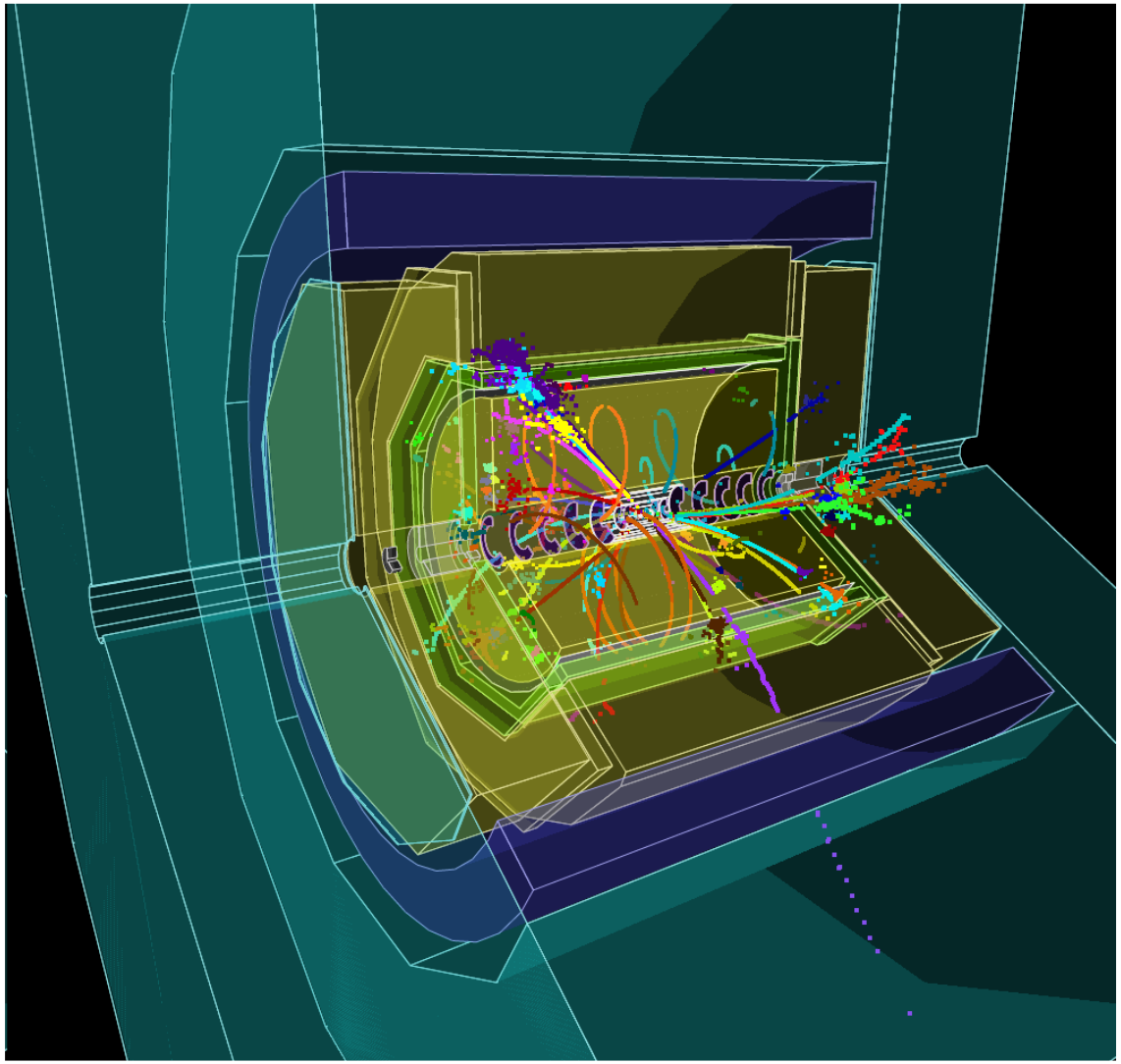
ヒッグスファクトリーの測定器

2026年11月8日

岩手大学　成田晋也

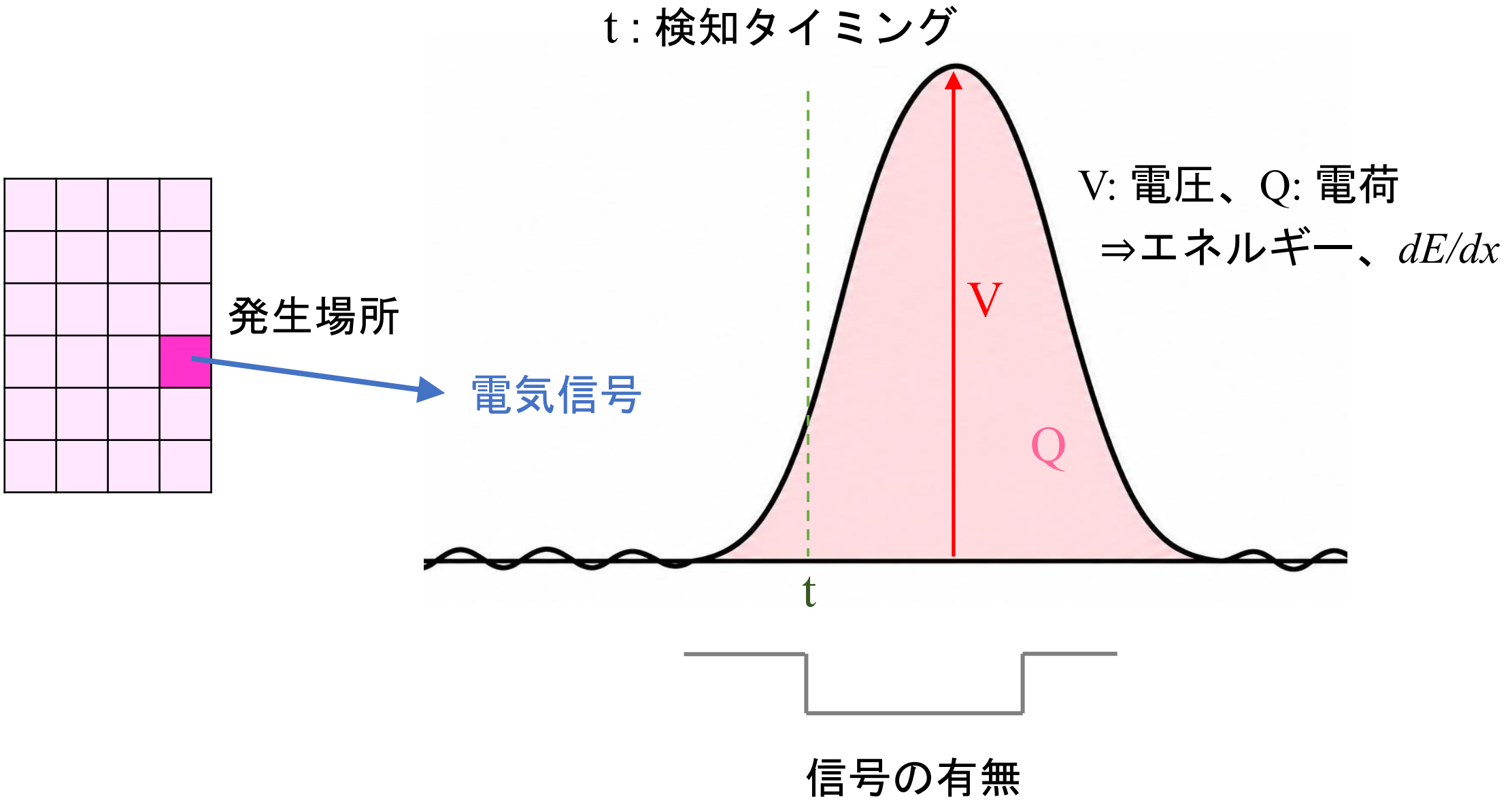
今日のおはなし

- コライダー測定器
- ヒッグスファクトリー測定器
- さまざまな検出器技術



コライダー測定器

検出器からの信号



粒子反応をどうやって見るか？

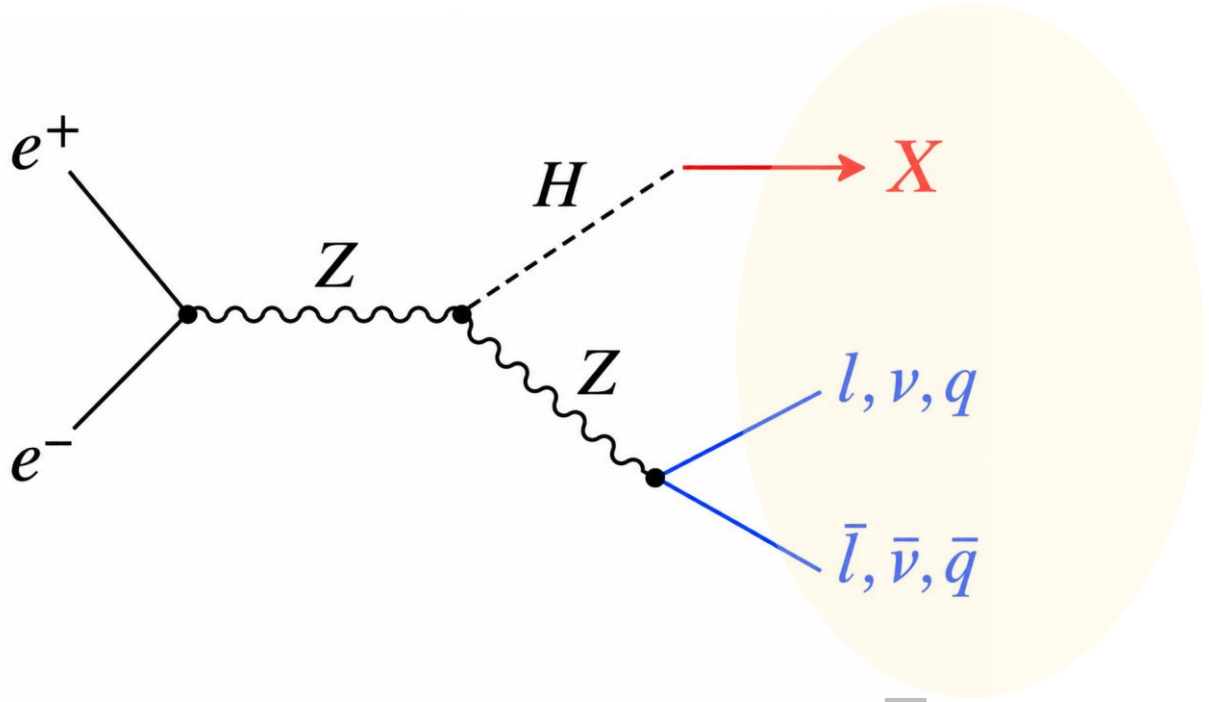
検出器から得られる情報
- 信号検出位置
- 検出時間
- 電圧／電荷

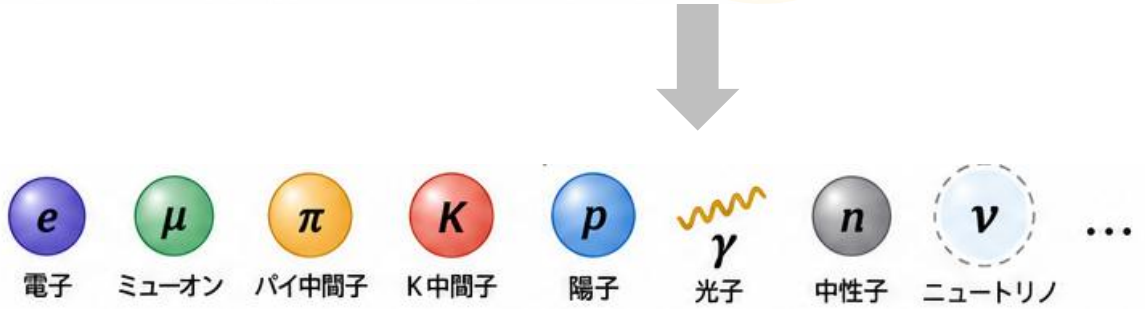
↓

再構成、識別するもの
- 位置（生成点、崩壊点、通過点）
- 飛跡→運動量
- エネルギー
- 粒子の種類

↓（さらに情報を組み合わせて）

質量、寿命、フレーバー、見えない粒子



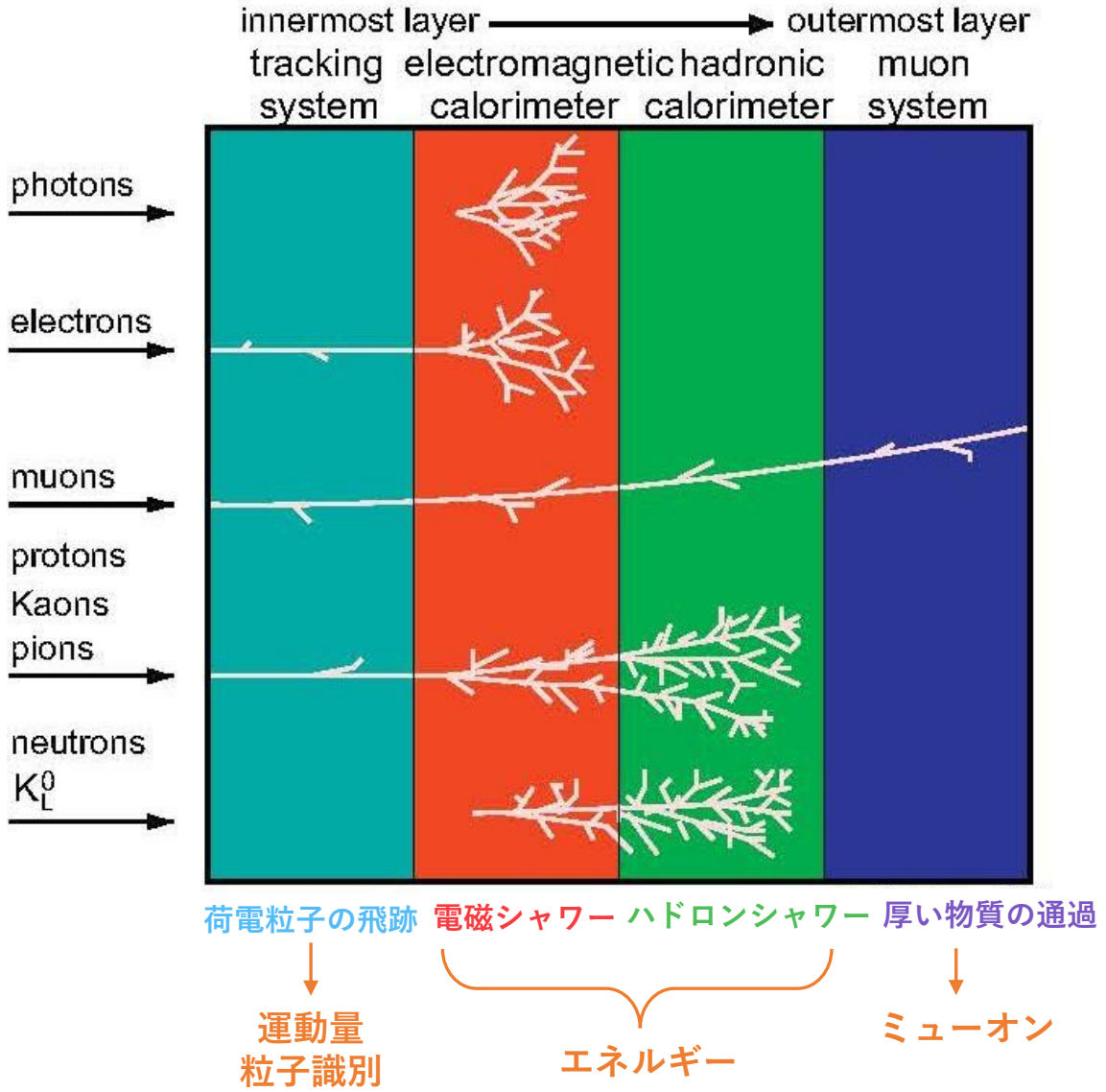


測定器中でのふるまいは？

測定器での見え方

粒子によって物質との相互作用が異なる

粒子	測定器での主な見え方
γ	電磁シャワー
$e^{\pm}$	飛跡＋電磁シャワー
$\mu^{\pm}$	飛跡＋測定器の外まで通過
$\pi^{\pm}, K^{\pm}$	飛跡＋ハドロンシャワー
n, K_L	ハドロンシャワー
ν	直接は見えない



NIM A 666 (2012) 148

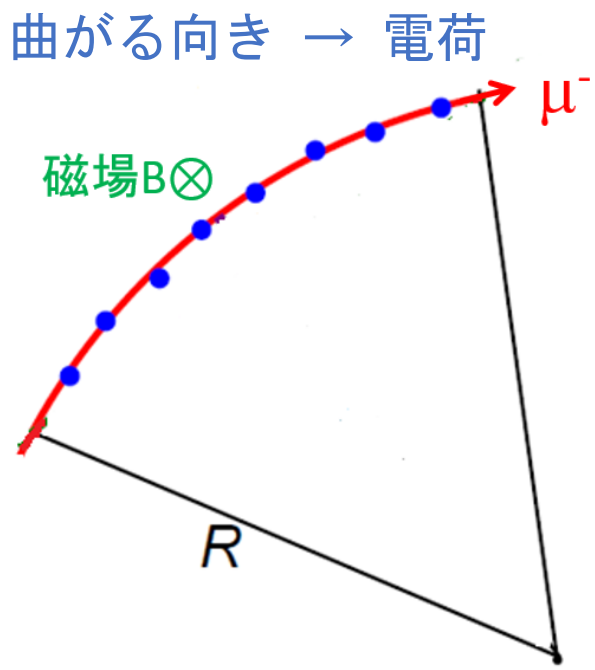
荷電粒子の運動量測定

- 飛跡測定器で荷電粒子の飛跡を測定する。
- 一般的に飛跡検出器にはビーム軸と平行な方向に磁場が印加されている。
- 荷電粒子は磁場(B)で曲げられ、らせん運動をする。
- 飛跡の半径(R)は磁場に垂直な方向の運動量(p_T)に比例する。

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

正確に運動量を測定するには...

- ✓ 高い位置分解能
- ✓ 多数の測定点
- ✓ 長い測定距離（レバーアーム）
- ✓ 強い磁場
- ✓ 少ない物質量



粒子のエネルギー測定

- 粒子が物質中で電磁シャワーやハドロンシャワーを形成し、それにともなって生じる電荷や光を検出する。
- 検出信号を較正して、入射粒子のエネルギーを再構成する。

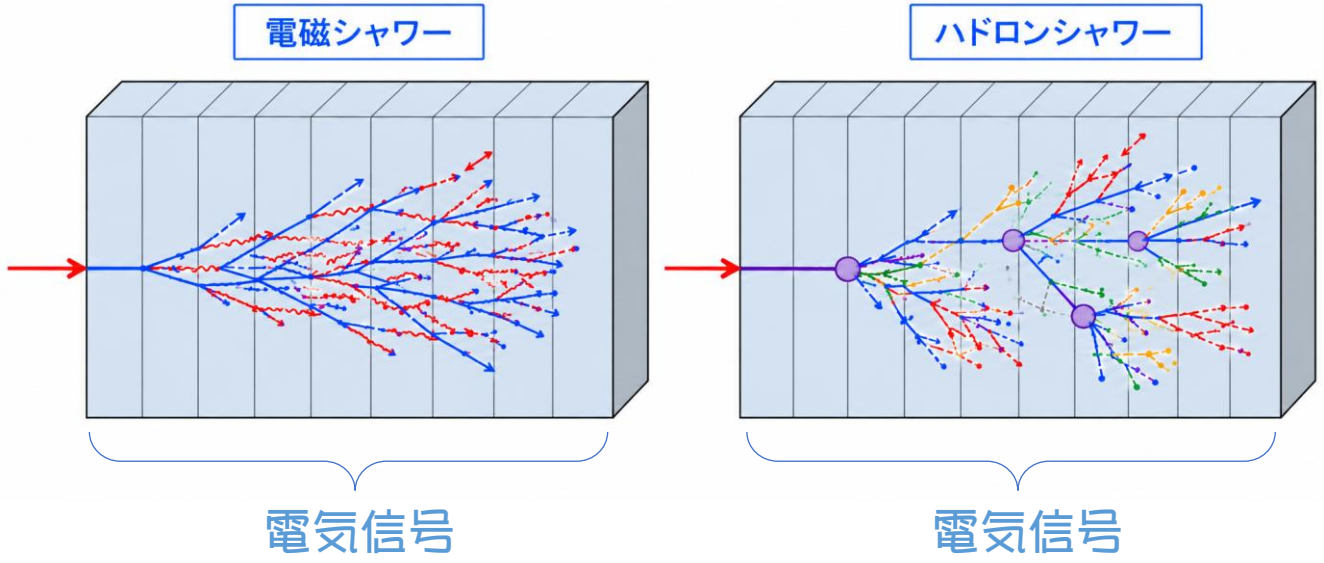
$E_{rec} \sim k \times \sum_i S_i$　　S_i:検出された信号

構造

- 均質型：検出媒体そのものが吸収体
- サンプリング型：吸収体＋検出媒体

正確なエネルギー測定のために

- ✓ 十分な深さ（シャワーを完全に含む）
- ✓ 均一な応答
- ✓ 較正の安定性



電磁シャワー：コンパクト
ハドロンシャワー：電磁成分も含み、広がりが大きく不規則に発達

粒子のエネルギー測定

- ハドロンシャワーでは、電磁成分と非電磁成分が共存。
- 核破砕などによる不可視エネルギーが生じる。

出力信号

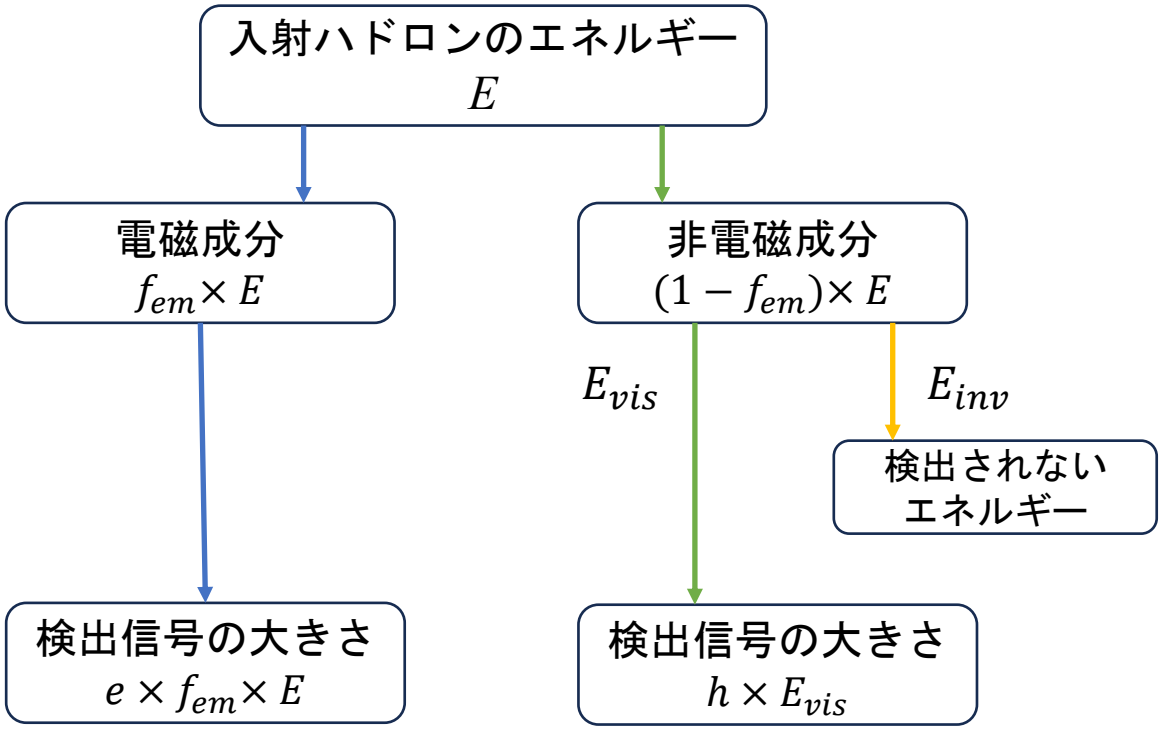
$$S = E[f_{em} + h/e\,(1 - f_{em})]$$

f_{em}：電磁成分のエネルギーの割合

h/e：非電磁成分と電磁成分の応答比

非補償（$e/h \neq 1$）

- f_{em}のイベントごとの揺らぎ → 分解能悪化
- 平均f_{em}のエネルギー依存性 → 非線形応答



粒子の識別

粒子識別には

dE/dx、TOF、クラスターカウンティング、RICH

などが用いられる。

例）*dE/dx*（電離エネルギー損失）

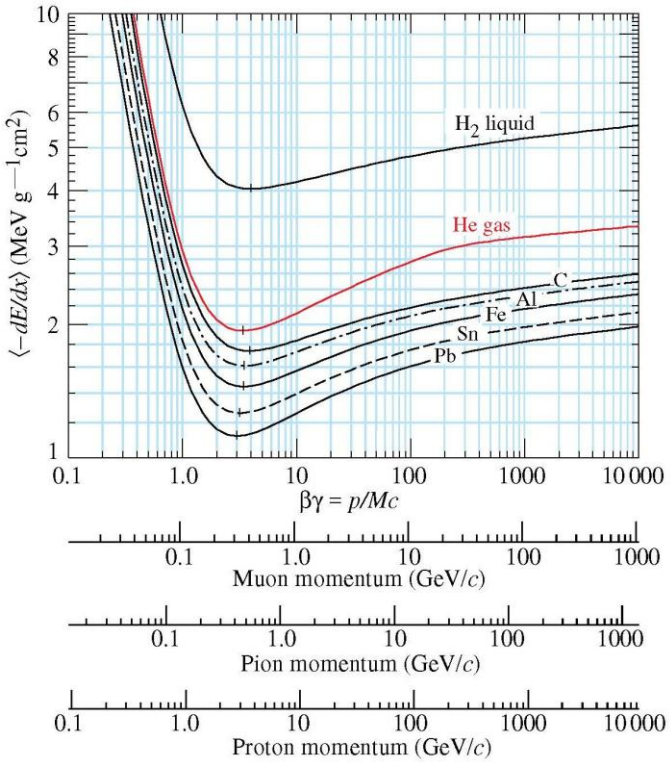
- *dE/dx*は粒子の速度による $-\frac{dE}{dx} = f(\beta\gamma)$
- 同じpでも質量が異なれば*dE/dx*が異なる。 $\beta\gamma = \frac{p}{mc}$

$$\beta = \frac{v}{c}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

運動量 p + *dE/dx*（実際には測定器からの信号電荷量）

⇩

粒子識別($\pi/K/p$識別など)



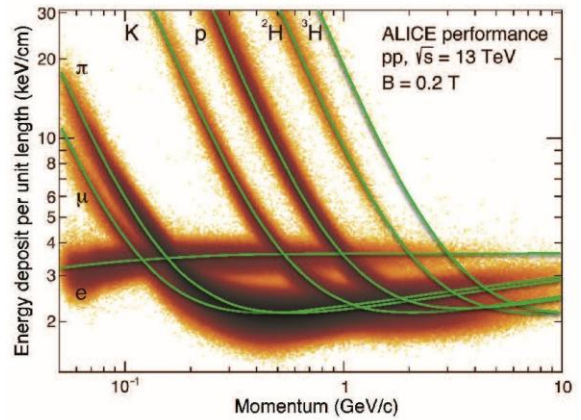


Figure 35.15: Energy deposit versus momentum measured in the ALICE TPC.

粒子の識別

例）RICH（チェレンコフ光による粒子識別）

- 粒子が媒質中の光速を超えるとチェレンコフ光を放出。

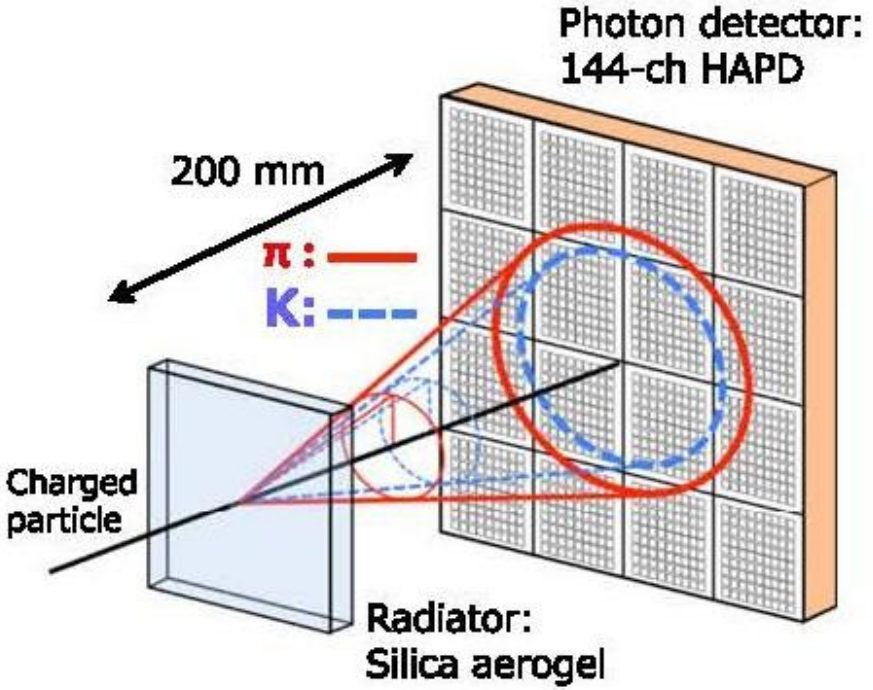
$$cos\theta_c = \frac{1}{n\beta}$$

- チェレンコフ光の放出角θ_cは粒子の速度βに依存。
  同じ運動量でも質量が異なればβが異なり、放出角も異なる。

運動量 p + チェレンコフ角 θ_c

⇩

粒子識別



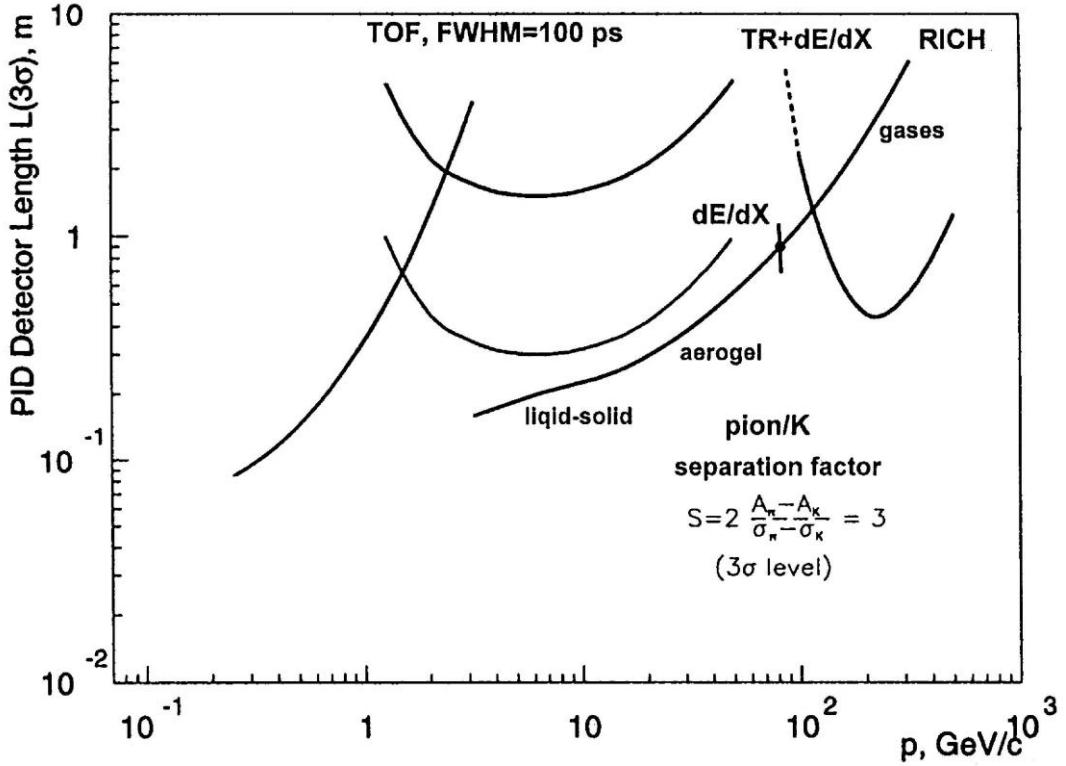
Prog. Theor. Exp. Phys. 2016, 033H01.

粒子の識別

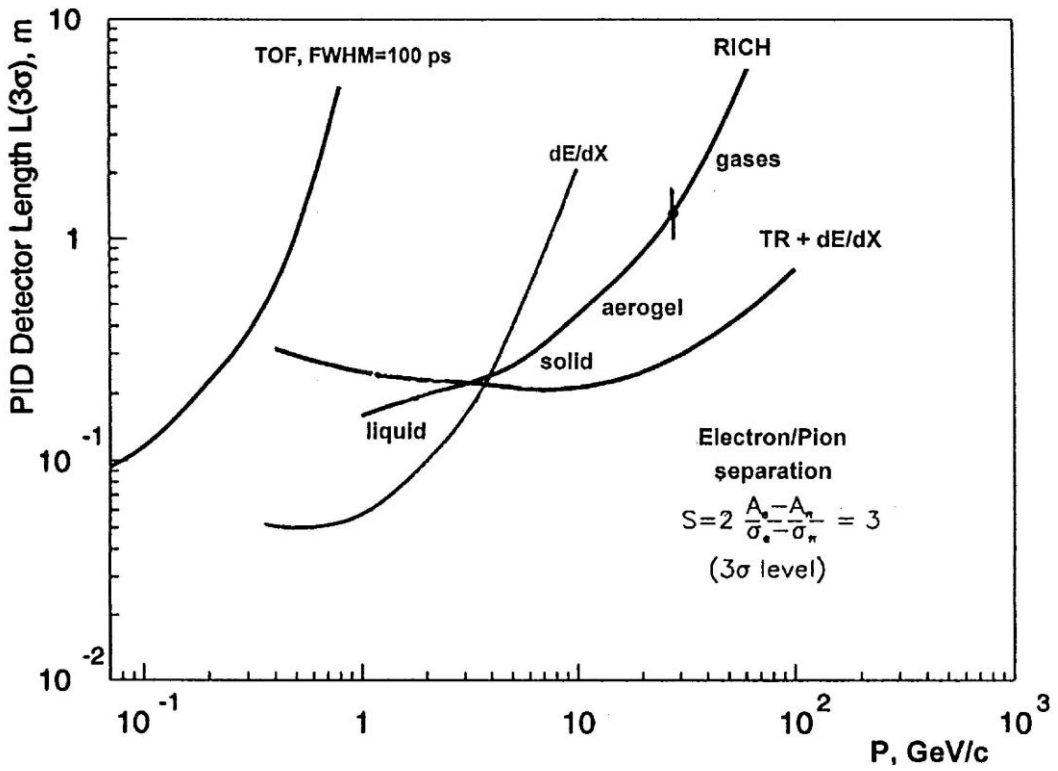
さまざまな測定器における粒子識別性能

- 運動量領域で適した方法がある。
- 測定器設計も考慮した方法の選定が必要。

π/k 識別



e/π 識別

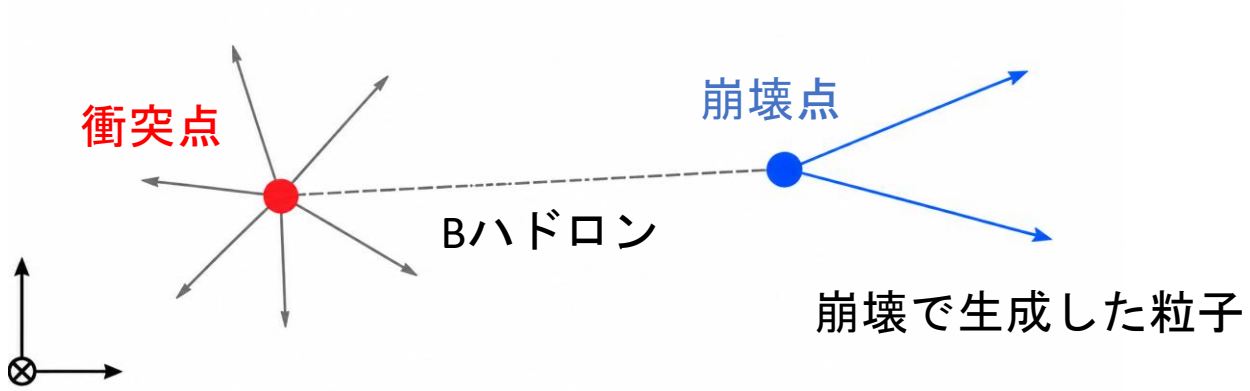


NIM A 433 (1999) 533.

崩壊点の同定

短寿命粒子は、衝突点からわずかに（数100μm～数mm）飛行してから崩壊するため、
その崩壊点（バーテックス）をシリコン検出器などで高精度に同定する。

半導体は微細プロセスが可能



崩壊点までの距離／位置の違い、崩壊粒子の運動量からの組み合わせ

→ 寿命

→ 重いフレーバー (b/c)の識別

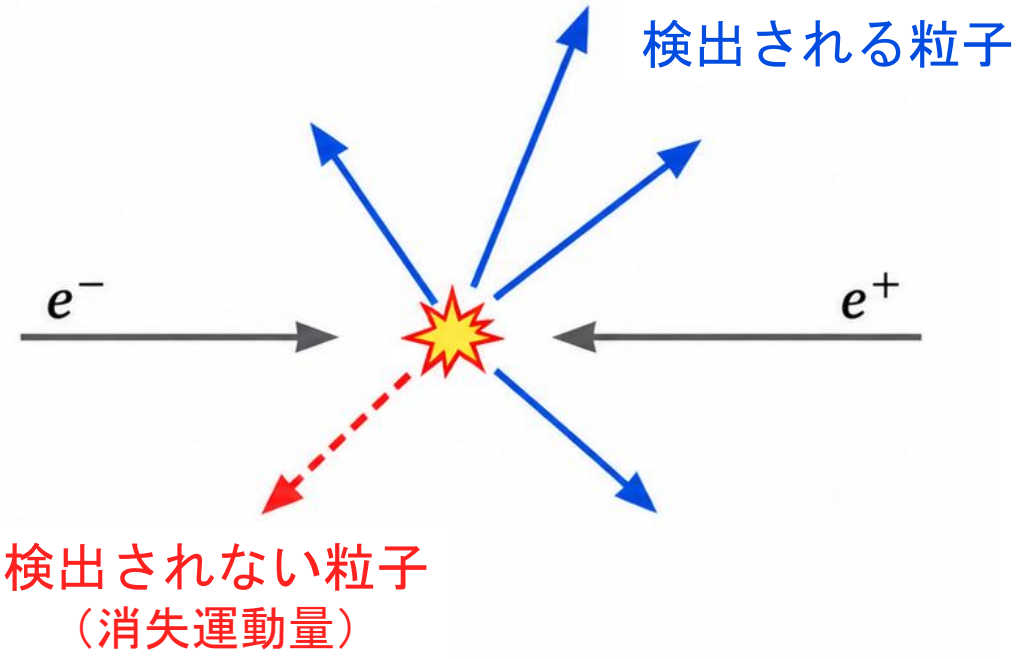
→ 短寿命粒子の崩壊過程の再構成

見えない粒子の探索（消失運動量）

- 電子陽電子衝突では、初期状態の4元運動量が良くわかっている。
- 測定された粒子の４元運動量の和から、未検出の粒子を推定する。

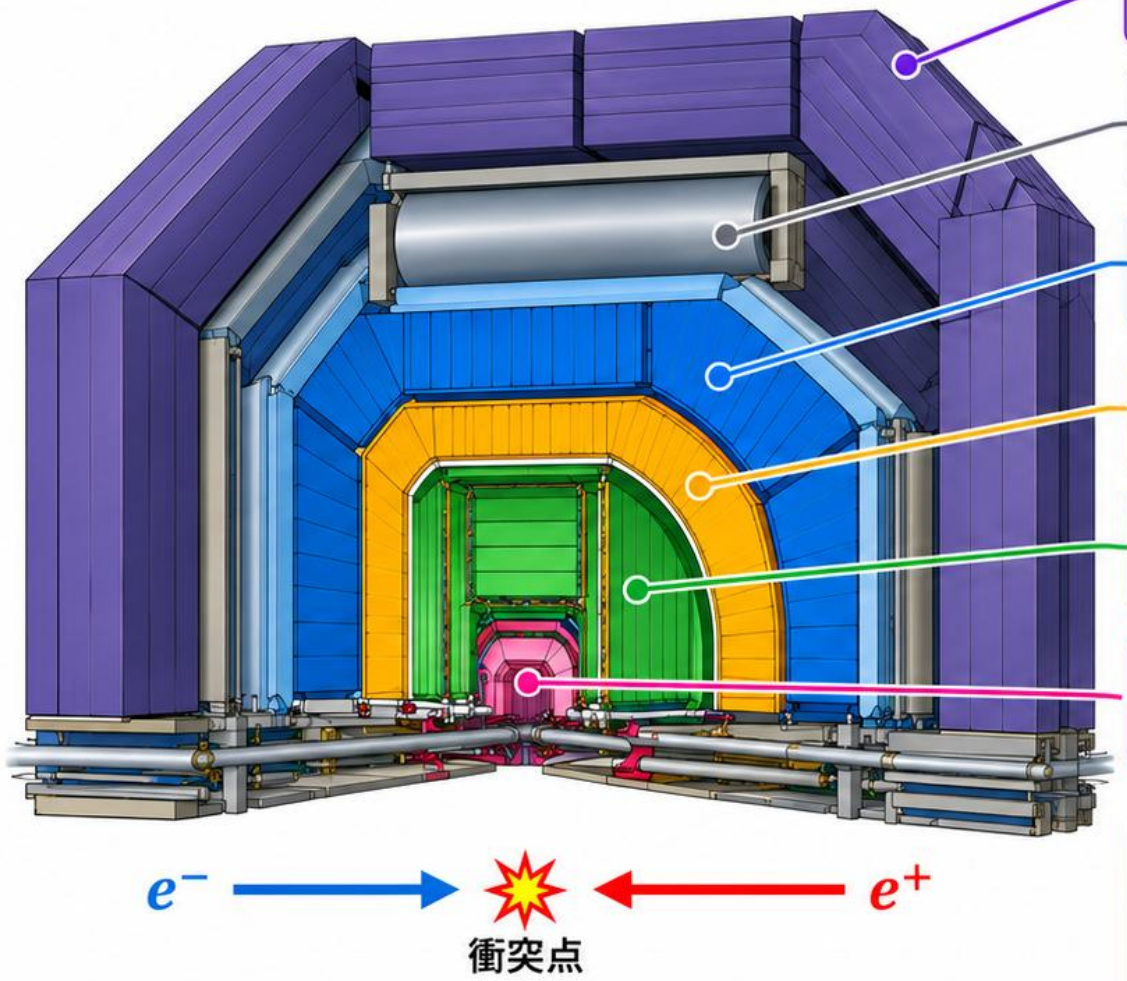
$$p^{\mu}_{miss} = p^{\mu}_{inital} - \sum_{visible} p^{\mu}_{i}$$

物理事象の例
- ニュートリノを含む過程
- ヒッグス粒子のinvisible decay
- 新粒子探索



消失運動量の精密測定には測定器の高いHermeticityが重要

コライダー測定器の構成



AI図

ミューオン検出器
(Muon system)
ミューオンの検出・識別

ソレノイド磁石
(Solenoid)
荷電粒子の運動量測定のための磁場（数 T）を提供

ハドロンカロリメータ
(HCAL)
ハドロンのエネルギー測定

電磁カロリメータ
(ECAL)
電子・光子のエネルギー測定

飛跡検出器
(Tracking system)
荷電粒子の飛跡測定・運動量測定

崩壊点検出器
(Vertex detector)
崩壊点の精密測定（重い粒子の識別など）

中心から外側に向かって
Vertex → Tracker → ECAL → HCAL → Magnet → Muon
という階層構造になっている。

ヒッグスファクトリー測定器

ヒッグスファクトリー

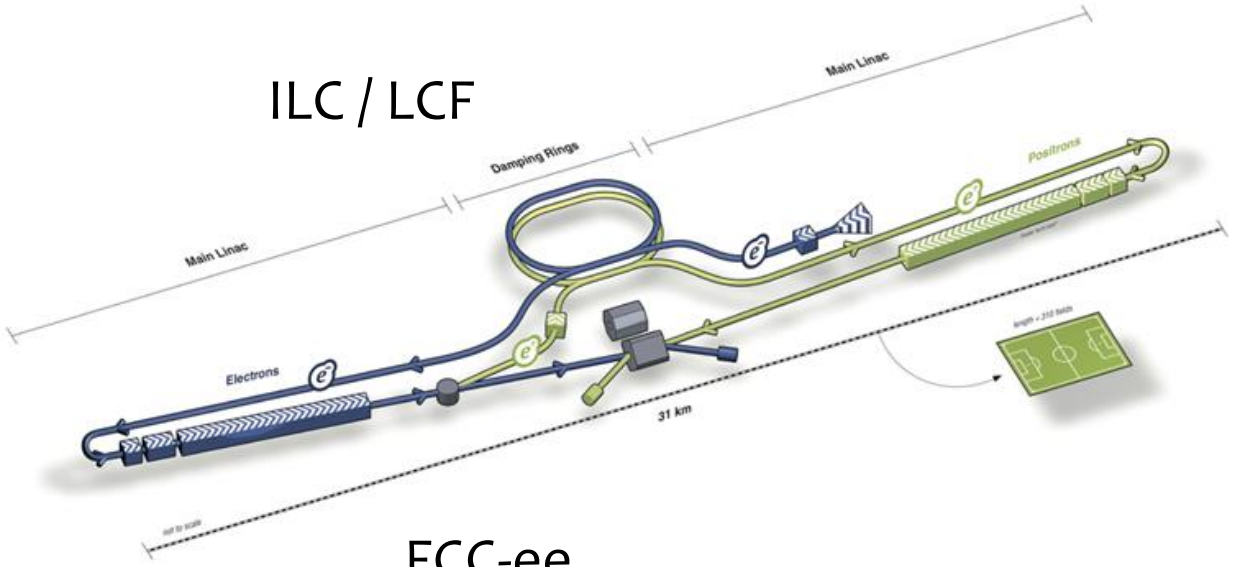
リニアコライダー

- エネルギー拡張性
- 偏極ビーム
- パルスビーム

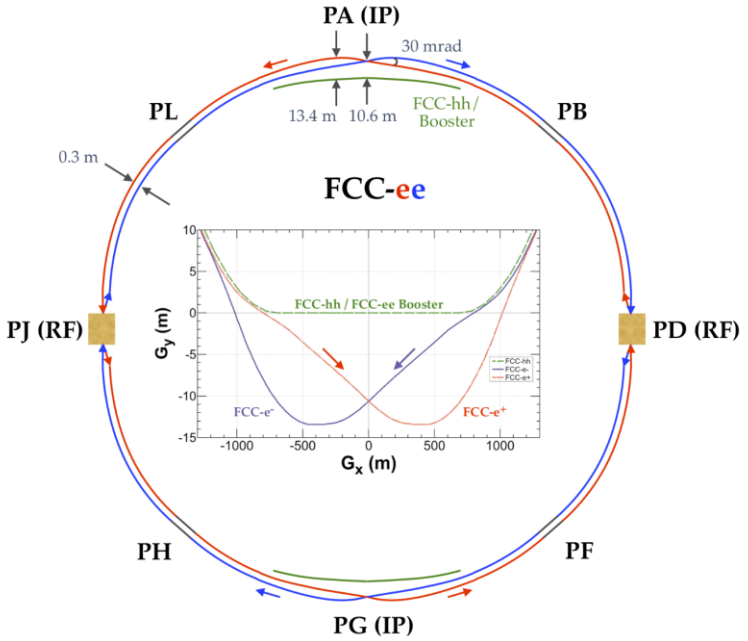
円形コライダー

- 高ルミノシティ
- 複数の衝突点
- 連続ビーム

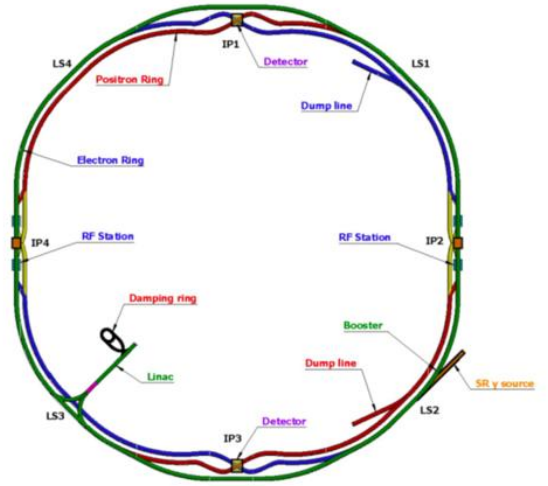
ILC / LCF



FCC-ee



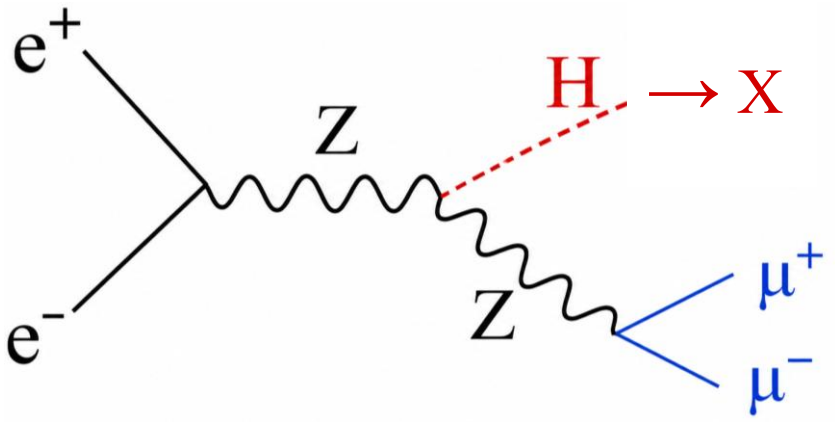
CEPC



ヒッグス粒子の捉え方

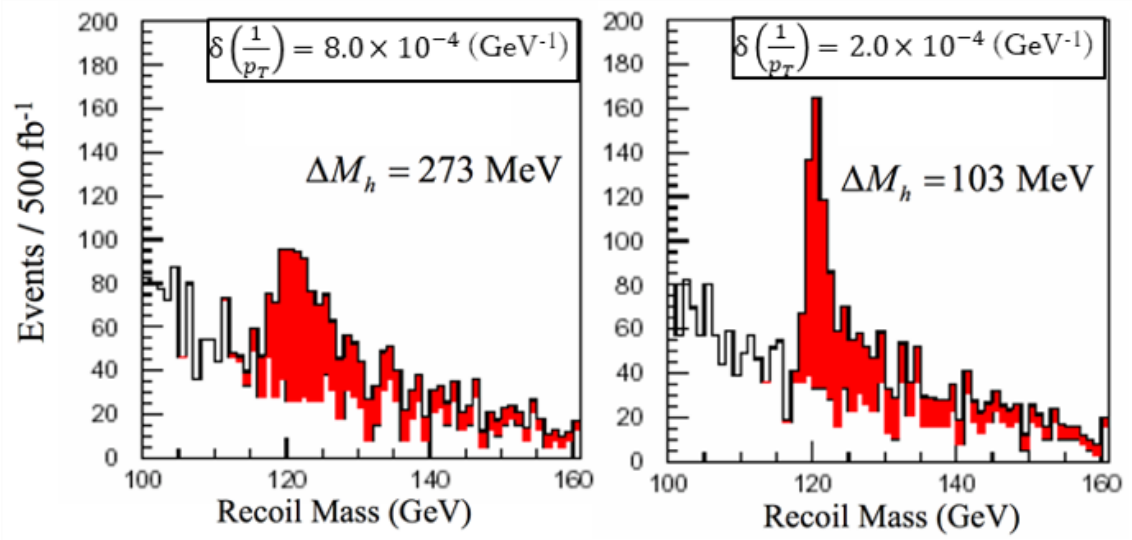
例

衝突時の4元運動量
- 重心系エネルギー
- ビームのエネルギーのひろがり
- エネルギー損失



$$m^2_{recoil} = s + m_Z^2 - 2E_Z\sqrt{s}$$

測定される4元運動量



ヒッグス粒子の崩壊測定

見たい反応	必要な測定	測定器に求められるもの
Recoil Higgs $(e^+e^- \to ZH(Z \to l^+l^-))$	高精度運動量	高精度トラッキング
$H \to bb, cc$	高精度崩壊点同定	高精度崩壊点検出器
Hadoronic W/Z/H decays $(W/Z/H \to q\bar{q})$	高精度ジェットエネルギー	高精度カロリメータ
$H \to ss\ gg$ など	粒子／フレーバー識別	高い粒子識別能力 （dE/dx, TOFなど）
見えない崩壊 $(H \to \text{invisible})$	欠損運動量の測定	高い検出効率 （高カバレッジ、ビームBGの制御）
稀崩壊 $(H \to \gamma\gamma, \mu^+\mu^-, \cdots)$	稀な事象の高感度識別	優れた背景識別能力

ヒッグスファクトリーにおける検出器要求性能

✓ ヒッグス精密測定に必要な基本性能はLCとCCで共通。

✓ 運転条件の違いによって異なる性能要求が加わる。

線形コライダー

パルス状のビーム構造、クリーンな衝突環境
→低い検出器占有率，ドリフト方式の読み出し、
パワーパルシングが可能

⇨高細分化・高精度な測定器設計を実現しやすい

円形コライダー

連続ビーム、ビームBGの影響が大きい
→高速読み出しと時間情報を用いたBG除去が必要

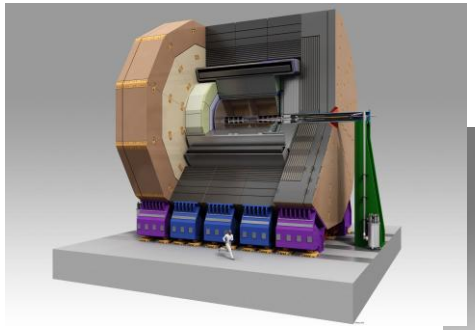
⇨高レート対応性能が必要

運動量分解能	$\sigma(1/p_T) \leq 2\times10^{-5}\ GeV^{-1}$
インパクトパラメータ分解能	$\sigma_{IP} \leq 5 \oplus \frac{10}{p\beta \sin^{3/2}\theta}$
ジェットエネルギー分解能	$3-4\%$ （全体）
粒子識別	$3\sigma\ K/\pi\ (p < 40GeV/c)$ ILD TPC: *dE/dx* resolution < 5 %
前方アクセプタンス	約5 mrad (LC) 約50 mrad (CC)

Z poleでの実験：LCでも検討されているが、FCC-eeではTeraZが主要なプログラムの一つとなっている。

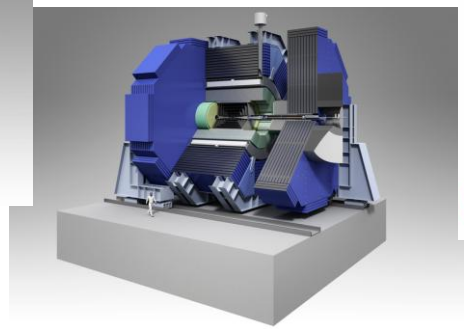
現在検討されている測定器

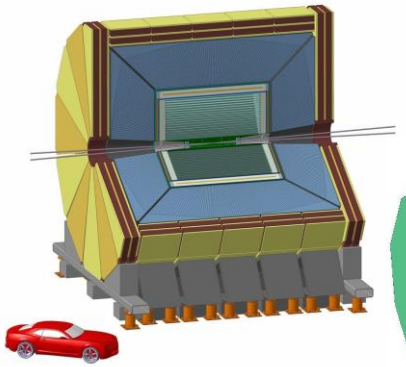
各測定器の基本設計は似ているが、それぞれに特徴がある。新しい技術の導入も進んでいる。



ILD

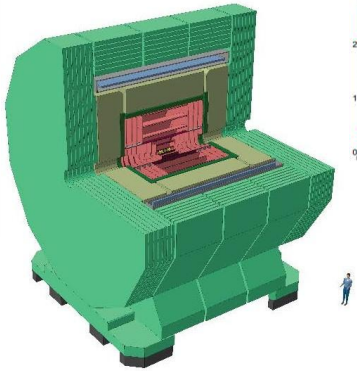
SiD

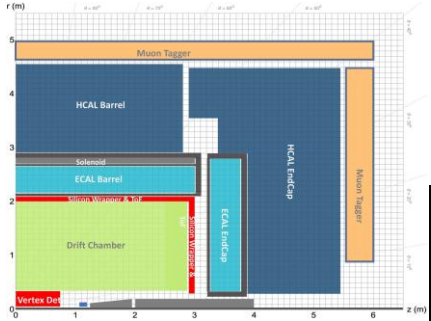




IDEA

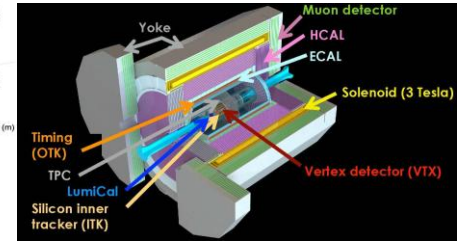
CLD





ALLEGRO

AGORA



他にもALFAなど…

ILD	TPCを主飛跡検出器とし、PFA用カロリメータを備えた測定器
SiD/CLD	シリコン飛跡検出器と、PFAに最適化された高細分化カロリメータを組み合わせたコンパクトな測定器
IDEA	粒子識別(PID)機能を持つドリフトチェンバーとDual-Readoutカロリメータを組み合わせた測定器
ALLEGRO	ドリフトチェンバー、時間情報を取得できるシリコン検出器、希ガスカロリメータを組み合わせた測定器
AGORA	シンチレーションガラスを用いた高精細カロリメータ（詳細検討中）
ALFA	MAPSによる飛跡検出器（もろもろ検討中）

※ PFA：粒子ごとにトラッカーとカロリメータの情報を組み合わせて、ジェットのエネルギーを精度よく測定する方法

主な測定器の概要

	ILD	SiD	IDEA	CLD	ALLEGRO
VXD内径 (mm)	16	14	12	12	12
トラッカー外径 (m)	1.8	1.2	2	3.3	2
トラッカー	TPC/Si	Si	DC/Si	Si	DC/Si
磁場 (T)	3.5	5	2	2	2
カロリメータ（特徴）	高細分化	高細分化	Dual-readout	高細分化	高細分化

FCC-ee/CEPCでは、このほかにAGORA、ALFAなどの新しい検出器コンセプトについても研究開発が進められている。

さまざまな検出器技術

崩壊点検出器

ILDの例

検出原理・構造

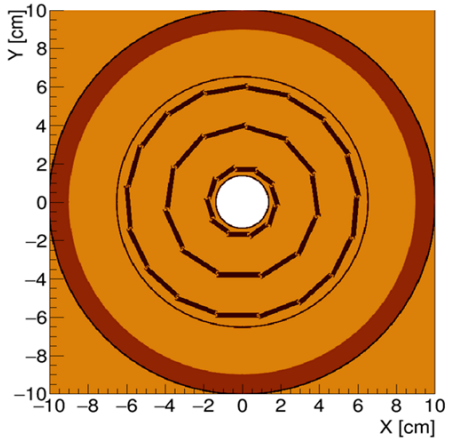
- 微細なシリコンピクセルで荷電粒子の通過位置を測定
- 3組のダブルレイヤー（計6層）
- 最内層半径：約16 mm

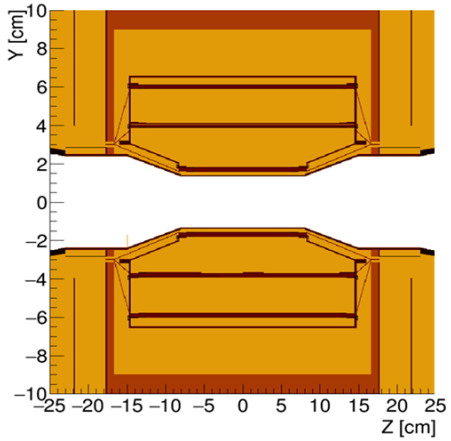
目標性能

- 位置分解能：< 3 μm
- 物質量：< 0.15% X_0/layer
- 放射線耐性：100 krad/年, 10^{11} n_{eq}/年)

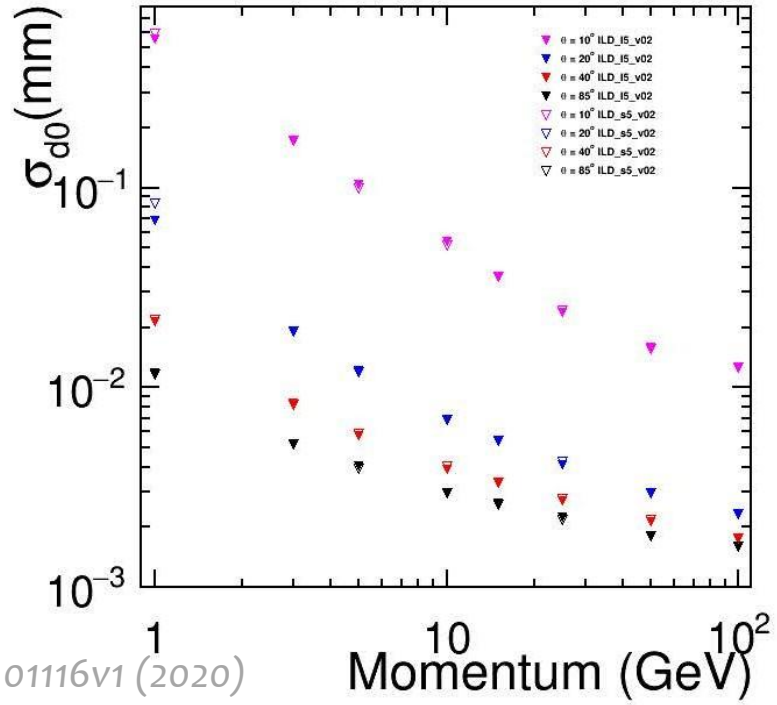
センサー技術の候補

- CMOS：高細分化・高速読み出し
- DEPFET：薄型・低物質量
- FPCCD：極微細ピクセル





IP Resolution インパクトパラメータ分解能



数μmの精度

ILD-IDR. arXiv:2003.01116v1 (2020)

崩壊点検出器 ～新しい技術～

モノリシックシリコンピクセル技術

MAPS (Monolithic Active Pixel Sensor)

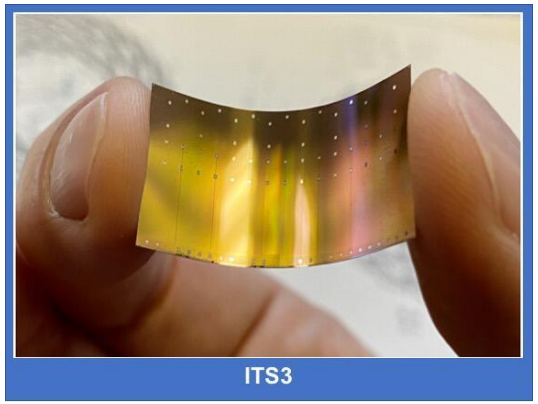
- センサと読み出し回路を同一のシリコン基板上に集積したピクセルセンサ。
- 薄く、細かいピクセルサイズが可能。
- 低消費電力、大面積化に適する。

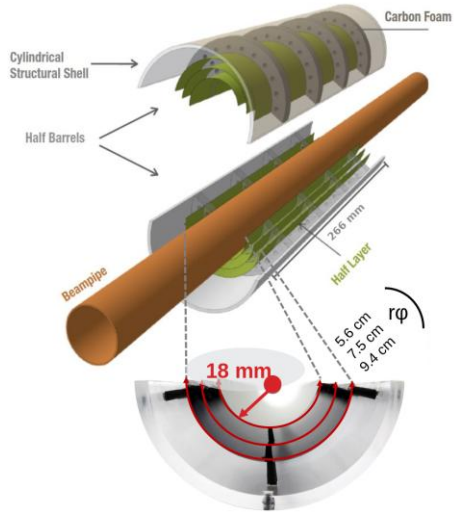
SOI (Silicon-On-Insulator)

- 薄いシリコン層(センサ層)と絶縁層の上に読み出し回路を形成。
- センサー部と回路部を電気的に分離。
- 高速読み出し、低ノイズ読み出しが可能。

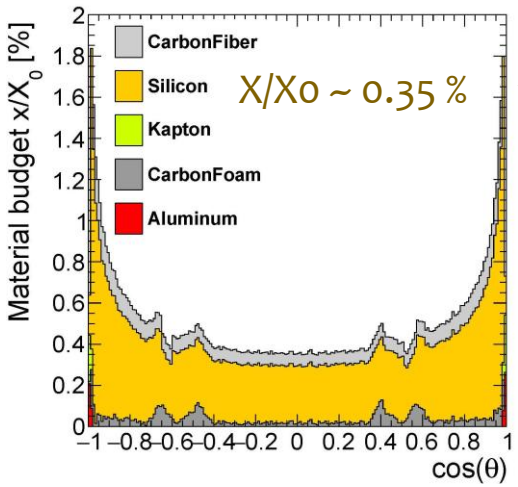
より低物質量、高位置分解能、高放射線耐性の崩壊点検出器実現に向けた研究が進行中。

Curved Si @ ALICE ITS3





- 20~40 μmの超薄型シリコンピクセルセンサを機械的に曲げることで最内層の半径を小さくできる。
- 低物質量の構造が可能。



FCC-ee でcurved MAPSを使用した場合のシミュレーションスタディ

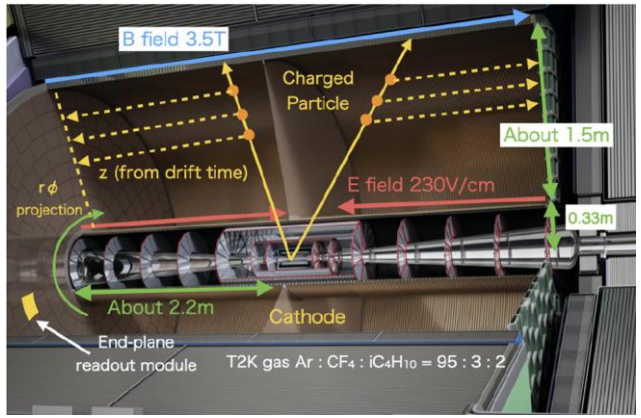
低物質量化で崩壊点測定精度の向上が図られる。

arXiv:2506.02675

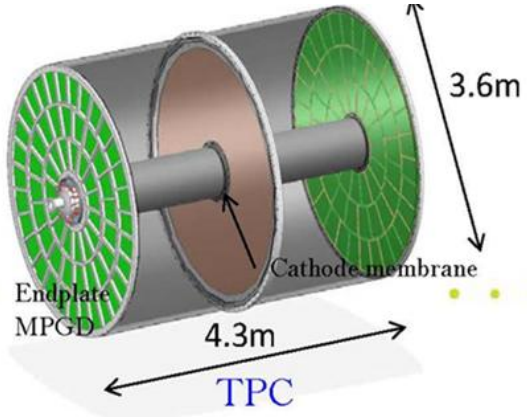
飛跡検出器 ～ガス型検出器～

検出原理・特徴

- 荷電粒子の通過によって発生する電離電子の発生位置情報から飛跡を決定する。
- 大体積の飛跡測定が可能で、物質量が少ない。
- 多数の測定点による飛跡再構成と、電離損失を利用した粒子識別が可能。

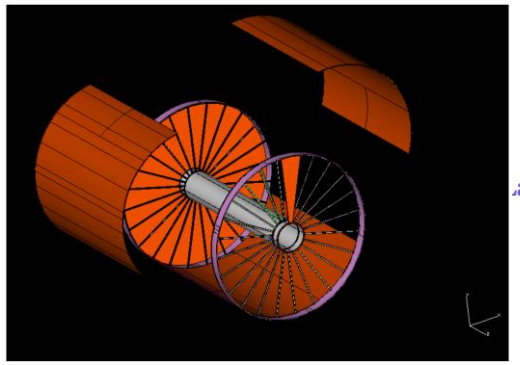


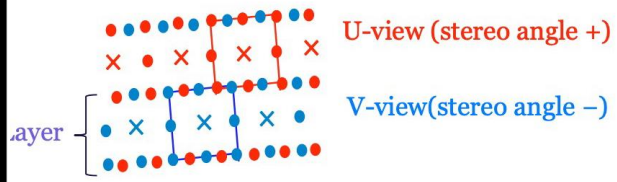
ILD-TPC



- ガス中の電離電子を電場でドリフトさせ、3次元飛跡を再構成。
- GEM、MicromegasなどのMPGDによる読み出し。
- 多数の測定点とdE/dxによる粒子識別。

IDEA Drift Chamber





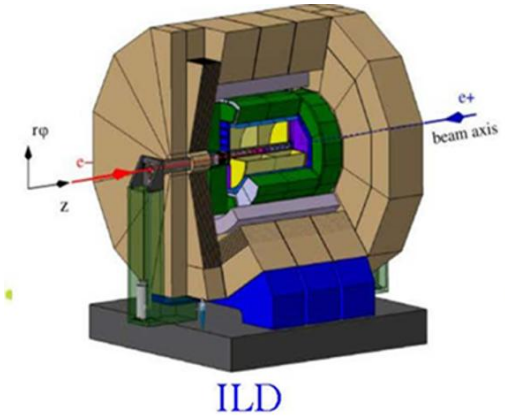
- 多数のワイヤーセルでドリフト時間を測定。
- ステレオワイヤーによる3次元飛跡再構成。
- 軽量な構造と、dE/dx・クラスター計数による粒子識別。

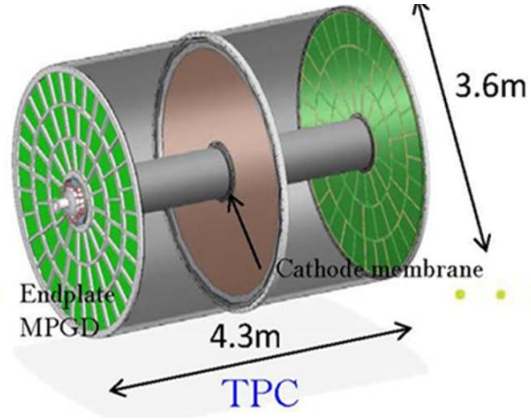
飛跡検出器：ILD-TPC

ガスTPC + MPGD(マイクロパターンガス検出器)

低物質量

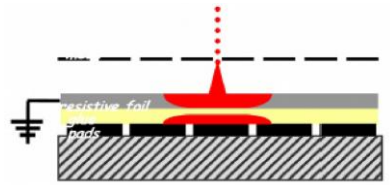
高精細飛跡決定
飛跡に沿って1粒子あたり200点以上のヒット情報を高S/Nで得ることができる。





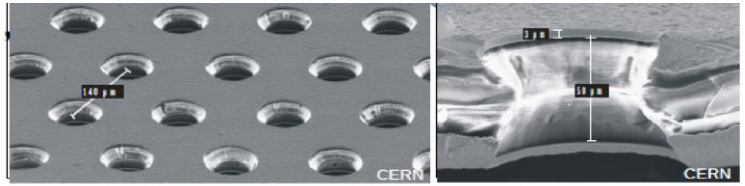
読み出し方法

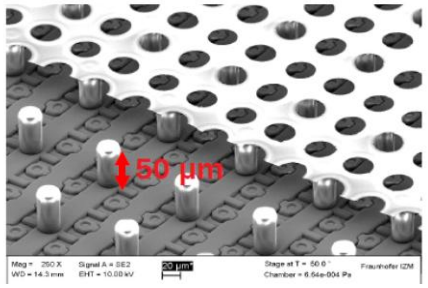
MicroMegas (MM)



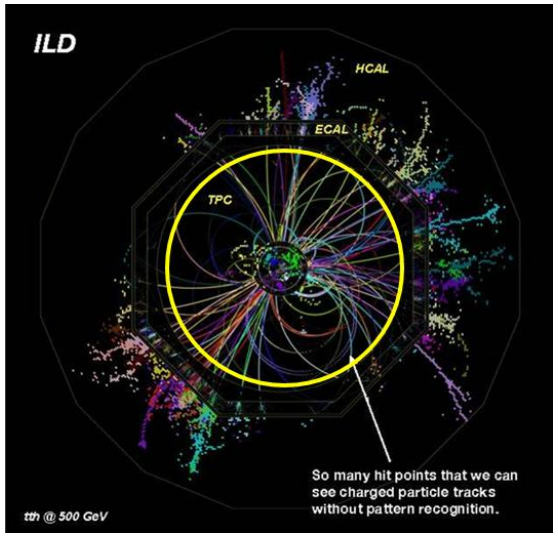
using resistive anode to spread charge

Gas Electron Multiplier (GEM)





パッド読み出し
／ピクセル読み出し

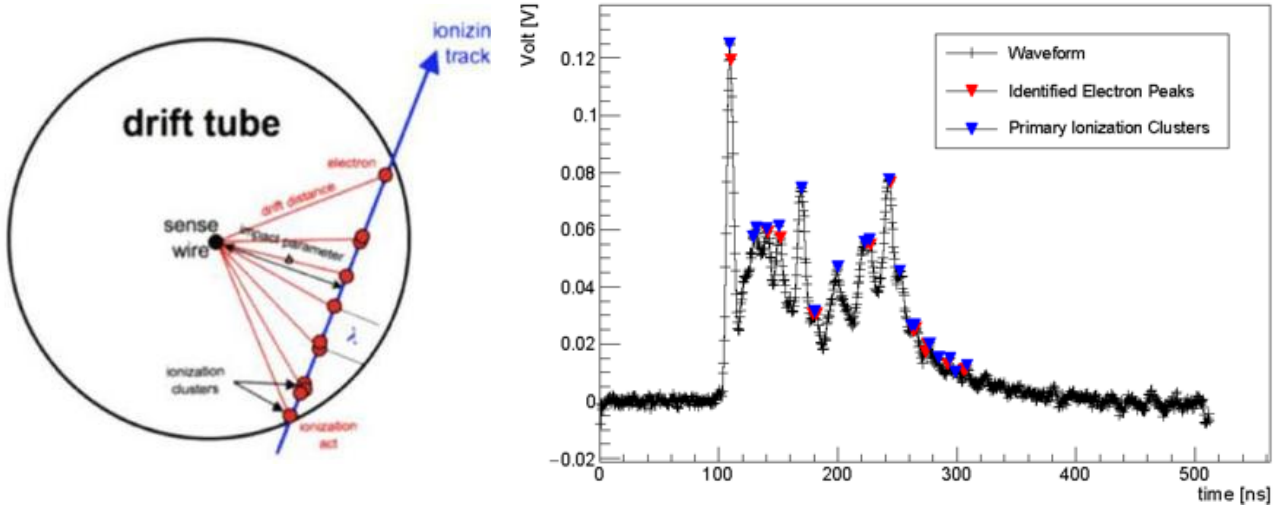


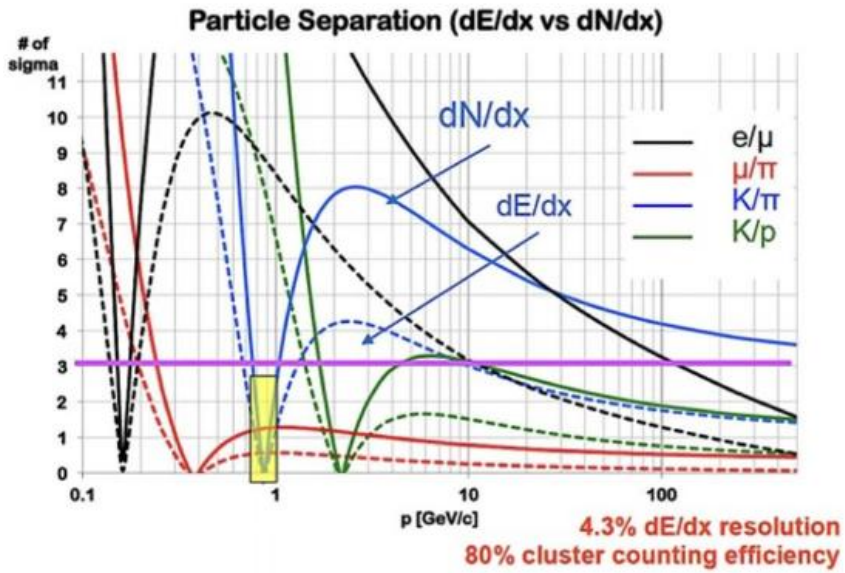
円形加速器での高頻度衝突／高ビームBG条件での一次陽イオン、ガス増幅によって発生する二次陽イオンによるドリフト電場の歪み対策が課題

飛跡検出器：IDEA-Drift Chamber

クラスターカウンティング：ドリフトチェンバー内の一次電離クラスターを数えるPID手法

- ✓ dE/dx：ガス中の電離によるエネルギー損失を測定
- ✓ クラスターカウンティング：個々の一次電離クラスターを識別し、その個数 **dN/dx** を測定
  - → エネルギー損失分布の大きな揺らぎ(Landau tail)の影響を抑え、粒子識別性能を改善





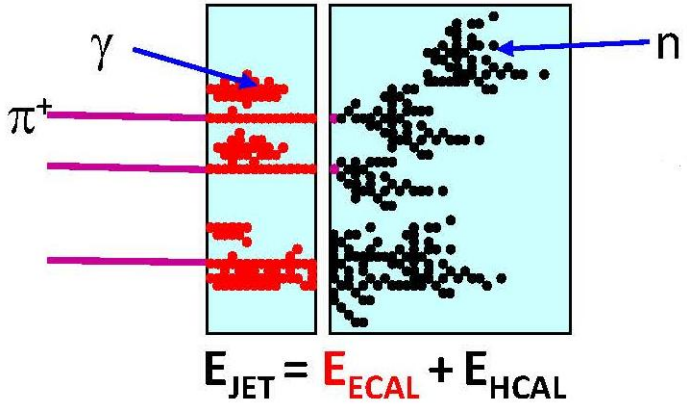
一次電離クラスターを時間的に分離し、信号波形のピークを数えることで、その個数を測定する。

arXiv:2502.21223

カロリメータ

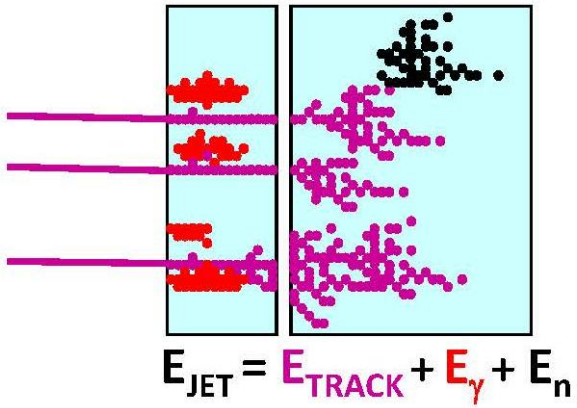
Particle Flow Approach (PFA)

典型的なジェットのエネルギー構成
- 60% : 荷電ハドロン
- 30% : 光子
- 10% : 中性ハドロン



従来のカロリメータによる測定
- ジェットの全エネルギーをECAL・HCALで測定
- 約70%のエネルギーをHCALで測定: $\sigma_E/E \sim 60\%/\sqrt{E(\mathrm{GeV})}$

PFA
- 荷電粒子の運動量は飛跡検出器で高精度に測定
- 光子のエネルギーはECALで測定: $\sigma_E/E < 20\%/\sqrt{E(\mathrm{GeV})}$
- HCALで測定するのは中性ハドロン



それぞれ最も精度よく測れる検出器を使う

PFAでは、荷電粒子と中性粒子のシャワーを正しく分離することが重要。
そのため、ECAL・HCALには高い空間分割能が要求される。

カロリメータ

ILDの例: PFAのための高細分検出器　（吸収体と検出層を交互に配置するサンプリング型カロリメータ）

ECAL

SiW-ECAL:
　シリコンセンサー
　セル：5×5 mm²

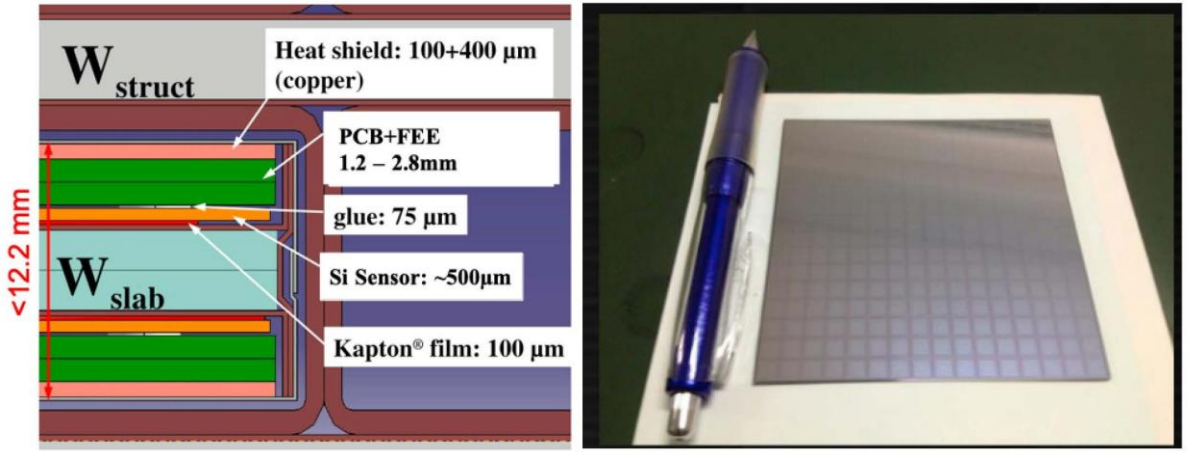
ScW-ECAL
　シンチレータ＋SiPM
　ストリップ：5×45 mm²

HCAL

AHCAL:
　シンチレータ＋SiPM
　タイル：3 x 3~12 x 12 cm²

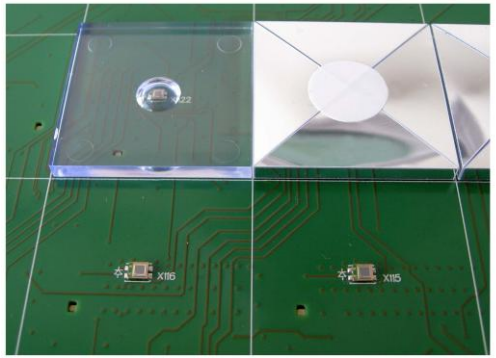
SDHCAL
　ガス検出器(RPC)
　パッド：1 x 1 cm²

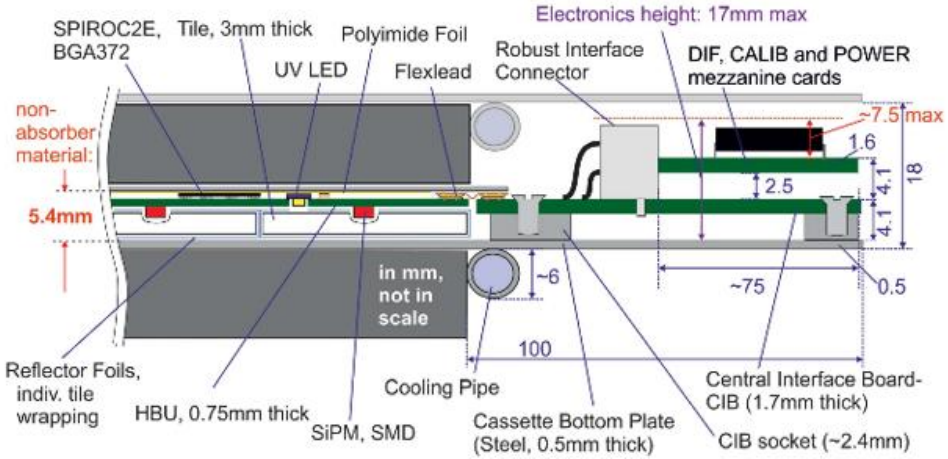
SiW-ECAL



- タングステン吸収体＋シリコンセンサー
- セルサイズ：5 × 5 mm²

AHCAL





- 吸収体＋シンチレータタイル
- セルサイズ：代表例 3 × 3 cm²

Instruments 6 (2022) 75, JINST 18 (2023) P11018

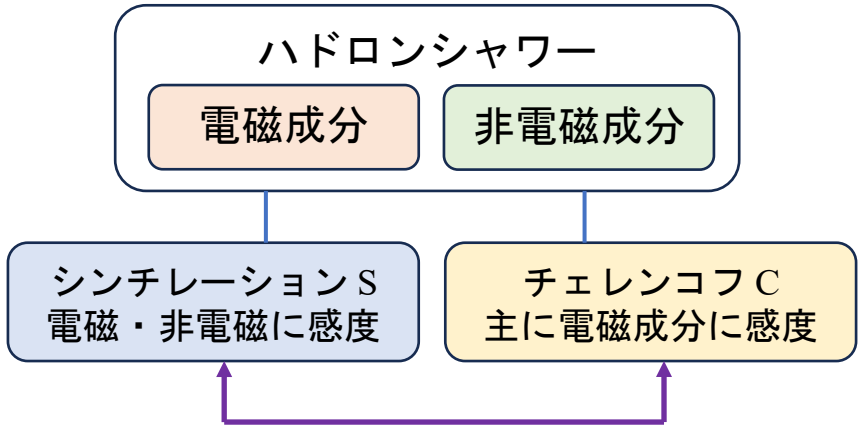
Dual-readoutカロリメータ

電磁成分と非電磁成分に対する応答が異なる2種類の信号を測定し、ハドロンシャワーの電磁成分比による影響を取り除いてエネルギーを再構成する。

ハドロン信号に対して

シンチレーション　$S = E\left[f_{em} + \frac{1}{(e/h)_S}(1 - f_{em})\right]$

チェレンコフ　$C = E\left[f_{em} + \frac{1}{(e/h)_C}(1 - f_{em})\right]$



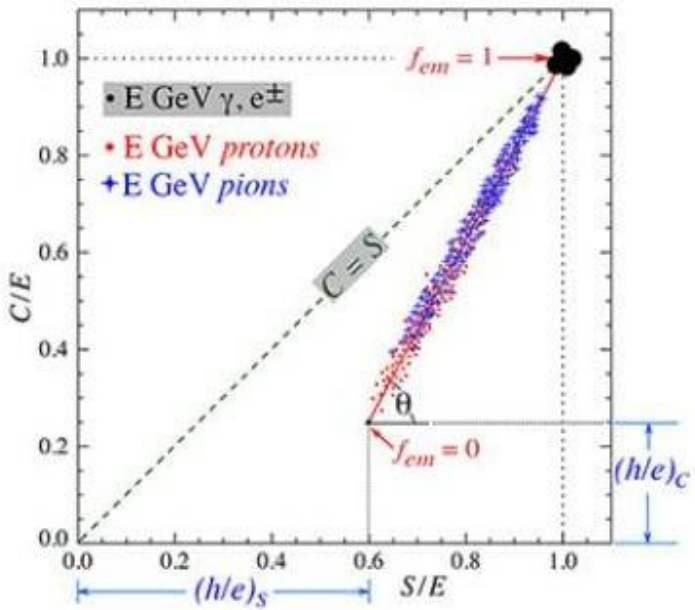
SとCから入射ハドロンのエネルギーを再構成

S,Cは電磁シャワーで較正　$\frac{\langle S \rangle}{E} = \frac{\langle C \rangle}{E} = 1$

f_{em}：電磁成分のエネルギーの割合

e/h：非電磁成分と電磁成分の応答比

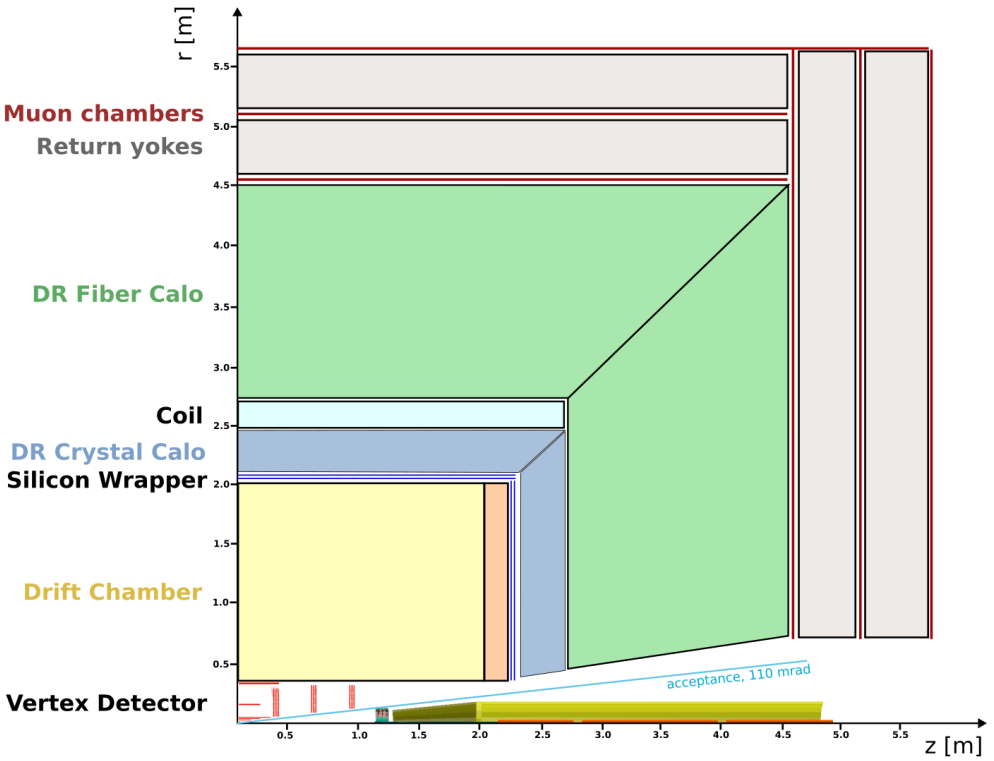
$$E = \frac{S - \chi C}{1 - \chi} \qquad \chi = \frac{1 - (h/e)_S}{1 - (h/e)_C}$$

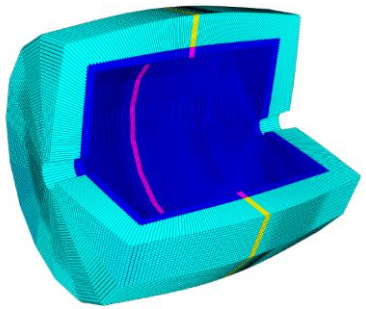


arXiv:1712.05494

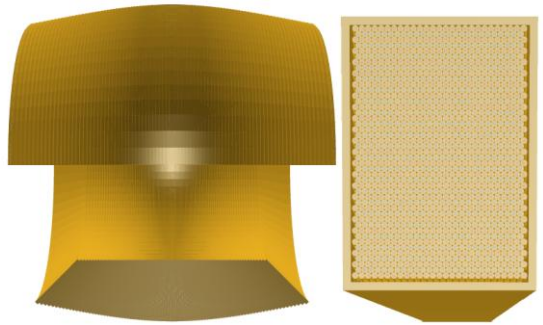
Dual-readoutカロリメータ：IDEAでの検討例

FCC-eeの検出器コンセプトIDEAでは、Dual-readoutを用いたハドロンカロリメータが検討されている。

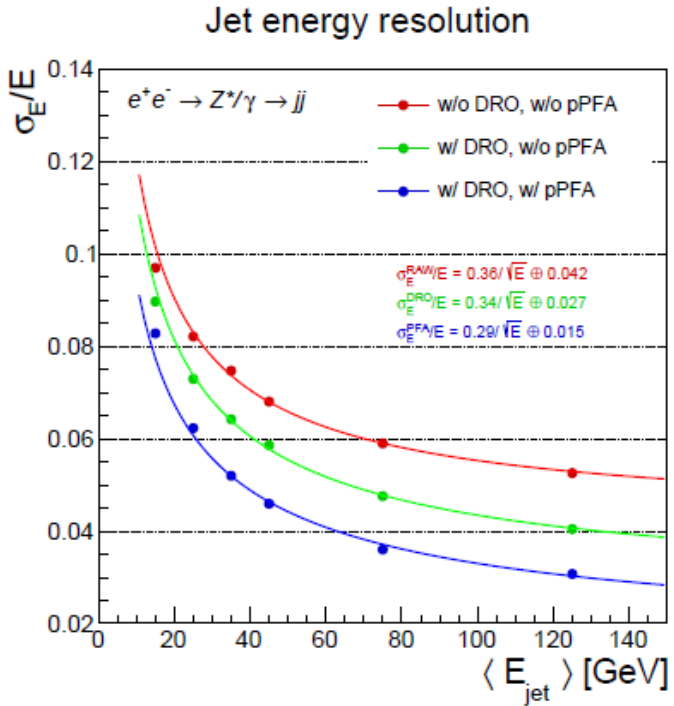




Crystal calorimeter



Fiber calorimeter



Dual-readoutとPFAの併用により、ジェットのエネルギー分解能が改善

arXiv:2502.21223

新しい半導体技術

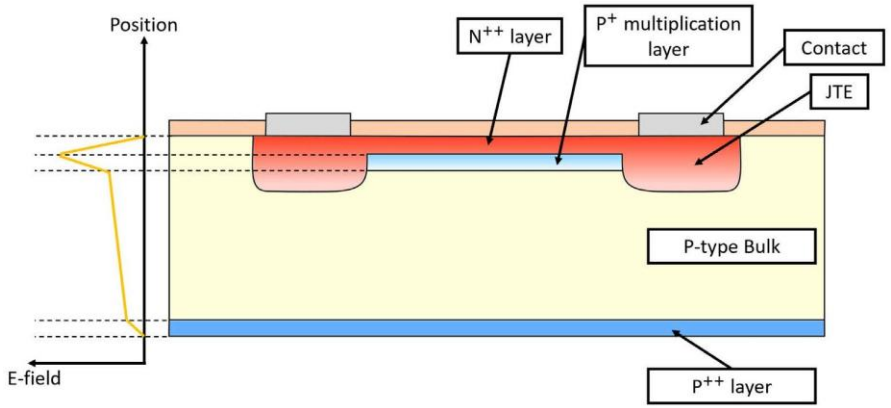
Low Gain Avalanche Detector (LGAD)： 高速・高精度の時間測定を可能にするシリコンセンサ

原理・構造

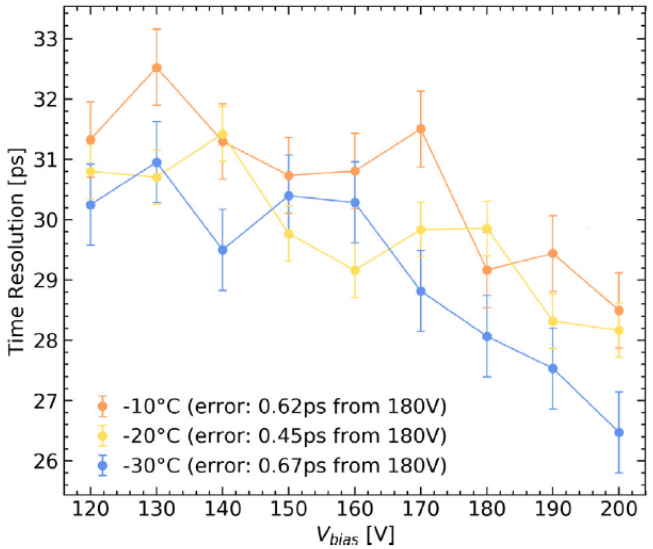
- シリコン内部に高電場の増幅層を形成
- アバランシェ増幅によって信号を増幅（利得: 約10~30)
- 大きく速い信号により、数10 psの時間分解能を実現

４次元測定：位置＋時間

- 異なる衝突・背景信号の時間的分離
- 飛行時間による粒子識別
- カロリメータのシャワー時間構造の測定



β線(^{90}Sr)に対する時間応答測定



利得：5-10
時間分解能：~30 ps

NIM, A 1080 (2025) 170775

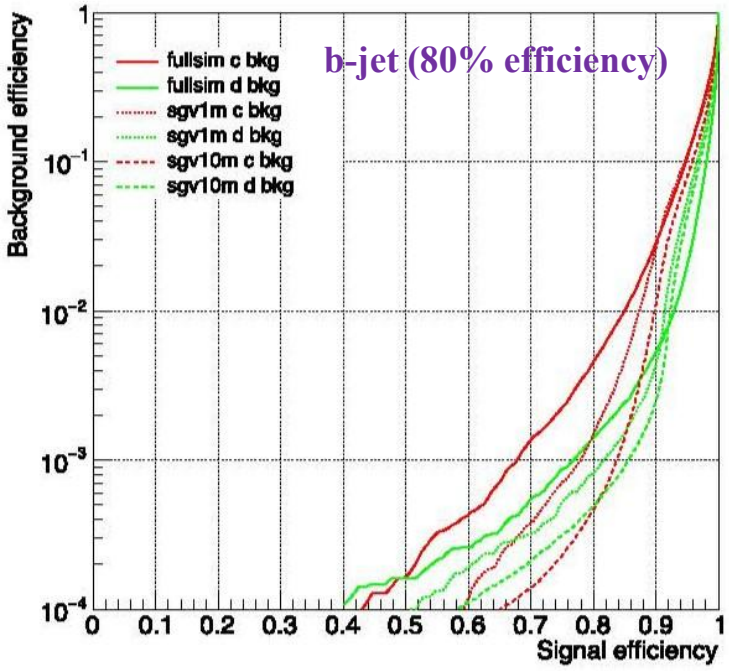
測定器開発とデータ再構成におけるML/AIの活用

機械学習(ML)・AIは、事象再構成、粒子識別、検出器シミュレーション、検出器の最適化などで重要な役割を果たしている。

モデル	応用例
Transformer	フレーバー識別 カロリメータのクラスタリング
Graph Neural Network (GNN)	飛跡再構成・バーテックス検出
Diffusion Model	検出器シミュレーション
Autoencoder / Denoising AE	ノイズ除去、異常検知 データ圧縮
Reinforcement Learning (RL)	検出器配置や形状の最適化 トリガー・読み出し条件の最適化

課題：
- 結果の信頼性・現実性の担保
- シミュレーションへの依存を減らし、より実データへの適合性を向上させる

Particle Transformerによるフレーバー識別性能



同じ信号効率で背景効率が低いほど識別性能が高い

Eur. Phys. J. Plus (2026) 141:567

量子・低温センサ技術応用

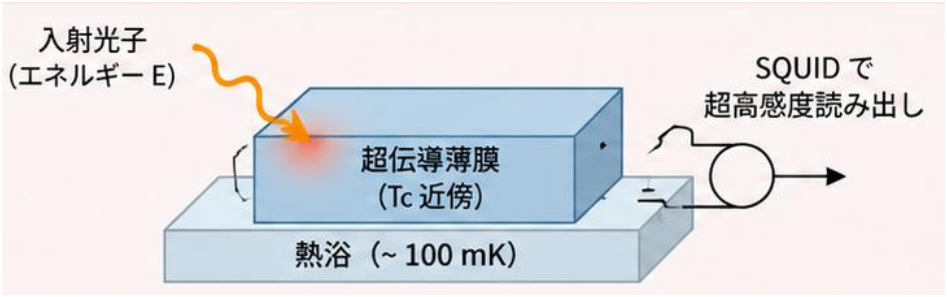
- 超伝導・極低温センサー技術は粒子測定器への応用も期待されている。
- 微小エネルギーの検出、単一光子検出、高精度時間測定など、新しい測定能力をもたらす。

Transition-Edge-Sensor (TES)

原理：超伝導転移温度近傍での吸収エネルギーによる抵抗変化

特長：極めて高いエネルギー分解能

応用：光子の高分解能エネルギー測定

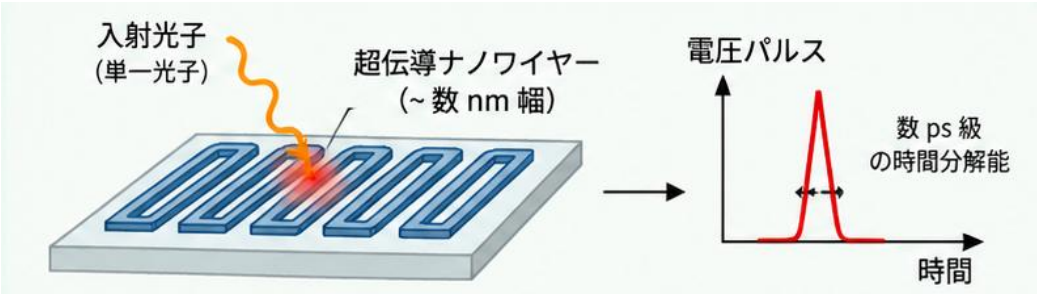


Superconducting Nanowire Single Photon Detector (SNSPD)

原理：光子吸収により局所的に超伝導状態が破れ、一時的な抵抗(ホットスポット)が生じる

特長：高い量子効率、優れた時間分解能 (~数ps)

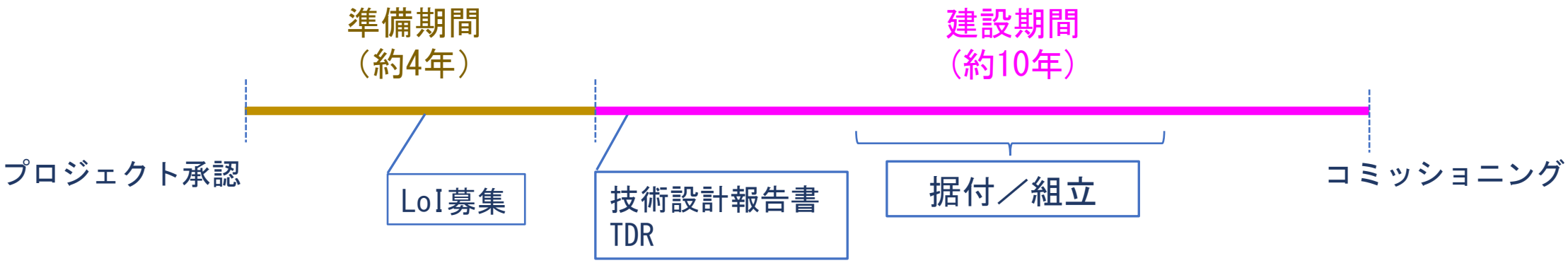
応用：高精度時間測定、単一光子検出



低温読み出しエレクトロニクス（Cryo-CMOS, SiGeなど）

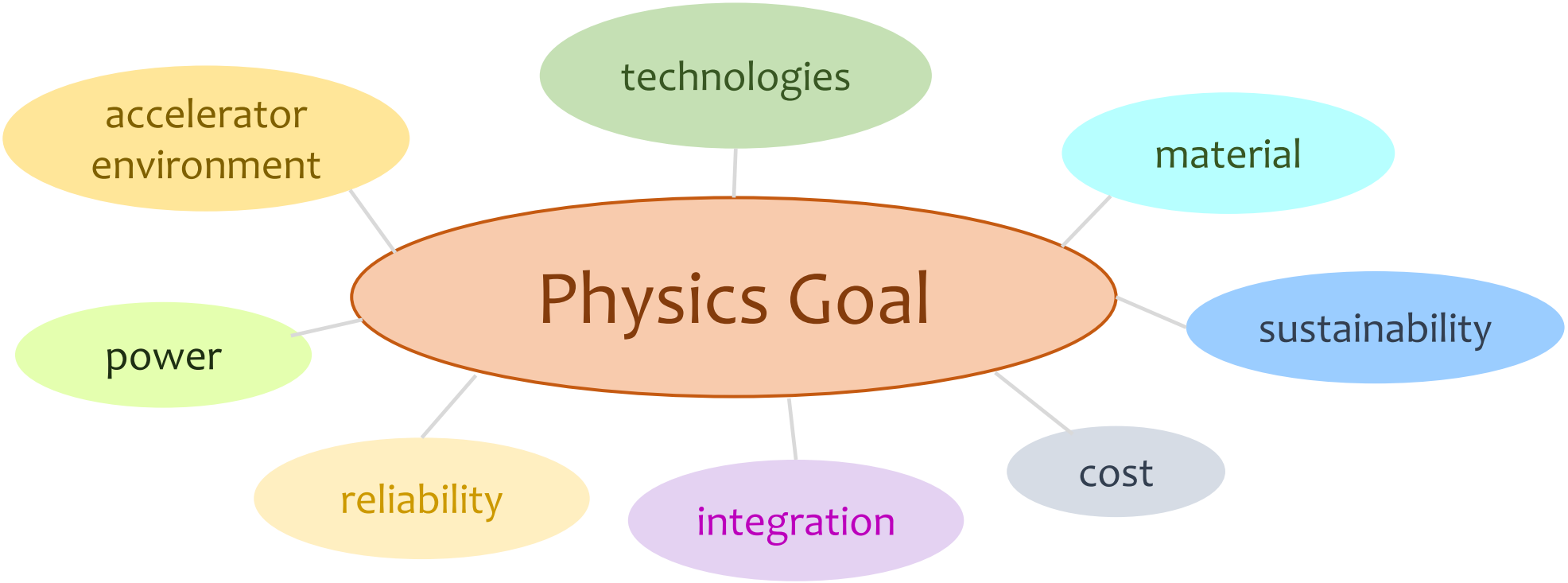
- 極低温で動作する低雑音・高集積の読み出し回路の開発が進んでいる。

実験開始までの想定タイムライン



- 測定器技術の選択はプロジェクト承認後も数年間は継続して検討される。
- 新しい技術の進展や他分野から生まれる技術革新を継続的に取り入れることが重要。
- 成熟した技術や概念も新しいアイデアとの融合によって大きく進化する可能性がある。

一番良い測定器は？



- 測定器設計はさまざまな要求の最適化問題。
- 新技術を取り入れつつ、物理目標に対する要求を検討・検証し続けることが重要。

まとめ

- ヒッグスファクトリーにおける物理成果を最大化するために、様々な技術を組み合わせた測定器の開発が進められている。

- 技術の進展に対応した測定器の高性能化が常に検討されている。
  - 半導体微細加工技術、ガス検出器、ML/AI、量子・極低温技術など
  - 高精度位置測定、低消費電力読み出し、大体積飛跡検出、4D再構成、ps級時間測定など

- 分野・計画を横断した連携が重要
  - ECFA-DRDなどの国際的な研究開発体制
  - ILC/LCF、FCC-ee、CEPCなどの計画間の協力
  - ITDCプラットフォームの活用