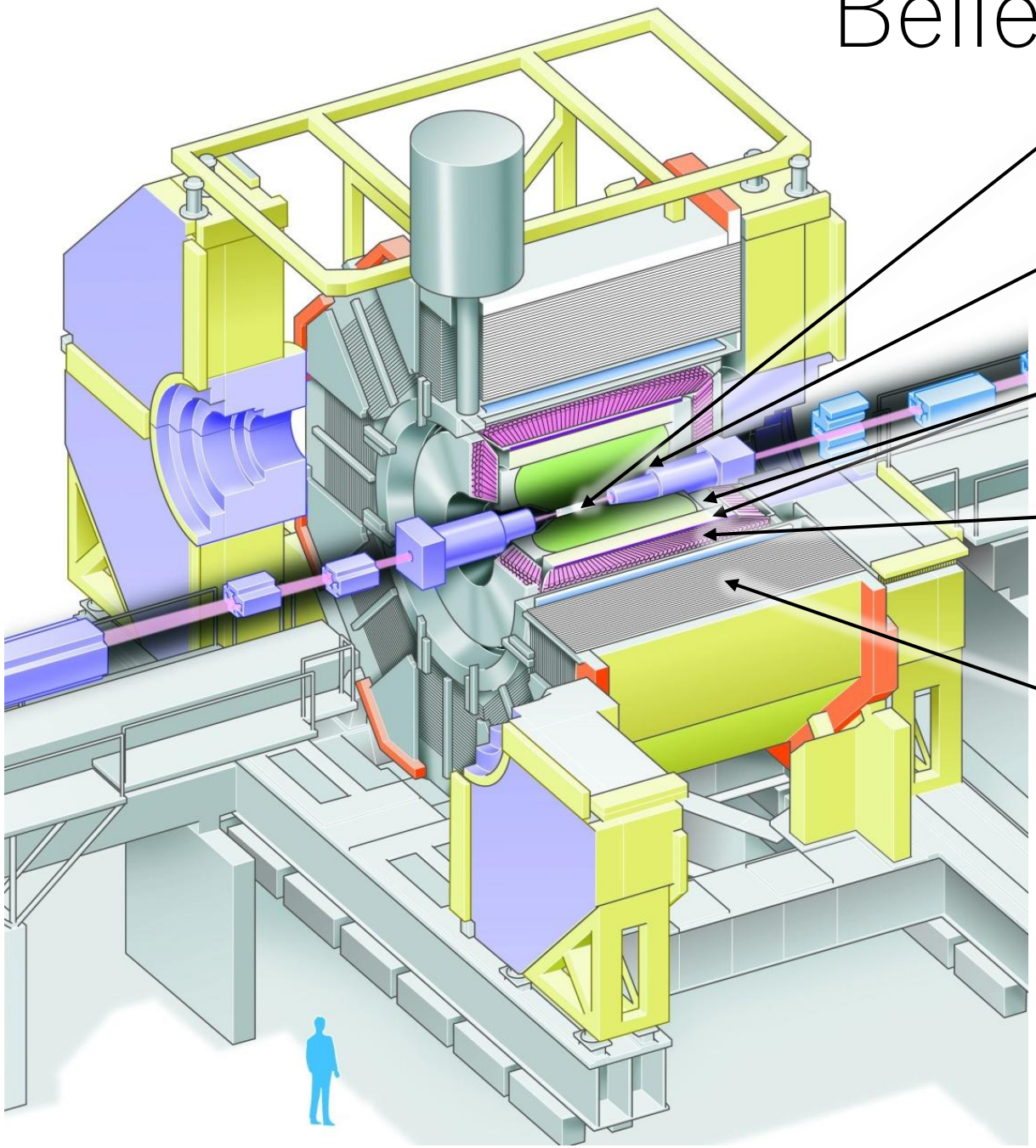
Belle II アップグレード



小貫良行
東京大学ICEPP

Belle検出器



崩壊点検出器（SVD）
- 外層4層：DSSD (strip)センサー

中央飛跡検出器（CDC）
- 全50層He+C_2H_6ガスワイヤーチェンバー

粒子識別（PID）検出器
- Barrel：Time-Of-Flight検出器(TOF), <~1GeV/c
- Forward endcap/Barrel： Aerogelチェレンコフ(ACC), <~3.5GeV

電磁カロリメータ（ECL）
- CsI(Tl)シンチレータ+波形ピークホールド

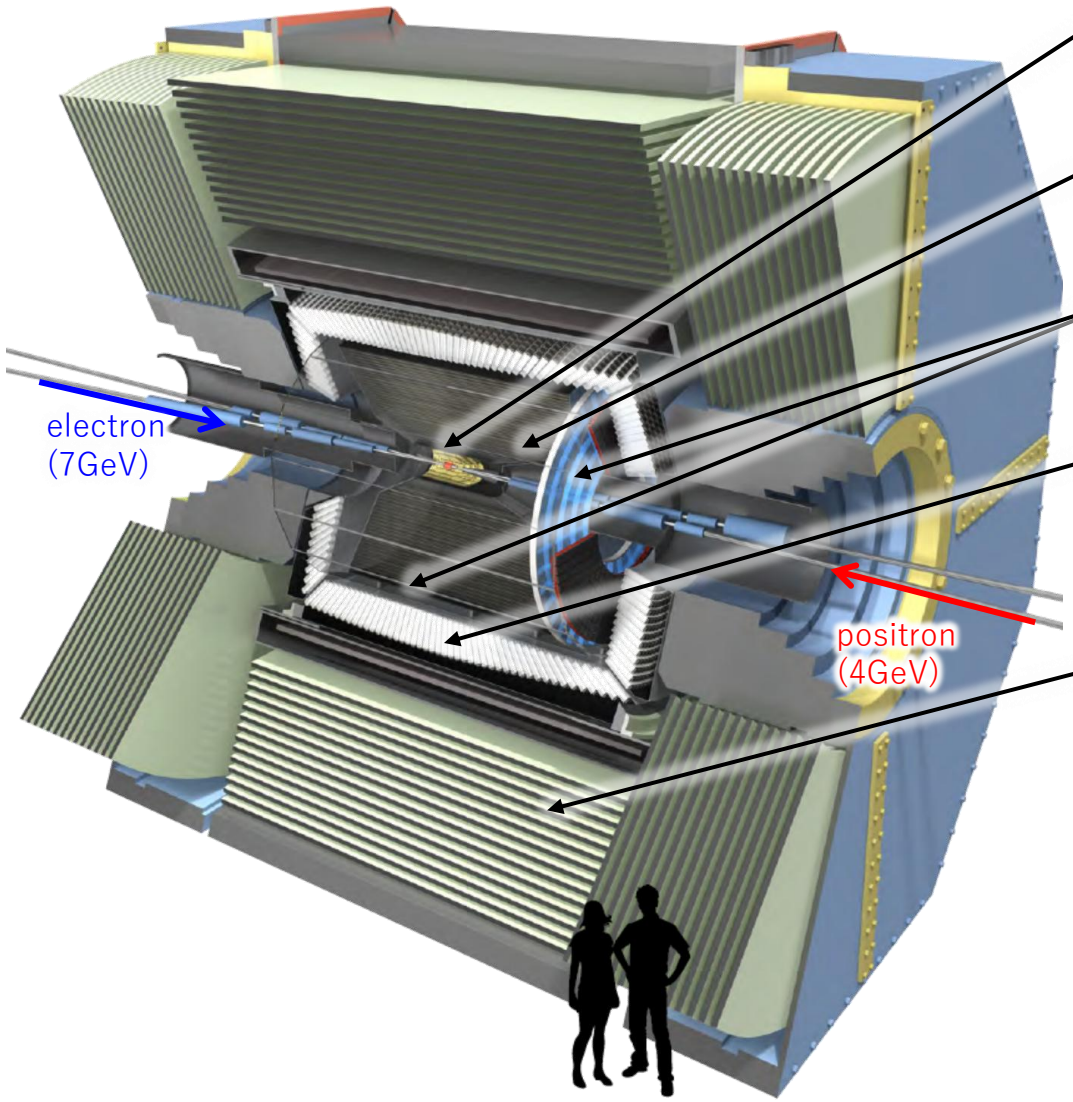
超電導ソレノイド電磁石 1.5 T

K_L/m検出器（KLM）
- Resistive Plate Chamber(streamer)

トリガーシステム
- CDC+ECL+KLM, Max. Level-1 rate：~500Hz
- Latency：2.2μsec

DAQシステム
- Max. Level-1 rate：~500Hz
- Typical data size：~30kB/event

BelleII検出器



崩壊点検出器（VXD）
- 内層2層：DEPFET (pixel、PXD)センサー
- 外層4層：DSSD (strip、SVD)センサー

中央飛跡検出器（CDC）
- 全56層He+C_2H_6ガスワイヤーチェンバー

粒子識別（PID）検出器
- Barrel：Time-Of-Propagation(TOP)検出器 0.5~4.0GeV/c
- Forward endcap：Aerogel RICH(ARICH)検出器 0.5~4.0GeV/c

電磁カロリメータ（ECL）
- CsI(Tl)シンチレータ+waveform sampling

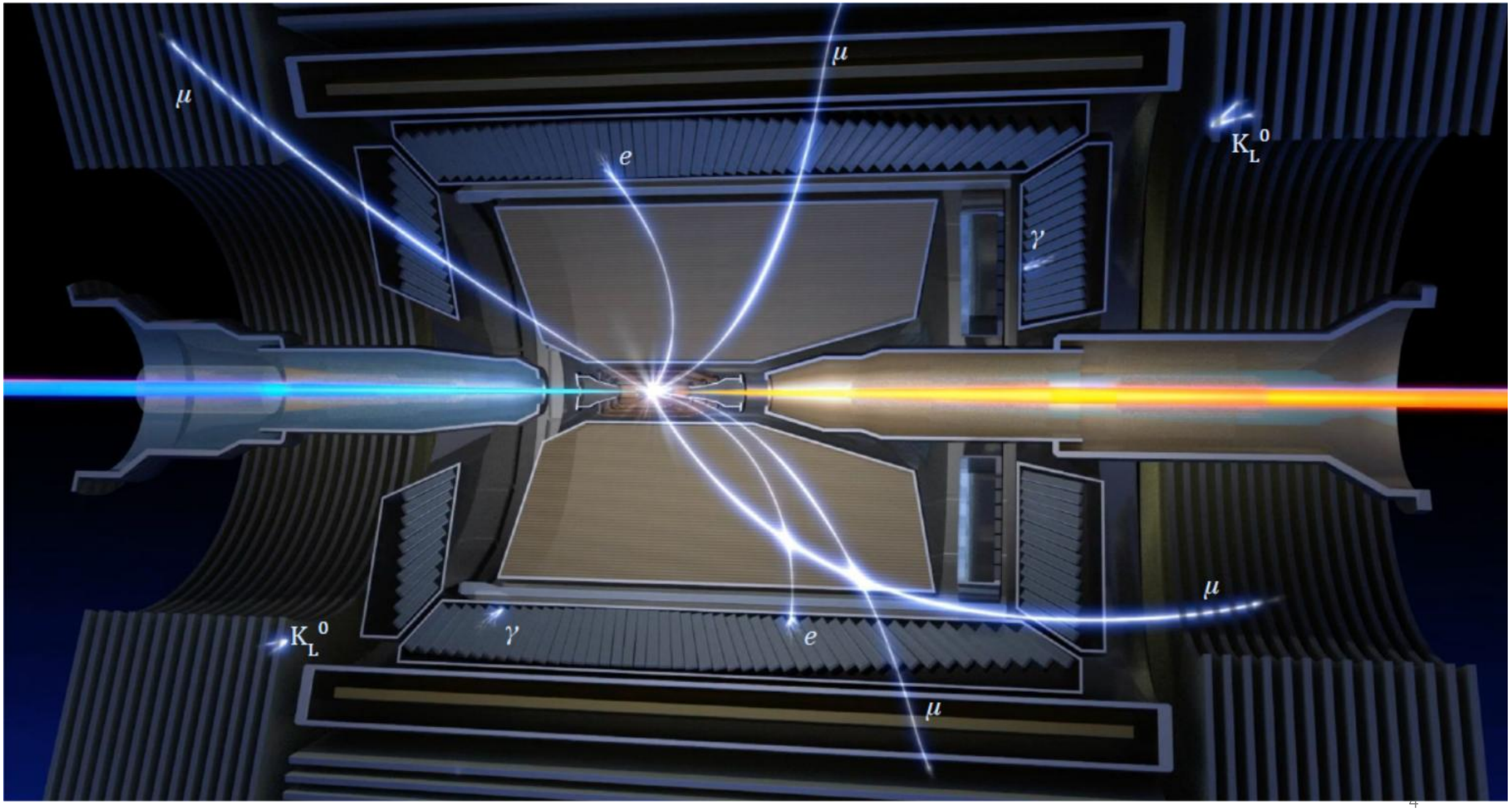
超電導ソレノイド電磁石 1.5 T

K_L/m検出器（KLM）
- Outer barrel： Resistive Plate Chamber(streamer)
- Endcap/Inner Barrel：プラスチックシンチ＋MPPC

トリガーシステム
- CDC+ECL+KLM, Max. Level-1 rate：~30kHz
- Latency：5μsec

DAQシステム
- Max. Trig. rate：30kHz, オンライン再構成
- Typical data size：~1MB/event

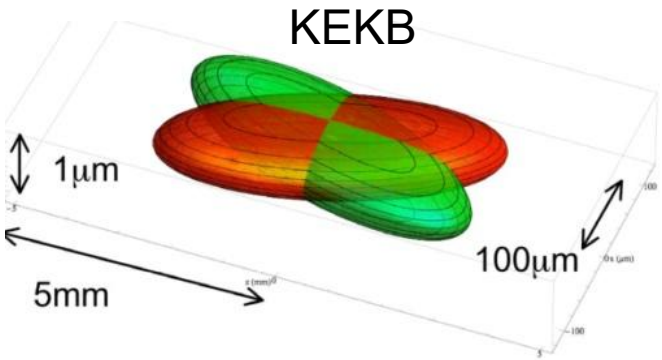
GRID computingによるデータ解析

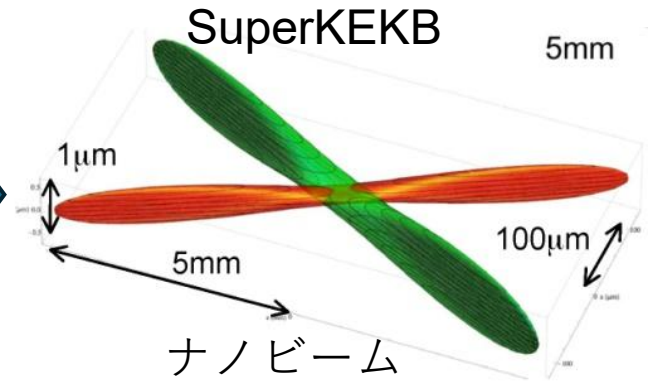

μ
μ
e
K_L^0
γ
μ
K_L^0
γ
e
μ
μ

SuperKEKB加速器

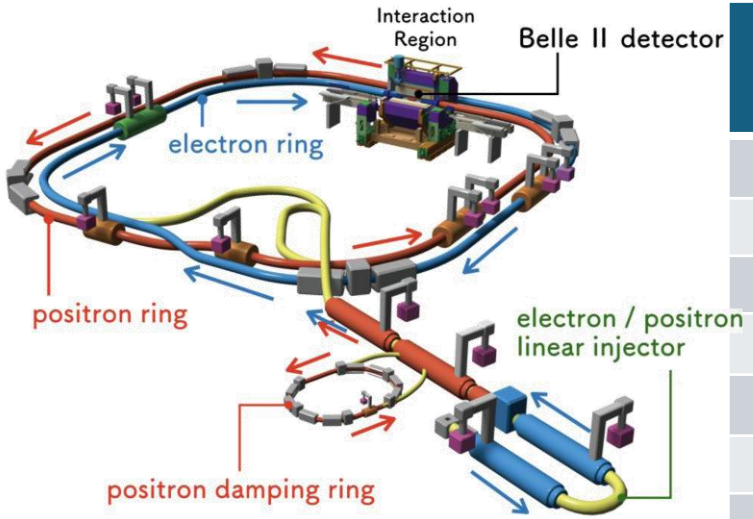
ルミノシティの増強
- ビーム電流：$I_{\pm}$
- ビームサイズの集束：β_y^*

$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e}\left(1+\frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}\right)\left(\frac{I_{\pm}\xi_{y\pm}}{\beta_y^*}\right)\left(\frac{R_L}{R_{\xi_{y\pm}}}\right)$$

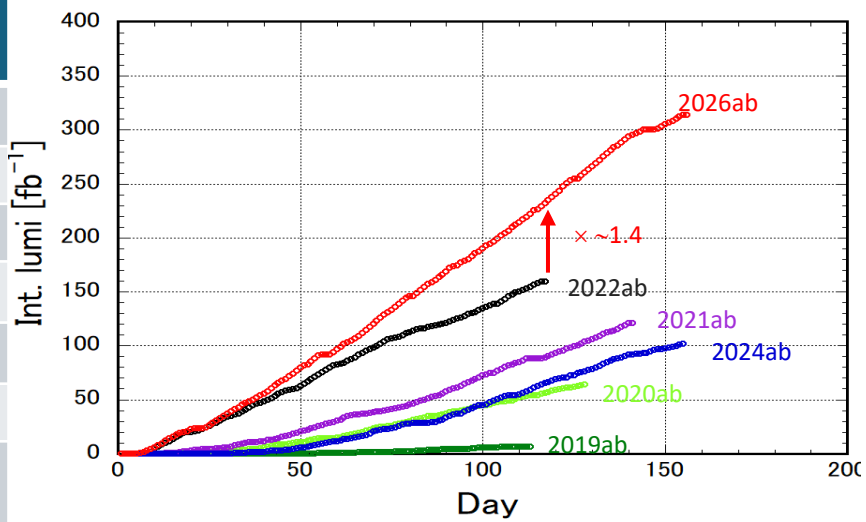




ナノビーム
大角度ビーム公差

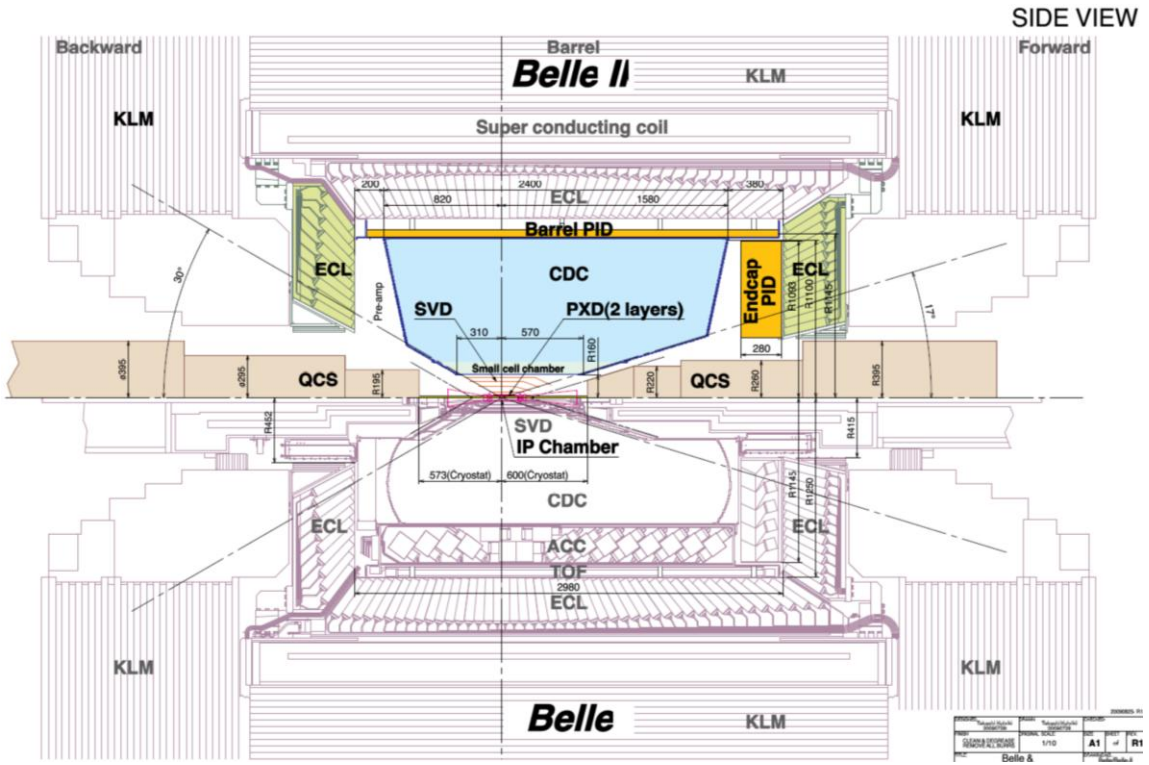


	KEKB (LER/HER)		SuperKEKB (LER/HER) 2026/6/30	
Beam Energy	3.5/8.0[GeV]		4.0/7.0[GeV]	
Beam current	1.64/1.19[A]		1.60/1.20[A]	
# of bunches	1584		1990	
β_x^*/β_y^* [mm]	1200/5.9	1200/5.9	55/0.9	55/0.9
σ_x^*/σ_y^* [μm]	147/0.94	170/0.94	18/0.23	18/0.24
公差角[mrad]	11		41.5	
ルミノシティ [$\times 10^{34}$ cm^{-2}s^{-1}]	2.1		5.32/5.28 (w/o and w/ Belle II operation	



SuperKEKBとBelleIIコラボレータが一体となった取り組み
- 運転の安定化・高度化
- 加速器BGの理解と低減

Bellellアップグレード



	Belle	BelleII	BelleII upgrade
崩壊点検出器	ストリップ(4層)	ピクセル(2層) ストリップ(4層)	
中央飛跡検出器	50層 半径：88 mm ～ 863 mm	56層 半径：168 mm ～ 1,111.4 mm	
粒子識別（PID）検出器	閾値型 TOF	リングイメージング DIRC(Detection of Internally Reflected Cherenkov light)	
電磁カロリメータ	Peak hold	waveform sampling	?
超電導ソレノイド電磁石	1.5 T	1.5 T	
K_L/m検出器（KLM）	RPC	RPC/プラスチックシンチ	
トリガーシステム	500Hz	30kHz	
DAQシステム	各検出器ごとに異なる規格。 シンプルな再構成・選別	共通化。オンライン完全再構成	
Computing	On-Premises	On-Premises&GRID	

- 世界発のナノビーム実装加速器での実験
  - ビーム光学設計
  - ビーム・ビーム効果
  - ビーム由来BG
  - Belle比50倍の統計量、20倍のBG耐性の検出器設計
- 検出器アップグレード設計議論
  - BG耐性
  - 長期安定動作と耐久性
  - 物理性能の向上

$5.3\times10^{34}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}\rightarrow6\times10^{35}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$、 $0.9\mathrm{ab}^{-1}\rightarrow50\mathrm{ab}^{-1}$
を完走する検出器寿命とBG耐性が重要

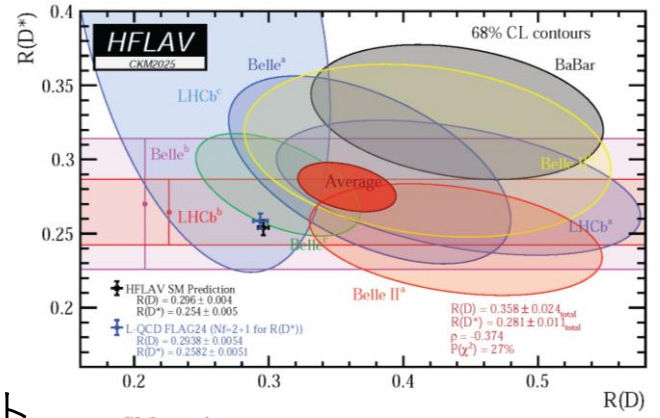
物理の測定精度

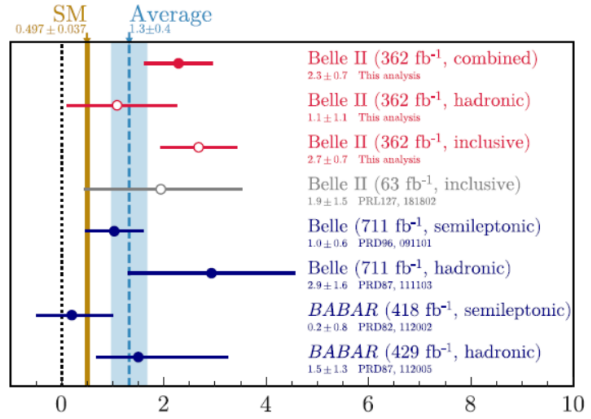
- 大きな統計量…瞬間ルミノシティ×取得効率×時間
  - 瞬間ルミノシティ　加速器
  - 検出器稼働率　検出器ダウンタイム
  - 取得効率　検出器デッドタイム
  - 運転時間

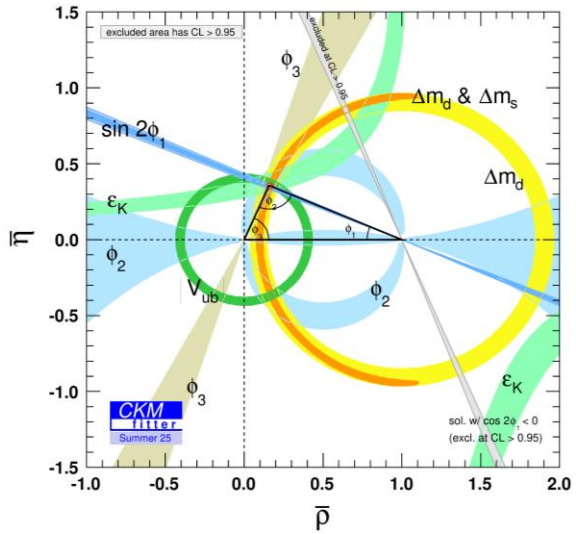
} ハード→ソフト

- データ品質
  - シグナル
    - 分解能向上
      - 崩壊点、運動量
      - 時間、エネルギー
      - 粒子識別
    - 検出効率
  - 高いBG環境

} ハード→ファーム→ソフト→解析技術



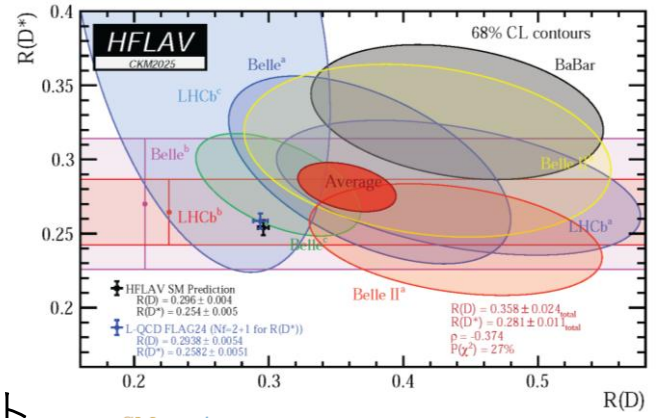


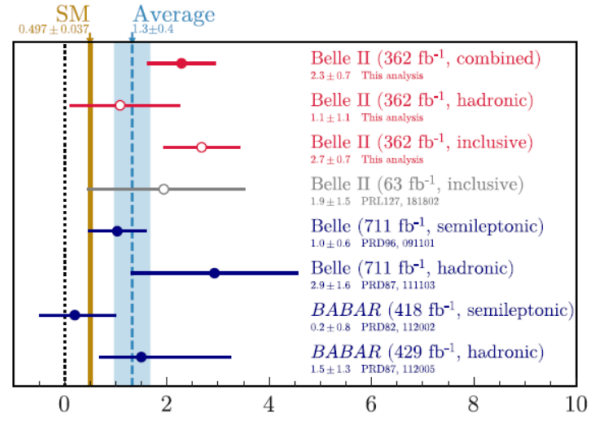


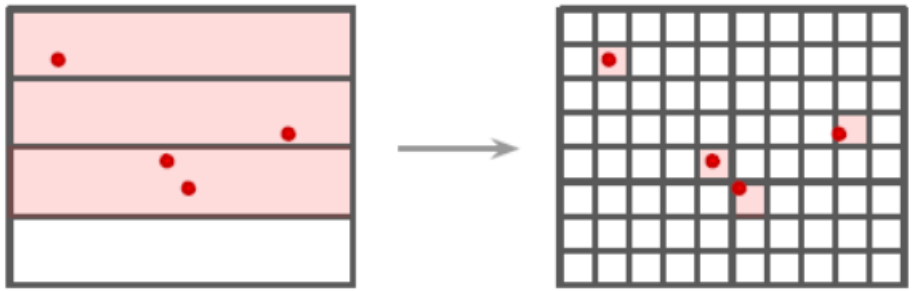
物理の測定精度

- 大きな統計量…瞬間ルミノシティ×取得効率×時間
  - 瞬間ルミノシティ
  - 検出器稼働率
  - 取得効率
  - 運転時間

加速器
検出器ダウンタイム
検出器デッドタイム
} ハード→ソフト

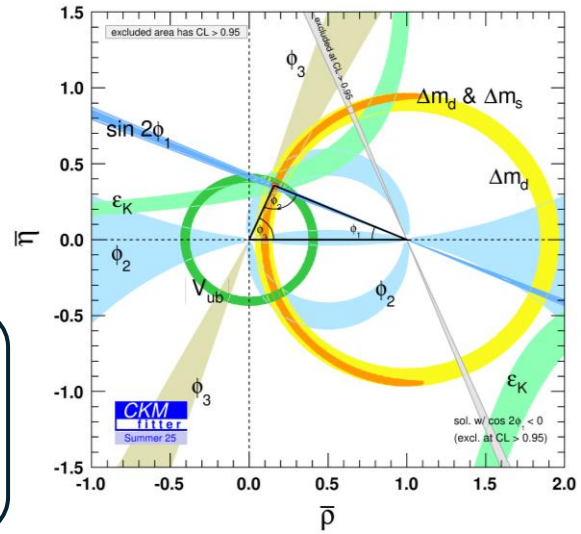






- データ品質
  - シグナル
    - 分解能向上
      - 崩壊点、運動量
      - 時間、エネルギー
      - 粒子識別
    - 検出効率
  - 高いBG環境

} ハード→ファーム→ソフト→解析技術



- 多チャンネル化
- 高分解能化
- 低物質量化

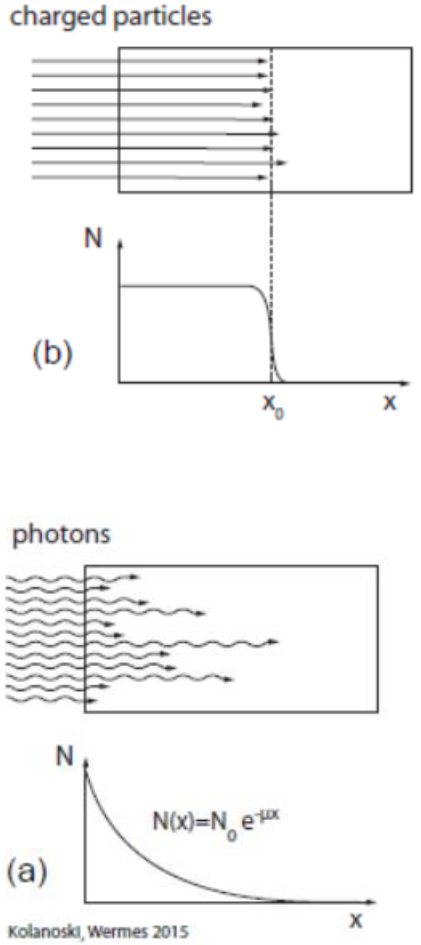
Trigger

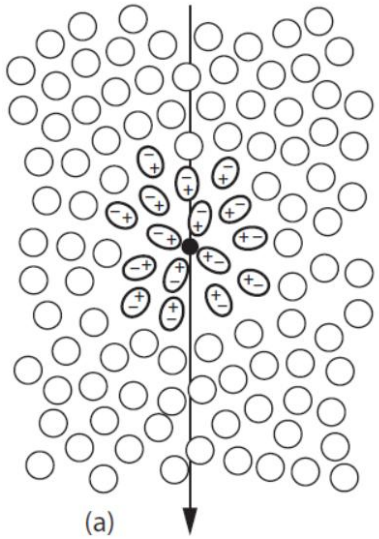
- 再構成の最適化
- 機械学習/AI
- 検出器の較正

- 解析の最適化
- 機械学習/AI
- 系統誤差

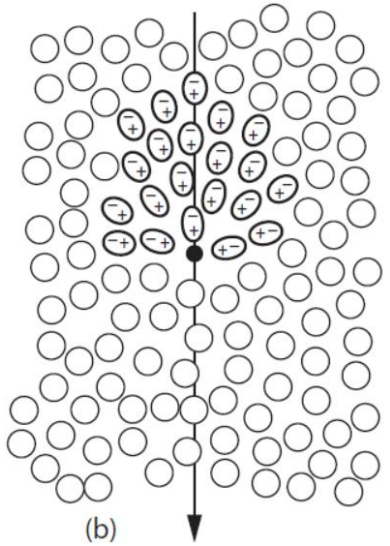
粒子と物質の相互作用

- 入射粒子
  - 荷電粒子(z, m)
    - 電離損失
    - クーロン多重散乱
    - 制動放射
    - チェレンコフ光(遷移放射)
    - (ハドロン相互作用(p, n, π, K))
  - X、γ線
    - 光電吸収
    - コンプトン散乱
    - 対生成
- 物質
  - Z
  - A
  - n





$v \ll c_n = c_0/n$



$v > c_n$

粒子と物質の相互作用

- 入射粒子
  - 荷電粒子(z, m)
    - 電離損失
    - クーロン多重散乱
    - 制動放射
    - チェレンコフ光(遷移放射)
    - (ハドロン相互作用(p, n, π, K))
  - X、γ線
    - 光電吸収
    - コンプトン散乱
    - 対生成
- 物質
  - Z
  - A
  - n

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

$$\theta_{ms} = \frac{13.6\ \mathrm{MeV/c}}{p\beta} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left(1 + 0.038 \ln \frac{x}{X_0} \right)$$

$$\lambda_\gamma = \frac{1}{\sigma_{pair}\, n_{atoms}} = \frac{9}{7} X_0, \quad E(x) = E_0 e^{-\frac{x}{9/7 X_0}}$$

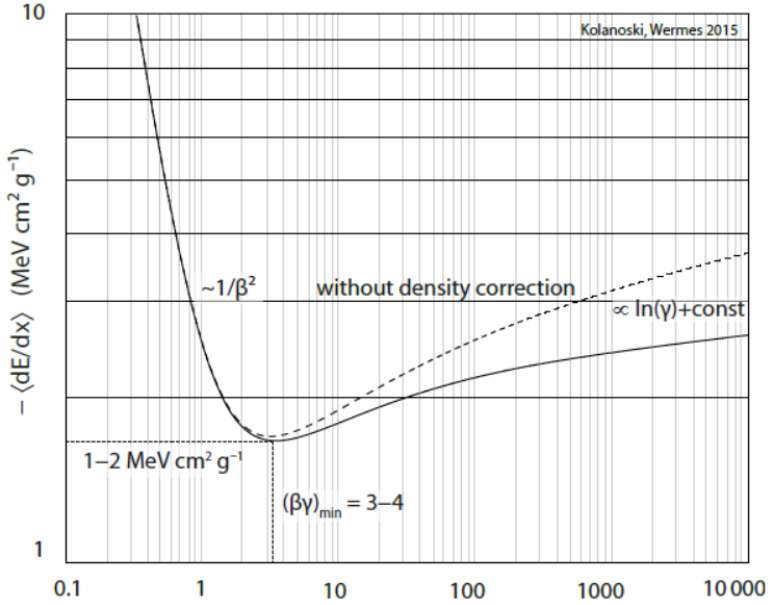
電離損失

入射荷電粒子による物質のイオン化によるエネルギー損失

ベーテブロッホの式

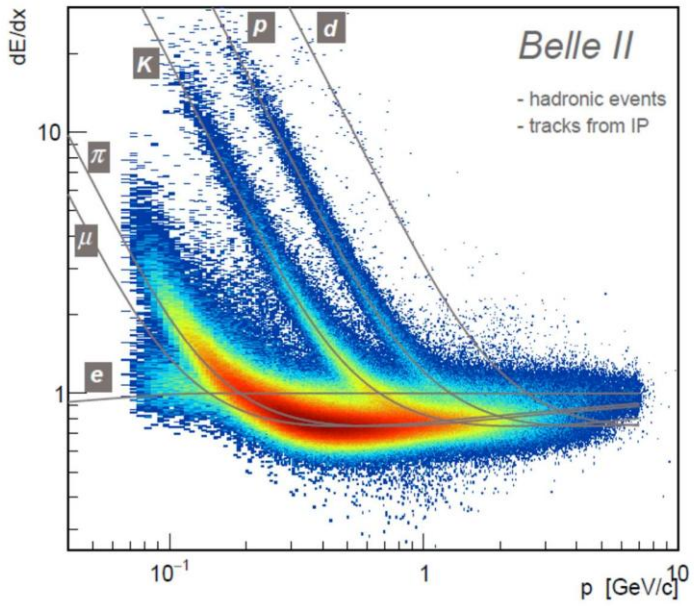
$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K\frac{Z}{A}\rho\frac{z^2}{\beta^2}\left[\frac{1}{2}\ln\frac{2m_e c^2\beta^2\gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2}\right]$$

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.307\text{MeV cm}^2/\text{mol}, \quad T_{max} = \frac{2m_e c^2\beta^2\gamma^2}{1+2\gamma m_e/M+(m_e/M)^2}$$



最小電離粒子
~2 MeV cm²/g (水)

dE/dx ~f(βγ)=f(p/m)



運動量pが測定できれば粒子識別が出来る

放射長と物質量

物質	Z	密度[g/cm^3]	X_0[cm]
Be	4	1.85	35.2
C	6	2.21	19.3
Al	13	2.70	8.9
Si	14	2.33	9.36
Fe	26	7.87	1.76
Cu	29	8.96	1.44
W	74	19.3	0.35
		シンチレータ	
NaI	11, 53	3.67	2.59
CsI	55, 53	4.51	1.86
		ガス	
He	2	0.166×10^{-3}	568200
C_2H_6	6, 1	1.34×10^{-3}	34000
air	7, 8	1.205×10^{-3}	30390
Xe	54	$5{,}48\times10^{-3}$	1547
		その他	
H_2O	1, 8	1.0	36.1
岩	11	2.65	10.0

電子が制動放射で損失するエネルギー

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



(a) Bremsstrahlung.

$$E(x) = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}}$$

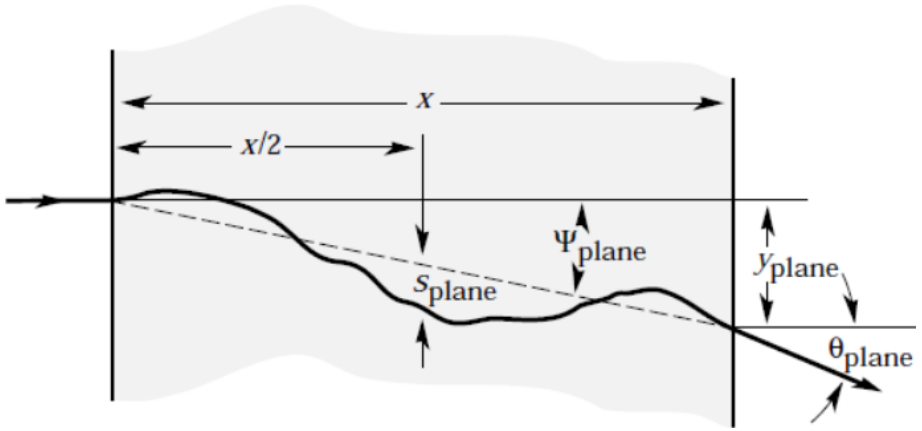
$x=X_0$ の時に初期エネルギーが1/eになる。→
X_0を放射長と呼ぶ。

電子が物質中を1放射長X_0進むと63%のエネルギーを失う

ある物質の厚みXに対して、その物質の放射長X_0に対する割合を%で表したものを物質量[$\%X/X_0$]と呼ぶ。

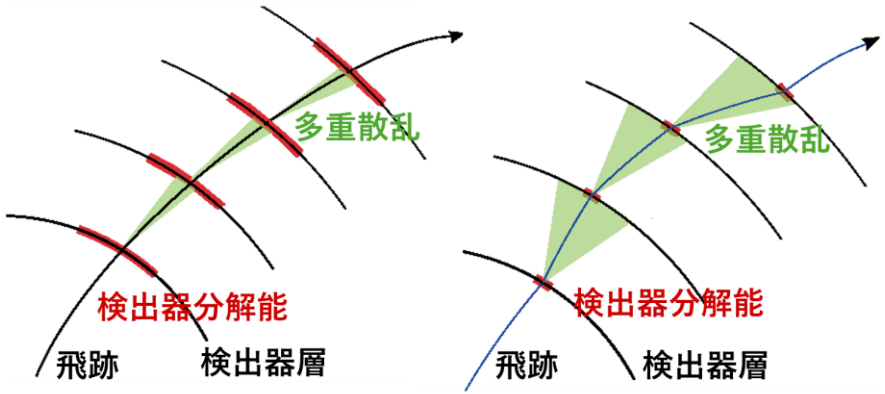
例) 0.1mm厚シリコンセンサーの物質量~0.1% X/X_0

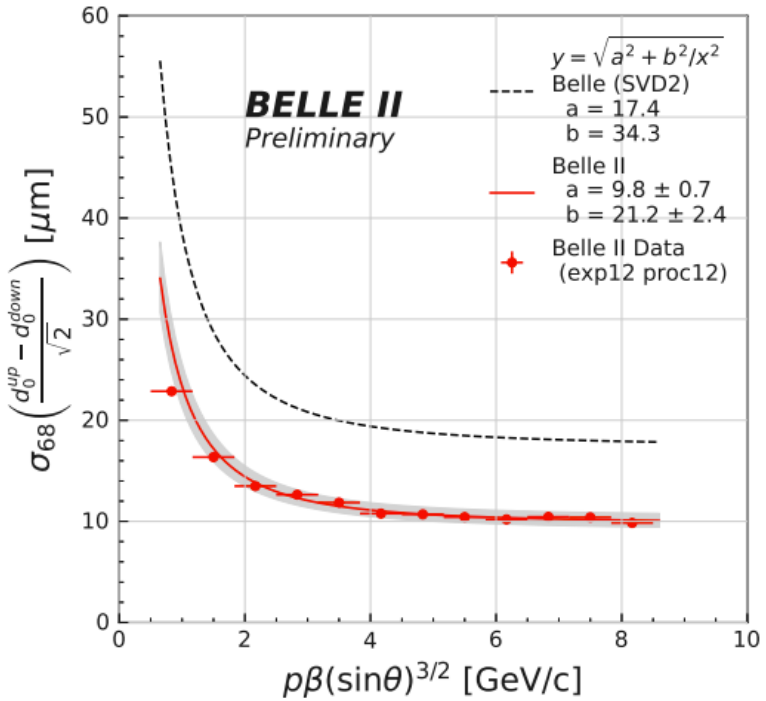
クーロン多重散乱

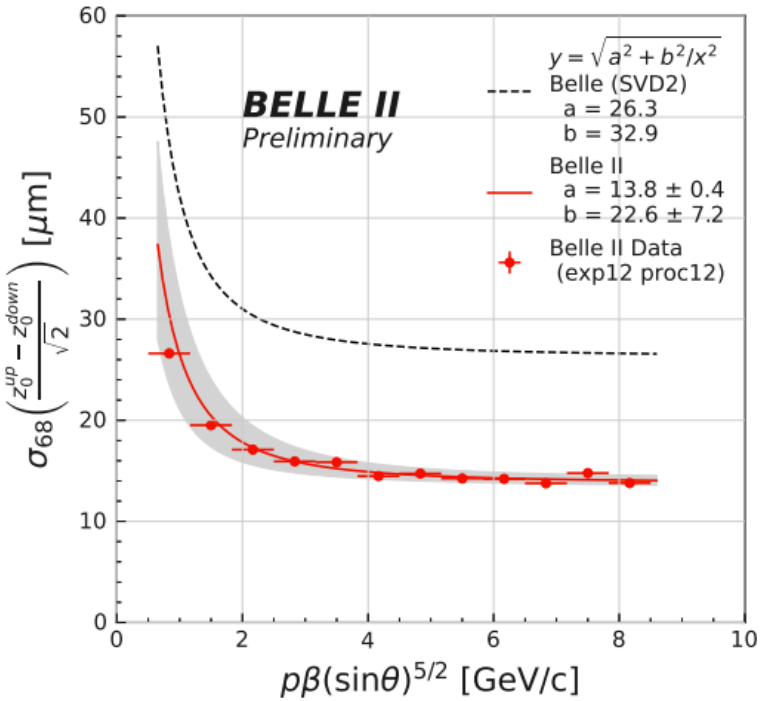


$$\theta_{ms} = \frac{13.6\ \mathrm{MeV/c}}{p\beta} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left(1 + 0.038 \ln \frac{x}{X_0}\right)$$

$$\theta_{ms}^{rms} = \theta_{ms}, \quad \langle \psi_{plane} \rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} \theta_{ms}, \quad \langle y_{plane} \rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} x\theta_{ms}, \quad \langle S_{plane} \rangle = \frac{1}{4\sqrt{3}} x\theta_{ms},$$







クーロン多重散乱→物質量の平方根に比例する

光子の物質との相互作用

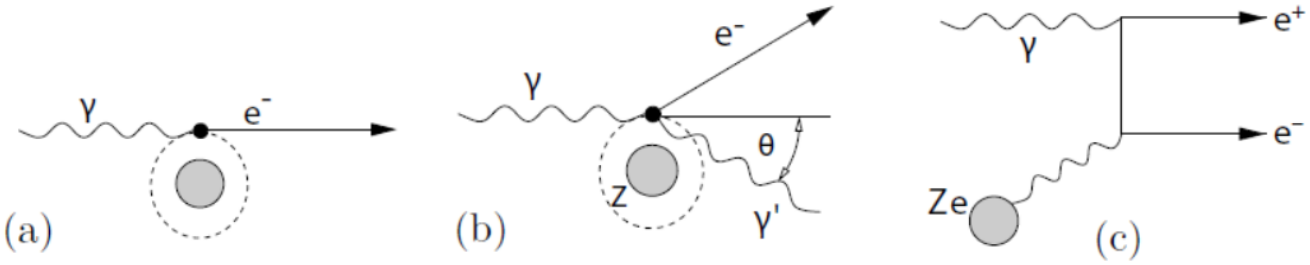
確率的反応

$$N(x) = N(0)e^{-\mu x}$$

$$\mu = n\left(\sigma_{photoeffect} + \sigma_{compton} + \sigma_{pair}\right)$$

$$n = \frac{\rho N_A}{A}, \qquad \text{平均自由工程} \quad \lambda = \frac{1}{\mu}$$

$$N(x) = N(0)e^{-\frac{x}{\lambda}}$$



(a)光電効果

$$\sigma_{photoeffect} \propto Z^5$$

(b)コンプトン散乱

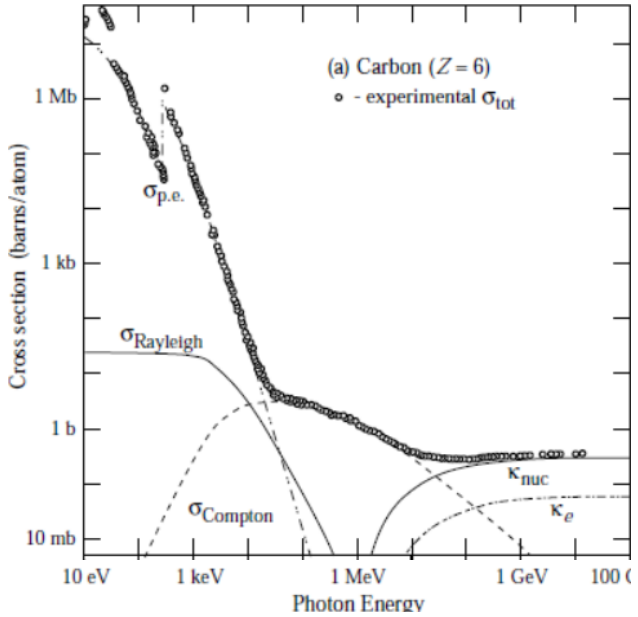
$$\sigma_{compton} \propto Z$$

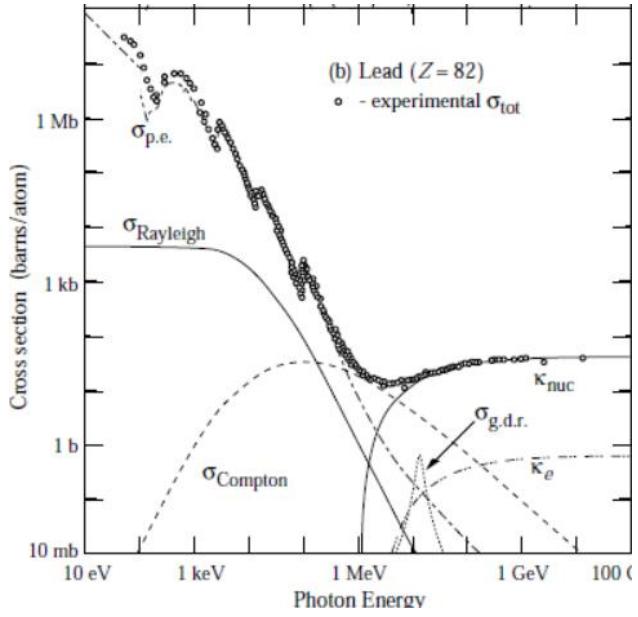
(c)対生成

$$\sigma_{pair} \propto Z^2$$

$$\sigma_{pair} = \frac{7}{9}\frac{1}{X_0}\frac{A}{N_A\rho}$$

$$\rightarrow \quad \lambda_\gamma = \frac{1}{\sigma_{pair}\, n} = \frac{9}{7}X_0$$





光子が物質中を1放射長X_0進むと54%が対生成する

光子の物質との相互作用

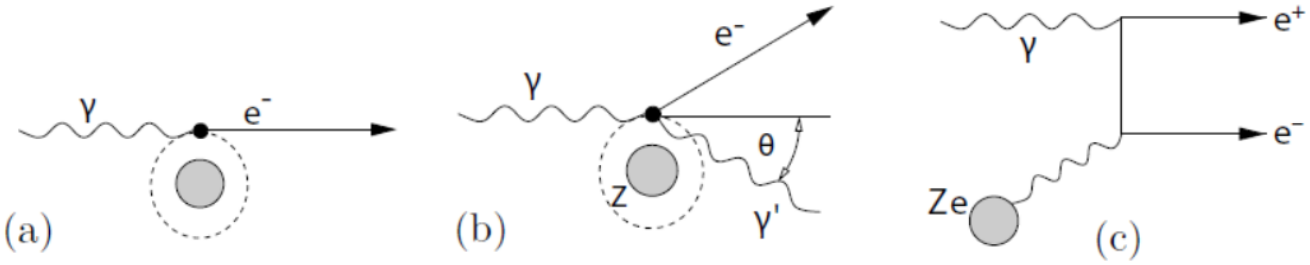
確率的反応

$$N(x) = N(0)e^{-\mu x}$$

$$\mu = n\left(\sigma_{photoeffect} + \sigma_{compton} + \sigma_{pair}\right)$$

$$n = \frac{\rho N_A}{A}, \qquad \text{平均自由工程} \quad \lambda = \frac{1}{\mu}$$

$$N(x) = N(0)e^{-\frac{x}{\lambda}}$$



(a)光電効果

$$\sigma_{photoeffect} \propto Z^5$$

(b)コンプトン散乱

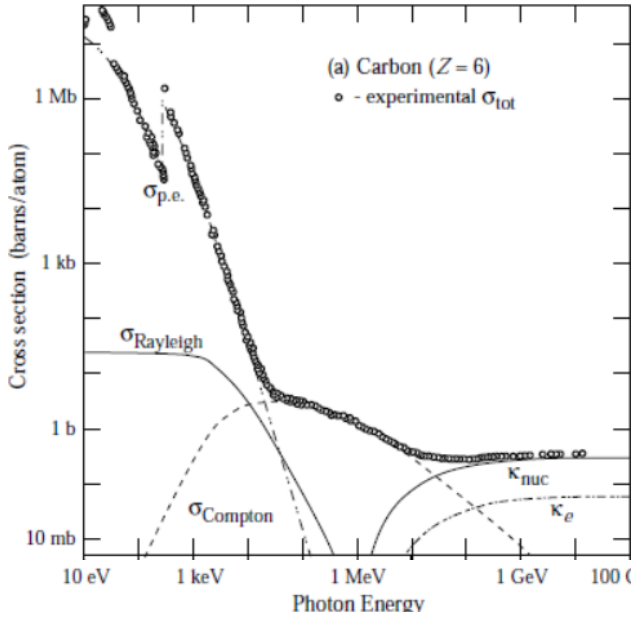
$$\sigma_{compton} \propto Z$$

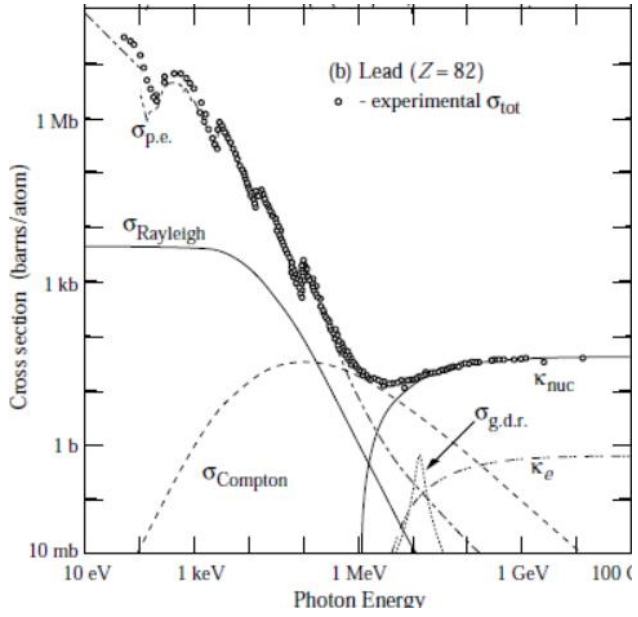
(c)対生成

$$\sigma_{pair} \propto Z^2$$

$$\sigma_{pair} = \frac{7}{9}\frac{1}{X_0}\frac{A}{N_A\rho}$$

$$\rightarrow \quad \lambda_\gamma = \frac{1}{\sigma_{pair}\, n} = \frac{9}{7}X_0$$



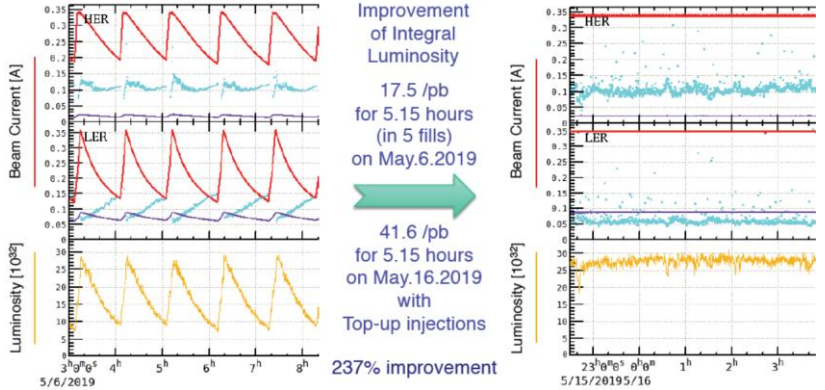


光子が物質中を1放射長X_0進むと54%が対生成する

c.f. 電子が物質中を1放射長X_0進むと63%のエネルギーを失う

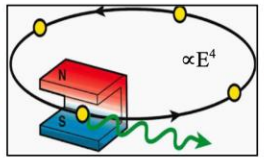
現行検出器のBG耐性

- Injection BG　∝injection rate and quality
  - Top-upでビーム継ぎ足し運転
  - 常時ビーム入射

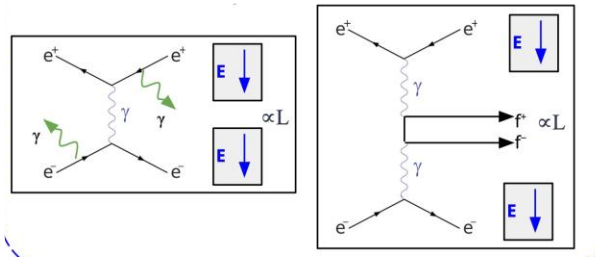


WEOOP01

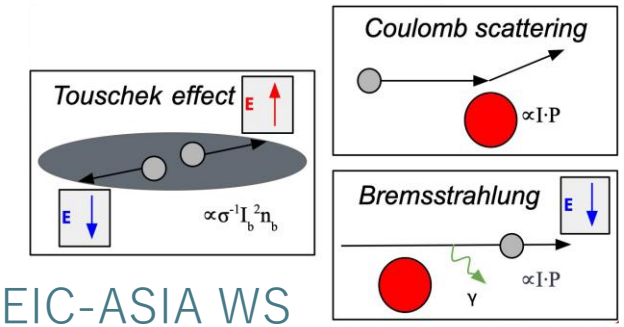
- (Synchrotron BG)　$\propto E_{beam}^4$
  - 直接当たらない設計



- Luminosity BG
  - Radiative Bhabha process　$\propto \mathcal{L}_{peak}$
  - Two-photon process



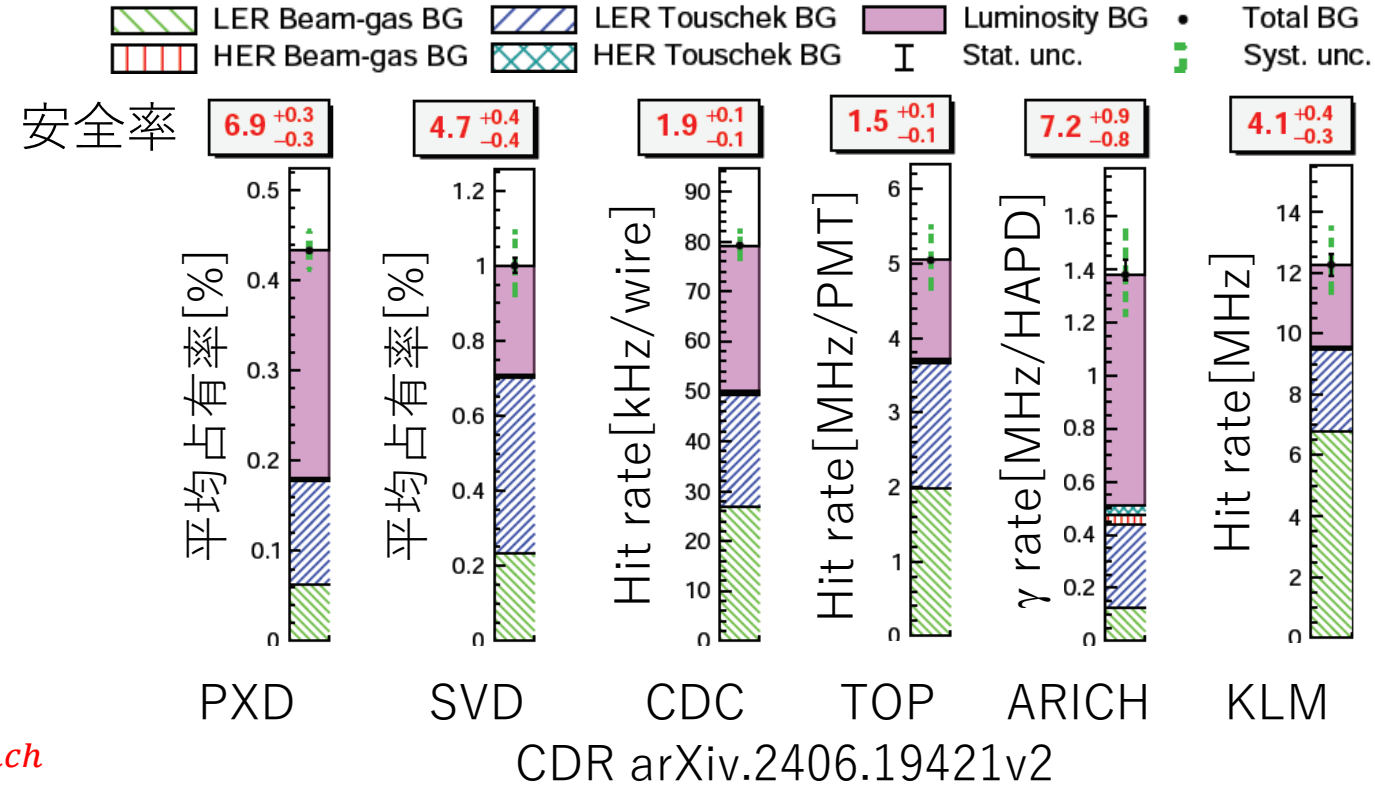
- Beam induced BGs
  - Toushek effect　$\propto \sigma^{-1} E_{beam}^{-3} I_{bunch}^2 n_{bunch}$
  - Beam-gas interaction　$\propto I_{beam} p$
    - Coulomb
    - Breams.



5th EIC-ASIA WS

現行検出器のBG耐性

- Injection BG　∝injection rate and quality
  - Top-upでビーム継ぎ足し運転
  - 常時ビーム入射
- (Synchrotron BG)　$\propto E_{beam}^{4}$
  - 直接当たらない設計
- Luminosity BG
  - Radiative Bhabha process　$\propto \xi_{peak}$
  - Two-photon process
- Beam induced BGs
  - Toushek effect　$\propto \sigma^{-1} E_{beam}^{-3} I_{bunch}^{2} n_{bunch}$
  - Beam-gas interaction　$\propto I_{beam} p$
    - Coulomb
    - Breams.



CDR arXiv.2406.19421v2

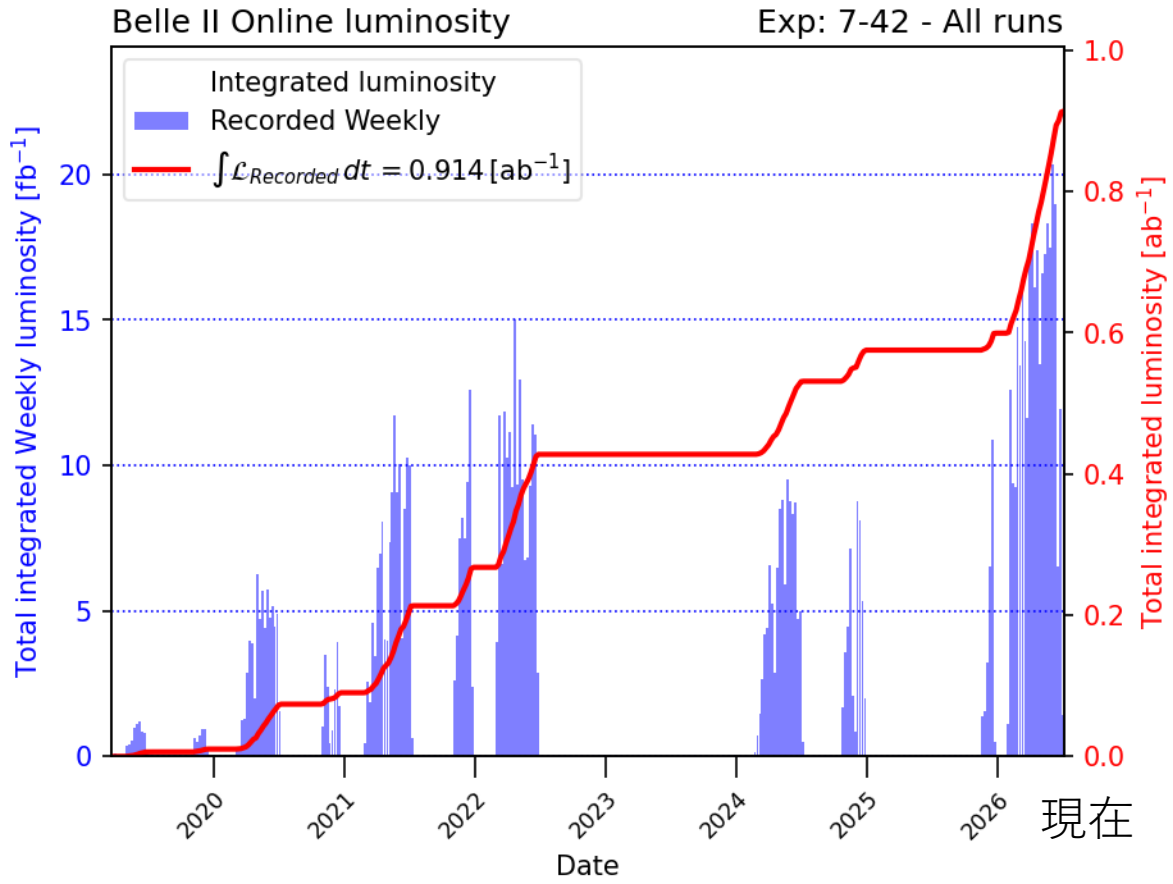
IRアップグレード無の時の最高ルミノシティ2.8×10^{35}cm^{-2}s^{-1}

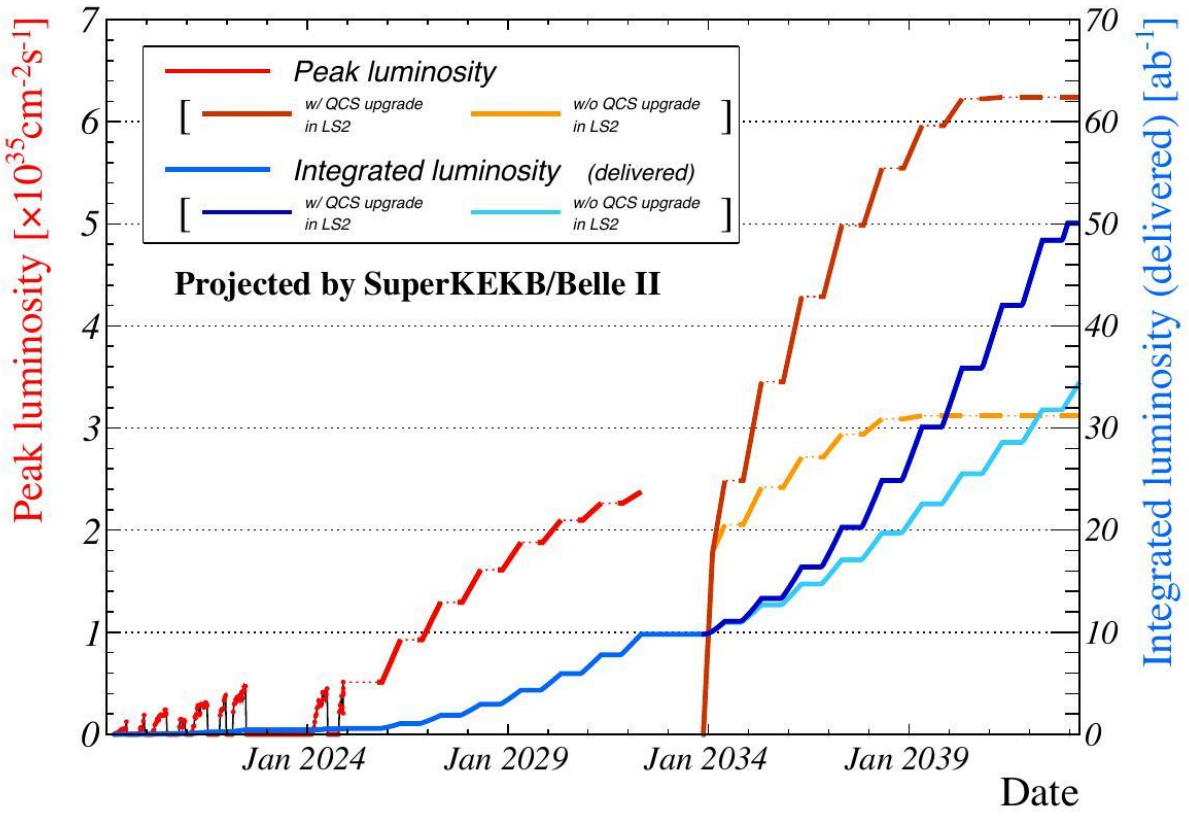
- CDCとTOPのBG許容限界まで安全率<2を切る予想→加速器BGの制御・抑制が必要
- その他の検出器 →安全率>4だが性能維持が必要

アップグレードのタイムライン

実験開始　　Long Shutdown1　　現在　　Long Shutdown2

2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034

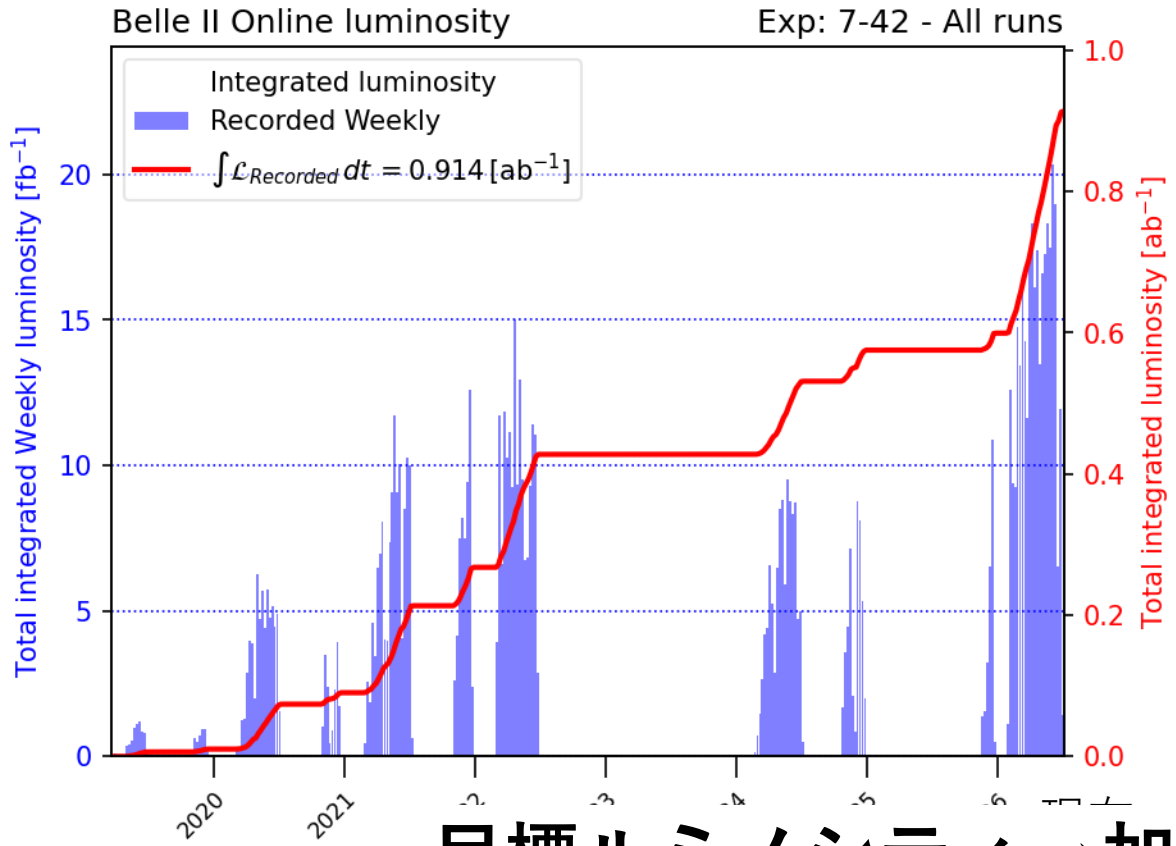


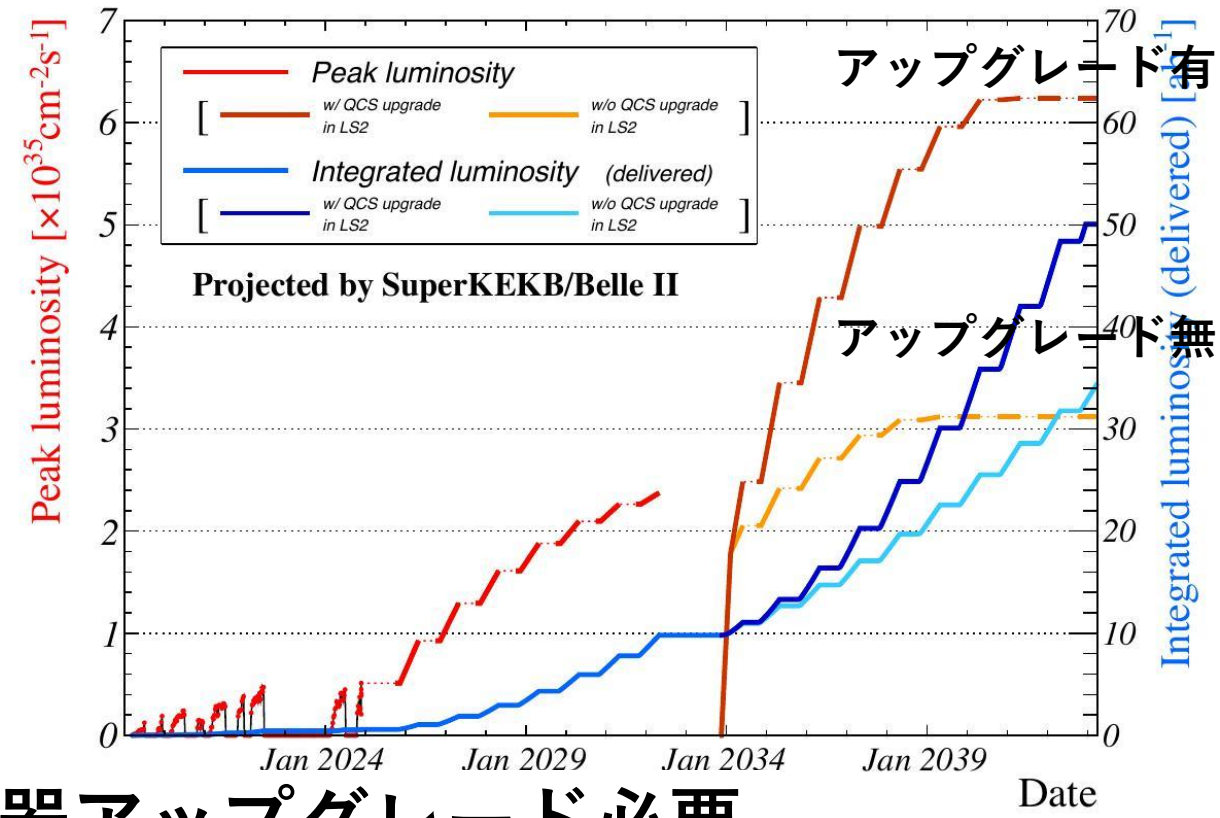


アップグレードのタイムライン

実験開始　　Long Shutdown1　　現在　　Long Shutdown2

2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034



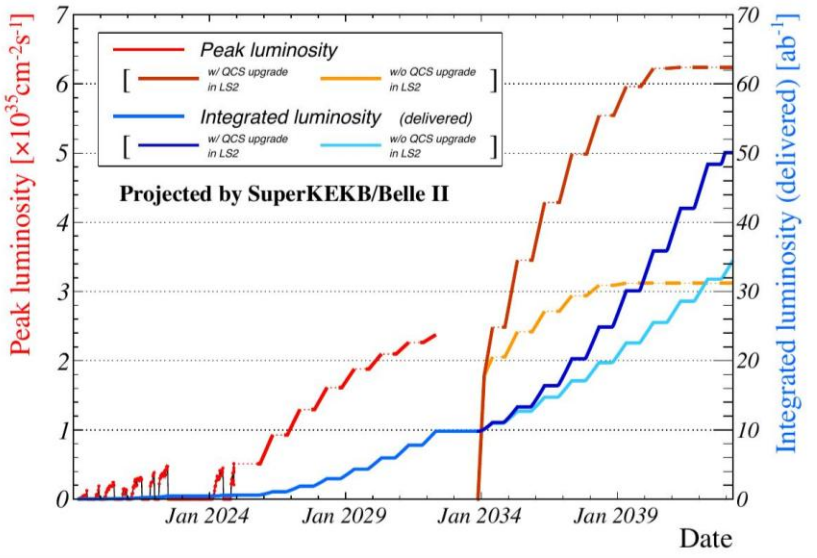


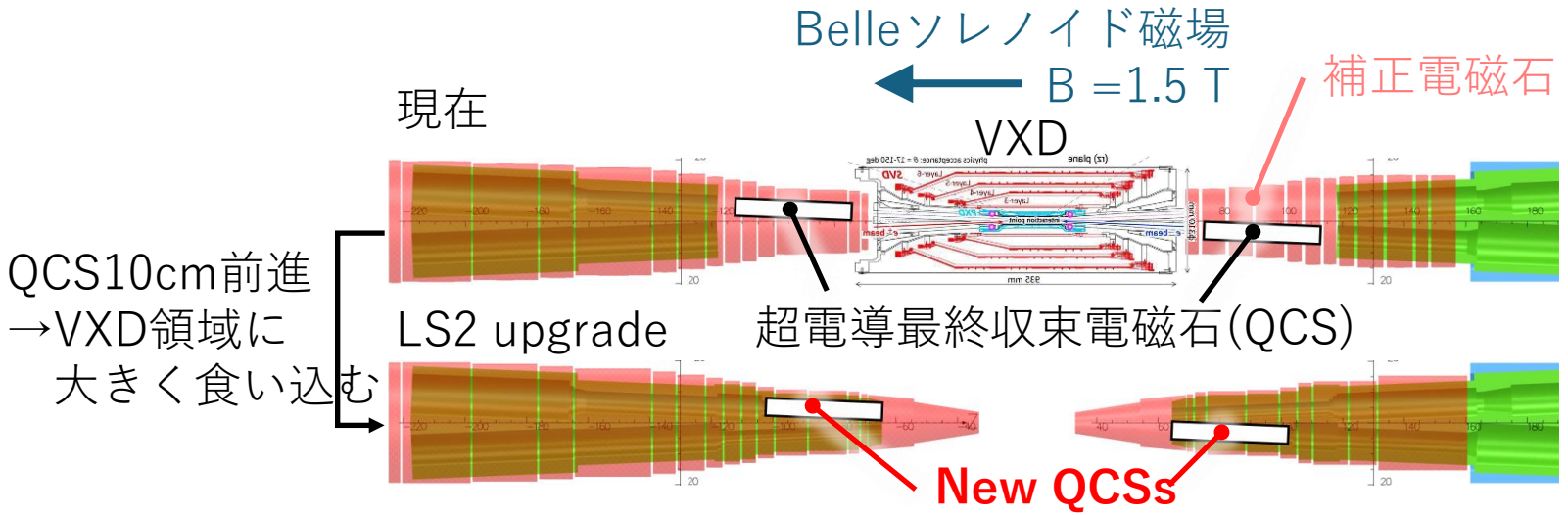
目標ルミノシティ→加速器アップグレード必要

Updated on 2026/07/04 00:00 JST

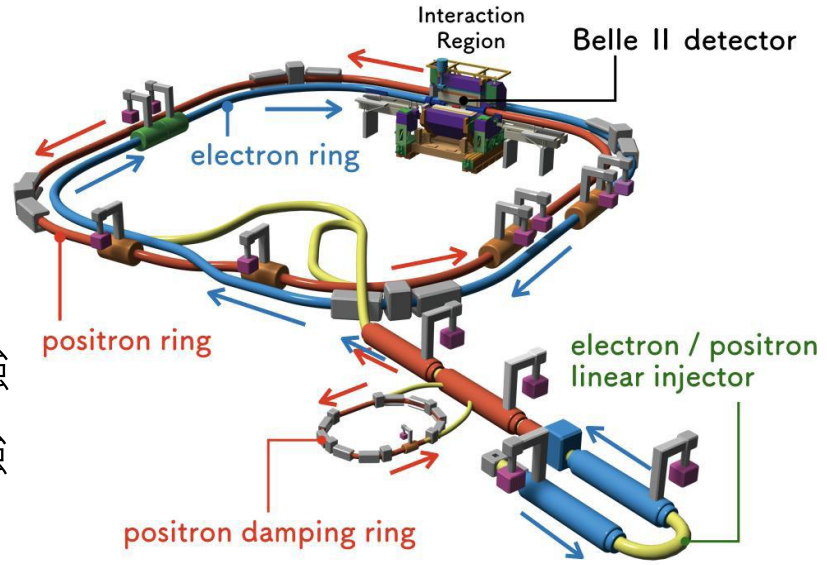
加速器アップグレード計画@LS2

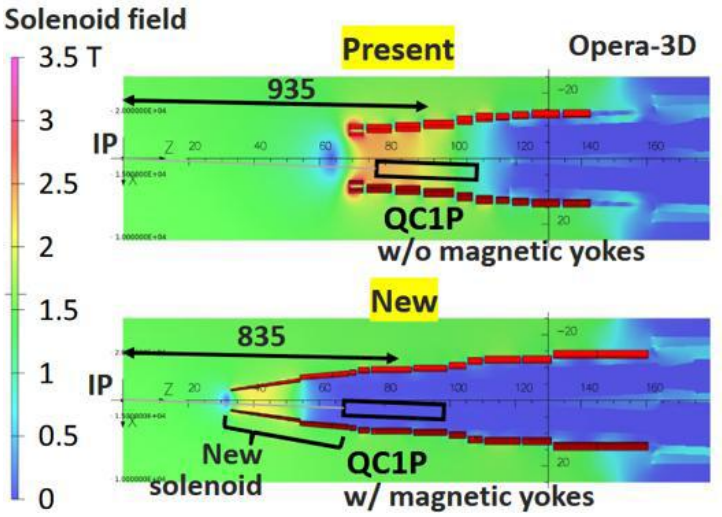
arXiv2406.19421 Conceptual Design Report



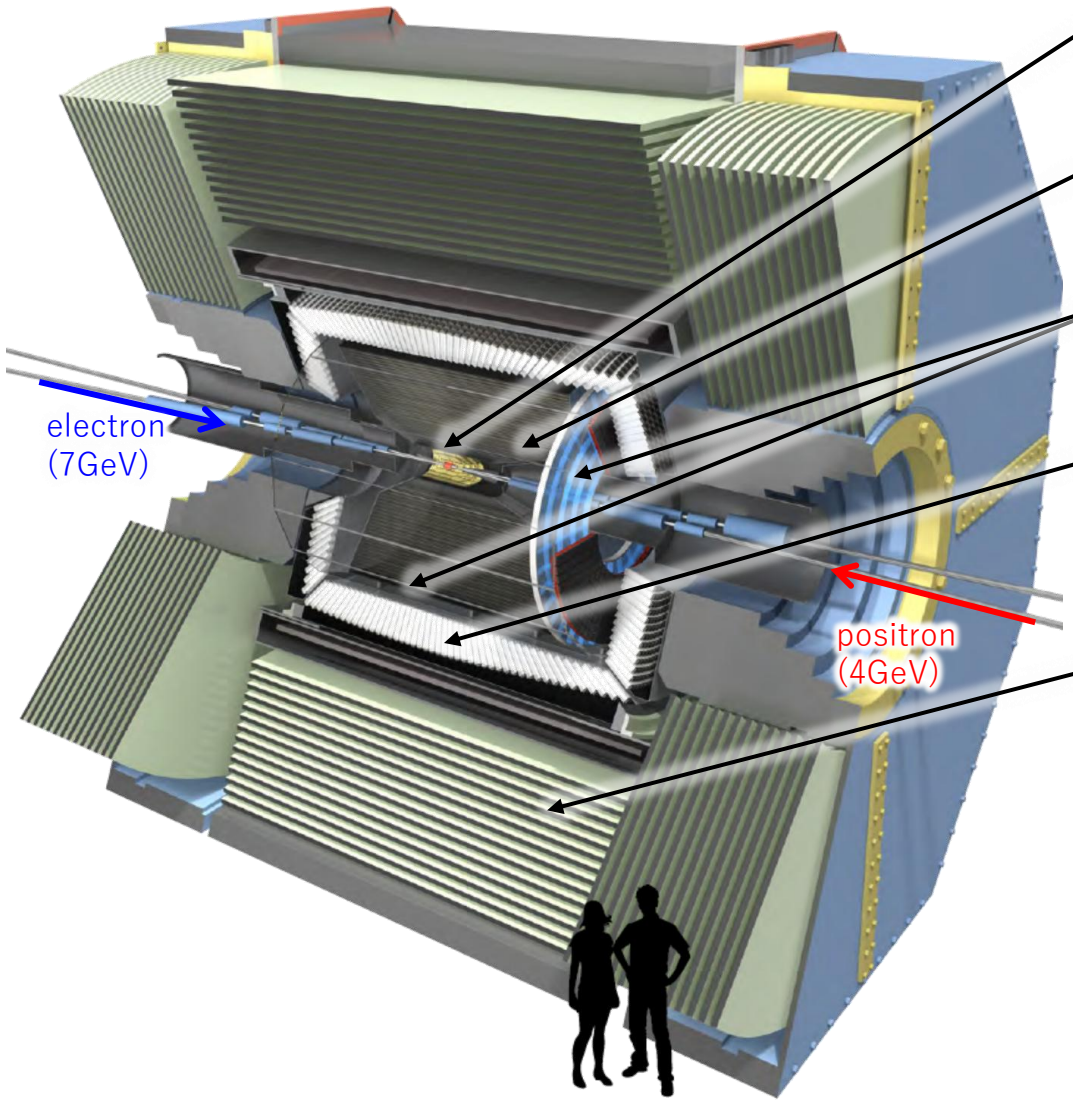


- 最終収束系(IR領域)の改良
  - Top-upでビーム継ぎ足し運転
  - 常時ビーム入射
- 高周波(RF)空洞・ビーム電流の増強
- 入射器の安定性向上・パワーの増強





LS2計画との互換性



崩壊点検出器（VXD）
- 内層2層：DEPFET (pixel)センサー
- 外層4層：DSSD (strip)センサー

中央飛跡検出器（CDC）
- He+C_2H_6ガスワイヤーチェンバー

粒子識別（PID）検出器
- Barrel：Time-Of-Propagation(TOP)検出器
- Forward endcap：Aerogel RICH(ARICH)検出器

電磁カロリメータ（ECL）
- CsI(Tl)シンチレータ+waveform sampling

超電導ソレノイド電磁石 1.5 T

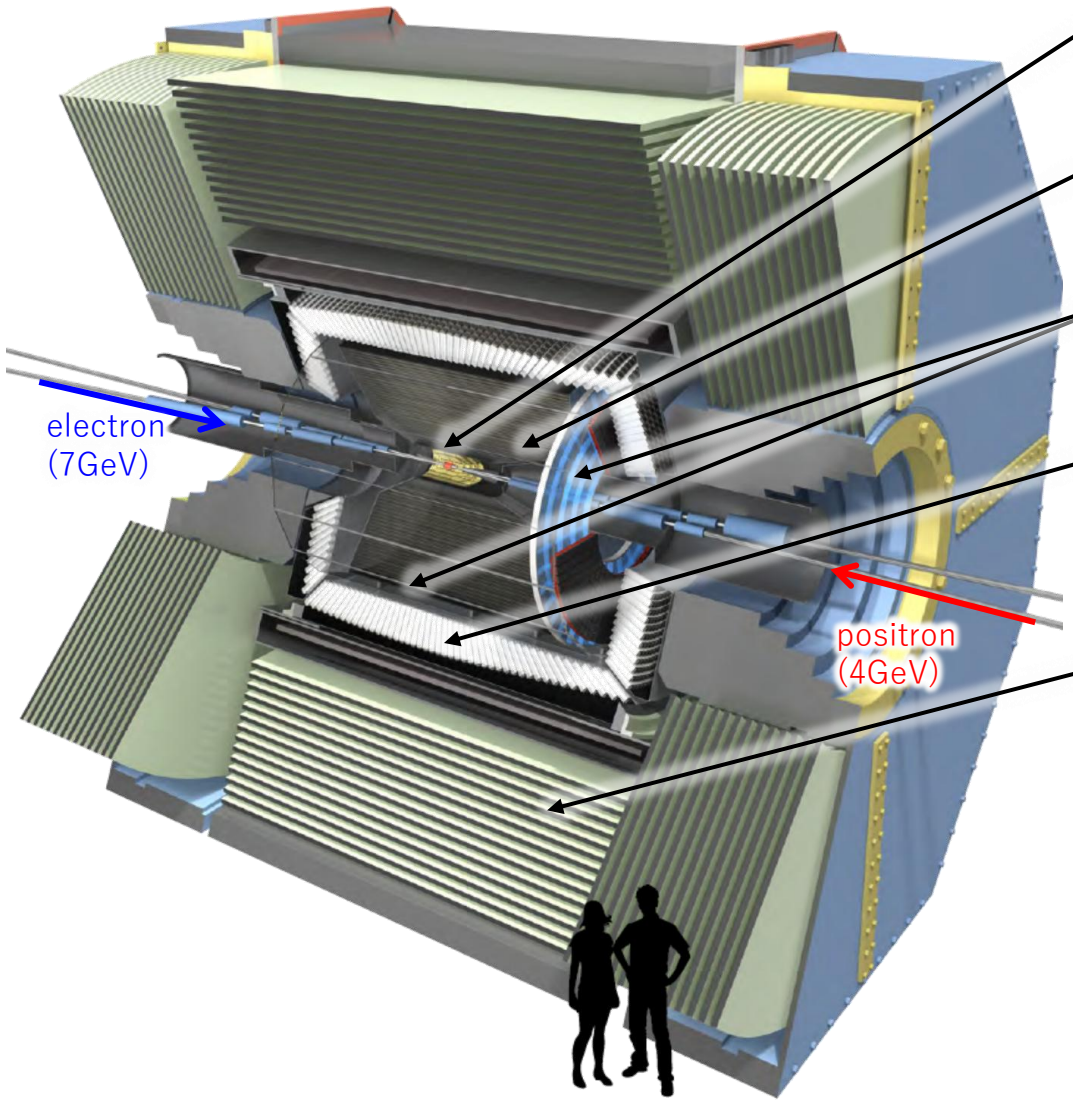
K_L/m検出器（KLM）
- Outer barrel：Resistive Plate Chamber(streamer)
- Endcap/Inner Barrel：プラスチックシンチ＋MPPC

Level-1トリガーシステム
- CDC+ECL+KLM
- Latency：5μsec

DAQシステム
- Max. Level-1 rate：30kHz
- Typical data size：1MB/event

GRID computingによるデータ解析

LS2計画との互換性



崩壊点検出器（VXD）
- 内層2層：DEPFET (pixel)
- 外層4層：DSSD (strip)センサー

IR 領域の改修

中央飛跡検出器（CDC）
- $He+C_2H_6$ガスワイヤーチェンバー

Hit rate 耐性

粒子識別（PID）検出器
- Barrel：Time-Of-Propagation(TOP)検出器
- Forward endcap：Aerogel RICH(ARICH)検出器

電磁カロリメータ（ECL）
- CsI(Tl)シンチレータ+waveform sampling

超電導ソレノイド電磁石 1.5 T

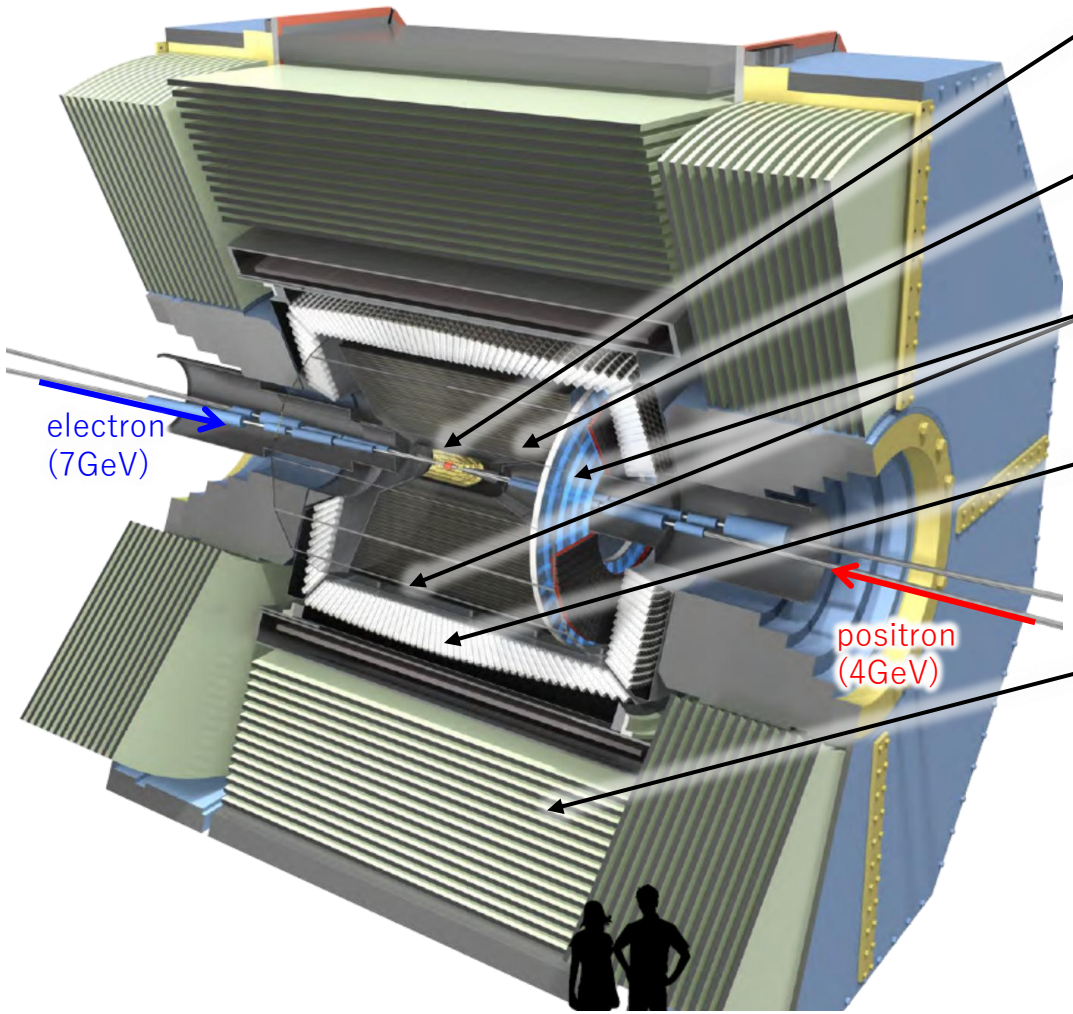
K_L/m検出器（KLM）
- Outer barrel：Resistive Plate Chamber(streamer)
- Endcap/Inner Barrel：プラスチックシンチ＋MPPC

Level-1トリガーシステム
- CDC+ECL+KLM
- Latency：5μsec

DAQシステム
- Max. Level-1 rate：30kHz
- Typical data size：1MB/event

GRID computingによるデータ解析

LS2計画との互換性



崩壊点検出器（VXD）
- 内層2層：DEPFET (pixel)
- 外層4層：DSSD (strip)センサー

IR領域の改修

中央飛跡検出器（CDC）
- $He+C_2H_6$ガスワイヤーチェンバー

Hit rate 耐性

粒子識別（PID）検出器
- Barrel：Time-Of-Propagation(TOP)検出器←TOPのPMT交換必要
- Forward endcap：Aerogel RICH(ARICH)検出器

電磁カロリメータ（ECL）
- CsI(Tl)シンチレータ+waveform sampling

超電導ソレノイド電磁石 1.5 T

K_L/m検出器（KLM）
- Outer barrel：Resistive Plate Chamber(streamer)
- Endcap/Inner Barrel：プラスチックシンチ＋MPPC

Level-1トリガーシステム
- CDC+ECL+KLM
- Latency：5μsec

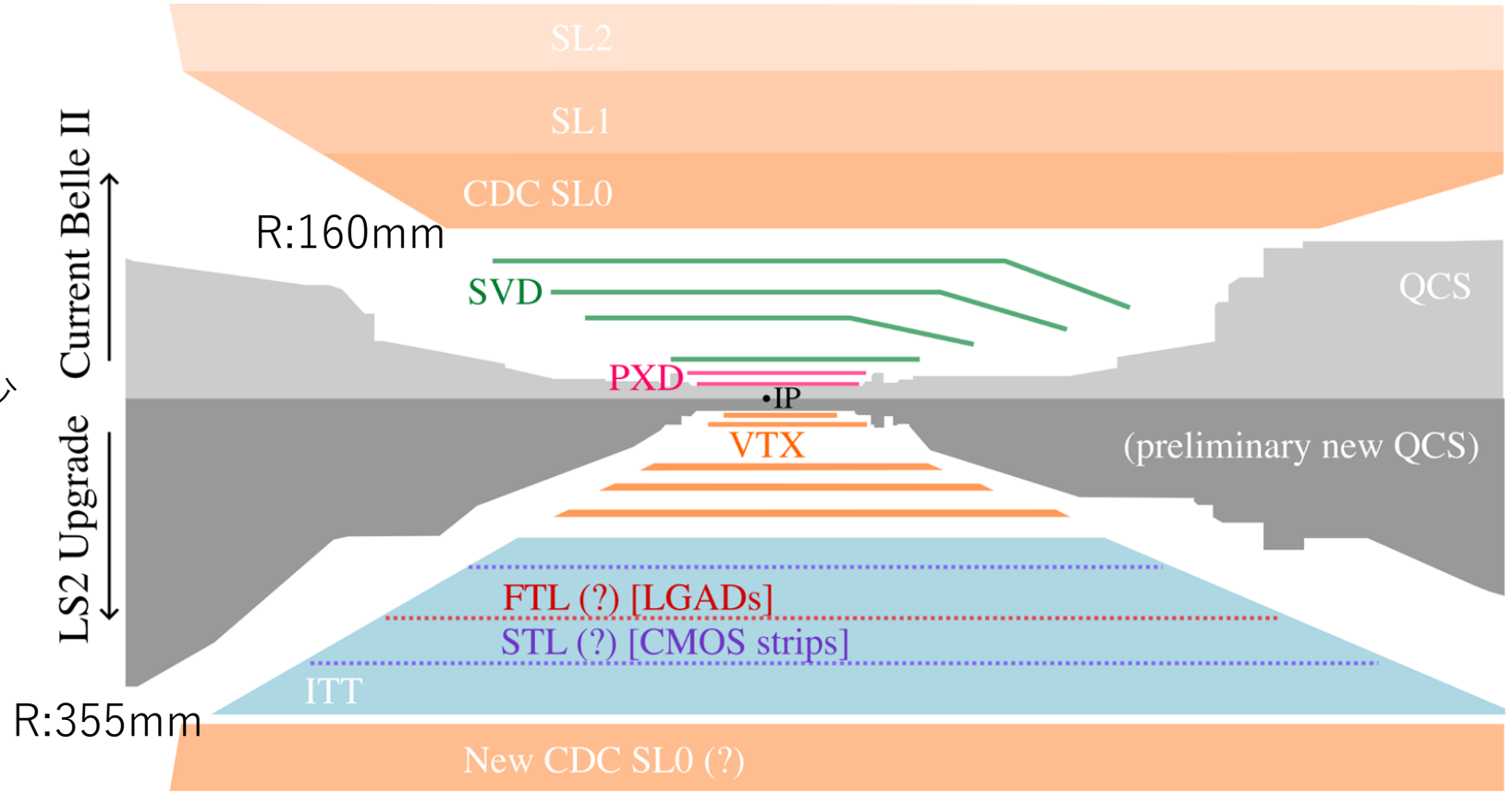
DAQシステム
- Max Level-1 rate：30kHz

- LS2前までCDCとTOPに慎重な運用が必要
- VXDとCDC…LS2で新しく作り変えが必要

BelleII検出器LS2アップグレード

PXD+SVD→VTX

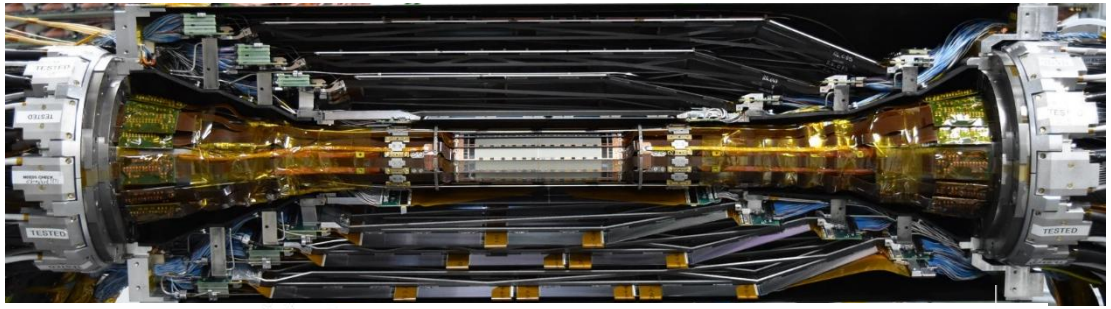
CDC→oDC+FTL+STL

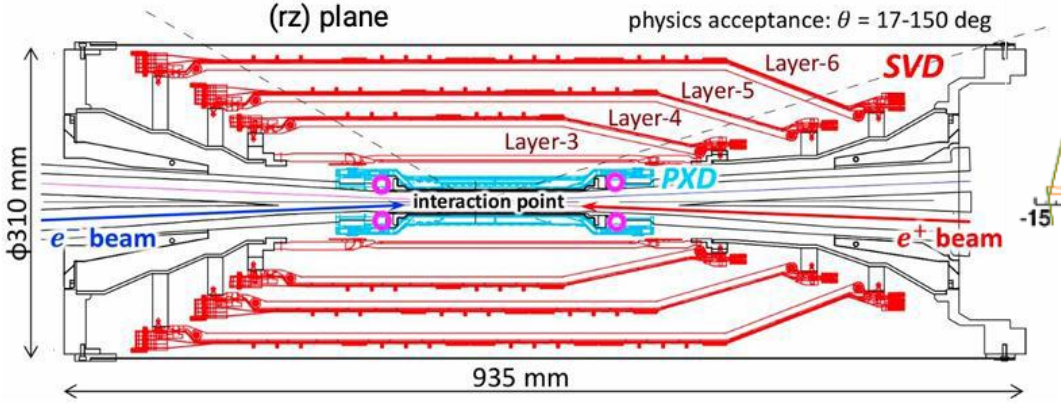


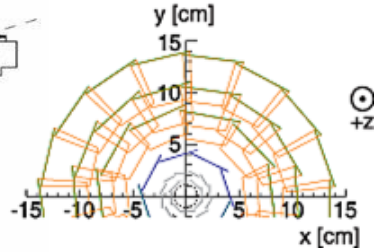
- 前方(ブースト方向)アクセプタンス減少
  17度→22度
- Vertex Detector(VTX)
  - CMOSピクセルセンサー 5層
- Fast Timing Layer(FTL)
  - AC-LGAD 1層
- Silicon Transition Layer(STL)
  - CMOS strip

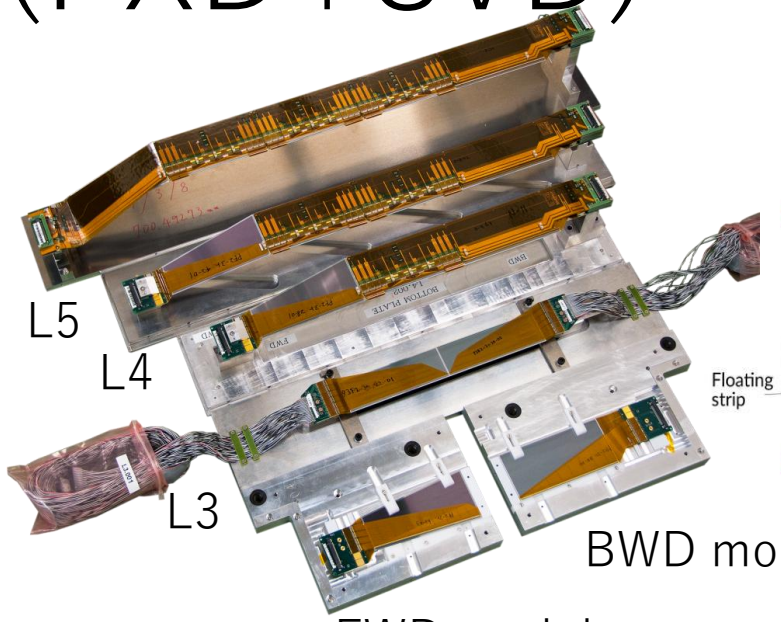
- CDCを衝突点から遠ざけhit rateを下げる+セルサイズ(ワイヤー間隔)を狭める→oDC
- VTXとoDCの間にトラッカーが必要(low p_t π from $D^* \to D\pi$)→FTL(Hawaii)とSTL(DESY)が提案中

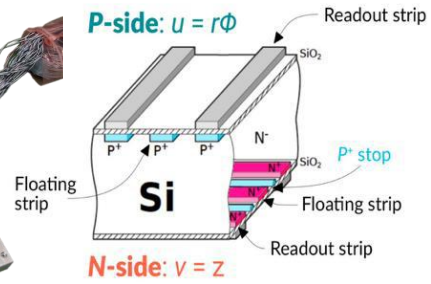
現行崩壊点検出器(PXD+SVD)

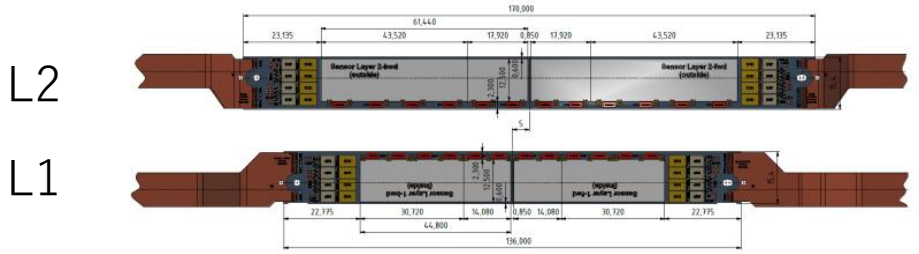












	VXD					
Layer	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Sensor	PXD/DEPFET		SVD/DSSD			
Readout	Rolling shutter(ASIC)		Analog pipeline(APV25)			
Radius	14mm	22mm	39mm	80mm	105mm	135mm
Pixel/Strip pitch(Slant)	50x55~60um	50x70~85um	p-strip: 50um, n-strip: 160um	p-strip:75um(50-70um) n-strip: 240um(240um)		
#sensor/ladder	2	2	2	3	4	5
#Ladder	8	12	7	10	12	16
Material budget	~0.3%	~0.3%	~0.5%	~0.7%	~0.8%	~0.8%

PXD…DEPFET(Depleted p-channel FET).
- オールシリコン、ローリングシャッター読出し

SVD…両面ストリップ検出器
- 読出しチップAPV25のチップオンセンサー実装(Origami-concept)

PXD、SVD共通2相CO2冷却

崩壊点検出器VTX

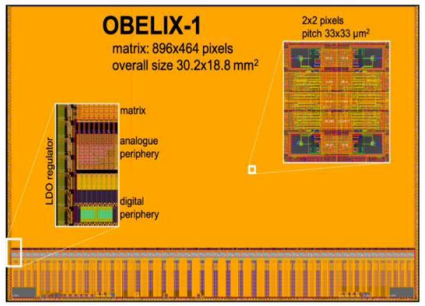
全層ピクセルセンサー(VTX)

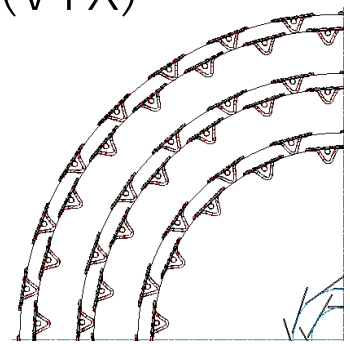
- A depleted monolithic active pixel sensor(DMAPS)
  OBELIX(Optimized Belle II Monolitic Pixel sensor)
  高い時間空間分解能
  - 33μm× 33μmピクセル.
    <15μm 固有位置分解能
  - 464row×896column
  - 50-100ns time stamp

  高い放射線耐性
  - 100Mrad,
  - $5\times10^{14}n_{eq}/cm^2$

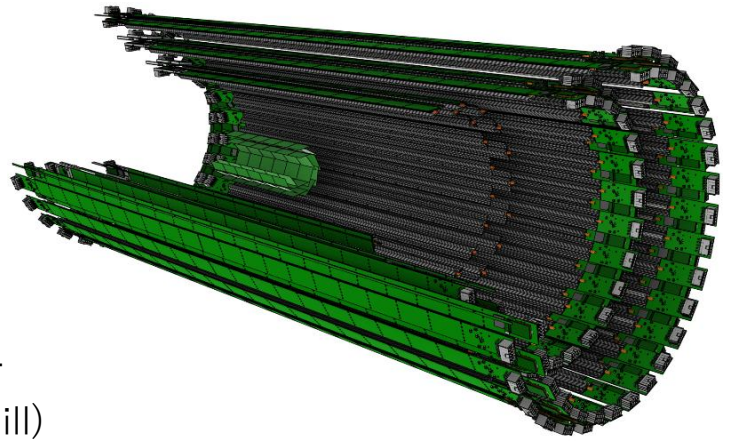
  消費電力
  - 200-300mW/cm^2

  状況
  - OBELIX1
  - Tower Semiconductor 180nm
  - 2026年11月製造完了。順次納品中。
- 2種類のラダー構造(iVTX and oVTX)
  - ５層構造:
  - 設置半径: 14、22、82.5/89、108.0/114.5、133.5/140.0mm
- 低物質量化
  - L1-2: 0.3%,
  - L3-5: 0.6-%

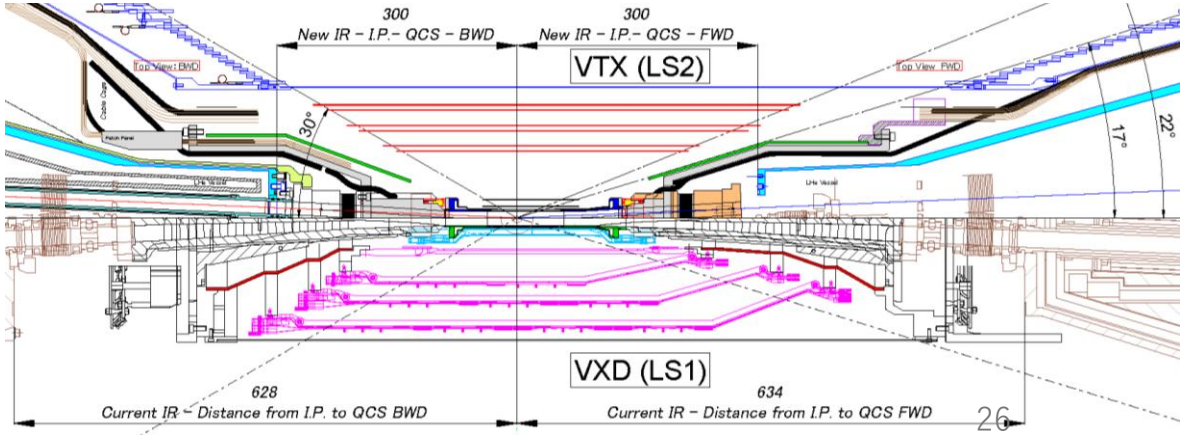




L5 L4 L3 oVTX (staggered)　L2 L1 iVTX (windmill)

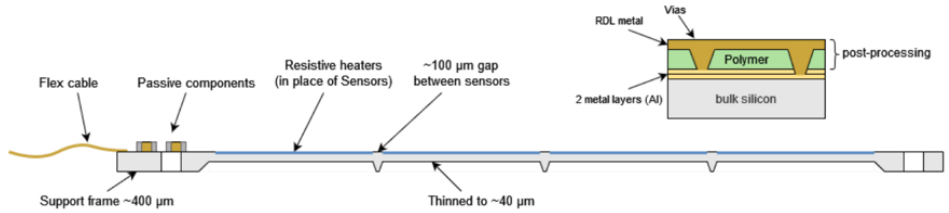


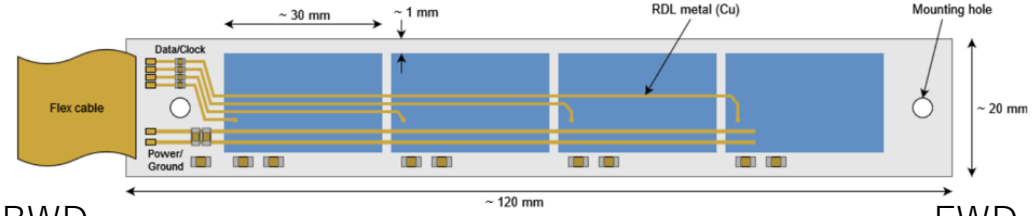
	L1	L2	L3	L4	L5
Radius[mm]	14.1	22.1	82.5/89.0	108/114.5	133.5/140
#Ladder	6	10	36	48	60
#Sensors/Ladder	4	4	16	20	24
Mat budget[% X0]	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6
Expected hit rate[MHz/cm2]	34	16	0.76	0.41	0.27

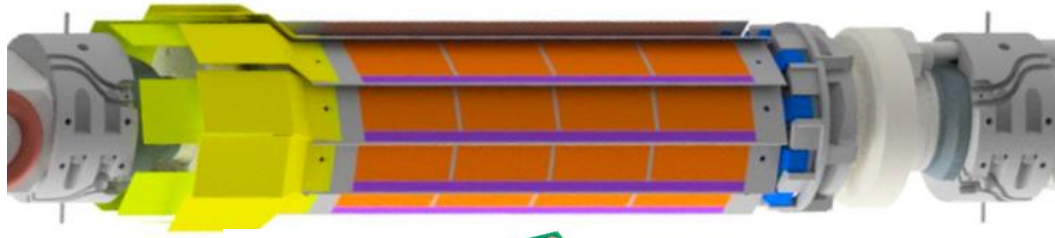


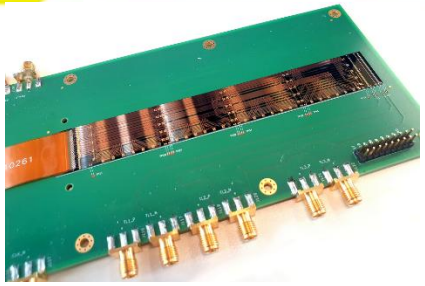
iVTX

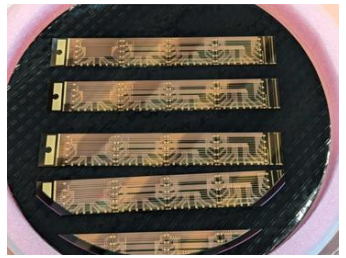
- 4チップラダー(L1、L2)
  - ウェハーから4チップ分をダイシングし、~100μmまで薄化。
- 目標物質量 0.3% X/X_0
  - Post-process redistribution layer(RDL)で信号線を形成。片側読出し
  - RDLでフルスケールのヒーター付きダミーラダーを製造
- TPG(Thermal Pyrolytic Graphite)で伝熱冷却
  - 設計要件: センサー40 °C以下
  - CBM実験のMVD検出器で実績[JINST 20 C06024]
    - TPG：1500 W/mK c.f. 銅~400W/mK
  - 熱をTPGで両側のエンドマウントまで輸送
    - 3D プリンターによる水冷埋め込みチャンネル付エンドマウント(PXDと同様)
  - シリコンとTPG間の接着剤の低熱抵抗の実現が鍵
    - 熱シミュレーションの実測確認
    - 垂直方向の伝熱
    - 水平方向の伝熱

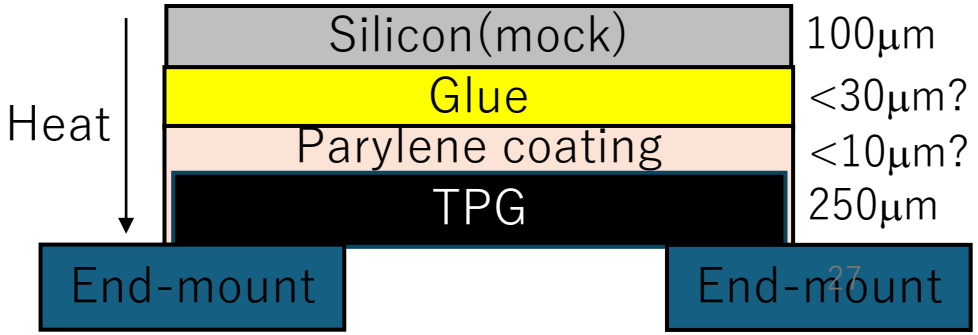






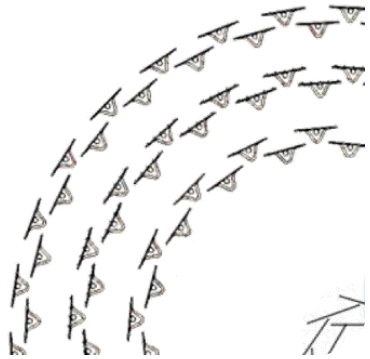


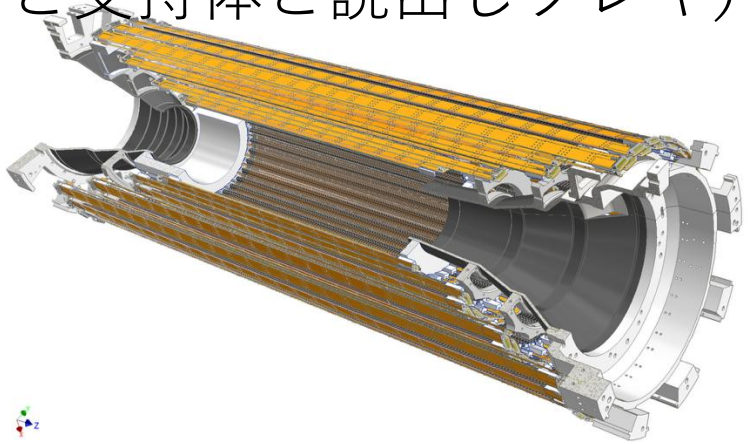


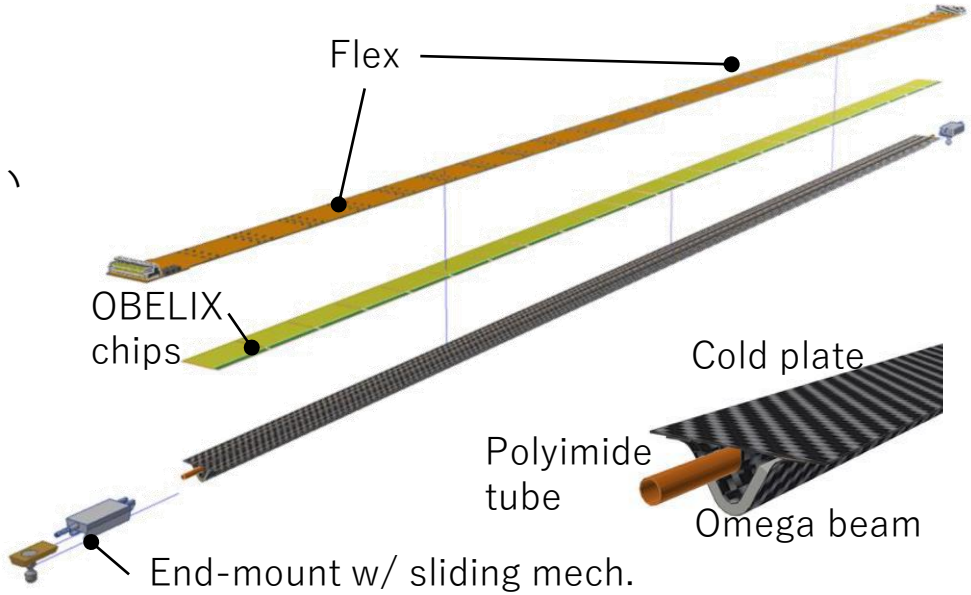


oVTX

- oVTX ： 単体OBELIXチップを一列に連ねた構造(センサーと支持体と読出しフレキ)
  - ALICE ITS2 inspired
- 目標物質量 0.6% X/X_0 per layer
  - Al-Flex (0.24%)
  - Support(0.23%)
  - Chips(0.10%)
- Staggered ladder layout
  - 隣接ラダーと有感領域が重複
- 限られたサービススペース
  - 前進したQCSによって信号配線、冷却パイプの設置空間が少ない
  - 放射線遮蔽体(ヘビーメタルシールド)の設置空間が少ない
- ラダー量産
  - 量産手法：現在検討中
  - 量産開始：2029年開始予定







Al-Flex

- 導体に銅ではなくアルミ導体を用いたフレキシブル基板

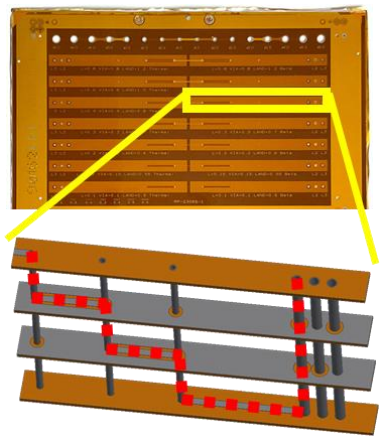
物質	Z	密度[g/cm^3]	X_0[cm]
Cu	29	8.96	1.44
Al	13	2.70	8.9

低物質量化が可能

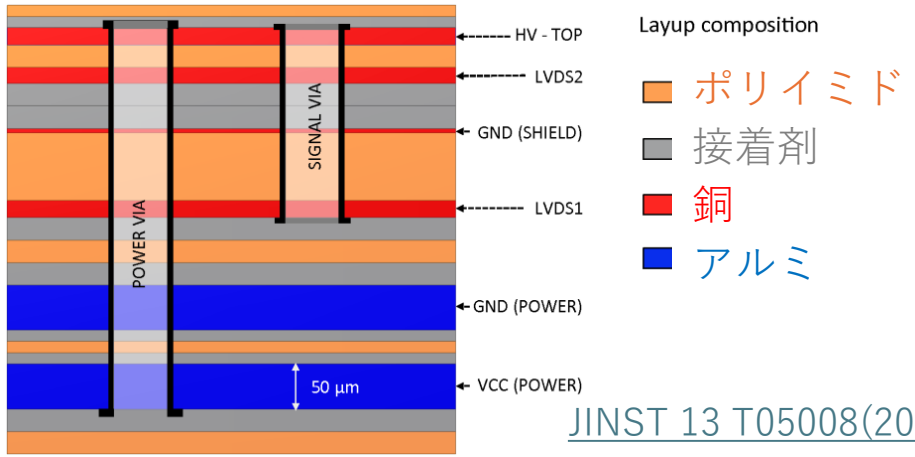
単層は存在、多層は存在しない(層間導通ビア作れない)

- ATLAS/IBL用にCERNが多層アルミ銅フレキを開発
  - 銅4層(19μm3層,4μm1層)、アルミ2層(50μm)
  - 原理的に多層フルアルミフレキにも応用可能
    →但し製造コストが高い(蒸着)
- oVTX/OBELIXの読出しアルミフレキ開発
  - CERNで製造
  - 日本でも製造したい
    - CERN方式
    - めっき方式(蒸着無→安価)
    - 超音波接合方式(安価で高密度)

  3つの手法で開発中



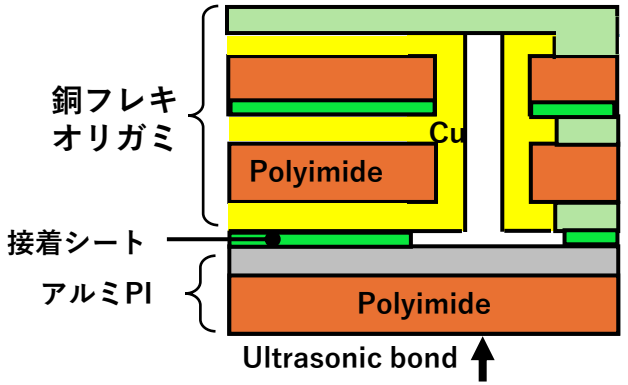
ATLAS/IBLのAl-Cuフレキ



JINST 13 T05008(2018)

スルーホールの形成方法

1. 貫通穴
2. アルゴンプラズマエッチング
3. クロム0.2μm物理蒸着(PVD)
4. 銅2μm物理蒸着
5. 銅25μm電気めっき



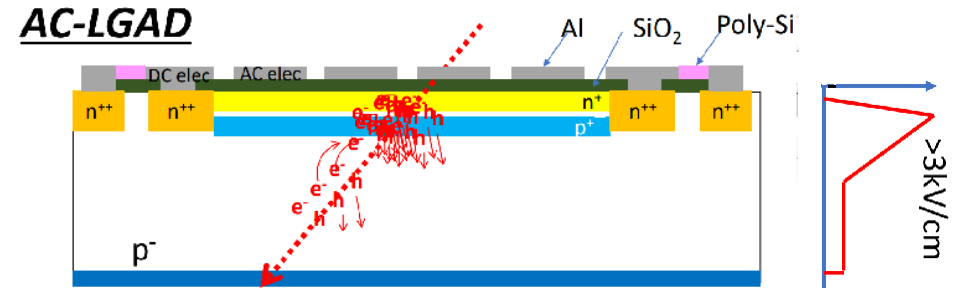
Fast Timing Layer(FTL)

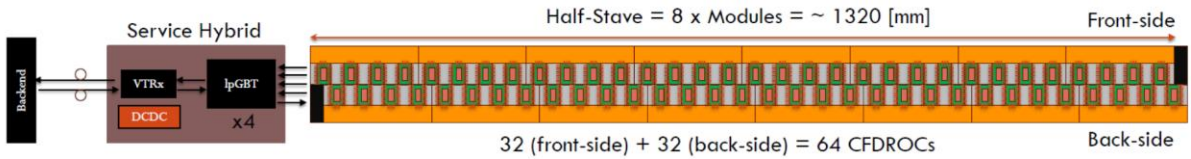
$$m = p\sqrt{\frac{c^2T^2}{L^2} - 1}$$

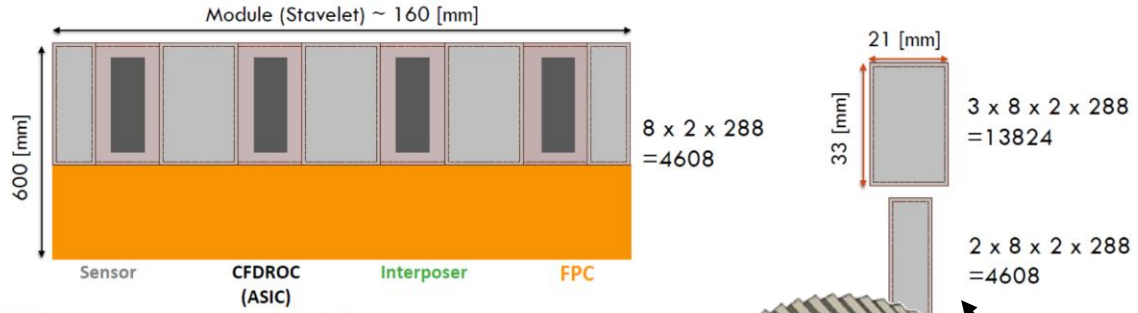
飛行時間差：T
飛行距離：L
運動量：p

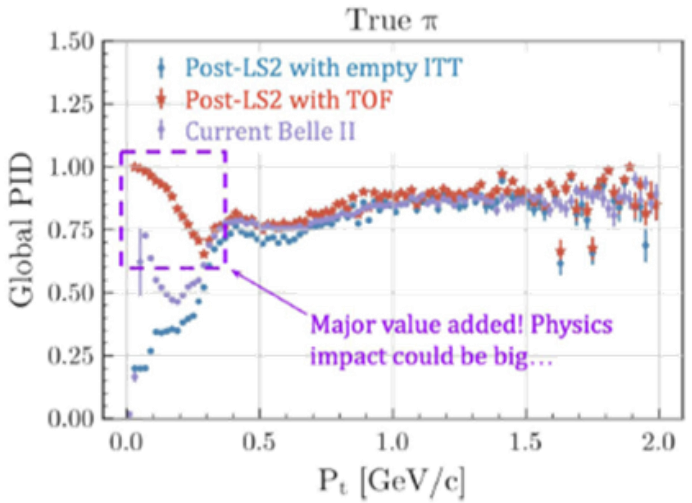
トラッカー兼TOF

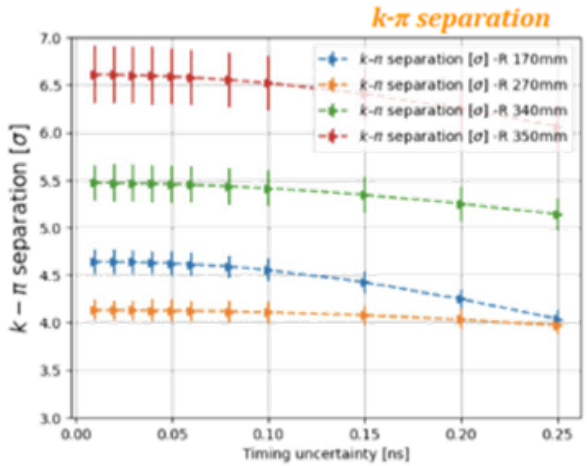
- AC-LGAD(AC-coupled Low-Gain Avalanche Diodes)
- ストリップサイズ：10mm×0.5mm
- #ストリップ：512ch
- センサーサイズ：22.3mm×36.9mm
- $\sigma_{intrinsic}$~30psec
- σ_{system}~50psec(ASIC込み)を狙っている

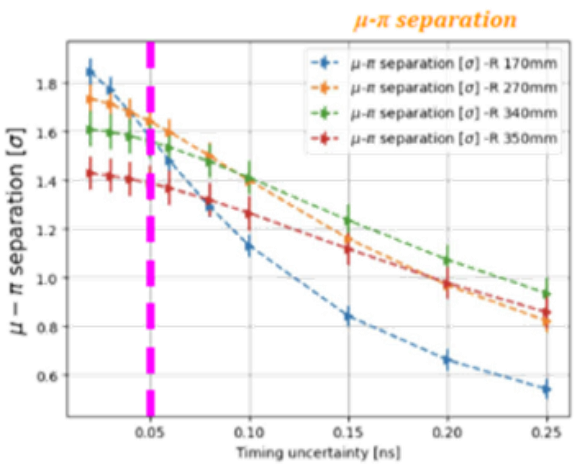


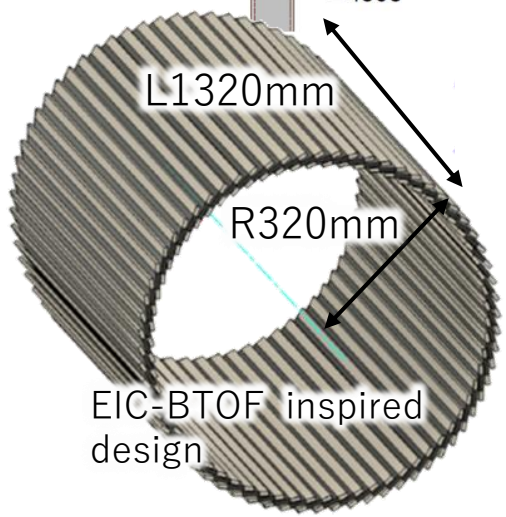








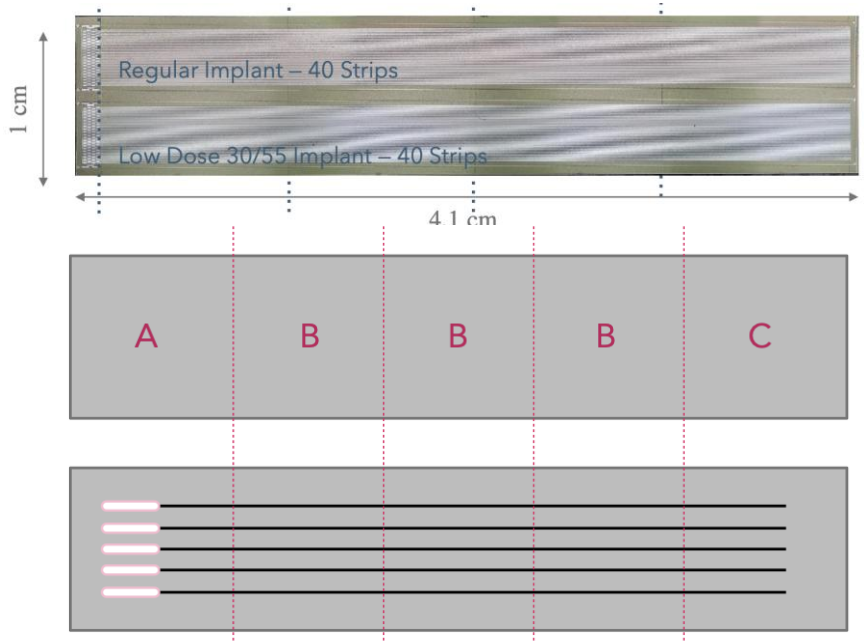


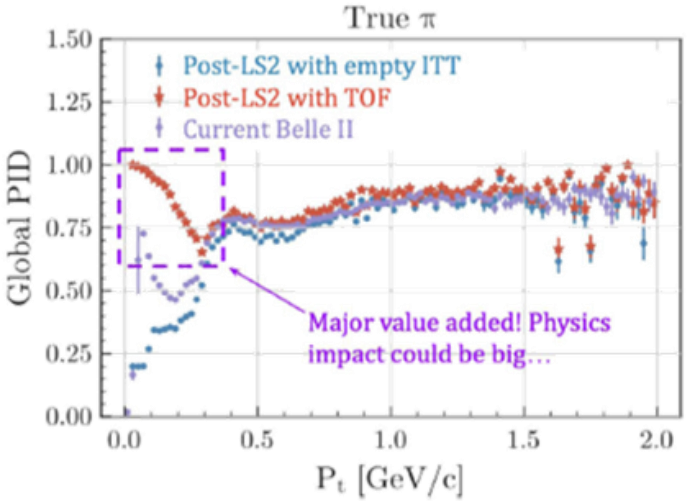


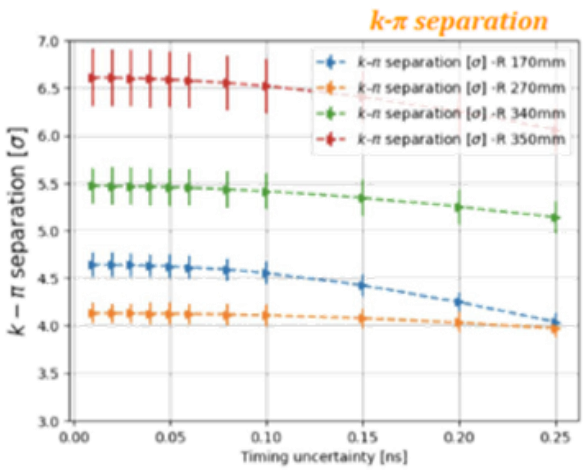
Silicon Transition Layer(STL)

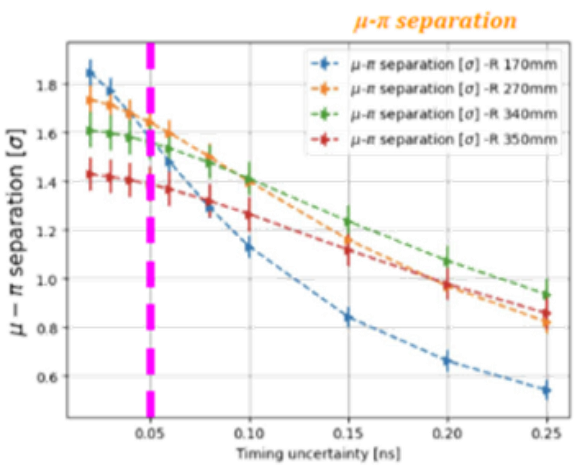
Active CMOS ストリップセンサー

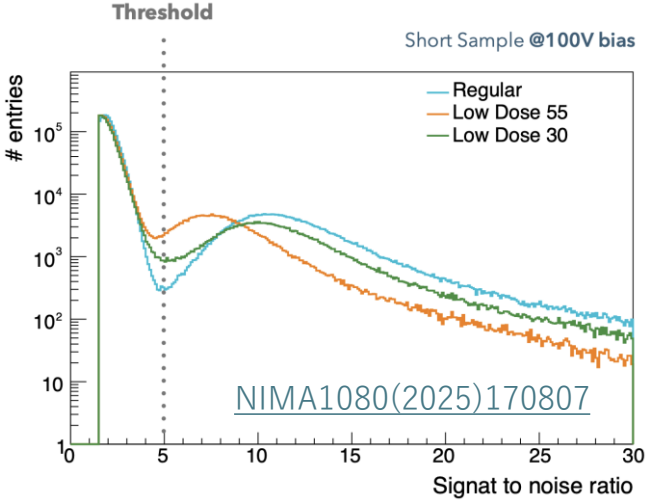
- ストリップセンサーにFront-end回路を入れたモノリシックセンサー
  →MONSTERAプロジェクト
- 開発状況
  - Passive CMOSストリップセンサー
    - LFoundry 150 nm process
    - スティッチングにより4.1cmのストリップを製造
    - テストビームで電荷量不純物濃度を最適化
  - Active CMOSストリップセンサー
    - Telepix2 based chipのサブミッション。製造中。





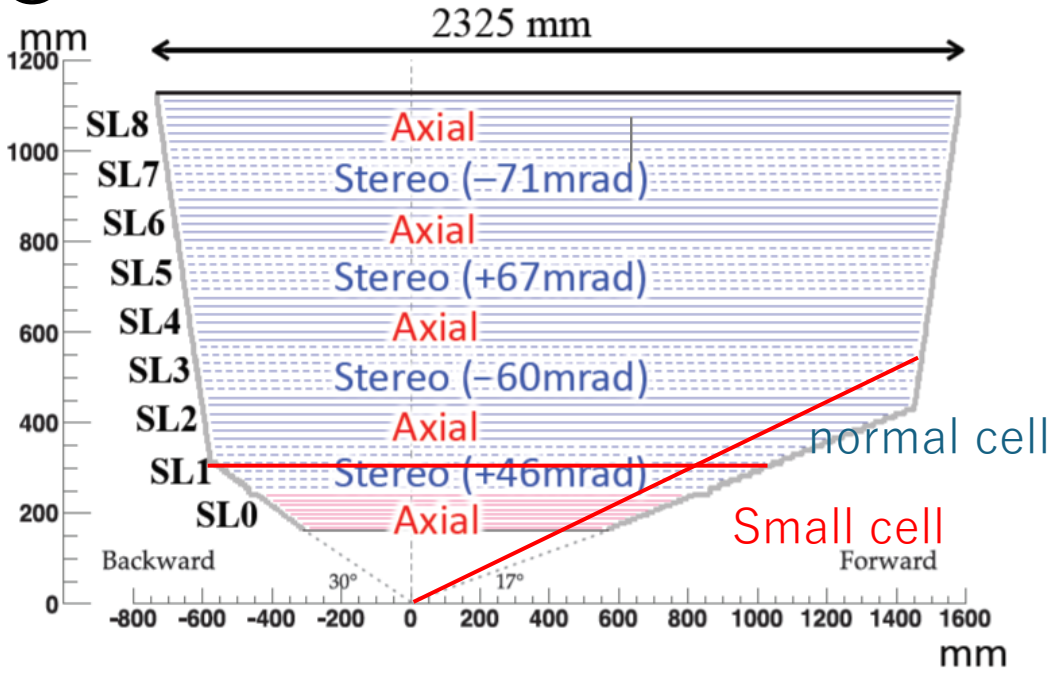


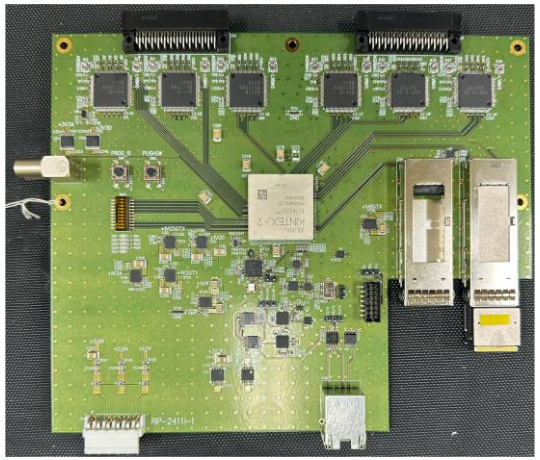


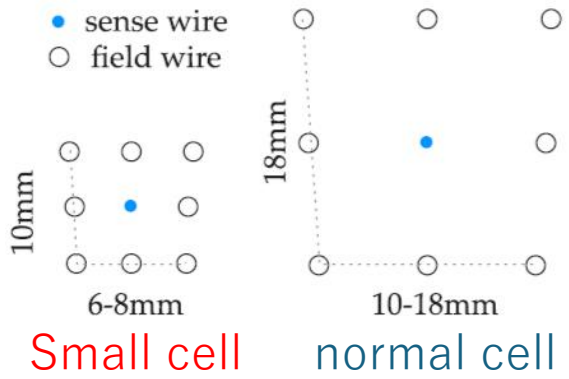


CDC/oDC

- CDC
  - Hit rate
    - 内層で高い
    - セルサイズ：
  - エージング効果
    - 陽極ワイヤー表面に不純物付着
    - ガスゲイン低下
    - ワイヤー電流の蓄積電荷量で評価
  - マルター効果
    - 陰極ワイヤー表面に堆積物付着
    - ダークカレントの増加
  - Front-end board アップグレード
    - Optical Linkの放射線耐性
    - クロストーク(フェイクトラック)削減

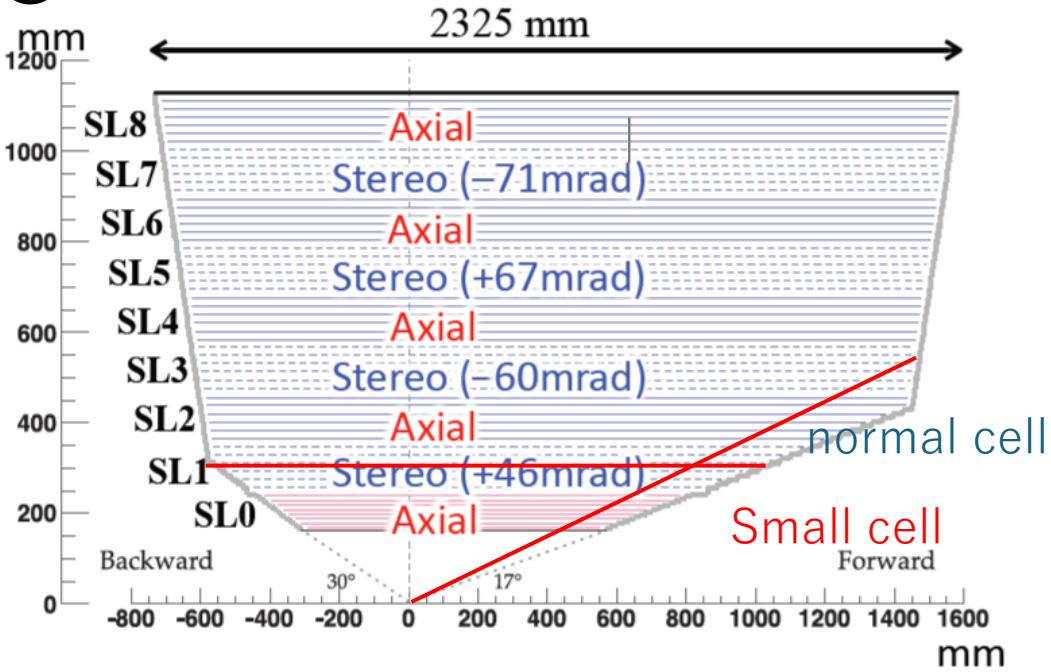


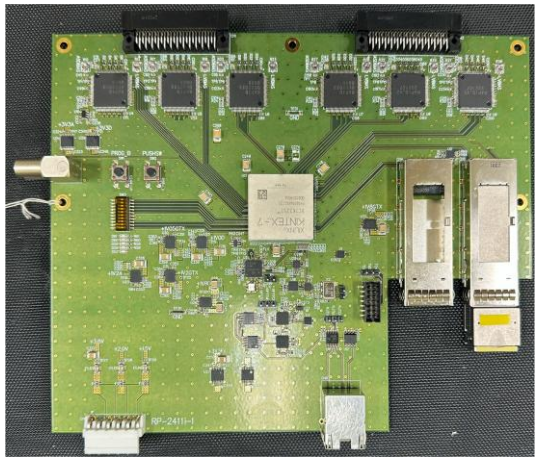


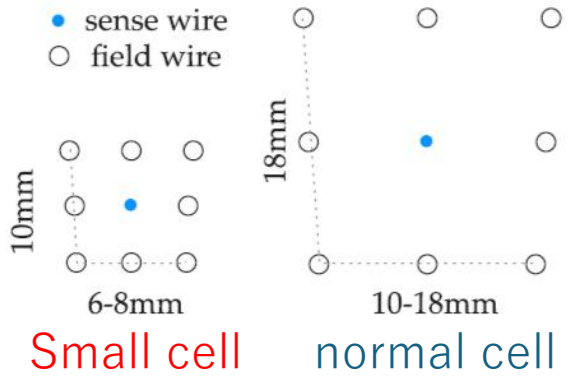


CDC/oDC

- CDC
  - Hit rate
    - 内層で高い
    - セルサイズ：
  - エージング効果
    - 陽極ワイヤー表面に不純物付着
    - ガスゲイン低下
    - ワイヤー電流の蓄積電荷量で評価
  - マルター効果
    - 陰極ワイヤー表面に堆積物付着
    - ダークカレントの増加
  - Front-end board アップグレード
    - Optical Linkの放射線耐性
    - クロストーク(フェイクトラック)削減
- oDC
  - 最内層R363m(レバーアームの短縮)
    - 粒子識別分解能
    - 運動量分解能
  - セルサイズの縮小
  - エージング、マルター効果対策

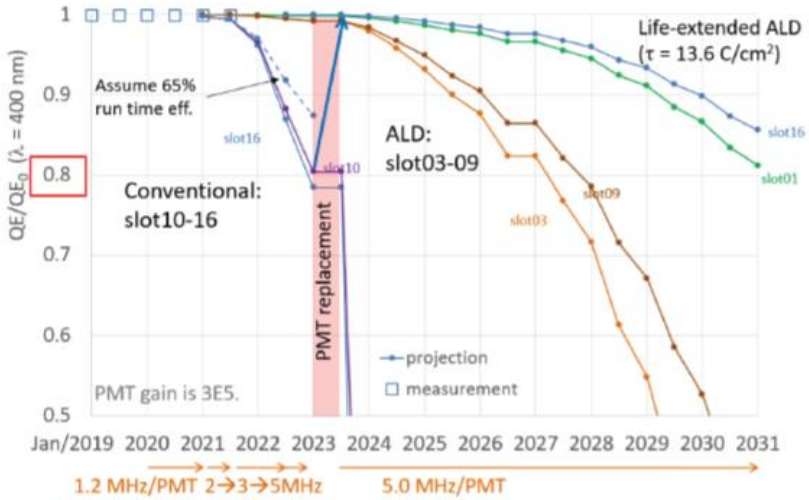




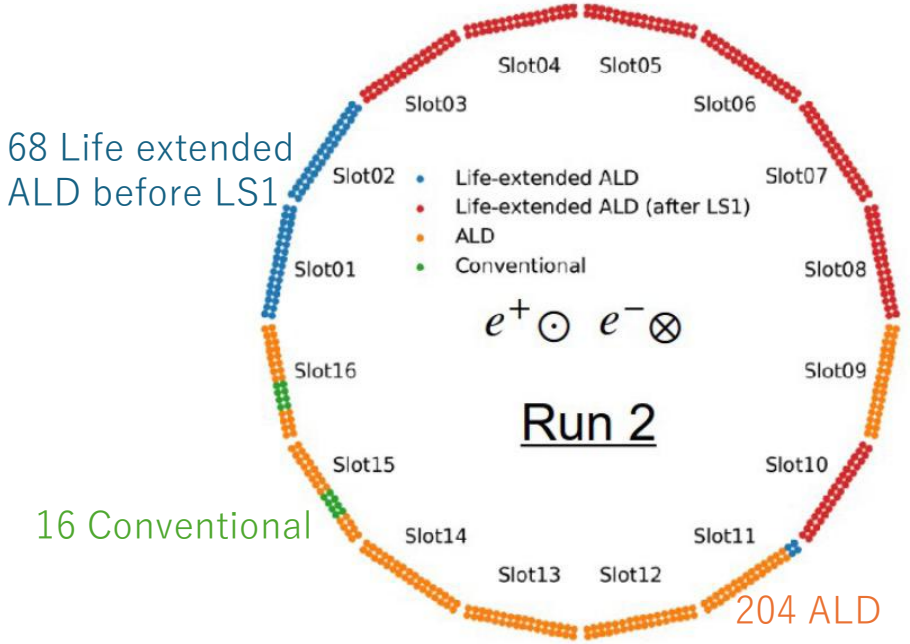


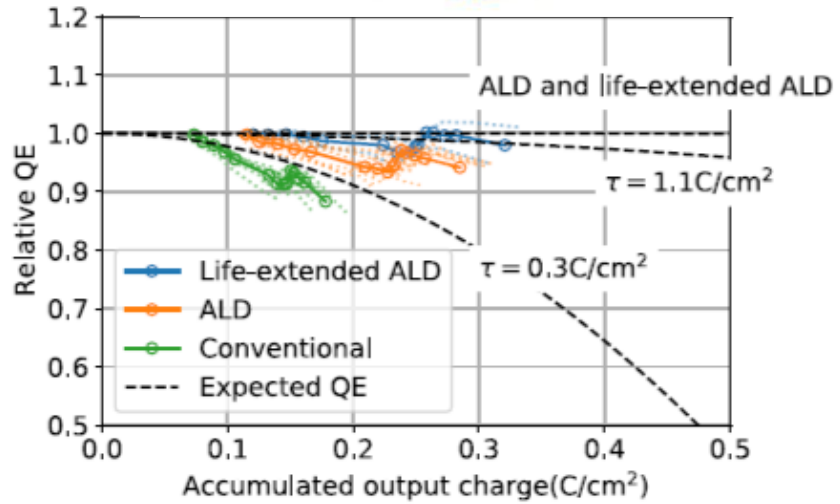
TOP

- MCP(マイクロチャンネル)-PMTの寿命
  - 電子の増幅仮定でイオン、ガスが光電面を劣化



  - ALD(Atomic Layer Deposition)原子層堆積
    - 表面に原子を一層ずつ重ね表面を均一化
      →ガスの放出/吸着を抑制
  - 長寿命化ALD MCP-PMT
- BGの緩和策
  - 加速器との連携

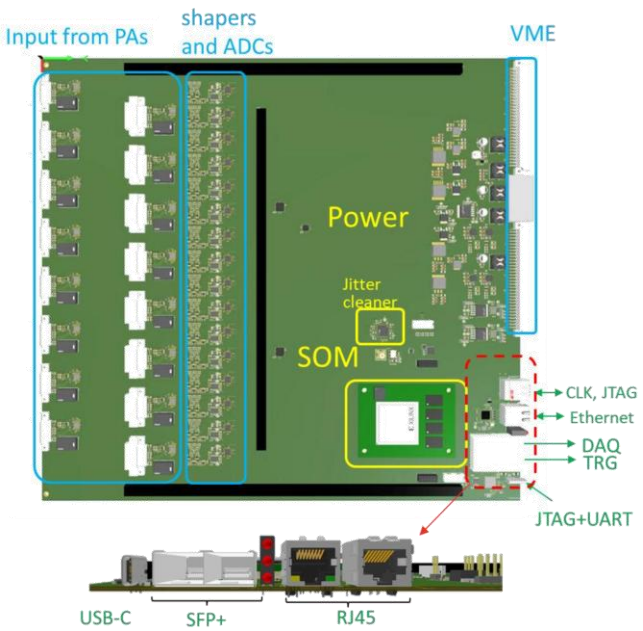


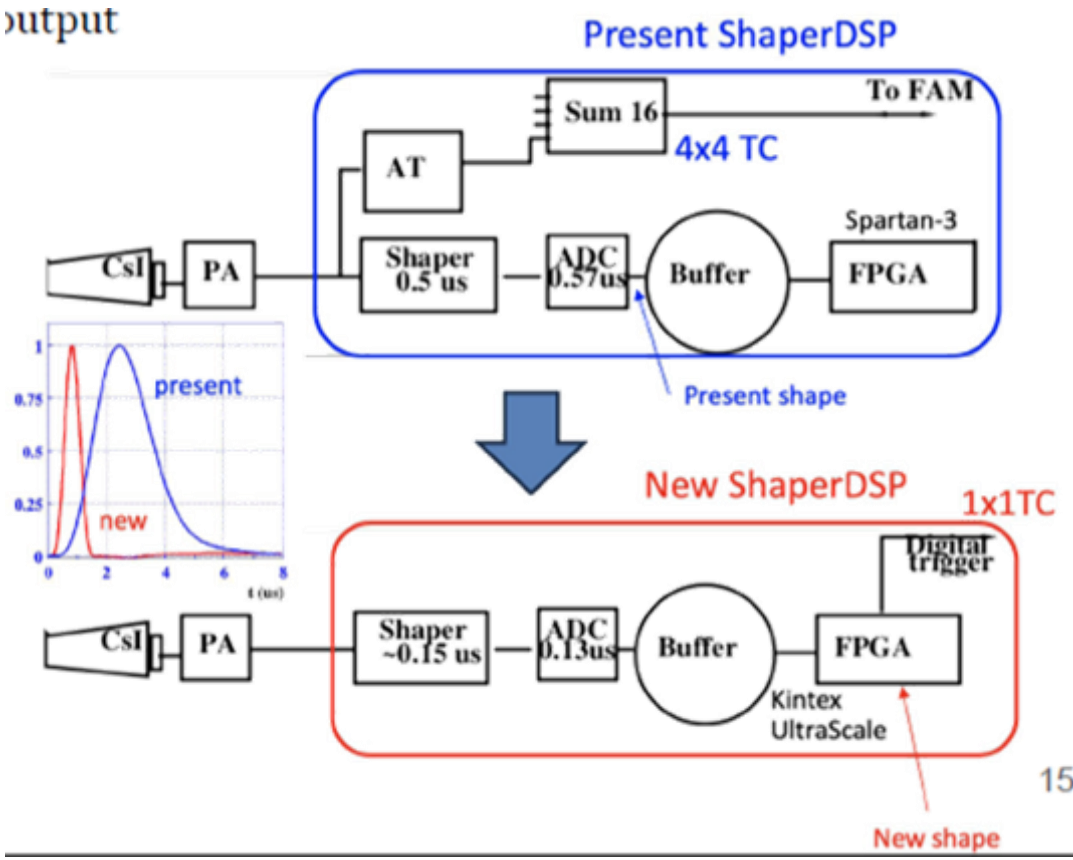


NIMA 1056(2023)168627

ECL electronics upgrade

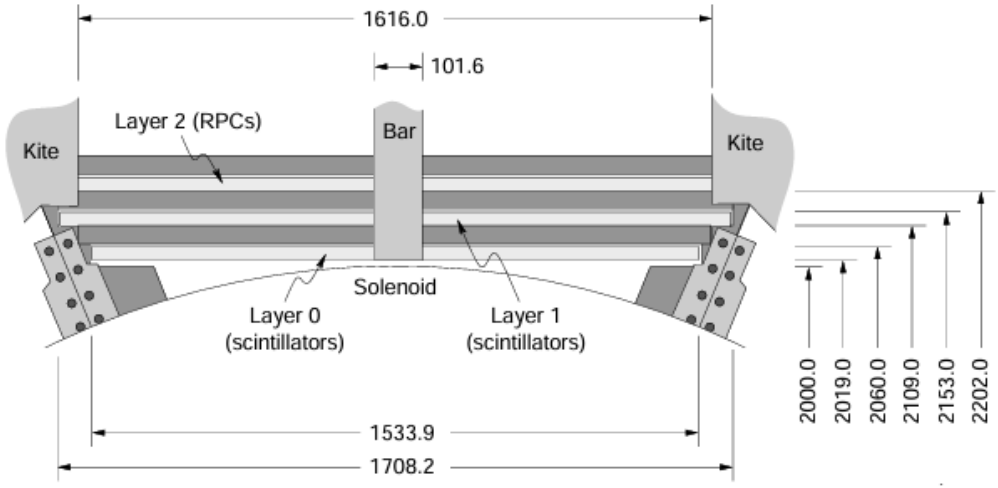
- 高時間分解能
  - パイルアップBG
    ビームBG起源のヒットが信号に混ざる
  - Faster shaping time 500nsec→150nsec
  - Higher sampling rate 1.7MHz→7.9MHz
  - Prototype board available
- シミュレーション
  - アップグレードエレクトロニクス
  - Physics performance
  - BGスタディ





KLM

- タイミングの高精度化
  - KL、中性子のコインシデンス/VETO
  - TOF化
    - KLの運動量測定
    - SiPM



- RPC efficiency
  - BG ~1.3 Hz/cm^2
    - ストリーマー放電した不感領域によりefficiencyが顕著に落ちる
  - アバランシェ領域での運転
    - 回復時間早い
    - 信号量小さい→新しいフロントエンドエレキ
    - ガス組成30% argon, 8% butane, 62% HFC-134aの変更必要(クエンチングガスの導入)
    - クエンチングガス(SF_6)もHFCも温室効果ガス。→将来の入手性?

Trigger



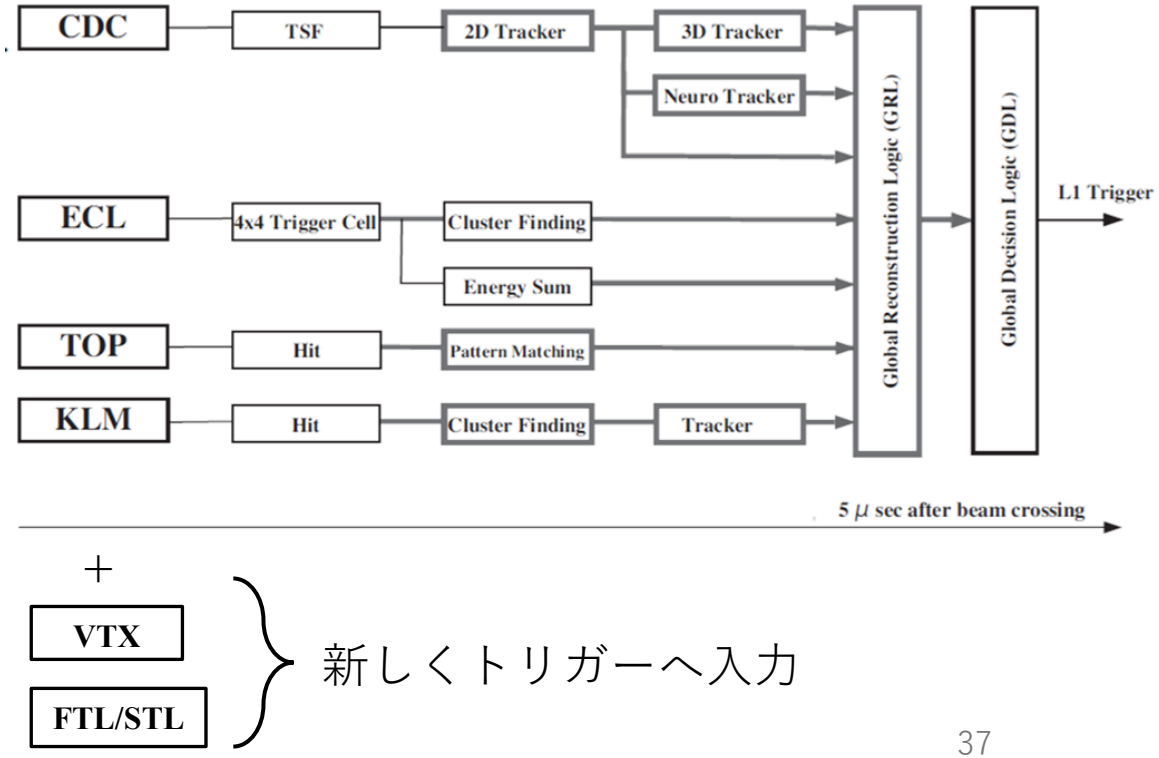
UT3



UT4

UT generation	UT3	UT4	UT5
Main FPGA (Xilinx)	Virtex6 XC6VHX380-565	Virtex Ultrascale XCVU080-190	Versal
Sub FPGA (Xilinx)	−−	Artex7	Artex7, Zynq
# Logic gate	500k	2000k	8000k
Optical transmission rate	8 Gbps	25 Gbps	58 Gbps
RAM	−−	DDR4	DDR4, UltraRAM
# UT boards	30	30	10
Cost per a board (k$)	15	30	50
Time schedule	2014-	2019-2026	2024-2032

- Level-1トリガーのための汎用トリガーロジック(UT)回路
- UT5：大規模LogicおよびDSPによるAI/MLトリガーの拡充
- LS2以降、さらなる精巧なトリガーロジックが実装可能に
  - 崩壊点検出器VTXによるLevel-1トリガー情報
  - 電磁カロリメータからのより精細なヒット情報
  - トリガー遅延の許容幅拡大（５μｓ→９μｓへ）



まとめ

- LS2にルミノシティ増強のためIR領域をアップグレード
- 内層の崩壊点検出器と飛跡検出器で検出器の入れ替えを伴う大幅なアップグレードを予定。
- その他の粒子識別装置、カロリメータ、K_L/μ検出器、トリガーと様々な改良も盛り込まれる予定。
- 2027年に技術設計書(Technical Design Report)を出版予定
- 本格的な開発はまだまだこれから
- SuperKEKB/BelleII検出器が刷新され、順調に運用されるまで沢山の研究開発→活躍の機会

