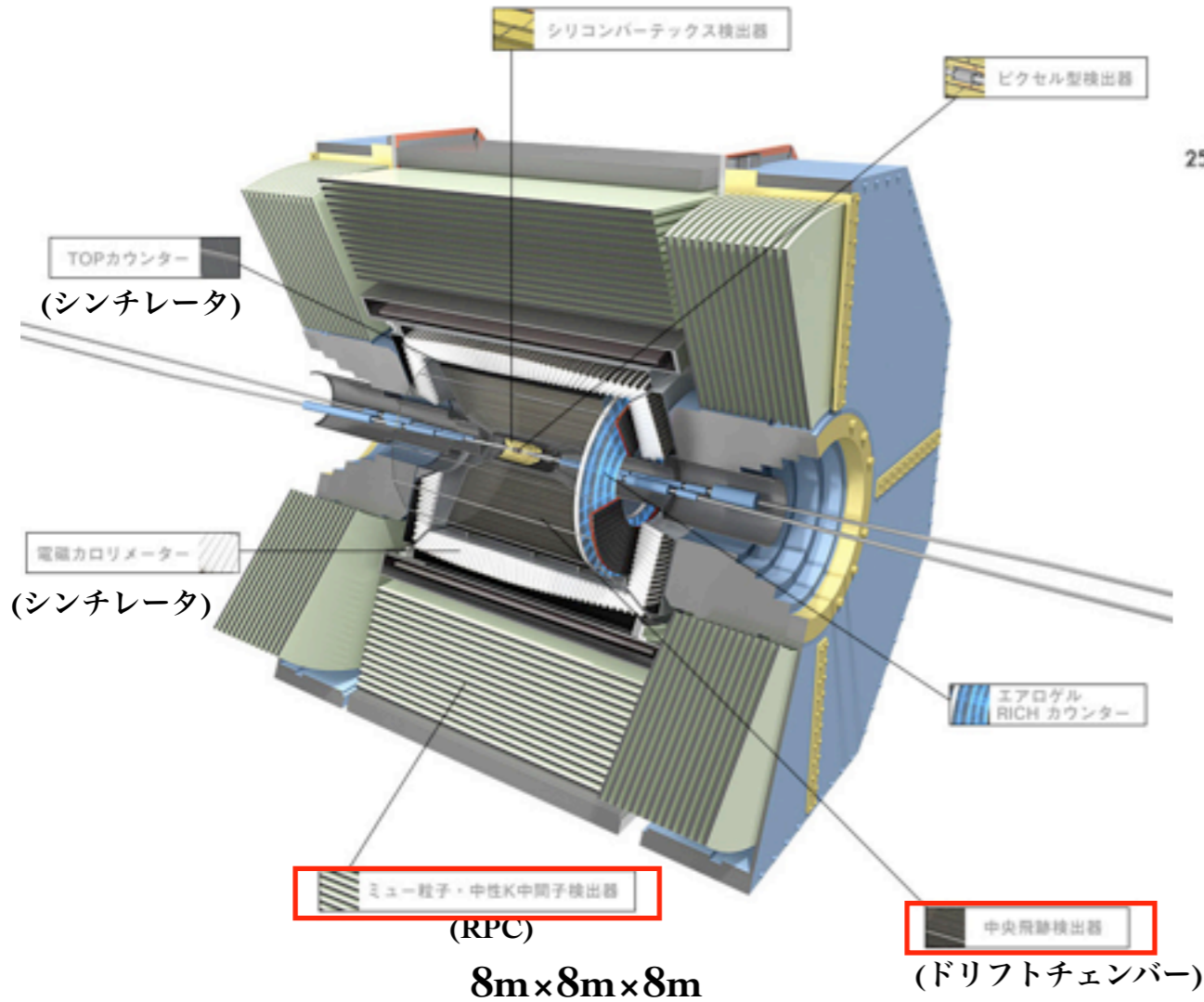


# ガス検出器の基礎

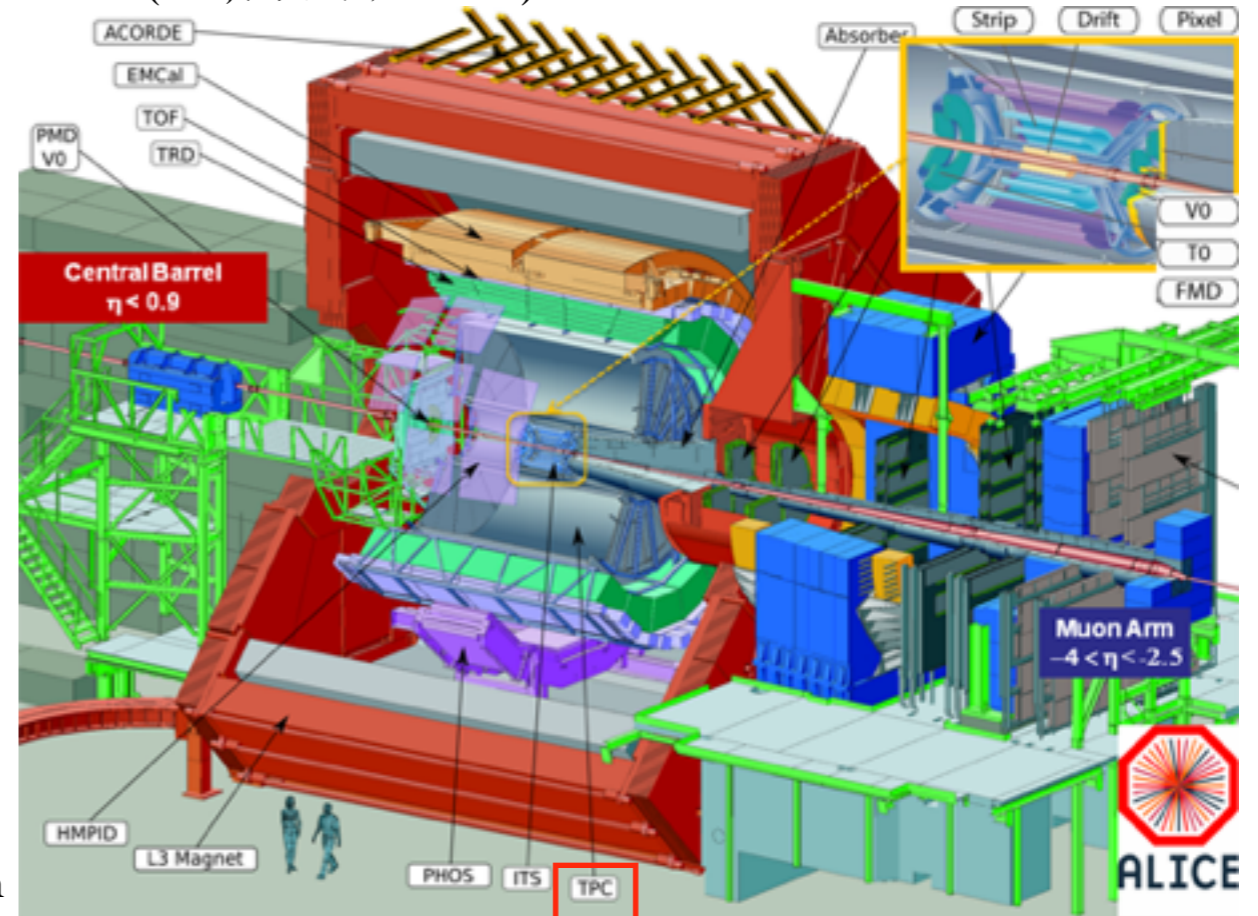
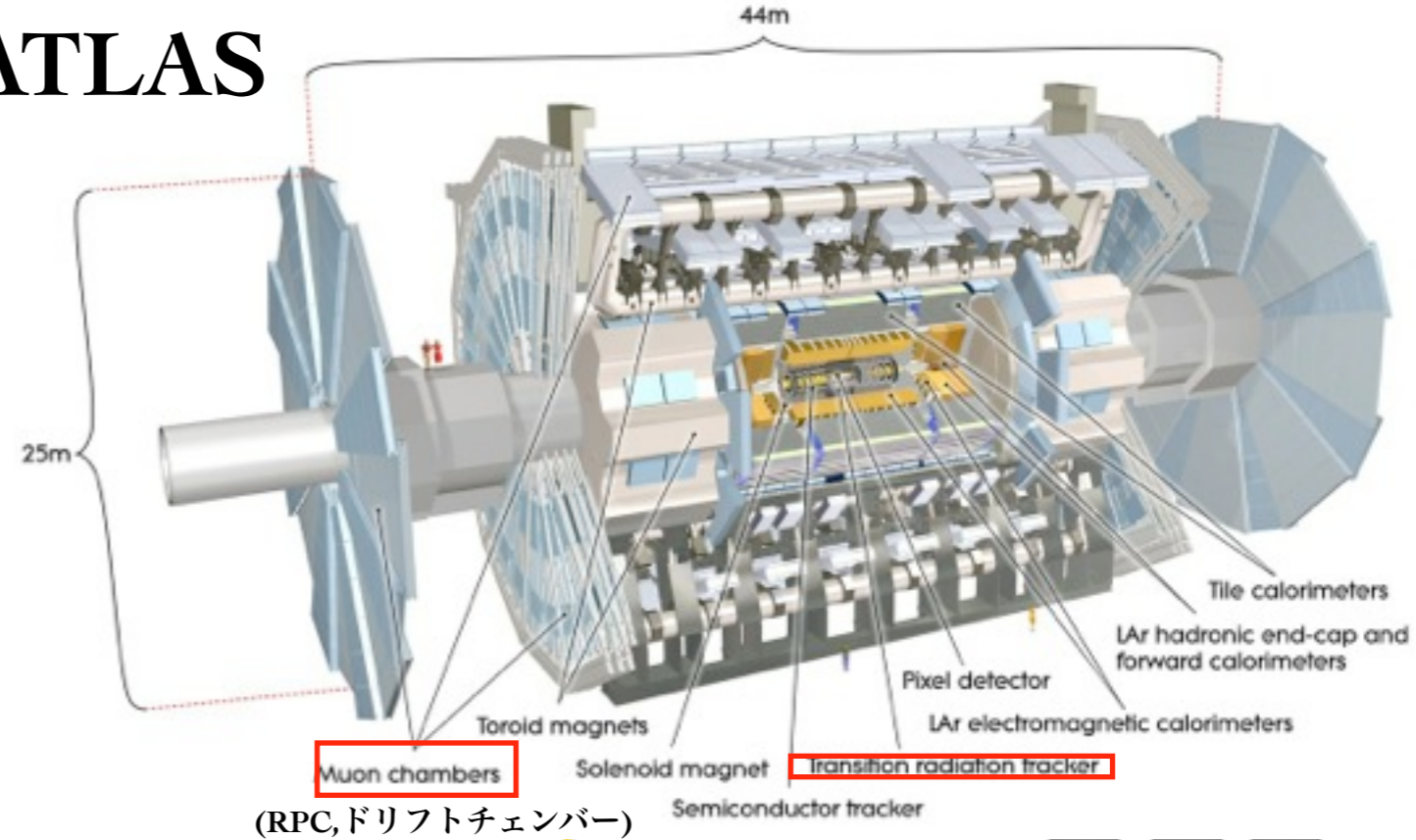
与那嶺 亮 (KEK)

# 加速器実験の検出器の例

## Belle II



## ATLAS



## ALICE

16m×16m×26m

# そもそも粒子検出器にはどんな種類があるの？

検出器媒体によって大きく3つに分けられる。

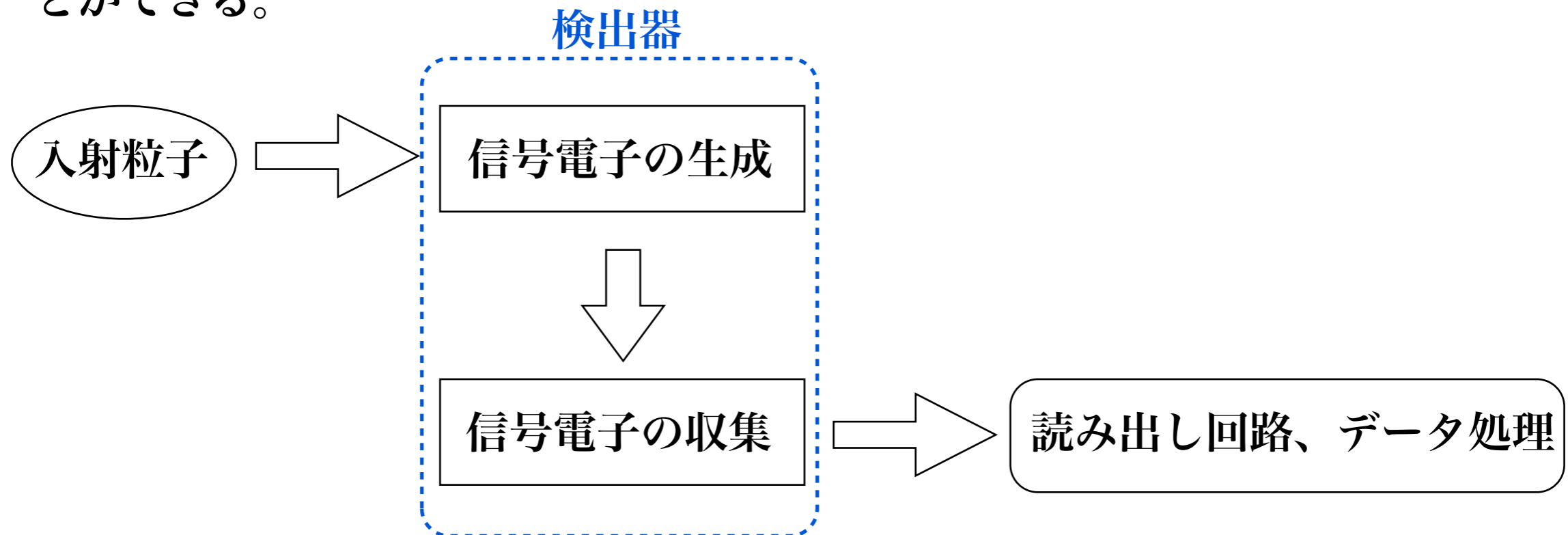
固体のもの 半導体検出器、シンチレータ(固体)、、、

液体のもの シンチレータ(液体)、液体電離箱、、、

気体のもの 気体電離箱、RPC、MWPC、、、

粒子の検出 --> 最終的に電気信号になっていてくれないと大量のデータ処理に困る。

その意味で、粒子検出器とは、入射粒子に応じて信号電子を作り出す装置とみなすことができる。



# 気体検出器の良いところ、悪いところ

## 特徴：

検出器媒体が気体なので、密度が小さい。

## 良い点：

信号電子の平均自由行程が大きく、信号電子の収集が比較的簡単  
(適切な電場をかけて信号電子を増幅させながら収集する)。

物質質量が小さいので、検出器を大型化しても入射粒子のエネルギー損失が小さい。  
(カロリメータの前におく場合は物質質量をなるべく減らすことが重要)

放射線による劣化を気にする必要がない。

## 悪い点：

密度が小さいので、信号電子の生成量が少ない。

信号電子を生成する原理によって分類してみると、、、

荷電粒子 --> 媒質の電離

光子 --> 光電効果、コンプトン効果、電子・陽電子対生成

これらを応用して以下のようなこともできる：

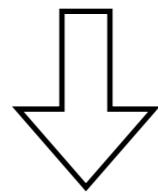
荷電粒子の入射によって光子を生成させ、それを読み出す。

例) シンチレーション光、チェレンコフ光、遷移輻射光

中性粒子と原子核との反応を利用して、一旦、荷電粒子を生成しそれを読み出す。

例) シンチレーション光、チェレンコフ光、遷移輻射光

(ガス)検出器の基礎は電磁相互作用。



Maxwell方程式を駆使するといろいろ分かる。

電離によるエネルギー損失

チェレンコフ放射、遷移輻射

信号電子のドリフト速度、拡散

# 信号電子の生成

高速の荷電粒子によって媒質の原子が電離する。

## 電磁場テンソル

$$\begin{aligned} F_{\mu\nu} &= [D_\mu, D_\nu] \\ &= \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu \\ &= \begin{pmatrix} 0 & E_x & E_y & E_z \\ -E_x & 0 & -B_z & B_y \\ -E_y & B_z & 0 & -B_x \\ -E_z & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

x方向に速さ $\beta$ で進んでいる粒子がつくる電場を計算してみよう。

粒子が止まっている状態を考えて、それをLorentz変換する。

粒子が止まって見える系では

$$F_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & E_x & E_y & E_z \\ -E_x & 0 & 0 & 0 \\ -E_y & 0 & 0 & 0 \\ -E_z & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

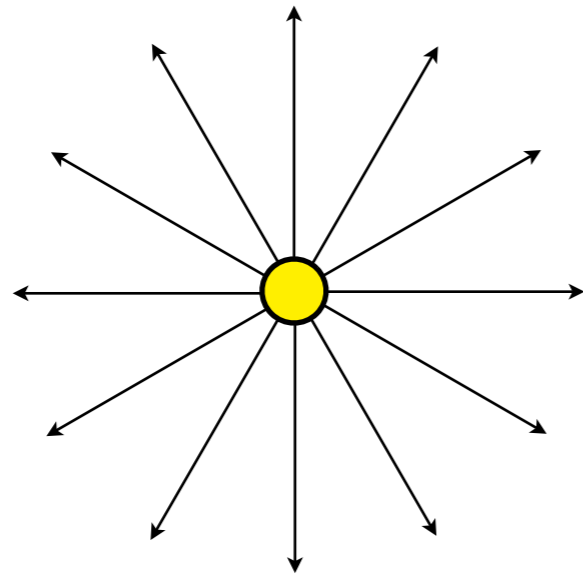
変換後の電磁場テンソルを'で区別することになると、

$$F'_{\mu'\nu'} = L_{\mu\mu'} L_{\nu\nu'} F_{\mu\nu}$$

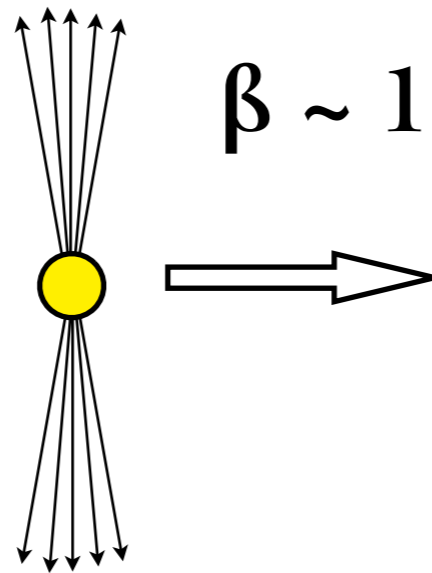
$$L = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$F'_{\mu'\nu'} = \begin{pmatrix} 0 & E_x & \gamma E_y & \gamma E_z \\ E_x & 0 & -\beta\gamma E_y & -\beta\gamma E_z \\ -\gamma E_y & \beta\gamma E_y & 0 & 0 \\ -\gamma E_z & \beta\gamma E_z & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

# イメージ的には



$$\beta = 1$$



$$\beta \sim 1$$

高速で運動する粒子近傍の電場(進行方向に垂直な成分)が大きくなる。

飛跡にそって、気体分子の電離が起こる。

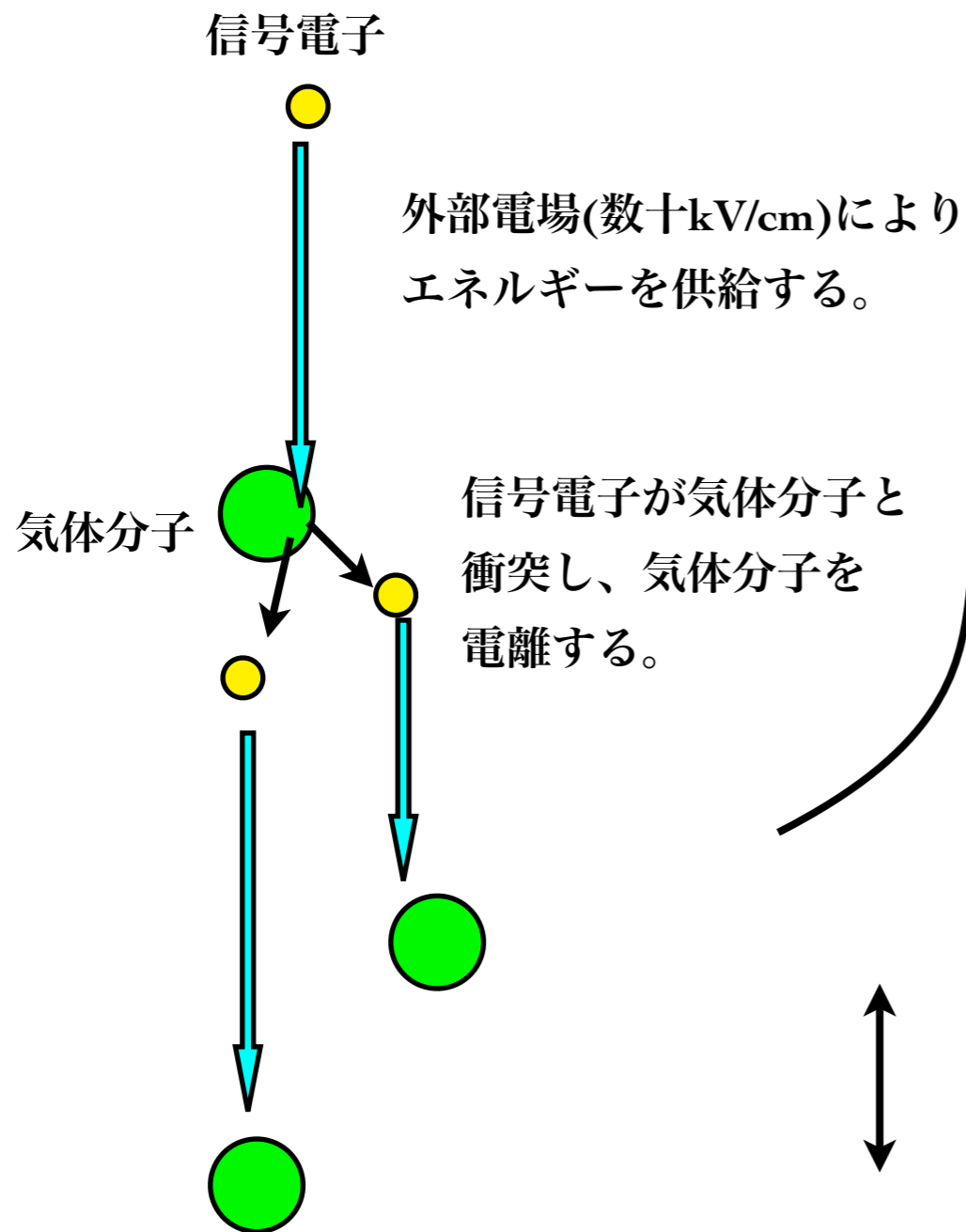


# ガス増幅の仕組み

通常、気体中でできる信号電子数は1cm当り100個程度(MIP, Arガス1atm)。

回路で読み出す前に、S/N比を稼ぐために、信号増幅が必要(数千倍程度)。

信号電子を強い電場で加速し、電離を次々に起こさせる(電子雪崩)。

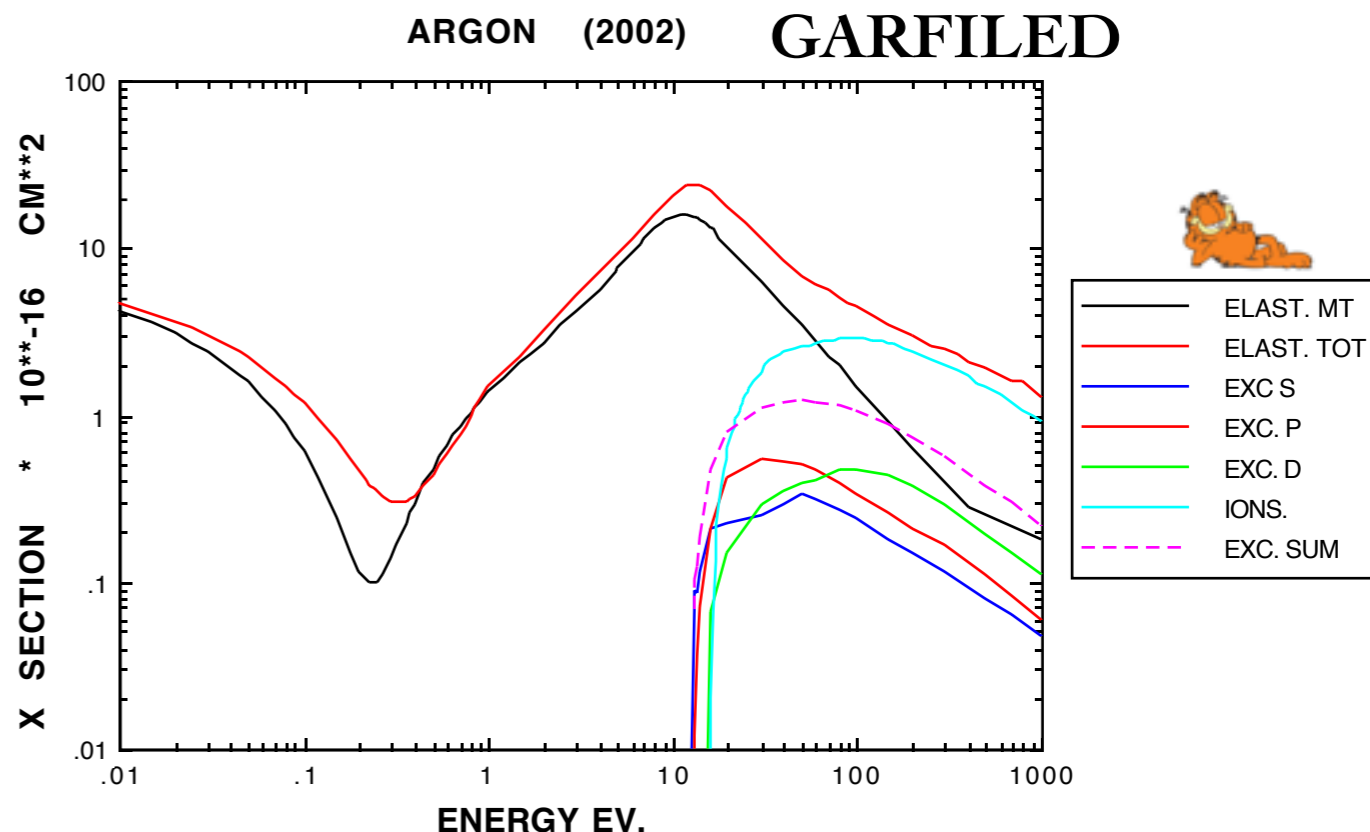


平均自由行程を概算してみると、、、

$$\lambda = \frac{1}{N\sigma} \quad N \sim \frac{N_A}{22.4 \times 1000} \text{ [/cm}^3\text{]}$$

$$\sigma_I \sim 10^{-16} \text{ cm}^2$$

--> ~数 $\mu\text{m}$ 程度



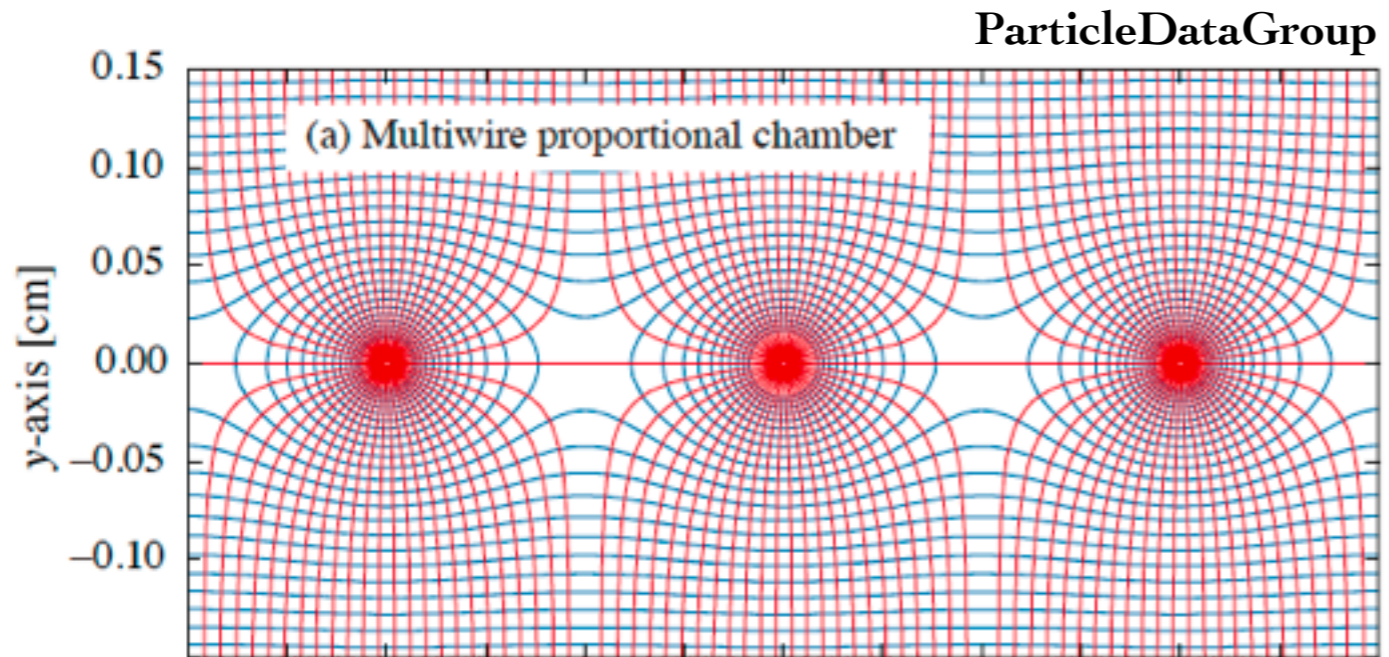
# Multi Wire Proportional Chamber (1960年代～)

From Sauli's slides at MPGD2011

"A TRIBUTE TO GEORGES CHARPAK"

The Nobel Prize in Physics 1992

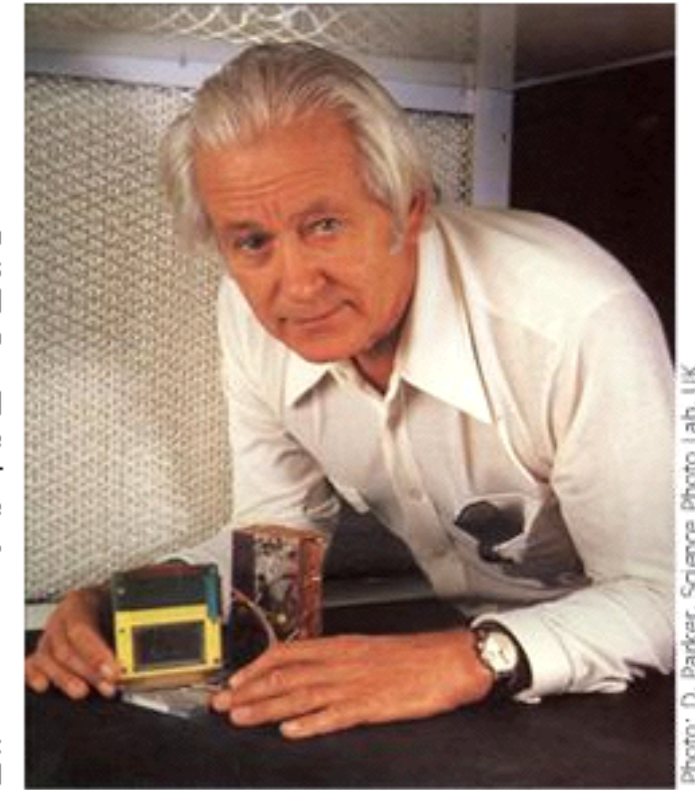
G. Charpakによって発明され、 $J/\psi$ 粒子やZ,Wボソンの発見など多くの成果を上げた。



ワイヤー径 数十 $\mu\text{m}$ , 電位  $\sim 5\text{kV}$

The Royal Swedish Academy of Sciences awards the 1992 Nobel Prize in Physics to **Georges Charpak** for his invention and development of particle detectors, in particular the multiwire proportional chamber.

**Georges Charpak**  
CERN, Geneva, Switzerland

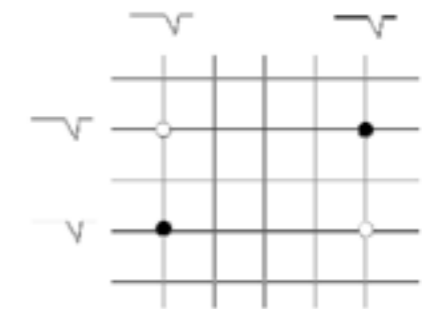


ワイヤー近傍で電場が非常に強くなり、信号増幅が起こる。

ワイヤーを数ミリ間隔で張ることによって、粒子が通過した位置を検出する仕組み。

ワイヤーの長手方向の位置をどうやって検出するか？

- 抵抗値をもつワイヤーを使い、両端で読み出した電荷量の比から見積もる。
- 両端の読み出し時間差を利用する。
- 角度をつけたワイヤー層を重ねて二重で読み出す。
- 誘導電位をパッドで読み出す。

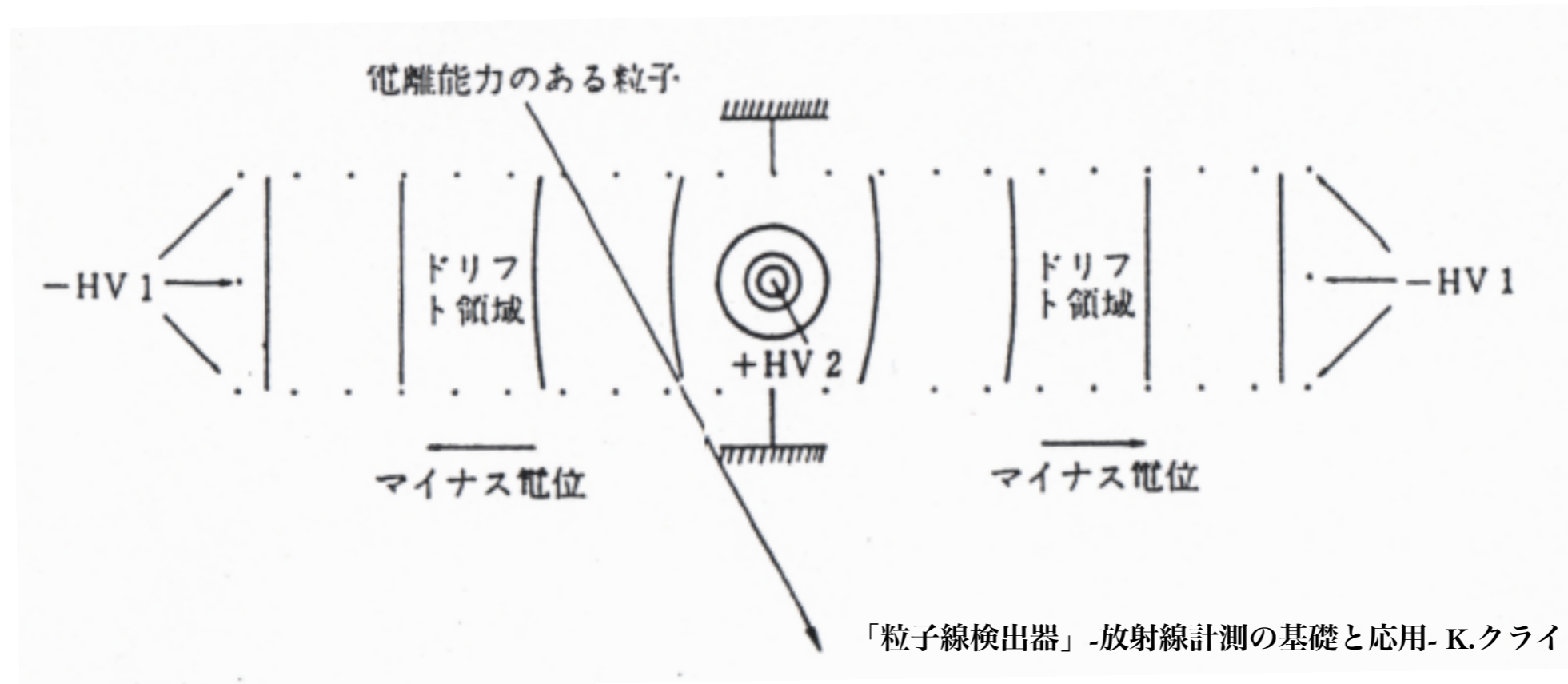


# MWPCからの変化形

## ドリフトチェンバー (1970年代~)

ワイヤーの間隔を広げて、大きな測定領域を確保。

信号電子がドリフトする時間を利用してワイヤー間隔より細かい精度で位置測定。

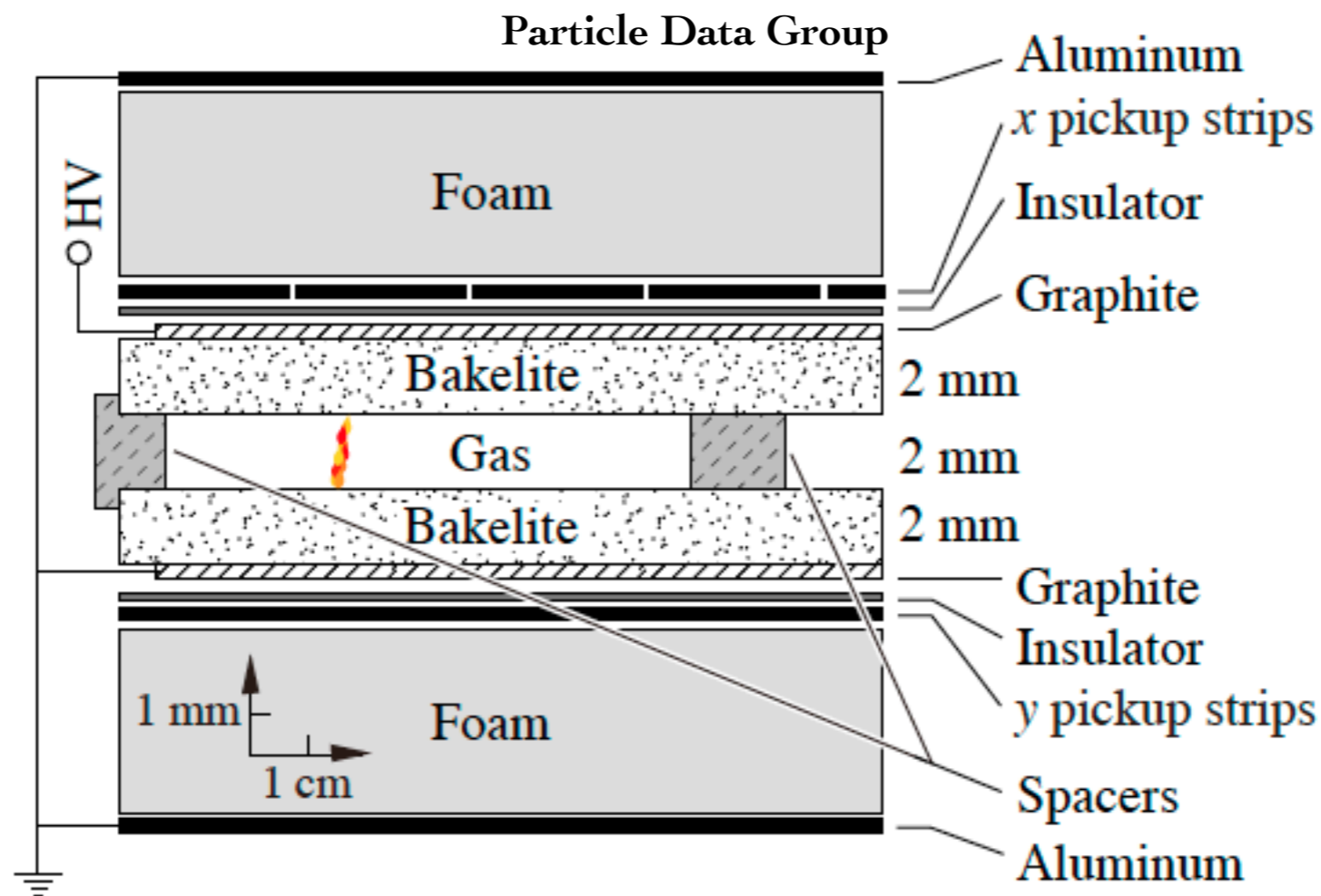


# MWPCからの変化形

## Resistive Plate Chamber (RPC)

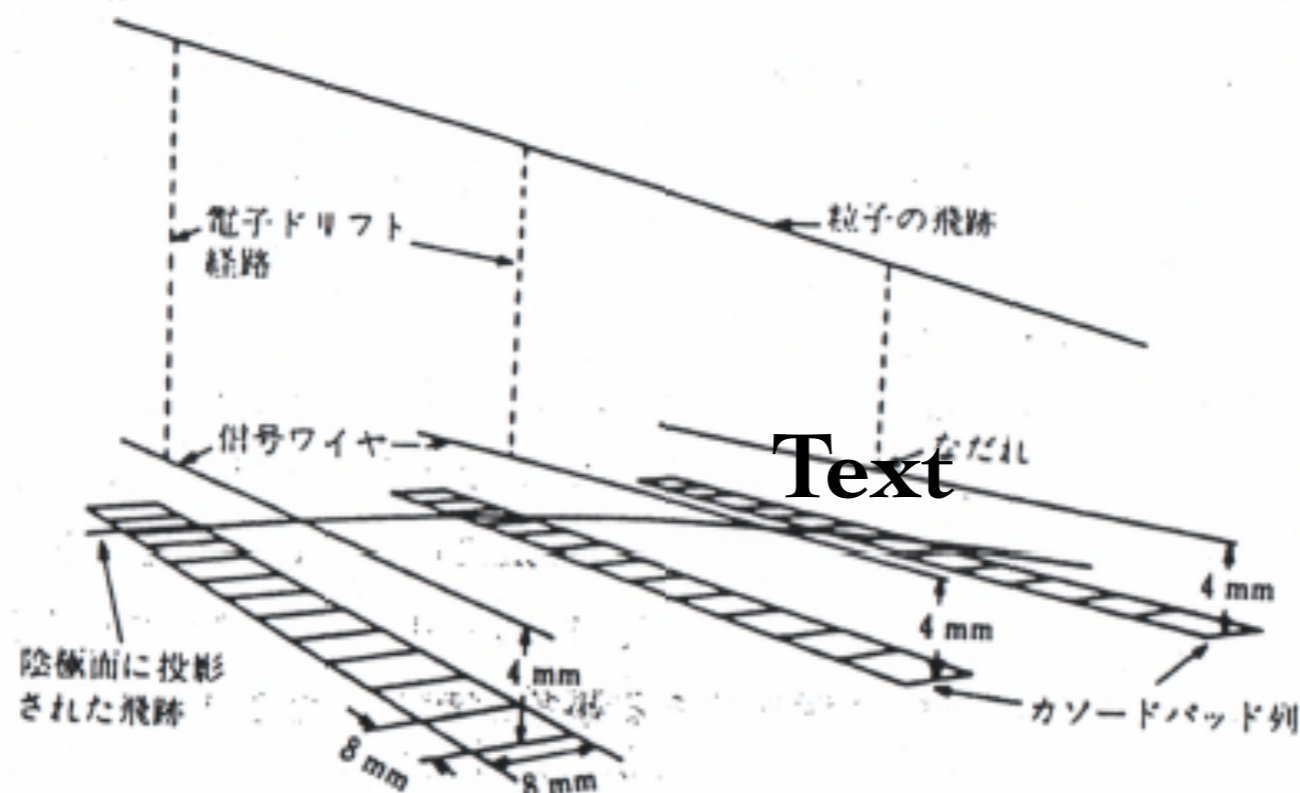
Santonico, Cardarelliにより開発(1980年代)。

ワイヤーをなくす代わりに電極を高抵抗板に置き換えて、電極間に高電圧をかける。抵抗のおかげで荷電粒子の通過によって引き起こされる放電が局在化し、位置測定に利用できる。

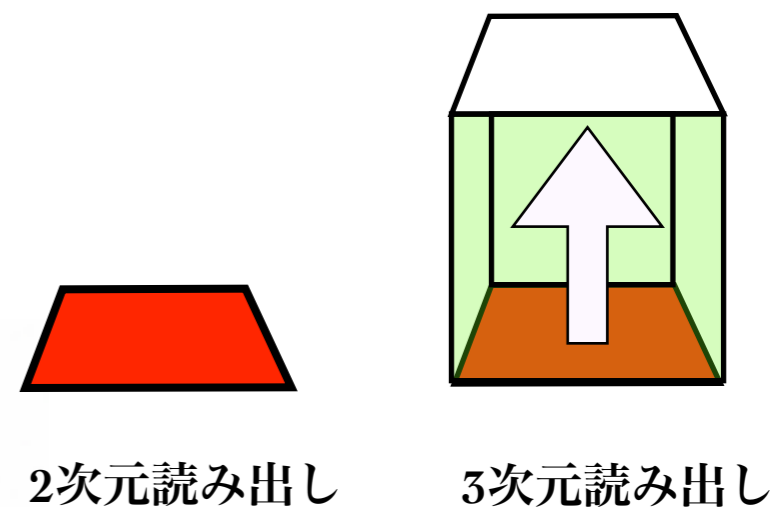


# MWPCからの変化形 Time Projection Chamber (TPC)

これまでの2次元読み出しに加えて、信号電子をドリフトさせる領域を作り、3次元測定を行う。



「粒子線検出器」-放射線計測の基礎と応用- K.クラインクネヒト



通常の2次元的な読み出しを行う検出器に比べて信号電子をドリフトさせる距離が長いので、高純度のガス組成、一様な電場や磁場形成、補正が性能向上に必要不可欠。増幅時にできるイオンがドリフト領域に逆流して、ドリフト電場を歪める可能性がある。(イオンフィードバックの問題)

# Micro Pattern Gaseous Detectors (MPGD) R&D collaboration : RD51

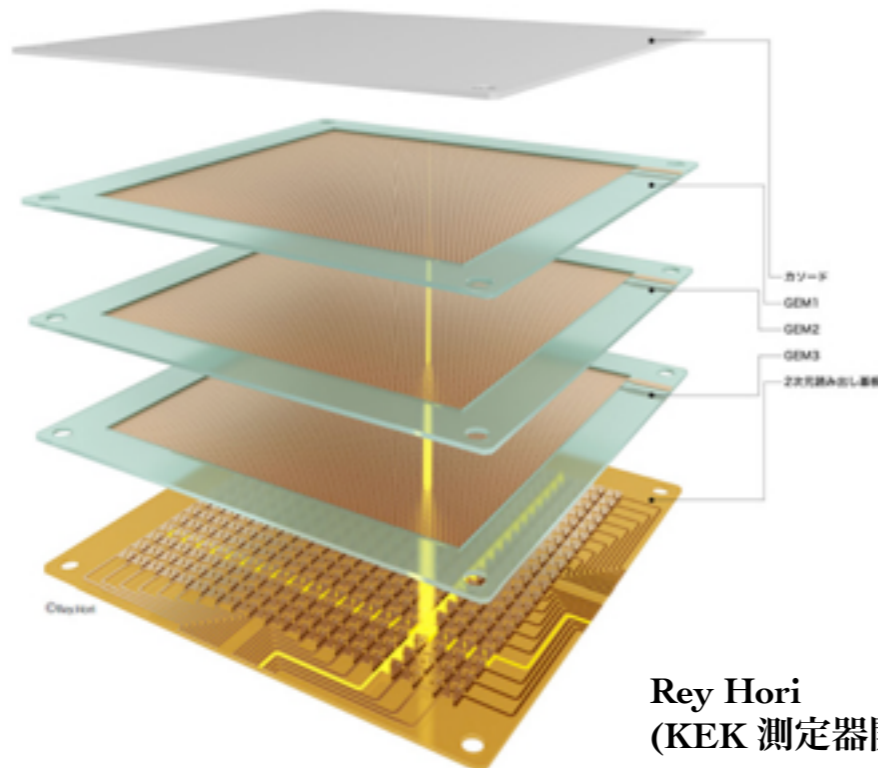
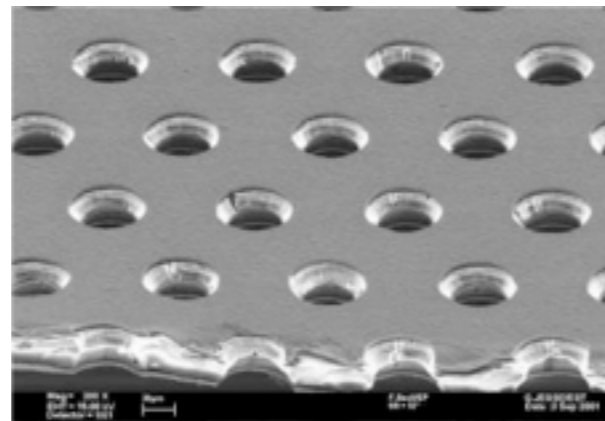
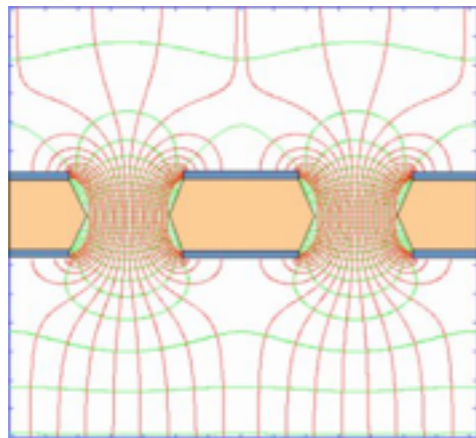
位置分解能の向上 ( $\sim 100\mu\text{m}$ )

高頻度耐性 ( $\sim 10^6 \text{ Hz/mm}^2$ )

不感領域の縮小 (ワイヤーを張る頑丈なフレームがいない)

イオンフィードバックを抑制

GDD group (CERN)



Rey Hori  
(KEK 測定器開発室のwebページより)

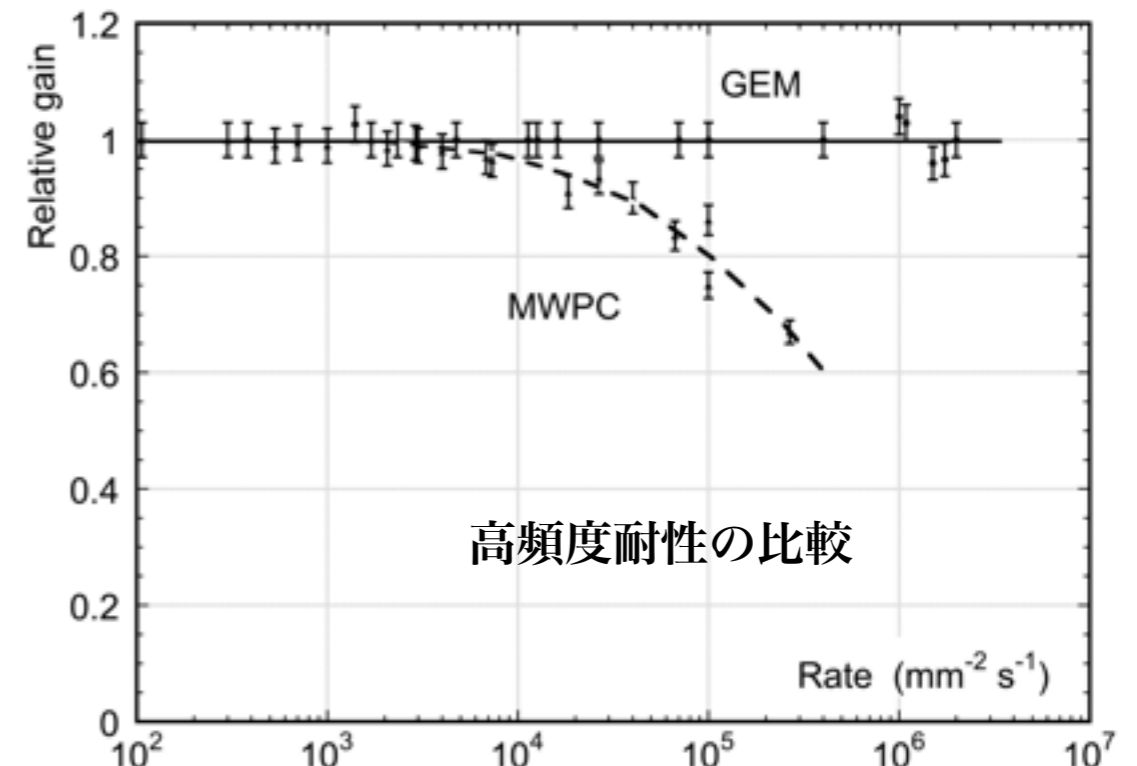
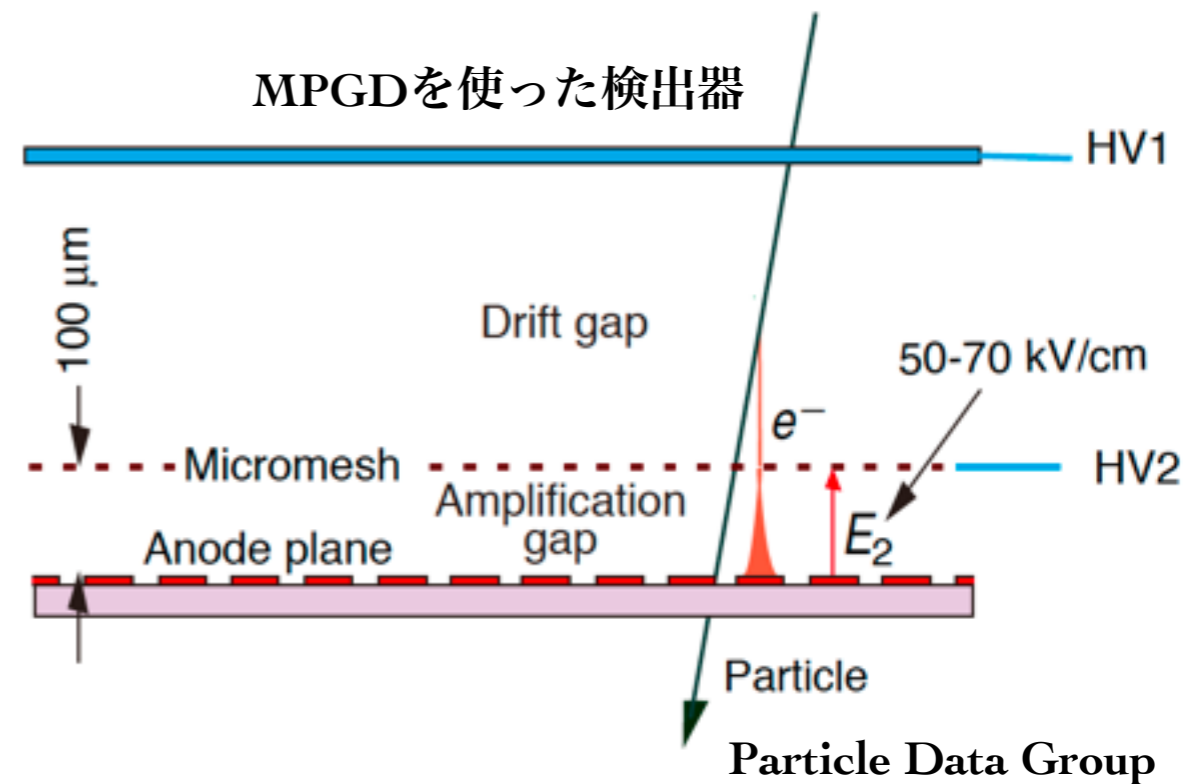


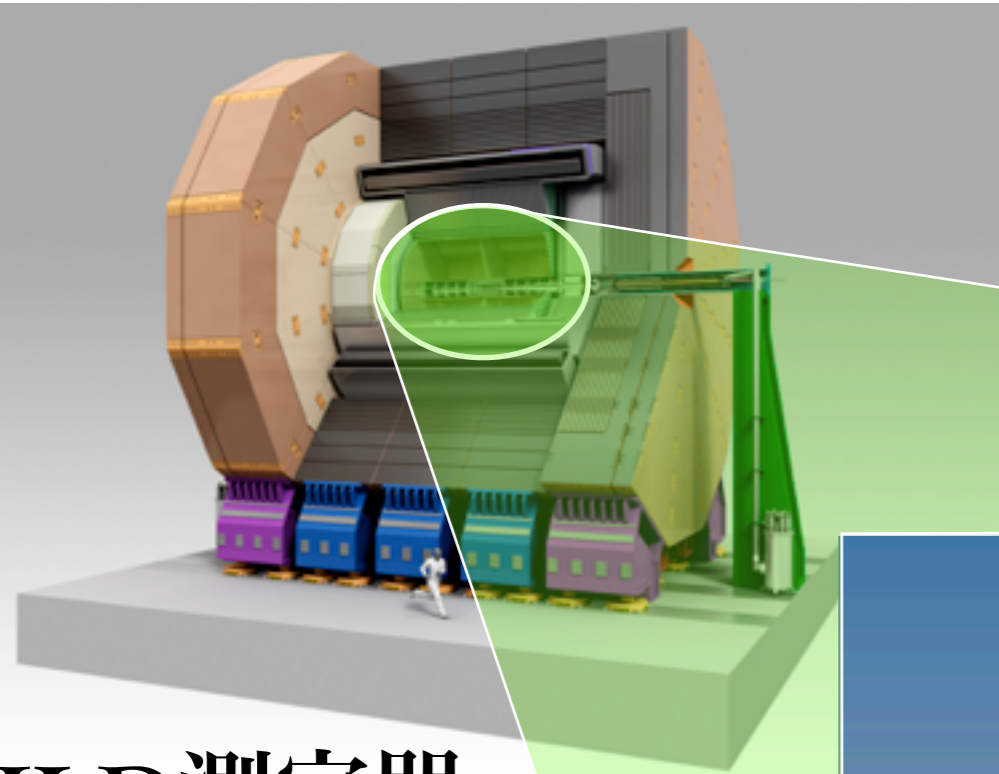
Figure 31.9: Normalized gas gain as a function of particle rate for MWPC [72] and GEM [86].

高頻度耐性の比較

# ILD-TPC

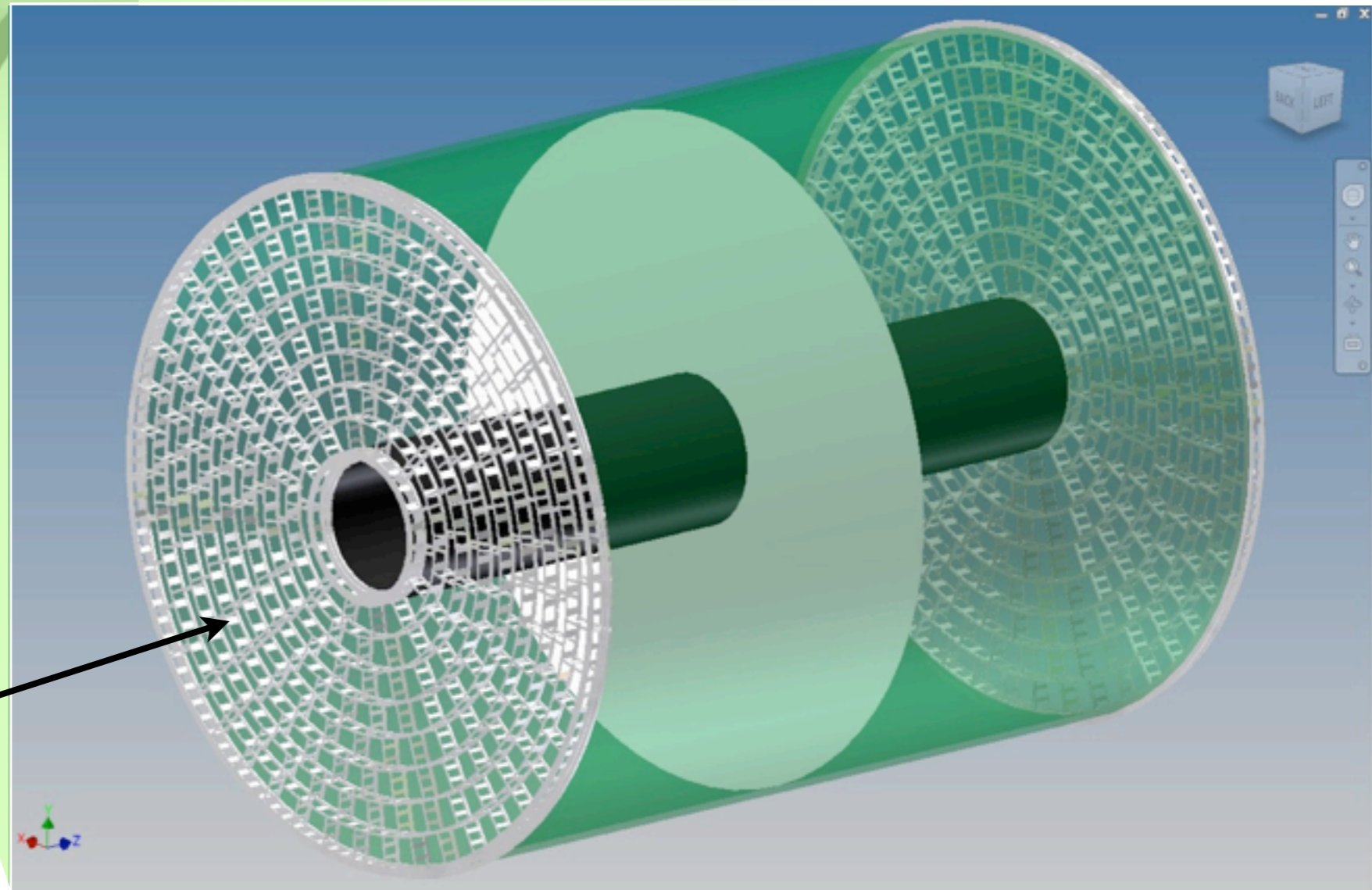
TPC+MPGDを組み合わせた構成。

Rey Hori



## ILD測定器

## ILD - TPCのイメージ図



MPGDを用いた読み出しモジュール  
を敷き詰めて読み出し端板を構成する。

## まとめ

ガス検出器の歴史はながく、実績が多数ある。

ガス分子を電離させてできる信号電子を検出する。

電氣的に信号を読み出すためには、ガス増幅させる必要がある。

### ガス検出器の強み

構造が単純(ガスと電場が適切にかかっているだけで動作する)。

大型の検出器にしても、物質量が小さく抑えられる。

放射線による劣化を気にする必要はない。

### ガス検出器の弱み

エネルギー分解能は半導体検出器に比べて悪い。