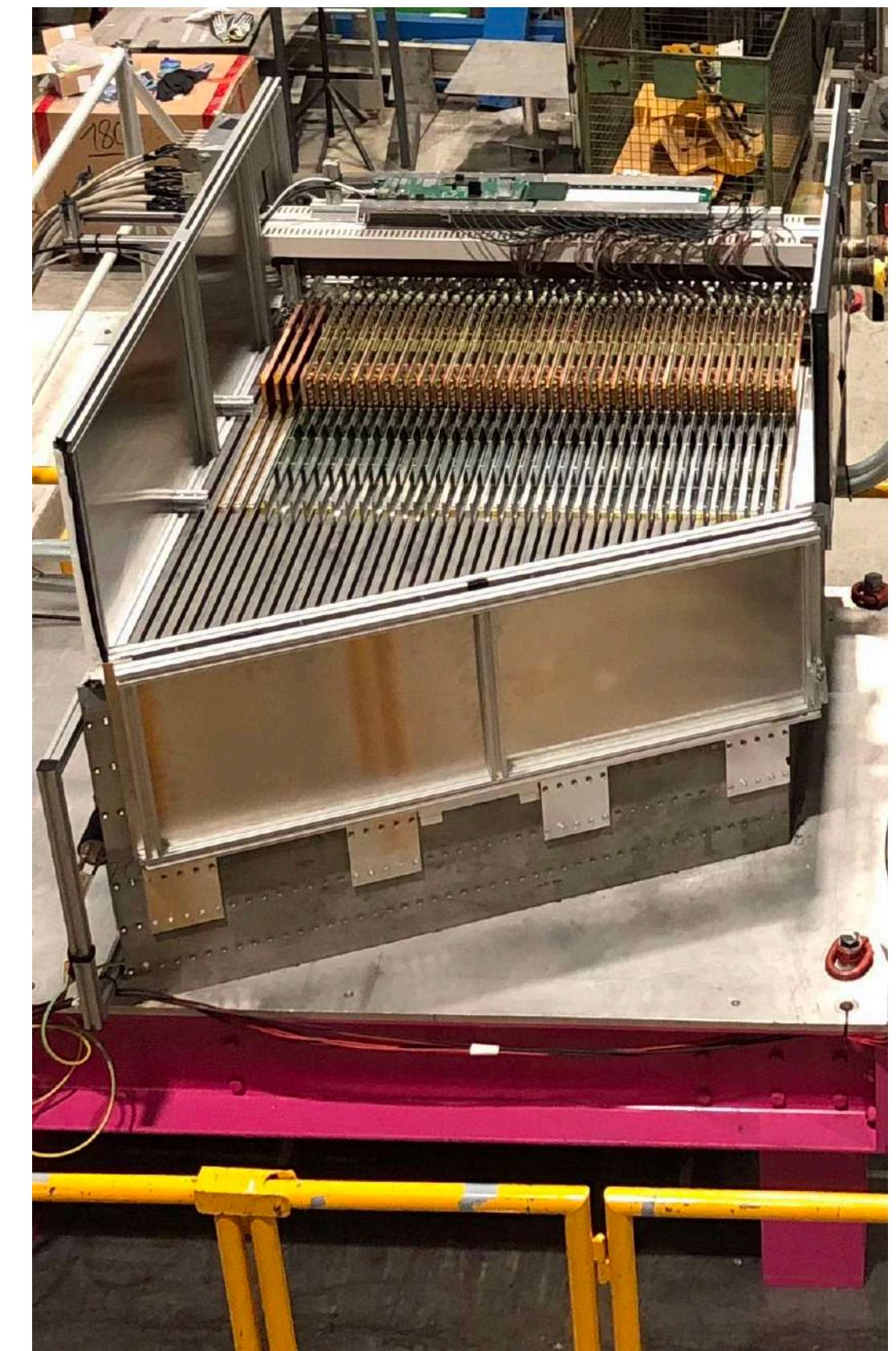
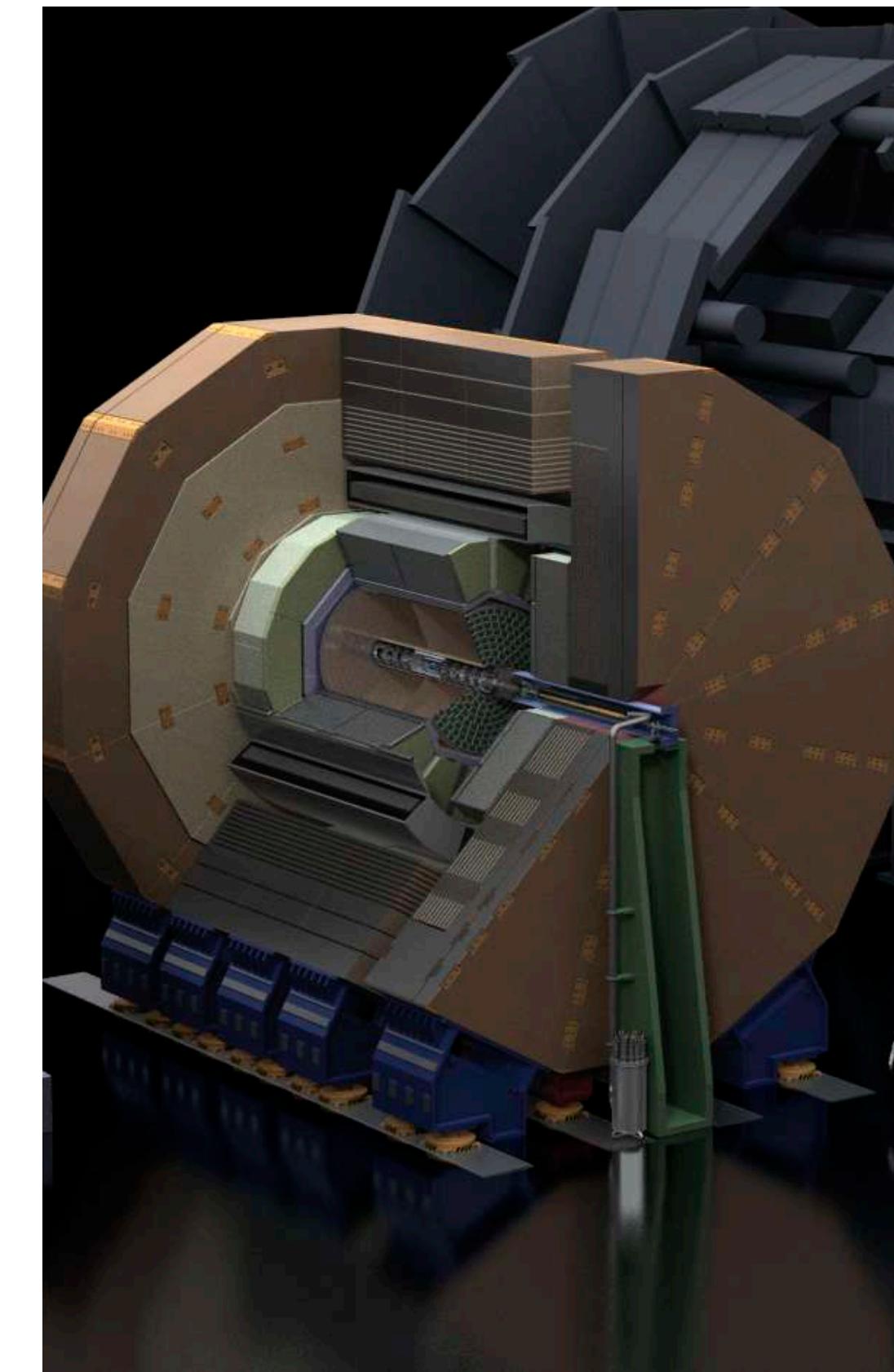
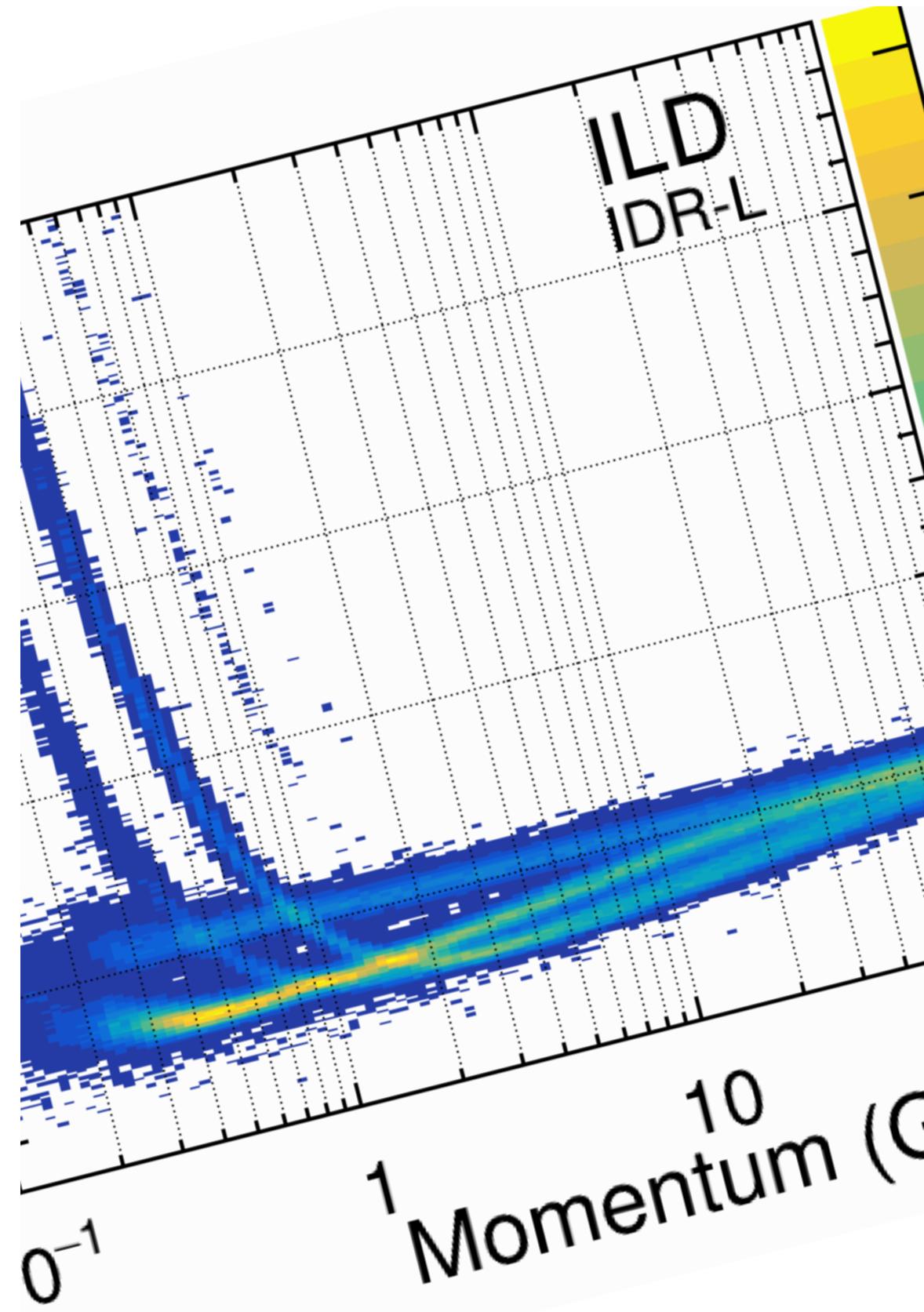


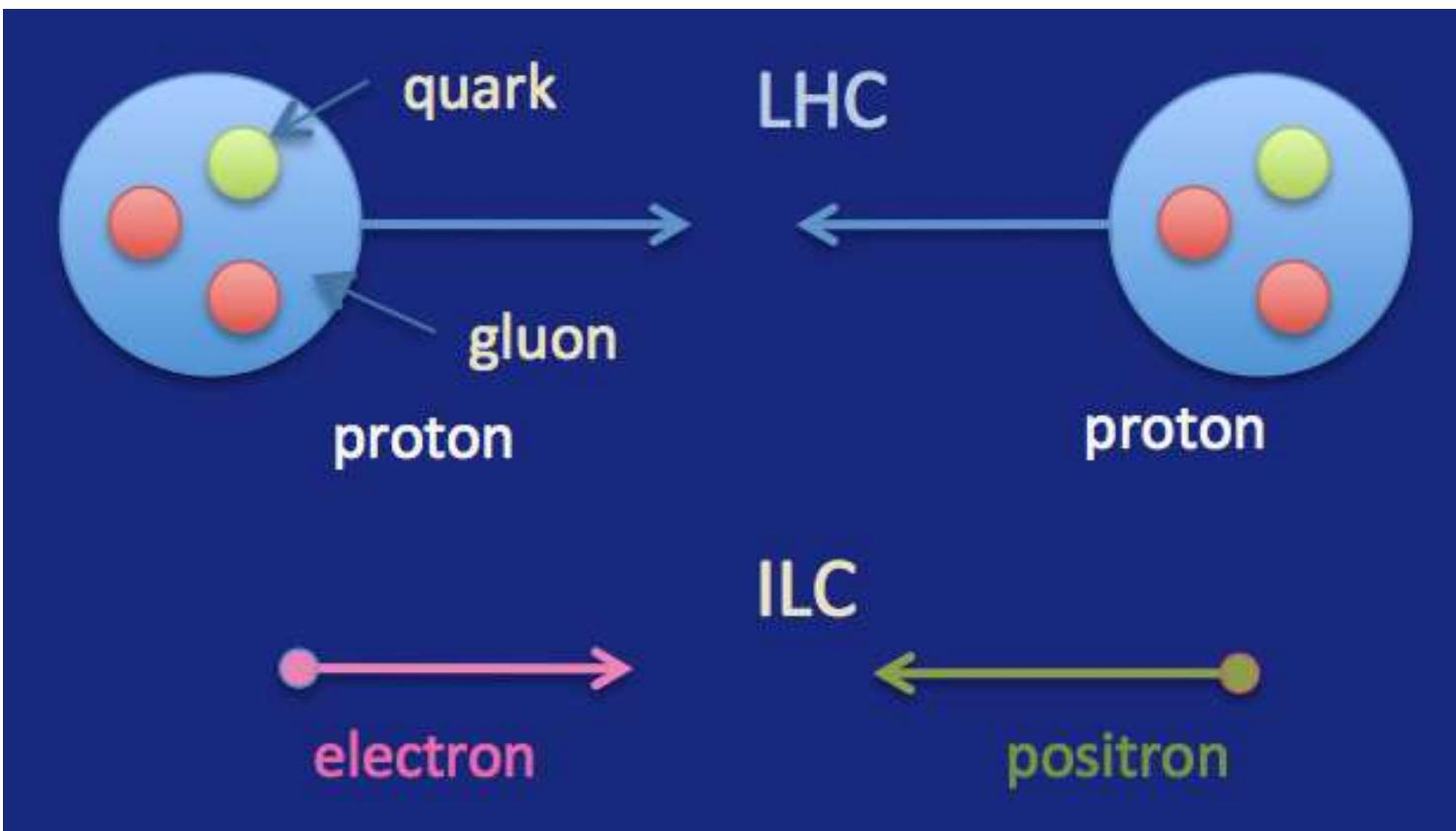
ヒッグスファクトリーの測定器

大谷航 東京大学素粒子物理国際研究センター

2025年5月2日 神戸大学

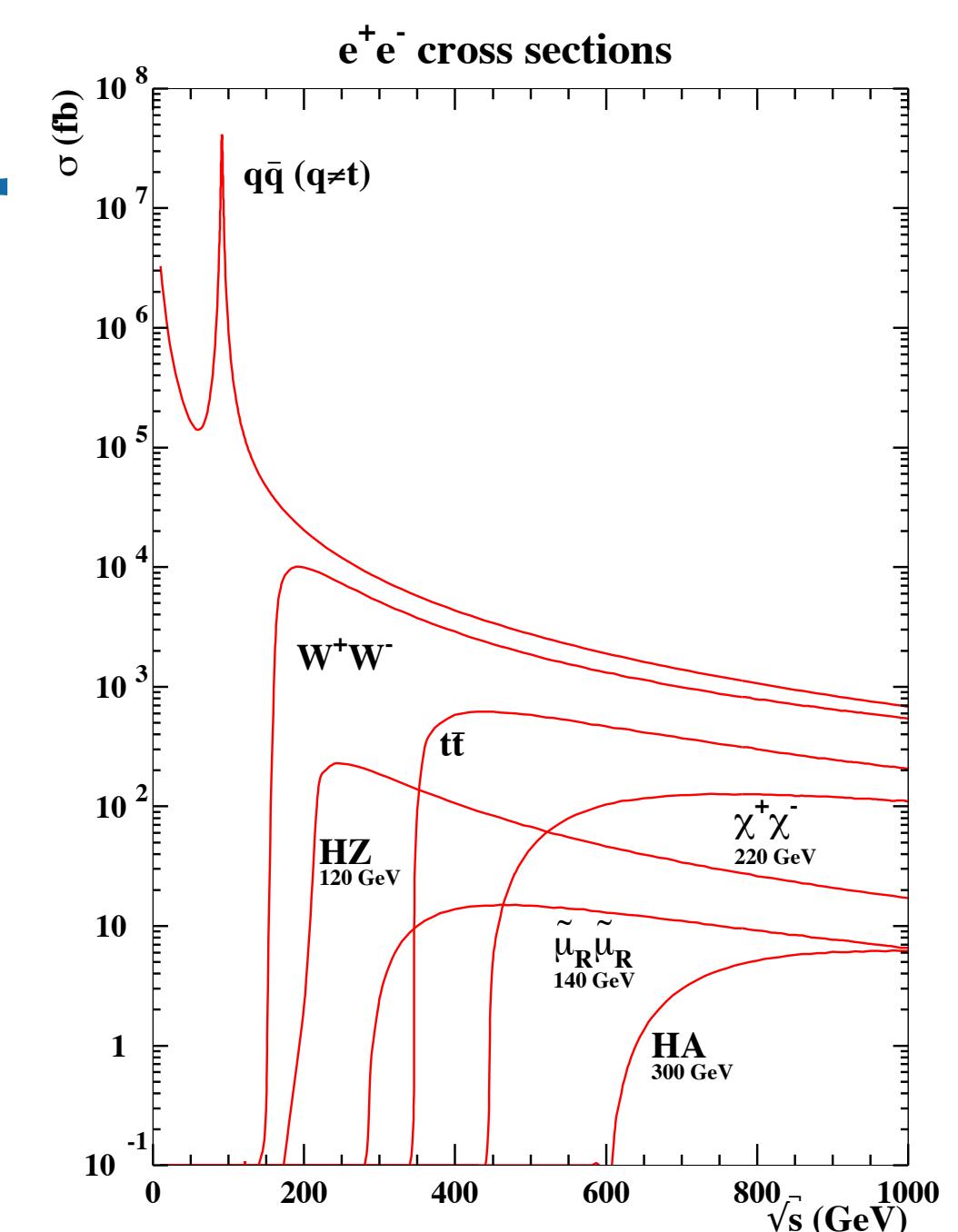


レプトンコライダー vs. ハドロンコライダー



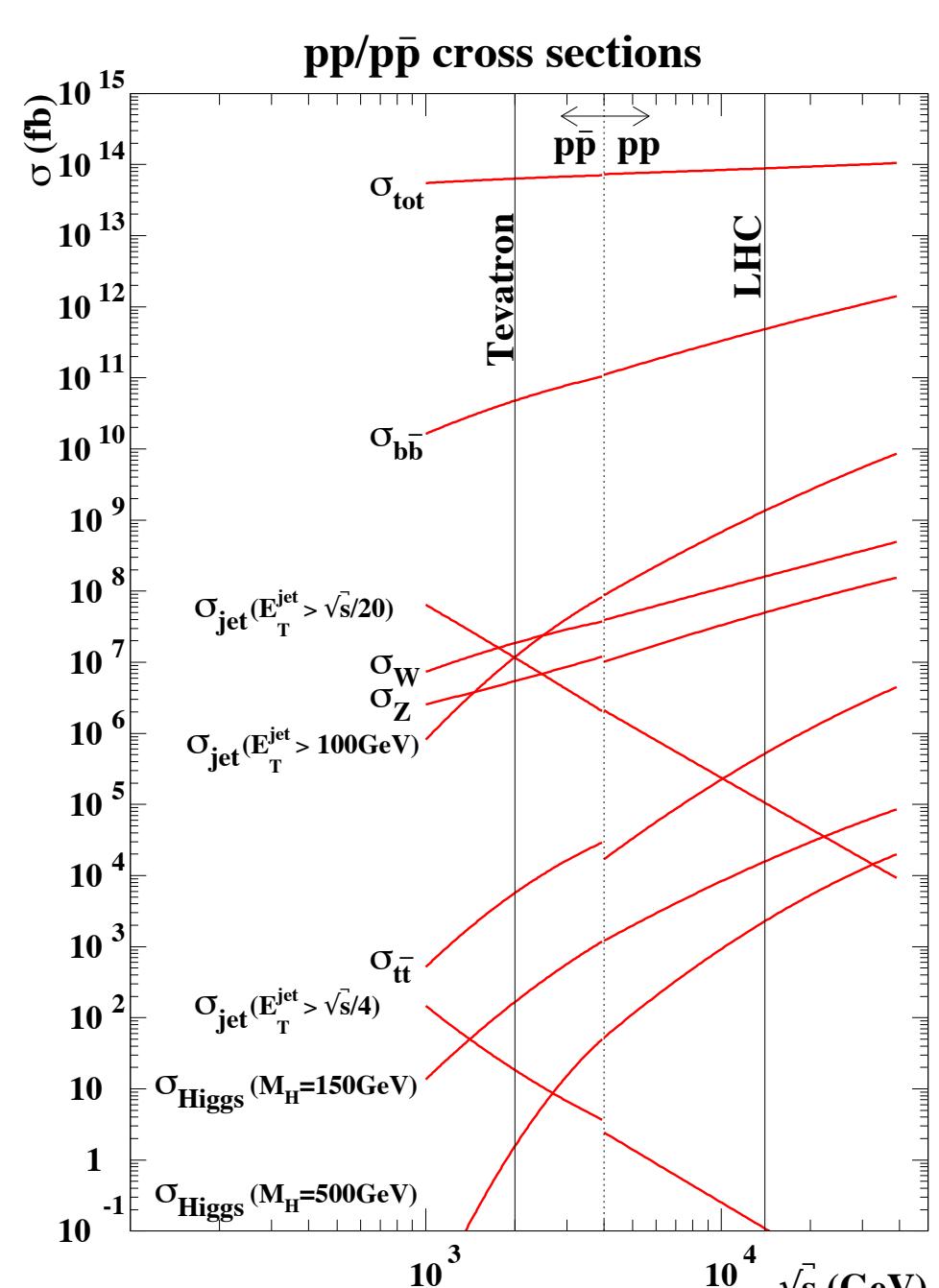
レプトンコライダー

- 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 $\mathcal{O}(1 \text{ ns})$



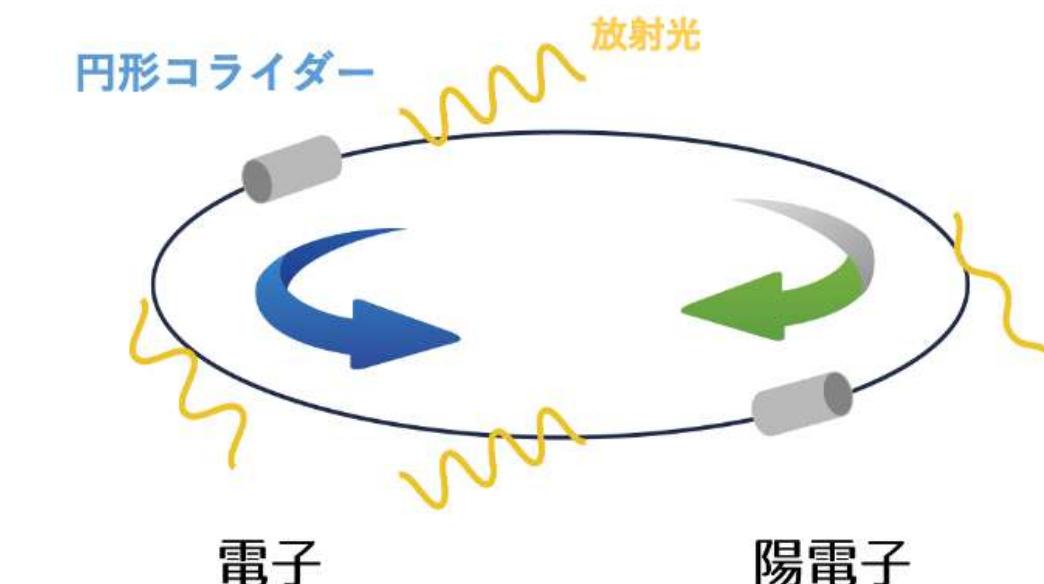
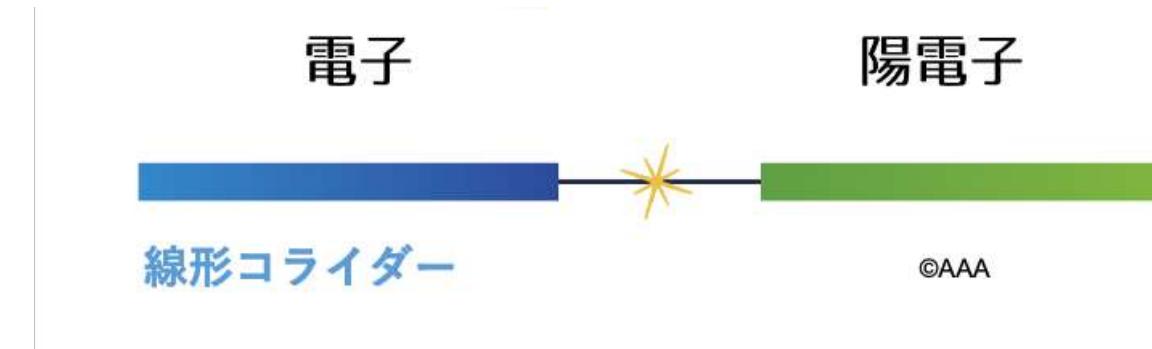
ハドロンコライダー

- 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 $\mathcal{O}(10 \text{ ps})$



arXiv:hep-ph/0410364

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 $\gtrsim 1\text{TeV}$

- 1衝突点 (検出器 $\times 2$ プッシュプル@ILC)

- パルス運転 (5Hz, 0.7ms)

- 事象頻度~1Hz @ $\gtrsim 250\text{GeV}$

- 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 $\rightarrow e^+e^- \text{ pair}$

円形電子陽電子コライダー (FCC-ee, CEPC)

- 衝突エネルギー $\lesssim 350\text{GeV}$

- $\lesssim 4$ 衝突点 ($\lesssim 4$ 検出器)

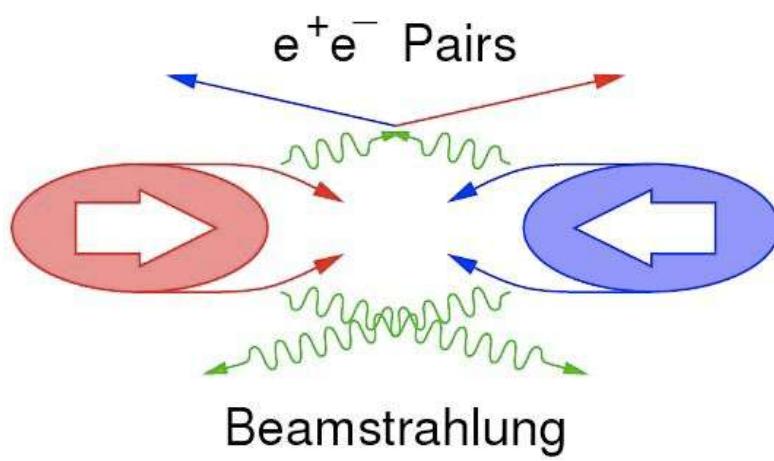
- 連続運転

- 事象頻度~100kHz @ 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

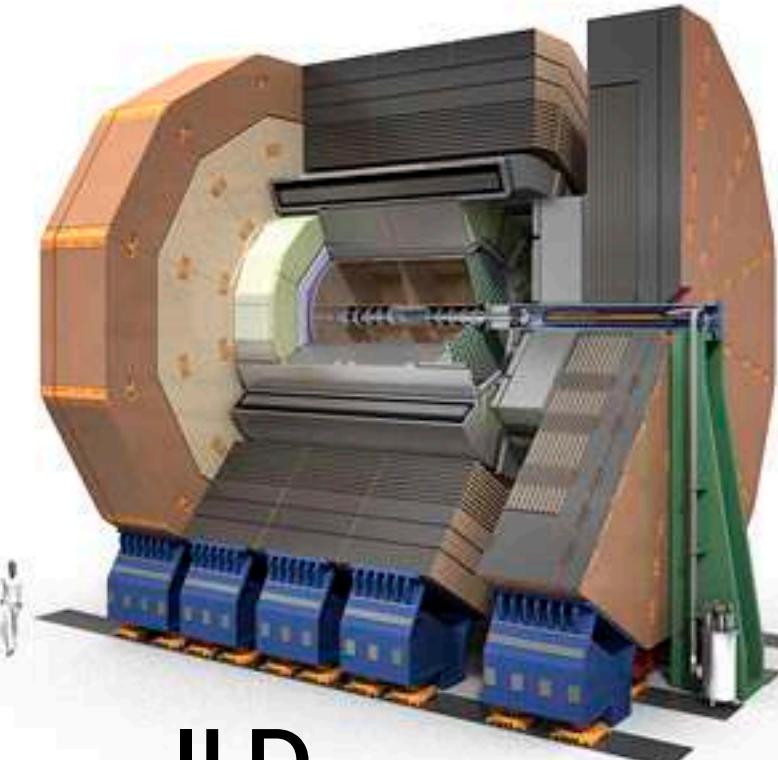
- シンクロトロン放射, 制動放射



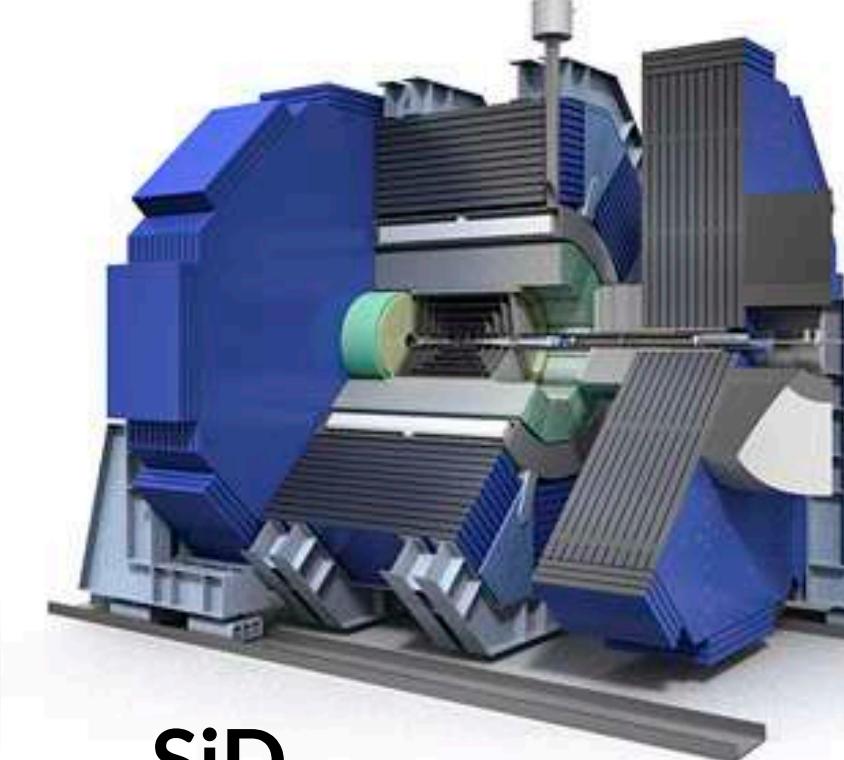
測定器設計の違い

ヒッグスファクトリー測定器

ILC

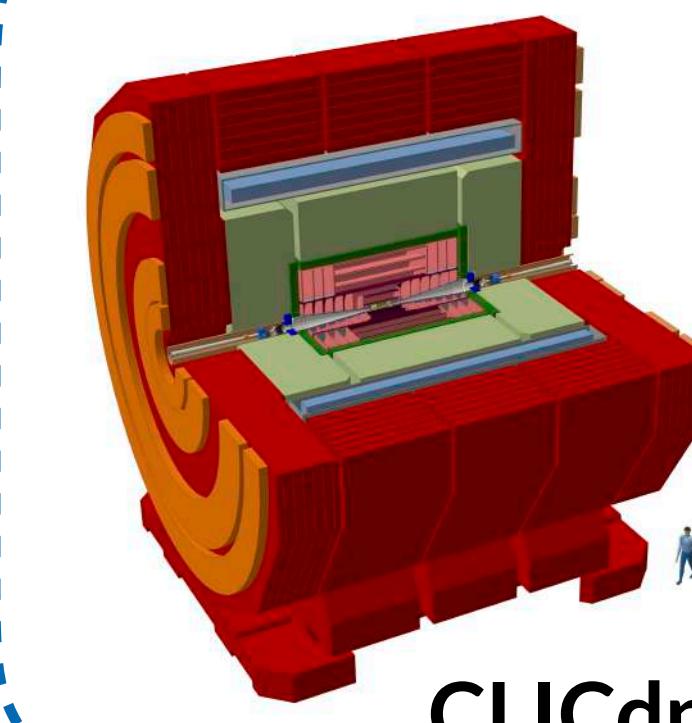


ILD



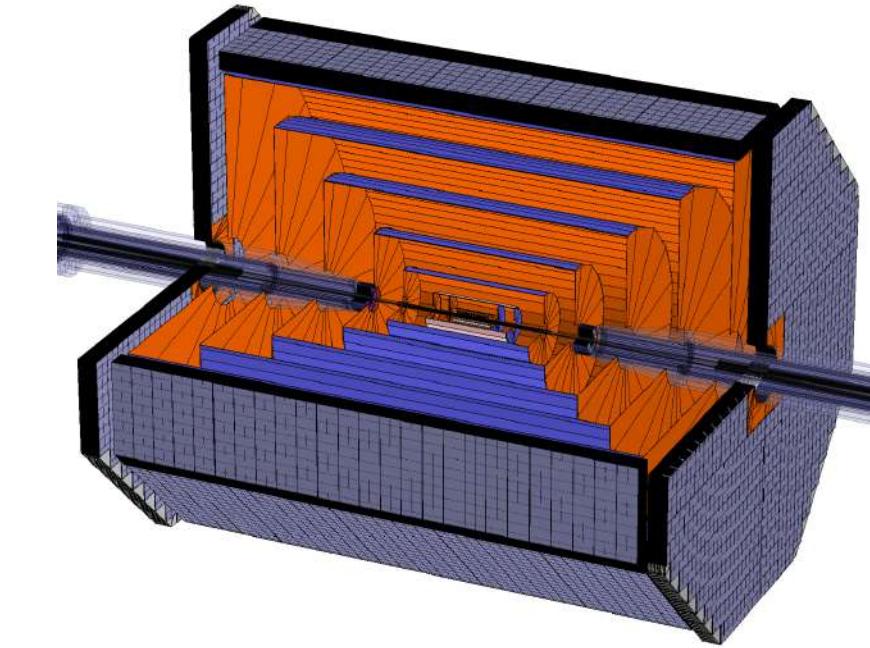
SiD

CLIC



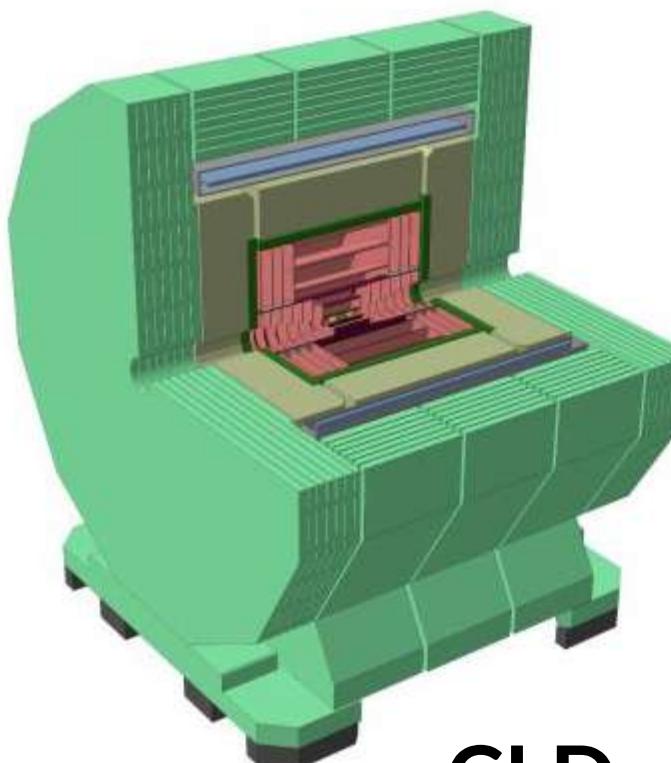
CLICdp

CEPC

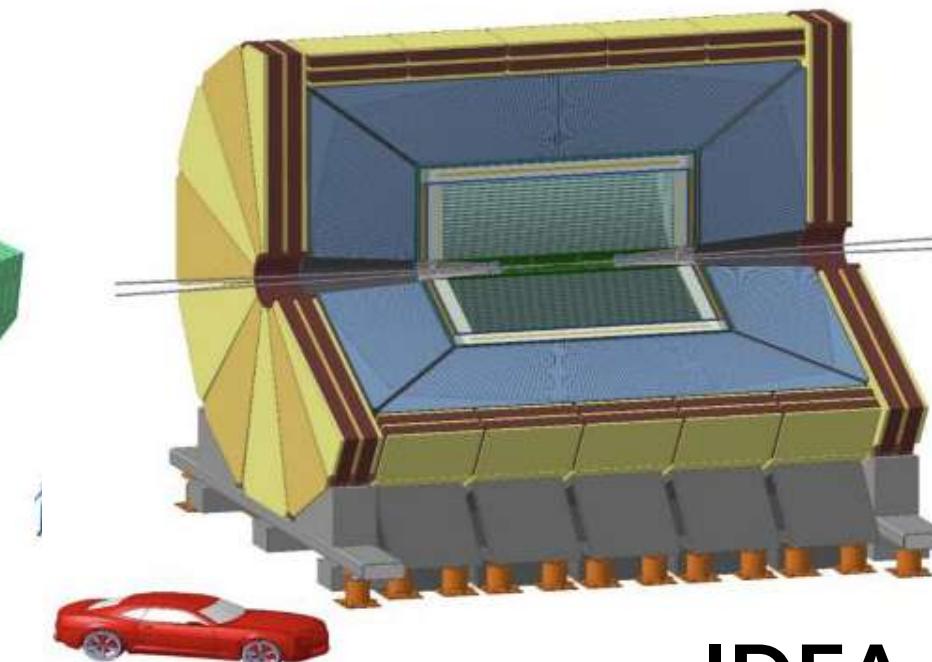


FST

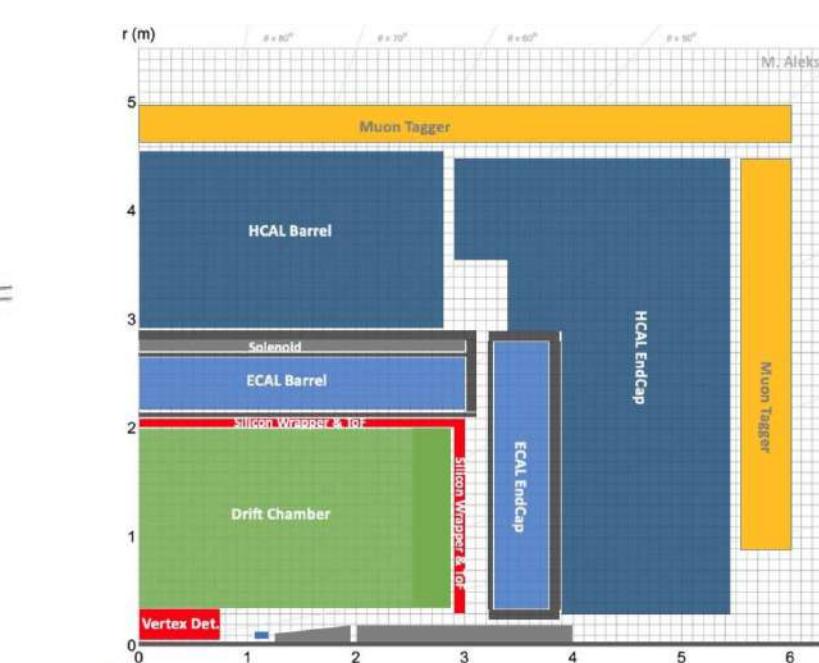
FCC-ee



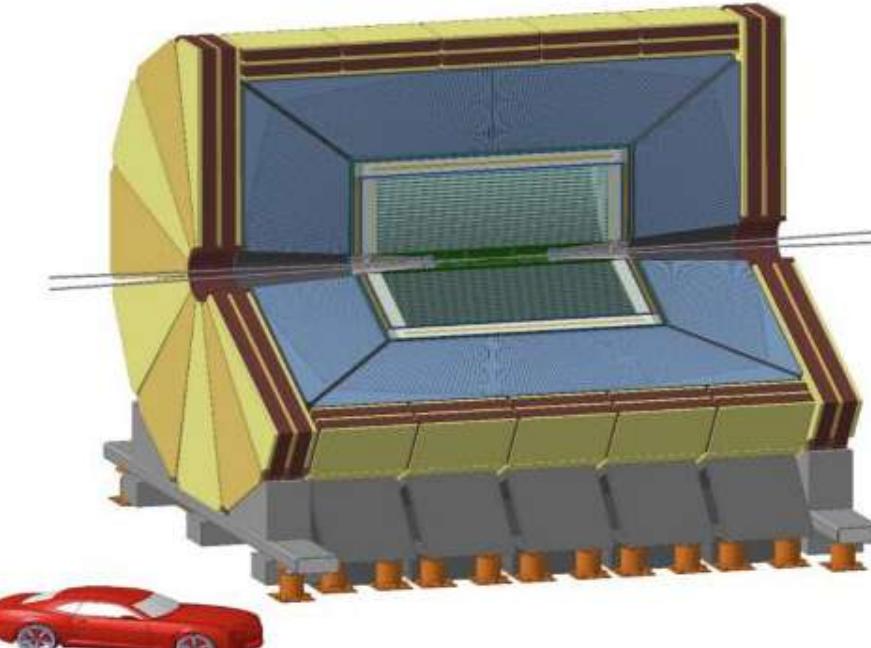
CLD



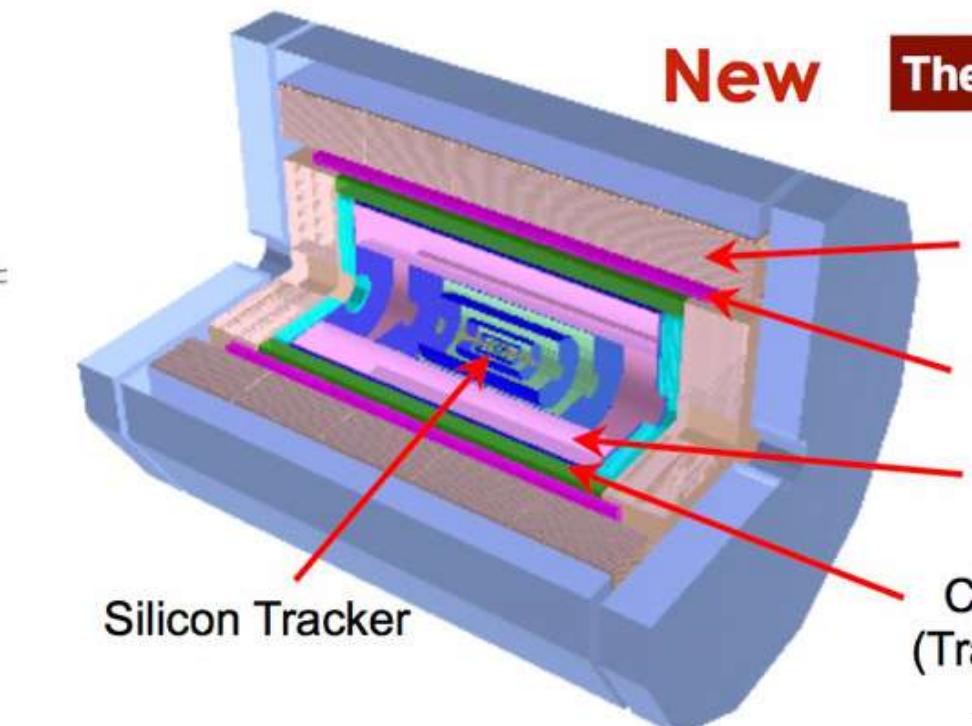
IDEA



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

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

• 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

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

• 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

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

• Hermeticity ~5mrad

- 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: $p_{e^+e^-} = p_H + p_Z$
- $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ 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！

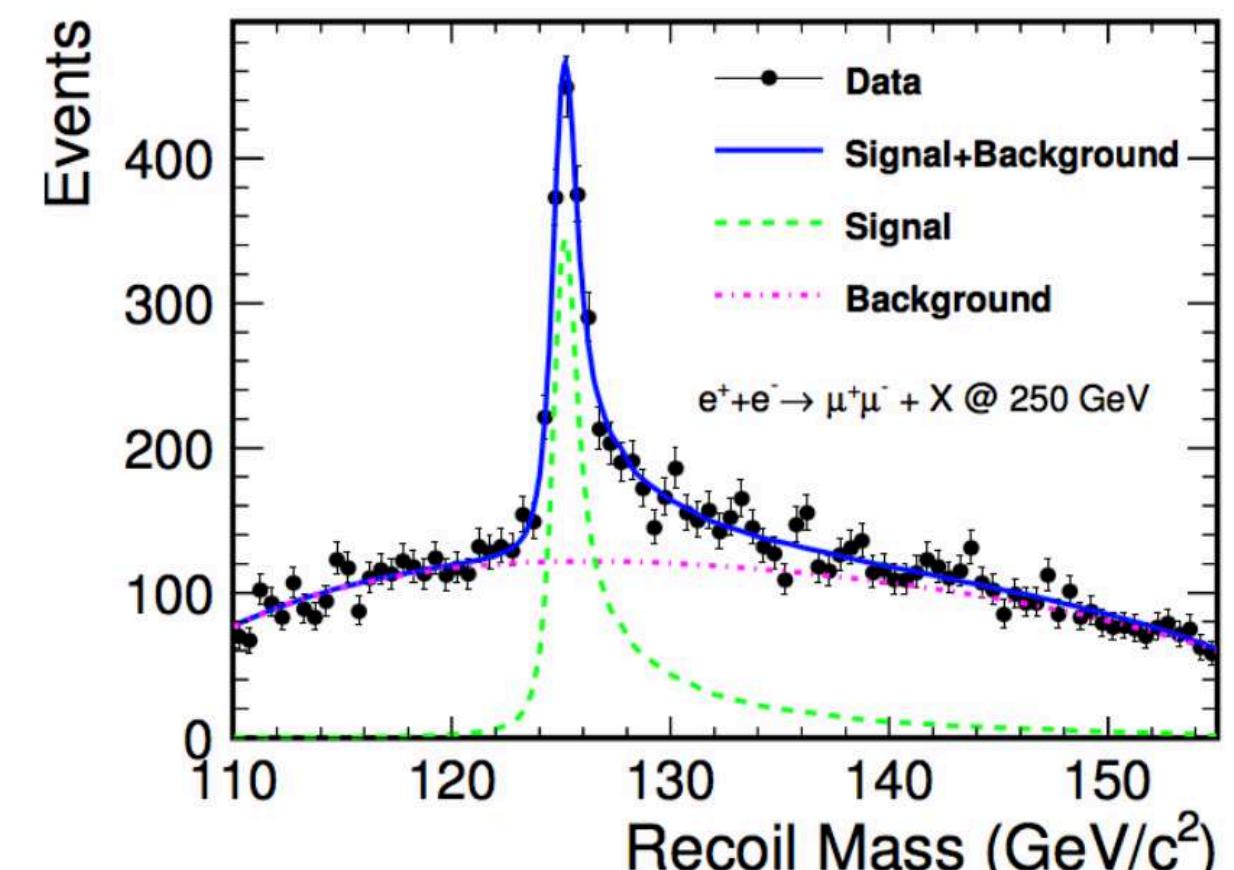
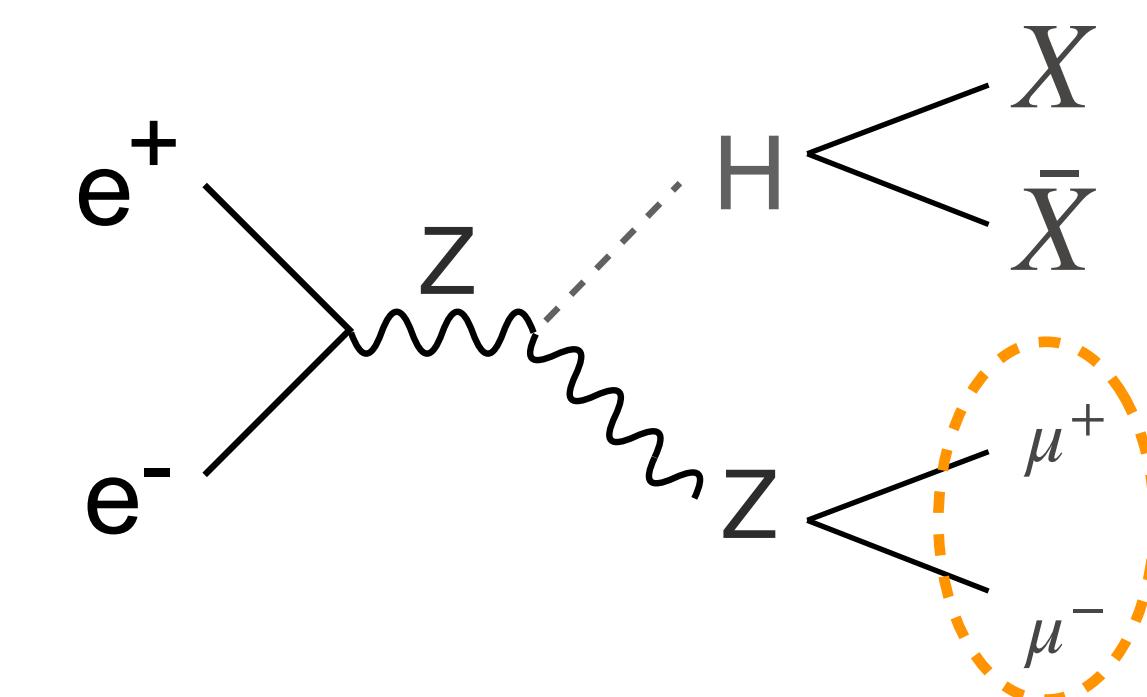
- 反応の総断面積を測定可能

→ 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 ($\delta m_h = 14\text{MeV} \leftrightarrow 250\text{MeV}$ @LHC)

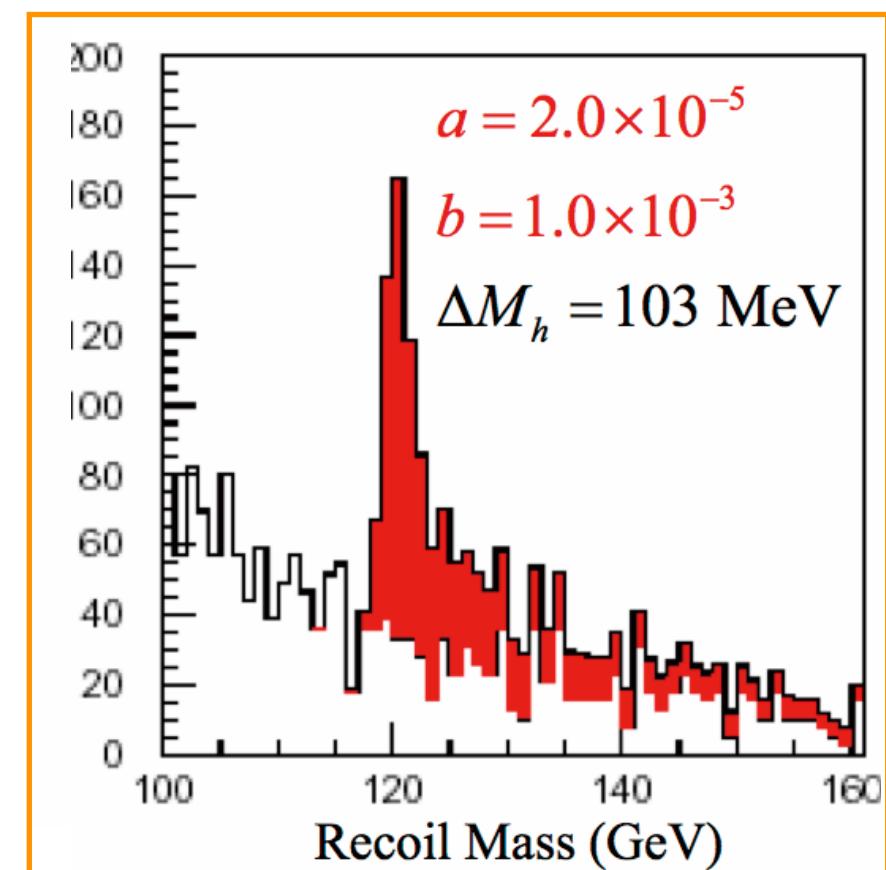
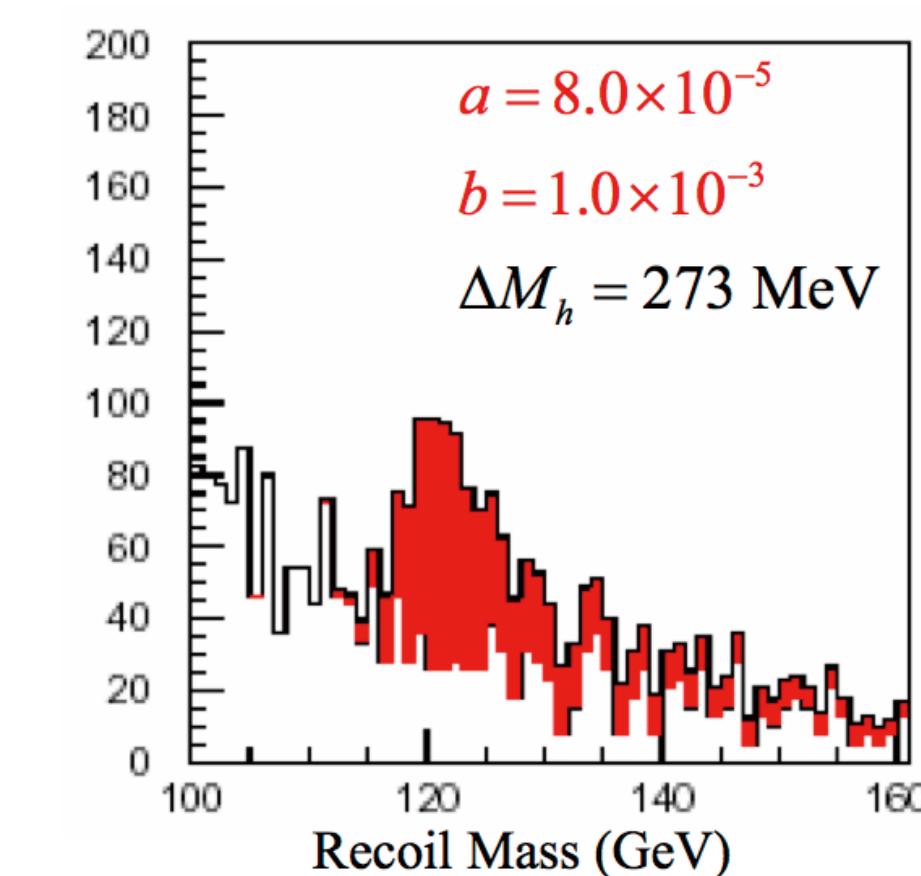
- 高精度なレプトン運動量測定が必要

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



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

ILC target performance

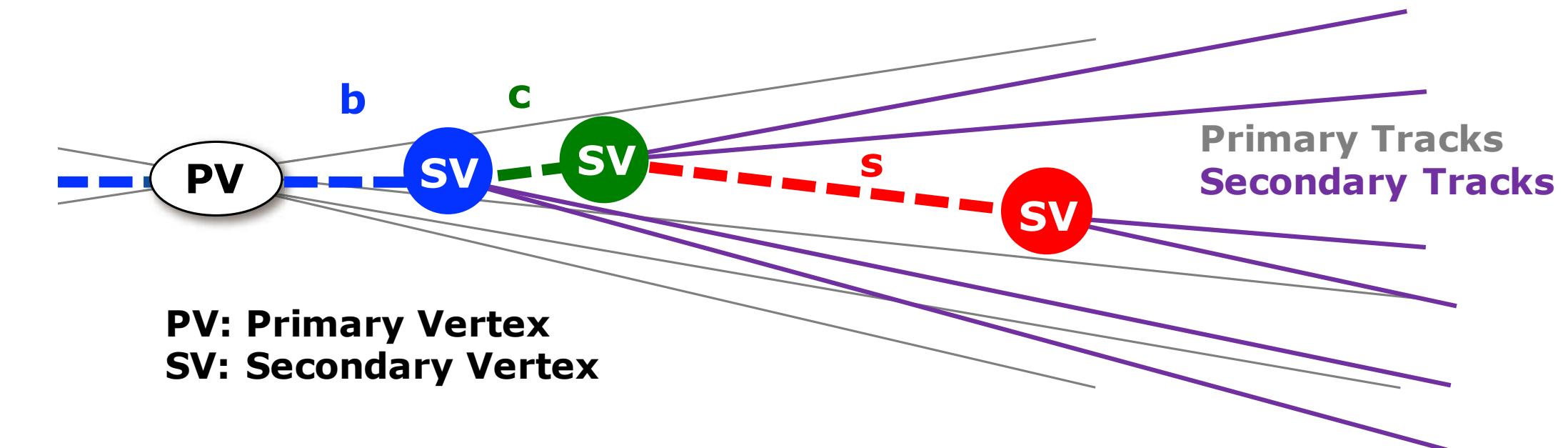


$$\sigma_{1/p_T} = \frac{\sigma_{p_T}}{p_T^2} = a \oplus b/p_T$$

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 $\text{BR}(\text{H} \rightarrow \text{bb}, \text{cc}, \text{gg})$
- Higgs self coupling $Z\text{HH} \rightarrow \text{qqbbbb}$
- Top Yukawa coupling $t\bar{t}\text{H} \rightarrow \text{bWbWbb}$



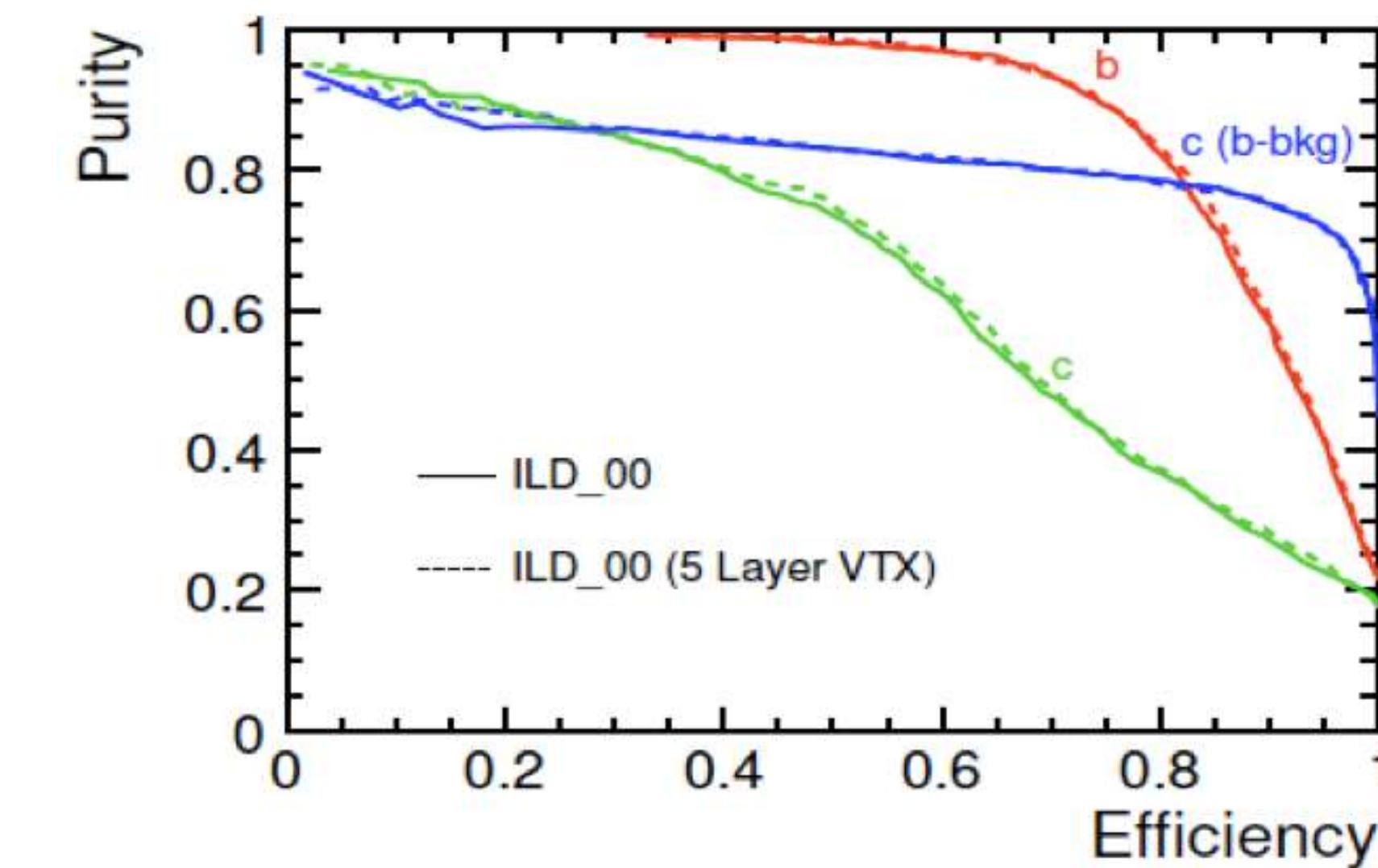
- 二次崩壊点を見つけて重いクォークのジェットのフレーバー(世代)を同定

- 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

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

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

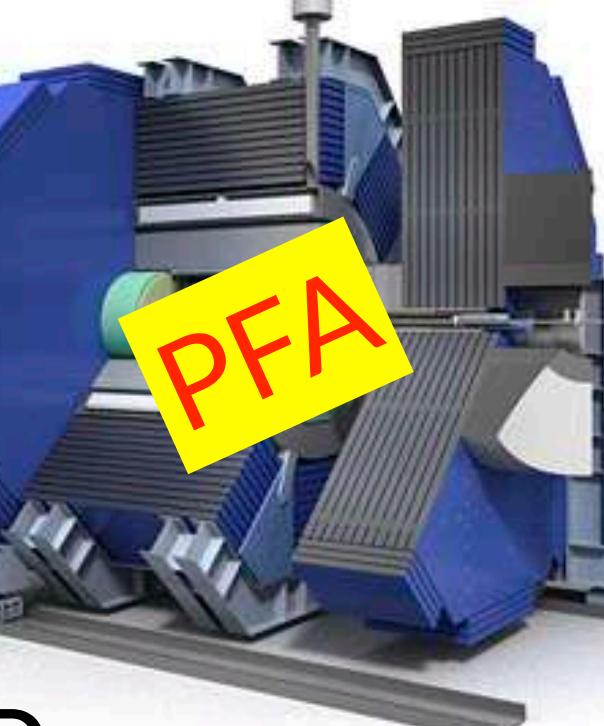
•飛跡検出器：ガス検出器(TPC/DC), シリコンピクセル/シリコンストリップ

カロリメータ

ILC

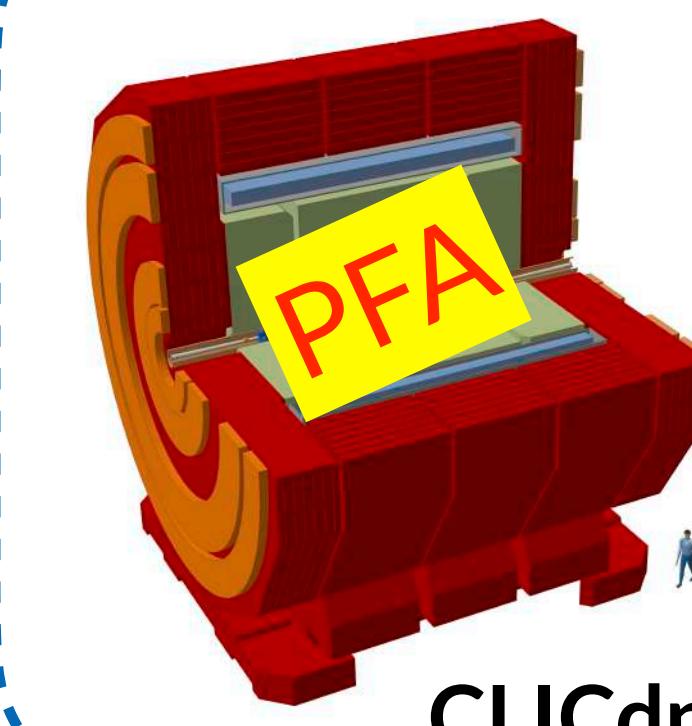


ILD



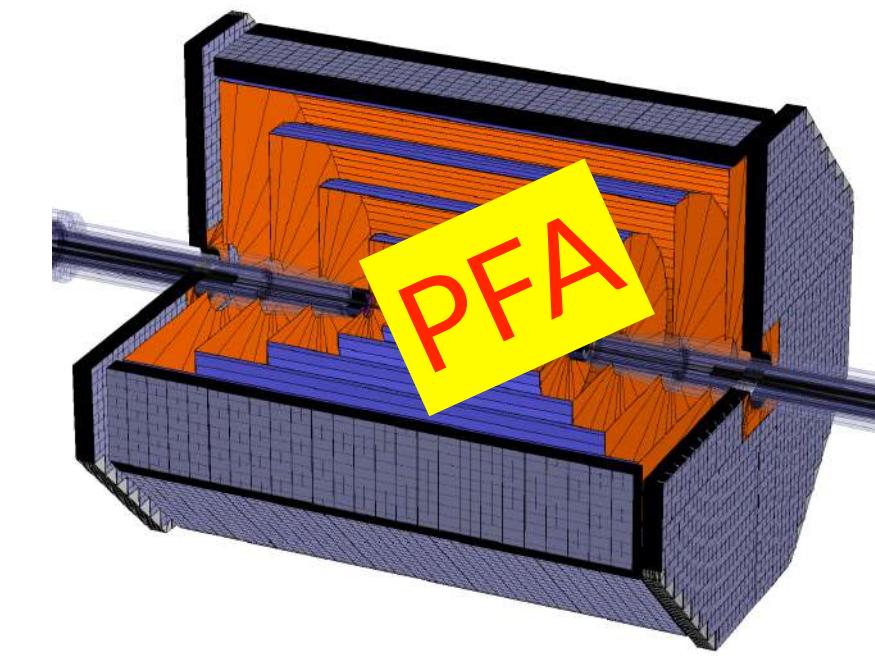
SiD

CLIC



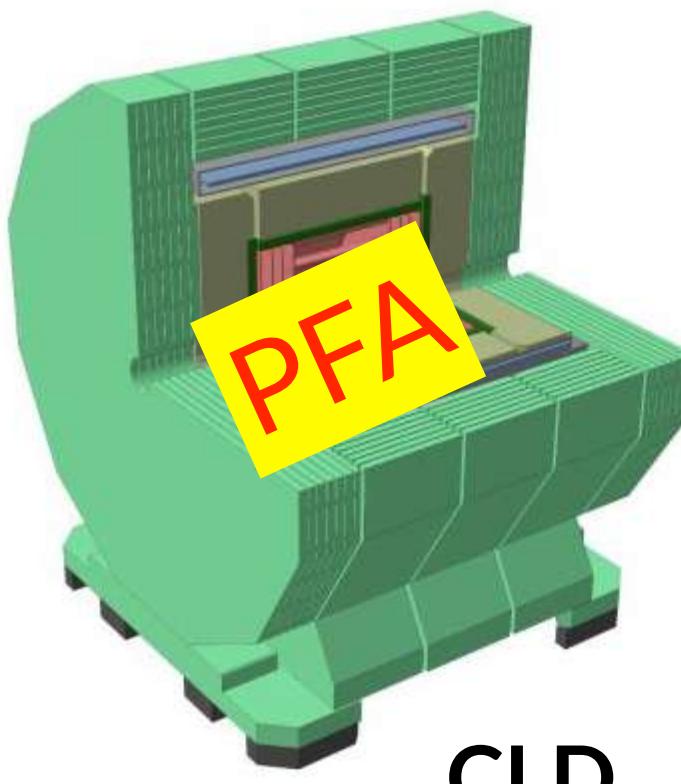
CLICdp

CEPC

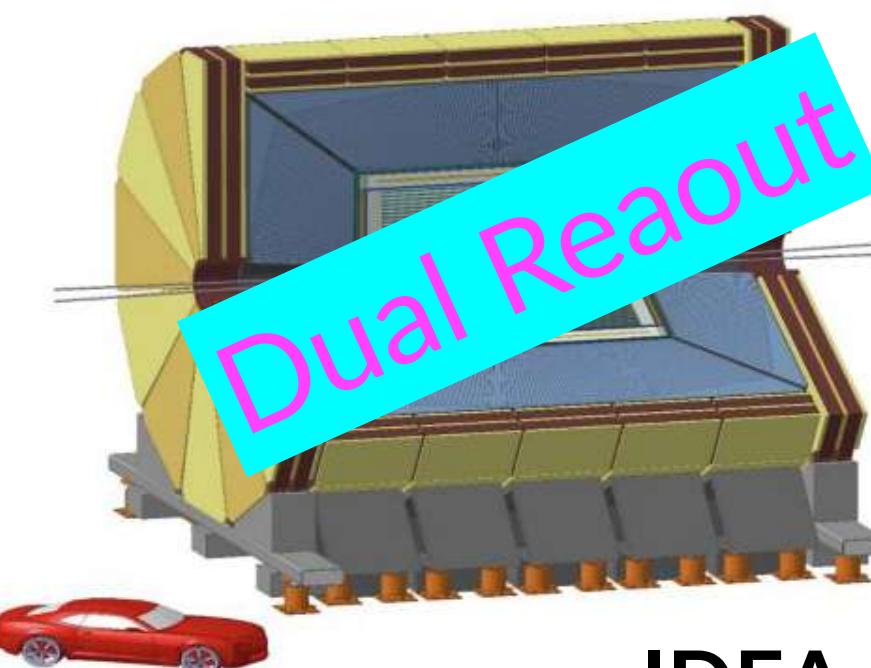


FST

FCC-ee



CLD

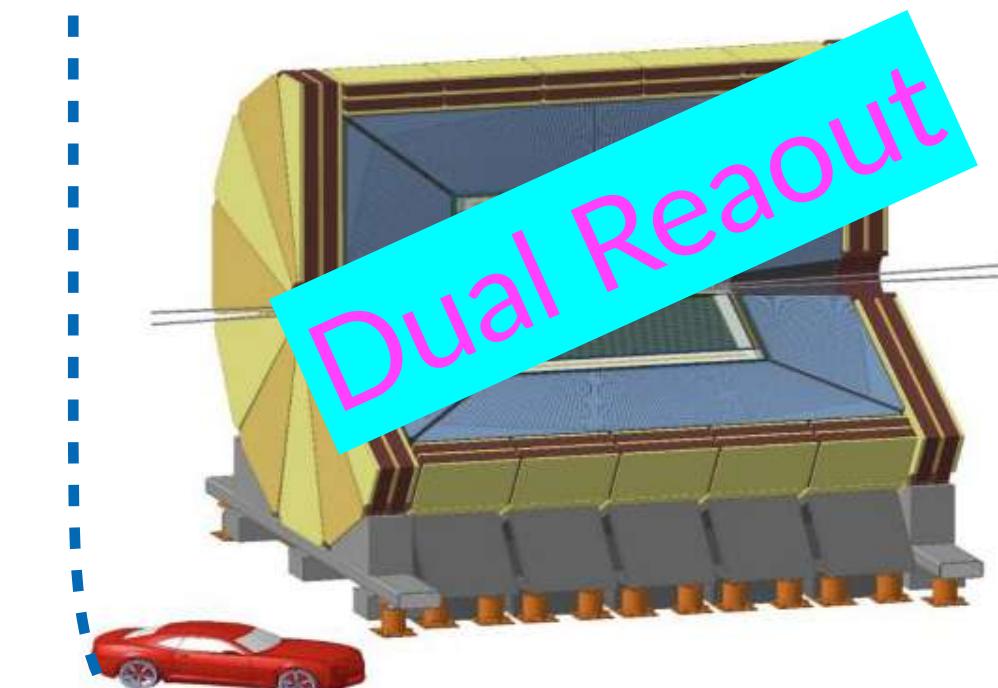


IDEA



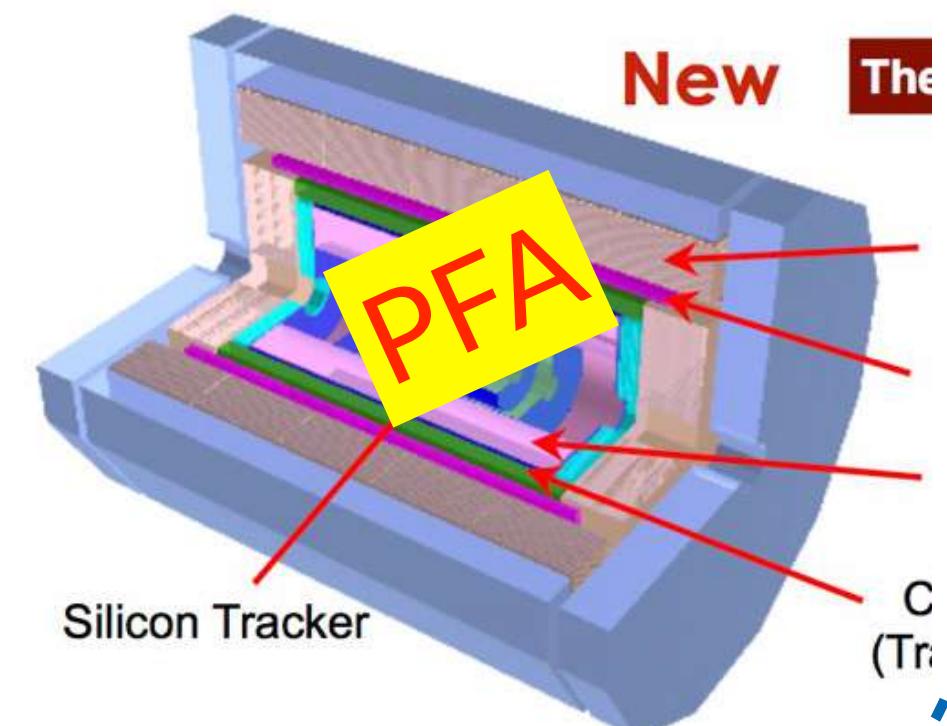
ALLEGRO

Baseline



IDEA

Dual Readout



4th Concept

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ベスト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

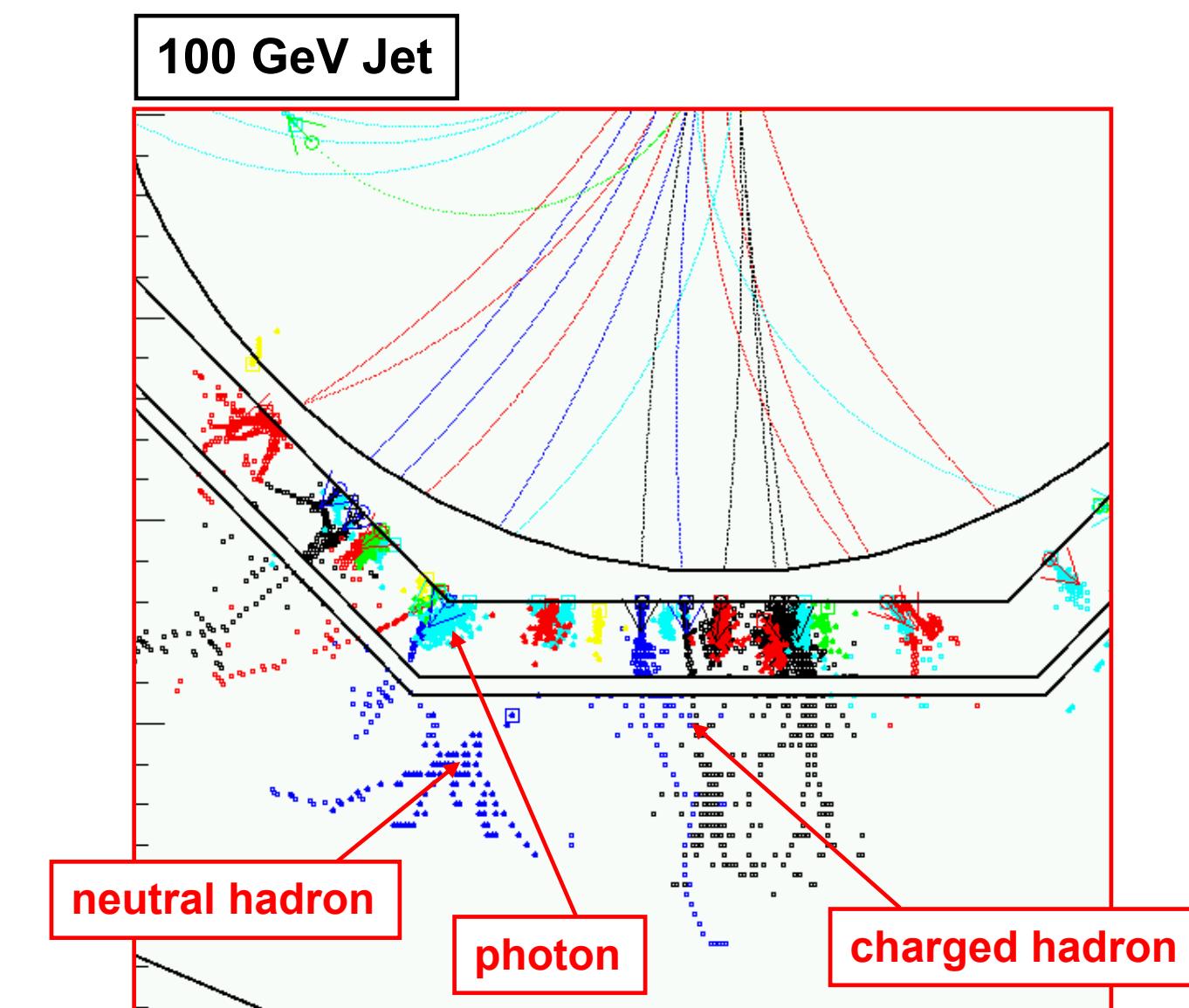
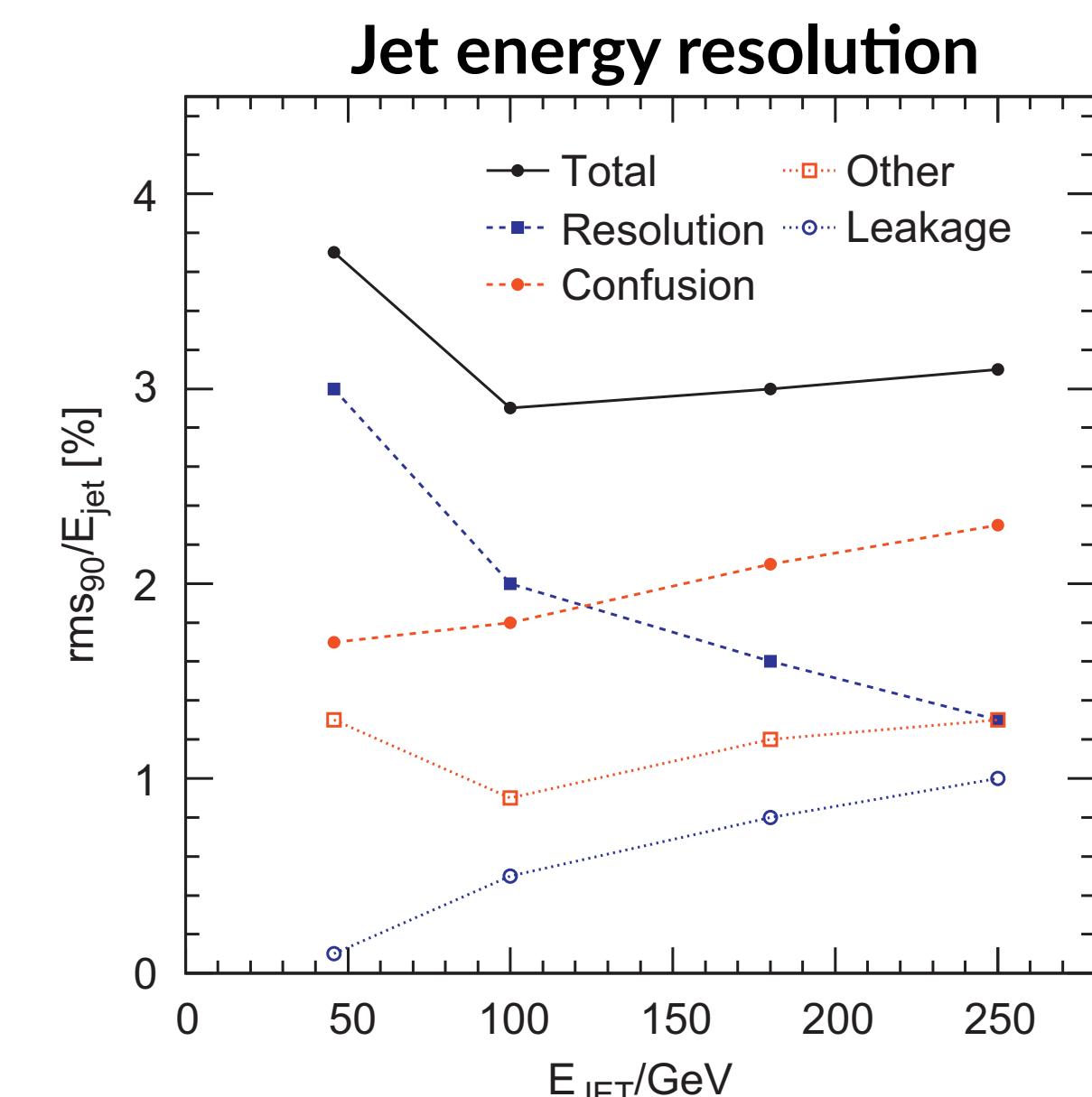
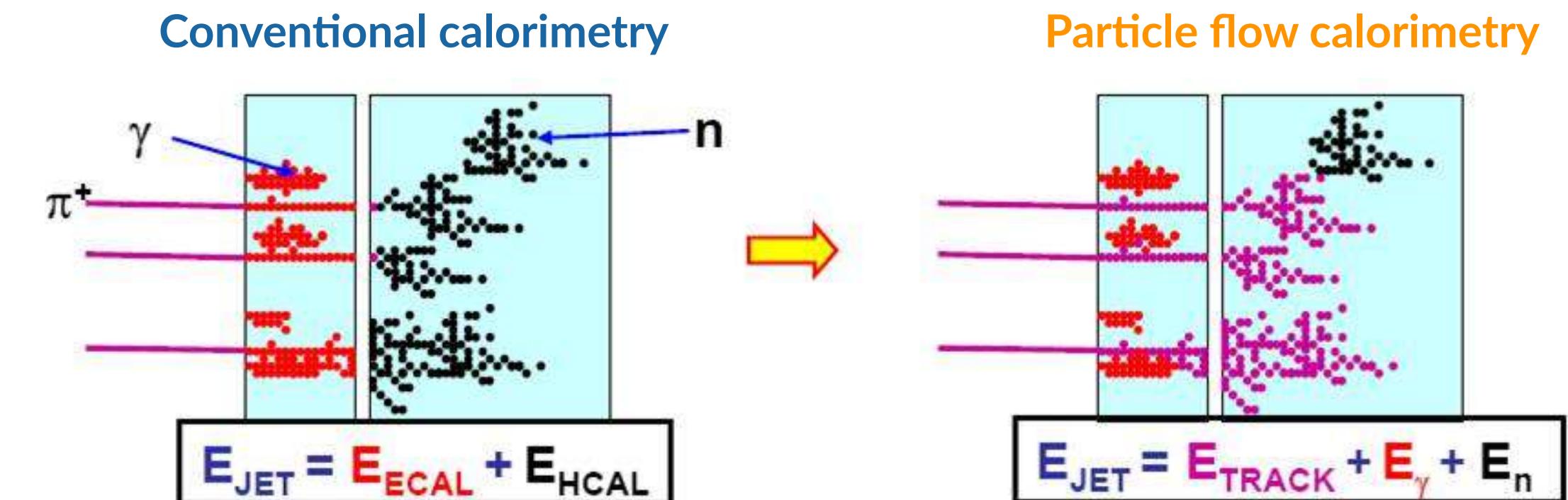
- HCALが測るのはジェットエネルギーの10%のみ

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

- 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



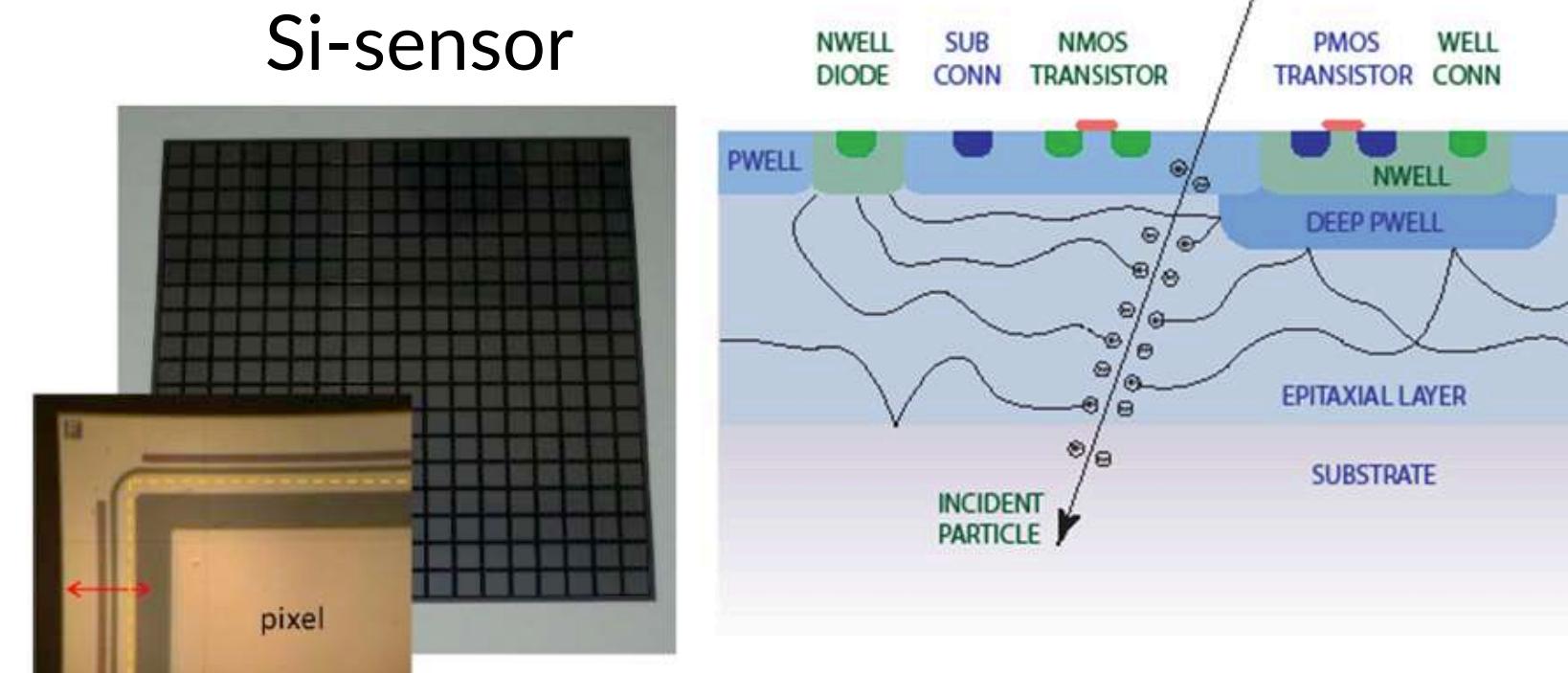


CALICE-PFAカロリメータ

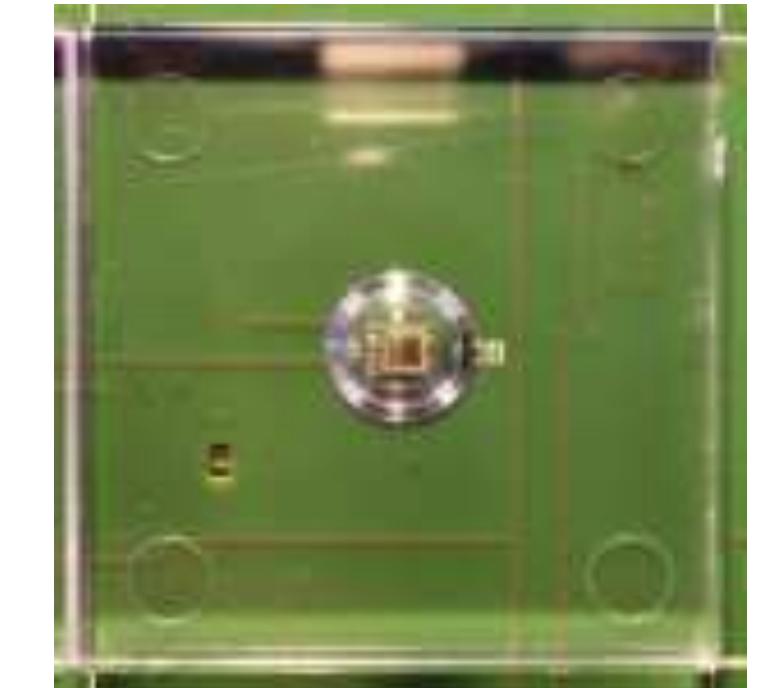
- PFAのための高精細カロリメータ開発は国際コラボレーションで行われてきた(昨年からDRDに移行)
- さまざまな技術オプションによるPFAカロリメータが開発されている

• Silicon sensor for ECAL

- Cell size $5 \times 5\text{mm}^2$ (even smaller for MAPS option)



Scintillator+SiPM



• Scintillator + SiPM for ECAL/HCAL

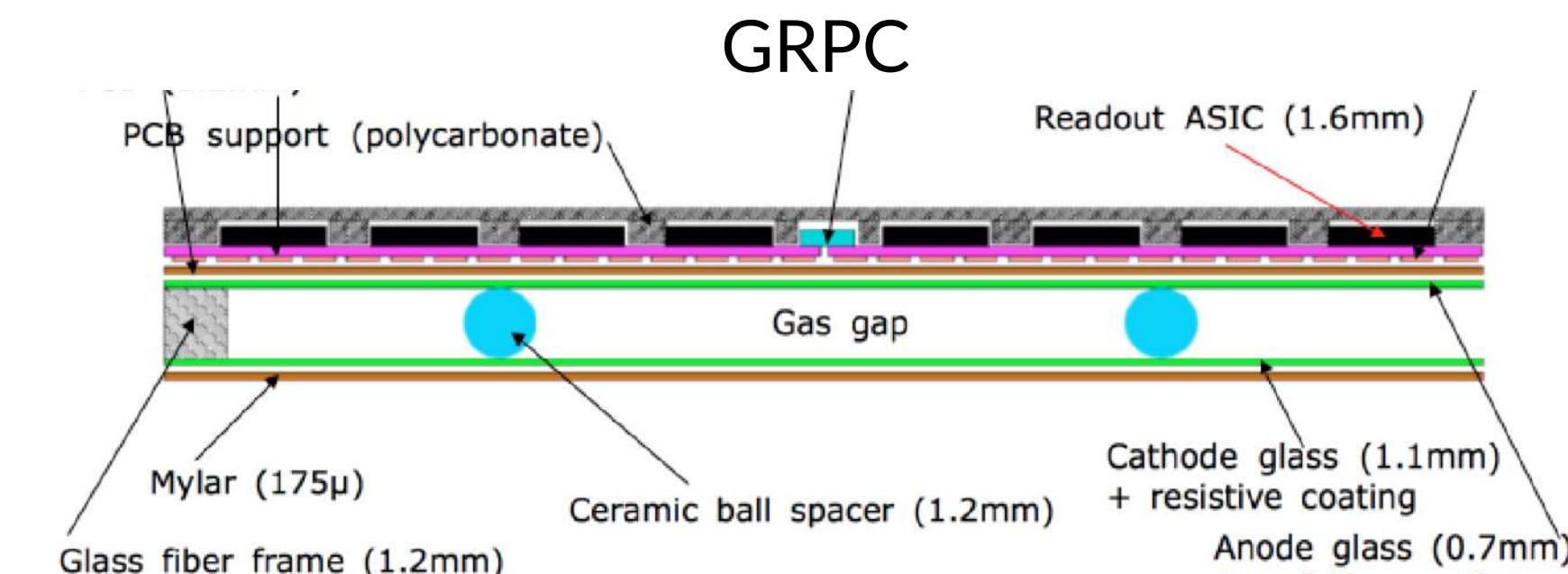
- Cell size $5 \times 5\text{mm}^2$ (ECAL), $30 \times 30\text{mm}^2$ (HCAL)

• Gaseous detector (GRPC, MPGDs) for HCAL

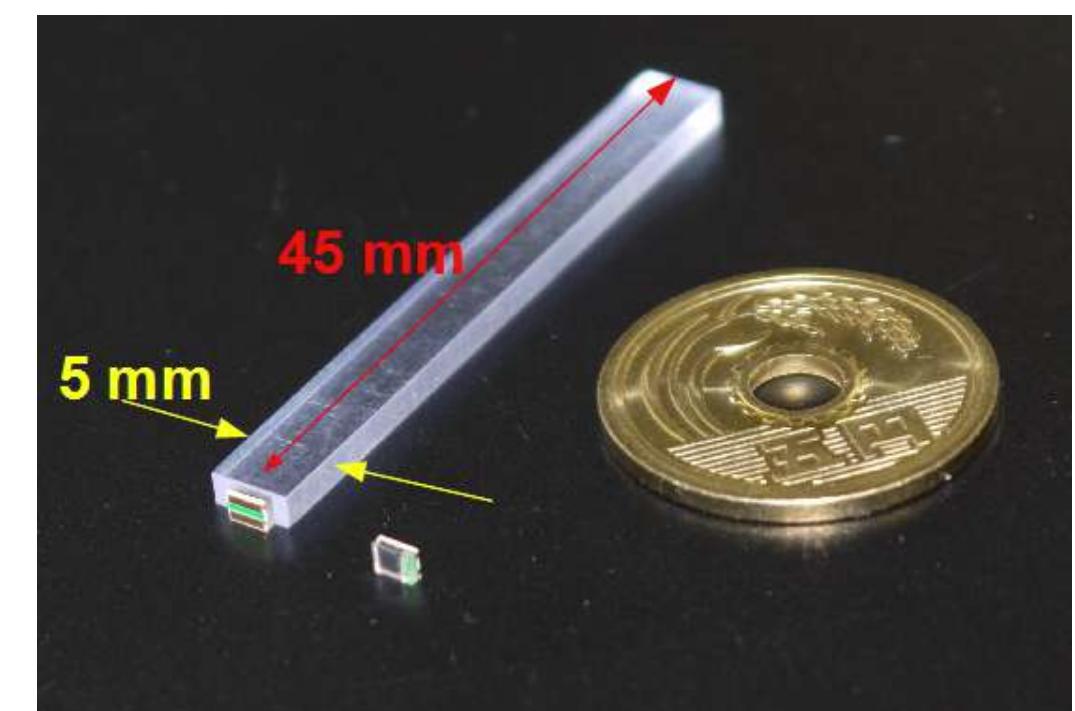
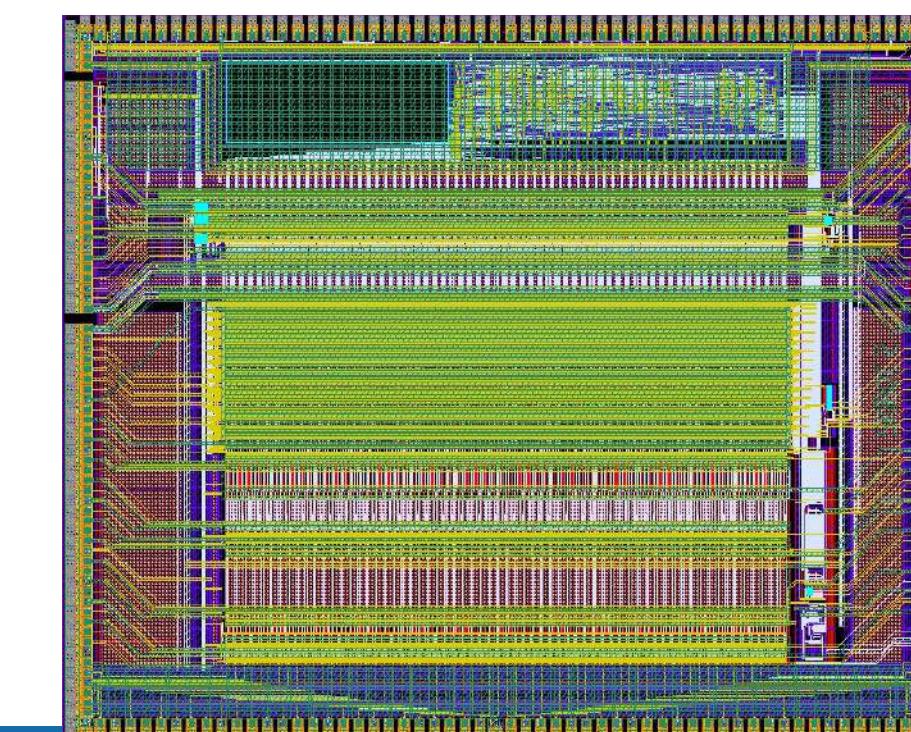
- Cell size $10 \times 10\text{mm}^2$

• 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)



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(e) + ハドロン成分(h)

- ・電磁成分の比率が事象毎に大きく変動

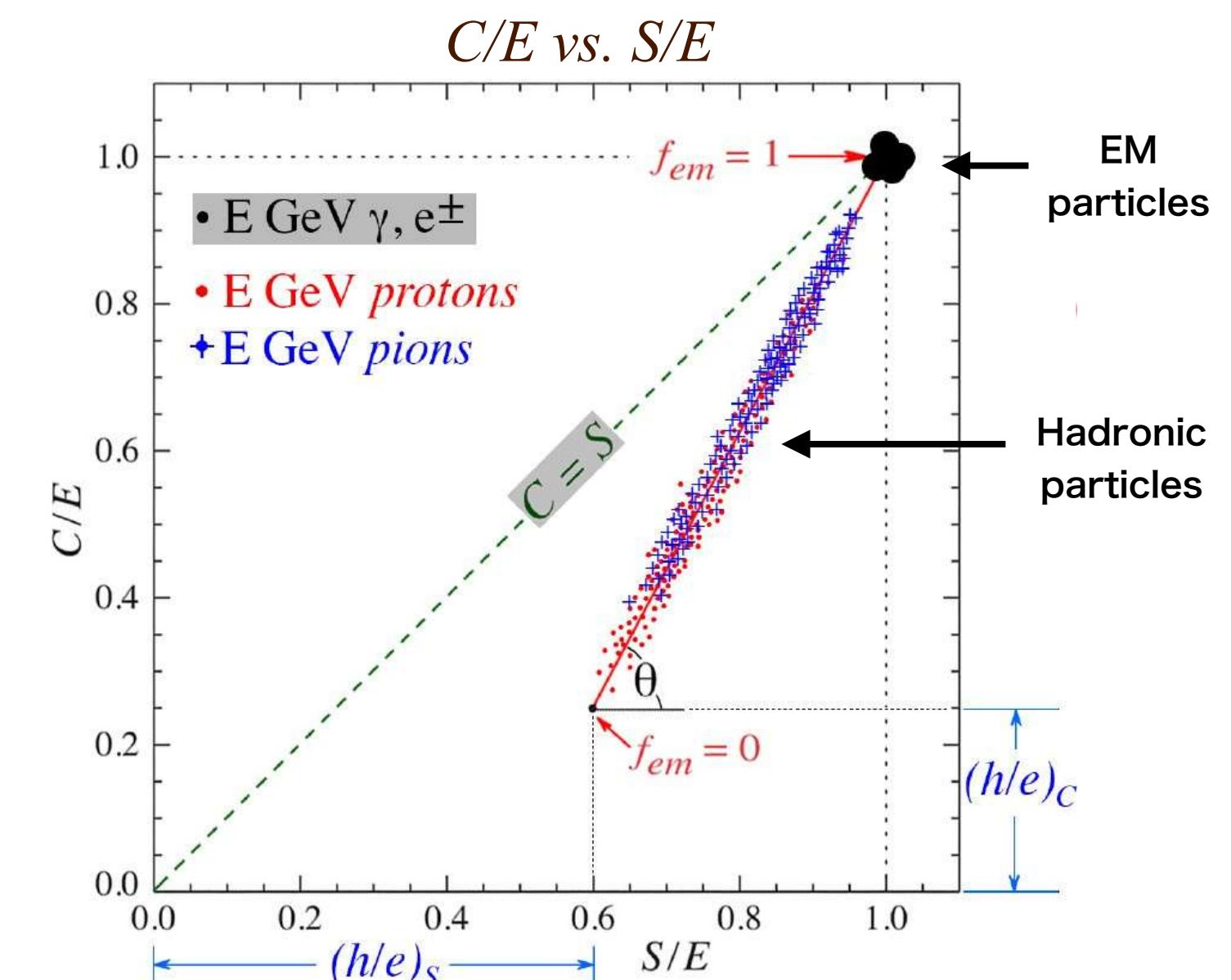
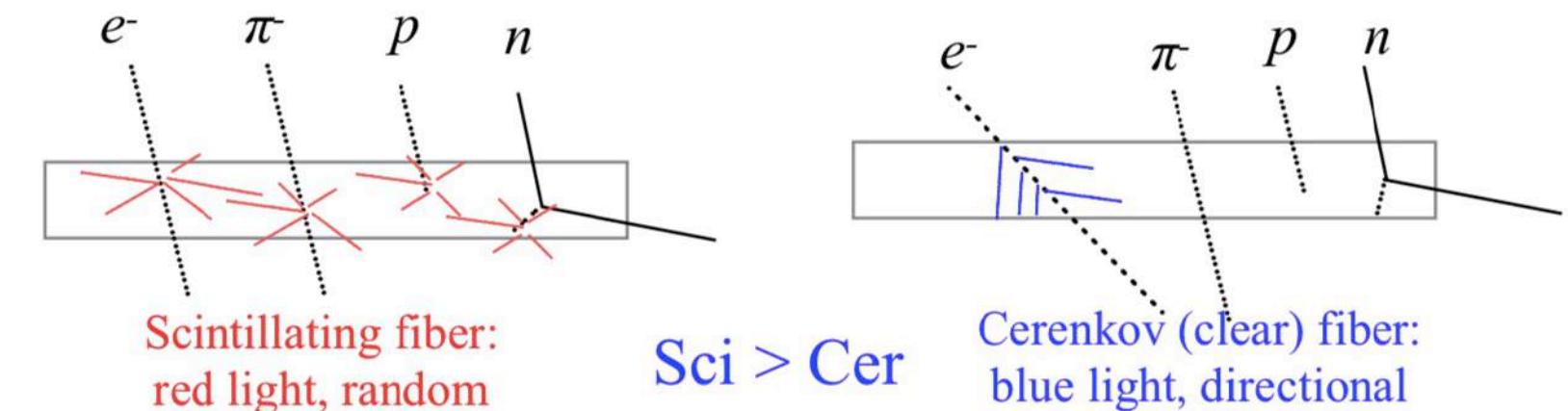
- ・通常のカロリメータは電磁成分とハドロン成分に対する感度が異なる($e/h \neq 1$)

→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

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

- $\left(\frac{h}{e}\right)_s, \left(\frac{h}{e}\right)_c$: 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 .

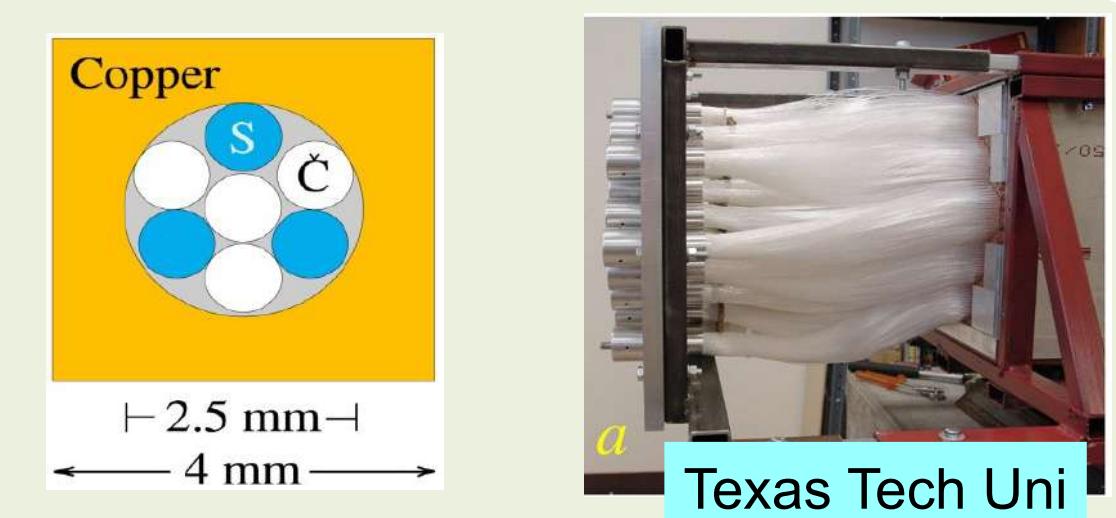
カロリメータ：Dual-Readout

- 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+クオーツファイバー

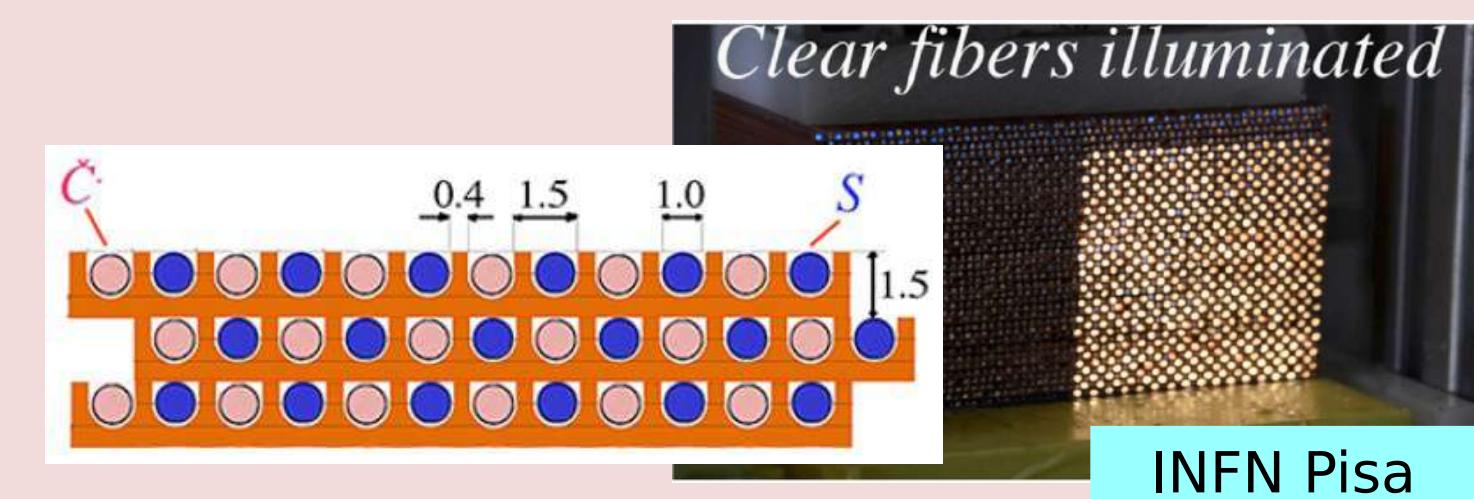
2003
DREAM

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



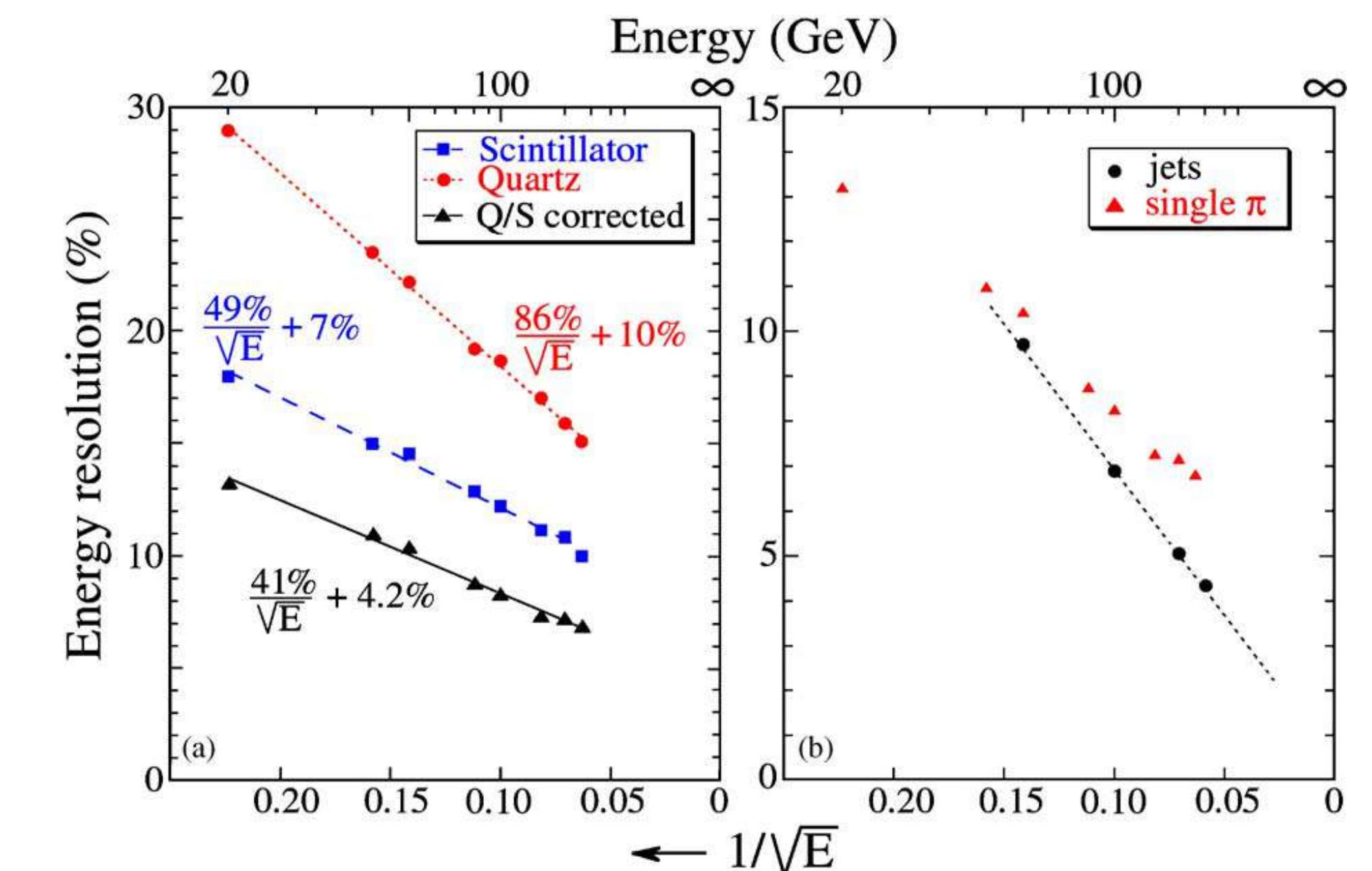
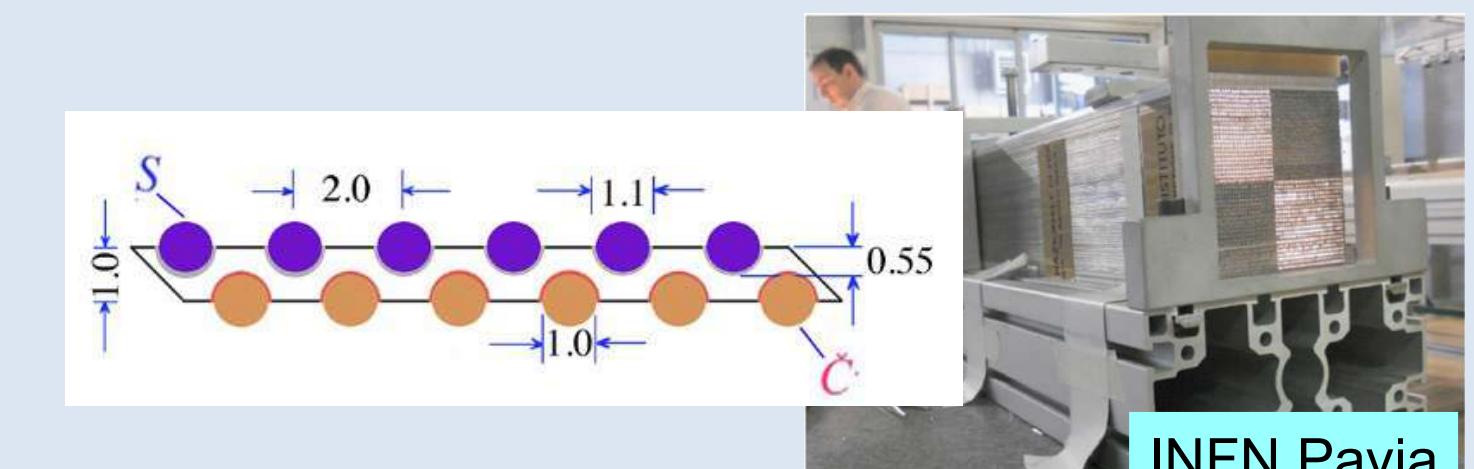
2012
RD52

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: $\sim 10 \lambda_{\text{int}}$



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: $\sim 10 \lambda_{\text{int}}$



R. Ferrari, EIC Calorimeter Workshop 2021

新しい技術の導入

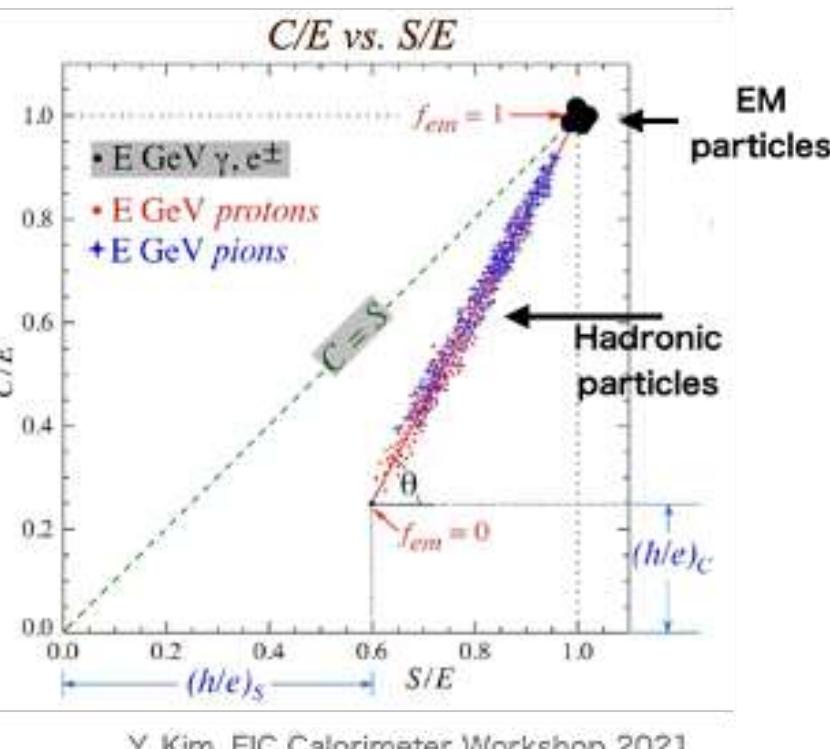
- ・ヒッグスファクトリーは計画毎に異なるタイムライン(CEPC ⇒ ILC ⇒ FCC-ee?)
 - ・測定器建設開始は最速シナリオでは数年後、場合によっては10年以上後の場合も
 - ・ILC測定器は既に高い完成度。工学設計に入っていた
 - ・円形ヒッグスファクトリーでは複数測定器。最近では線形でも衝突点2つの議論も (LCF@CERN)
⇒新しい技術による測定器コンセプトの改良、新しい測定器コンセプト導入の可能性も
- ・さまざまな新しい技術の導入が検討されている
 - ・時間分解能
 - ・量子技術 (量子センサー、量子マテリアルなど)
 - ・MAPS
 - ・解析技術 (ML/AI)
 - ・新しいカロリメータ技術
 - ・...

新しいカロリメータ技術の開発

- 3つの技術を統合した新しいカロリメータ技術の開発
 - PFAカロリメータ
 - Dual readoutカロリメータ
 - 高時間分解能
- 東大・信州大・KEK・Fermilab・NIUの共同開発

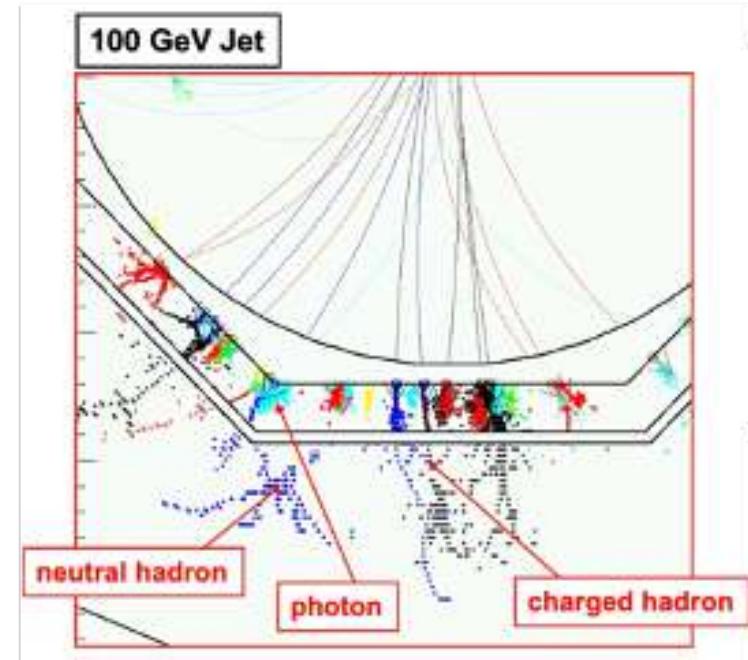
二重読み出しカロリメータ技術

Better performance at high energy, PID



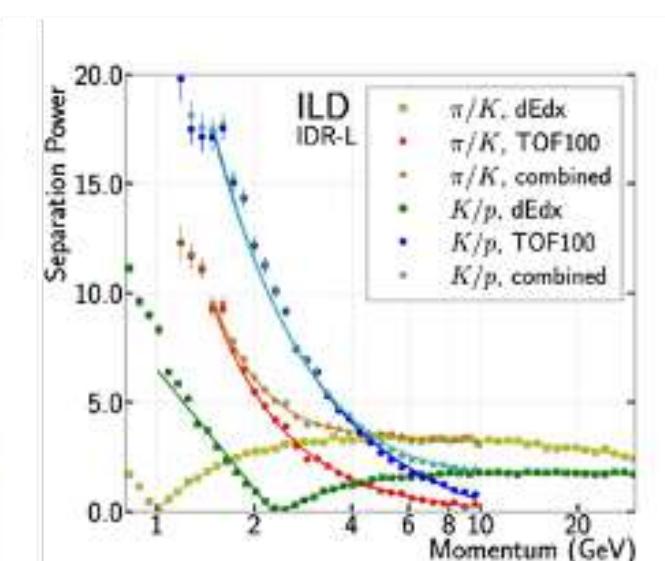
高精細カロリメータ技術

Better performance at low energy



将来コライダー実験のための 新しいカロリメータ技術

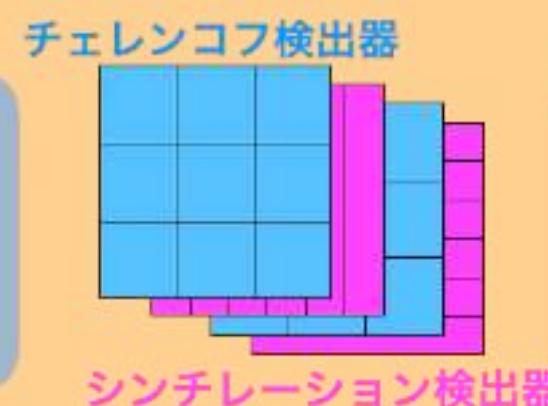
ピコ秒タイミング PID, BG reduction, improve PFA



3つの技術をどのように統合するか？

二重読み出し

チェレンコフ検出器
チェレンコフ放射体 + UV-GasPM
・高精細読み出し
・ピコ秒タイミング



シンチレーション検出器
SiPM読み出しストリップシンチレーター
・高精細読み出し



高時間分解能エレクトロニクス

シミュレーション・解析ツール

プロトタイプ検出器性能試験・ビームテスト

新しいカロリメータ技術の開発：チェレンコフ検出器

・コンセプト

- ・チェレンコフ放射体 + GasPM (フォトカソード + RPC増幅層)

- ・DLC-RPCは神戸大と共同開発

・優位性

- ・優れた時間分解能(目標 $\mathcal{O}(10 \text{ ps})$)

- ・一様かつ効率的なチェレンコフ光検出器

- ・大面積化が容易

- ・読み出しセグメント化

・プロトタイプ試験@KEKテストビームライン 2024年12月

- ・チェレンコフ放射体 : MgF₂ (10mm厚)

- ・フォトカソード : DLC (3nm)

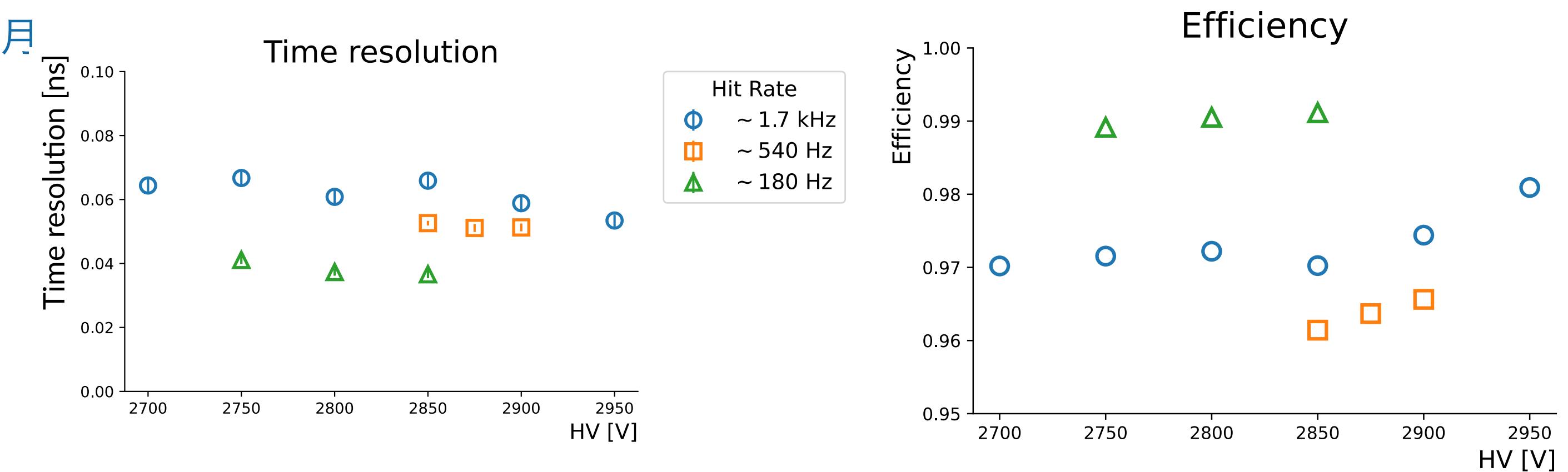
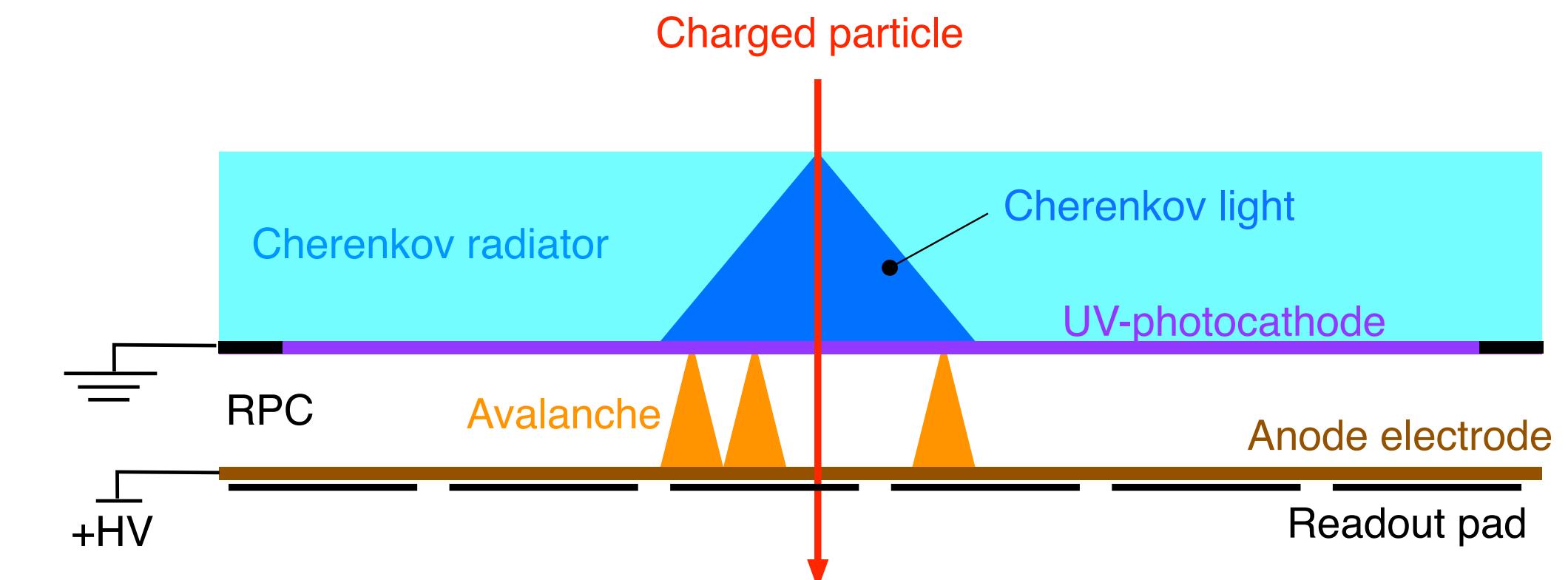
- ・アノード電極 : 0.5mm厚ソーダガラス

- ・ギャップ : 190μm

- ・ガス混合比 : R134a:SF₆:C₄H₁₀=20:0:20 [mL/min]

⇒ 検出効率 99%, 時間分解能 37ps

Cherenkov detector (gasPM)



* Hit rate = scaler count of TC scaled by CD active area
gas mixture R134a : SF₆ : C₄H₁₀ = 20 : 0 : 20

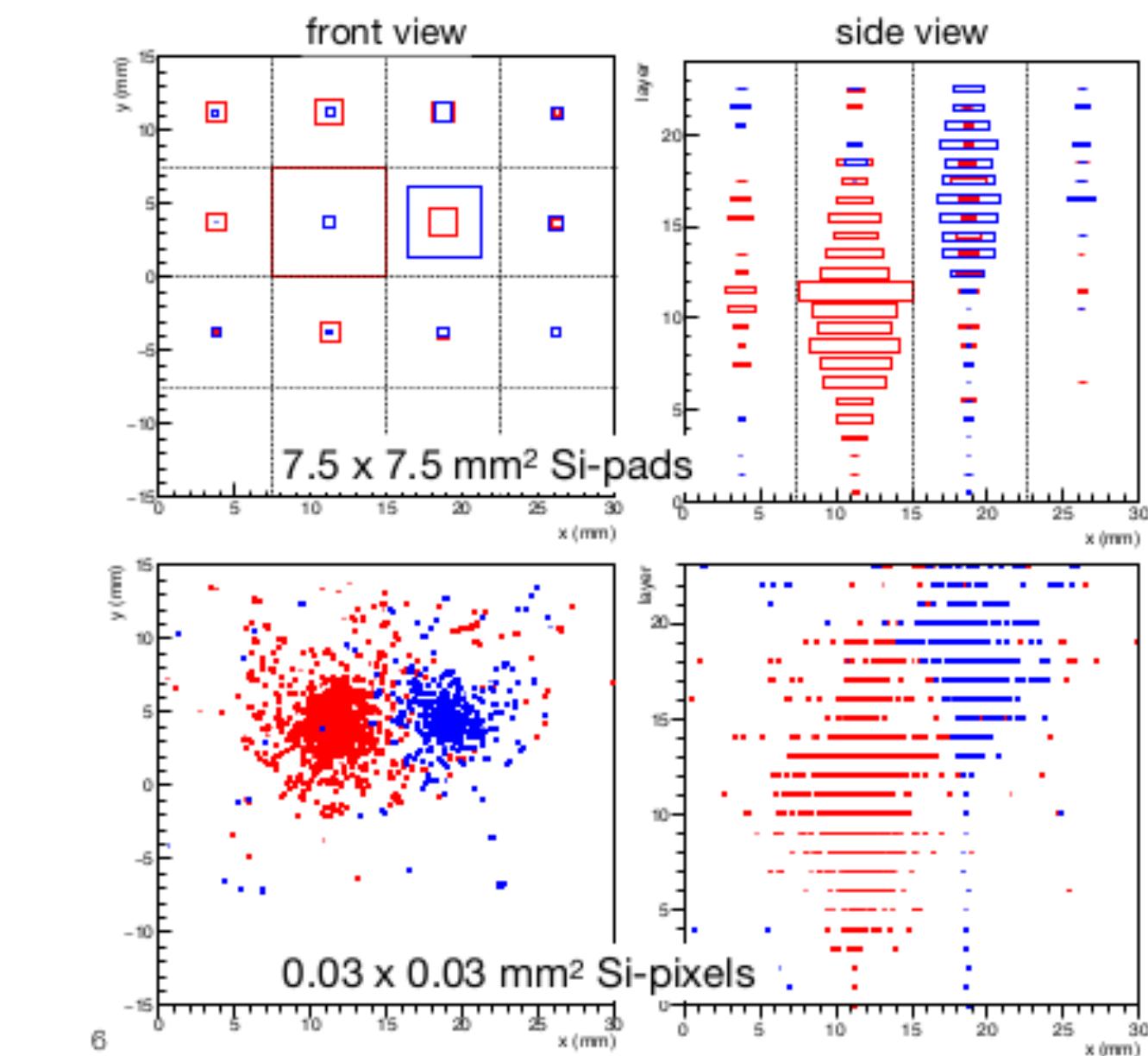
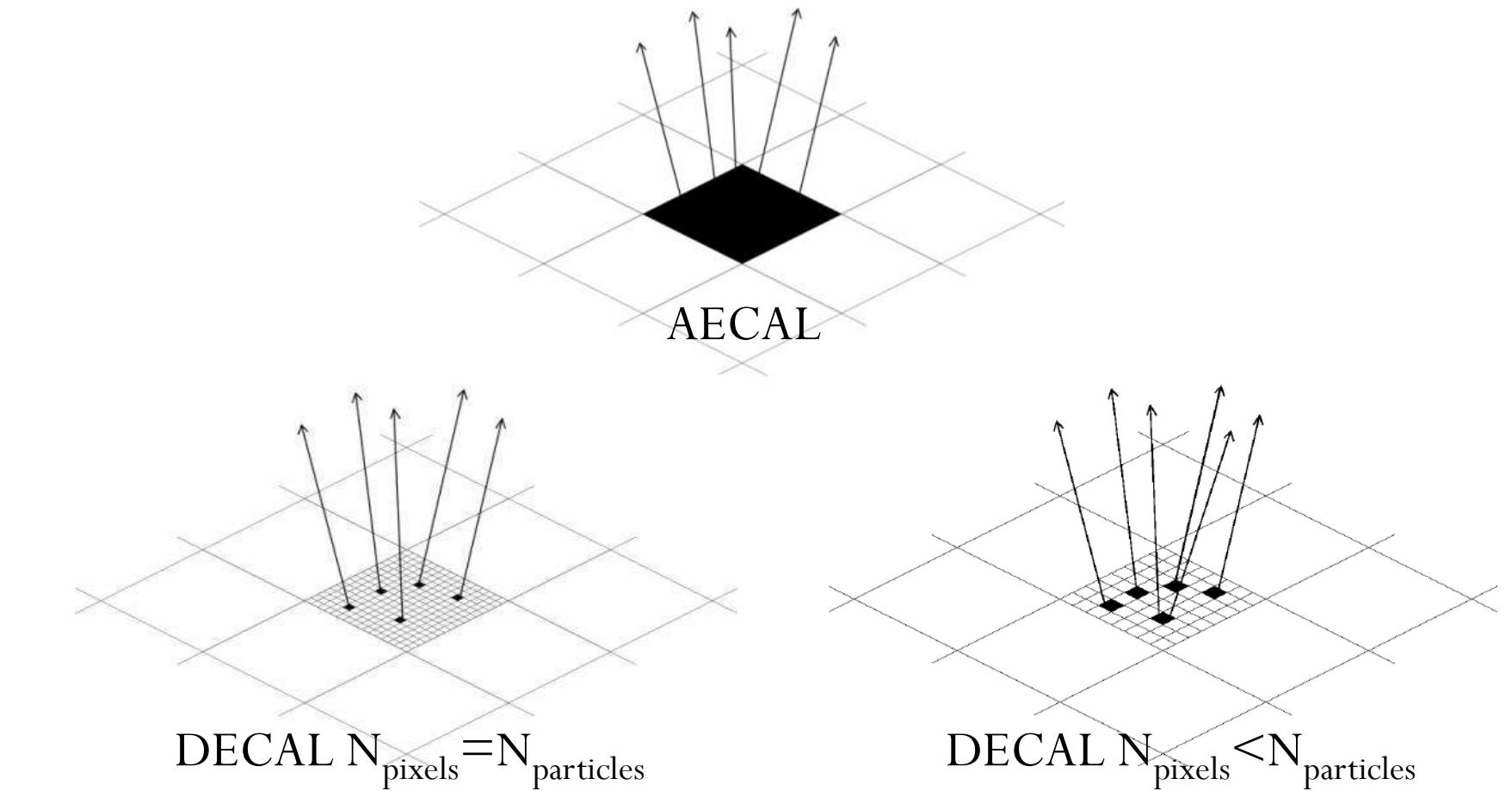
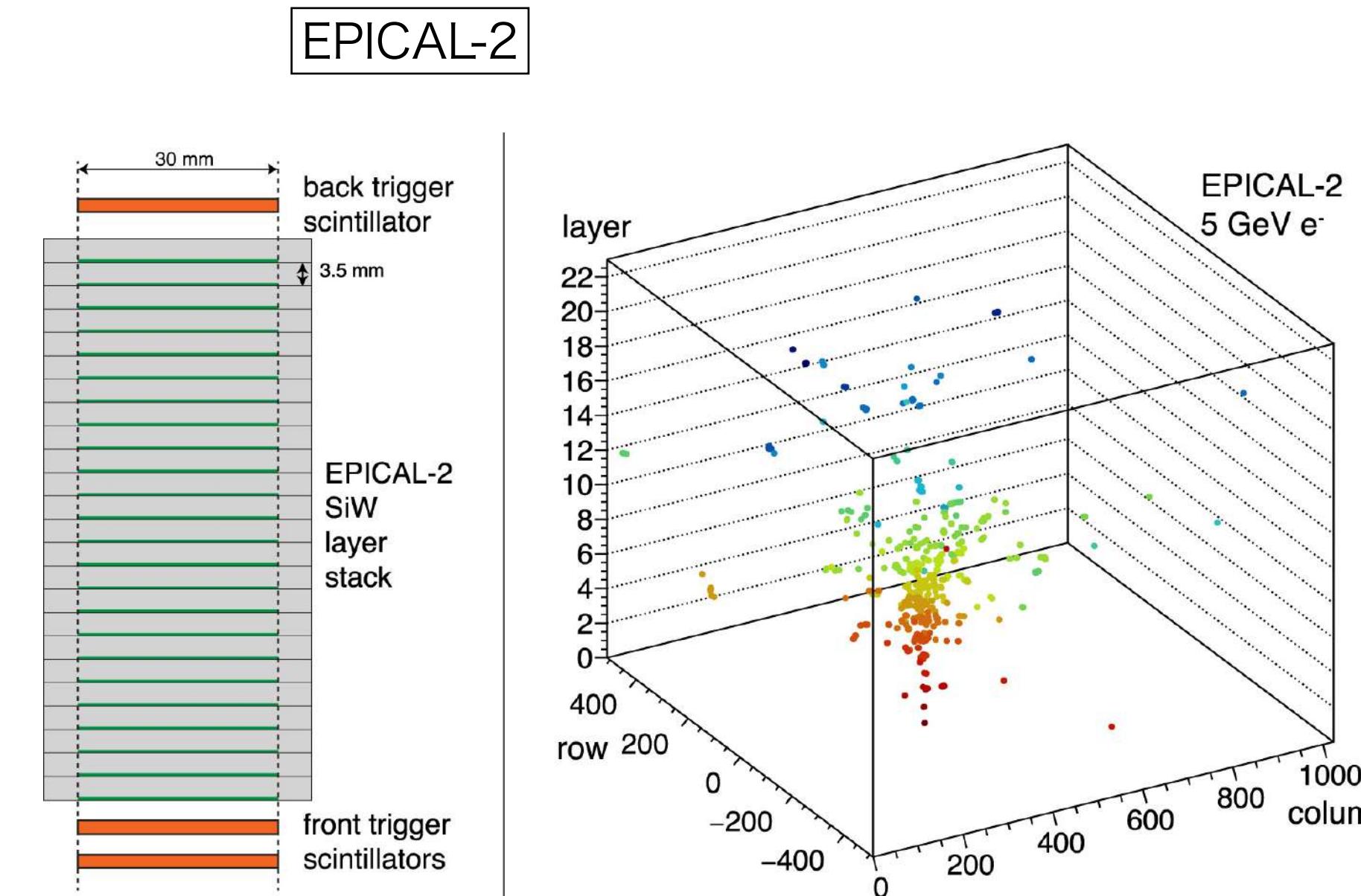
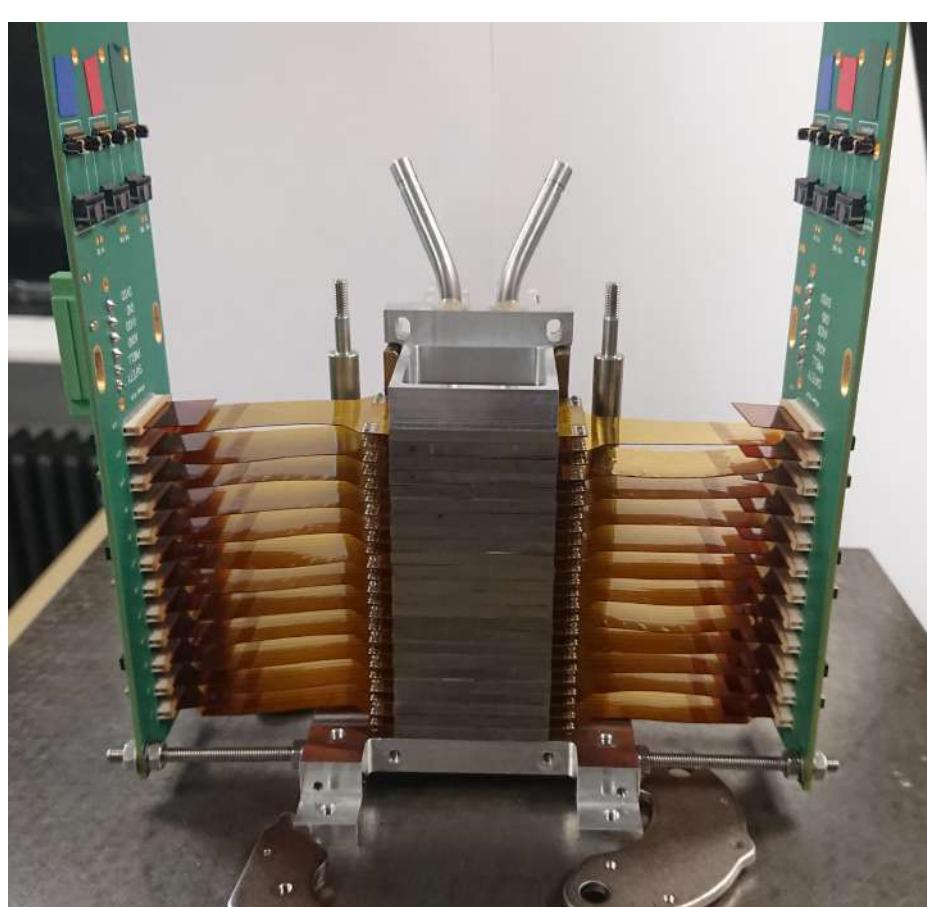
デジタルカロリメータ

- 究極粒度(granularity)のECAL

- シャワーエネルギーを粒子数で測る
- アナログエネルギー測定におけるLandau揺らぎ、角度揺らぎを回避
- 高い粒子分離能力

- MAPS技術を用いたdigital ECAL

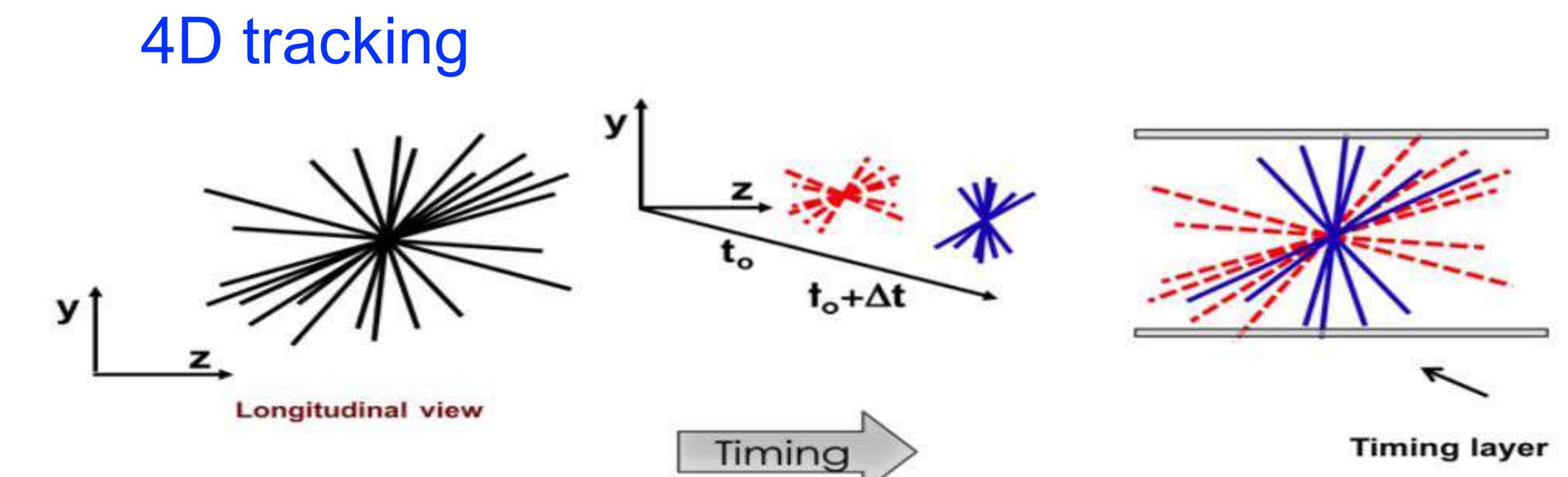
- Pixel size $30 \times 30 \mu\text{m}^2$



時間分解能

- 高時間分解能の導入

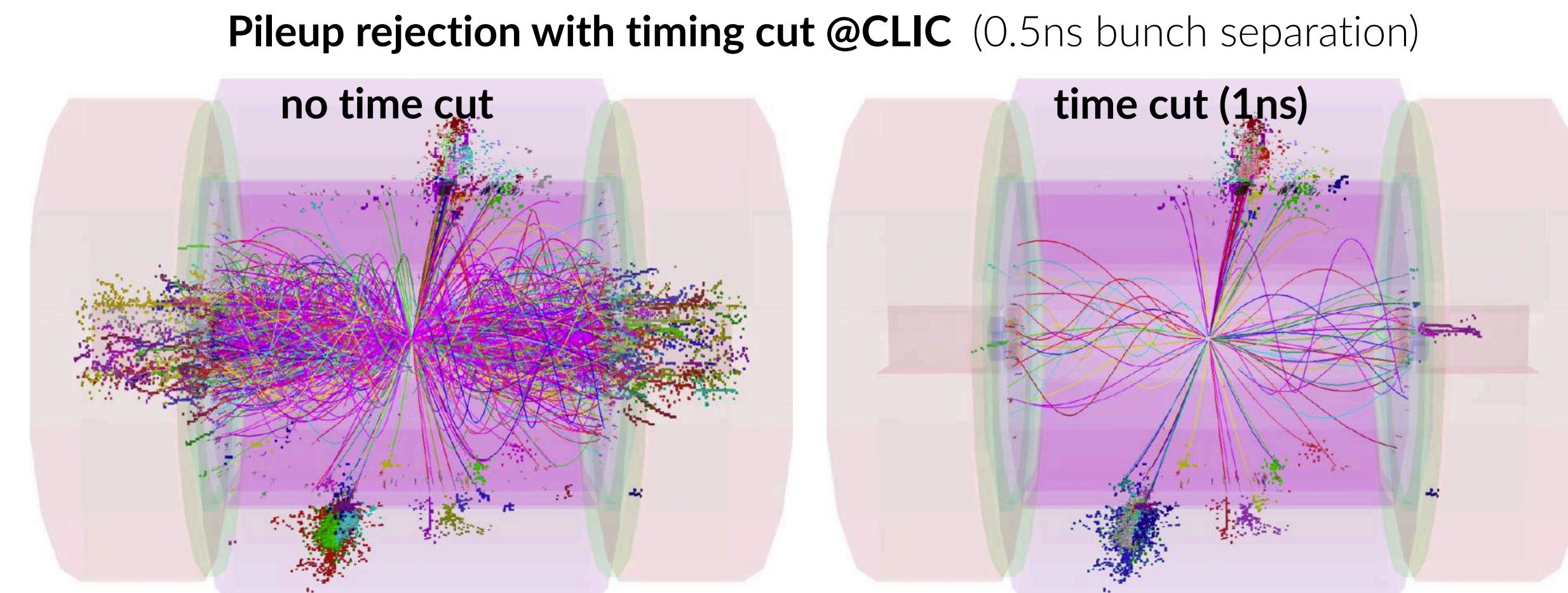
- 4次元飛跡再構成
- 飛行時間測定により粒子識別能力の向上
- 5次元カロリメータ
- パイルアップやBGの抑制



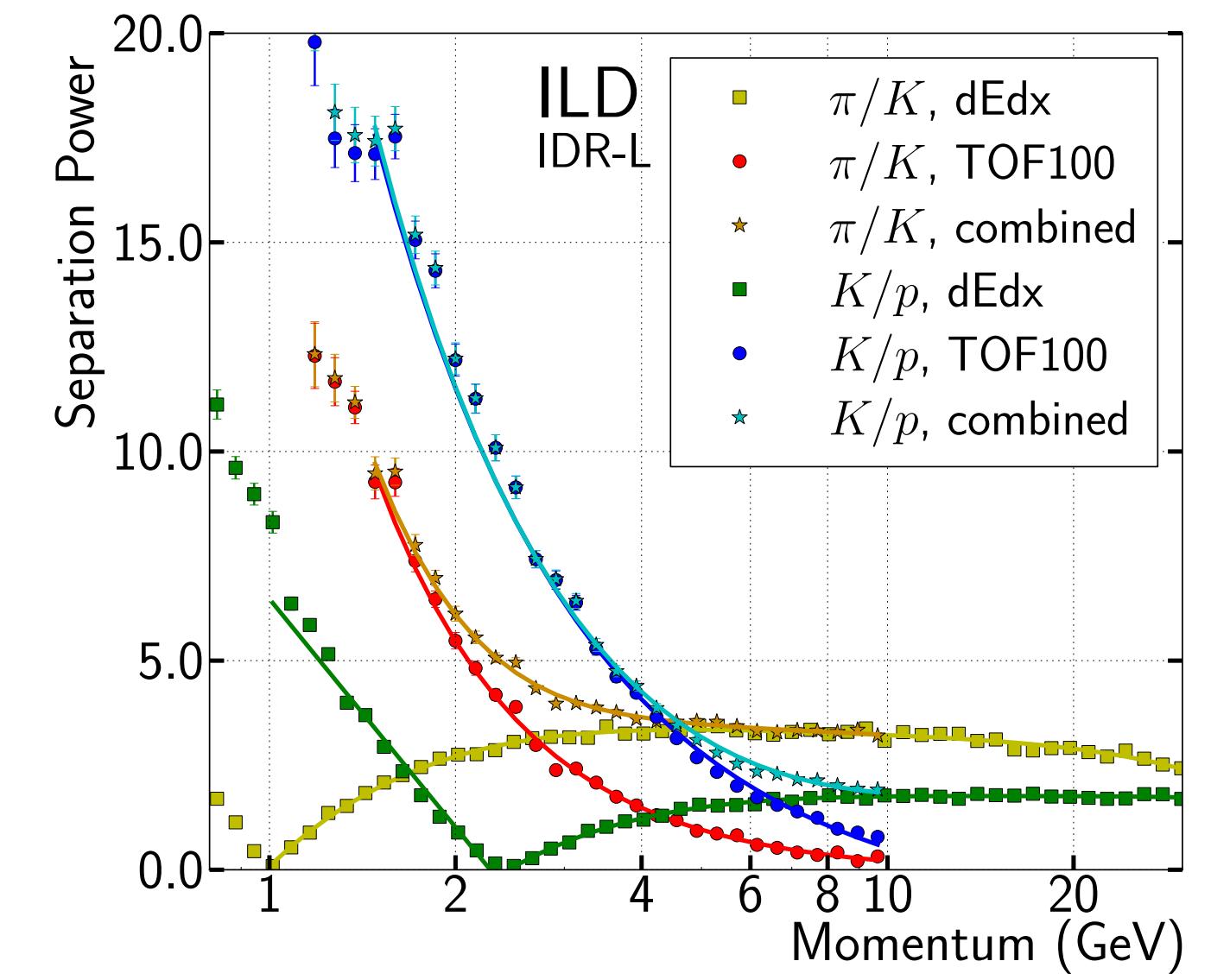
<https://agenda.linearcollider.org/event/8217/contributions/44430>

- 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 $\mathcal{O}(10 \text{ ps})$



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

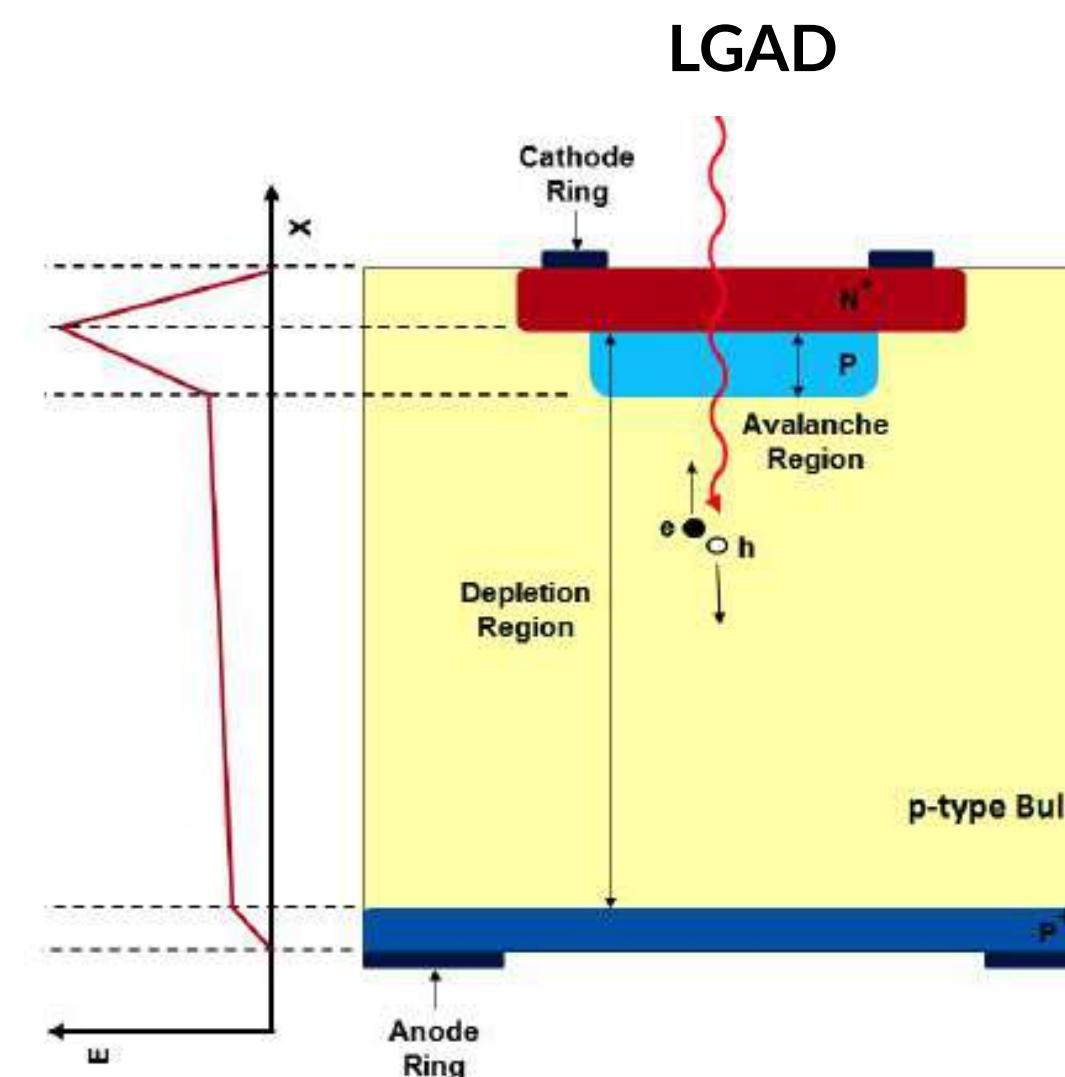
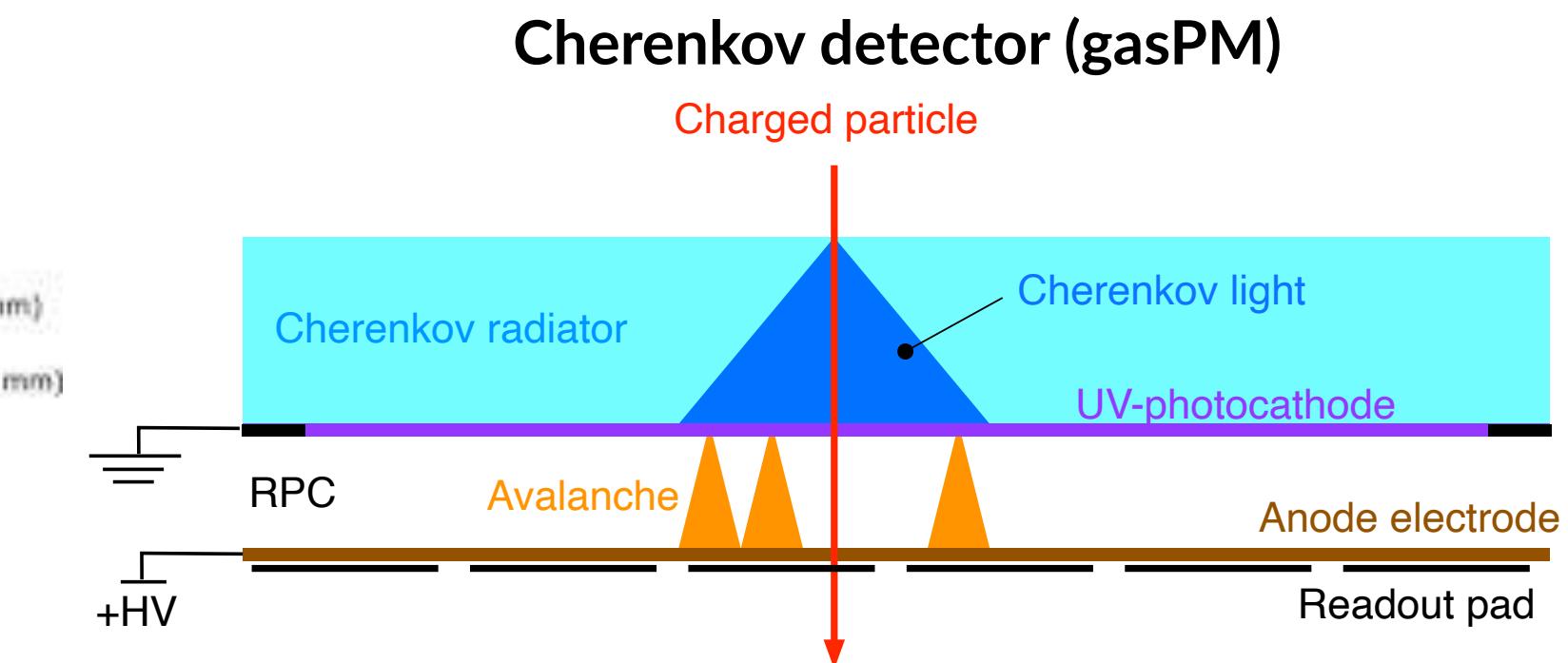
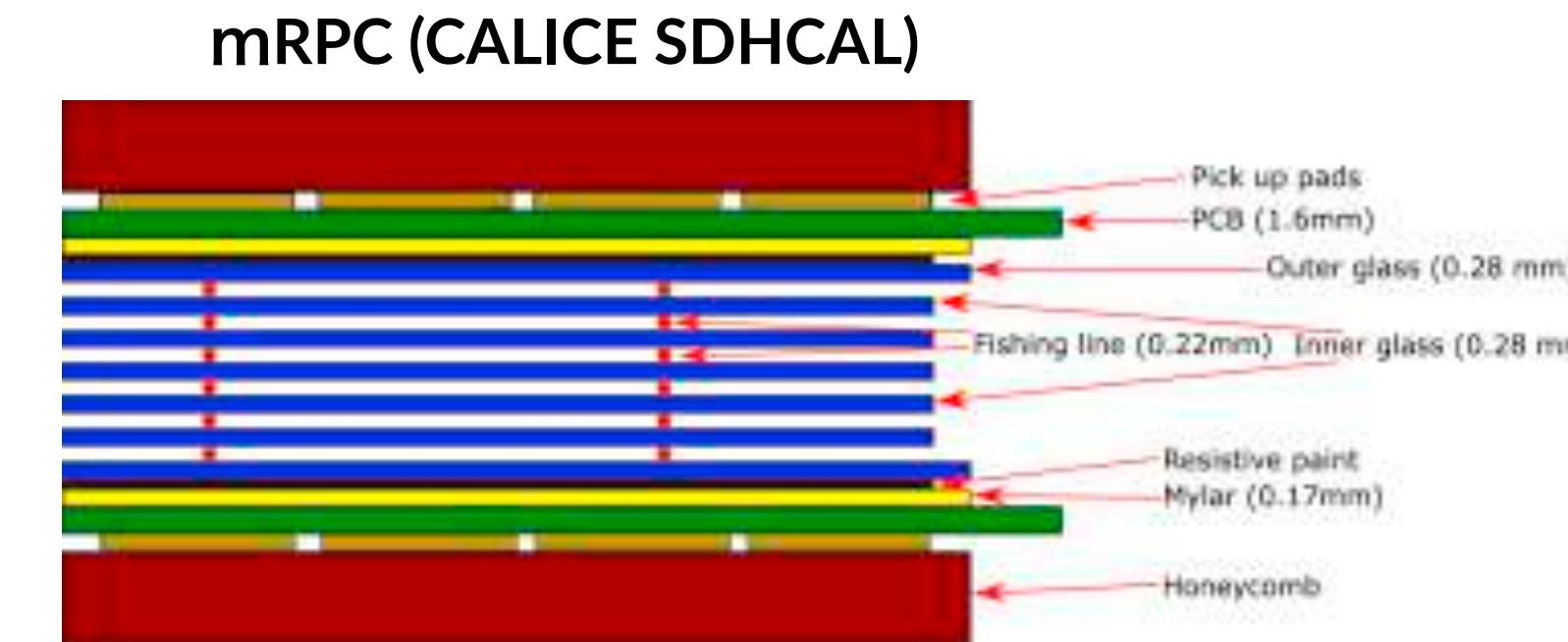


時間分解能

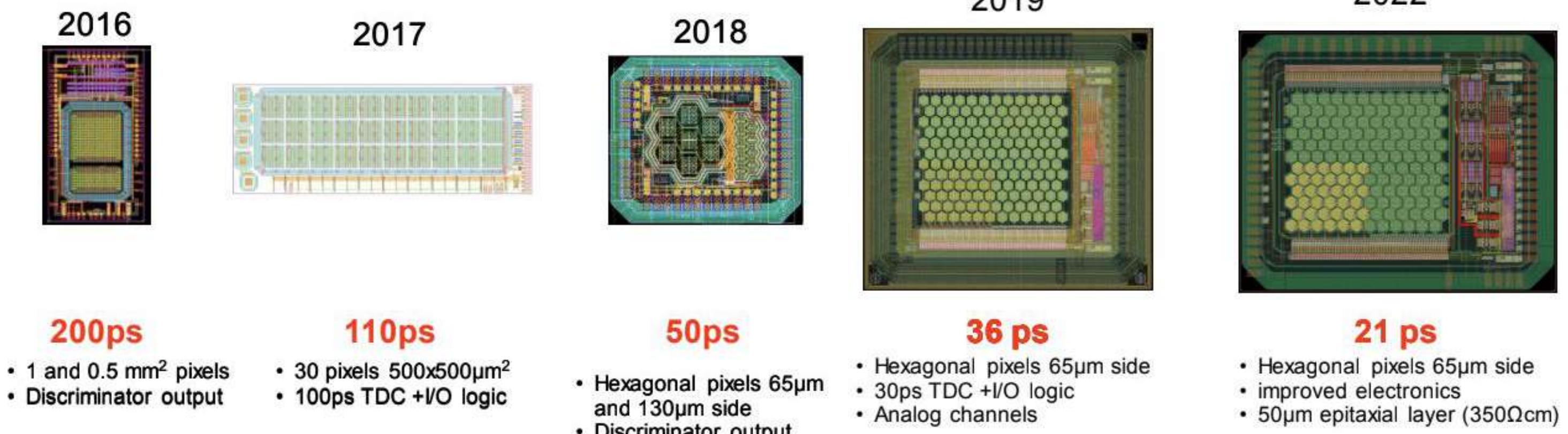
- ・超高時間分解能の時間測定層の導入 or カロリメータの各層の平均で高時間分解能を実現

- ・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



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

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(ペロブスカイト量子ドット)

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

from Benoit Dubertret and Hideki Ooba

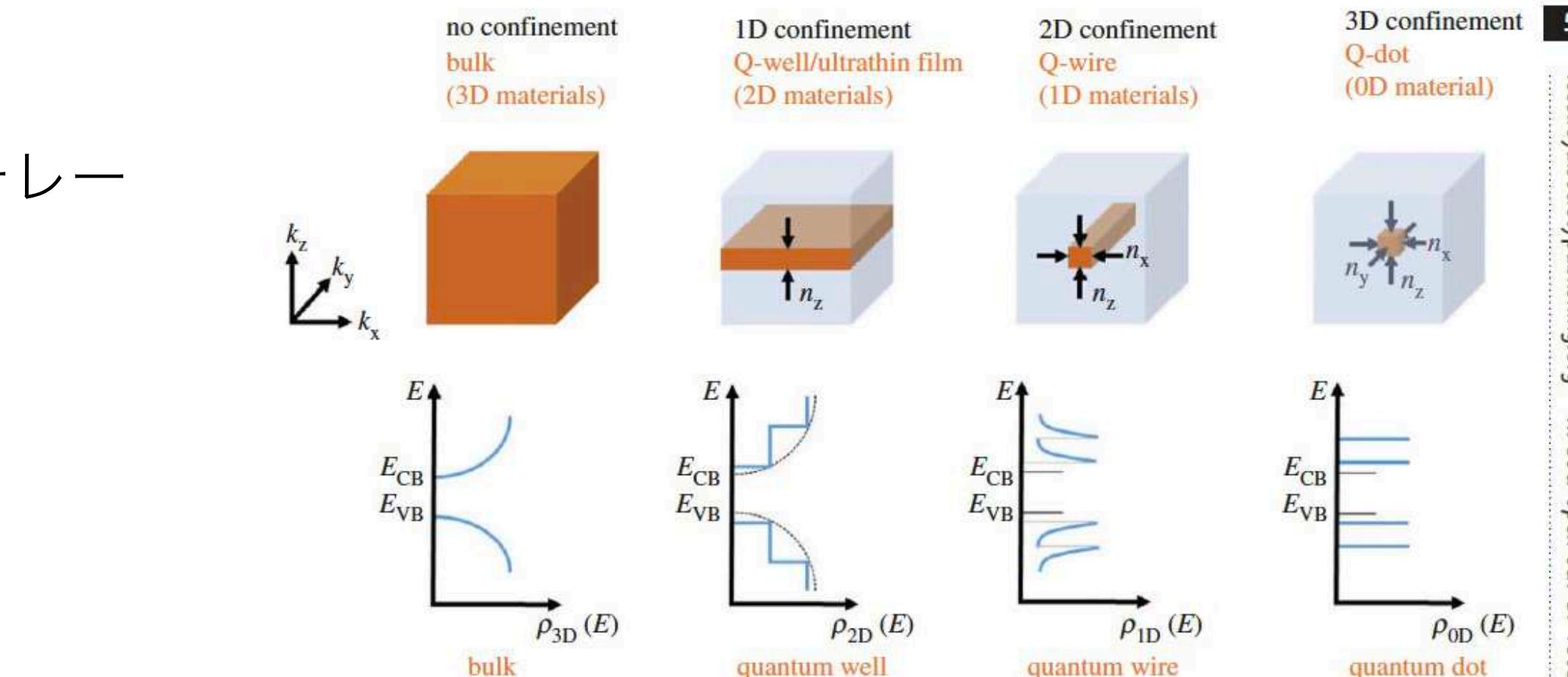
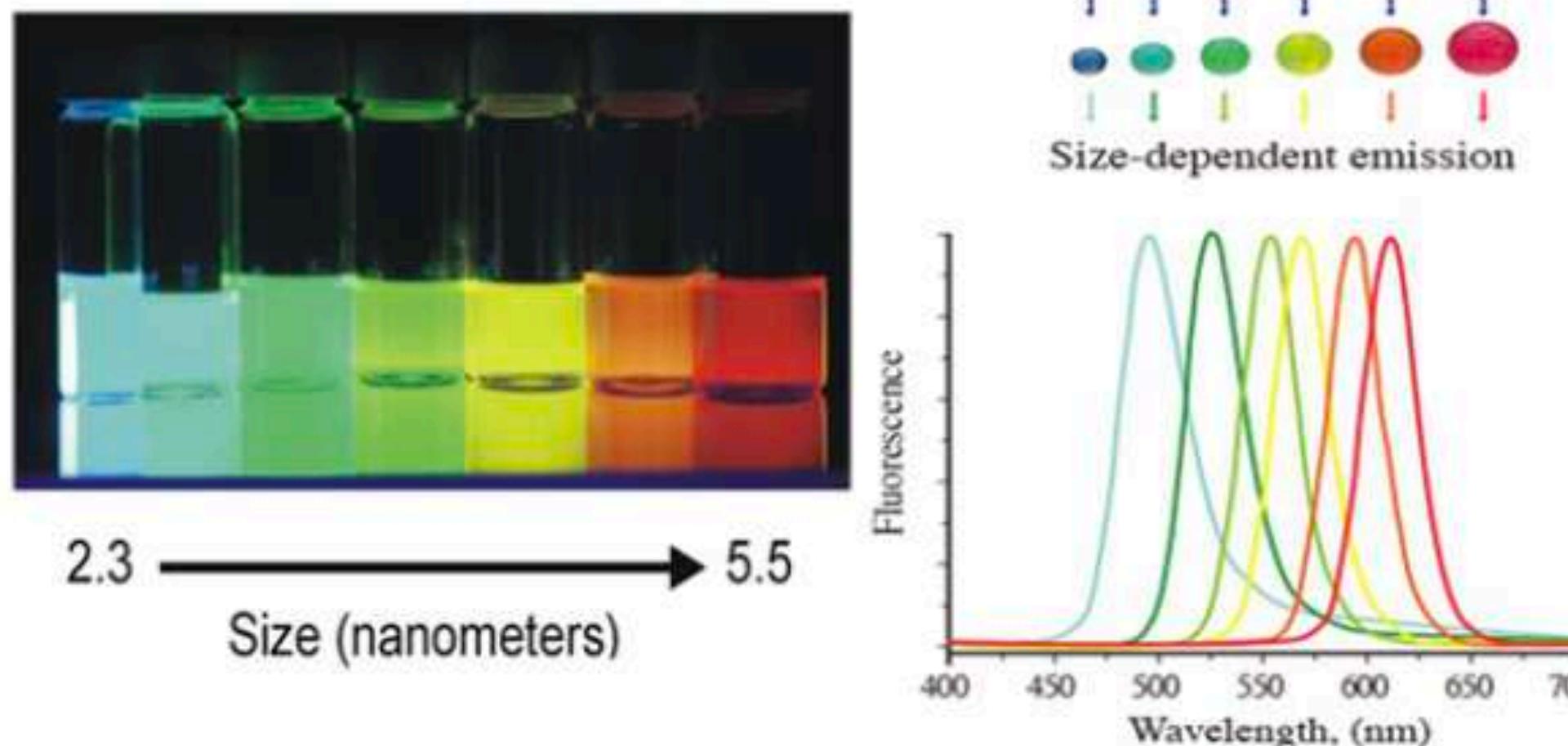
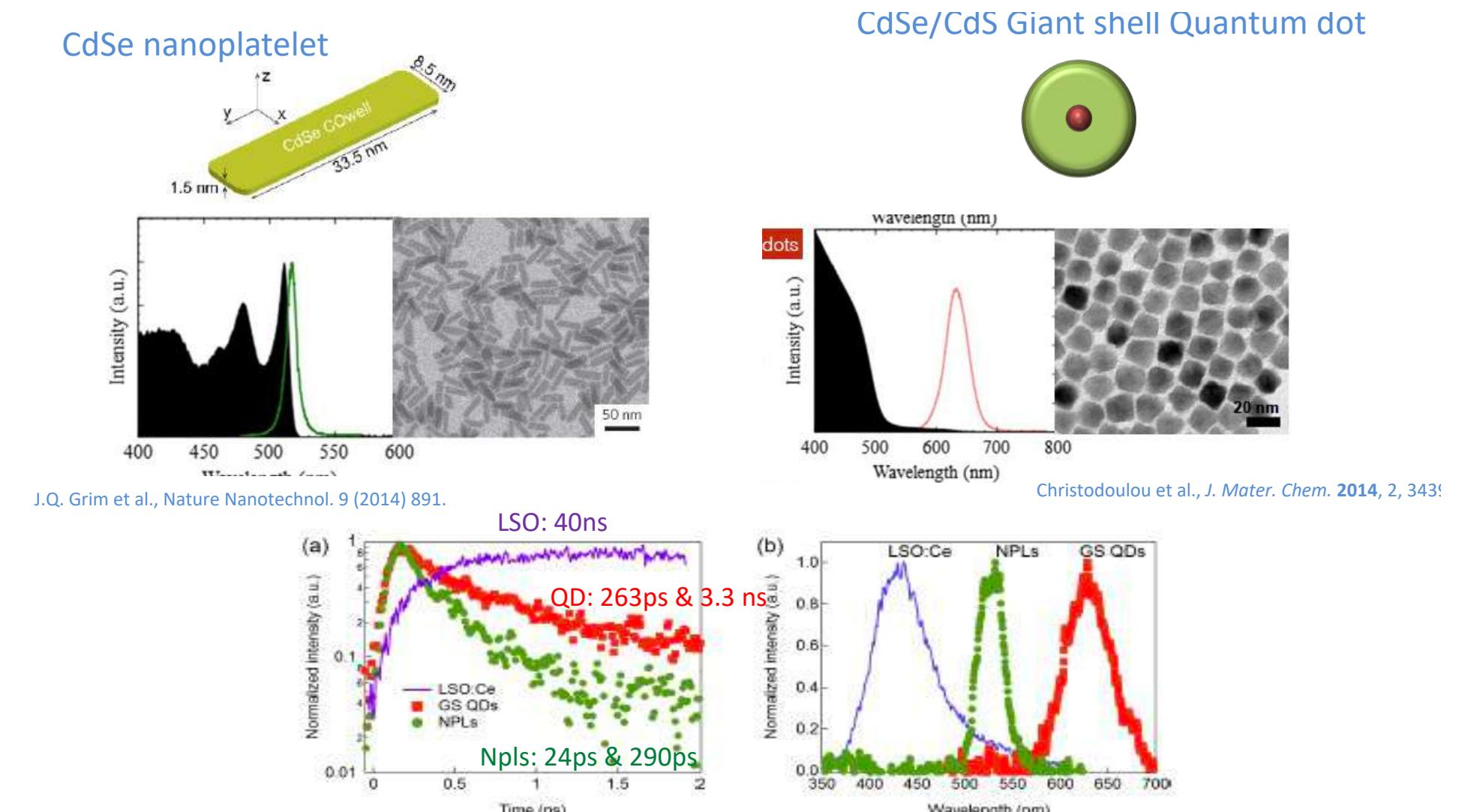


Figure 1. Schematic illustration of broken symmetry and functional form of the density of states in 1D, 2D and 3D confined materials.



R. Martinez Turtos et al., 2016 JINST_11 (10) P10015

=> Much Faster than LYSO crystal

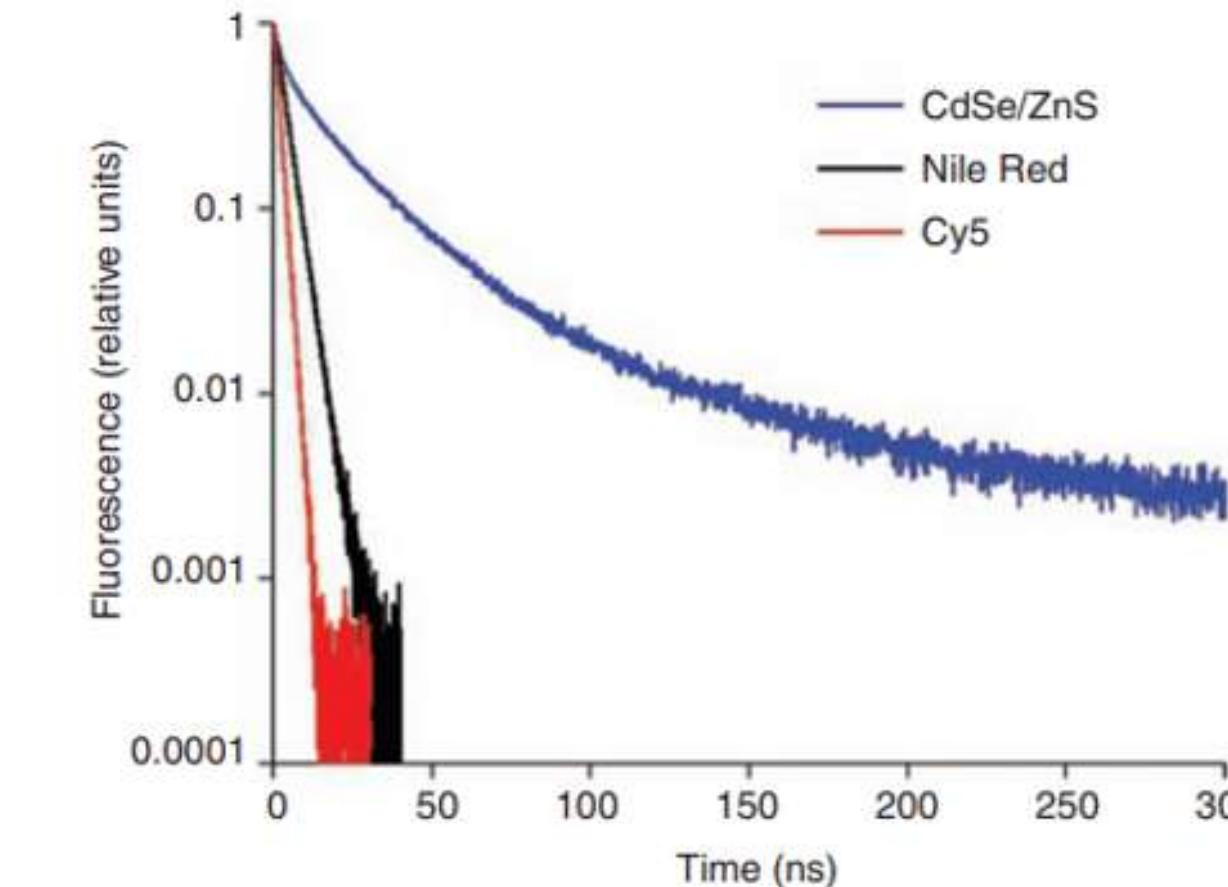
measured @cern Lab27

量子シンチレータを用いたdual-readoutカロリメータ

・量子シンチレータ

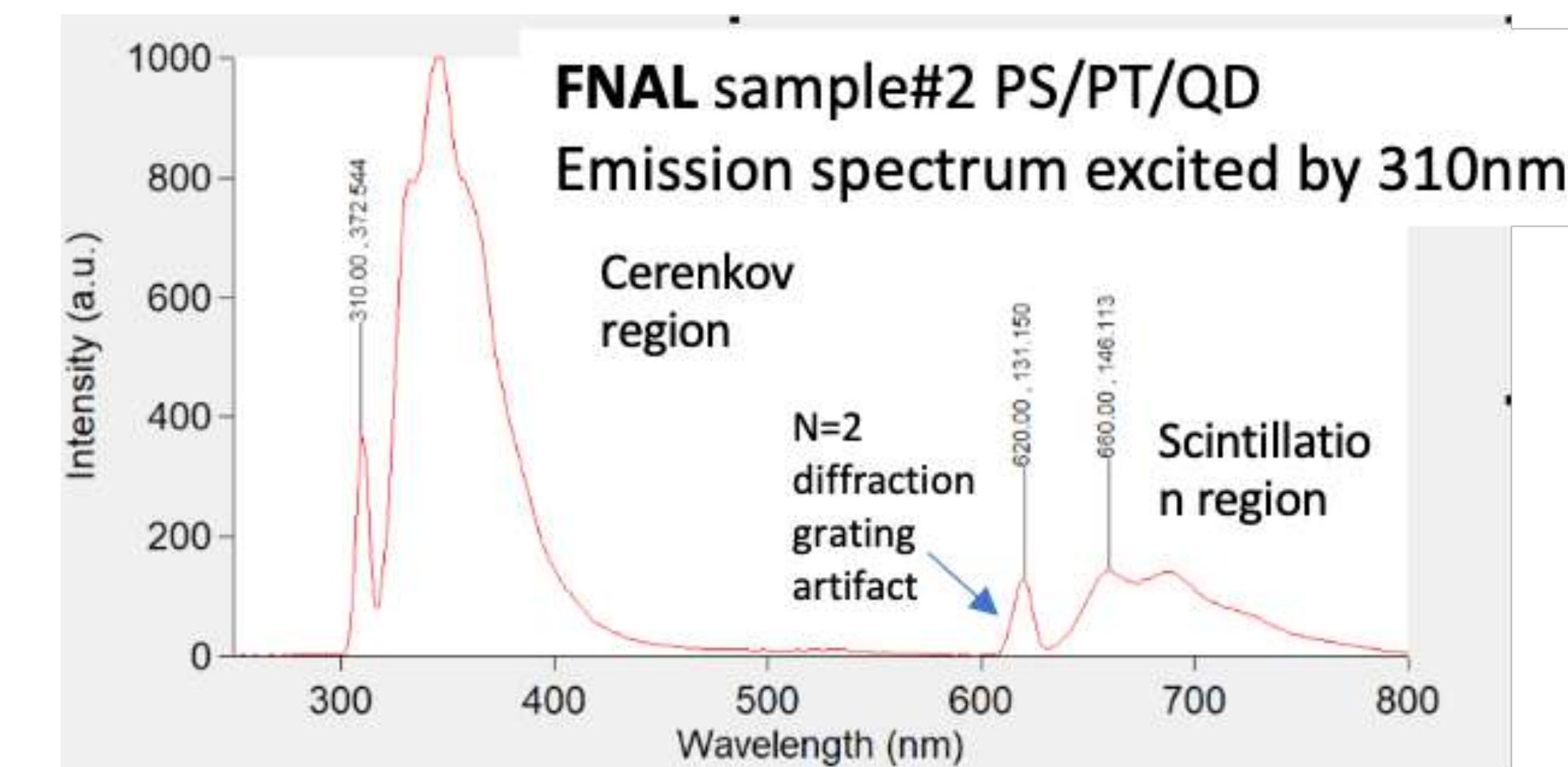
- ・量子ドットを混ぜたプラスチックシンチレータ
- ・大きい波長シフト(ストークスシフト)を持つ量子ドットを用いてシンチレーション光を長波長光に変換
- ・量子ドットの発光時定数は一般的に長くなる

Courtesy of J. Freeman (Fermilab)



・量子シンチレータをもちいたdual-readoutカロリメータ

- ・同じシンチレータでチェレンコフ光とシンチ光の同時測定
- ・シンチレータタイルに二つのSiPMを搭載 (blue-sensitive + red-sensitive)
- ・波長フィルターや発光時定数の違いによりチェレンコフ光とシンチレーション光の分離を高めることも
- ・High-granularityの導入でPFAカロリメータとしても動作可能



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)
- ・FCC-ee, CEPCの測定器コンセプトも大きく進展している
- ・新しい技術、新しいアイディ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、新しいカロリメータ技術....
- ・新しいアイディアとやる気に溢れた若手の方々の参入を期待！
- ・ILC-Japanでは6月2日にヒッグスファクトリー測定器開発に関する日本の取り組みを議論するワークショップを開催予定