

# 衝突型加速器実験

## 事始め

竹下徹 (信州大)

ILC夏の合宿@富山2013



Shinshu  
University

# 物理実験

- ❧ 目的：何を測る
- ❧ 企画：どう測る
- ❧ 装置：どんなものを作る
- ❧ どう作る
- ❧ 測定
- ❧ 物理成果

# 物理実験

## BSM?

目的：何を測る

企画：どう測る

装置：どんなものを作る

どう作る

測定

物理成果

目的：Higgs 結合定数

企画：Higgs 崩壊判別

装置：加速器と測定器

どう作る

測定

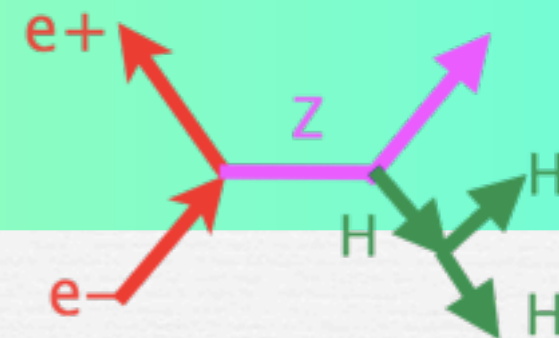
物理成果

# 物理実験

- 目的：何を測る
- 企画：どう測る
- 装置：どんなものを作る
- どう作る
- 測定
- 物理成果

## BSM?

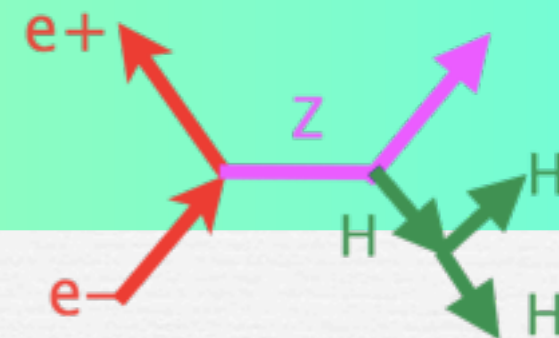
- 目的：Higgs 結合定数
- 企画：Higgs 崩壊判別
- 装置：加速器と測定器
- どう作る
- 測定
- 物理成果



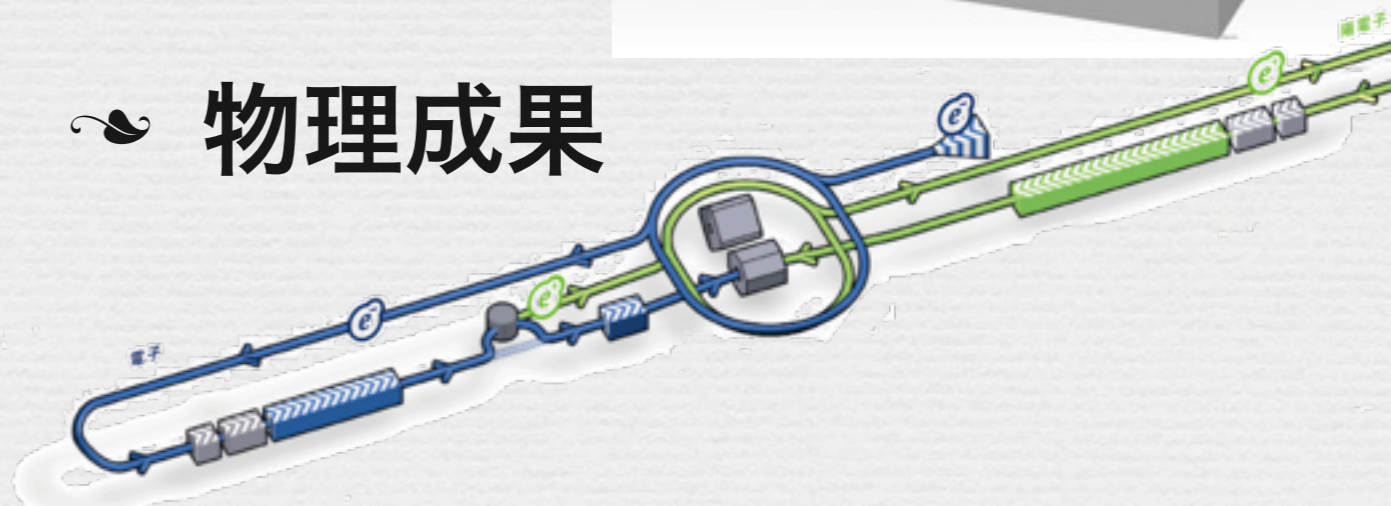
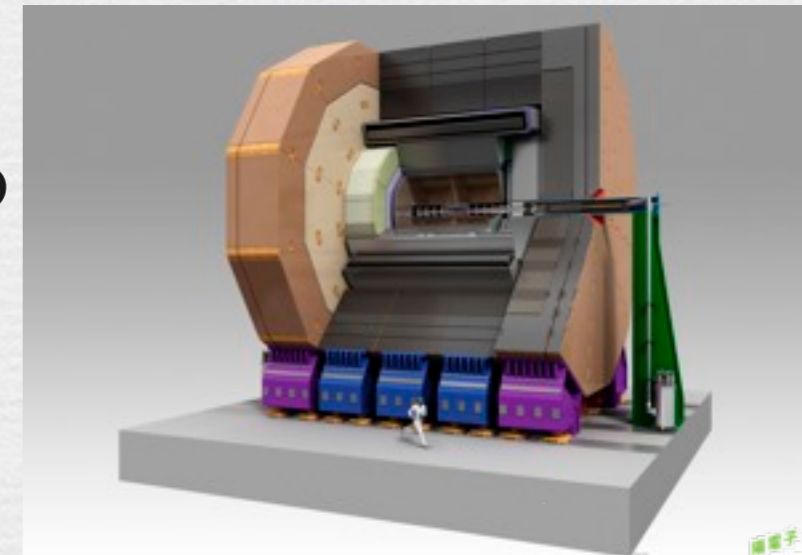
# 物理実験

- 目的：何を測る
- 企画：どう測る
- 装置：どんなものを作る
- どう作る
- 測定
- 物理成果

BSM?

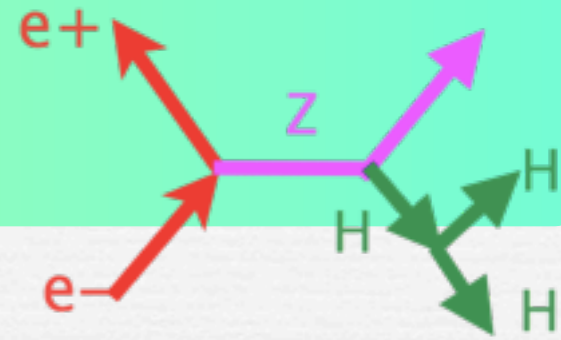


- 目的：Higgs 結合定数
- 企画：Higgs 崩壊判別
- 装置：加速器と測定器
- どう作る
- 測定
- 物理成果



# 物理実験

BSM?



目的：何を測る

企画：どう測る

装置：どんなものを作る

目的：Higgs 結合定数

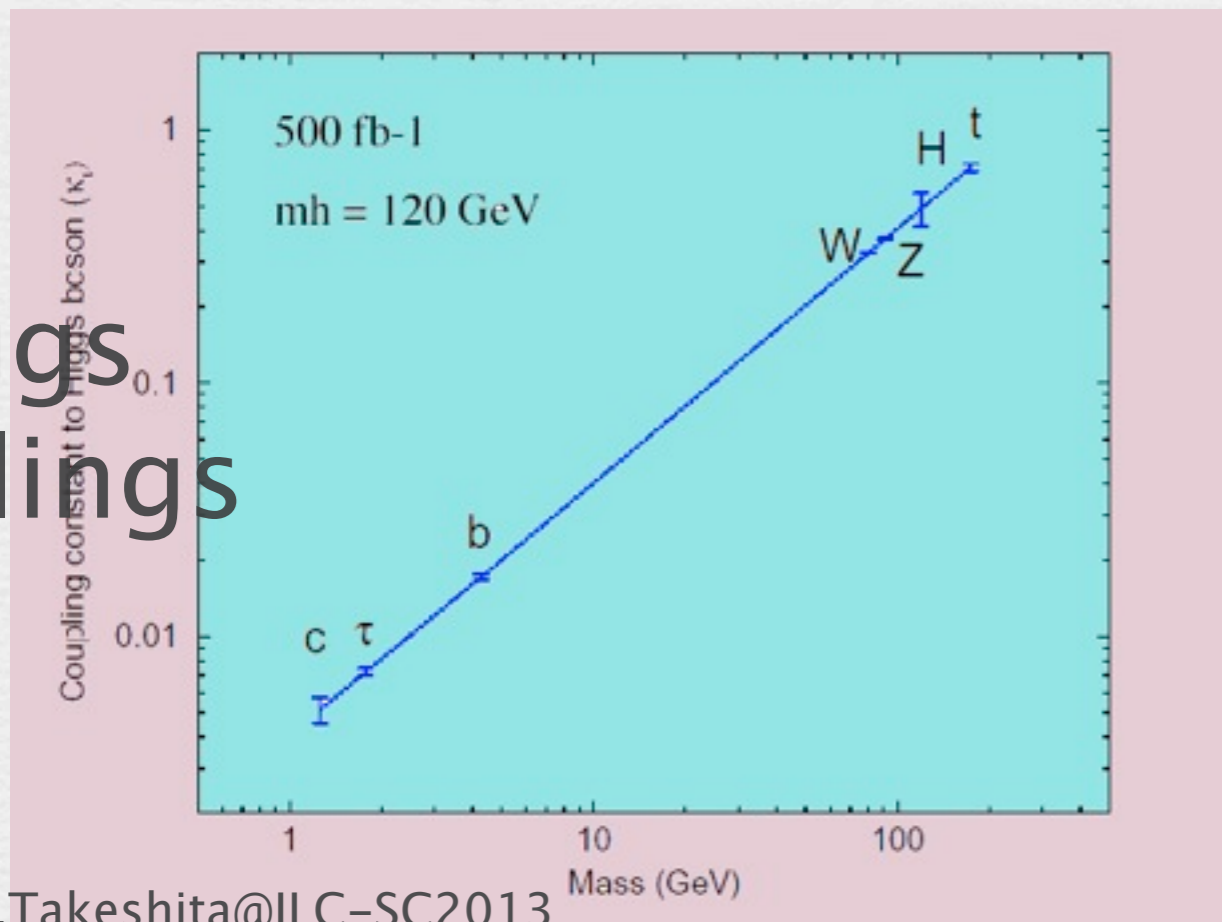
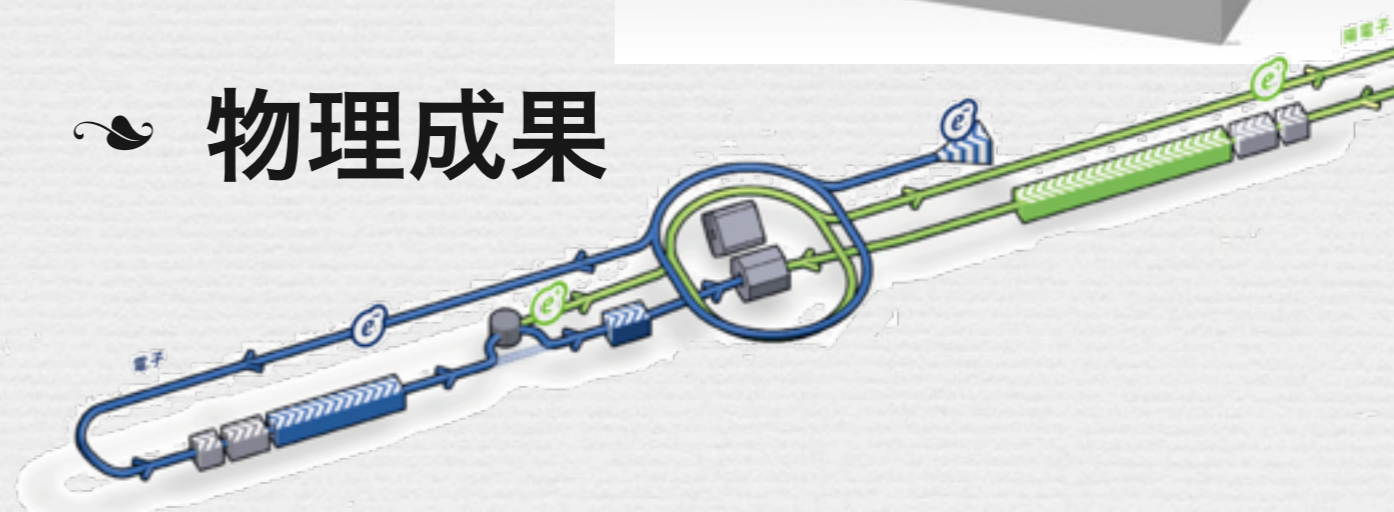
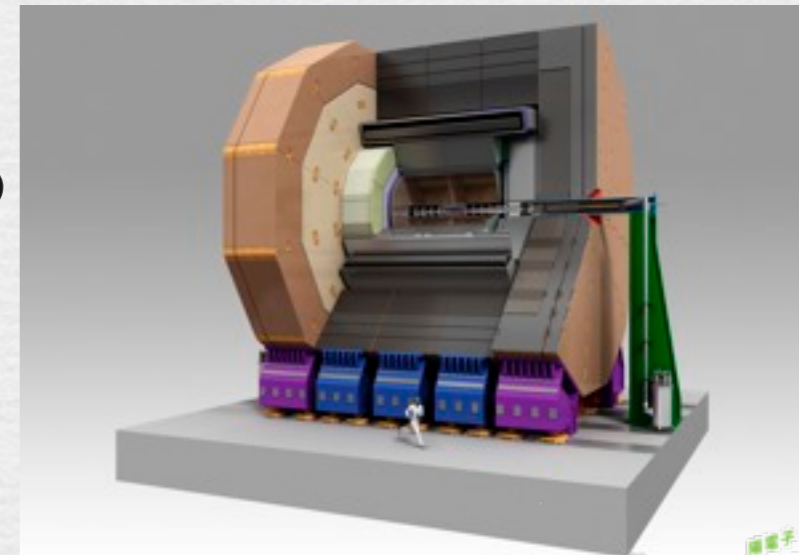
企画：Higgs 崩壊判別

装置：加速器と測定器

どう作る

測定

物理成果

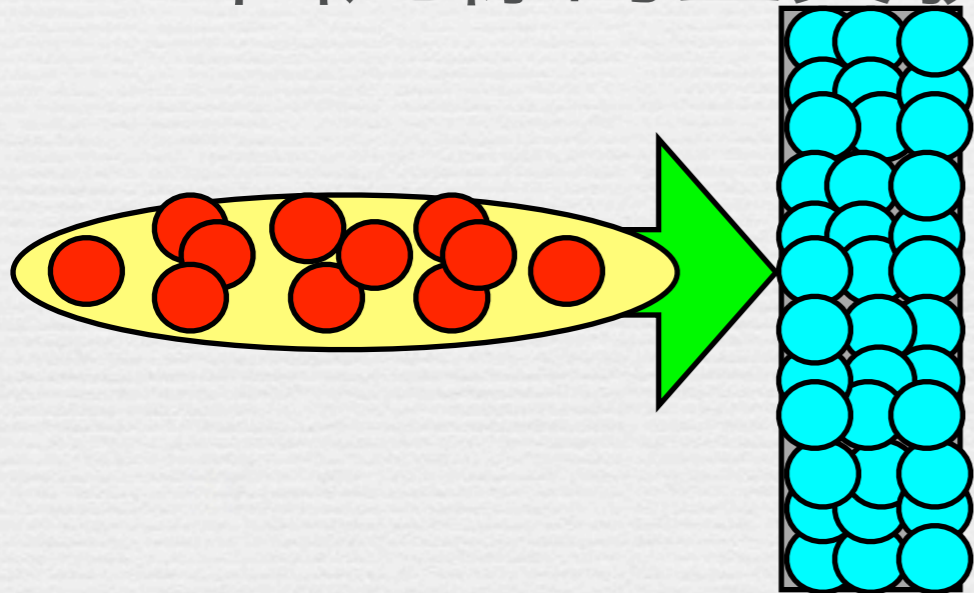


Higgs couplings

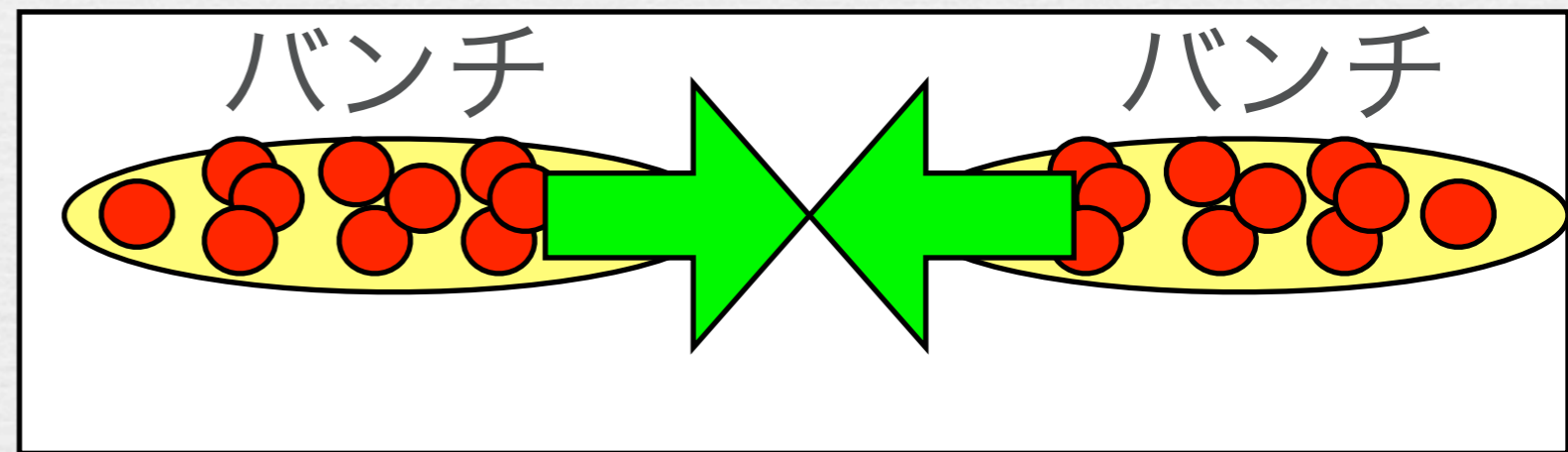
# 衝突型加速器実験

- なぜ beam - beam 衝突 という 技術的に 困難な方法を取るのか？

固定標的型実験



衝突型実験



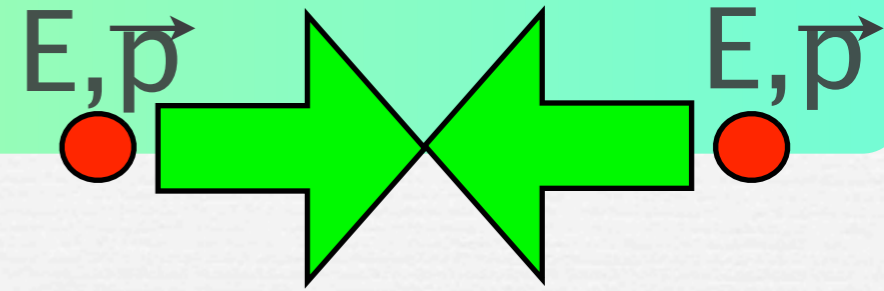
真空パイプ



素粒子実験

1 粒子と 1 粒子の衝突

# 衝突型実験



重心系のエネルギー:  $\sqrt{s}$

$$s = (E + E)^2 - (\vec{p} + \vec{p})^2$$

固定標的

衝突型

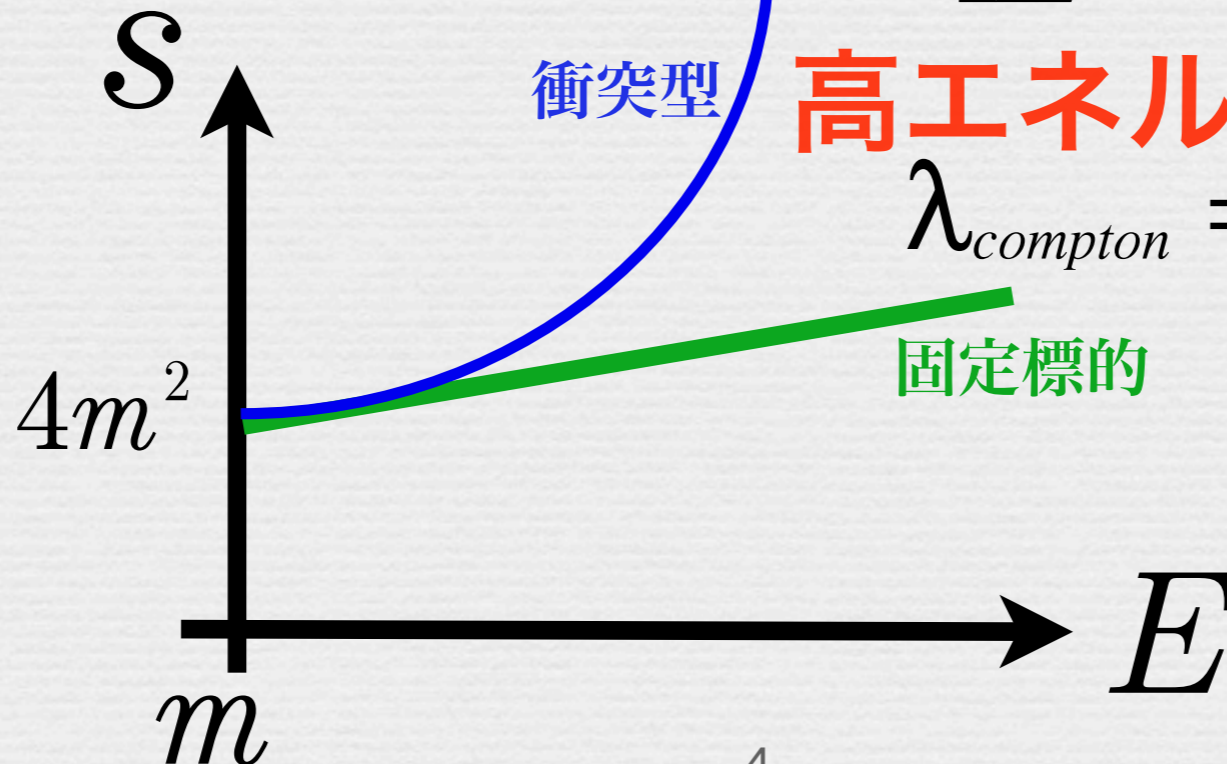
$$s = (E + m)^2 - (\vec{p} + \vec{0})^2$$

$$= 2m^2 + 2mE$$

$$s = (E + E)^2 - (\vec{p} - \vec{p})^2$$

正面衝突

$$= 4E^2$$



高エネルギー

$$\lambda_{\text{compton}} = \frac{h}{mc} = \frac{hc}{mc^2} = \frac{hc}{E}$$

固定標的



# 衝突型加速器 colliders

電子陽電子

陽子陽子

10,000

1,000

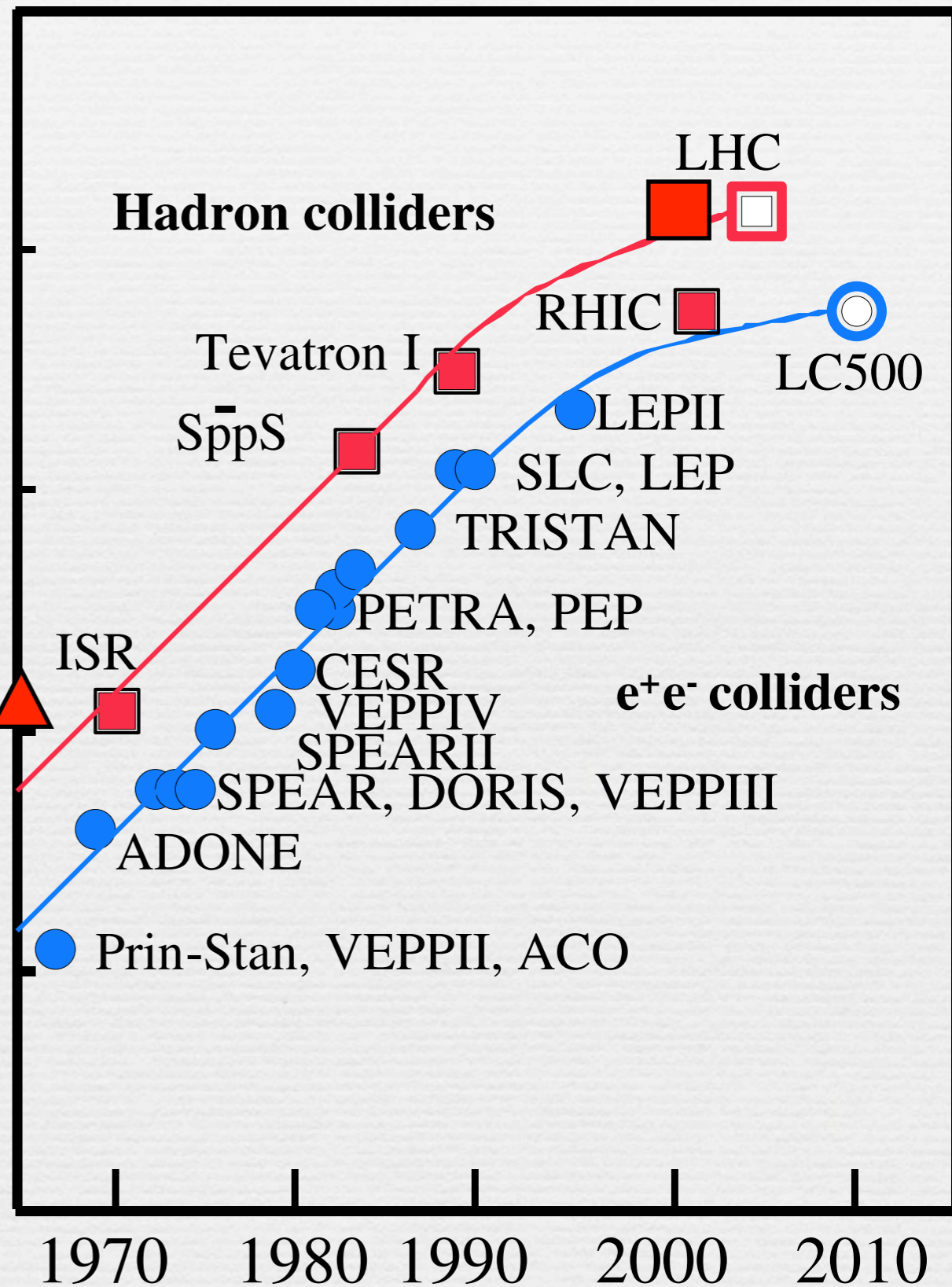
100

10

1

0

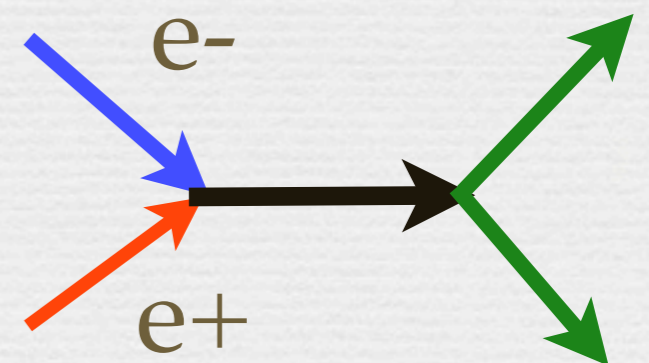
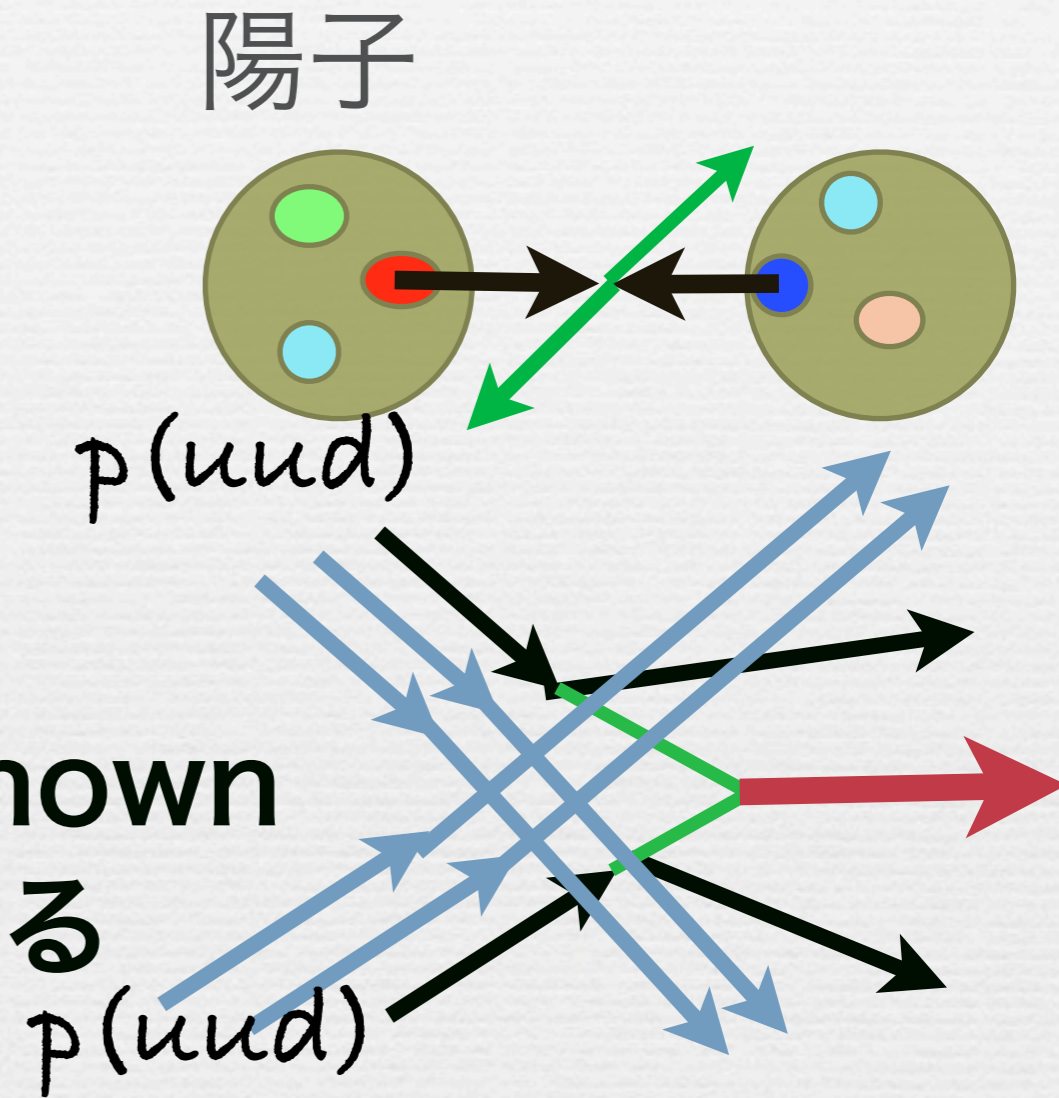
5



|        | $e^+e^-$            | pp       |
|--------|---------------------|----------|
| charm  | SPEAR<br>DORIS      | AGS      |
| bottom | CESR<br>KEKB/PEP II | fermi PA |
| tau    | SPEAR               |          |
| top    | ILC                 | Tevatron |
| Higgs  | ILC                 | LHC      |

# 陽子衝突と電子陽電子衝突

- 衝突は1個同士でおこる
- 陽子は複数のquarkの集まり
- 1個のエネルギー？1/3以下
- $E_p$ は大きい：TeV
  
- 電子は素粒子：エネルギーknown
- 全エネルギーが衝突に使われる
- $E_e$ は大きくない



# ルミノシティ

$$Yield = \mathcal{L}\sigma$$

## 衝突型実験の最重要パラメータ

**Luminosity**  $\mathcal{L} = \frac{Y}{\sigma} \propto \frac{N^2 f}{S_x S_y}$

**Y: Yield** 単位時間に事象が生成される数: 1/s

**$\sigma$ : cross section** 事象の断面積:  $\text{cm}^2$   **$\sigma$  物理**

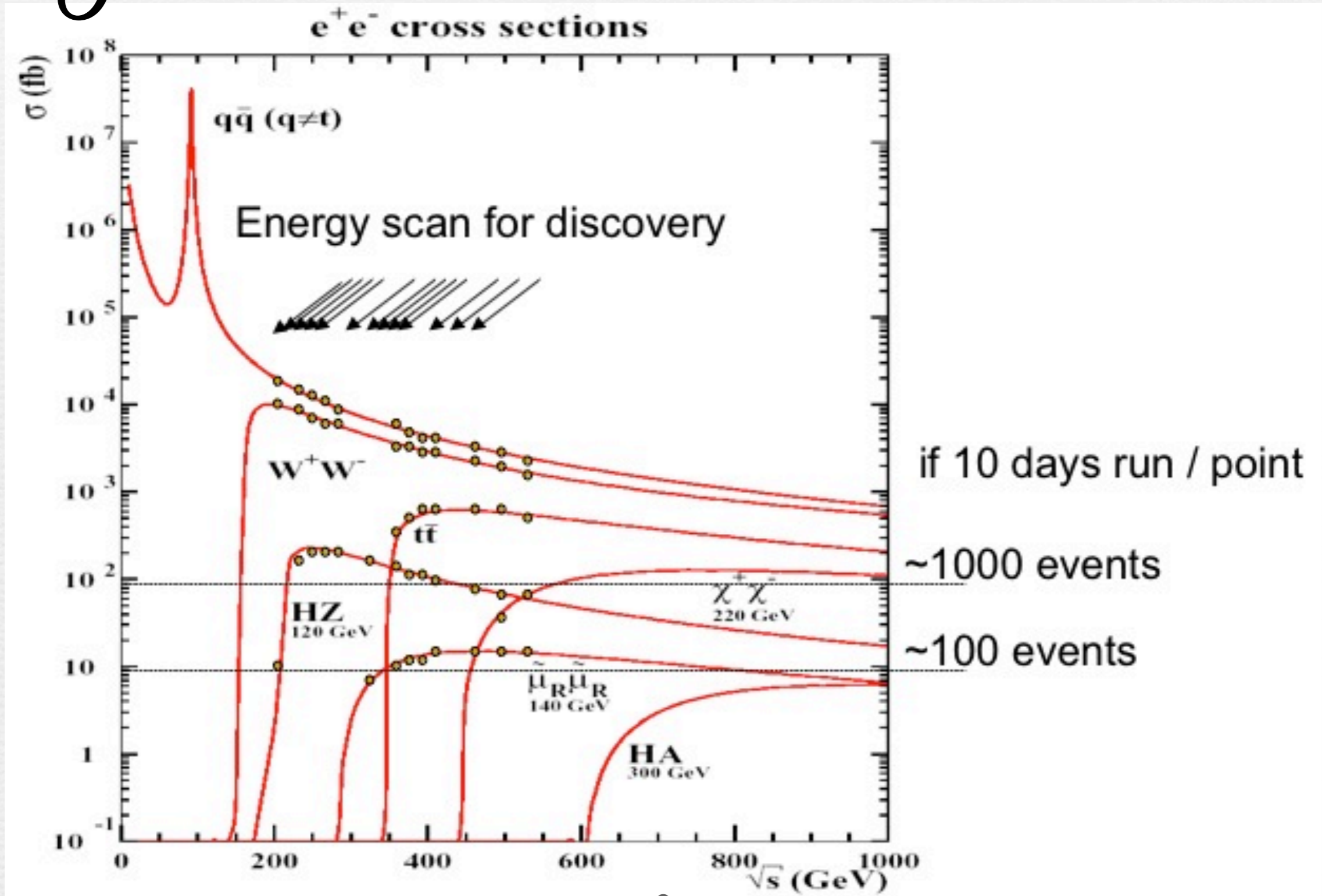
**N: beam中の粒子数**

**f: beamの衝突頻度:** 1/s  **$f_{ILC}=5$**

**$S_x, S_y$ : beamの広がり:** cm

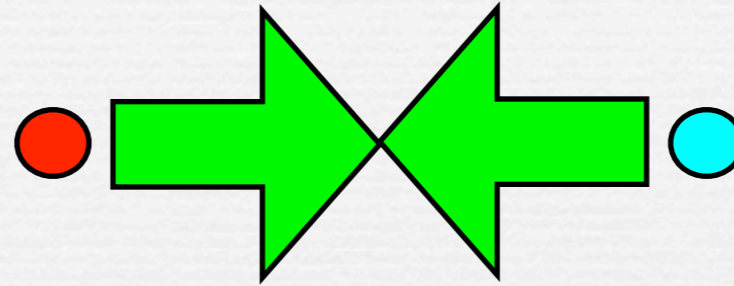
# 生成粒子数 $Yield = \mathcal{L}\sigma$

$\sigma$

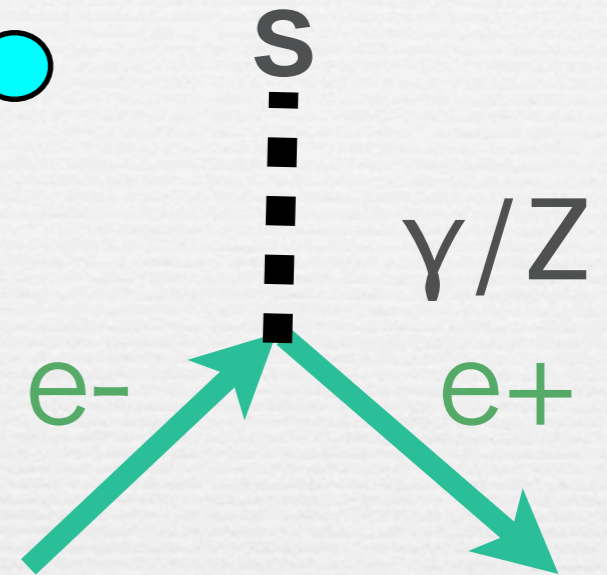


# ILC:電子陽電子衝突

☞ 電子反電子対消滅



☞ 初期状態を忘れて  $s$  が残る



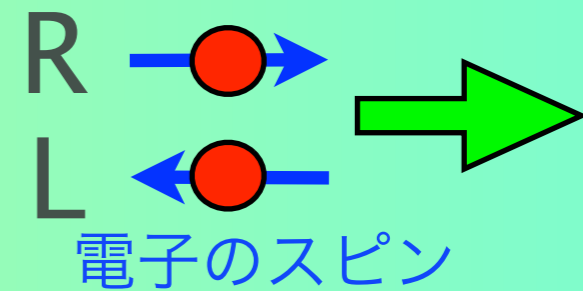
☞ 衝突前の全てのエネルギー利用

☞ 終状態：スピン1状態を生成：s-channel

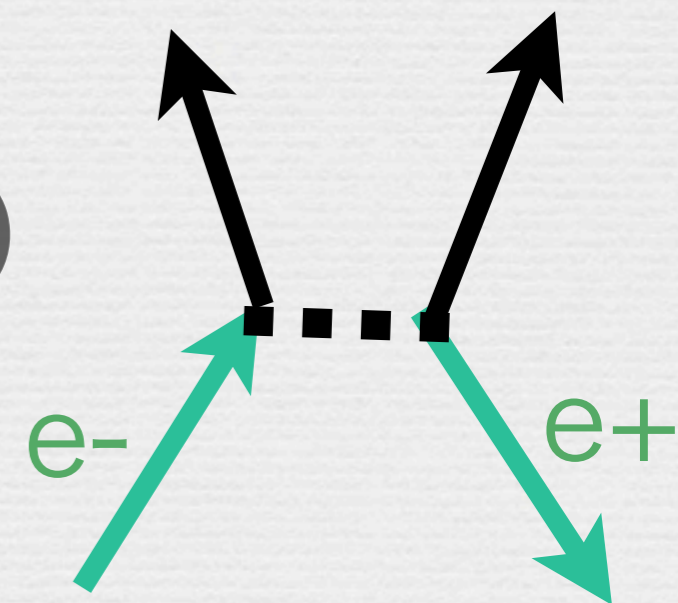
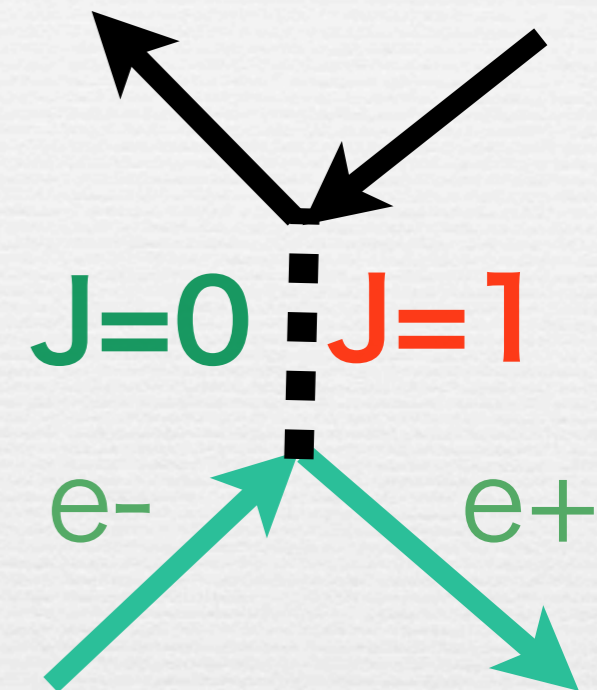
☞ 対生成= $f\bar{f}$ ,  $ZH$ ,  $WW$

☞ 偏極：電子のスピンをそろえる：終状態を選ぶ

# 偏極実験



- 生成粒子のスピンを制御
- $P(e^\pm) < 0$ : L,  $P(e^\pm) > 0$ : R
- J=1: RL/LR : SM and NewParticle**
- J=0: LL/RR: NewParticle!**
- スピン偏極度  $P = (N \uparrow - N \downarrow) / (N \uparrow + N \downarrow)$
- $P(e^-) \sim 80\%$ ,  $P(e^+) \sim 30\%$

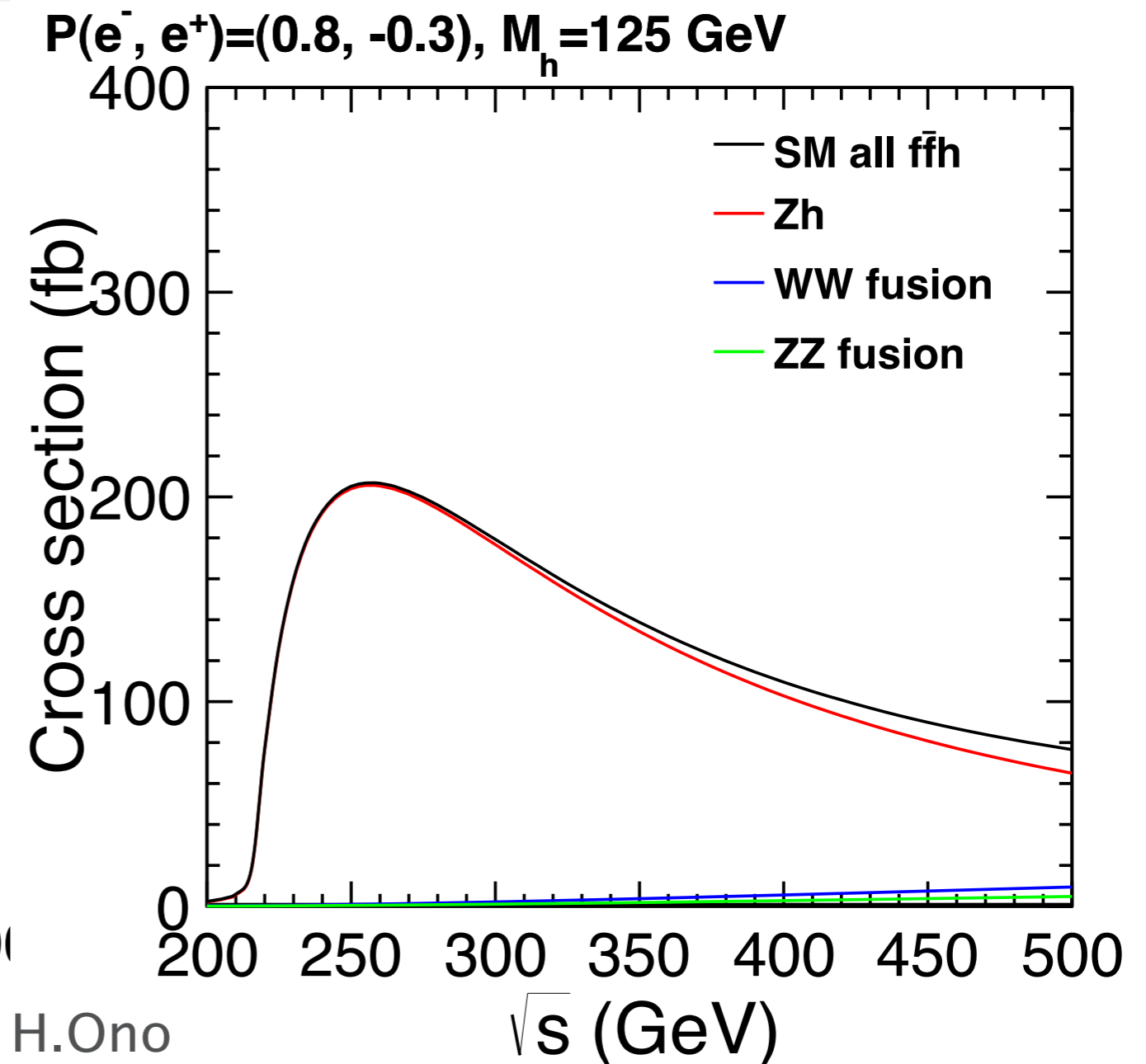
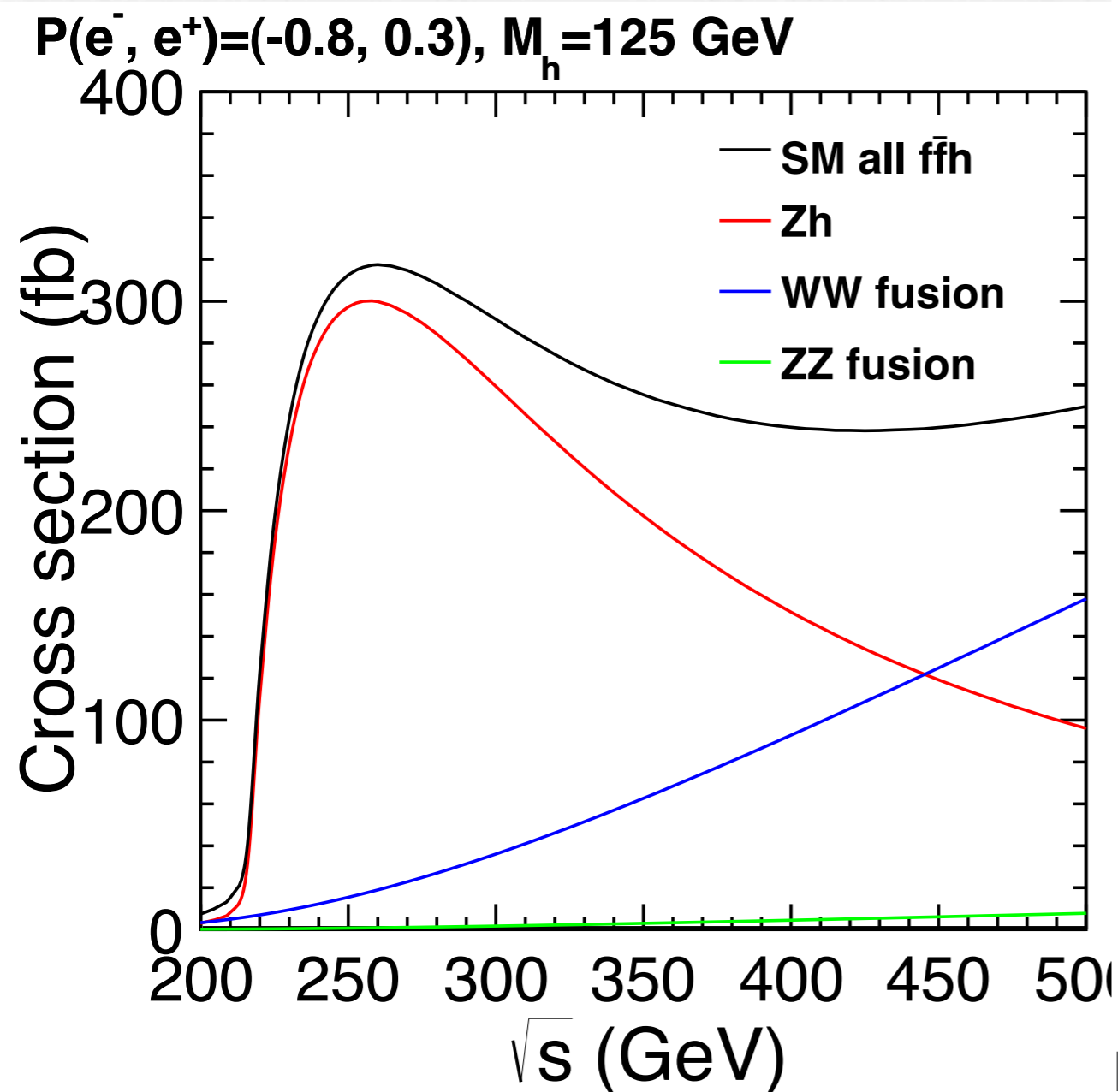


# 偏極の効果

ee>ZH の断面積

$P(-0.8, 0.3)$  vs  $P(0.8, -0.3)$

WWなし

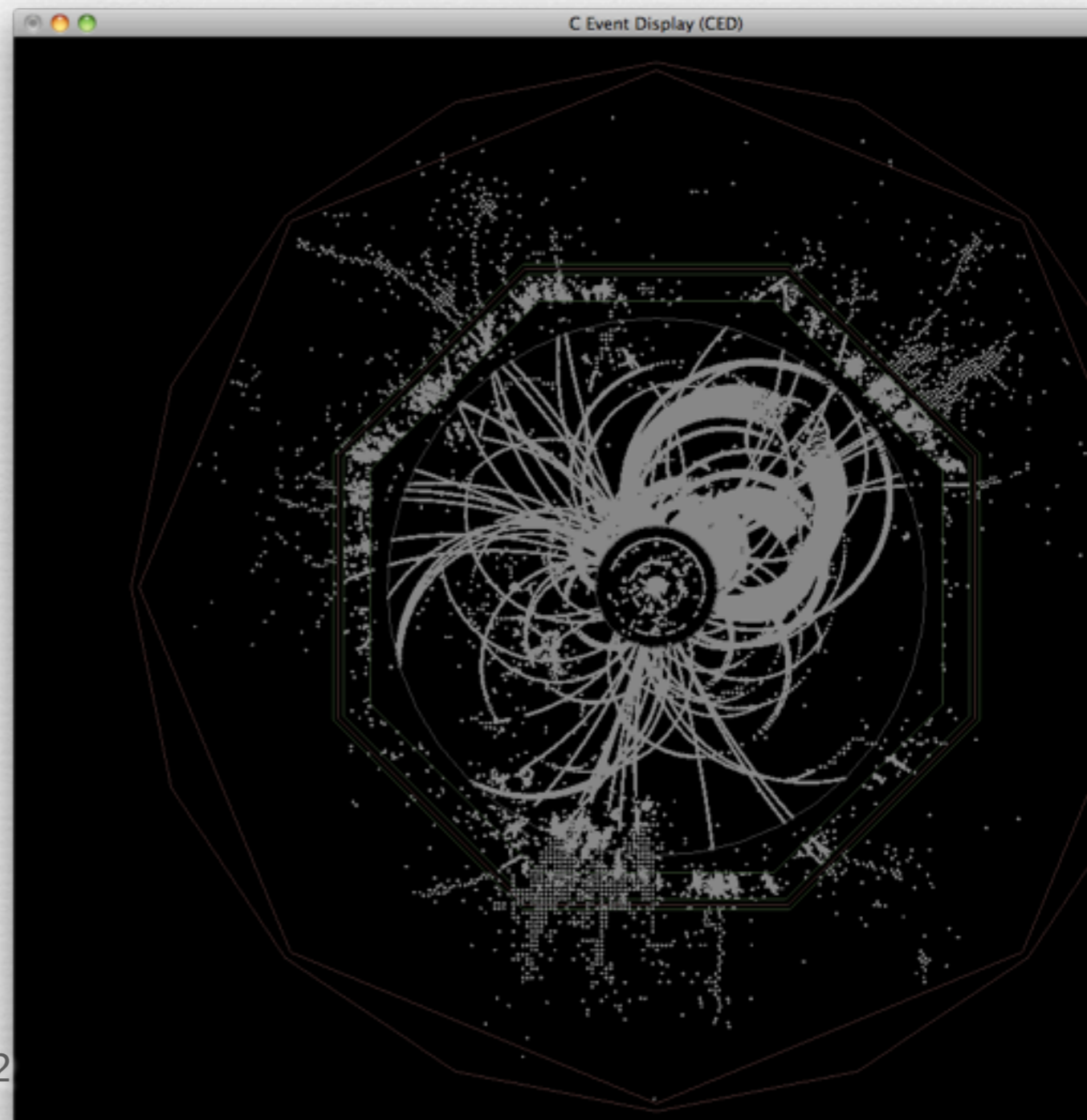
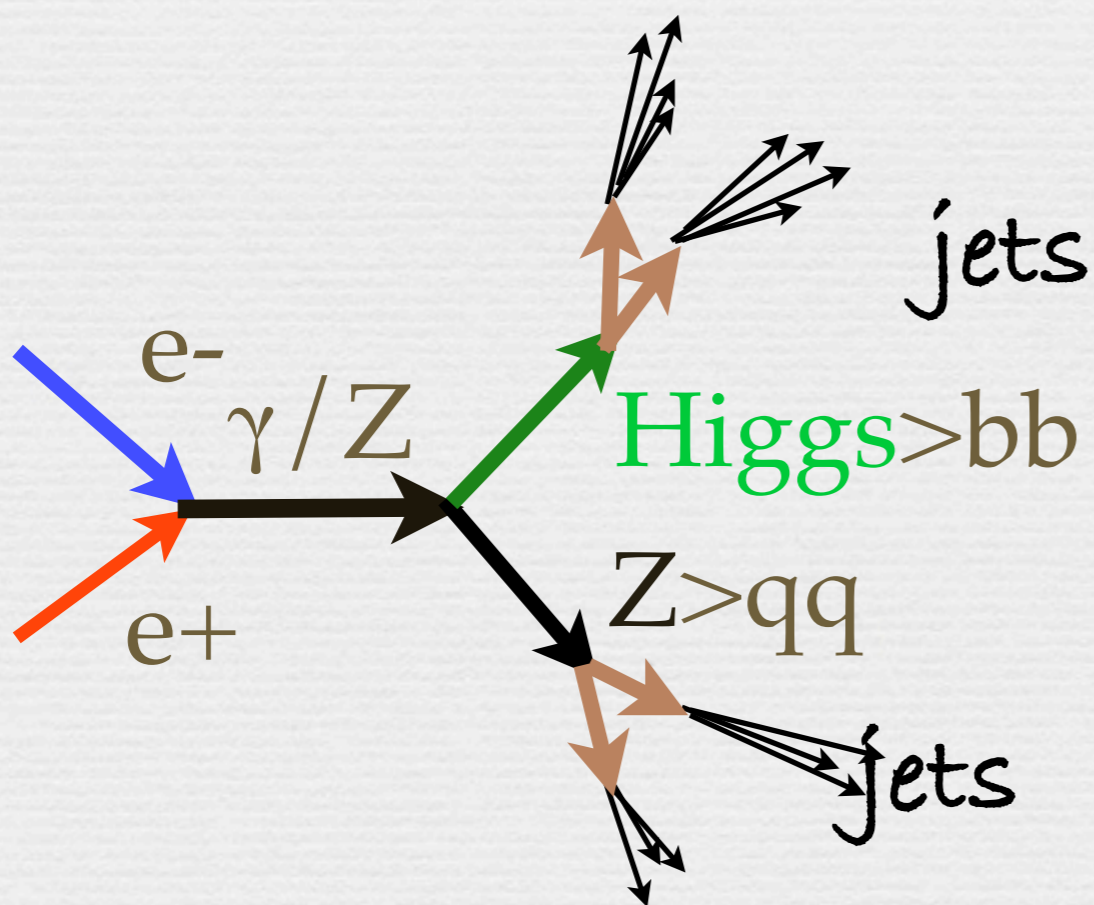


H.Ono

# 測定

$$\sigma = \frac{Y}{\mathcal{L}}$$

- 観測粒子：安定な  $\pi, K, e, p, n, \gamma$
- 知りたい物理にせまるか？
- 事象の同定と **数え上げ**  $> Y$

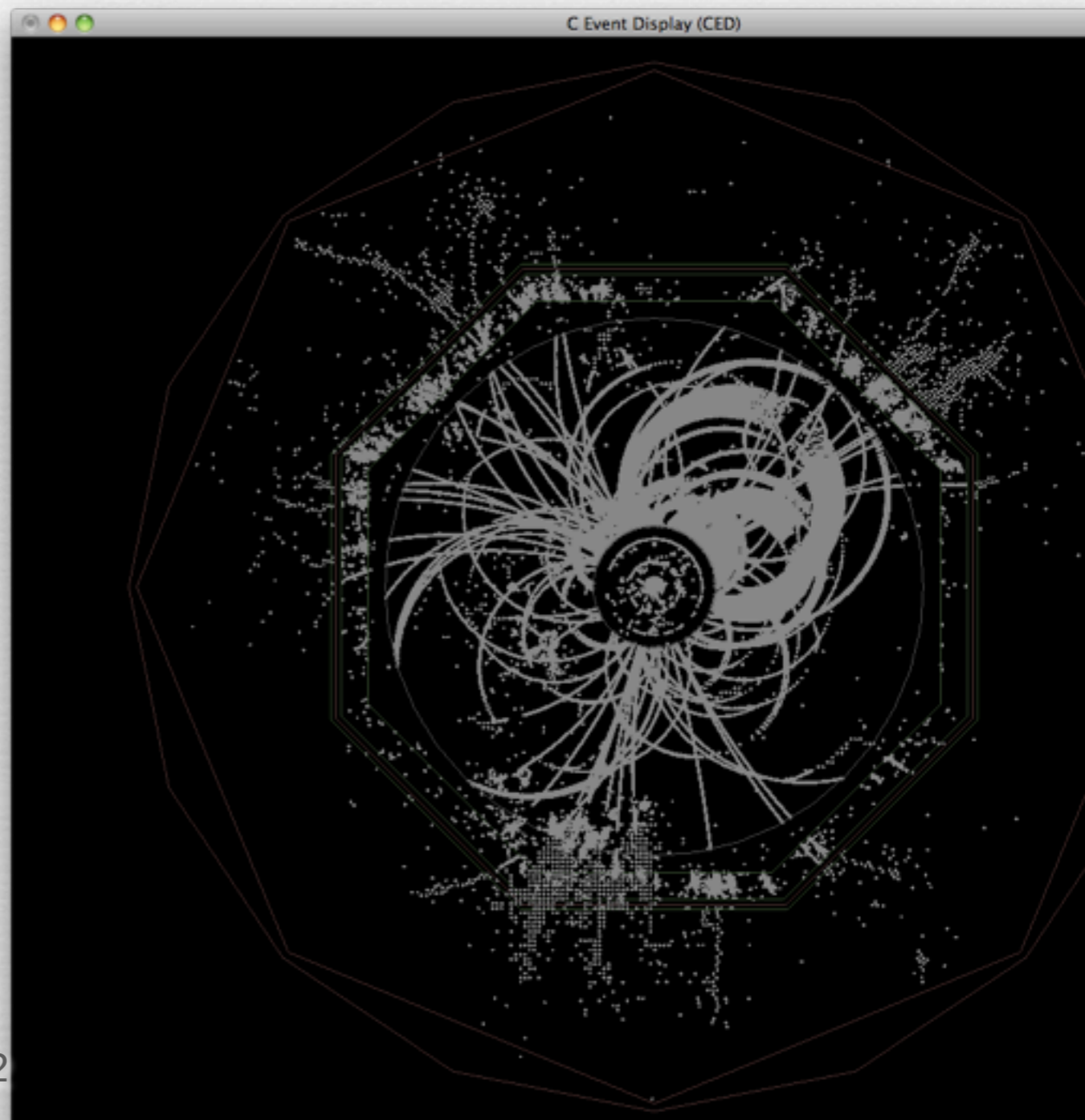
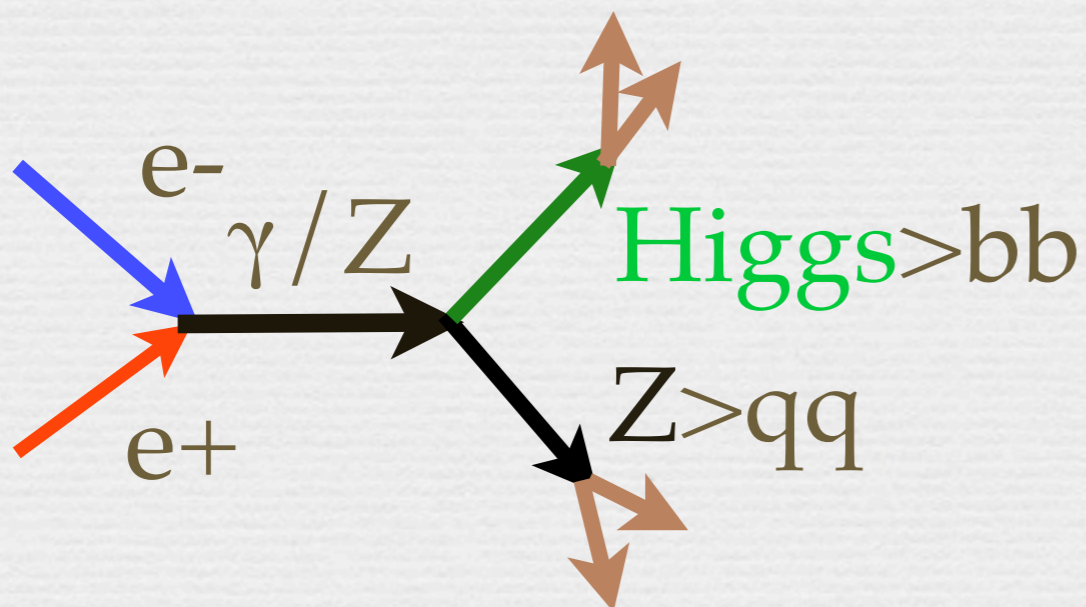




# 測定

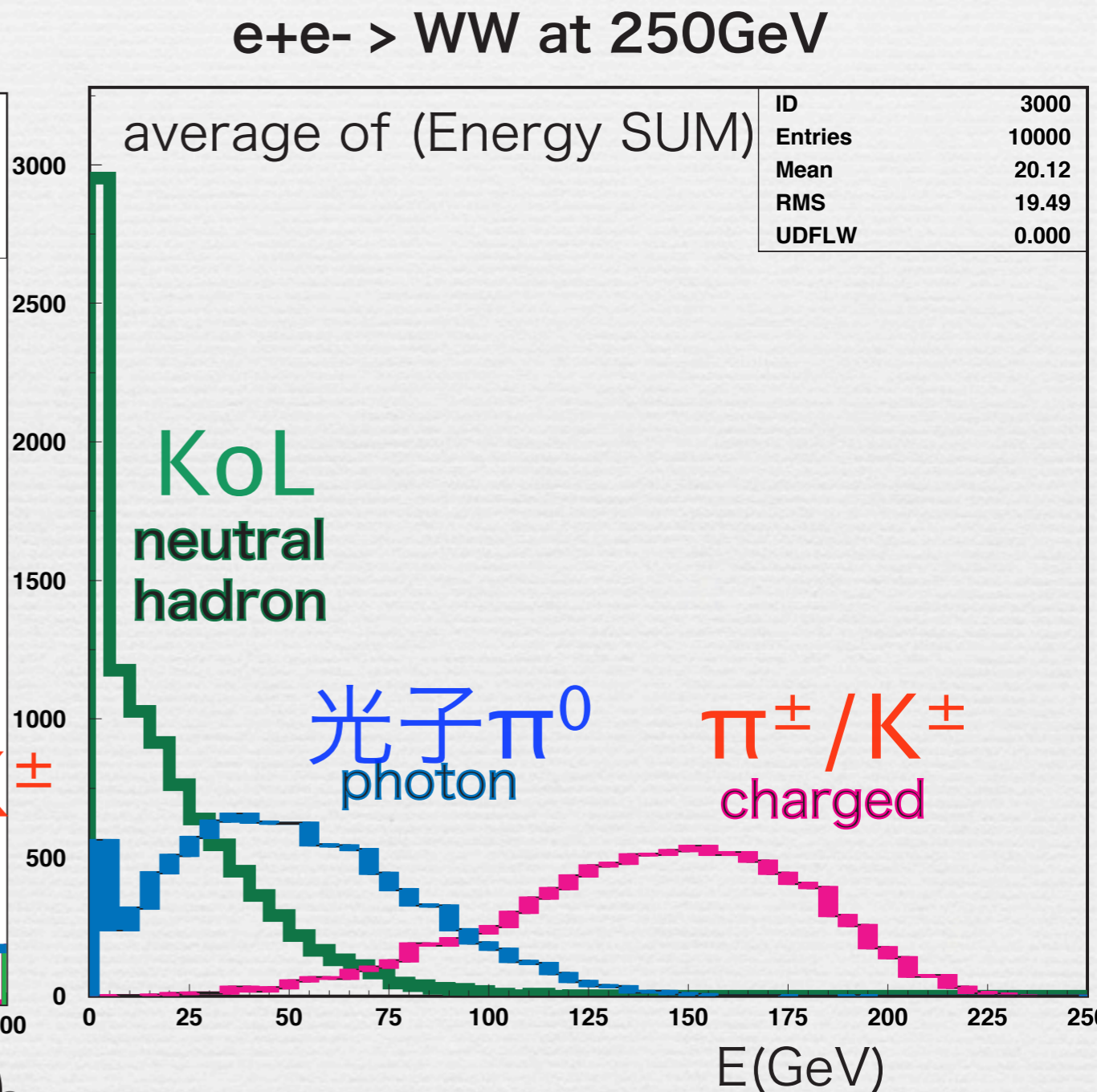
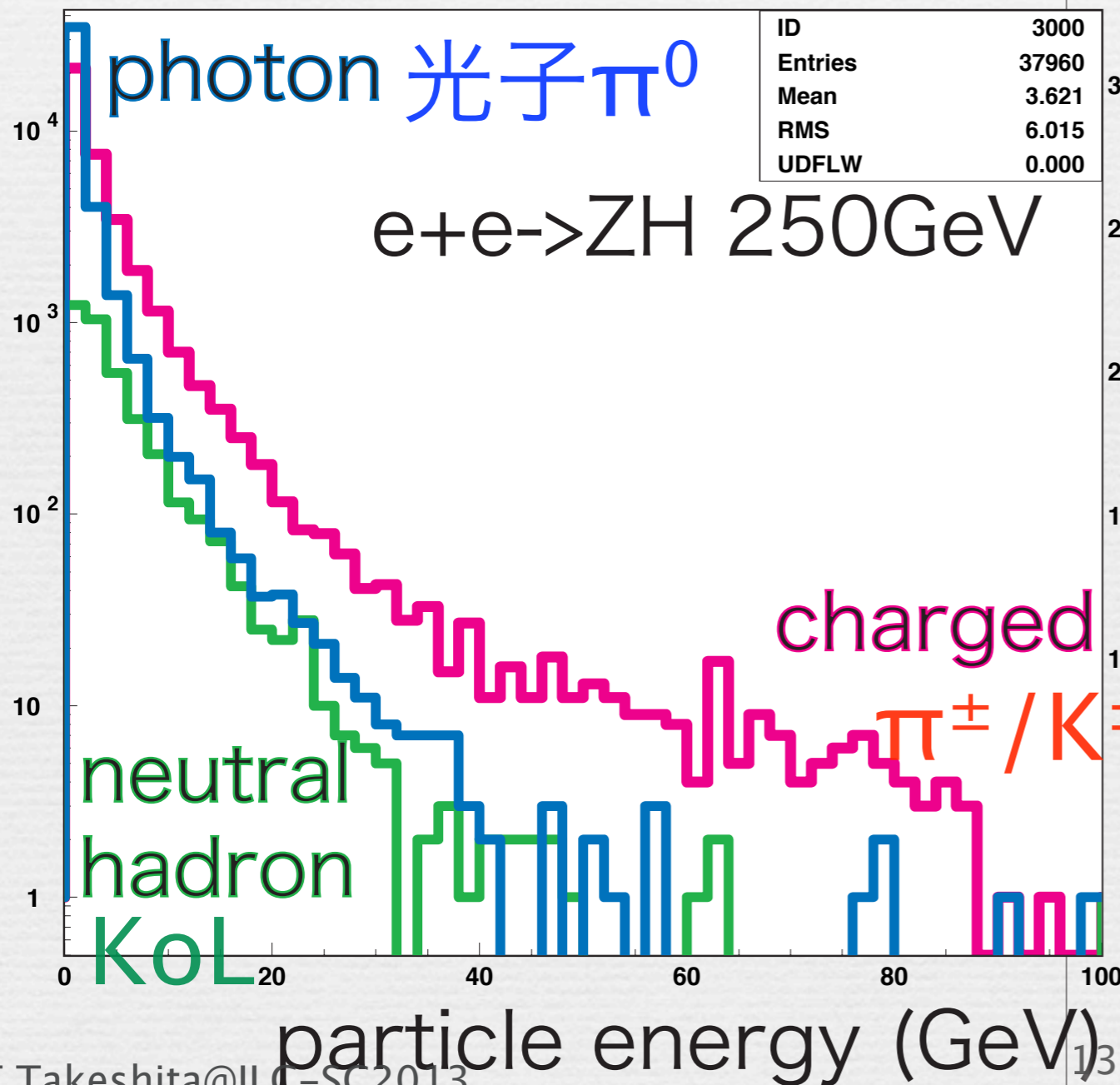
$$\sigma = \frac{Y}{\mathcal{L}}$$

- 観測粒子：安定な  $\pi, K, e, p, n, \gamma$
- 知りたい物理にせまるか？
- 事象の同定と **数え上げ**  $> Y$



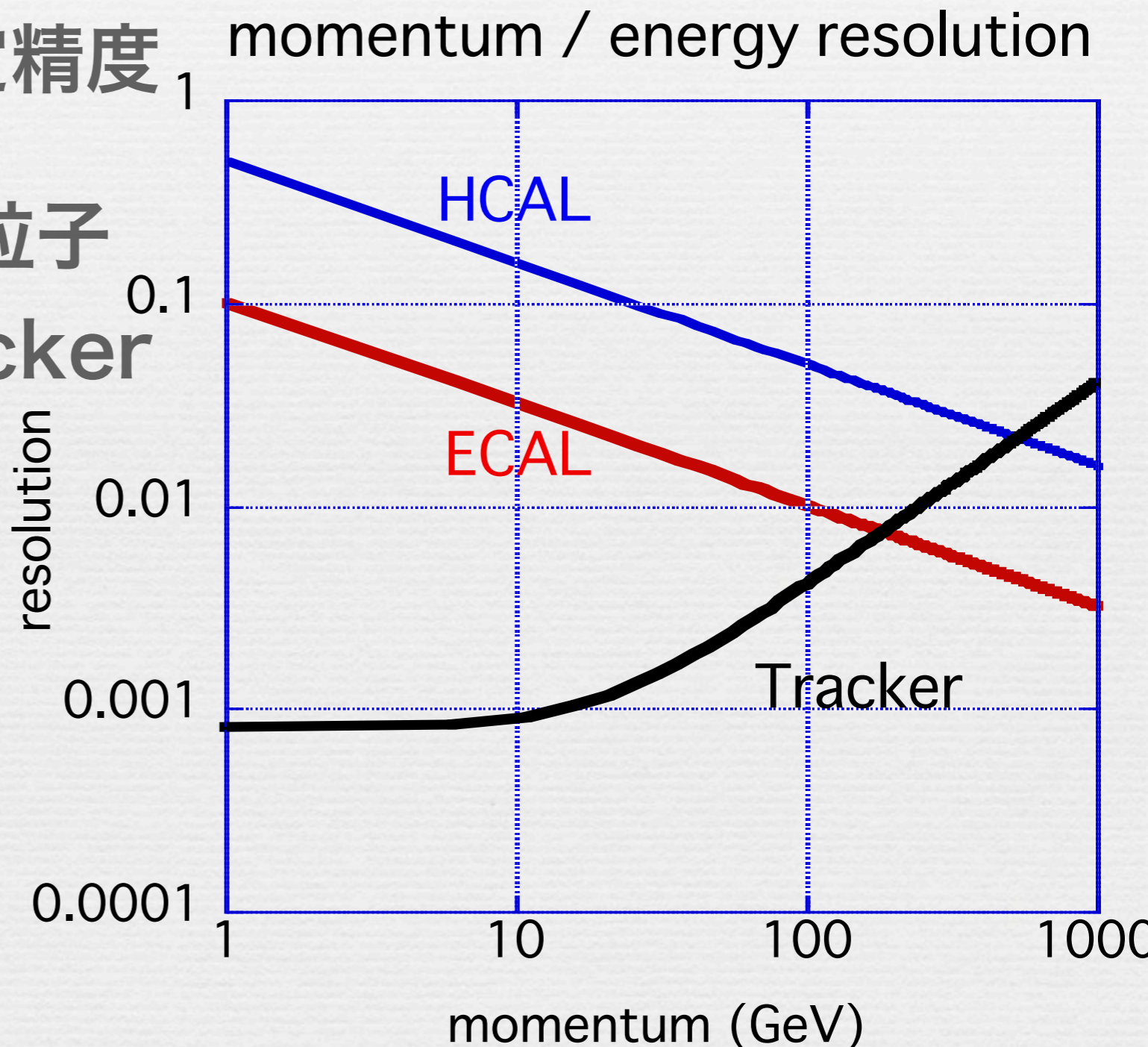
# 測定対象粒子

安定粒子エネルギー分布と平均エネルギー/event

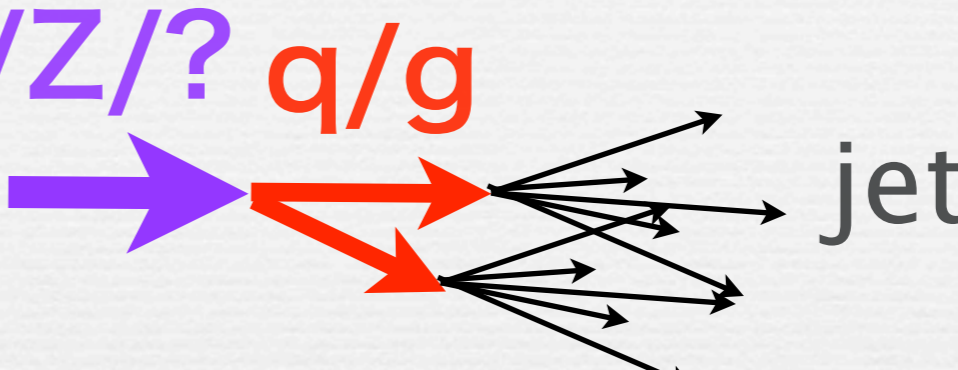


# 測定器の性能

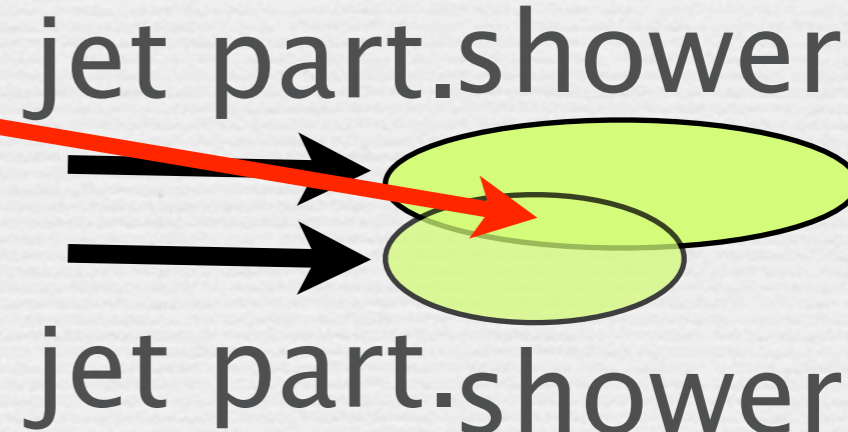
- 1 粒子エネルギー測定精度
- 200GeV以下は荷電粒子の運動量を測る : tracker  
 $\pi^\pm / K^\pm$
- エネルギー測定
- 光子 : ECAL  $\pi^0$
- KoL : HCAL



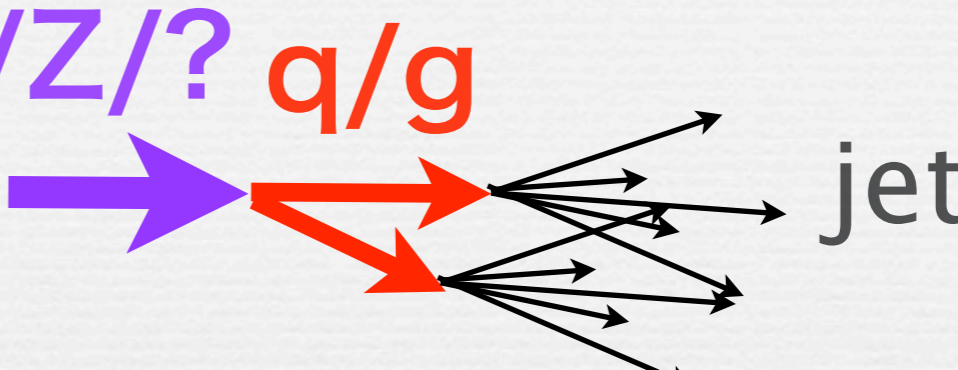
# ジェットの測定

- 終状態の大半はジェット
 
- ジェットエネルギー  $E_{jet}$  はジェット内の粒子の和

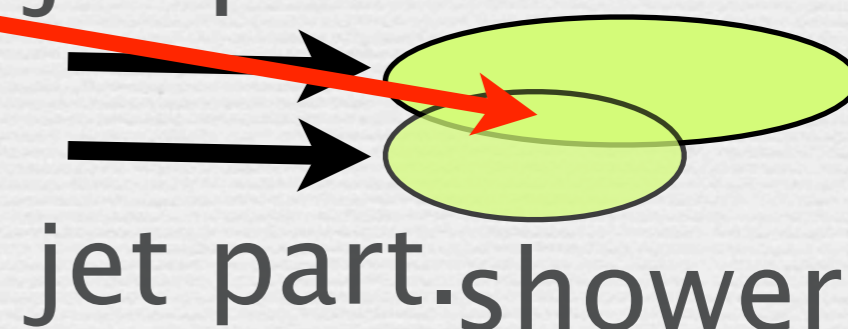
$$E_{jet} = \sum_{\text{charged}} p_i + \sum_{\text{photon}} E_i + \sum_{\text{neutral hadron}} E_i$$

- $E_{jet}$  の測定精度<sup>2</sup>  $\sim (w_c \text{荷電粒子})^2 + (w_p \text{光子})^2 + (w_k \text{KoL})^2 + (\text{confusion})^2$ 

- $w_c \sim 0.65, w_p \sim 0.25, w_k \sim 0.1$

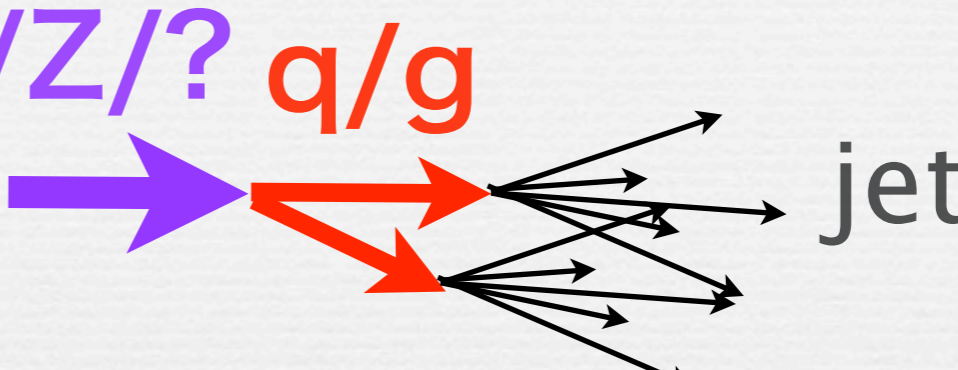
# ジェットの測定

- 終状態の大半はジェット
 
- ジェットエネルギー  $E_{jet}$  はジェット内の粒子の和

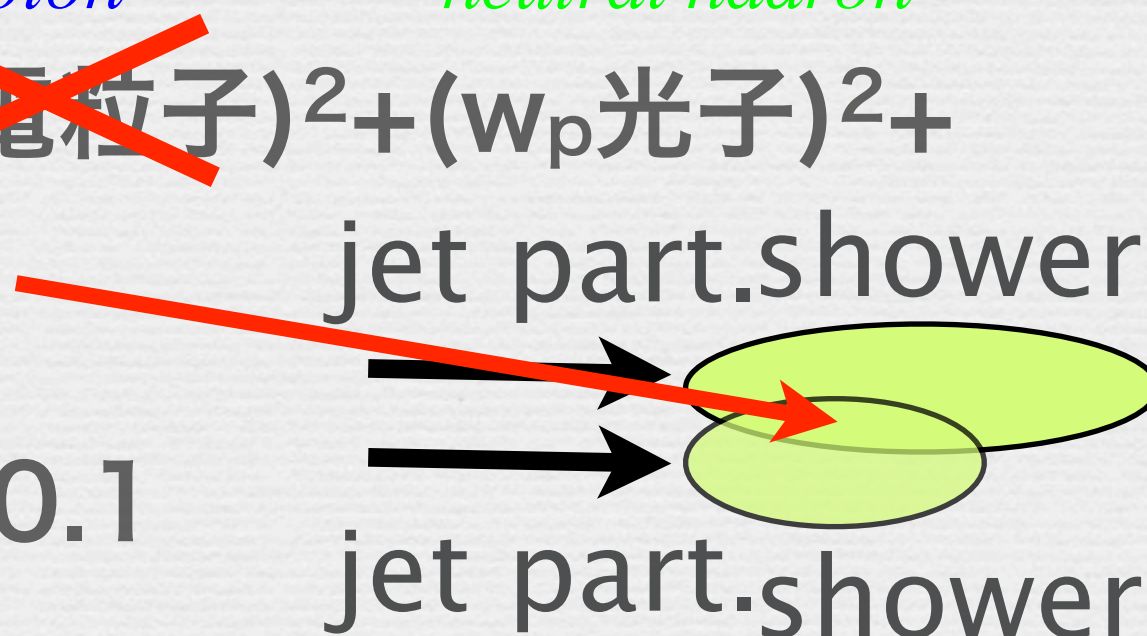
$$E_{jet} = \sum_{\text{charged}} p_i + \sum_{\text{photon}} E_i + \sum_{\text{neutral hadron}} E_i$$

- $E_{jet}$  の測定精度<sup>2</sup>  $\sim (w_c \text{荷電粒子})^2 + (w_p \text{光子})^2 + (w_k \text{KoL})^2 + (\text{confusion})^2$ 

- $w_c \sim 0.65, w_p \sim 0.25, w_k \sim 0.1$

# ジェットの測定

- 終状態の大半はジェット
 
- ジェットエネルギー  $E_{jet}$  はジェット内の粒子の和

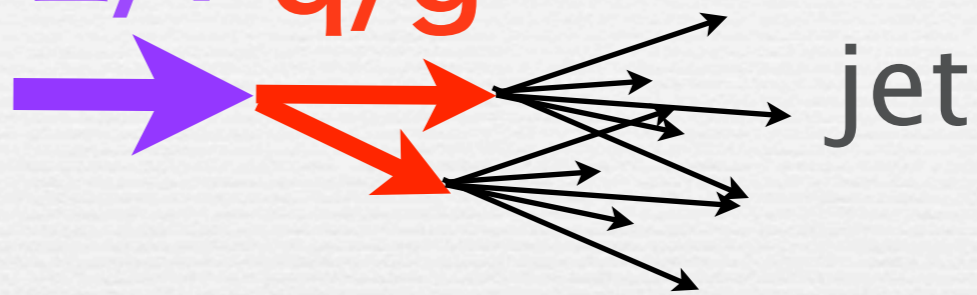
$$E_{jet} = \sum_{\text{charged}} p_i + \sum_{\text{photon}} E_i + \sum_{\text{neutral hadron}} E_i$$

- $E_{jet}$  の測定精度<sup>2</sup>  $\sim (w_c \text{荷電粒子})^2 + (w_p \text{光子})^2 + (w_k \text{KoL})^2 + (\text{confusion})^2$ 

- $w_c \sim 0.65, w_p \sim 0.25, w_k \sim 0.1$

# ジェットの測定

- 終状態の大半はジェット
- ジェットエネルギー  $E_{jet}$  はジェット内の粒子の和

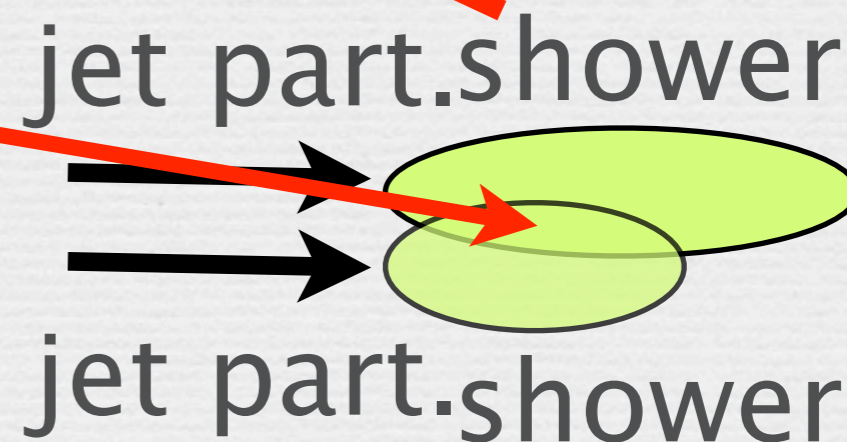
H/W/Z/? q/g



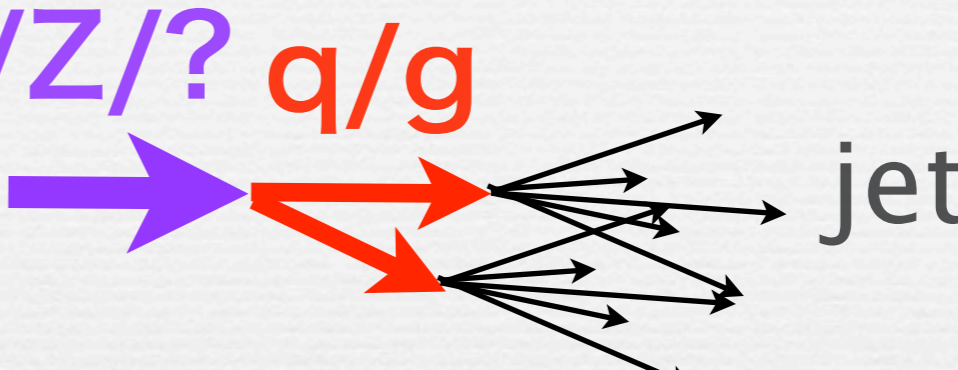
$$E_{jet} = \sum_{\text{charged}} p_i + \sum_{\text{photon}} E_i + \sum_{\text{neutral hadron}} E_i$$

- $E_{jet}$  の測定精度<sup>2</sup>  $\sim (w_c \text{荷電粒子})^2 + (w_p \text{光子})^2 + (w_k \text{KoL})^2 + (\text{confusion})^2$

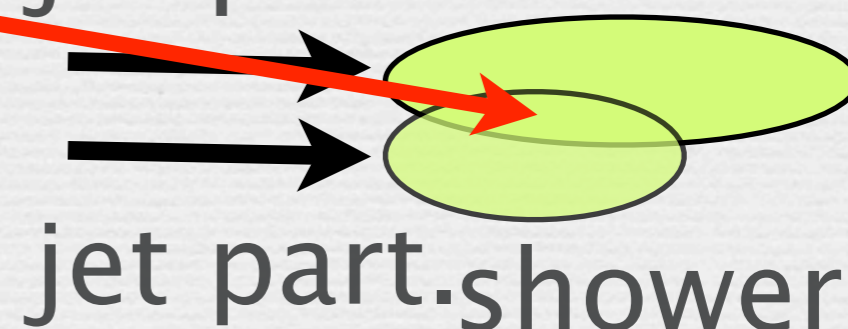
- $w_c \sim 0.65, w_p \sim 0.25, w_k \sim 0.1$



# ジェットの測定

- 終状態の大半はジェット 
- ジェットエネルギー  $E_{jet}$  はジェット内の粒子の和

$$E_{jet} = \sum_{\text{charged}} p_i + \sum_{\text{photon}} E_i + \sum_{\text{neutral hadron}} E_i$$

- $E_{jet}$  の測定精度<sup>2</sup>  $\sim (w_c \text{荷電粒子})^2 + (w_p \text{光子})^2 + (w_k \text{KoL})^2 + (\text{confusion})^2$  
- $w_c \sim 0.65, w_p \sim 0.25, w_k \sim 0.1$



# 荷電粒子測定

磁場中で円運動

$$p = eBR$$

半径R(m), B(T), 運動量 p(GeV/c)

測定量：通過位置 > R計算

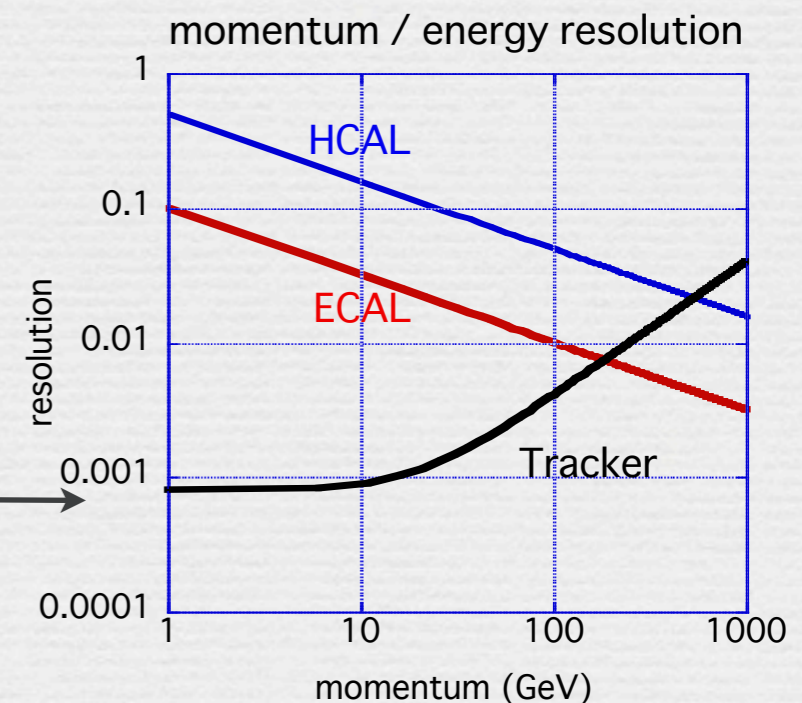
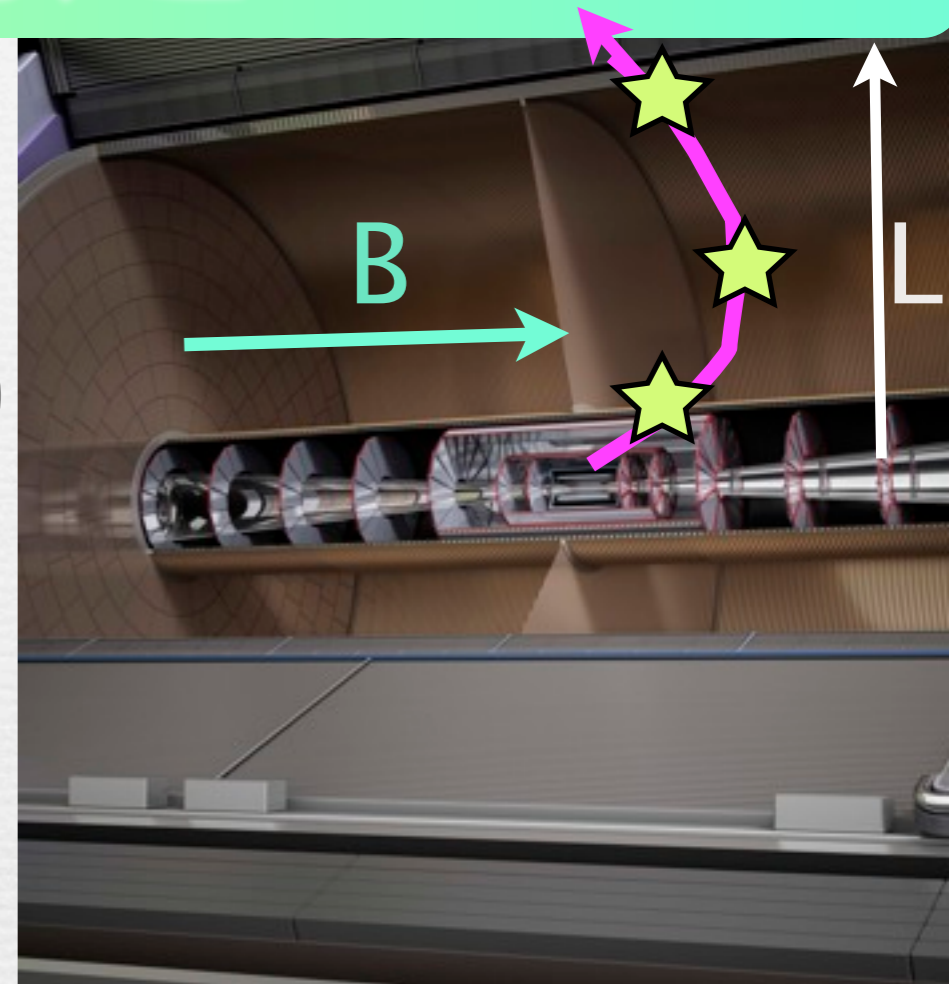
測定精度

$$\frac{\sigma}{p} \sim \frac{p}{\sqrt{N} BL^2}$$

B&Lを大きく、多数点N測定

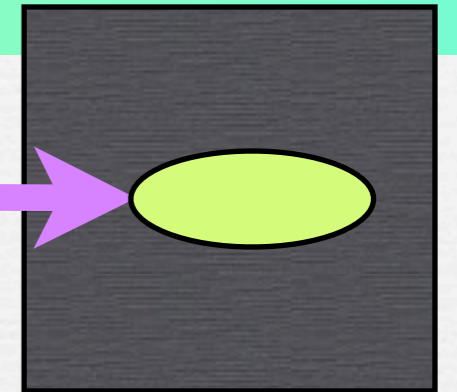
問題点：大きなコイル、物質減らす  
multiple-scattering

> 与那嶺TPC



# エネルギー測定

カロリメータ



• カロリメータ  $E \propto E_{\text{measured}}$

• 入射粒子を止める~ (止まるまでに落とすエネルギー) : 重い物質

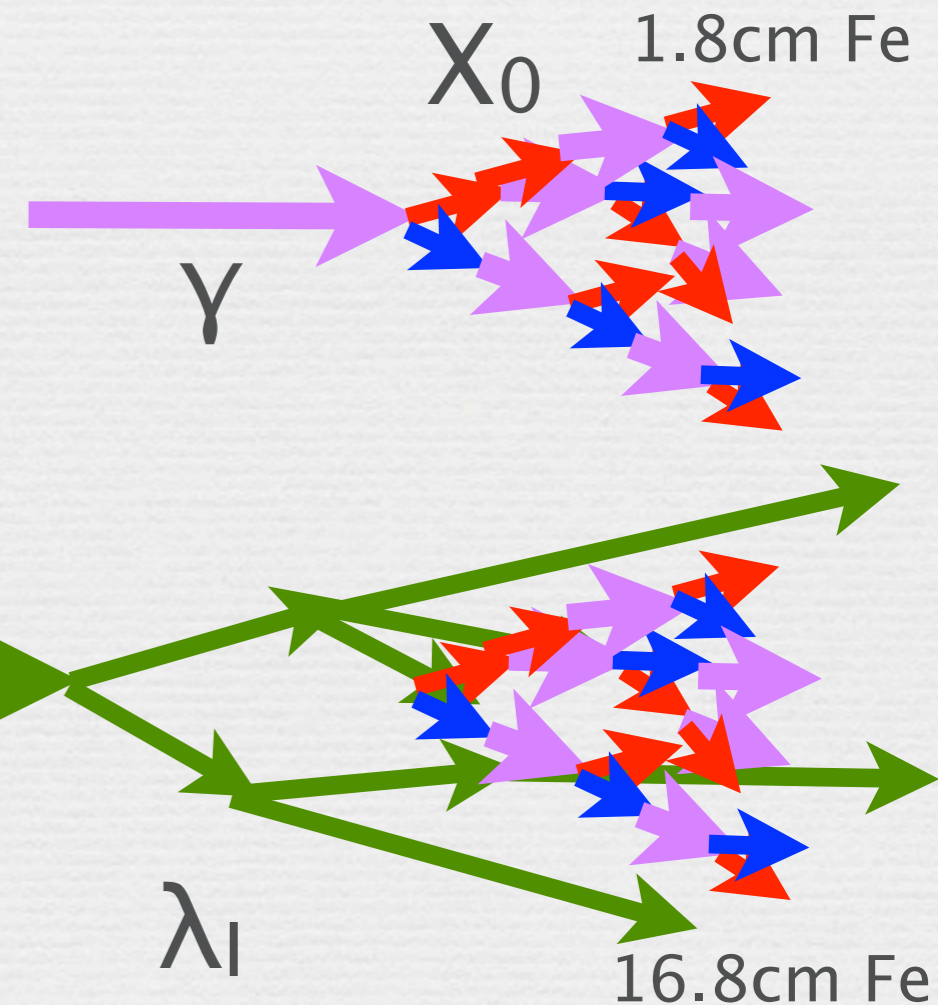
• 光子/電子 : 電磁シャワー : 短い  
ECAL

• ハドロン : ハドロンシャワー : 長い、電磁シャワーを含む  
HCAL

• サンプリング型と一様型

> 須藤/小寺

crystal



# どうして止まるか？

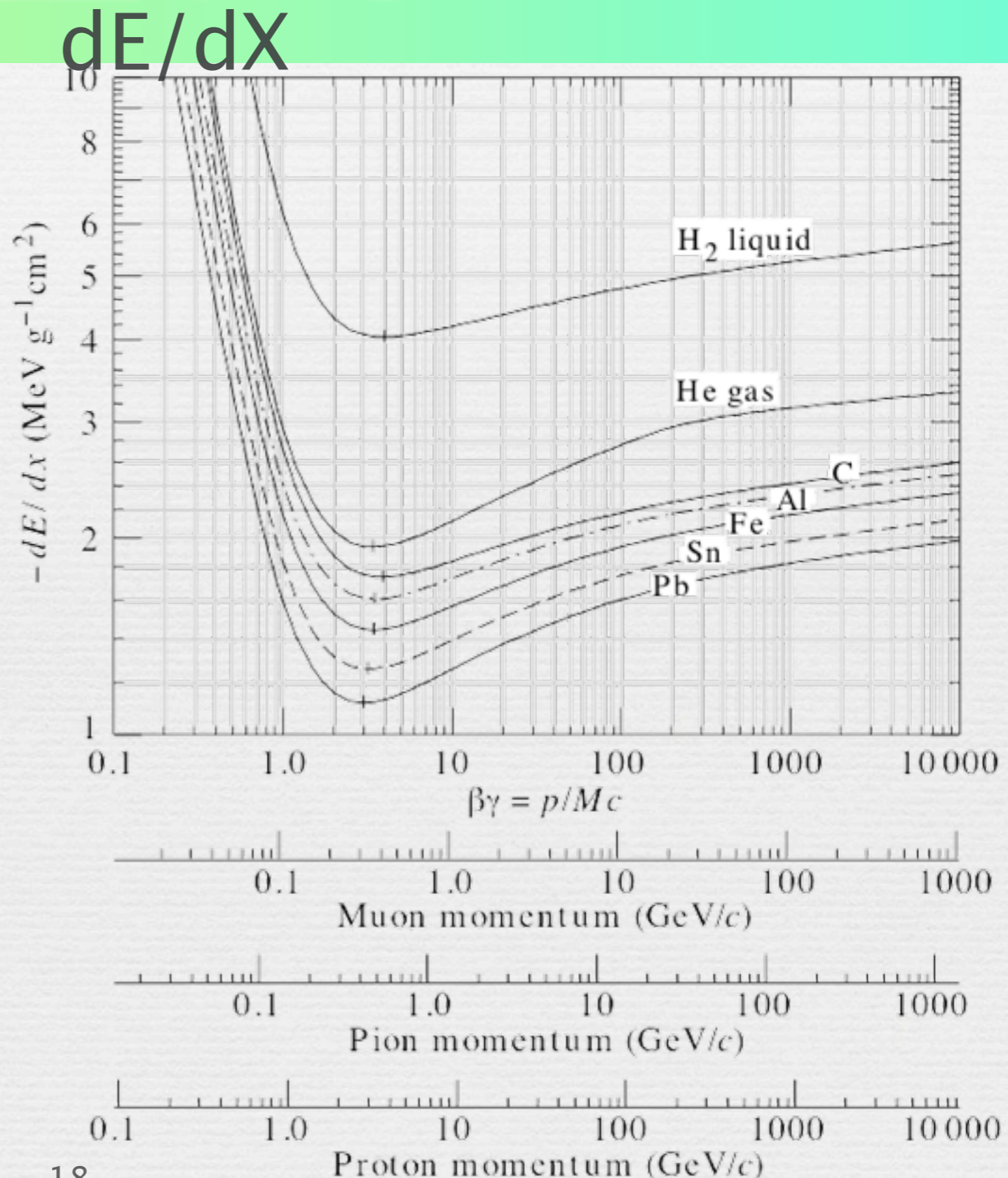
物質を通過すると原子をイオン化し自分はエネルギーを失う

$dE/dX$  (MeV/gcm<sup>2</sup>)

密度をかけて

$dE/dX$  (MeV/cm)

止まる@X



# どうして止まるか？

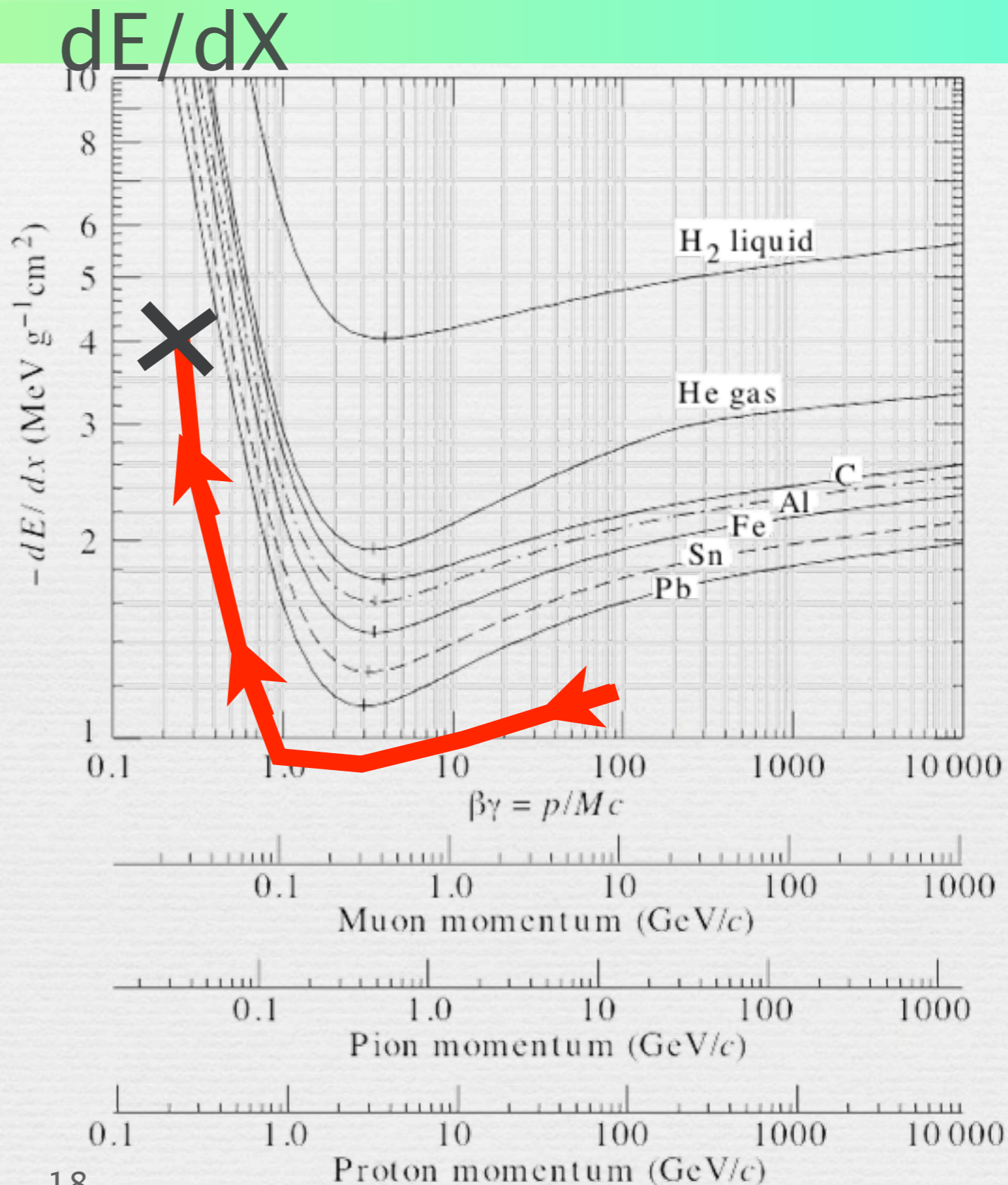
物質を通過すると原子をイオン化し自分はエネルギーを失う

$dE/dX$  (MeV/gcm<sup>2</sup>)

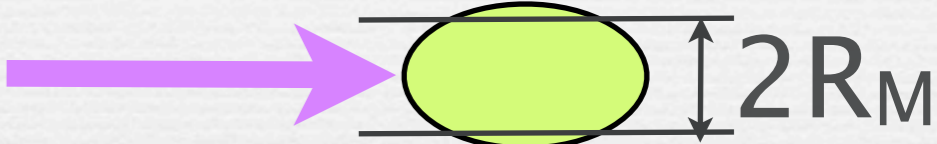
密度をかけて

$dE/dX$  (MeV/cm)

止まる@X



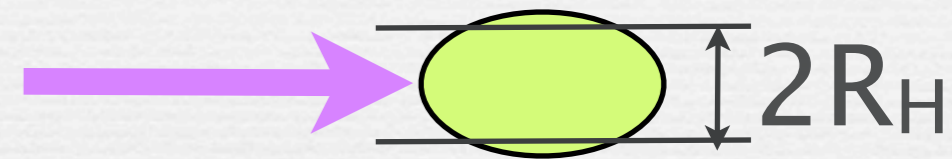
# 電磁シャワー-CAL

- ❖ Moliere radius: 90% の電磁シャワーが入る半径
- ❖ 電磁シャワーの横方向の広がり 
- ❖ エネルギー分解能:  $\frac{\sigma}{E} \sim \frac{A}{\sqrt{E}} \oplus B$   $R_M^{\text{Fe}} \sim 1.26\text{cm}, R_M^{\text{W}} \sim 0.70\text{cm}$
- ❖ A: stochastic: シャワーのふらつき ~15%  
統計項
- ❖ B: constant: もれ, 非一様性 ~1%  
定数項
- ❖ sampling ECAL: 3D再構成  
奥行き  $\sim 25X_0 \sim 9\text{cmW}$

# ハドロンシャワー-CAL

90% のハドロンシャワーが入る半径

~7cm 吸収物質Fe



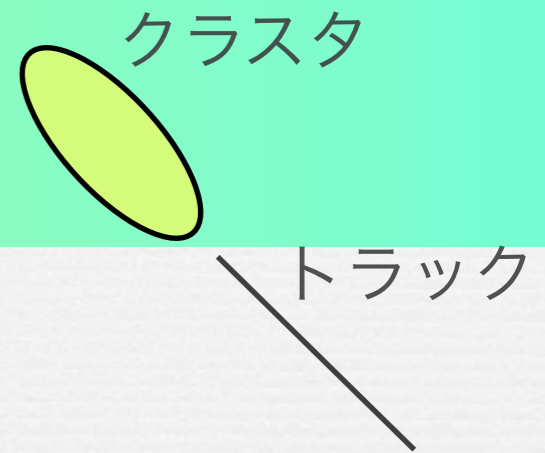
エネルギー分解能： $\frac{\sigma}{E} \sim \frac{A}{\sqrt{E}} \oplus B$

A: stochastic : シャワーのふらつき~50%  
統計項

B: constant : もれ, 非一様性 ~ 4%  
定数項

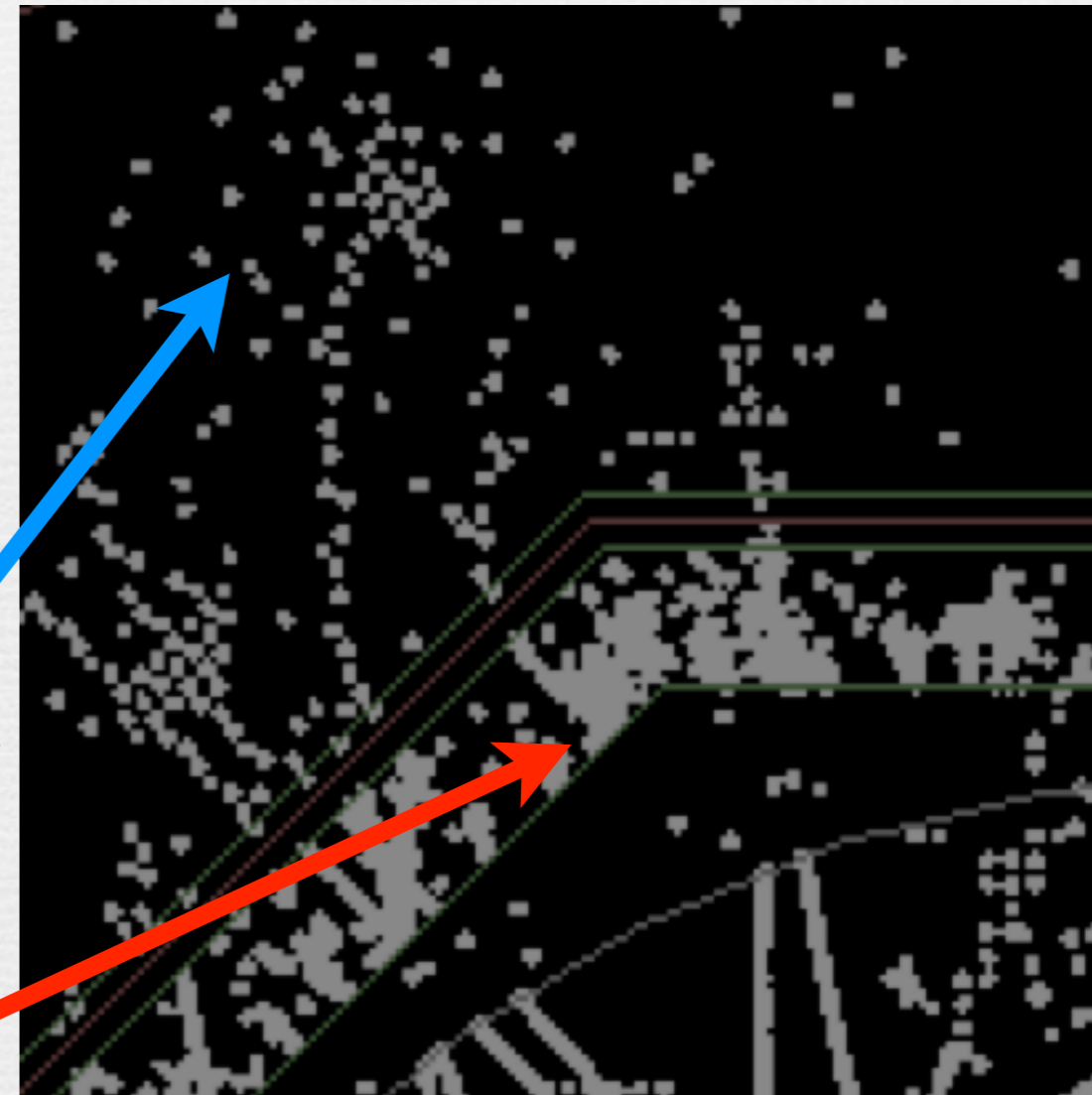
sampling HCAL : 3D再構成  
奥行き~ $5\lambda_1$ ~  
90cmFe

# 再構成



- jet内の粒子を測定
- トラックから運動量ベクトル
- カロリメータからエネルギー
- jetの4 vectorを計算 荷電粒子
- トラックとクラスターマッチング
- ECALから取り除く
- 残りは光子 (のはず)

HCAL

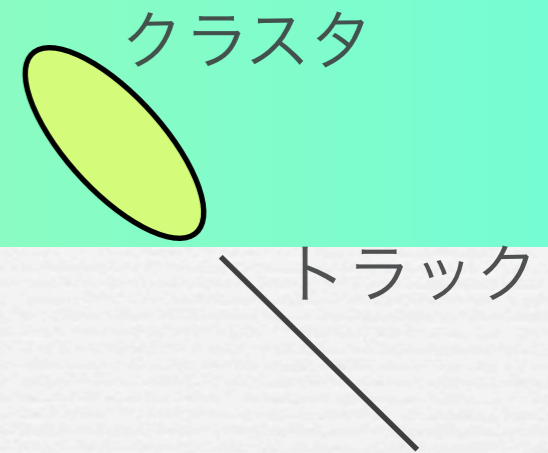


ECAL

track

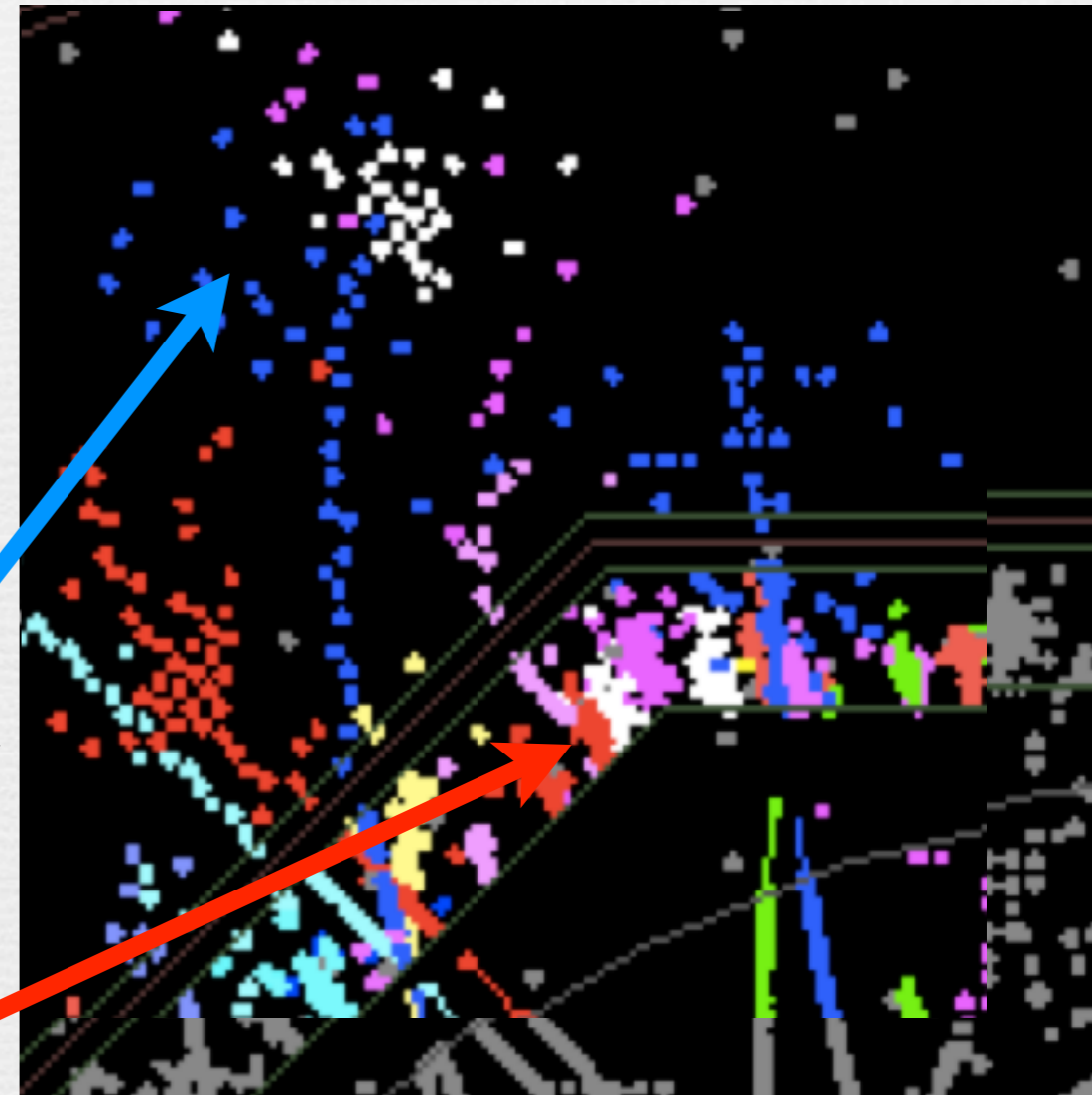
光子

# 再構成



- jet内の粒子を測定
- トラックから運動量ベクトル
- カロリメータからエネルギー
- jetの4 vectorを計算 荷電粒子
- トラックとクラスターマッチング
- ECALから取り除く
- 残りは光子 (のはず)

HCAL



ECAL

track

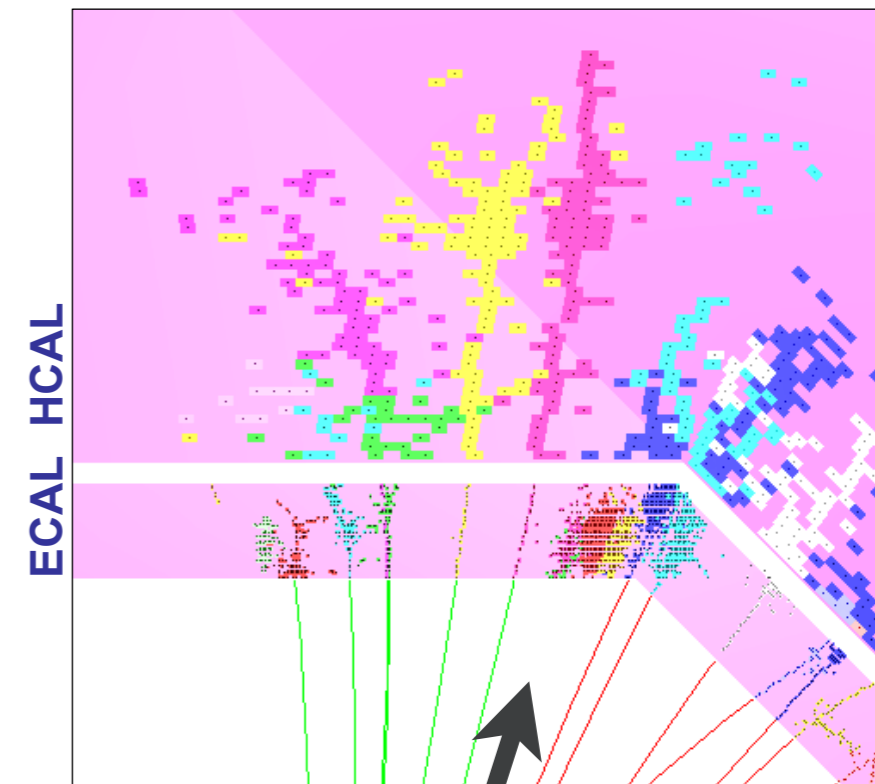
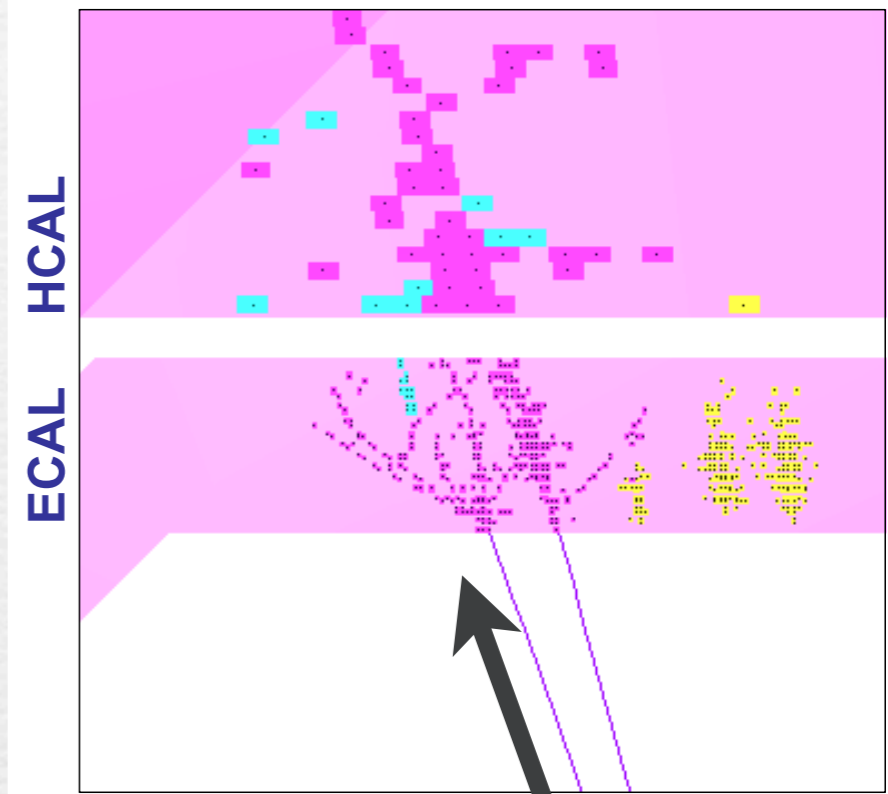
光子



# カロリメータ

- ECAL (前) + HCAL(後)
- 光子測定性能：横方向の広がり
- ECAL: タングステン吸収層 + 薄い測定層  
横広がり
- HCAL: <sup>non-mag</sup>ステンレス吸収層  
縦広がり

| 吸収物質 | $X_0(\text{cm})$ | $\rho$ | $\lambda_1(\text{cm})$ | $\lambda_1/X_0$ |
|------|------------------|--------|------------------------|-----------------|
| Fe   | 1.77             | 7.87   | 16.8                   | 9.5             |
| W    | 0.35             | 19.3   | 9.94                   | 28              |





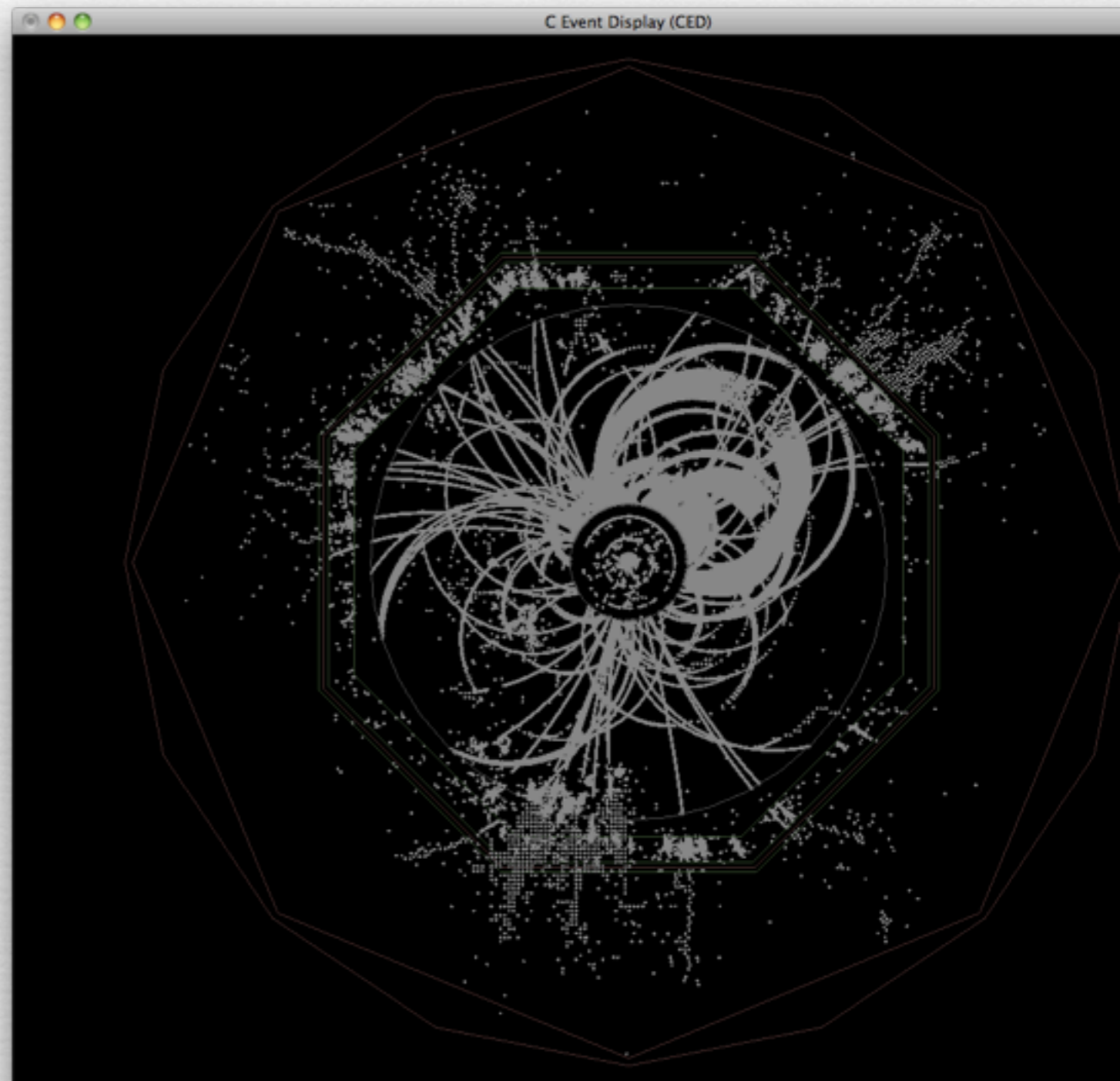
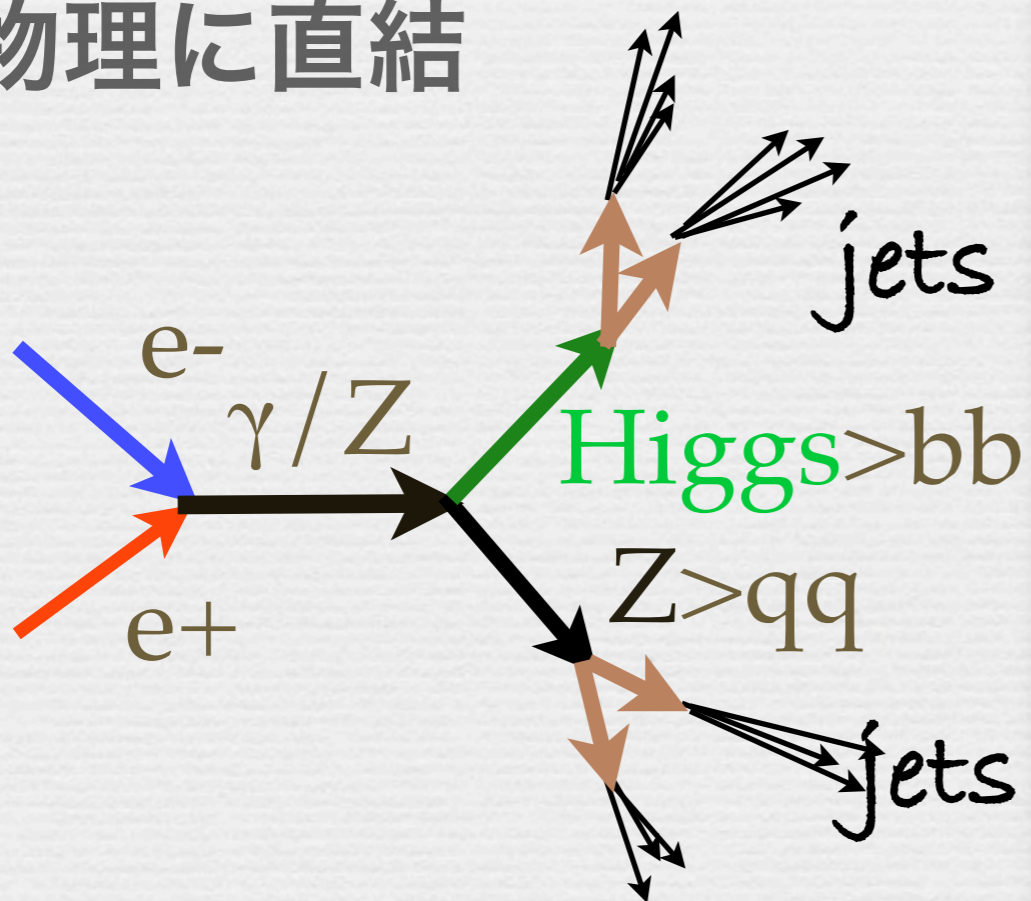
# PFA

Particle Flow Algorithm: software

測定されたデータを使い粒子を識別

測定器の細分化を要求

物理に直結



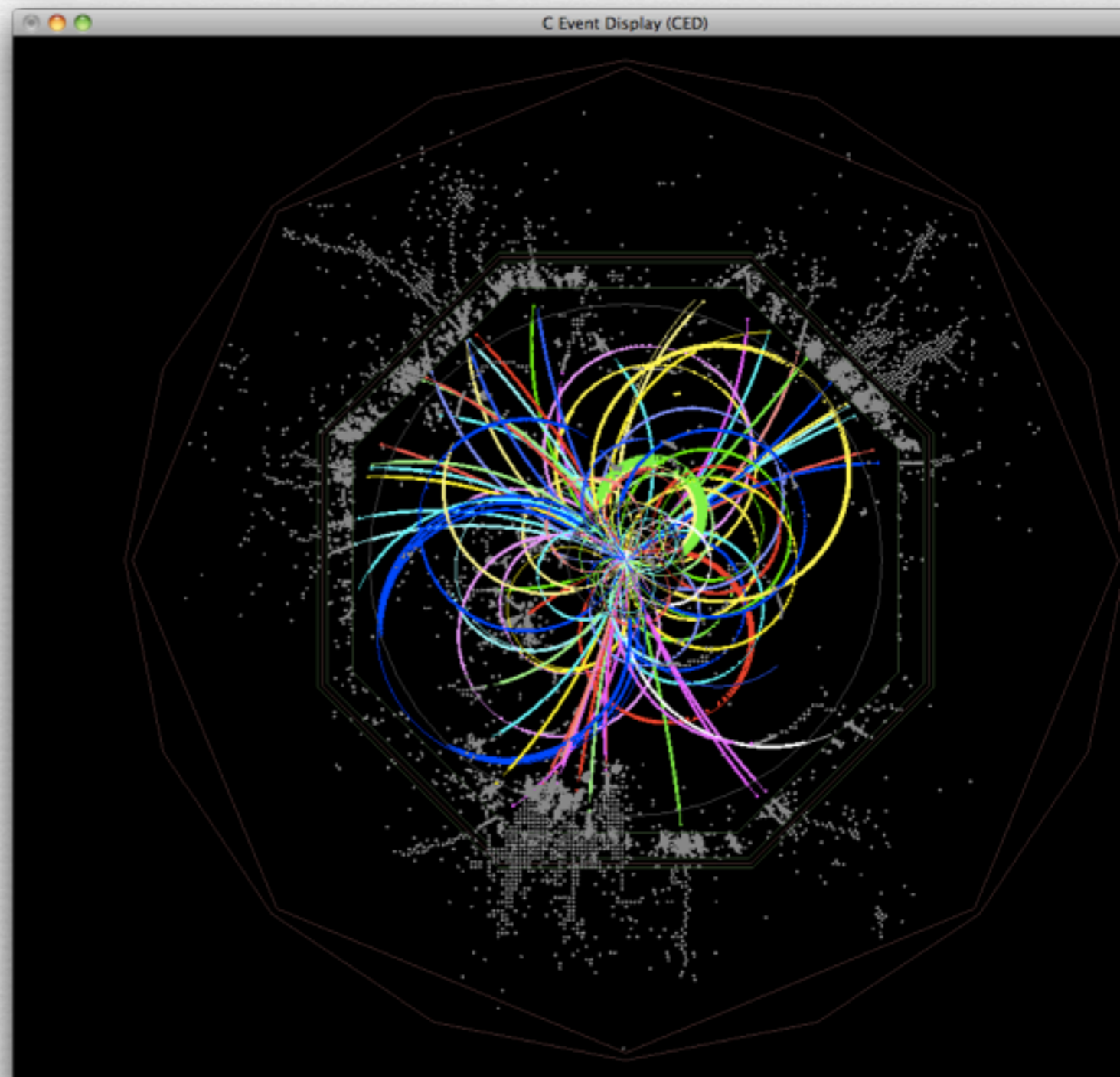
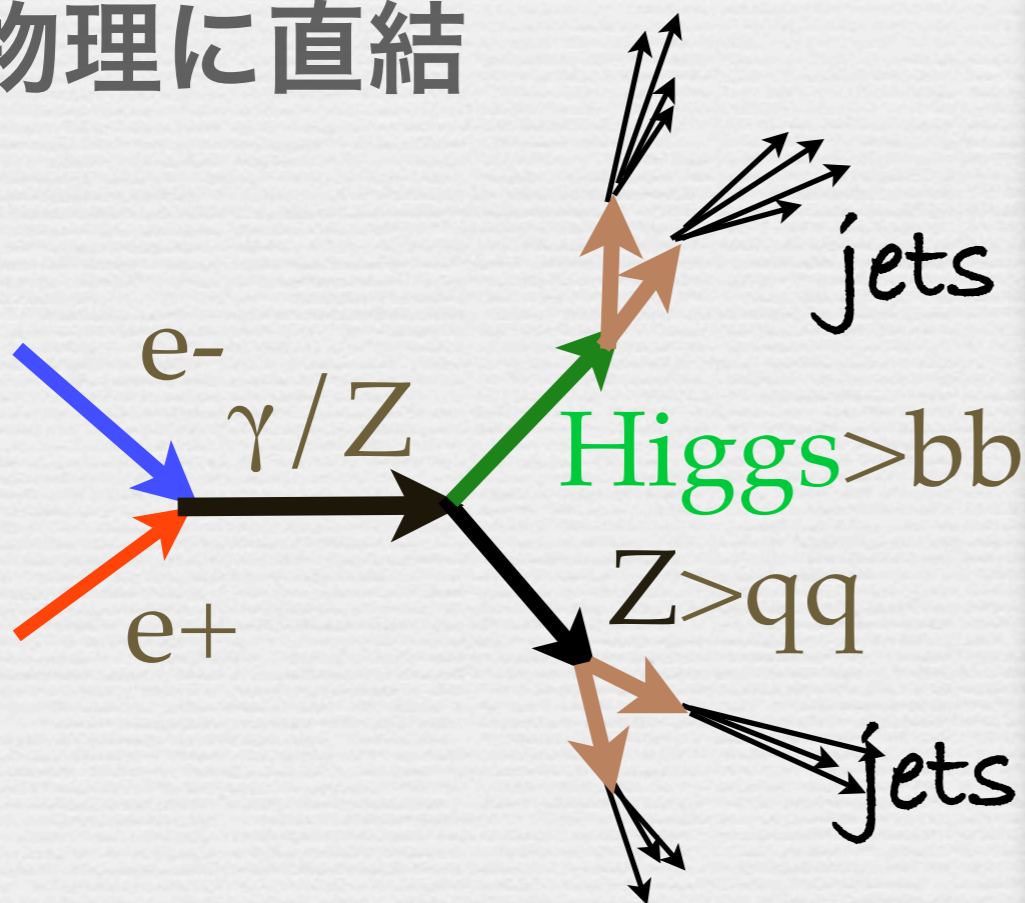
# PFA

Particle Flow Algorithm: software

測定されたデータを使い粒子を識別

測定器の細分化を要求

物理に直結



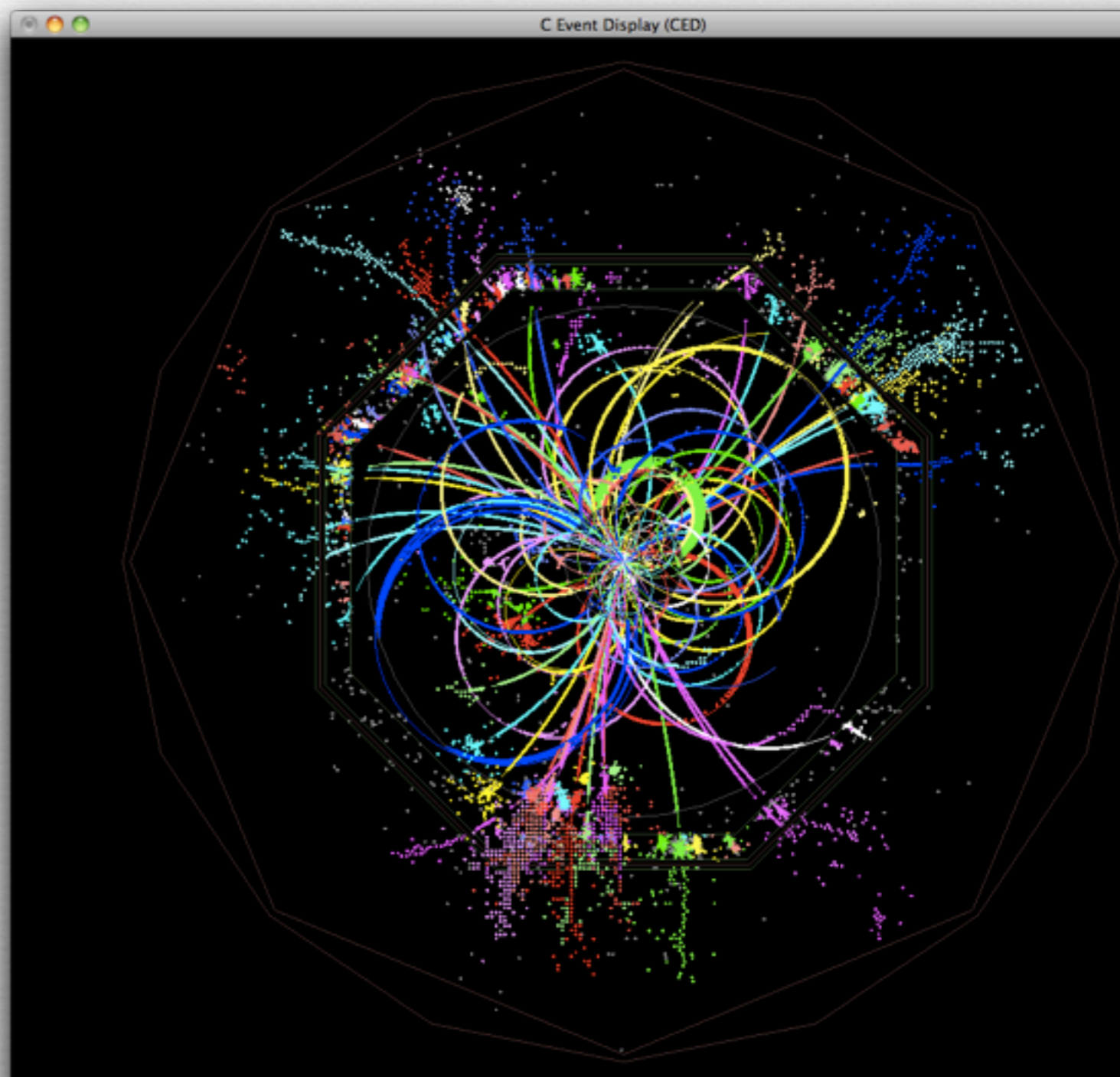
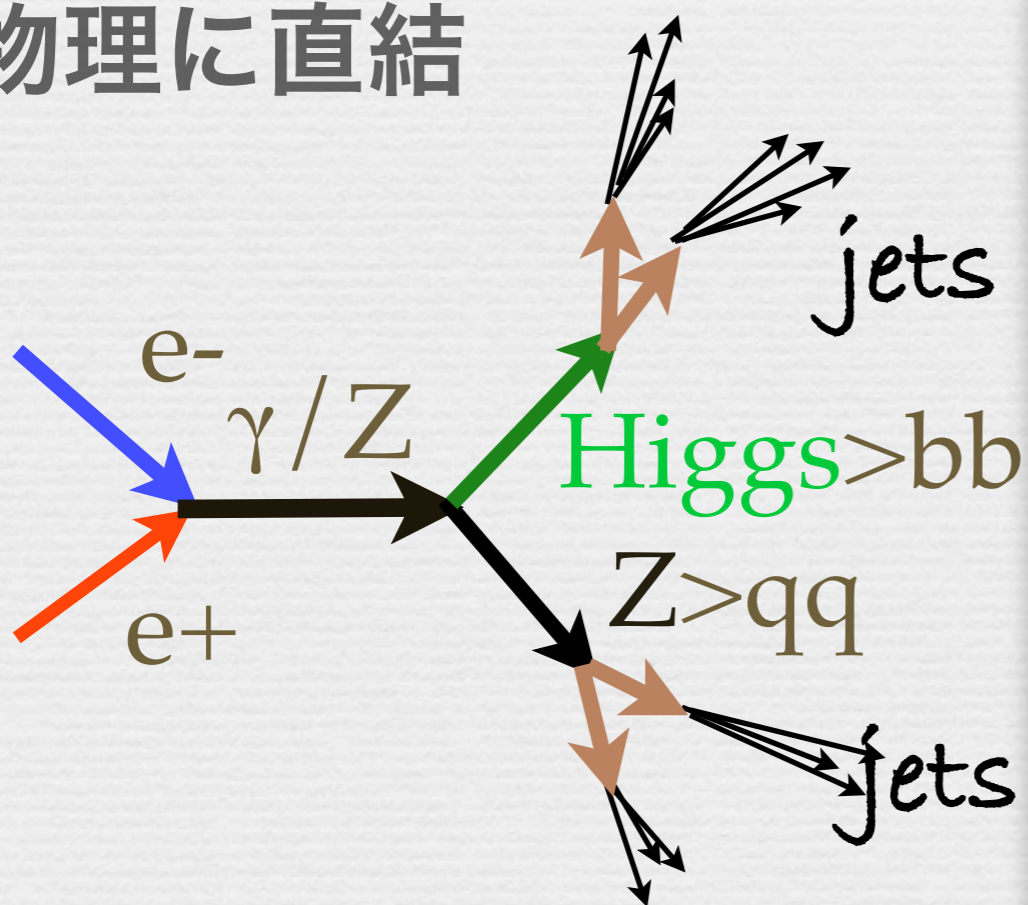
# PFA

Particle Flow Algorithm: software

測定されたデータを使い粒子を識別

測定器の細分化を要求

物理に直結



# Higgs 解析

event を 4jets に分ける

各 **ジェット** の **エネルギー** と方向

$$E_{jet} = \sum_{charged} p_i + \sum_{photon} E_i + \sum_{neutral\ hadron} E_i$$

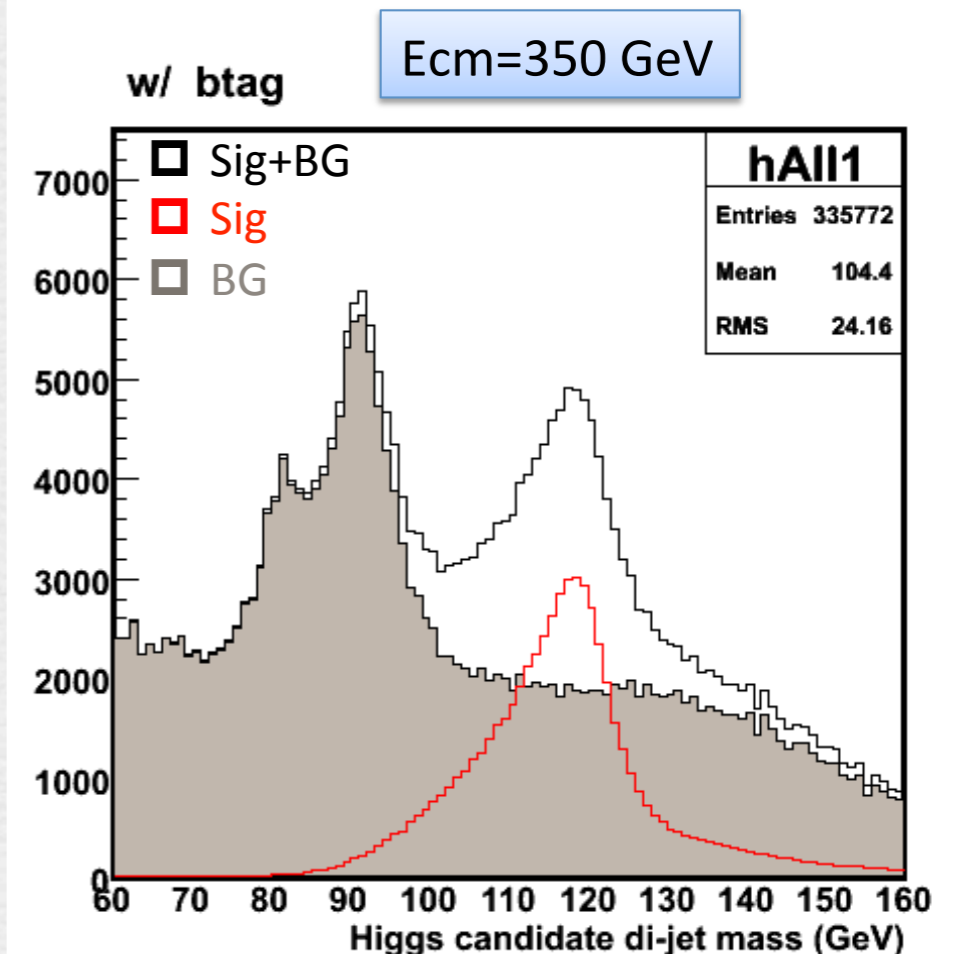
b-jetか? VTX-detector

2つの b-jets で不変質量:  $m_H$

山が Higgs mass にできるか?



=250fb<sup>-1</sup> without kinematical constraint fits



# Higgs 解析

event を 4jets に分ける

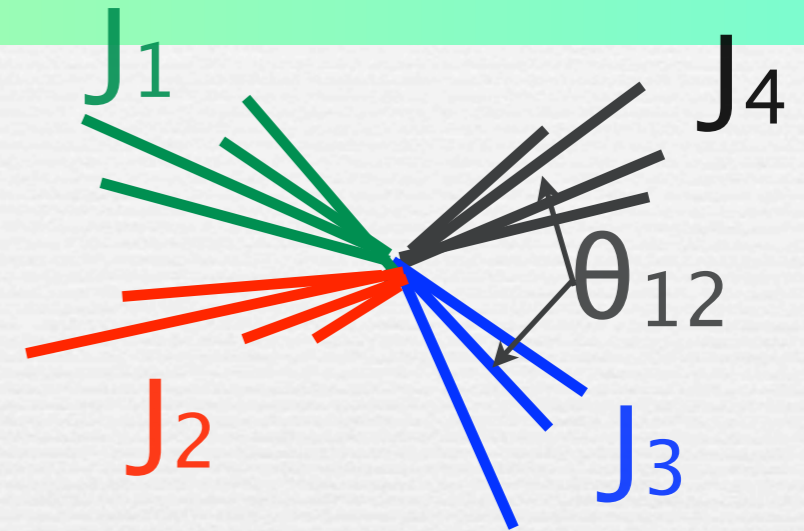
各 **ジェット** の **エネルギー** と **方向**

$$E_{jet} = \sum_{charged} p_i + \sum_{photon} E_i + \sum_{neutral\ hadron} E_i$$

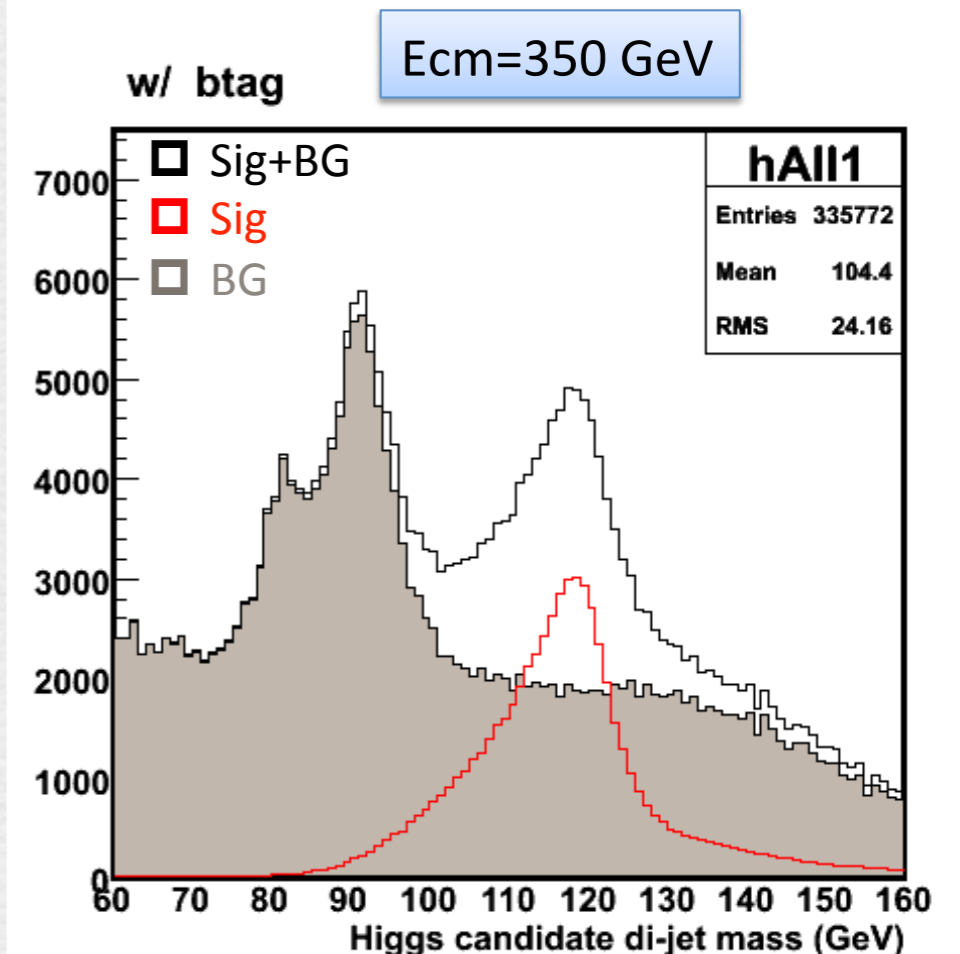
b-jetか? VTX-detector

2つの b-jets で不変質量:  $m_H$

山が Higgs mass にできるか?



=250fb<sup>-1</sup> without kinematical constraint fits



# Higgs 解析

event を 4jetsに分ける

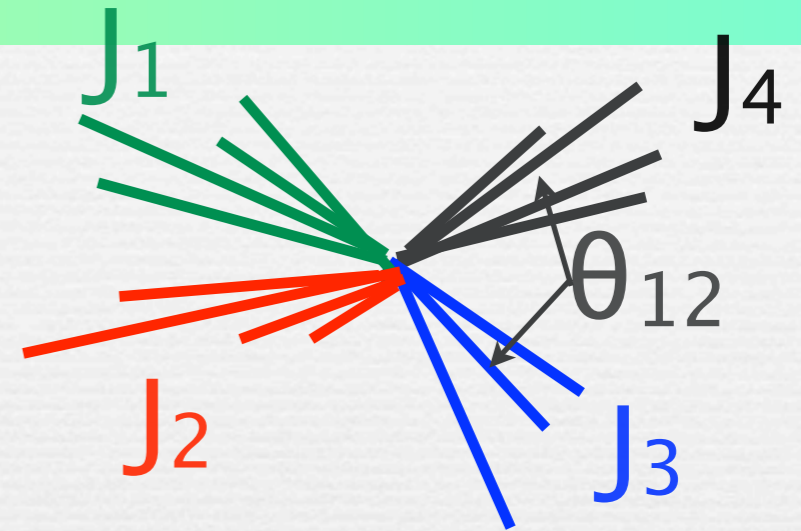
各**ジェット**の**エネルギー**と方向

$$E_{jet} = \sum_{charged} p_i + \sum_{photon} E_i + \sum_{neutral\ hadron} E_i$$

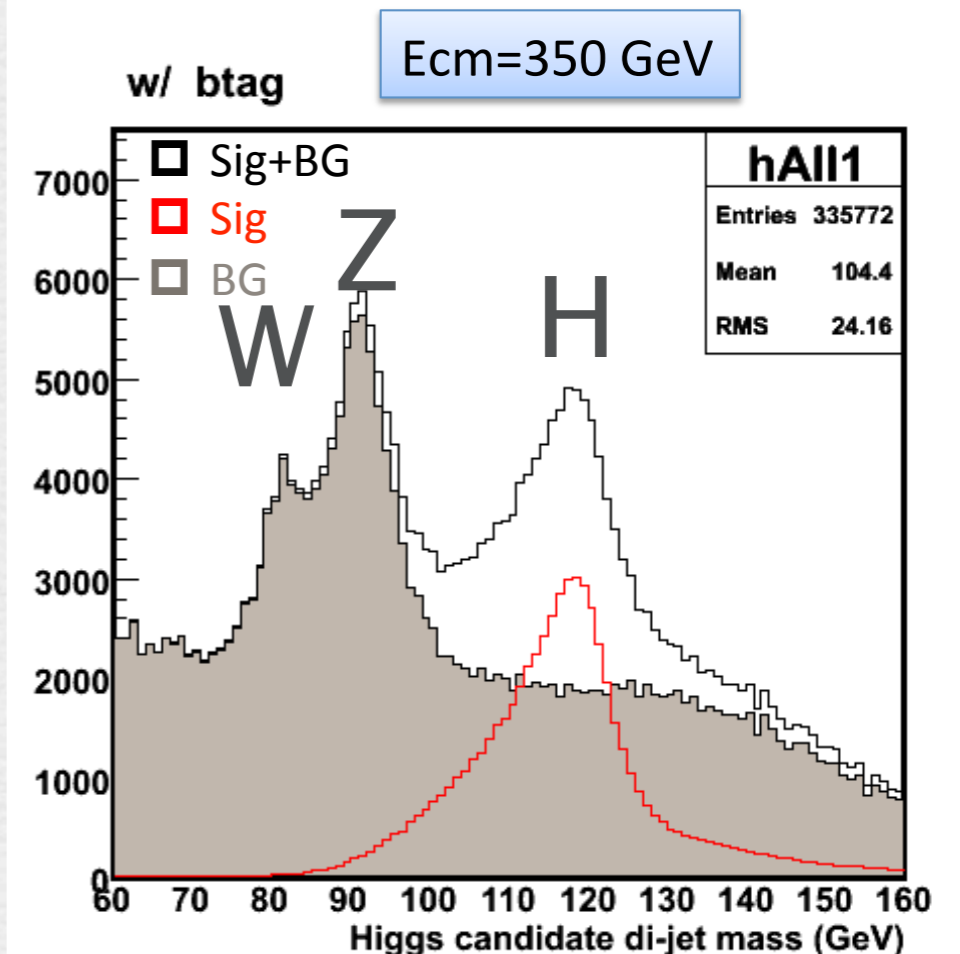
b-jetか? VTX-detector

2つの b-jetsで不変質量:  $m_H$

山がHiggs mass にできるか?



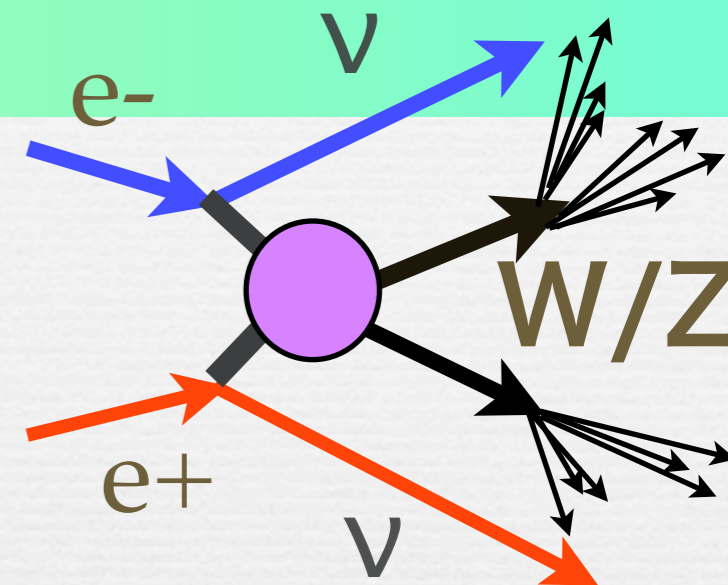
=250fb<sup>-1</sup> without kinematical constraint fits



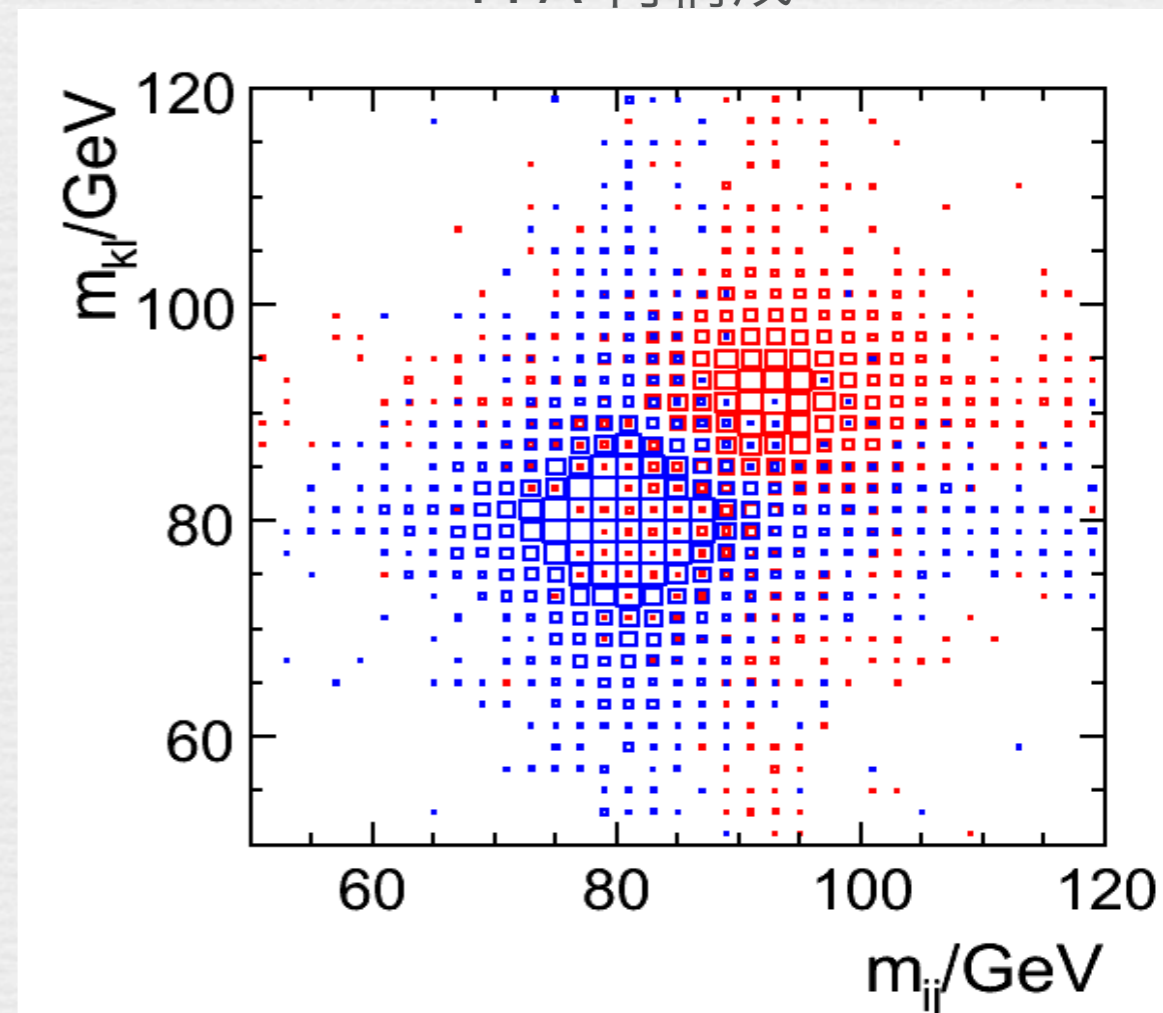
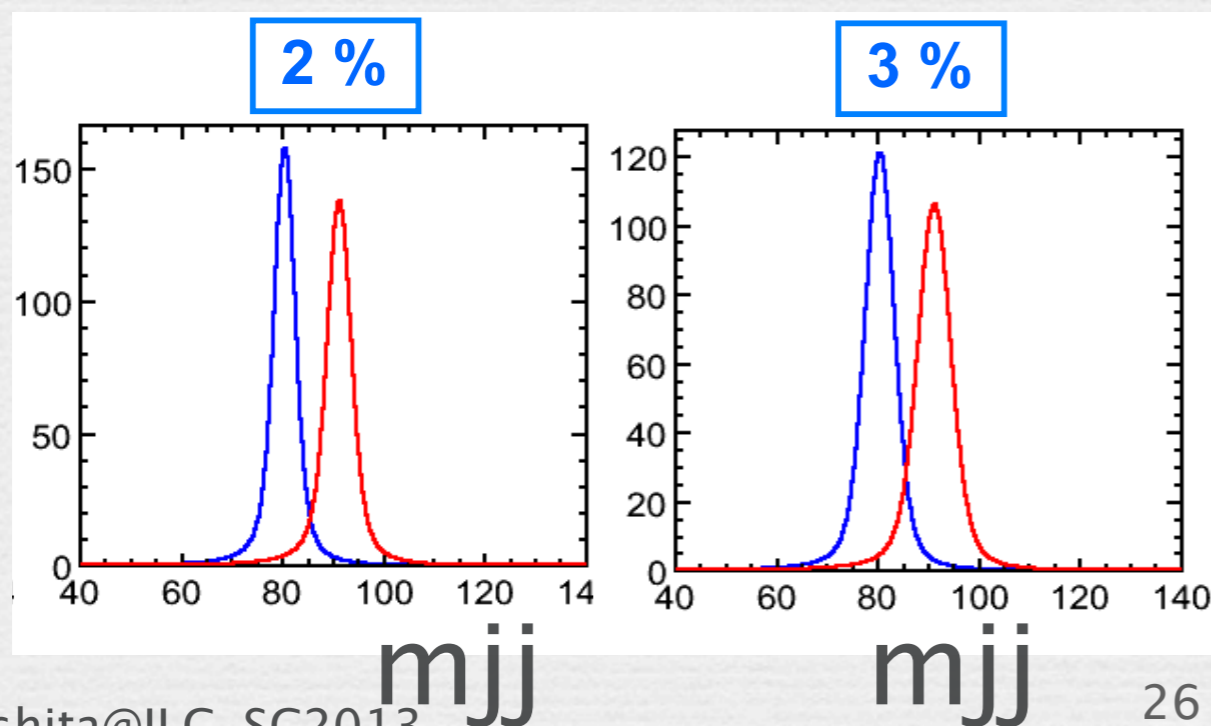


# jet E 分解能

- $ee \rightarrow \nu \nu WW / \nu \nu ZZ$  : 4jet event
- $E_\nu$  が不定:  $E_W/E_Z$  一定ではない
- 2つのジェットで不変質量
- 分解能 < 3.5%

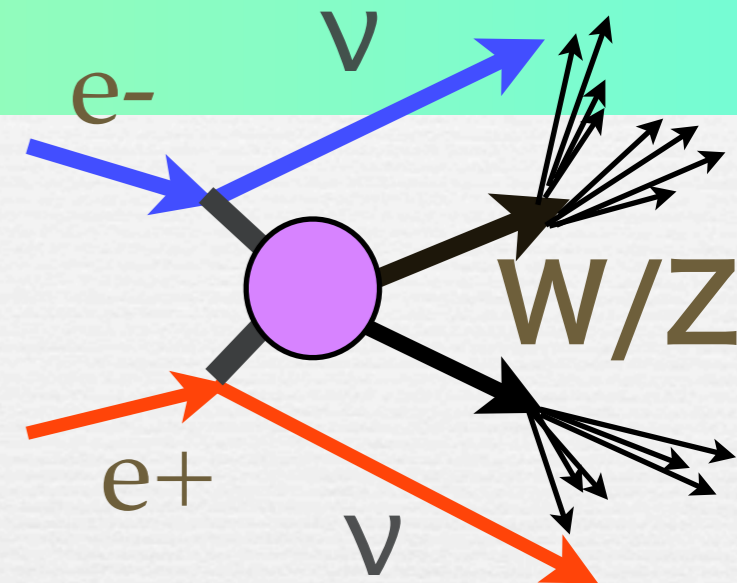


PFA 再構成

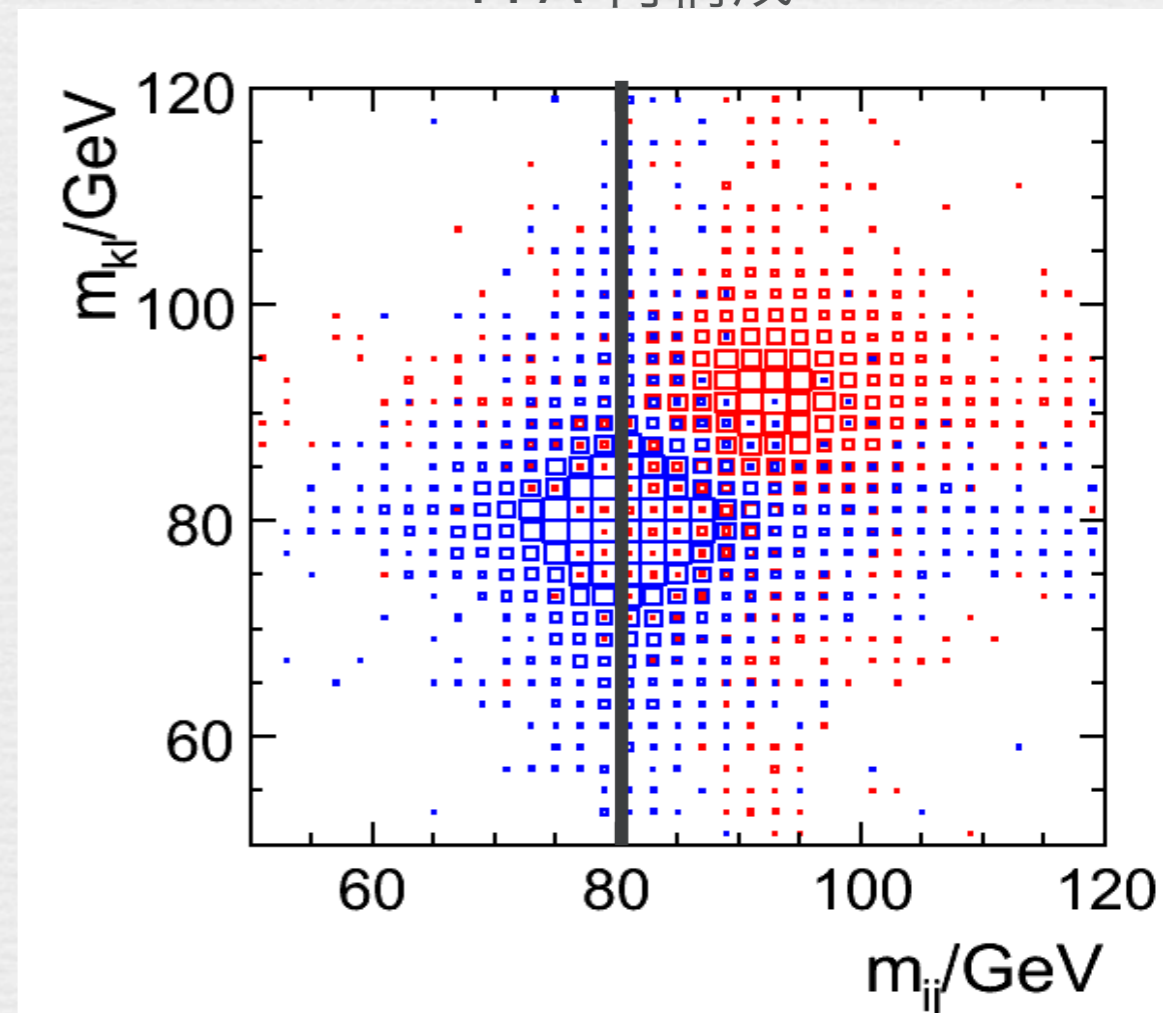
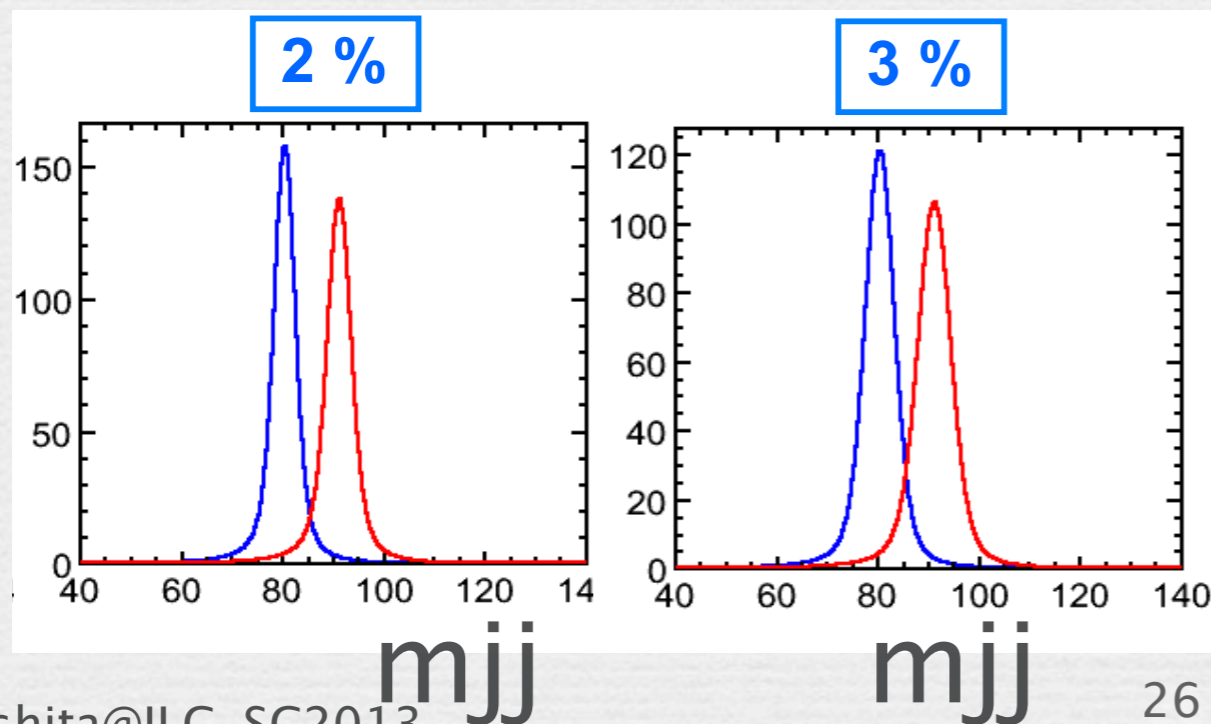


# jet E 分解能

- $ee \rightarrow \nu \nu WW / \nu \nu ZZ$  : 4jet event
- $E_\nu$  が不定:  $E_W/E_Z$  一定ではない
- 2つのジェットで不変質量
- 分解能 < 3.5%

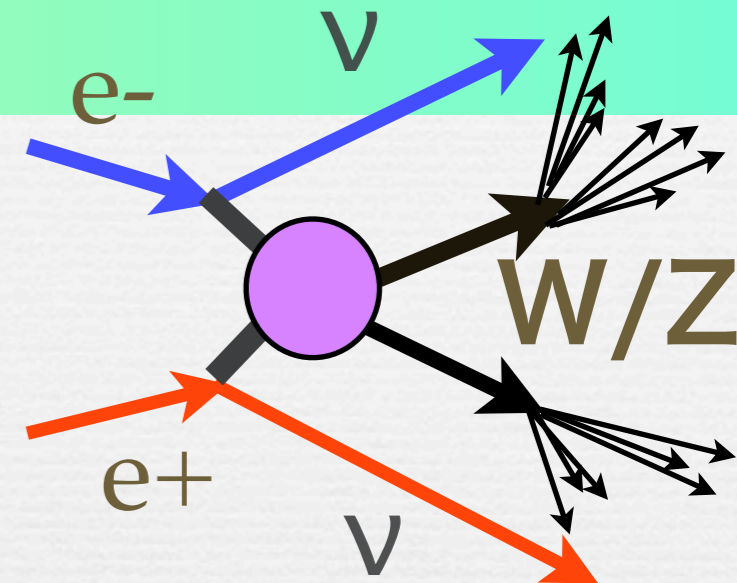


PFA 再構成

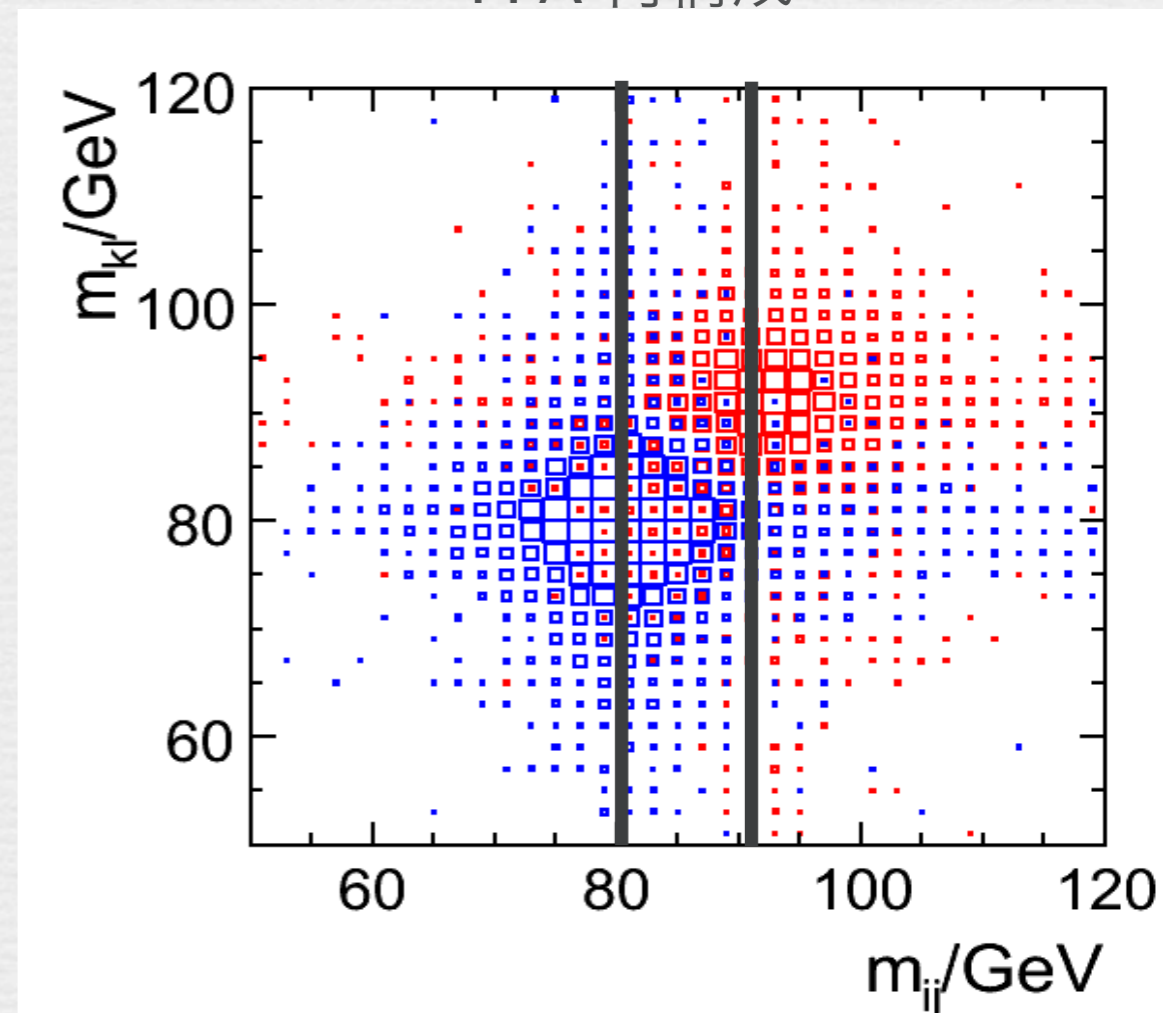
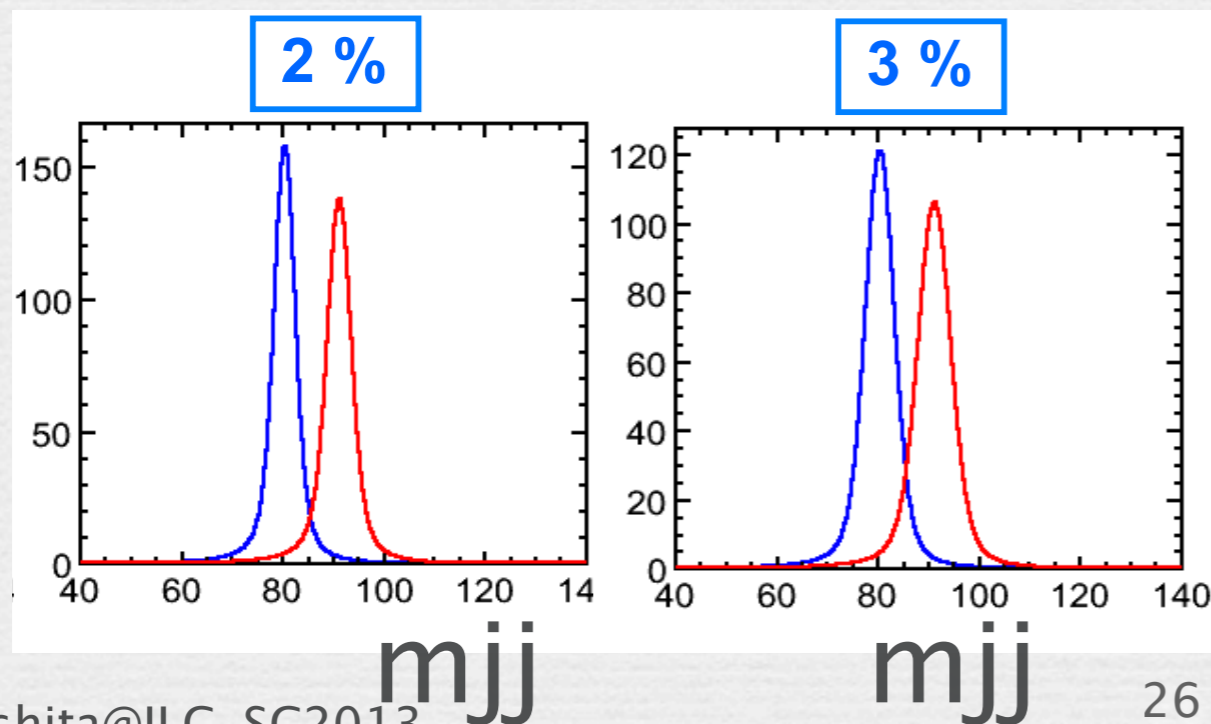


# jet E 分解能

- $ee \rightarrow \nu \nu WW / \nu \nu ZZ$  : 4jet event
- $E_\nu$  が不定:  $E_W/E_Z$  一定ではない
- 2つのジェットで不変質量
- 分解能 < 3.5%

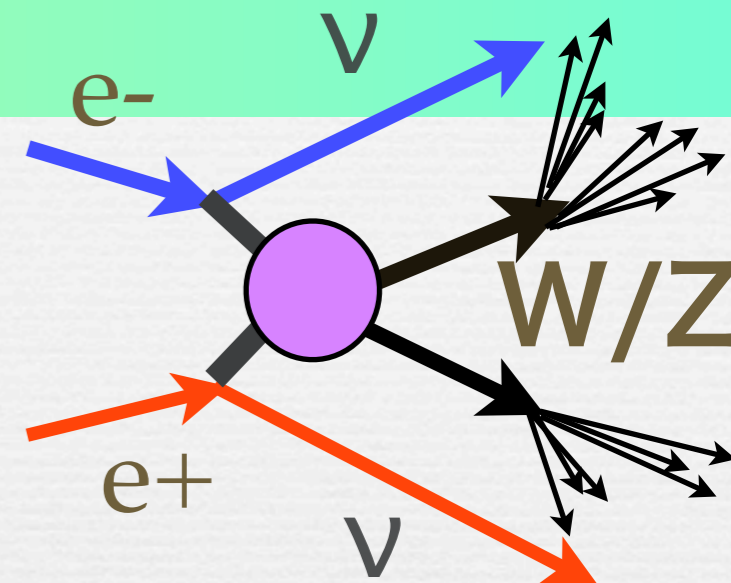


PFA 再構成

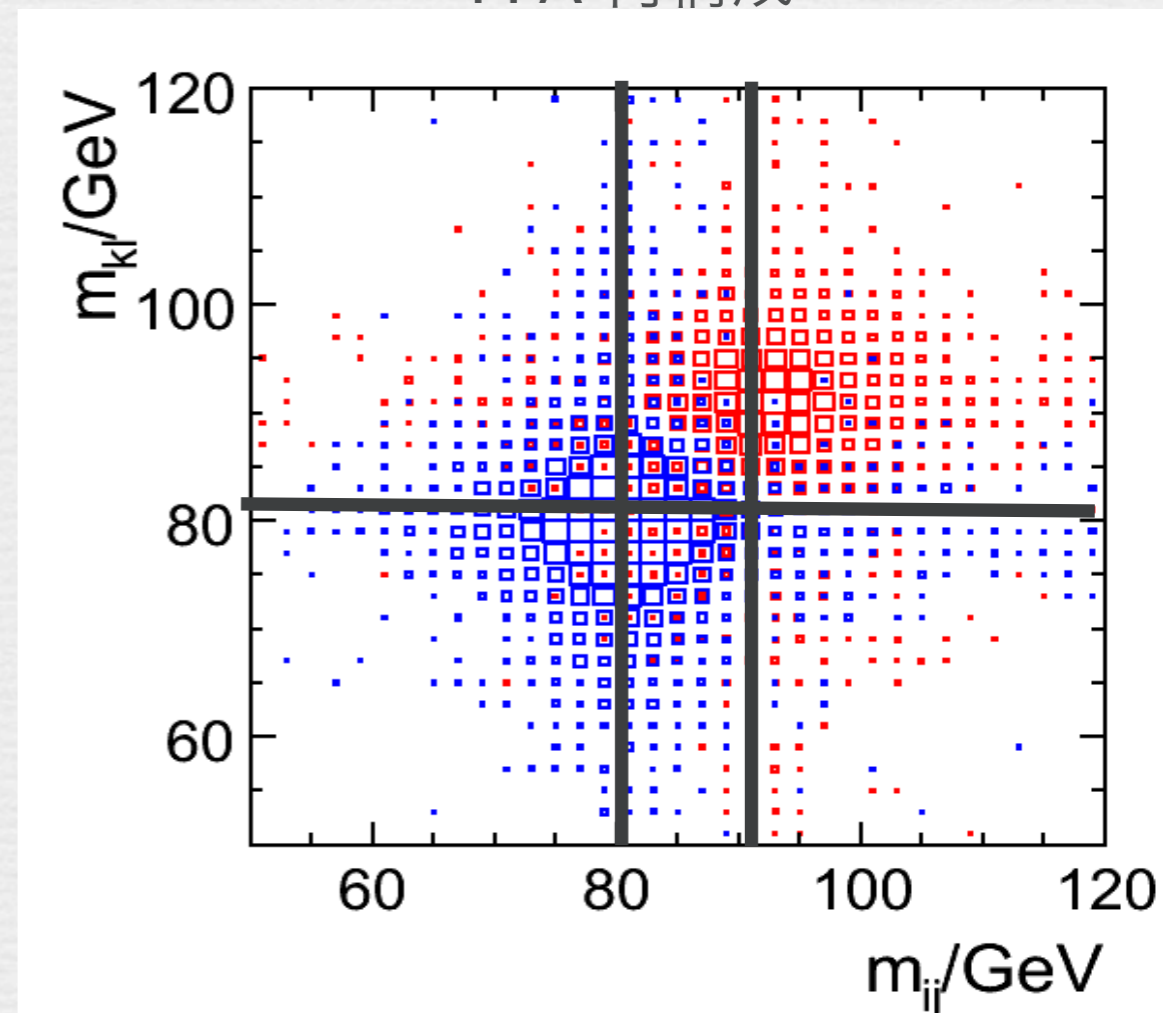
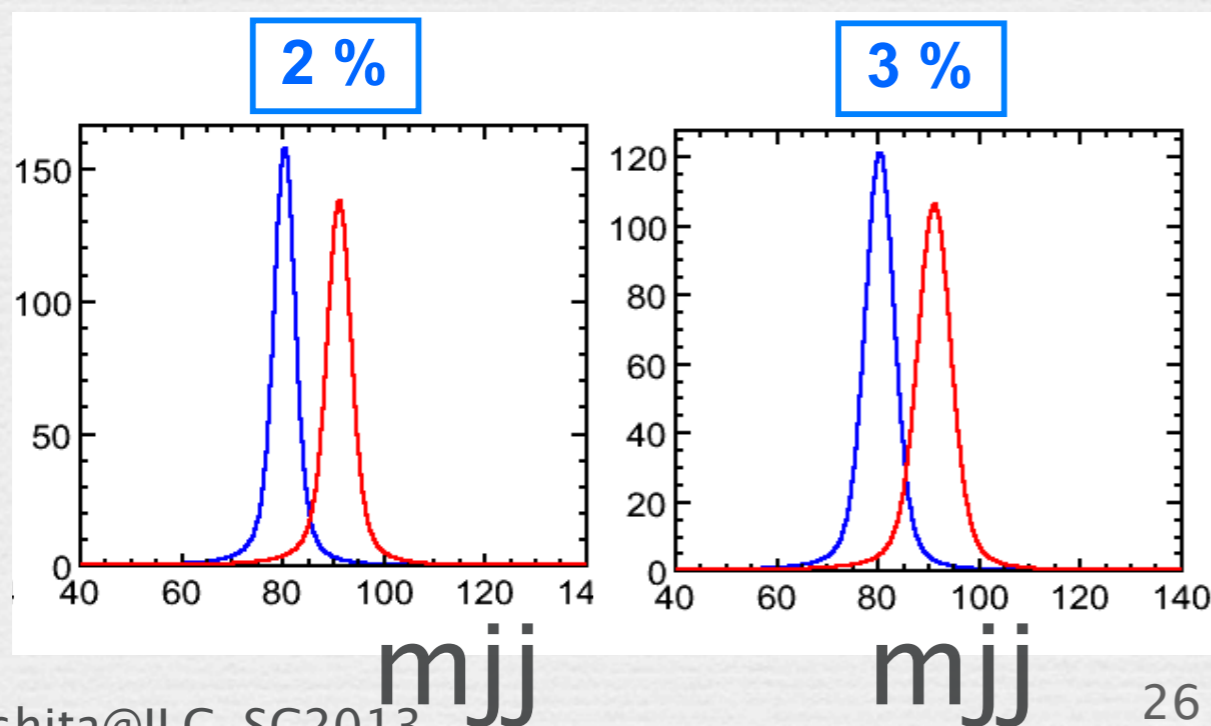


# jet E 分解能

- $ee \rightarrow \nu \nu WW / \nu \nu ZZ$  : 4jet event
- $E_\nu$  が不定:  $E_W/E_Z$  一定ではない
- 2つのジェットで不変質量
- 分解能 < 3.5%

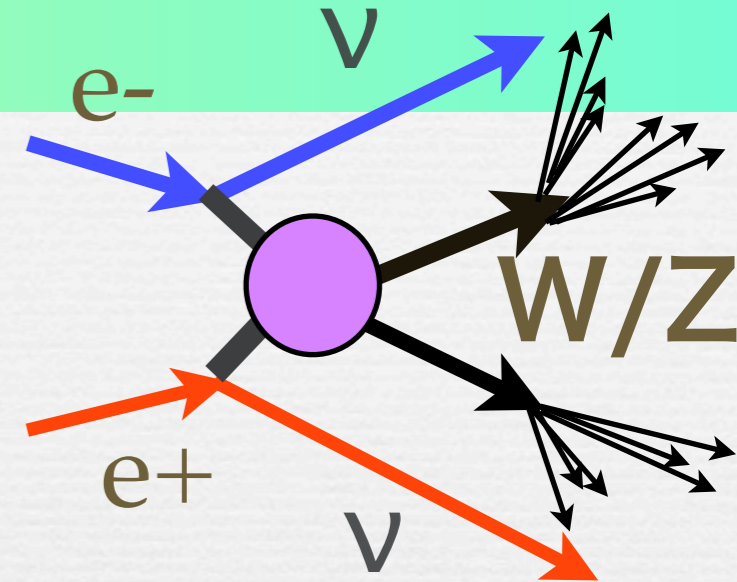


PFA 再構成

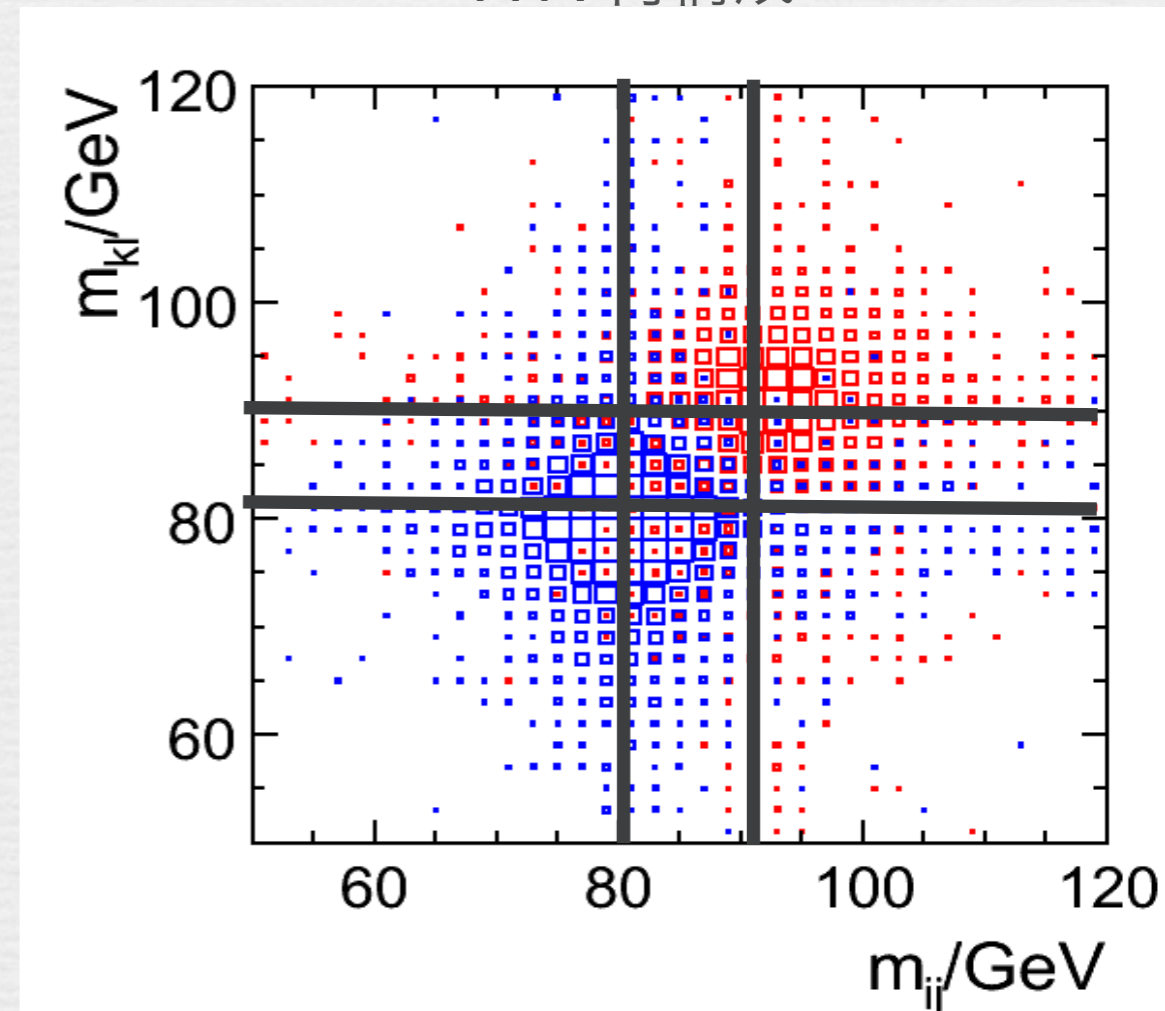
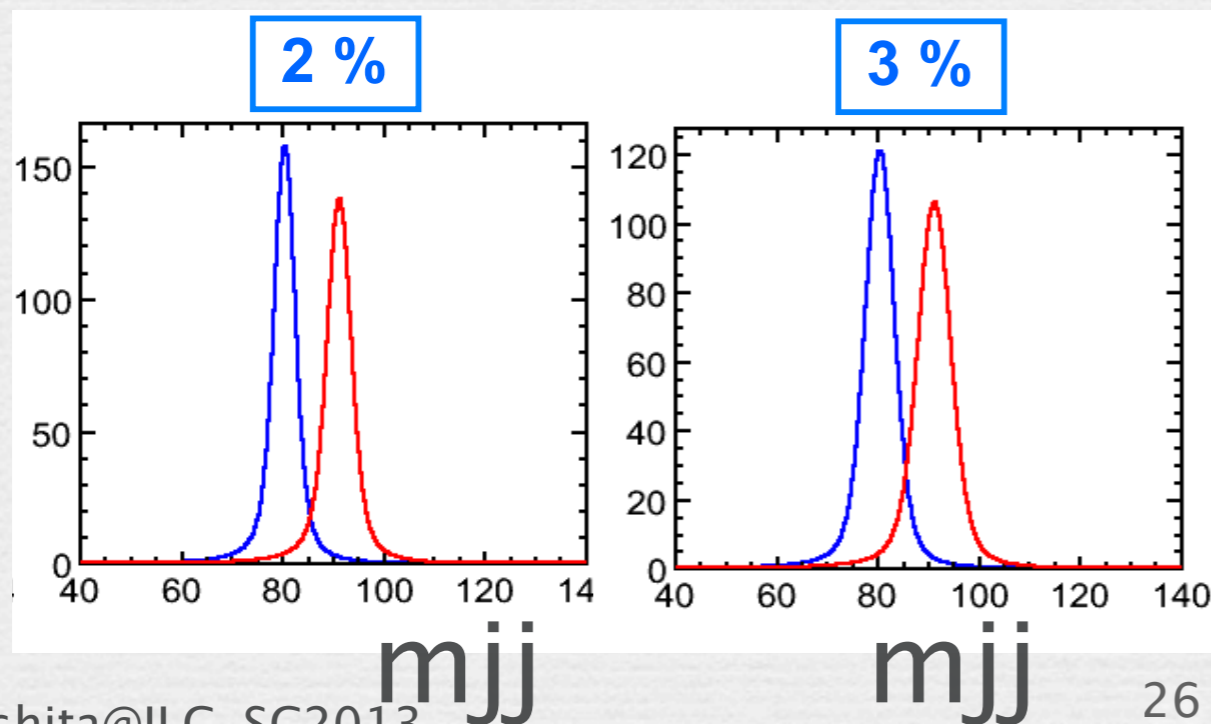


# jet E 分解能

- $ee \rightarrow \nu \nu WW / \nu \nu ZZ$  : 4jet event
- $E_\nu$  が不定:  $E_W/E_Z$  一定ではない
- 2つのジェットで不変質量
- 分解能 < 3.5%

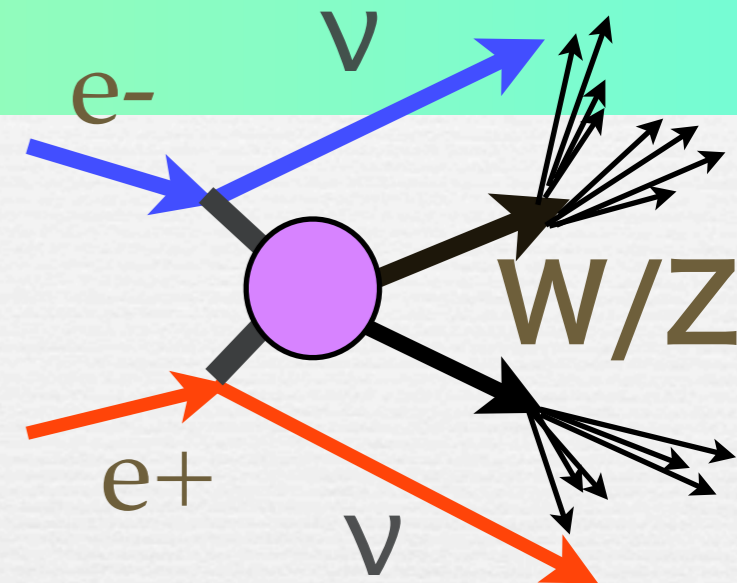


PFA 再構成

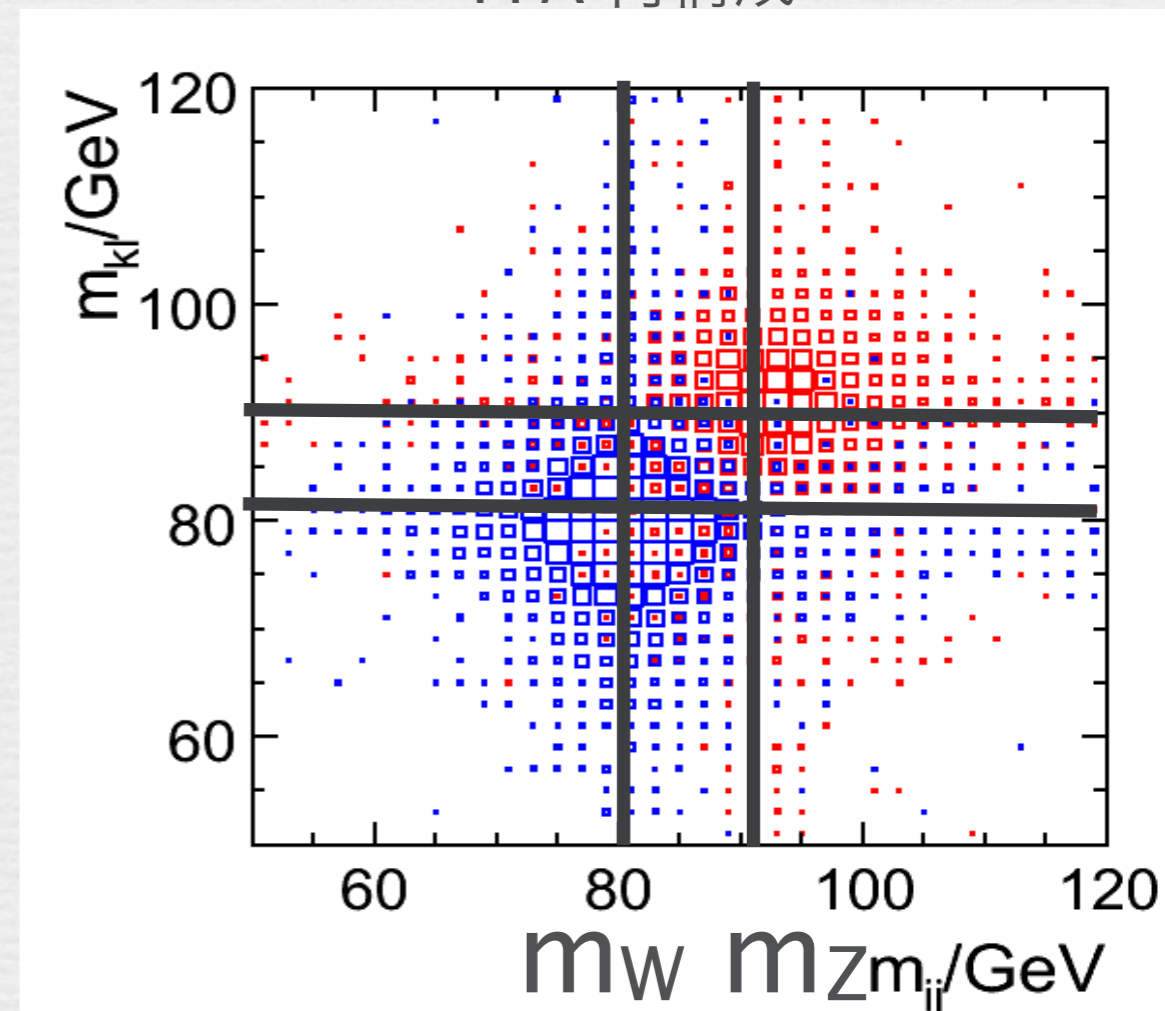
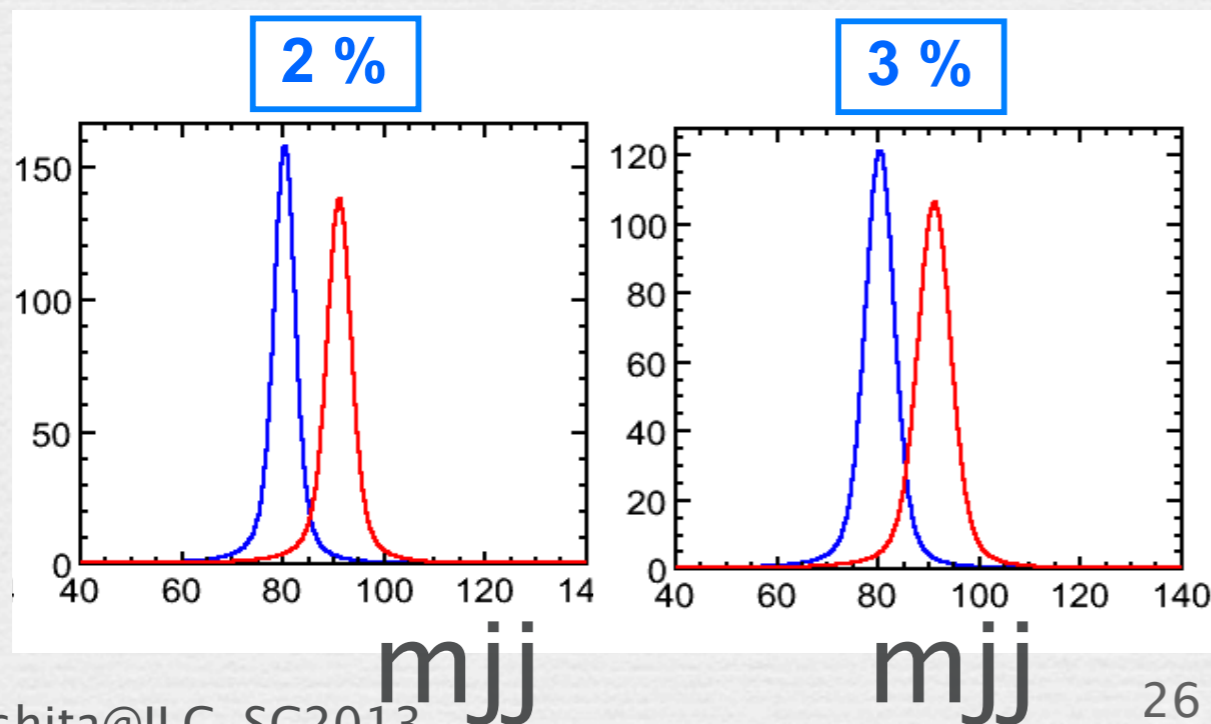


# jet E 分解能

- $ee \rightarrow \nu \nu WW / \nu \nu ZZ$  : 4jet event
- $E_\nu$  が不定:  $E_W/E_Z$  一定ではない
- 2つのジェットで不変質量
- 分解能 < 3.5%

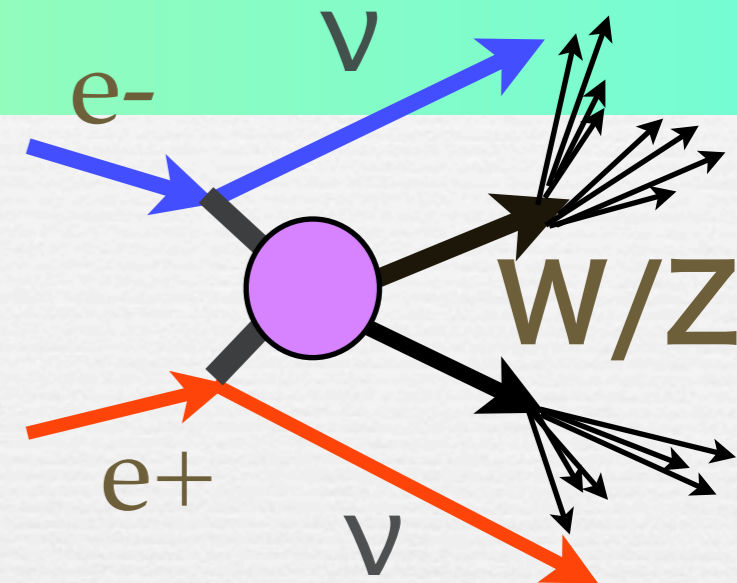


PFA 再構成

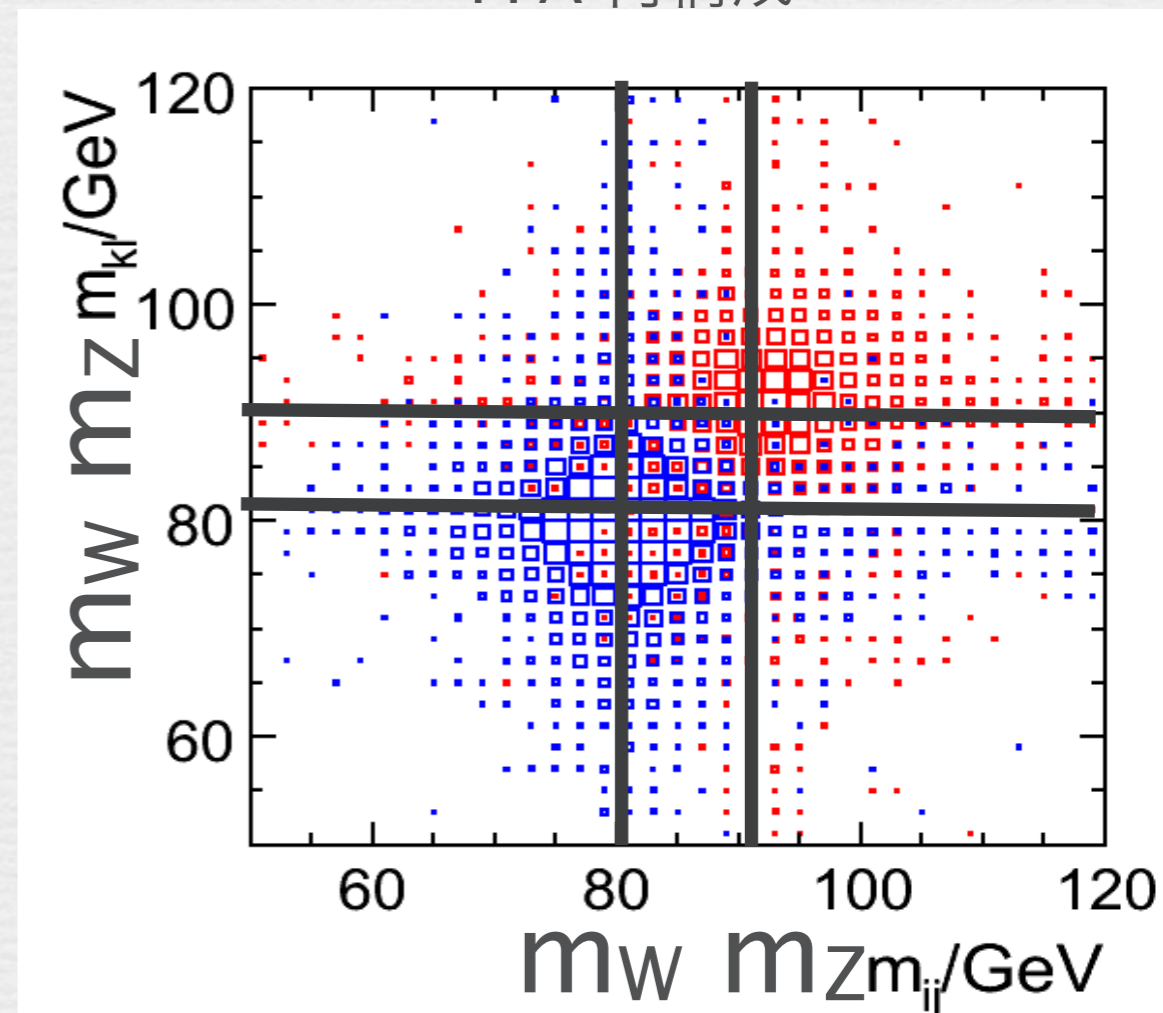
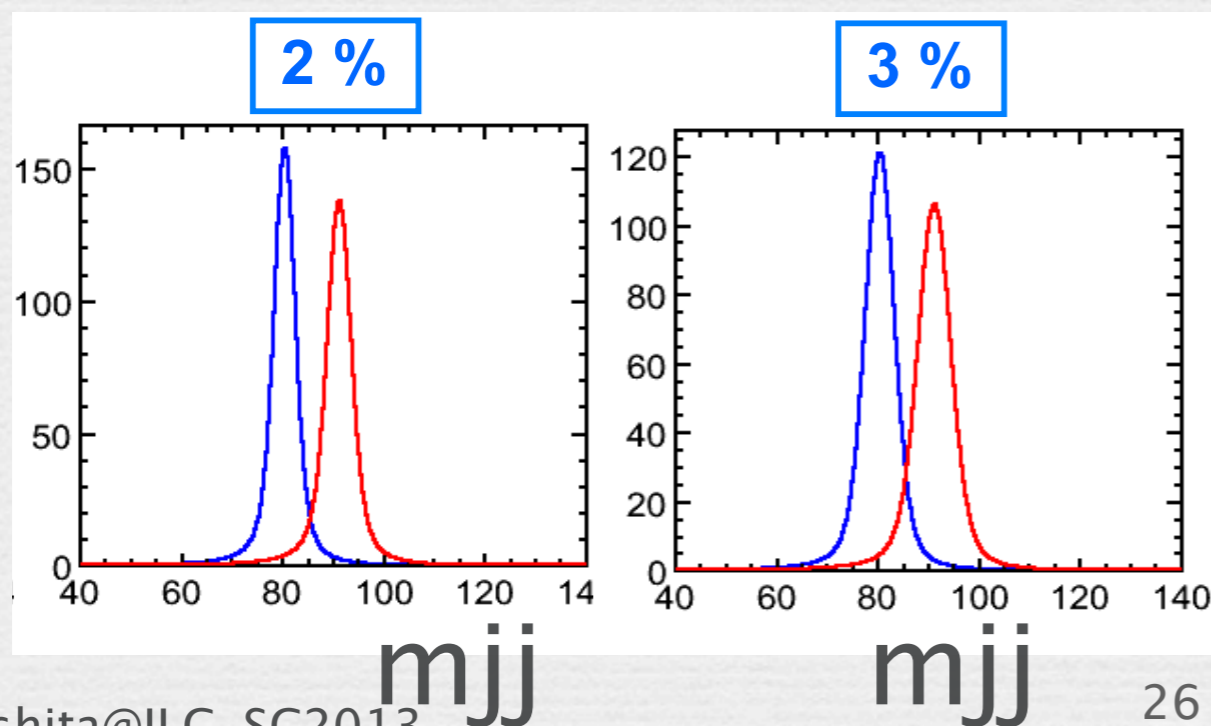


# jet E 分解能

- $ee \rightarrow \nu \nu WW / \nu \nu ZZ$  : 4jet event
- $E_\nu$  が不定:  $E_W/E_Z$  一定ではない
- 2つのジェットで不変質量
- 分解能 < 3.5%

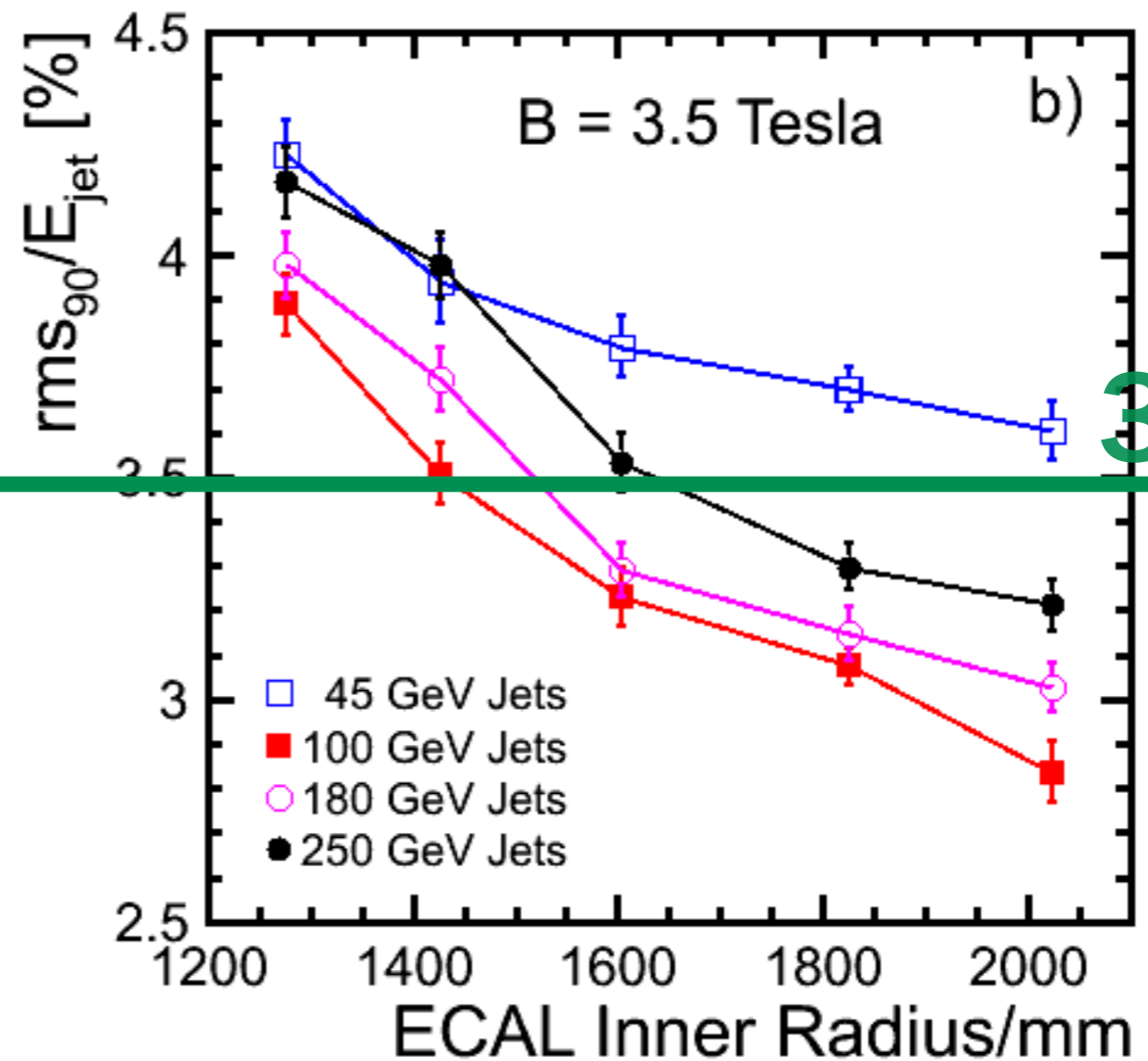
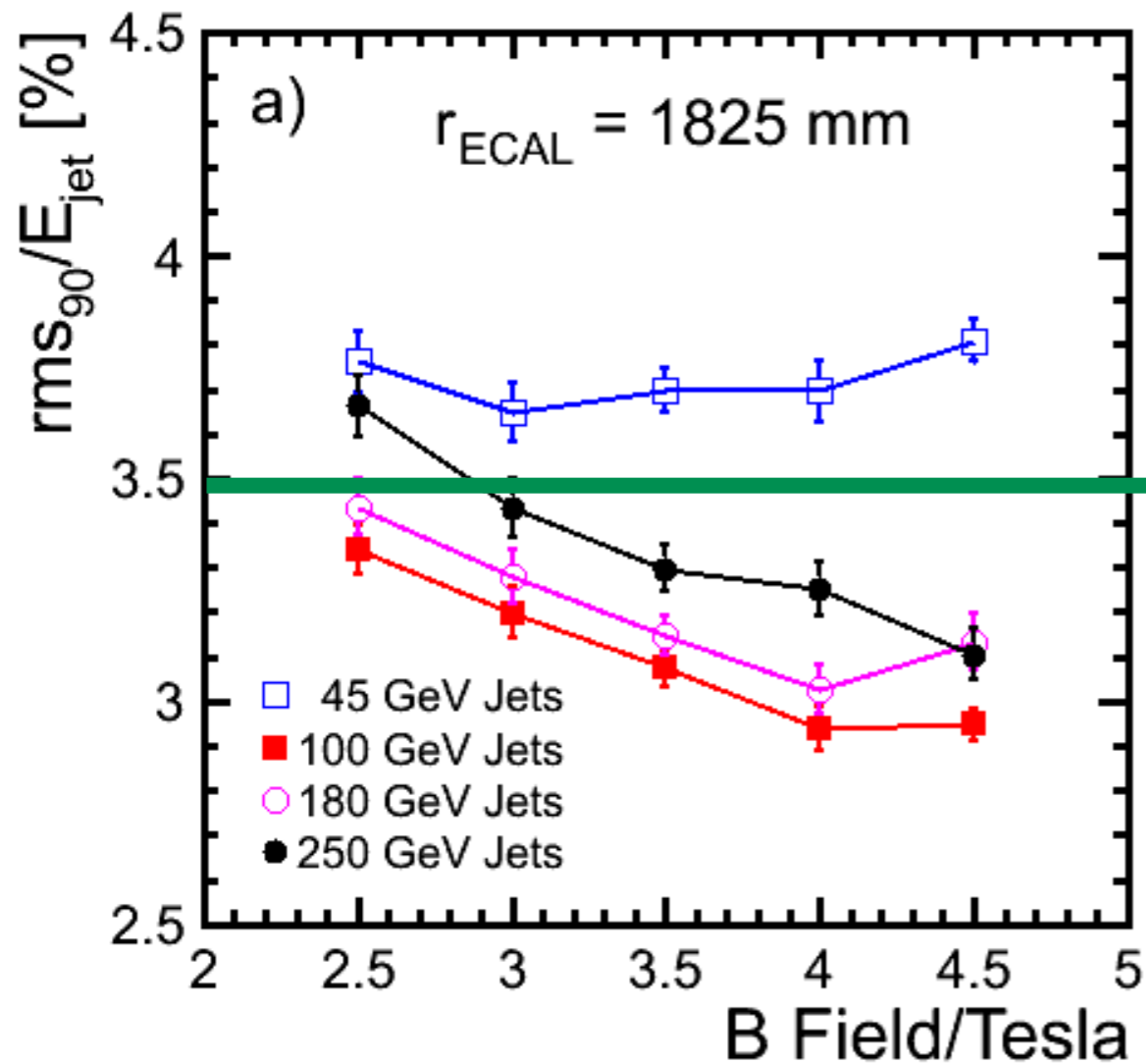


PFA 再構成



# PFAの測定器への要求

- Jet エネルギー分解能 > 測定器を縛る：大きさ



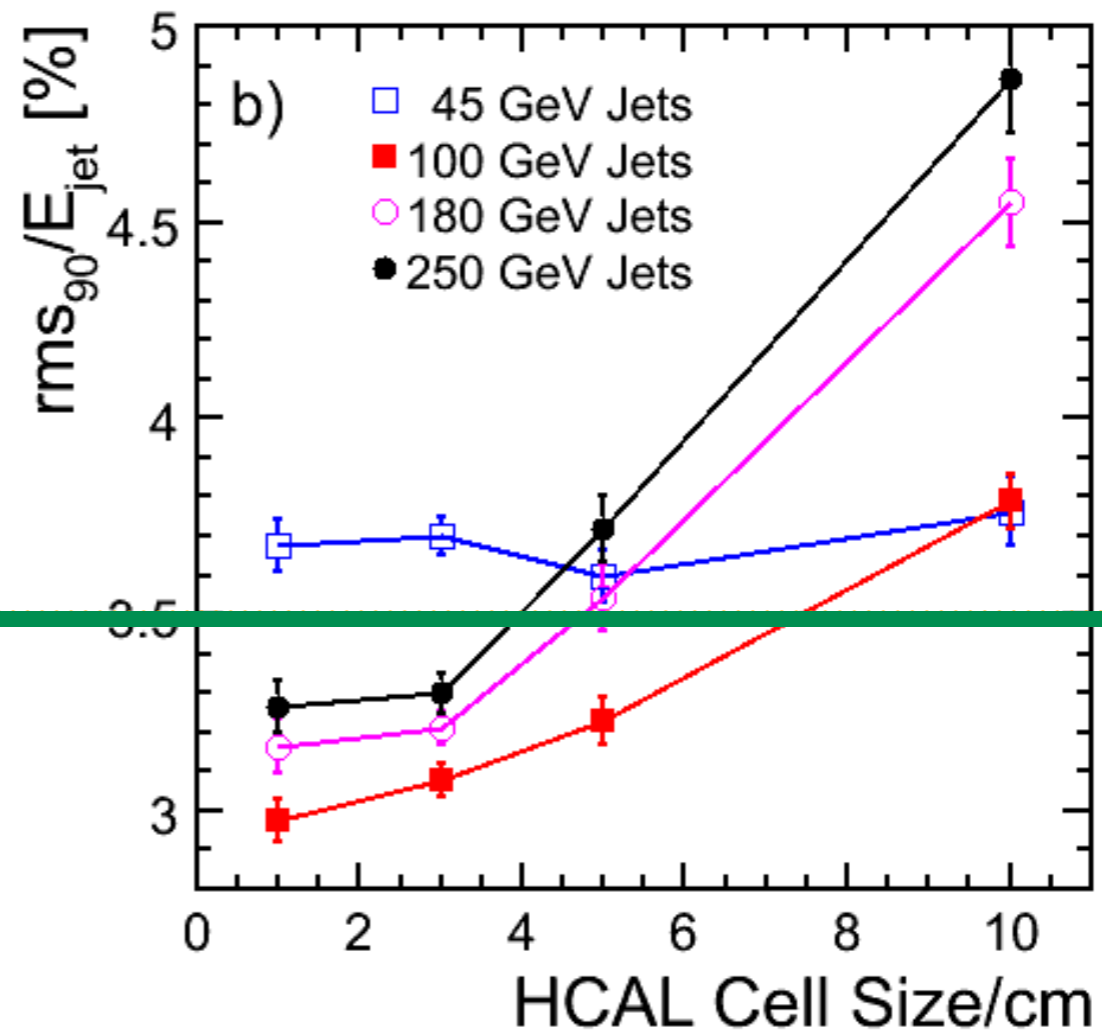
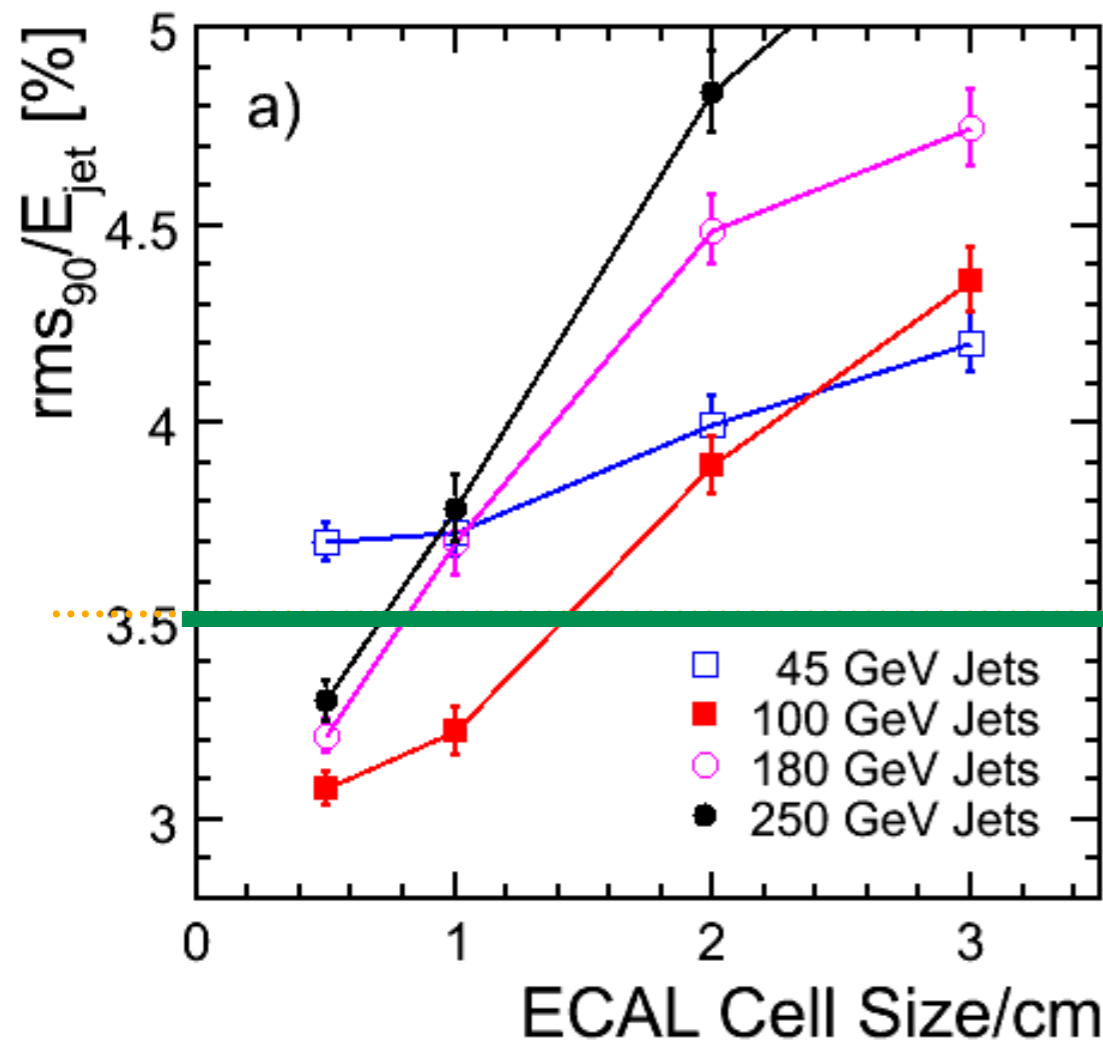
3.5%

Mark Thomson



# PFAの測定器への要求II

- Jet エネルギー分解能 > 測定器を縛る：細分化

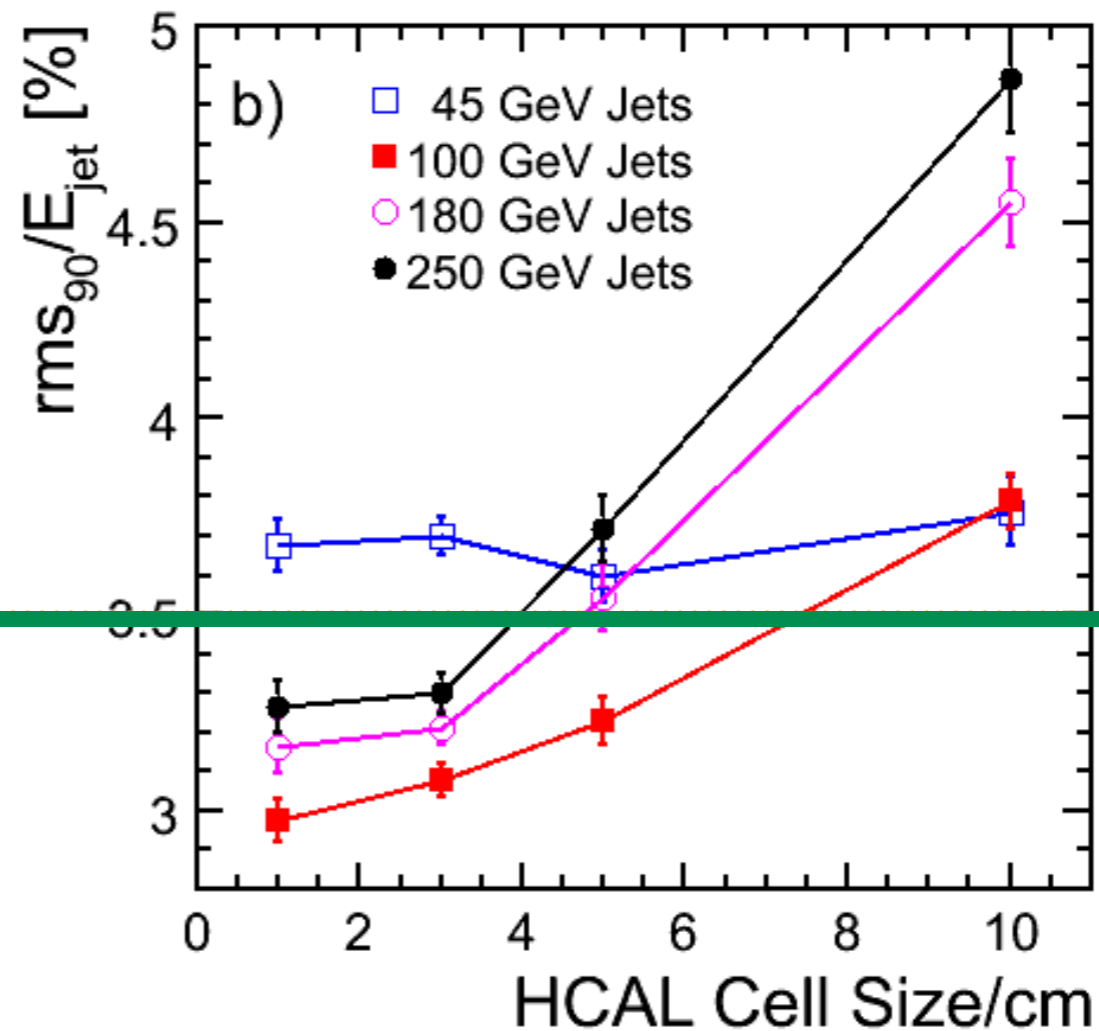
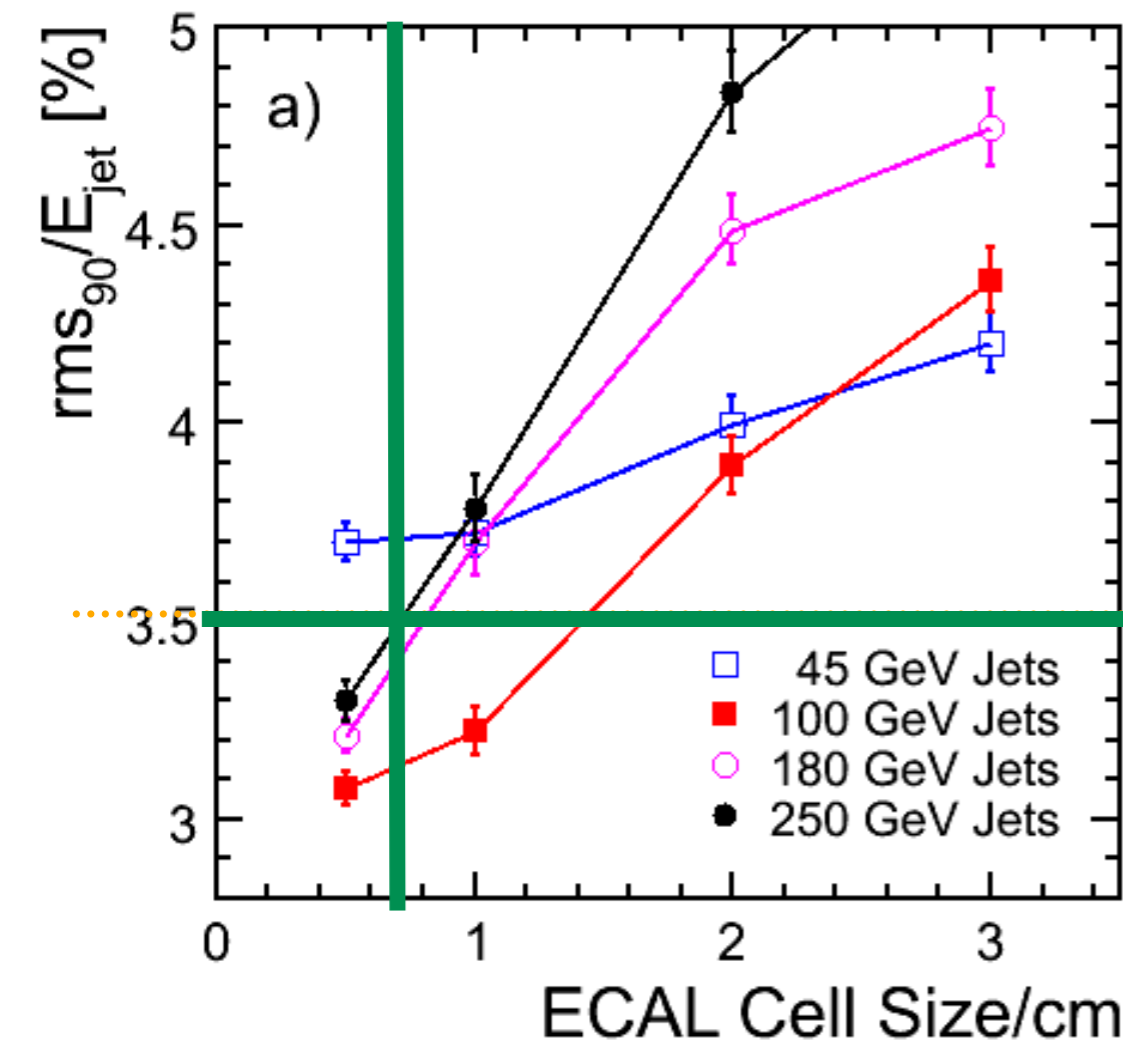


3.5%  
ILC G

Mark Thomson

# PFAの測定器への要求II

- Jet エネルギー分解能 > 測定器を縛る：細分化

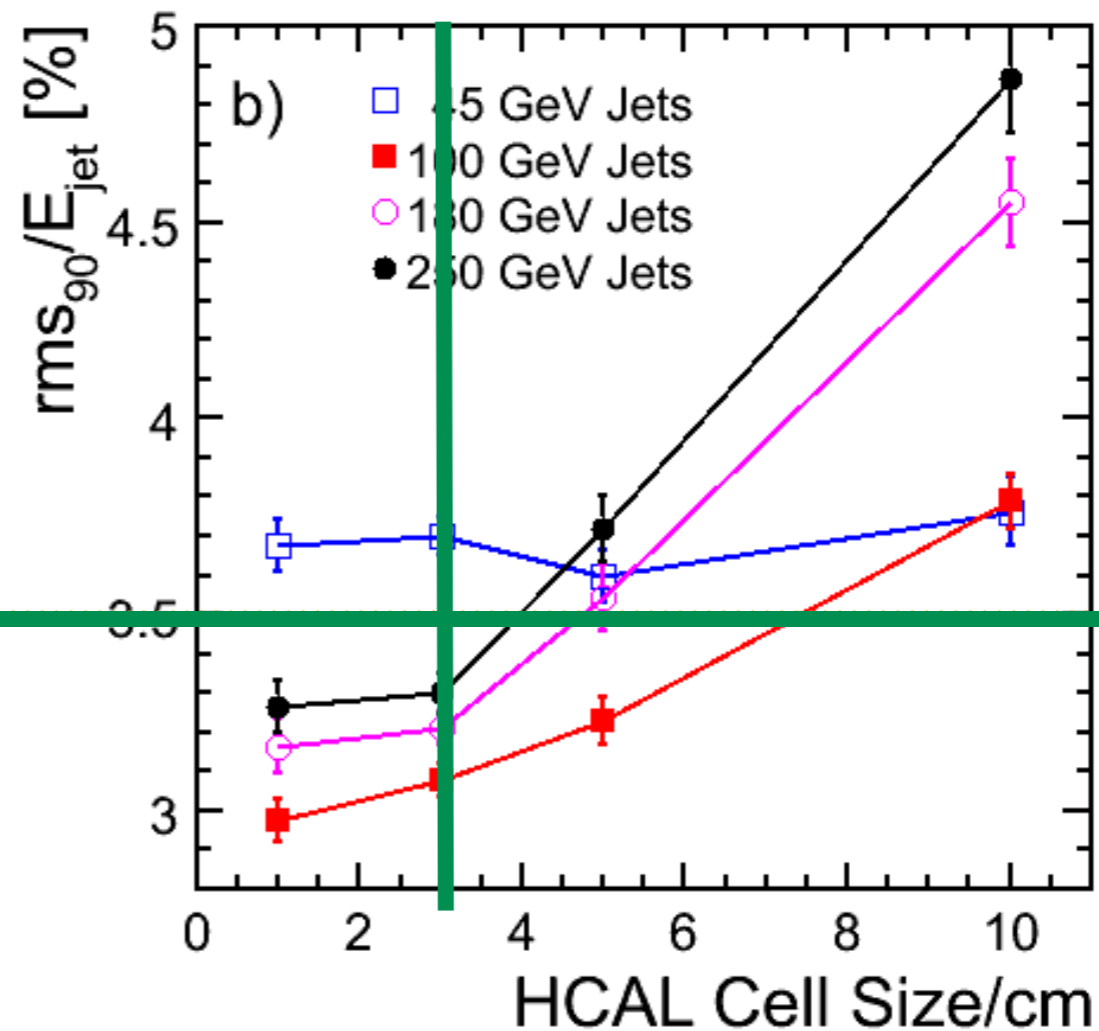
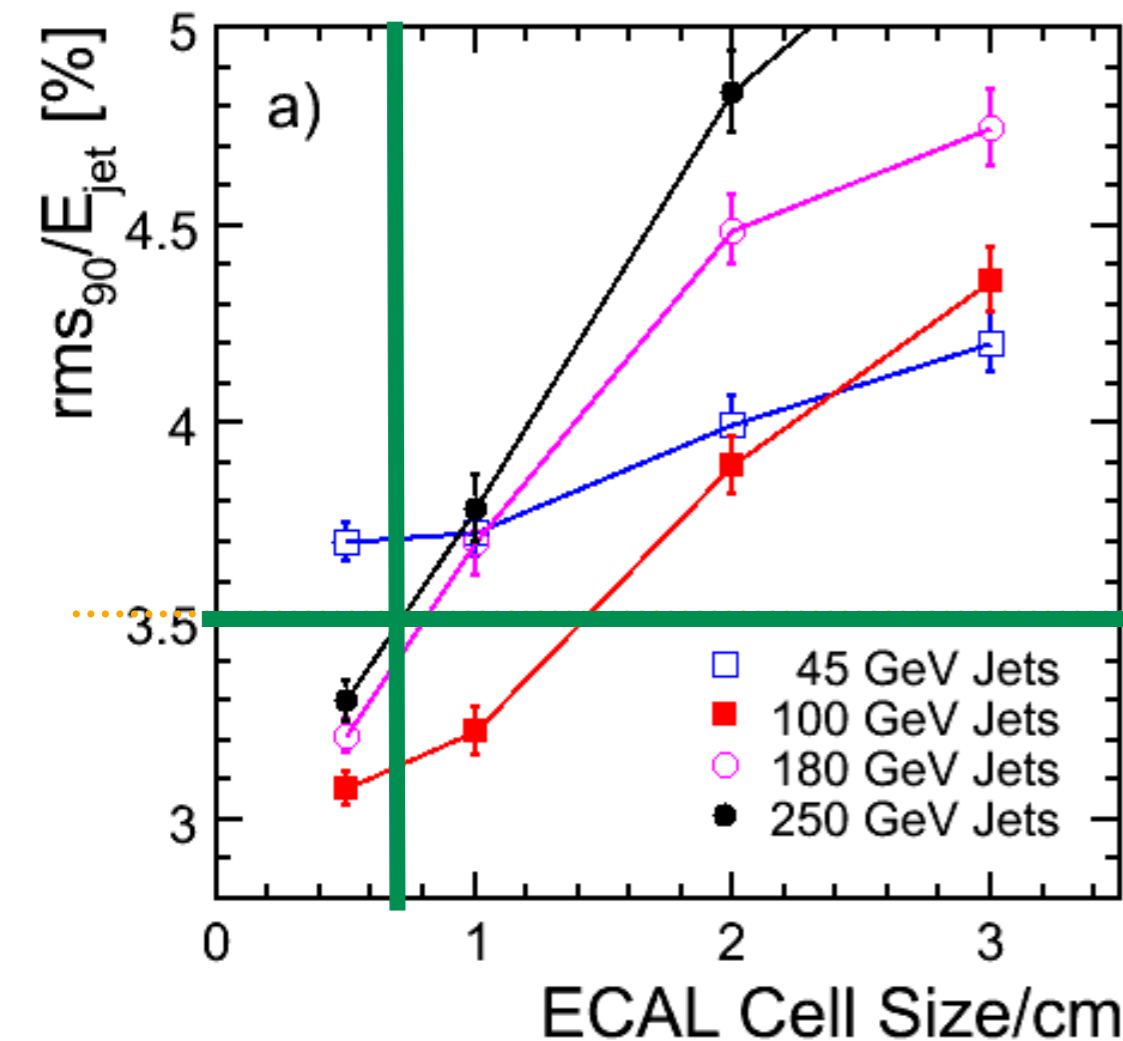


3.5%  
ILC G

Mark Thomson

# PFAの測定器への要求II

- Jet エネルギー分解能 > 測定器を縛る：細分化

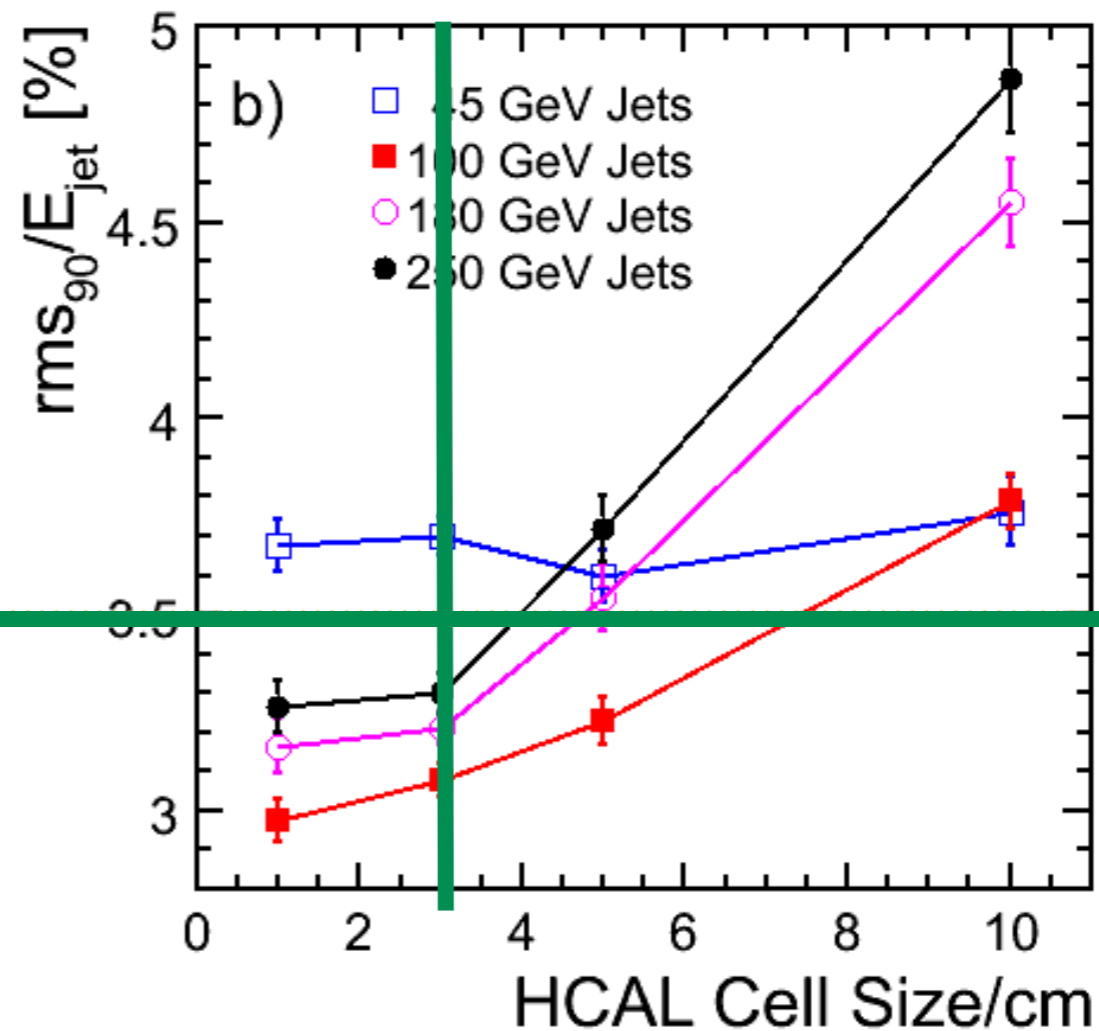
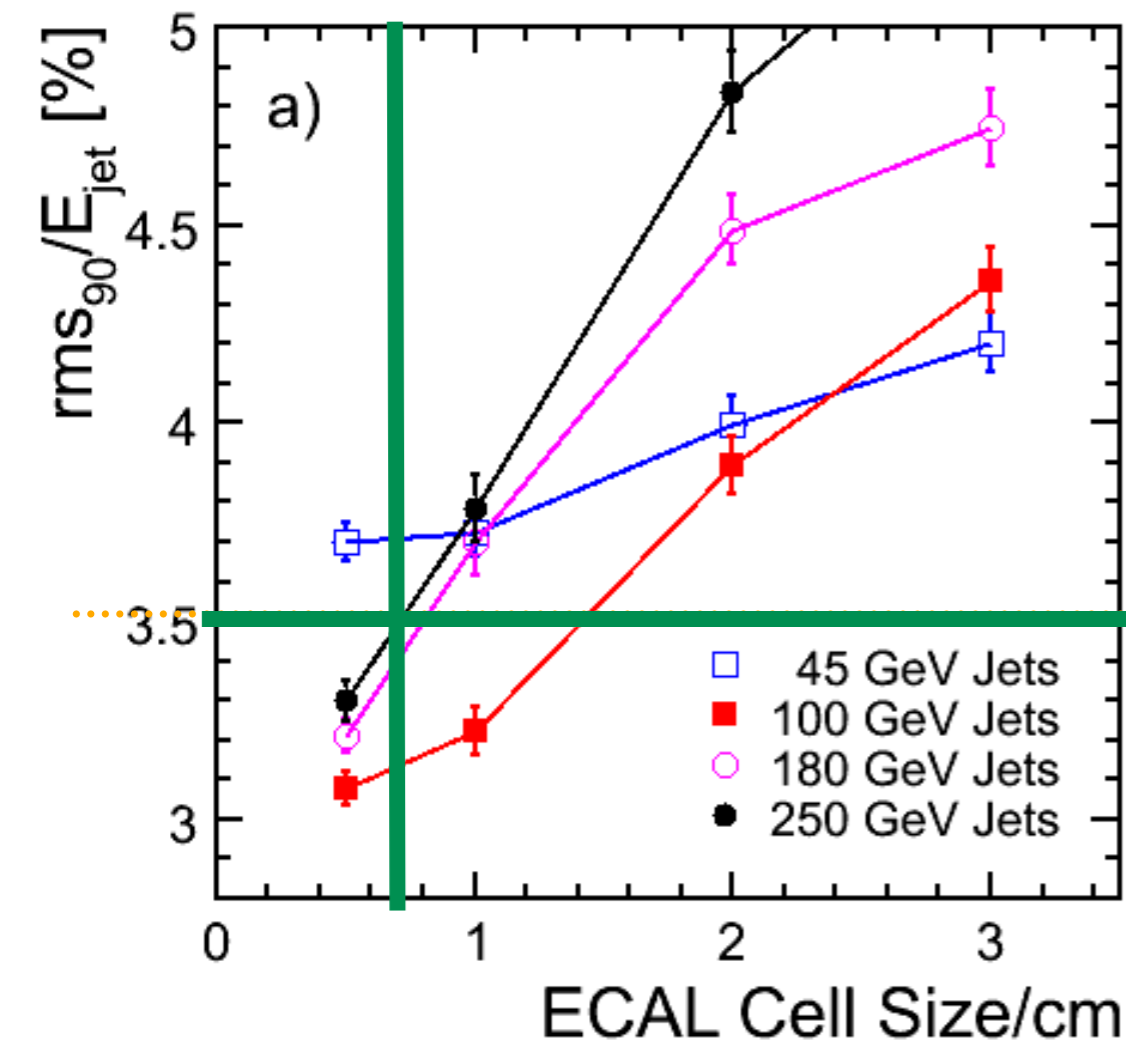


3.5%  
ILC G

Mark Thomson

# PFAの測定器への要求II

- Jet エネルギー分解能 > 測定器を縛る：細分化



3.5%

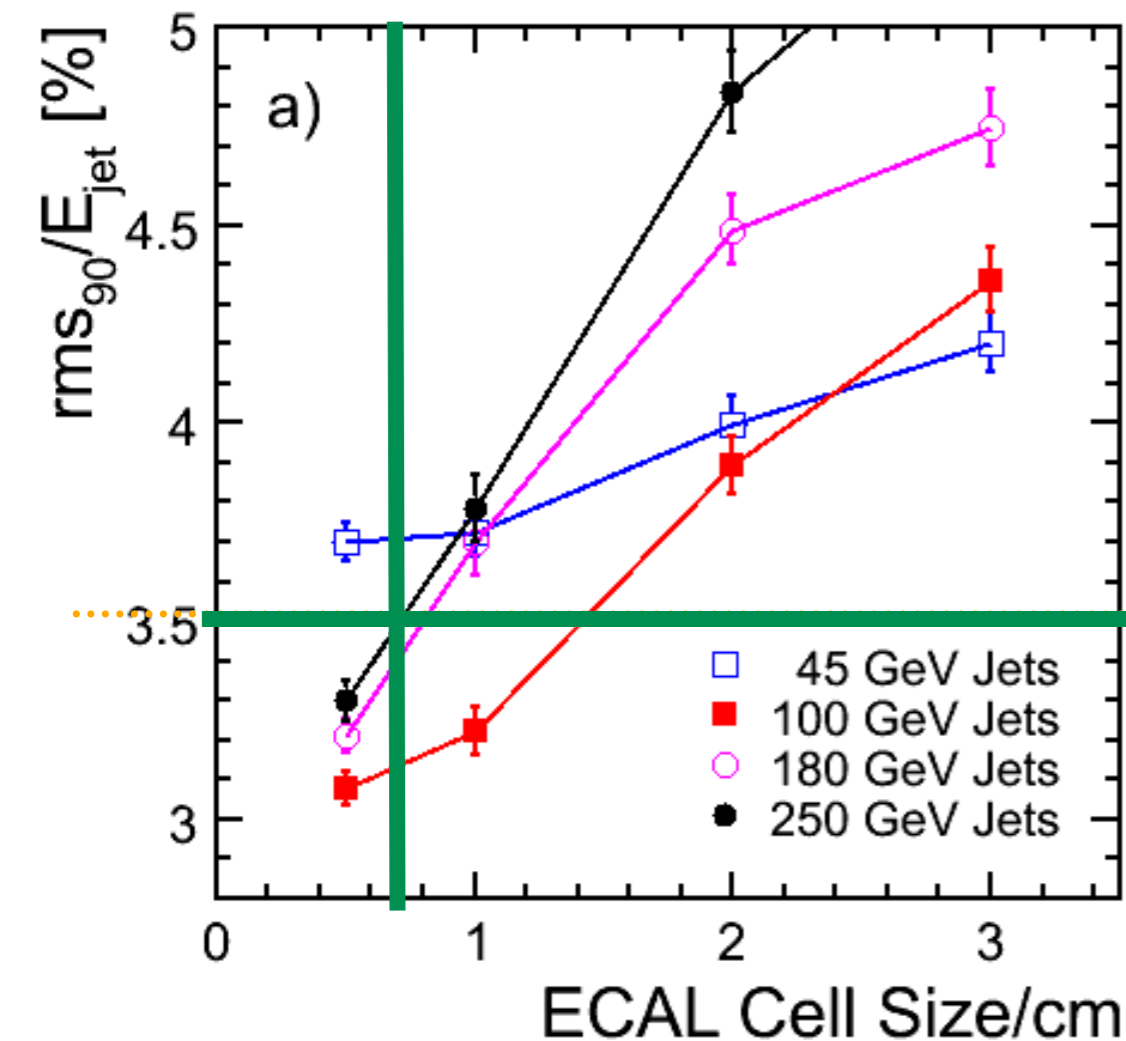
ILC G

5mm

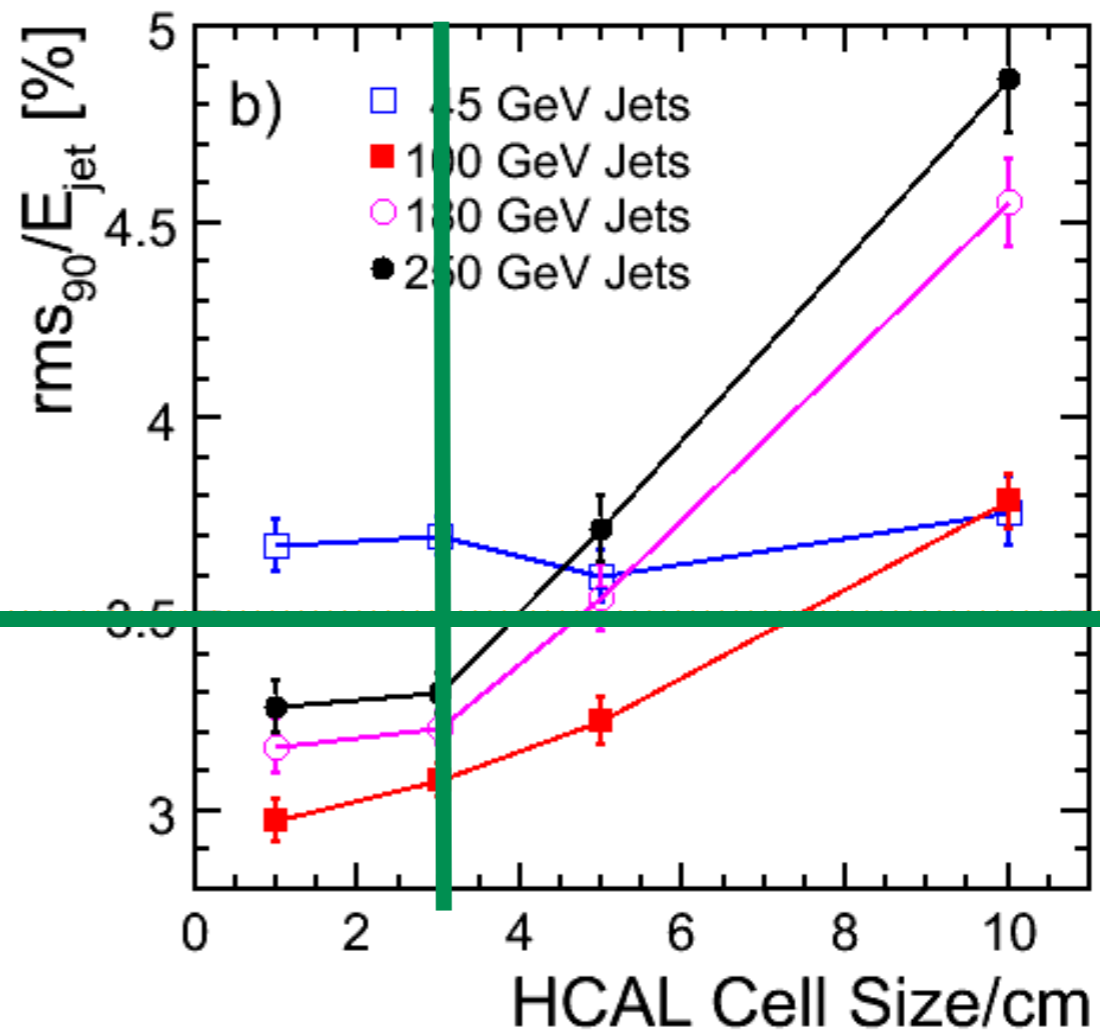
Mark Thomson

# PFAの測定器への要求II

- Jet エネルギー分解能 > 測定器を縛る：細分化



5mm



3cm

3.5%

ILC G

Mark Thomson

# 衝突型測定器

VTX

衝突点周り:全てを囲う  
Emiss

飛跡

崩壊点測定:超高精度位置測定 VTX

粒子は通過

運動量測定:測定点数勝負 飛跡測定器

エネルギー測定器

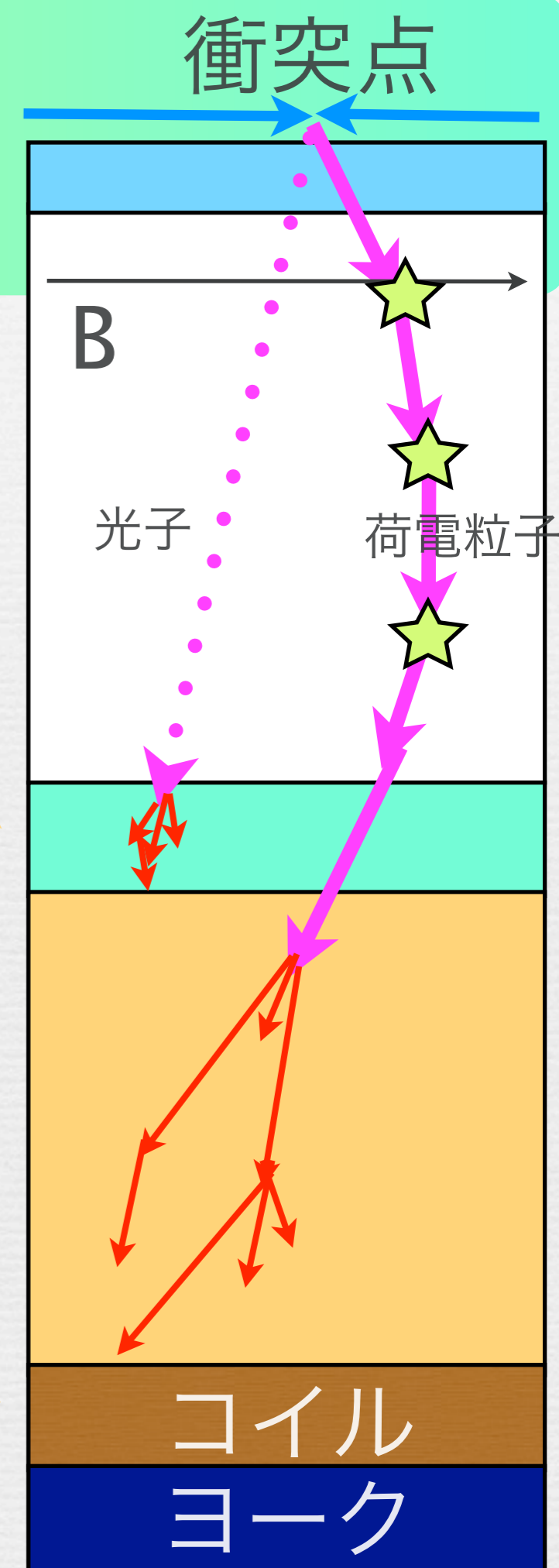
カロリ

粒子を止めるカロリメータ

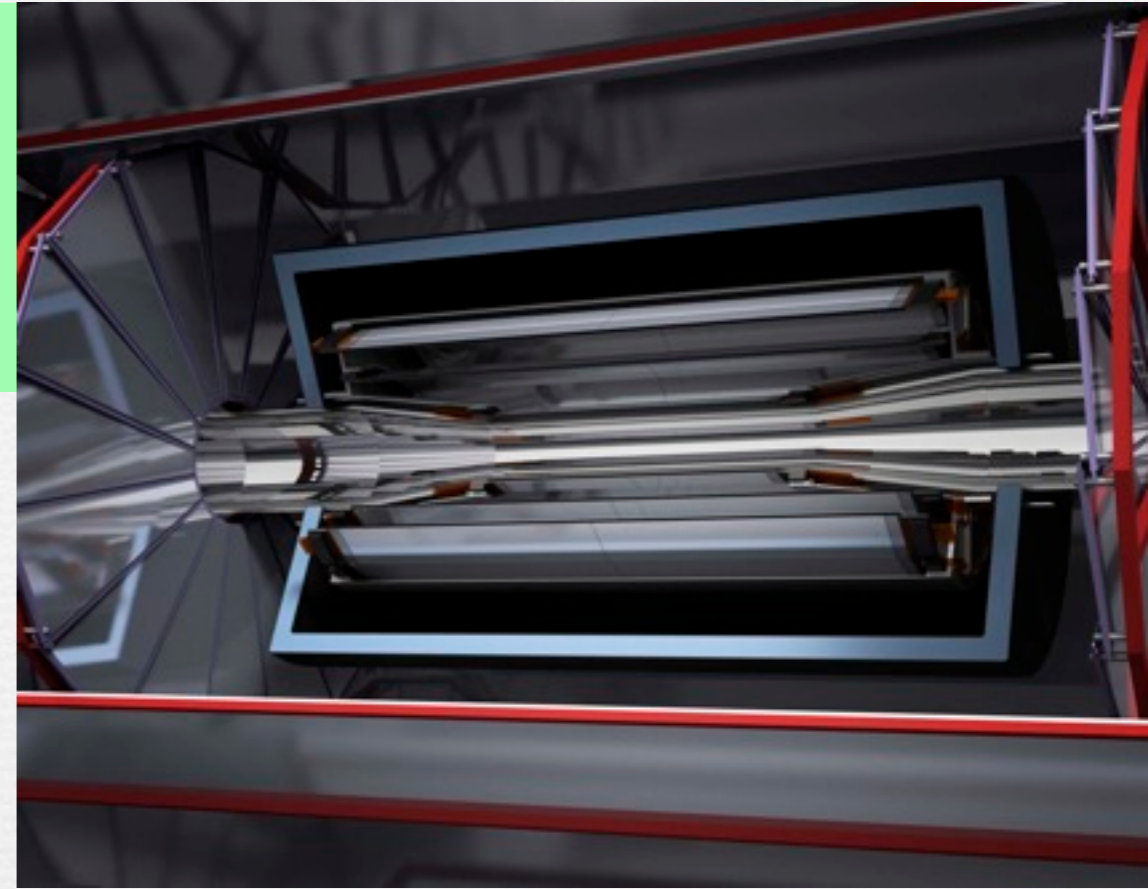
メータ

コイルとリターンヨーク (ミュー測定)

コイル  
ヨーク



# VTX



- ❧ 崩壊点測定器

- ❧ b/c quark tagging

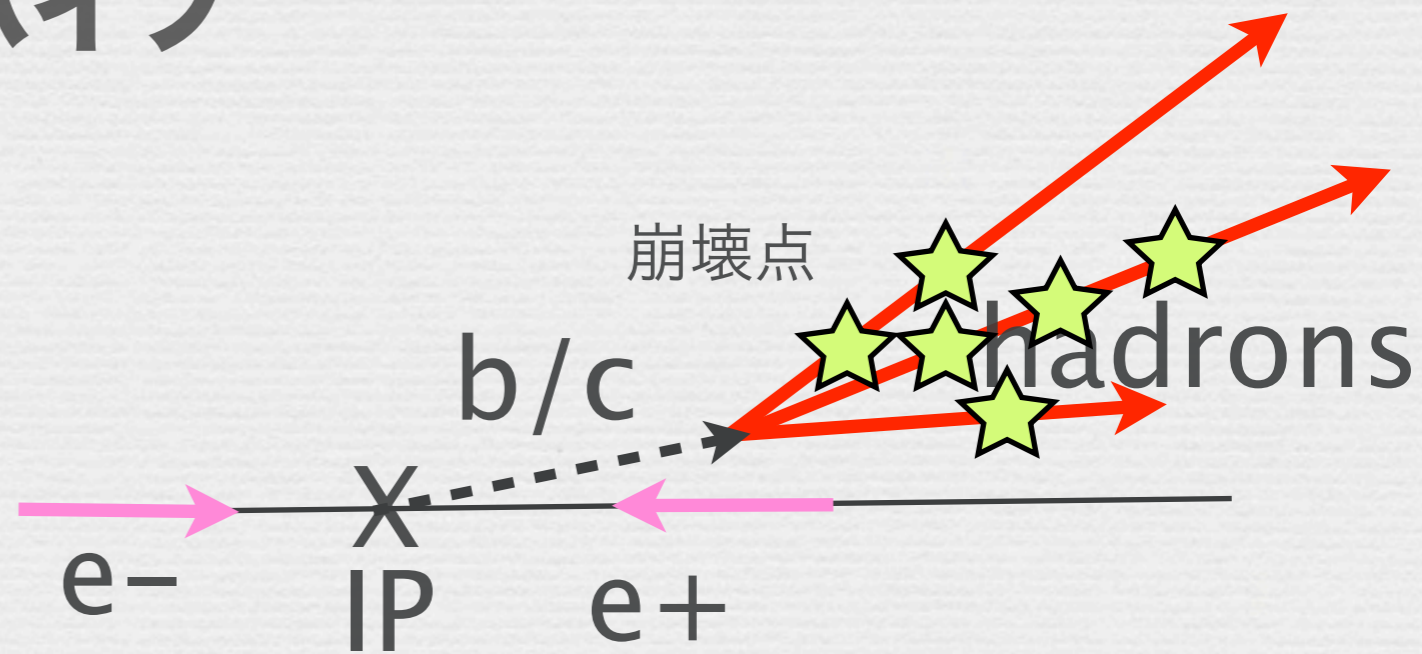
b/c quarkの寿命は長い $\sim 10^{-12}$ s  
CT $\sim 300\mu\text{m}$

衝突点IPに近づく: ビームパイプ

- ❧ ごみ(e/r)が増える

- ❧ 位置測定精度をあげる

- ❧ 小さいピクセル



# ミュー粒子 検出器

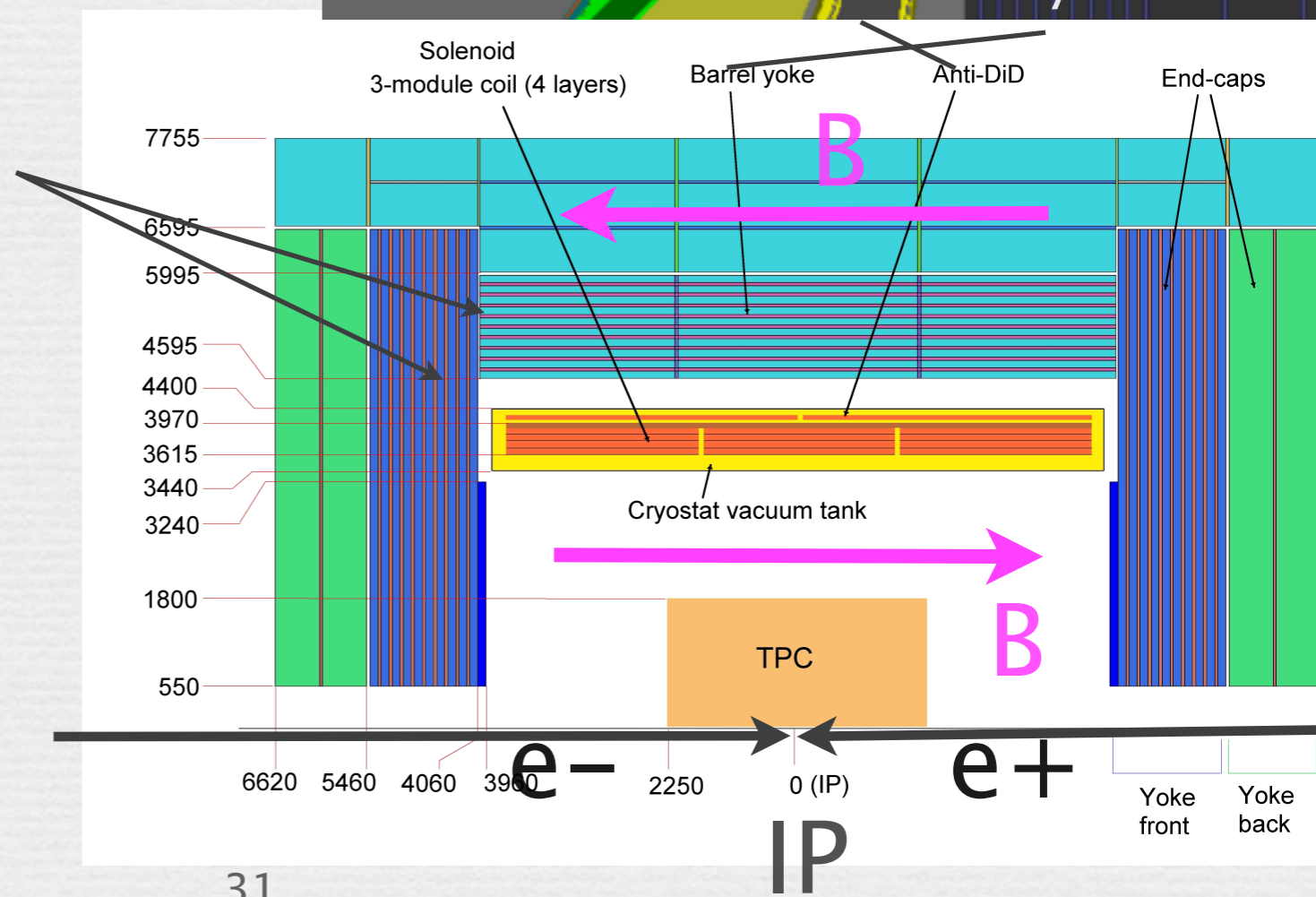
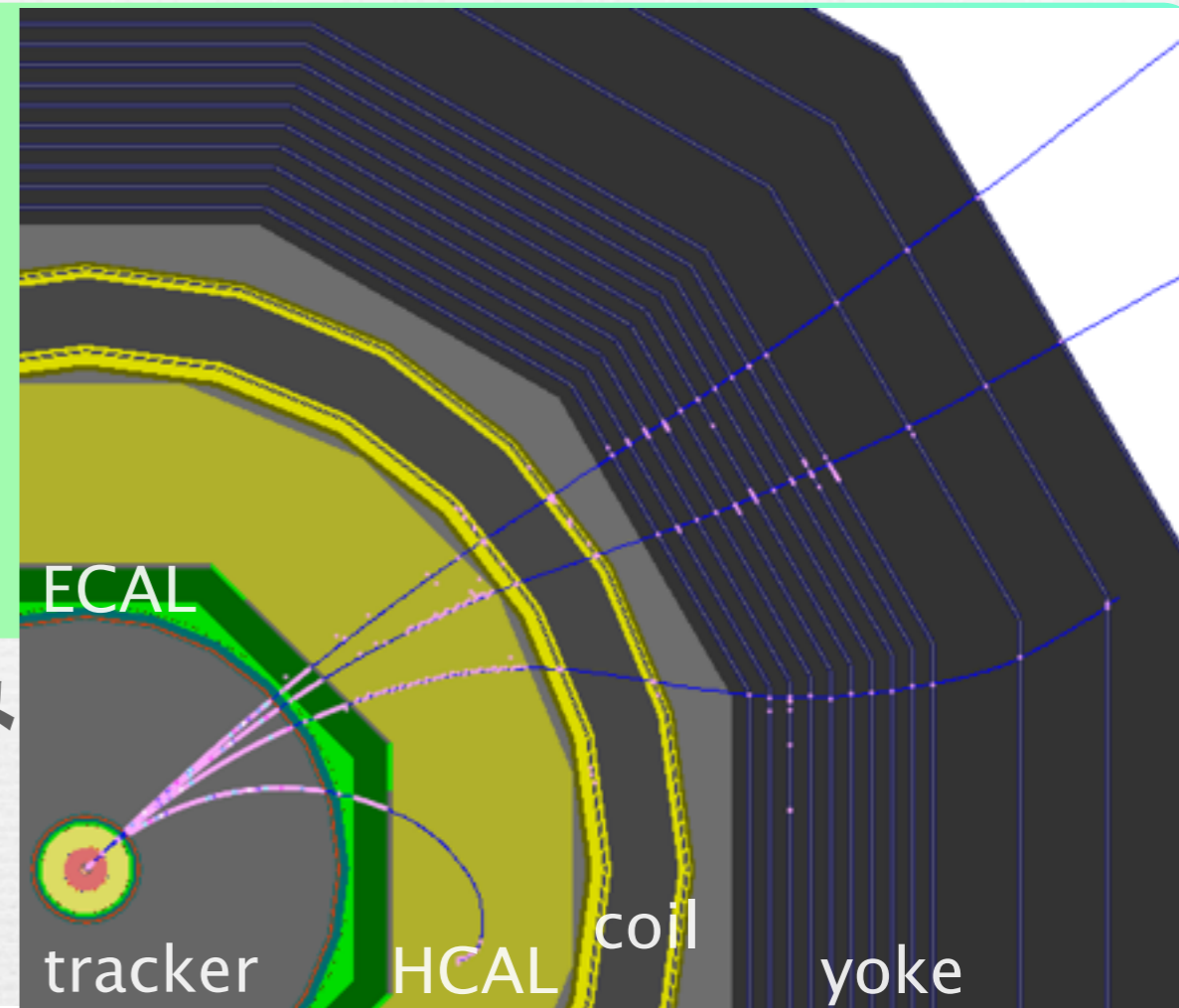
☞ ミュー粒子は電磁相互作用のみ

☞ 貫通力が大きい 20,10,5,2GeV/c

☞ リターンヨークを分割

☞ 位置測定器を挿入

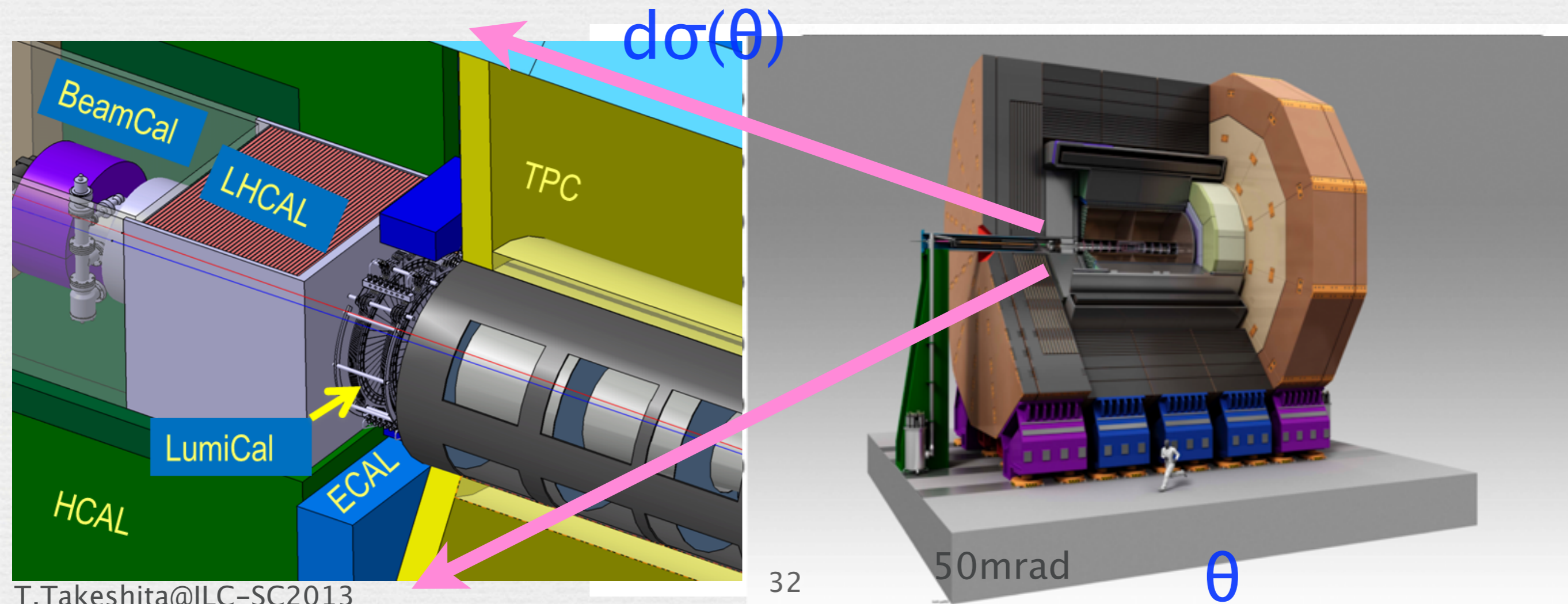
☞ ~3cm multiple scattering





# Luminosity 測定 $\mathcal{L} = \frac{Yield(\theta)}{\sigma(\theta)}$

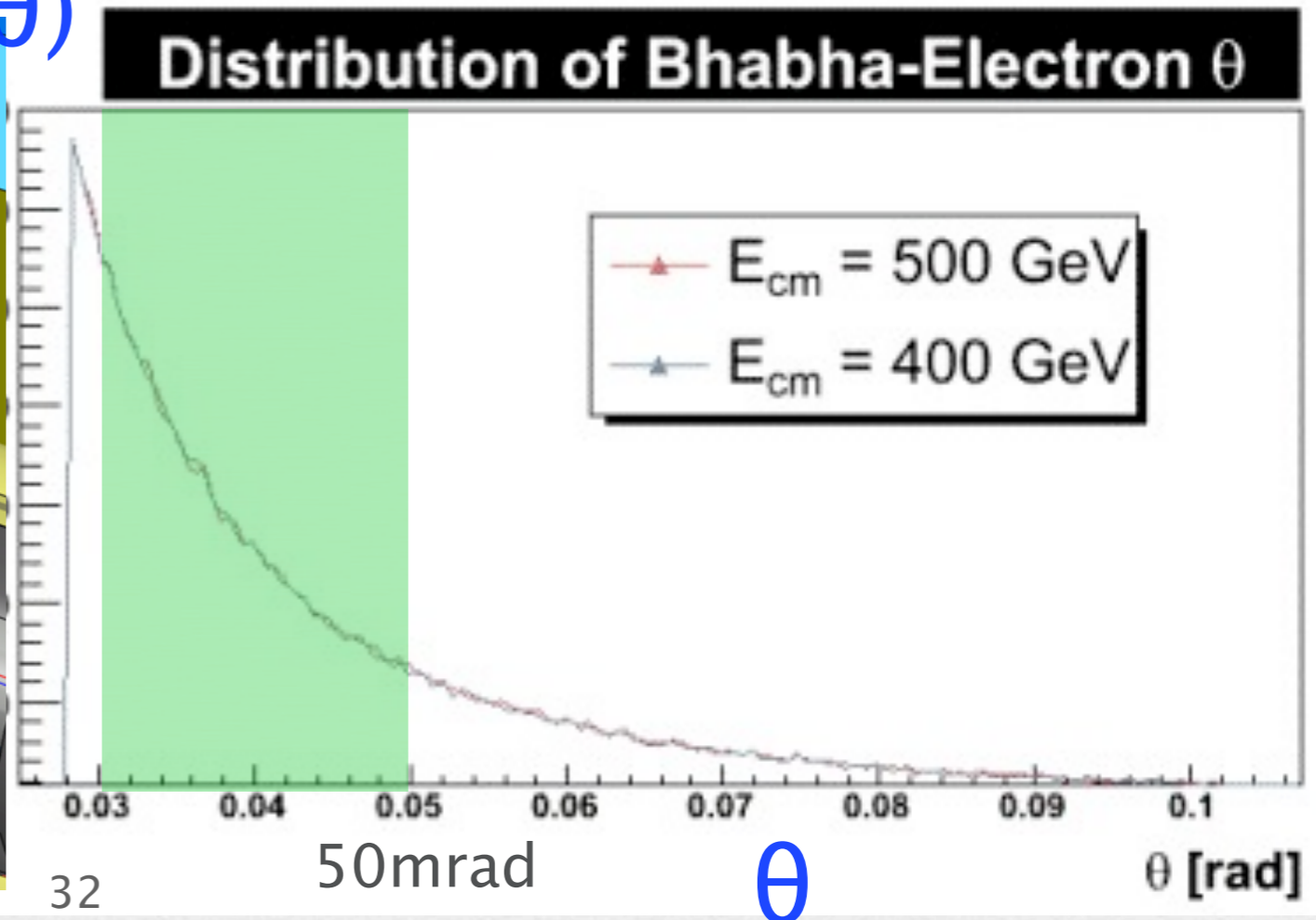
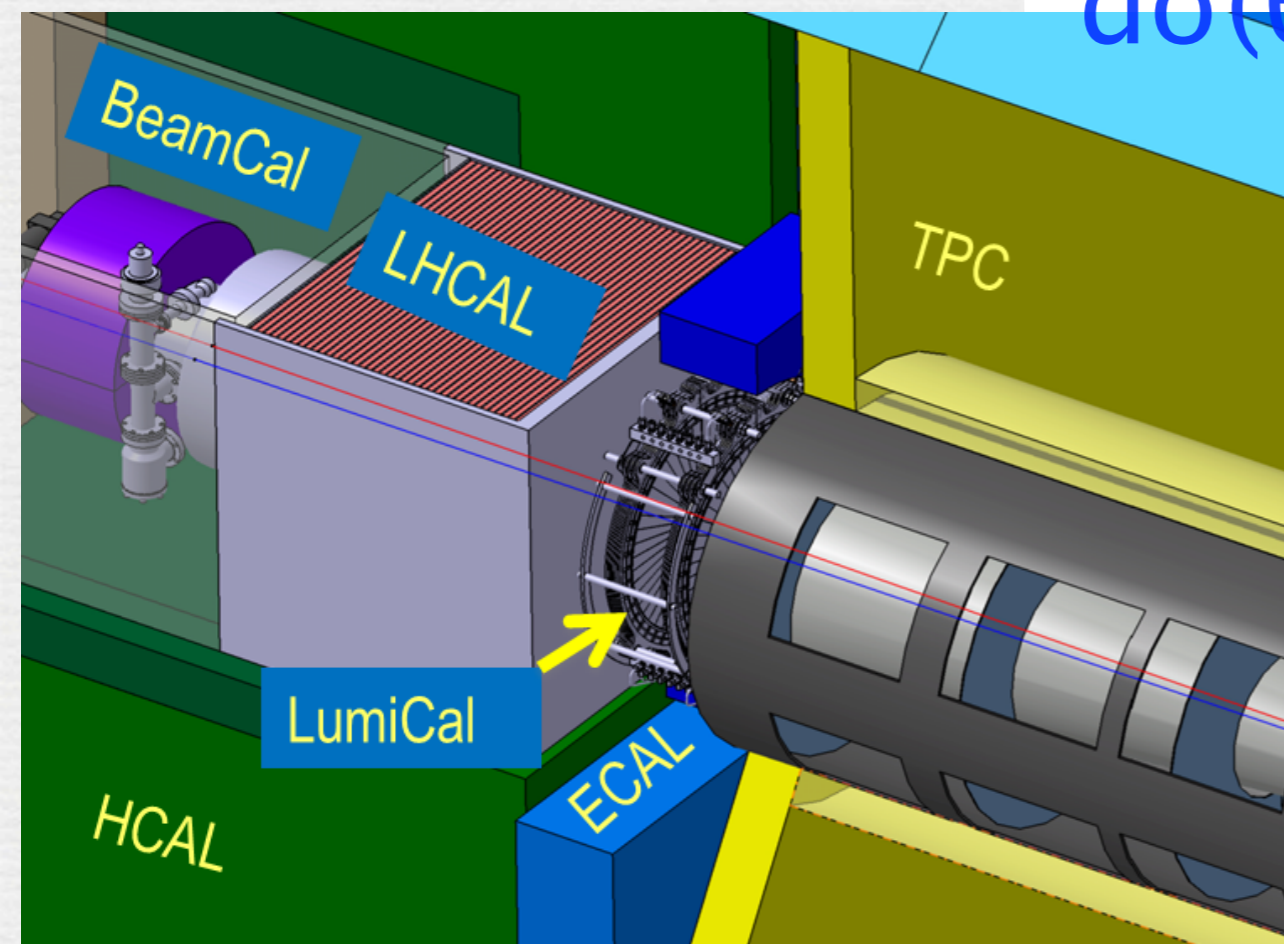
- 衝突点でビーム衝突がどのくらい起きているか
- 既知の $d\sigma(\theta)$ を使う :  $e+e^- \rightarrow e+e^-$  : Bhabha散乱
- 前方超ピーク : 測定器は超前方  $\theta \sim 0$  by FCAL



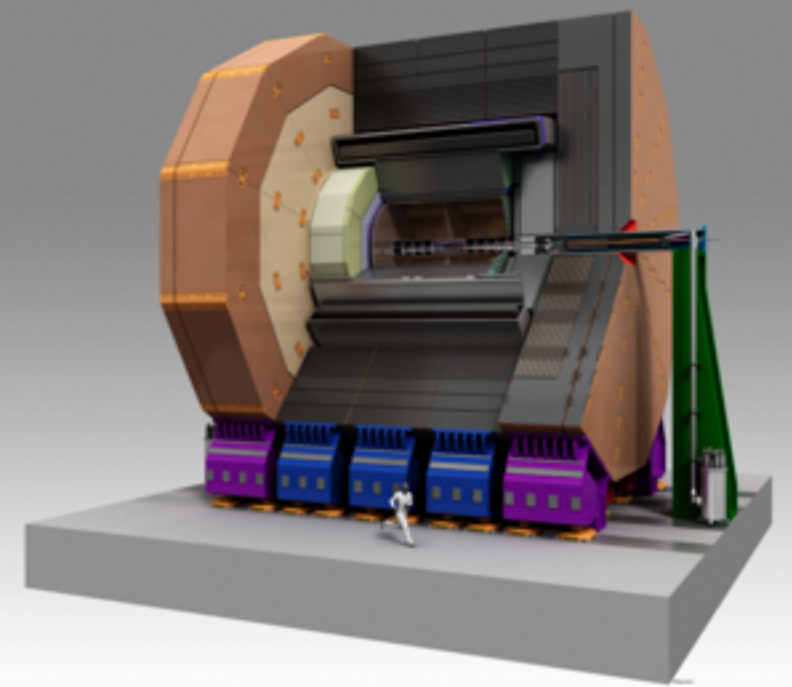
# Luminosity 測定 $\mathcal{L} = \frac{Yield(\theta)}{\sigma(\theta)}$

- 衝突点でビーム衝突がどのくらい起きているか
- 既知の $d\sigma(\theta)$ を使う :  $e+e^- \rightarrow e+e^-$  : Bhabha散乱
- 前方超ピーク : 測定器は超前方  $\theta \sim 0$  by FCAL

$d\sigma(\theta)$



# ILD



International Large Detector

**Large:** tracker : large N測定点、  
ジェットの中の粒子の分離:TPC

独+日

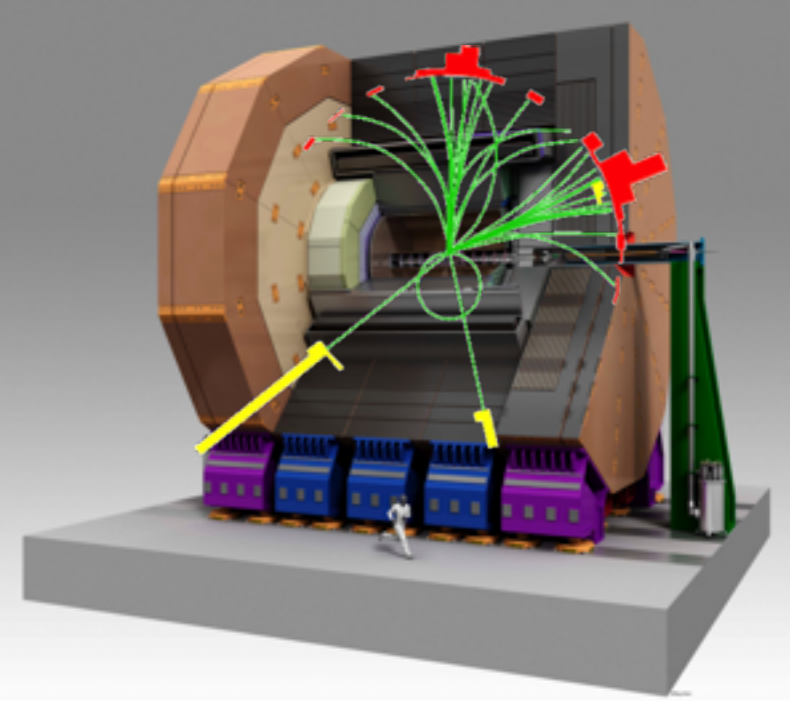
コストに問題 (コイルとカロリメータ)

$$\frac{\sigma}{p} \sim \frac{p}{\sqrt{N} BL^2}$$

ECAL: silicon or scintillator: <Large  
仏 日

HCAL: scintillator analog or gas  
digital  
独+露  
仏/米

# ILD



International Large Detector

**Large:** tracker : large N測定点、  
ジェットの中の粒子の分離:TPC

独+日

コストに問題 (コイルとカロリメータ)

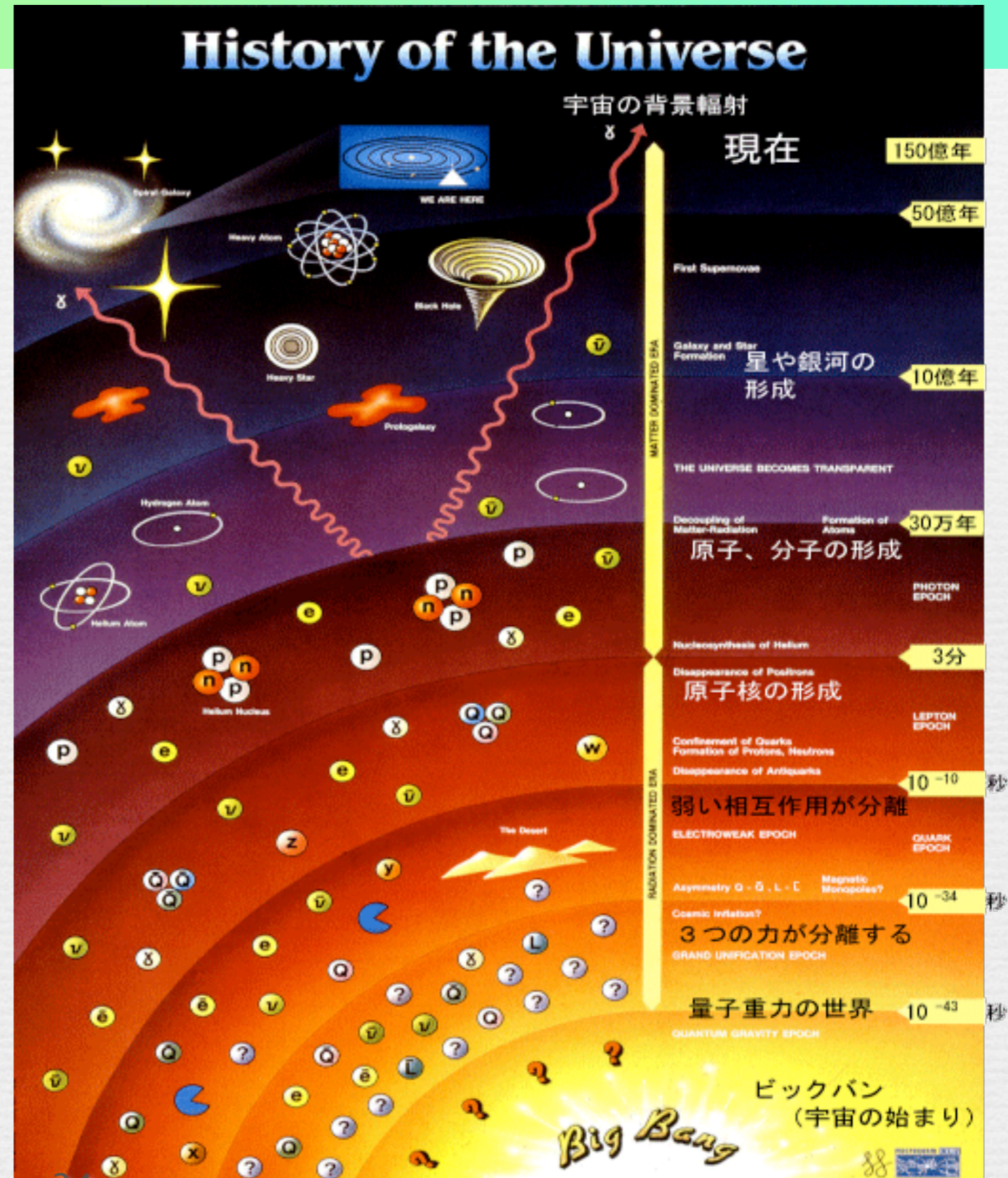
$$\frac{\sigma}{p} \sim \frac{p}{\sqrt{N} BL^2}$$

ECAL: silicon or scintillator: <Large  
仏 日

HCAL: scintillator analog or gas  
digital  
独+露  
仏/米

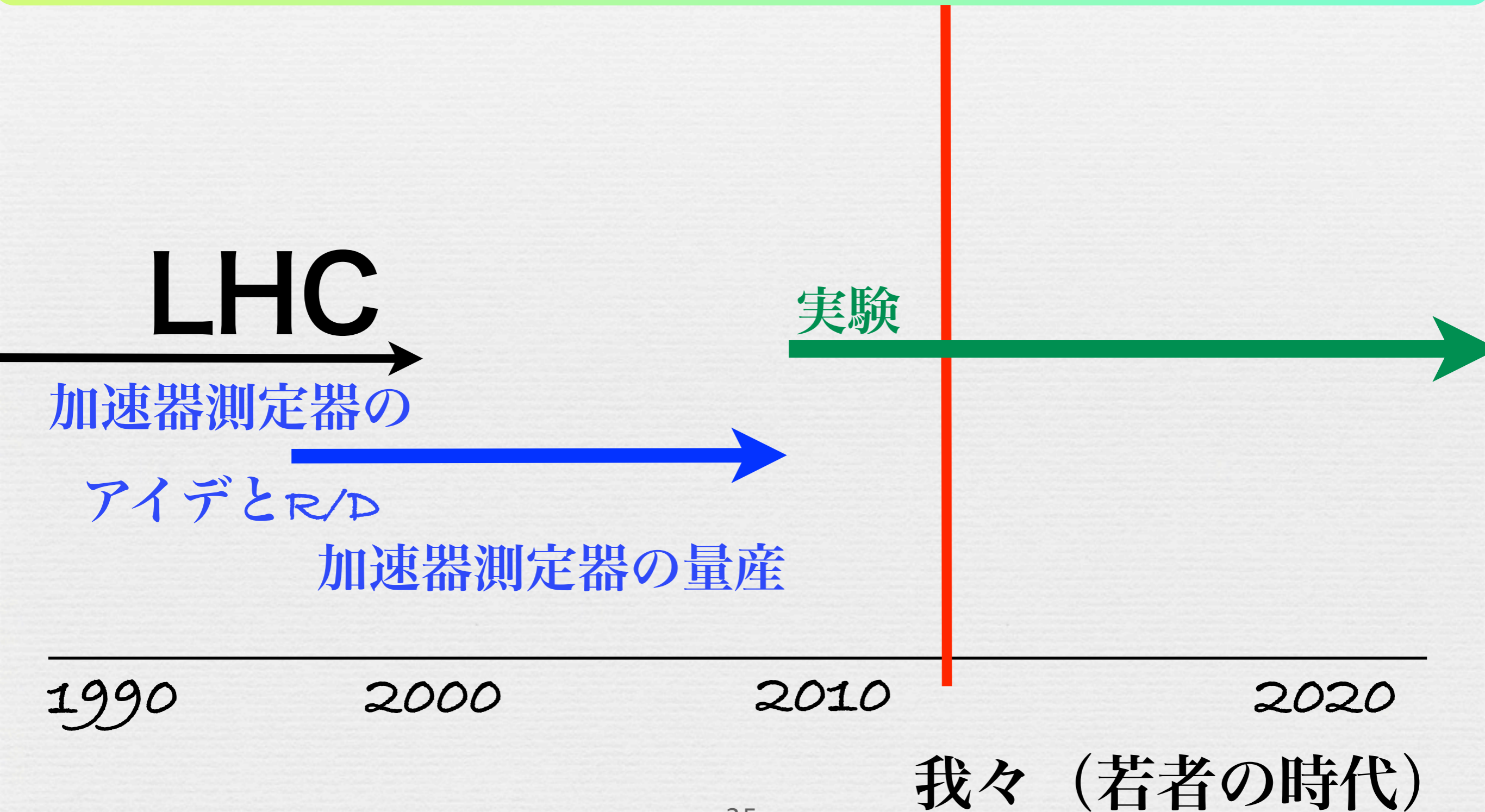
# 宇宙の初まり

- ☞ BigBang
- ☞ 高温 = 高エネルギー
- ☞ 衝突実験は宇宙の初まりを人の手で再現
- ☞ 宇宙創生に迫る

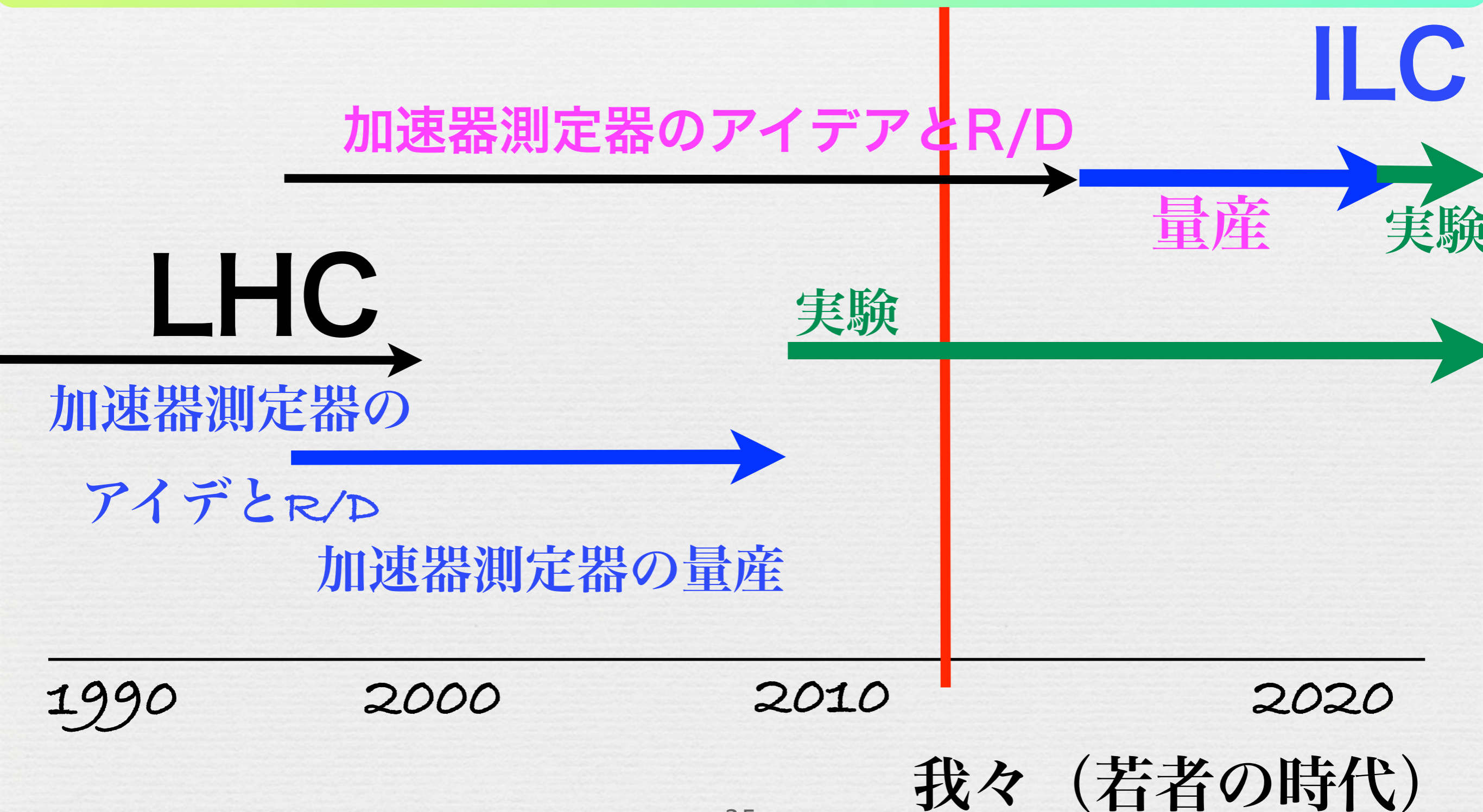


# スケジュール

## 物理と加速器測定器



# スケジュール 物理と加速器測定器



# まとめ

- ☛ 衝突型加速器の実験
- ☛ なぜやるのか？
- ☛ どうやってやるか？
- ☛ なにを知ろうとしているか？
- ☛ これからどうなるか？
- ☛ 皆さんの仕事はどこに位置づけられているか？



# まとめ

- ☛ 衝突型加速器の実験
- ☛ なぜやるのか？ なぜILC
- ☛ どうやってやるか？
- ☛ なにを知ろうとしているか？
- ☛ これからどうなるか？
- ☛ 皆さんの仕事はどこに位置づけられているか？

# まとめ

- ☛ 衝突型加速器の実験
- ☛ なぜやるのか？                      なぜILC
- ☛ どうやってやるか？                  衝突実験
- ☛ なにを知ろうとしているか？
- ☛ これからどうなるか？
- ☛ 皆さんの仕事はどこに位置づけられているか？

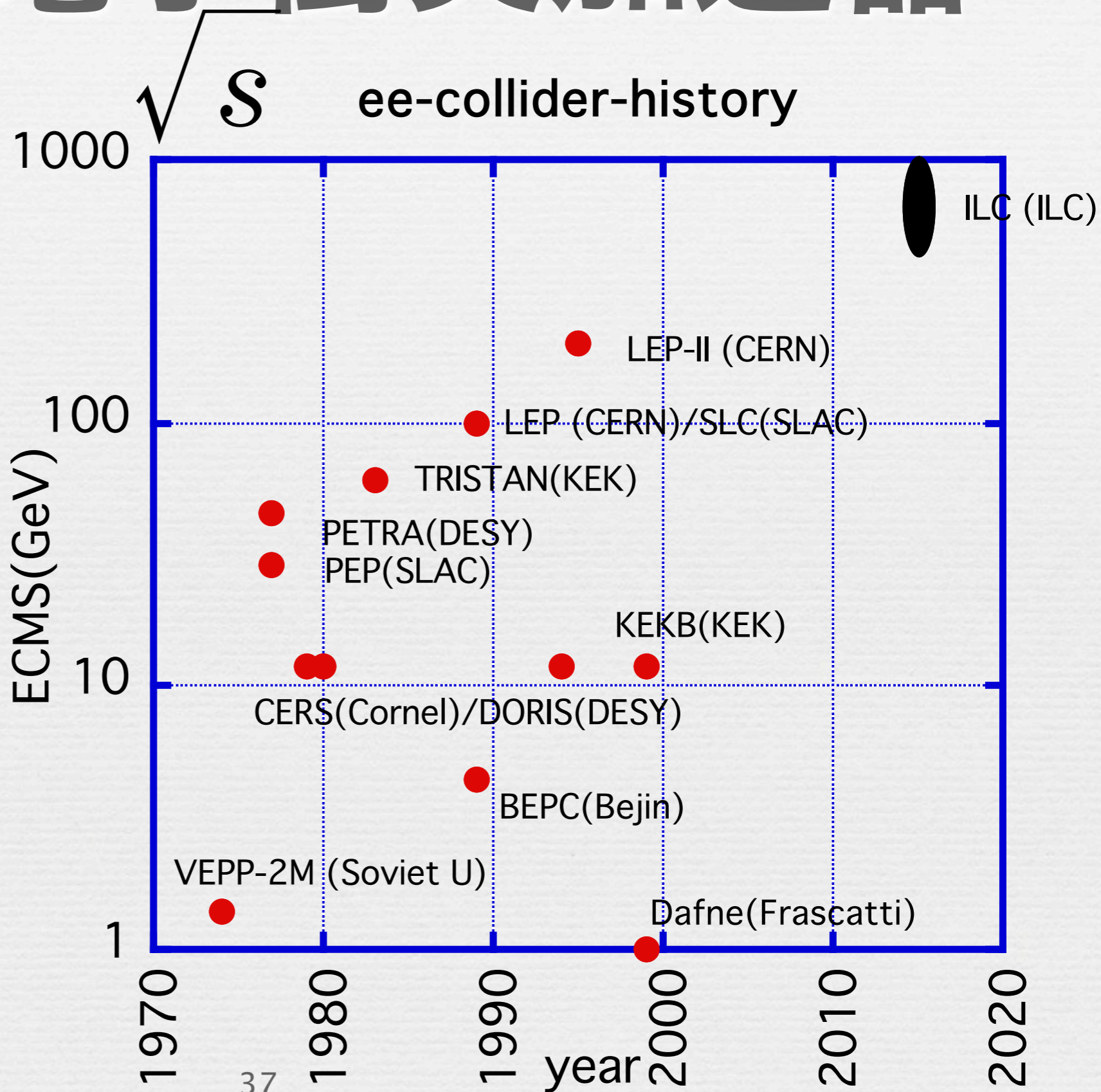
# まとめ

- ☛ 衝突型加速器の実験
- ☛ なぜやるのか？                      なぜILC
- ☛ どうやってやるか？                  衝突実験
- ☛ なにを知ろうとしているか？      どうやって
- ☛ これからどうなるか？
- ☛ 皆さんの仕事はどこに位置づけられているか？

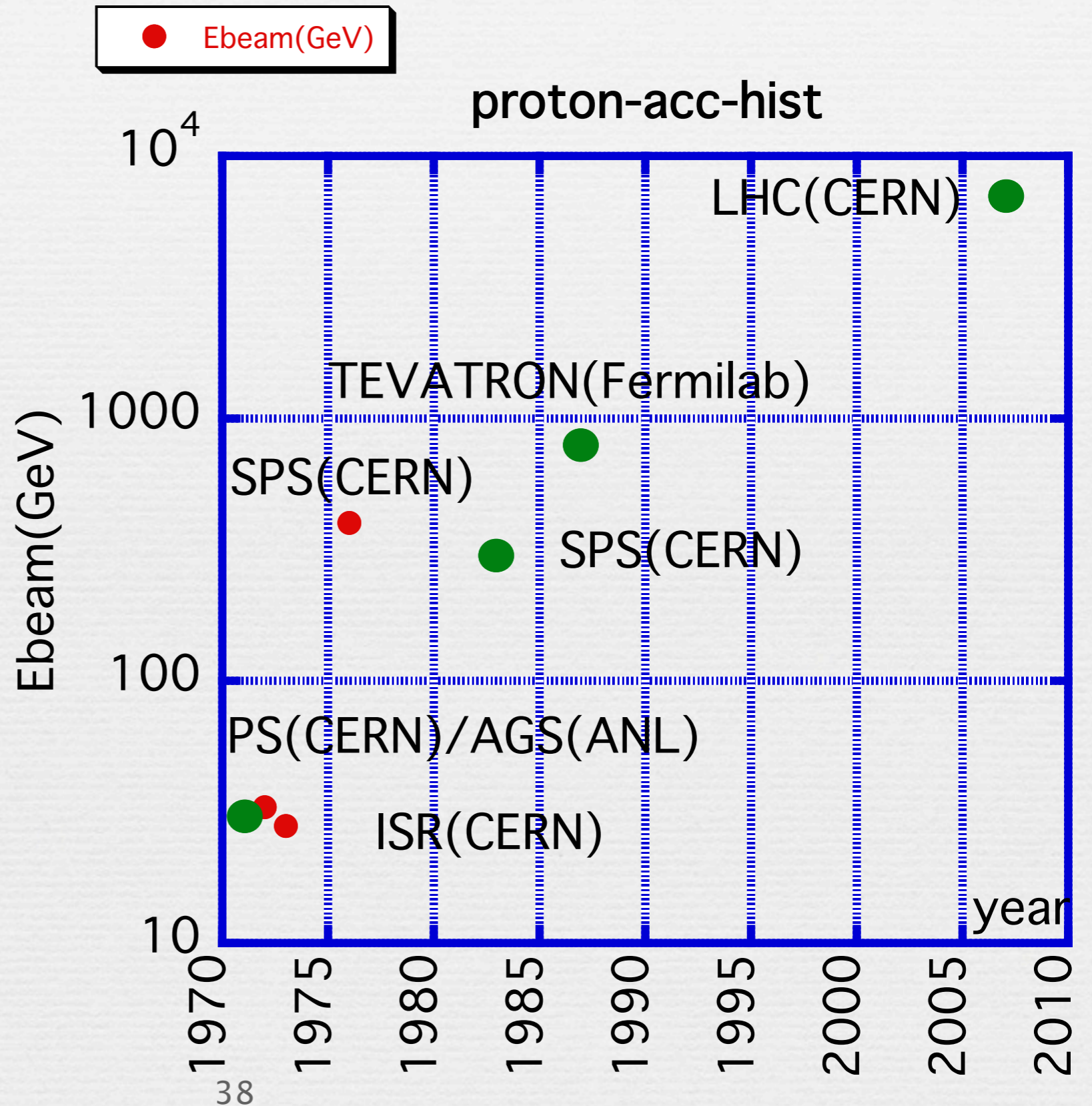
# まとめ

- ☛ 衝突型加速器の実験
- ☛ なぜやるのか？                      なぜILC
- ☛ どうやってやるか？                  衝突実験
- ☛ なにを知ろうとしているか？      どうやって
- ☛ これからどうなるか？                今でしょう
- ☛ 皆さんの仕事はどこに位置づけられているか？

# 電子陽電子衝突加速器



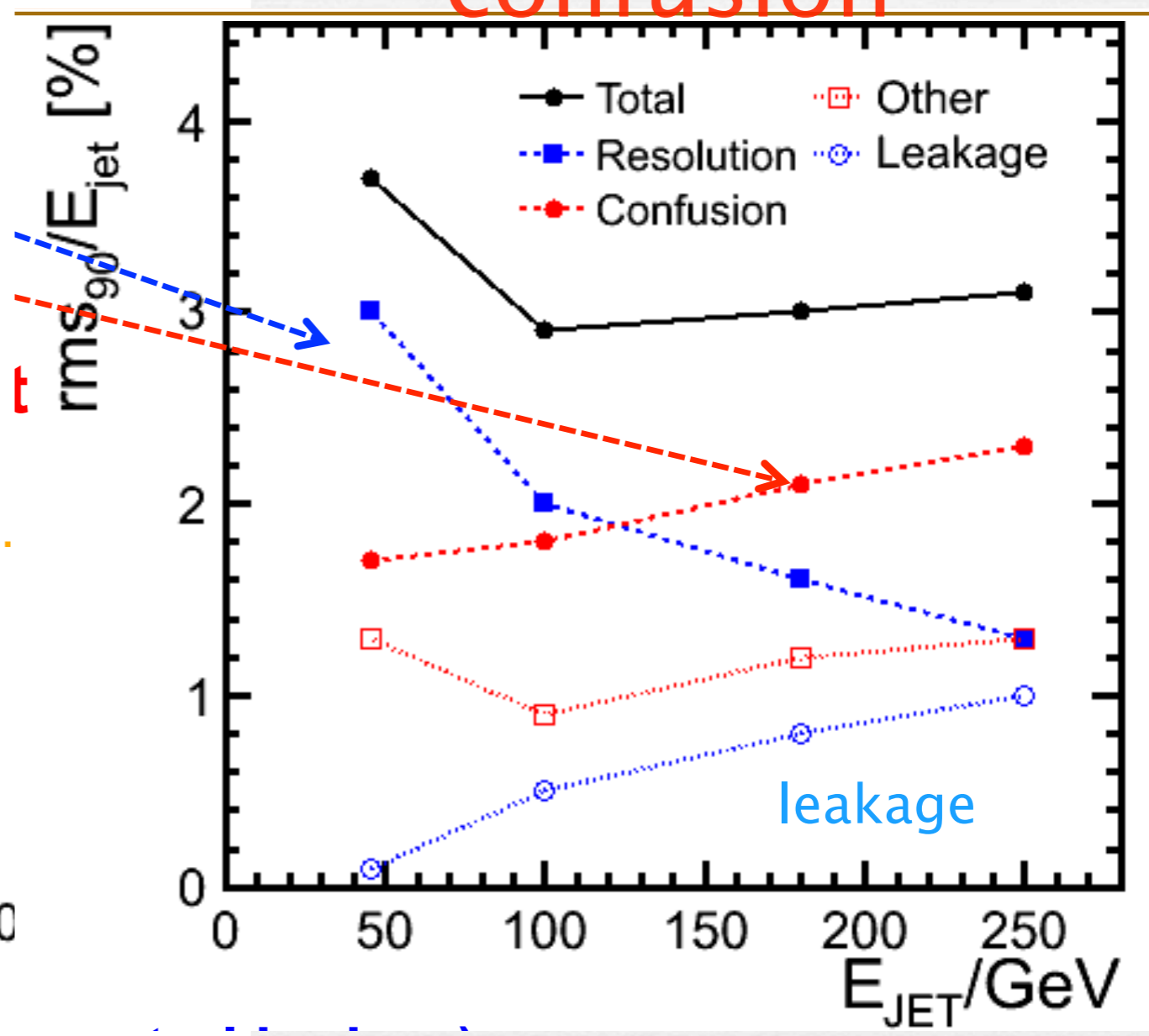
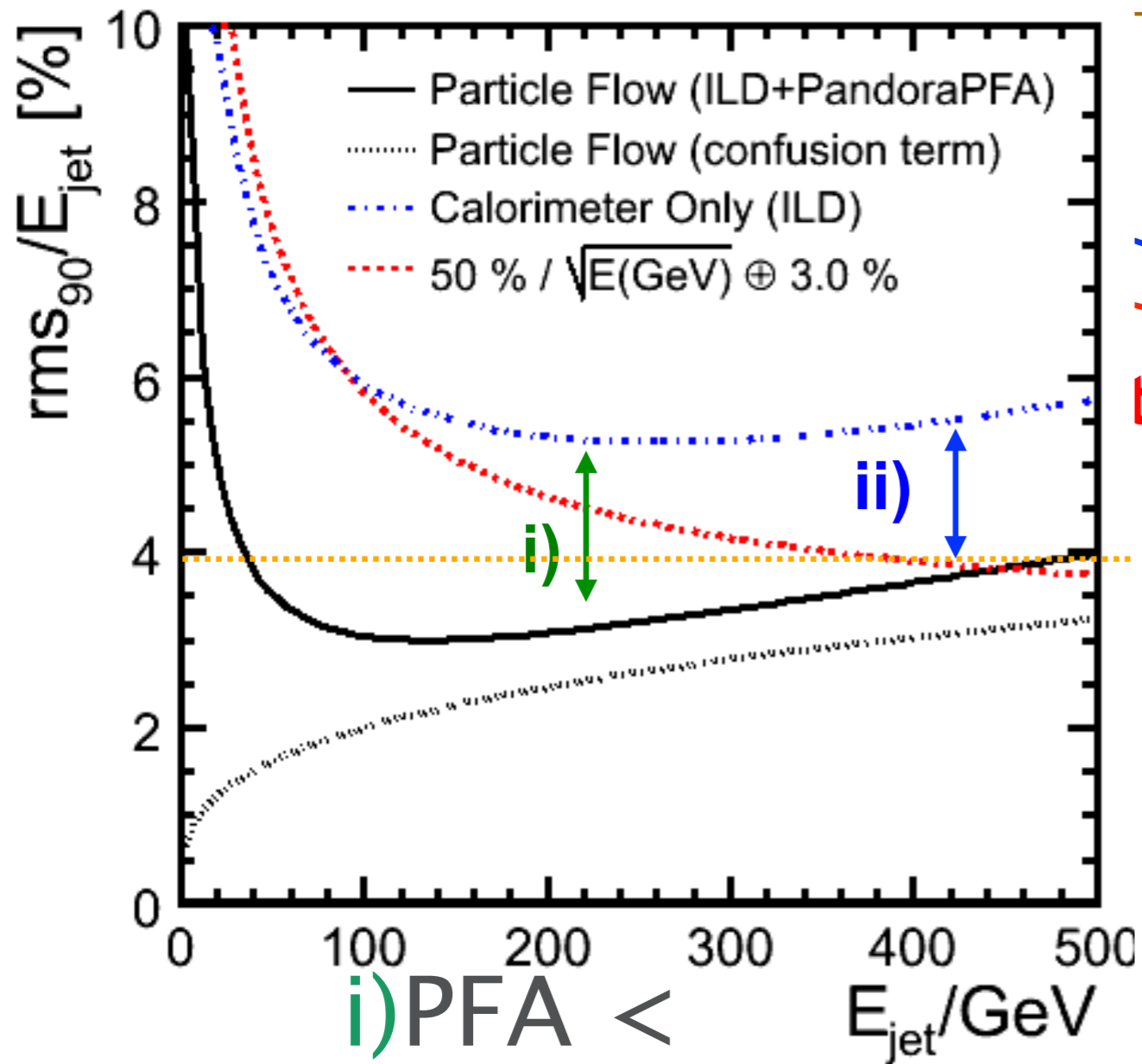
# 陽子加速器



# PFA vs conv. CAL

## CAL only vs PFA

## resolution vs confusion



cal

leakage

Mark Thomson