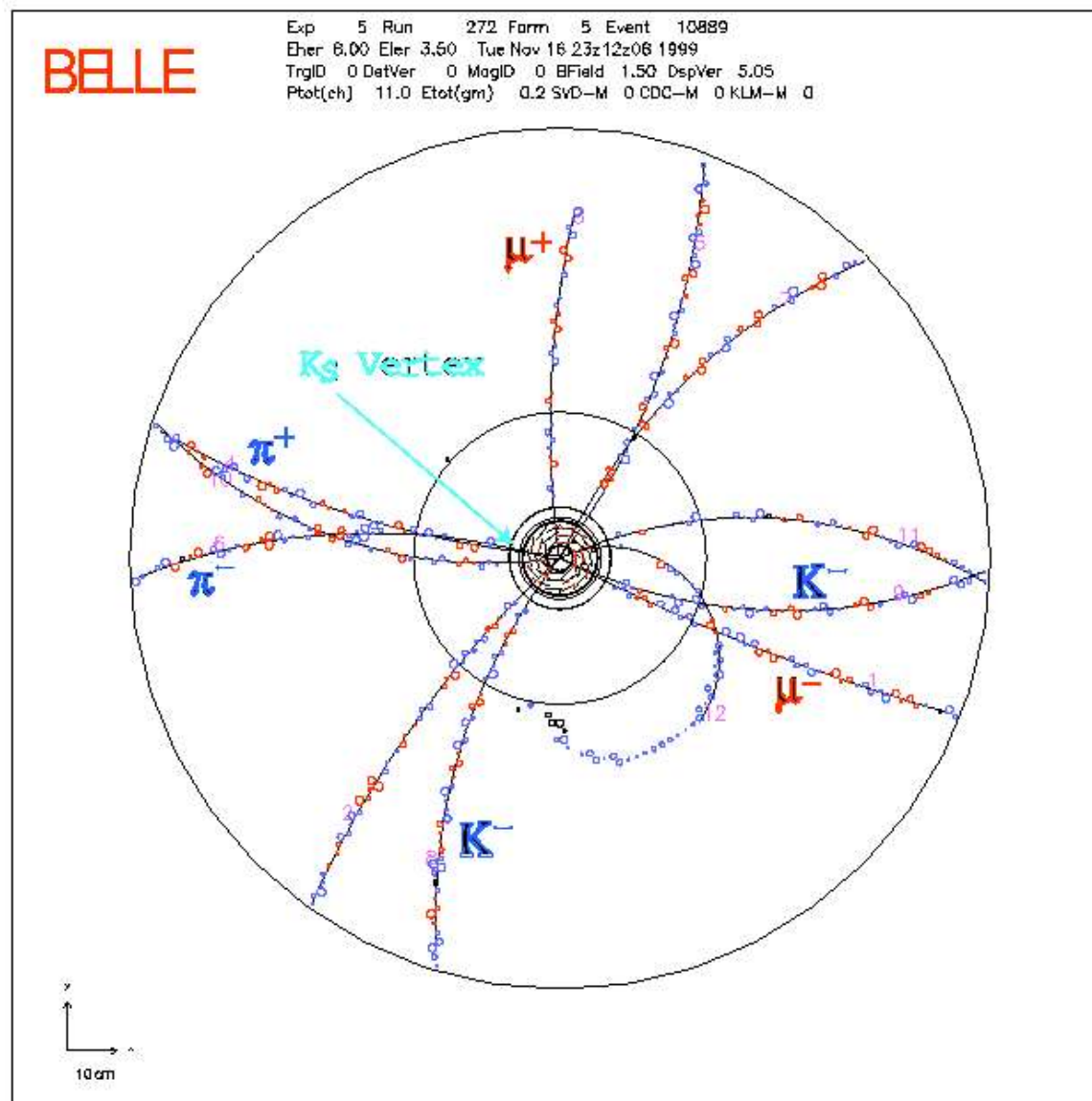
1. ガスワイヤーチェンバーの動作原理
2. ガスワイヤーチェンバーの応用
3. 最近のガスチェンバー
4. GEMチェンバー基本特性
5. GEM型中性子画像検出器

ガスワイヤーチェンバー

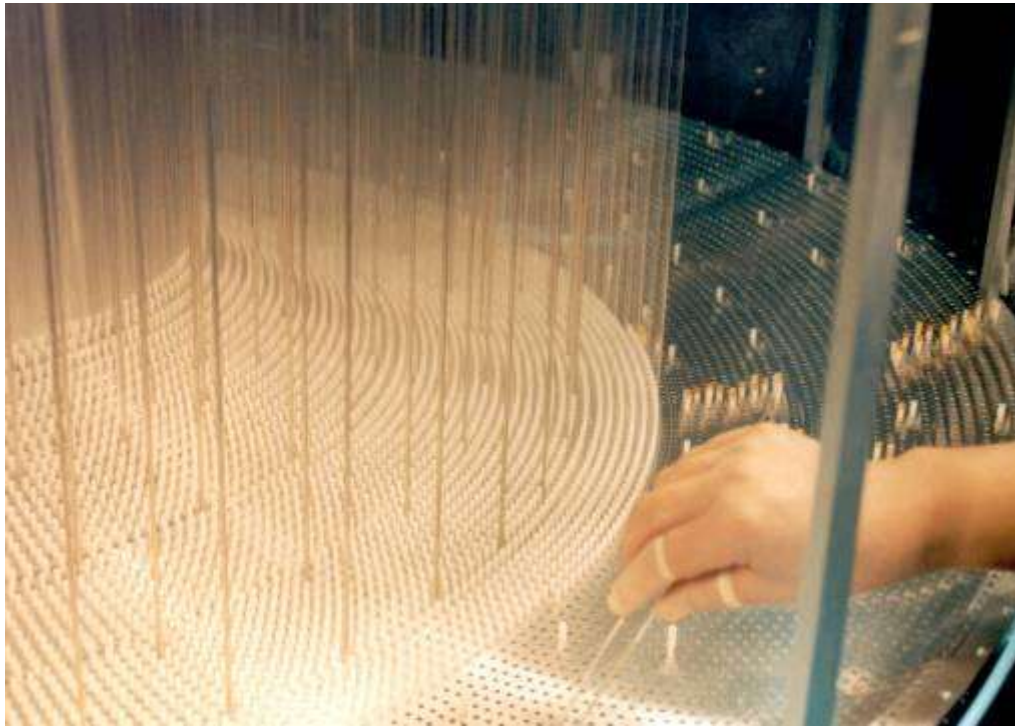
- 荷電粒子がチェンバー内のガスをイオン化することによって電子を生成し、ワイヤー付近でガス増幅し、電気信号として取り出す。
- 安価、容易に巨大化
- 低物質質量 → 生成された粒子の状態を損なわない。
- 広く素粒子・原子核実験に使用されている。
 - 素粒子実験には無くてはならない検出器
 - 素粒子実験に対する貢献があまりにも絶大であるのでその発明者シャルパック(G.Charpak)は、ノーベル物理学賞を受賞している。
- 比例計数管, ガイガーカウンター
 - 放射光実験、ヘリウム-3中性子カウンター
 - 放射能測定

ガスワイヤーチェンバー

- 荷電粒子の飛跡を捕らえる測定器
- Belle実験をはじめ、多くの素粒子実験に使われている。
- 細いワイヤーを利用した単純な構造



Belle実験用ワイヤーチェンバー



チェンバー内部
ワイヤー張り作業中



Belle用
現在、上野の国立科学博物館に展示

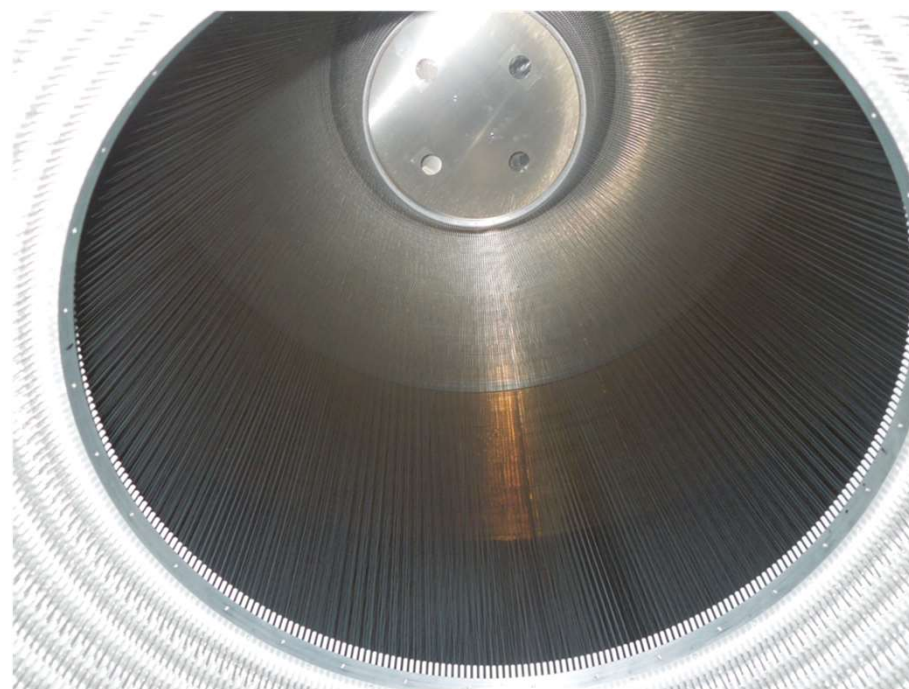
建設風景 (ワイヤー張り)

製作には5年以上かかっている



内側の検出器

まさにワイヤーを張っている様子
横張り 5,120本

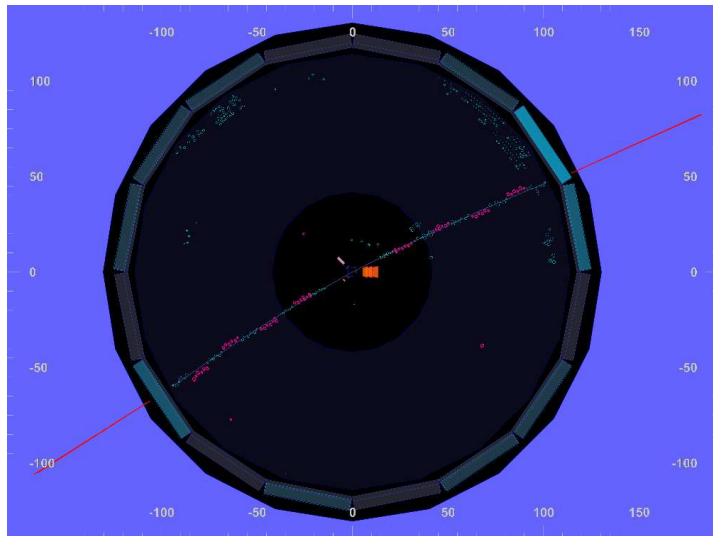
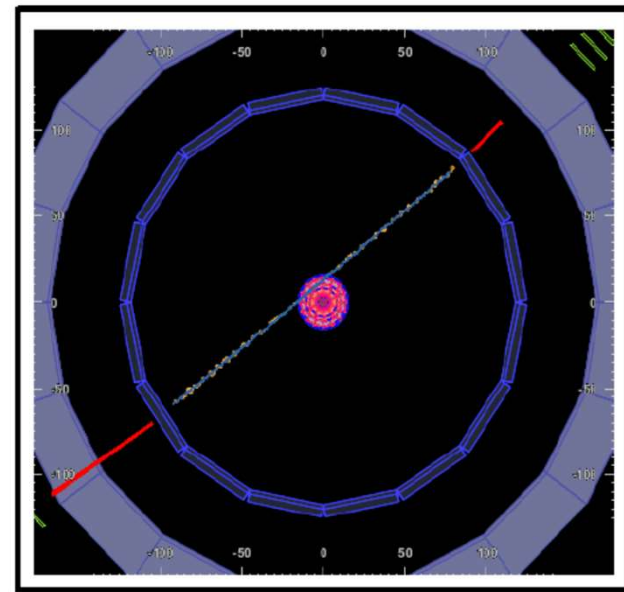
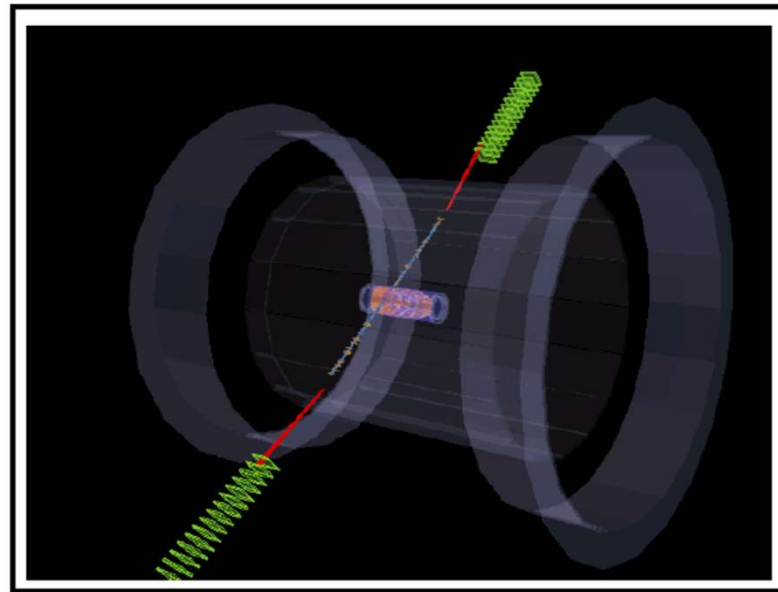


外側の主な検出器

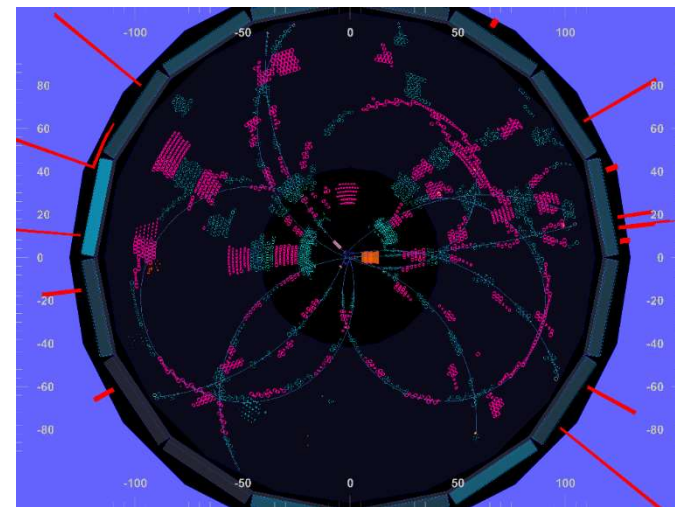
ワイヤーを張り終わって
内側を見た様子
縦張り 43,776本

Belle II

宇宙線



バーバー事象



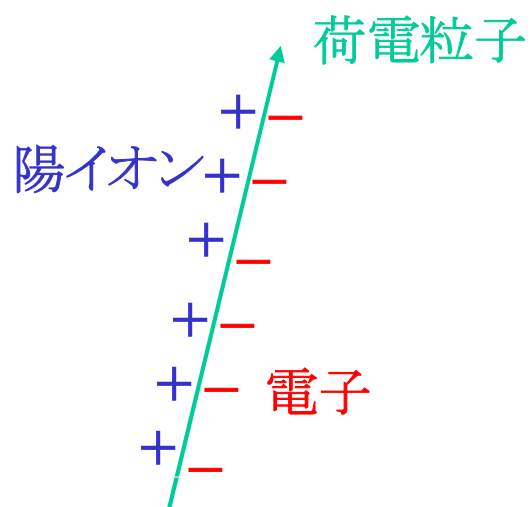
B中間子崩壊事象

ワイヤーチェンバーの動作原理

- 荷電粒子によるガス分子のイオン化(電離、電子の生成)
- 生成された電子の移動(ドリフト)
- 陽極ワイヤー近傍でのガス増幅
- 電磁誘導によるパルス信号の発生

ガス分子のイオン化 I

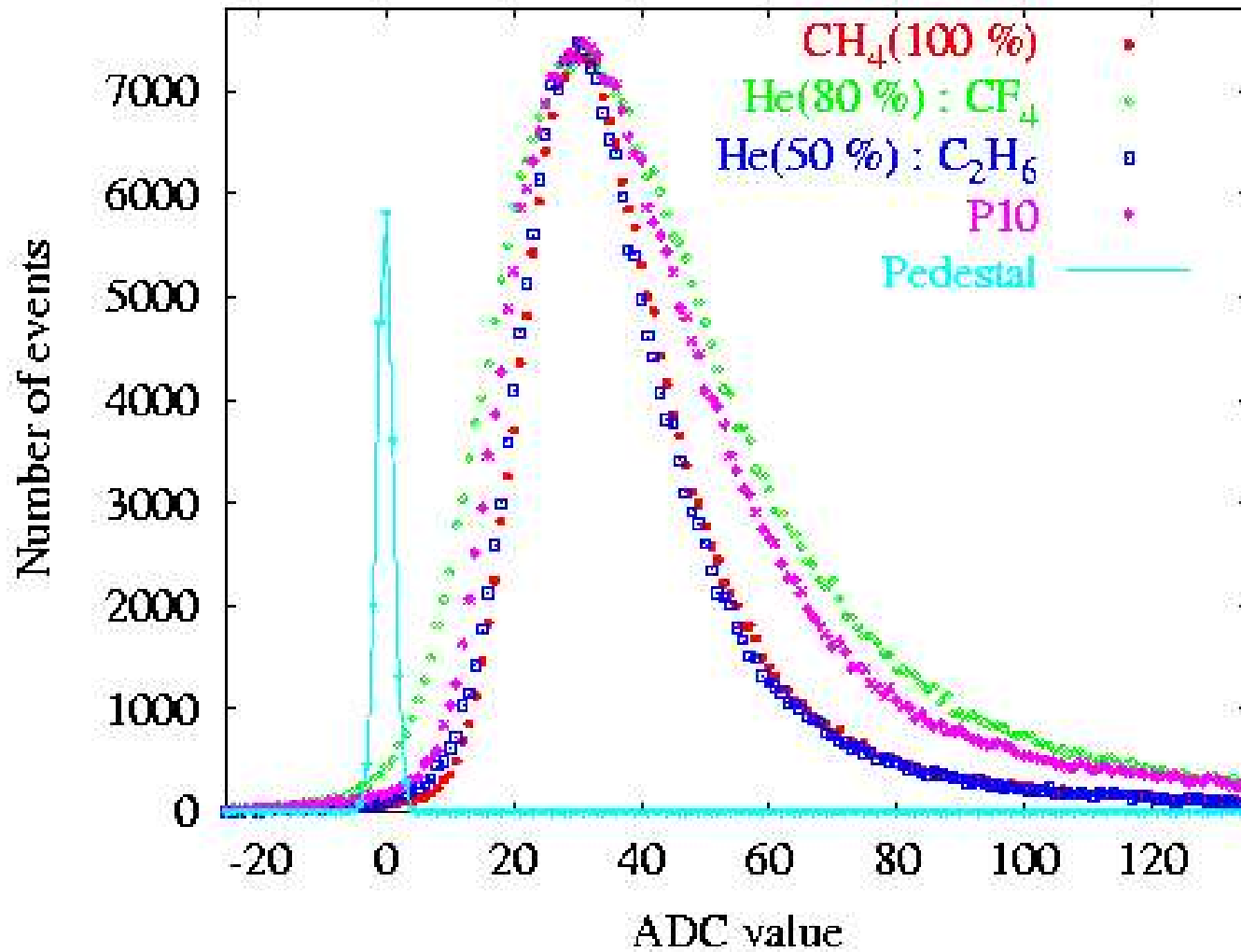
- 荷電粒子がガス中を通過すると荷電粒子とガス分子の中の電子との衝突によって電子とイオンが生成される（イオン化，電離）。
- 荷電粒子は、その分だけエネルギーを失う。このことを荷電粒子のエネルギー損失という。
- 発生する電子の数は、エネルギー損失の量に比例する。



ガス分子のイオン化 II

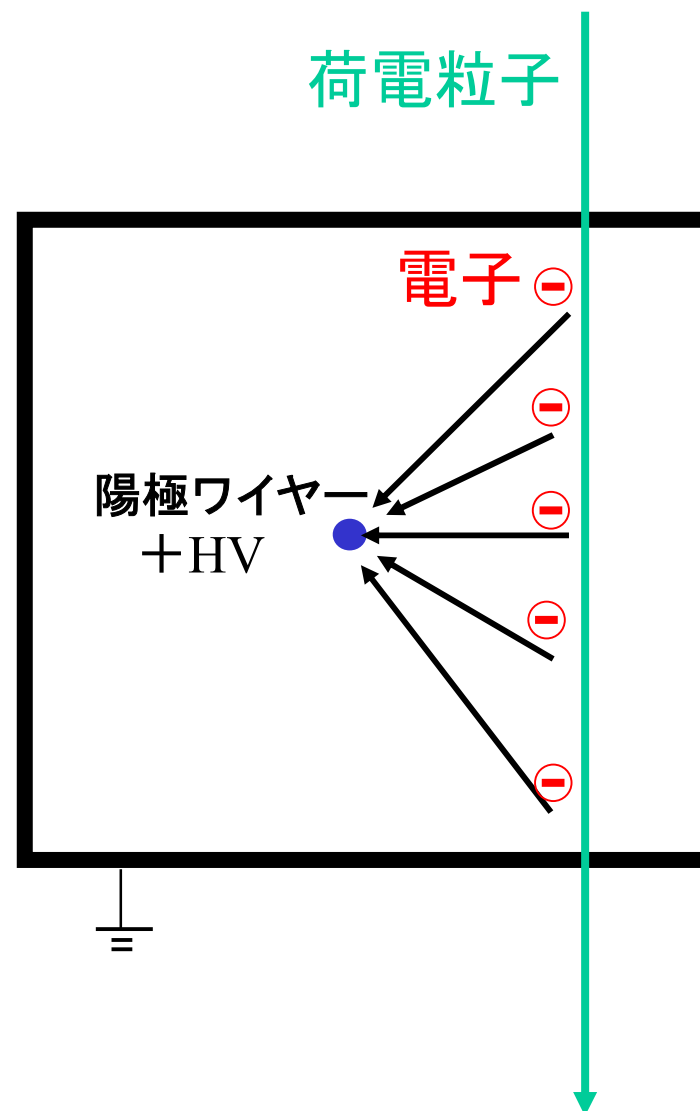
- イオン化には、2つの過程がある。
 - 初期イオン化 ~ 30 個/cm (アルゴン)
 - 初期イオン化によって出来た電子には、大きなエネルギーをもったものもある。このような電子は、別の分子をイオン化できる。
 - 最終的なイオン化の数 ~ 100 個/cm (アルゴン)
- δ 線 (δ -ray)
 - 初期イオン化によってできた電子の中で、特に大きなエネルギーをもつもののことを δ -rayという(1MeV程度のエネルギーになることもある)。
- 出来る電子の総数の分布
 - イオン化によって出来た電子の総数の分布は、ガウス分布でなく、多い方にテイルを引く。これをランダウテイルと呼ぶ。
 - 理由は、イオン化によって出来る電子の数が少ないことからくる統計的なものと δ -rayによる影響である。

波高分布



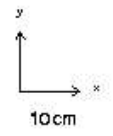
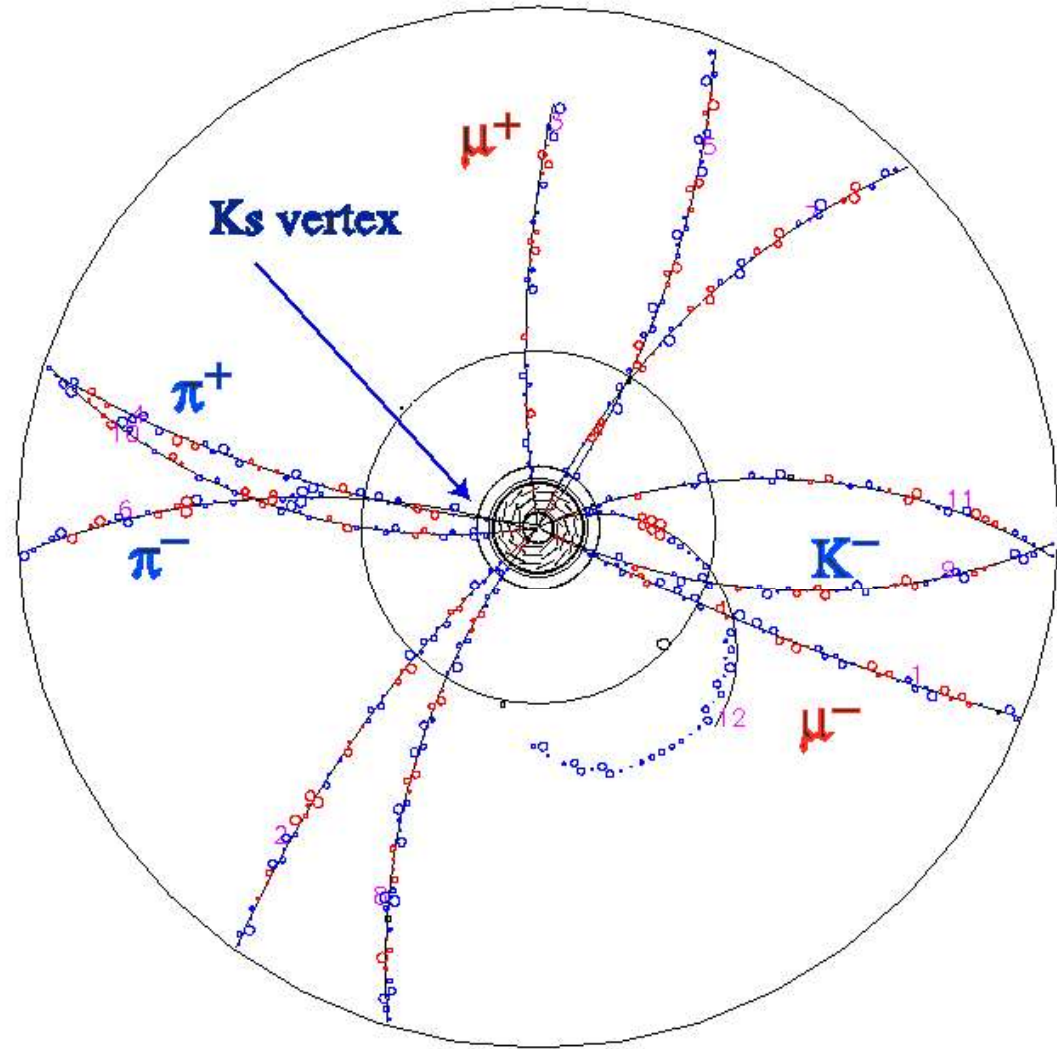
生成された電子の移動(ドリフト)

- ワイヤーに高電圧を印可することによって電場を形成する。
- 電場にそって電子が陽極ワイヤー(センスワイヤー)に向かって移動する(電子のドリフト)。
- 移動中の多重衝突によって移動速度は比較的遅い。
~50 $\mu\text{m}/\text{nsec}$
(1nsec=0.000000001sec:10億分1秒)
比較として、光速: 30cm/nsec
- 移動時間の測定によって位置精度が飛躍的に向上する。
→ ドリフトチェンバーの名の由来



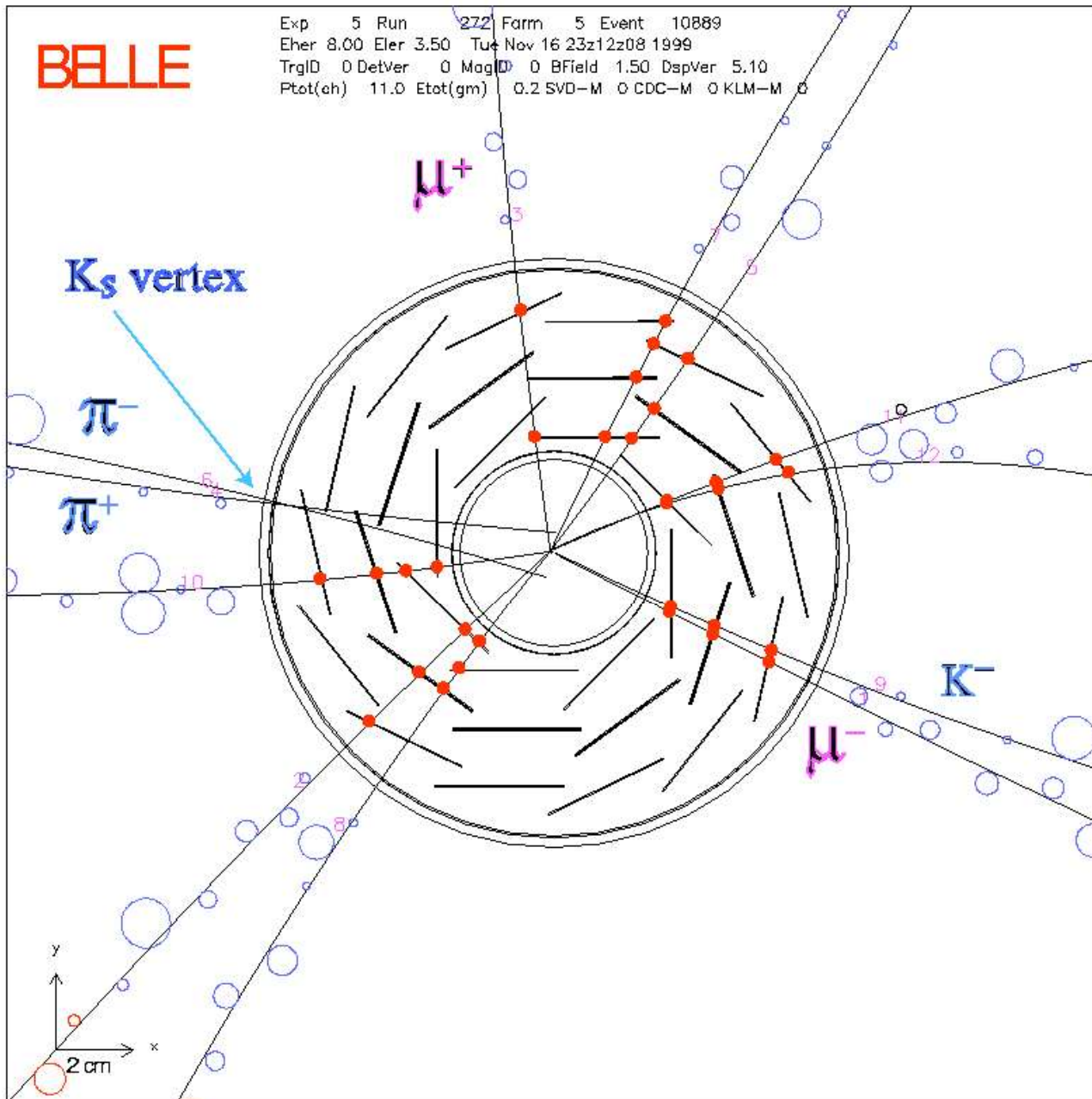
BELLE

Exp 5 Run 272 Farm 5 Event 10889
Eher 8.00 Eler 3.50 Tue Nov 16 23z12z08 1999
TrgID 0 DetVer 0 MagID 0 BField 1.50 DspVer 5.10
Ptot(ch) 11.0 Etot(gm) 0.2 SVD-M 0 CDC-M 0 KLM-M 0



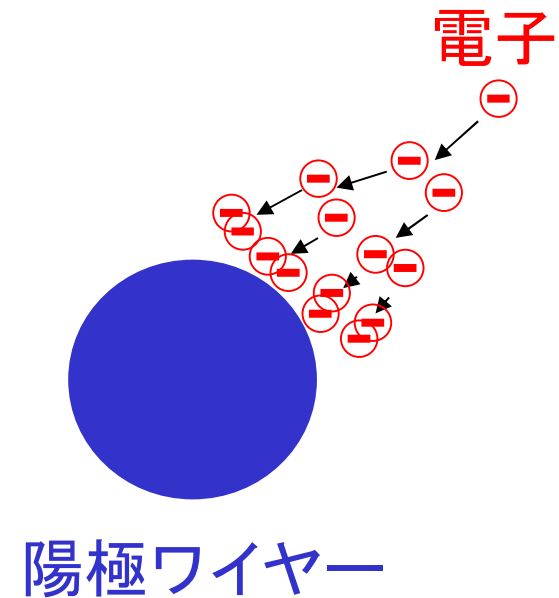
BELLE

Exp 5 Run 272 Farm 5 Event 10889
Eher 8.00 Eler 3.50 Tue Nov 16 23z12z08 1999
TrgID 0 DetVer 0 Mag 0 BField 1.50 DspVer 5.10
Ptot(oh) 11.0 Etot(gm) 0.2 SVD-M 0 CDC-M 0 KLM-M 0

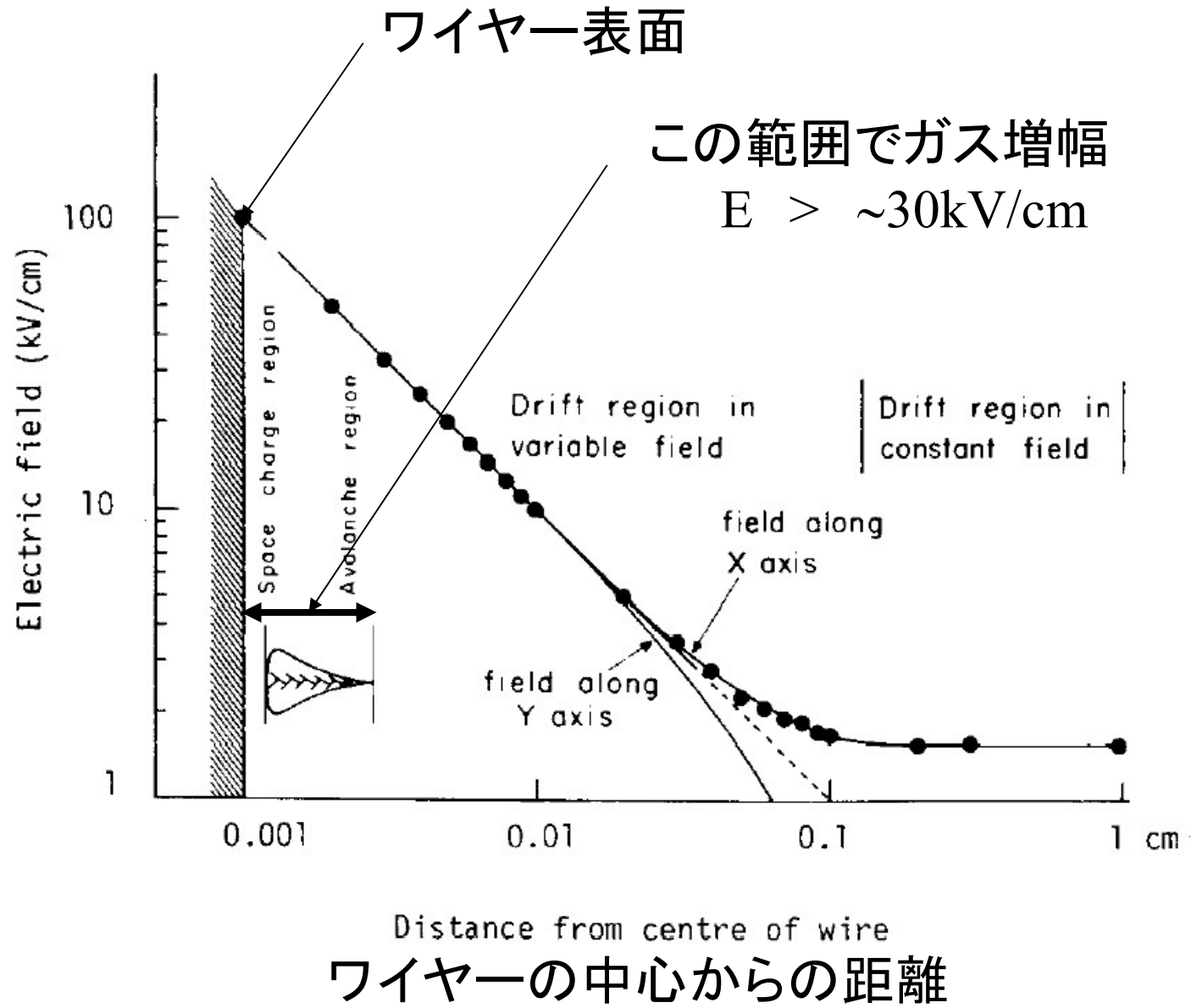


陽極ワイヤー近傍でのガス増幅

- 細いワイヤー(直径 $\sim 0.03\text{mm}$)を使うことによって高電場($> 30\text{kV/cm}$)が容易に得られる。
- ワイヤー近傍での高電場によって電子が加速される。
- 加速された電子がさらにガス分子をイオン化する。
- この繰り返しによって電子(及びイオン)の数がねずみ算式に増大する
(ガス増幅、電子雪崩)。
- 増幅度は、 $\sim 10^5$ まで容易に得られる。
- 信号の大きさ(最終的な電子の総数)は、最初の電子の数(エネルギー損失)に比例する。ただし、増幅度があまり大きくなると比例関係が崩れる。



電場

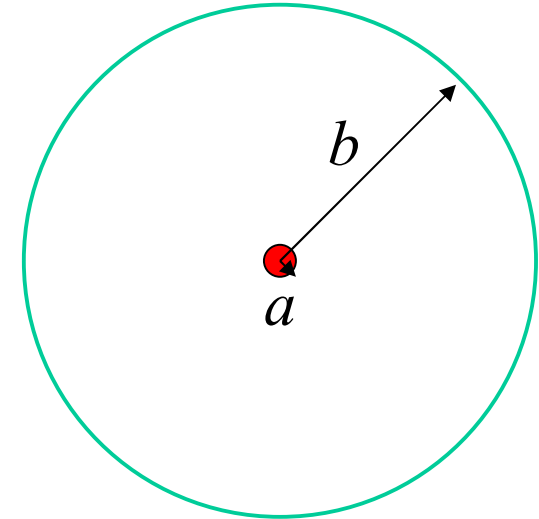


ガス増幅度 I

- 電場 $E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$, $C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(b/a)}$
- 電子がガス分子と衝突して次の電子を放出するまでに移動する平均距離(仮定)
 $\Delta r = 1/(kN\epsilon)$ N :ガス分子の密度
- 電子が電場からもらうエネルギー

$$\epsilon = E(r) \cdot \Delta r$$

$$\longrightarrow \Delta r(r) = \frac{1}{\sqrt{kNE(r)}}$$



ガス増幅度 II

- 電子 n 個が dr 移動する間に増える電子の数は、

$$dn = -n \cdot 1/\Delta r(r) \cdot dr = -n \cdot \sqrt{kNE(r)} \cdot dr = -n \sqrt{\frac{kNCV_0}{2\pi\epsilon_0}} \sqrt{\frac{1}{r}}$$

- これを積分すると、ガス増幅度 M は、

$$M = \frac{n_{final}}{n_{init}} = \exp \sqrt{\frac{kNCV_0}{2\pi\epsilon_0}} \int_a^{r_c} \sqrt{\frac{1}{r}} dr$$
$$= \exp \left[2 \sqrt{\frac{kNCV_0 a}{2\pi\epsilon_0}} \left(\sqrt{\frac{r_c}{a}} - 1 \right) \right]$$

r_c : ガス増幅が始まる径

ガス増幅度 III

- ガス増幅の始まる径は、条件によって大きく変わるので、ガス増幅の始まるエネルギーに書き換えると

$$M = \exp\left(\frac{Q}{\pi\varepsilon_0\varepsilon_c} - \sqrt{\frac{2kNQa}{\pi\varepsilon_0}}\right) \quad \varepsilon_c^2 = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0kN} \frac{1}{r_c}, \quad Q = CV_0$$

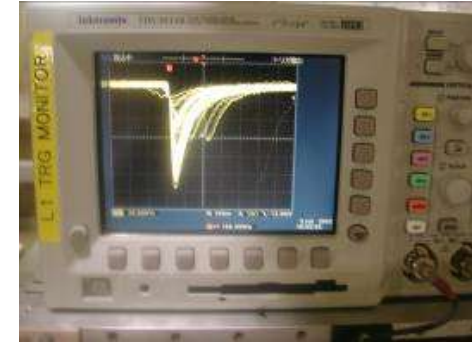
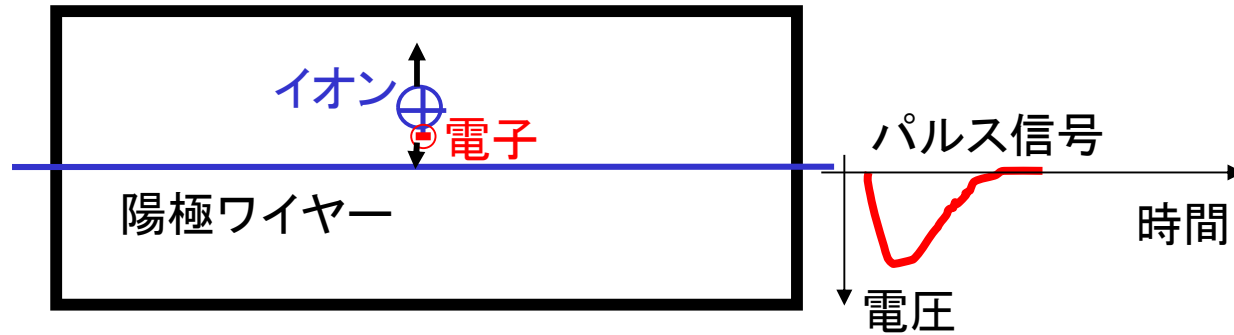
- この式で ε_c , k はガスのみによるパラメーター
- センスワイヤー径 a が同じならばガス増幅度は、 Q (線電荷)のみによる。
- セルの大きさ b は C を通してのみ効く。 a は C に効く分と直接効く分がある。
- ガスの温度、圧力は N を通して効く。 $N = P/RT$
- N が大きくなると増幅度は下がる。

ガス増幅の制御

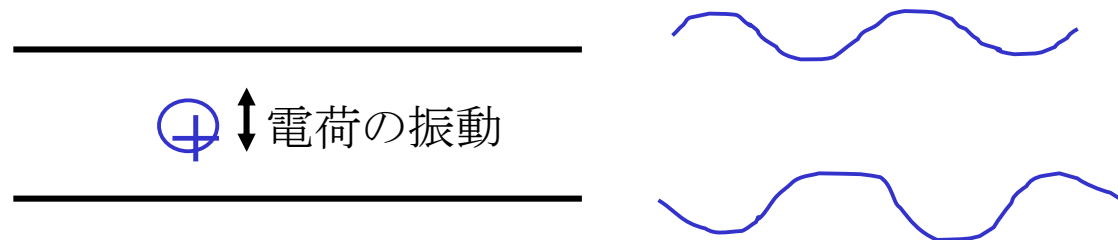
- ガス増幅度が大きくなるとガス増幅過程を制御しないとガス増幅を止められなくなる。→ 放電(持続的)
- いわゆる希ガス(例えば、アルゴン)だけだと、大きな増幅度は得られない。→ なぜか？
- ガス増幅過程でイオン化した分子からは、外郭電子が基底レベルに落ちることによって紫外線が出る。その紫外線がワイヤー、壁や他のガス分子をイオン化して電子をさらに作り出す。
- ガス増幅を局所的に制限して大きな増幅度を得るためには、この紫外線を吸収する必要がある。
- そのために、クエンチャーと呼ばれるガス(メタン等)を加える。
- では、クエンチャーだけではだめか？ → 大丈夫である。

電磁誘導による信号の発生

- 最終的な電気信号(パルス信号)は、電子、及びイオンの移動による電磁誘導で発生する。



- センスワイヤーに信号が出ると同時にカソード(陰極)にも信号が出ている。イオンがカソードに到達する前に信号は出る。
- イオンの移動速度は、電子のドリフト速度に比べて遅い(約1000倍)。



信号の形

イオンの移動速度は電場に比例。

→ 陽極ワイヤーから離れると遅くなる。

→ 電子増幅によって得られた電荷をすべて読み込むには時間が相当時間が掛かる。

読み出しの時間特性によって変わる。

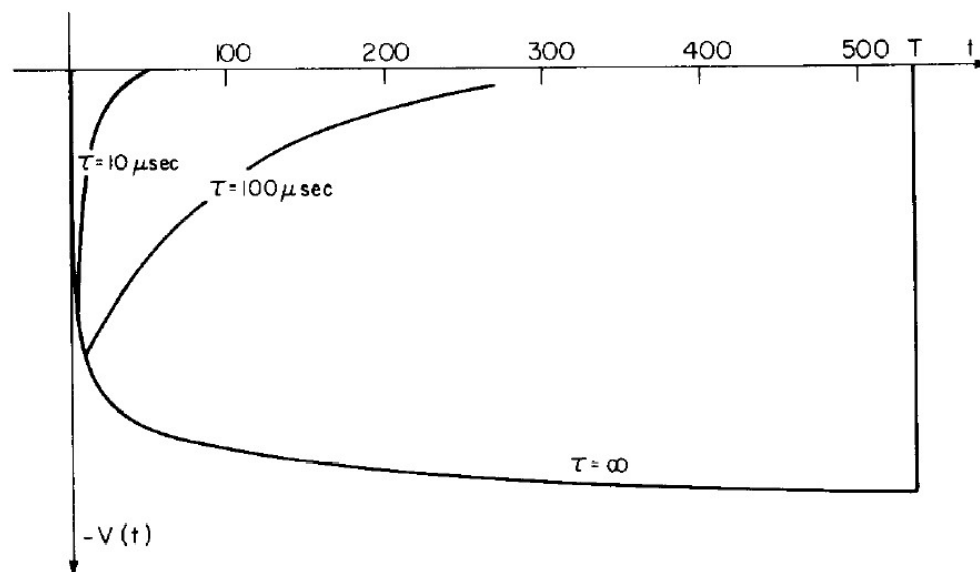
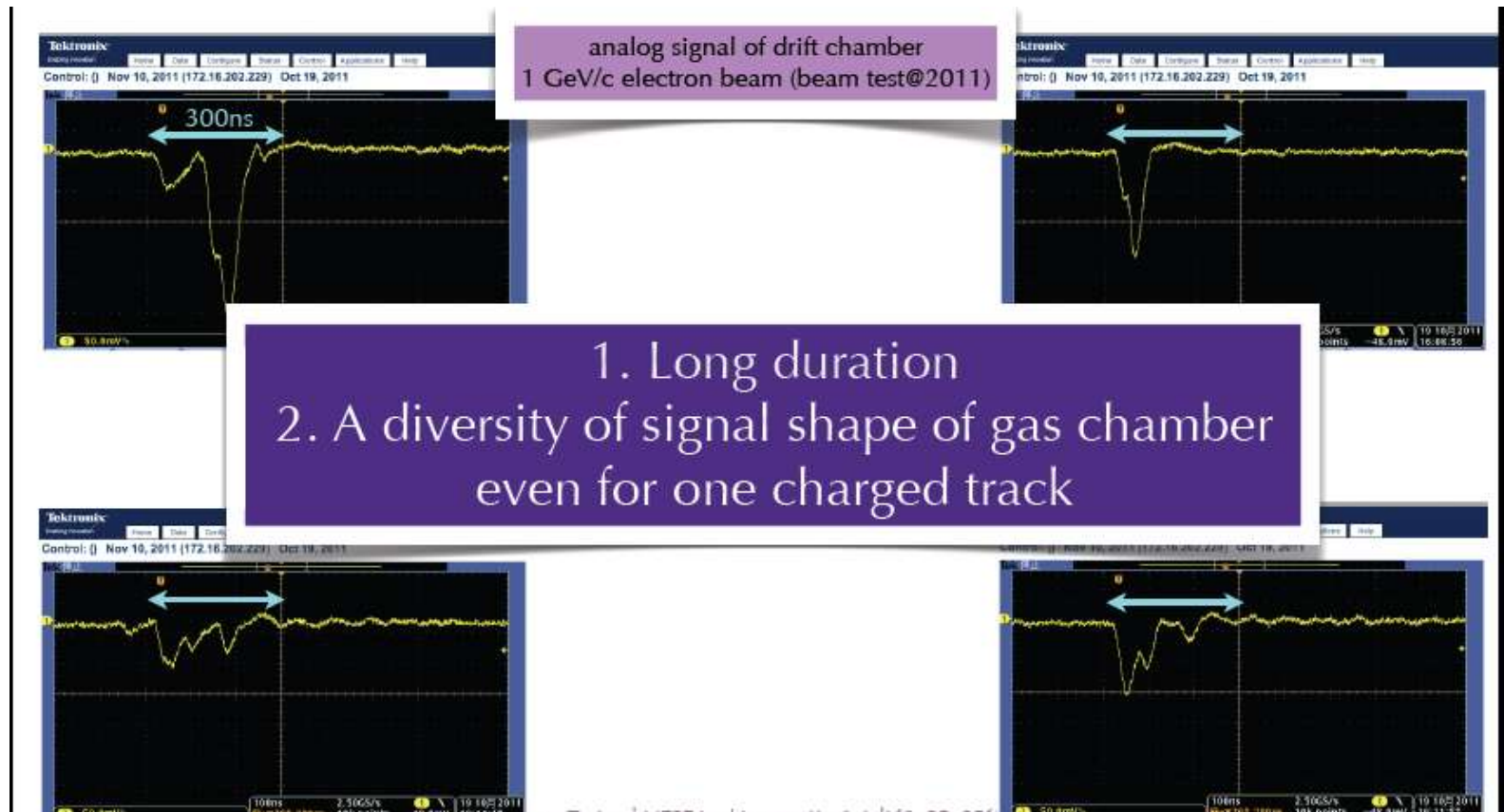


Fig. 52 Time development of the pulse in a proportional counter; T is the total drift time of positive ions from anode to cathode. The pulse shape obtained with several differentiation time constants is also shown.

荷電粒子に対する信号波形

- 1個1個の信号の形は同じではない。
- 立ち上がり : $\sim 10\text{sec}$, 信号の継続時間 : $\sim 300\text{nsec}$
(**Belle**のチェンバーの場合、 2cm 程度のセル)

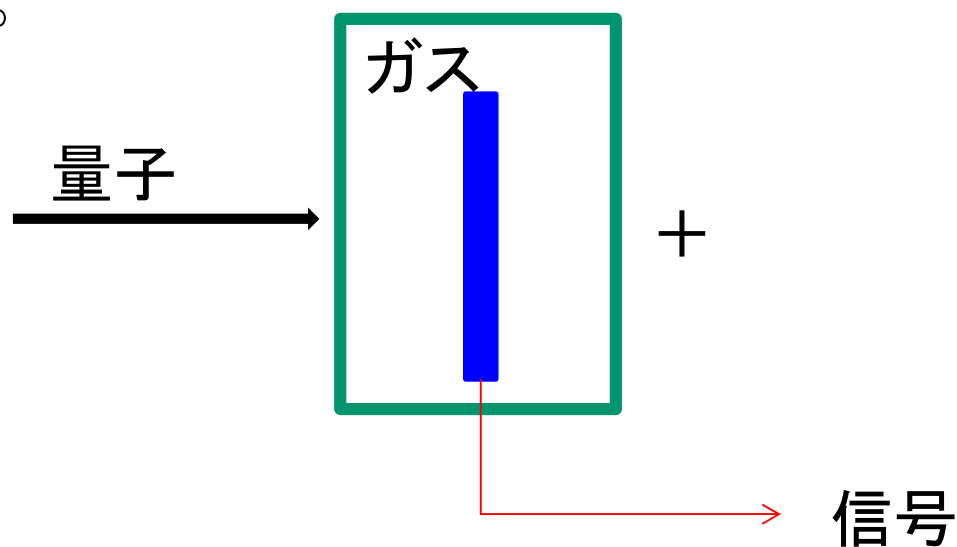


ガス増幅度の違いによるカウンタータイプ I

- イオン化によってできた電子が変わらない領域
 - イオンチェンバー (Ionization chamber) 電離箱
 - 1個1個、量子を測定できない。
- ガス増幅によって出来た電子の総数がイオン化によってできた電子の数に比例している領域
 - 比例カウンター (Proportional counter)
 - 一般に、信号が小さいので、前段増幅器が必要。
- ガス増幅がワイヤー全長にわたって起こる。
 - ガイガーカウンター (Geiger-Muller counter)
 - 大きな信号、信号を増幅する増幅器が簡便になる。
 - 測定計数に限界がある。
 - 放射能の測定

電離箱

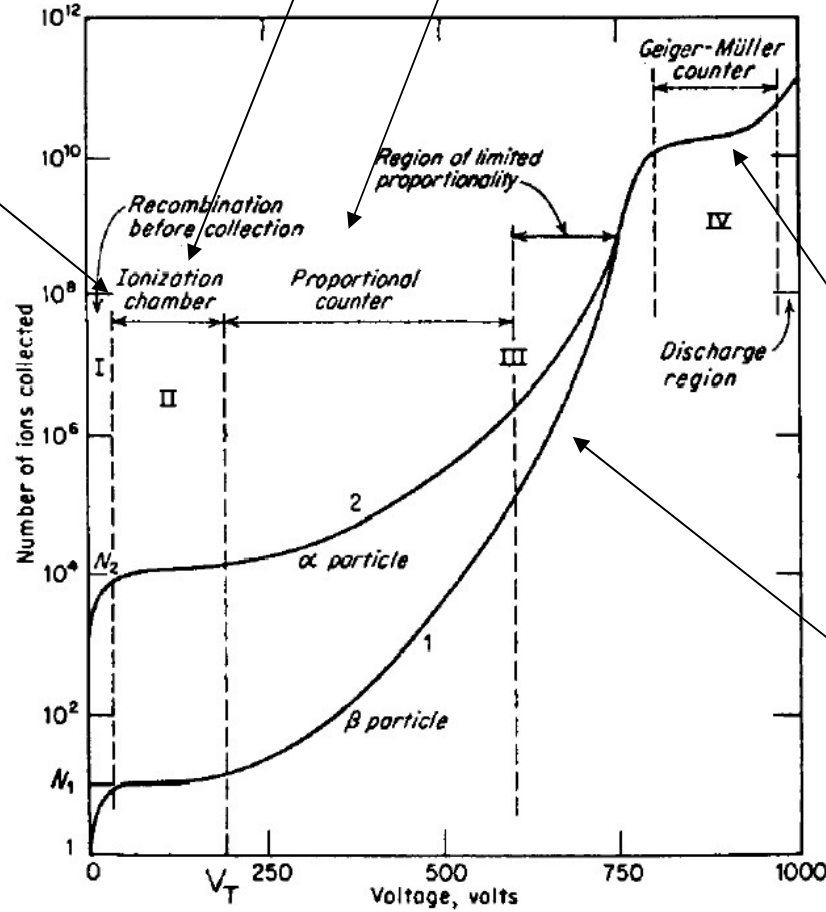
- 古くから使われている放射線検出器
 - ガス中で発生した、イオン(または、電子)を集める。
- ガス増幅はなく、大量の量子が入射する場合に使われる。
- 安定で、安価だが、1個1個の量子を検出することは難しい。



イオン化によって
出来た電子が減少してしまう
領域

増幅度 1
比例領域

増幅度 $\times Ni$



ガイガーミュラー

準比例

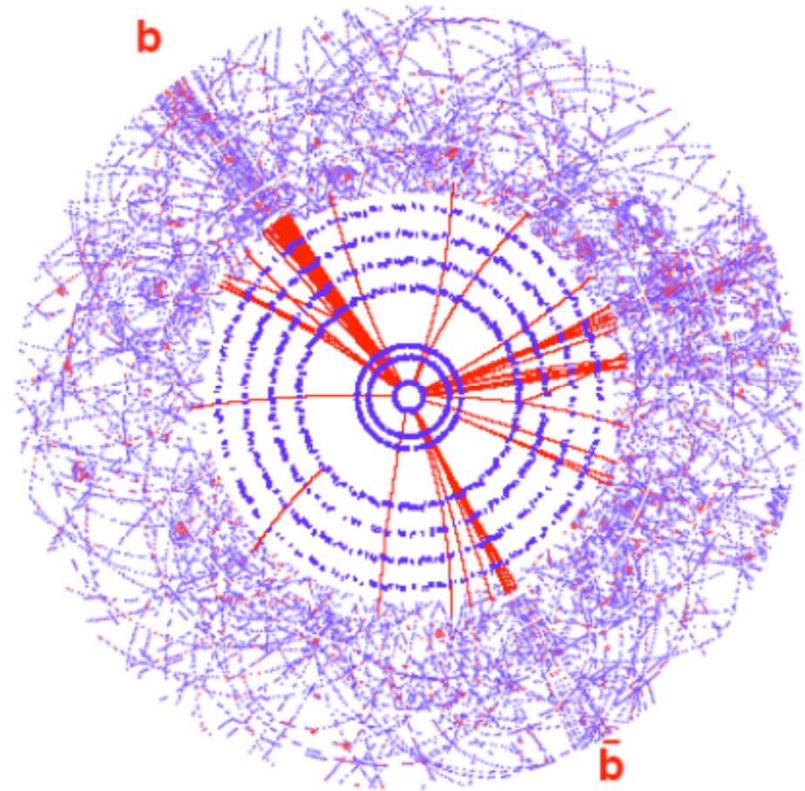
印加電圧

ガス増幅度の違いによるカウンタータイプ II

- ガス増幅度が大きくなるにしたがって信号は大きくなるので、読み出しは容易になる。
- ただし、その分最初のイオン化の情報を失う。
- また、不感時間・空間(dead time・space)が大きくなる。
- それに、放射線損傷でチェンバーの寿命が問題になる。
- 目的、仕様環境によって色々な動作モードが選択されている。

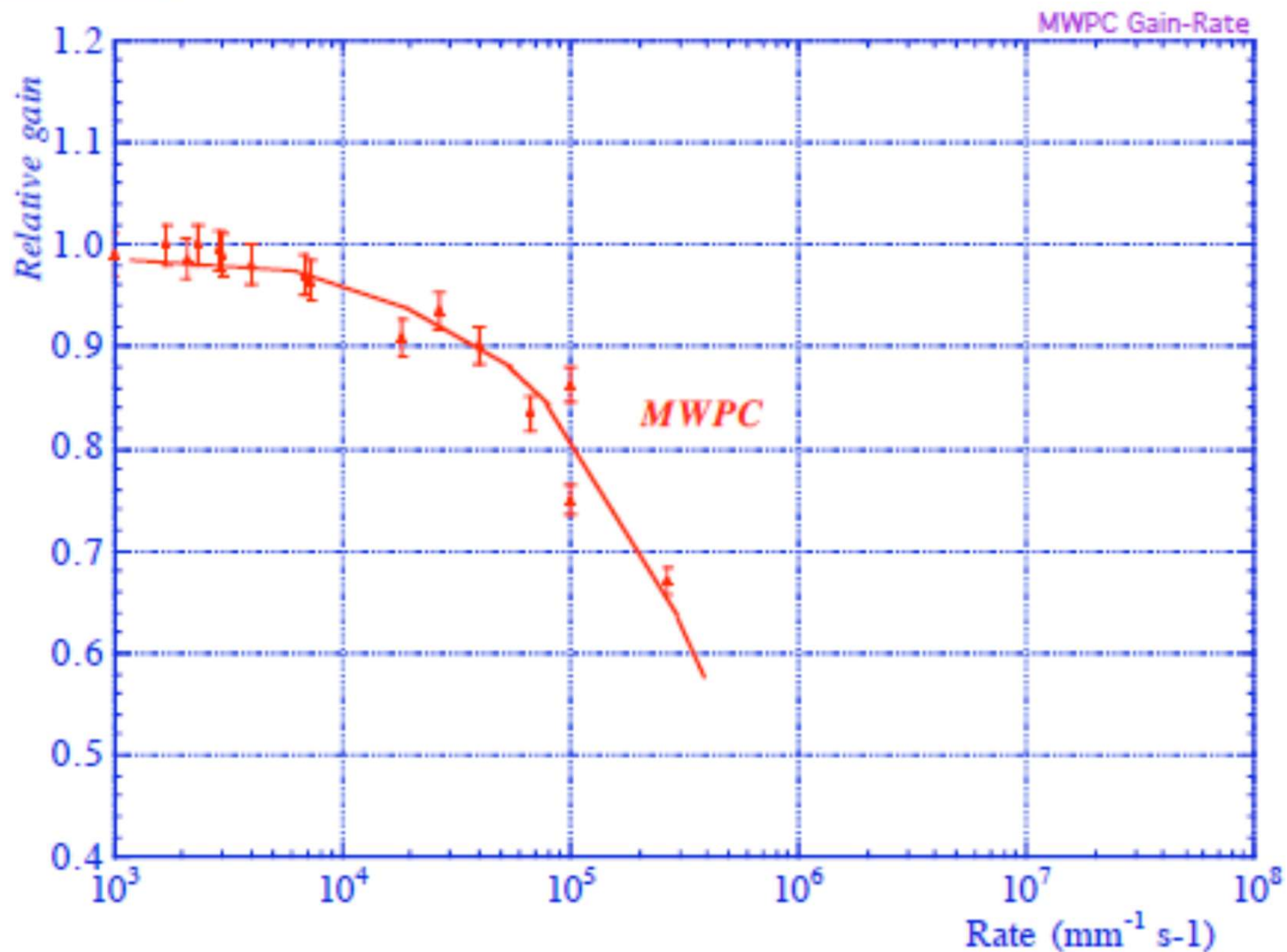
最近のガスチェンバー

- 要求
 - 入射粒子の頻度が高い。
 - 1本のワイヤーの受け持つ範囲が広い。
 - ワイヤー間隔 $\sim 2\text{mm}$ 程度が限界
 - ワイヤーの長さ方向 $\sim 10\text{cm}$ (分割すると不感領域が増える)
 - 真の2次元読み出し
 - ワイヤーによる1次元の制約がない。



LHC ATLAS

ワイヤーチェンバーの限界



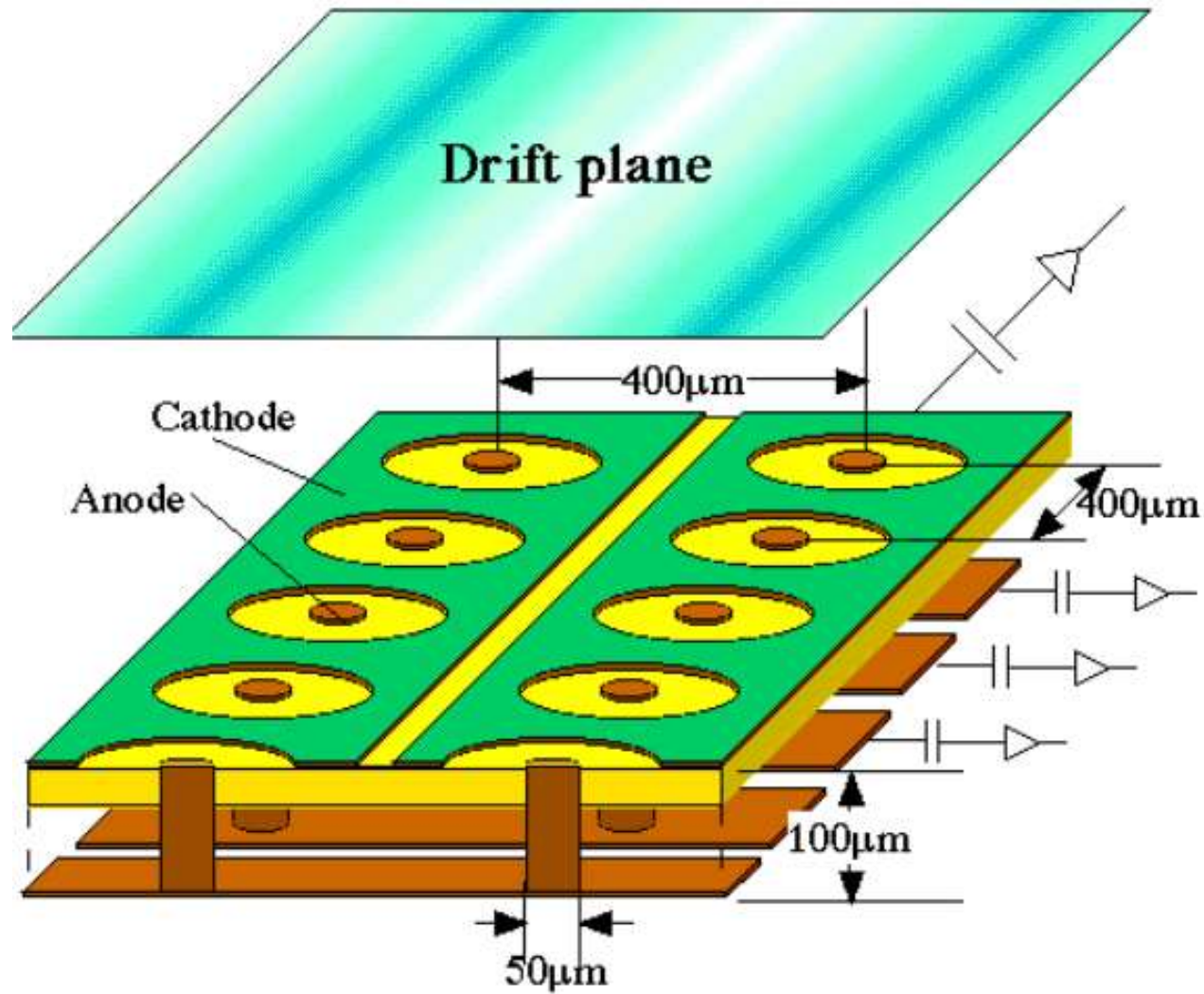
新しい試み

- **MPGD (Micro Pattern Gas detector)の開発**
 - ワイヤー以外のもので高電場を形成してガス増幅。
 - 3種類
 - MSGC (Micro Strip Gas Chamber)
 - MICROMEGAS (Micromesh Gaseous Detector)
 - GEM (Gas Electron Multiplier)

MSGC

- MSGC(Micro Strip Gas Chamber)
 - PCB(プリントサーキットボード)で電極を形成してガス増幅。
 - 絶縁層での電荷の蓄積 → 放電
 - 増幅度をさほど大きく出来ない。
 - 一時、世界的に開発が進められたが、今は下火。
 - 日本では、京大で開発が進められている。
 - μ -PIC
 - 中性子への応用
 - 増幅度がそれほどいらない。
 - 日本では、東大工学部 高橋さん

μ -PIC



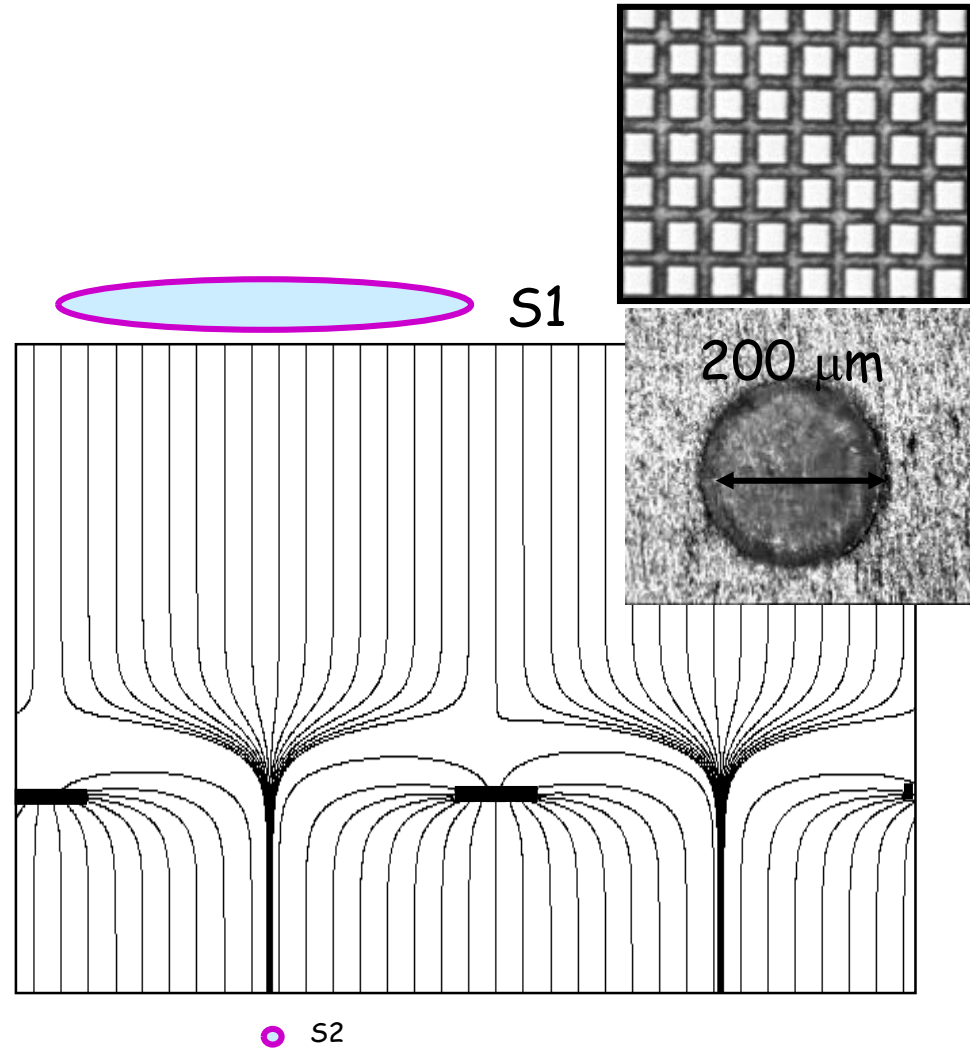
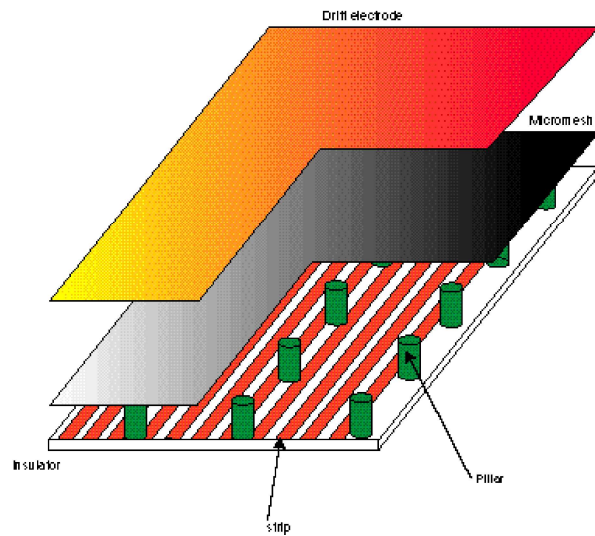
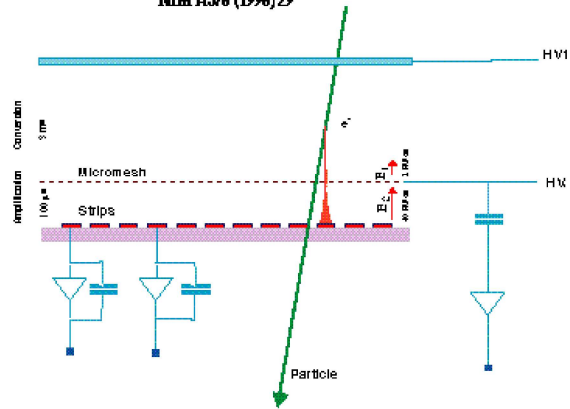
MICROME GAS 1

- 金属メッシュを読み出しPCBの上50 μm 程度のところに配置
- その間の高電圧を印加して、高電場を形成してガス増幅。
- スペーサーを配置し、50 μm 程度と狭いギャップを確保。

MICROMEAS 2

MICROMEAS

Y.Giomataris, Ph. Rebourgeon, J.F Robert and G. Charpak
NIM A36 (1996) 29

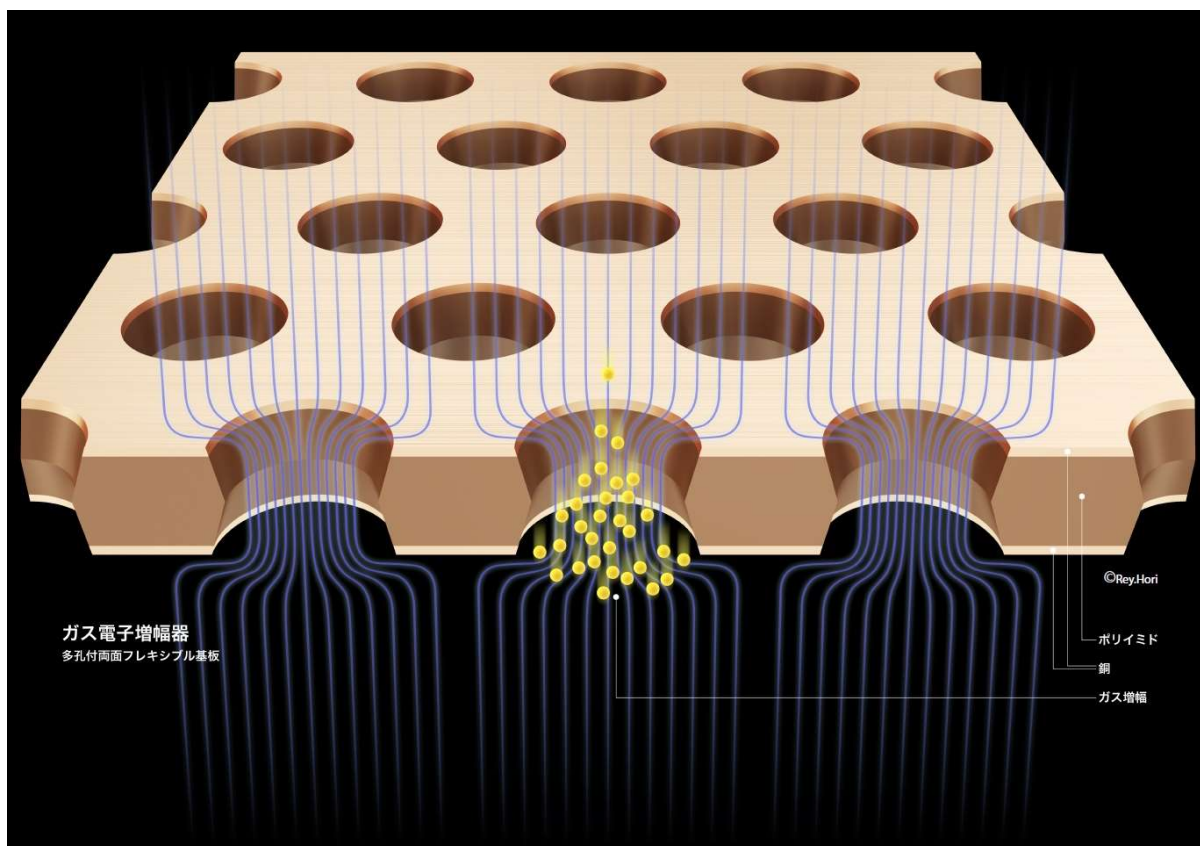


GEM 1

- フレキシブル両面基板
 - 厚さ 50 μm 程度
 - 多数の穴
 - ・ ピッチ 140 μm
 - ・ 穴径 70 μm
- 両面間に高電圧
 - 穴内に高電場が形成され、ガス増幅
- 多数段組み合わせることによって、全体の増幅度を上げることが可能。

GEM (Gas Electron Multiplier)

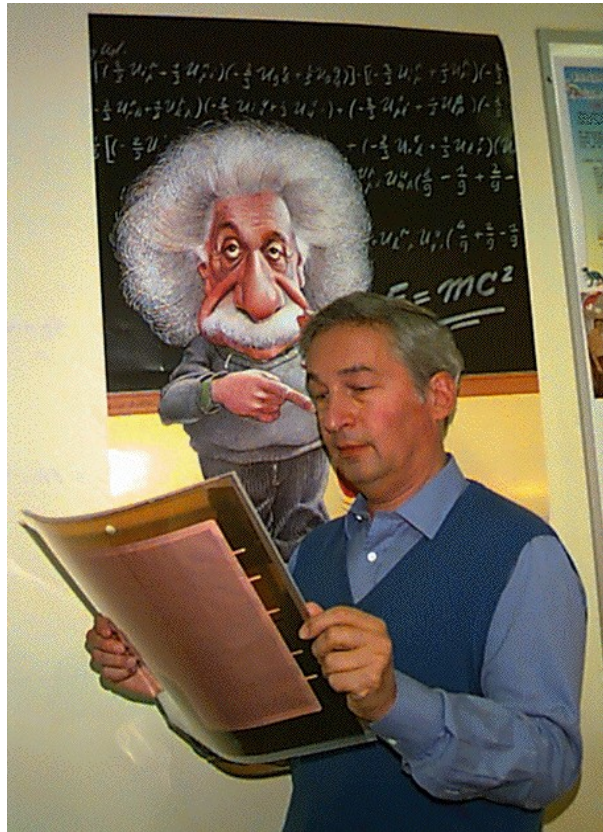
両面フレキシブル基板 電気力



穴径	70 μm
穴ピッチ	140 μm
絶縁材の厚さ	50 μm
銅箔厚さ	5 μm

F.Sauli (CERN) によって1997年
に提案 NIMA 386(1997)531

自由な形



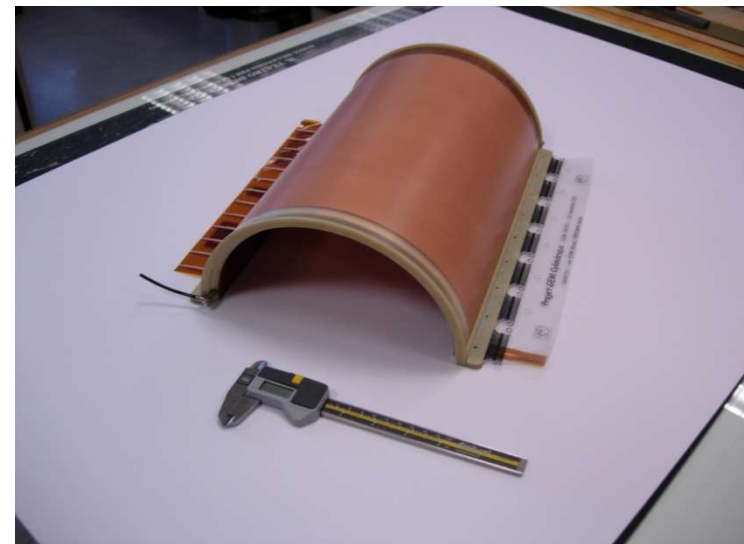
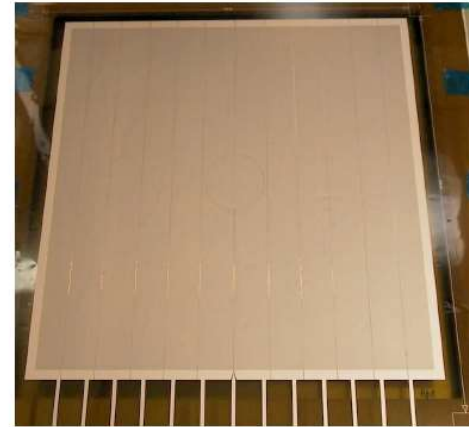
Fabio Sauli

GEM: FREEDOM OF SHAPE



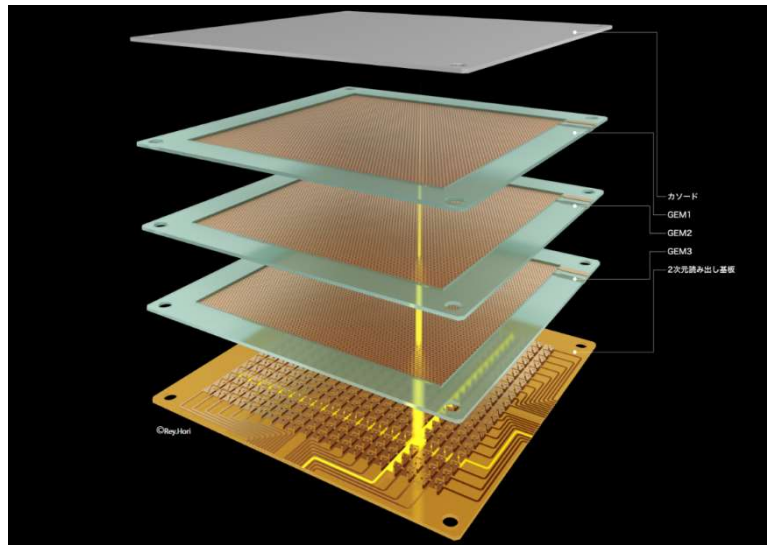
ESA-INTEGRAL Mission
Prototype GEM for JEM-X (25 cm \emptyset):

COMPASS GEMS
31x31 cm²



曲げられる。円筒形

GEMの特徴



多段化可能
独立した読み出しパターン

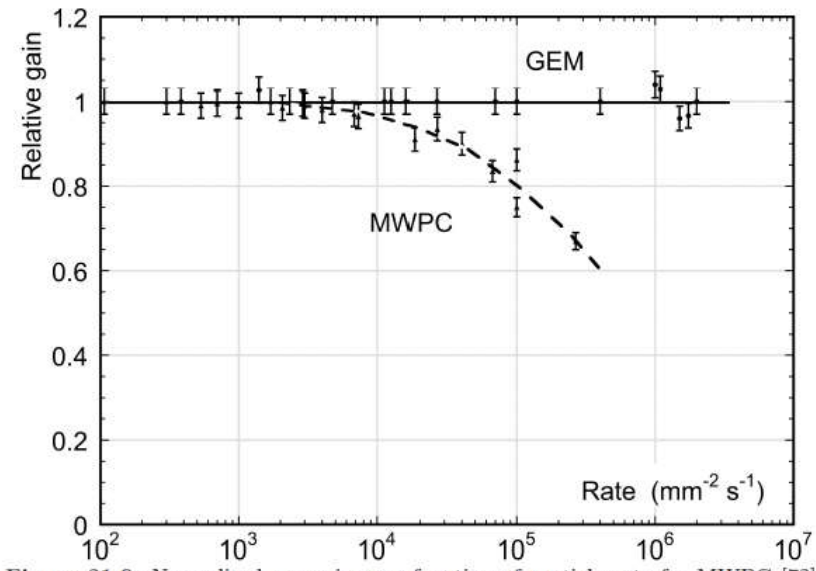


Figure 31.9: Normalized gas gain as a function of particle rate for MWPC [72] and GEM [86].

高計数率 $>10^6 \text{ Hz/mm}^2$

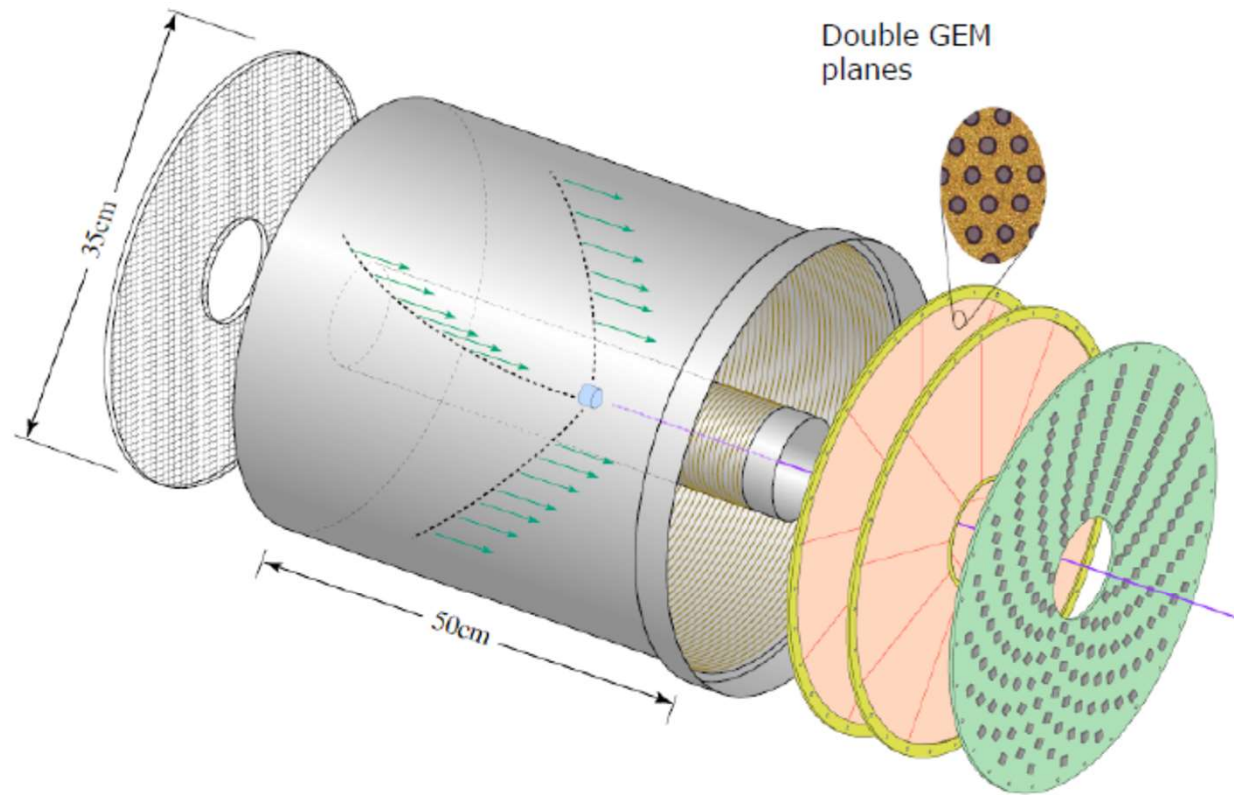
GEMの応用範囲

- GEMの特徴
 - 真の2次元読み出しが可能 → 画像
 - 多層化可能
 - ・ 安定した動作
 - ・ 荷電粒子への変換層を多層化
 - 高頻度耐性
- 素粒子実験のみだけでなく、応用範囲が広い。

TPC

GEM DETECTORS: LEGS AT BNL

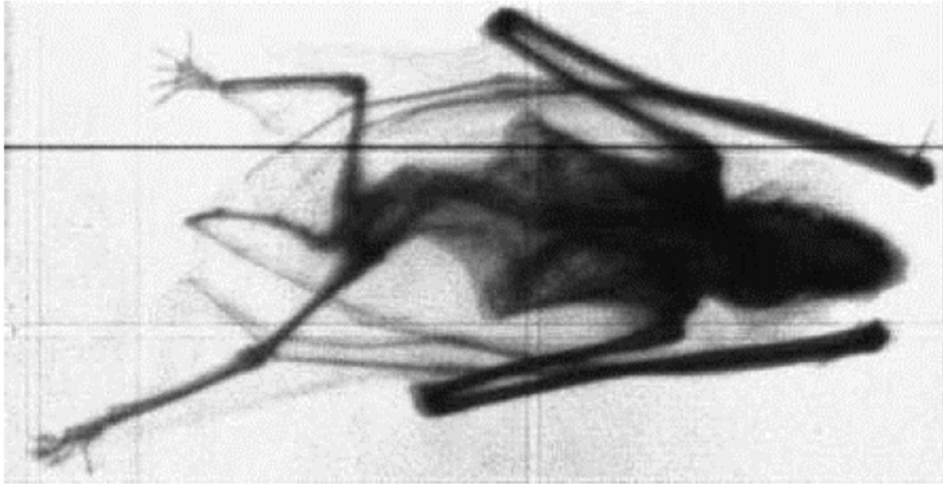
Laser Electron Gamma Source (BNL)



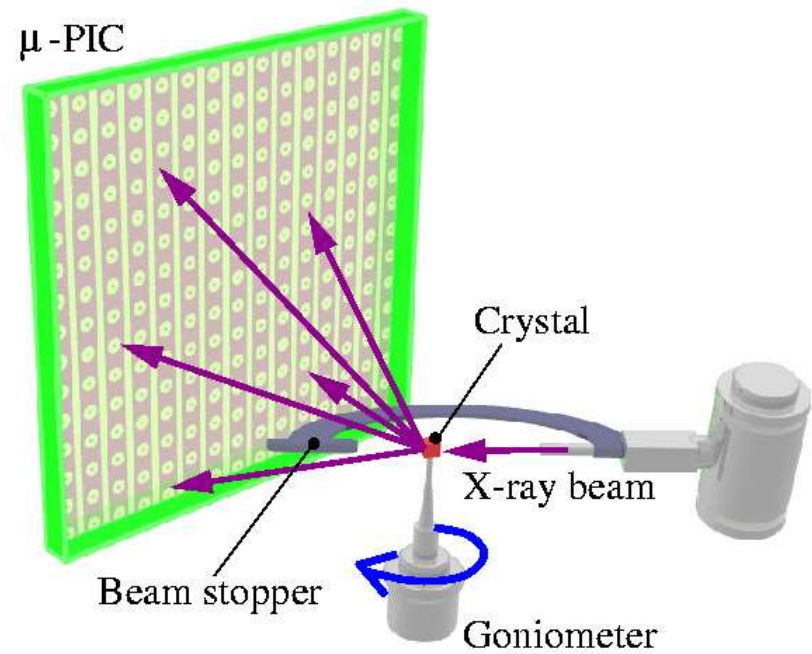
Double GEM
planes

Interpolating anode pad plane
with ASICs on the back

X線検出器



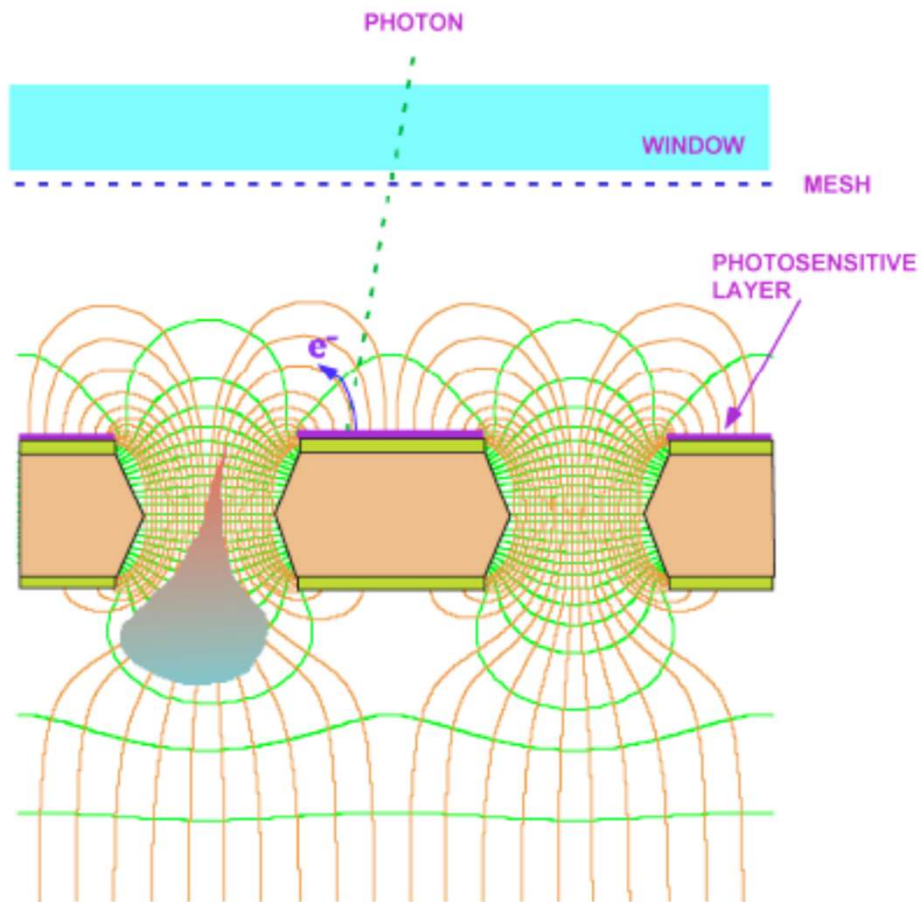
X線吸収画像



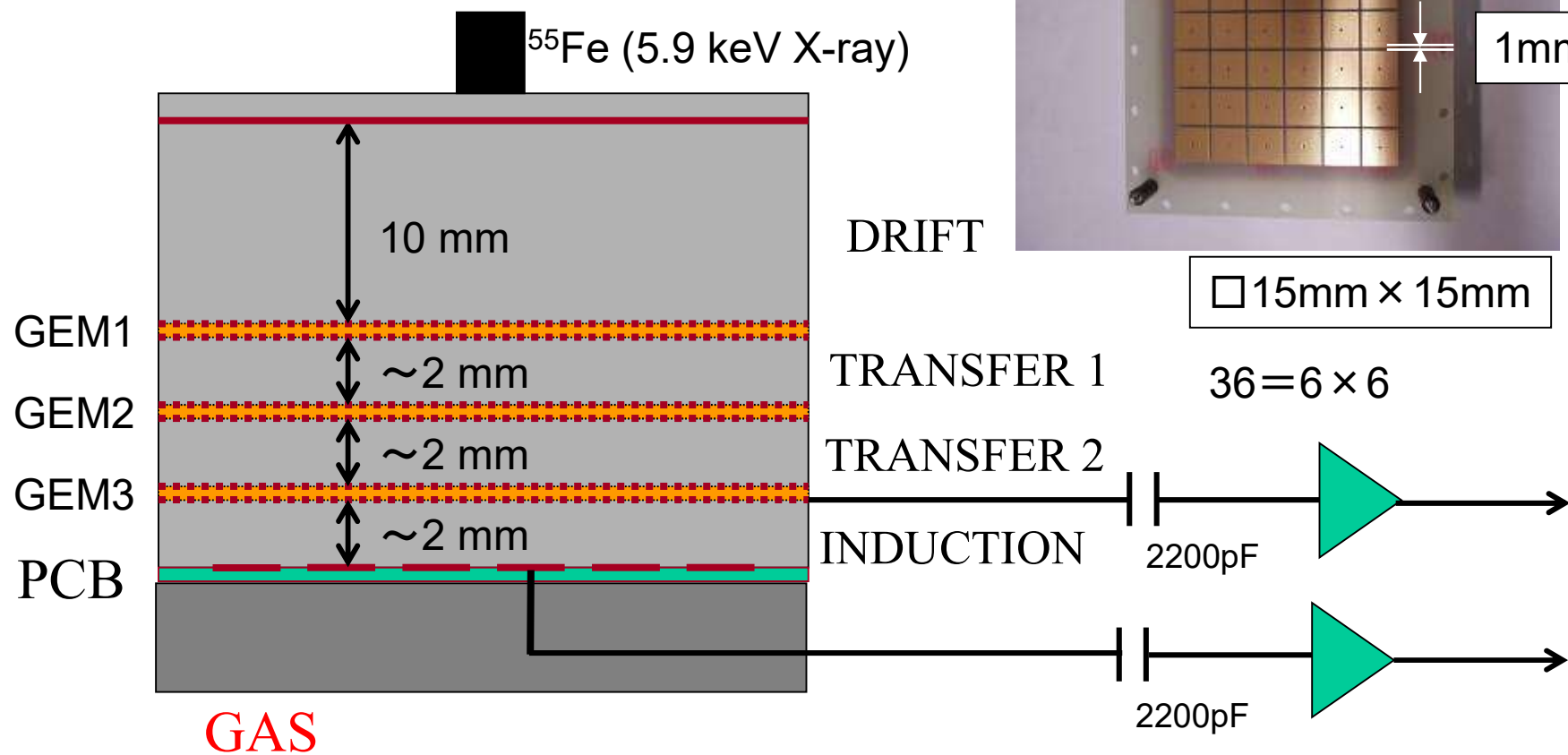
X線結晶構造解析

光センサー

- 光電子増倍管と同じ働き
- 磁場中で使用可
- 読み出しの細分化容易
- 安価、巨大化
- ガス中で働く光電面が鍵
- 開発中



Test Chamber

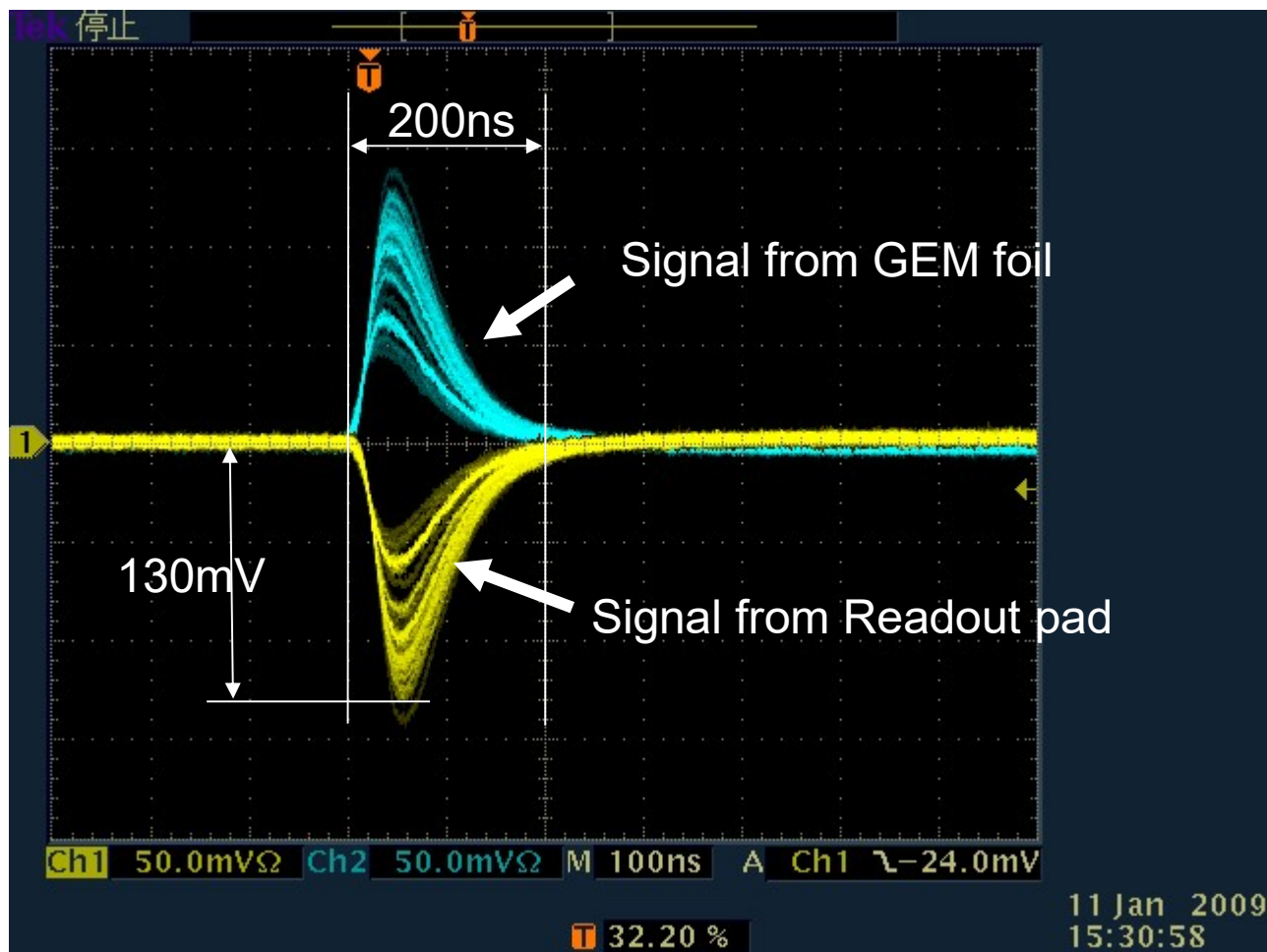


GAS

Ar-CH₄(90/10) (P-10)

Ar-CO₂(70/30)

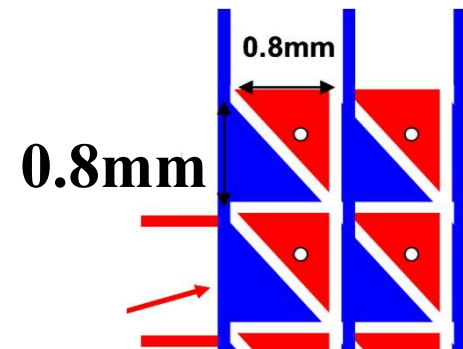
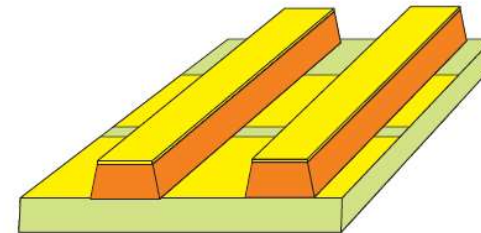
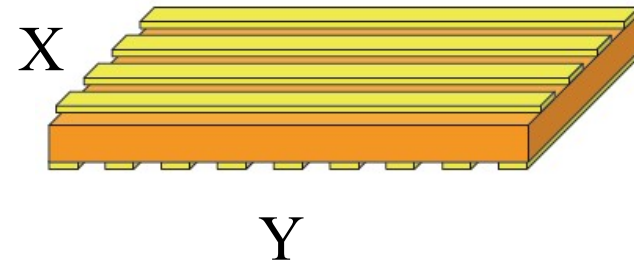
Pulse shape



高抵抗素材を利用した読み出し基板の動作検証

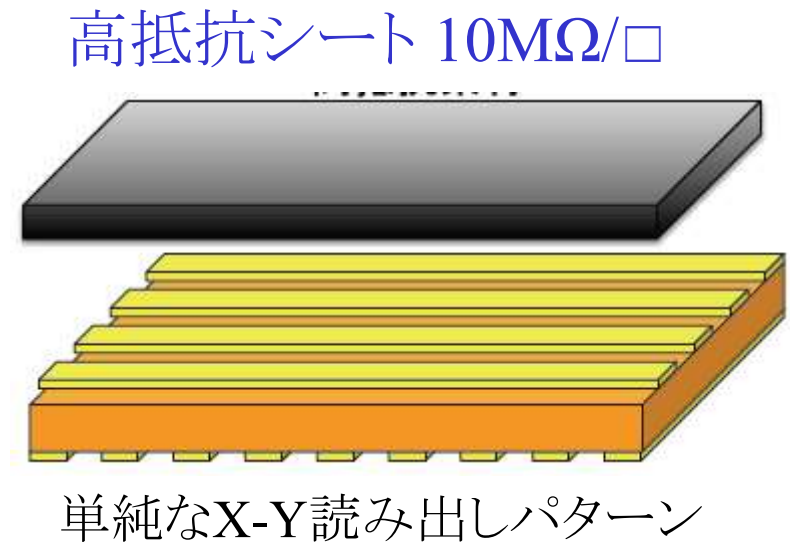
2次元読み出しの方法

- パッド
 - 単純であるが多くの読み出し電子回路が必要
- X-Y ストリップ
 - 少ないチャンネル数で細かい読み出しが可能
 - X:表面、Y:裏面
 - 単純で原理的にはOK
 - しかし、電荷蓄積で不可
 - 2種類の解決法
 - 絶縁体の除去
 - 色々な特殊なパターン
 - 別の単純な方法
 - 高抵抗素材の利用



高抵抗素材を利用した2次元読み出し

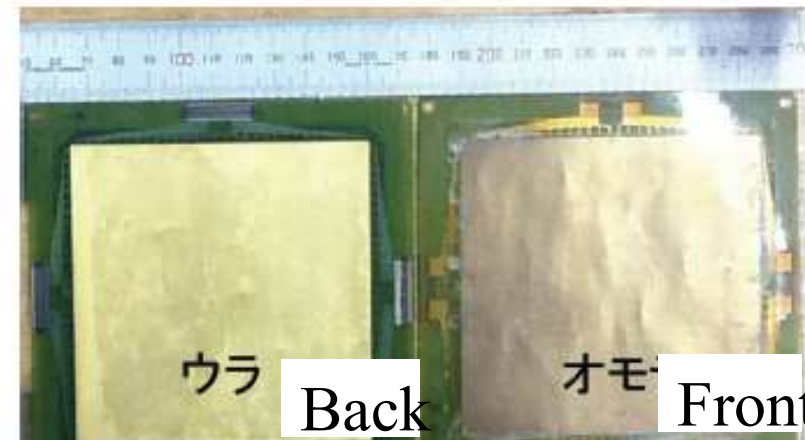
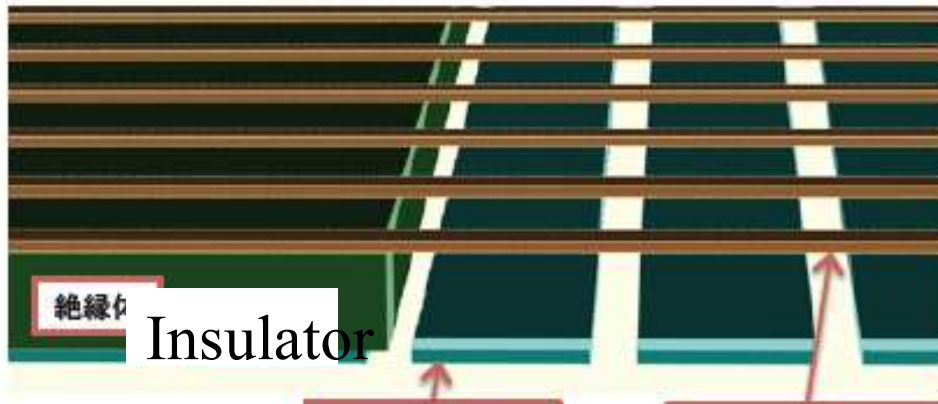
- 単純なX-Yストリップ
- 高抵抗素材を配置
- 信号(AC)は読み出し可能
- 実際の電荷(DC)は、高抵抗素材を通して、グラウンドに流れる。
- 放電などによる巨大電荷が電子回路に流れるのを避けることもできる。





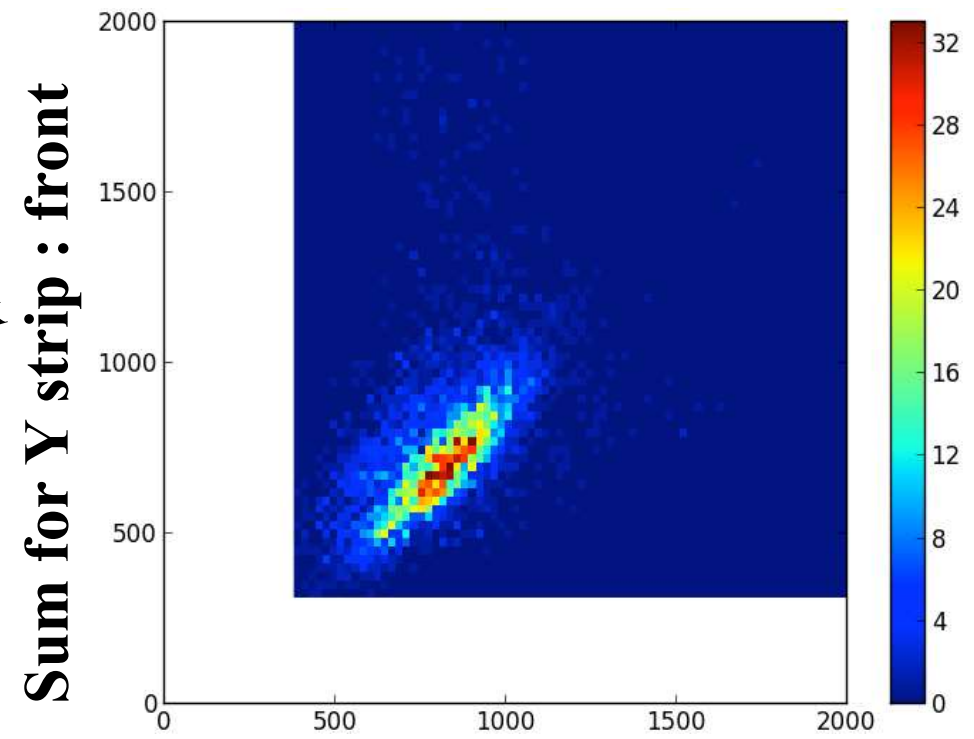
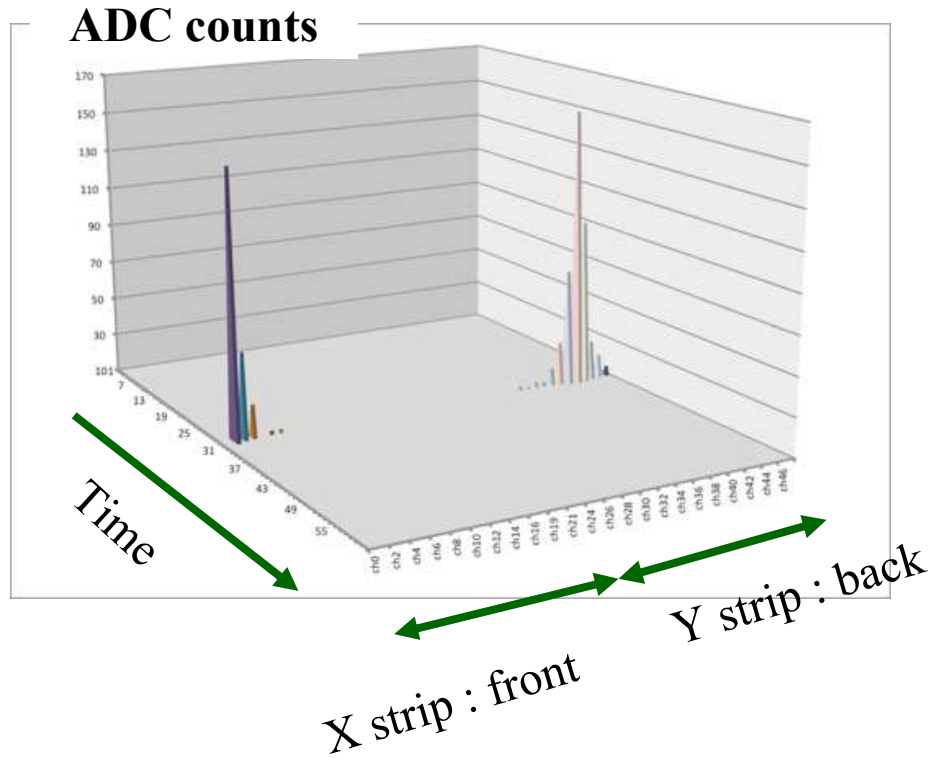
今回使用した読み出し基板について

- オモテ面: Xストリップ幅0.08mm (Pitch:0.4mm)
- ウラ面: Yストリップ幅0.34mm (Pitch:0.4mm)
- 2本を端でつないで、0.8mm Pitch
- 有感面積 95mm x 95mm
- Ch数 120 x 120



Strips on back surface | Strips on front surface

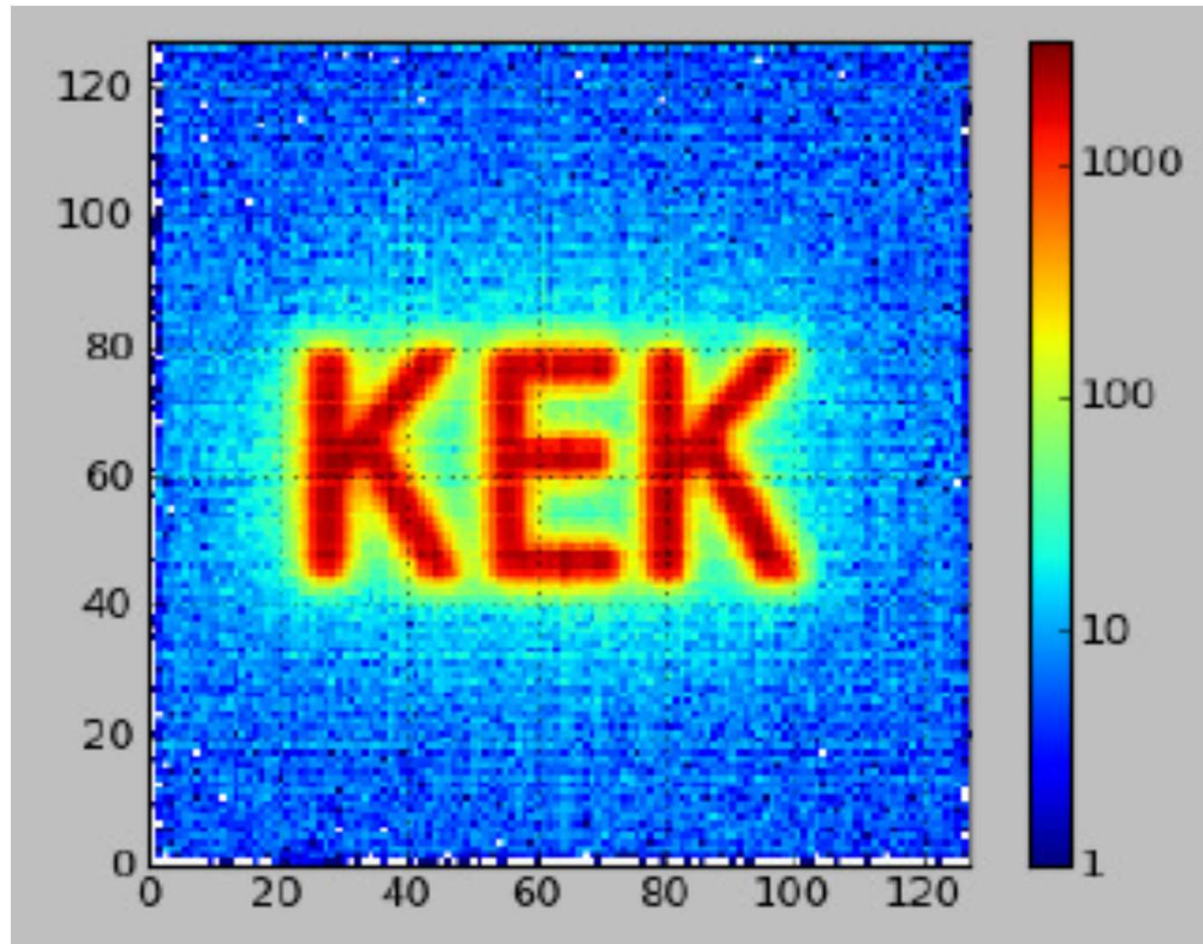
Signal charge



Sum for X strip : front

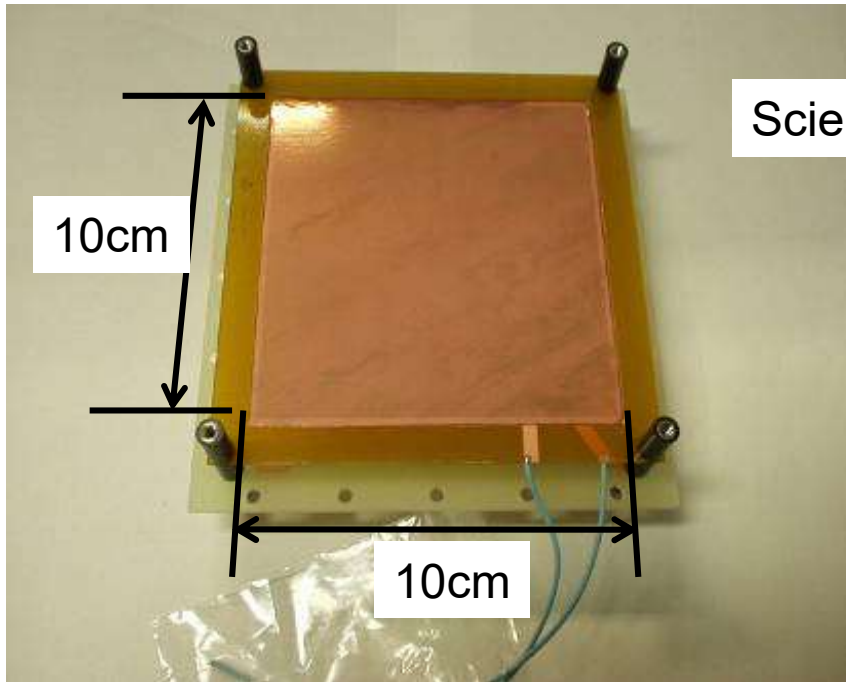
中性子ビーム

北海道大学パルス中性子源



GEM型中性子画像検出器

GEM Foil & Test Chamber

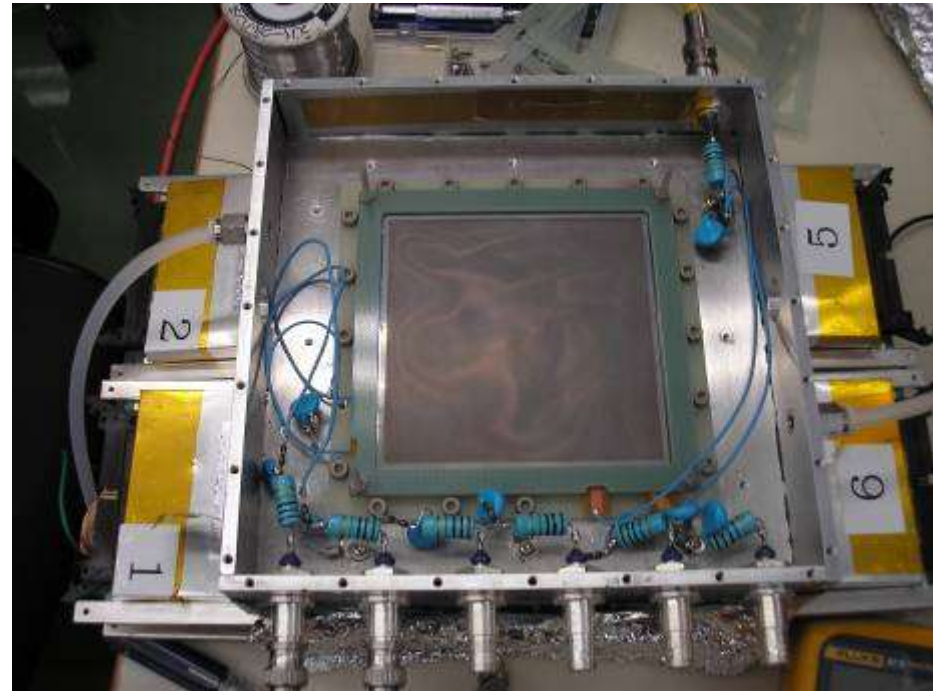


Scienergy Co., Ltd. (Japanese company)

Boron coated GEM
Enriched B-10 Purity > 99%

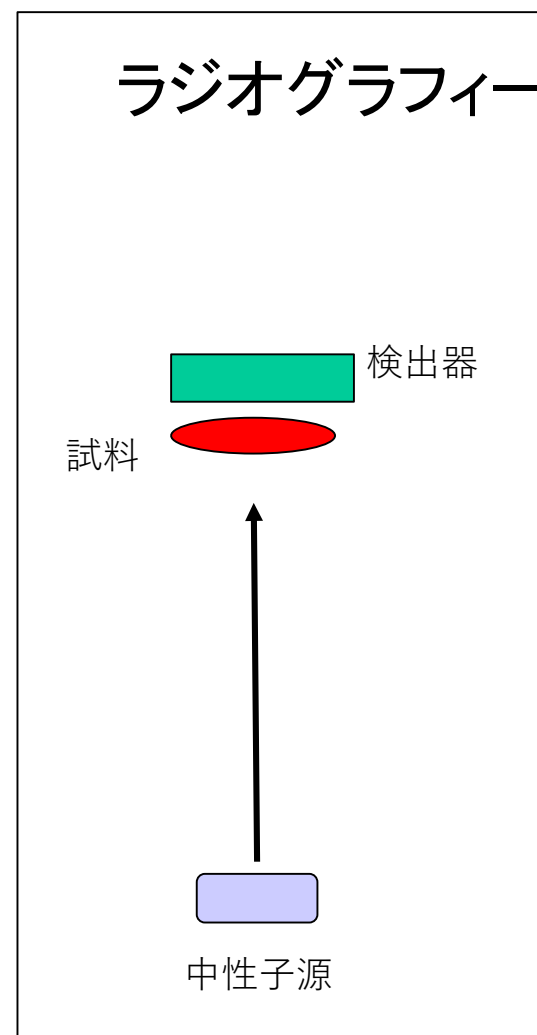
Standard GEM Foil
without Boron coating

Hole diameter	70 μ m
Hole pitch	140 μ m
Thickness	50 μ m
Cu thickness	5 μ m

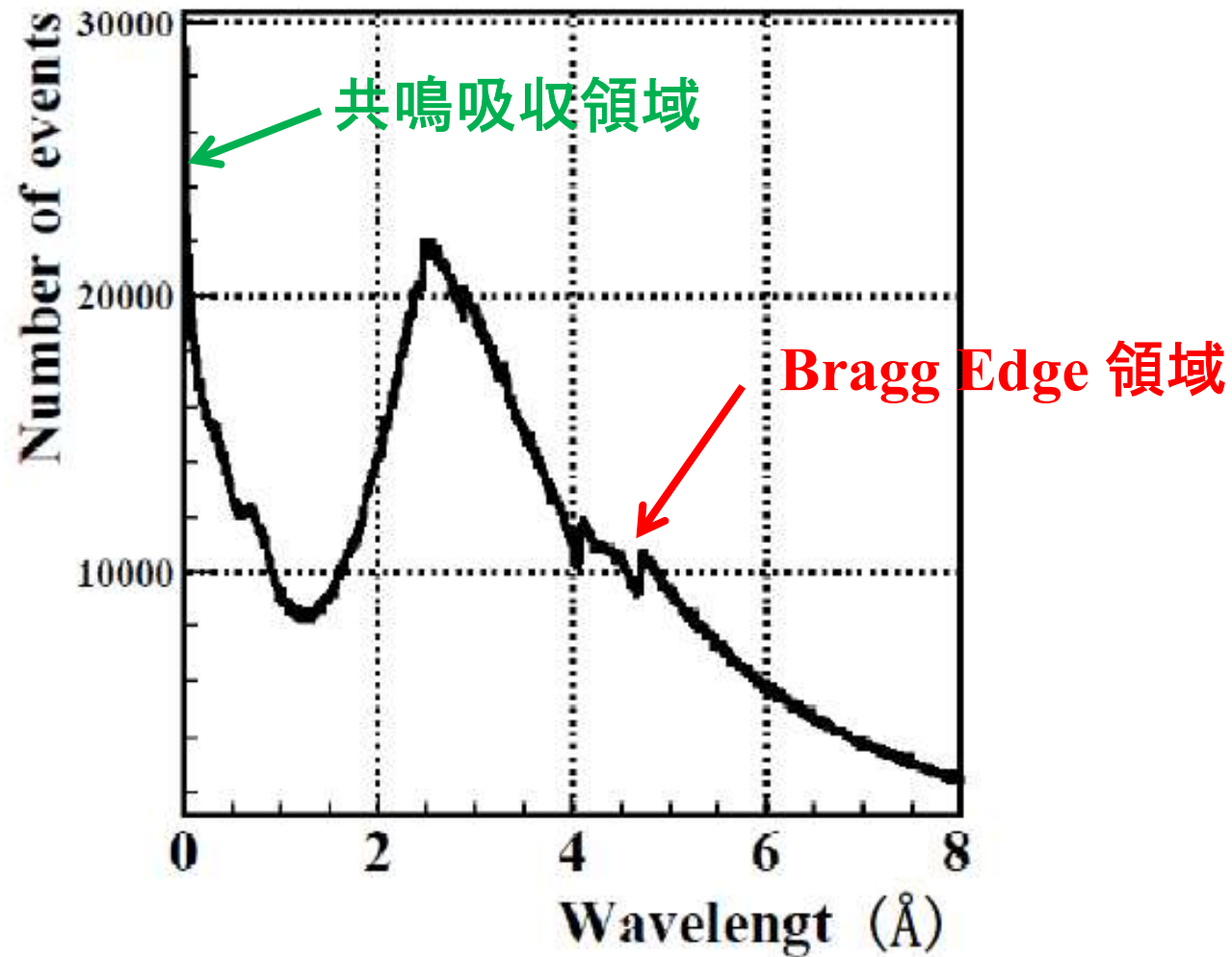


パルス中性子源

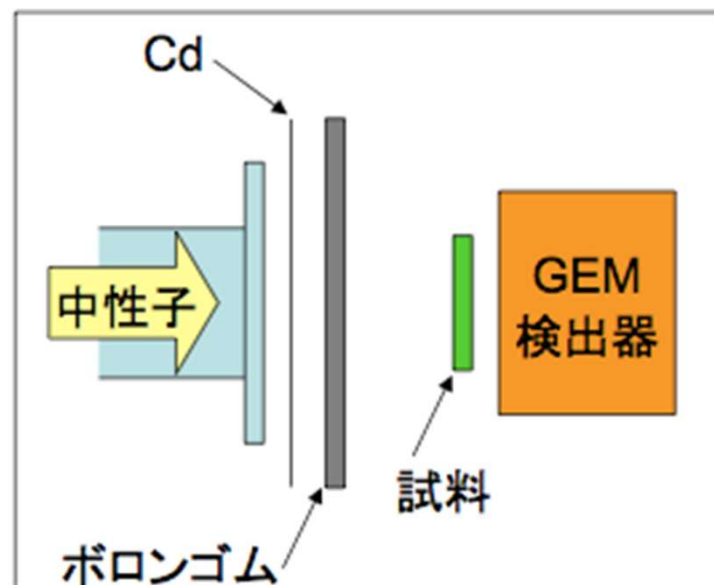
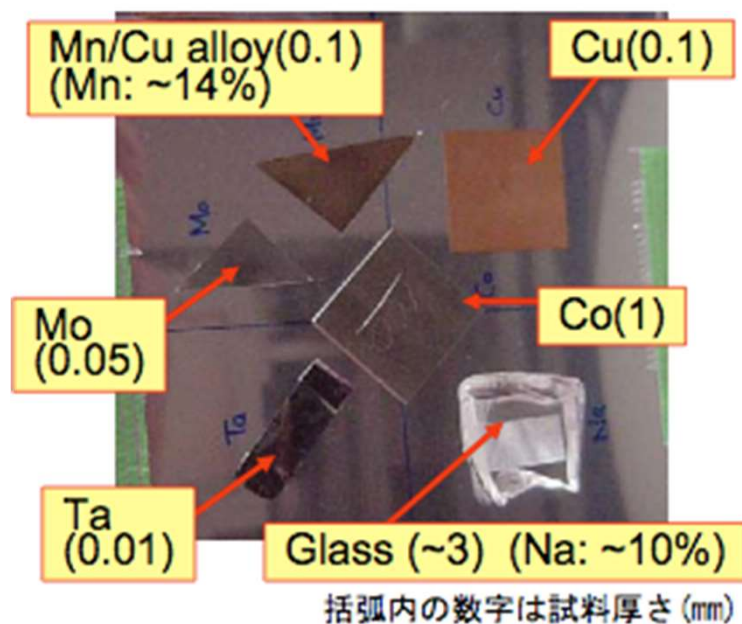
- 散乱実験において、
 - 散乱角と波長の測定
 - 1点1点の位置情報に加えて**時間情報**が重要
 - 飛行時間 → 中性子の速度(波長)
- 中性子ラジオグラフィー
 - 波長別に反応断面積が異なる。
 - 波長別に吸収画像を得る。
 - ・ 過去にあまり研究されていない
 - ・ 新しい分野



波長別中性子ラジオグラフィ



共鳴領域でのイメージング



データ処理:

$I/I_0 = \exp(-\Sigma t)$ を仮定する。

I: 試料有りのデータ

I_0 : 試料なしのデータ

Σ : 試料の巨視的断面積

t: 試料の厚さ

エネルギー範囲: 10 keV ~ 1 eV

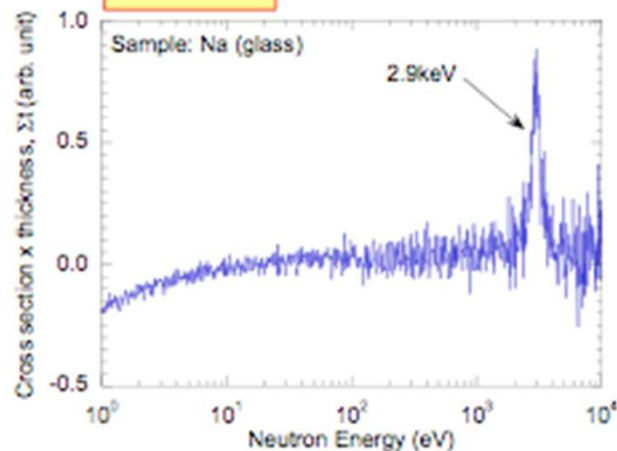
イベント数: 120 M-events

パルス数: 1.18693e+5 (試料有り, 1.3h測定)

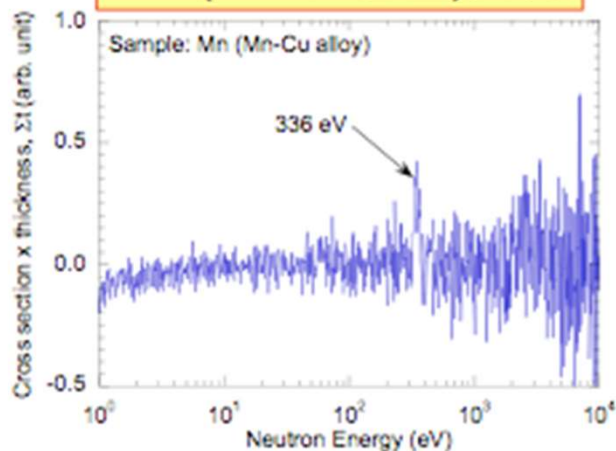
1.26664e+5 (試料なし, 1.4h測定)

各試料のエネルギー透過率

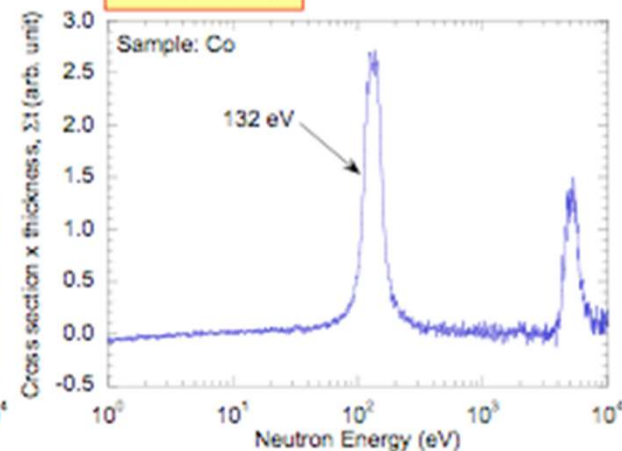
Na-23



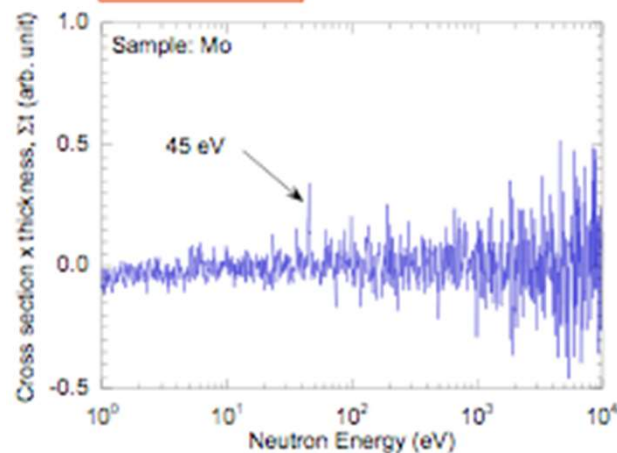
Mn (Mn/Cu合金)試料



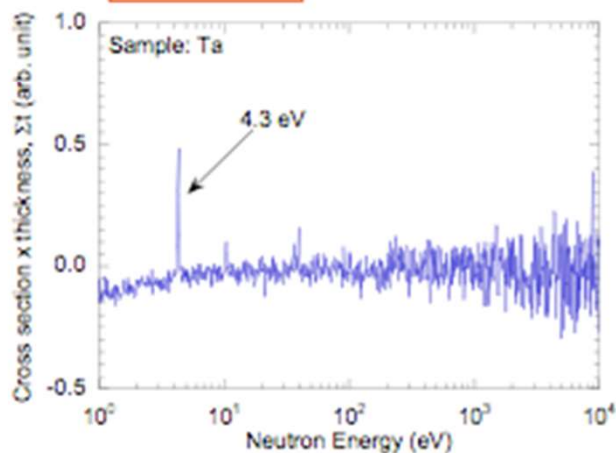
Co試料



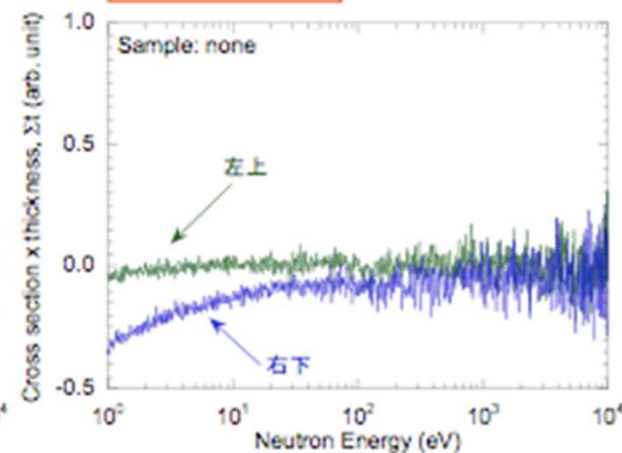
Mo試料



Ta試料

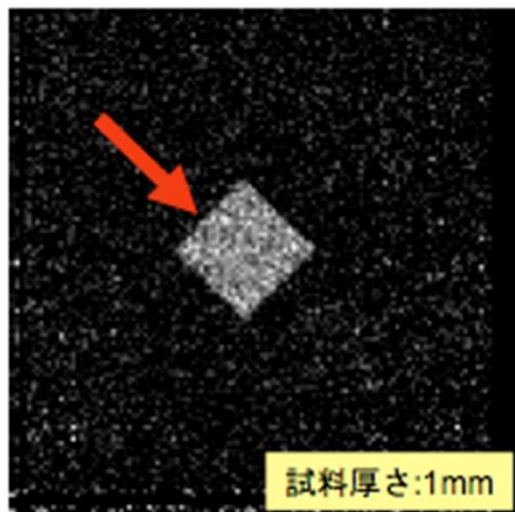


試料なし

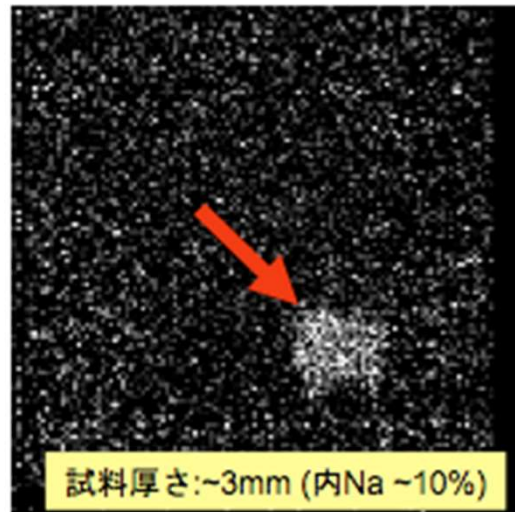


イメージングの実証(Σt 分布)

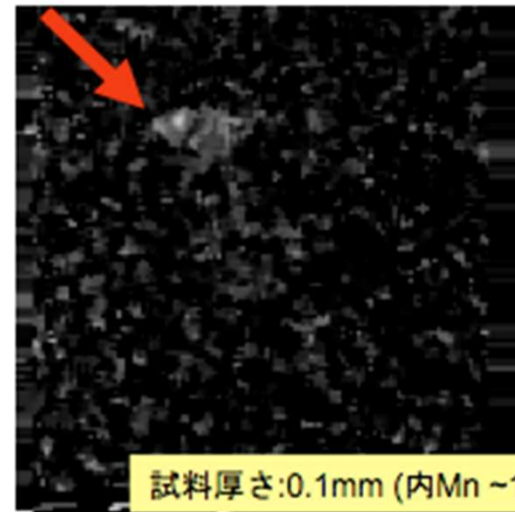
Co試料(9.29-11.8 μs)



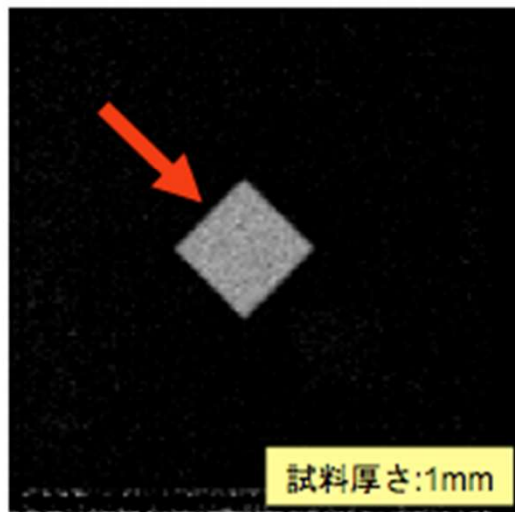
Na試料(14.5-15.5 μs)



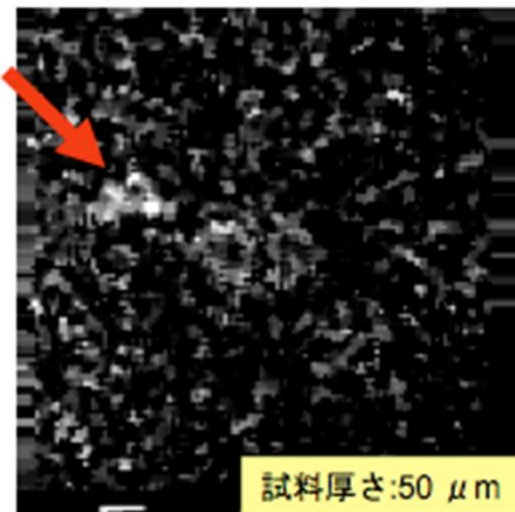
Mn試料(48.5-52.5 μs)



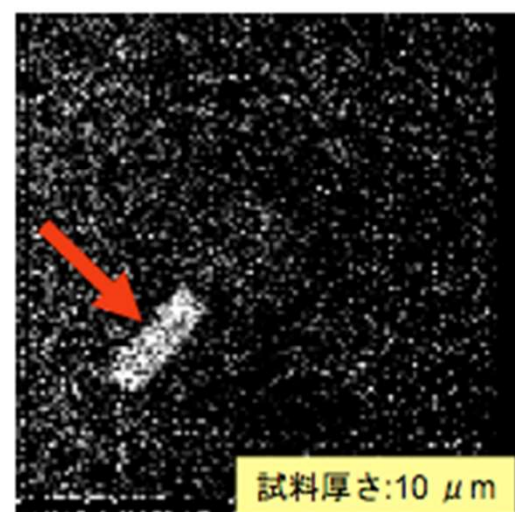
Co試料(70.4-100 μs)



Mo試料(144-148 μs)



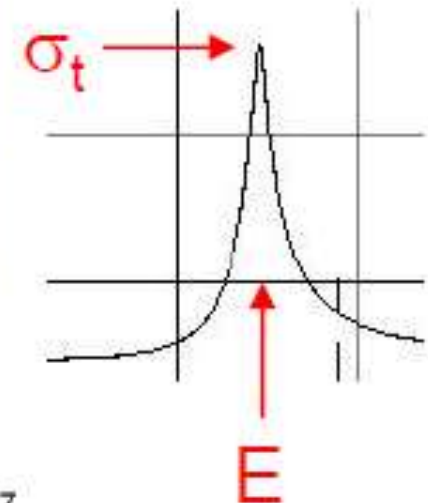
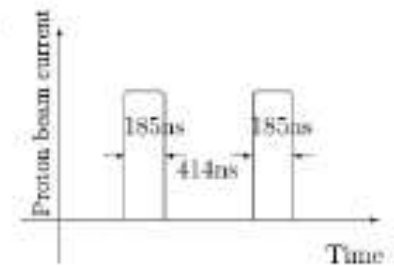
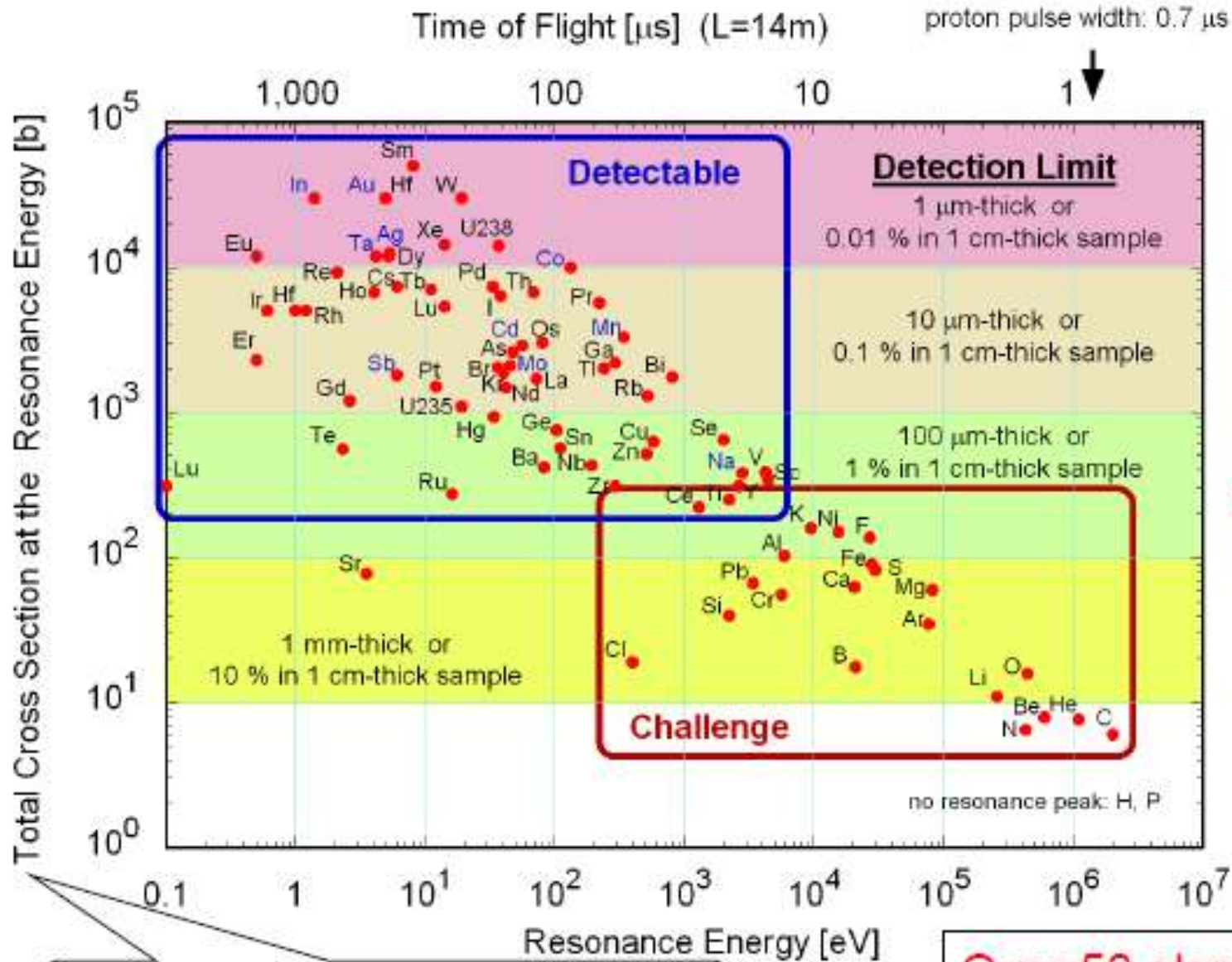
Ta試料(476-485 μs)



Mn/Cu試料とMo試料は、ノイズ低減処理(despeckle)を施した。

Atlas of Resonance Peaks

前川 (JAEA)



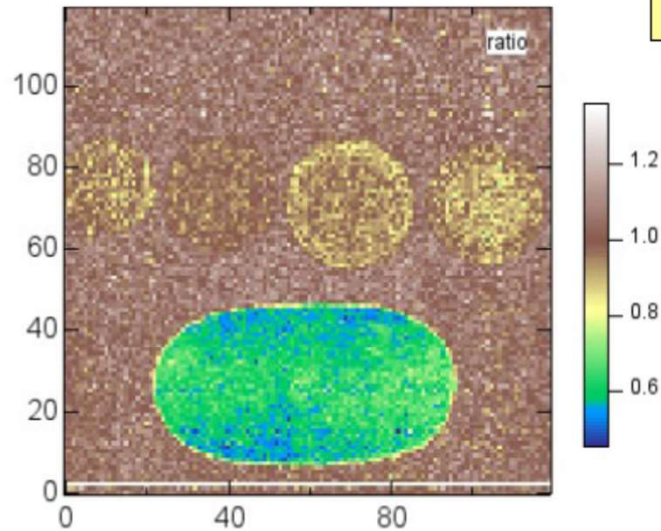
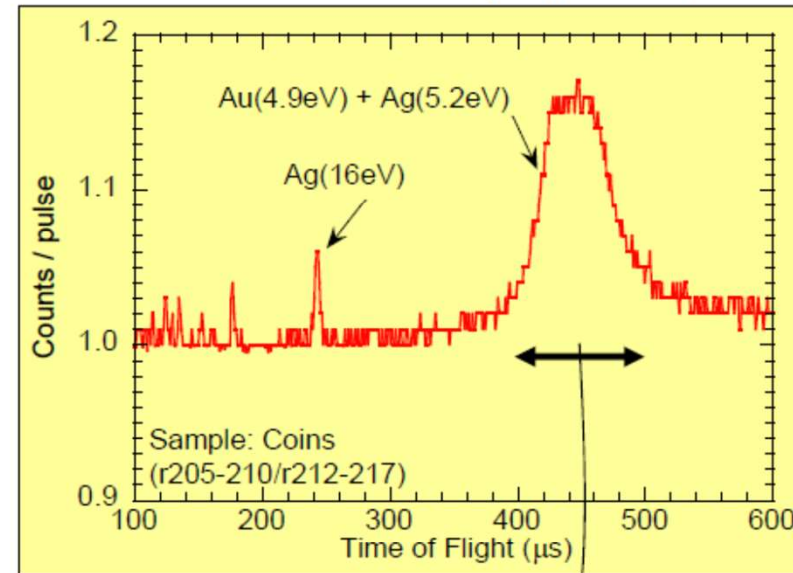
Should be (resonance peak area)
or (peak value x width)

Over 50 elements out of 83
are detectable.

テストに使用した試料



TOFスペクトルの比(試料無し/有り)

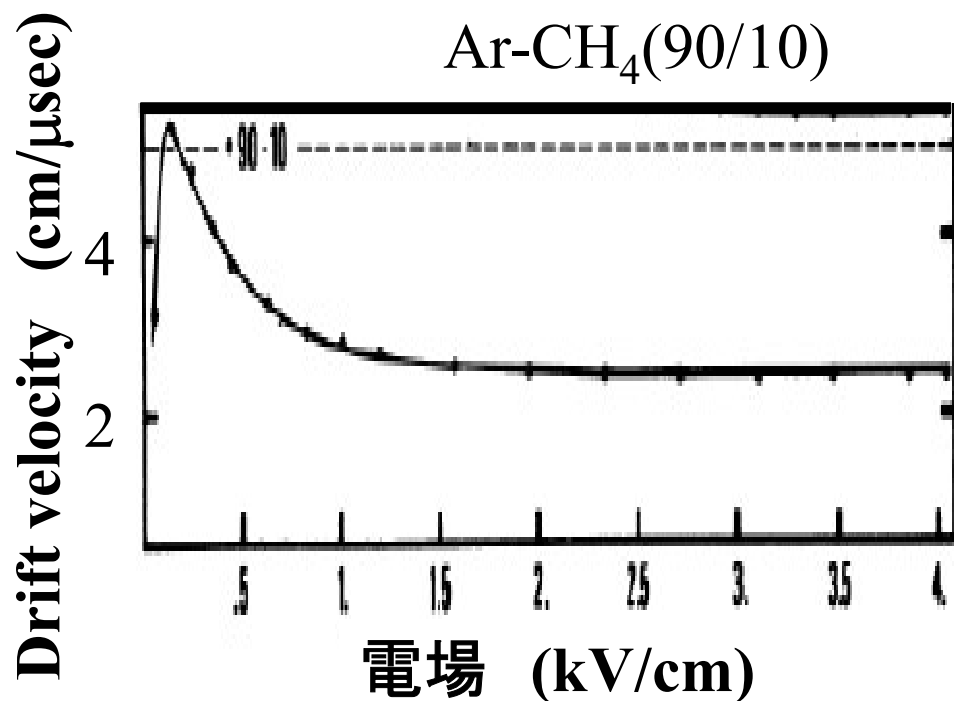


GEMを用いたイメージング (TOF: 450 μs 付近)

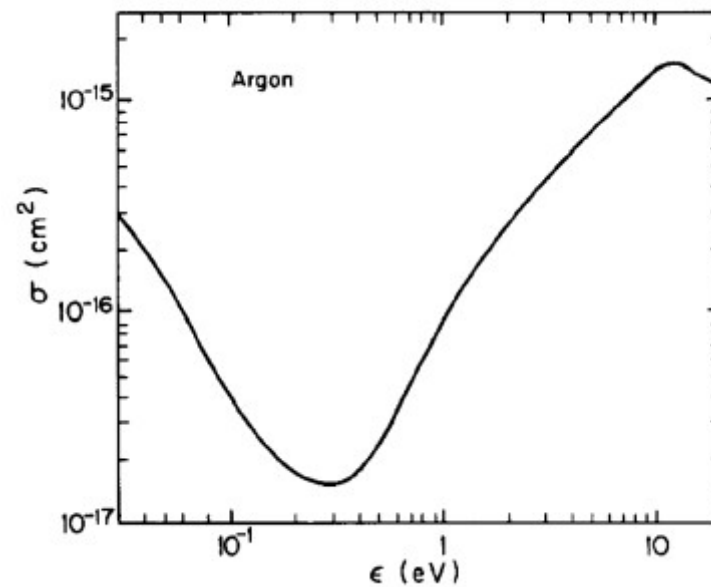
甲斐さん(JAEA)らとの
共同実験
at BL10 in J-PARC

Backup

電子の移動(ドリフト)速度と ガス分子との衝突断面積



ガス分子との衝突断面積



電子のエネルギー

磁場中での電子のドリフト

- 磁場中では、電子はローレンツ力によって曲げられて陽極(センスワイヤー)に向かって最短距離で進めない。
- ガス分子との多重衝突によって直線的に進む(一様電場中)。

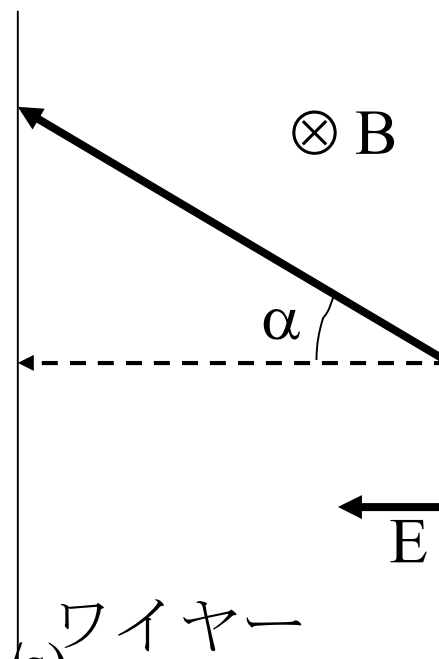
$$\tan \alpha = c \frac{B \cdot v_0}{E}$$

α : ローレンツ角

B : 磁場 (T)

E : 電場 (V/m)

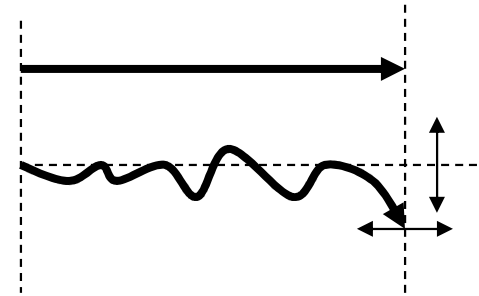
v_0 : 磁場がない時のドリフト速度 (m/s)



電場が強いとローレンツ角は小さい。

電子のドリフト中の拡散

- 電子は、ドリフト中にガス分子と衝突することによってドリフト方向がふらつく。
- 同様にドリフト時間もふらつく。

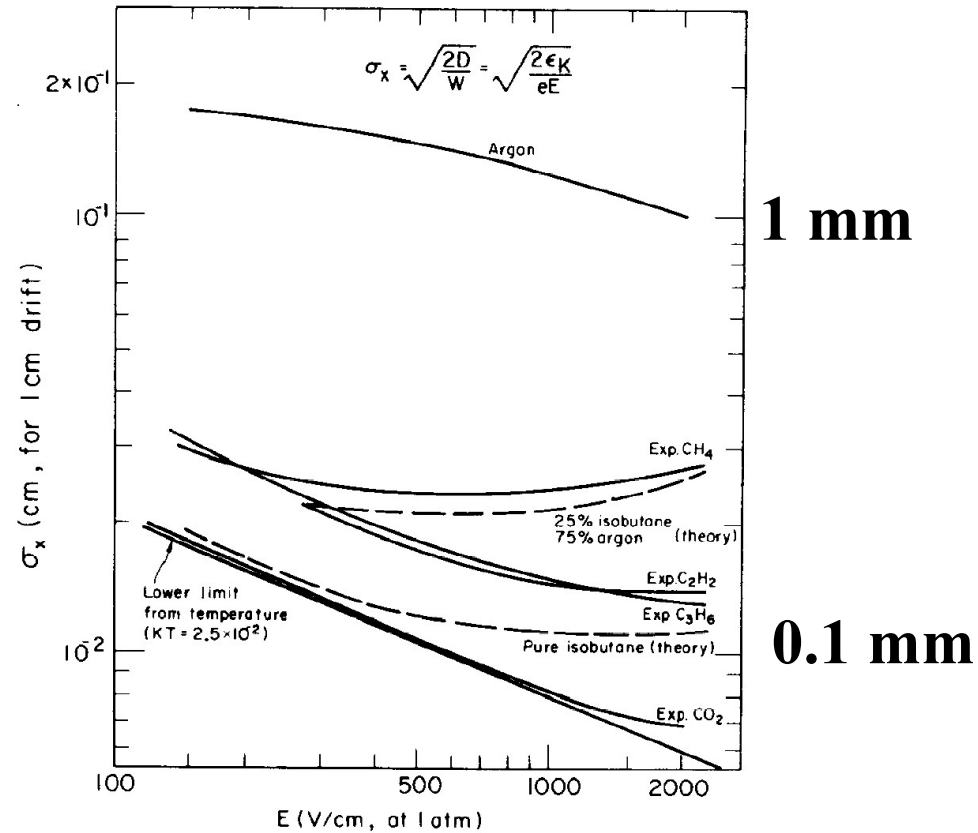


$$\sigma_x = \sigma_D \sqrt{x}$$

x : ドリフト距離

σ_D : 1cmドリフトしたときに拡散による
電子の広がり標準偏差

電子の1個に対する拡散係数



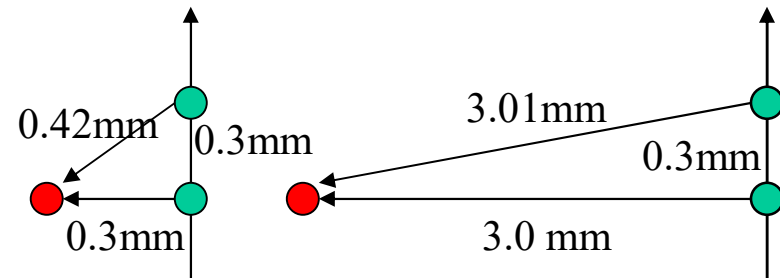
注：電子1個対しては結構大きな値である
電場が強いと拡散は小さい。

電子のドリフト中の吸収

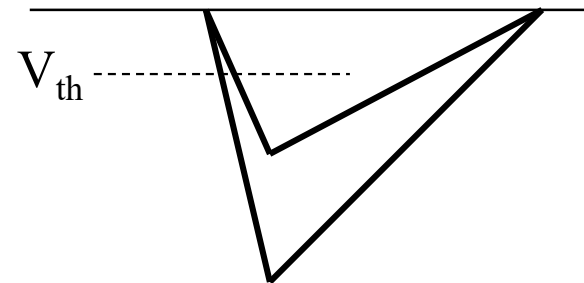
- 電子がドリフト中にある種のガス分子と衝突すると電子がガス分子に吸収されてしまうことがある。
- このような性質をもったガスのことを**陰性ガス(Negative gas)**という。
- 酸素もその一種である。だから、空気をチェンバーガスとして使うことが出来ない。ドリフト距離が長い時は、酸素の混入が問題となりうる。
- フレオンと呼ばれるガスは、この効果が大きい。

位置分解能を決める要因

- イオン化の時の統計的ふらつき
 - センスワイヤーの近傍のみ効く
- ドリフト中の拡散
 - ドリフト距離が長いと重要

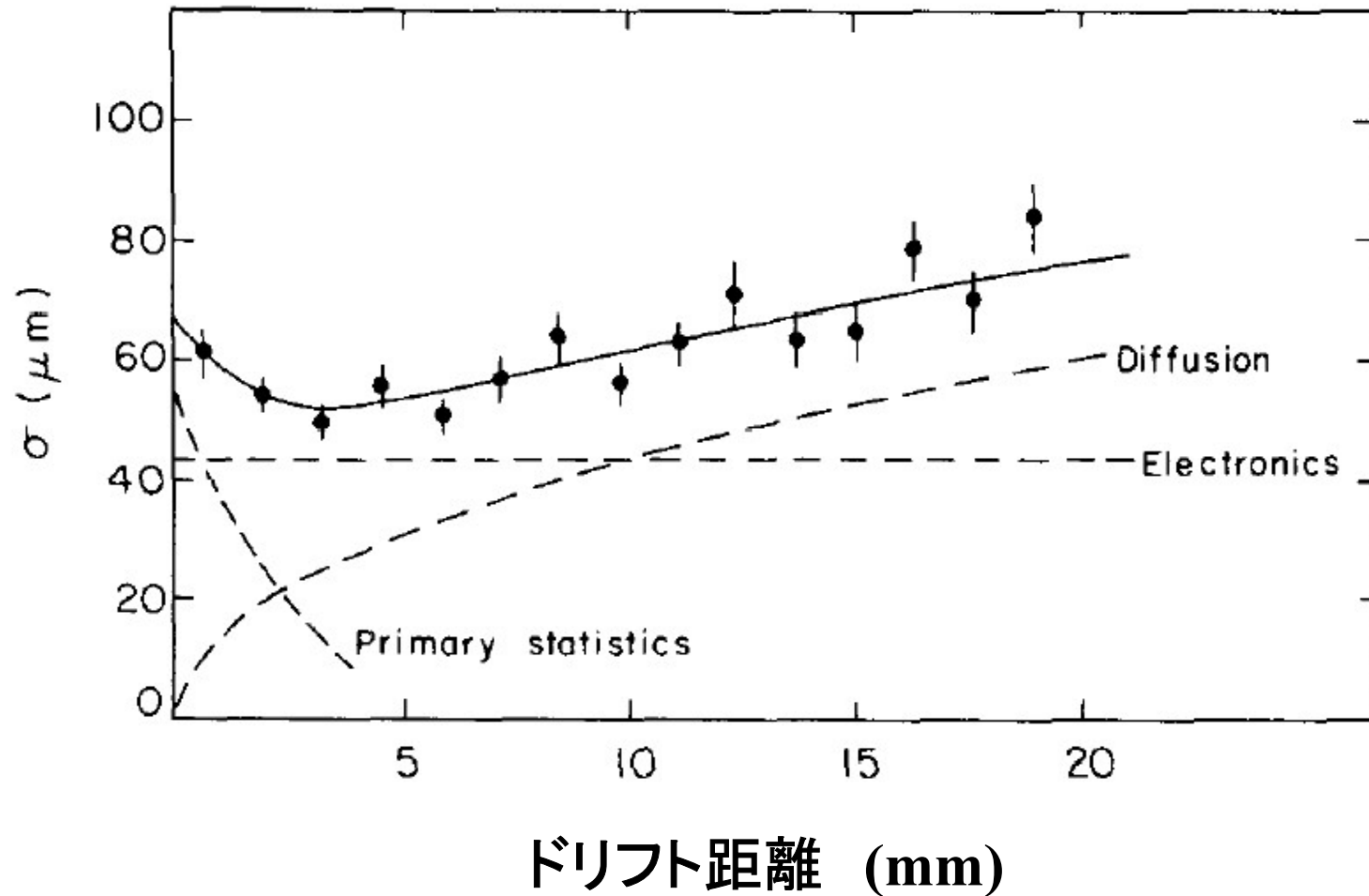


- 電気ノイズとTime walk
 - ガス増幅度、 V_{th} 、信号の立ち上がりの早さ等と関係してくる。



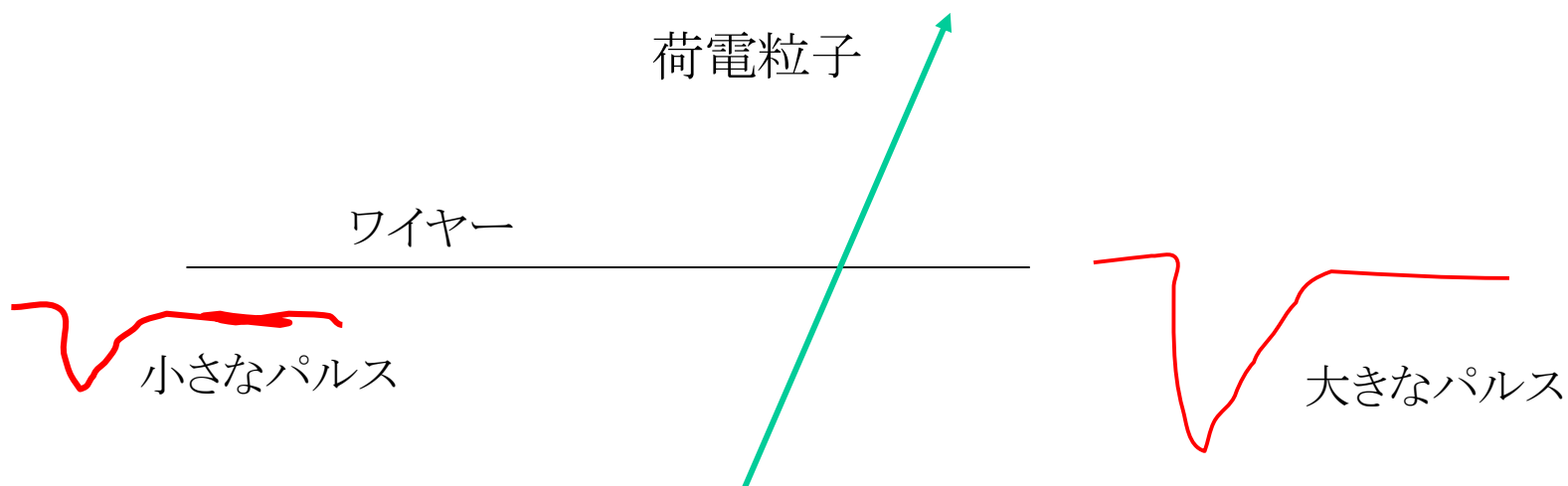
位置分解能を決める要因

電気のノイズが小さい場合



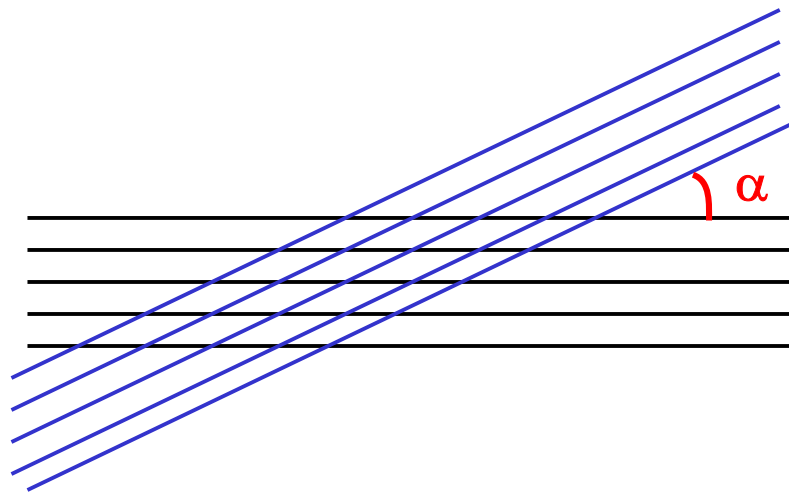
ワイヤーにそった方向 (Z方向) の位置測定 I

- 電荷分割方法 (Charge division)
 - ワイヤーの両端で測定される電荷量の違いからZの位置を出す。
 - 位置精度 $\sigma_z/L = 1\%$, $L=2000\text{mm} \rightarrow \sigma_z = 20\text{mm}$
 - ワイヤーの両端から信号を読み出す必要がある。
 - 1本のワイヤーからの情報でZが出せる。



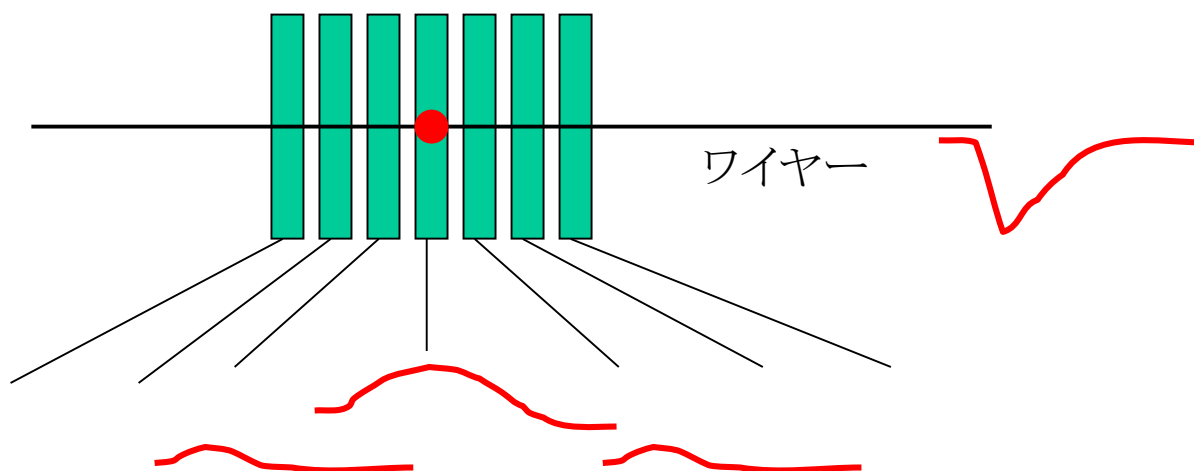
ワイヤーにそった方向 (Z方向) の位置測定 II

- ステレオワイヤー
 - 真直ぐ張ったワイヤーからの情報と斜めに張ったワイヤーからの情報との組み合わせによってZを出す。
 - 位置精度 $\sigma_z = \sigma_{r\phi} / \sin\alpha$,
 $\alpha = 4^\circ$, $\sigma_{r\phi} = 200\mu\text{m} \rightarrow \sigma_z = 3\text{mm}$
 - 複数のワイヤーの情報をソフトで解析してからZが出る。



ワイヤーにそった方向 (Z方向) の位置測定 III

- カソードストリップ
 - 分割した陰電極を配置することによって信号を取り出す。
 - それぞれの信号の大きさを測定することによって良い位置精度が得られる ($\sigma_z = 0.5\text{mm}$)。
 - 信号が比較的小さい。
 - カソードストリップが大きいと電気容量が大きくなりパルス高が小さくなる。
 - 逆に、小さいと読み出しの数が多くなりすぎる。
 - 物質が多い。



セントラルドリフトチェンバーの役割

- 荷電粒子の飛跡を捕らえて、運動量を測定すること。
 - 運動量の測定精度
 - 近接する飛跡を分離できる能力
 - Z方向(ワイヤーに沿った方向)の位置測定
- エネルギー損失の測定(粒子識別)を行うこと。
- 荷電粒子が衝突点から出ているイベントが発生していることをデータ収集システムにすばやく知らせるトリガー信号を出すこと。

運動量分解能

$$\left(\frac{\sigma_{Pt}}{Pt} \right)^2 = (aPt)^2 + b^2$$

$$a = \frac{\sigma_{r\phi}}{0.3BL^2} \sqrt{\frac{720}{N+5}} \quad b = \frac{0.054}{LB} \sqrt{\frac{L}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \frac{L}{X_0} \right]$$

B : 磁場の強さ (Tesla)

L : 測定する長さ (m) (チェンバーの大きさ)

$\sigma_{r\phi}$: 測定する位置精度 (m)

N : 測定点の数

X_0 : チェンバー内の放射長 (m) (チェンバー内の物質質量)

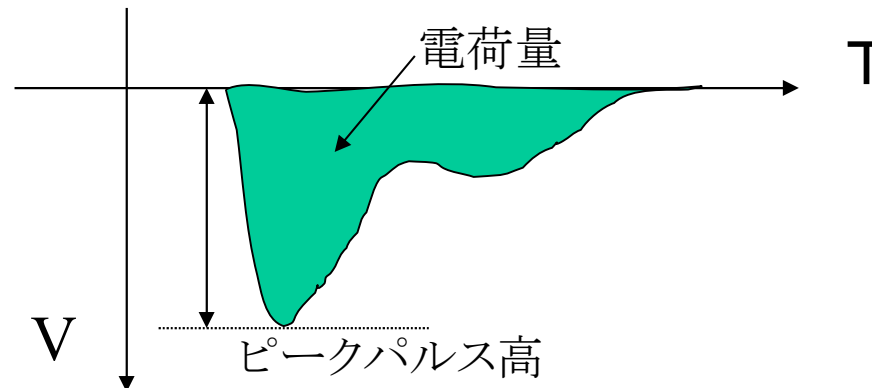
Pt : 荷電粒子の横運動量 (GeV/c)

高エネルギー実験では、 a が重要

比較的低いエネルギーの実験では、 b が重要

エネルギー損失の測定 I

- エネルギー損失の量は、同じ運動量でも粒子の種類によって異なる。
- 運動量とエネルギー損失を測定することによって粒子を識別することが可能
- エネルギー損失の量は、
 - イオン化における電子の数に比例する(ガスによって不定性は異なる)。
 - ガス増幅後の最終的な電子の総数に比例する(ガス増幅度をあまり上げてはいけない)。
 - 信号の大きさに比例する(積分した電荷量で、ピークパルス高ではない)。



エネルギー損失の測定 II

- エネルギー損失の量

$$-\frac{dE}{dx} \propto z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

z : 荷電粒子の電荷

Z : 物質の原子番号(電子の数)

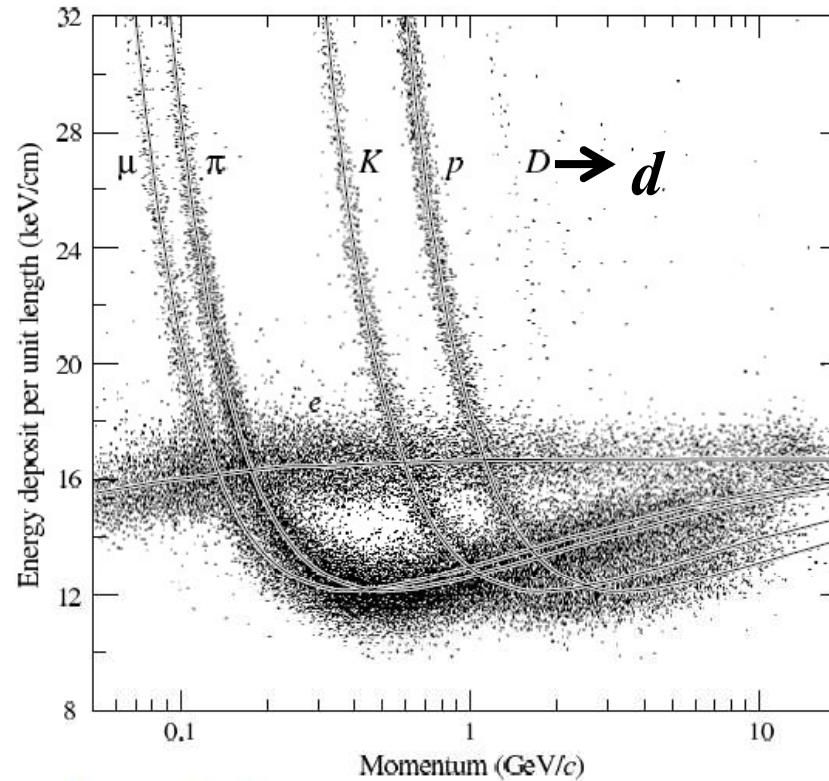
A : 物質の原子質量

m_e : 電子の質量(MeV)

I : 平均イオン化エネルギー(MeV)

δ : 密度効果を記述するパラメーター

PDG
PEP4-TPC



dE/dx as a function of the particle momentum

If we know the momentum of particle, we can use to distinguish the particle of different mass using dE/dx informations.

\Rightarrow So, it is important for particle identification using dE/dx in low momentum region, especially.

エネルギー損失の測定精度

$$\frac{\sigma_{\frac{dE}{dx}}}{\frac{dE}{dx}} = C \cdot N^{-0.46} (xP)^{-0.32} = C \cdot N^{-0.14} (xN)^{-0.32} P^{-0.32}$$
$$= C \cdot N^{-0.14} (L)^{-0.32} P^{-0.32}$$

N : 測定点の数

P : チェンバー内の圧力

x : 1 測定点の飛跡距離

L : 全測定点の飛跡距離 (チェンバーの大きさ)

C : ガスによって決まる係数

チェンバーの大きさが重要だが、
それをどう分割するかはさほど重要ではない。