



# Introduction of TPC for ILC experiment

Keita Yumino (SOKENDAI)



# TPC talk @ILC summer camp 2019

## Main topics: Overview of LCTPC

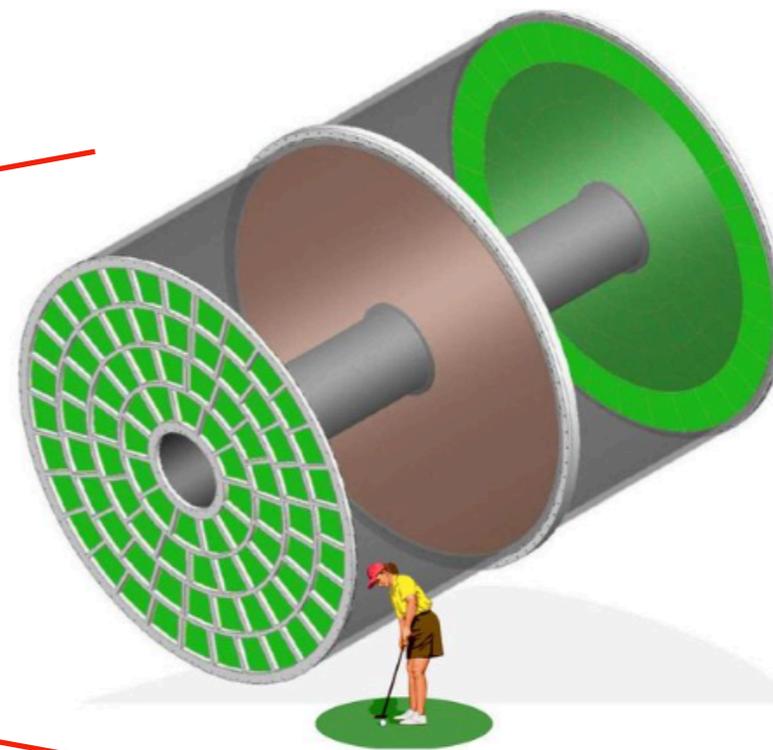
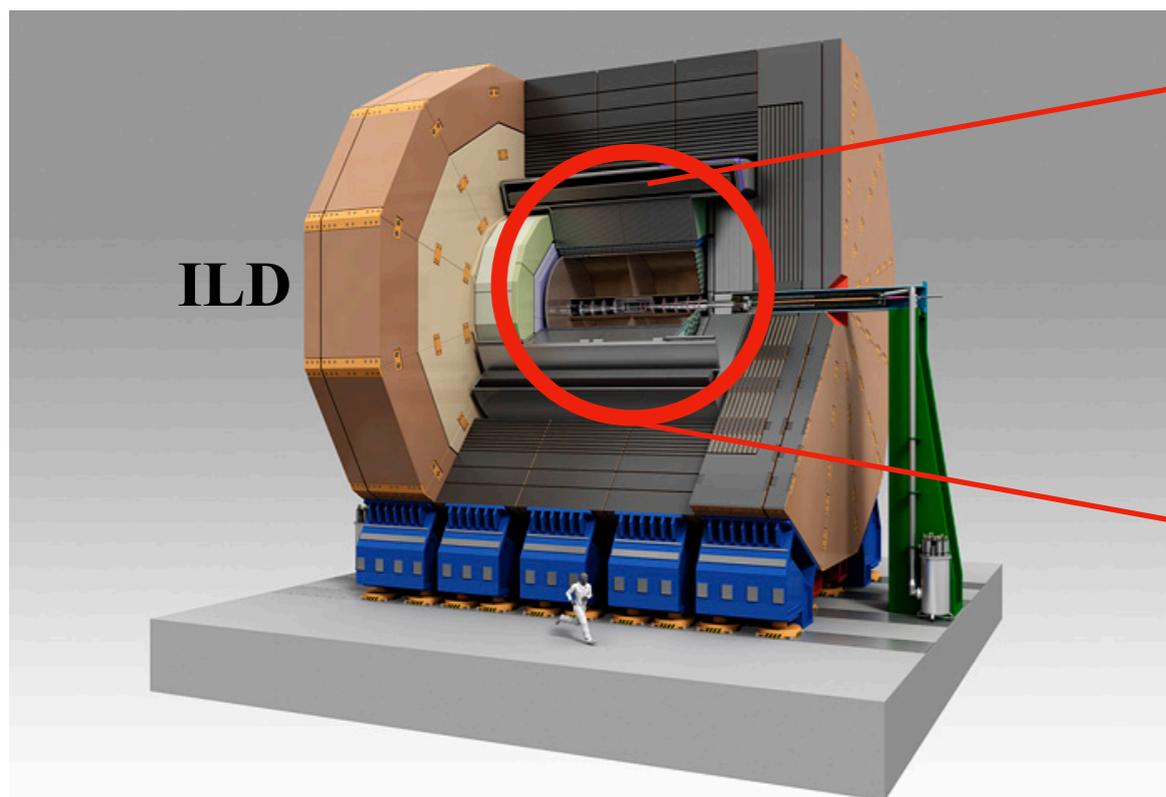
[https://agenda.linearcollider.org/event/8237/contributions/44016/attachments/34697/53550/ILC\\_SummerCamp\\_Yumino2019ENG\\_0.pdf](https://agenda.linearcollider.org/event/8237/contributions/44016/attachments/34697/53550/ILC_SummerCamp_Yumino2019ENG_0.pdf)

## This year Mainly focus on

- **dE/dx**
- **Gas mixture**
- **Avalanche gas gain**

# Time Projection Chamber (TPC)

## ILDの中央飛跡検出器



荷電粒子の飛跡を3次的に再構成

### TPCの役割

荷電粒子

#### 荷電粒子のトラック測定

飛跡に沿って生じる荷電粒子の通過点を測定

↳ トラックの方向がわかる

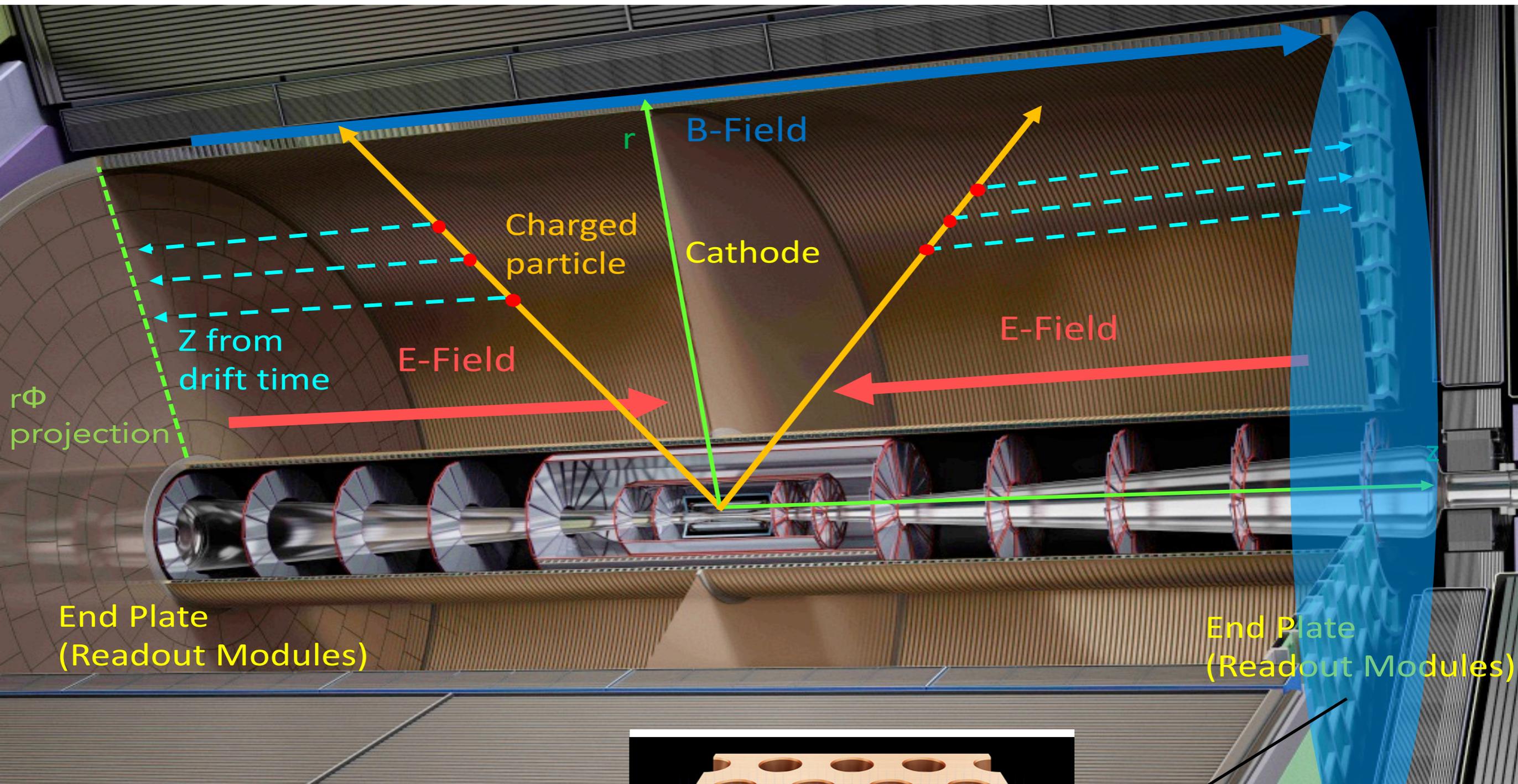
#### 運動量測定

磁場中でのトラックの曲がり具合を測定

↳ 荷電粒子の運動量がわかる

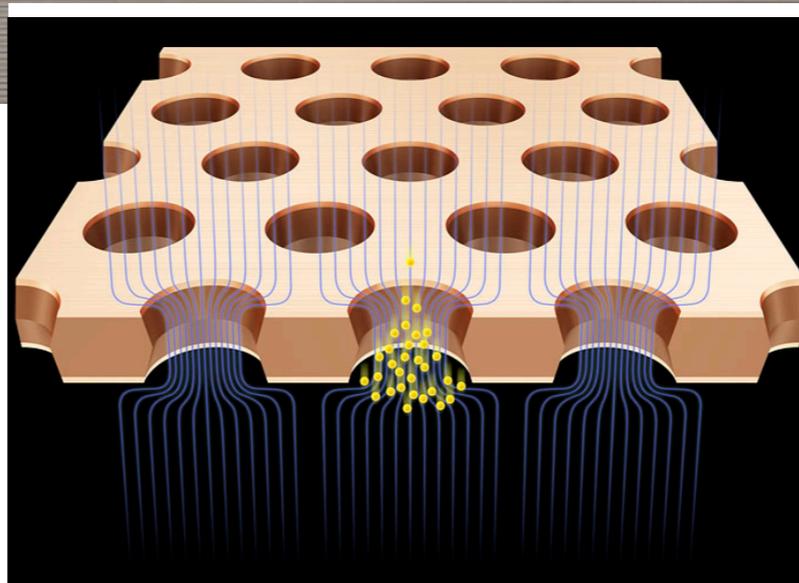
#### 粒子識別 (PID)

# Inside of ILD-TPC



T2K gas  $\text{Ar} : \text{CF}_4 : \text{iC}_4\text{H}_{10} = 95 : 3 : 2$

電離によって生じた電子をガス増幅して  
電気信号として読み出し

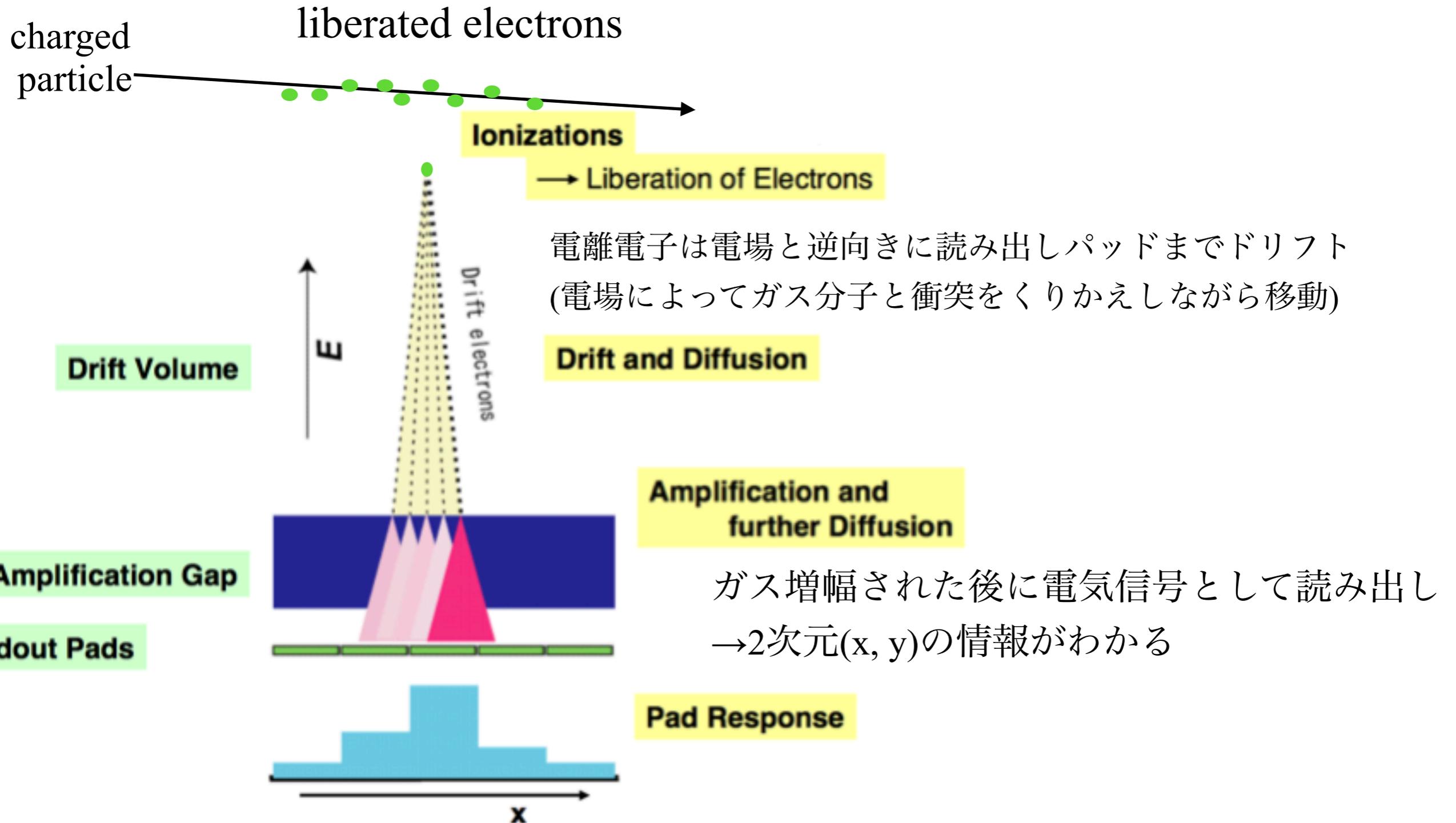


ガス増幅器の例

GEM (Gas Electron Multiplier)

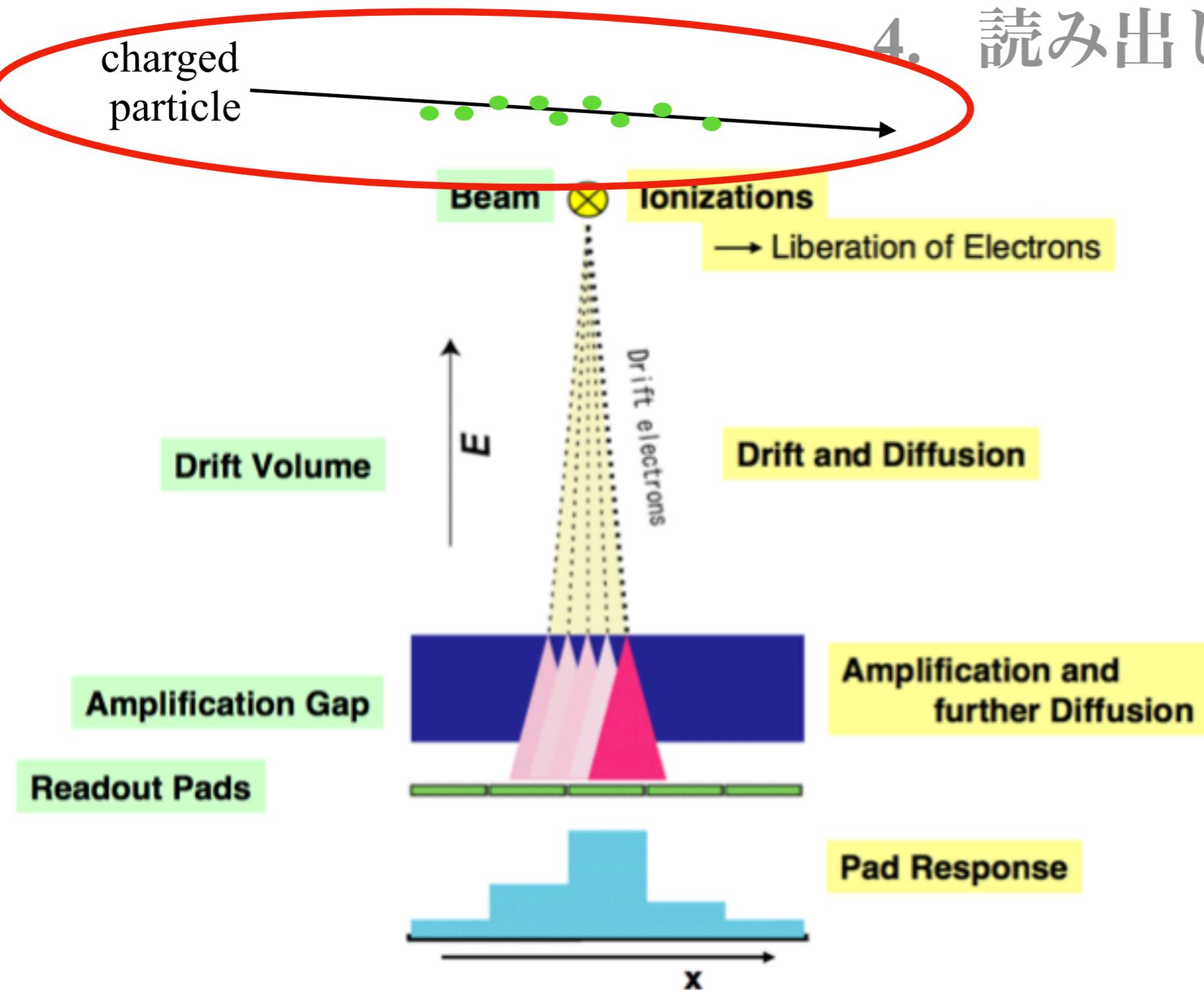
# TPCの動作原理

荷電粒子が飛跡に沿ってガス分子を電離



z成分(ドリフト方向)はドリフト時間からわかる→3次元的に再構成

1. 運動量測定
2. ガス組成
3. 粒子識別とエネルギー損失
4. 読み出しモジュール



# 運動量測定

磁場中の荷電粒子->磁場中で円運動

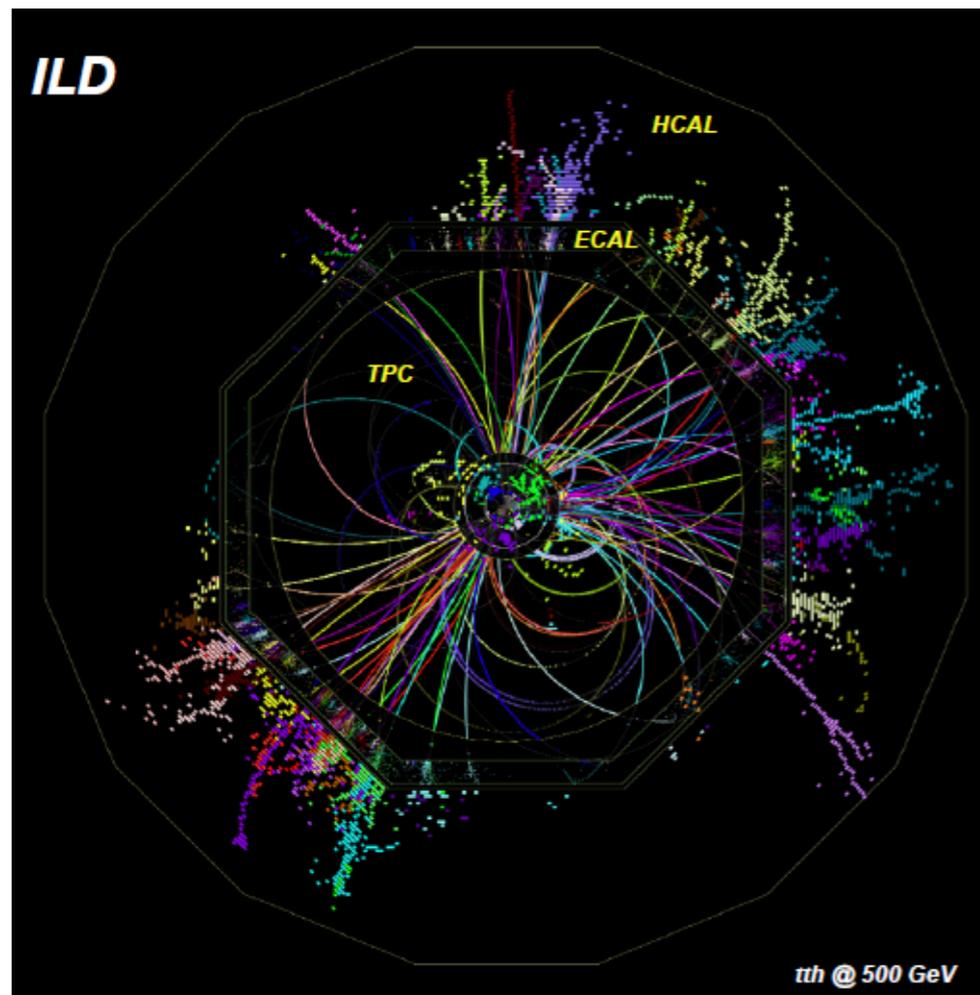
運動方程式より  $p_{\perp} = eBR$  [ $kg \cdot m \cdot s^{-1}$ ]

・両辺に光速  $c$  をかけてジュールに変換

・  $1[eV] = 1.6 \times 10^{-19}[J]$

$p_{\perp}$  : 磁場に垂直な荷電粒子の運動量成分

$p_z$  : ビーム軸方向の荷電粒子の運動量成分



$$\begin{aligned} p_{\perp}c &= \frac{eBRc}{1.6 \times 10^{-19}} [eV] \\ &= 3.0 \times 10^8 BR [eV] \\ &= 0.3 BR [GeV] \end{aligned}$$

$$\therefore p_{\perp} = 0.3 BR [GeV/c]$$

$p_{\perp}$  と  $p_z$  の比は粒子の放出角から求められる



荷電粒子の飛跡の曲率半径  $R$  によって運動量  $p$  が求められる

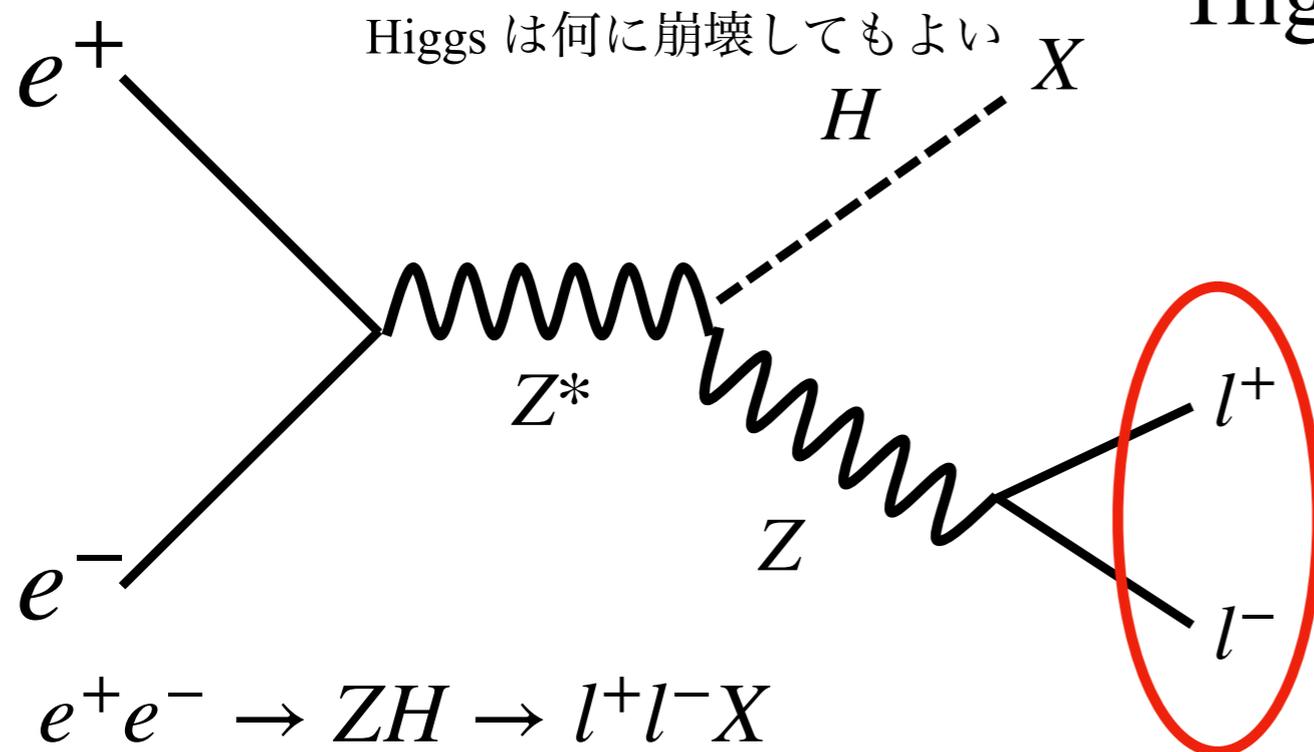
## ILD-TPCで要求される運動量分解能

ILC: “Higgs factory”

Higgs 精密測定は最重要課題

“反跳質量測定法”

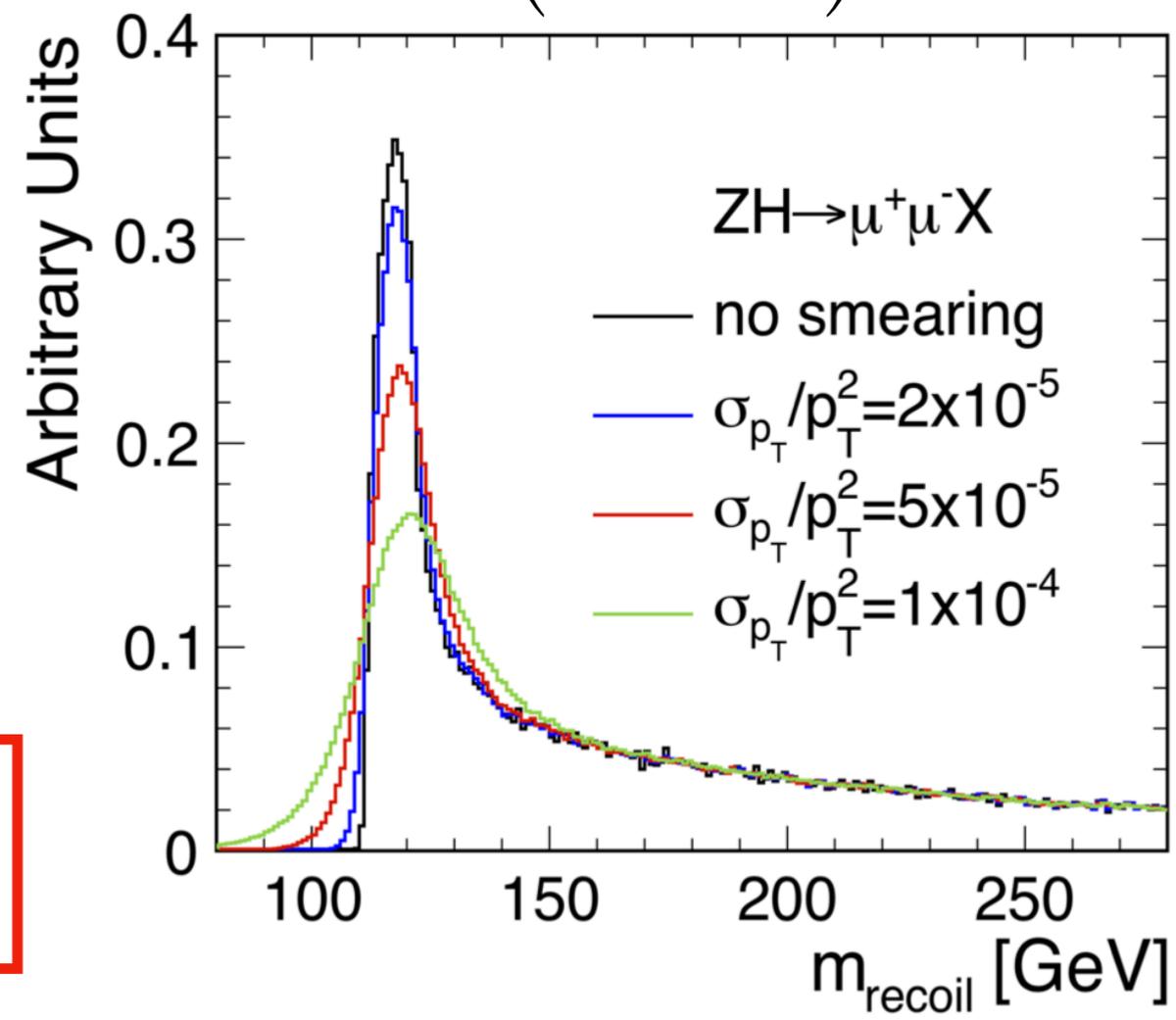
Higgs を直接見ずに再構成



$$P_h = P_{e^-} + P_{e^+} - P_Z$$

or

$$m_{recoil}^2 = \left( \sqrt{s} - E_{ll} \right)^2 - |P_{ll}|^2$$



$Z \rightarrow ll$  の再構成のために  
高精度の運動量分解能が必要

# 運動量分解能公式

## 運動量分解能

$$\frac{\sigma_{p_{\perp}}}{p_{\perp}} = \sqrt{\left(\frac{\alpha' \sigma_x}{BL^2}\right)^2 \left(\frac{720}{N+4}\right) p_{\perp}^2 + \left(\frac{\alpha' C}{BL}\right)^2 \frac{10}{7} \left(\frac{X}{X_0}\right)}$$

多重散乱

$p_{\perp}$  : 横運動量

$B$  : 磁場の強さ

$L$  : 検出器半径

$\alpha', C$  : 定数

$\sigma_x$  : 位置分解能

$N$  : 測定点の数

$\frac{X}{X_0}$  : ガスの放射長

R.L. Gluckstern, NIM 24 (1963), 381

## ILD-TPCで要求される分解能

$$\frac{\sigma_{p_{\perp}}}{p_{\perp}} \approx 2 \times 10^{-5} p_{\perp} \text{ GeV}/c \quad \text{シリコントラッカーの情報も含めて}$$

TPC だけでは...

$$\frac{\sigma_{p_{\perp}}}{p_{\perp}} \approx 1 \times 10^{-4} p_{\perp} \text{ GeV}/c$$

## 運動量分解能公式

運動量分解能

$$\frac{\sigma_{p_{\perp}}}{p_{\perp}} = \sqrt{\underbrace{\left(\frac{\alpha' \sigma_x}{BL^2}\right)^2 \left(\frac{720}{N+4}\right) p_{\perp}^2}_{\text{measurements}} + \underbrace{\left(\frac{\alpha' C}{BL}\right)^2 \frac{10}{7} \left(\frac{X}{X_0}\right)}_{\text{multiple scattering}}}$$

ILD-TPCで要求される運動量分解能を達成するためには

$$\frac{\sigma_{p_{\perp}}}{p_{\perp}} \approx 1 \times 10^{-4} p_{\perp} \text{ GeV}/c$$

ILCTPC:  $B = 3.5 \text{ T}$ ,  $N \simeq 200$ ,  $L = 1.5 \text{ m}$  から

高精度の位置分解能が必要  $\sigma_x$

$$\sigma_x \approx 100 \mu\text{m}$$

## 位置分解能

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_0^2 + \frac{C_d^2 \cdot z}{N_{eff}}}$$

$z$ : ドリフト距離

$N_{eff}$ : 有効電子数

$C_d$ : ガスの拡散定数

ドリフト距離に依存

最長ドリフト距離 2.2 mにおいても

位置分解能  $\sigma_x \approx 100 \mu m$  を達成する必要

ドリフトしている間に可能な限り拡散を抑えたい

強磁場  $B = 3.5 T$  下で拡散が抑制されるガスの選択

# 位置分解能

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_0^2 + \frac{C_d^2 \cdot z}{N_{eff}}}$$

拡散定数

$$C_d(B, E) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} C_d(0, E)$$

$\omega$ :サイクロトロン周波数

$\tau$ :平均自由行程

ドリフト電子は拡散する

†特に横方向拡散が位置分解能を悪くしてしまう

In TPC : E // B

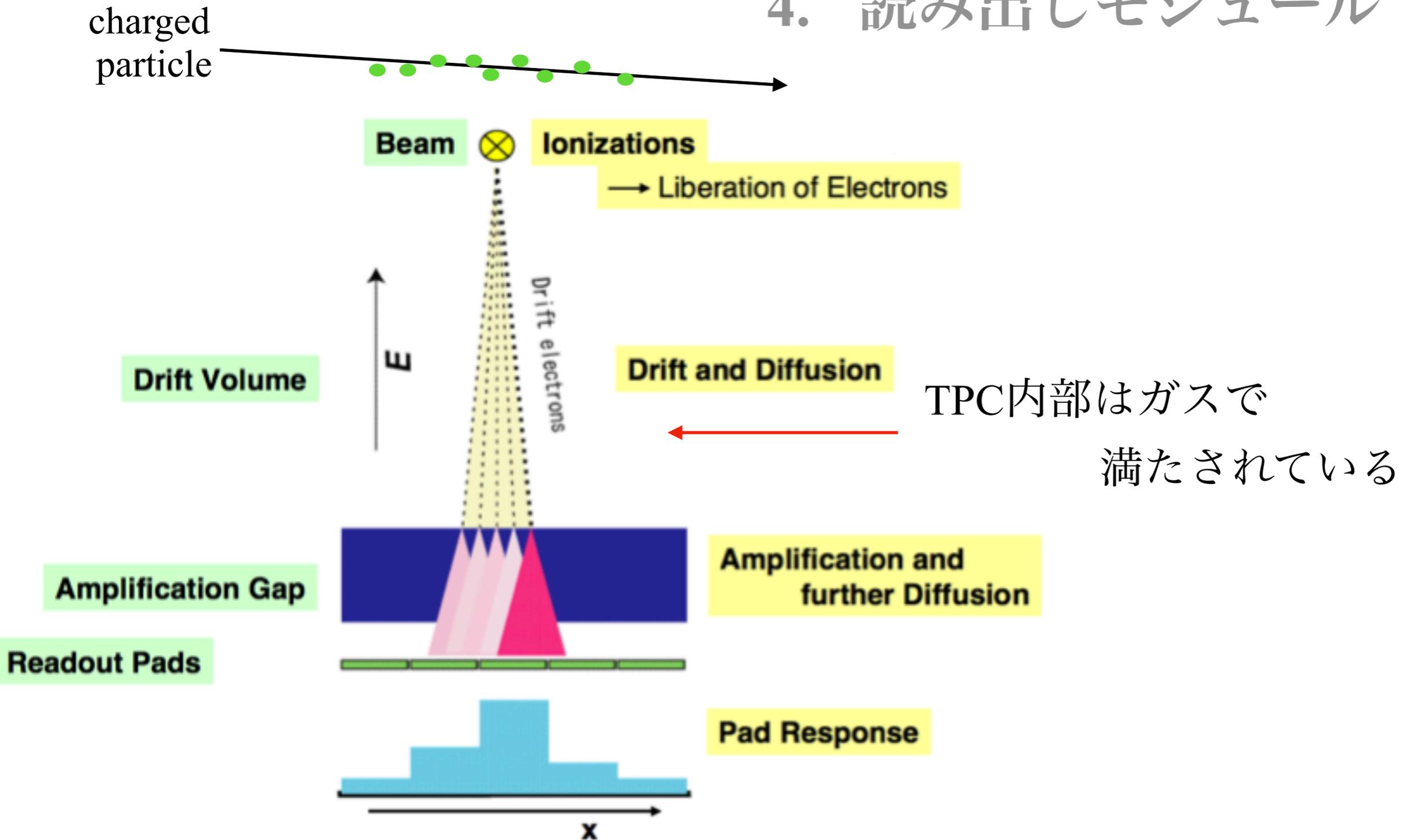
ドリフト電子はローレンツ力によって磁場にまきつくようにして進む  
→横方向拡散が抑制される

さらに

ILD-TPCで要求される分解能を達成するために

強磁場中において横方向拡散の小さくなるようなガスの選択

1. 運動量測定
2. ガス組成
3. 粒子識別とエネルギー損失
4. 読み出しモジュール



## ガス組成

横方向拡散を抑えるために $\omega\tau$  の大きいガスを選択する必要がある

T2K gas      Ar : CF4 : iC4H10 = 95 : 3 : 2       $C_d(B, E) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} C_d(0, E)$

### CF4

- Ar-CF4 は比較的速いガス

->  $\omega\tau$  が大きい！      ∴ドリフト速度  $\propto \tau$

- $E = 230 \text{ V/cm}$  と  $B = 3.5 \text{ T}$  下において  $\omega\tau$  はおおよそ 11.6

(see the first paragraph of Section 5.3 in NIM A918 (2019) 41)

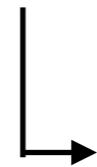
## ガス組成

T2K gas  
イソブタン

Ar : CF<sub>4</sub> : **iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>** = 95 : 3 : 2

“クエンチャー”として機能

電子増幅の際に発生する紫外光を吸収



放電を引き起こす恐れがあり

安定な運用の妨げとなる

**ボーナス**

ペニング効果によって

少量のイソブタンを入れることで低電圧においても  
高いゲインが達成可能

## Penning effect

### ペニング効果

イソブタン(iC4H10)

低いイオン化ポテンシャル

$$I_{\text{Isobutane}} = 10.67 \text{ eV} <$$

アルゴン

イソブタンのイオン化ポテンシャルより

高い励起エネルギーを持つ

**Argon:**

**Excitations:**

- 11.55 eV (S)
- 13.0 eV (P)
- 14.0 eV (D)



追加の電子!!



ペニング効果による追加の電子で

低い電圧でも高いゲインを達成できる

# 横方向拡散

$$D(B, E) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} D(0, E)$$

$\omega$  は磁場  $B$  にのみ依存

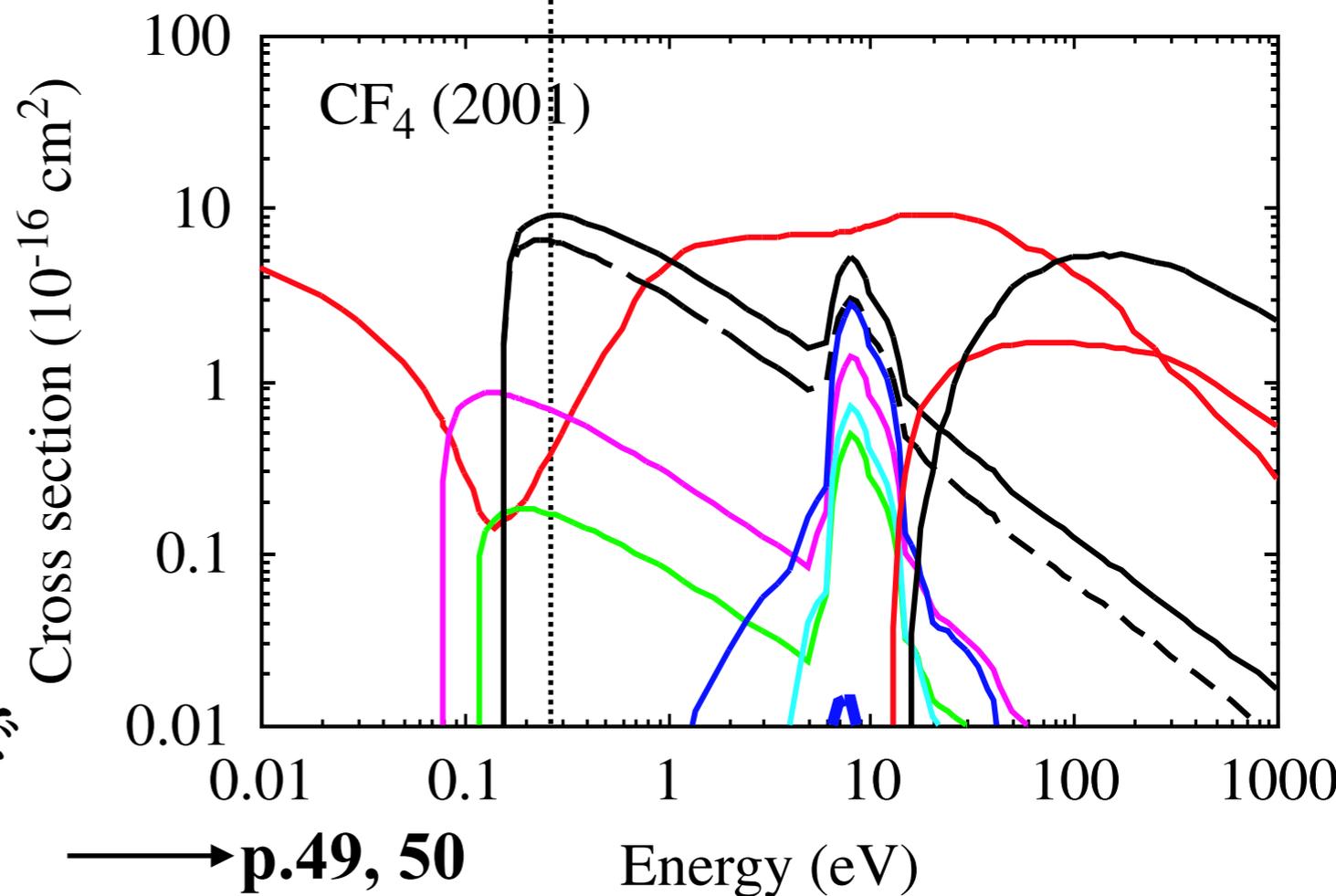
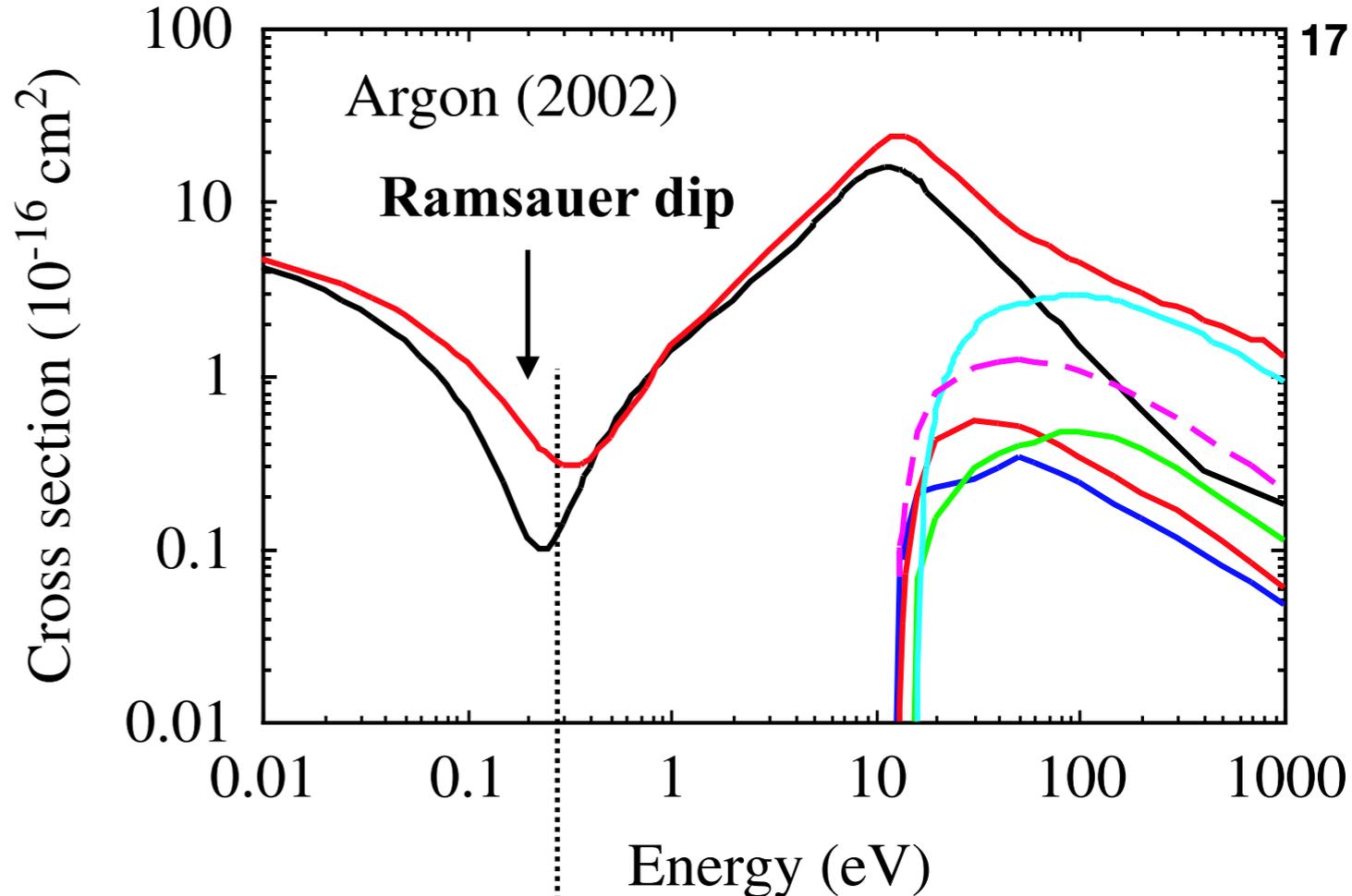
$\tau$  の大きいガスが必要

$$\tau \propto \sigma^{-1}$$

$\sigma$  : 断面積

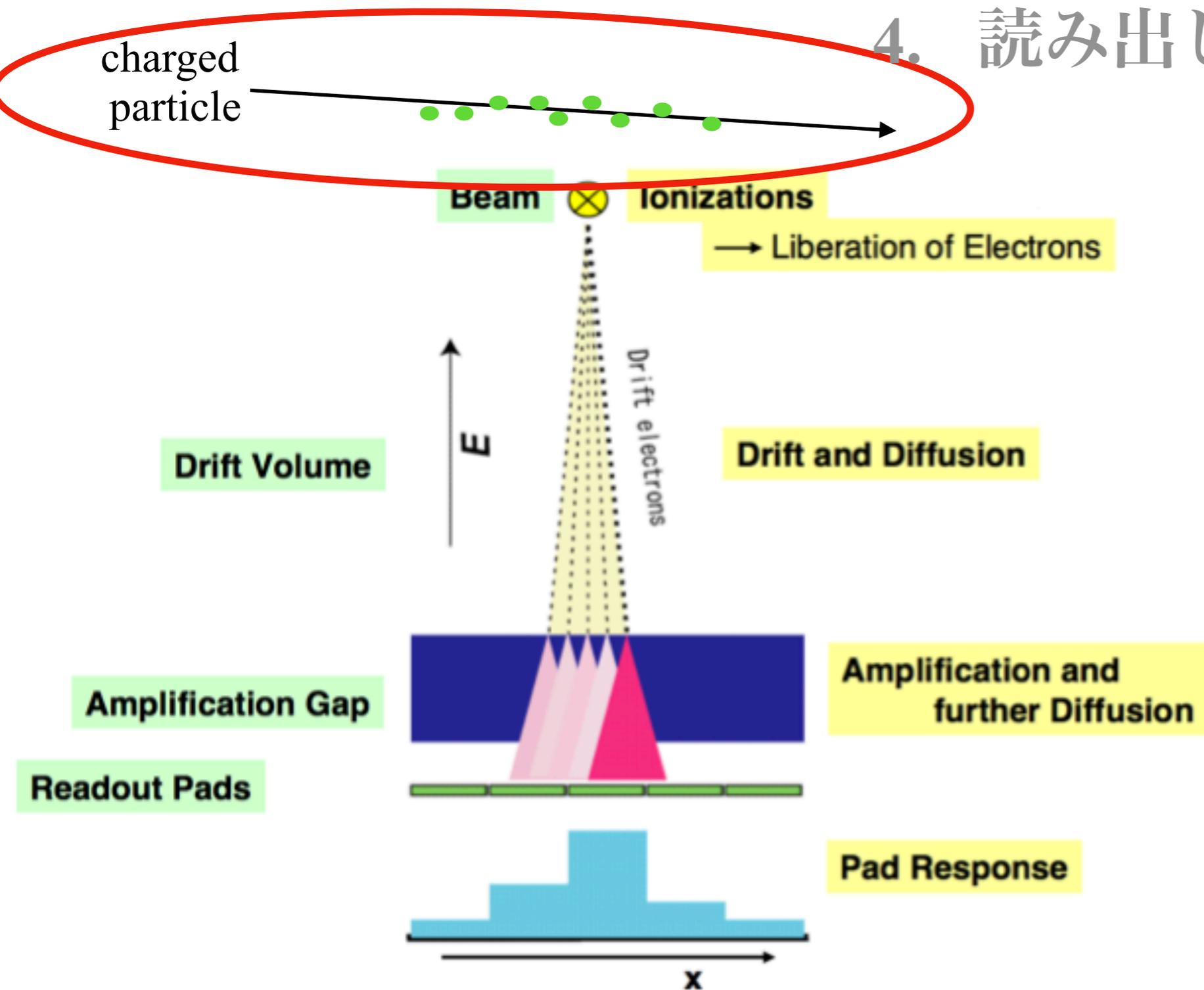
CF<sub>4</sub>は ラムザーバー-dip 近傍において高い電子との衝突断面積をもつ

ArベースのガスにCF<sub>4</sub>を入れることで  $\omega\tau$ の大きいガスが得られる



→ p.49, 50

1. 運動量測定
2. ガス組成
3. 粒子識別とエネルギー損失
4. 読み出しモジュール



# 粒子識別 PID

◎荷電粒子が通過 ->トラックとして検出

飛跡検出器内で検出される主な荷電粒子

- $\pi$
- $K$
- $e$
- $\mu$

磁場中において曲げられた方向から  
電荷の正負が識別可能

↓ 粒子の種類については

$dE/dx$ : 単位長さあたりのエネルギー損失

ベーテ・ブロッホの式

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

$\langle dE/dx \rangle$ は ある運動量での粒子の種類に依存する

→粒子の識別が可能

## ベータ・ブロッホの式

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

### 物質に依存するパラメータ

Z, A: 原子番号, 質量数 I: イオン化ポテンシャル

### 荷電粒子に依存するパラメータ

z: eを単位とした粒子の電荷  $\beta, \gamma$ : 相対論的パラメータ

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{1}{\beta^2}$$

“運動学的領域”

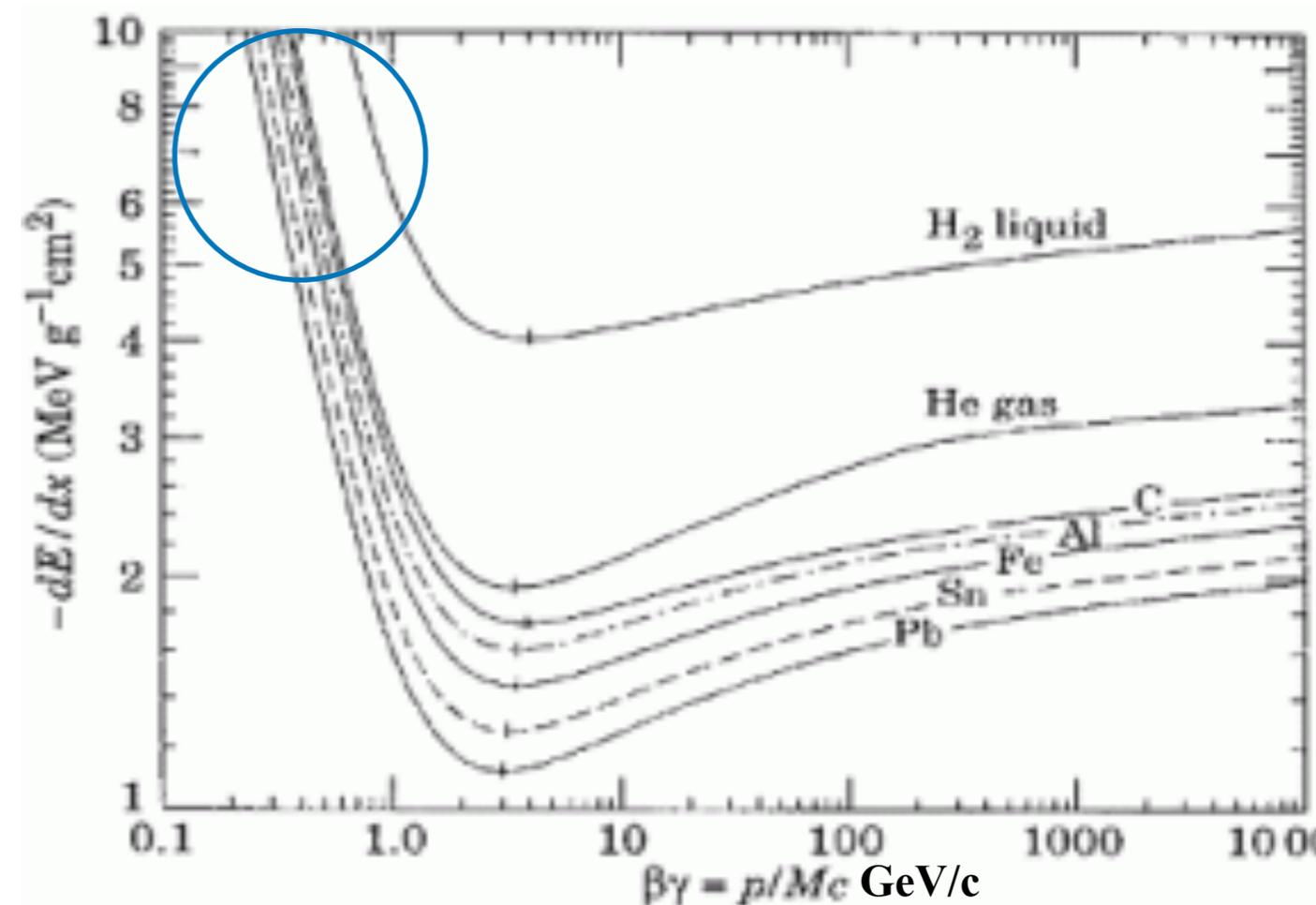
イオン化が大きい

遅い粒子ほど長い時間, 原子中の電子  
 が作る電場の影響を受ける

非相対論的な散乱現象

非相対論的領域

$$\beta\gamma < 4$$



## 最小電離粒子(MIP)

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

### 物質に依存するパラメータ

Z, A: 原子番号, 質量数 I: イオン化ポテンシャル

### 荷電粒子に依存するパラメータ

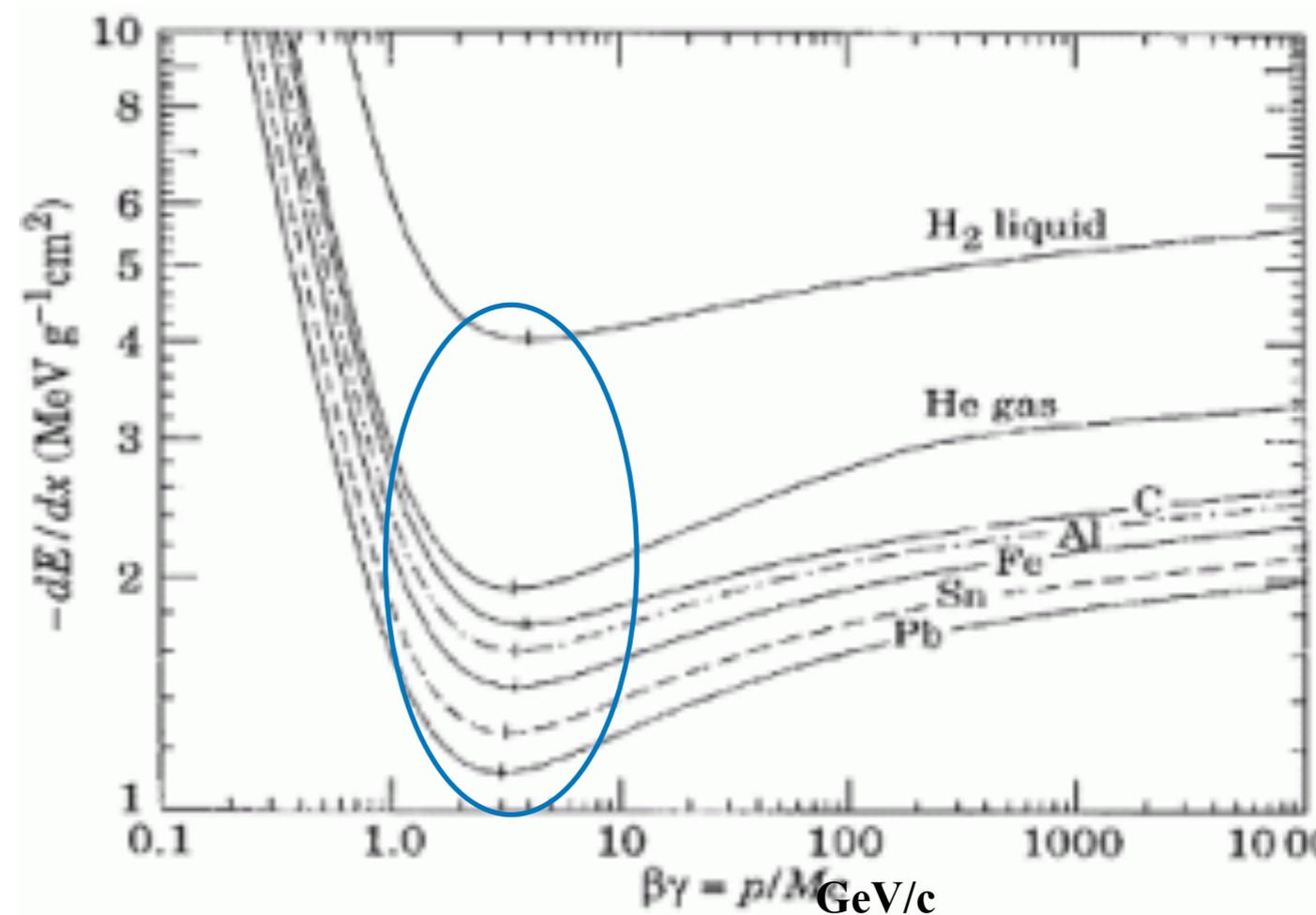
z: eを単位とした粒子の電荷  $\beta, \gamma$ : 相対論的パラメータ

$$\beta\gamma \approx 4$$

この領域にある粒子は物質中を  
最小のエネルギー損失で進む

## 最小電離粒子 (MIP)

e.g. 宇宙線ミュオン

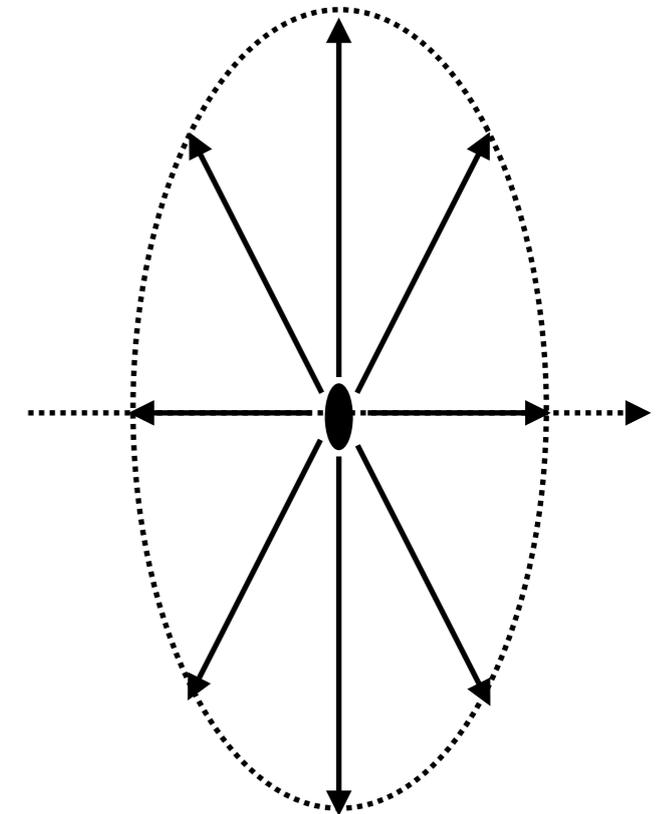
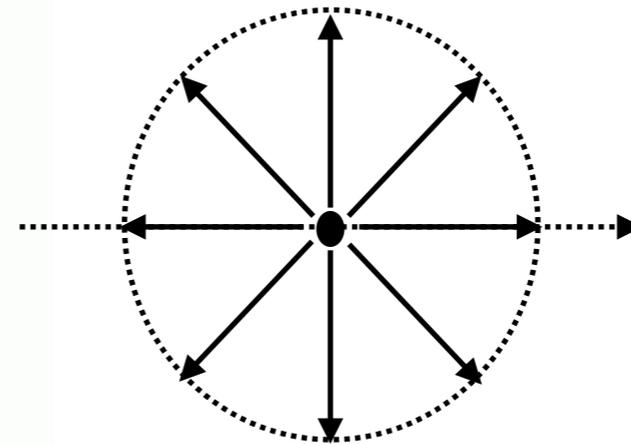
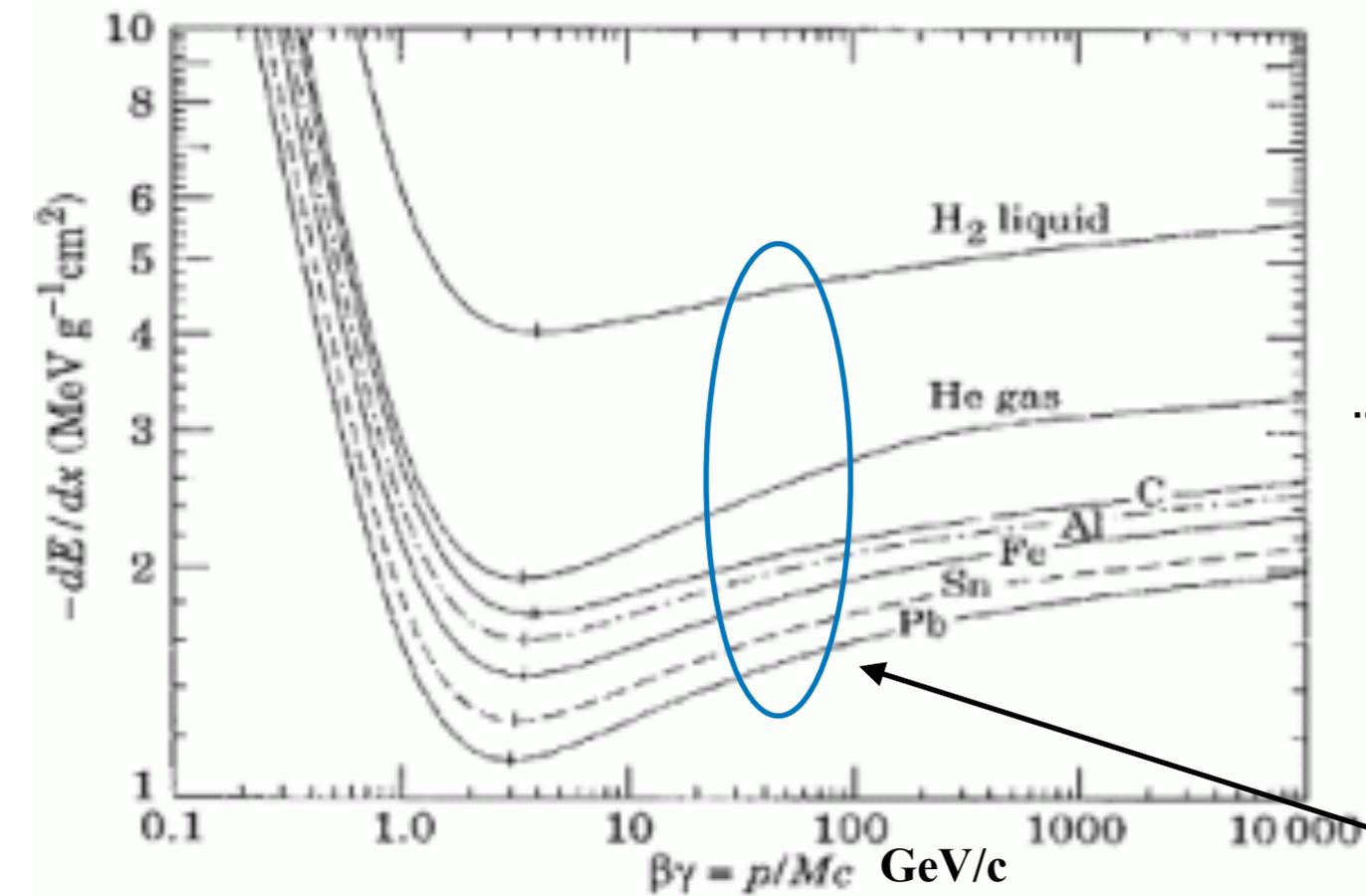


## 相対論的効果

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

$\beta \sim 0$

$\beta \sim 1$



$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \ln \beta^2 \gamma^2$$

“相対論的上昇”

相対論的効果により速い速度で運動する粒子が作る電場の縦方向成分が大きくなる

→エネルギー損失が大きくなる

## Density effect

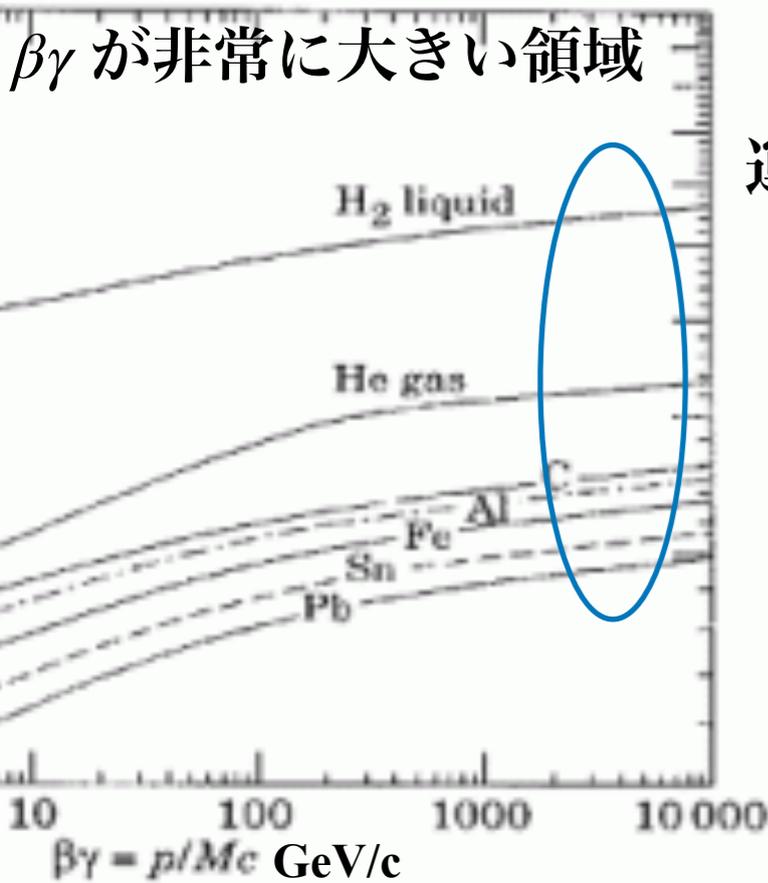
$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K Z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} - \beta^2 \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

相対論的上昇はストップし，エネルギー損失が  $\beta\gamma$  に非依存になる

“フェルミプラトー”

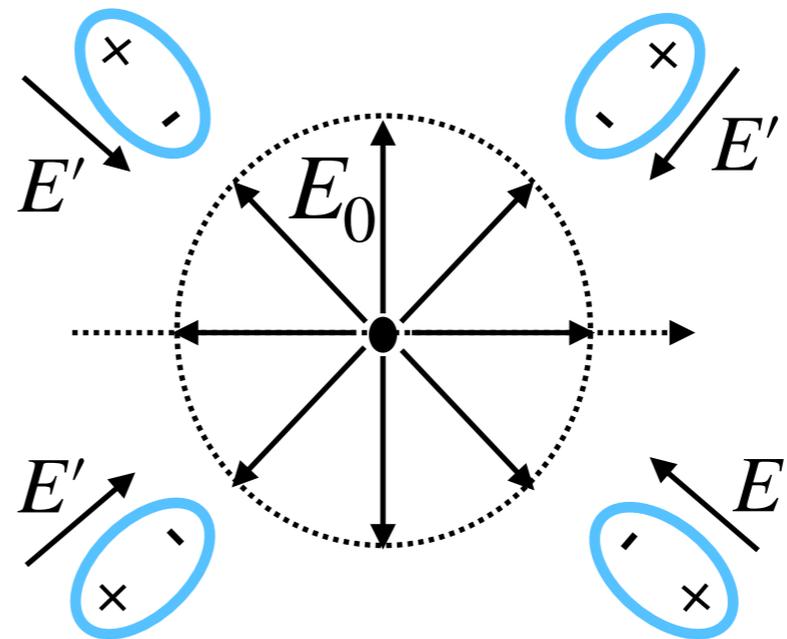
プラトー:

高原, 水平状態, 定常状態



運動する粒子が作る電場がその飛跡に沿ってガス原子を分極する

離れたところにある電子に対して遮蔽効果



ガス媒質の分極により運動する粒子の作る電場の縦方向は制限されてしまう

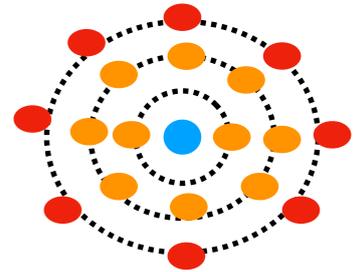
この効果は“密度”に依存するため

“密度効果”

# ランダウ分布

ベーテ・ブロッホの式によって計算されるエネルギー損失は”平均”

厚い物質では電子との散乱の回数は増える  
→中心極限定理によりガウス分布に



薄い物質中では散乱の回数は少ない

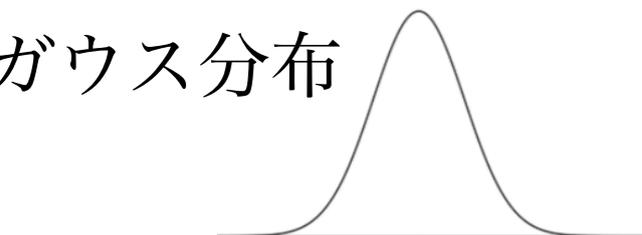
● 外殻電子  
束縛エネルギー: 低い  
簡単にイオン化される

● 内殻電子  
束縛エネルギー: 高い  
なかなかイオン化されない

ガウス分布 長い尾を引く分布

畳み込み

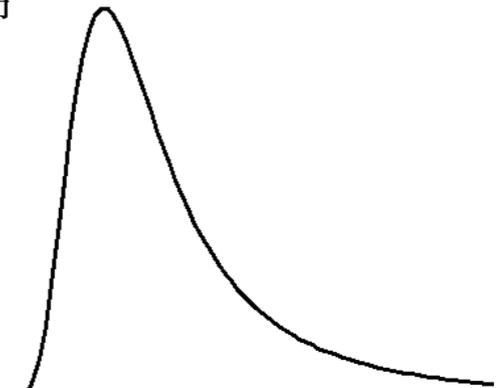
ガウス分布



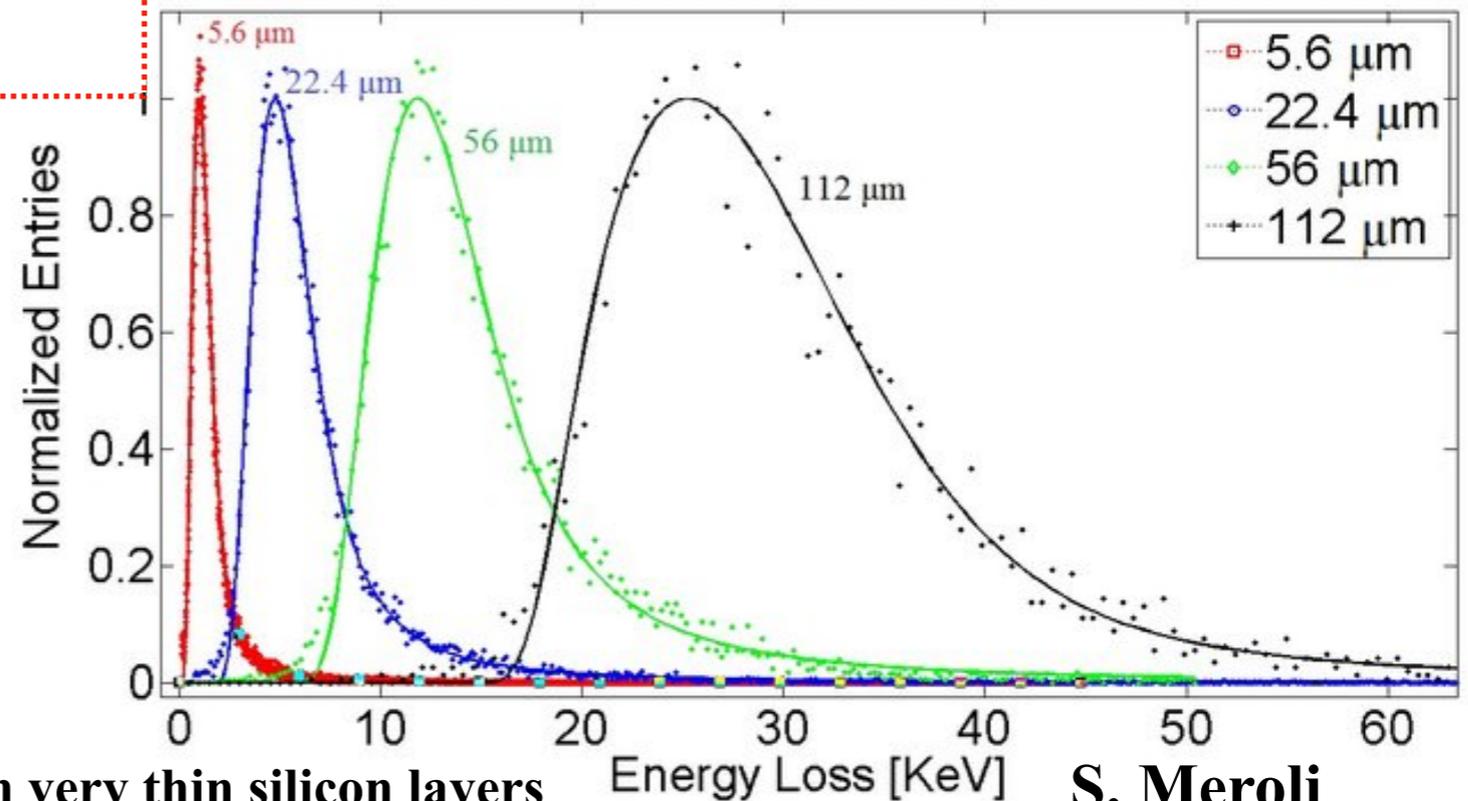
エネルギー損失は低いけど数が多い

長い尾を引く分布

数は少ないけどエネルギー損失は大きい



エネルギー損失の分布は  
非対称で尾を引くような分布  
→ランダウ分布

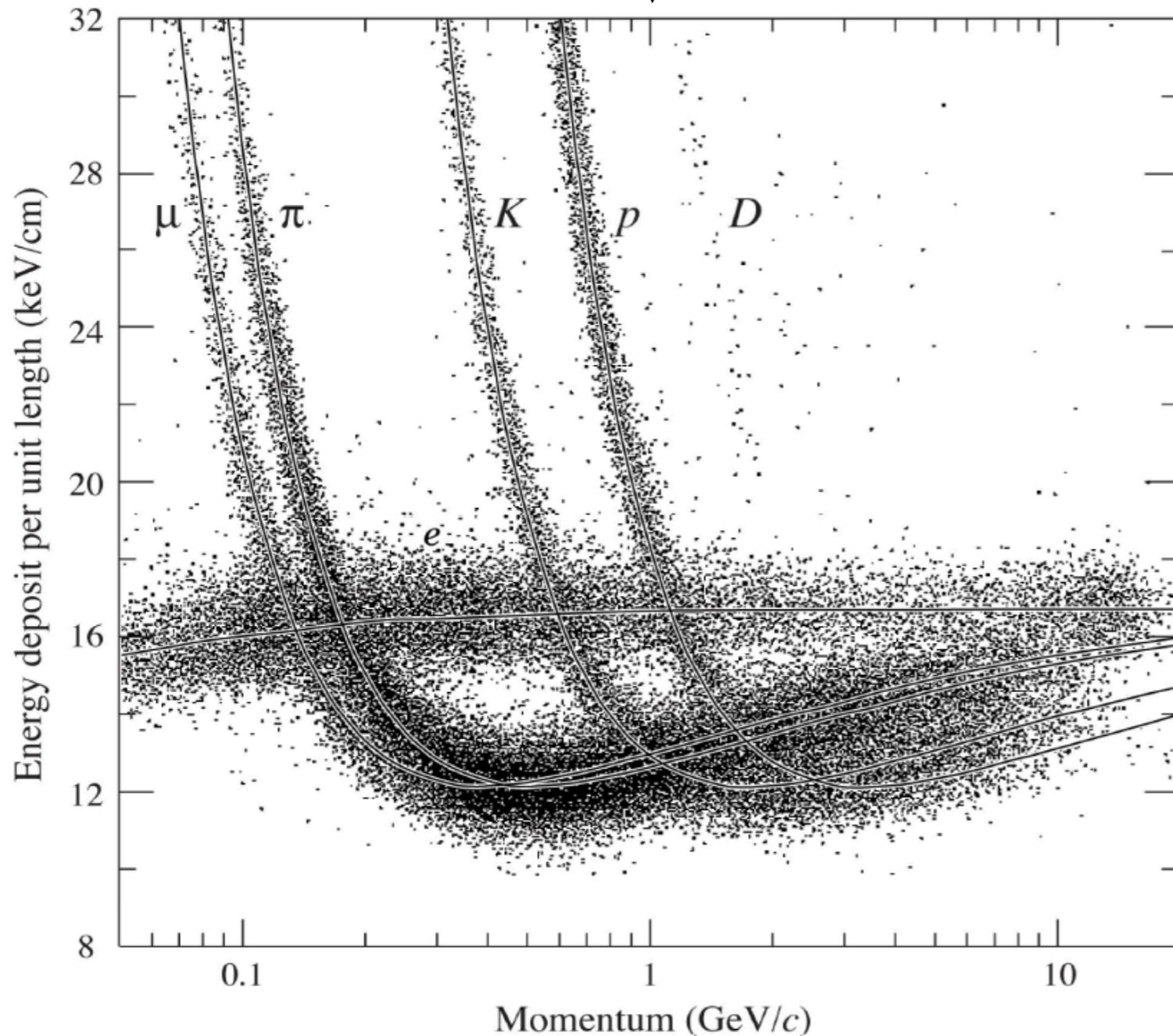


# 粒子識別 PID

$\beta\gamma = p/M$ の関数でプロット：粒子の種類に関係なく同じ形



$p = M\beta\gamma$  でプロット



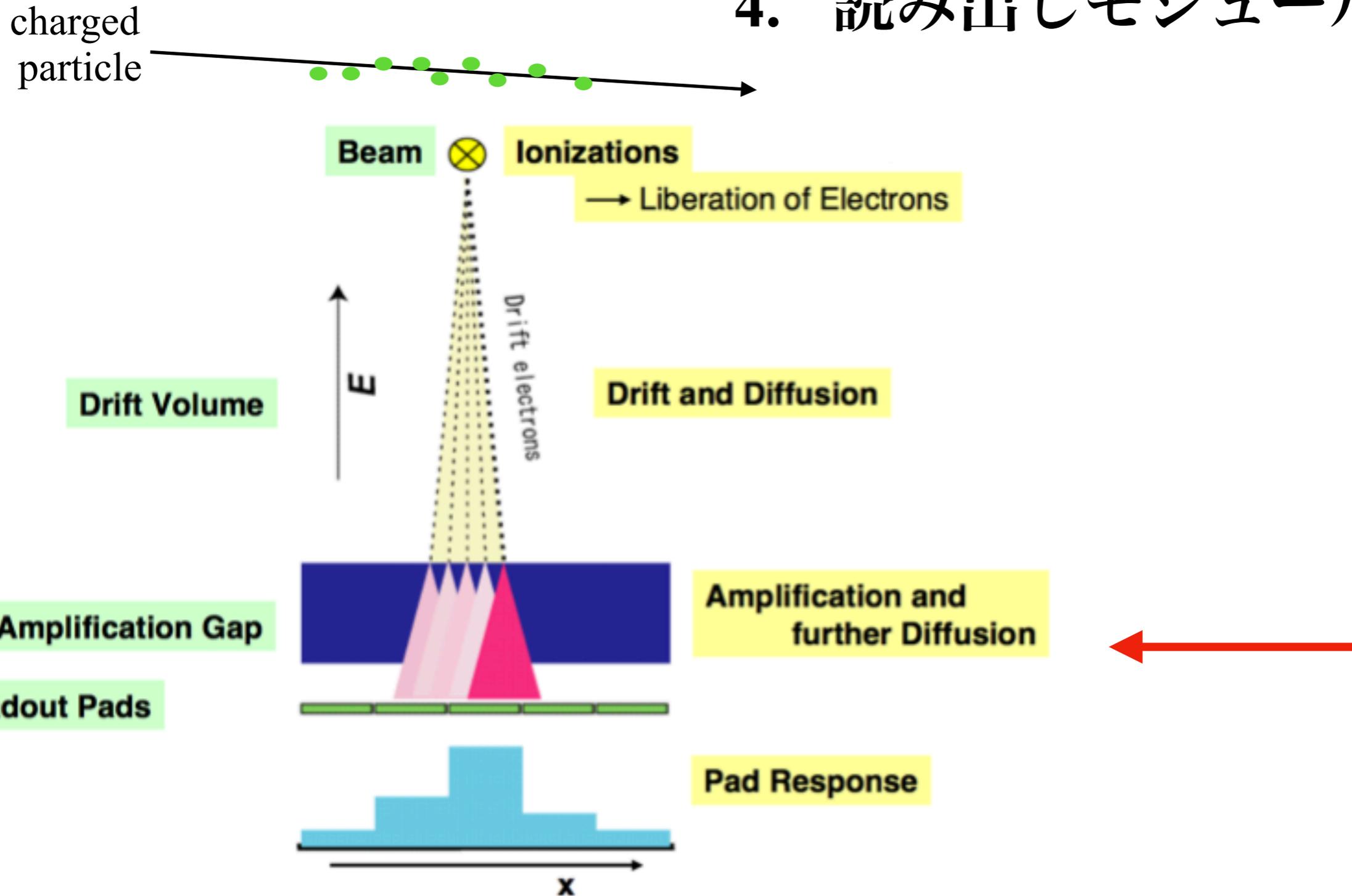
粒子の種類に対応してシフト  
形は変わらない

**粒子識別**

低い運動量領域において  
エネルギー損失を用いることによって識別可能

(PEP4/9-TPC energy deposit measurement)  
Physics Letters B667 (2008) 1  
available on the PDG WWW page

1. 運動量測定
2. ガス組成
3. 粒子識別とエネルギー損失
4. 読み出しモジュール



# 読み出しモジュール

MWPC (多線式比例係数管)はこれまで多くの実験で用いられてきた

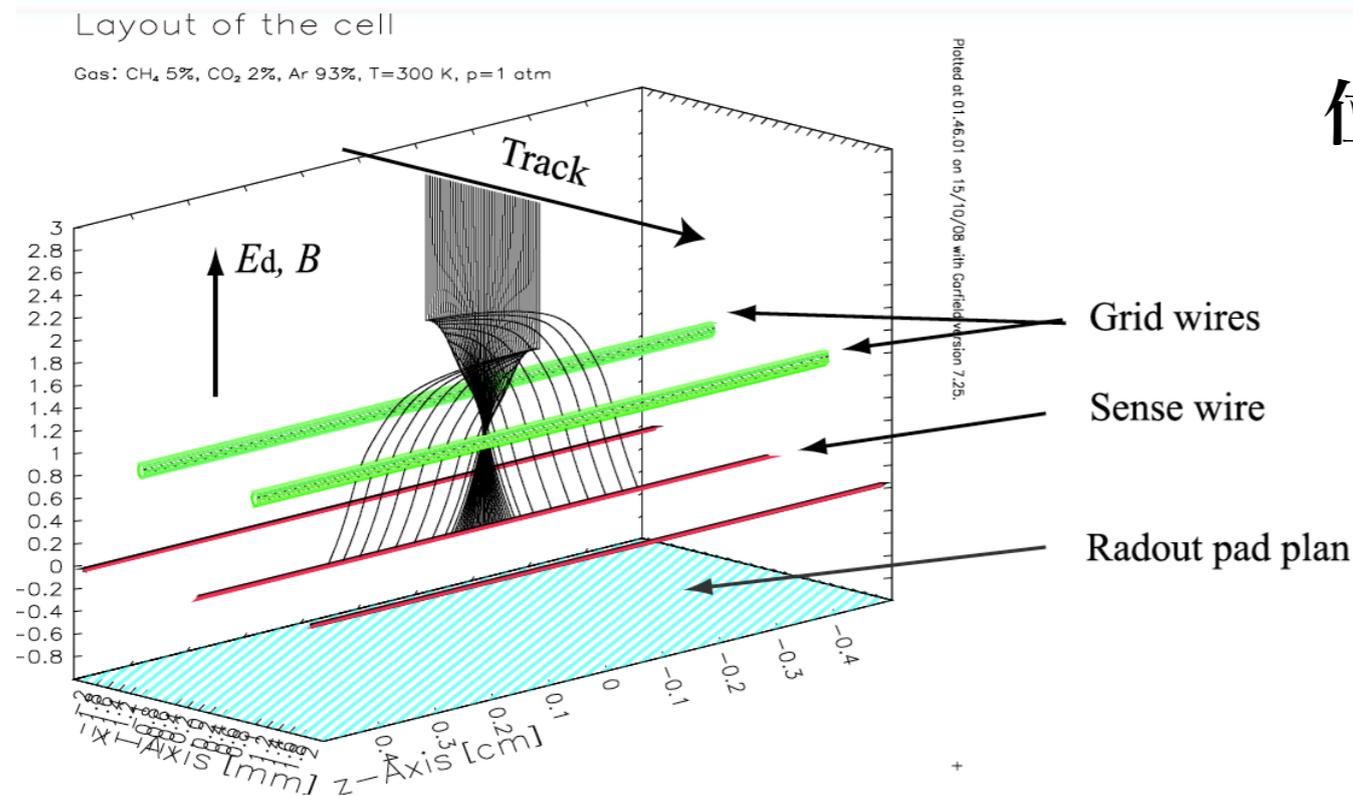
ILD: 磁場 3.5T

→ $E \times B$  効果:ワイヤー近傍において電子のドリフト軌道が曲げられてしまい

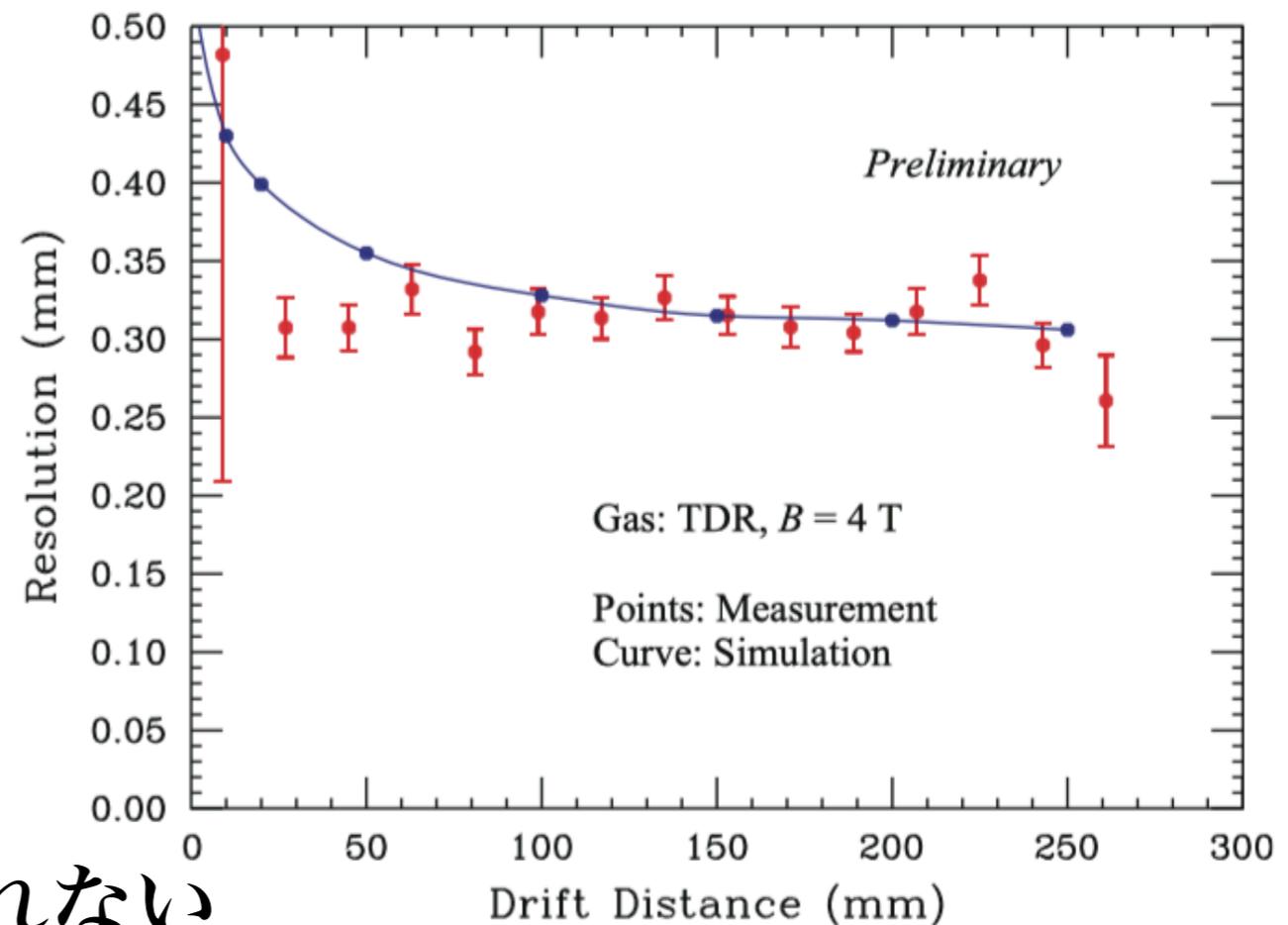
電子の横への拡がりが大きくなってしまふ

→ p.48

TPC using MWPC



位置分解能  $300 \mu\text{m}$  でフラット



強磁場下でMWPCは

ILDの要求 $\sigma_x \approx 100 \mu\text{m}$ に応えられない

## 読み出しモジュール

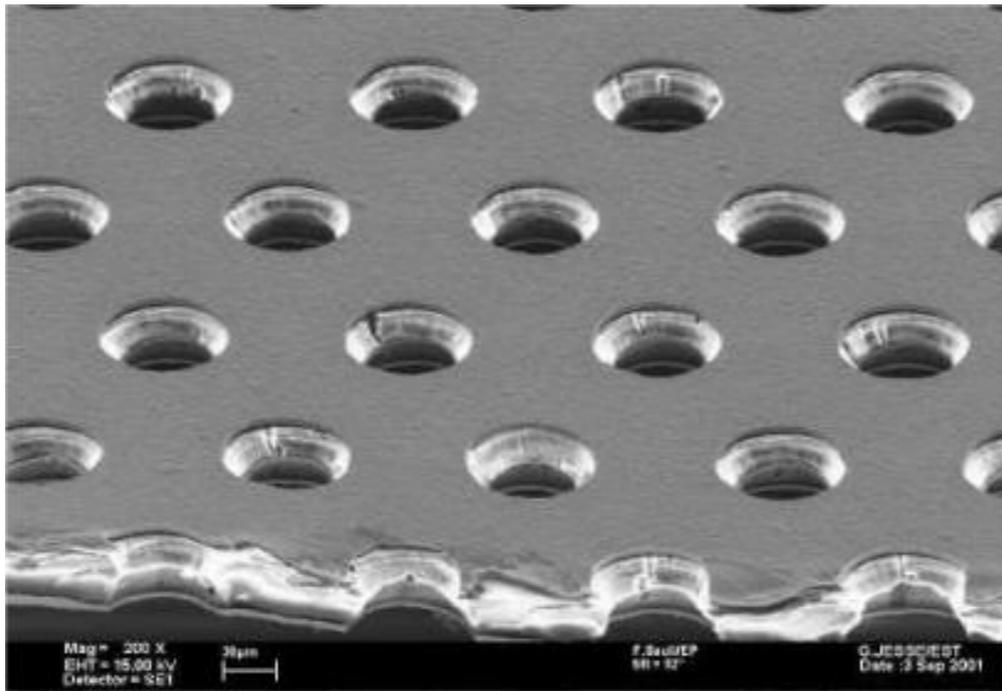
MPGD (マイクロパターンガス検出器)

プリント基板(PCB)エッチング技術を用いたガス検出器

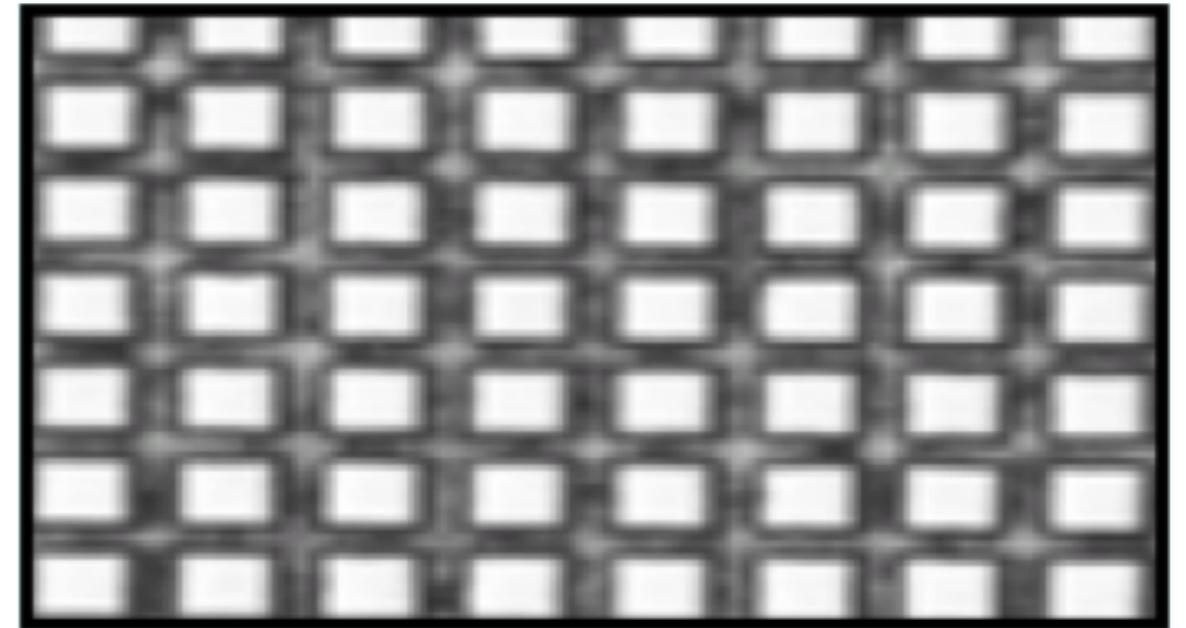
MPGDの例

GEM

MICROME GAS



F.Sauli, NIM A 386(1997)531



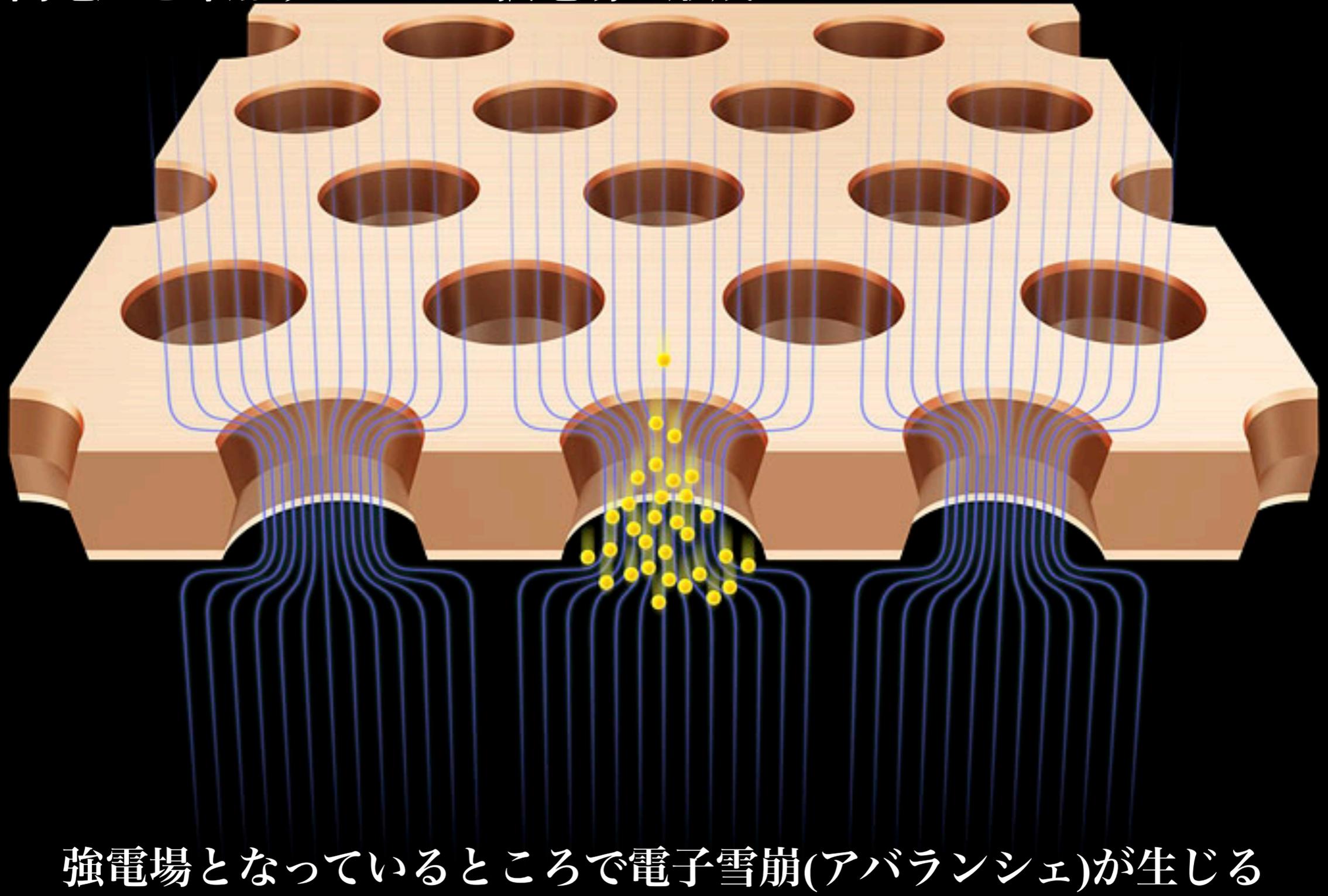
強磁場中においても  $E \times B$  effect が抑制される

位置分解能も良い

# ガス増幅

高電圧を印加することで強電場が形成

© Rey.Hori/KEK



強電場となっているところで電子雪崩(アバランシェ)が生じる

陽イオンも同時に生成される

# ガス利得(ゲイン)

電場中におけるガスゲイン $M$ の電場依存性は

$$\log M = \int \alpha(E(s)) ds \quad \text{or} \quad M = e^{\int \alpha(E(s)) ds}$$

$s$ :電気力線に沿った経路

$\alpha(s)$  は第1タウンゼント係数

イオン化衝突間の電子の平均自由行程

ペニングガス(ペニング効果の起こるガス)では  
第1タウンゼント係数は

$$\alpha(s) \rightarrow (1 + r) \alpha(s)$$

$r$  はペニング輸送効率

ガス固有の値

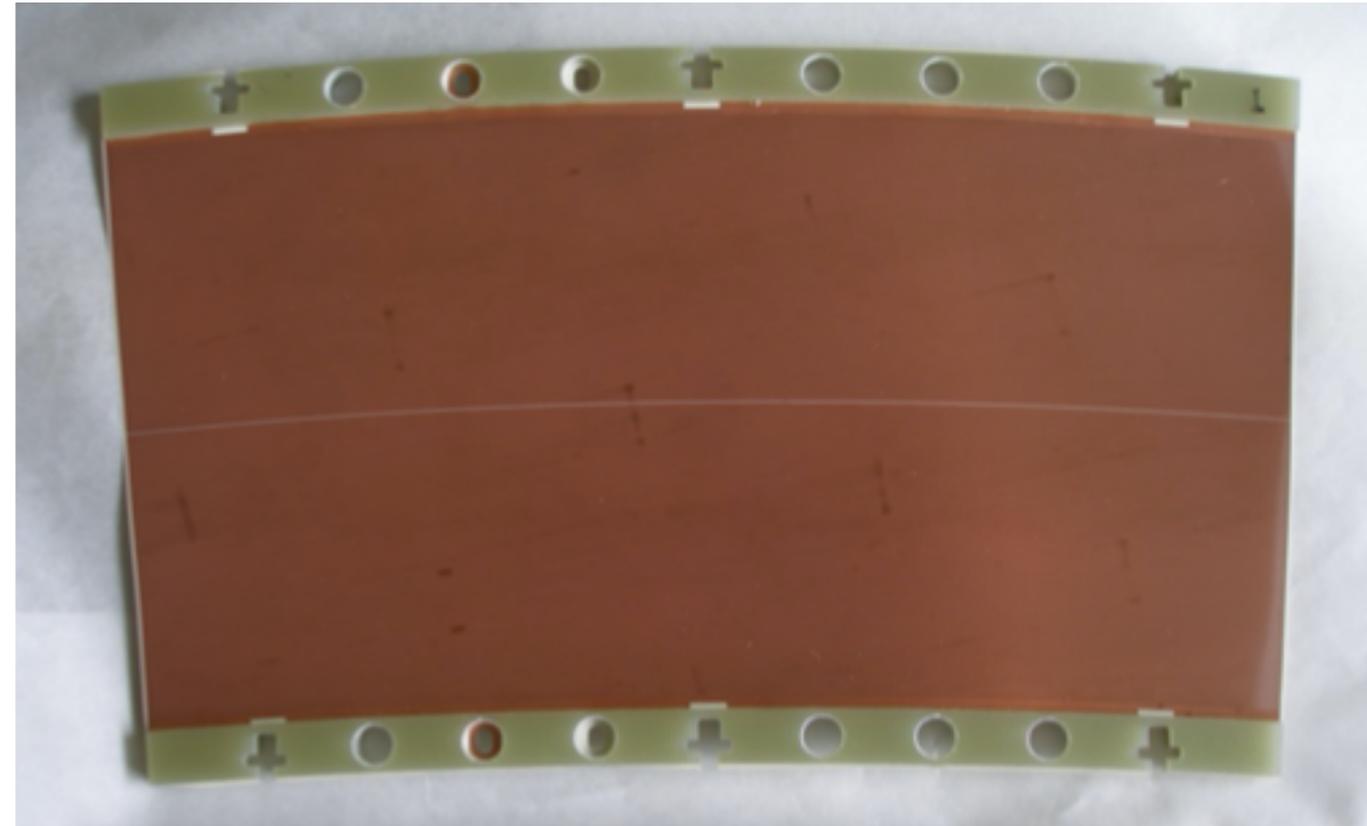
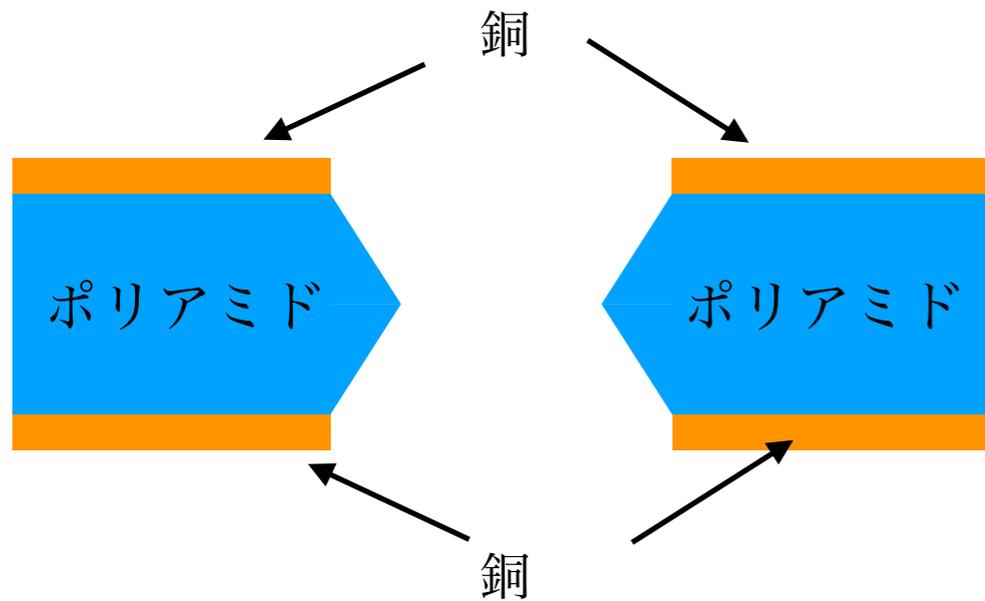
ペニングガスにおけるゲイン $M$

$$M = e^{\int (1+r) \alpha(E(s)) ds}$$

# ILC-TPC R&D

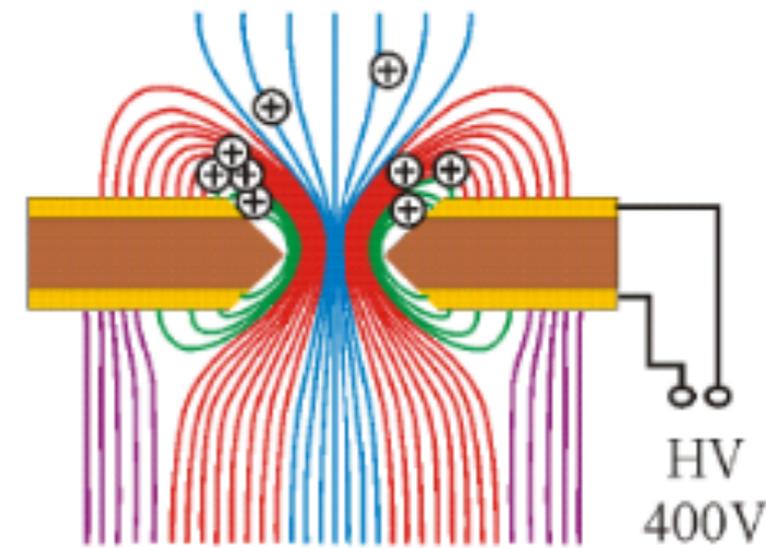
LCTPCのための検出器として高いパフォーマンスのGEMを開発したい

## Asian-GEM



- 速い応答  $\sim \mathcal{O}(10 \text{ ns}) \rightarrow$ 
  - 時間分解能
  - 2つ飛跡の分離
- 小さいガス増幅領域  $\rightarrow$  位置分解能が良い
- 増幅過程で生じた陽イオンの逆流を防ぐ

good!



LCTPCのための検出器として高いパフォーマンスのGEMを開発したい

我々のアジアンGEMの抱える問題...

- 放電
- 支持構造の必要性
- GEMのたわみによるガスゲインのふらつき

これらの問題を解決する一つの解

硬い絶縁素材を使ったGEMの開発

## GEMの絶縁素材

GEMは放電に弱い:ポリマー層が炭化してしまうことにより短絡してしまう

一度の放電すらも命取りとなるかもしれない

=> 新しい絶縁素材を探す

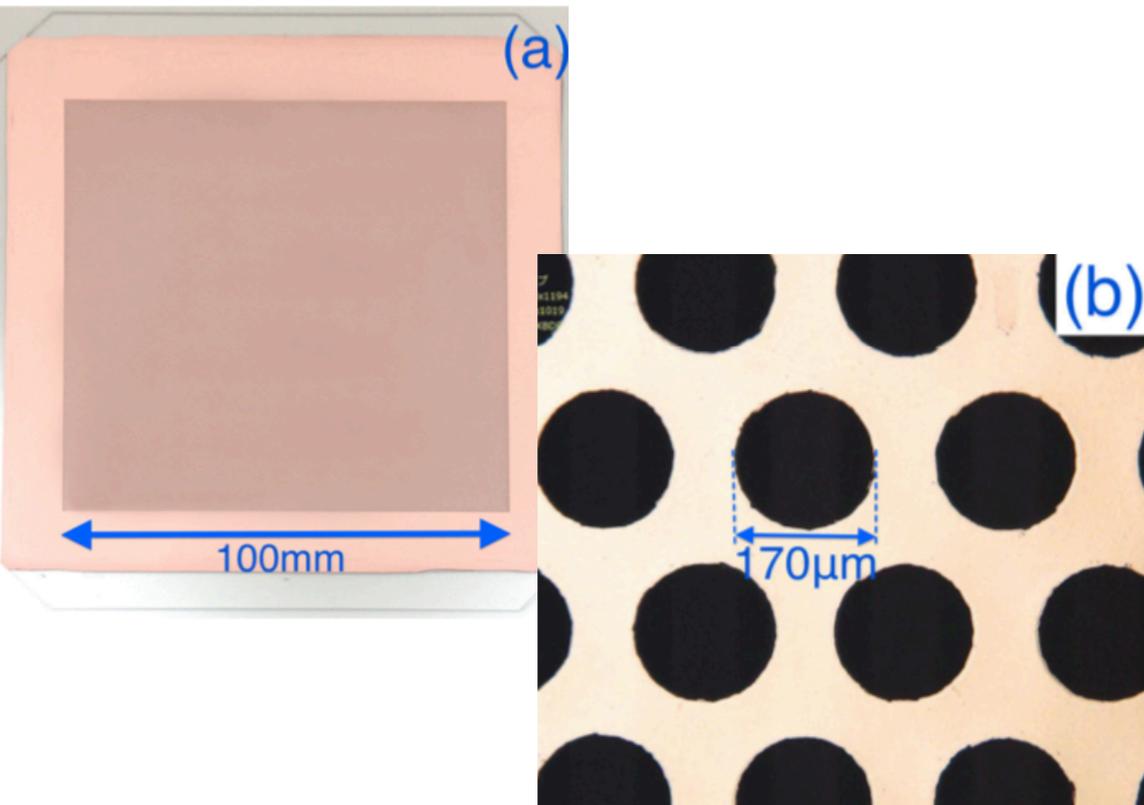
**LTCC**

**低温同時焼成セラミックス**

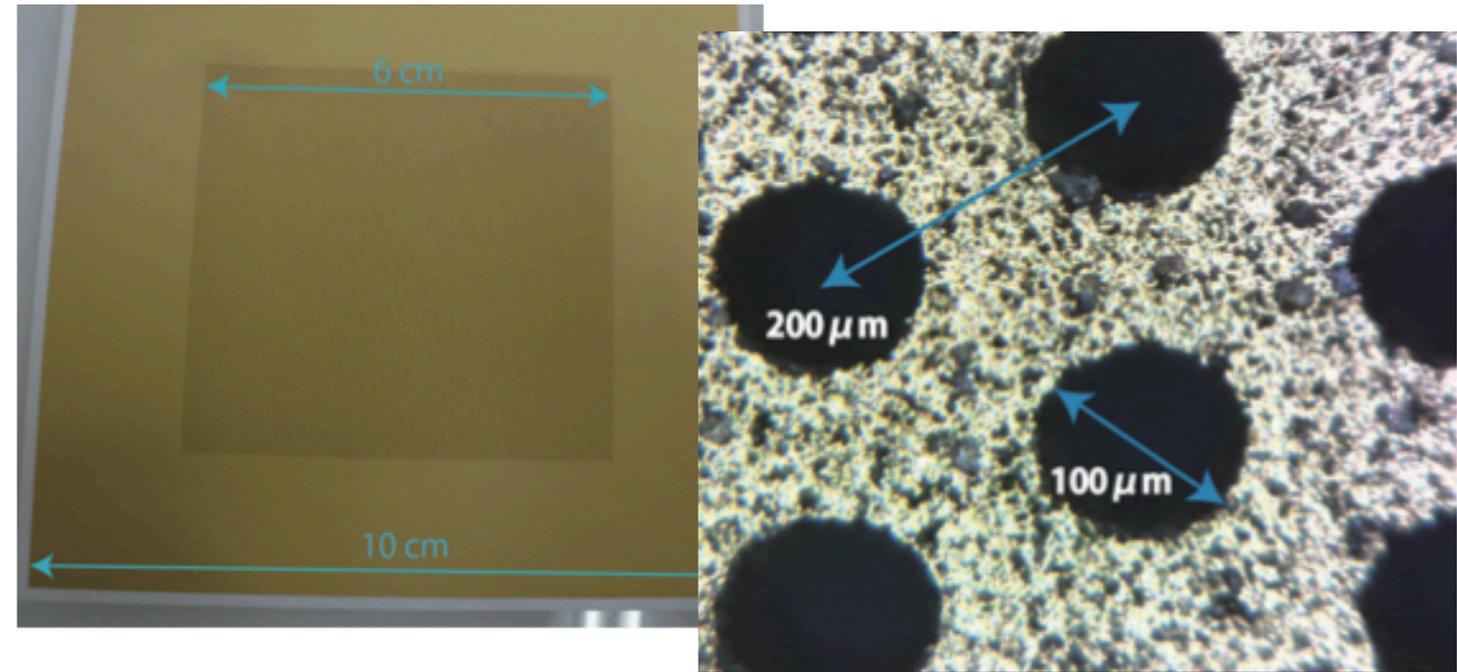
**ガラスGEM**

ポリアミドの代わりにガラス

誘電材料を1000°C以下の窯で同時に焼結する



T. Fujiwara et al 2014 JINST 9 P11007



Yukihiro Kato 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1498 012010

- 均一性が高い
- 一枚でも高いゲイン
- 放電ダメージに強い

ガス漏れがない

LTCC or G-GEM は固くて厚い”プレート”状  
支持構造が必要ない

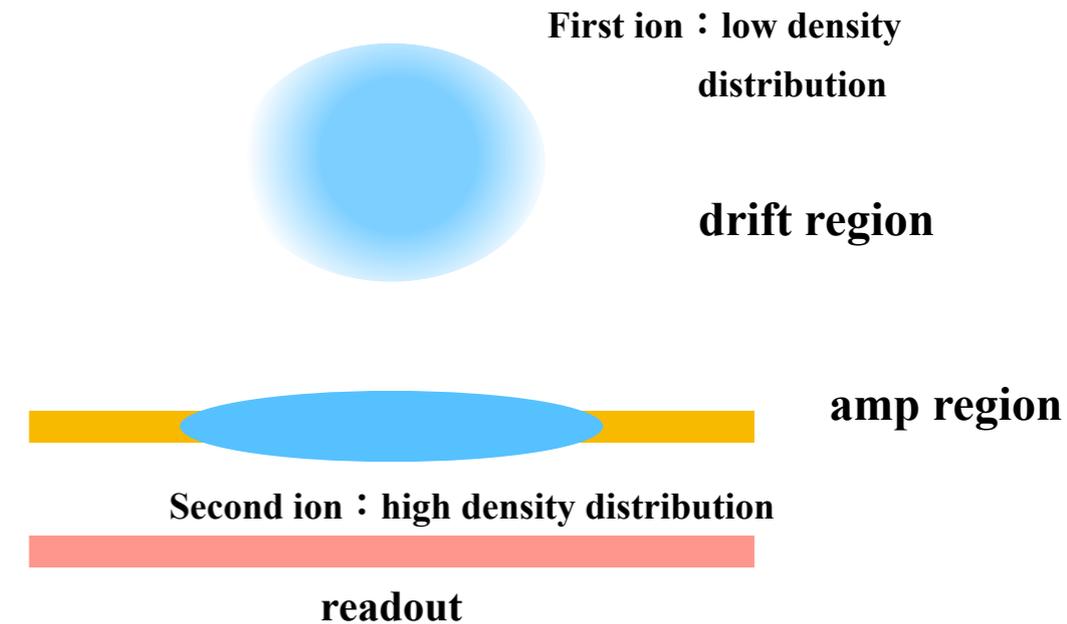
# イオンバックフロー

初期陽イオン : 荷電粒子の飛跡に沿って生成  
 TPC内部に一様に分布

二次陽イオン : ガス増幅過程において生成

高密度で薄い2, 3枚の”ディスク”を形成

陽イオンはカソードに向かって逆流



電子に比べて非常に重いのでドリフト速度も遅い 電子の約 $\mathcal{O}(10^{-4})$ 倍

陽イオンディスクは電場の動径方向成分を持つため

ドリフト電子は $E \times B$  効果によって方位角方向に偏向されてしまう

## 位置分解能への影響

初期陽イオンの効果は無視できる程度

2次陽イオンは  $60 \mu\text{m}$  と大きいので無視できない

陽イオンバックフローを我々はゲート機構を用いることで防ぐ

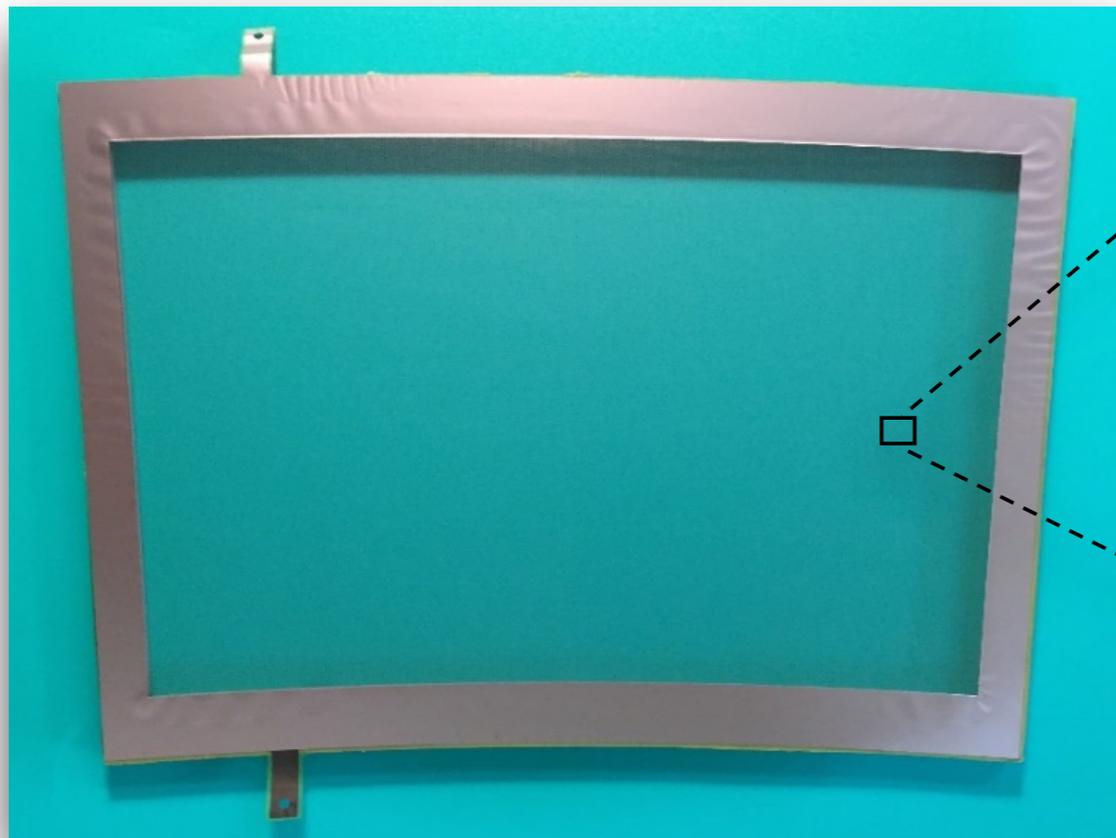
# ゲート機構

## 陽イオン

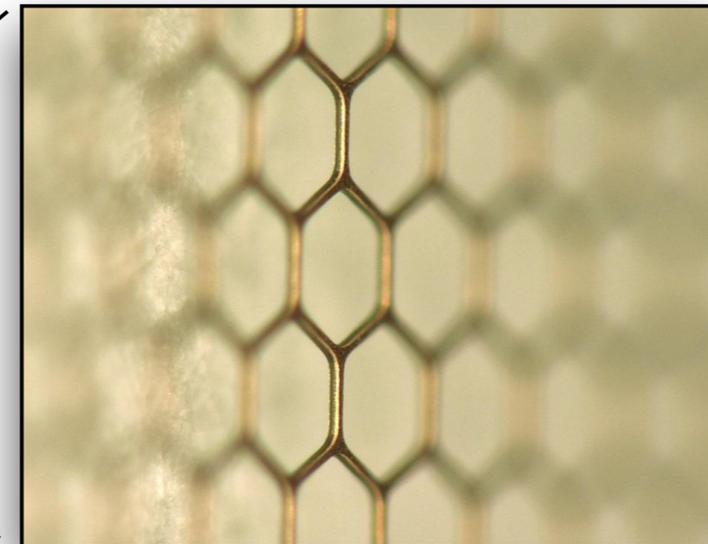
- 電子に比べて非常に重い, ので
- 電気力線に沿ってドリフトする

拡散が小さい

GEMを低い電圧で用いることで陽イオン阻止膜として機能



co-developed with Fujikura Co., Ltd.



ゲートフォイル・・・高い電子透過率かつ

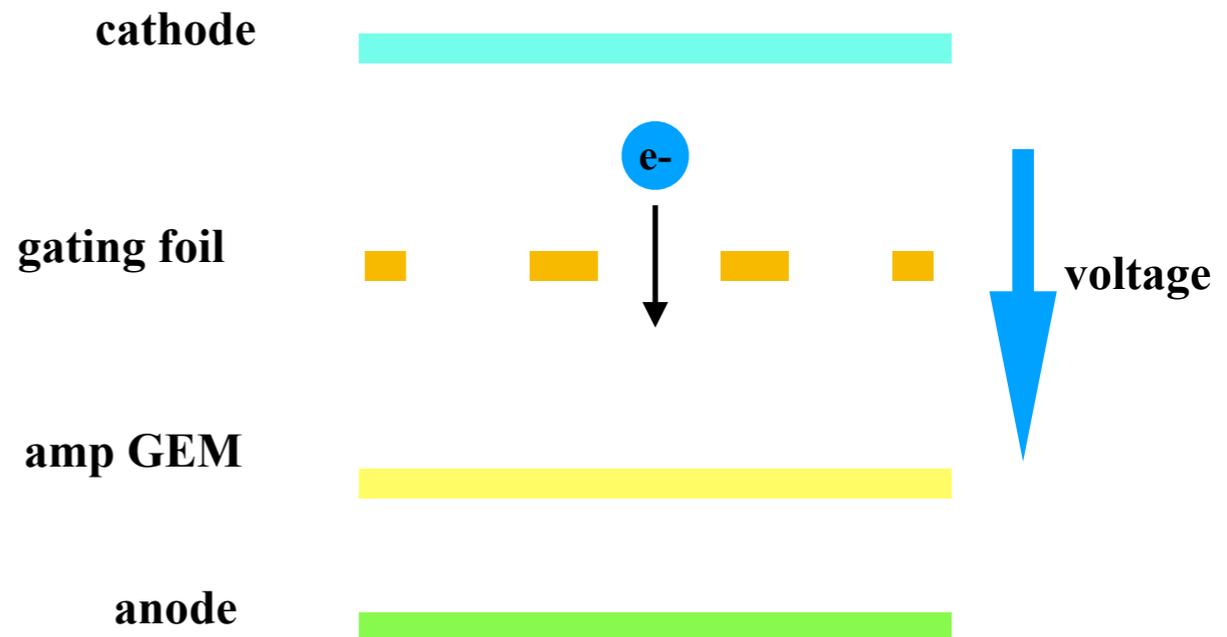
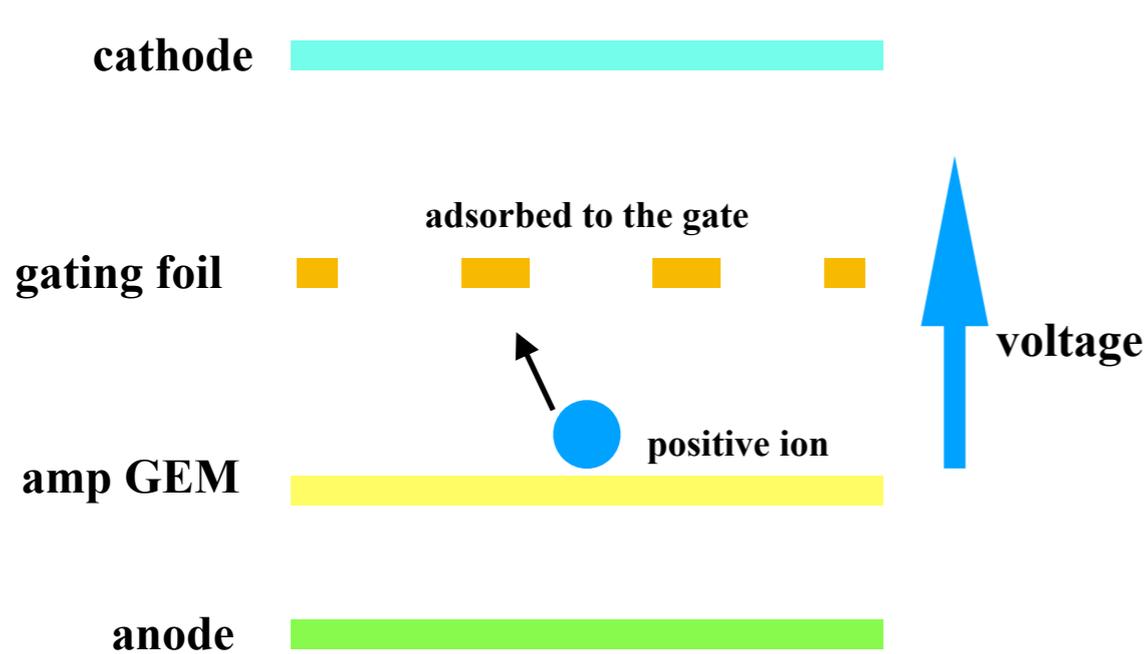
陽イオンをブロックするデバイス

磁場中においては磁場に巻きつくようにドリフトするため

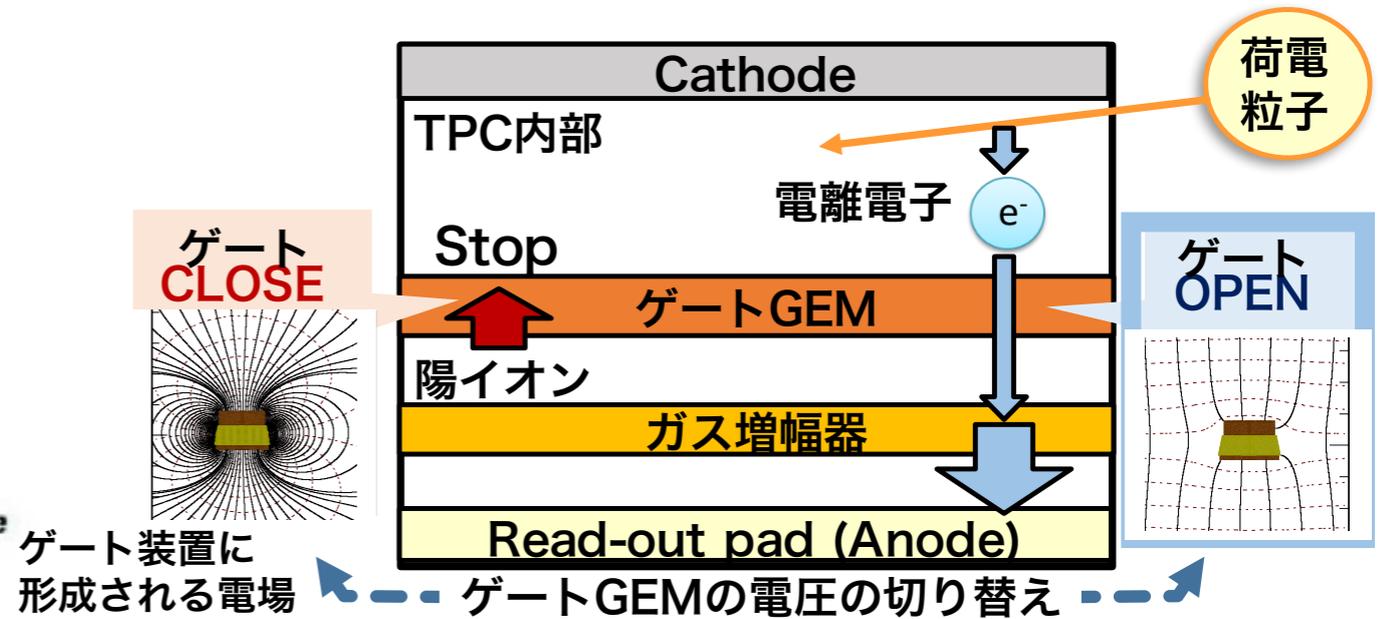
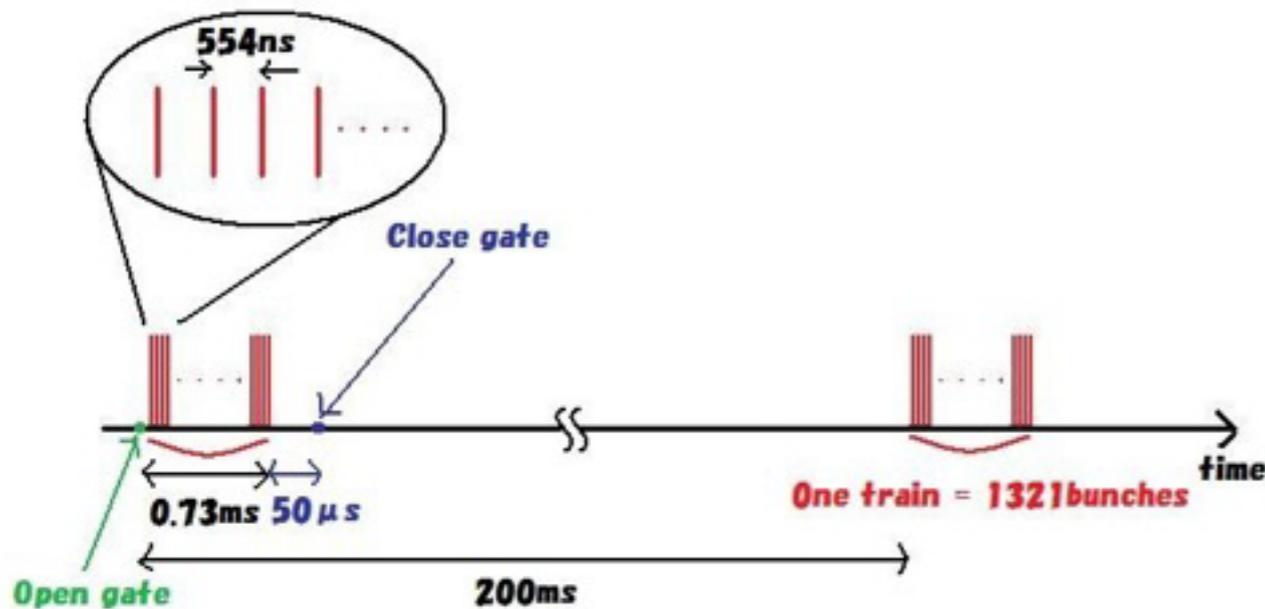
どれだけ穴があいているか

電子透過率 $\equiv$ 光学的開口度

# ゲート機構



## ▼ beam structure of ILC



バンチトレイン間でゲートを閉じて  
陽イオンバックフローを阻止

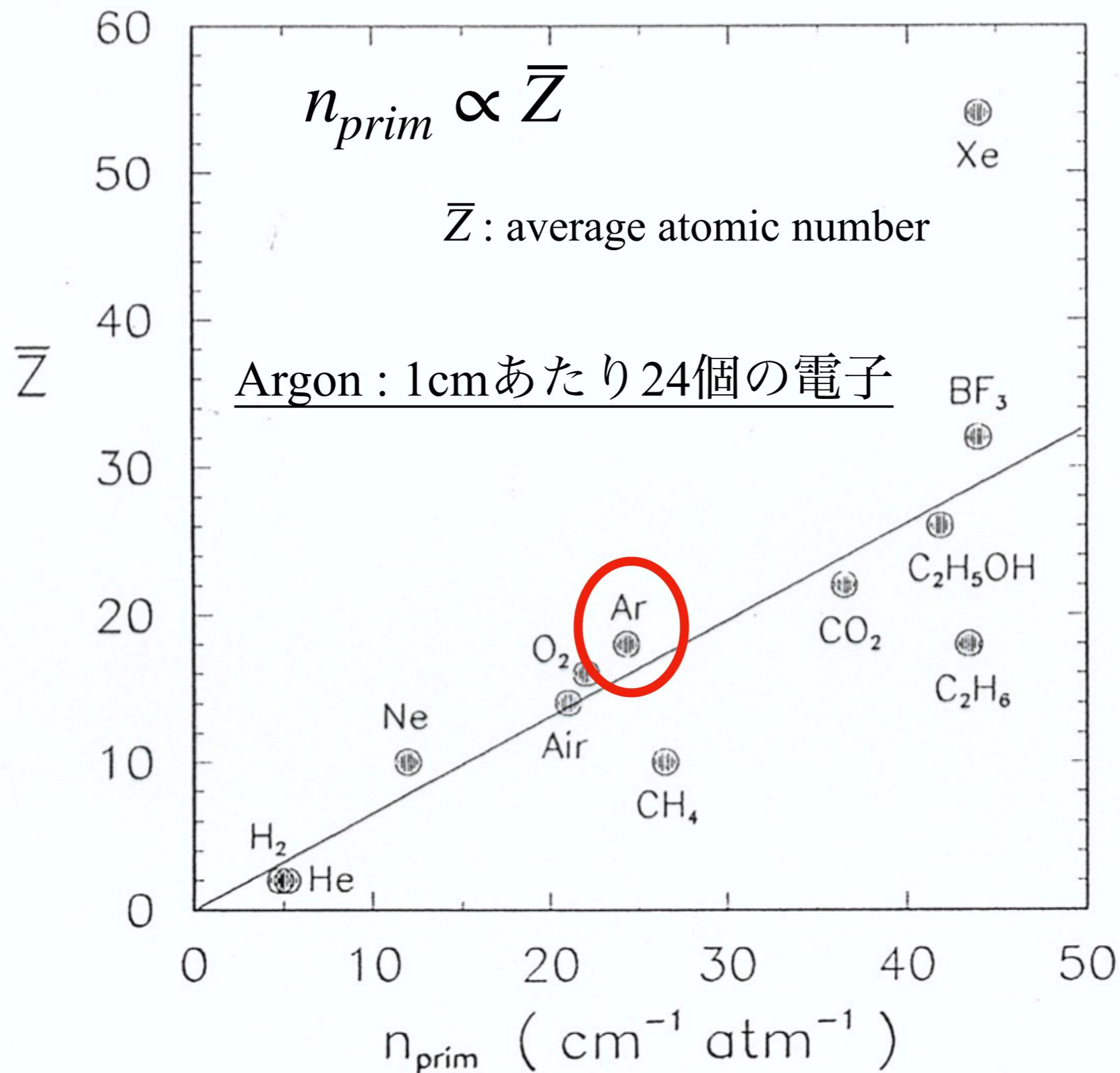
# Summary

The ILD-TPC is a high-performance central tracker operated in a strong B-field, featuring MPGD readout modules.

The TPC provides excellent track pattern recognition capability with small 3-D voxels, along with good position, momentum, and  $dE/dx$  information of each track in jets, which are indispensable for the Particle Flow Analysis.

We have successfully developed a gating foil that meets the requirements, and are now working on the R&D of new GEM foils (plates) with new insulator materials in order to make the gas-amplification device simple and "die-hard".

# Backup



Number of primary electrons versus the average atomic number of popular chamber gases

Total number of ionisation electrons  $n_{tot}$

$$n_{tot} = \frac{\Delta E}{W_I}$$

$\Delta E$  total energy loss in the gas volume

$W_I$  effective energy loss for the production of one ionisation

Gas	Z	A	$\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	$E_{ex}$	$E_i$	$I_0$	$W_i$	dE/dx		$n_p$ (i.p./cm) <sup>a)</sup>	$n_T$ (i.p./cm) <sup>a)</sup>
								(MeV/g cm <sup>-2</sup> )	(keV/cm)		
H <sub>2</sub>	2	2	$8.38 \times 10^{-5}$	10.8	15.9	15.4	37	4.03	0.34	5.2	9.2
He	2	4	$1.66 \times 10^{-4}$	19.8	24.5	24.6	41	1.94	0.32	5.9	7.8
N <sub>2</sub>	14	28	$1.17 \times 10^{-3}$	8.1	16.7	15.5	35	1.68	1.96	(10)	56
O <sub>2</sub>	16	32	$1.33 \times 10^{-3}$	7.9	12.8	12.2	31	1.69	2.26	22	73
Ne	10	20.2	$8.39 \times 10^{-4}$	16.6	21.5	21.6	36	1.68	1.41	12	39
Ar	18	39.9	$1.66 \times 10^{-3}$	11.6	15.7	15.8	26	1.47	2.44	29.4	94
Kr	36	83.8	$3.49 \times 10^{-3}$	10.0	13.9	14.0	24	1.32	4.60	(22)	192
Xe	54	131.3	$5.49 \times 10^{-3}$	8.4	12.1	12.1	22	1.23	6.76	44	307
CO <sub>2</sub>	22	44	$1.86 \times 10^{-3}$	5.2	13.7	13.7	33	1.62	3.01	(34)	91
CH <sub>4</sub>	10	16	$6.70 \times 10^{-4}$		15.2	13.1	28	2.21	1.48	16	53
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	34	58	$2.42 \times 10^{-3}$		10.6	10.8	23	1.86	4.50	(46)	195

a) i.p. = ion pairs

Important parameters for frequently used chamber gases.

## Argon

Gas	Z	A	$\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	$E_{ex}$	$E_i$ (eV)		$W_i$	$dE/dx$		$n_p$ (i.p./cm) <sup>a)</sup>	$n_T$ (i.p./cm) <sup>a)</sup>
								(MeV/g cm <sup>-2</sup> )	(keV/cm)		
H <sub>2</sub>	2	2	$8.38 \times 10^{-5}$	10.8	15.9	15.4	37	4.03	0.34	5.2	9.2
He	2	4	$1.66 \times 10^{-4}$	19.8	24.5	24.6	41	1.94	0.32	5.9	7.8
N <sub>2</sub>	14	28	$1.17 \times 10^{-3}$	8.1	16.7	15.5	35	1.68	1.96	(10)	56
O <sub>2</sub>	16	32	$1.33 \times 10^{-3}$	7.9	12.8	12.2	31	1.69	2.26	22	73
Ne	10	20.2	$8.39 \times 10^{-4}$	16.6	21.5	21.6	36	1.68	1.41	12	59
Ar	18	39.9	$1.66 \times 10^{-3}$	11.6	15.7	15.8	26	1.47	2.44	29.4	94
Kr	36	83.8	$5.49 \times 10^{-3}$	10.0	13.9	14.0	24	1.32	4.60	(22)	192
Xe	54	131.3	$5.49 \times 10^{-3}$	8.4	12.1	12.1	22	1.23	6.76	44	307
CO <sub>2</sub>	22	44	$1.86 \times 10^{-3}$	5.2	13.7	13.7	33	1.62	3.01	(34)	91
CH <sub>4</sub>	10	16	$6.70 \times 10^{-4}$		15.2	13.1	28	2.21	1.48	16	53
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	34	58	$2.42 \times 10^{-3}$		10.6	10.8	23	1.86	4.50	(46)	195

a) i.p. = ion pairs

**Argon: total number of ionisation electrons is 94 /cm**

**24 primary electrons produce about 2, 3 secondary electrons**

# Characteristic of electron transmission

## aim of ILD-TPC

momentum resolution:

$$\frac{\sigma_{p_{\perp}}}{p_{\perp}} \approx 1 \times 10^{-4} p_{\perp} \text{ GeV}/c$$

-> position resolution:

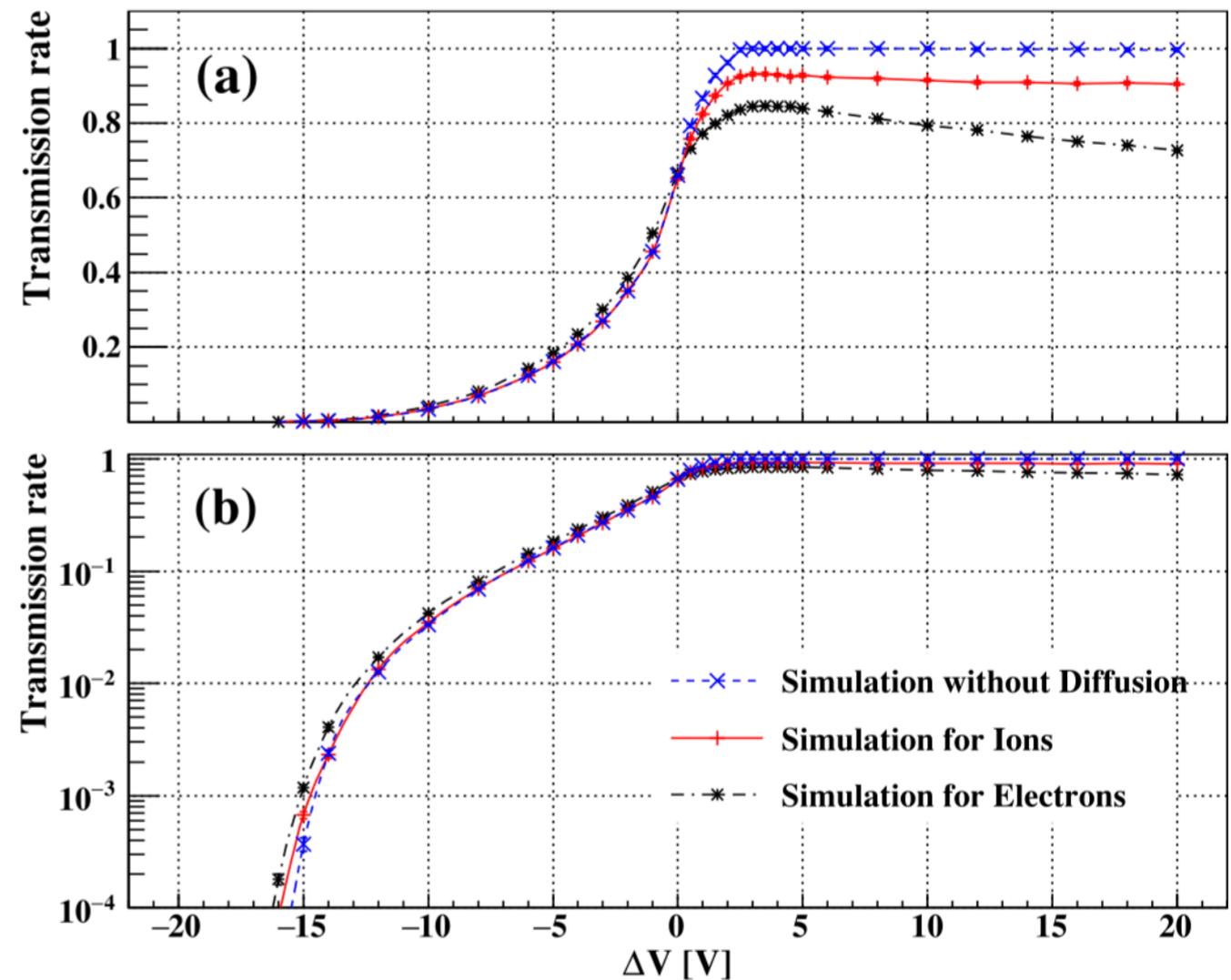
$$\sigma_x \approx 100 \mu m$$

## aim of gate device

electron transmission rate > 80 %

ion blocking rate ~

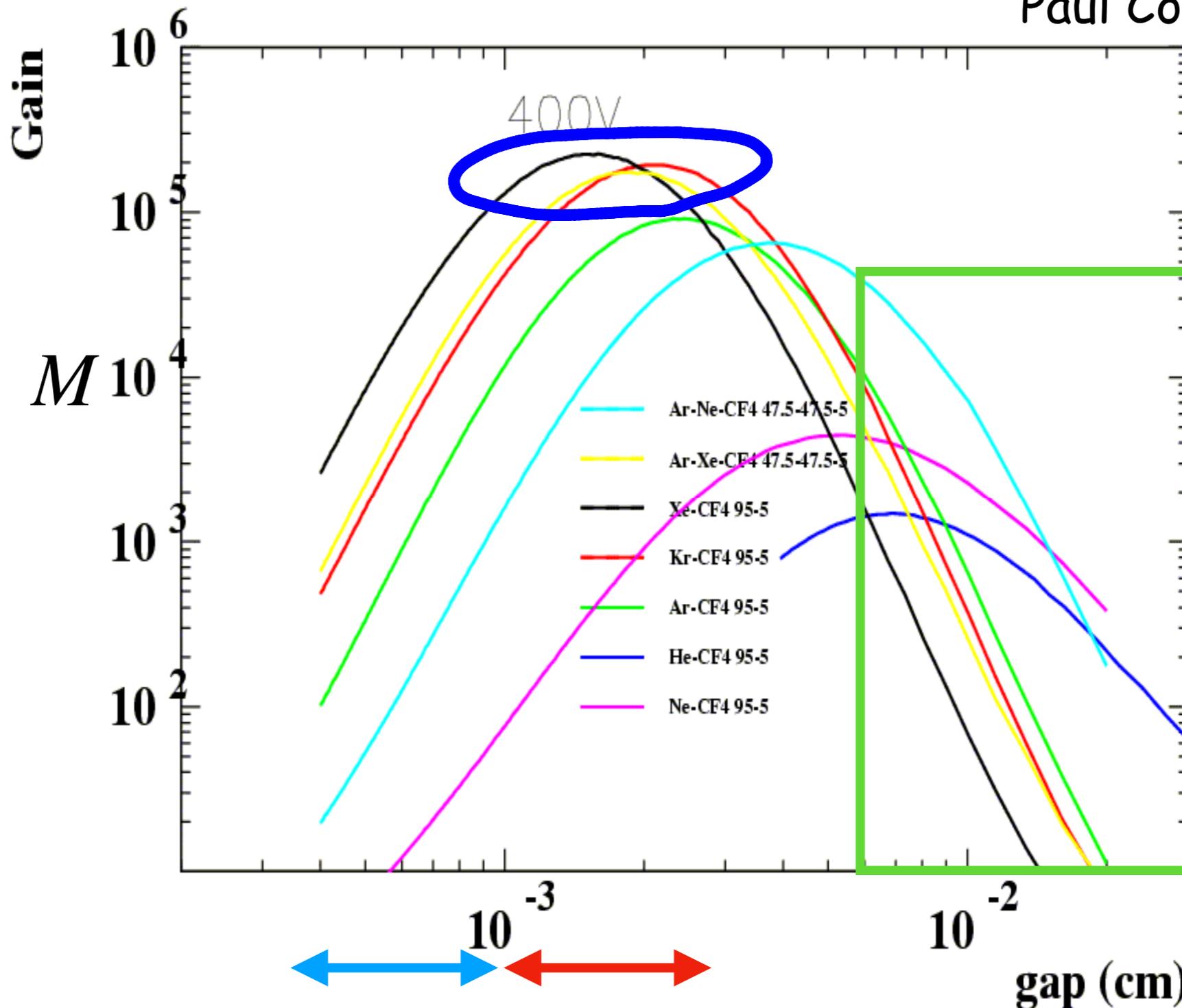
$$\mathcal{O}(10^{-4})$$



in the case of a MicroMEGAS, there is a “plateau” in a gap dependence of gas gain

Paul Colas

$$M = e^{\alpha d}$$



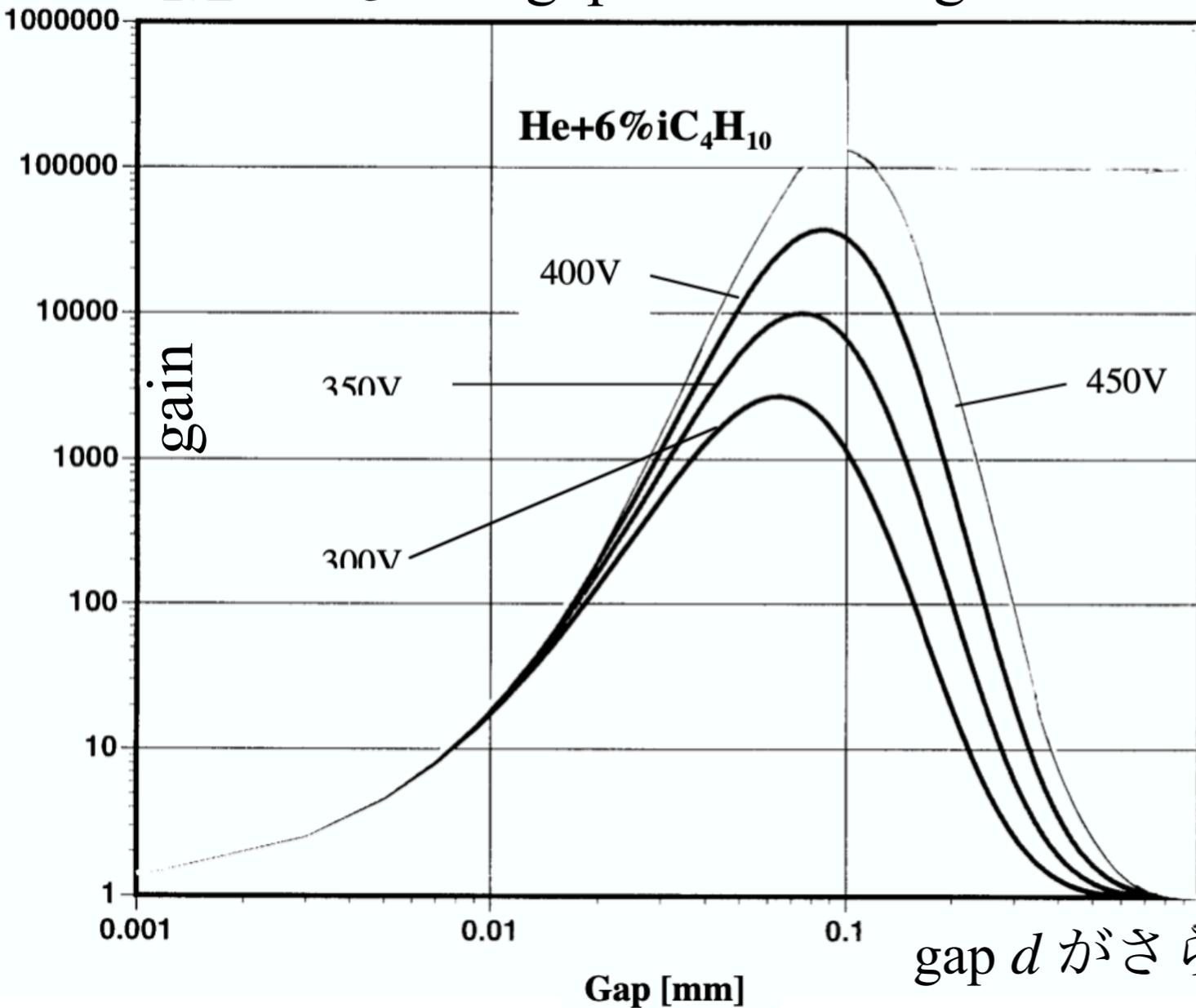
“plateau”

gap  $d$  :  $\uparrow\uparrow$   
 EField:  $\downarrow$   
 $\alpha$  :  $\downarrow$  (depends on Efield)

gap  $d$  :  $\uparrow$   
 EField:  $\downarrow\downarrow$   
 $\alpha$  :  $\downarrow\downarrow$  (depends on Efield)

# MICROME GAS

$M = e^{\alpha d}$  gap  $d$  の関数 gas: He + iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 94:6



$d$  が増加するにつれて,  $M$  も増加  
最大値をとる

$M$  は gap  $d$  が 30-100  $\mu\text{m}$  の領域で最大

この領域は MicorMEGAS で用いられている  
gap 領域に対応

gap  $d$  がさらに大きくなっていくと落ちていく

## MICROME GAS: results and prospects : I. Giomataris

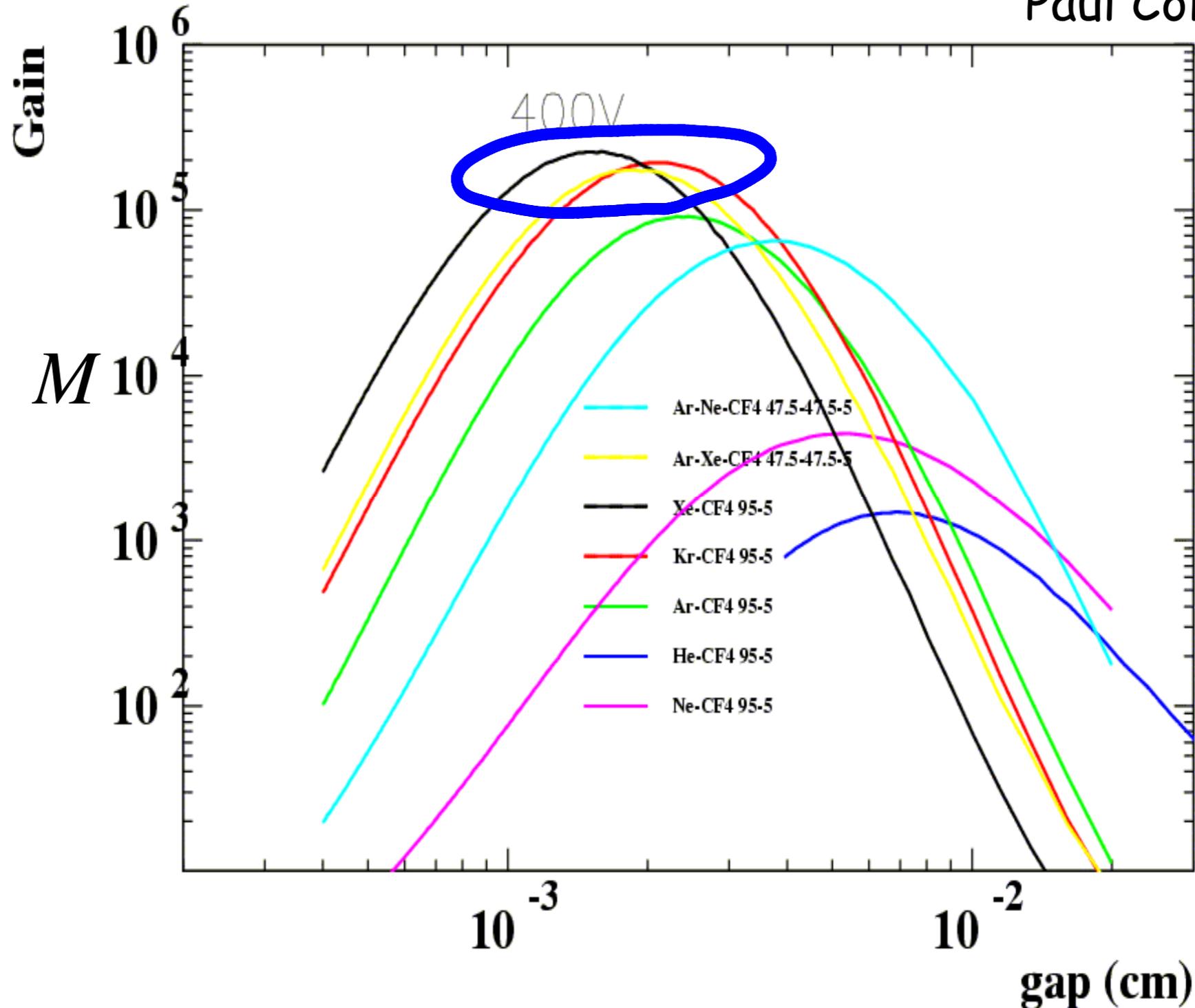
この plateau の領域において  $M$  は最大値をとり, そのふらつきもキャンセル  
されてなくなる

安定条件

MicroMEGASでガスゲインのgap依存性を見るとplateauが存在する

Paul Colas

$$M = e^{\alpha d}$$

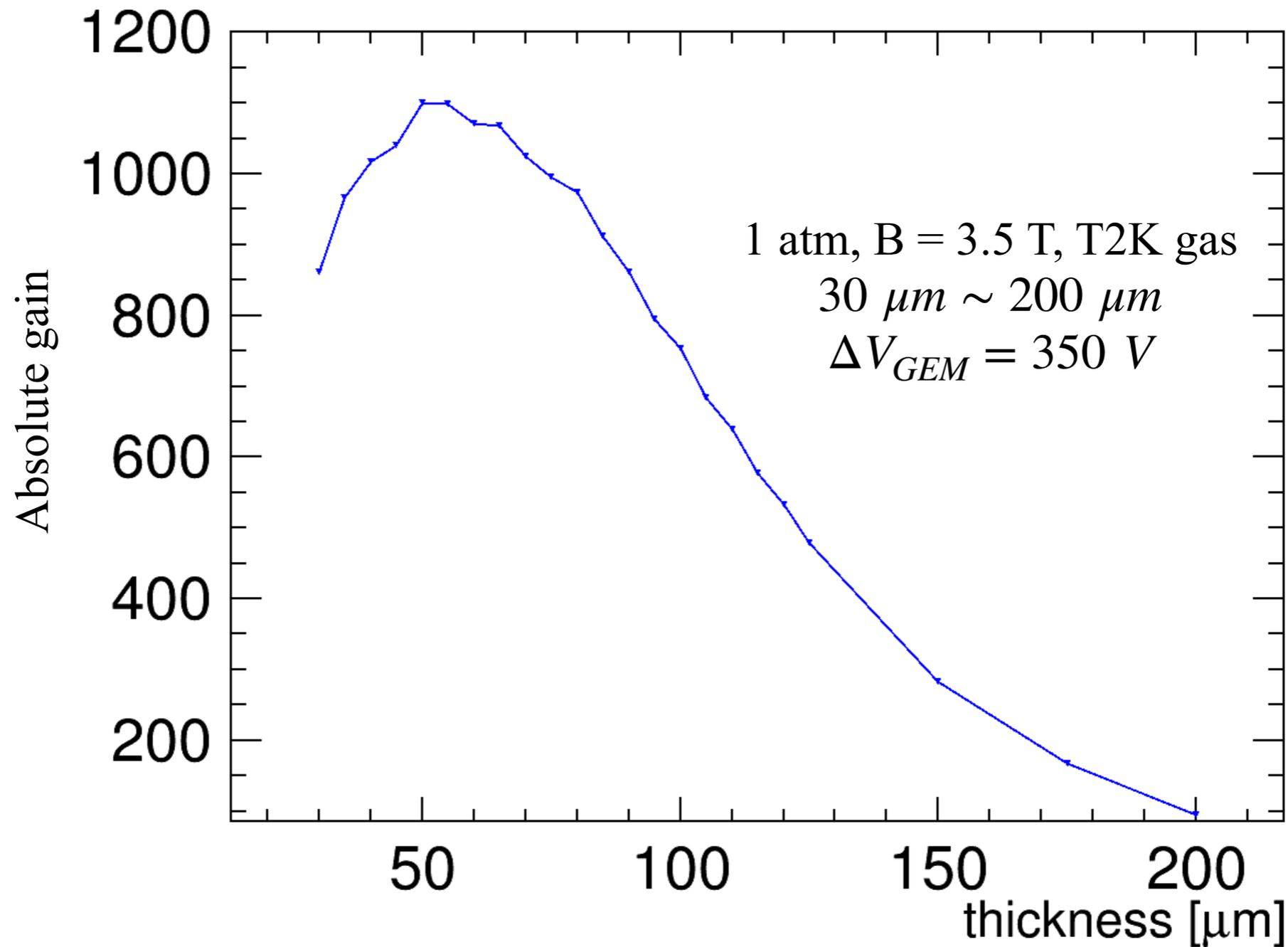


GEMにもこのようなplateauが存在するのかな？

理論的にこのガスゲインが安定となる条件を探して最適な設定を探す

I (KY) am working on this study **on going**

# Thickness dependence of gain: Asian GEM



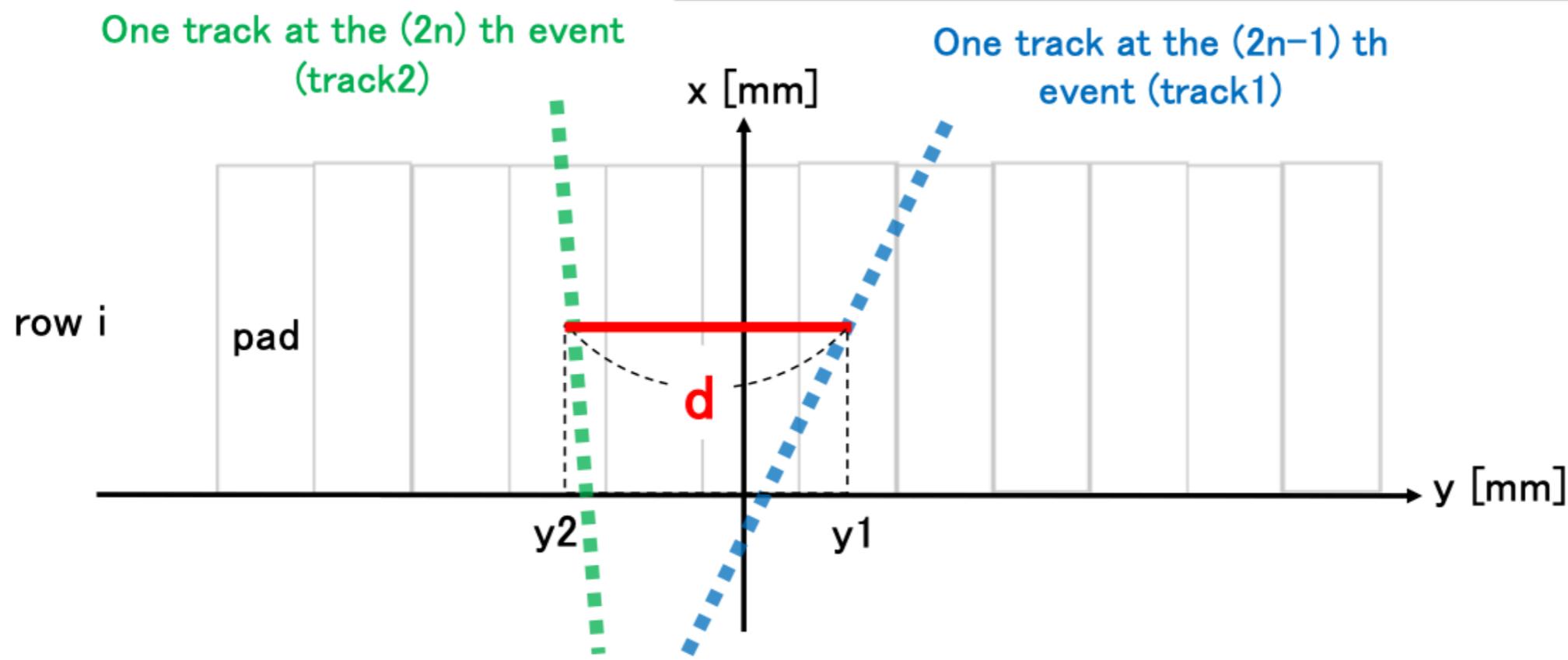
The plateau area was found in the range of 40  $\mu m$  ~ 80  $\mu m$

cf. CERN GEM: thickness 50  $\mu m$

If our theory is correct, the stability condition should be satisfied in the range of 40  $\mu m$  ~ 80  $\mu m$

- A MPGD-based TPC can provide clearly track separation thanks to its small ExB effect compared with MWPC.
- We're trying to investigate 2-track separation for a GEM-based TPC using electron beam.

$\sigma_{\text{point}}$ in $r\phi$	$\simeq 60 \mu\text{m}$ for zero drift, $< 100 \mu\text{m}$ overall
$\sigma_{\text{point}}$ in $rz$	$\simeq 0.4 - 1.4 \text{ mm}$ (for zero - full drift)
2-hit resolution in $r\phi$	$\simeq 2 \text{ mm}$
2-hit resolution in $rz$	$\simeq 6 \text{ mm}$
dE/dx resolution	$\simeq 5 \%$
Momentum resolution at B=3.5 T	$\delta(1/p_t) \simeq 10^{-4}/\text{GeV}/c$ (TPC only)

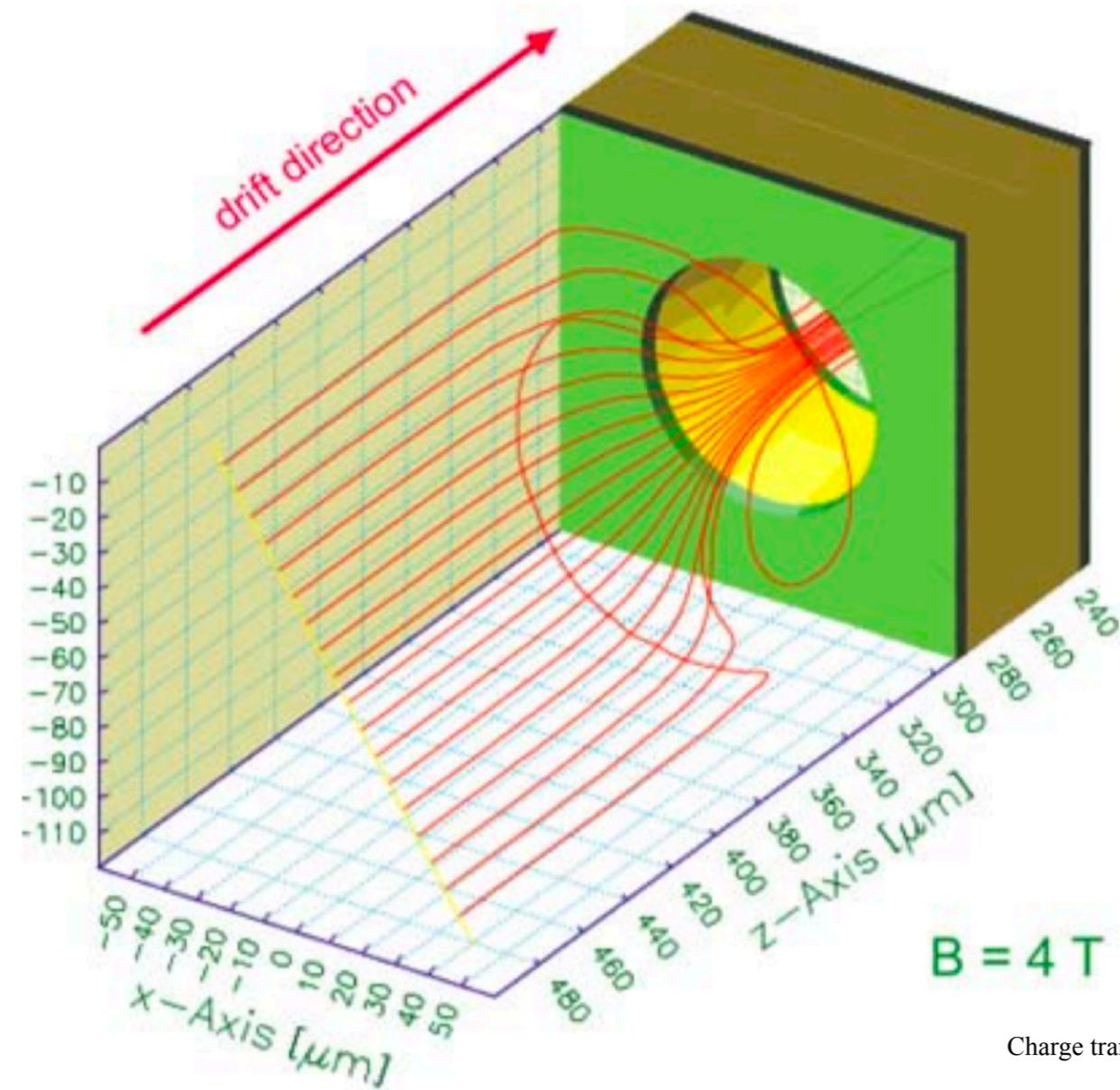


**on going**

**Aiko shoji is working on this study**

From Aiko Shoji (LCWS 2019) @ Sendai

# Backup



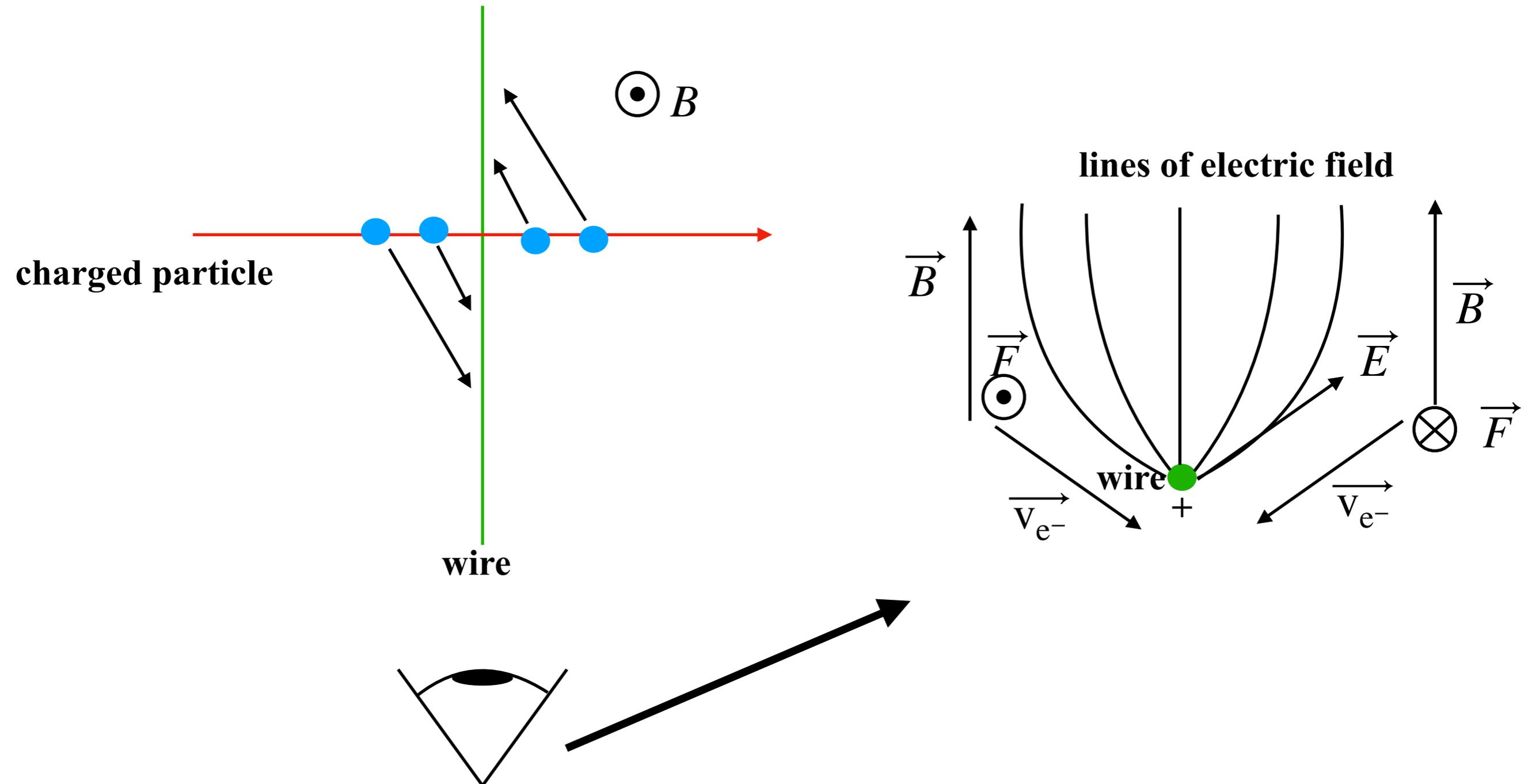
Charge transfer and charge broadening of GEM structures in high magnetic fields  
M. Killenberg et al.

GARFIELD simulation of electron drift lines starting in front of a GEM (electric field  $200 \text{ V/cm}$ ; GEM voltage  $400 \text{ V}$ ); at  $4 \text{ T}$

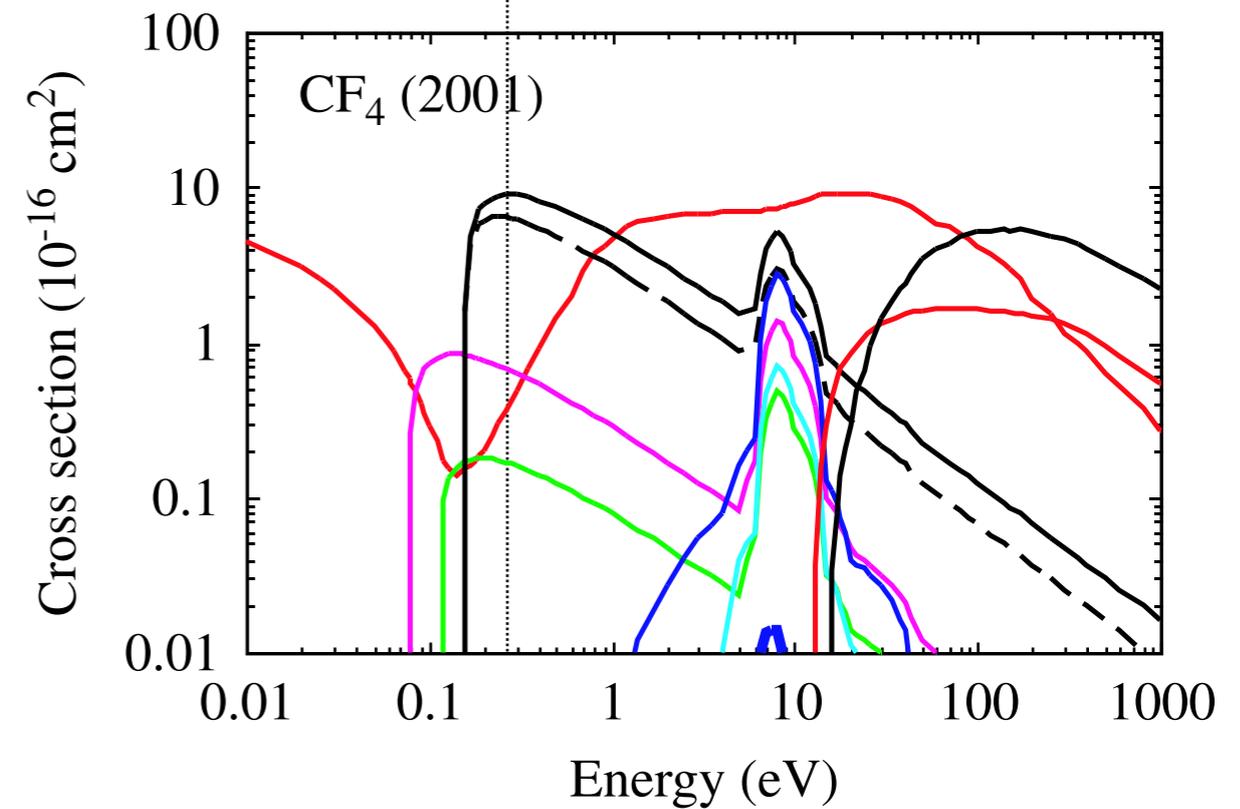
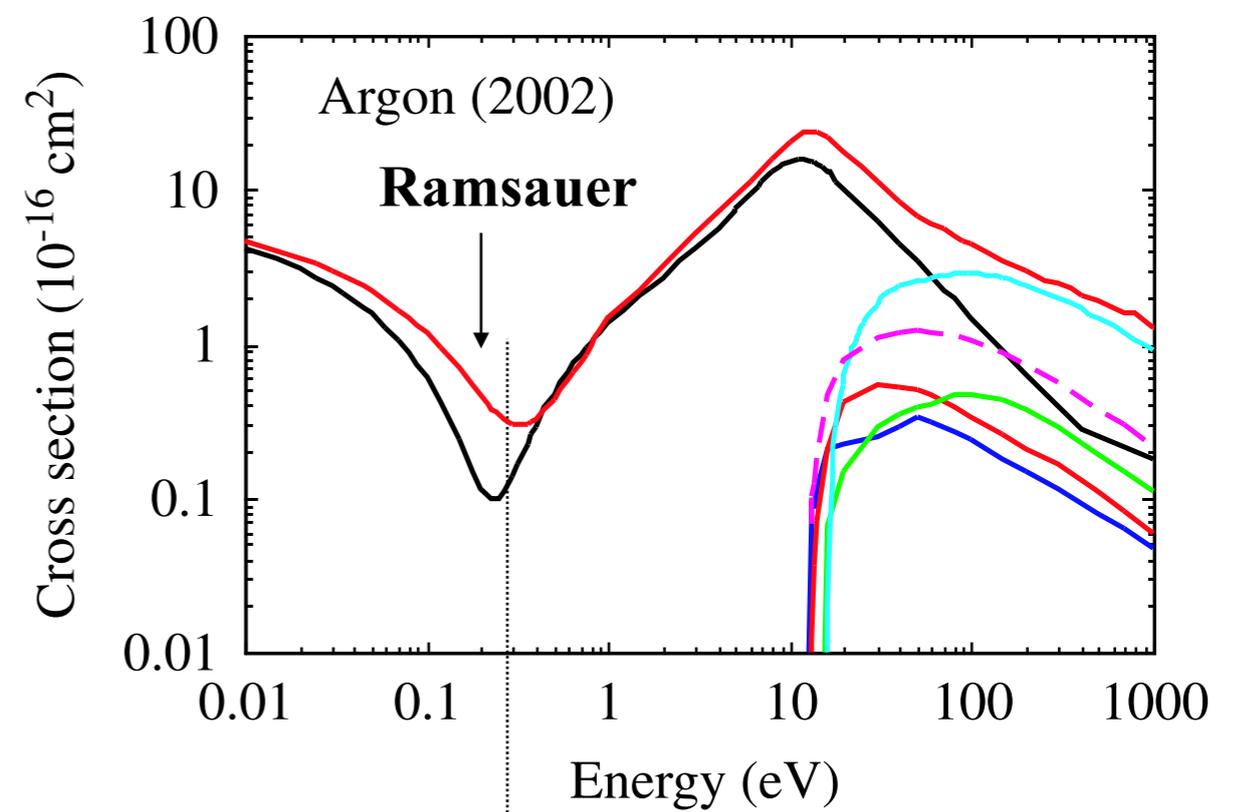
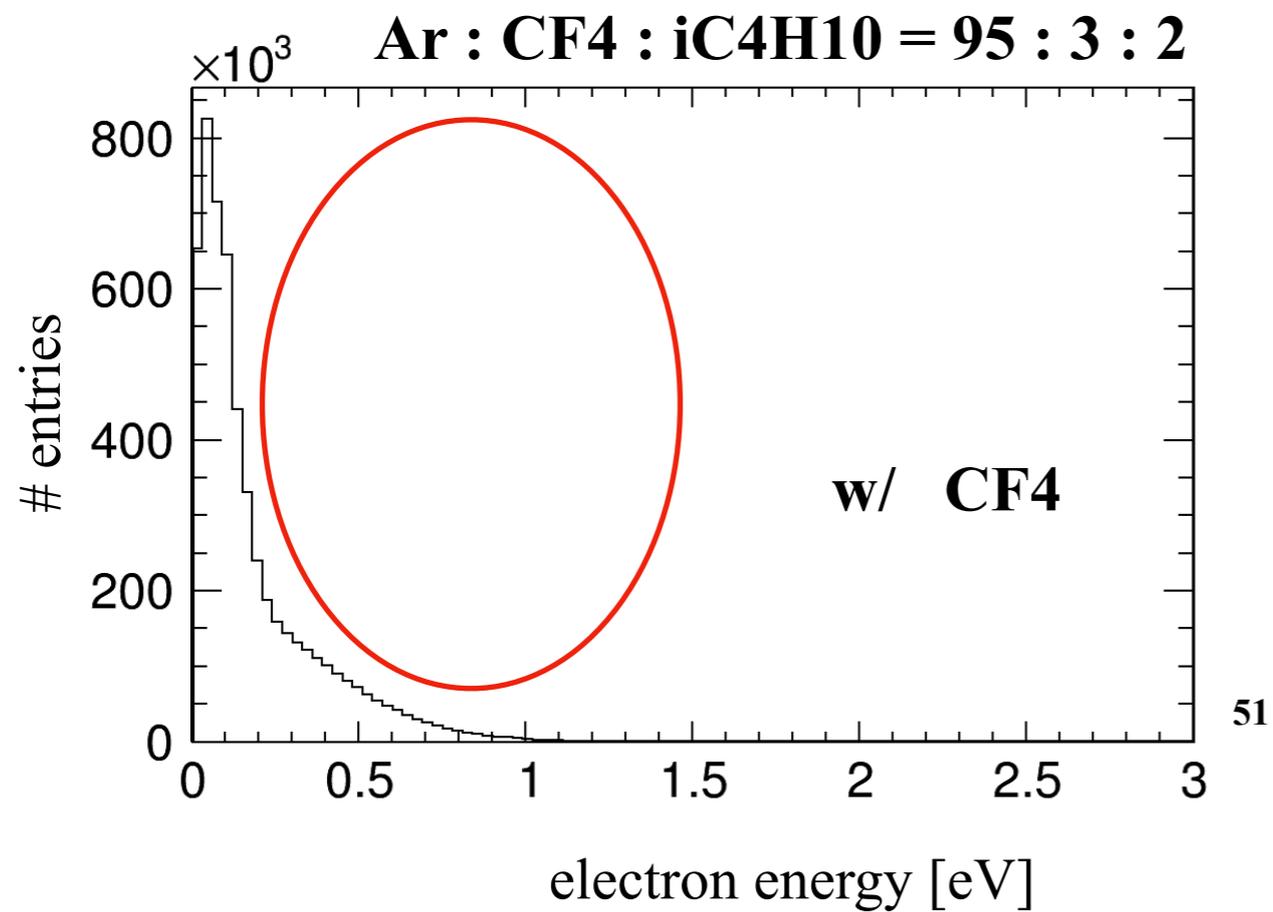
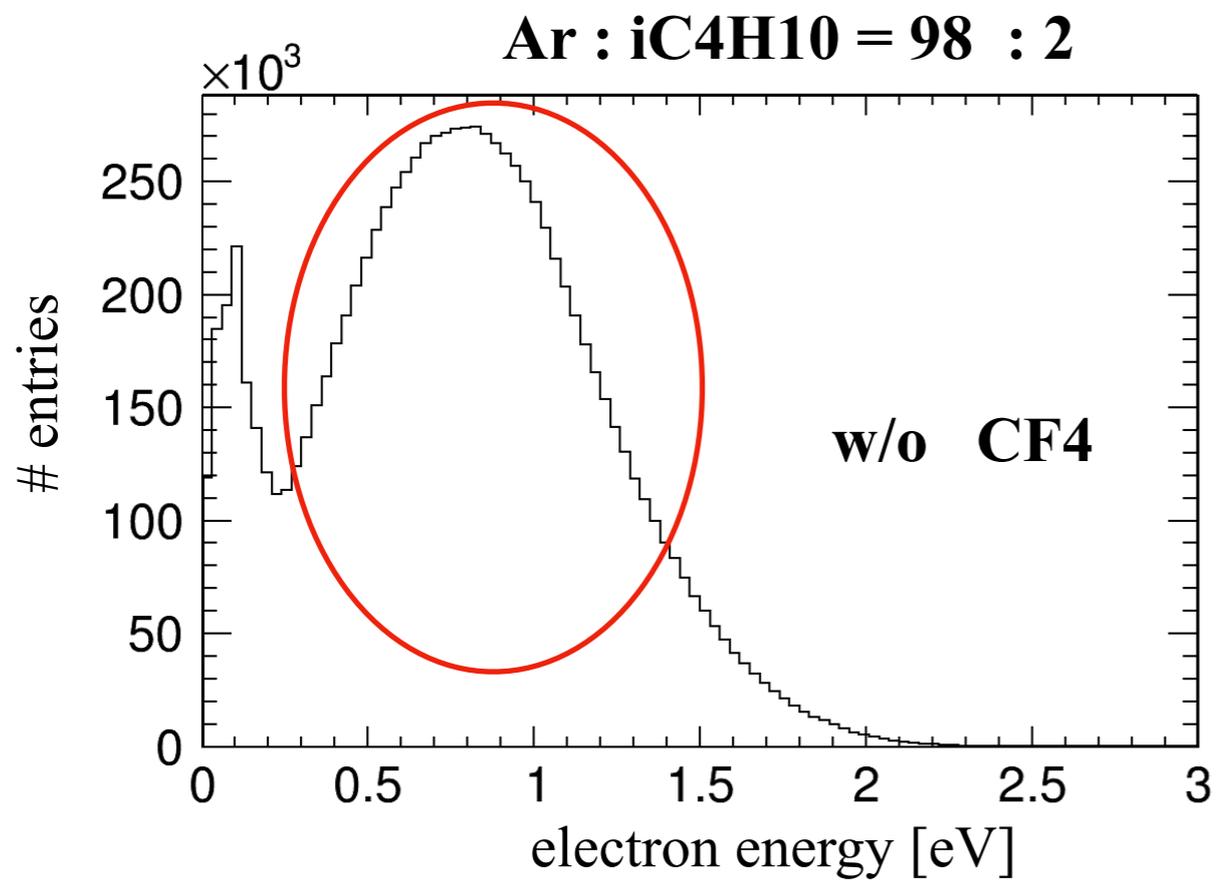
**no electrons are lost during collection into the GEM holes.**

# $E \times B$ effect

bend the electron drift path near the wire

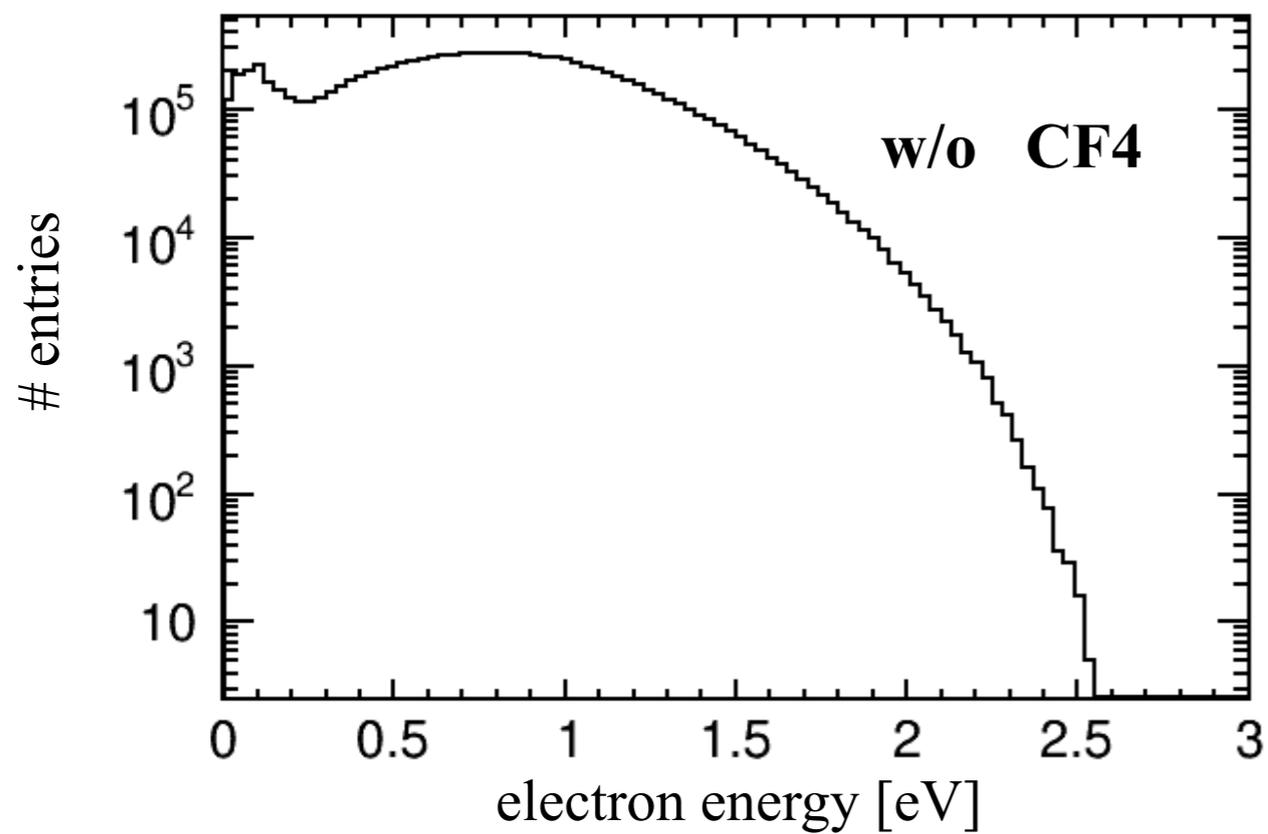


liberated electrons are bent along the wire (in the direction of wire)

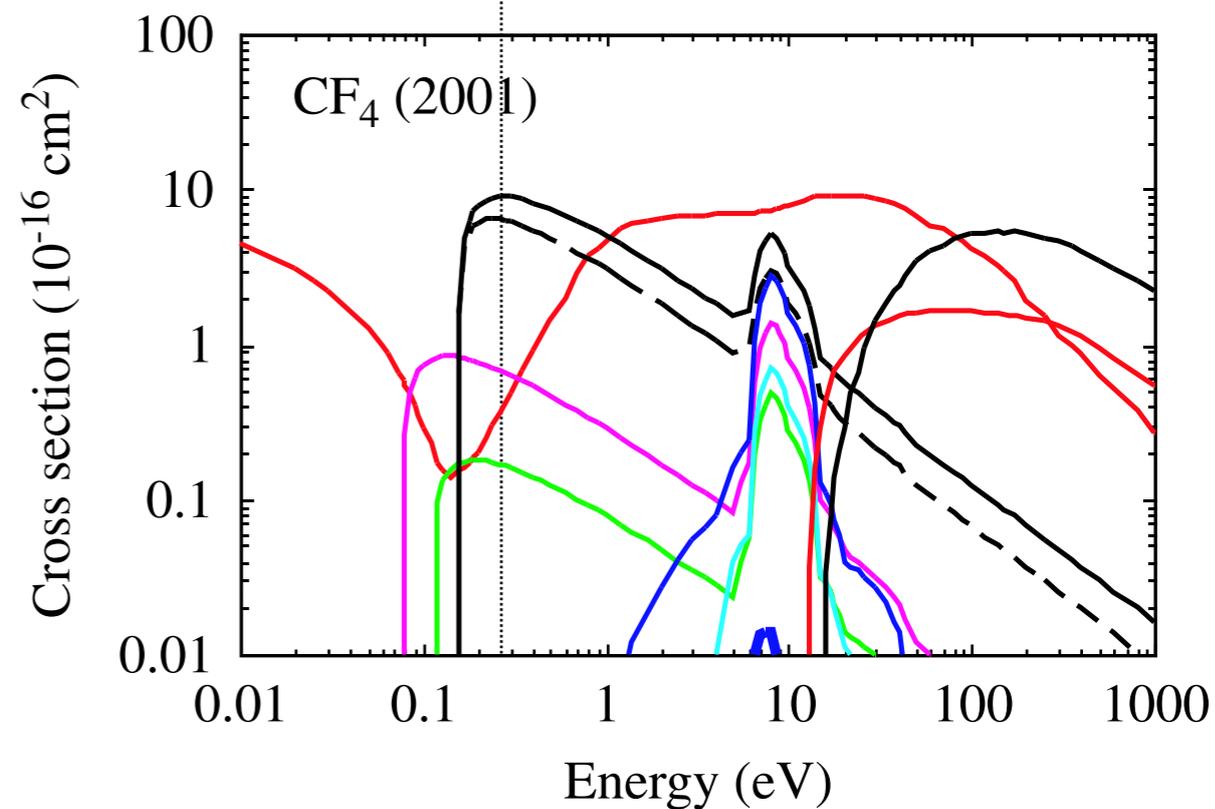
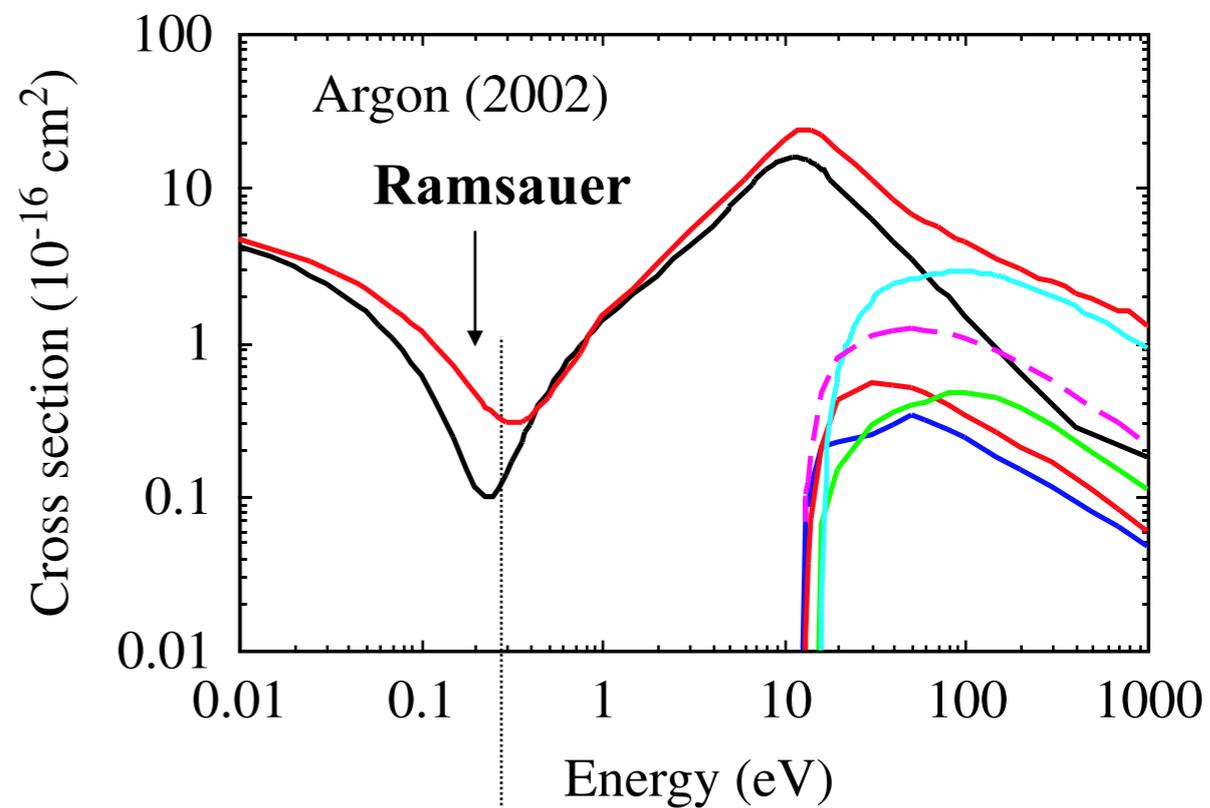
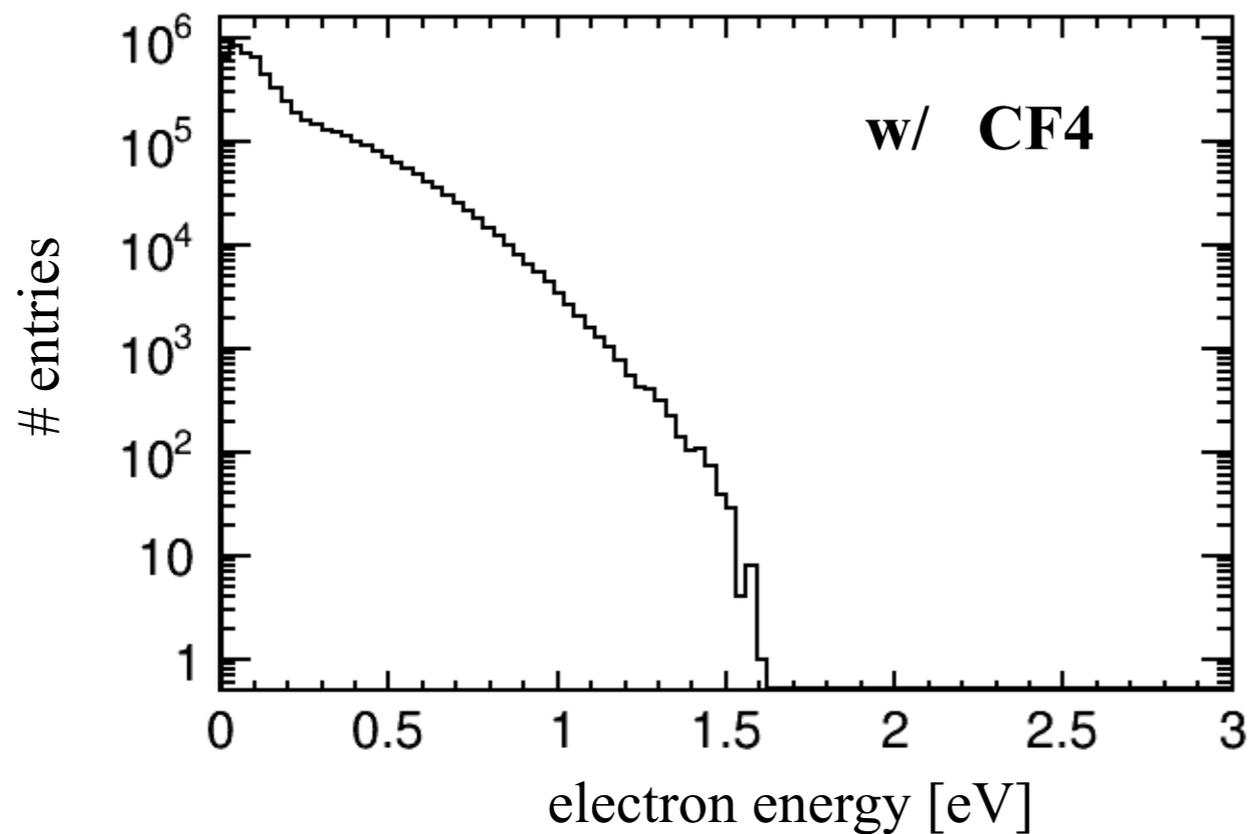


$E = 230 \text{ V/cm}$

**Ar : iC4H10 = 98 : 2**



**Ar : CF4 : iC4H10 = 95 : 3 : 2**



$E = 230 \text{ V/cm}$

# Insulation material of GEM

GEM is vulnerable to discharges: a single (large) discharge could be fatal

= > Looking for new insulator material

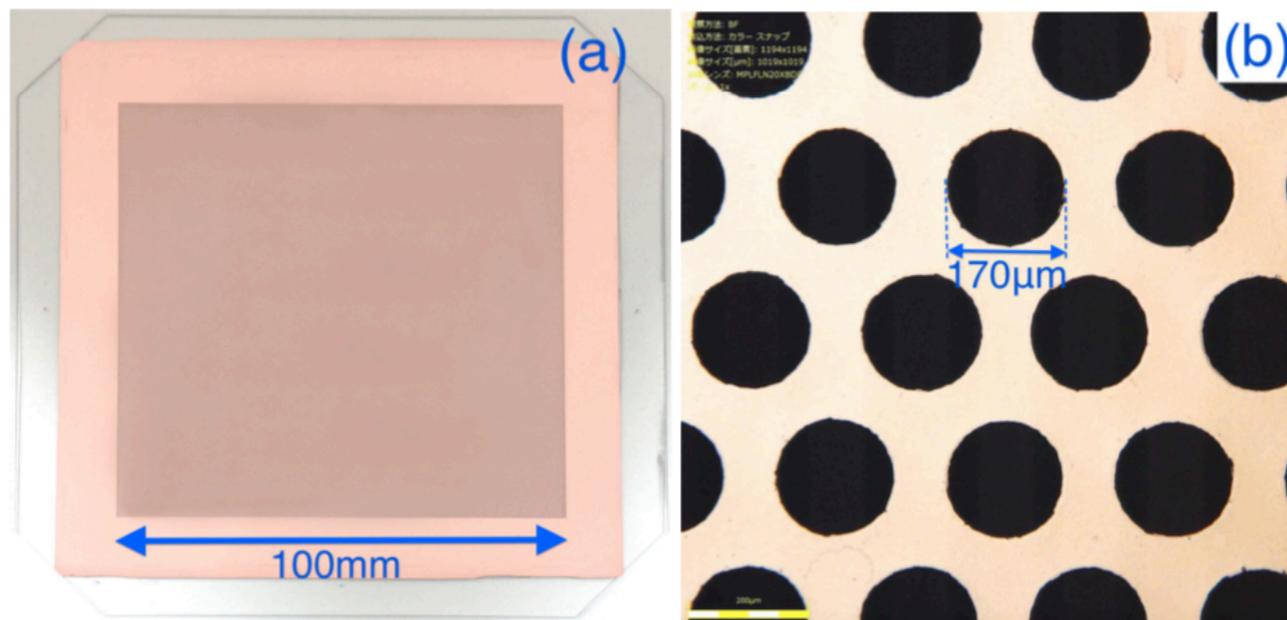
## Glass GEM

Using glass instead of polyimide  
as the substrate

No outgassing

High gain with only one stage

LTCC or G-GEM is a thin but stiff “plate”: self-supporting without tension applied



Photograph of the G-GEM

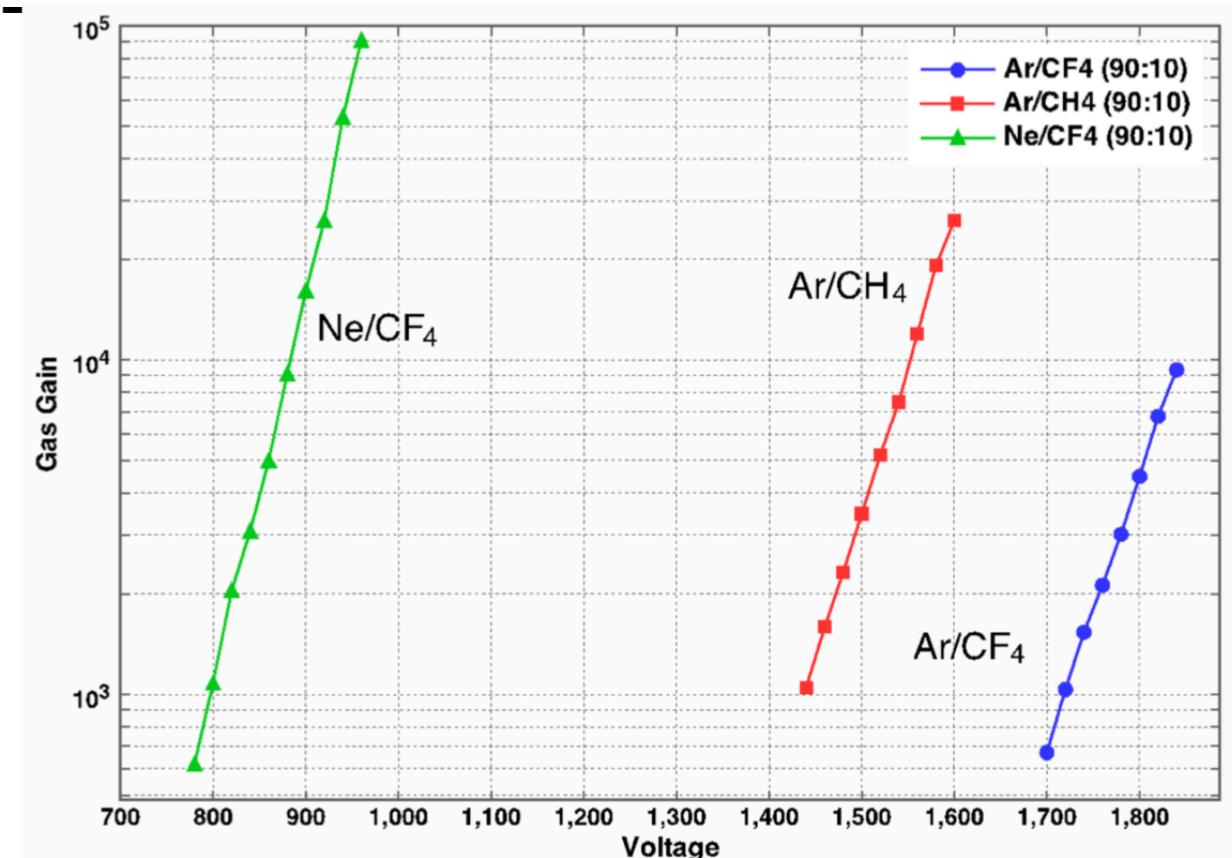
Microphotograph of the G-GEM

T. Fujiwara et al 2014 JINST 9 P11007

Characteristics of G-GEM & CERN GEM

Type of GEM	Glass GEM	CERN GEM
Hole diameter	170 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
Pitch	280 $\mu\text{m}$	150 $\mu\text{m}$
Thickness	680 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
Insulator	Glass	Polyimide

T. Fujiwara et al 2014 JINST 9 P11007



Gas gain curves of Glass GEM measured with 5.9-keV X-rays

T. Fujiwara et al 2014 JINST 9 P11007

# Insulation material of GEM

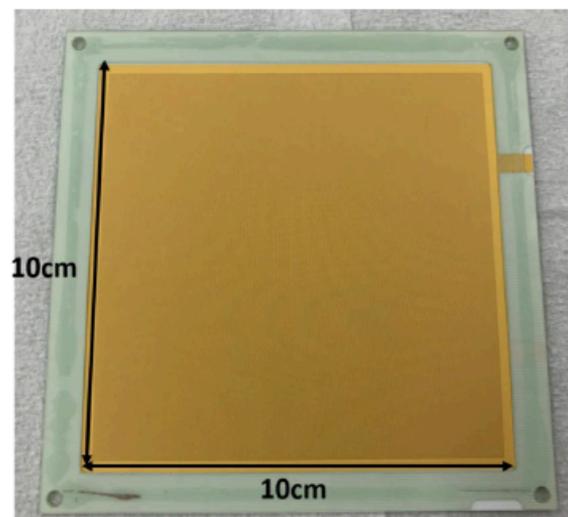
## LTCC: Low Temperature Co-Fired Ceramics

By mixing glass components with alumina ceramics  
annealing temperature  $\sim 900^{\circ}\text{C}$

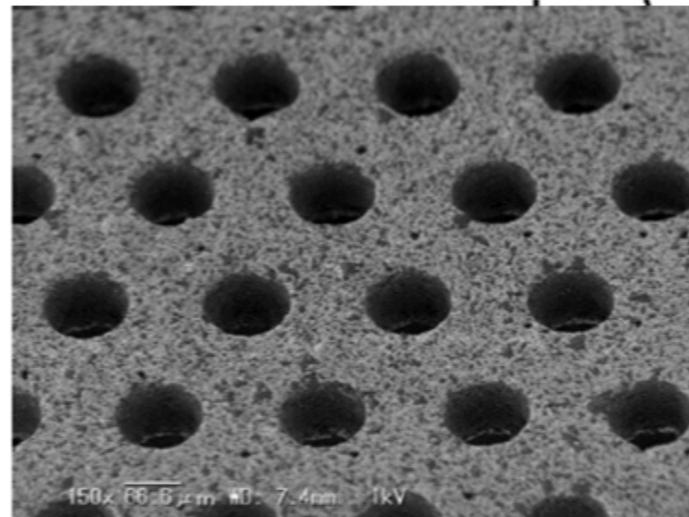
No outgassing

High gain with only one stage

LTCC or G-GEM is a thin but stiff “plate”: self-supporting without tension applied



Photograph of the LTCC-GEM



Microphotograph of the LTCC-GEM

### Area

Substrate: 12.4 cm x 12.4 cm

Hole region: 10 cm x 10 cm

Thickness: 100  $\mu\text{m}$  or 200  $\mu\text{m}$

Hole size:  $\phi 100 \mu\text{m}$

Hole pitch: 200  $\mu\text{m}$

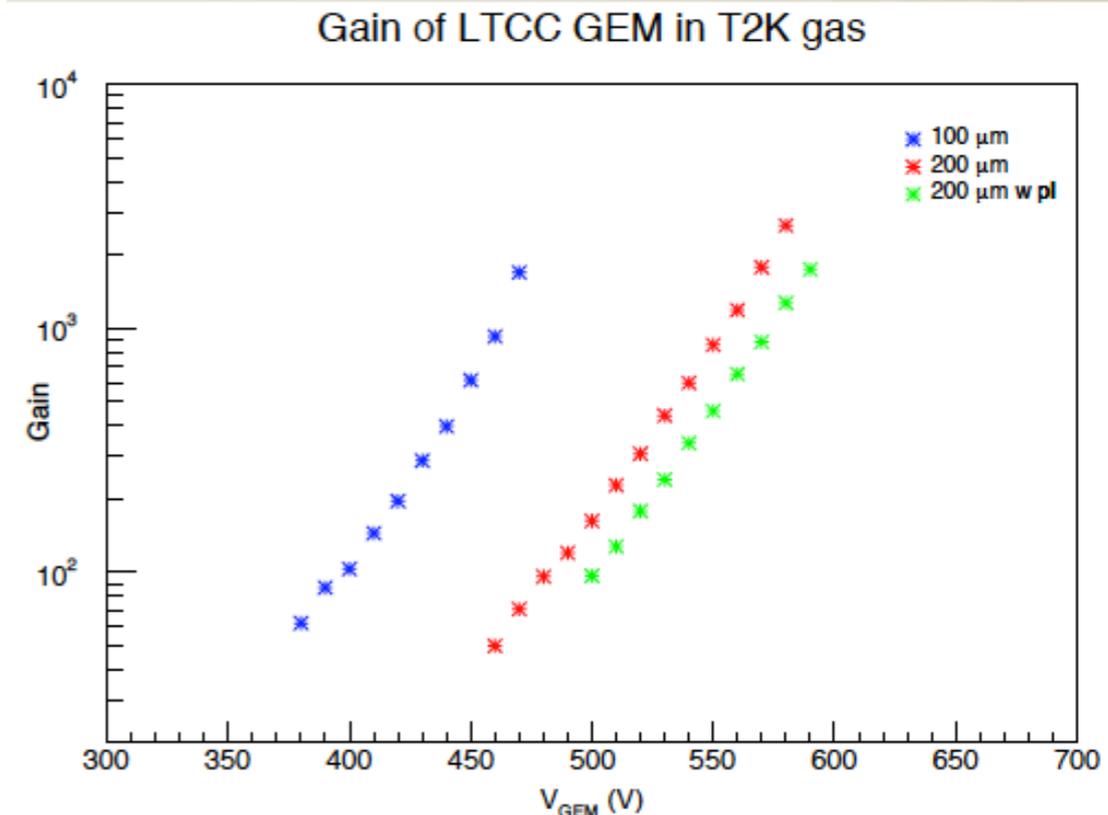
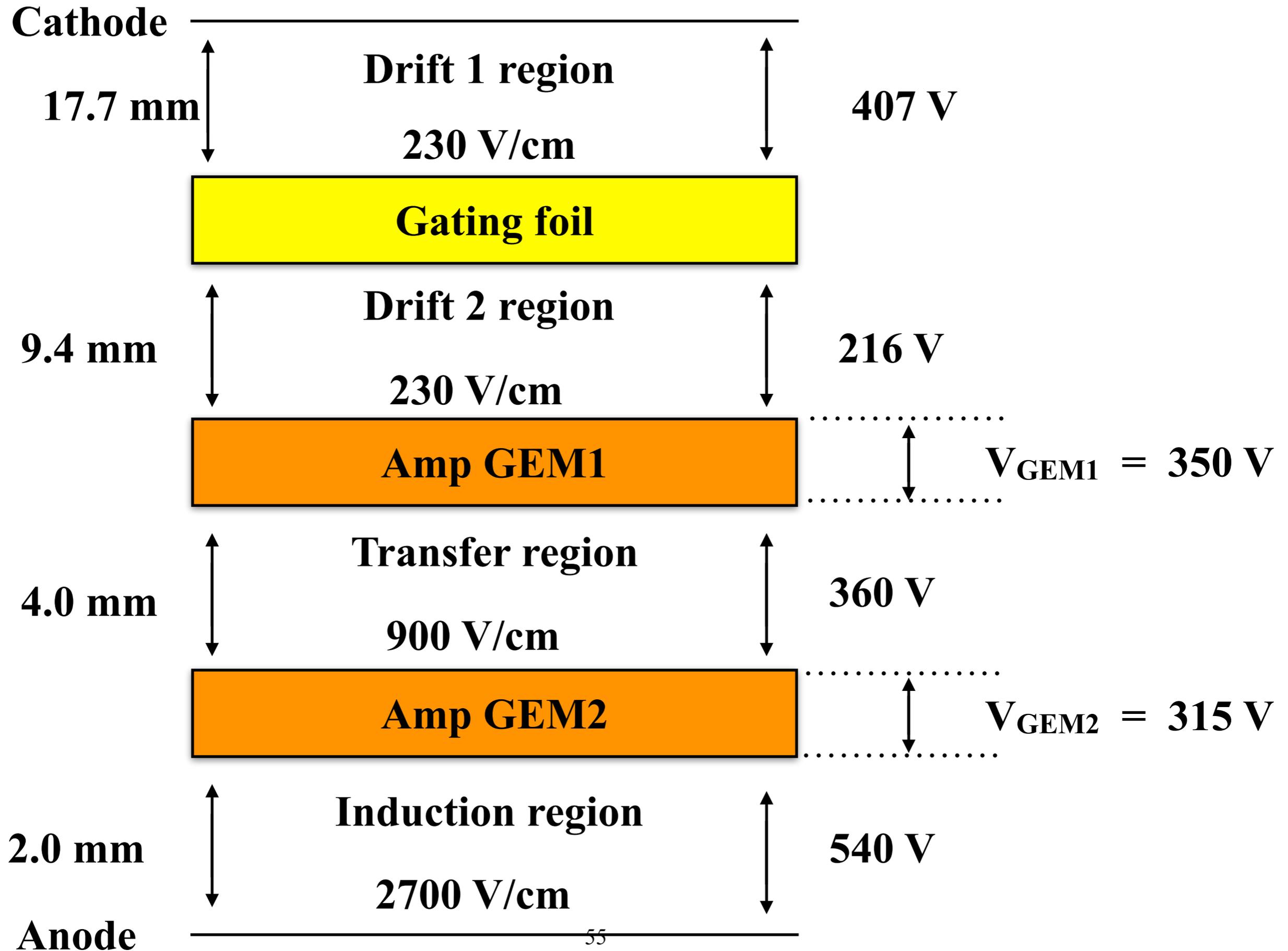


Figure by Y.Kato, Kindai Univ.

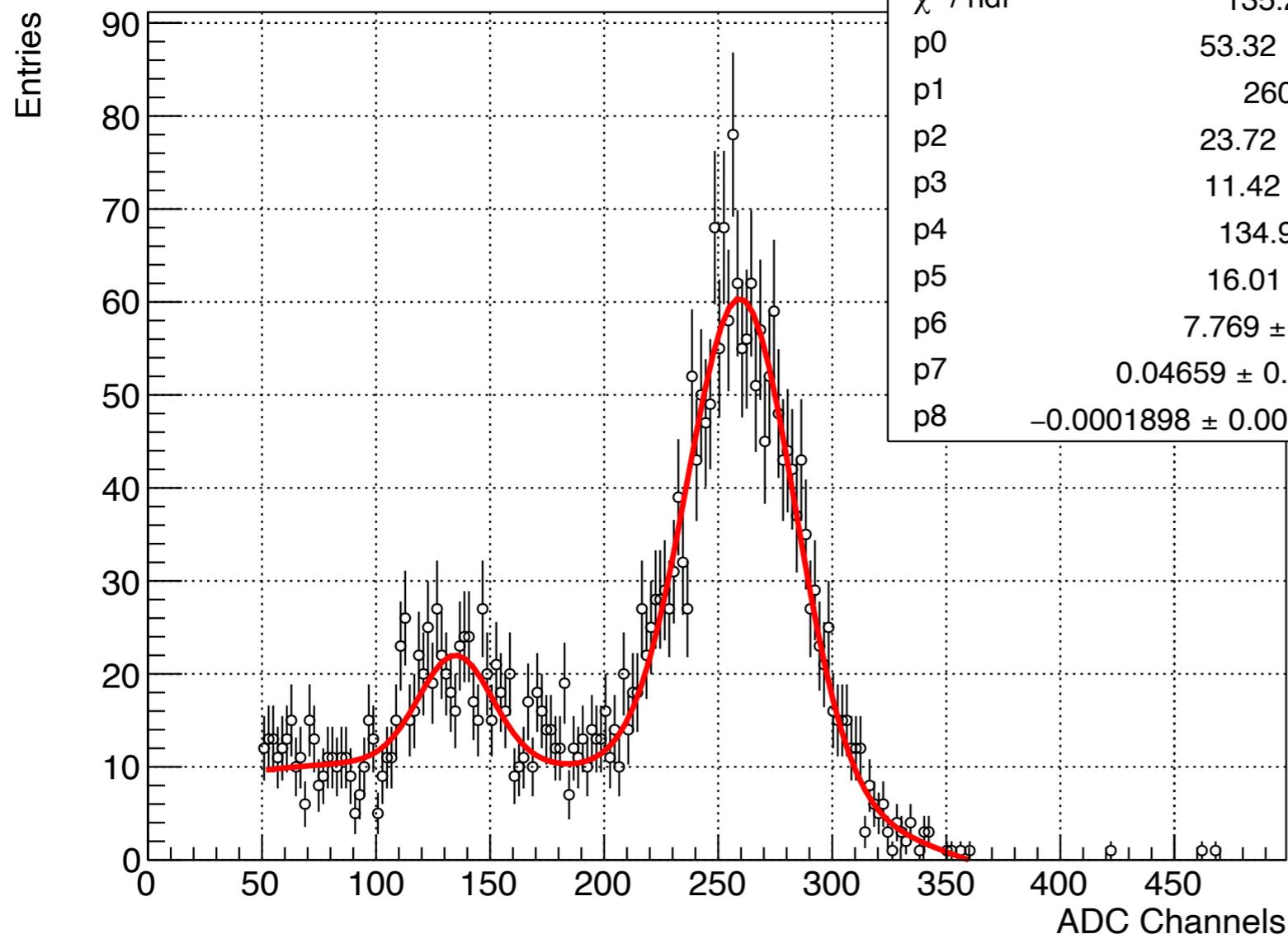
# Electric field and voltage



# Definition of Gain

[Example: run10]

Energy spectrum



Gain:

$$G = \frac{\text{Charge after amplification}}{\text{Charge before amplification}}$$

$Q_{\text{after}}$

$Q_{\text{before}}$

$$Q_{\text{after}} \sim 0.52 * p_1 - 0.78 \text{ [fC]}$$

This formula is obtained from ADC calibration. Correlation between ADC channels and charge was examined using a pulse generator.

$$Q_{\text{before}} \sim n_0 * 1.6 * 10^{-19} \text{ [C]}$$

$n_0$ : seed electrons  $\sim 227$

Fitting function:

$$f(x) = p_0 \exp\left(-\frac{(x - p_1)^2}{2p_2^2}\right) + p_3 \exp\left(-\frac{(x - p_4)^2}{2p_5^2}\right) + p_6 + p_7x + p_8x^2$$

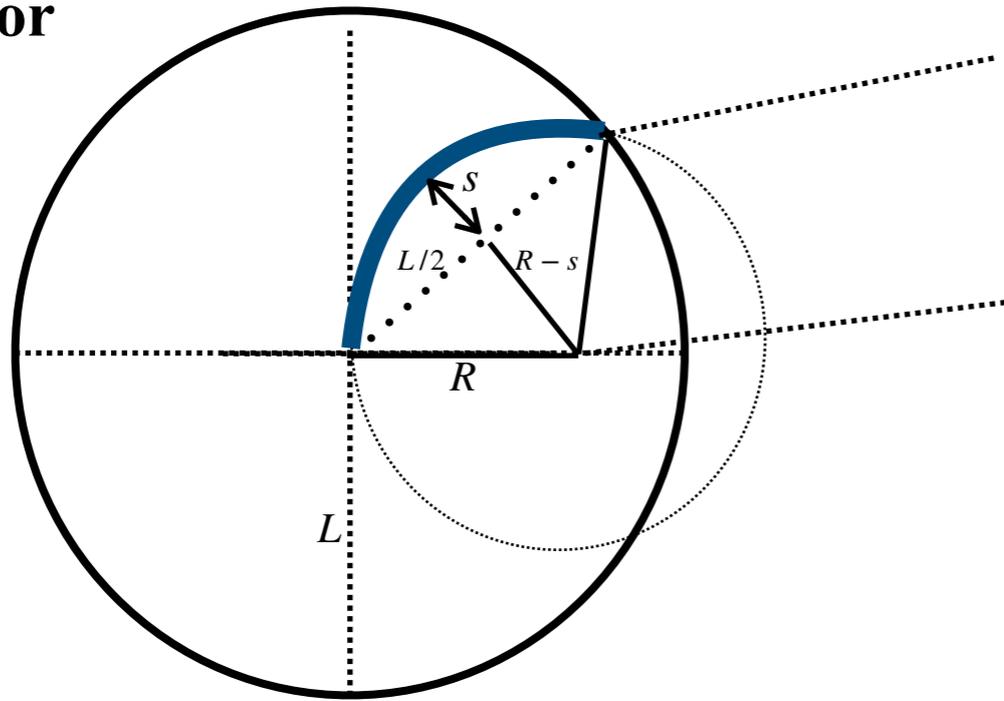
Main peak

Escape peak

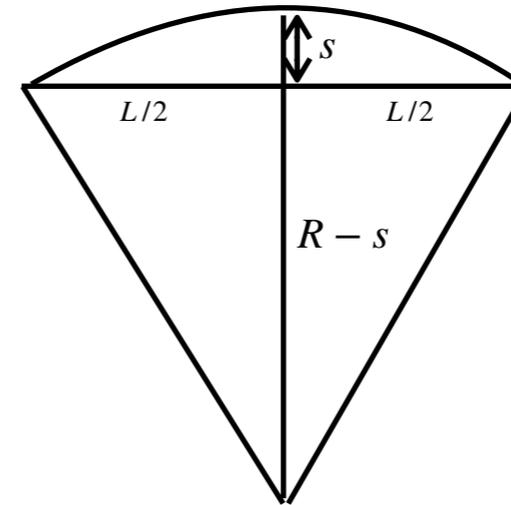
Background

# Momentum resolution

cross section  
of detector



using sagitta  $s$



Let  $R$  be

$$R \gg s$$

$$R \approx \frac{L^2}{8s}$$

$$p_{\perp} = 0.3 BR \approx \frac{0.3BL^2}{8s}$$

by taking into account

- Multiple measurements points

- Multiple scattering

$$\frac{\sigma_{p_{\perp}}}{p_{\perp}} \propto \frac{\sigma_x p_{\perp}}{BL^2}$$

precisely,  
Momentum resolution is

$$\frac{\sigma_{p_{\perp}}}{p_{\perp}} = \sqrt{\underbrace{\left(\frac{\alpha' \sigma_x}{BL^2}\right)^2 \left(\frac{720}{N+4}\right) p_{\perp}^2}_{\text{measurements}} + \underbrace{\left(\frac{\alpha' C}{BL}\right)^2 \frac{10}{7} \left(\frac{X}{X_0}\right)}_{\text{multiple scattering}}}$$

$p_{\perp}$  : lateral momentum

$B$  : strength of B-Field

$L$  : track detection length

$\alpha', C$  : constant

$\sigma_x$  : position resolution

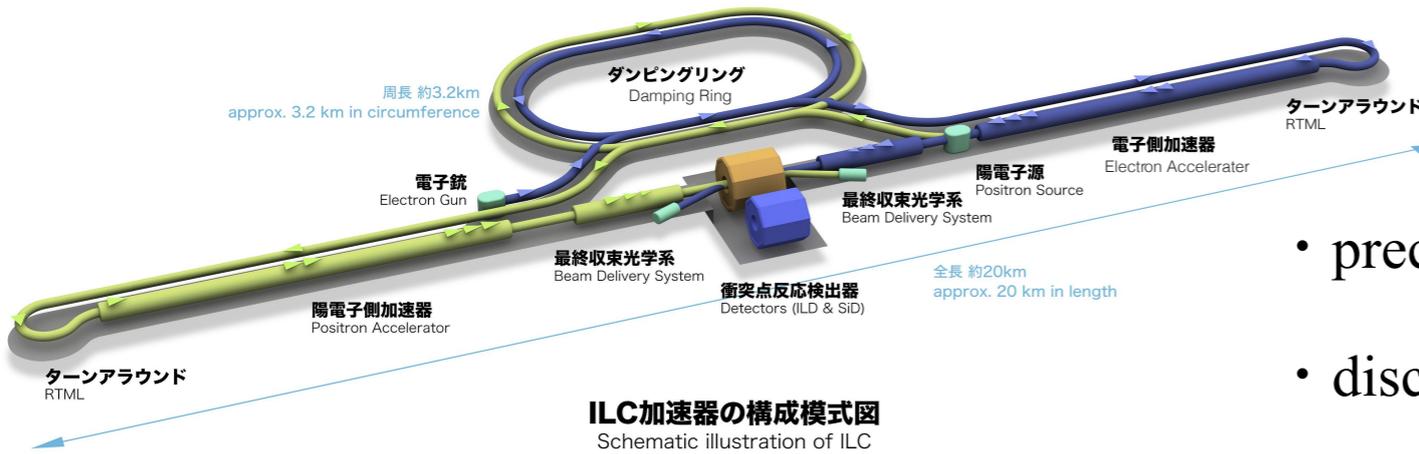
$N$  : # of measurement  
points

$\frac{X}{X_0}$  : radiation length of gas

# Introduction

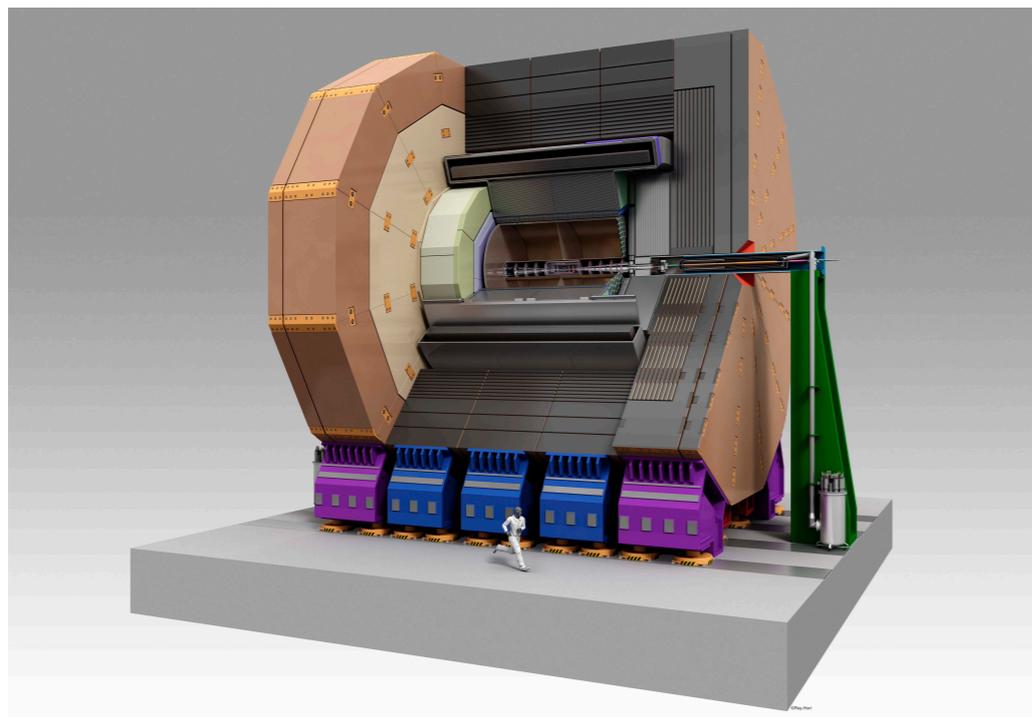
## International Linear Collider (ILC)

linear electron-positron collider

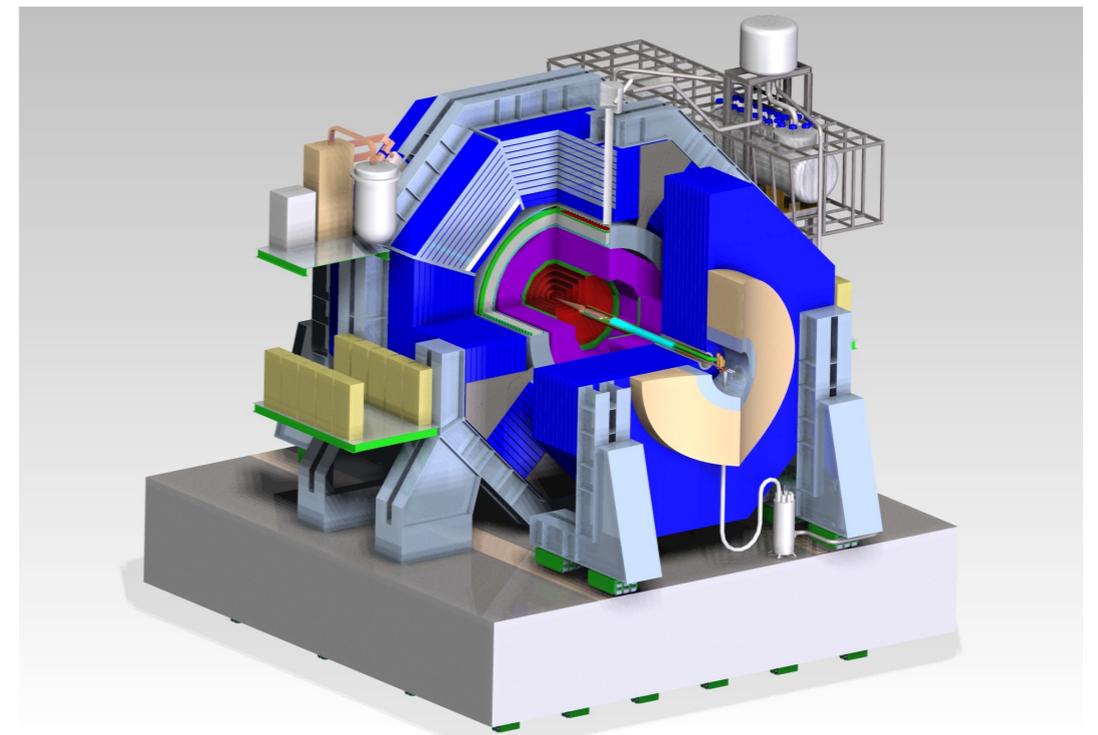


- precision measurement of the Higgs boson and top quark
- discovery of physics beyond the Standard Model
- search for candidates for dark matter

ILC has two detectors



ILD

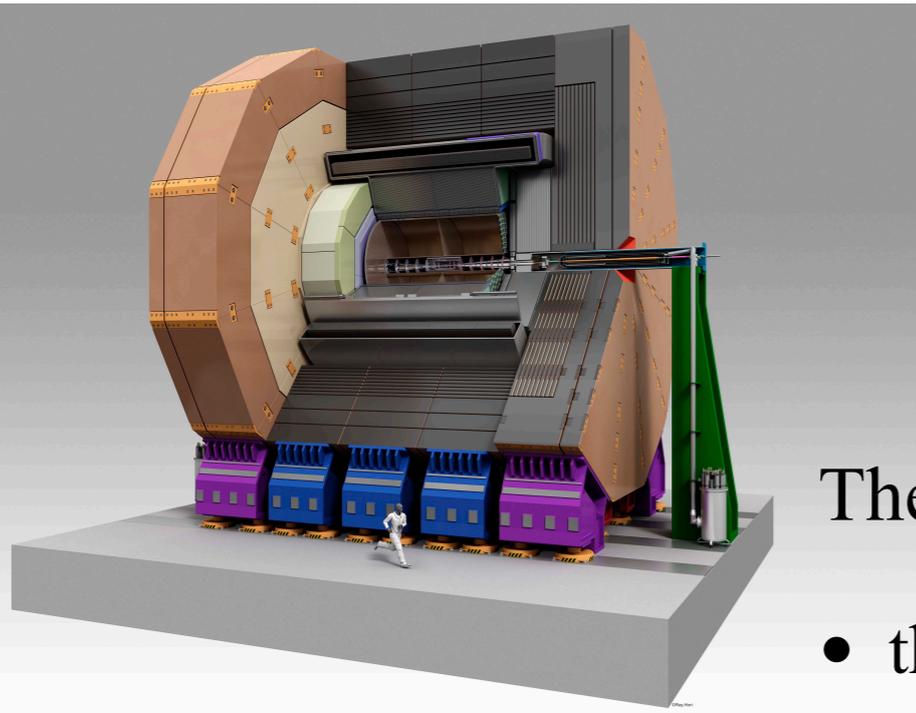


SiD

# Introduction

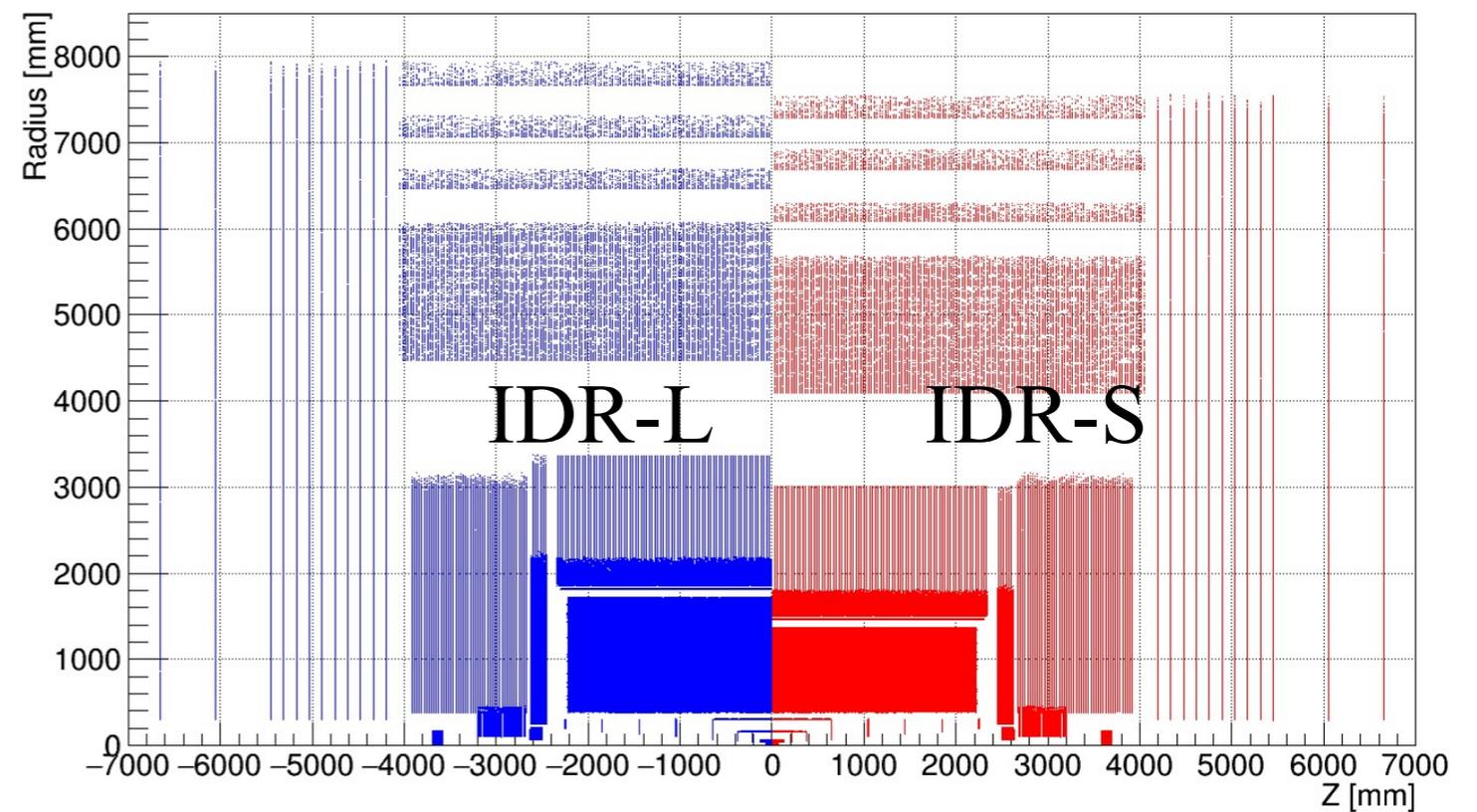
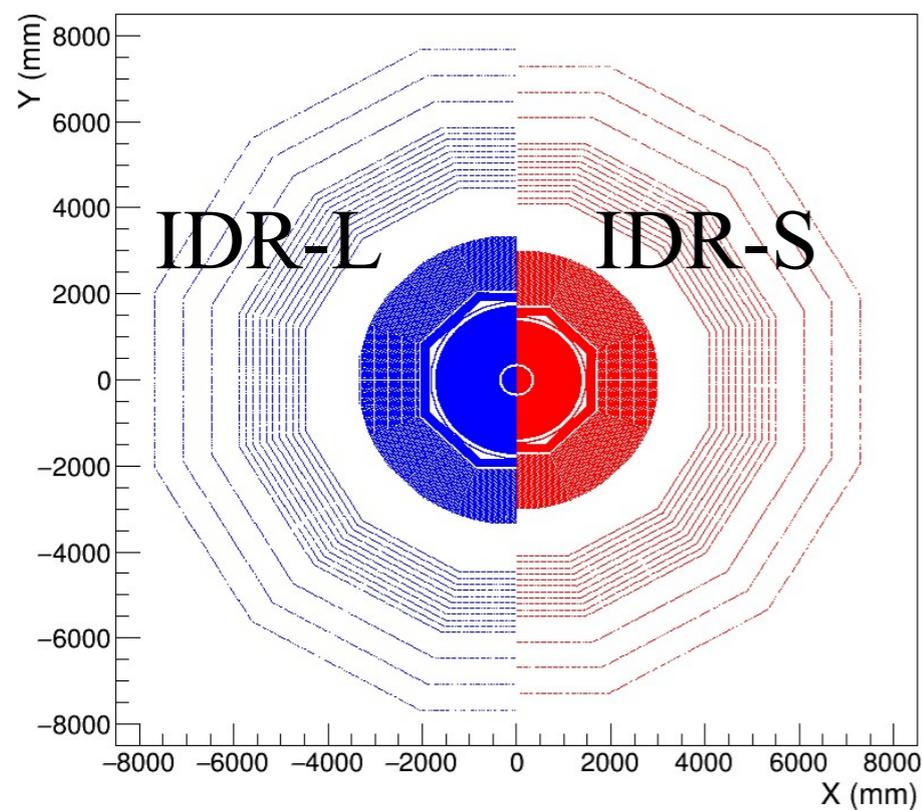
## International Large Detector (ILD)

two models of the ILD detector



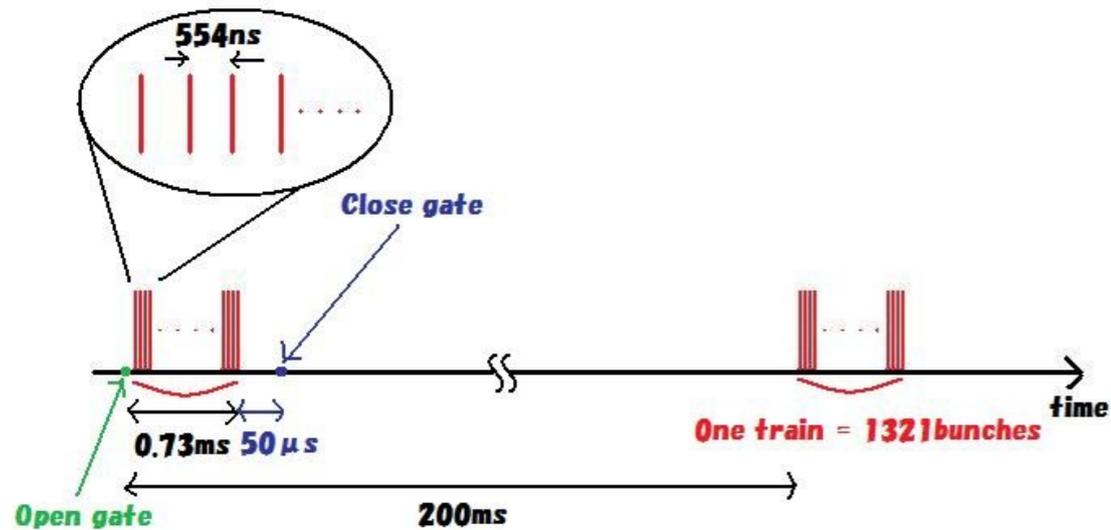
The difference

- |                                    | IDR-L   | IDR-S   |
|------------------------------------|---------|---------|
| • the outer radius of TPC          | 1770 mm | 1427 mm |
| • the strength of a magnetic field | 3.5 T   | 4.0 T   |



# Effects of Positive Ions

## ILC Beam Structure

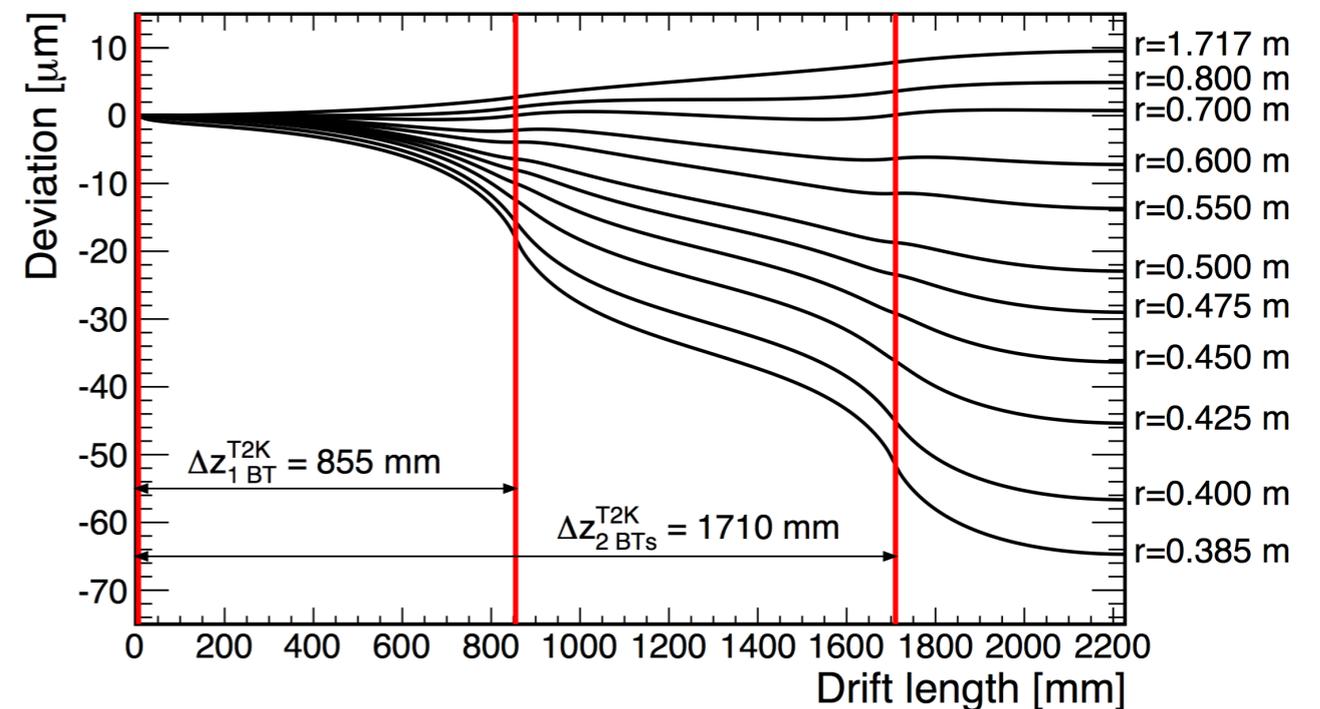
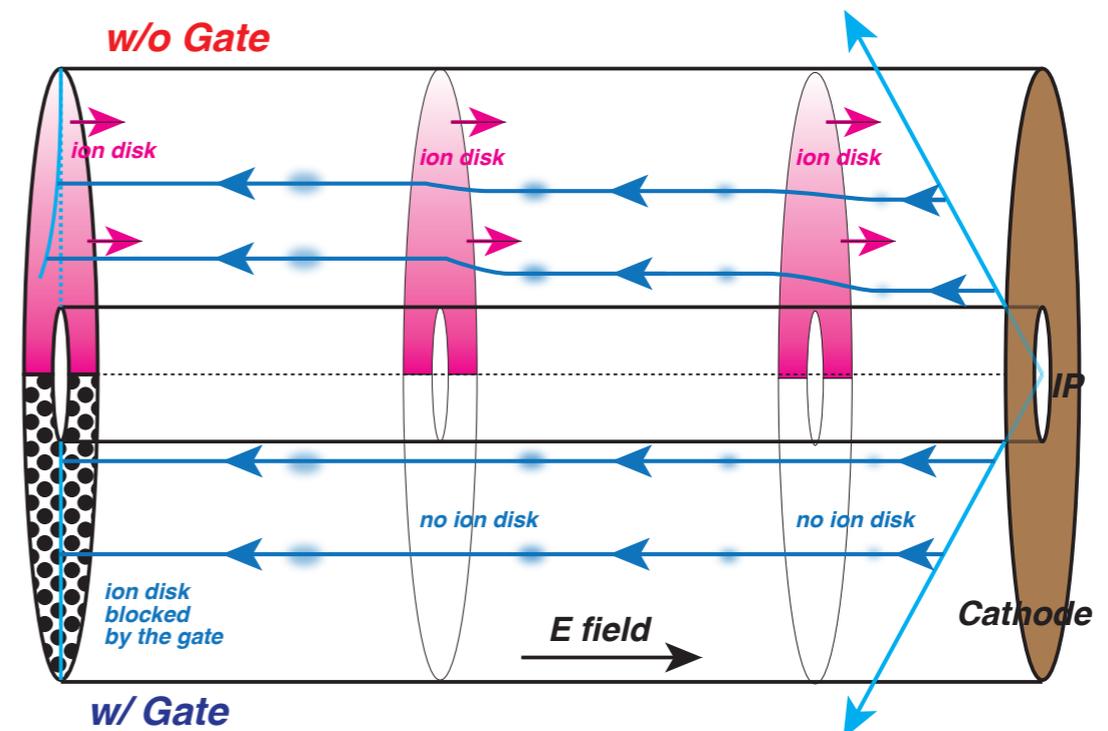


## Positive Ion Disk

Positive ions created in the gas amplification region of readout MPGD modules drift slowly to the cathode.

Since they are slow, the positive ions created in a single bunch train form *a thin (<1cm) sheet (ion disk)*.

There would be *maximum three such ion disks* drifting towards the cathode, which *distort the drift paths of track electrons*, if there is no gating device.



# 参考

## 阪大集中講義

[http://www-het.phys.sci.osaka-u.ac.jp/lecture2016/201606Nakamura/Lecture2-3\\_ParticleDet.pdf](http://www-het.phys.sci.osaka-u.ac.jp/lecture2016/201606Nakamura/Lecture2-3_ParticleDet.pdf)

## 名古屋大学 講義

[http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/~makoto.nagoya/lectures/ParticlePhysics\\_3\\_2017/0809\\_20171201-1208.pdf](http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/~makoto.nagoya/lectures/ParticlePhysics_3_2017/0809_20171201-1208.pdf)

## 理論屋さん向けの検出器入門

[http://research.kek.jp/people/nojiri/2015.11.26\\_PID\\_Jinnouchi.pdf](http://research.kek.jp/people/nojiri/2015.11.26_PID_Jinnouchi.pdf)

$\sigma$  of random walk

$$\sigma = \sqrt{2D^*t}$$

$D^*[\mu m/\sqrt{cm}]$  : **Diffusion Coefficient**

$\sigma$  of GEM

$$\sigma^2 = D^2L$$

$D[\mu m/\sqrt{cm}]$  : **Diffusion Constant**