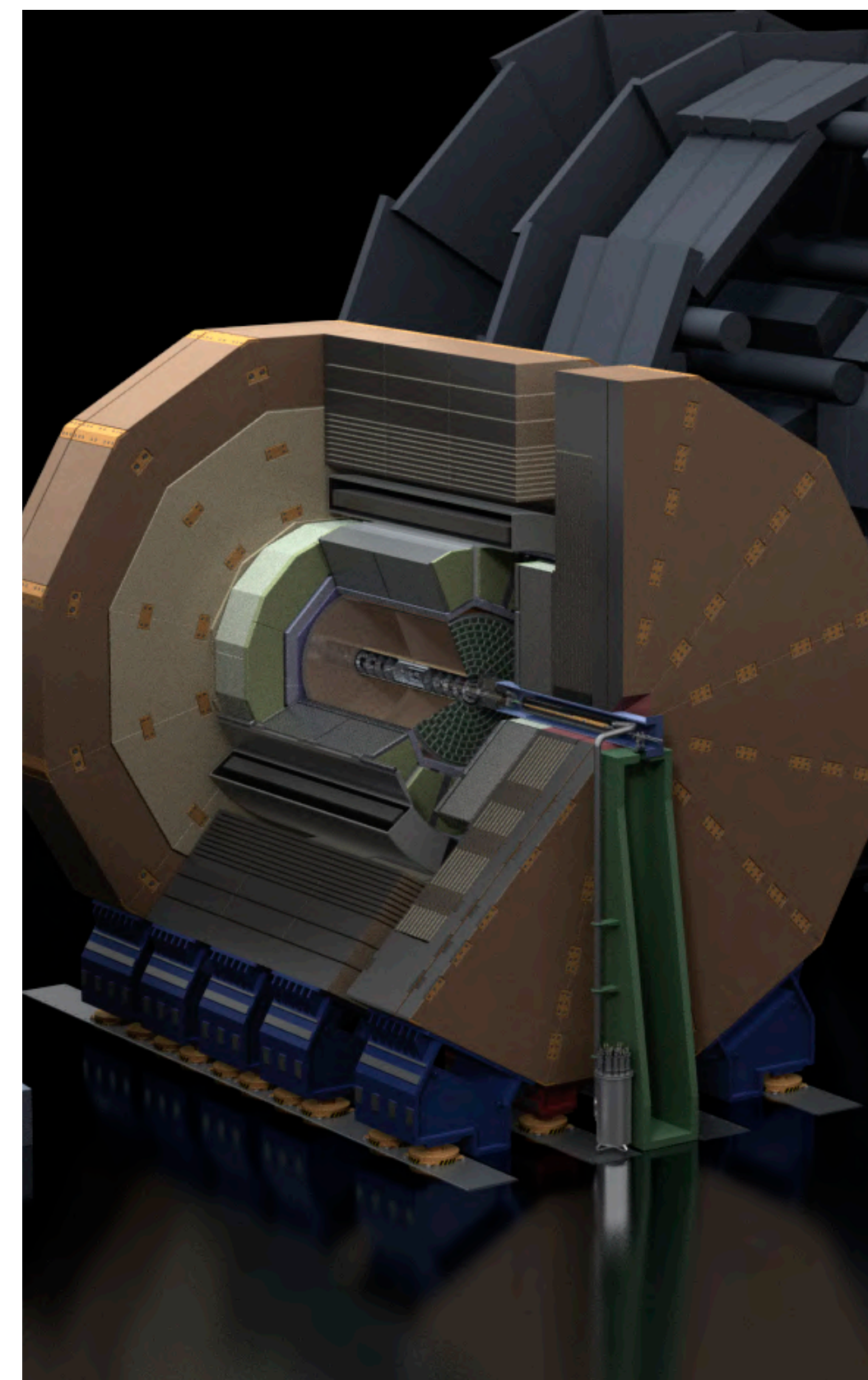
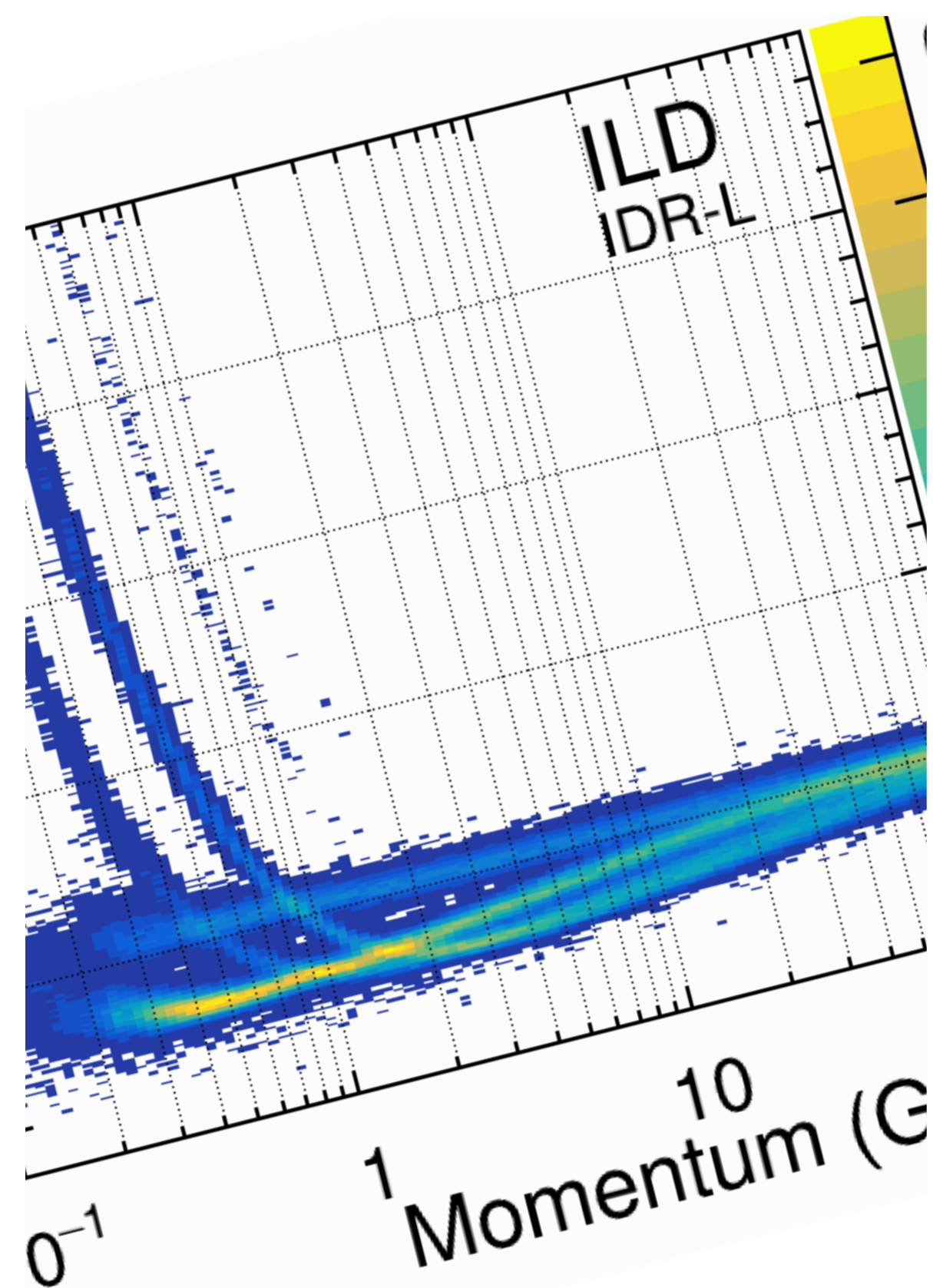


ヒッグスファクトリーの測定器

大谷航 東京大学素粒子物理国際研究センター

2025年1月28日 京都大学



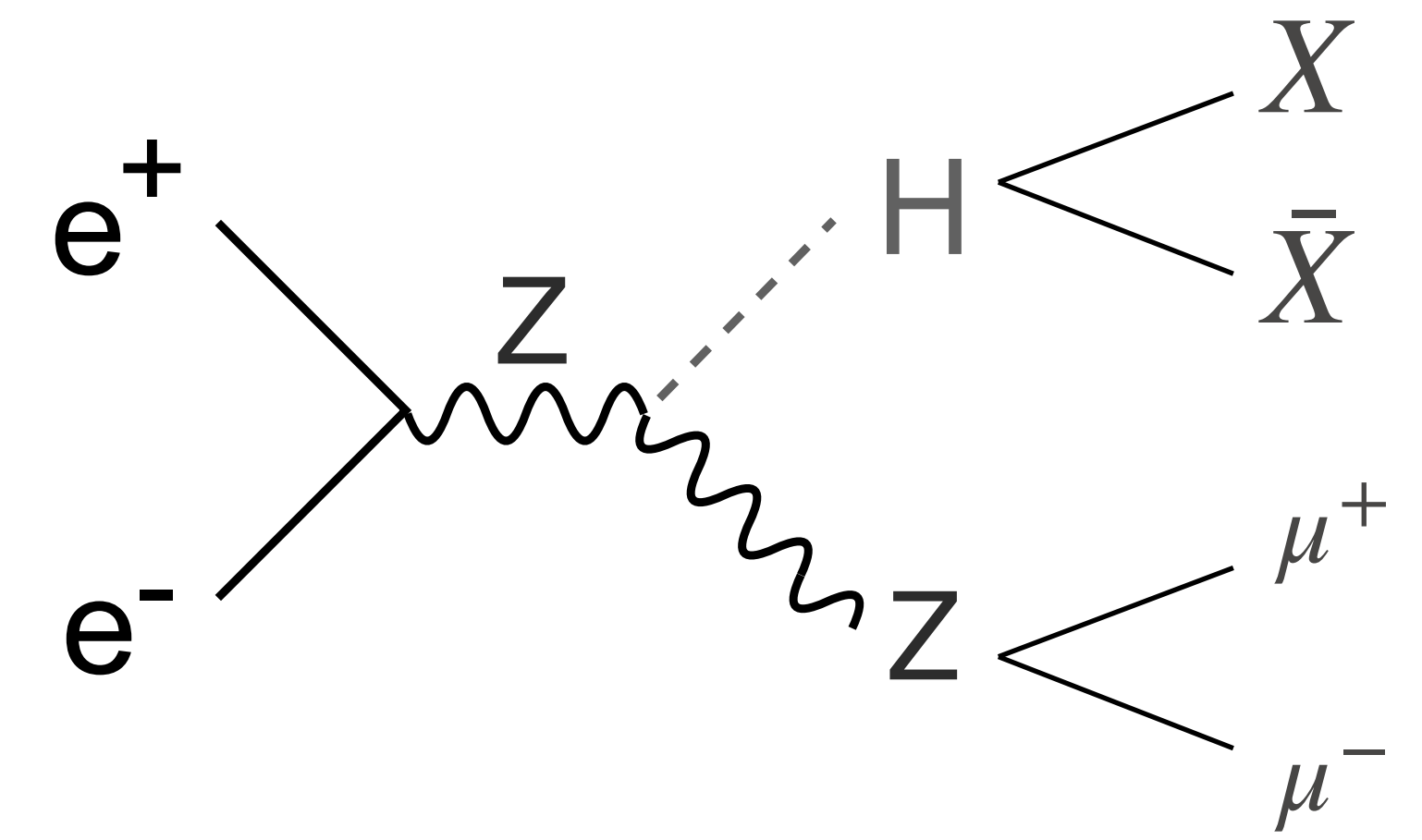
測定器の役割

測定器で出来ること

- 見たい現象そのものを直接観測することはできない
- 生成された安定な粒子のみ検出することができる
- 生成された粒子の特性を出来るだけ正確に測定し、起こった現象を再構成する

測定する粒子の特性

- **エネルギー**：物質中でのエネルギー付与, 物質中での飛程 (カロリメータ)
- **運動量、電荷**：磁場中での飛跡の曲率 (飛跡検出器)
- **質量**：測定したエネルギーと運動量から
- **速度**：飛行時間
- **スピン**：崩壊角度分布
- **粒子種**
- **寿命**
- **消失したエネルギー・運動量**



代表的なヒッグス粒子生成過程
@ヒッグスファクトリー

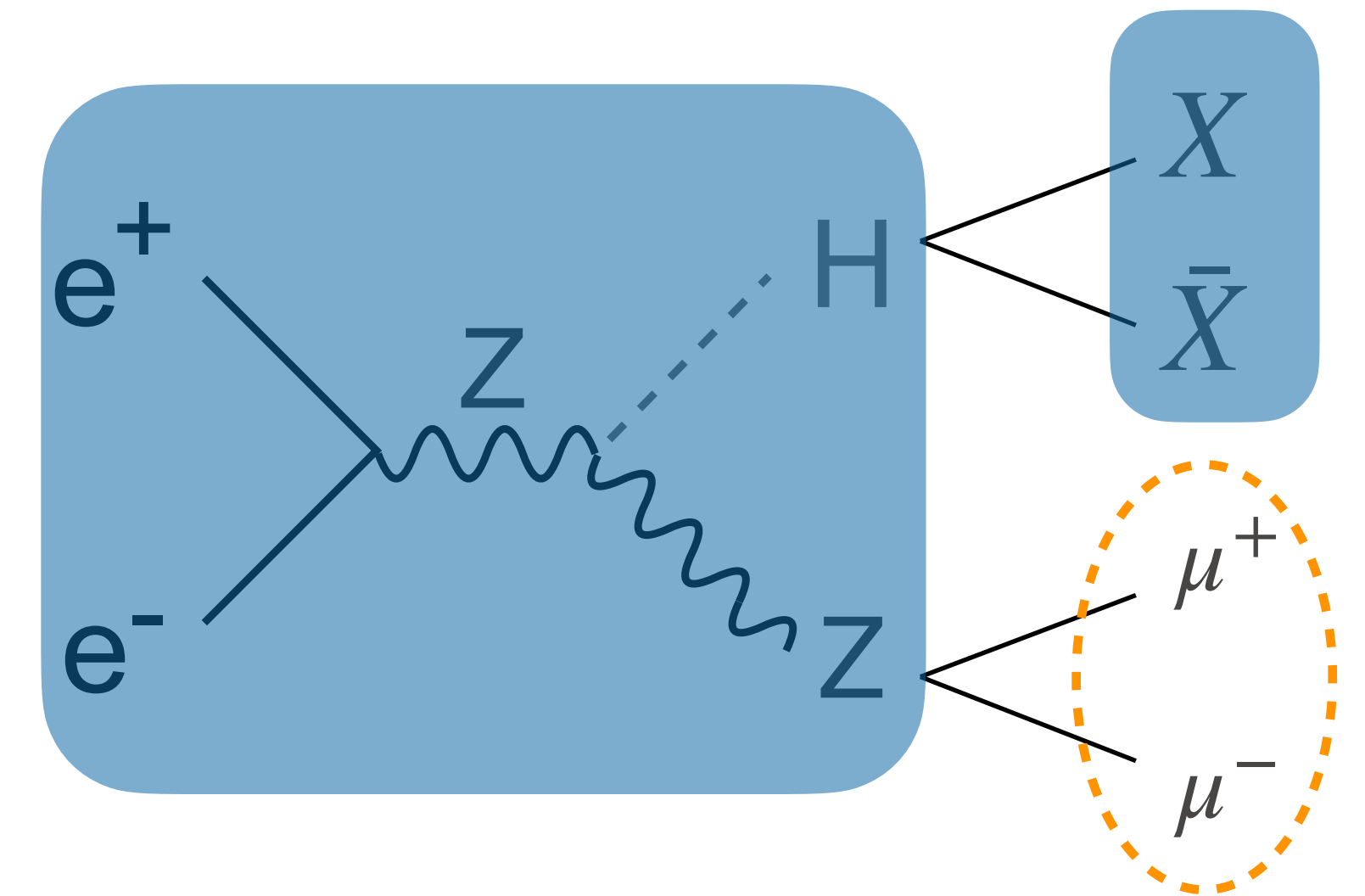
測定器の役割

・測定器で出来ること

- ・見たい現象そのものを直接観測することはできない
 - ・生成された安定な粒子のみ検出することができる
- 生成された粒子の特性を出来るだけ正確に測定し、起こった現象を再構成する

・測定する粒子の特性

- ・**エネルギー**：物質中でのエネルギー付与, 物質中での飛程 (カロリメータ)
- ・**運動量、電荷**：磁場中での飛跡の曲率 (飛跡検出器)
- ・**質量**：測定したエネルギーと運動量から
- ・**速度**：飛行時間
- ・**スピン**：崩壊角度分布
- ・**粒子種**
- ・**寿命**
- ・**消失したエネルギー・運動量**



代表的なヒッグス粒子生成過程
@ヒッグスファクトリー

コライダー実験測定器

コライダー実験測定器のコンセプト

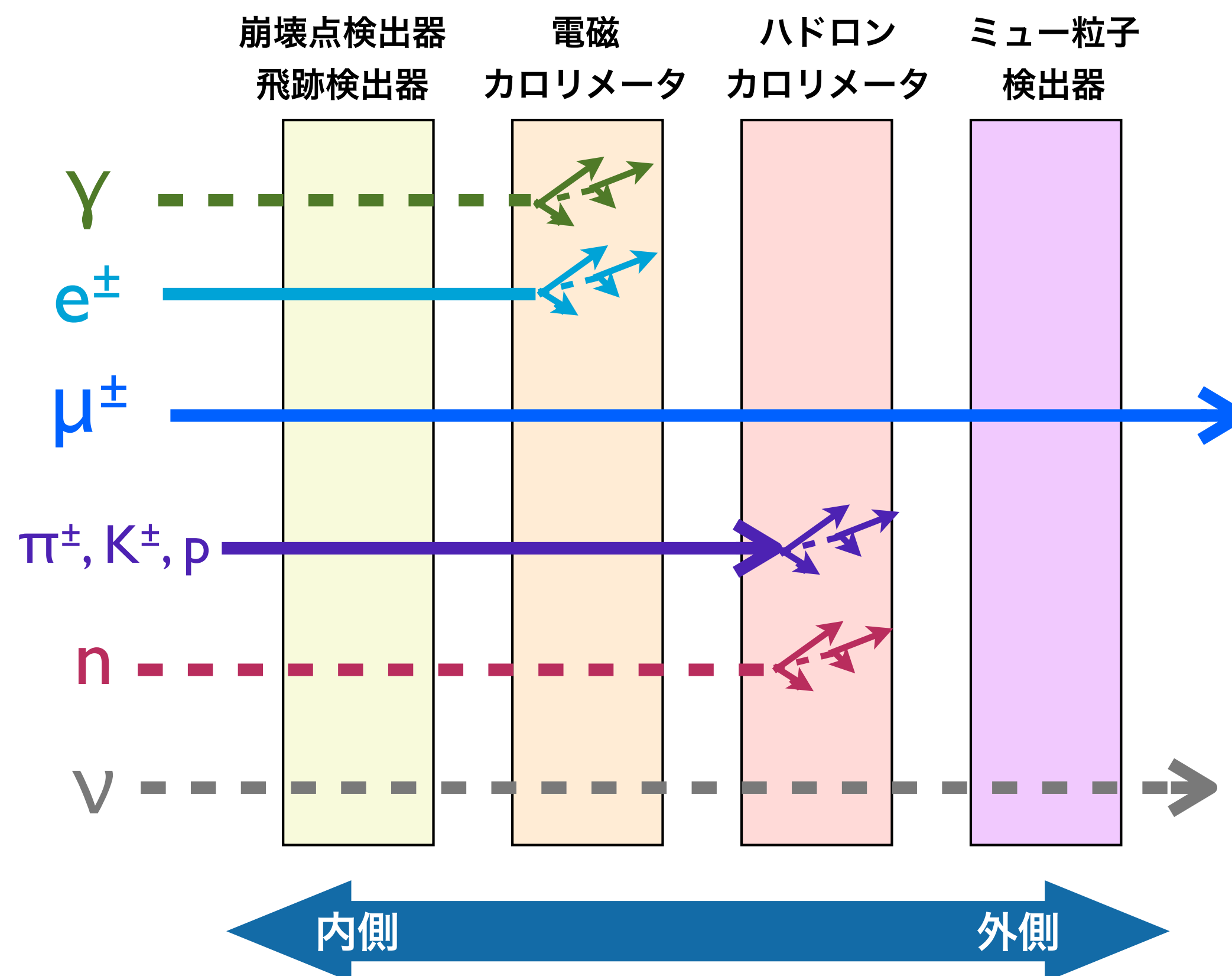
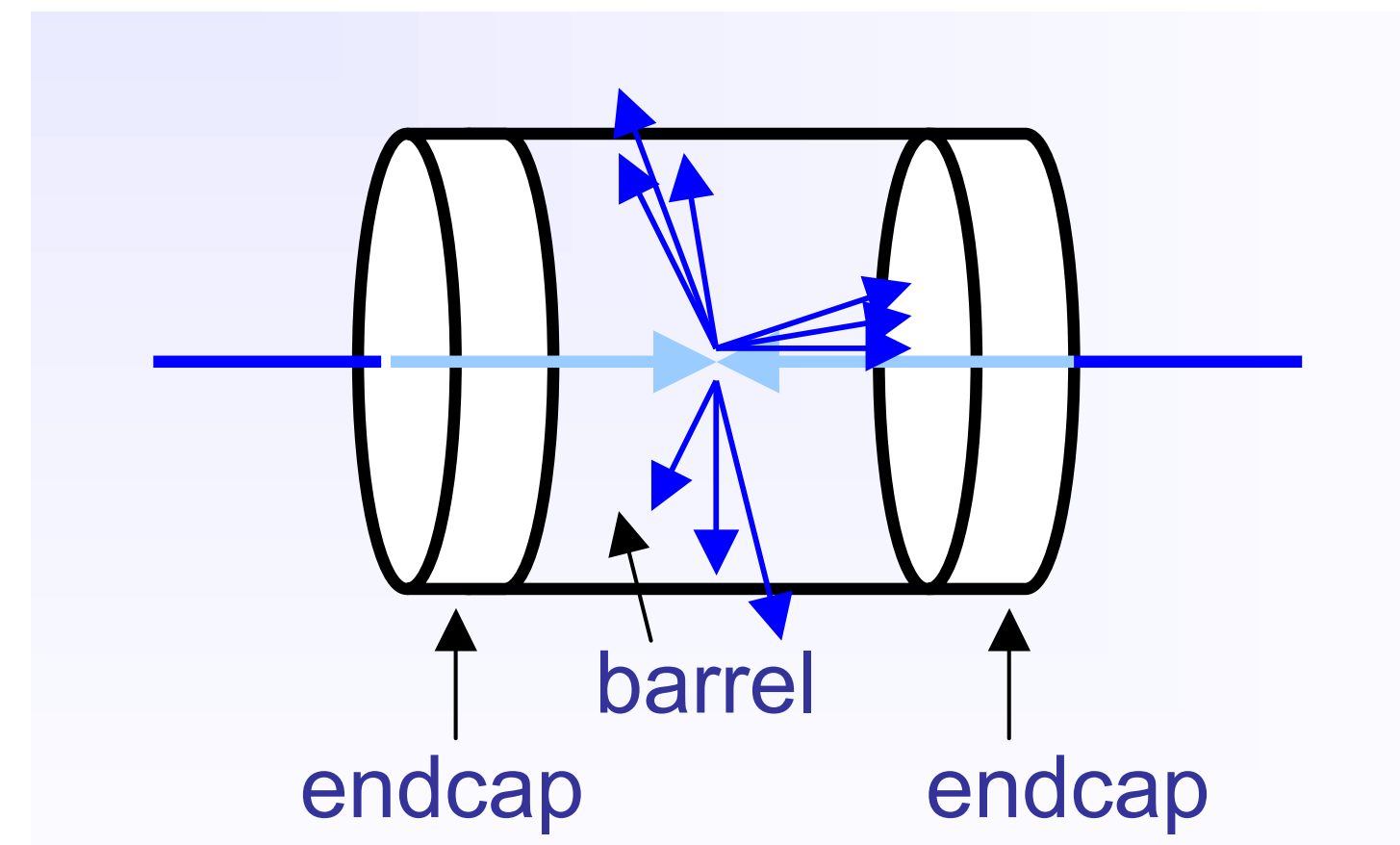
- 多目的測定器
- さまざまな測定器の多層構造

• 崩壊点検出器 → 飛跡検出器 → カロリメータ(電磁+ハドロン) → ミューオン検出器

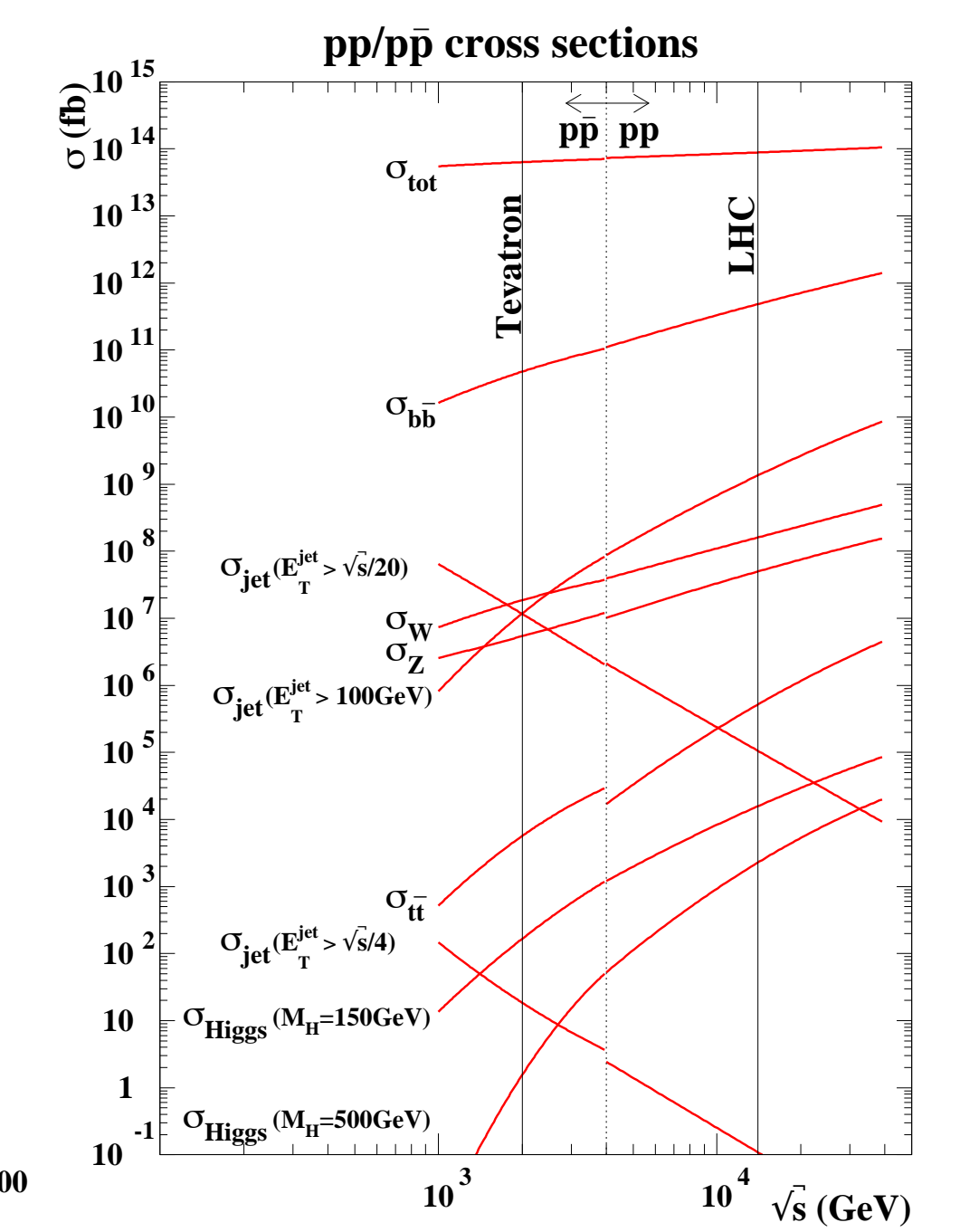
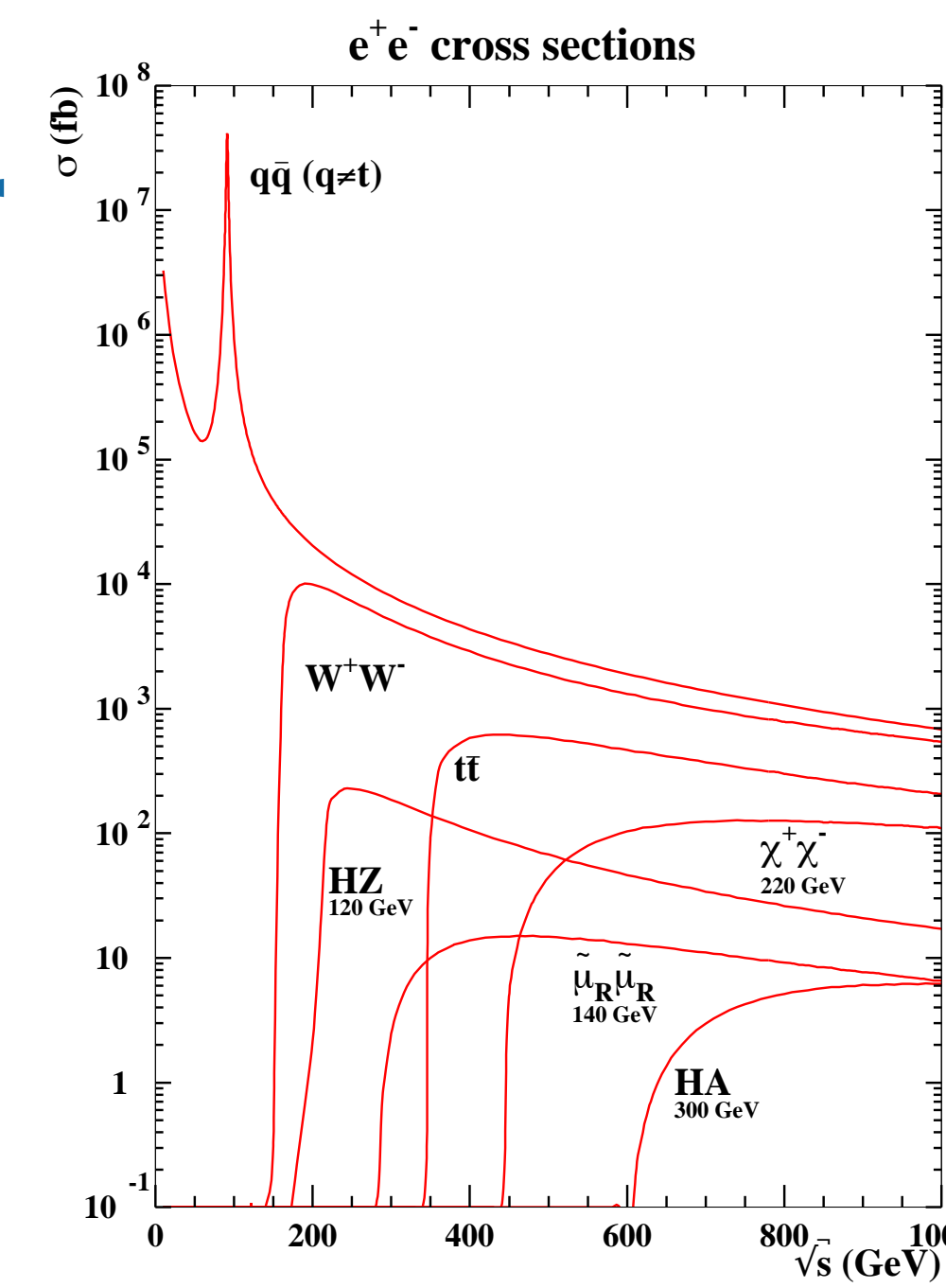
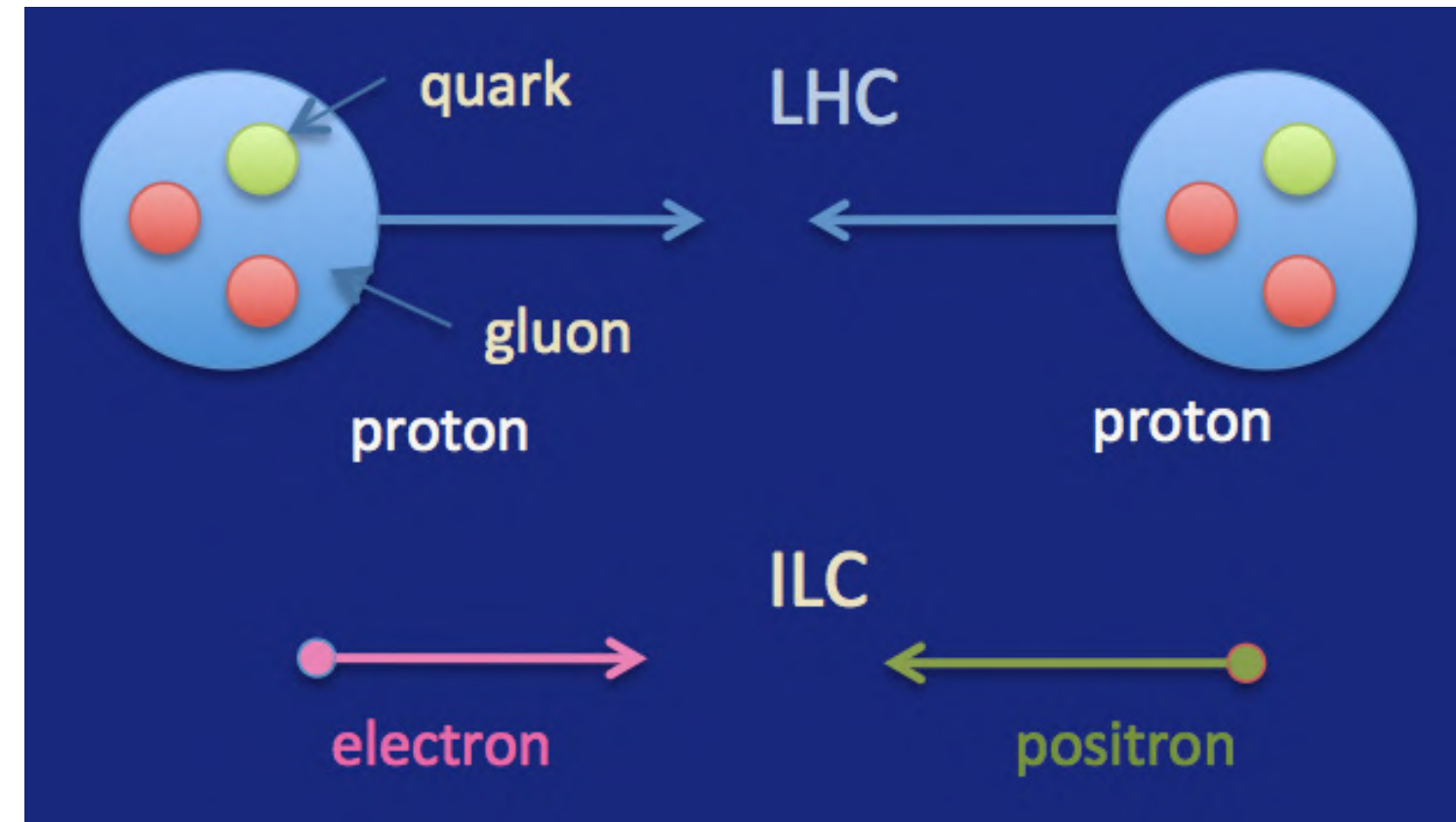
- 立体角 (4π) をフルカバー
- バレル+エンドキャップで衝突点を囲む

詳細なデザインは目的・測定条件に依存

- 物理
- 必要精度
- センサー技術
- 加速器やビーム構造との整合性
- レート耐性
- 放射線耐性
- ...



レプトンコライダー vs. ハドロンコライダー



arXiv:hep-ph/0410364

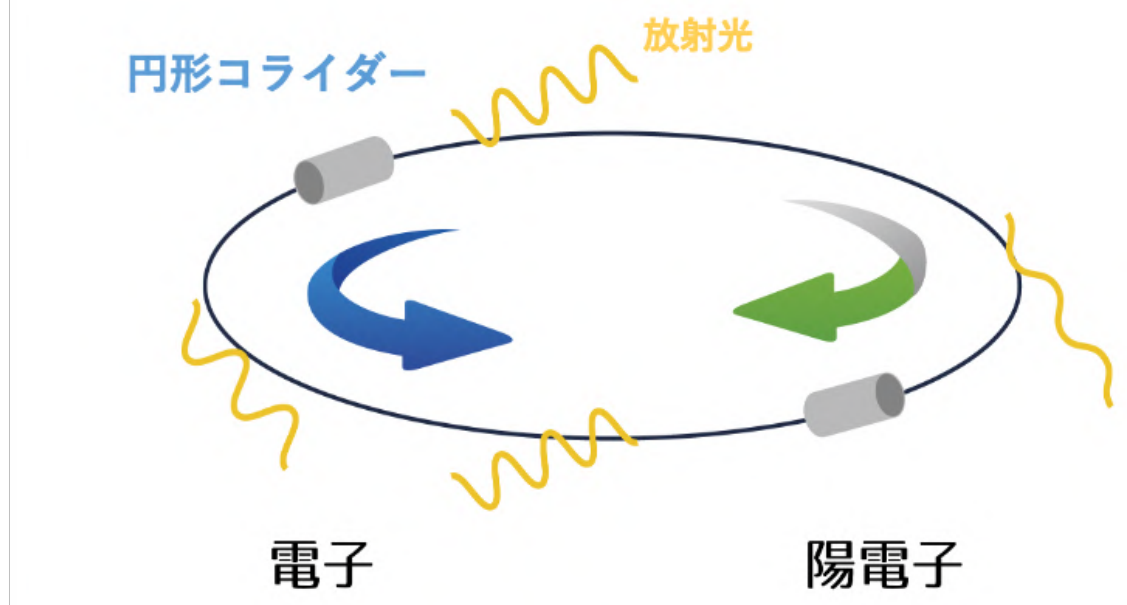
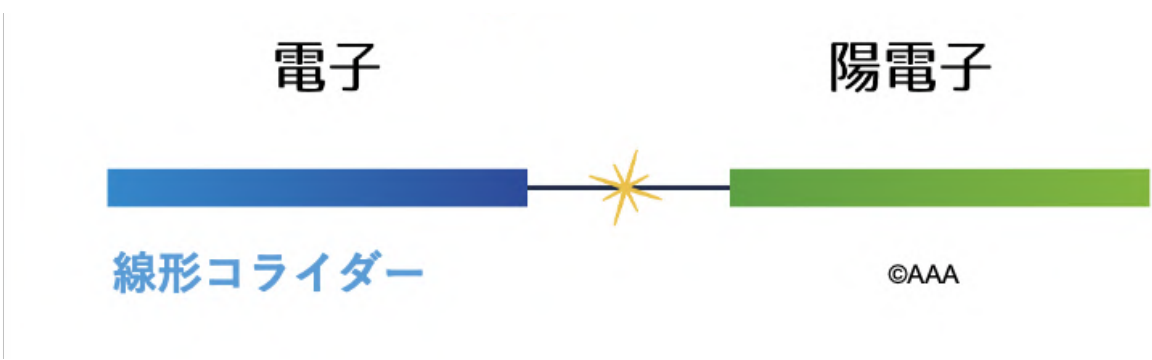
レプトンコライダー

- 素粒子同士の衝突
 - 初期状態が既知
 - 測定器精度に対する要求が高い
- 背景事象が少ない
 - トリガー不要
 - 高い放射線耐性は不要
- 低パイルアップ
 - 時間分解能 $\mathcal{O}(1\text{ ns})$

ハドロンコライダー

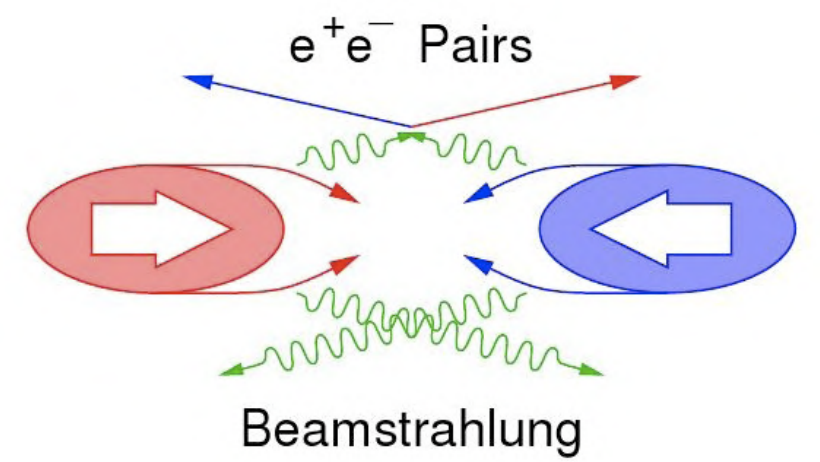
- 複合粒子の衝突
 - 初期状態に不定性
 - 測定器精度に対する要求はそれほど高くない
- 高い背景事象(QCD)
 - トリガーが必要
 - 高い放射線耐性が必要
- 高パイルアップ
 - 高い時間分解能が必要 $\mathcal{O}(10\text{ ps})$

線形電子陽電子コライダー vs. 円形電子陽電子コライダー



- ### 線形電子陽電子コライダー (ILC)
- 衝突エネルギー $\geq 1\text{TeV}$
 - 1衝突点 (検出器 x2 プッシュプル@ILC)
 - パルス運転 (5Hz, 0.7ms)
 - 事象頻度 $\sim 1\text{Hz}$ @ $\geq 250\text{GeV}$
 - シンクロトロン放射無し
 - ビーム起源バックグラウンド
 - 制動放射 $\rightarrow e^+e^-$ pair

- ### 円形電子陽電子コライダー (FCC-ee, CEPC)
- 衝突エネルギー $\leq 350\text{GeV}$
 - ≤ 4 衝突点 (≤ 4 検出器)
 - 連続運転
 - 事象頻度 $\sim 100\text{kHz}$ @ 90GeV
 - 高いシンクロトロン放射
 - ビーム起源バックグラウンド
 - シンクロトロン放射, 制動放射



↓
測定器設計の違い

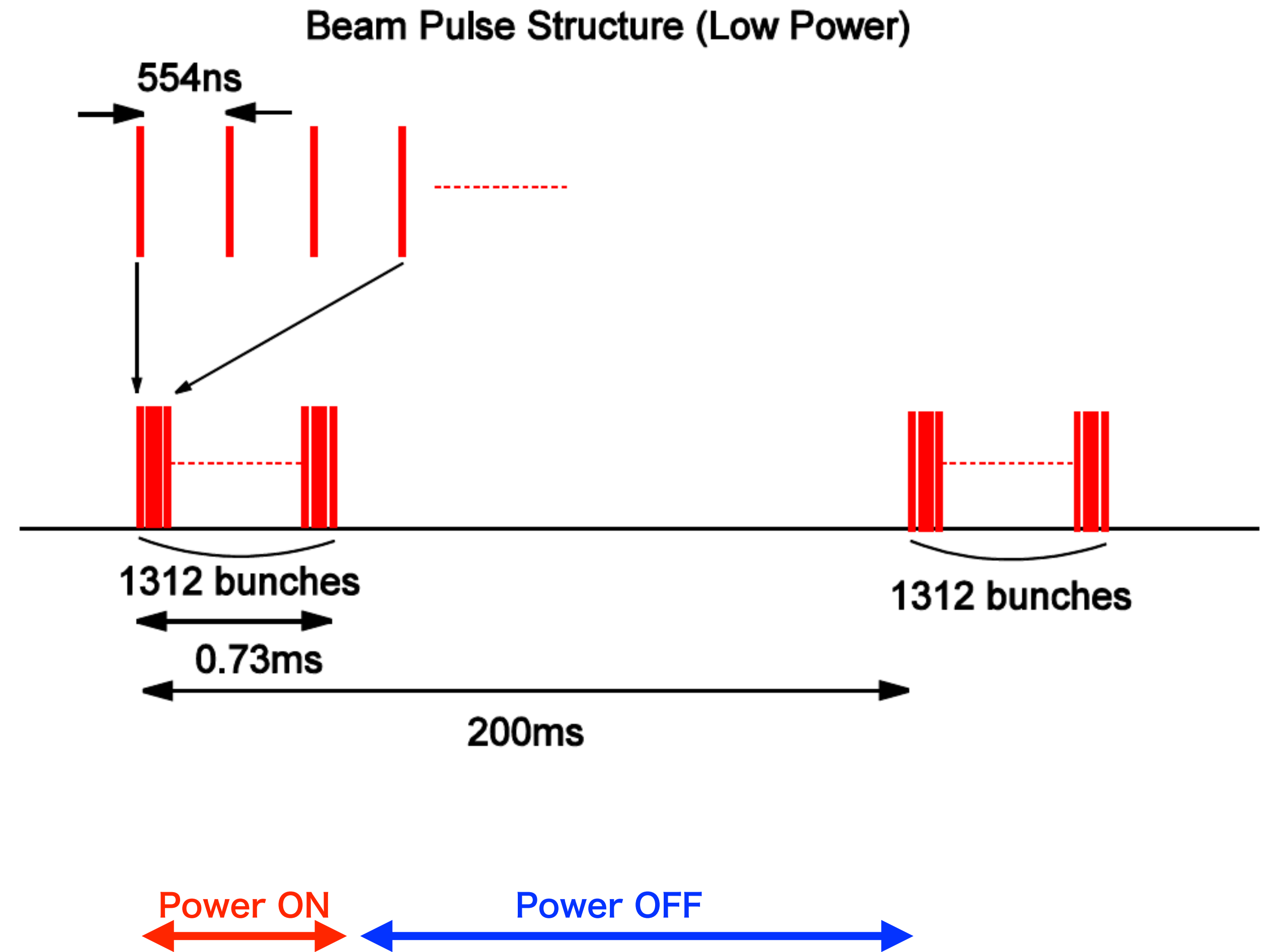
ILC ビーム構造

• パルス運転

- バンチトレイン ~0.7ms
- 繰り返し 5Hz

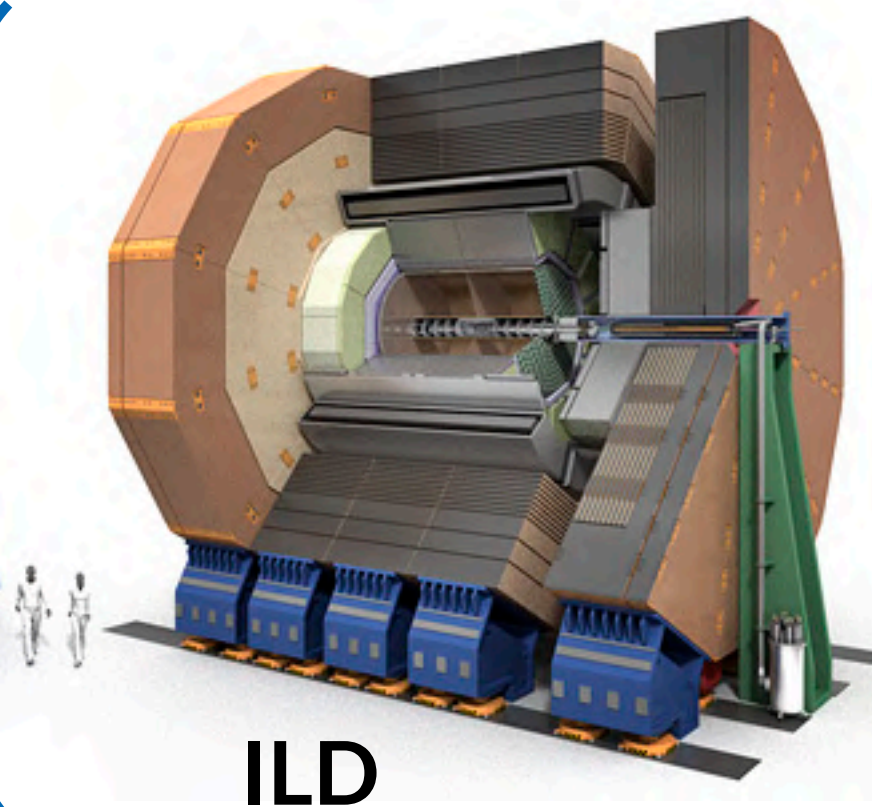
• 測定器設計への影響

- パワーパルシング
 - バンチトレインの衝突だけ測定器パワーオン
→消費電力の抑制
- バンチトレイン間での信号読み出し
- 測定器のアクティブな冷却不要
- トリガー不要

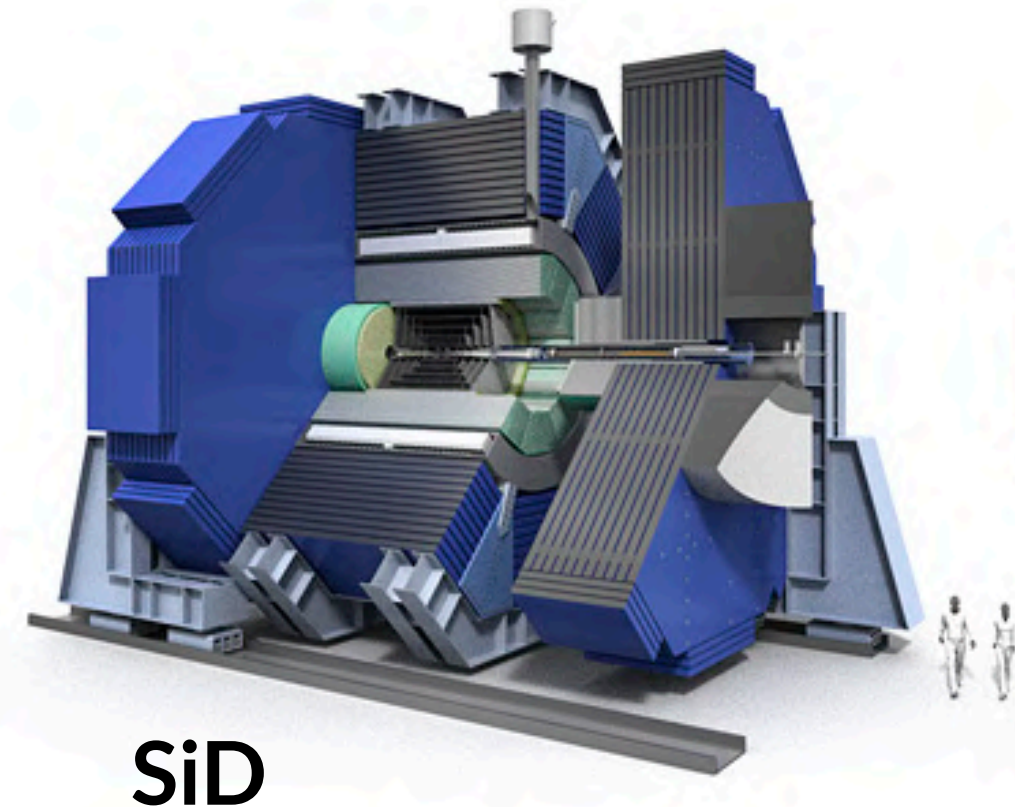


ヒッグスファクトリー測定器

ILC

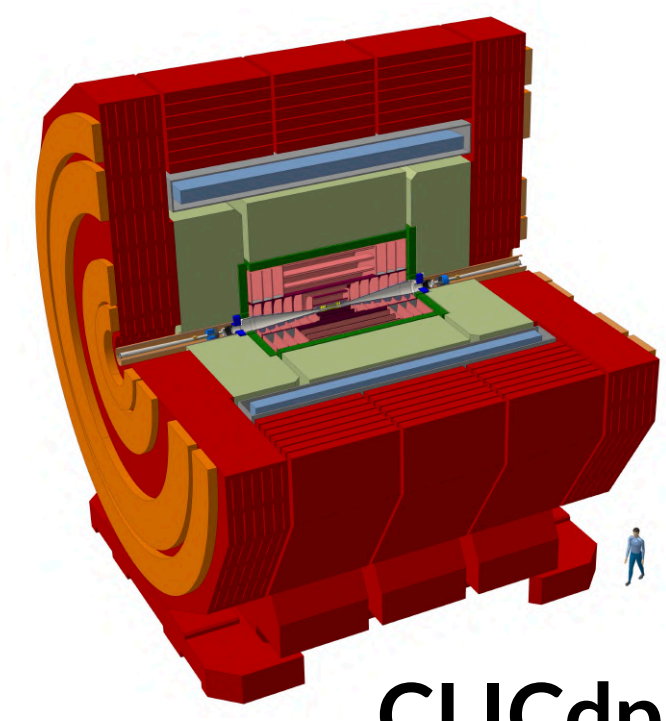


ILD



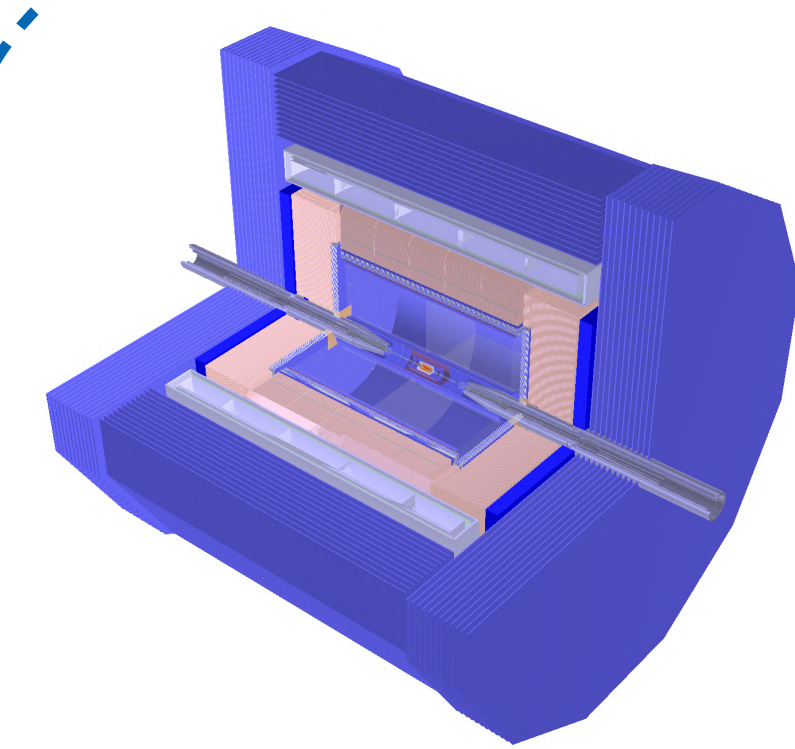
SiD

CLIC

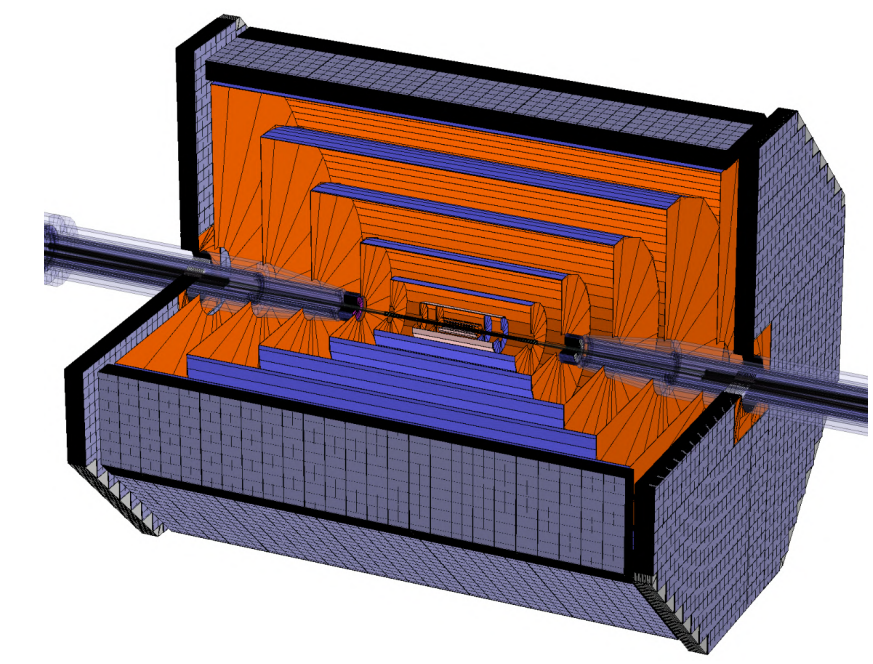


CLICdp

CEPC

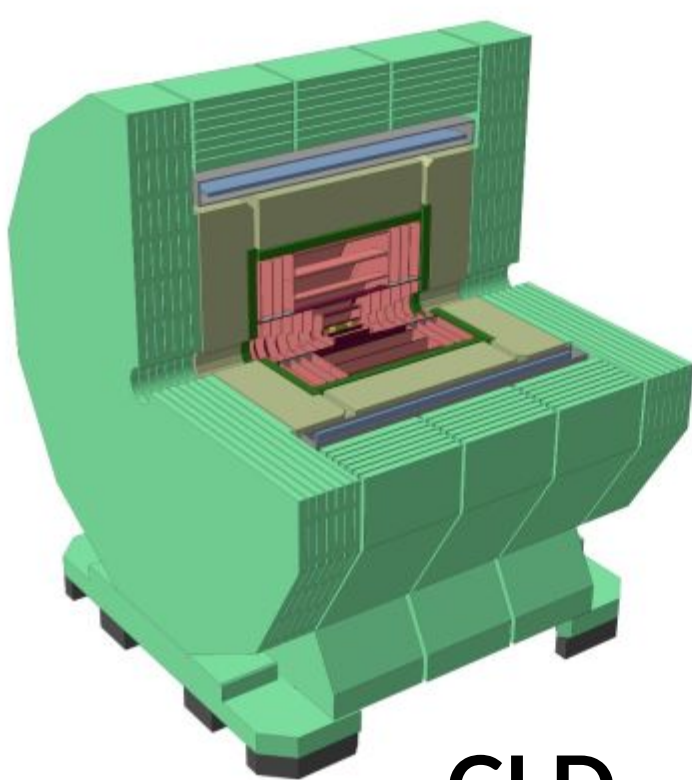


Baseline

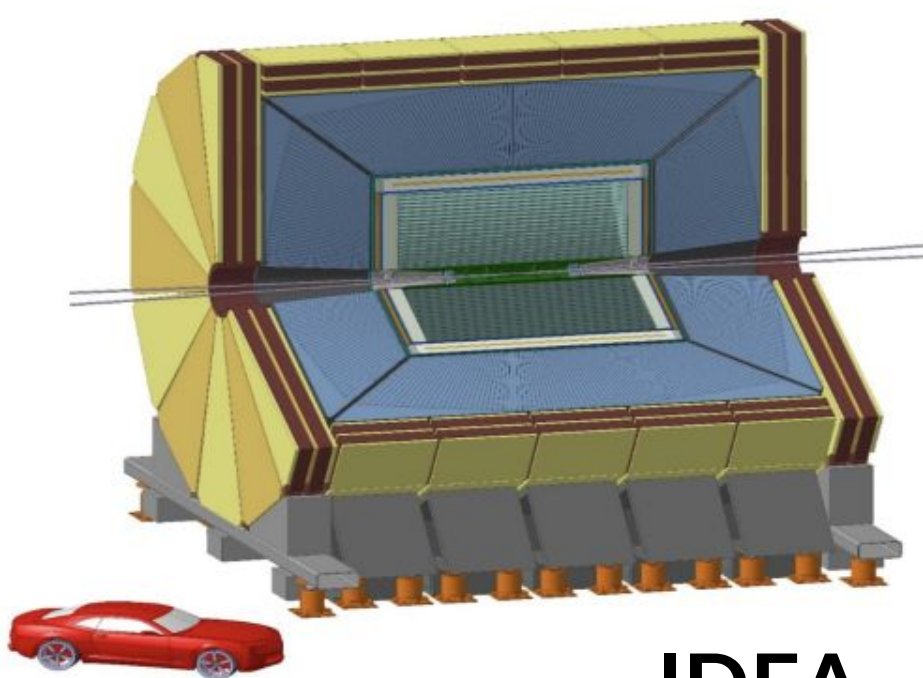


FST

FCC-ee



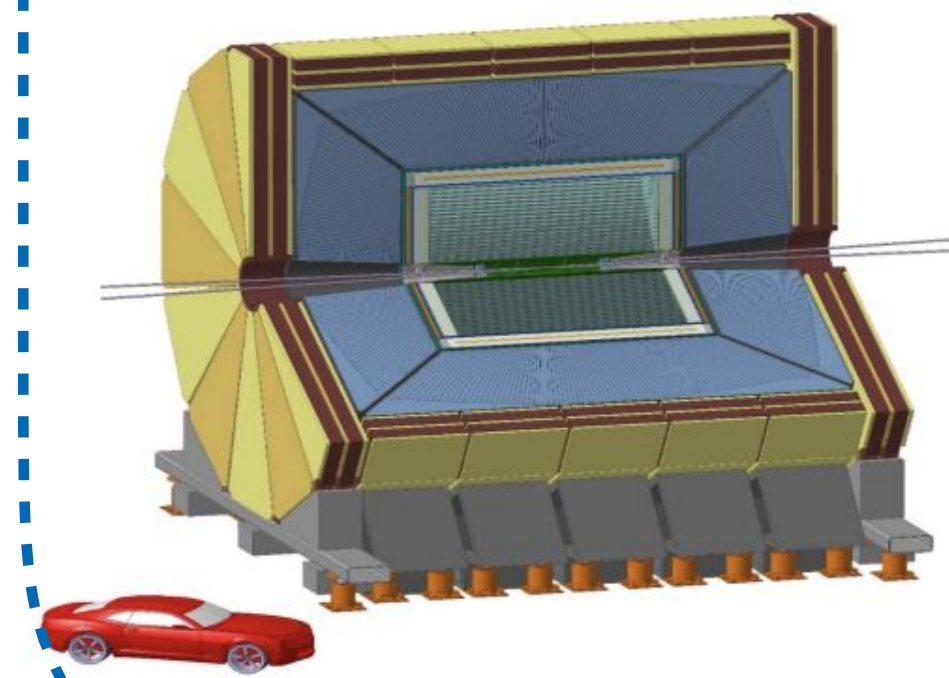
CLD



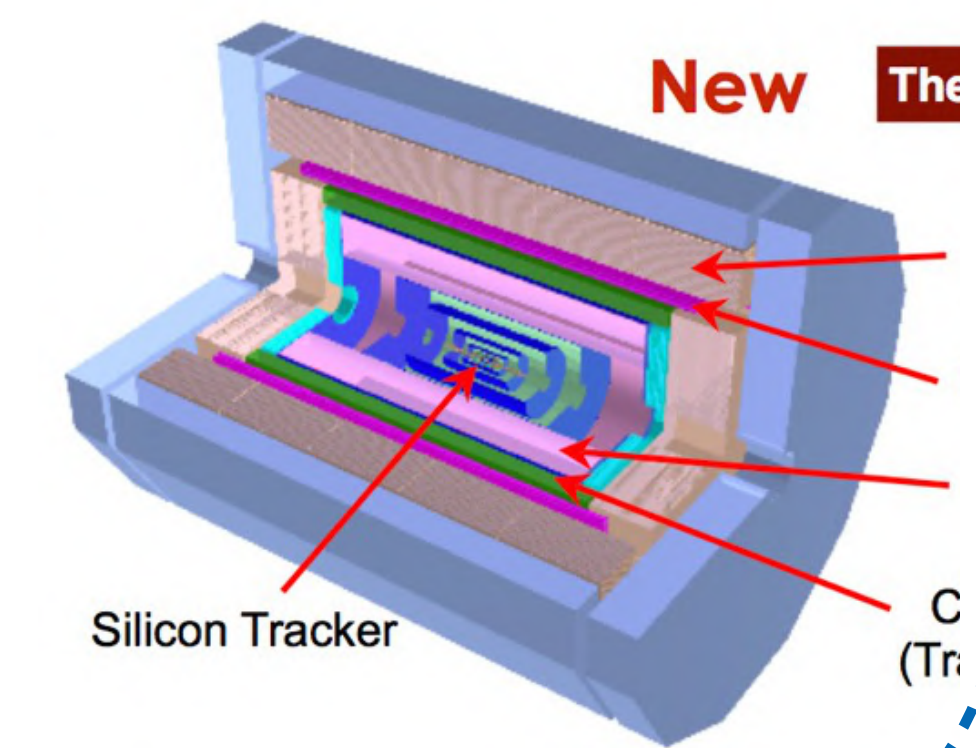
IDEA



ALLEGRO



IDEA



4th Concept

多数の測定器コンセプト。ただし、使用する検出器技術のオーバーラップは大きい

ヒッグスファクトリー測定器の必要性能

- ヒッグスファクトリーにおける高精度測定にこれまでにない高性能な測定器が必要

• 運動量分解能

- 物理: ヒッグス反跳質量測定 ($e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow \mu\mu H$)
- 測定器: 飛跡検出器

$$\sigma_{1/P_T} \leq 2 \times 10^{-5} \text{ [(GeV/c)}^{-1}]$$

~LHC/10, ~LEP/25

• 衝突径数分解能

- 物理: クォークジェットのフレーバー識別 ($H \rightarrow bb, cc, \tau\tau$)
- 測定器: 崩壊点検出器

$$\sigma_{IP} \leq 5 \oplus \frac{10}{p\beta \sin^{3/2} \theta} \text{ [\mu m]}$$

~LHC/2, ~LEP/5

• ジェットエネルギー分解能

- 物理: W/Z 不変質量分離, $Z/W/H \rightarrow jj$, $H \rightarrow \text{invisible}$
- 測定器: カロリメータ

$$\frac{\sigma(E)}{E} \sim \frac{30\%}{\sqrt{E[\text{GeV}]}}$$

~LHC/2, ~LEP/2

• Hermeticity ~5mrad ~LHC/3

- 物理: W/Z 不変質量分離, $H \rightarrow \text{invisible}$, BSM

ヒッグス反跳質量測定

●ヒッグス反跳質量測定 (ILC@250GeVのフラッグシップ測定)

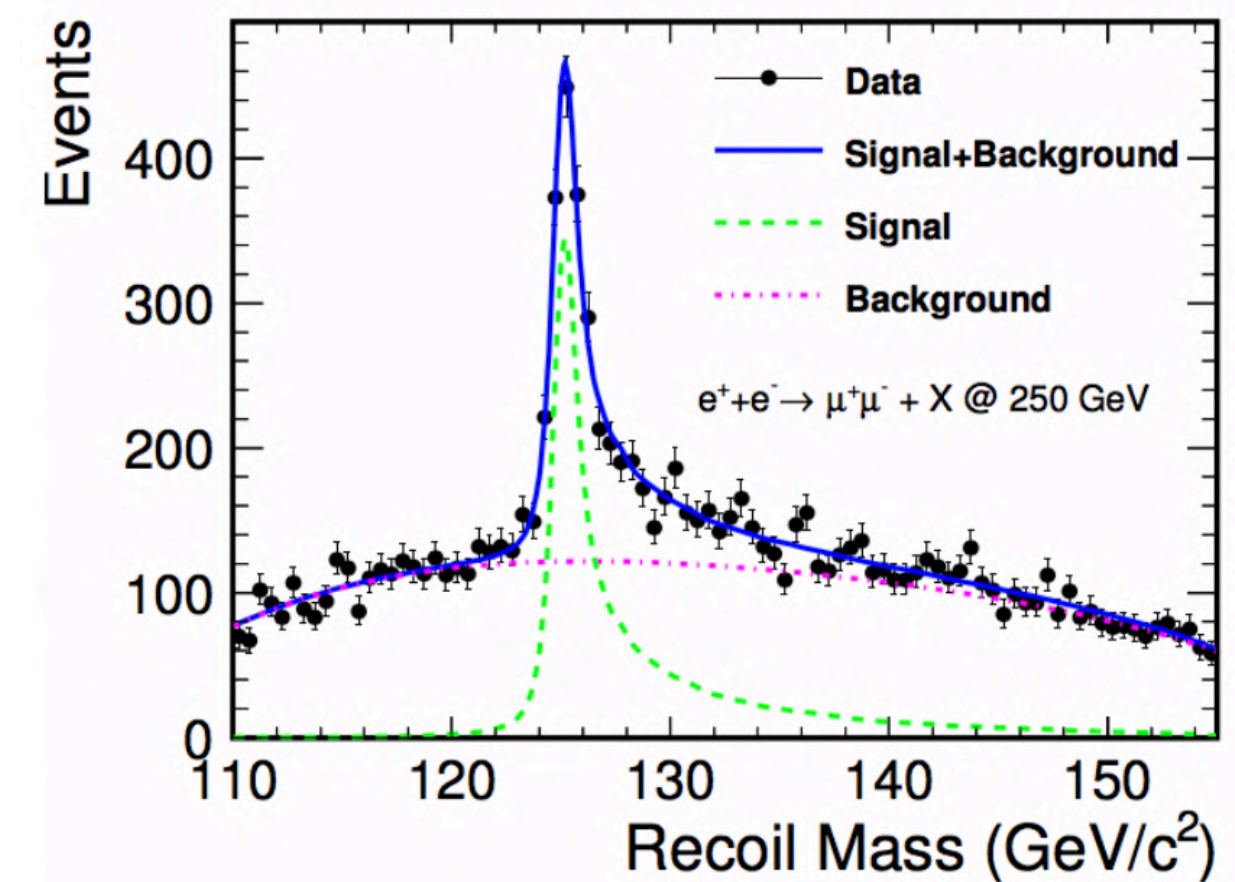
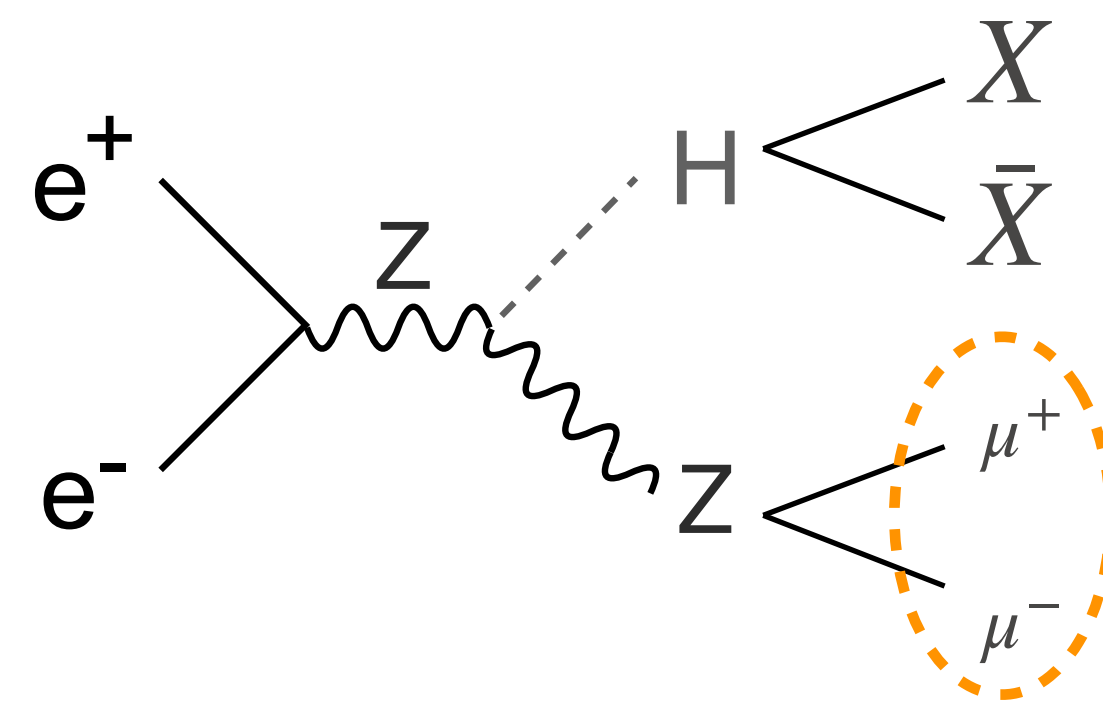
- 四元運動量保存: $p_{e^+e^-} = p_H + p_Z$
 - 既知 (blue arrow pointing to $p_{e^+e^-}$)
 - 測定 (orange arrow pointing to p_Z)
- $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ を再構成

⇒ ヒッグス粒子が(見えない)未知粒子に崩壊したとしても、ヒッグス粒子を再構成できる!

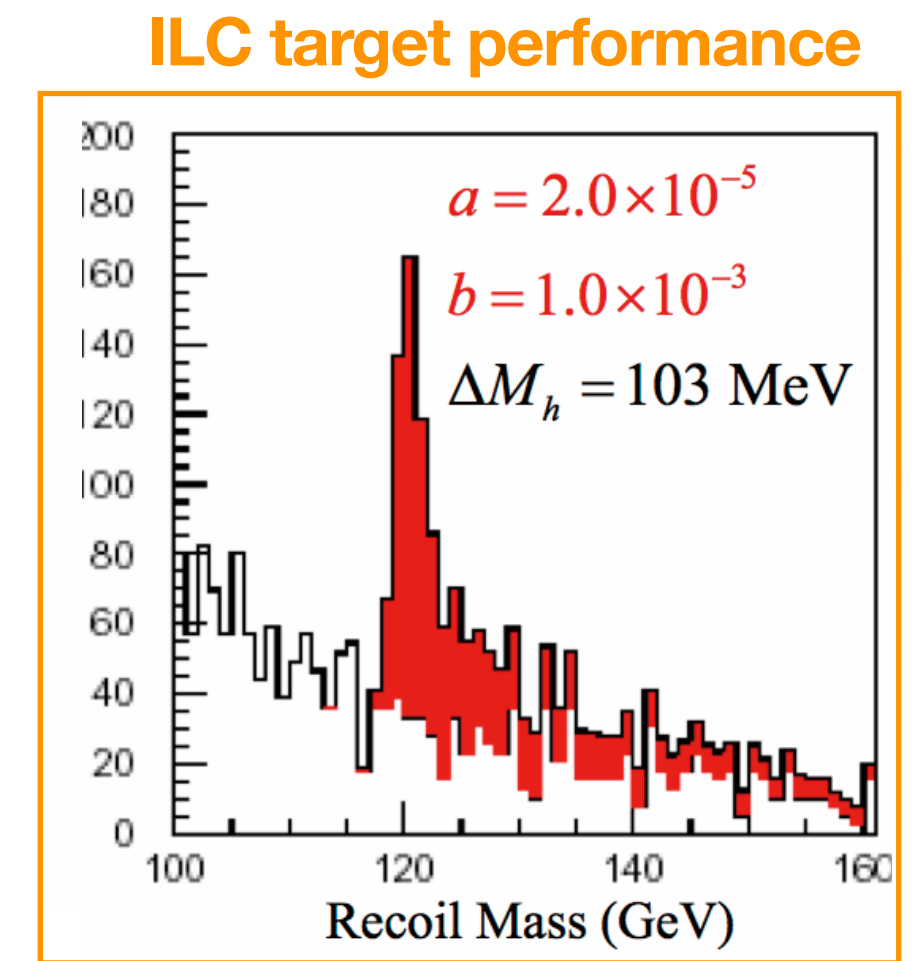
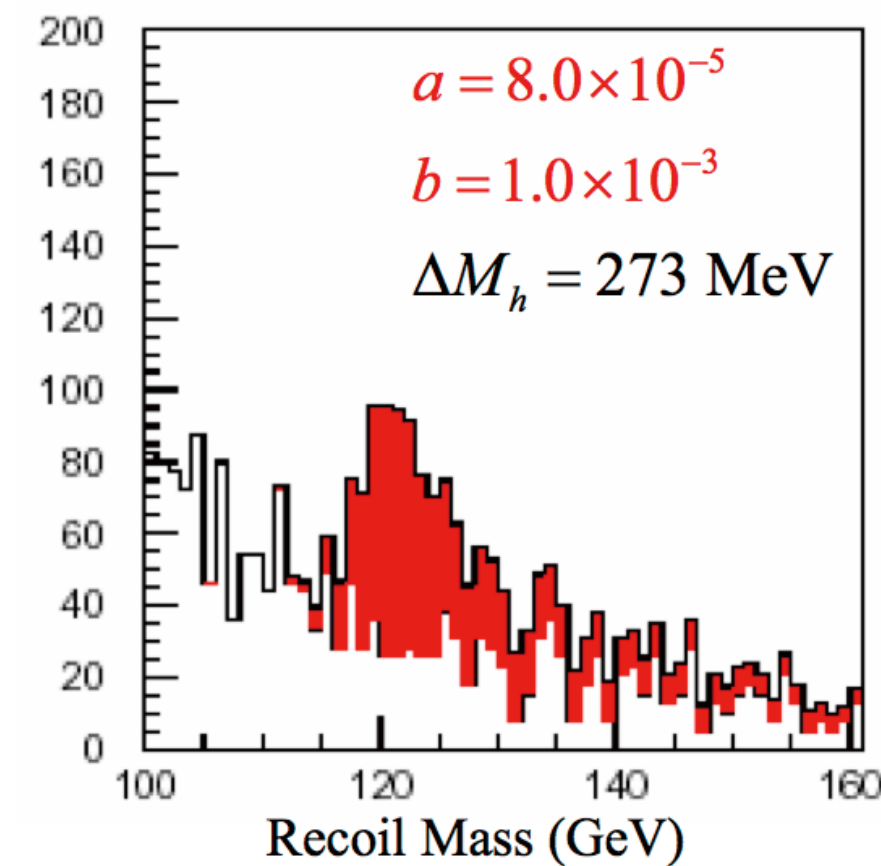
- 反応の総断面積を測定可能
 - モデルに依存しないヒッグス粒子の結合定数測定が可能
- ヒッグス未知の素粒子への崩壊
- ヒッグス粒子の高精度測定 ($\delta m_h = 14 \text{ MeV} \leftrightarrow 250 \text{ MeV} @ \text{LHC}$)

●高精度なレプトン運動量測定が必要

$$\sigma_{1/p_T} \leq 2 \times 10^{-5} \text{ [(GeV/c)}^{-1}] \quad \sim \text{LHC}/10, \sim \text{LEP}/25$$



$$m_{\text{recoil}}^2 = (\sqrt{s} - E_{\mu^+\mu^-})^2 - |\vec{p}_{\mu^+\mu^-}|^2$$

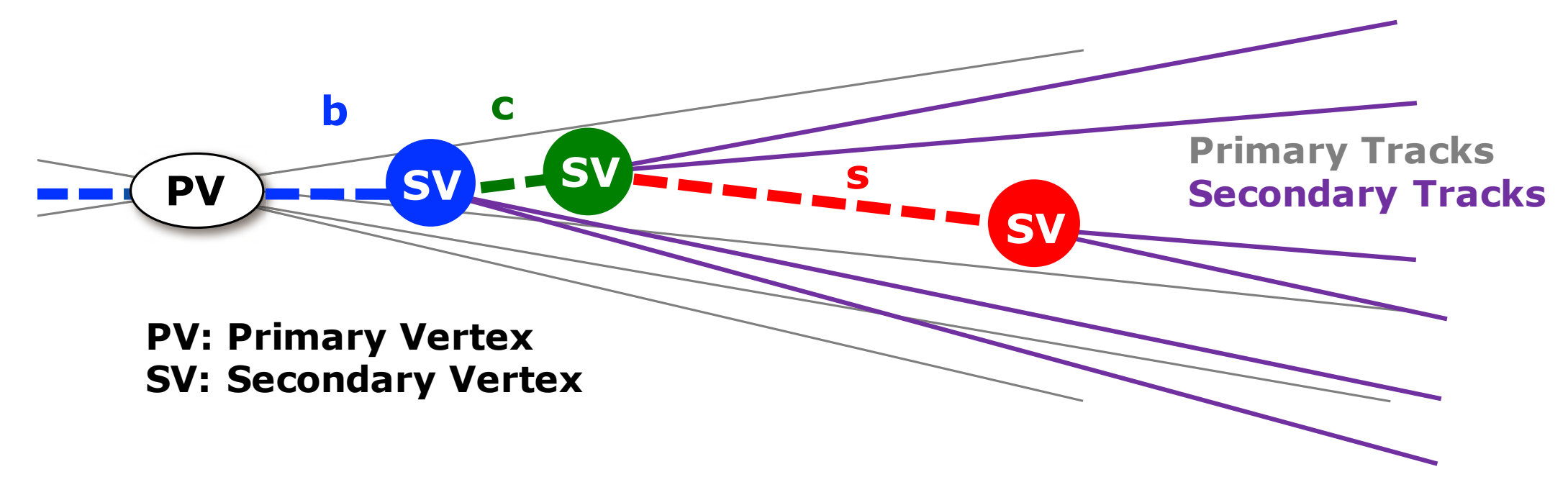


$$\sigma_{1/p_T} = \frac{\sigma_{p_T}}{p_T^2} = a \oplus b/p_T$$

フレーバー同定

●重要なプロセスの多くは終状態に重いクォークのジェット

- Higgs decay branching ratio BR(H→bb, cc, gg)
- Higgs self coupling ZHH→qqbbbb
- Top Yukawa coupling ttH→bWbWbb



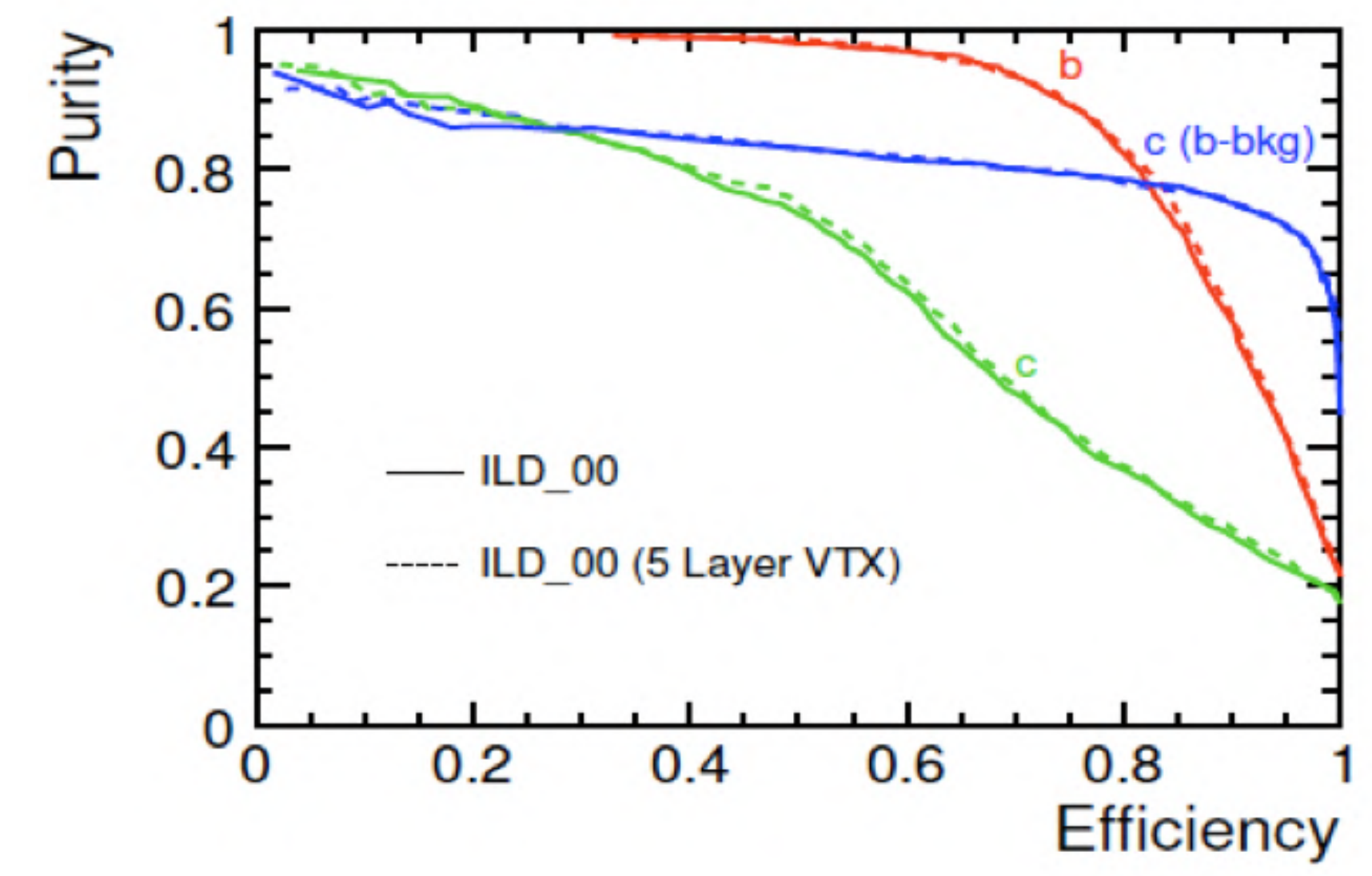
●二次崩壊点を見つけて重いクォークのジェットのフレーバー(世代)を同定

- u, d, s-quark jet, gluon jet: single vertex
- b-quark jet: three vertices
- c-quark jet: two vertices

●高精度な崩壊点測定が必要

$$\sigma \leq 5 \oplus \frac{10}{p\beta \sin^{3/2} \theta} [\mu\text{m}] \quad \sim \text{LHC}/2, \sim \text{LEP}/5$$

位置分解能 クーロン多重散乱



崩壊点検出器 & 飛跡検出器

D. Dannheim, BTTB11, Apr. 17, 2023

Collider	ILC		CLIC	FCC-ee			CEPC	
Detector Concept	SiD	ILD	CLICdet	CLD	FCC-ee IDEA	Noble LAr/LKr	CEPC baseline	CEPC IDEA
B-field [T]	5	4	4	2	2	2	3	2
Vertex inner radius [mm]	14	14	31	17 → 12	17 → 12	17 → 12	16	16
Tracker out. radius [m]	1.25	1.8	1.5	2.2	2.0	2.0	1.81	2.05
Vertex	Si-pixel	Si-pixel	Si-pixel	Si-pixel	Si-pixel	Si-pixel	Si-pixel	Si-pixel
Tracker	Si-strips	TPC/ Si-strips	Si-pixel	Si-pixel	DC/ Si-strips	DC/Si-strips or Si-pixel	TPC/Si-strips or Si-strips	DC/ Si-strips

[arXiv:1306.6329](https://arxiv.org/abs/1306.6329)

[arXiv:1812.07337](https://arxiv.org/abs/1812.07337)

[arXiv:1911.12230](https://arxiv.org/abs/1911.12230)

doi.org/10.1140/epjst/e2019-900045-4

[arXiv:1811.10545](https://arxiv.org/abs/1811.10545)

- 崩壊点検出器：シリコンピクセルセンサー
- 飛跡検出器：ガス検出器(TPC/DC), シリコンピクセル/シリコンストリップ

崩壊点検出器 (ILD)

- 6層 (3 × ダブルサイド)@R=1.6-6.0cm

- 目標性能

- 位置分解能: $< 3 \mu\text{m}$

- 物質質量: $< 0.2-0.3 \% X_0/\text{layer}$

- ピクセル占有率: $< \text{a few } \%$

- 放射線耐性 ($1\text{kGy}/\text{yr}$, $10^{11} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2/\text{yr}$)

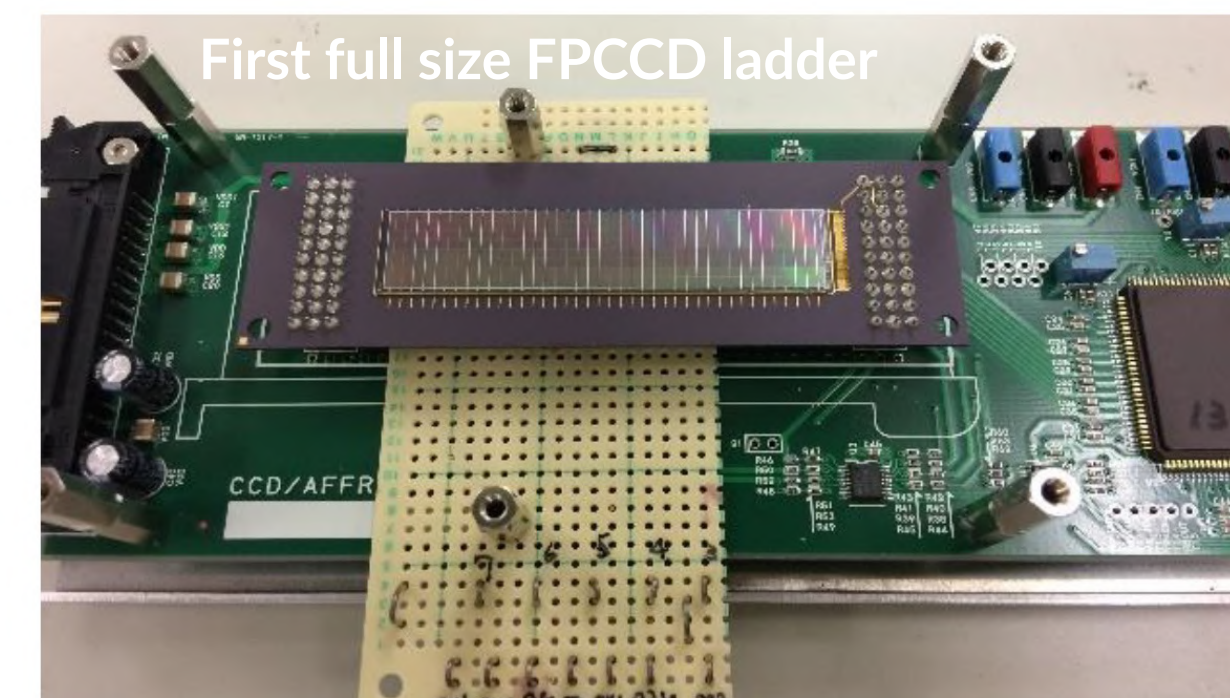
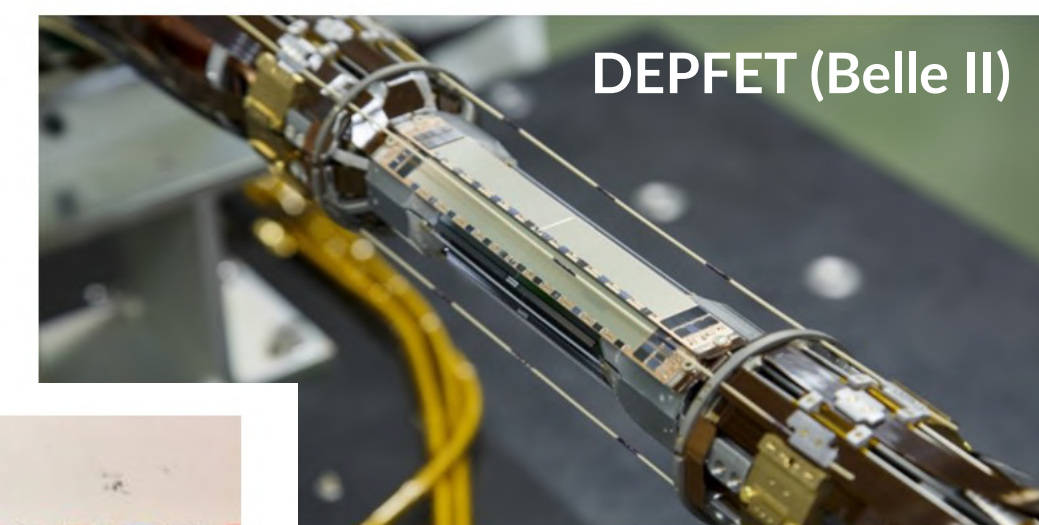
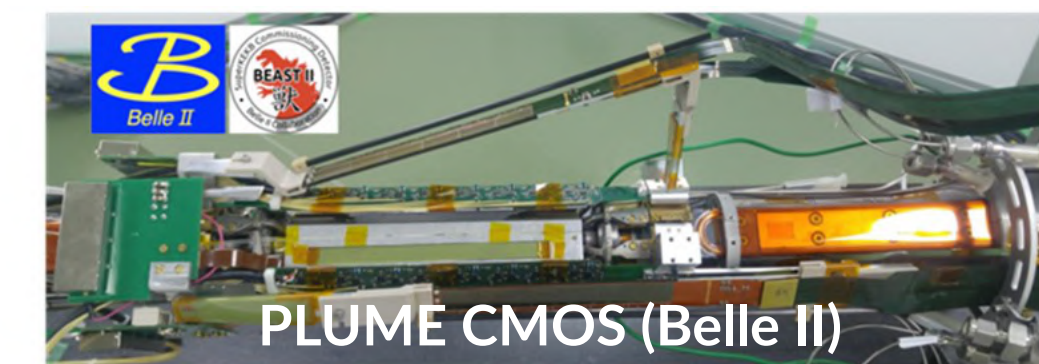
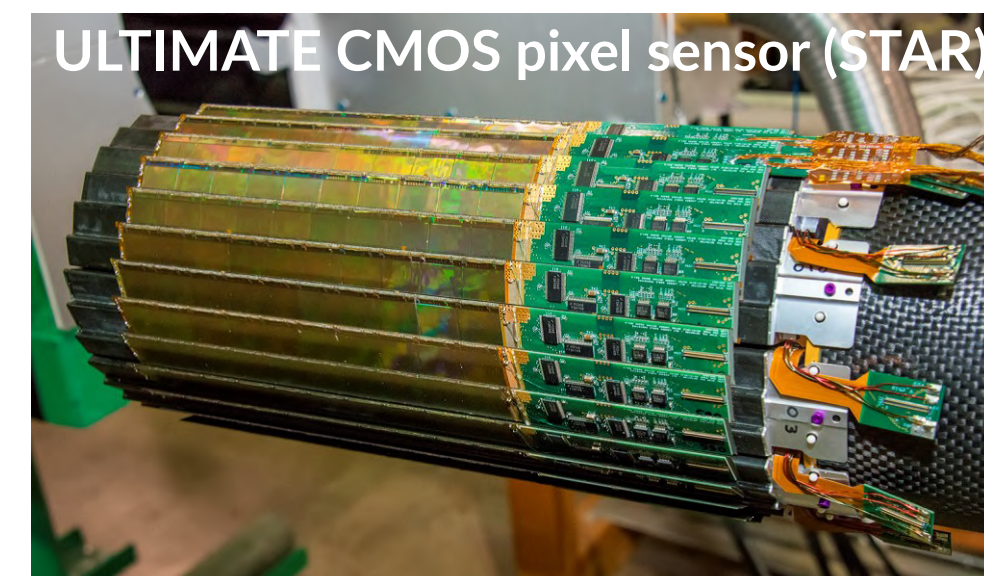
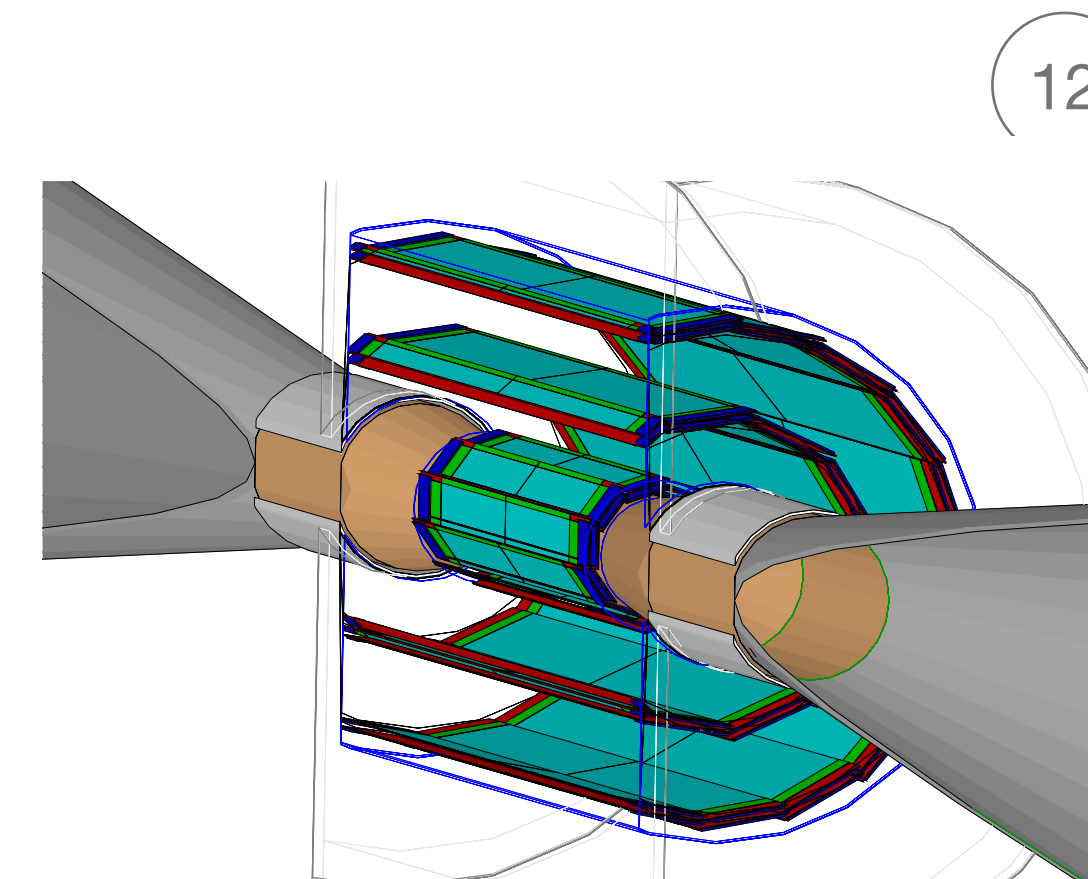
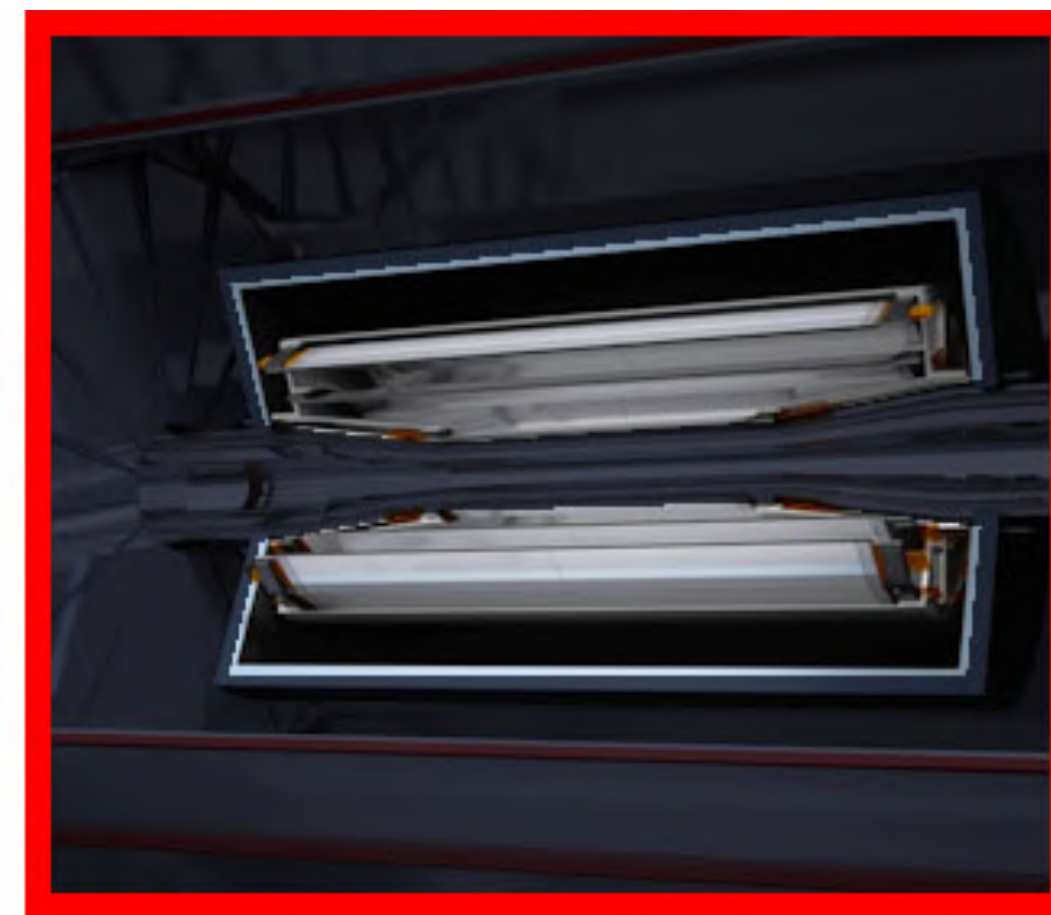
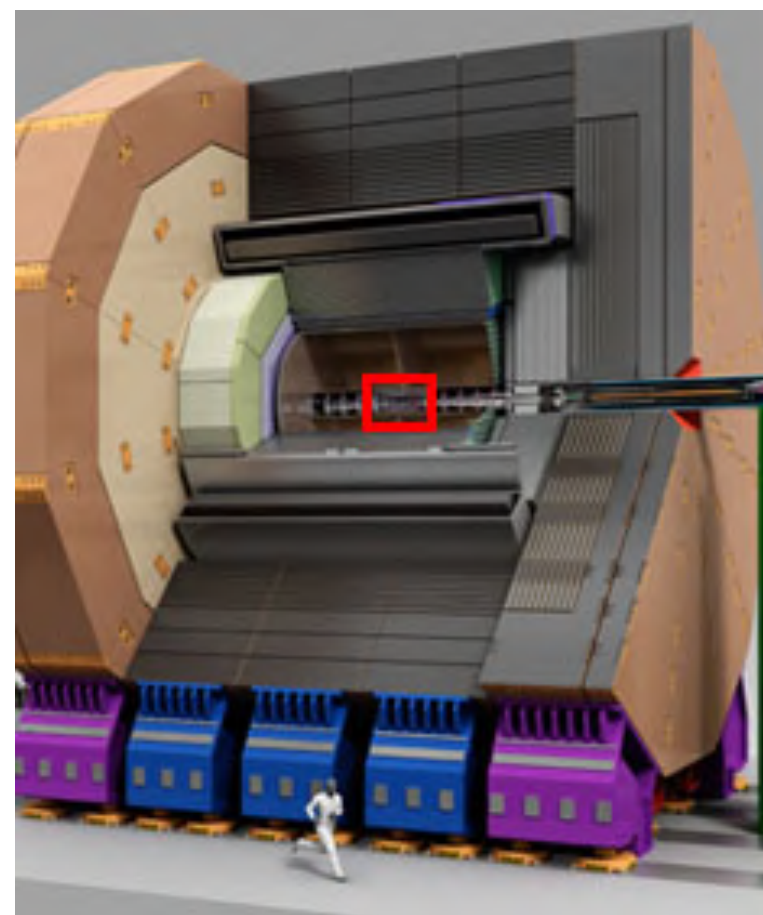
- センサー技術候補

- CMOS, DEPFET, FPCCD, SOFIST

- ピクセル占有率の抑制

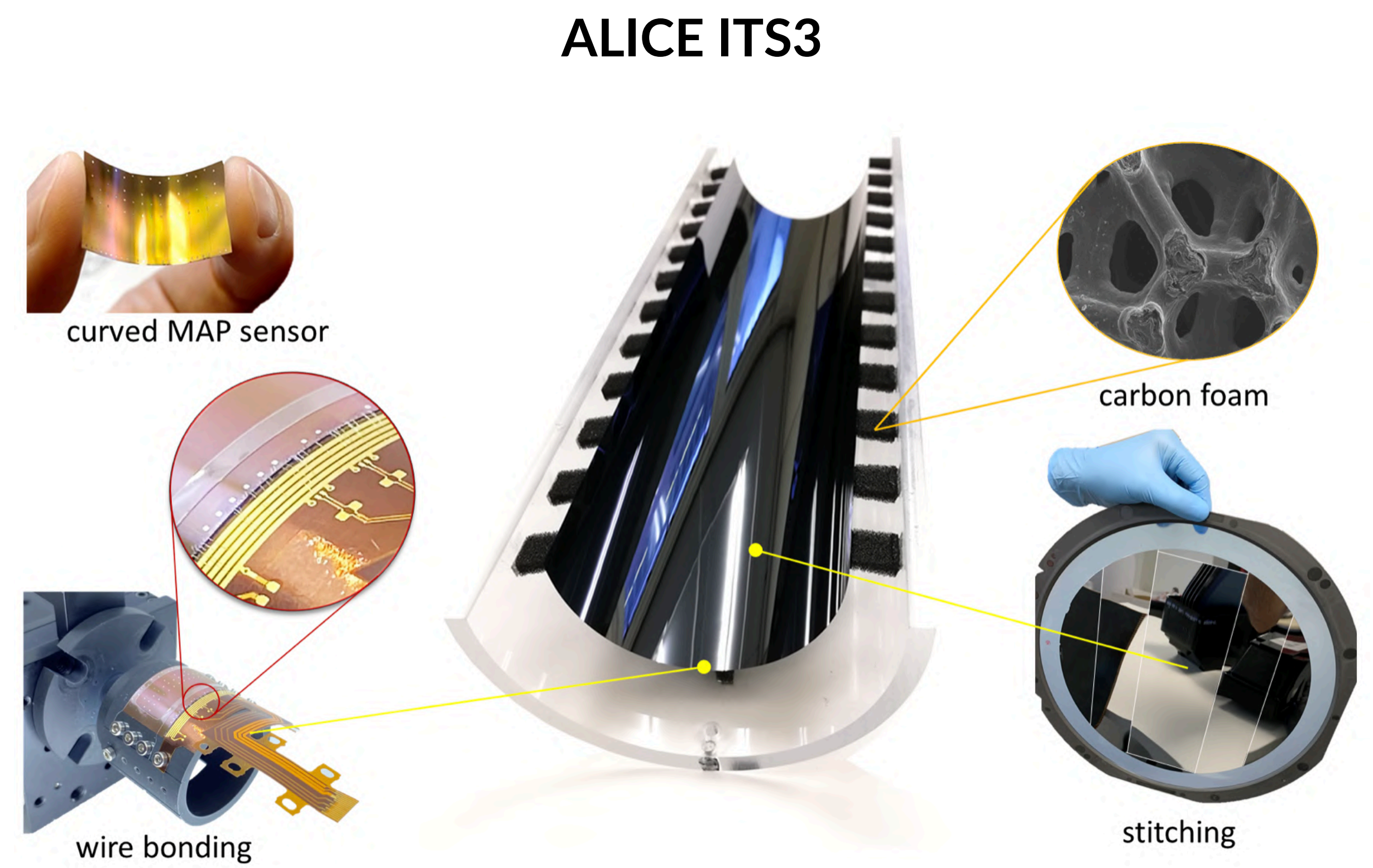
- CMOS, DEPFET: ピクセルサイズが大きめ($\sim 20\mu\text{m}$), バンチトレイン中に読み出し → パワーパルシングが可能

- FPCCD, SOFIST: ピクセルサイズ小($< 10\mu\text{m}$), バンチトレイン間にゆっくり読み出す



崩壊点検出器

- 湾曲シリコンピクセルセンサー
 - ALICE実験内部飛跡検出器のアップグレード (ITS3)
 - 極薄MAPSシリコンセンサー(<50μm) → 湾曲可能！
 - 支持構造が不要なので物質量を大幅に削減可能
 - 0.3% X₀ @ITS2 → 0.05% X₀@ITS3
- ヒッグスファクトリー崩壊点検出器への応用の可能性も



ALICE ITS3

運動量分解能

$$\frac{\Delta p_t}{p_t^2} = \frac{\sigma_{r\phi}}{0.3 L^2 B} \sqrt{\frac{720}{N+4}}$$

σ：ヒット位置分解能
 N：ヒット数
 B：磁場
 L：飛跡長

飛跡検出器

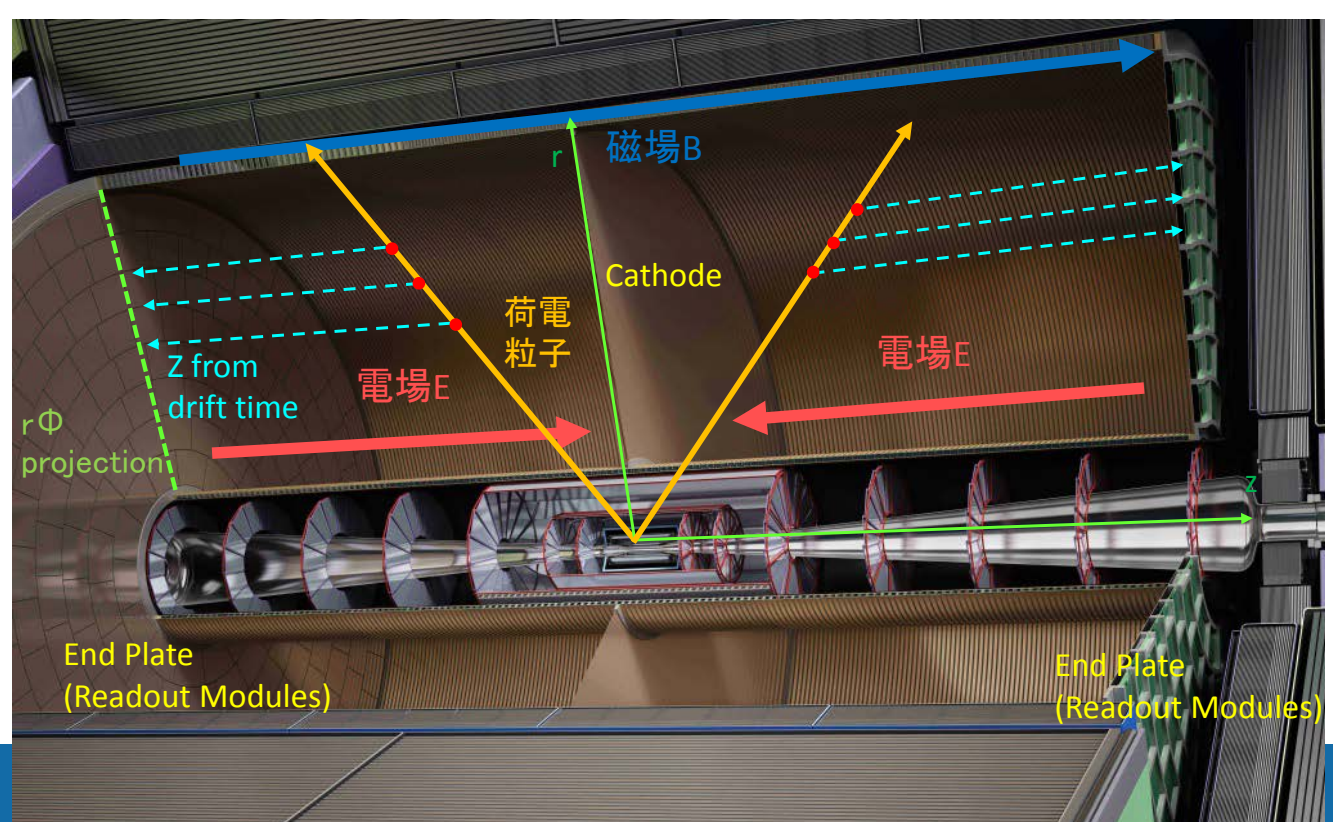
ガス検出器

- ヒット位置分解能 $\sigma \sim 100 \mu\text{m}$
- $N > 200$
- 物質質量：5% X_0
- $dE/dx, dN/dx$ による粒子識別
- 候補技術
 - Time Projection Chamber (TPC) @ILD, CEPC baseline
 - Drift chamber @IDEA

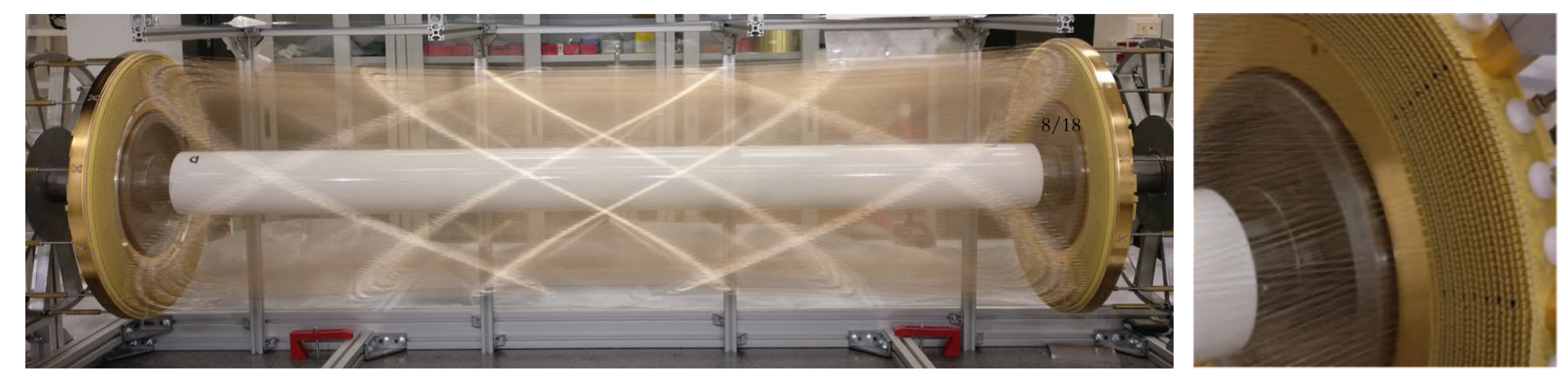
シリコン検出器

- ヒット位置分解能 $\sigma \sim 5-10 \mu\text{m}$
- $N \sim 10$ (崩壊点検出器 + 飛跡検出器)
- 物質質量：20% X_0
- 全シリコン飛跡検出 (崩壊点 + 飛跡)
- 候補技術
 - シリコンピクセル
 - シリコンストリップ

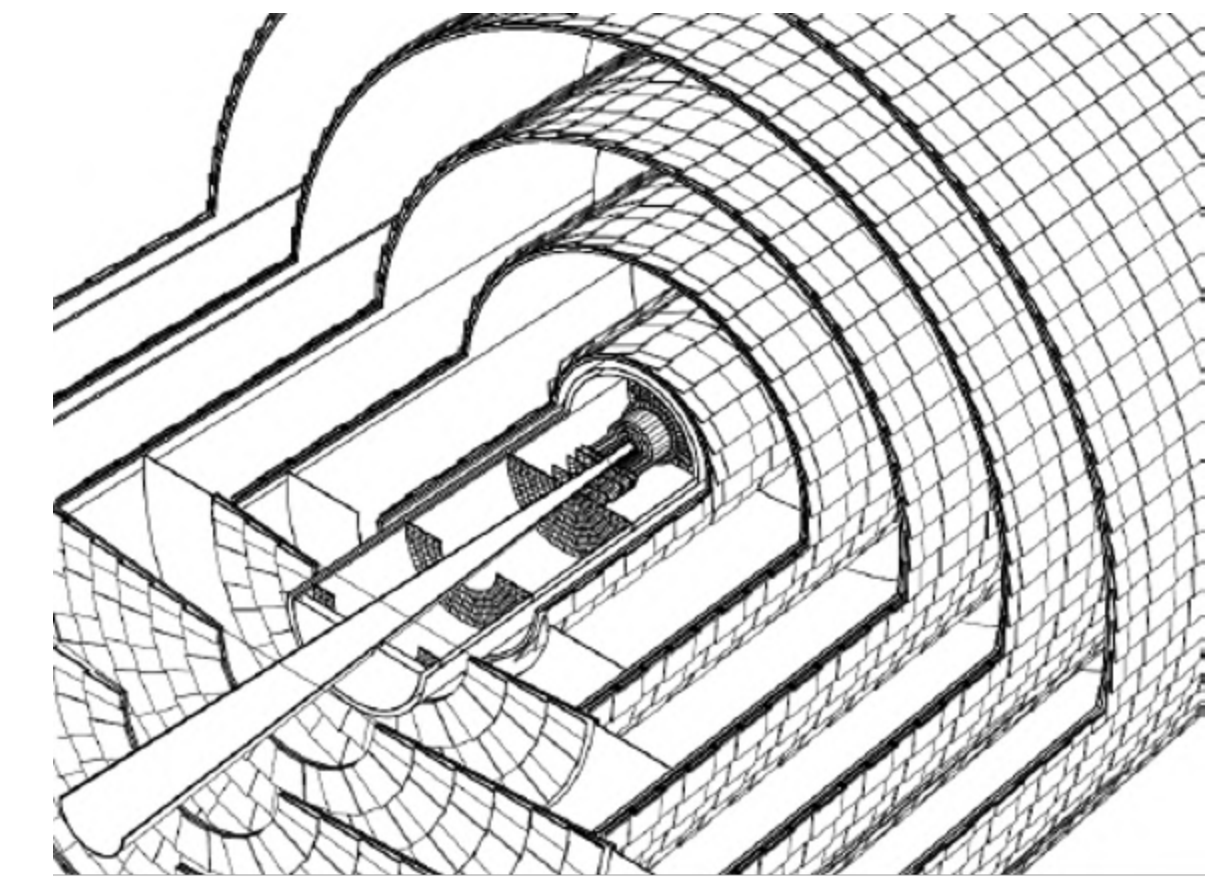
TPC (ILD)



Drift chamber (IDEA)



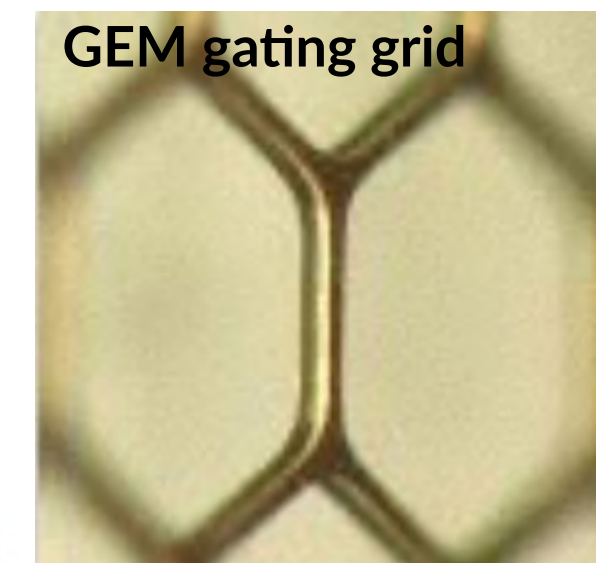
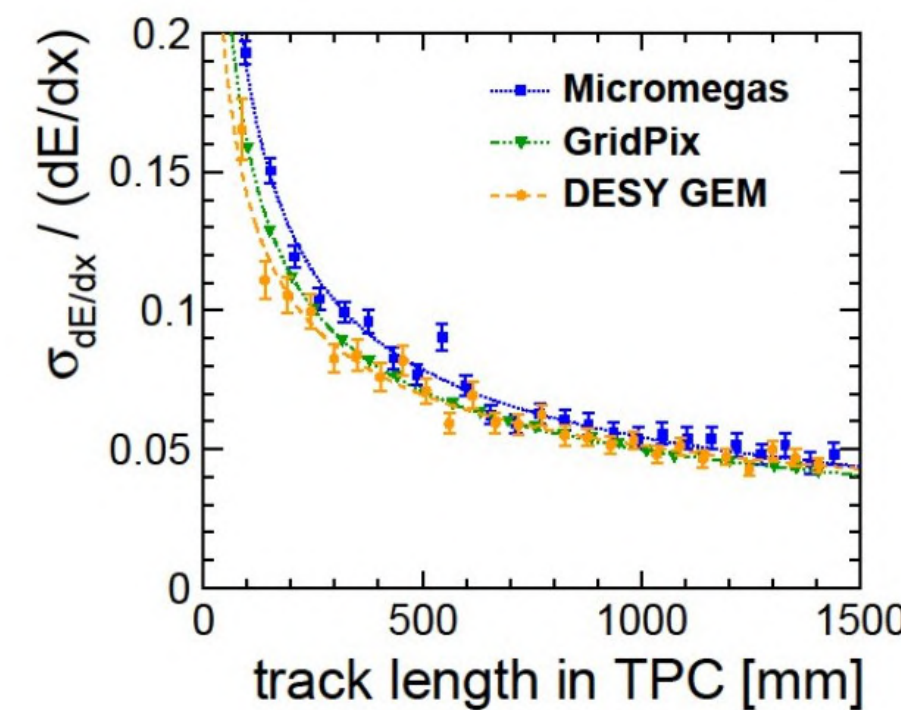
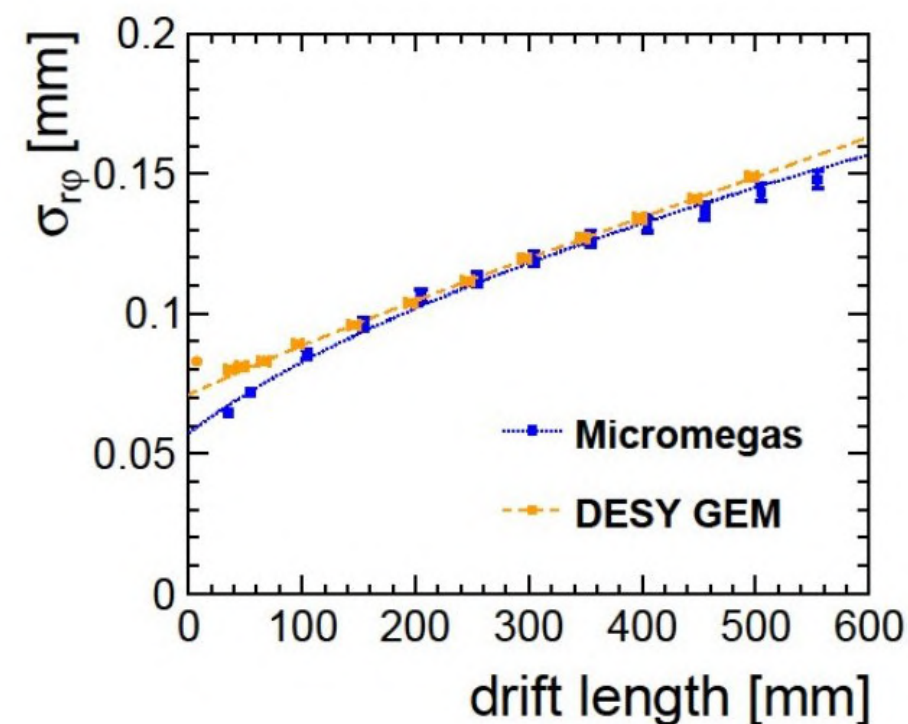
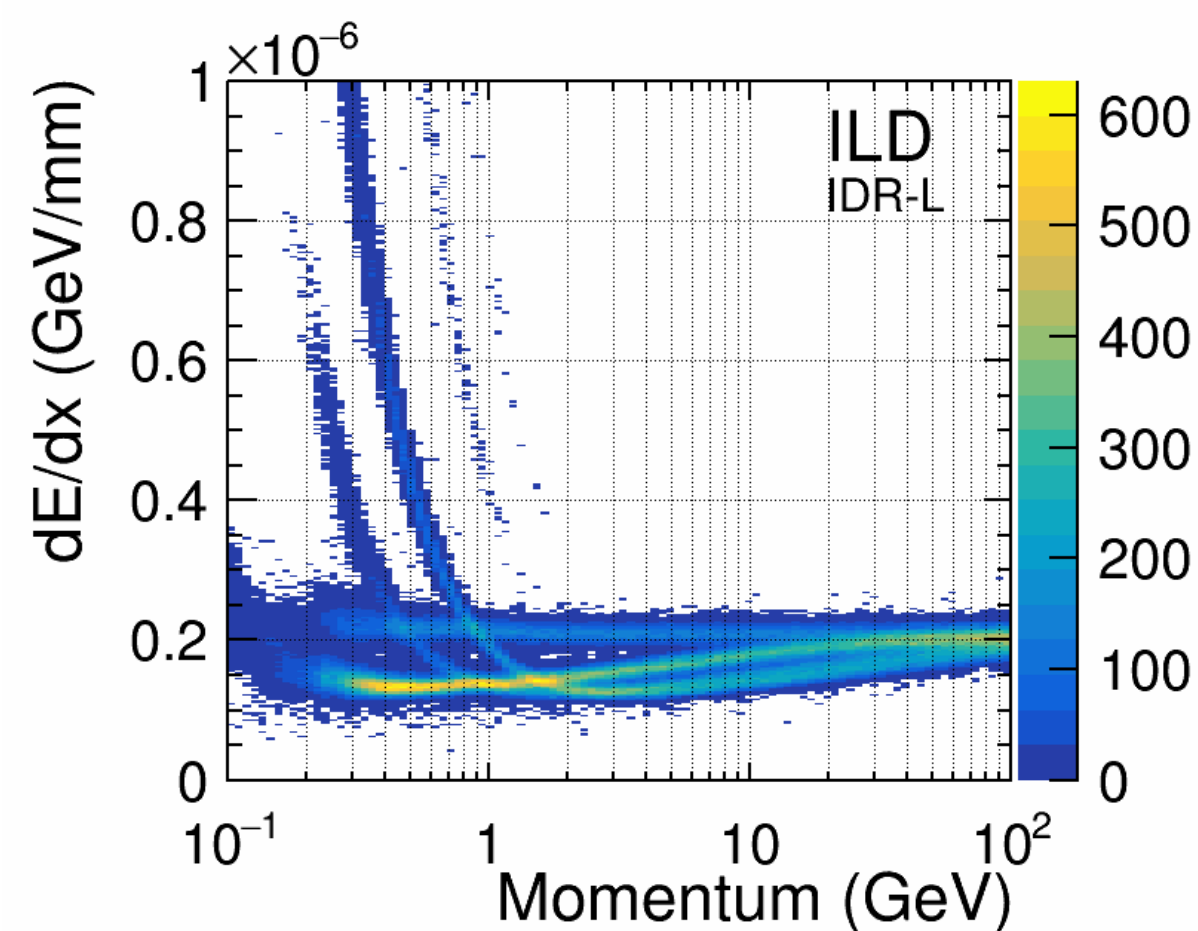
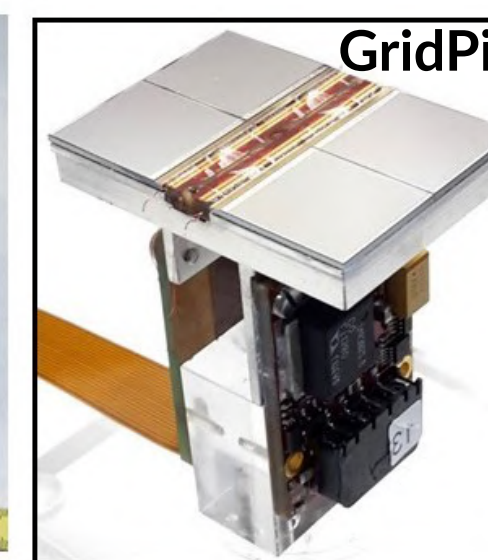
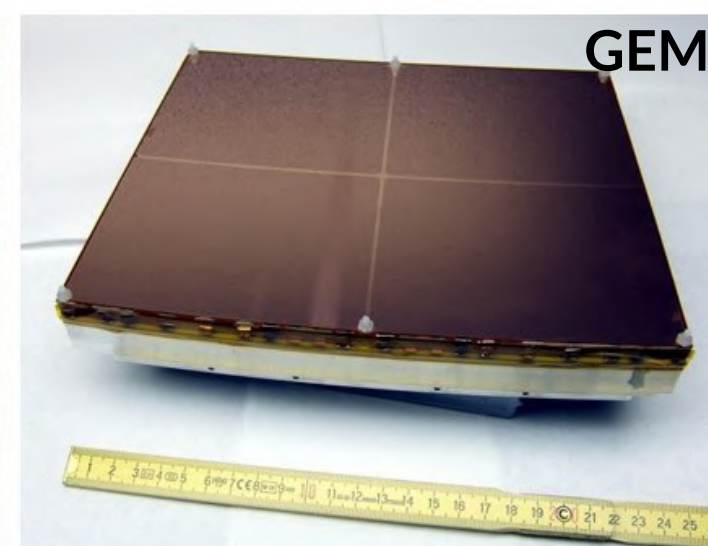
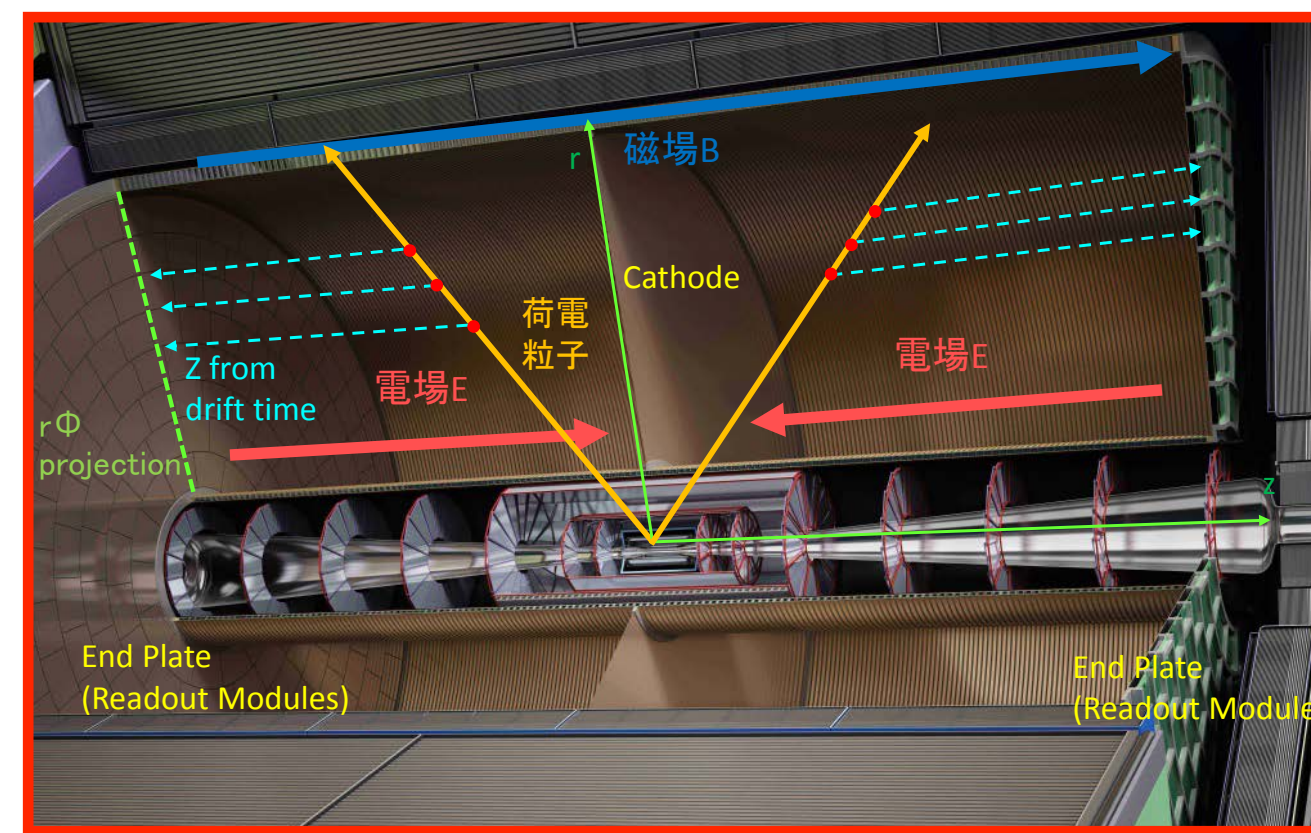
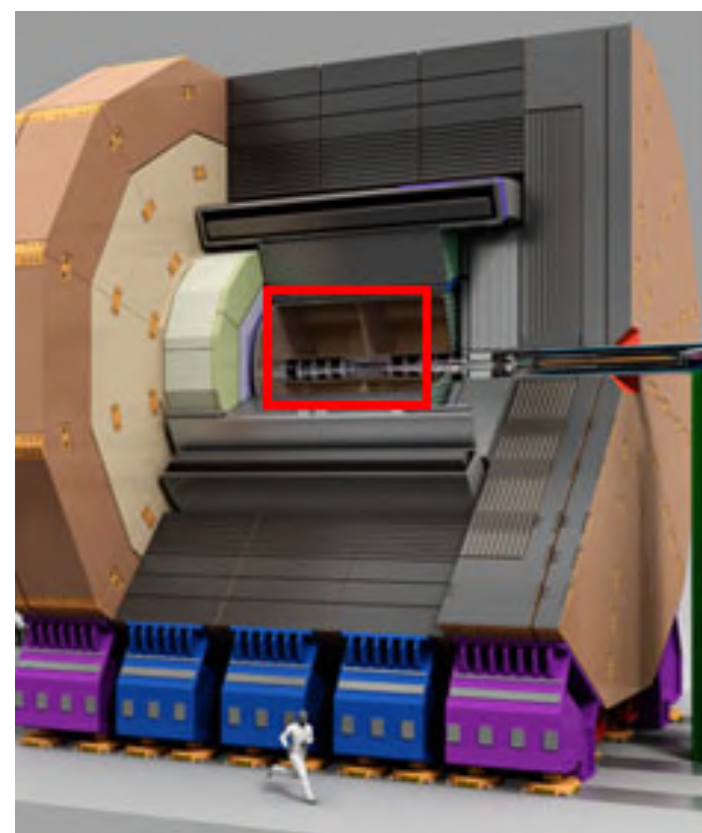
All silicon tracking (SiD)



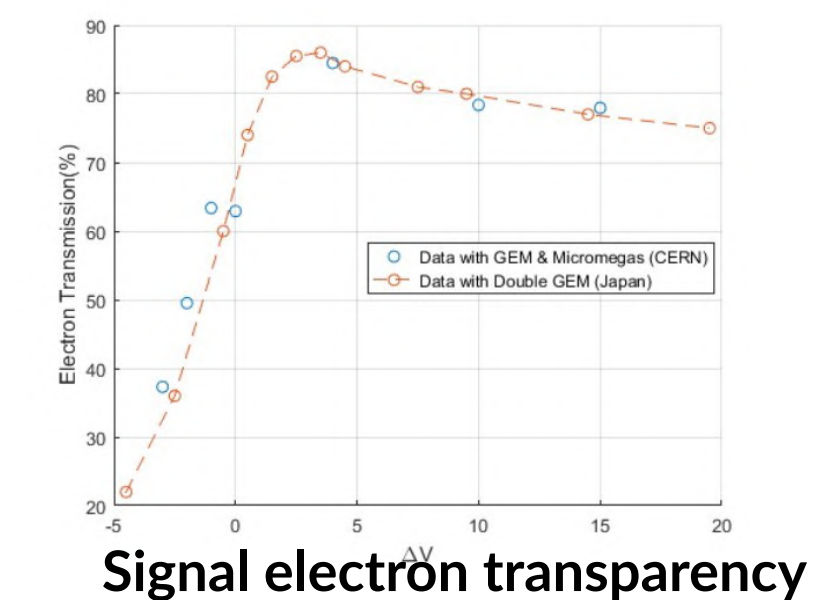
Time Projection Chamber (TPC)

• Time Projection Chamber (TPC) as central tracker

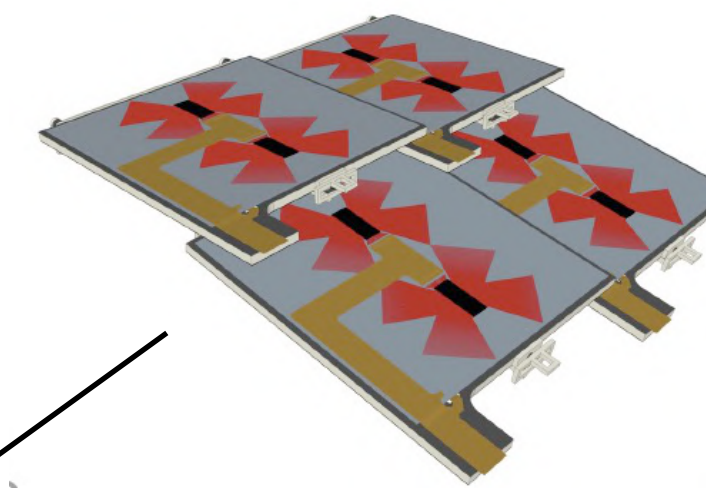
- 3D tracking: $r-\phi$ (track projection) + z (drift time)
- 超低物質質量(barrel region): $\sim 0.05 X_0$
- ヒット数が多い (>200)
- dE/dx による粒子識別(PID)
- 読み出し技術: Micromegas, GEM, pixel
- イオンバックフロー抑制 \rightarrow Gating GEM



Gating GEM



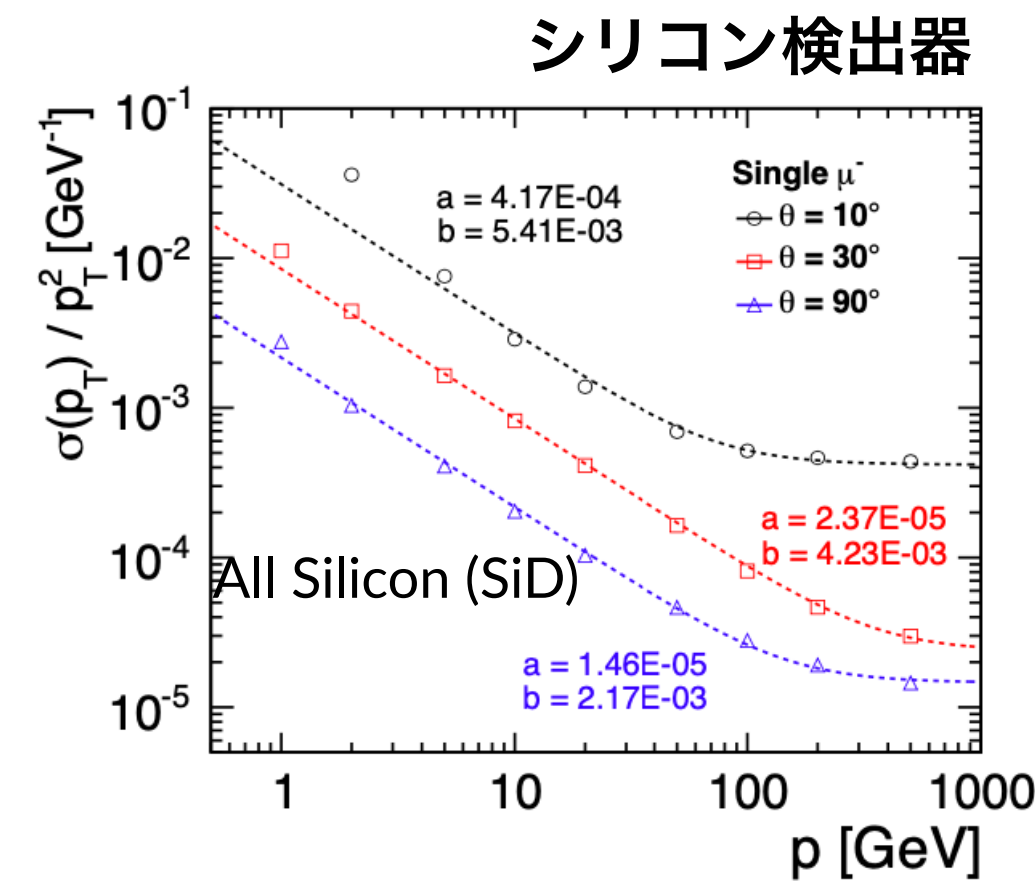
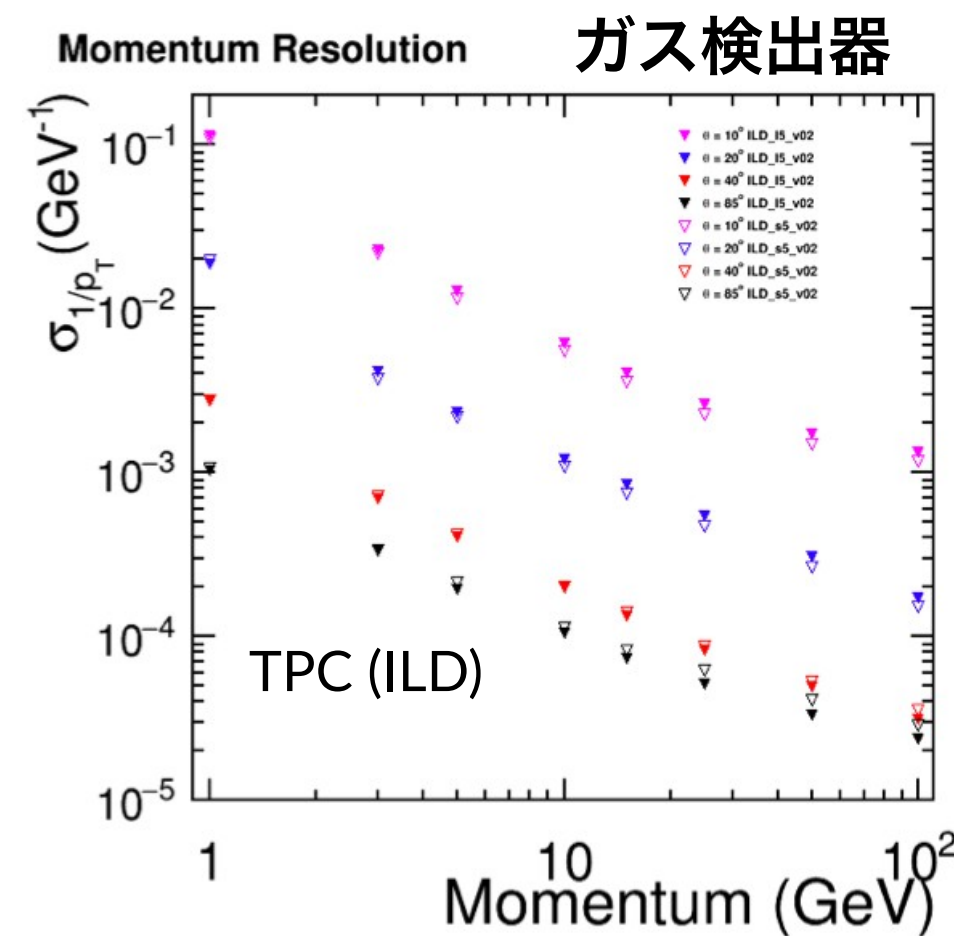
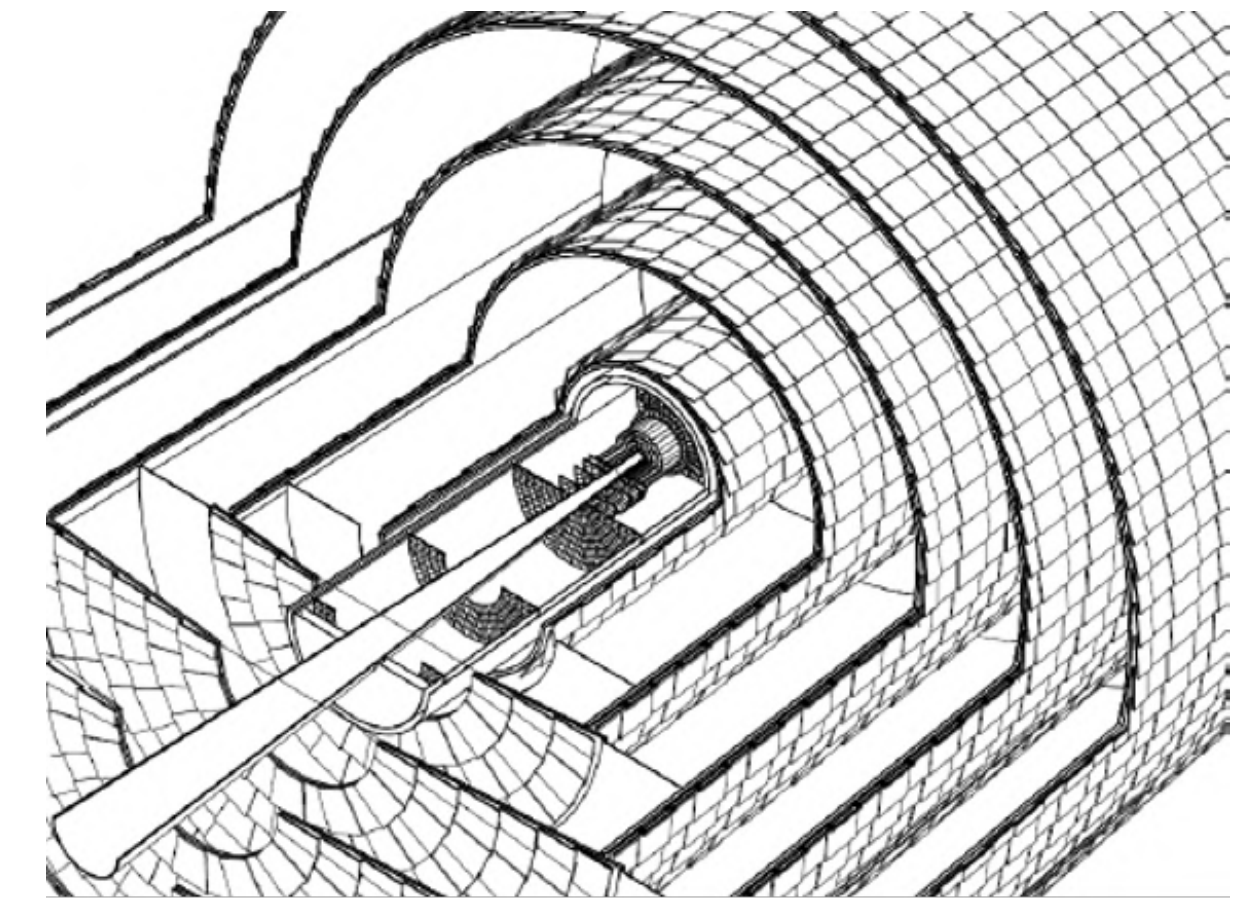
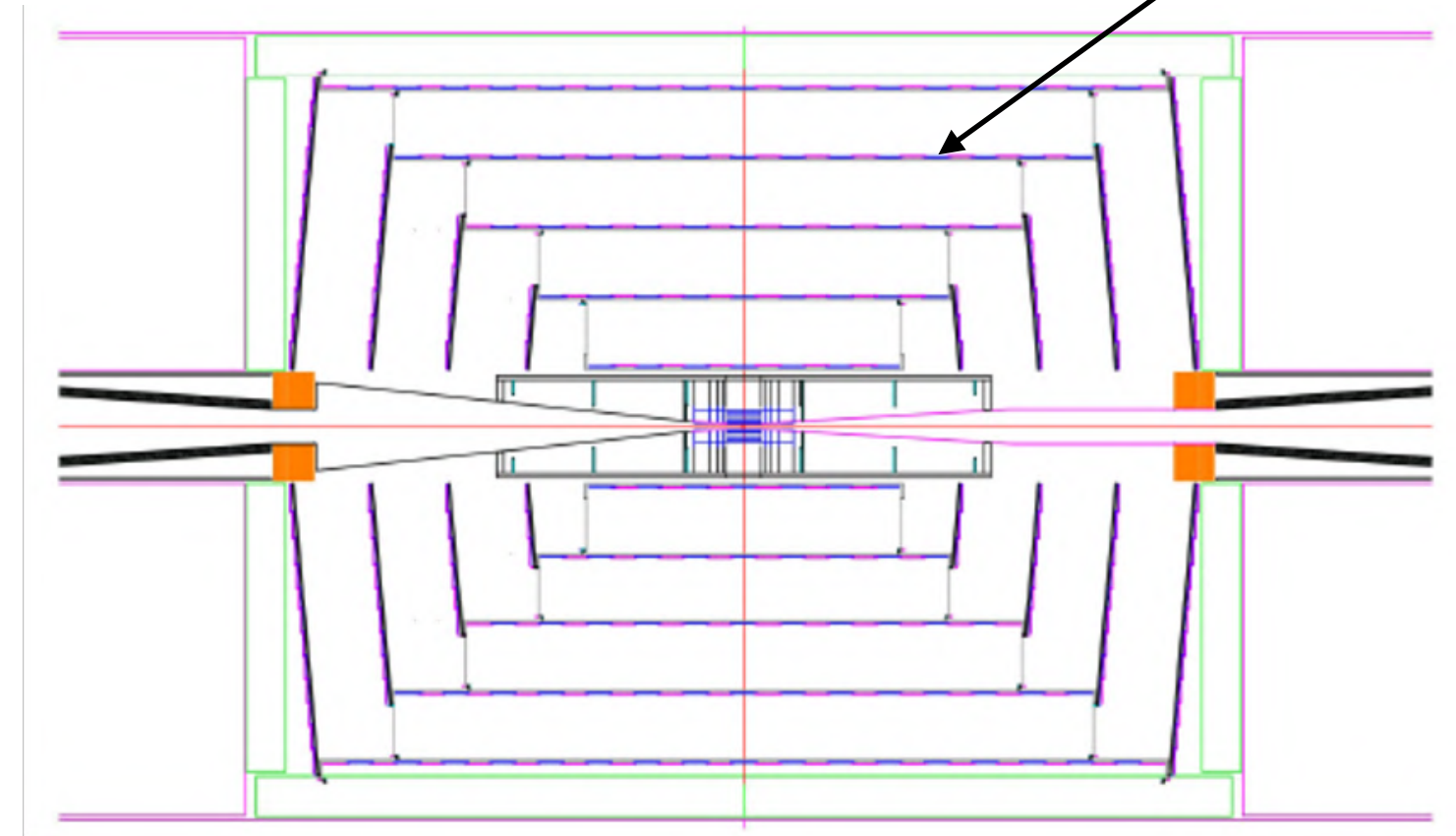
シリコン飛跡検出器(SiD)



オーバーラップで
隙間なく囲む

シリコン飛跡検出器@SiD

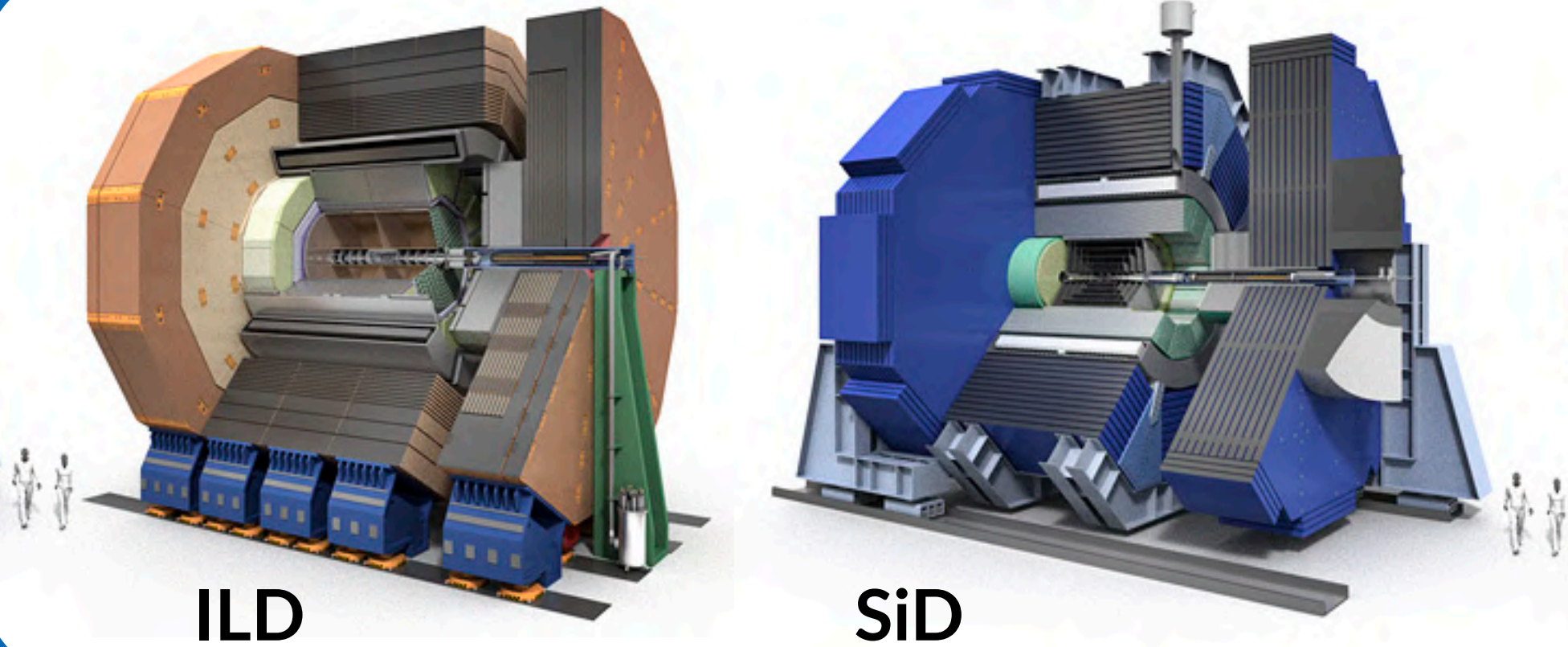
- シリコンストリップセンサー
 - センサーサイズ：10cm x 10cm
 - 25 μm sense; 50 μm readout pitch
 - ヒット位置分解能 $\sim 5\mu\text{m}$
- 5層 (飛跡検出器) + 5層 (崩壊点検出器)
- 物質厚: $\sim 0.2 X_0$ (崩壊点 + 飛跡検出器)
- 読み出し：KPIX ASIC



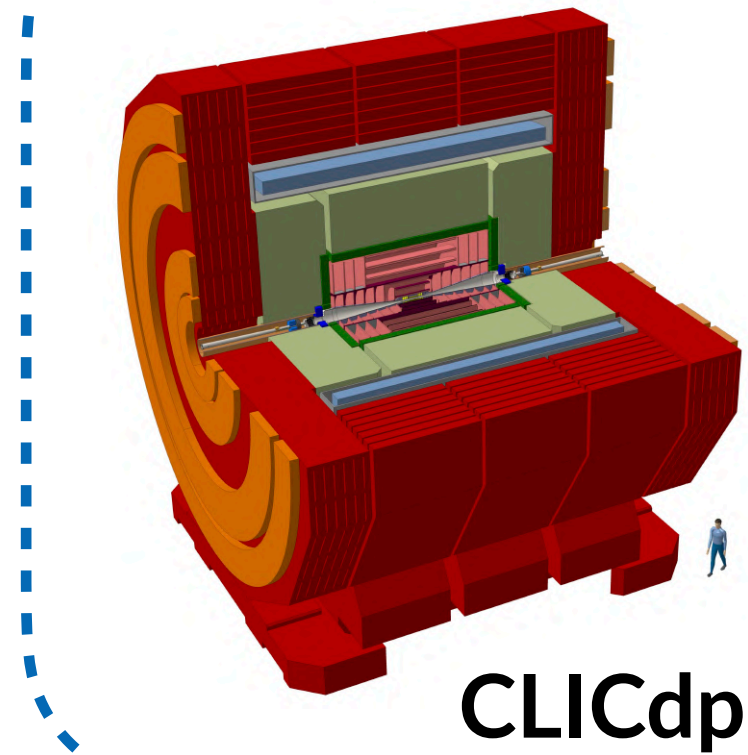
どちらも要求性能を満たす運動量分解能

カロリメータ

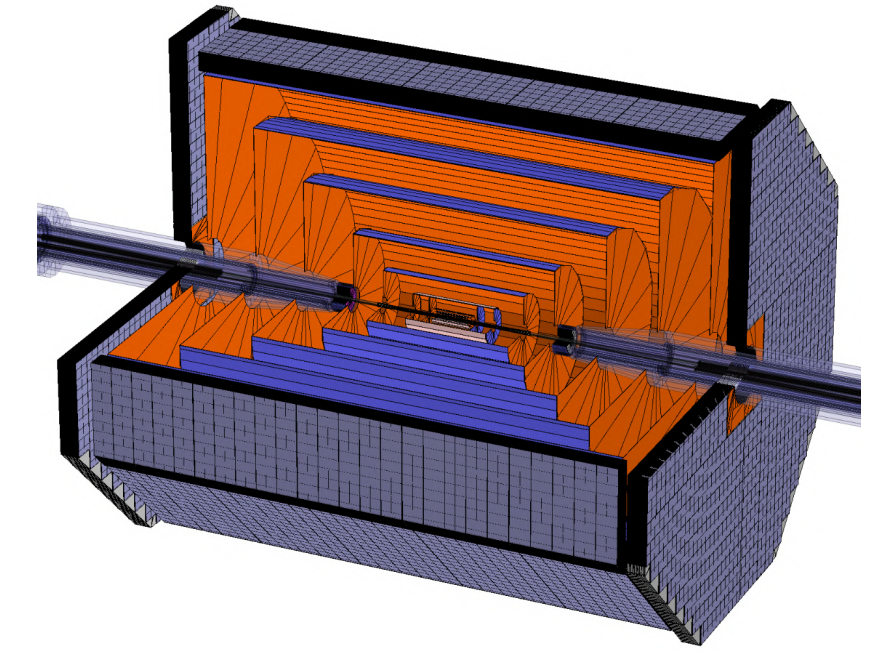
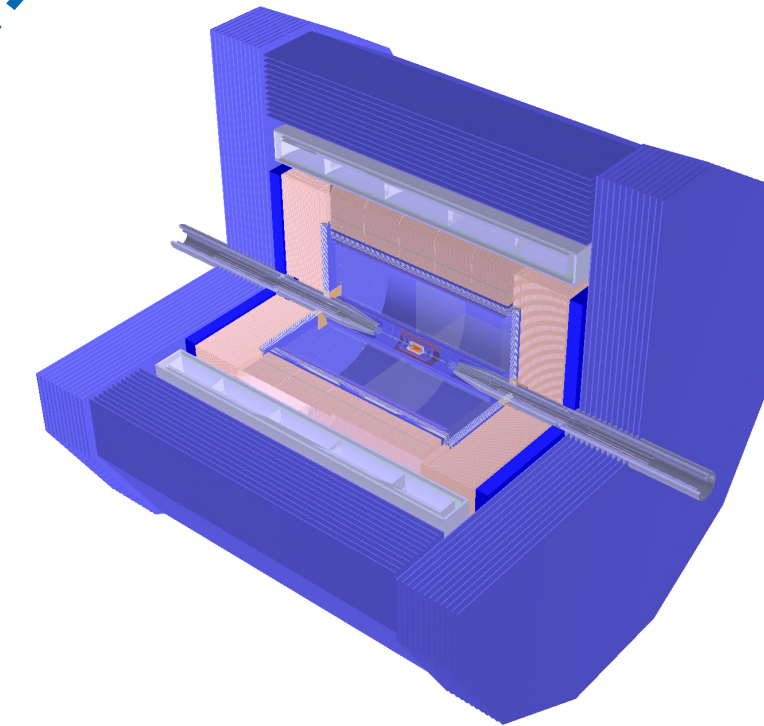
ILC



CLIC



CEPC



ILD

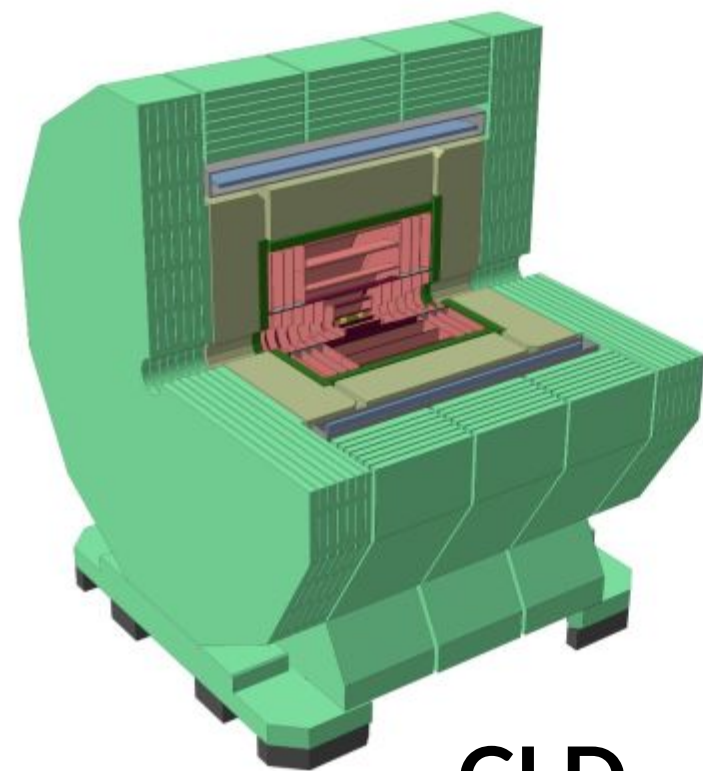
SiD

CLICdp

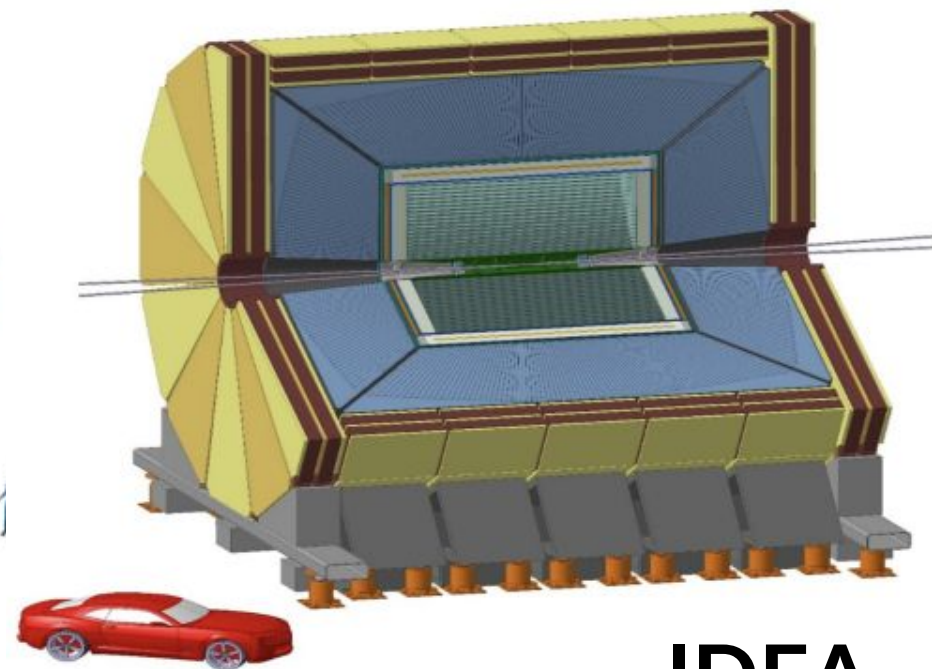
FST

FCC-ee

Baseline



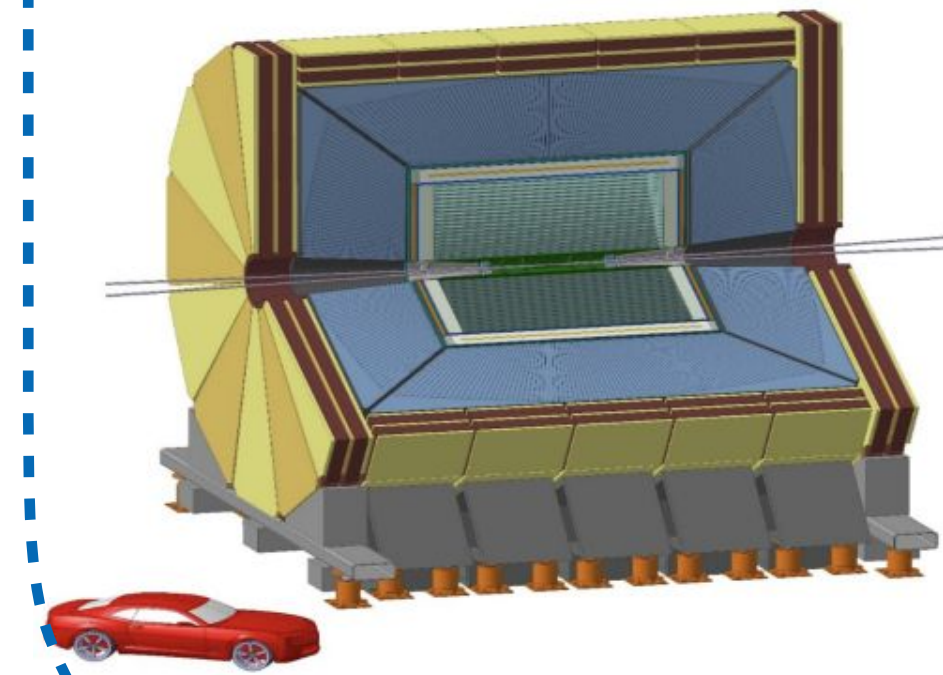
CLD



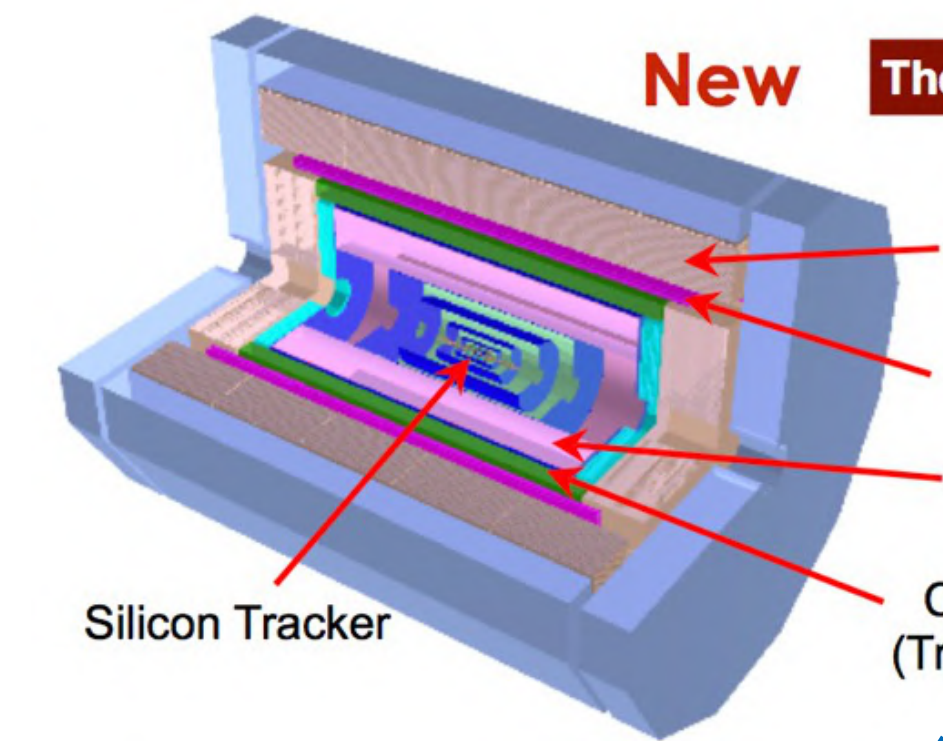
IDEA



ALLEGRO



IDEA



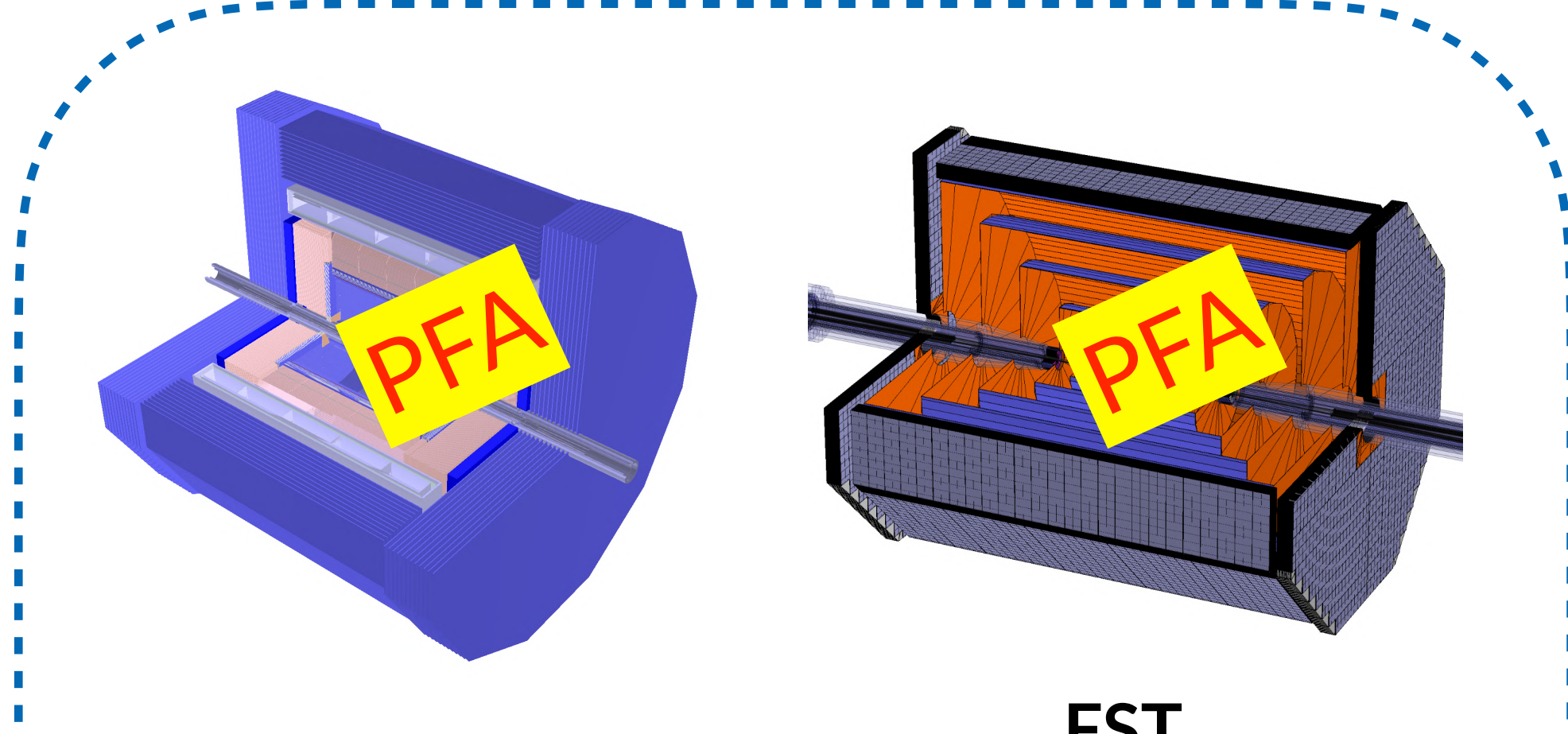
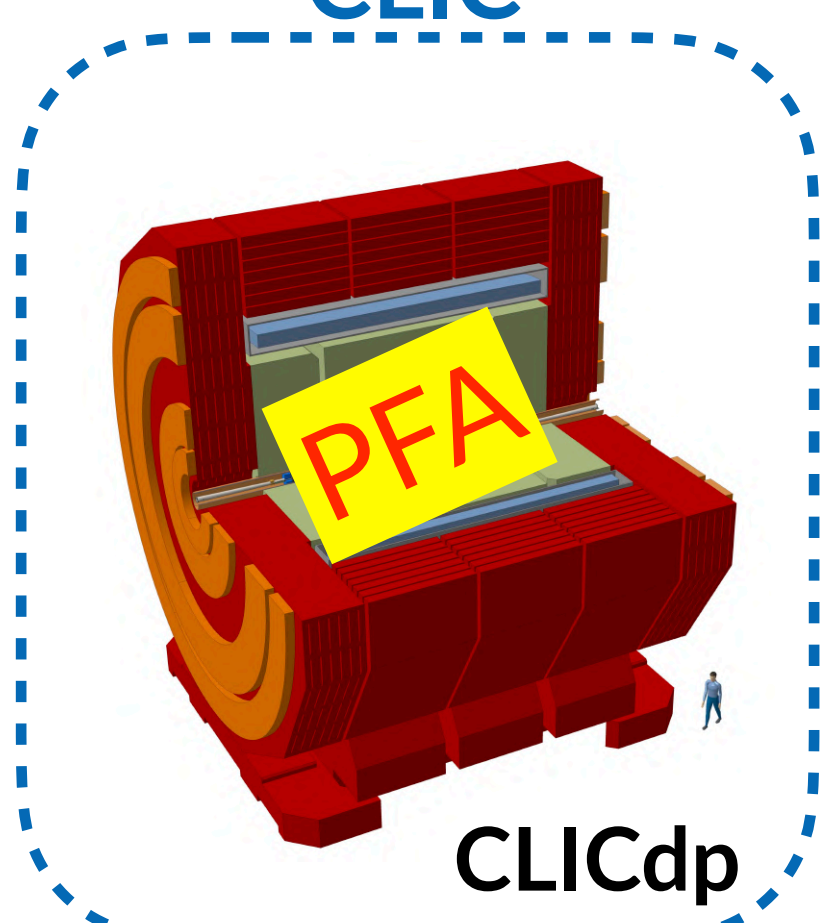
4th Concept

カロリメータ

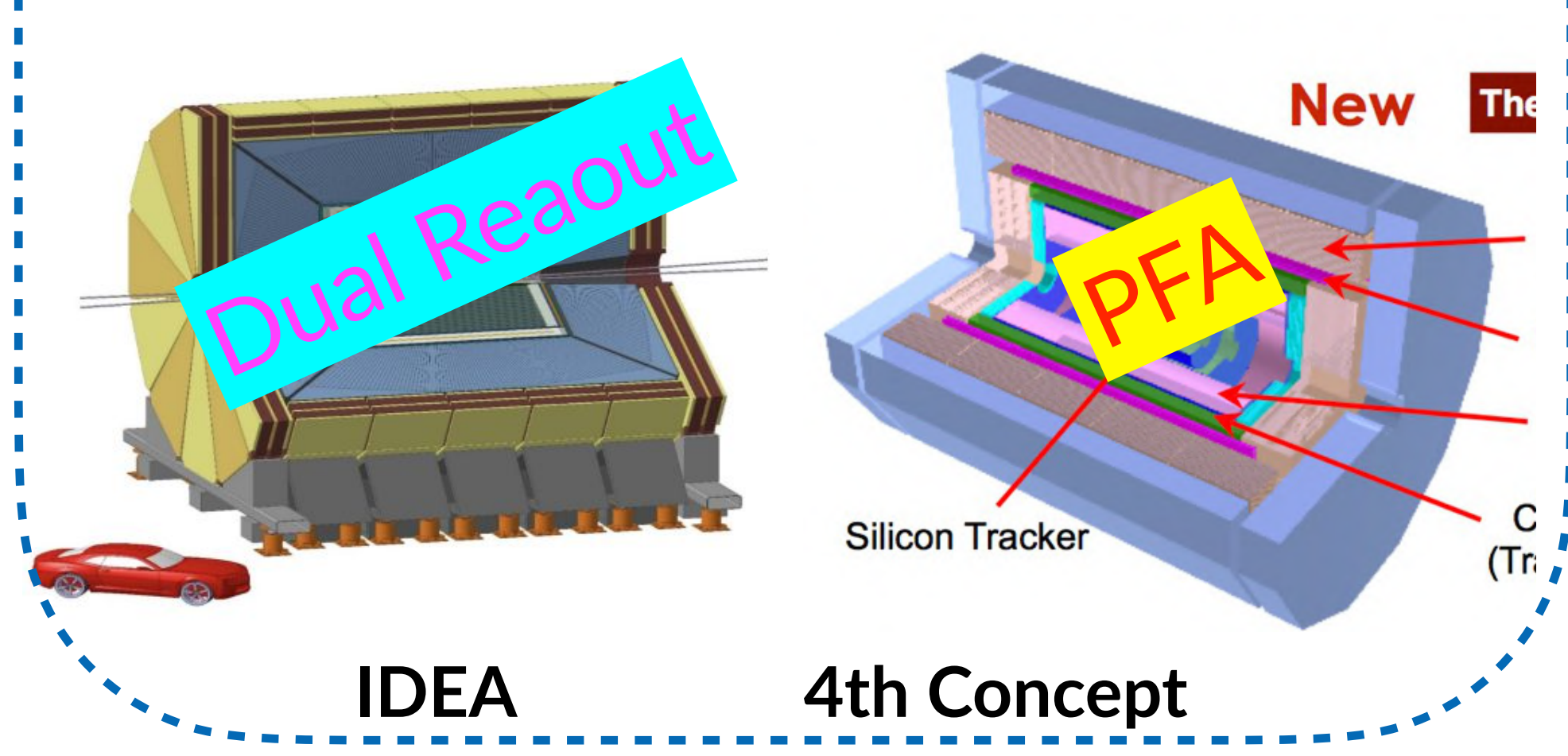
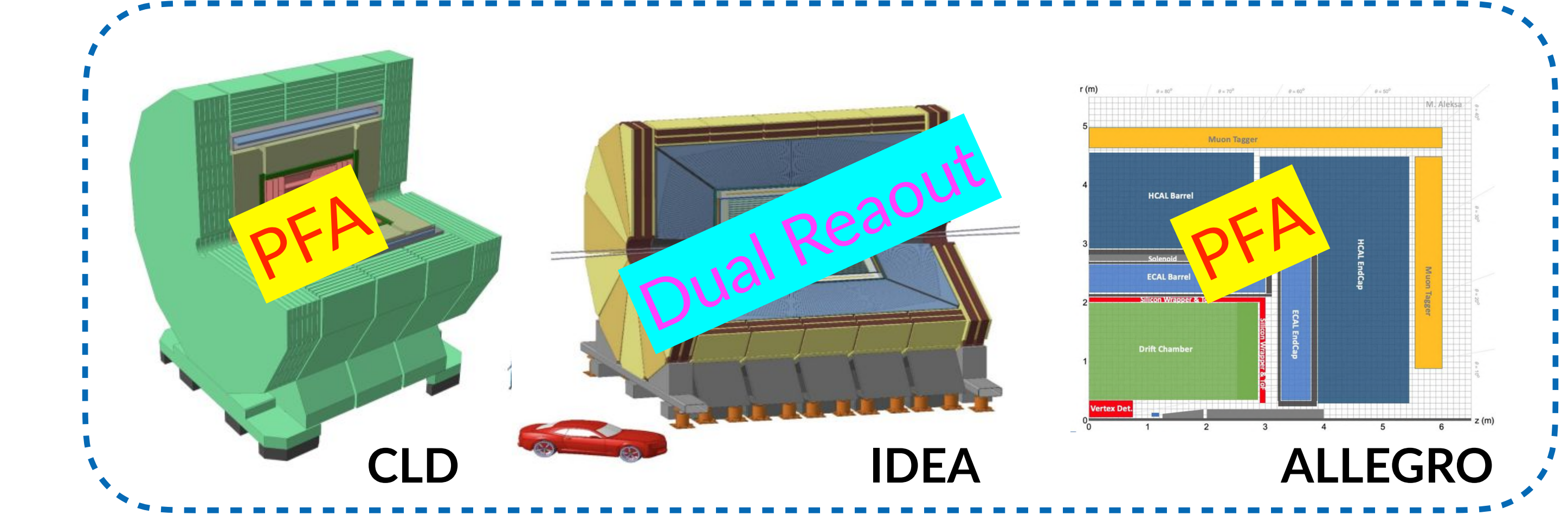
ILC

CLIC

CEPC



FCC-ee



主要なカロリメータ技術: **Particle Flow Approach (PFA)** & **Dual-readout**

カロリメータ：Particle Flow Approach (PFA)

●典型的なジェットの構成

- 荷電ハドロン (64%), フォトン (25%), 中性ハドロン (11%)

●これまでのカロリメータ

- ジェットエネルギーの~70%を分解能が良くないHCALで測定

●Particle Flow Approach (PFA)

- 粒子タイプに応じて最適な測定器でエネルギー測定
 - 荷電粒子 → 飛跡検出器, フォトン → ECAL, 中性ハドロン → HCAL

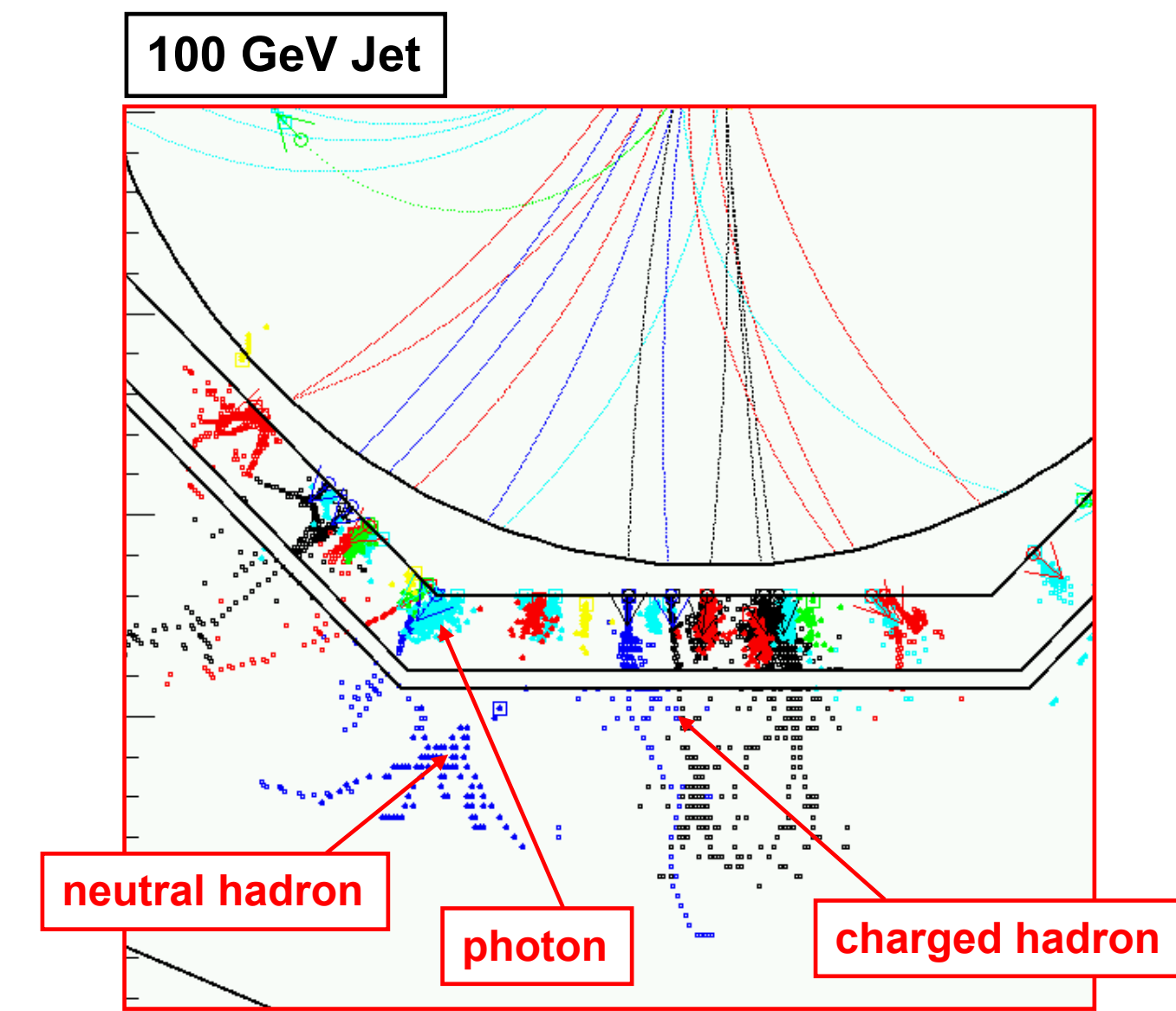
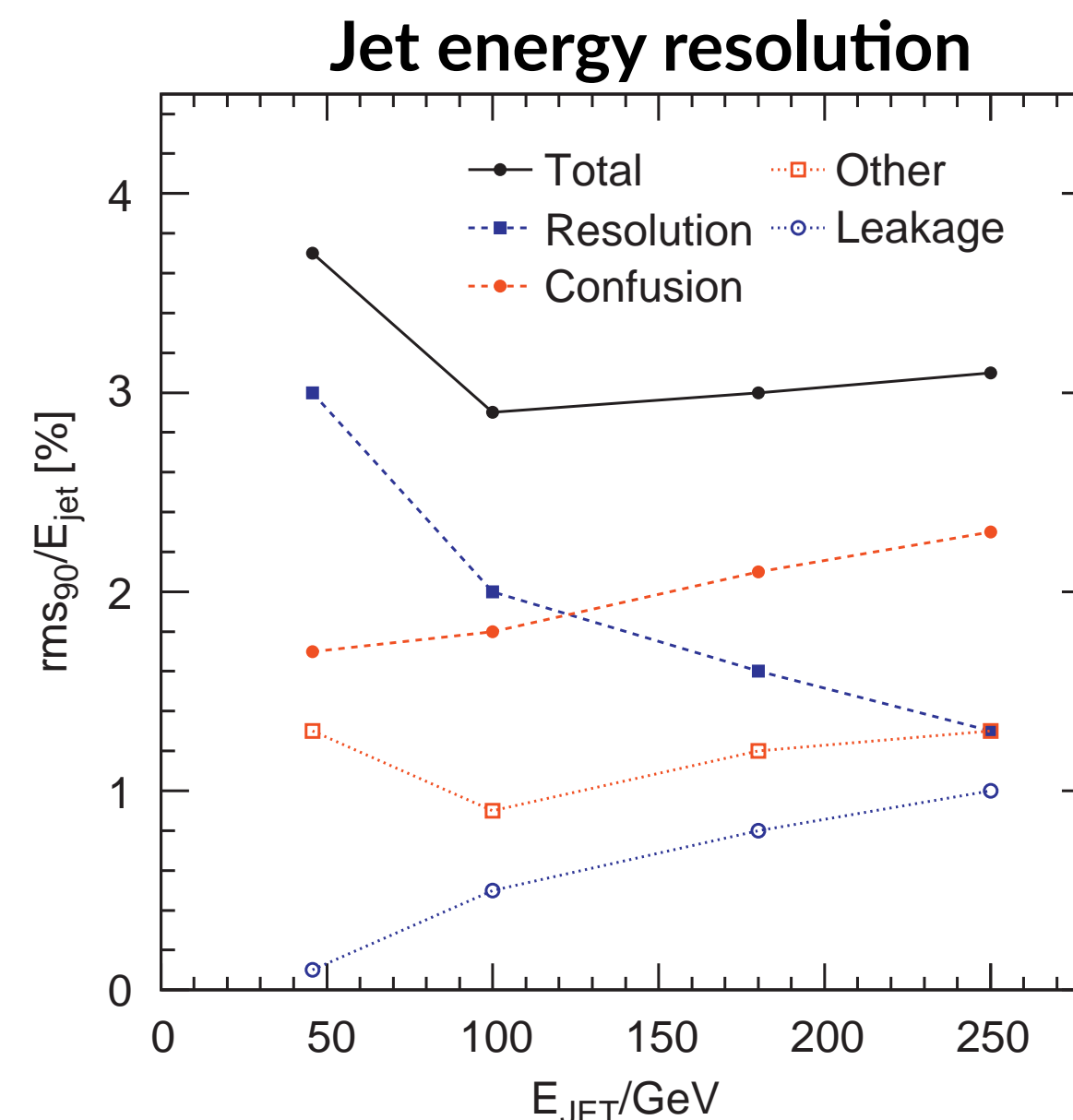
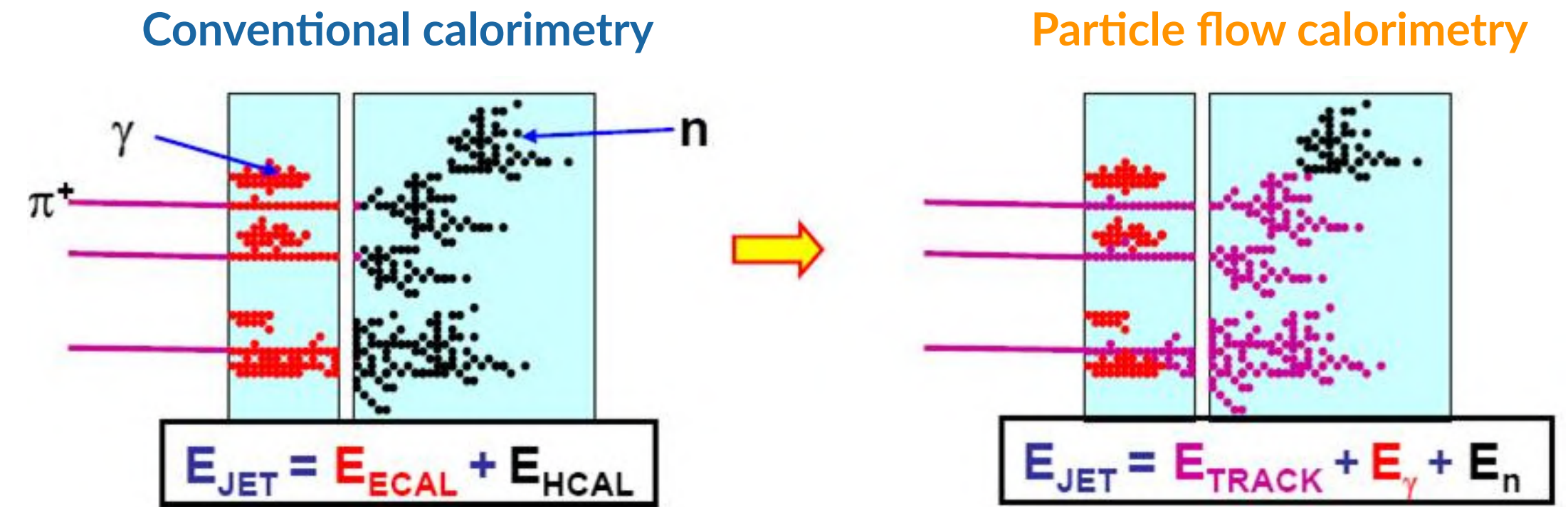
- HCALが測るのはジェットエネルギーの10%のみ

→ ジェットエネルギー分解能の大幅改善

- 広いエネルギー範囲で**3-4%のジェットエネルギー分解能**を実現

可能 $\frac{\sigma(E)}{E} \sim \frac{30\%}{\sqrt{E[\text{GeV}]}}$ ~LHC/2, ~LEP/2

- カロリメータにおけるそれぞれの粒子の寄与を分離するため**これまでにない粒度(granularity)**を持ったカロリメータが必要



- PFAのための高精細カロリメータ開発は国際コラボレーション**CALICE**で行われてきた(昨年DRDに移行)
- さまざまな技術オプションによるPFAカロリメータが開発されている

●Silicon sensor for ECAL

- Cell size 5×5mm² (even smaller for MAPS option)

●Scintillator + SiPM for ECAL/HCAL

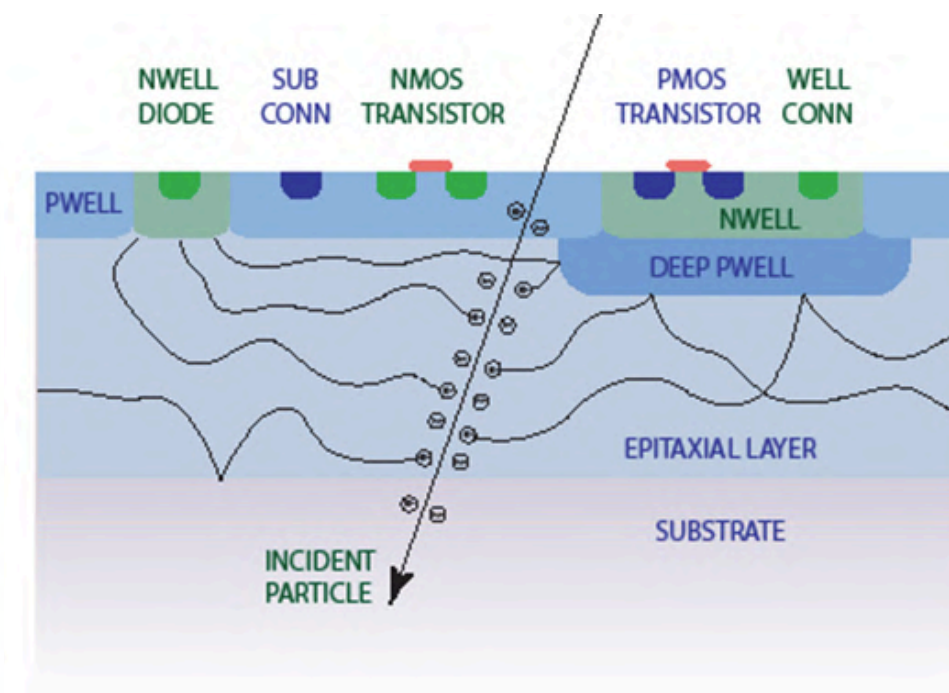
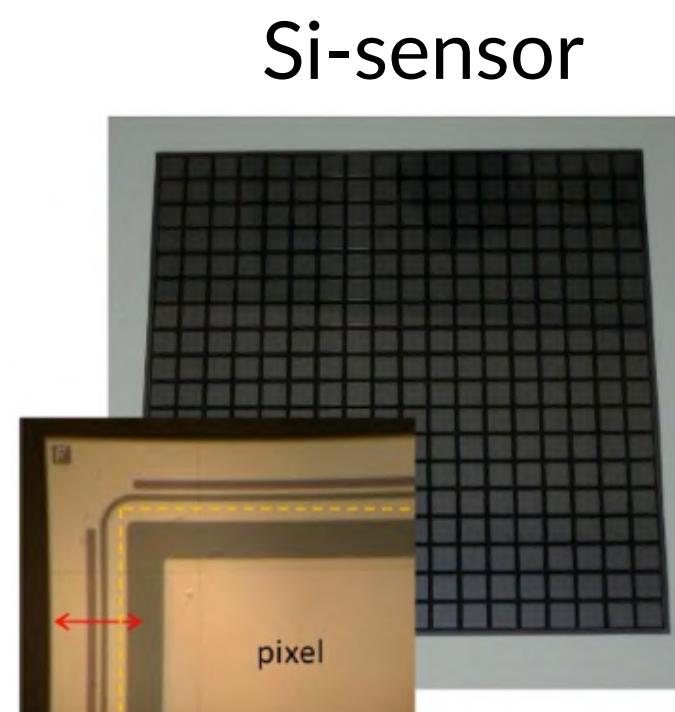
- Cell size 5×5mm² (ECAL), 30×30mm² (HCAL)

●Gaseous detector (GRPC, MPGDs) for HCAL

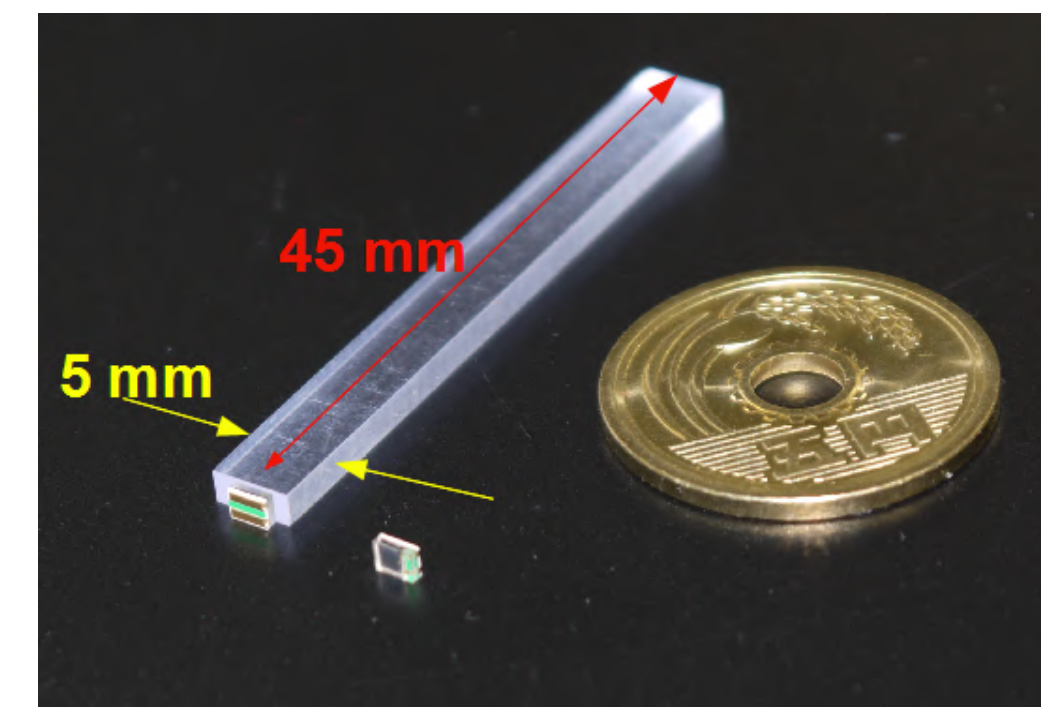
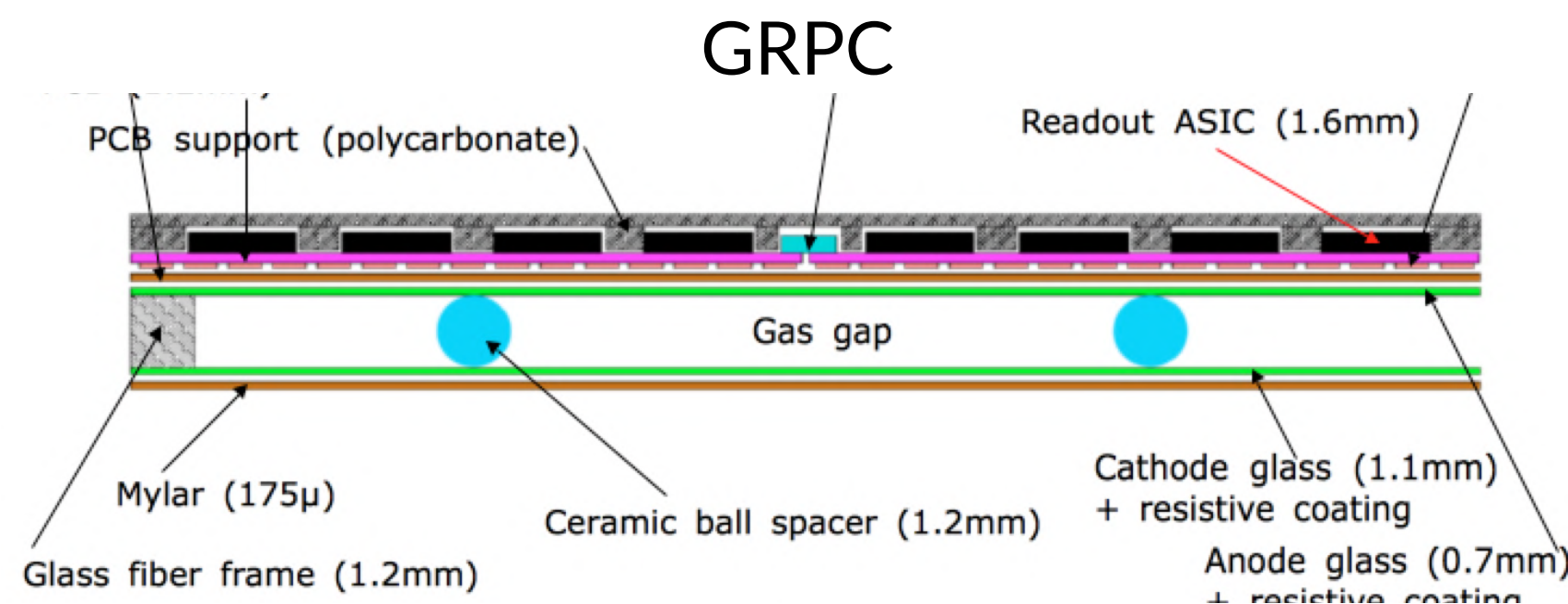
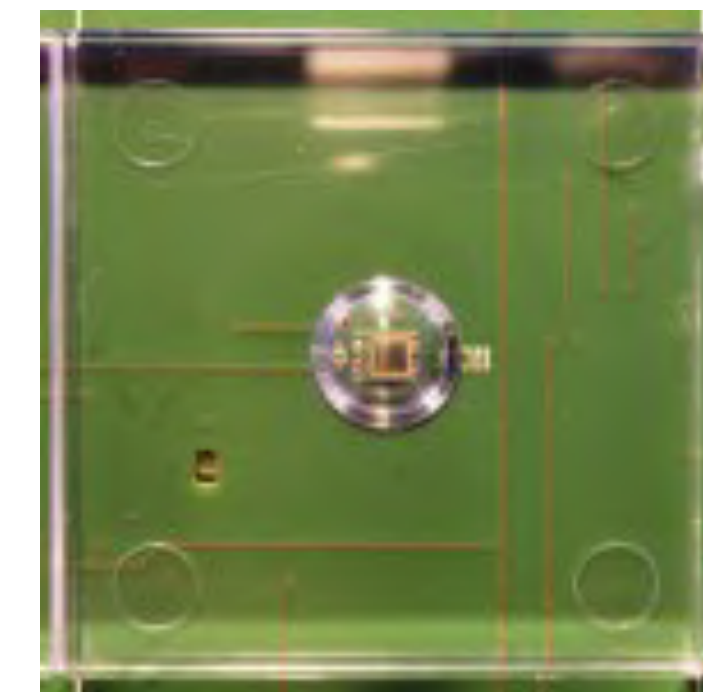
- Cell size 10×10mm²

●Front-end ASIC

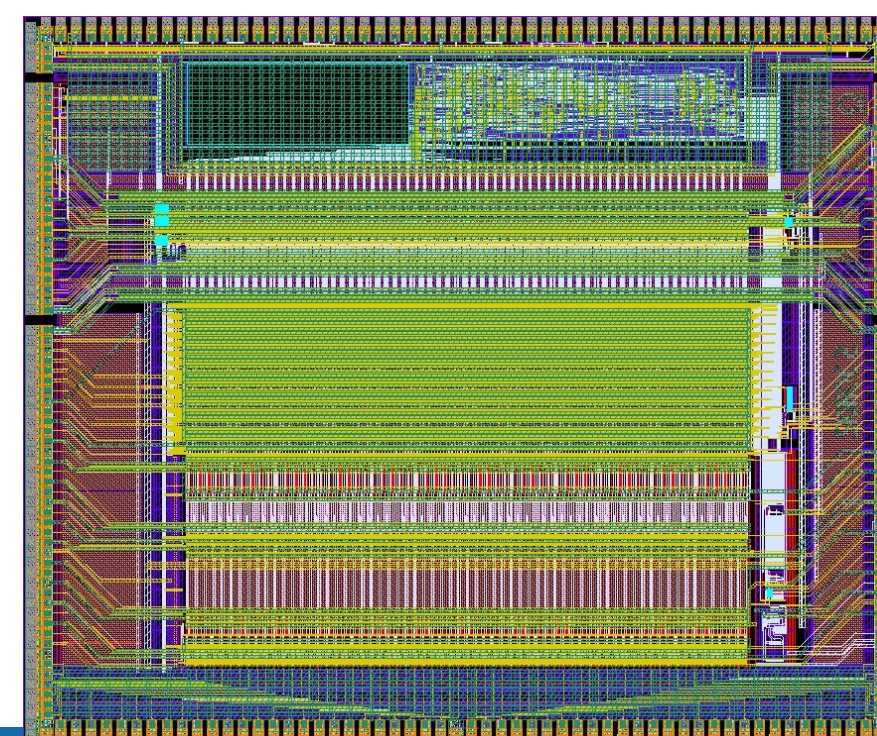
- 組み込み型読み出しエレキ
- ASICチップ開発 by Omega group
 - SKIROC(Si), SPIROC(SiPM), HARDROC(GRPC)



Scintillator+SiPM



ASIC (SKIROC chip)



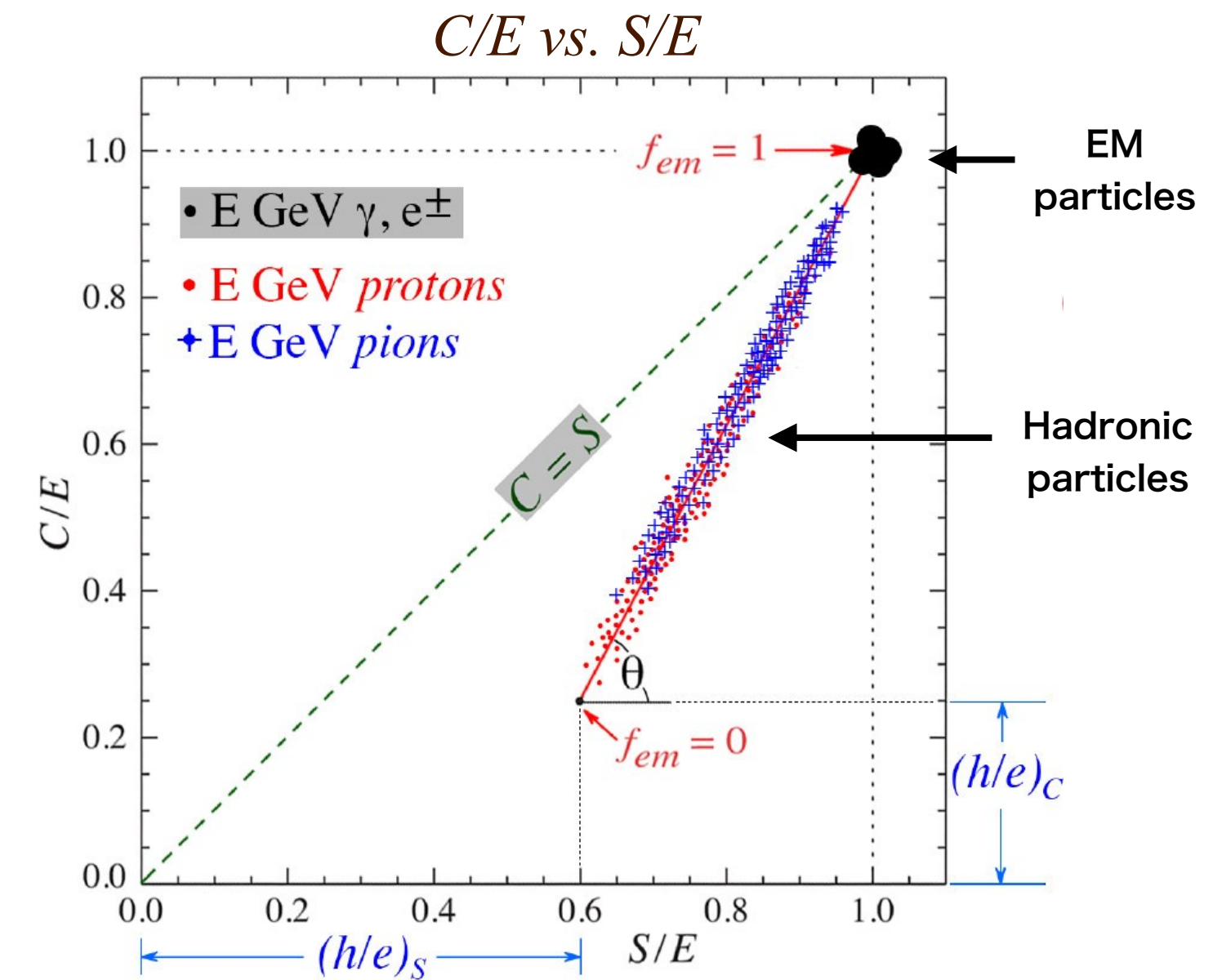
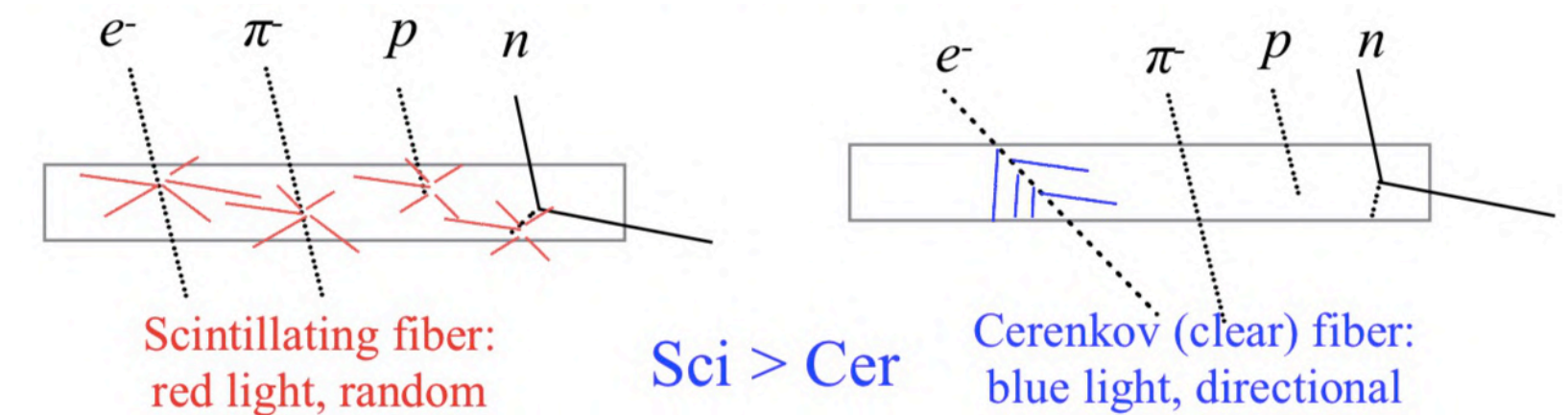
カロリメータ：Dual-Readout

ハドロンカロリメータの難しさ

- ハドロンシャワー = 電磁成分 + ハドロン成分
- 電磁成分の比率が事象毎に大きく変動
- 通常のカロリメータは電磁成分とハドロン成分に対する感度が異なる ($e/h \neq 1$)
→ ハドロンカロリメータの分解能を大きく制限

Dual readout

- 異なる e/h を持つチェレンコフ検出器とシンチレーション検出器で同時にハドロンシャワーを測定。その信号の比率から電磁成分の比率を事象毎に測定
- 粒子識別にも使える可能性



Y. Kim, EIC Calorimeter Workshop 2021

$$\begin{cases} S = E \cdot [f_{em} + \left(\frac{h}{e}\right)_s (1 - f_{em})] \\ C = E \cdot [f_{em} + \left(\frac{h}{e}\right)_c (1 - f_{em})] \end{cases} \quad \Rightarrow \quad E = \frac{S - \chi C}{1 - \chi} \quad \left(\chi = \frac{1 - \left(\frac{h}{e}\right)_s}{1 - \left(\frac{h}{e}\right)_c} \right)$$

- $\left(\frac{h}{e}\right)_s, \left(\frac{h}{e}\right)_c$: Conversion efficiency of Non-EM signals to EM signals (independent with energy and particle type).
- E : Initial particle energy.
- f_{em} : Energy ratio of EM component to E .

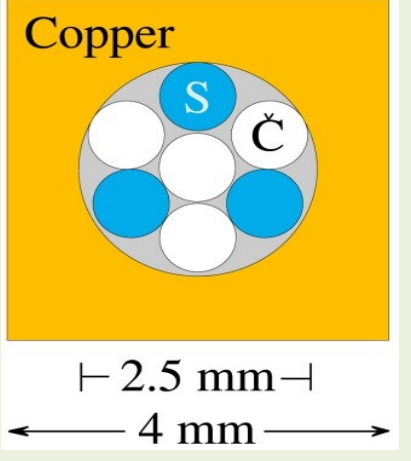

カロリメータ：Dual-Readout

• DREAMコラボレーション/CERN RD52コラボレーションで開発 (DRD6に移行)

- 吸収体(Cu or Pb)に埋め込んだシンチレーションファイバー+クォーツファイバー

2003 DREAM

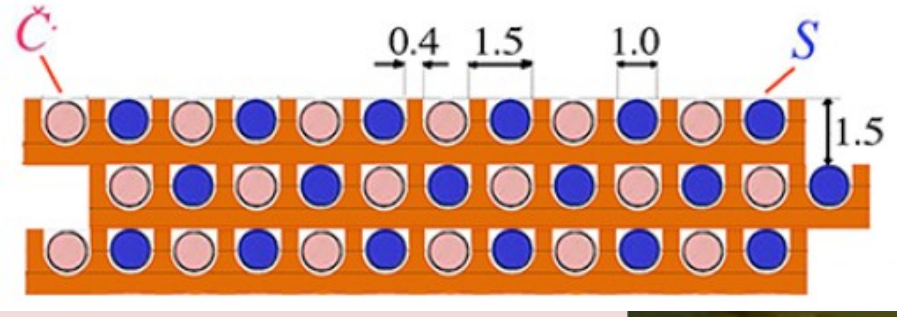
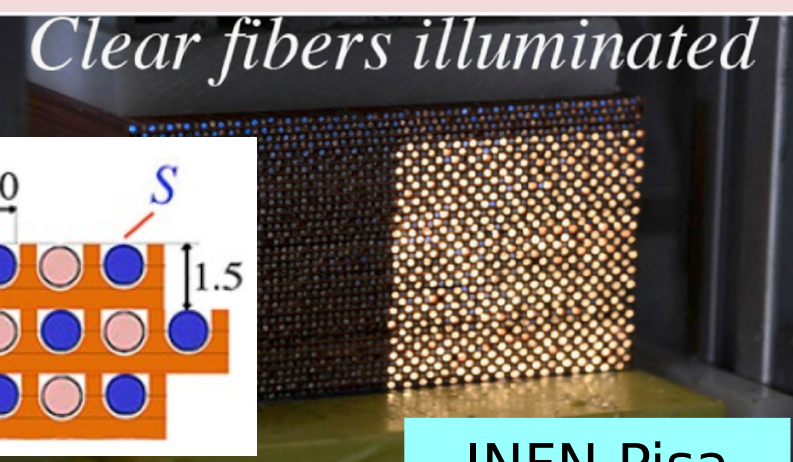
Cu: 19 towers, 2 PMT each
2m long, 16.2 cm wide
Sampling fraction: 2%

Texas Tech Uni

2012 RD52

Cu, 2 modules
Each module: $9.2 \times 9.2 \times 250 \text{ cm}^3$
Fibers: 1024 S + 1024 C, 8 PMT
Sampling fraction: ~4.6%
Depth: $\sim 10 \lambda_{\text{int}}$

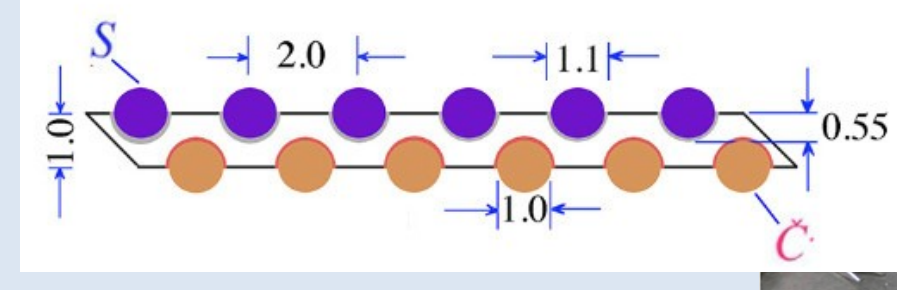




Clear fibers illuminated

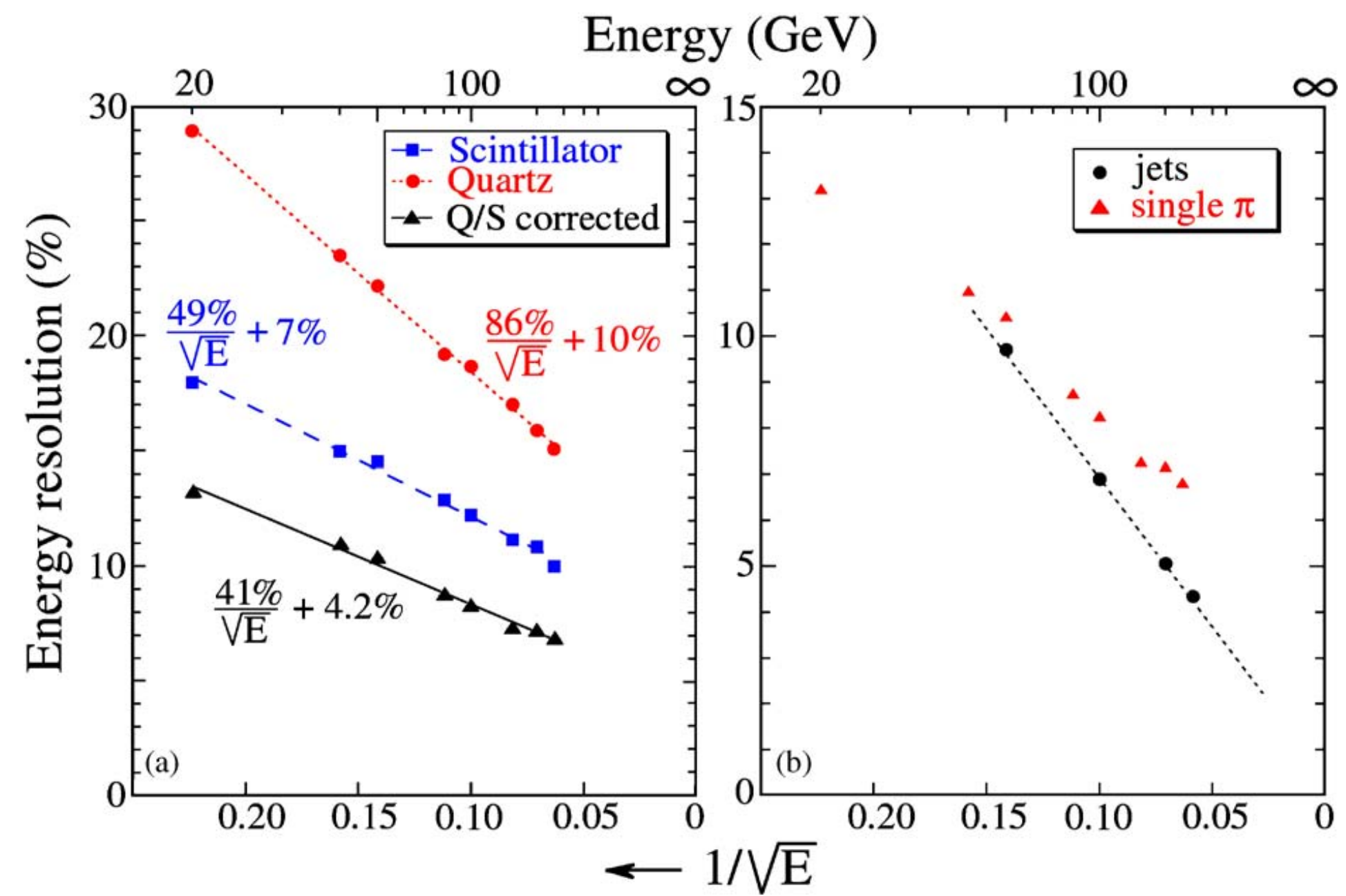
INFN Pisa

2012 RD52

Pb, 9 modules
Each module: $9.2 \times 9.2 \times 250 \text{ cm}^3$
Fibers: 1024 S + 1024 C, 8 PMT
Sampling fraction: ~5.3%
Depth: $\sim 10 \lambda_{\text{int}}$

INFN Pavia



NIM A 537 (2005) 537

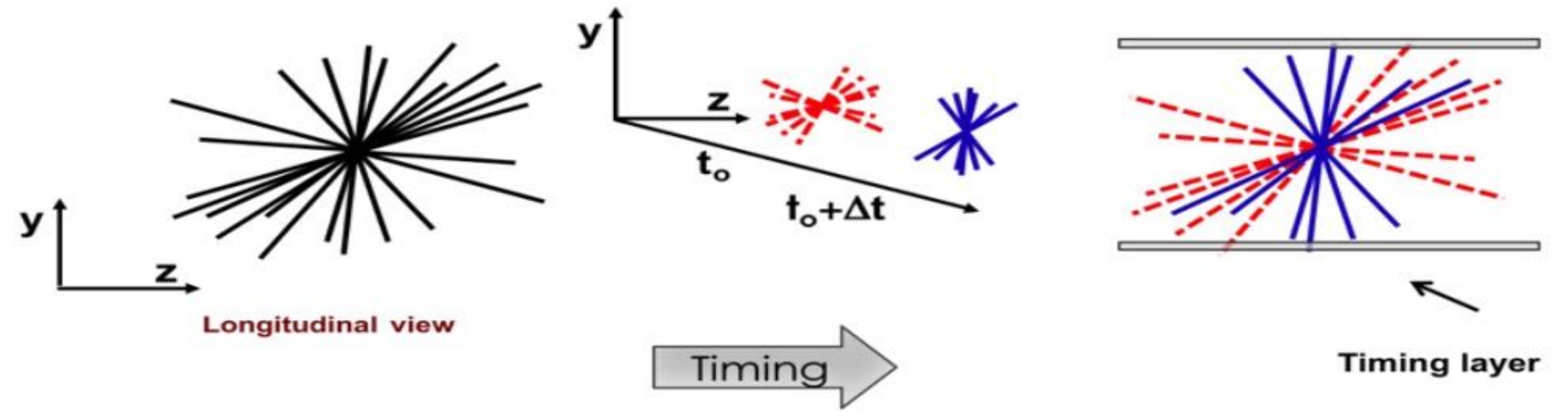
R. Ferrari, EIC Calorimeter Workshop 2021

新しい技術の導入：時間分解能

高時間分解能の導入

- 4次元飛跡再構成
- 飛行時間測定により粒子識別能力の向上
- 5次元カロリメータ
- パイルアップやBGの抑制

4D tracking

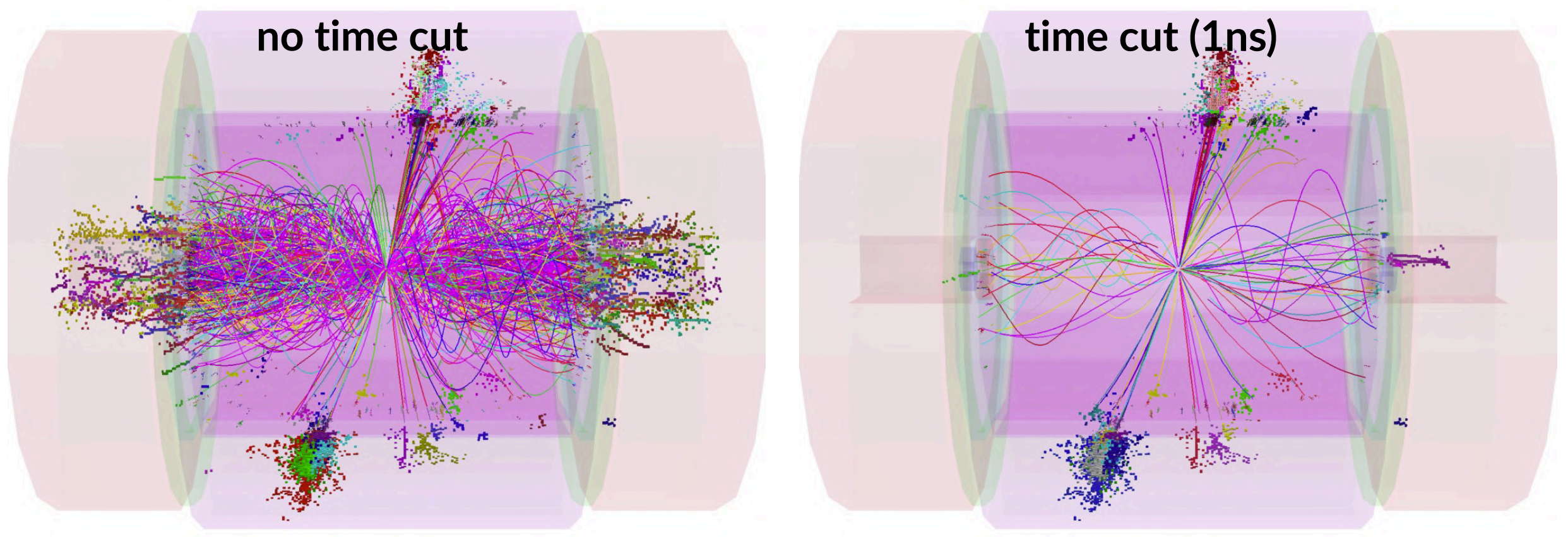


<https://agenda.linearcollider.org/event/8217/contributions/44430>

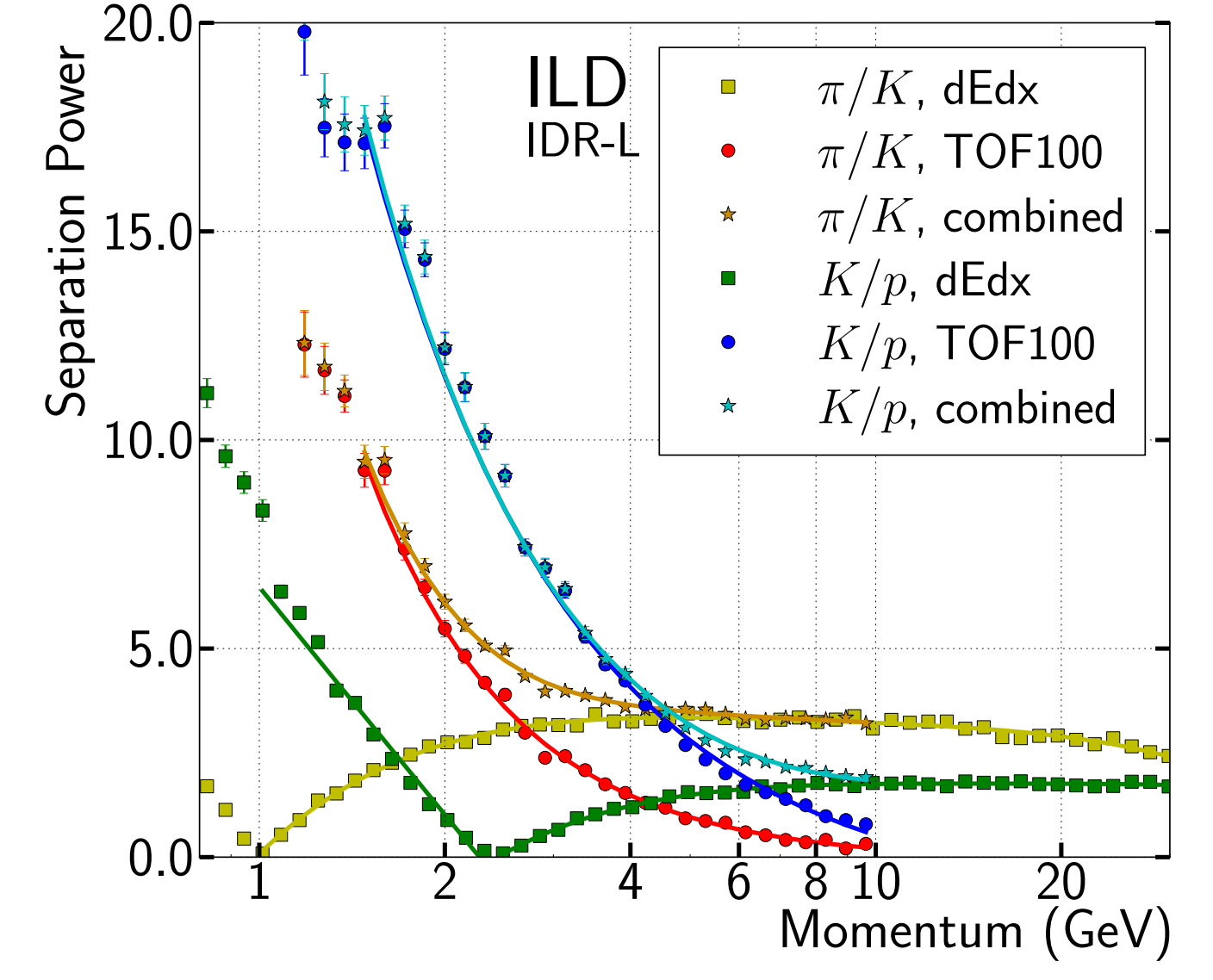
高時間分解能センサーの開発が進められている

- 目標分解能 $\mathcal{O}(10\text{ ps})$

Pileup rejection with timing cut @CLIC (0.5ns bunch separation)



Effect of TOF (res. 100ps) on particle ID performance

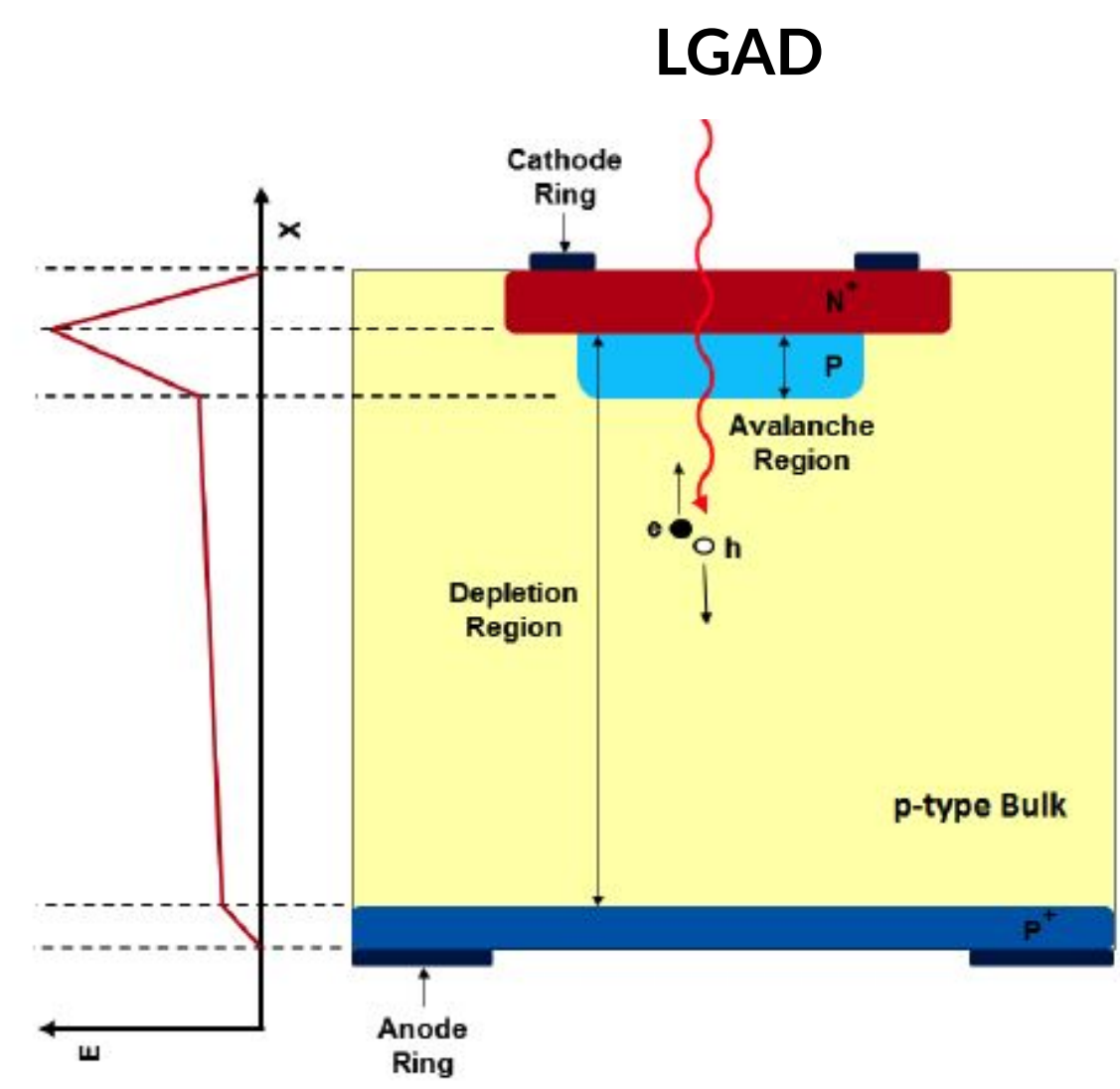
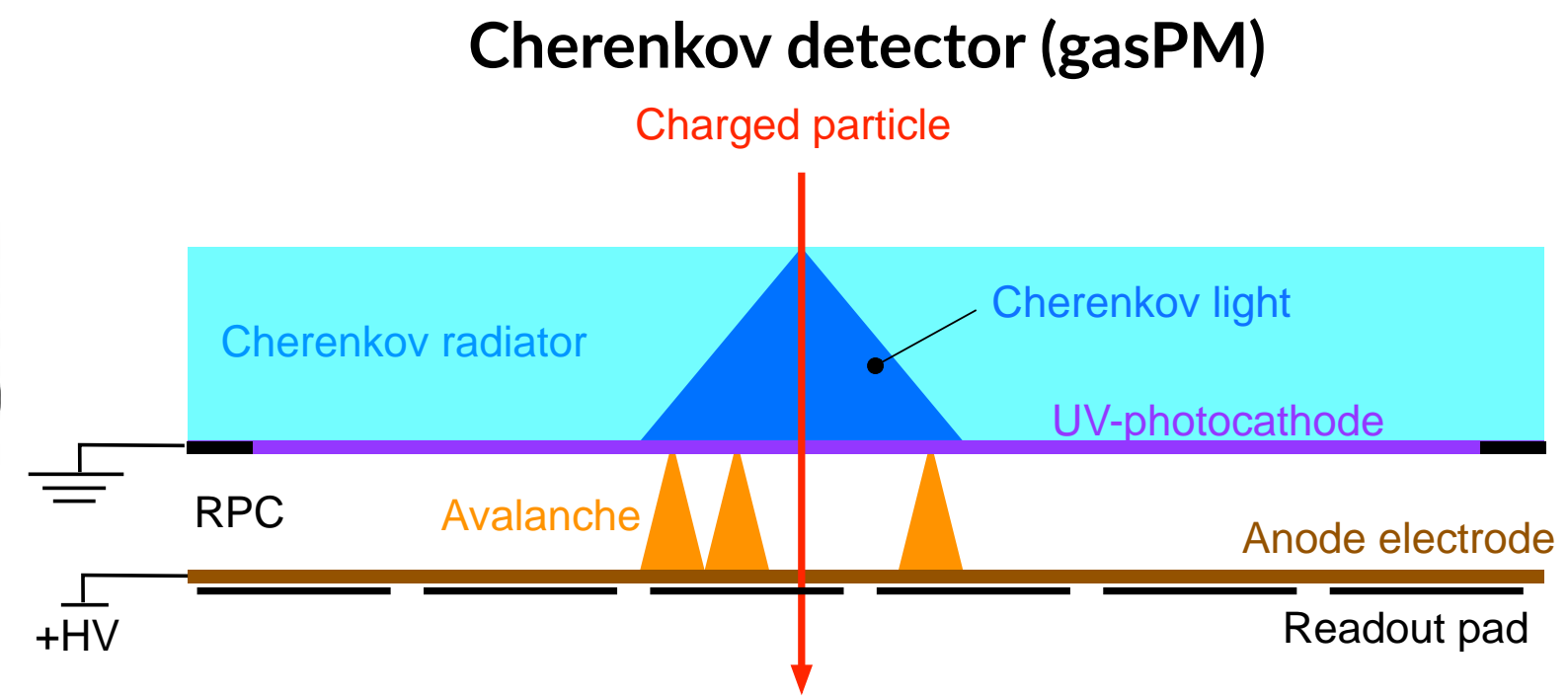
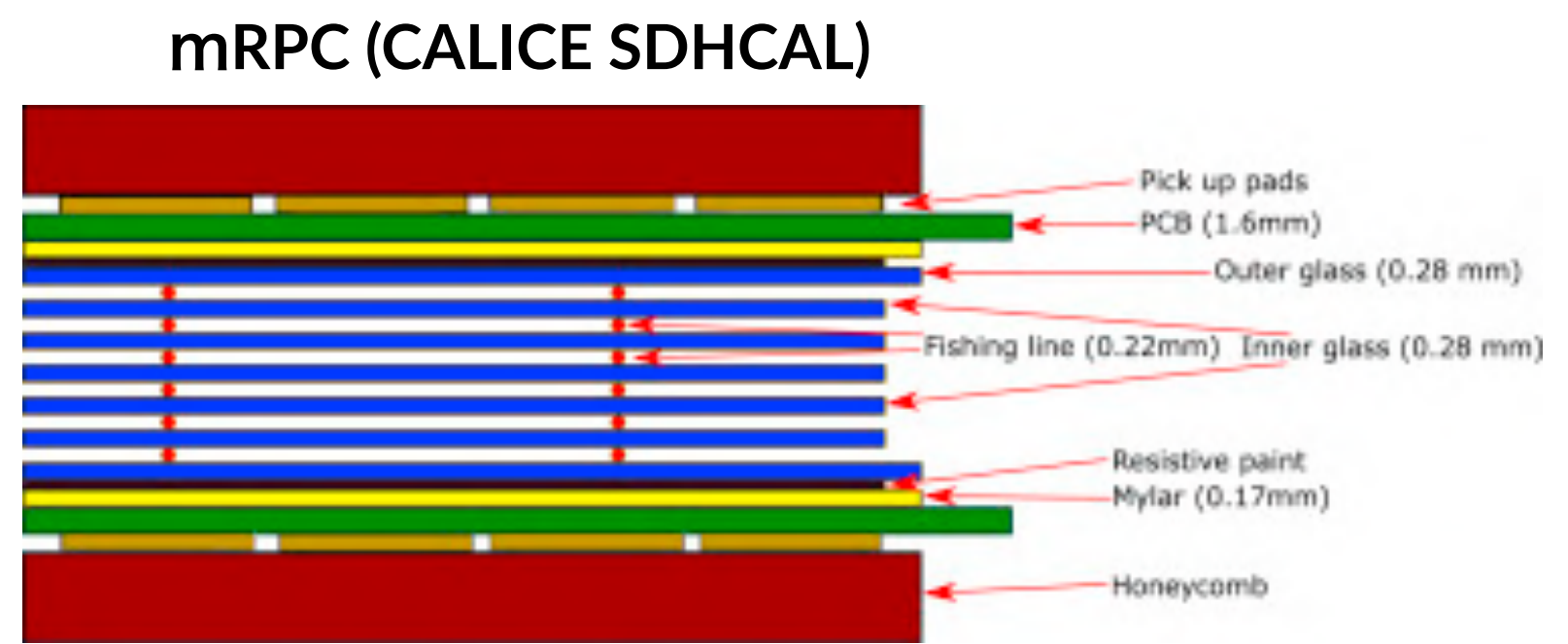


新しい技術の導入：時間分解能

• 超高時間分解能の時間測定層の導入 or カロリメータの各層の平均で高時間分解能を実現

• センサー技術の開発

- シリコンセンサー
 - LGAD, monolithic CMOS
- シンチレーター + SiPM
- チェレンコフ検出器
- mRPC



Monolithic prototypes with SiGe BiCMOS

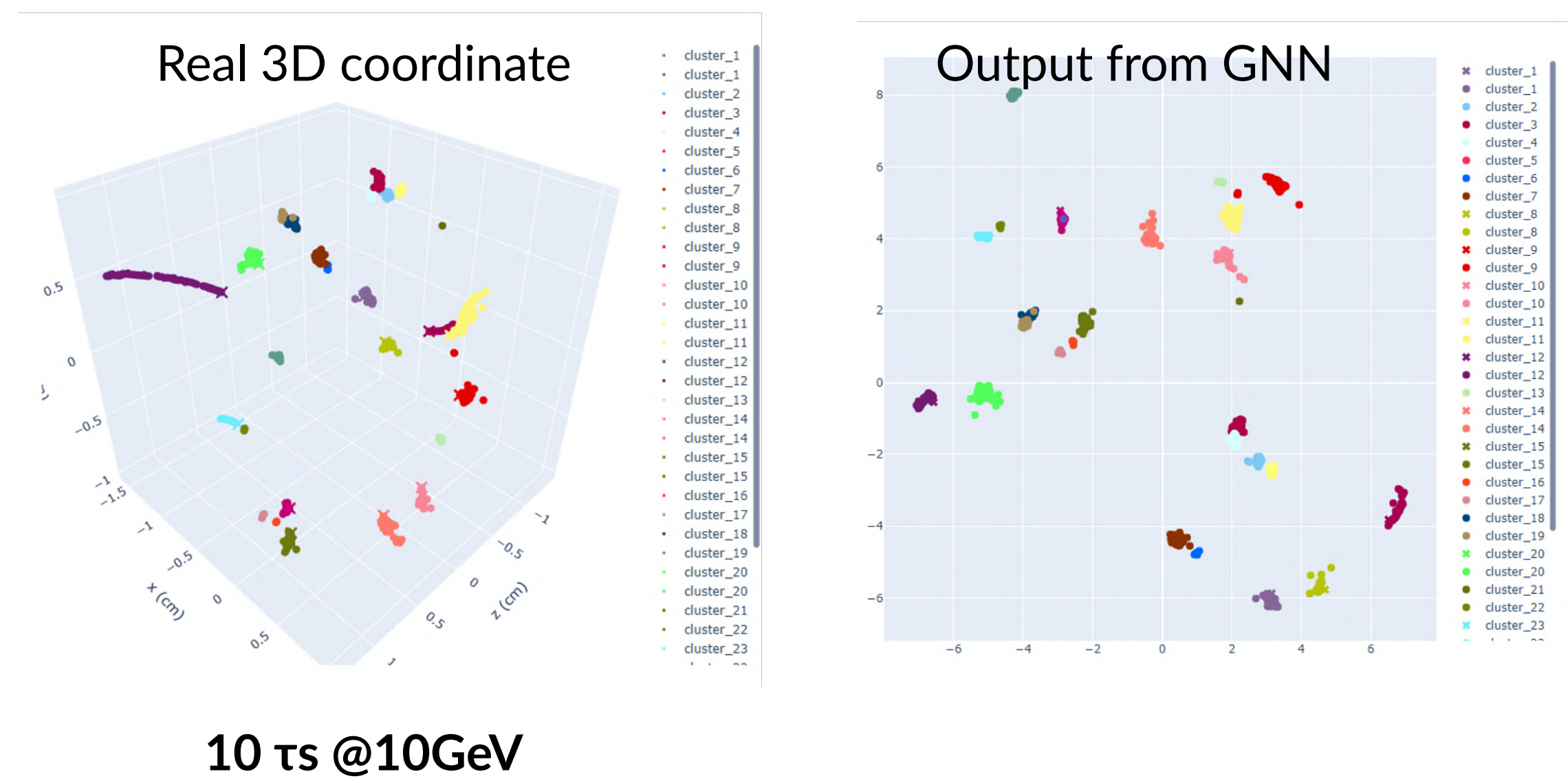
2016	2017	2018	2019	2022
200ps	110ps	50ps	36 ps	21 ps
<ul style="list-style-type: none"> • 1 and 0.5 mm² pixels • Discriminator output 	<ul style="list-style-type: none"> • 30 pixels 500x500μm² • 100ps TDC +I/O logic 	<ul style="list-style-type: none"> • Hexagonal pixels 65μm and 130μm side • Discriminator output 	<ul style="list-style-type: none"> • Hexagonal pixels 65μm side • 30ps TDC +I/O logic • Analog channels 	<ul style="list-style-type: none"> • Hexagonal pixels 65μm side • improved electronics • 50μm epitaxial layer (350Ωcm)

A. Schwartzman, ILC Physics and Detector Meeting, Dec.20, 2023

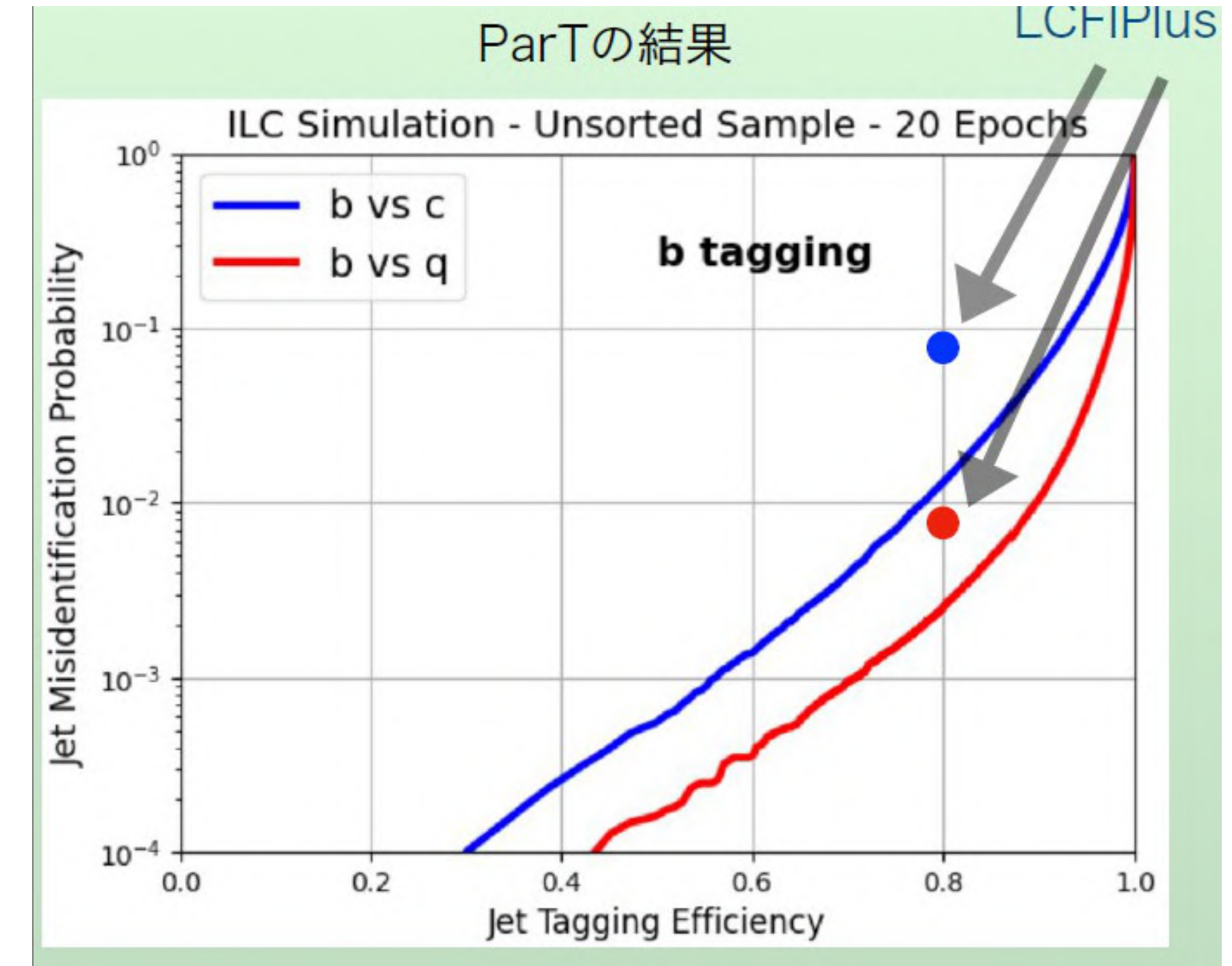
新しい技術の導入：深層学習

深層学習の導入による事象再構成の性能向上

Graph Neural Network (GNN)を使ったPFA



Transformerを使ったフレーバー識別



新しい技術の導入：量子技術

量子シンチレータ

- ナノサイズ物質 (quantum dot, nanoplatelet, ...) を用いた新しいシンチレータ素材の開発
- 波長の制御、時間分解能の向上

E. Auffray, ECFA Detector R&D Roadmap Symposium 12/4/2021

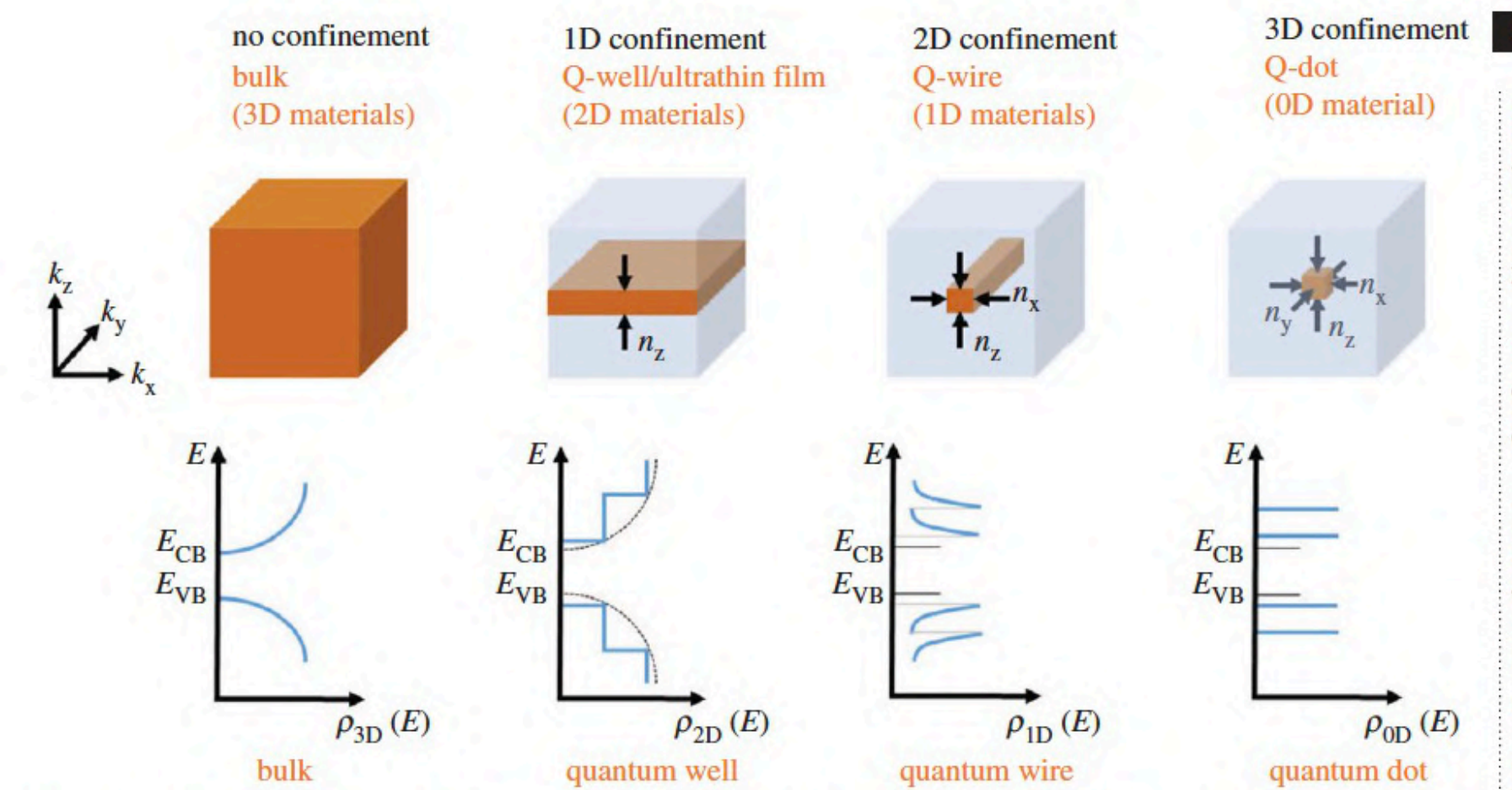
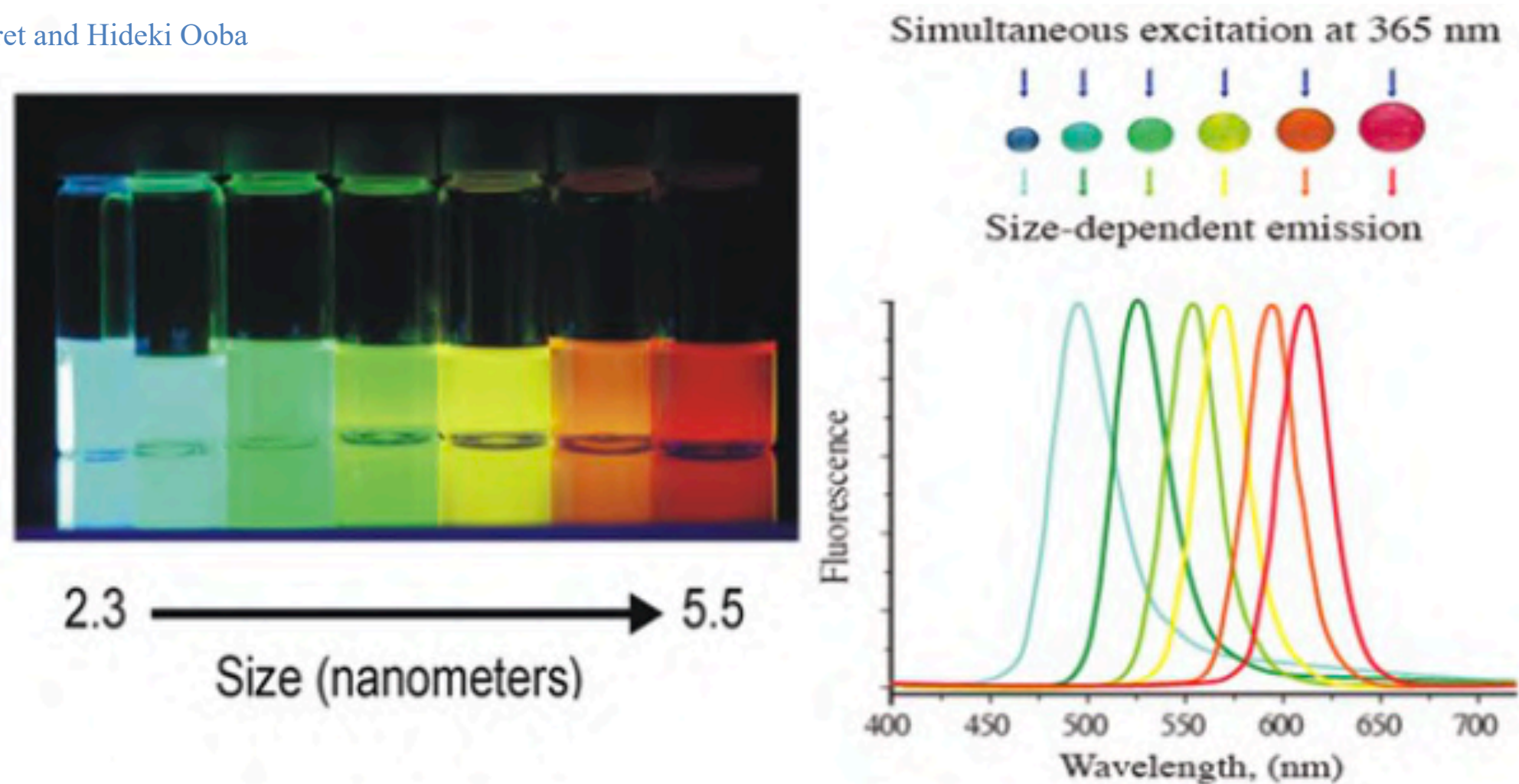
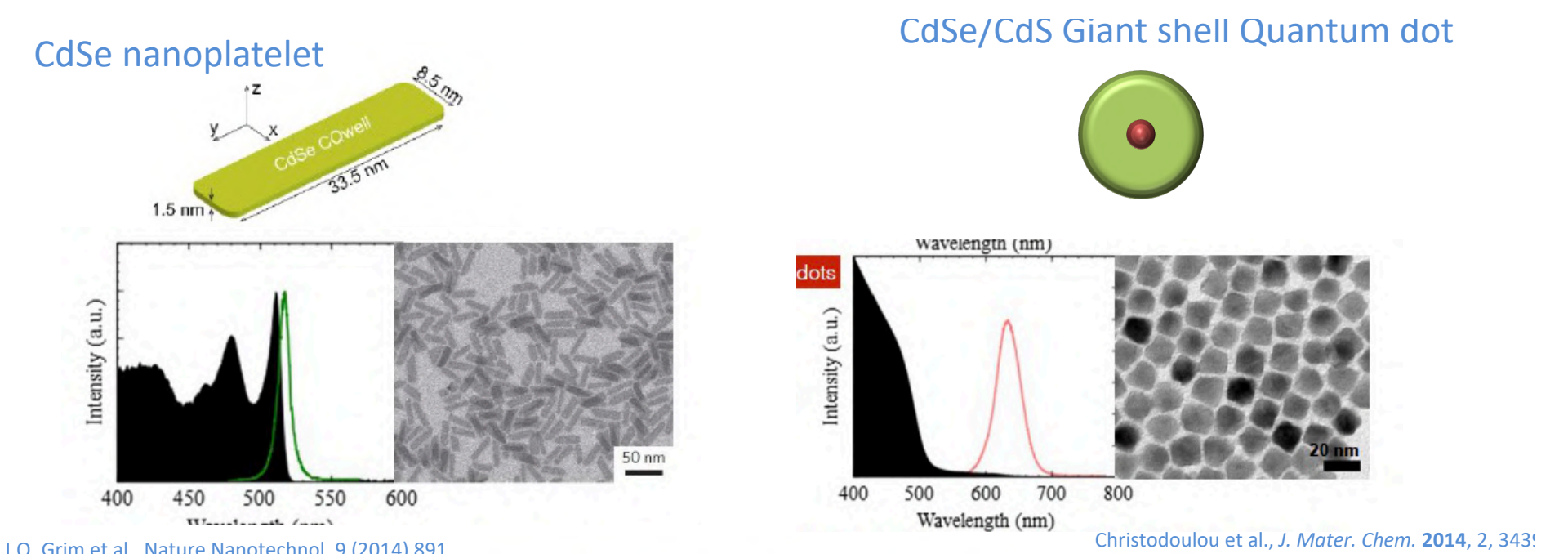


Figure 1. Schematic illustration of broken symmetry and functional form of the density of states in 1D, 2D and 3D confined materials.

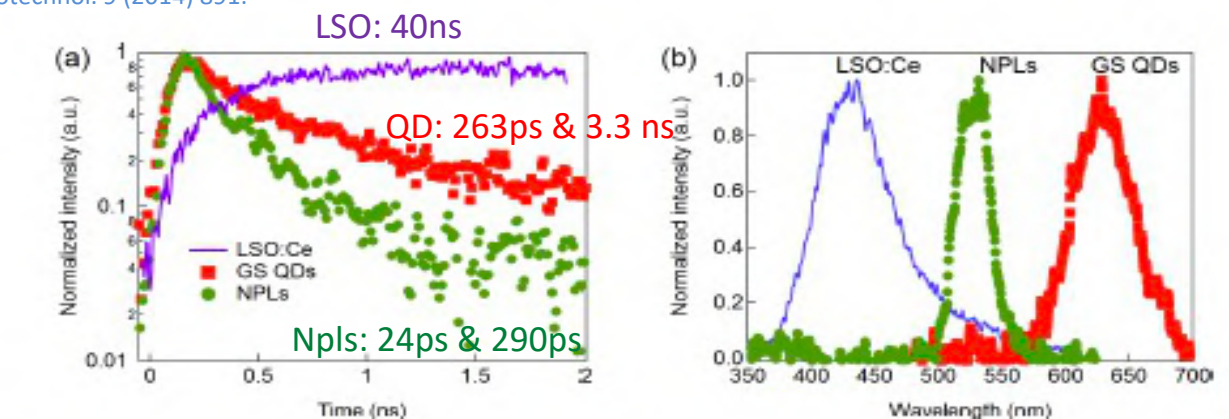
from Benoit Dubertret and Hideki Ooba



=> Tune the emission properties by changing size of nanodots



J.Q. Grim et al., Nature Nanotechnol. 9 (2014) 891. Christodoulou et al., J. Mater. Chem. 2014, 2, 343!



R. Martinez Turtos et al., 2016 JINST_11 (10) P10015 => Much Faster than LYSO crystal measured @cern Lab27

まとめ

- ヒッグスファクトリーにおける高精度物理研究にはこれまでになく高性能な測定器が必要
- 最先端のセンサー技術を使ってさまざまな測定器開発が行われている
- 高い完成度の測定器コンセプト(特にILC測定器)
 - 高精度崩壊点/飛跡検出器 + 高精細カロリメータ(PFA)
- 新しい技術、新しいアイデアの導入でさらなる性能改善を
 - 高時間分解能(5Dカロリメータ、4Dトラッキング)、深層学習、量子技術,....
- さまざまな分野のセンサー技術開発にアンテナを張ることが重要
- **新しいアイデアとやる気に溢れた若手の方々の参入を期待！**