

2016年度3年後期
素粒子物理学 1
第8回 2016年12月2日

戸本 誠

高エネルギー物理学研究室 (N研)

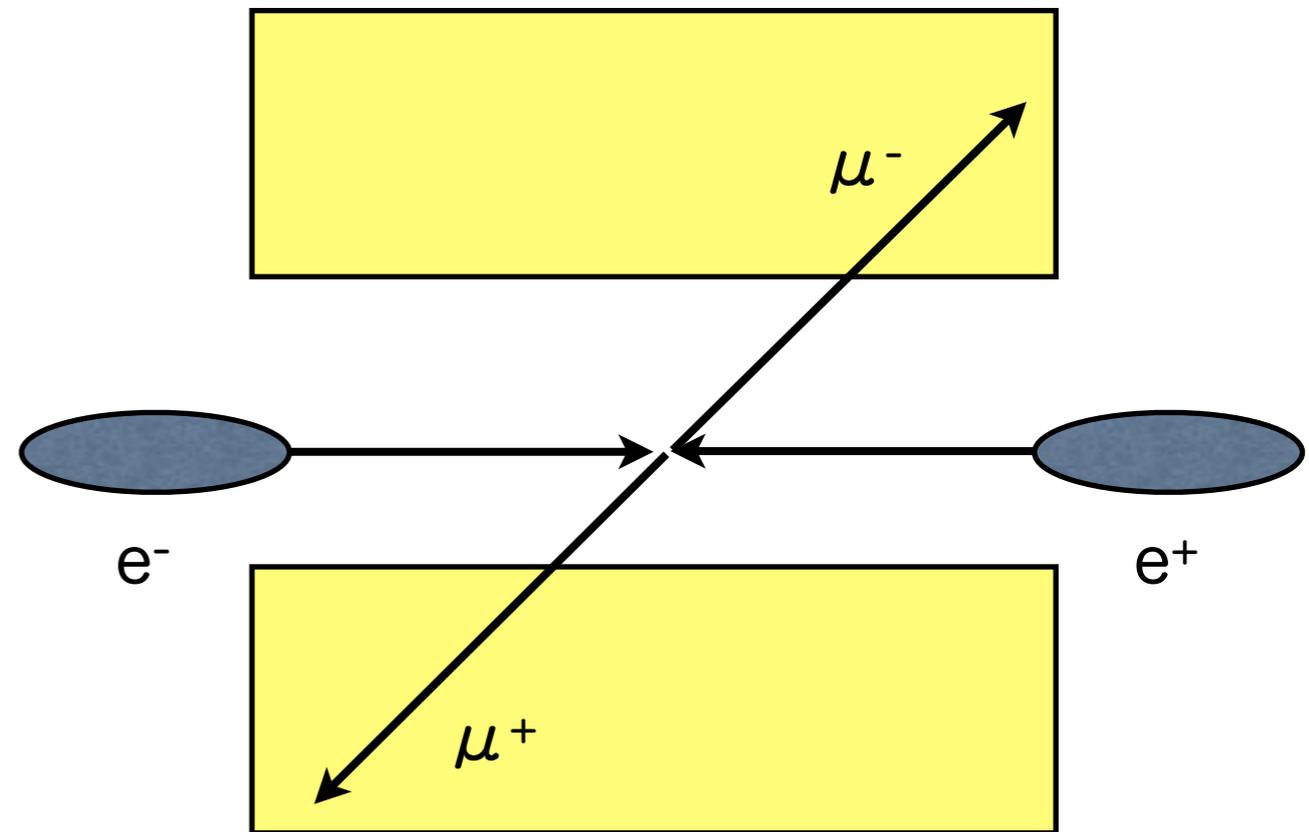
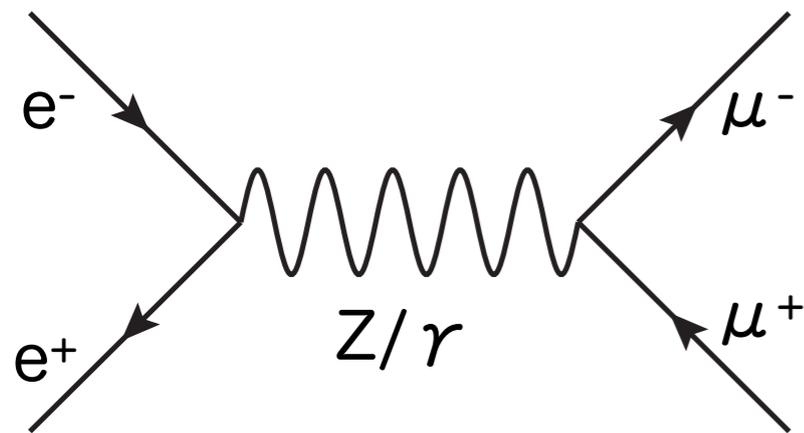
今日の内容

今回と次回は、高エネルギー実験で用いる測定器に関して

断面積や崩壊率を実験的にどのように測定するのか？

どうやって、素粒子を観測するのか？

どうやって、新しい粒子を発見するのか？



レポート問題（12月9日提出予定）

（問題1）

B(T)の磁場中を半径Rの円運動する電子の運動量は、 $p(\text{GeV}/c)=0.3B(\text{T})\times R(\text{m})$ の関係があることを示せ。

（問題2）

LHC加速器は、8.33Tの2極超伝導磁石(長さ14.3m)を1232本用いて、陽子を周回させている。何TeVまで陽子を加速することができるか？

（問題3）

(問題2)のエネルギーの陽子の速度は光速の何パーセントか？

（問題4）

(問題2)のエネルギーで陽子・陽子衝突した場合、重心系エネルギーは幾らか？また、このエネルギーの陽子を陽子(質量は1GeVとする)を標的とする固定標的実験に用いた場合、重心系エネルギーは幾らか？新粒子発見の観点から、どちらが優れているか？

（問題5） LHCのようなコライダー実験では、以下の粒子をどのように検出して、運動量やエネルギーを測定するのか？それぞれ、(a)物質との相互作用、(b)読み出しの原理、(c)どういう検出器を用いるのか、の3つの観点から説明せよ。

(a) 荷電粒子、(b) 電子、(c) 光子、(d) μ 粒子、(e) クォークやグルーオン（ハドロンの塊）
(f) ニュートリノ

何を測定すべきか？

安定粒子の粒子種を識別

電子、 μ 粒子、 π 粒子、K粒子、陽子、中性子、光子、 ν

$\tau \sim 2 \mu\text{s}$	$\tau \sim 0.26 \mu\text{s}$	$\tau \sim 0.12 \mu\text{s}$	$\tau \sim 880\text{s}$
$c\tau \sim 659\text{m}$	$c\tau \sim 7.8\text{m}$	$c\tau \sim 3.7\text{m}$	

実際には、相対論的効果で、 $c\tau\beta\gamma$ が重要 1GeVの μ 粒子： $\beta\gamma = p/m = 1000/100 = 10$
(MeV)/(MeV)

安定粒子の

運動量、エネルギー、空間的位置、時間応答などの情報

4元運動量

4元座標

を測定する

→最近は、bクォークや τ 粒子などの同定も可能に

以上の測定値から、親粒子の不変質量、崩壊様式を測定

新粒子の共鳴

断面積、崩壊率、角度分布

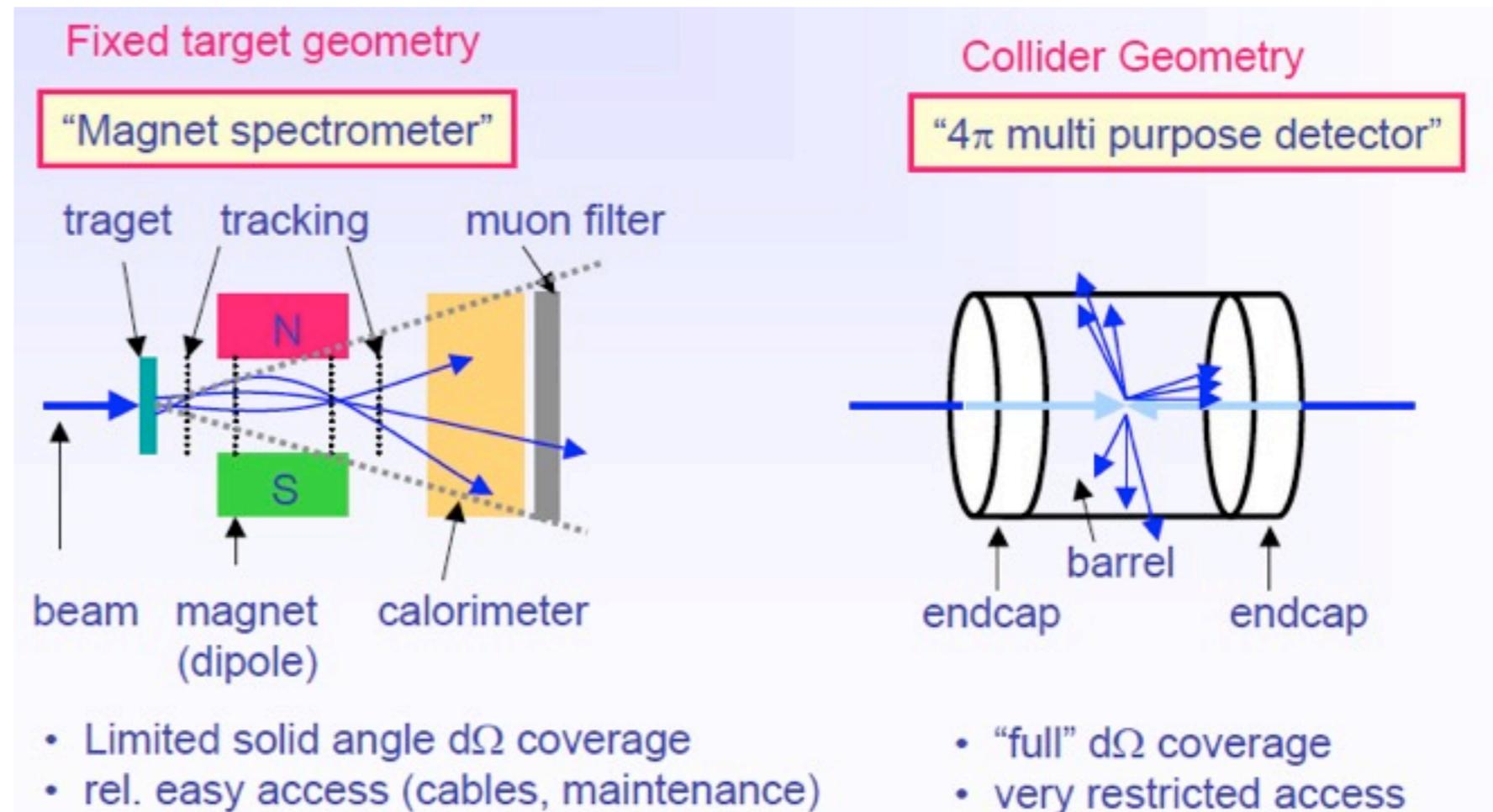
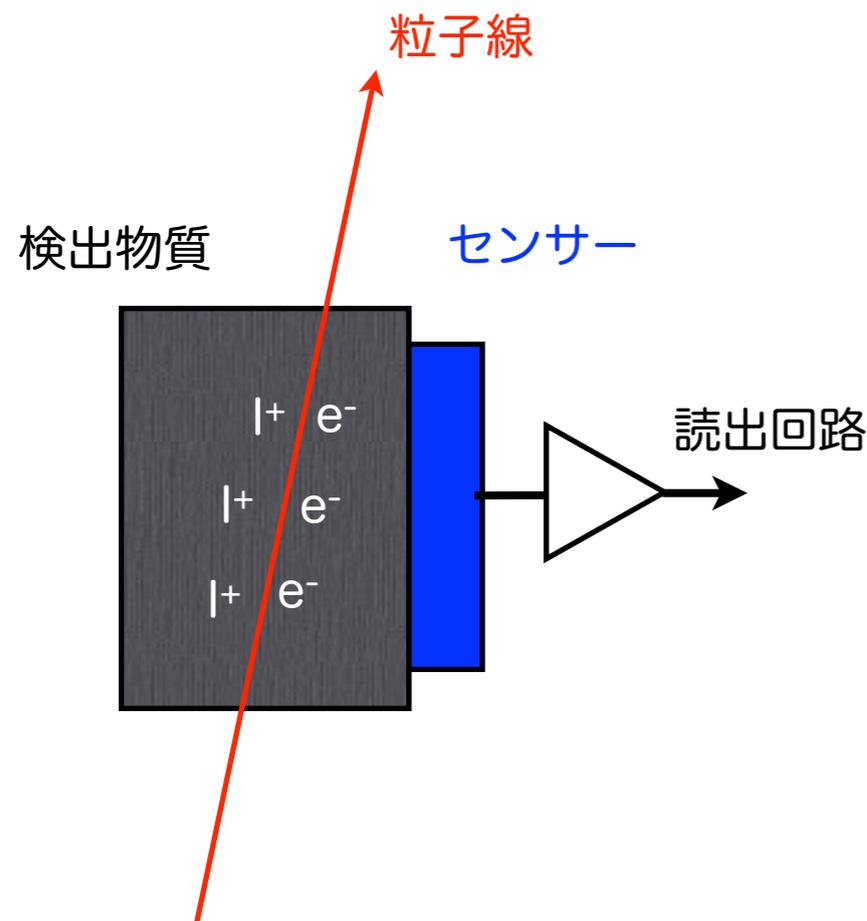
何をどこまで追究したいか？で、**測定器**の仕様が決まる

基本原理

測定には、粒子と検出器の構成物質との相互作用を用いる

電磁相互作用、強い相互作用 → 電磁相互作用
荷電粒子、光子 ハドロン

相互作用の結果出てきた、電子/イオン(電荷)や光を検出器で捕まえて運動量やエネルギーを測定する。

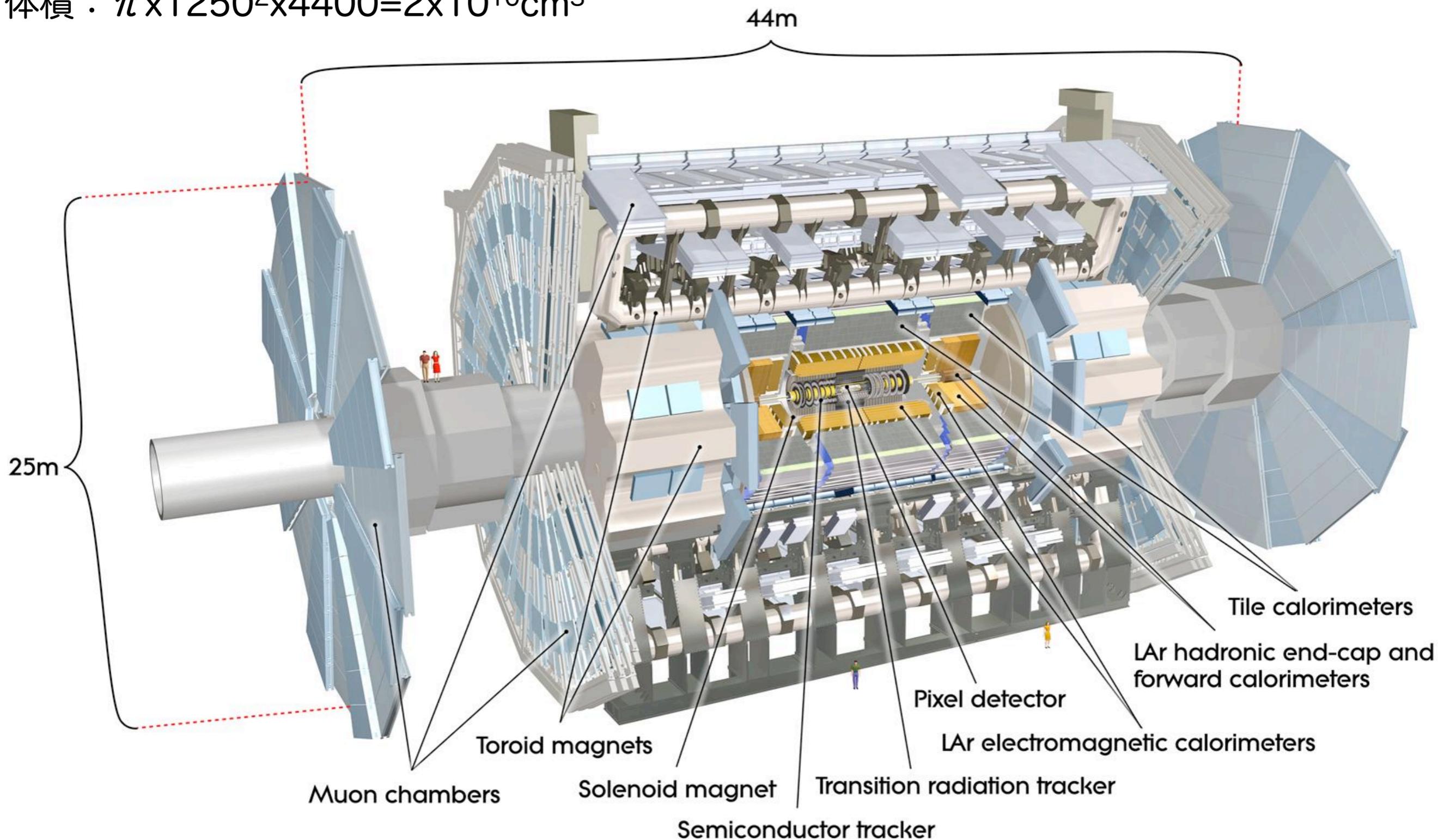


測定したいものに応じた複数の種類の検出器を用いる

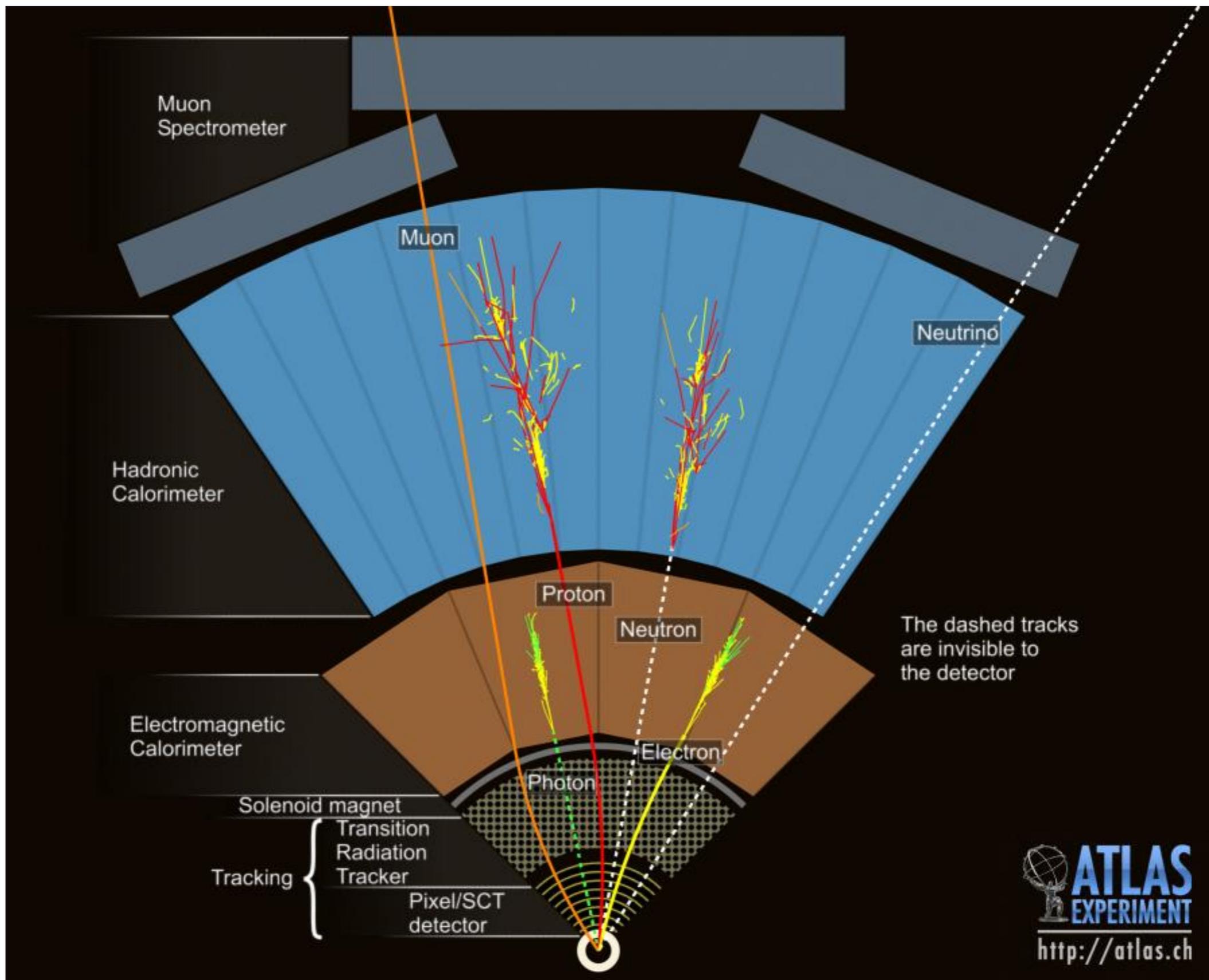
検出器の例：LHC-ATLAS検出器

総重量：7000トン= 7×10^9 g

体積： $\pi \times 1250^2 \times 4400 = 2 \times 10^{10}$ cm³



検出器の例：LHC-ATLAS検出器

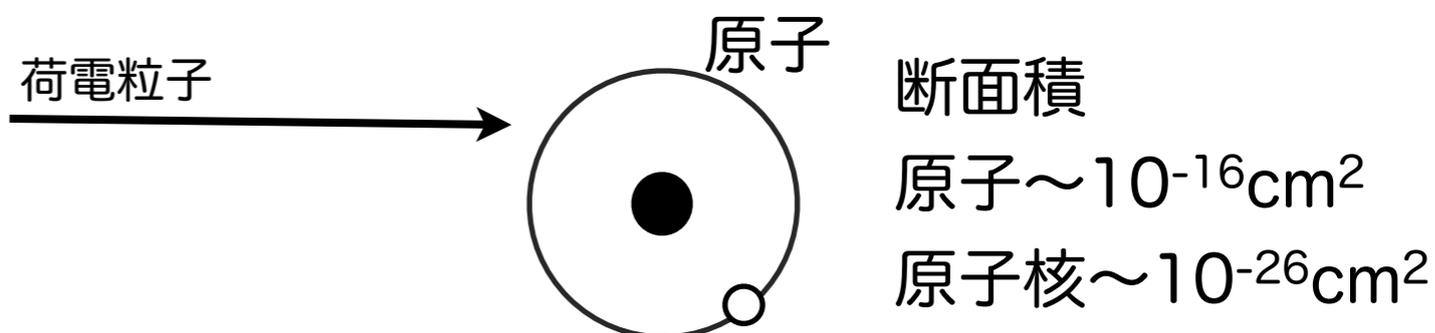


粒子種を相互作用の特徴から分類

	荷電粒子		中性粒子	
電磁シャワーする	e^{\pm}		$\gamma (\pi^0)$	
電磁シャワーしない	ハドロン	レプトン	ハドロン	レプトン
	π^{\pm}, K^{\pm}, p	μ^{\pm}	n	ν

荷電粒子と測定器物質との相互作用

- (1) 物質を構成する原子、分子中の電子との非弾性衝突
- (2) 原子核との弾性衝突
- (3) 原子核との反応
- (4) 制動放射



電子より質量が十分大きい粒子は (1) が重要

イオン化と励起

質量の軽い電子・陽電子は (4) が重要

	荷電粒子		中性粒子	
電磁シャワーする (4)が寄与	e^\pm		$\gamma (\pi^0)$	
電磁シャワーしない (1)が寄与	ハドロン	レプトン	ハドロン	レプトン
	π^\pm, K^\pm, p	μ^\pm	n	ν

荷電粒子と測定器物質との相互作用

質量($M \gg m_e$), 電荷 ze , 速度 βc の荷電粒子が原子番号 Z 、質量数 A を持つ物質中を通過する時に、物質をイオン化することで、単位長さあたりに失う平均エネルギー (Energy loss)

Bethe-Blochの式

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

[MeV g⁻¹ cm²]

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m c^2 = 0.3071 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \text{g}^{-1}$$

$$I \simeq 16Z^{0.9} \text{ eV} \quad \text{平均イオン化ポテンシャル}$$

$$r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m c^2} = 2.82^{-13} \text{ cm} \quad \text{古典電子半径}$$

$$N_A = 6.023 \times 10^{23} / \text{mol} \quad \text{アボガドロ数}$$

$$\beta = v/c$$

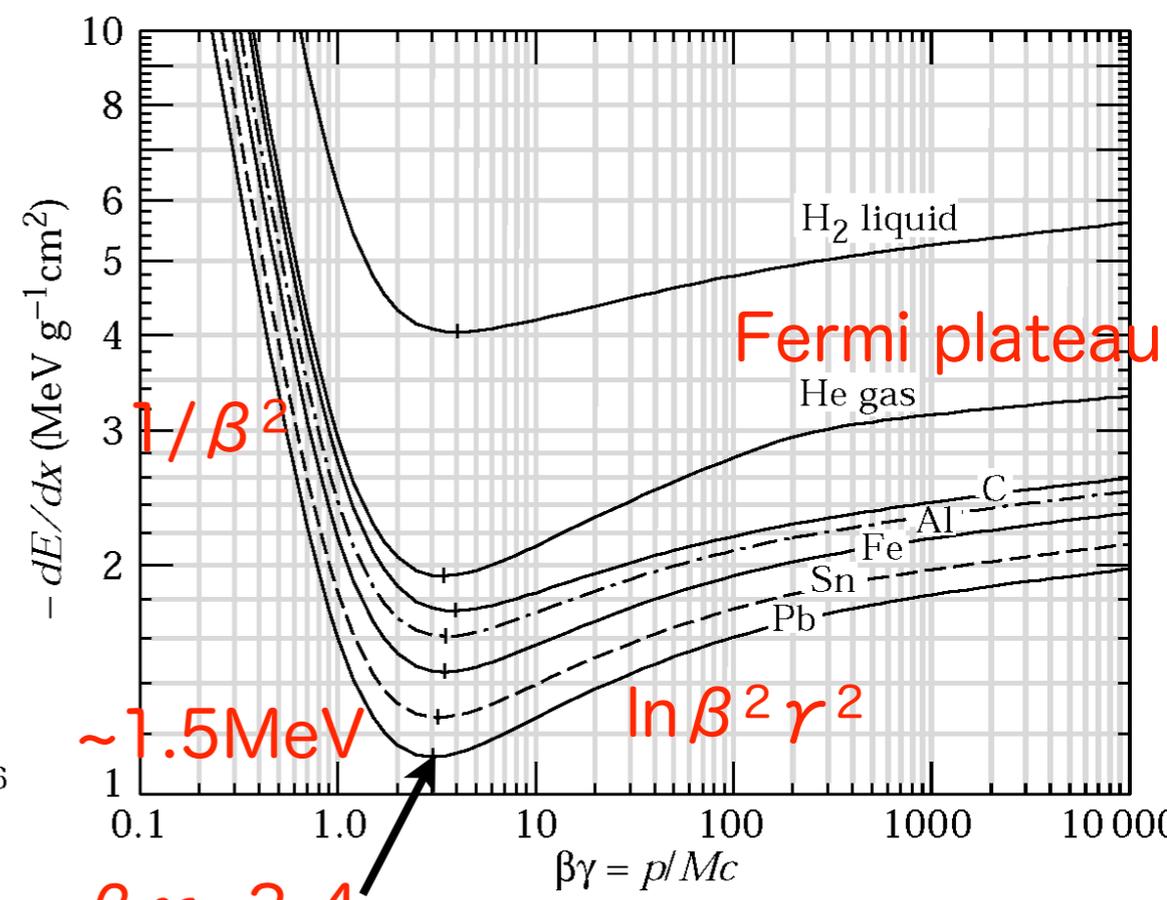
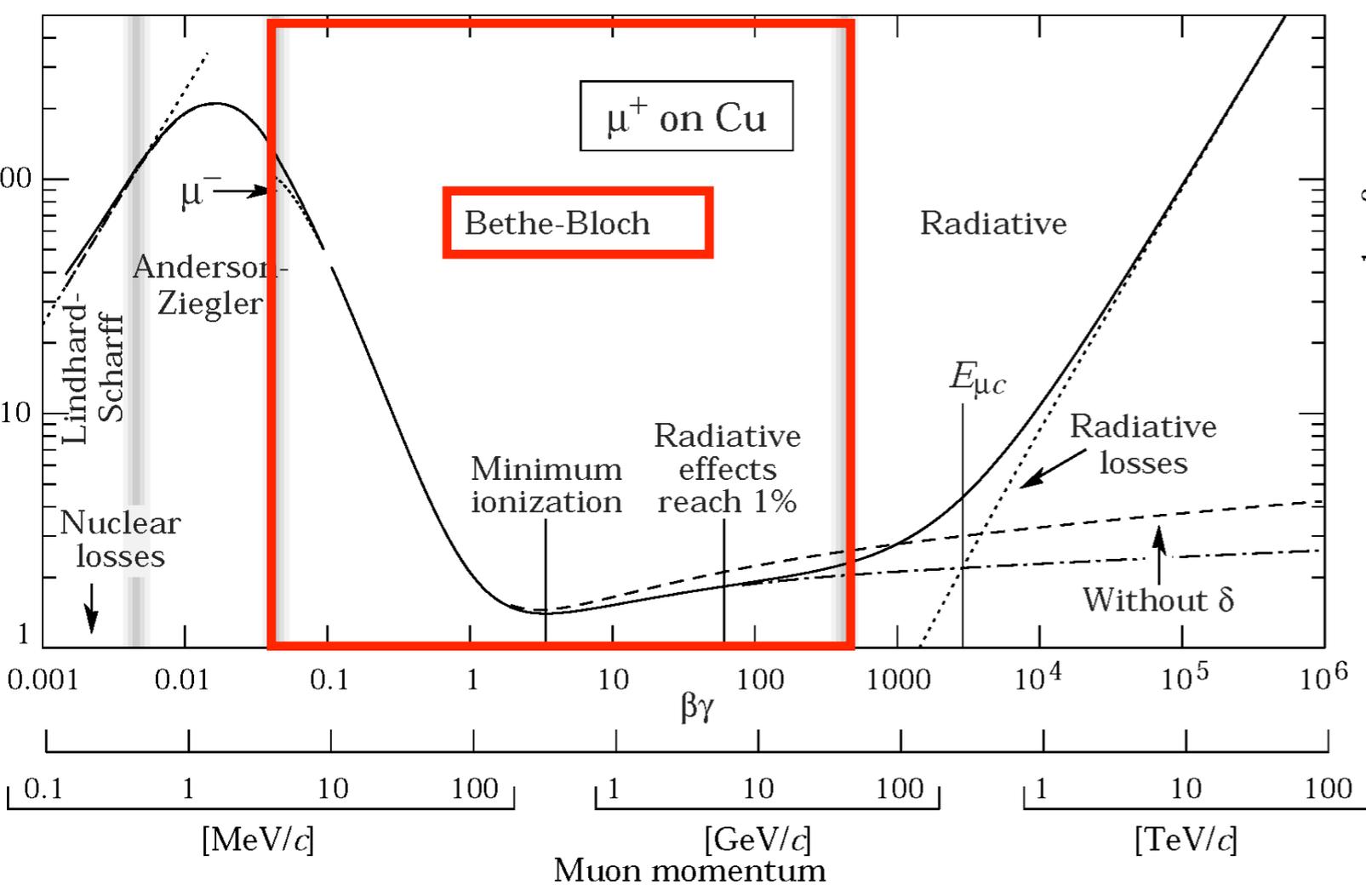
荷電粒子と測定器物質との相互作用

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

$\frac{Z}{A}$ に比例する → ほとんどの物質 (標的の個性) によらない

入射粒子の電荷の2乗 (z^2) に比例する

β の関数、入射粒子の質量に依らない → 粒子識別に使える

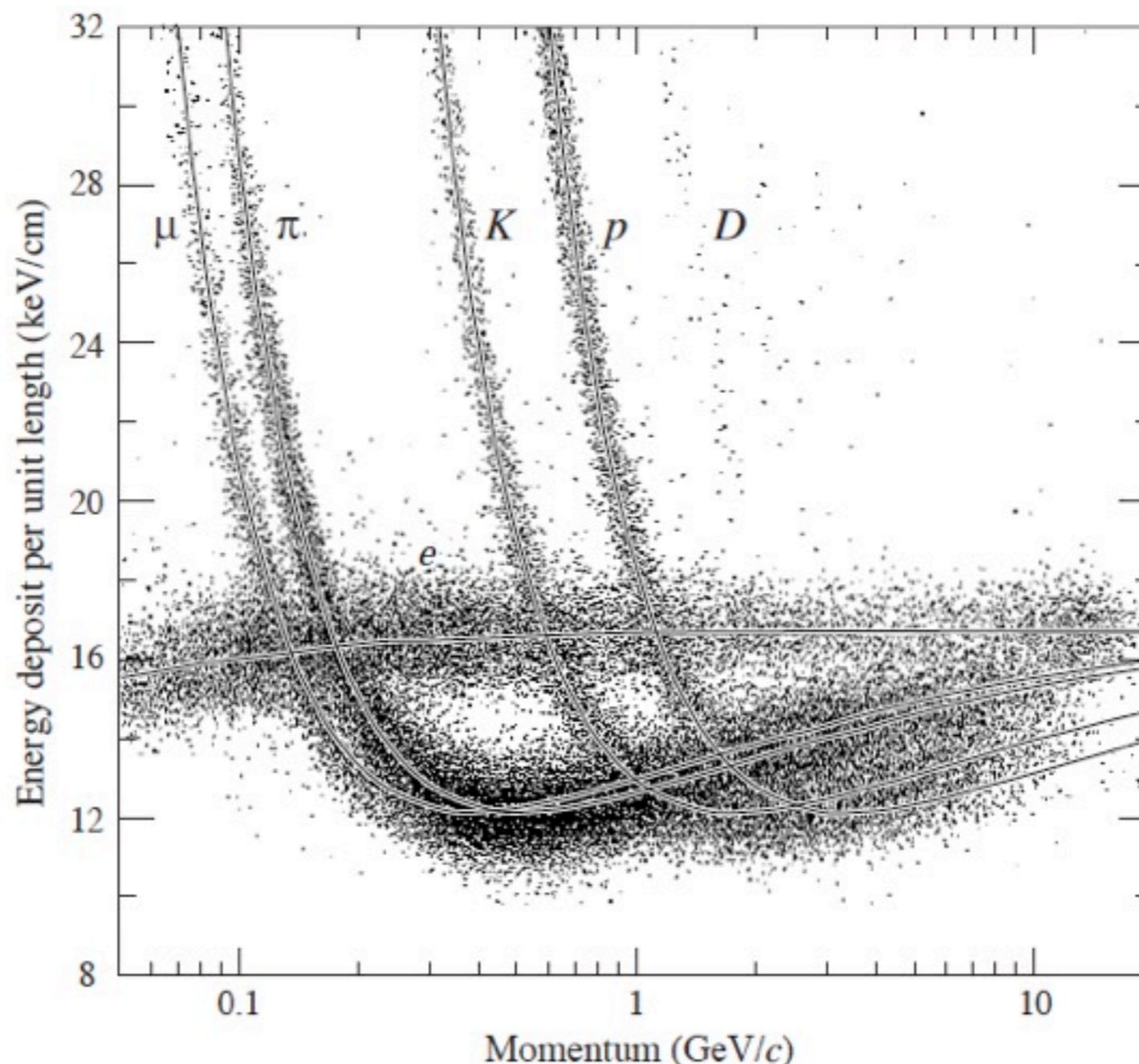


$\beta \gamma \sim 3-4$
 minimum ionizing particles, (MIPS)

dE/dxを用いた粒子識別

β $\gamma = p/M$ の関数で粒子の種類に関係なく同じ分布

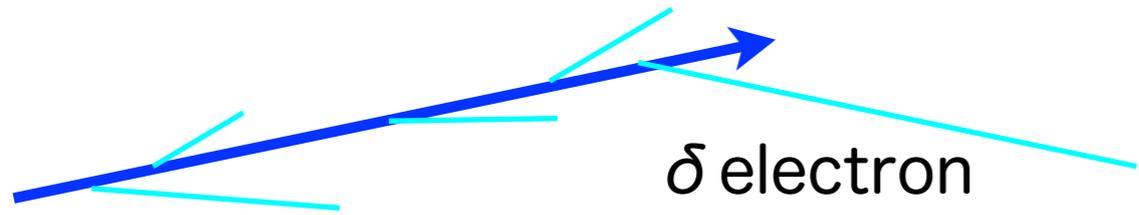
→ $p = M \beta \gamma$ の関数でプロットすると粒子の種類に応じたズレ



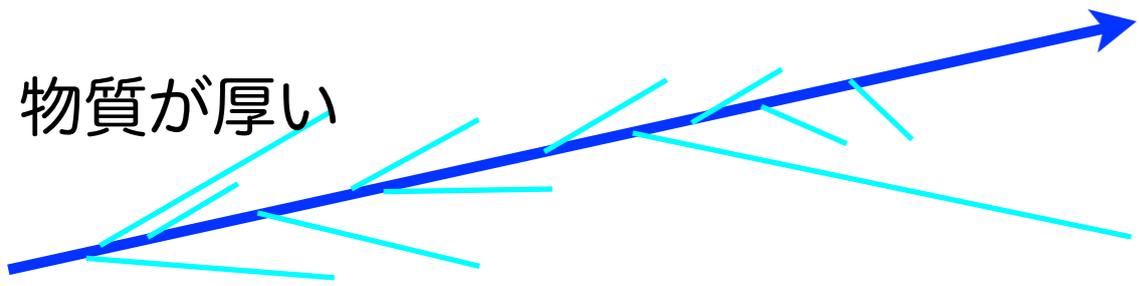
荷電粒子と測定器物質との相互作用

Bethe-Blochは、エネルギー損失の平均値であることに注意

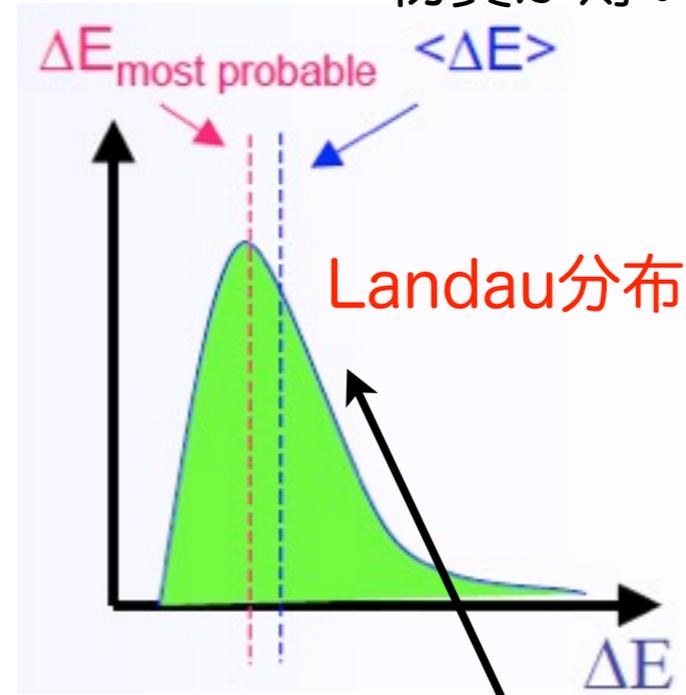
物質が薄い、密度が小さい



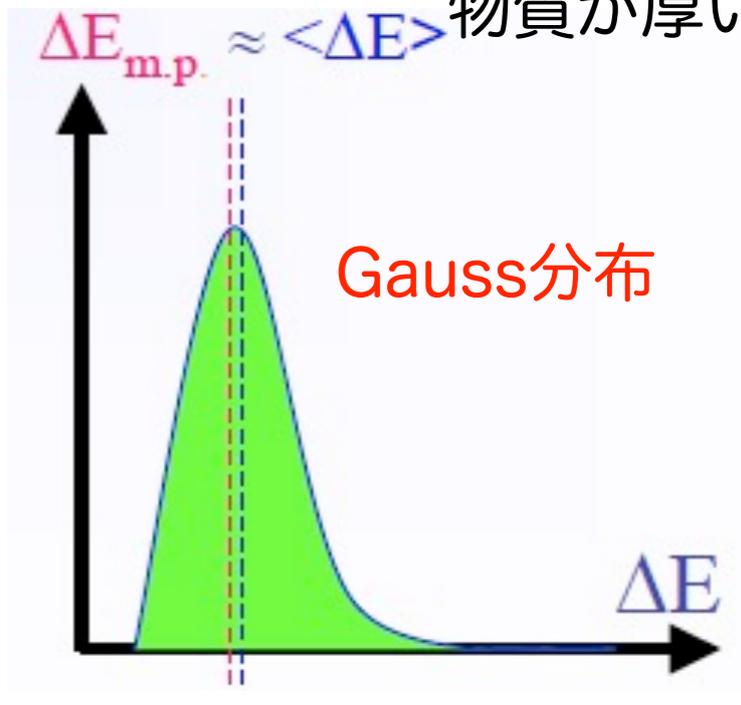
物質が厚い



物質が薄い

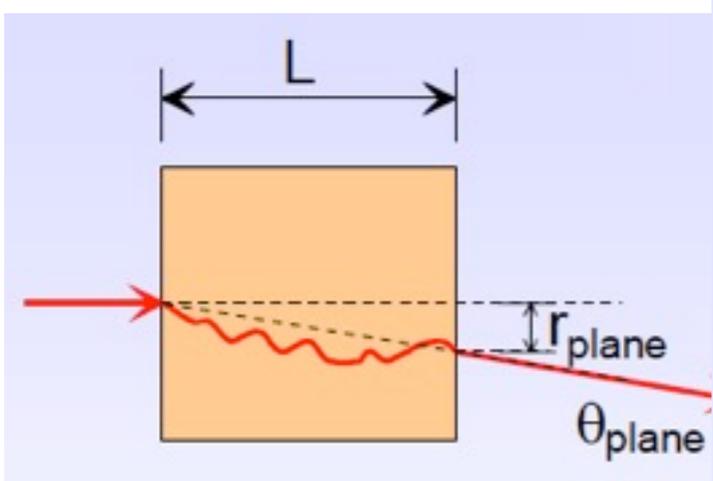


物質が厚い

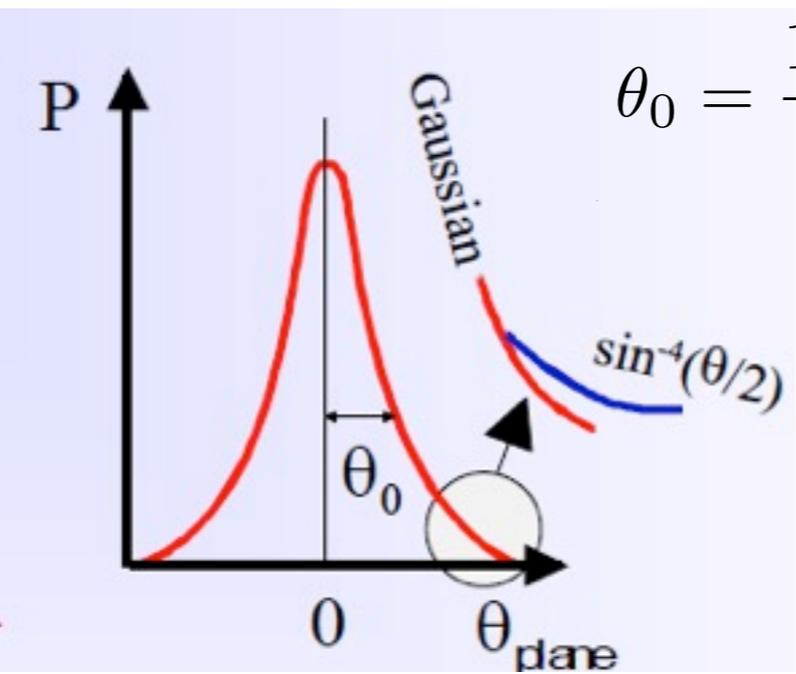


300 μmのSi : ΔE_{MP}=82keV、<ΔE>=115keV

多重散乱 特に低運動量で重要



ラザフォード散乱



$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right]$$

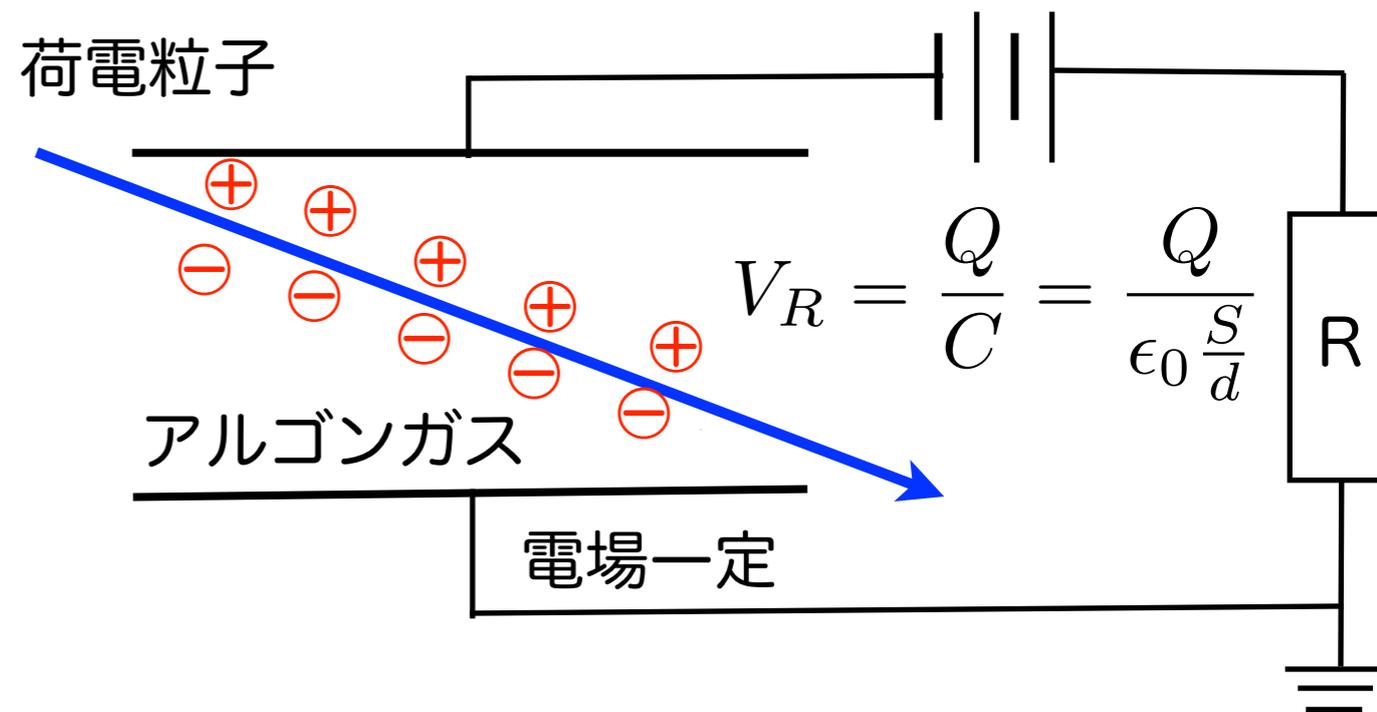
X₀ : 放射長 (radiation length)

$$X_0 = \frac{716.4 \text{ g cm}^{-2} A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$

荷電粒子検出器：ガス検出器

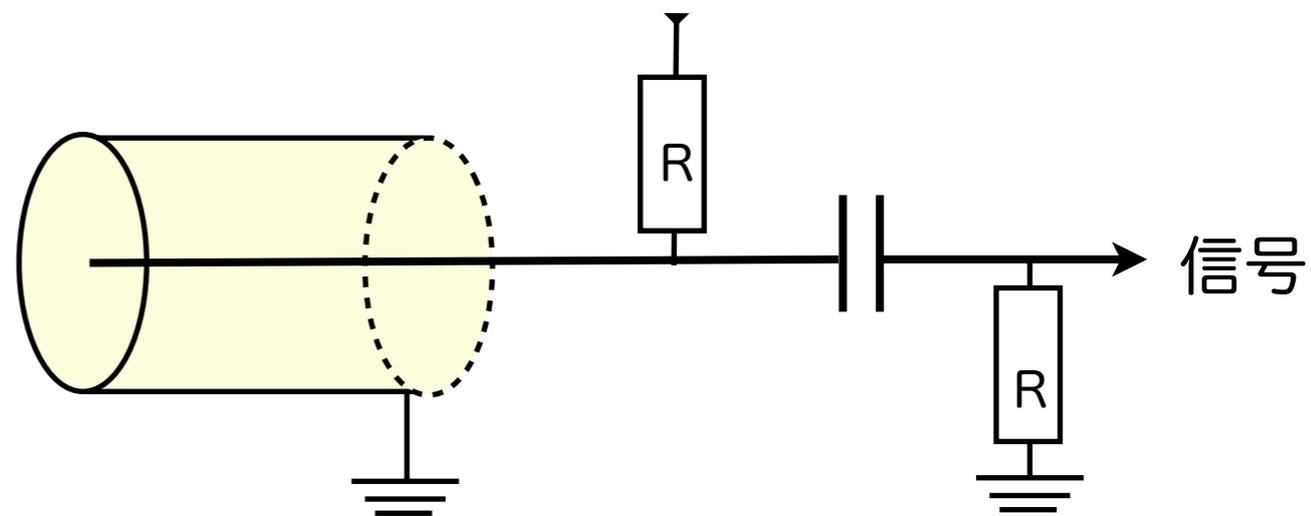
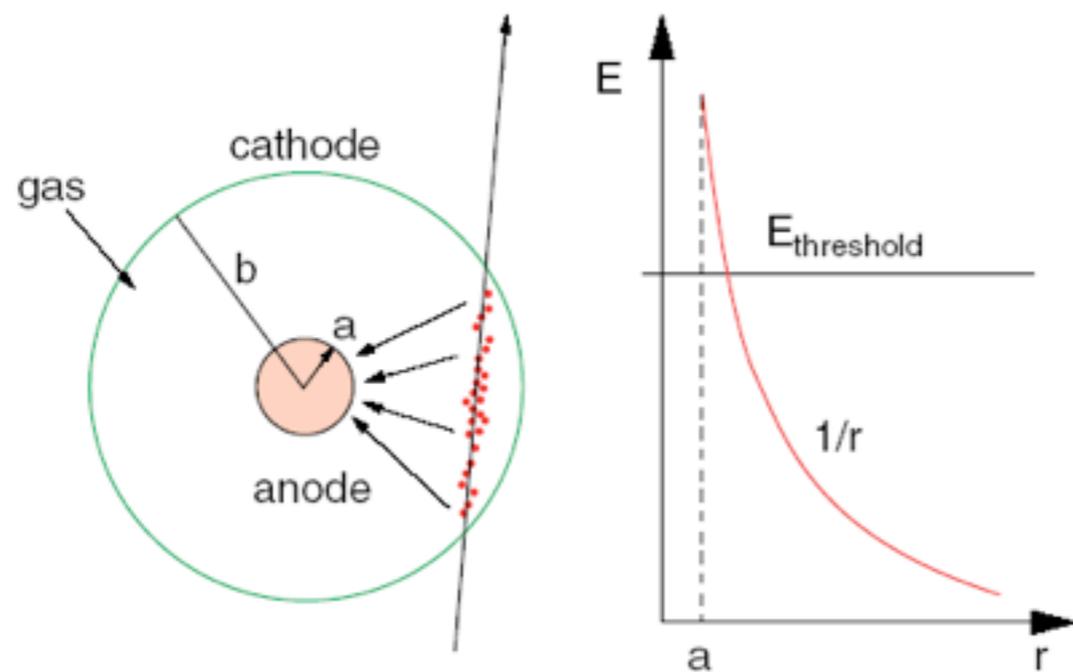
電離箱

1. 荷電粒子の dE/dx によってガス分子がイオン化
2. 電子・正イオン対の電場によるガス中での移動 (ドリフト)



ワイヤーチェンバー

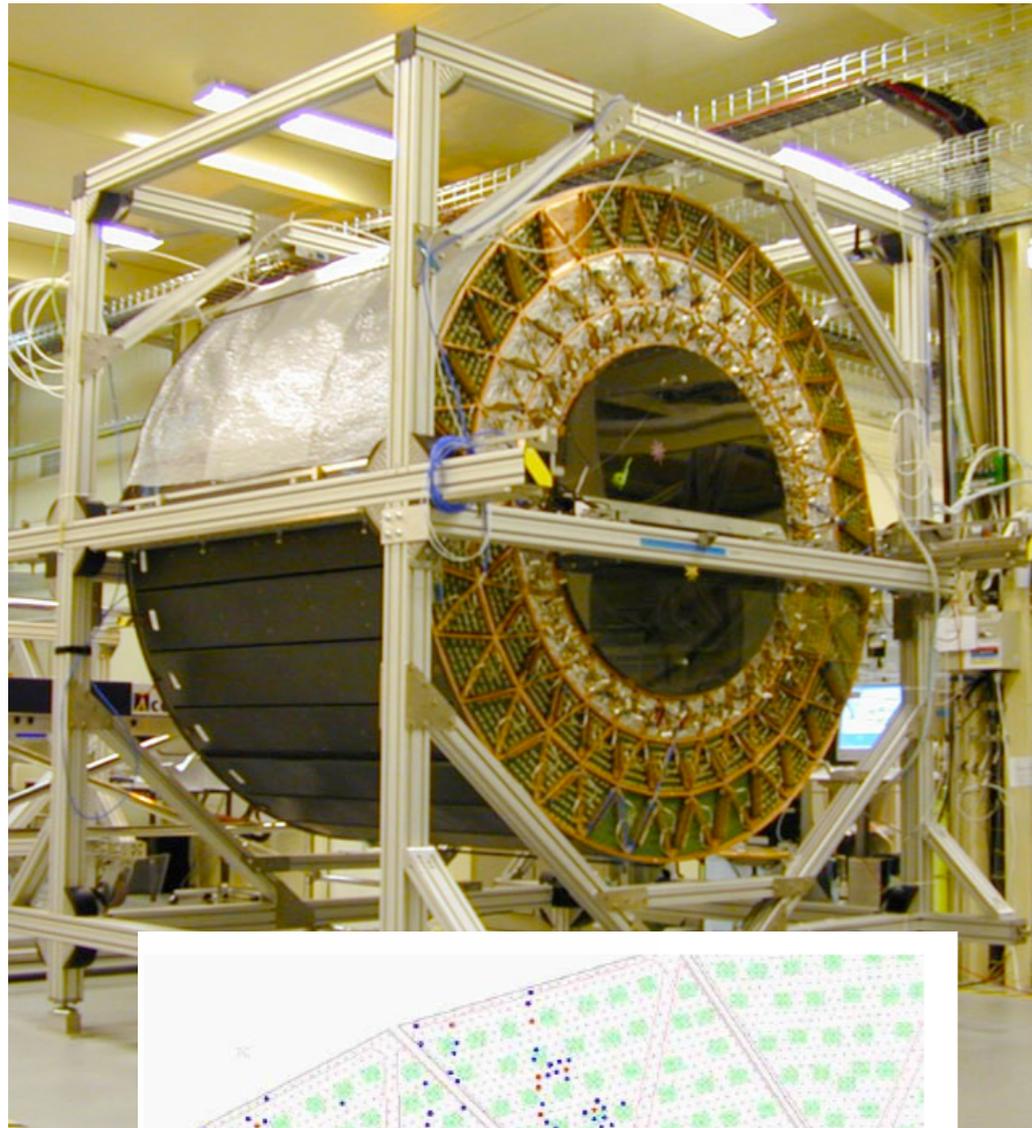
電子雪崩による増幅 (ガス増幅)



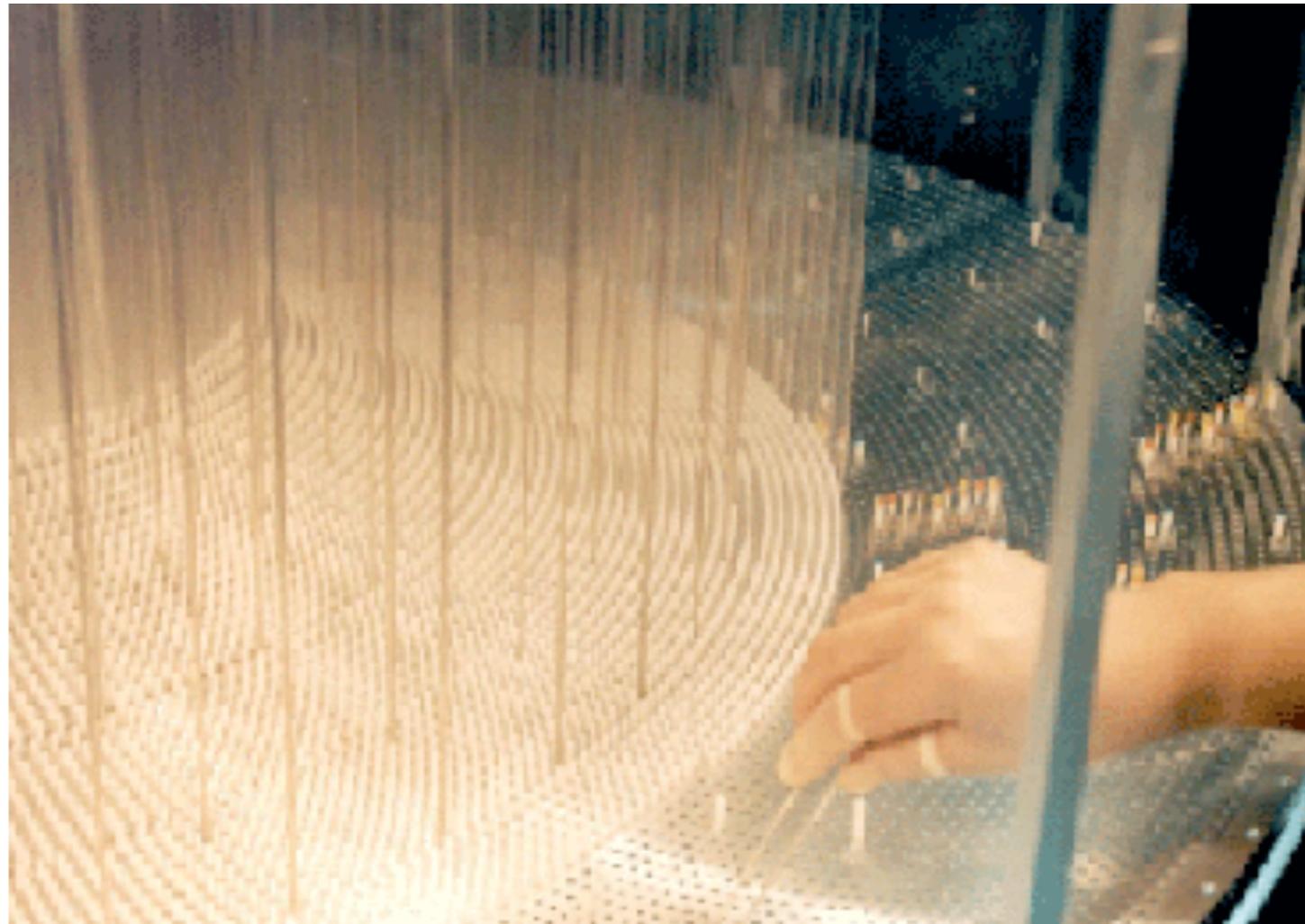
$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \quad V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{r}{a}$$

様々なガス検出器

Transition Radiation Tracker (ATLAS)



Central Drift Chamber (Belle)



荷電粒子の運動量測定

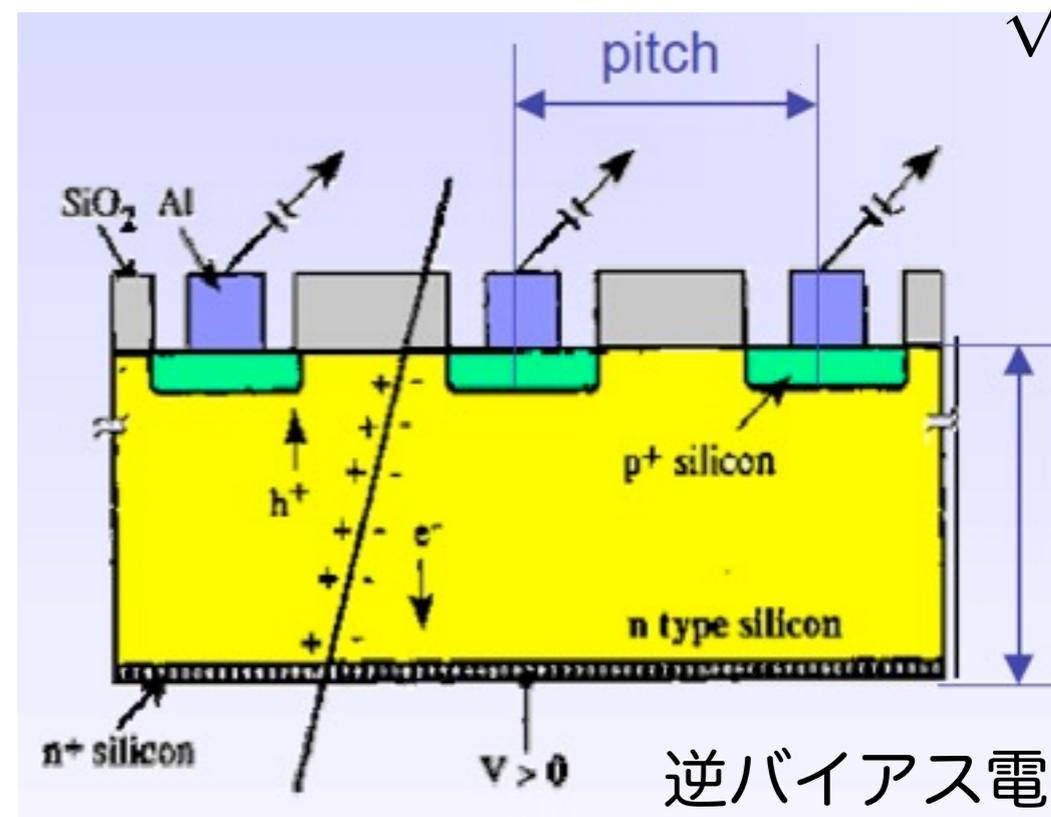
荷電粒子検出器：シリコン検出器

$dE/dx(\text{Si, MIPs}) = 3.88 \text{ MeV/cm}$
→ 116keV for 300 μm thickness

電子・正孔対生成に必要なエネルギー：3.6eV
→ 108 e-h/ μm

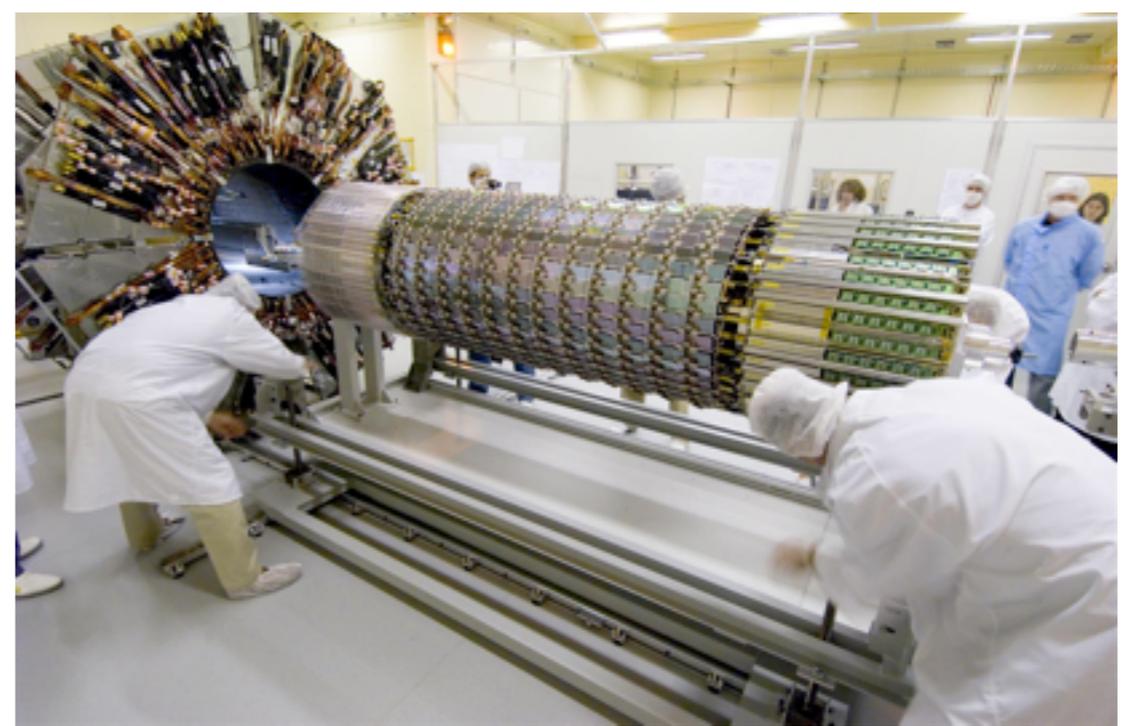
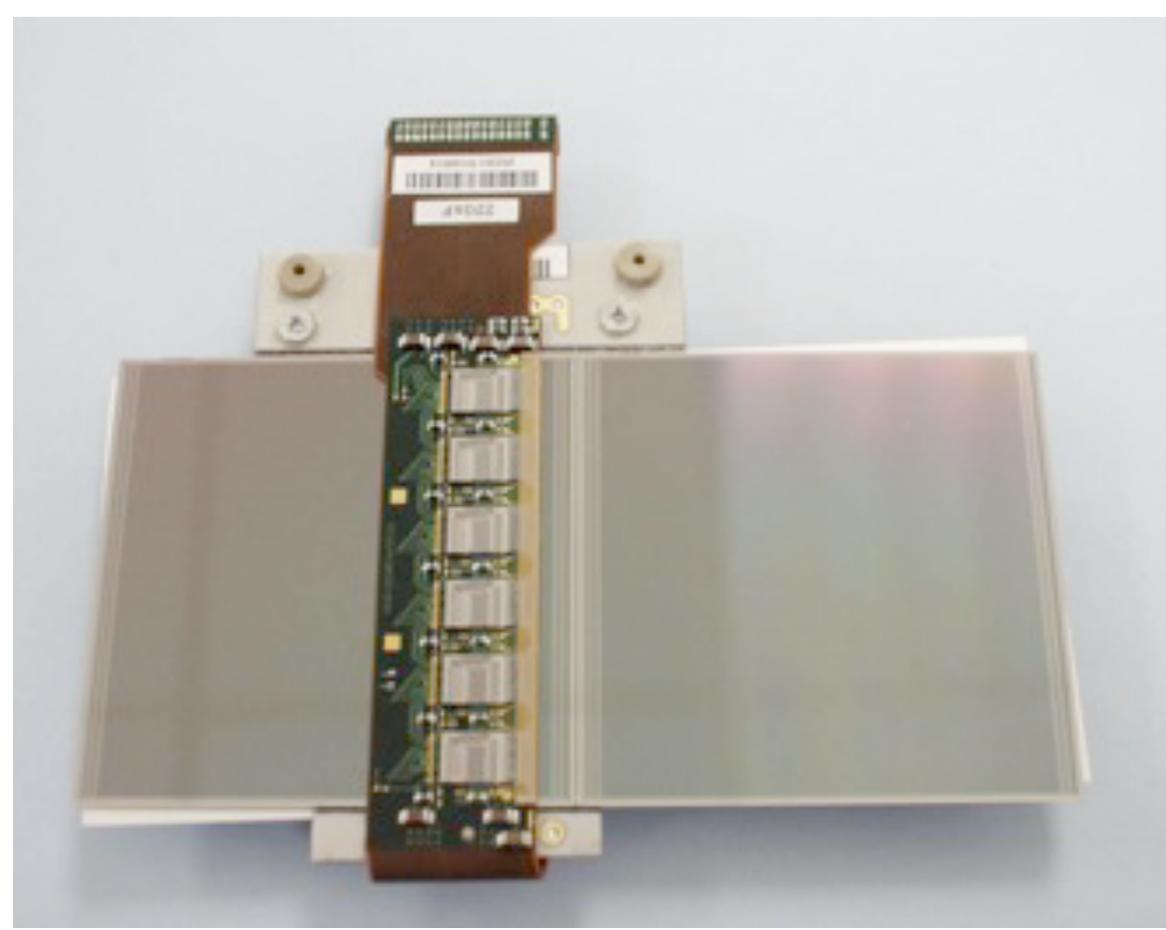
32000 電子・正孔対

typical : 20 μm - 150 μm $\sigma = \frac{d}{\sqrt{12}}$



typical 300 μm

逆バイアス電圧



荷電粒子検出器による運動量測定

荷電粒子の軌跡を測定する検出器

→磁場中の軌跡の測定から運動量を測定

$$p_T(\text{GeV}/c) = 0.3 \times B \times R \text{ (T} \cdot \text{m)}$$

sagitta(s)を測定

$$\frac{L}{2R} = \sin(\alpha/2) \rightarrow \alpha \simeq \frac{L}{R} = \frac{0.3LB}{p_T}$$

$$s = R(1 - \cos(\alpha/2)) \simeq R \frac{\alpha^2}{8} = \frac{0.3L^2 B}{8p_T}$$

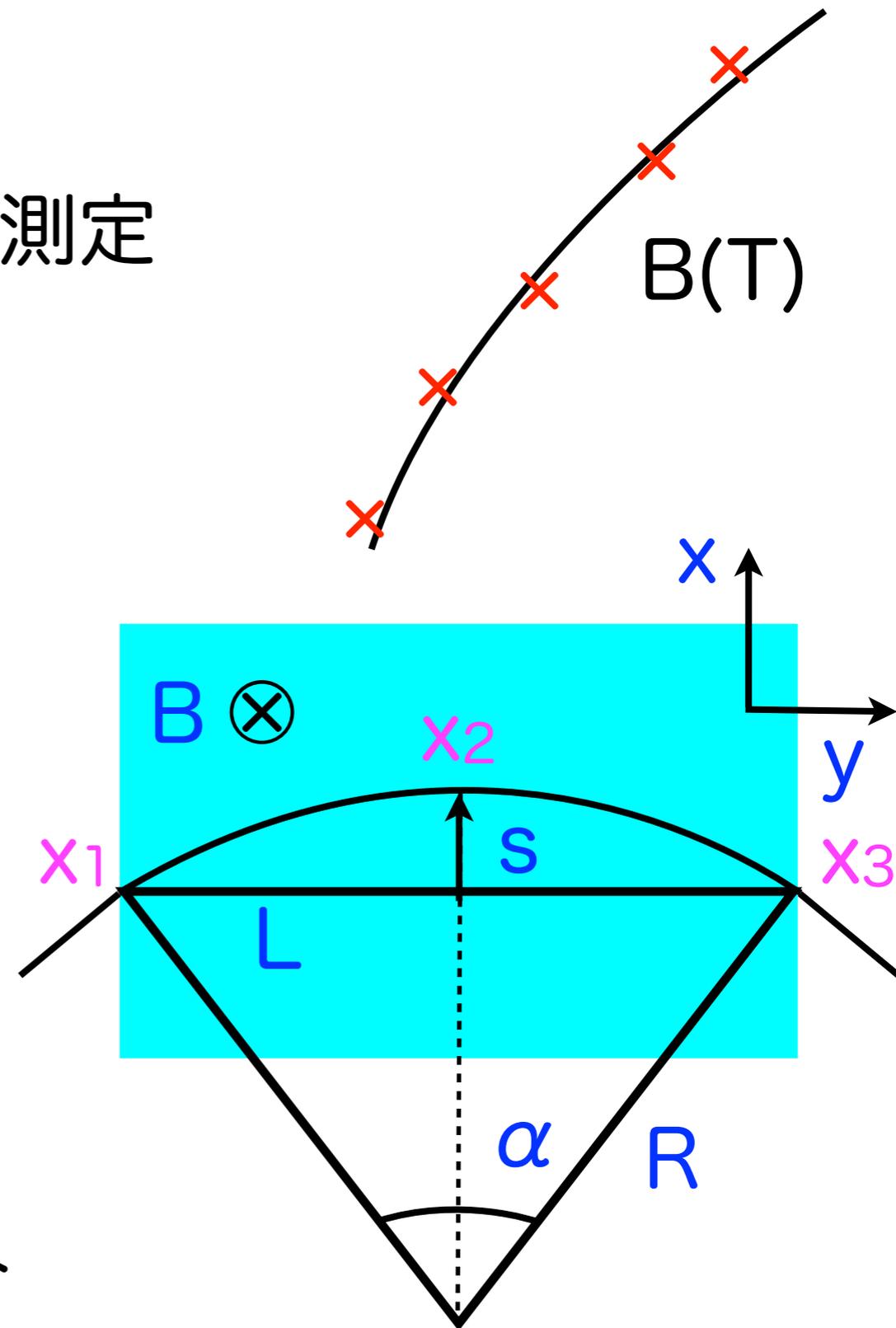
3点でsagittaを測定した場合

$$s = x_2 - \frac{x_1 + x_3}{2}$$

$$\left(\frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right)^{meas} = \frac{\sigma(s)}{s} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}}\sigma(x)}{s} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}}\sigma(x) \cdot 8p_T}{0.3BL^2}$$

N点(N>10)でsagittaを測定した場合

$$\left(\frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right)^{meas} = \frac{\sigma(x) \cdot p_T}{0.3 \cdot BL^2} \sqrt{\frac{720}{N+4}}$$



磁場 大
距離 大

分解能 良

運動量測定分解能

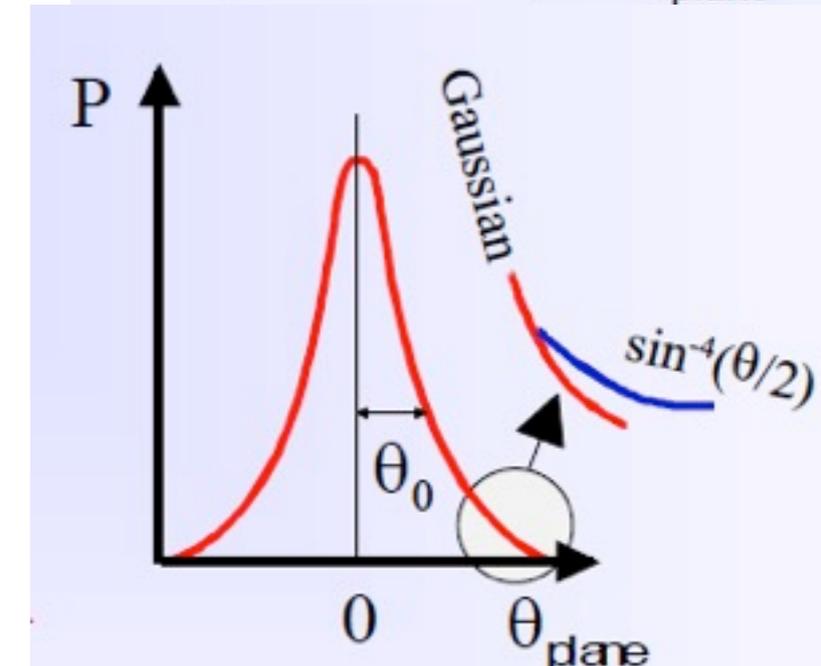
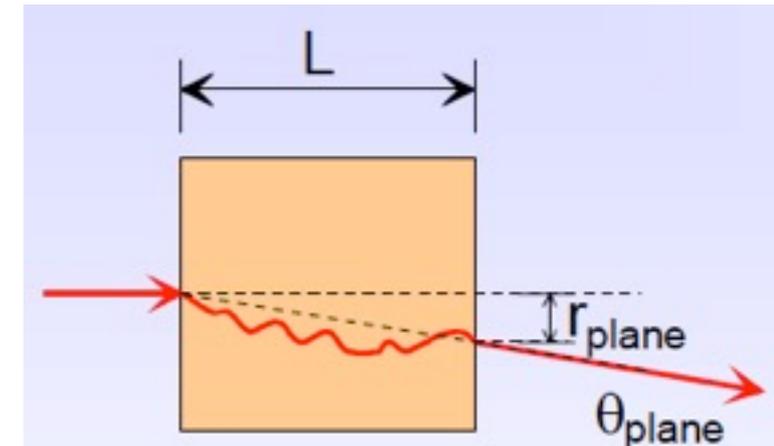
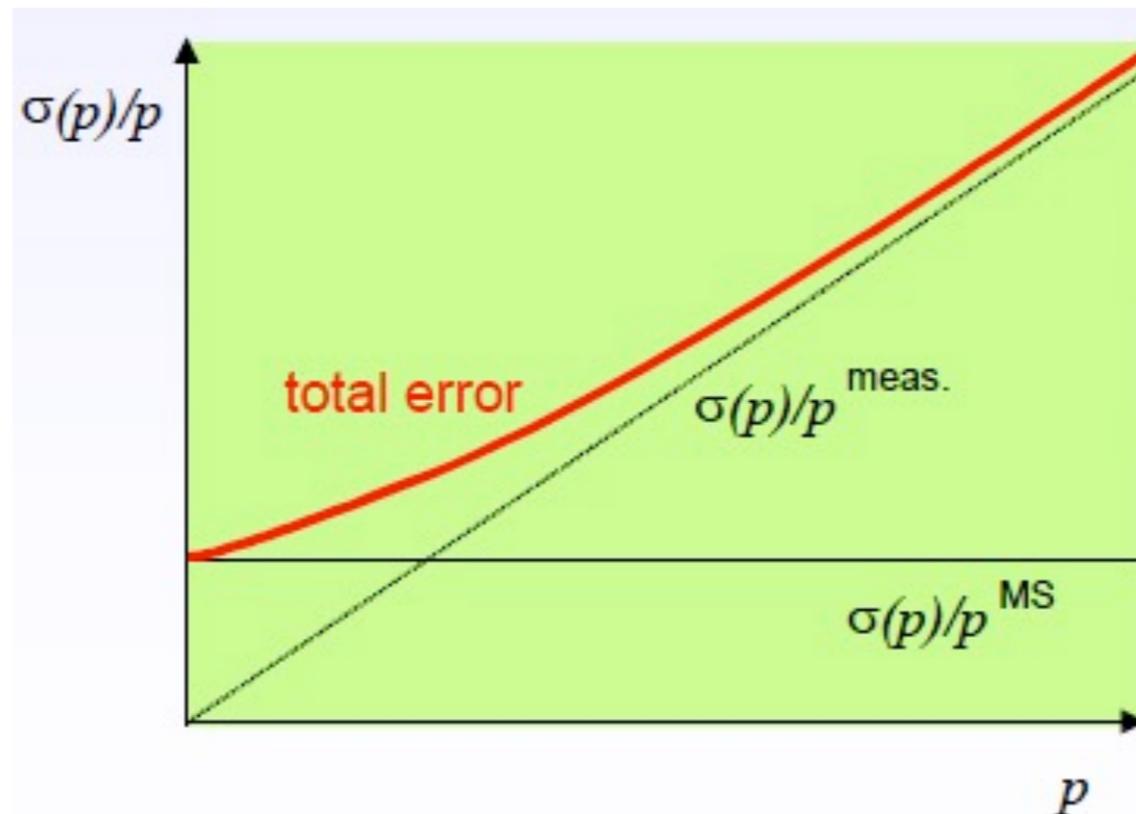
多重散乱の影響

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{L}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{L}{X_0} \right) \right] \propto \frac{1}{p} \sqrt{\frac{L}{X_0}}$$

多重散乱による運動量分解能

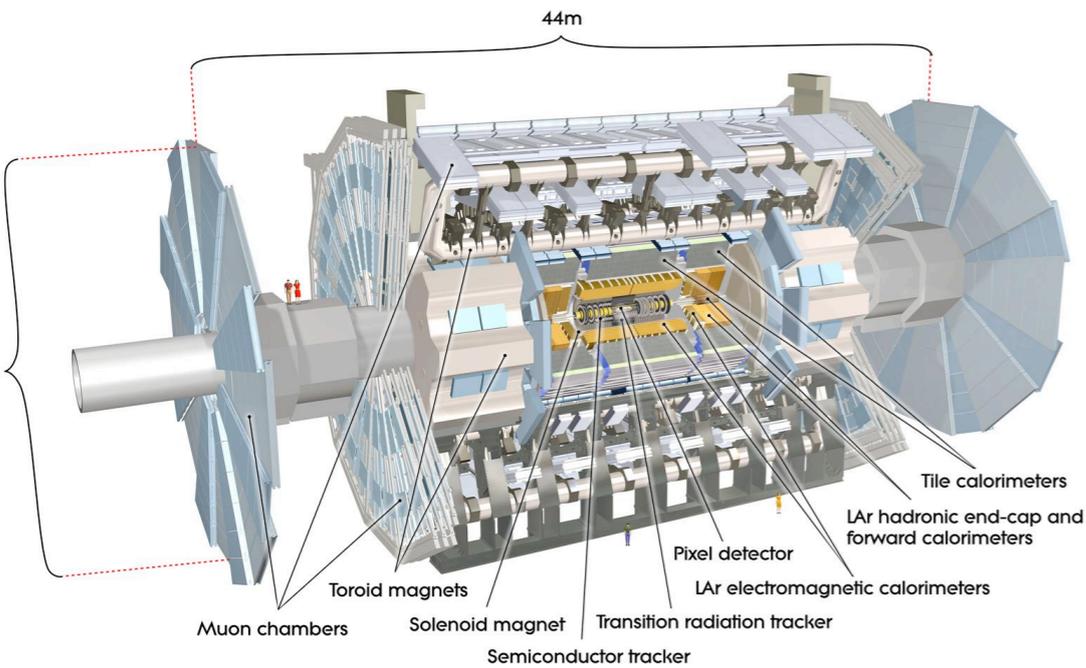
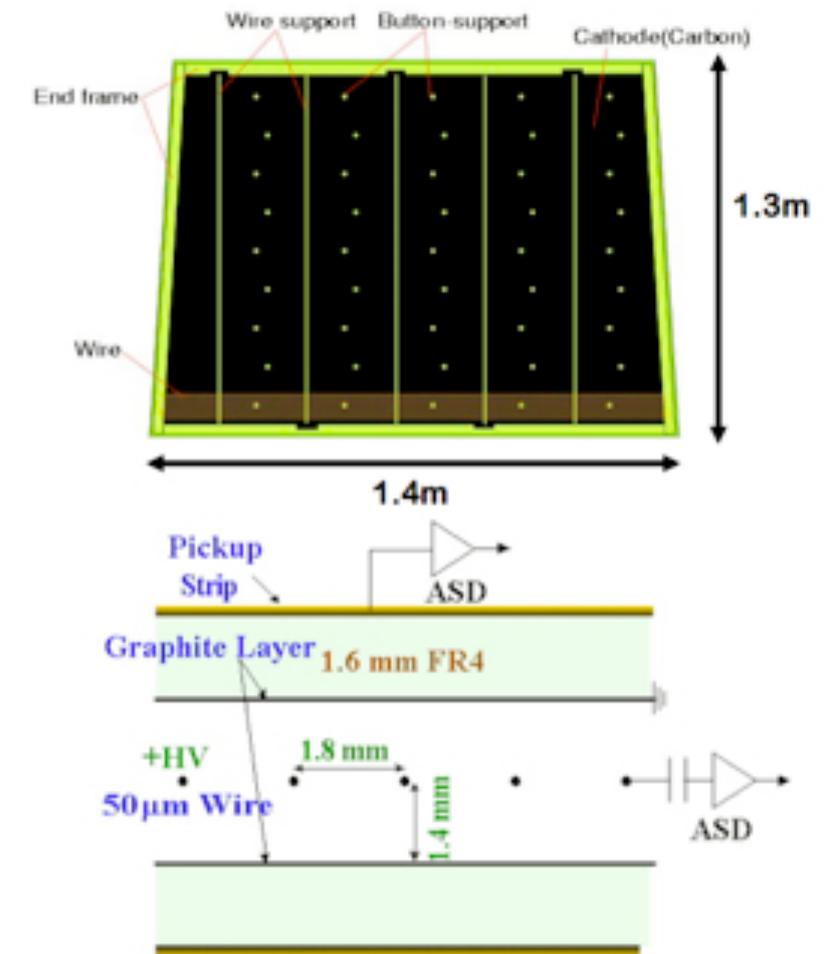
$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma(p_T)}{p_T} &\propto \sigma(x) \cdot p_T \\ (\sigma(x))^{MS} &\propto \theta_0 \propto \frac{1}{p} \end{aligned} \right\} \left(\frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right)^{MS} \sim \text{const.}$$

まとめると、



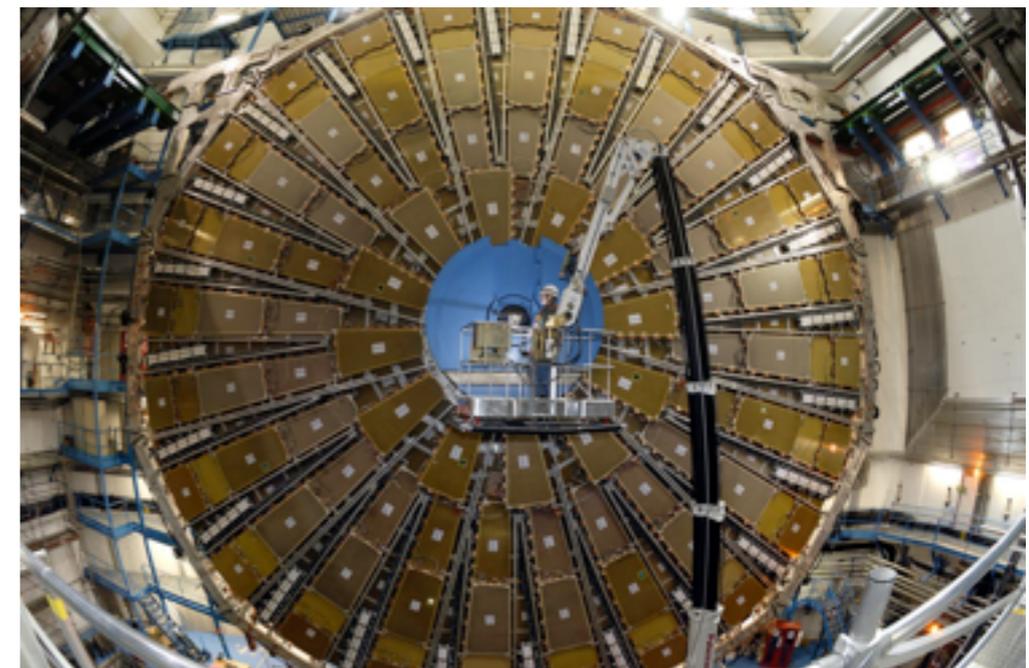
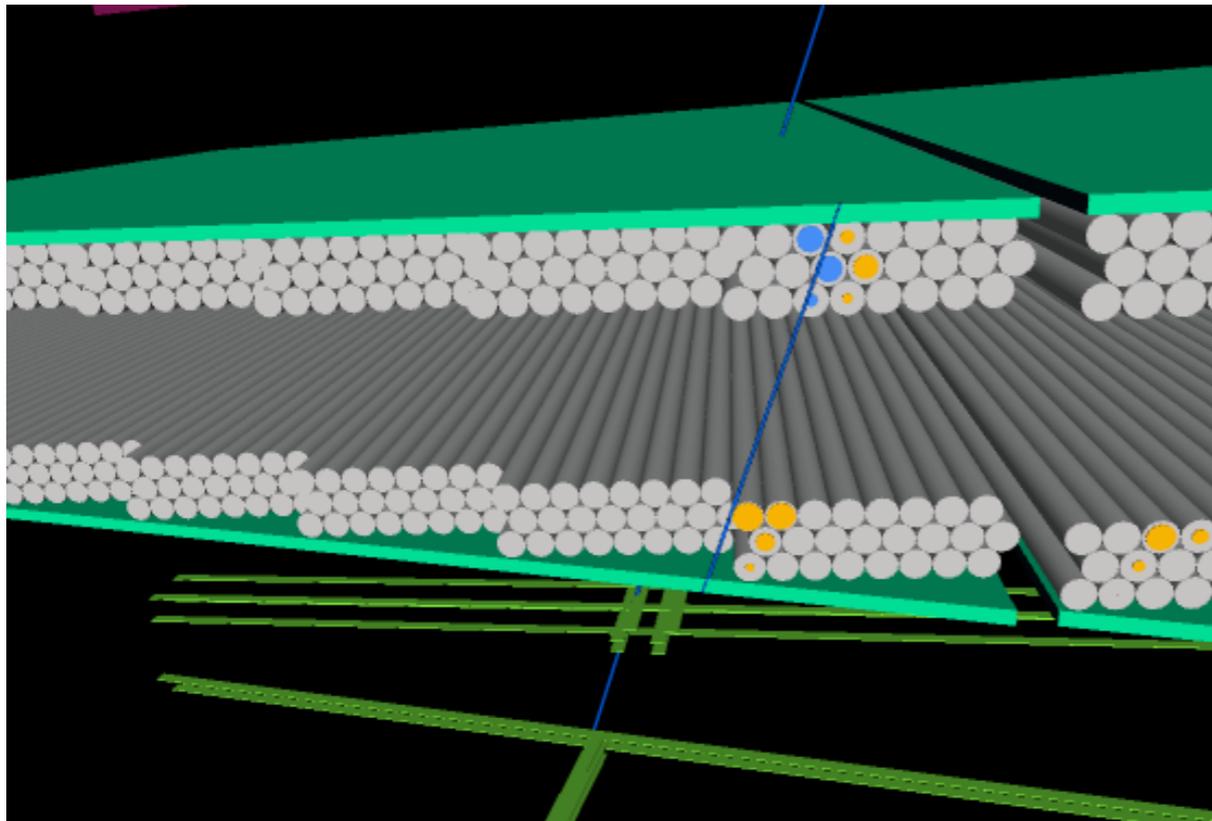
μ 粒子検出器

Thin Gap Chamber (ATLAS)

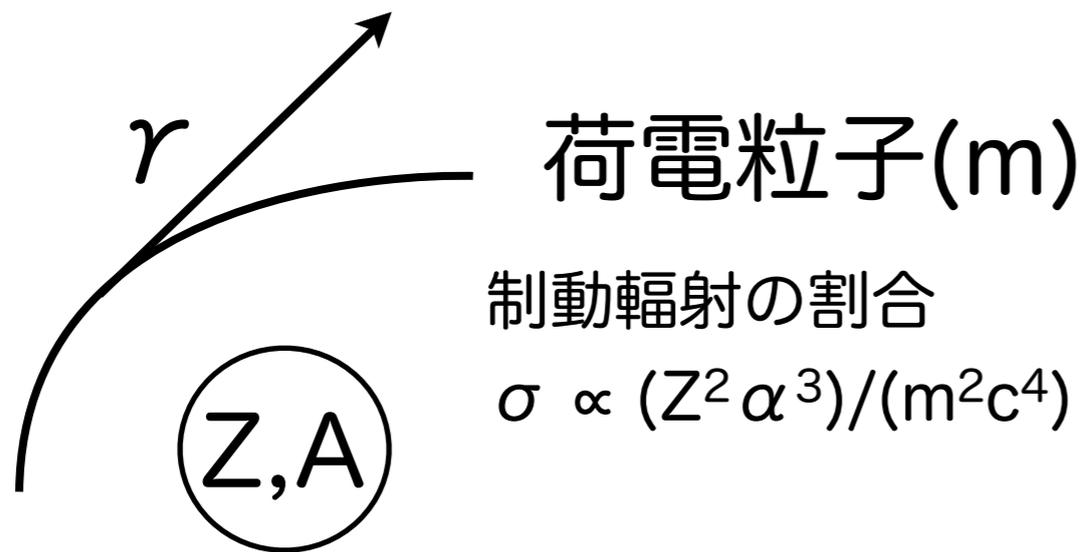


様々な物質を通り抜けてやってくる荷電粒子→ μ 粒子
制動放射も強い相互作用もしない

Monitored Drift Tube (ATLAS)



電子と測定器物質との相互作用



	荷電粒子		中性粒子	
電磁シャワー○	e [±]		γ (π ⁰)	
電磁シャワー×	ハドロン	レプトン	ハドロン	レプトン
	π [±] , K [±] , p	μ [±]	n	ν

イオン化によるエネルギー損失
原子核の電場による制動輻射

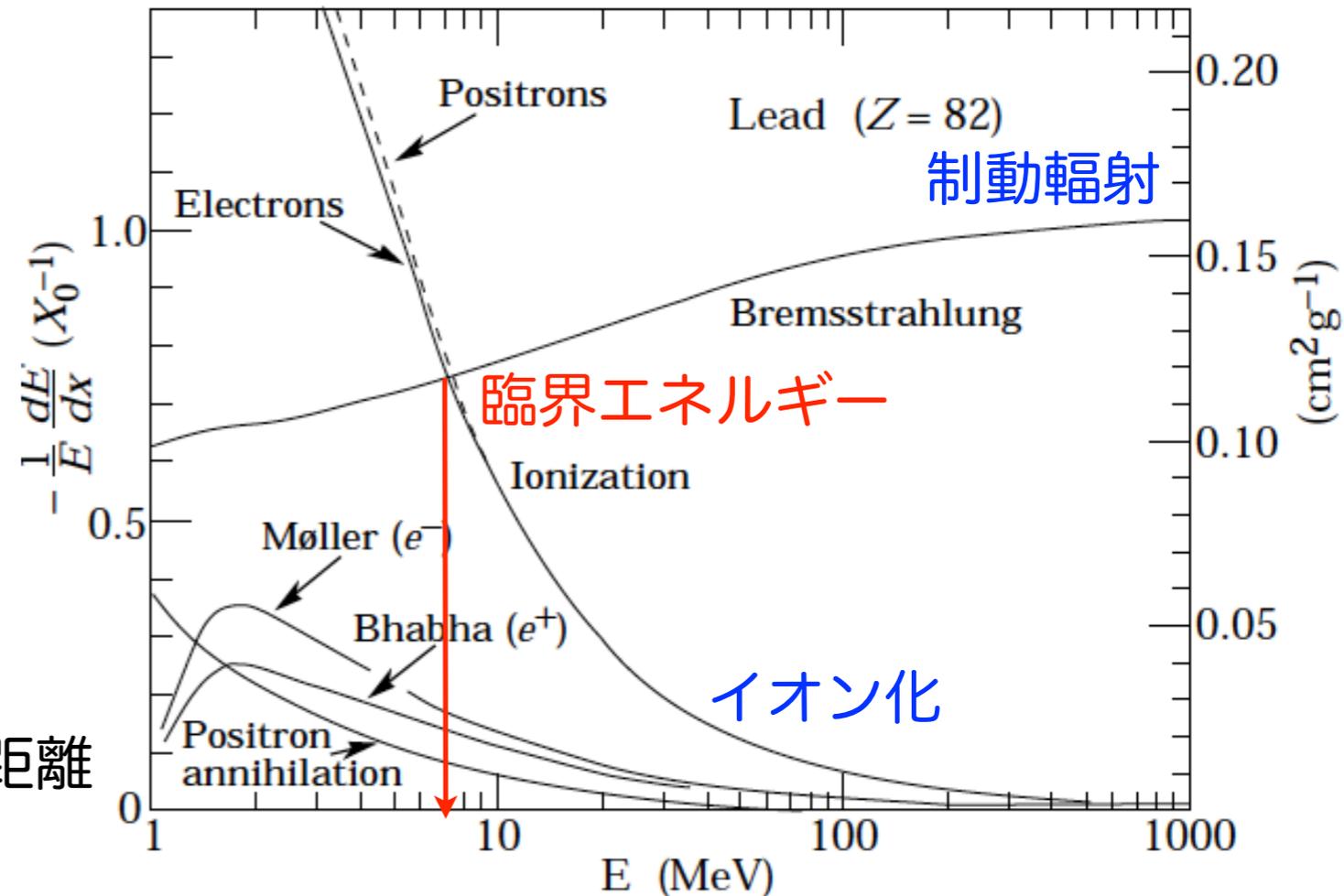
$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = -\frac{E}{X_0}$$

$$E = E_0 e^{-x/X_0}$$

放射長X₀：エネルギーが1/eに減衰する距離

臨界エネルギー：(dE/dx)_{brem}=(dE/dx)_{ion}のエネルギー

$$(dE/dx)_{brem} \propto Z^2, \quad (dE/dx)_{ion} \propto Z \quad \rightarrow \quad E_C = \frac{800 \text{ MeV}}{Z + 1.2}$$



光子と測定器物質との相互作用

	荷電粒子		中性粒子	
電磁シャワー○	e [±]		γ (π ⁰)	
電磁シャワー×	ハドロン	レプトン	ハドロン	レプトン
	π [±] , K [±] , p	μ [±]	n	ν

レイリー散乱：光子の原子による弾性散乱。

光子は方向を変えるだけ。低エネルギーで重要

光電効果：光子が原子に吸収され、光電子が放出。

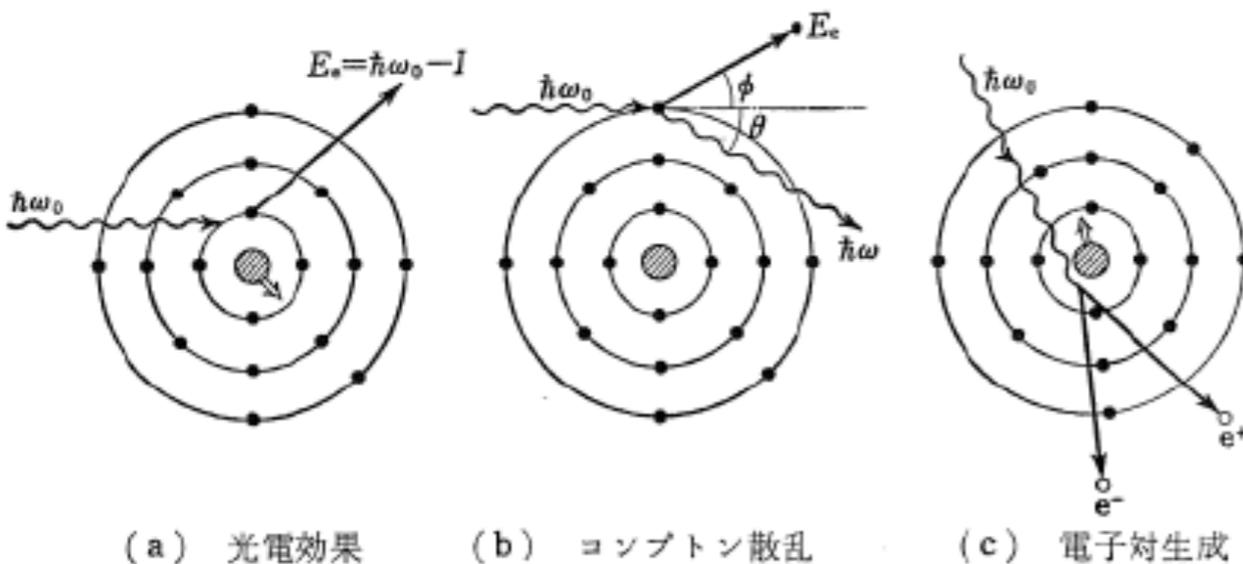
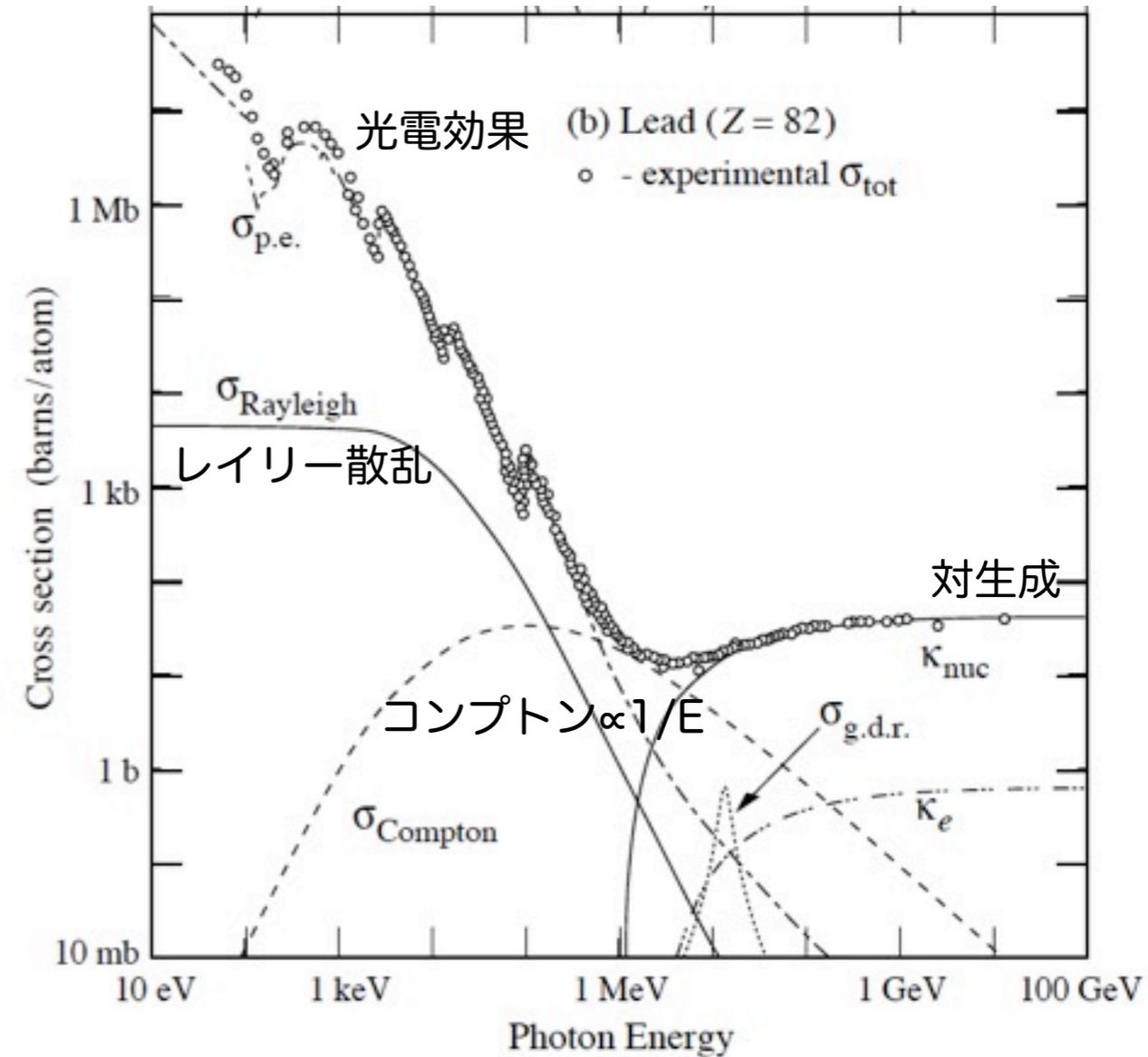
0.1~0.5MeV付近で重要

コンプトン効果：光子と自由電子の反応

0.5~5MeV付近で重要

電子陽電子対生成：原子核の強い電場に曝された時に起こる。

5MeV以上で重要



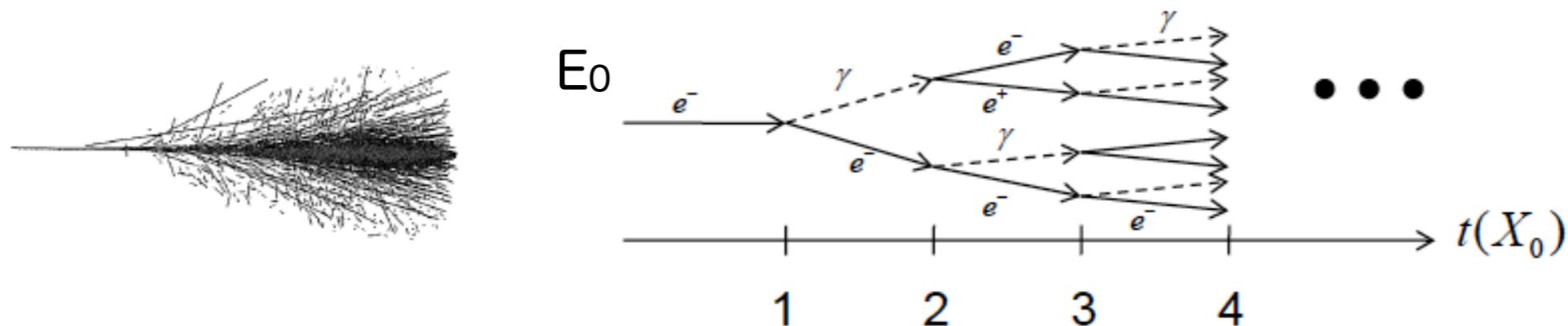
エネルギーフロンティア実験の場合：
対生成の断面積が重要

$$\sigma_{pp} = 4Z^2 \alpha r_e^2 \left[\frac{7}{9} \ln \left(\frac{183}{Z^{1/3}} \right) - \frac{2}{9} \right] = \frac{7}{9} \frac{A}{X_0 N_A}$$

電磁シャワー

入射電子のエネルギーが大きい

制動輻射による高エネルギー光子 → 電子・陽電子対生成



$$n_e(t) = 1, 3, 5, 11, 21 = [2^{t+1} + (-1)^t]/3$$

$$n_\gamma(t) = 1, 1, 3, 5, 11 = [2^t - (-1)^t]/3 \quad \rightarrow \quad n_e(t) + n_\gamma(t) = 2^t \quad \text{総粒子数}$$

電子一個のエネルギー： $E = E_0/2^t$

臨界エネルギー(E_C)に達して止まる → $E_C = E_0/2^{t_{max}}$

イオン化、コンプトン散乱によるエネルギー損失が大きくなるため

縦方向の広がり： $t_{max} = \frac{\ln(E_0/E_C)}{\ln 2}$ $N_{max} = 2^{t_{max}} = \frac{E_0}{E_C}$ シャワーの最大

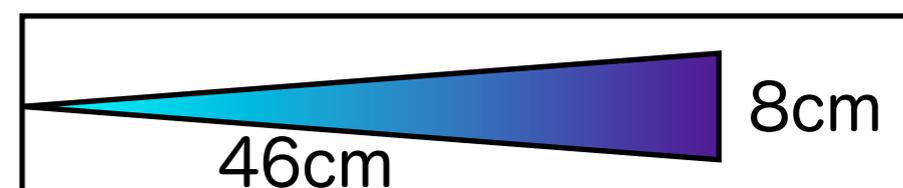
$$t_{95\%} \sim t_{max} + 0.08Z + 9.6$$

横方向の広がり： $R_M = \frac{21 \text{ MeV}}{E_C} X_0$ モリエール半径 90%のエネルギーが半径 $1R_M$ 以内に含まれる

例) 鉛ガラスの中で $E_0=100\text{GeV}$ の電子

$X_0 \sim 2\text{cm}$

$E_C=11.8\text{MeV}$, $t_{max} \sim 13$, $t_{95\%} \sim 23$



ハドロンシャワー

	荷電粒子		中性粒子	
EM ○	e [±]		γ (π ⁰)	
EM ×	Had	Lep	Had	Lep
	π [±] , K [±] , p	μ [±]	n	ν

強い相互作用による非弾性多重粒子生成シャワー

シャワーのパラメータ：

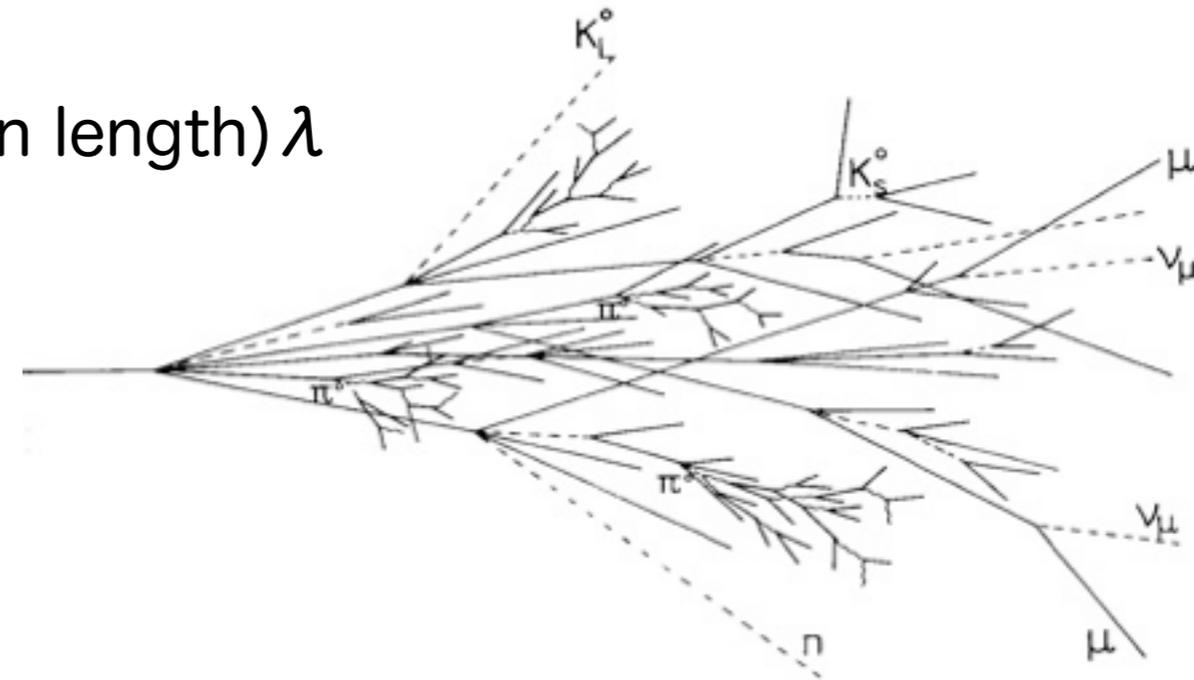
放射長(radiation length)X₀→吸収長(interaction length)λ

一般的に、λ >> X₀

鉄：X₀=1.8cm、λ=16.8cm

大きなAが必要

電磁シャワーとハドロンシャワーを分離



最終的に、π[±], π⁰, p, n, K, ...

π⁰→γγは電磁シャワー

電磁シャワーに比べ断面積小さい

回数少ない

エネルギーの多くが原子核の分解に利用

遅い中性子が観測され難い

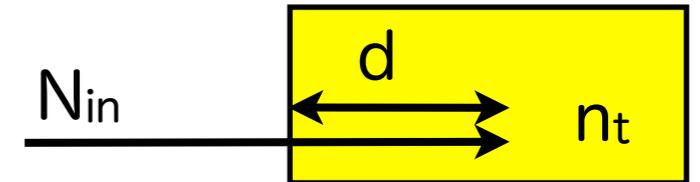
π[±]→ℓνのニュートリノが測定不可能

→ エネルギー分解能良くない

	Z	A	ρ [g/cm ³]	X ₀ [g/cm ²]	λ [g/cm ²]
Hydrogen	1	1.01	0.0899	63	50.8
Helium	2	4.00	0.1786	94	65.1
Carbon	6	12.01	2.265	43	86.3
Silicon	14	28.09	2.33	22	106.0
Iron	26	55.85	7.87	13.9	131.9
Copper	29	63.55	8.96	12.9	134.9
Lead	82	207.19	11.35	6.4	194.0

平均自由行程

入射粒子数 N_{in} (/sec)、単位体積あたり n_t 個の物質粒子数がある時、物質中を長さ d 進む間の衝突数



$$N_{in} \cdot \sigma_{tot} \cdot n_t \cdot d \quad \sigma_{tot} = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \quad \text{全断面積}$$

平均自由行程：1個の粒子が平均1回衝突するのに必要な長さ

$$\lambda = \frac{1}{n_t \cdot \sigma_{tot}} = \frac{A}{\rho \cdot N_A \cdot \sigma_{tot}}$$

ρ : 物質密度 (g/cm³)

N_A : アボガドロ数 (6.023 x 10²³ /mol)

A : 1molあたりの質量

x だけ進んだ時の粒子数は、

$$\frac{dN}{N} = -\frac{dx}{\lambda} \quad \rightarrow \quad N = N_0 e^{-x/\lambda}$$

λ : 衝突長、吸収長とも言う

密度 $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ の物質中を考える

強い相互作用 (π -陽子散乱 $\sigma \sim 10 \text{ mb}$): $\lambda \sim 100 \text{ cm}$ **ハドロンによる鉄の衝突長 : 10.5 cm**

電磁相互作用 (陽子によるトムソン散乱 $\sigma \sim 0.2 \mu \text{ b}$) : $\lambda \sim 100 \text{ km}$

弱い相互作用 (逆ベータ崩壊 $\sigma \sim 10^{-44} \text{ cm}^2/\text{atom}$) : $\lambda \sim 1.7 \times 10^{20} \text{ cm} \sim 180 \text{ 光年}$

カロリーメータ

エネルギー分解能

$$N^{total} \propto \frac{E_0}{E_C}$$

どれだけ、粒子(電子、光子)を捕らえるか? による

$$\frac{\sigma(E)}{E} \propto \frac{\sigma(N)}{N} \propto \frac{1}{\sqrt{N}} \propto \frac{1}{\sqrt{E_0}}$$

ポアソン分布

一般的には、

constant term : キャリブレーション

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \oplus \frac{c}{E}$$

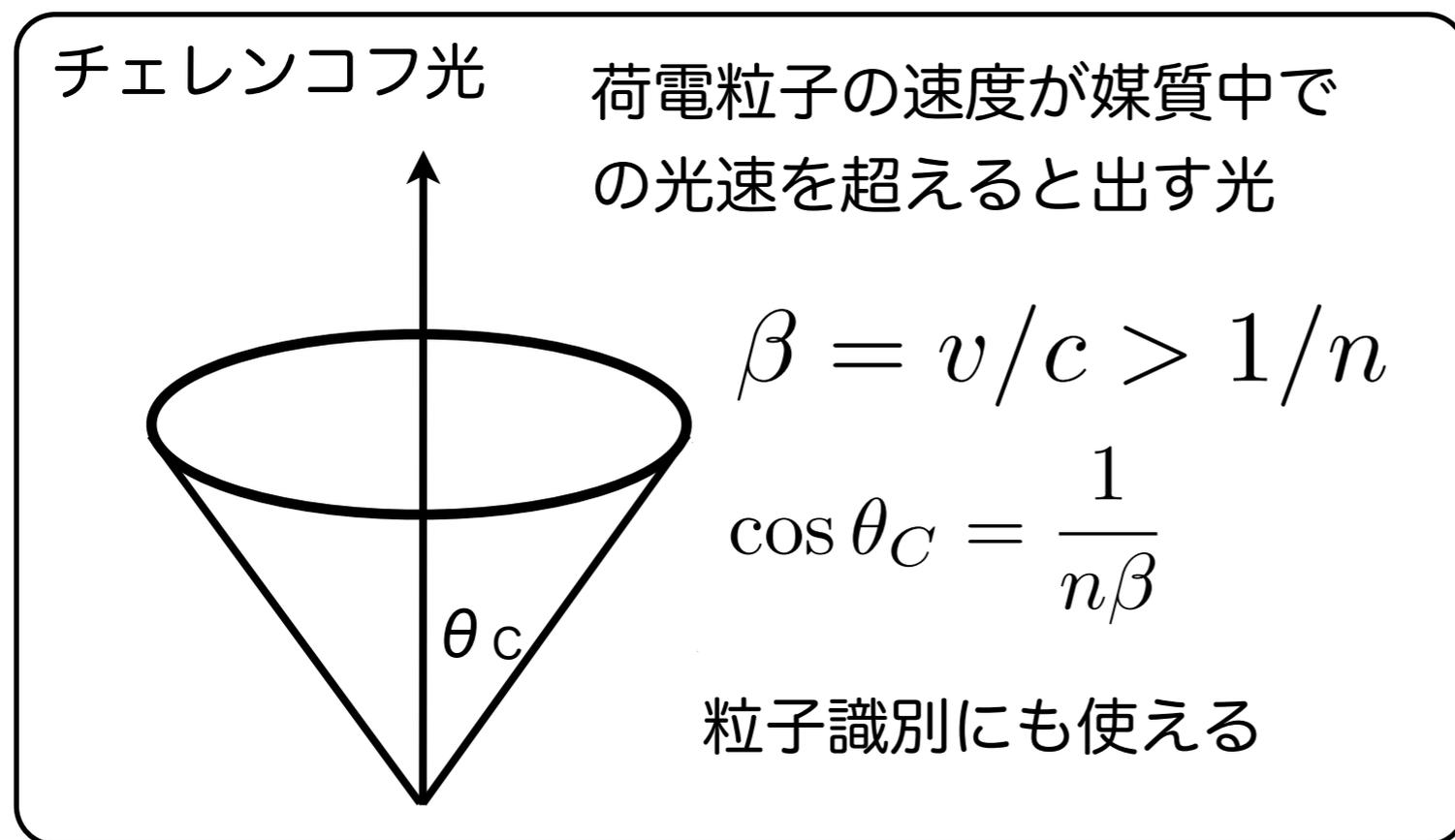
stochastic term

Noise term : ノイズ

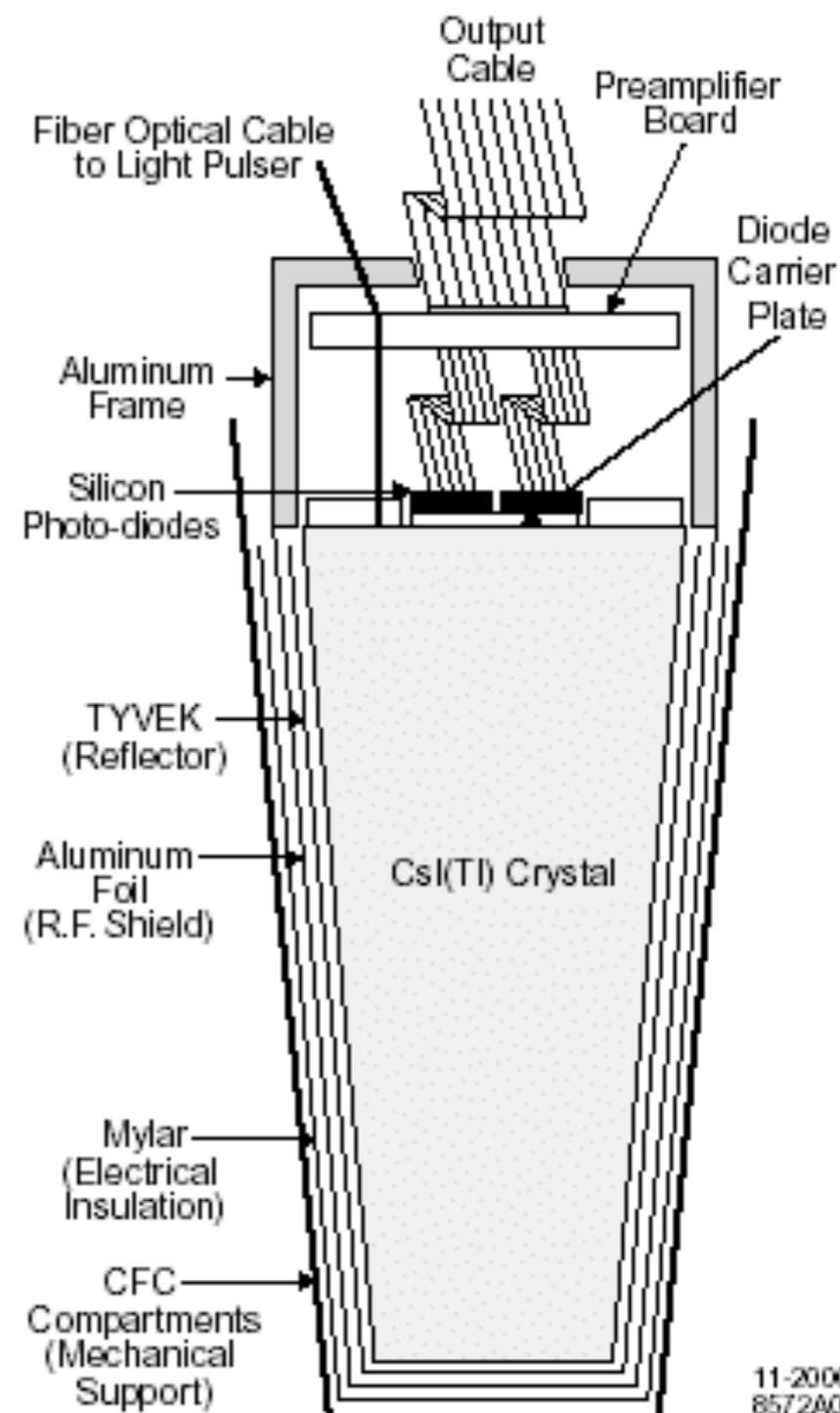
全吸収型カロリメータ

吸収体そのものが検出器
エネルギー分解能が良い

シンチレーション光か、
チェレンコフ光を用いる

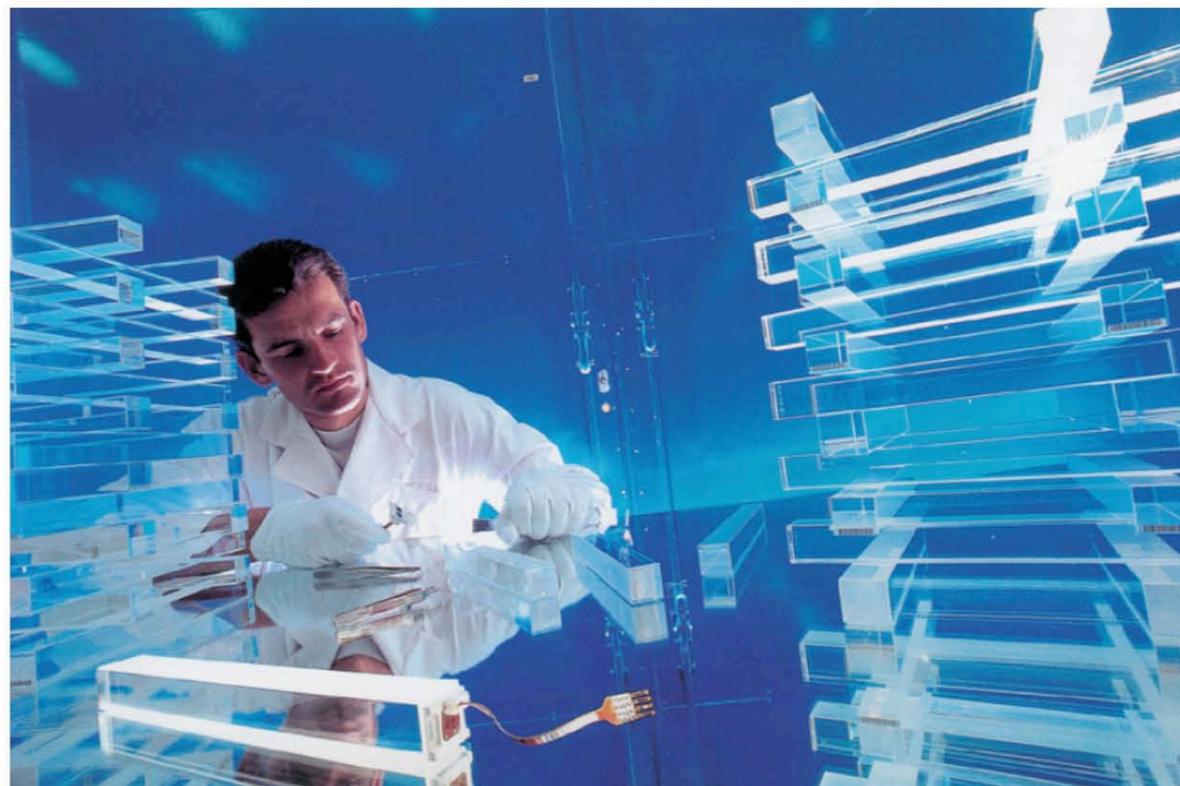
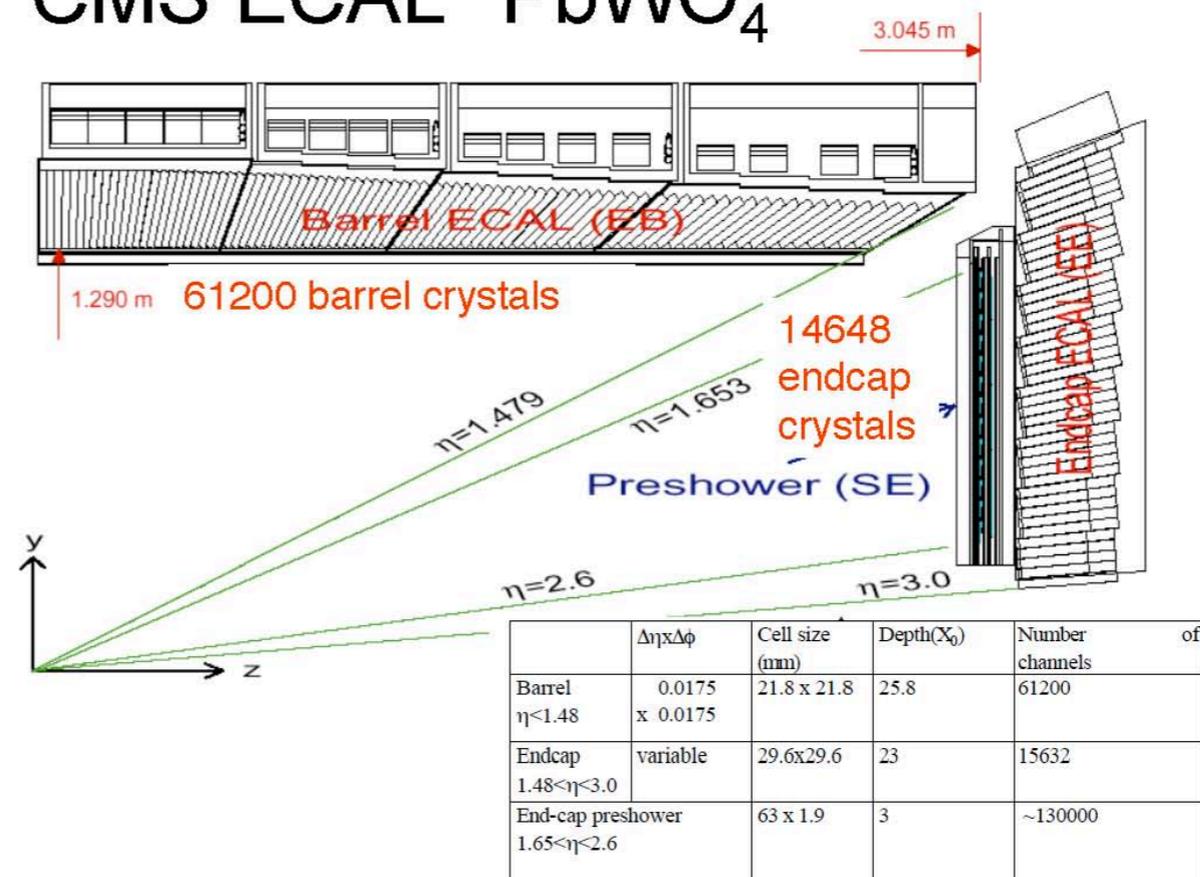


全エネルギーを吸収するには大型化
コストが高い



全吸収型カロリメータ

CMS ECAL PbWO_4



サンプリング型カロリメータ

吸収体+検出器のサンドイッチ

吸収体

電磁カロリメータ:

Pb (Zの大きな物質)

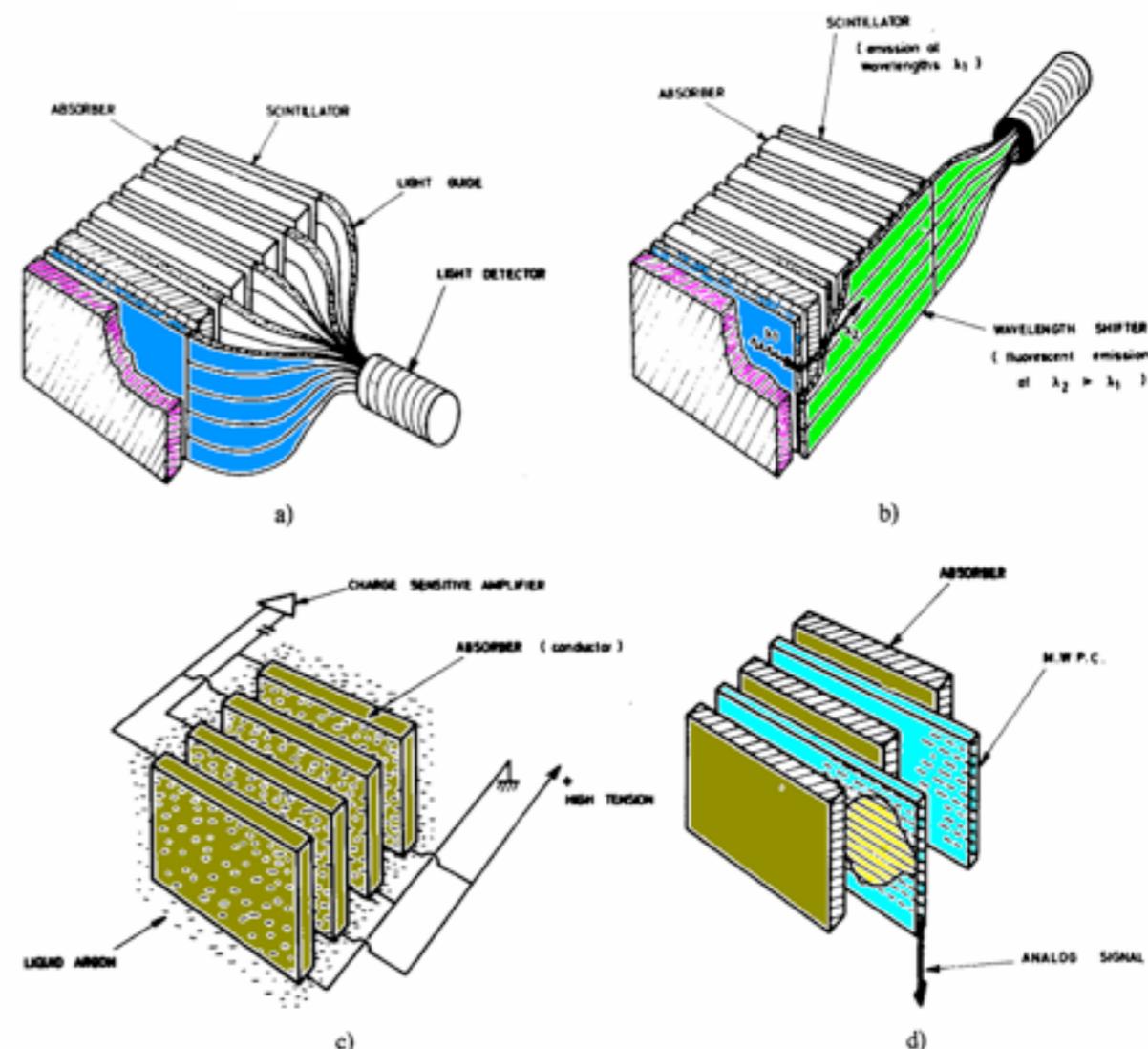
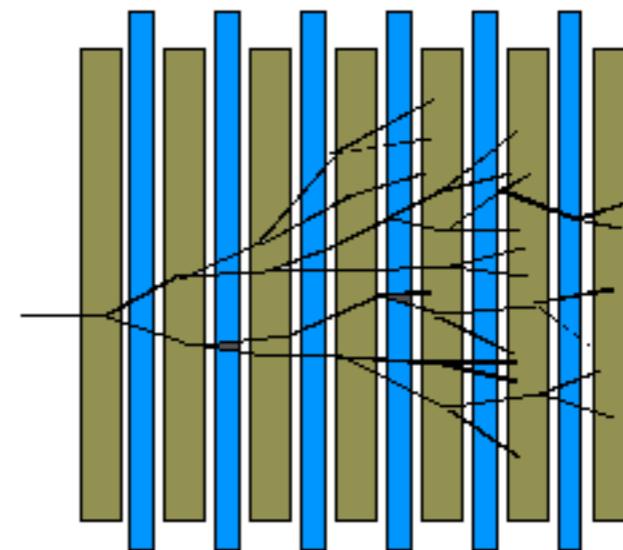
ハドロンカロリメータ:

Fe, Cu (Aの大きな物質)

検出器

シンチレータ

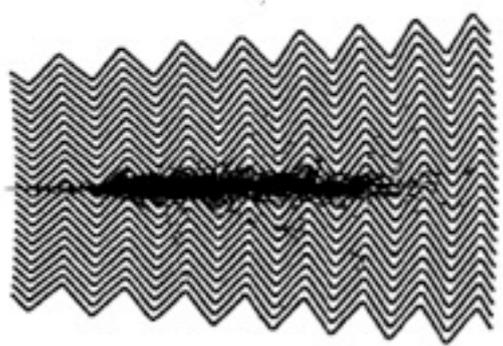
液体アルゴン電離箱



サンプリング型カロリメータ

ATLAS 電磁カロリメータ

液体アルゴン+鉛/鉄+銅読み出し板

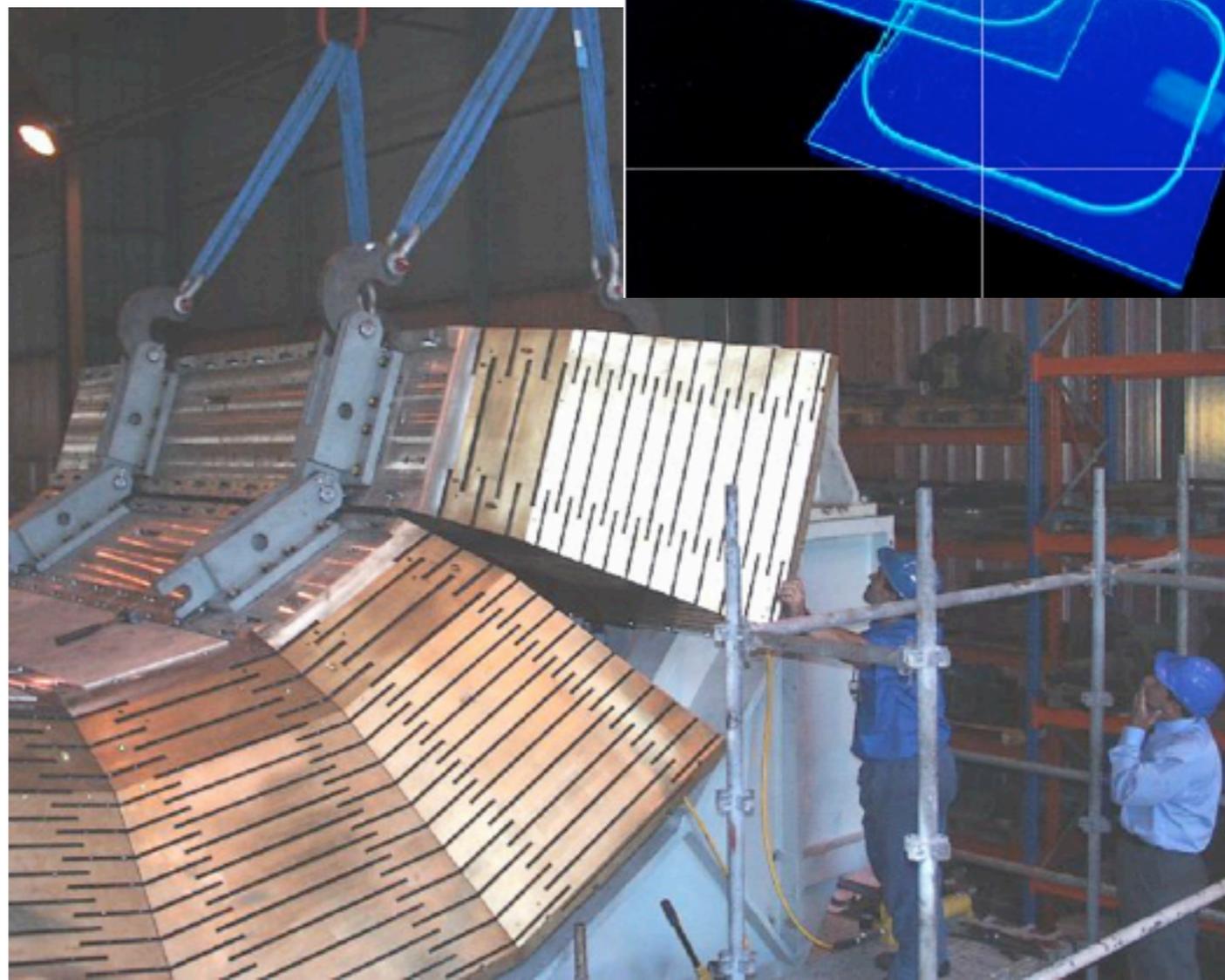
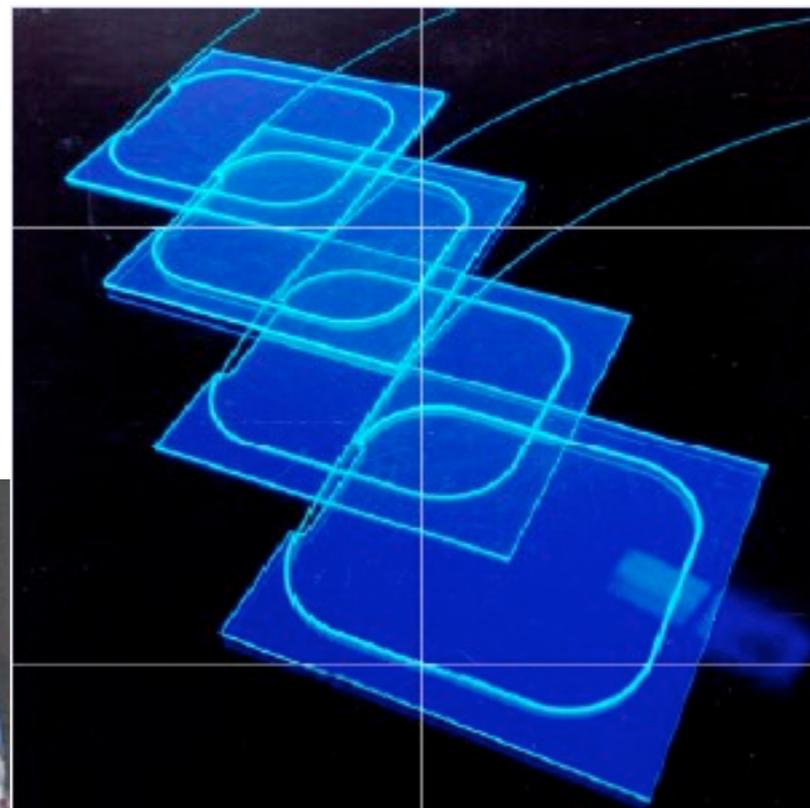


$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} + 0.7\%$$

CMSハドロンカロリメータ

真鍮+シンチ

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{65\%}{\sqrt{E}} + 5\%$$



カロリメータの性能比較

Table 28.8: Resolution of typical electromagnetic calorimeters. E is in GeV

Technology (Experiment)	Depth	Energy resolution	Date
NaI(Tl) (Crystal Ball)	$20X_0$	$2.7\%/E^{1/4}$	1983
$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) (L3)	$22X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$	1993
CsI (KTeV)	$27X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.45\%$	1996
CsI(Tl) (BaBar)	$16\text{--}18X_0$	$2.3\%/E^{1/4} \oplus 1.4\%$	1999
CsI(Tl) (BELLE)	$16X_0$	1.7% for $E_\gamma > 3.5$ GeV	1998
PbWO_4 (PWO) (CMS)	$25X_0$	$3\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.2/E$	1997
Lead glass (OPAL)	$20.5X_0$	$5\%/\sqrt{E}$	1990
Liquid Kr (NA48)	$27X_0$	$3.2\%/\sqrt{E} \oplus 0.42\% \oplus 0.09/E$	1998
Scintillator/depleted U (ZEUS)	$20\text{--}30X_0$	$18\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator/Pb (CDF)	$18X_0$	$13.5\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator fiber/Pb spaghetti (KLOE)	$15X_0$	$5.7\%/\sqrt{E} \oplus 0.6\%$	1995
Liquid Ar/Pb (NA31)	$27X_0$	$7.5\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.1/E$	1988
Liquid Ar/Pb (SLD)	$21X_0$	$8\%/\sqrt{E}$	1993
Liquid Ar/Pb (H1)	$20\text{--}30X_0$	$12\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$	1998
Liquid Ar/depl. U (DØ)	$20.5X_0$	$16\%/\sqrt{E} \oplus 0.3\% \oplus 0.3/E$	1993
Liquid Ar/Pb accordion (ATLAS)	$25X_0$	$10\%/\sqrt{E} \oplus 0.4\% \oplus 0.3/E$	1996

全吸収型

シンチレーション光

チェレンコフ光

サンプリング型

シンチレータ

液体アルゴン電離箱

粒子識別

検出器の併せ技で粒子識別が可能になる

電子：

飛跡検出器に飛跡＋電磁カロリメータでエネルギー

エネルギーの広がり狭い、全エネルギーを落とす

$E(\text{カロリメータ})/p(\text{飛跡検出器}) \sim 1$

光子：

飛跡検出器に飛跡なし＋電磁カロリメータでエネルギー

エネルギーの広がり狭い、全エネルギーを落とす

μ 粒子：

飛跡検出器＋カロリメータにエネルギーなし＋ μ 粒子検出器に飛跡

ハドロン：

飛跡検出器に飛跡の束＋電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータにエネルギー

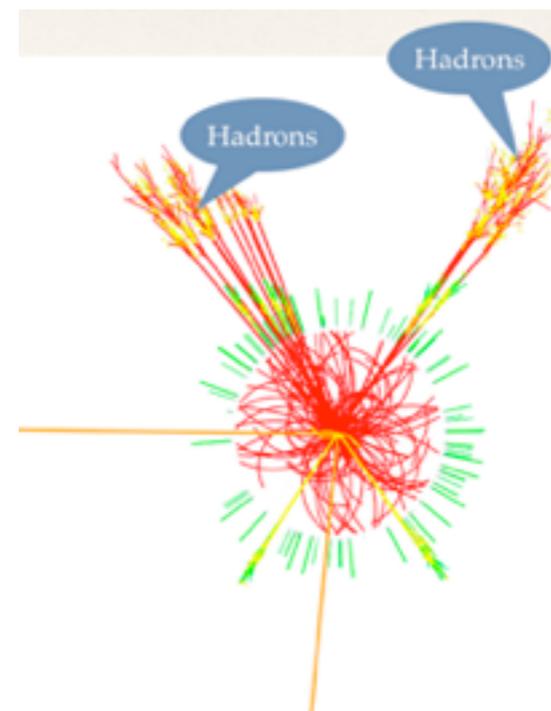
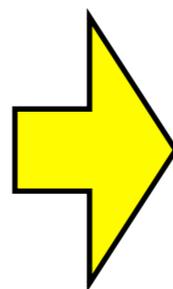
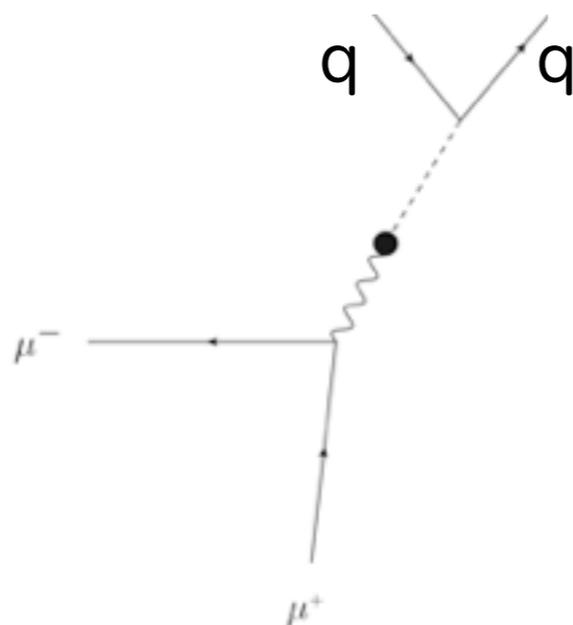
エネルギーの広がりが広い

π^\pm と K^\pm は飛行時間やチェレンコフ光などを用いて識別することも

粒子識別

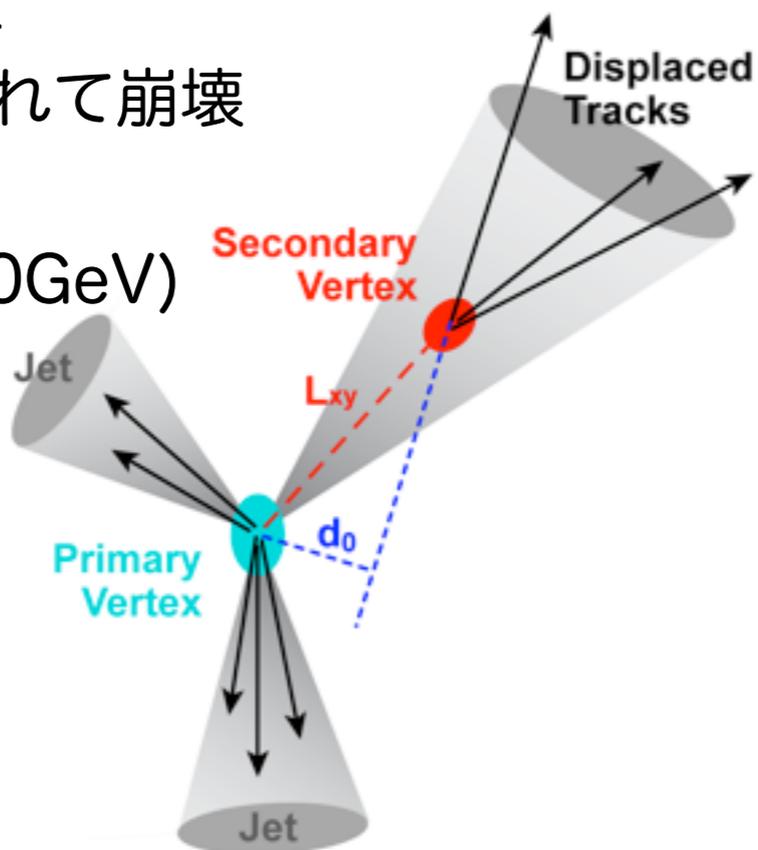
quark/gluon

ハドロンの“jet”として検出
飛跡の束とカロリメータの塊



b-quark jet

jet内の飛跡数が大
陽子衝突点から離れて崩壊
 $c\tau \sim 500\mu\text{m}$
 $\beta\gamma \sim 10$ (@ $P \sim 50\text{GeV}$)
→ 5 mm位走る



τ -lepton jet

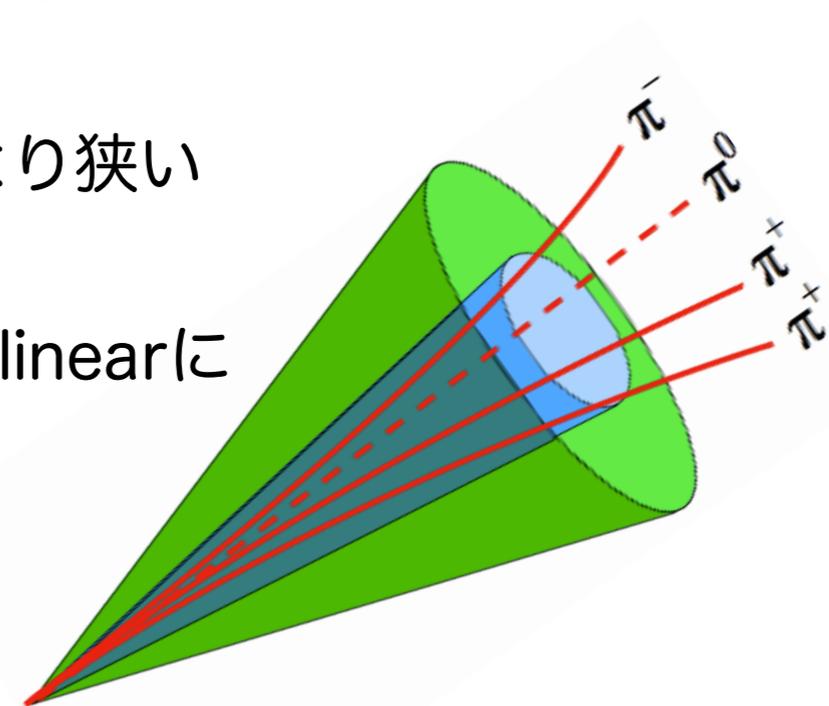
τ のハドロン崩壊はjetのよう
エネルギーの広がり：

e/γ より広く

quark/gluonより狭い

荷電粒子：

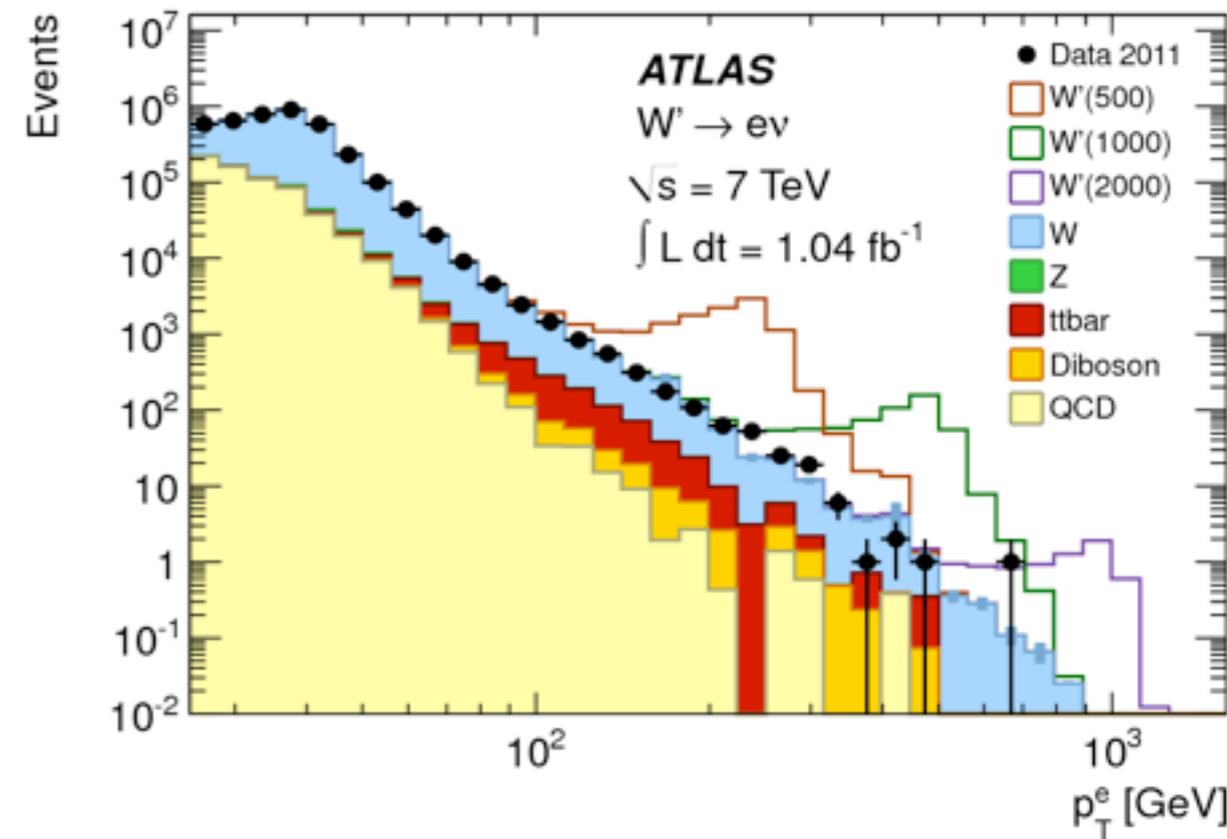
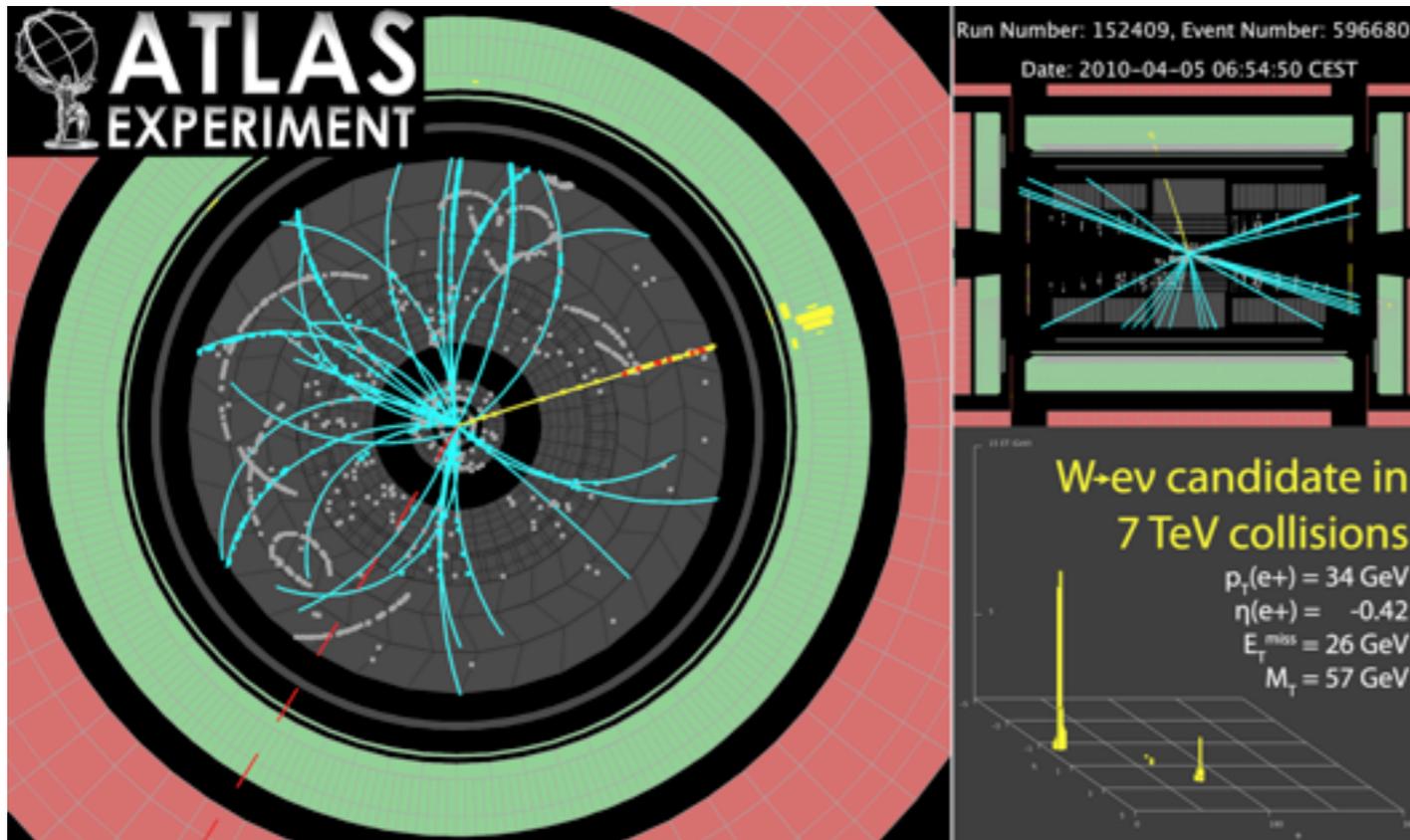
1本か3本がcollinearに



ニュートリノ

	荷電粒子		中性粒子	
EM ○	e [±]		γ (π ⁰)	
EM ×	Had	Lep	Had	Lep
	π [±] , K [±] , p	μ [±]	n	ν

$$pp \rightarrow W + X \rightarrow e\nu + X$$

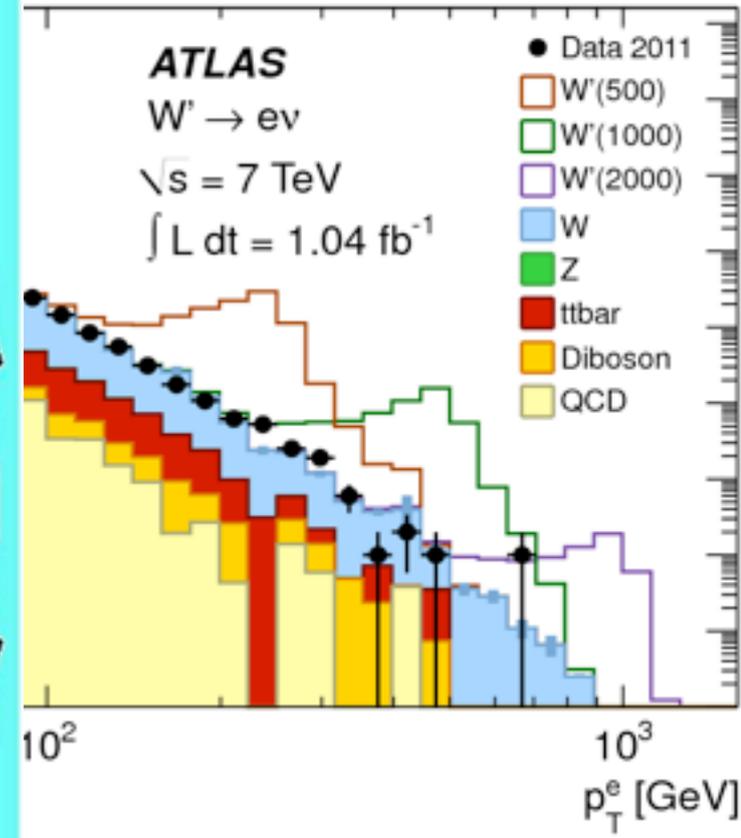
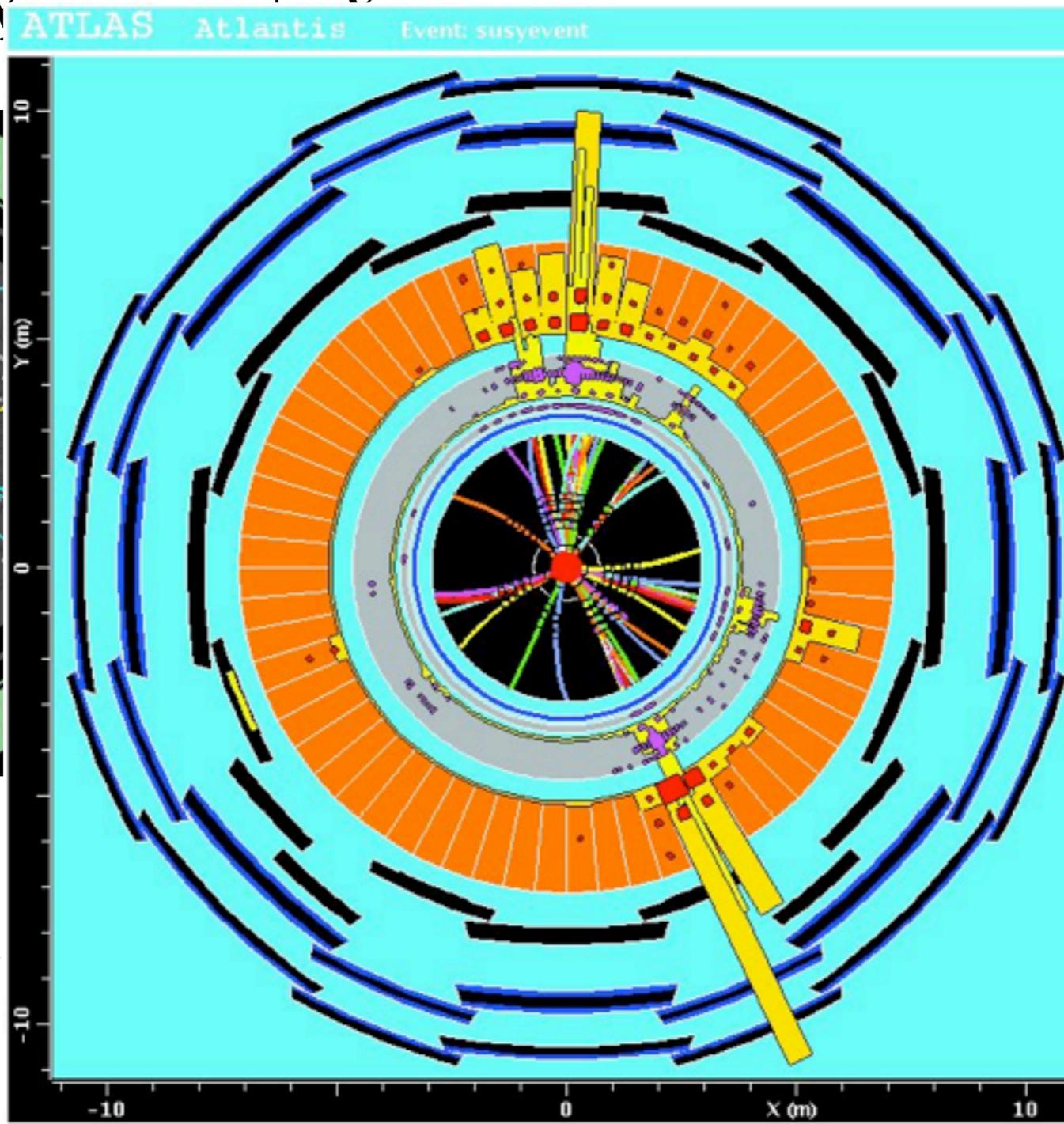
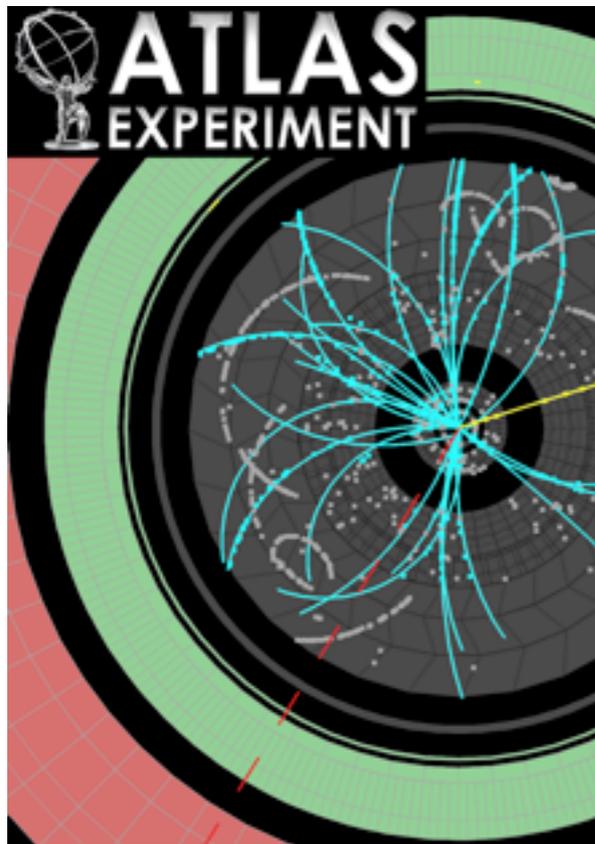


エネルギー保存を仮定→エネルギー非保存分だけ”測定できない”粒子が通過した

ニュートリノ

	荷電粒子		中性粒子	
EM ○	e [±]		γ (π ⁰)	
EM ×	Had	Lep	Had	Lep
	π [±] , K [±] , p	μ [±]	n	ν

$$pp \rightarrow W + X + \nu$$



エネルギー保存を仮

子が通過した

超対称性粒子も”見えないエネルギー”から測定する

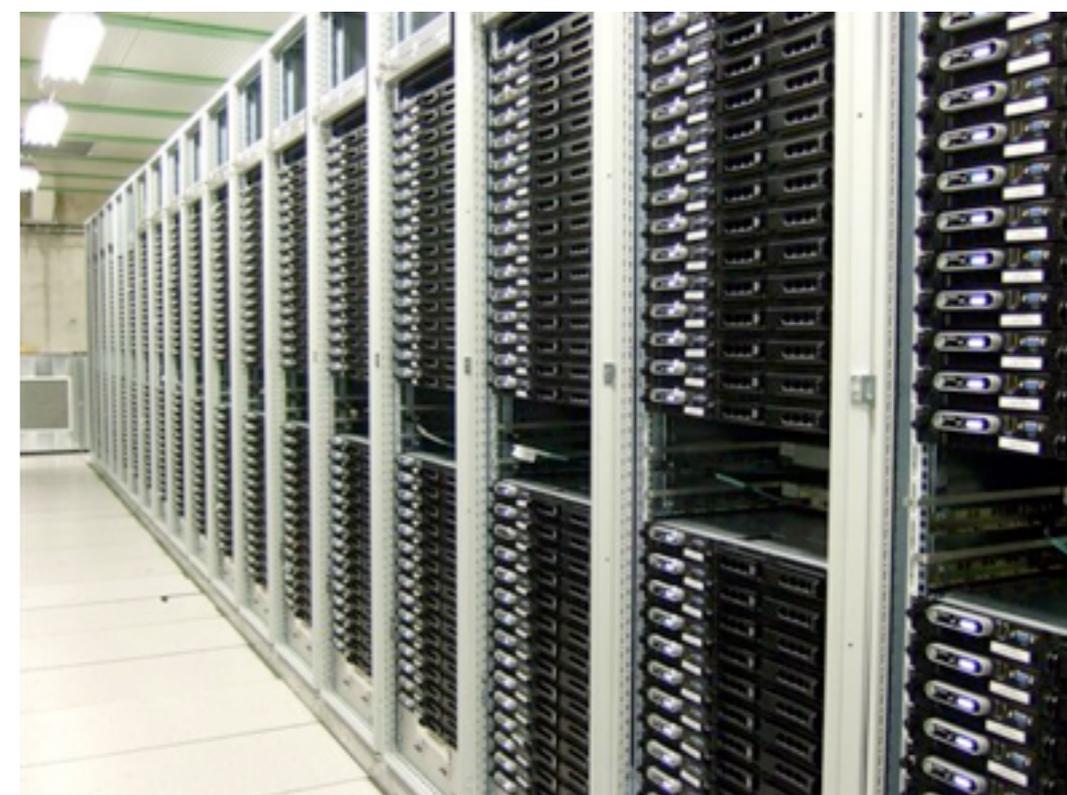
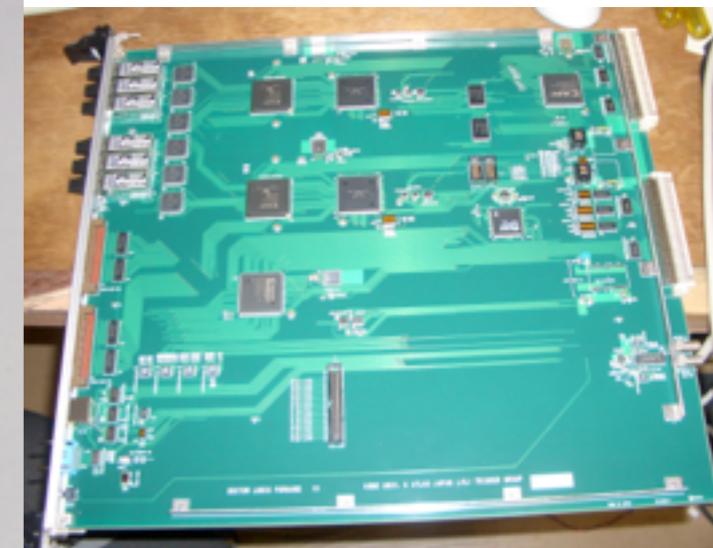
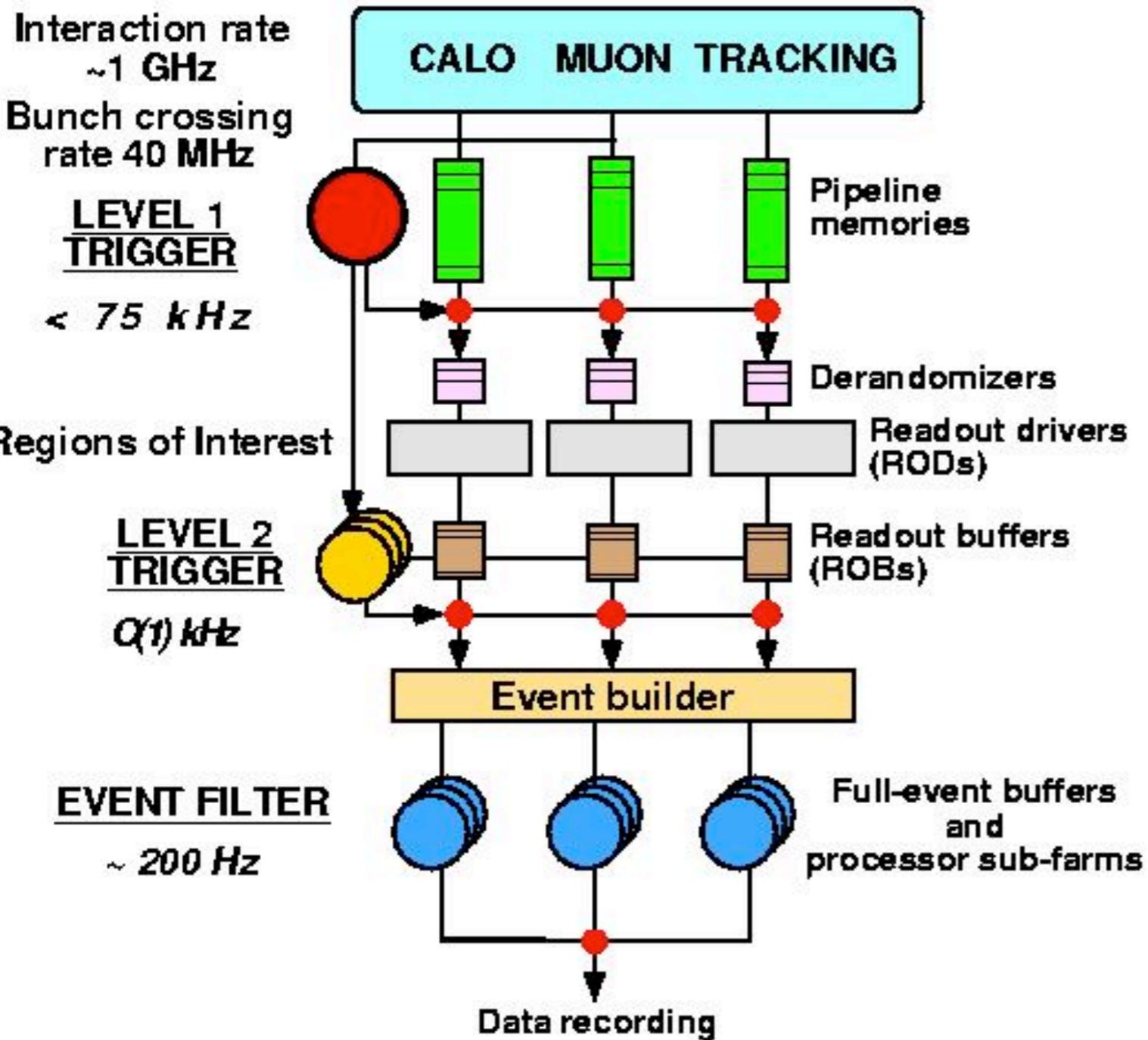
トリガー・データ収集 物理解析

トリガーとデータ収集

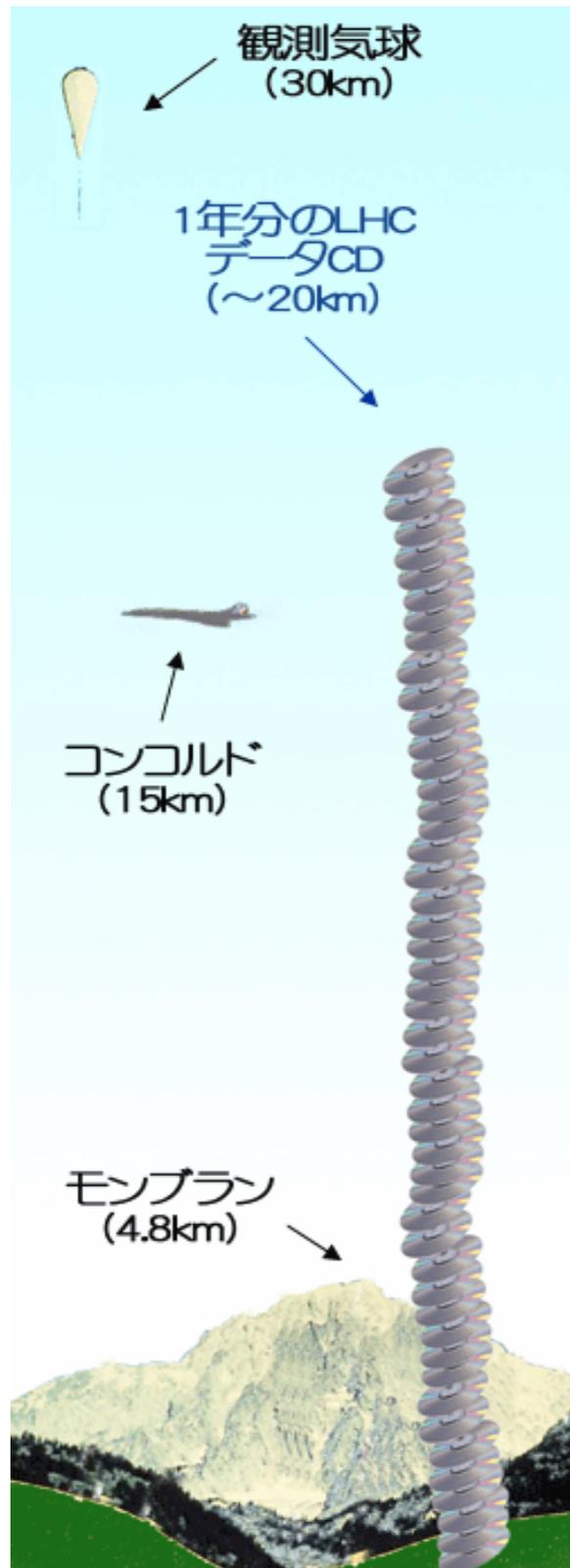
1.6MB/eventを全部蓄えることは不可能

→重要なイベントだけ「トリガー」する

高運動量の μ 粒子、電子、ジェットを含む事象



データ解析



LHCの4実験で1年間に蓄積されるデータを全部CDROMに焼いたとすると・・・

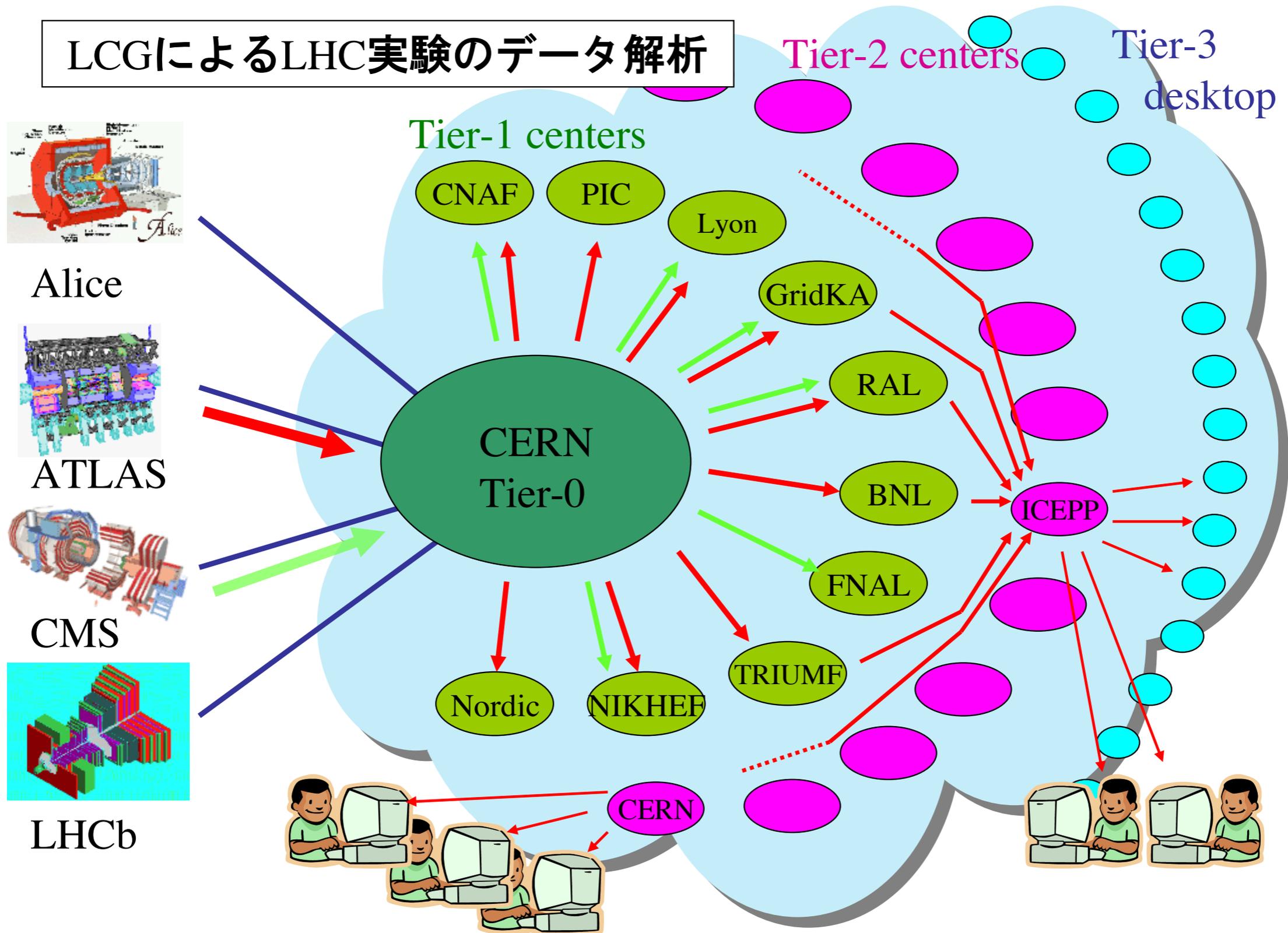
ATLASだけで年間5PB(ペタバイト=10¹⁵バイト)

event rate		200 Hz
raw data size	検出器のヒット情報	1.6 MB/event
		320 MB/sec
		1 TB/hour
ESD size	電気信号量やヒット時間等	500 kB/event
AOD size	4元運動量、4元位置	100 kB/event

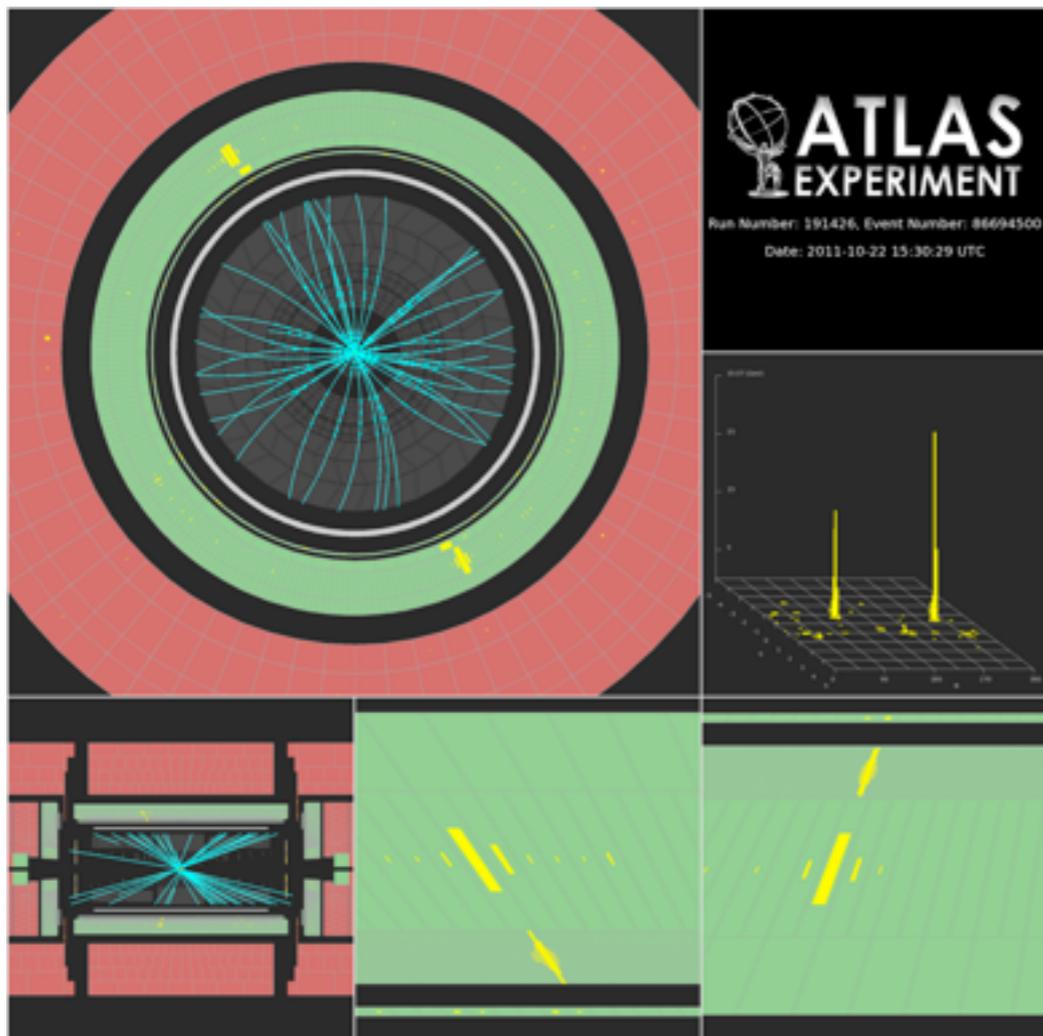
実験で取れたデータを世界に分散する
計算機センターに送り処理する。

グリッド

LCGによるLHC実験のデータ解析



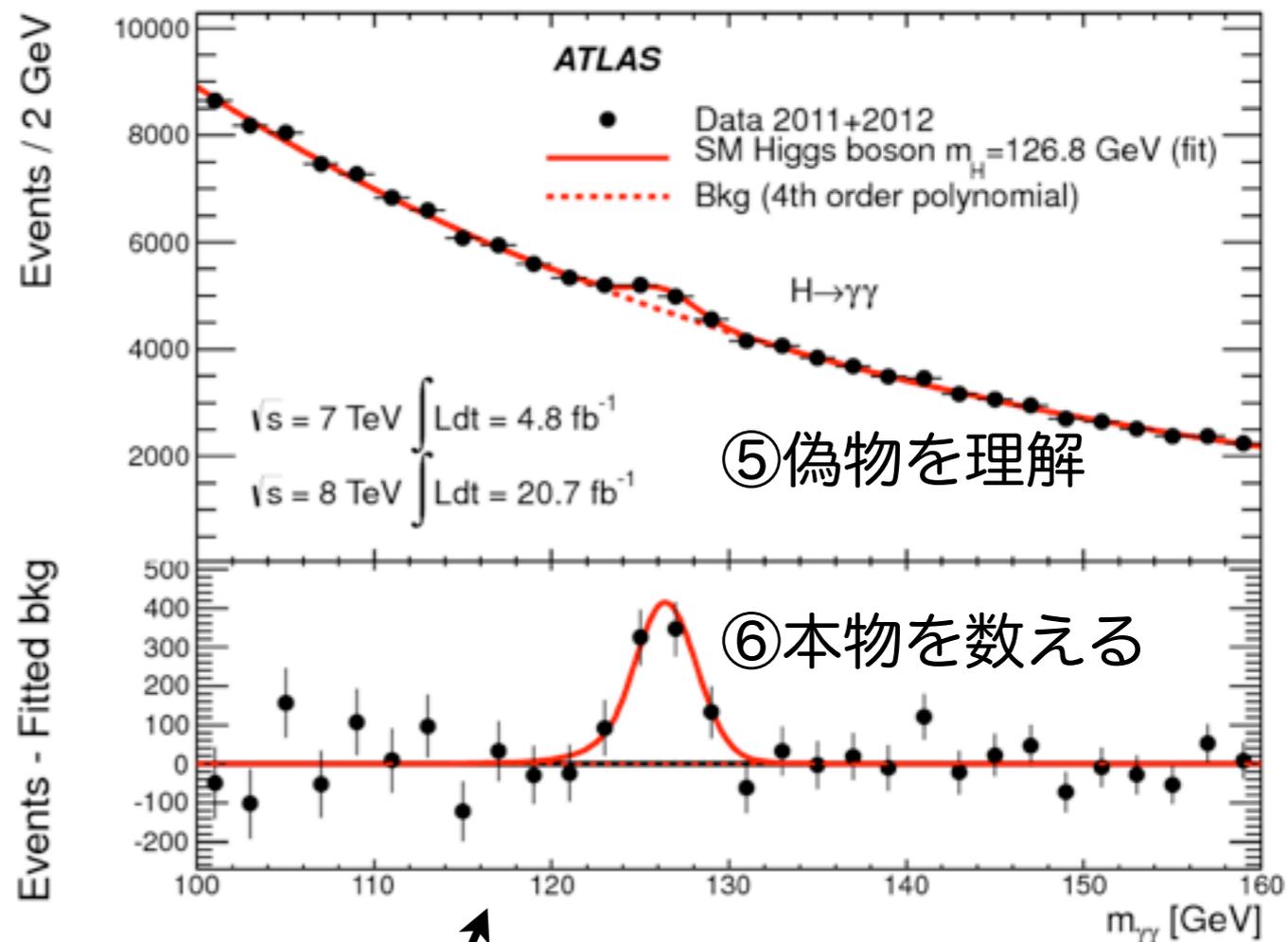
物理解析



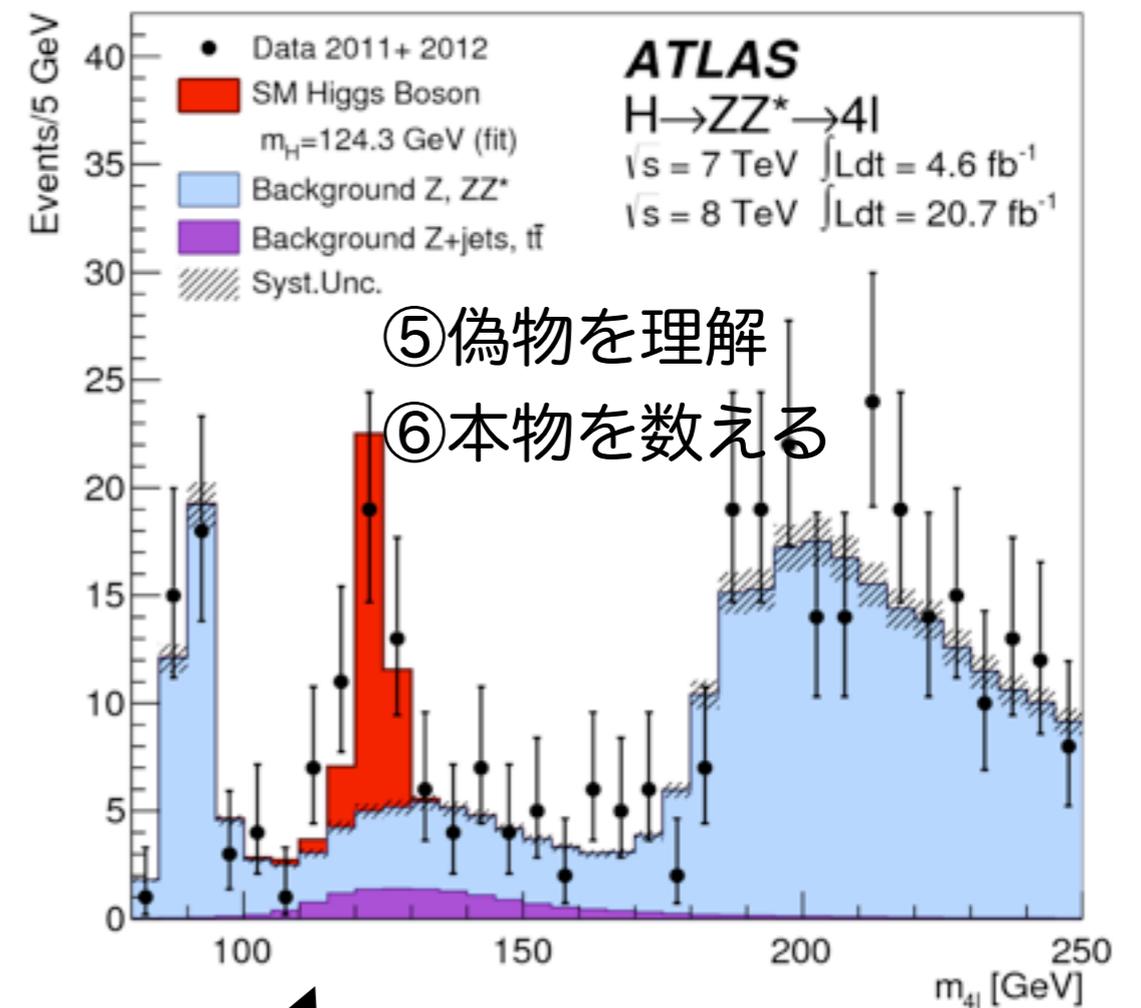
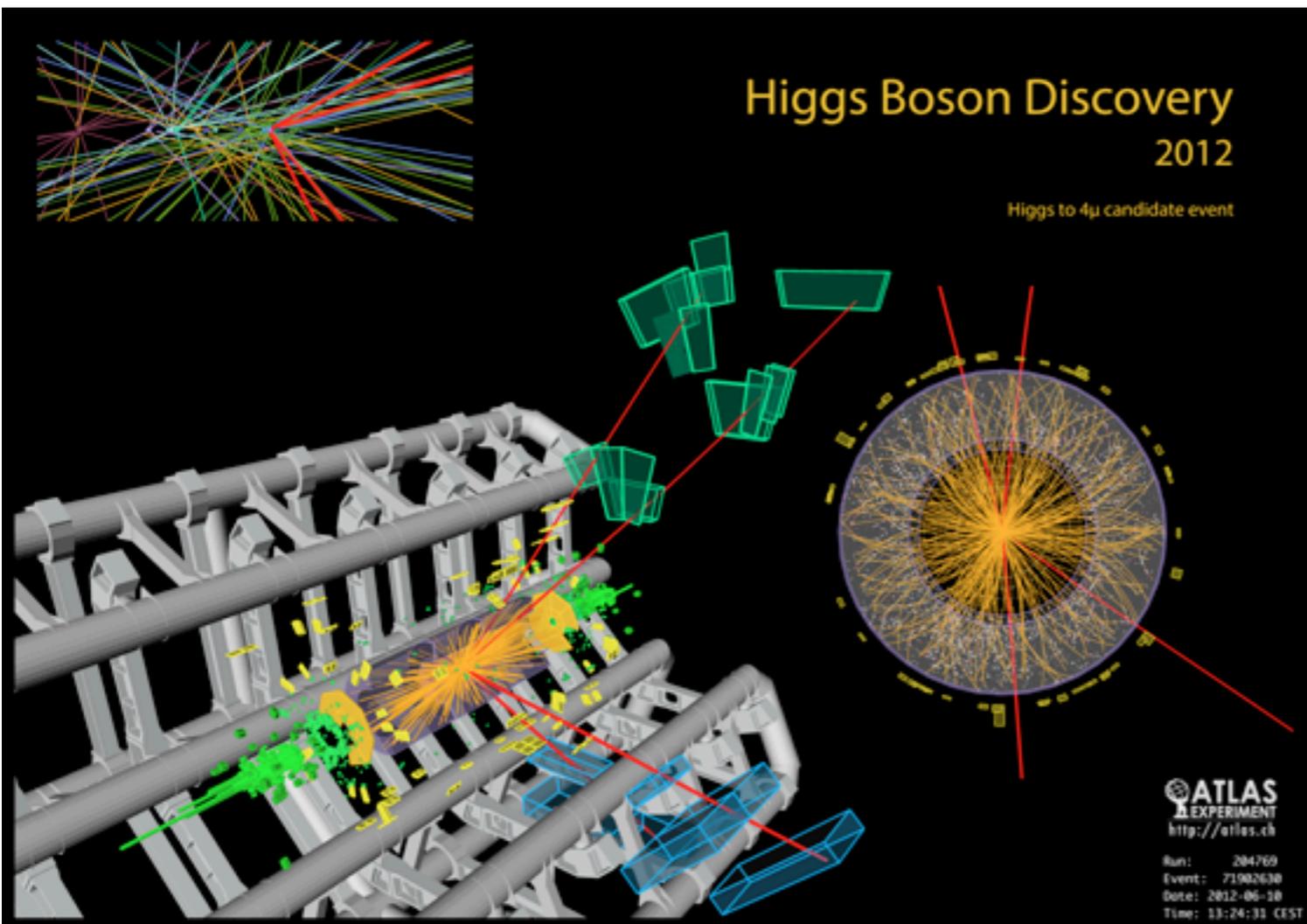
- ① 検出器信号を4元運動量に
- ② 事象選別
- ③ 本物を特徴付ける物理量を算出

不変質量

$$\begin{aligned}
 M_{\gamma\gamma}^2 &= (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2 \\
 &= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - (\mathbf{p}_1^2 + \mathbf{p}_2^2 + 2\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2) \quad E_i = |\mathbf{p}_i| \\
 &= 2E_1E_2(1 - \cos\theta)
 \end{aligned}$$



物理解析



- ①検出器信号を4元運動量に
- ②事象選別
- ③本物を特徴付ける物理量を算出

不変質量

$$M_{4\mu}^2 = (E_1 + E_2 + E_3 + E_4)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \mathbf{p}_3 + \mathbf{p}_4)^2$$

④信号候補の分布

レポート問題（12月9日提出予定）

（問題1）

B(T)の磁場中を半径Rの円運動する電子の運動量は、 $p(\text{GeV}/c)=0.3B(\text{T})\times R(\text{m})$ の関係があることを示せ。

（問題2）

LHC加速器は、8.33Tの2極超伝導磁石(長さ14.3m)を1232本用いて、陽子を周回させている。何TeVまで陽子を加速することができるか？

（問題3）

(問題2)のエネルギーの陽子の速度は光速の何パーセントか？

（問題4）

(問題2)のエネルギーで陽子・陽子衝突した場合、重心系エネルギーは幾らか？また、このエネルギーの陽子を陽子(質量は1GeVとする)を標的とする固定標的実験に用いた場合、重心系エネルギーは幾らか？新粒子発見の観点から、どちらが優れているか？

（問題5） LHCのようなコライダー実験では、以下の粒子をどのように検出して、運動量やエネルギーを測定するのか？それぞれ、(a)物質との相互作用、(b)読み出しの原理、(c)どういう検出器を用いるのか、の3つの観点から説明せよ。

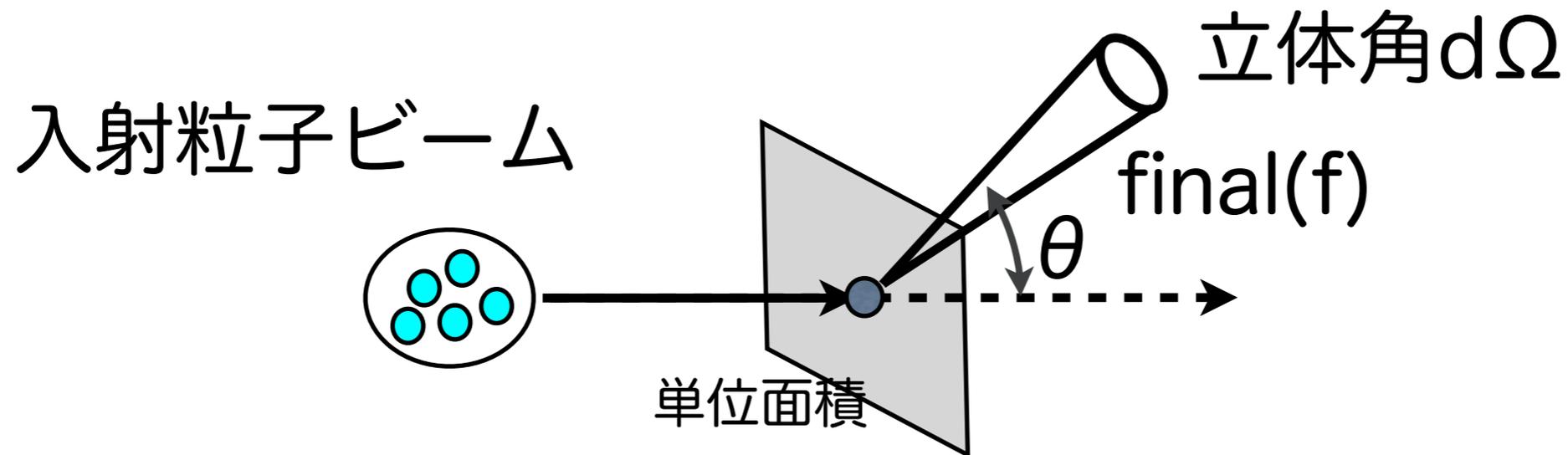
(a) 荷電粒子、(b) 電子、(c) 光子、(d) μ 粒子、(e) クォークやグルーオン（ハドロンの塊）
(f) ニュートリノ

参考

定数、パラメータ

Symbol	Definition	Units or Value
α	Fine structure constant ($e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$)	1/137.035 999 11(46)
M	Incident particle mass	MeV/ c^2
E	Incident part. energy $\gamma M c^2$	MeV
T	Kinetic energy	MeV
$m_e c^2$	Electron mass $\times c^2$	0.510 998 918(44) MeV
r_e	Classical electron radius $e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$	2.817 940 325(28) fm
N_A	Avogadro's number	$6.022 1415(10) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
ze	Charge of incident particle	
Z	Atomic number of absorber	
A	Atomic mass of absorber	g mol^{-1}
K/A	$4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 / A$	0.307 075 MeV $\text{g}^{-1} \text{ cm}^2$ for $A = 1 \text{ g mol}^{-1}$
I	Mean excitation energy	eV (<i>Nota bene!</i>)
$\delta(\beta\gamma)$	Density effect correction to ionization energy loss	
$\hbar\omega_p$	Plasma energy ($\sqrt{4\pi N_e r_e^3 m_e c^2 / \alpha}$)	$\sqrt{\rho \langle Z/A \rangle} \times 28.816 \text{ eV}$ (ρ in g cm^{-3})
N_e	Electron density	(units of r_e) $^{-3}$
w_j	Weight fraction of the j th element in a compound or mixture	
n_j	\propto number of j th kind of atoms in a compound or mixture	
—	$4\alpha r_e^2 N_A / A$	(716.408 g cm^{-2}) $^{-1}$ for $A = 1 \text{ g mol}^{-1}$
X_0	Radiation length	g cm^{-2}
E_c	Critical energy for electrons	MeV
$E_{\mu c}$	Critical energy for muons	GeV
E_s	Scale energy $\sqrt{4\pi/\alpha} m_e c^2$	21.2052 MeV
R_M	Molière radius	g cm^{-2}

散乱断面積



単位面積あたり 1 個粒子を入射し、標的粒子数が単位体積あたり 1 個存在する時の衝突確率。

$$dN = N_{in} \frac{d\sigma(\theta, \phi)}{d\Omega} d\Omega$$

微分断面積: とある θ 、 ϕ に散乱される確率

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^{-2} = 10^{-28} \text{ m}^{-2}$$

$$1 \text{ mb} = 10^{-3} \text{ b} = 10^{-27} \text{ cm}^{-2}, 1 \mu\text{b} = 10^{-6} \text{ b} = 10^{-30} \text{ cm}^{-2}, \dots$$