



Belle II実験の概要

ゆるく聞いてください..

宇野 健太 (KEK IPNS)

Flavor Physics Workshop 2026

2026年11月17日

Unravelling the mysteries of matter, life and the universe.

素粒子物理について

標準理論: 現代素粒子物理学の基本的な枠組み (1970年代半ば)

- 17個の素粒子を予言 → **実験で全て発見!**



https://higgstan.com/standerd-model/

標準理論は、ほぼ全ての実験結果を高い精度で説明できる!

素粒子物理は終わり？

素粒子物理について

標準理論: 現代素粒子物理学の基本的な枠組み (1970年代半ば)

- 17個の素粒子を予言 → **実験で全て発見!**



https://higgstan.com/standerd-model/

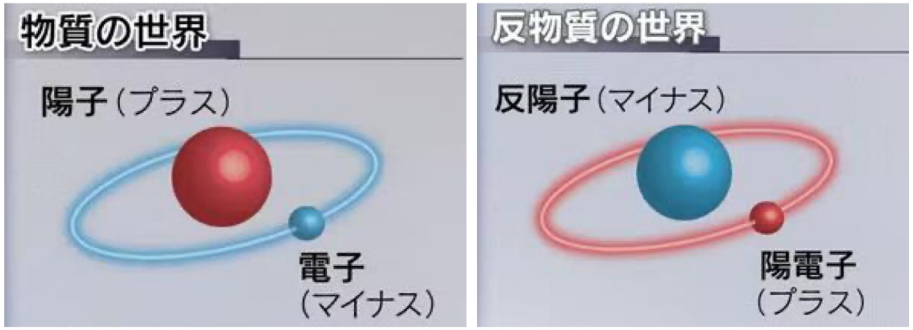
質量の起源
2012年LHC実験で発見!

標準理論は、ほぼ全ての実験結果を高い精度で説明できる!

No. まだまだわからないことがある

例. 消えた反粒子の謎

消えた反物質

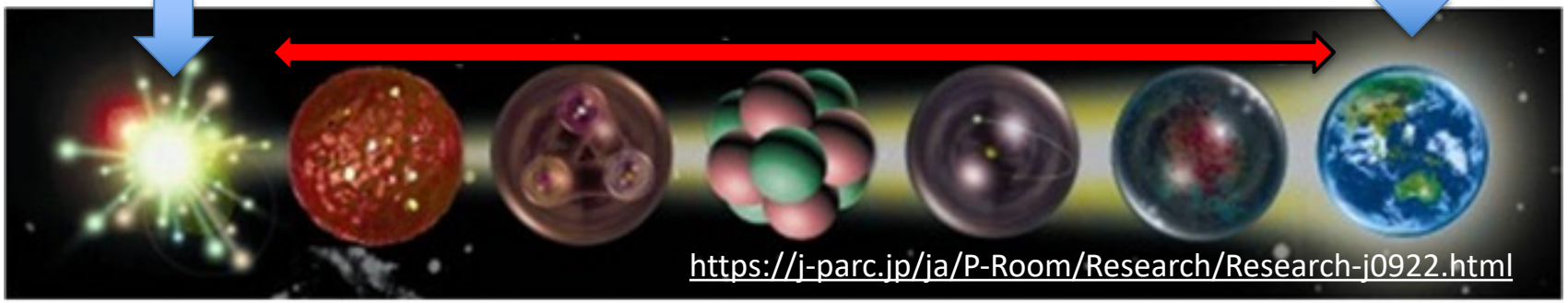


https://www.nikkei.com/article/DGKKZO02329020U6A510C1MY1000/

宇宙誕生初期、粒子と反粒子は同じ数だけあったはず

均衡を崩す何かが起こった？
(非対称性)

物質でできた世界



ビックバン	クォークなどのプラズマ状態	陽子・中性子の形成	軽い原子核の形成	原子の形成	星の形成	地球誕生
ビックバンからの時間	10^{-6}秒後	10^{-4}秒後	3分後	30万年後	10億年後	100億年後

宇宙誕生初期に何があったか (物理法則)調べることが重要!

加速器で宇宙誕生初期を調べる

高エネルギー粒子を衝突させる！

- 宇宙誕生初期の様子を再現可!

→ 新しい物理法則を見つけられるかも？



衝突型加速器を用いた実験

- LHC実験 at CERN
  - 衝突エネルギーをなるべく上げる

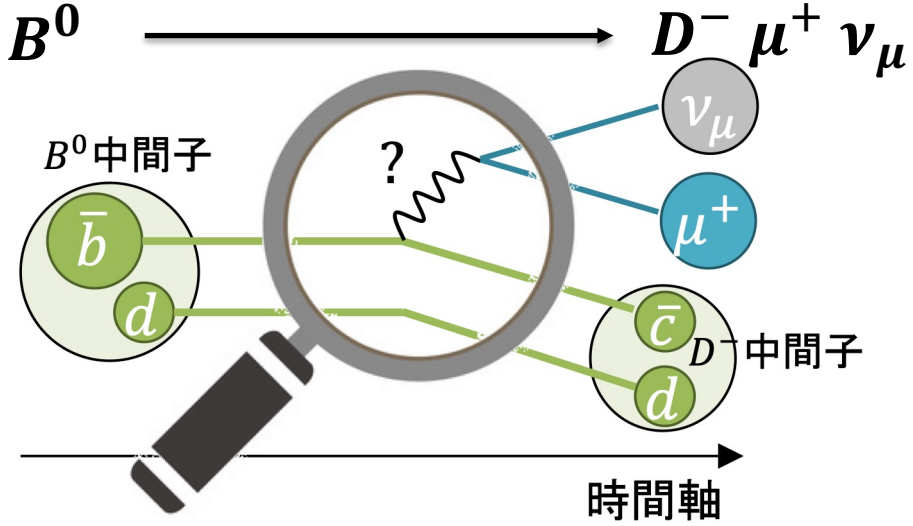
  → 新粒子の直接生成を狙う!
- SuperKEKB/Belle II実験
  - 精密測定から標準理論の綻びを見つける



標準理論からのズレ → 新物理によるもの？

精密測定から新物理の兆候を！

既知粒子の崩壊の様子をよく調べ、新物理の量子効果を捉える!



$$\tau(\psi) \cdot \sigma(\hat{H}) = \hbar$$

状態ψの変化にかかる時間 × エネルギーの不確定性 = 定数

→ 短い時間だとエネルギーが定まらず高いエネルギー状態になってもよい（量子効果）

中間状態を**間接的**に測定 (崩壊確率, 崩壊粒子の角度分布など..)

→ **標準理論の予想値と異なっていたら、新しい物理法則が潜んでいるかも？**

フレーバー物理のアプローチ

直接探索実験よりも高いエネルギーの物理を研究できる

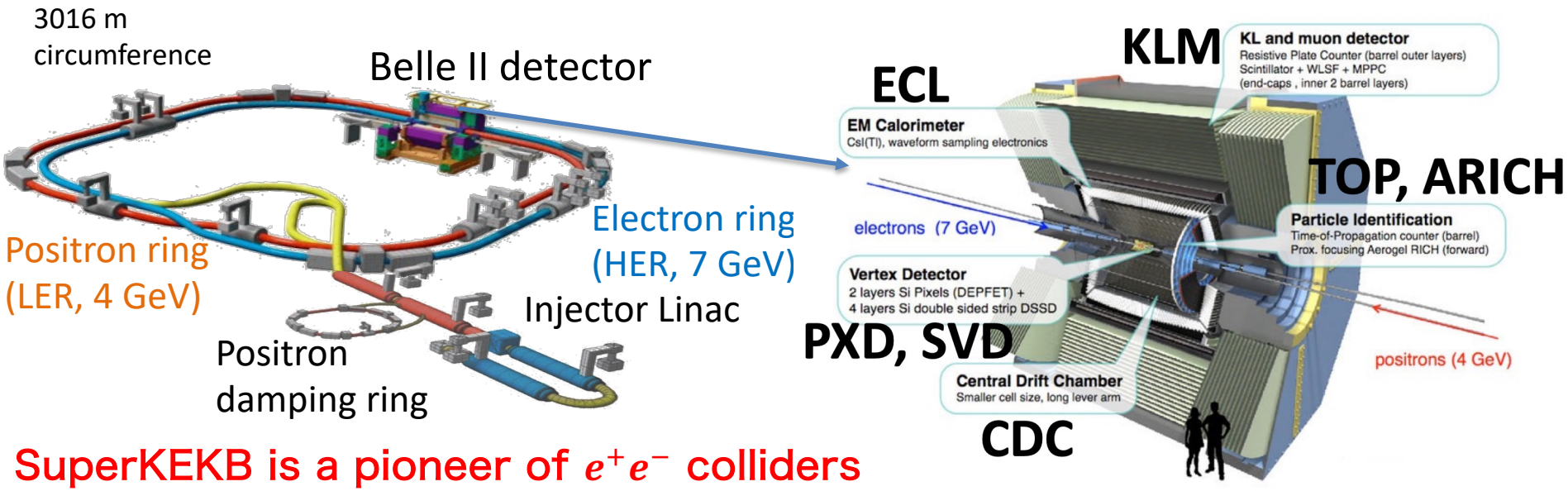
高いエネルギーの物理事象ほどより稀な確率 → 膨大な量のデータが必要!

SuperKEKB/Belle IIの挑戦!

SuperKEKB/Belle II

Main goal: Search for new physics in various decays such as B, D, τ

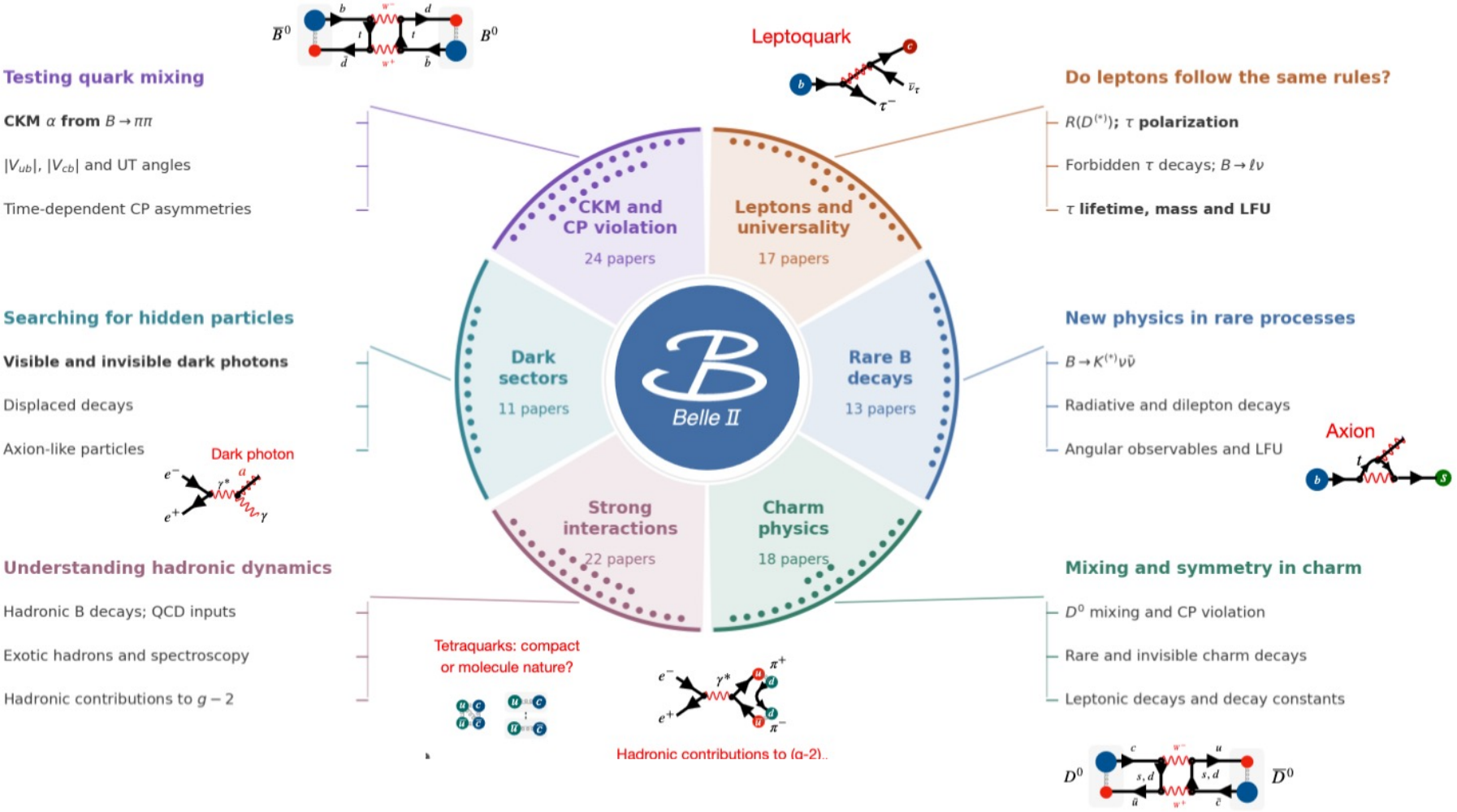
- Asymmetric e^+e^- collider operating manily at $\Upsilon(4S)$ resonance: 10.58 GeV
- **World's highest peak luminosity of 5.3×10^{34} cm^{-2} s^{-1}** (KEKB × 2.5)
- 914 fb^{-1} dataset including 808 fb^{-1} $\Upsilon(4S)$ dataset is recorded
  - Suparssed Belle $\Upsilon(4S)$ dataset → **World's largest dataset**



SuperKEKB is a pioneer of e^+e^- colliders

- The technologies developed here will be the basis of the future Higgs factories
  - Collaboration with FCC-ee is ongoing

多くの物理プログラムがある

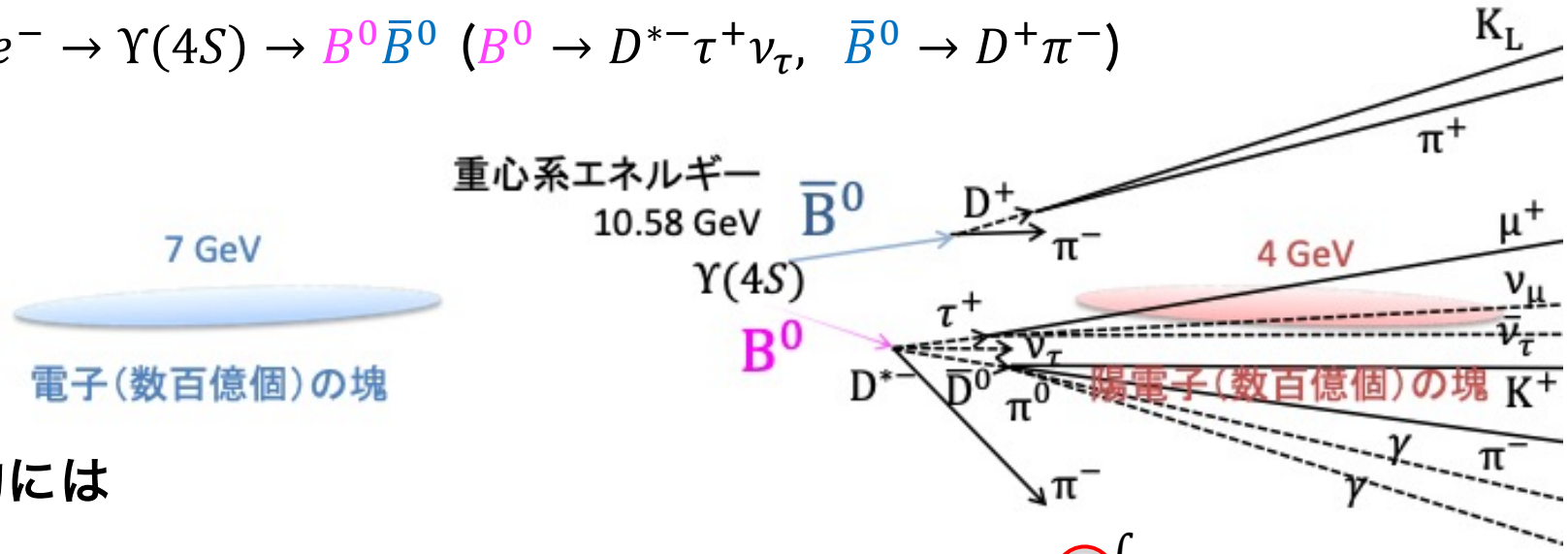


どのようにデータを集めるか？

我々が欲しい物理事象数: $N = \sigma \int L\,dt$

σ: 生成断面積 (自然が決める)
L: ルミノシティ (加速器衝突性能)
t: 加速器運転時間

例: $e^+e^- \to \Upsilon(4S) \to B^0\bar{B}^0$ $(B^0 \to D^{*-}\tau^+\nu_\tau,\ \bar{B}^0 \to D^+\pi^-)$



実験的には

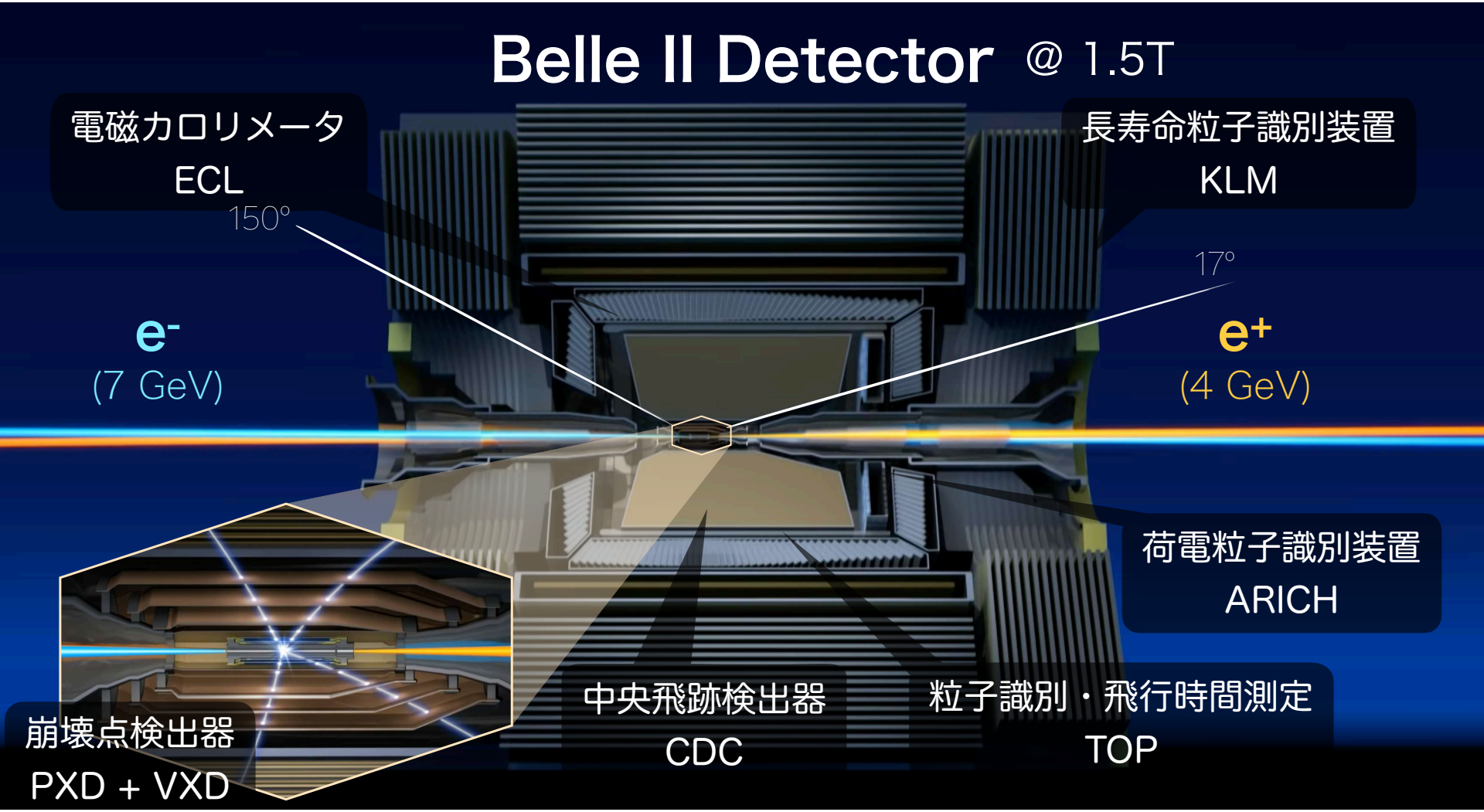
$$N = \sigma(e^+e^- \to B^0\bar{B}^0)\times\mathcal{B}(B^0 \to D^{*-}\tau^+\nu_\tau)\times\mathcal{B}(\bar{B}^0 \to D^+\pi^-)\times\epsilon\int L\,dt$$

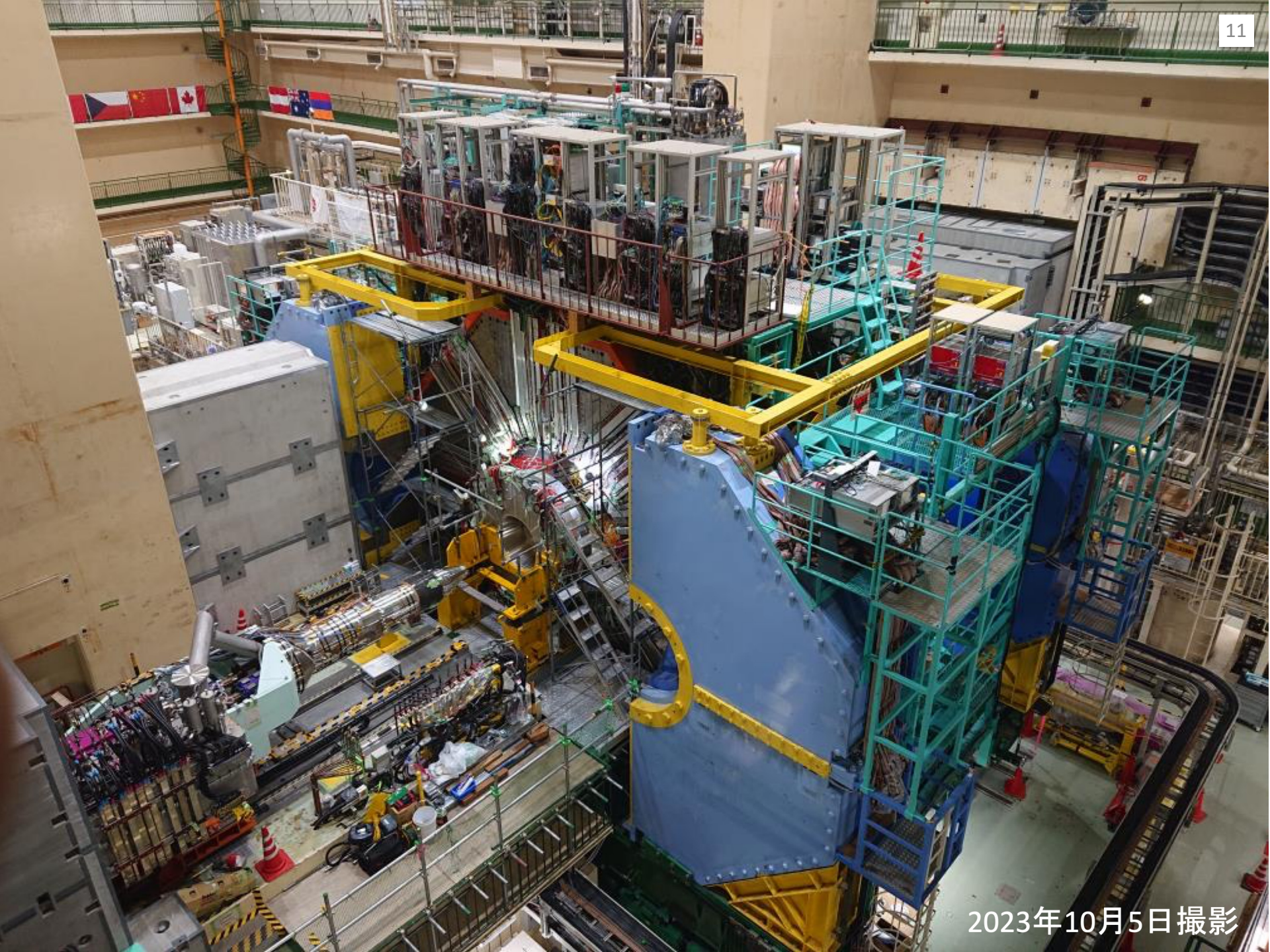
生成断面積、崩壊分岐比 (自然が決める)　　検出効率

SuperKEKB/Belle II実験の挑戦

- 検出効率を最大化させるために、測定器性能や解析手法の改善を行なってきた/ている
- 加速器性能 (ルミノシティ)を段階的に向上させる
- 加速器/測定器の運転を安定させ、実験時間をなるべく長くする

Belle II測定器


Belle II Detector @ 1.5T
電磁カロリメータ
ECL
150°
長寿命粒子識別装置
KLM
17°
e-
(7 GeV)
e+
(4 GeV)
荷電粒子識別装置
ARICH
崩壊点検出器
PXD + VXD
中央飛跡検出器
CDC
粒子識別・飛行時間測定
TOP



2023年10月5日撮影

State of the Collaboration

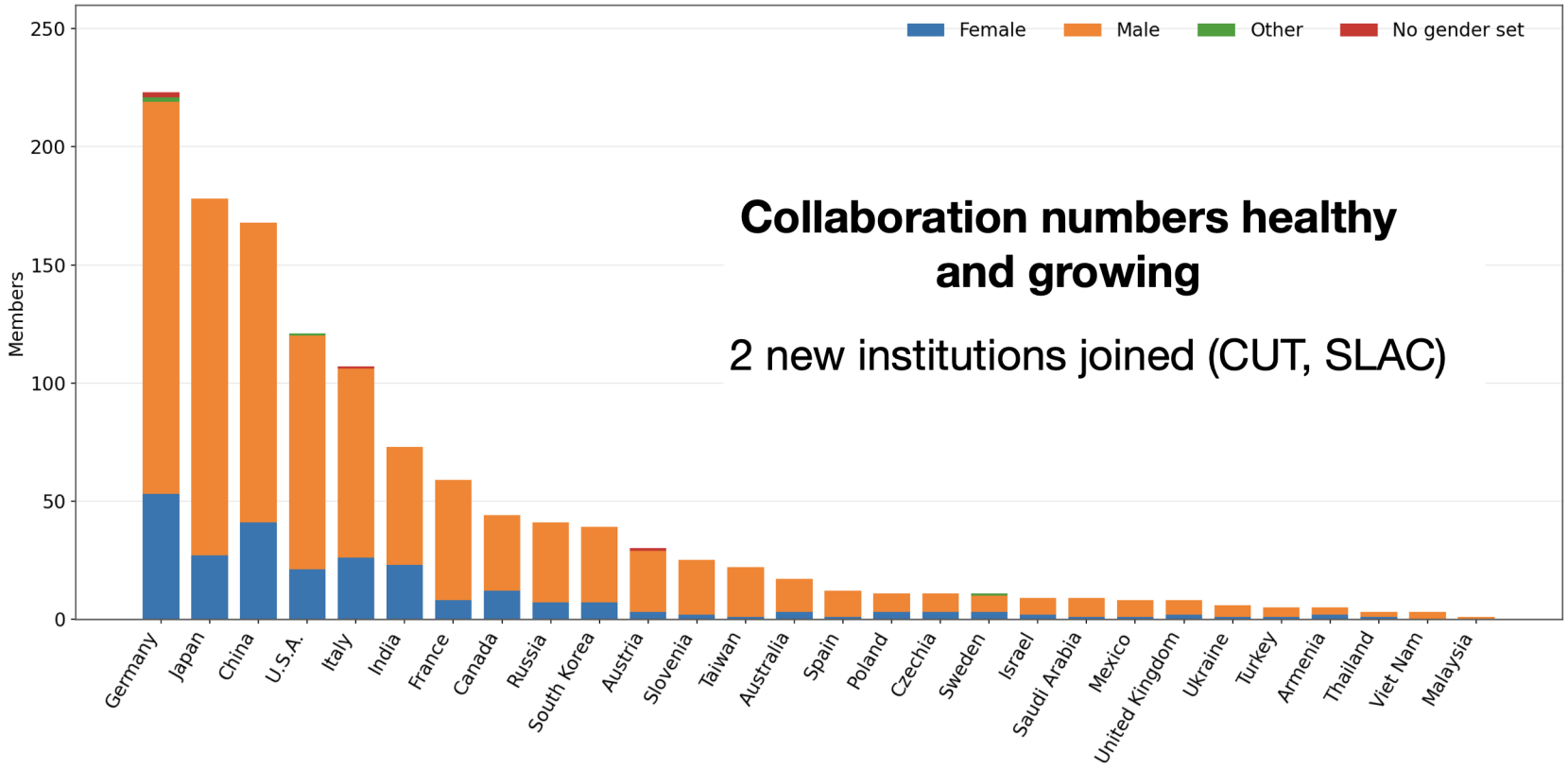
717 Collaborators (313 Faculty, 118 PDs, 286 PhDs)

Following definition of counting long-term contributors to our physics program

VoM = Visitor on Way to membership

+ MSc / BSc / Technical / Emeriti / VoMs

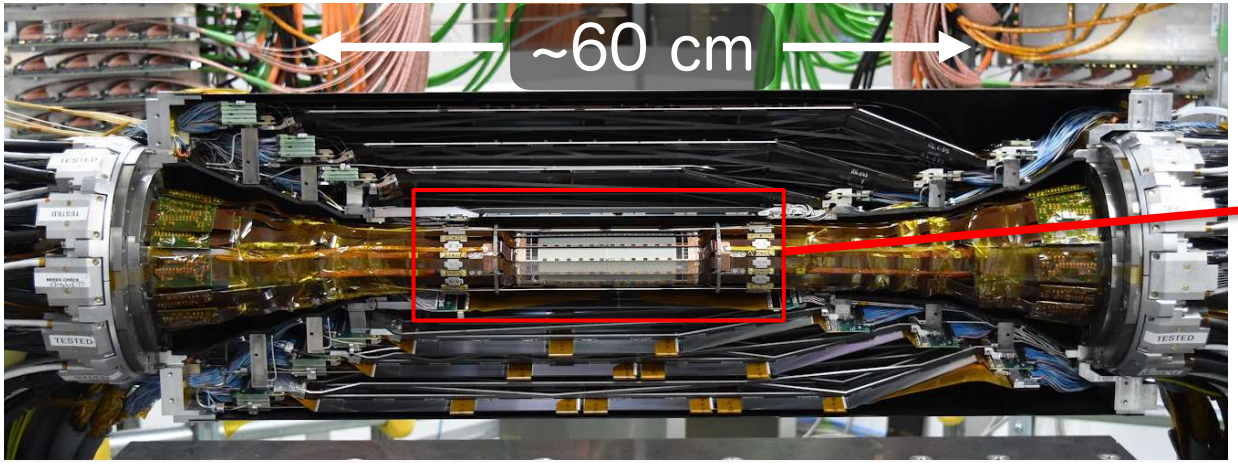
= **1249 Members**

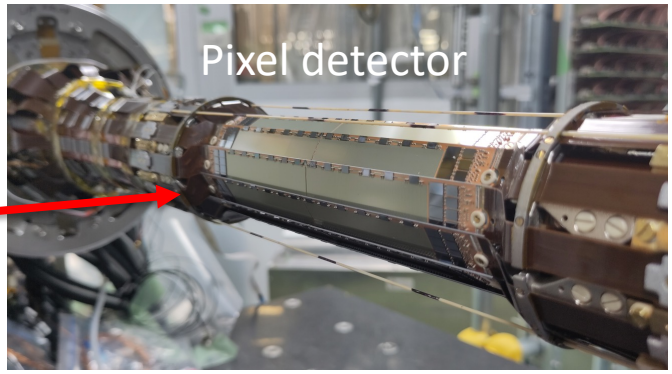


Improved detector peformance

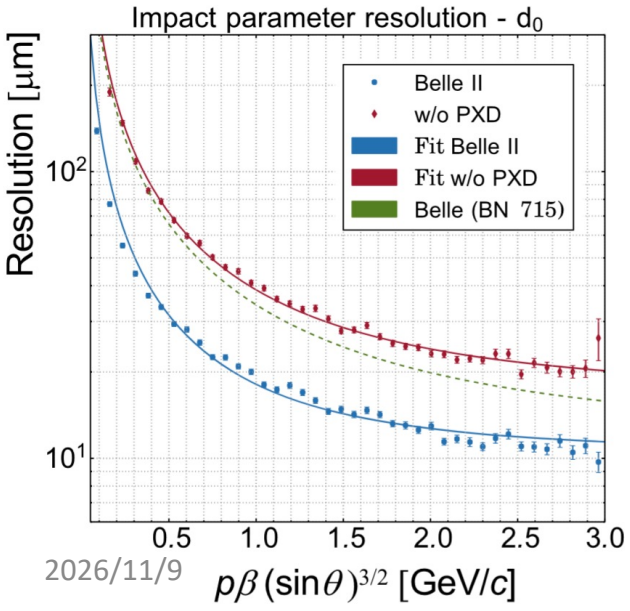
崩壊点検出器 (PXD)

Size: 55 μm × 50 μm
About 7.6 M pixel in total

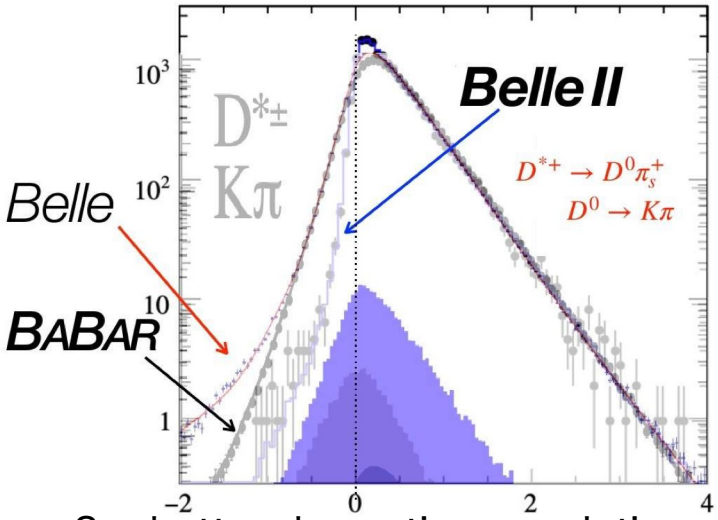




Belleに比べて約2倍改善



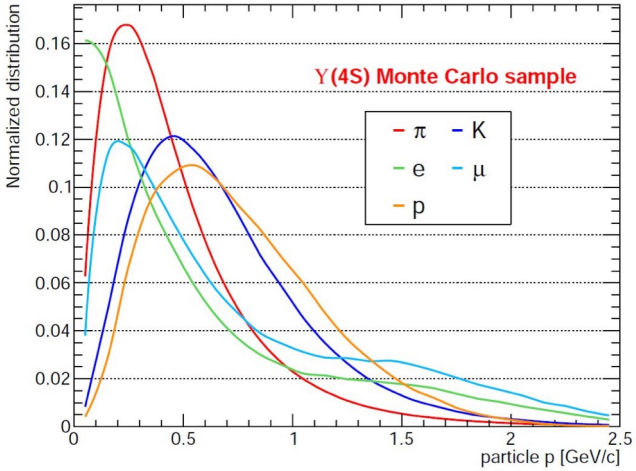
CPVや短寿命粒子の性質測定の精度改善



D^0 Lifetime

~2 × better decay-time resolution
→ World leading result with 72 fb^{-1}

Detector performance



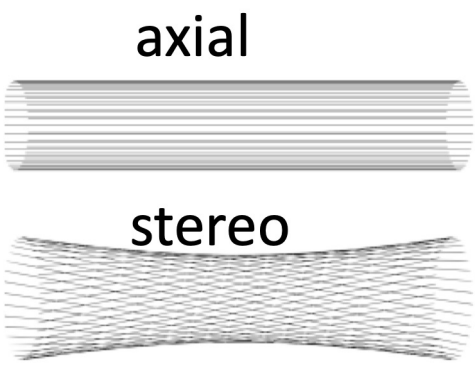
荷電粒子を精密に測定したい!

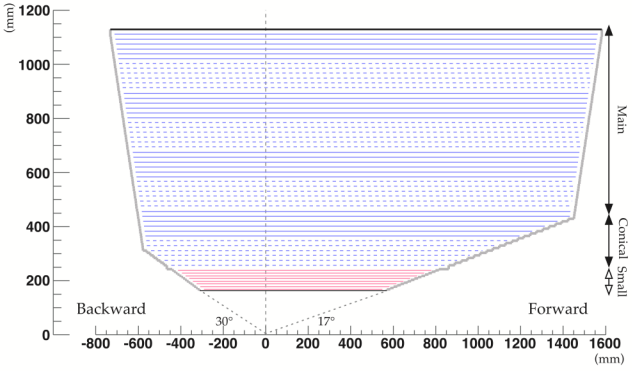
- 物質による散乱 (多重散乱)が肝 → 低物質量にしたい

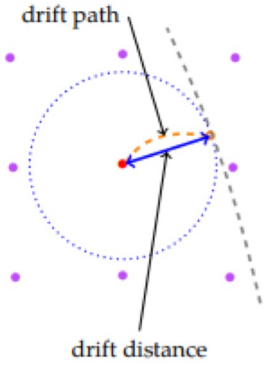
→ ガス増幅を利用したドリフトチェンバー

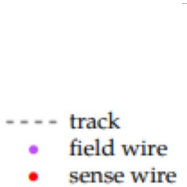
中央飛跡検出器 (CDC): 役割は大きく分けて二つ

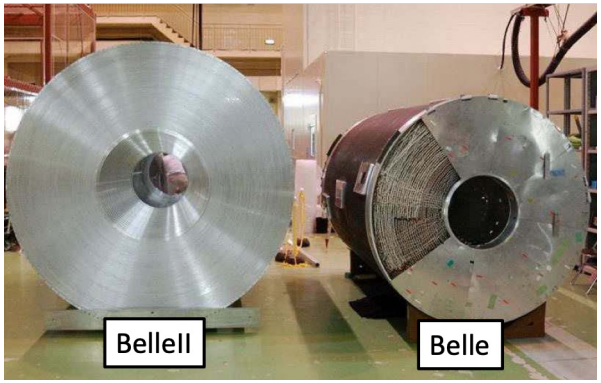
- 荷電粒子のトラッキング、運動量測定
- エネルギー損失 (dE/dx)を用いた粒子識別

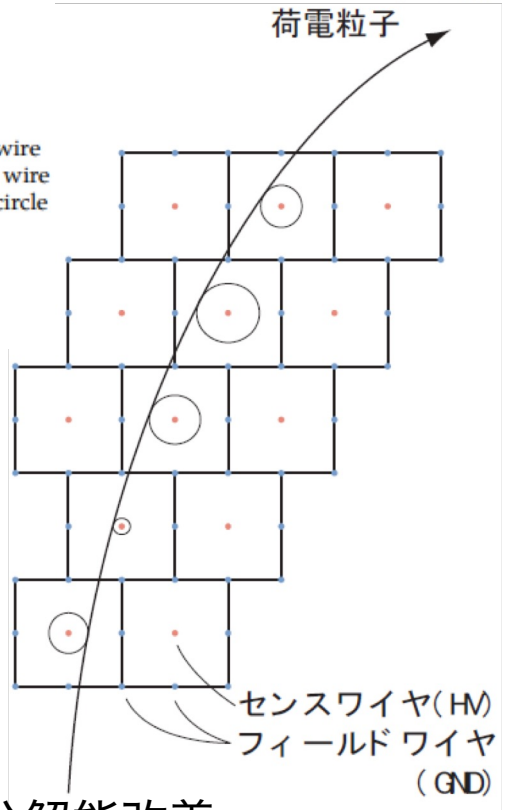










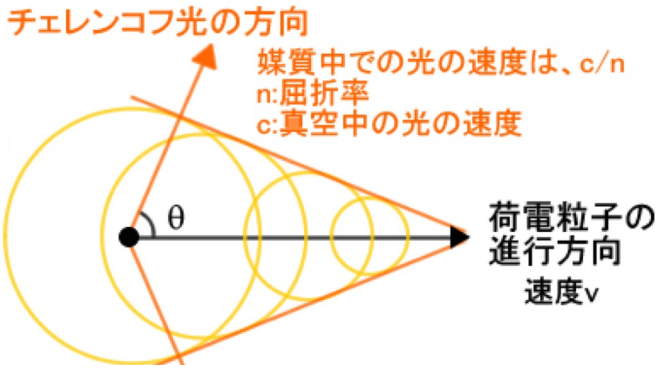


外径が大きくなった → 運動量分解能改善

粒子識別

チェレンコフ光放射

- 荷電粒子が水や光などの物質中を、その物質中での光の速さ (c/n)より速く進む場合、衝撃波としてチェレンコフ光を放射する
- 放射したチェレンコフ光の角度 θ_Cは
  - $cos\theta_c = \frac{1}{\beta n} = \frac{\sqrt{(m/p)^2+1}}{n}$

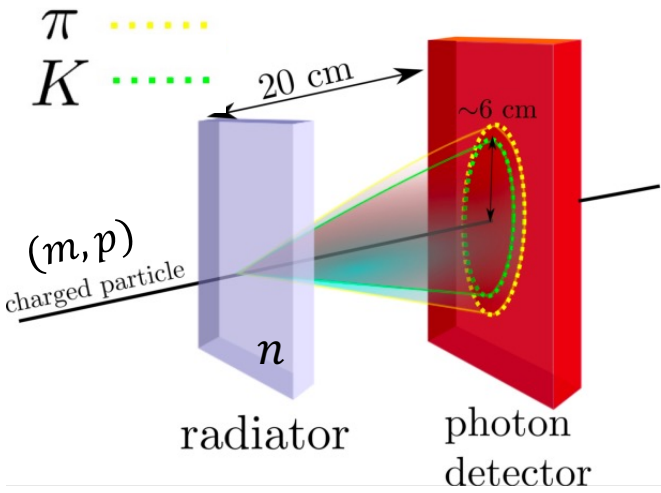


→ **粒子の質量, 運動量, 屈折率で角度は決定**

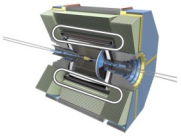
Ring Imaging Cherenkov counter

- θ_Cを測定し、飛跡検出器で得られた運動量から粒子の質量を算出

→ 粒子の種類がわかる!

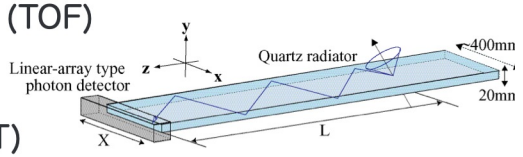


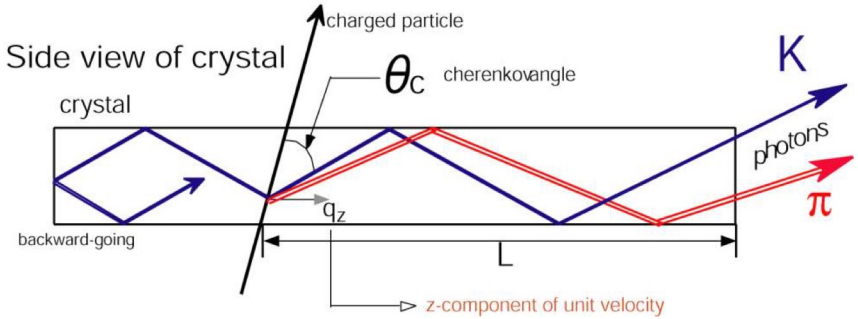
粒子識別・飛行時間測定：TOP

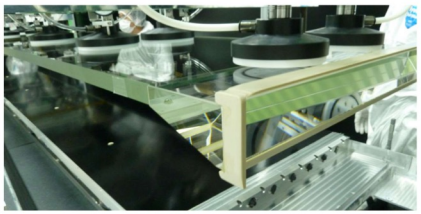


特徴：チェレンコフ光の到着位置 + 時間から粒子識別

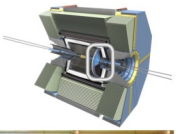
- 伝搬距離 (伝搬時間, TOP) + 衝突点からの飛行時間 (TOF)
- チェレンコフ輻射体：石英
- 光検出器：Micro-Channel-Plate PMT (MCP-PMT)
  - 34.3 ps 時間分解能，29.3% 量子効率 (#電子数/#入射光子の応答率)







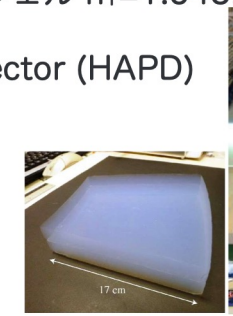
荷電粒子識別：ARICH

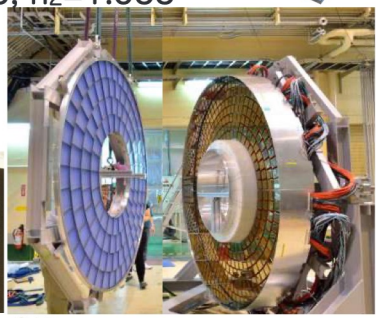


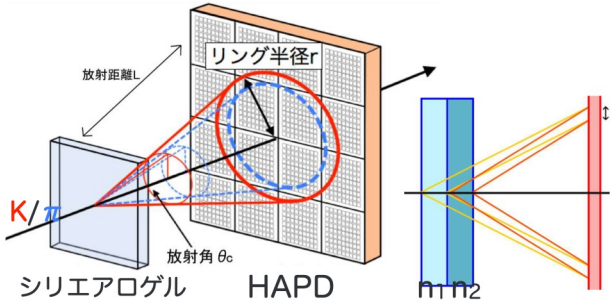
チェレンコフ輻射体：２層のシリカエアロジェル n_1=1.045, n_2=1.055

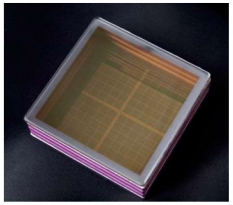
光検出器：Hybrid Avalanche Photo-Detector (HAPD)

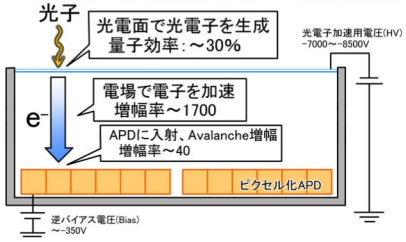
- １光子を捉えたい
- 高放射線耐性 (10^{11} neutrons/cm^2/year)
- 磁場中で安定動作 + 高検出効率 + 高位置分解能











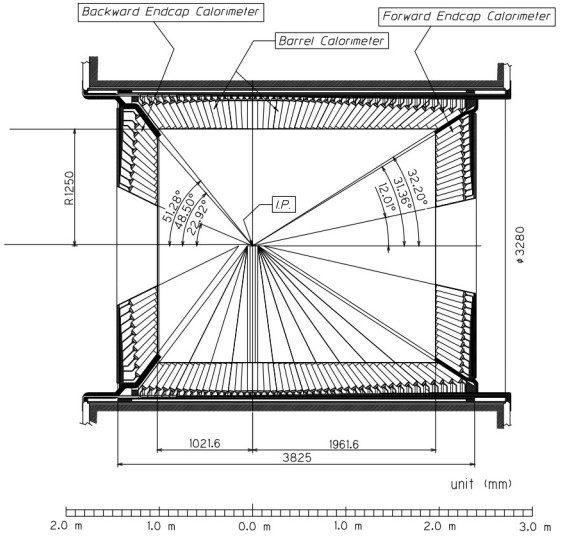
電磁カロリメータ ECL

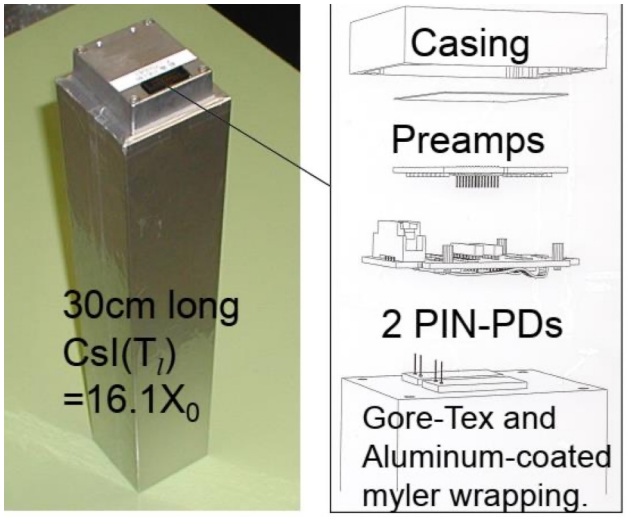
1 GeV以下の領域にも高いエネルギー分解能 → 全吸収型採用

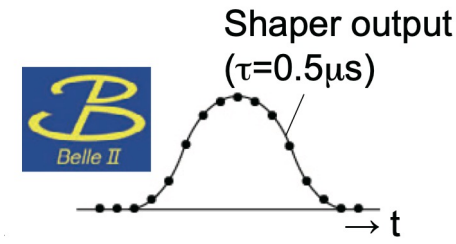
- **8736本のCsI (Tl)シンチレータ結晶で構成**
  - 電子・光子は結晶中で電磁シャワーをおこす → シンチレータ光
  - 光検出器、PIN-PD(フォトダイオード)でエネルギー測定

→ エネルギー分解能は、~1.3%/$\sqrt{E}$

- **波形をサンプリングして読みだす**
  - FPGAで波高とタイミングを算出 → パイルアップ削減







2MHz, 18bits digitizer

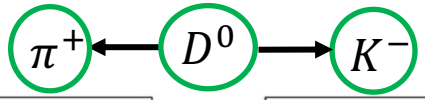
↓

waveform fit to get energy and timing (i.e. Digital Signal Processing) by FPGA

測定器のパフォーマンス

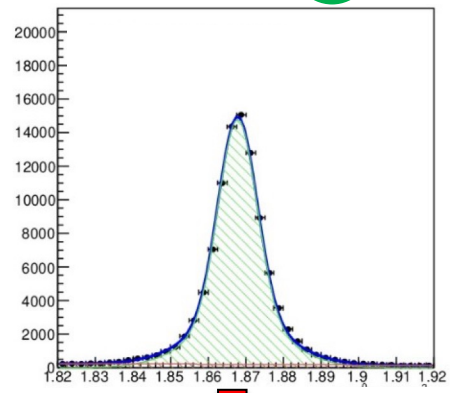
良い物理結果を出すためには、良いパフォーマンスが大事!

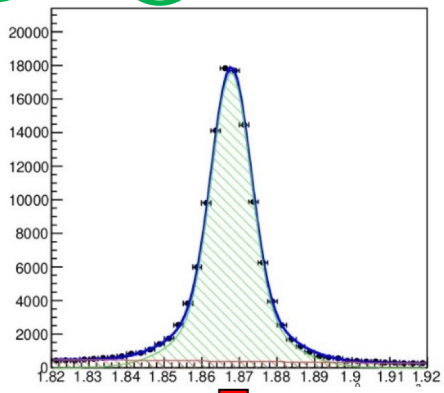
- K/π識別: D^*崩壊からのK,πトラックを利用: eg. $D^{*+} \to D^0\pi^+_{slow}$



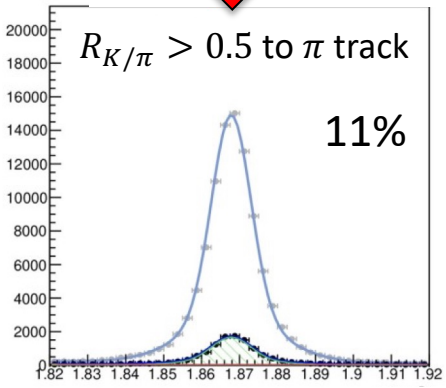
π miss-eff

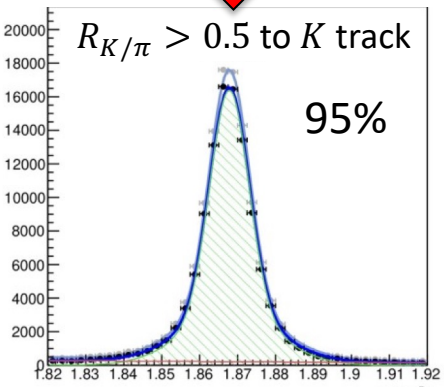
For K eff



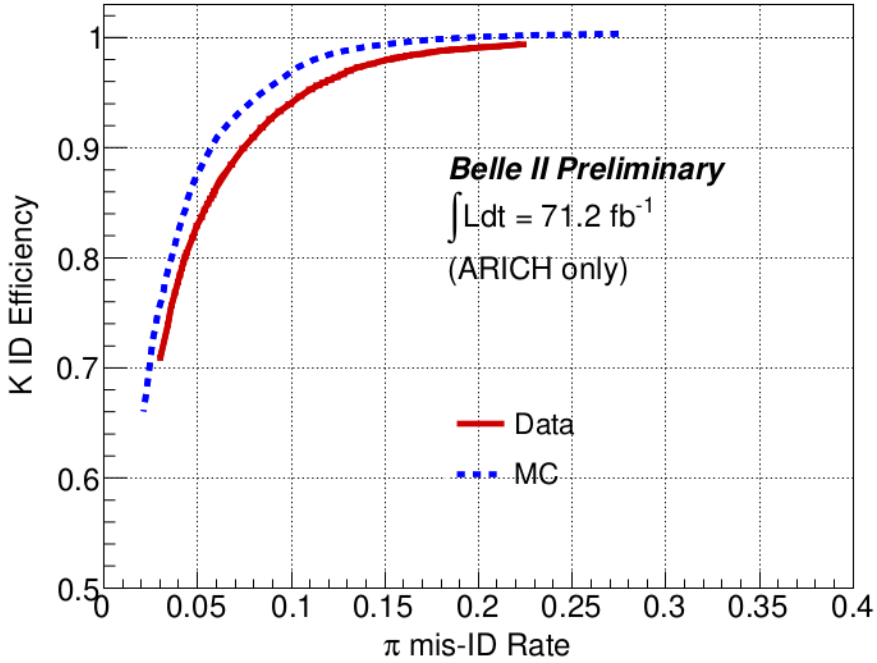


M_D [GeV/c²]





M_D [GeV/c²]



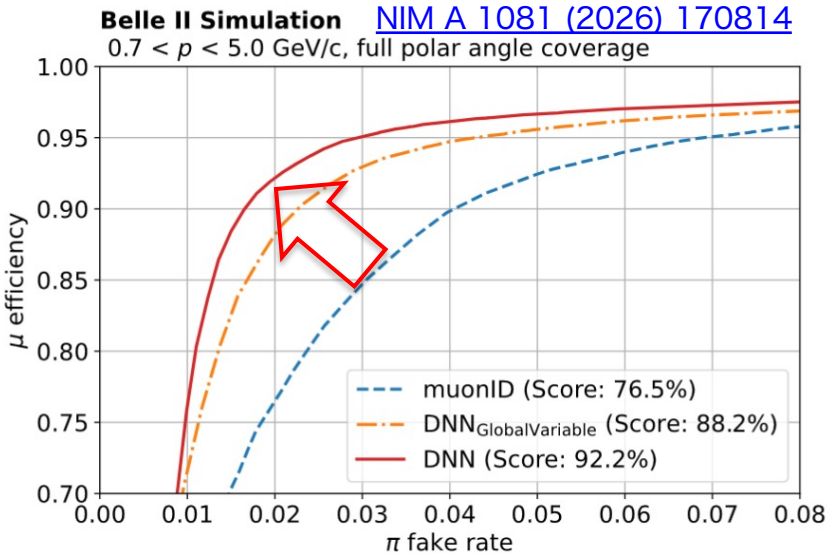
識別性能

- K efficiency: ~95%
- π mis-efficiency: ~10%

Advances in analysis techniques

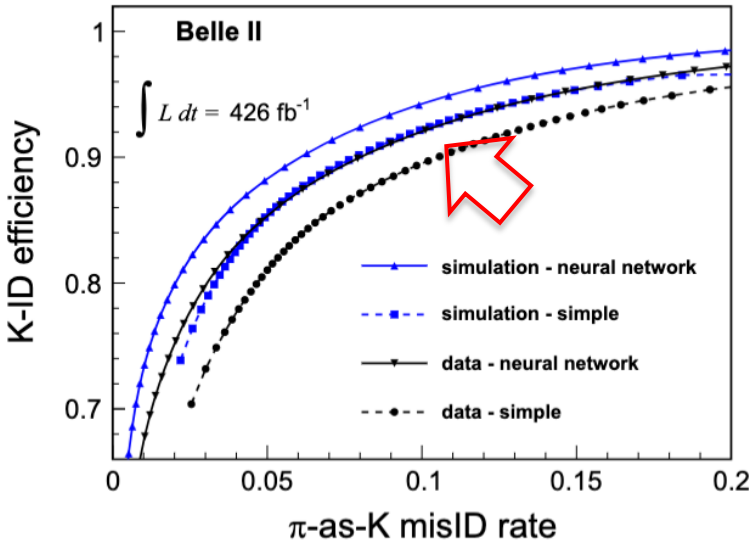
Machine learning enables more efficient reconstruction and analysis

- Particle Identification (e, μ, π, KID), Tagging to determine of neutral B mesons



NIM A 1081 (2026) 170814

Eur. Phys. J. C 85 (2025) 1237



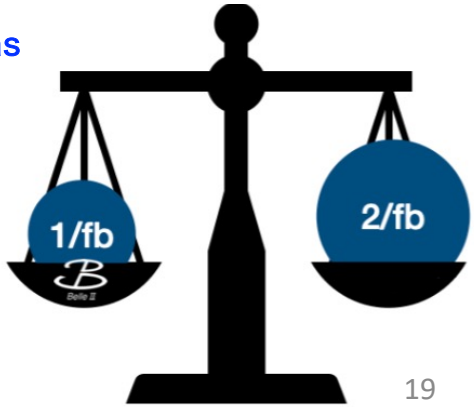
New analysis techniques also deliver sensitivity gain

beyond initial expectations

Rough rule of thumb:

1/fb of Belle II data is **worth 2/fb of BaBar** or **Belle** data*

* exceptions of course do exist



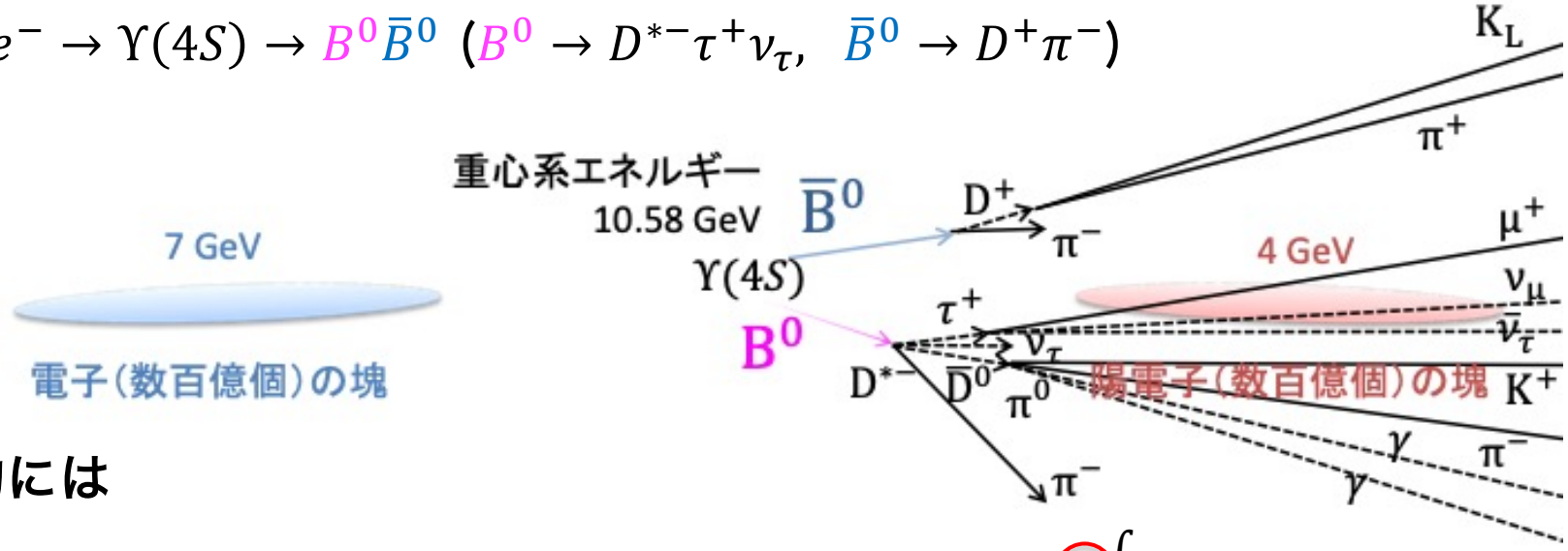
We can obtain meaningful physics results with less data than originally expected

どのようにデータを集めるか？

我々が欲しい物理事象数: $N = \sigma \int L\,dt$

σ: 生成断面積 (自然が決める)
L: ルミノシティ (加速器衝突性能)
t: 加速器運転時間

例: $e^+e^- \to \Upsilon(4S) \to B^0\bar{B}^0$ $(B^0 \to D^{*-}\tau^+\nu_\tau,\ \bar{B}^0 \to D^+\pi^-)$



実験的には

$$N = \sigma(e^+e^- \to B^0\bar{B}^0)\times\mathcal{B}(B^0 \to D^{*-}\tau^+\nu_\tau)\times\mathcal{B}(\bar{B}^0 \to D^+\pi^-)\times\epsilon\int L\,dt$$

生成断面積、崩壊分岐比 (自然が決める)　　検出効率

SuperKEKB/Belle II実験の挑戦



- 検出効率を最大化させるために、測定器性能や解析手法の改善を行なってきた/ている
- 加速器性能 (ルミノシティ)を段階的に向上させる　**この実験で一番難しい部分**
- 加速器/測定器の運転を安定させ、実験時間をなるべく長くする

ルミノシティ

詳しくは浅見さんの講演で

衝突型加速器の性能指標

$$L = \frac{N_+ N_- f_0 N_b}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$$

$$\propto \frac{I_+ I_-}{\sigma_x \sigma_y}$$

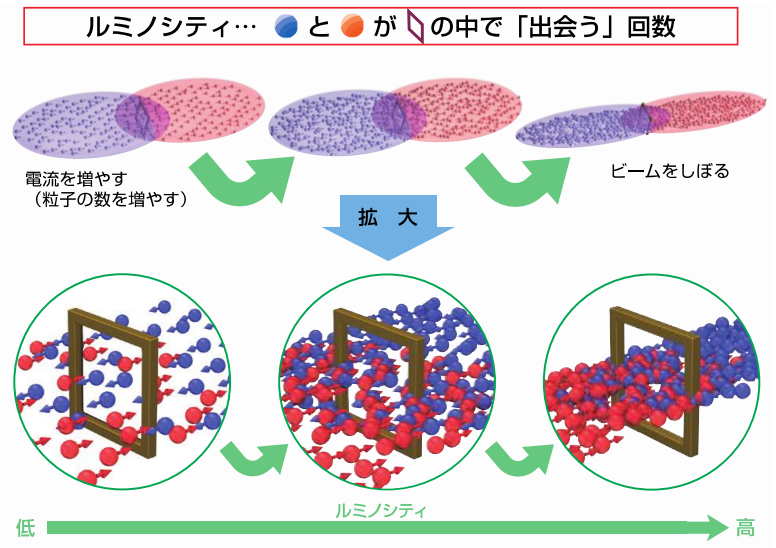
I_+: 陽電子ビーム電流
I_-: 電子ビーム電流
σ_x: 水平方向ビームサイズ
σ_y: 垂直方向ビームサイズ

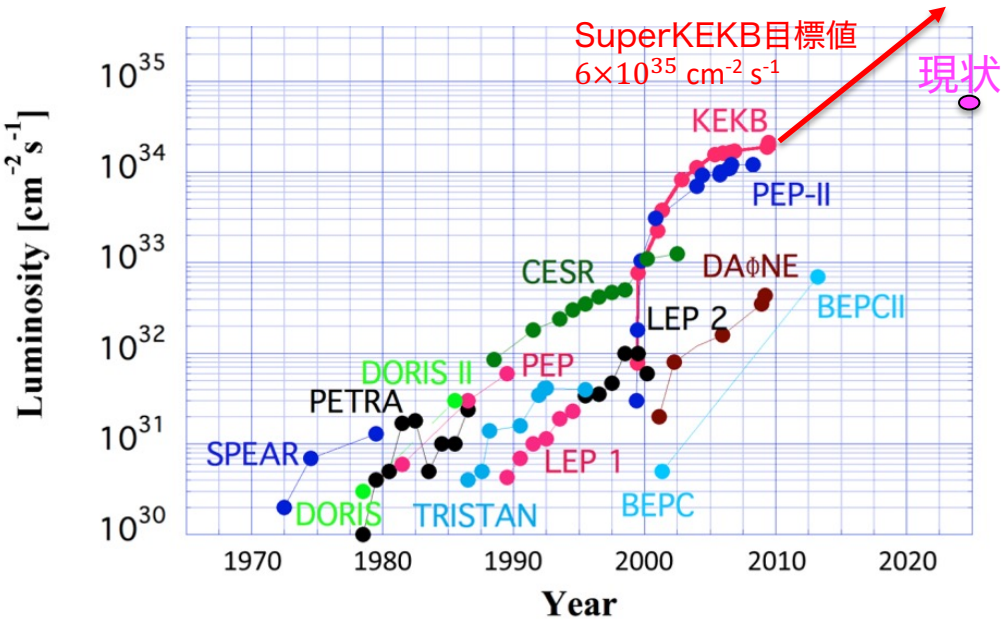
ルミノシティを上げるには

- **ビーム電流を増やす** (KEKBの約2倍)
- **衝突点でビームを強く絞る**
  - σ_y~50 nm (KEKBの約1/20)

ビームに対して鉛直方向　($\beta_y^* = 0.3$ mm, ϵ_y~8 pmに相当)

「もっと知りたい! SuperKEKB加速器」





KEKB: 2.1×10^{34} cm^{-2} s^{-1} → SuperKEKBの目標値: 6×10^{35} cm^{-2} s^{-1}

これがチャレンジングで、日々奮闘している。

高電流への鍵: top-up入射

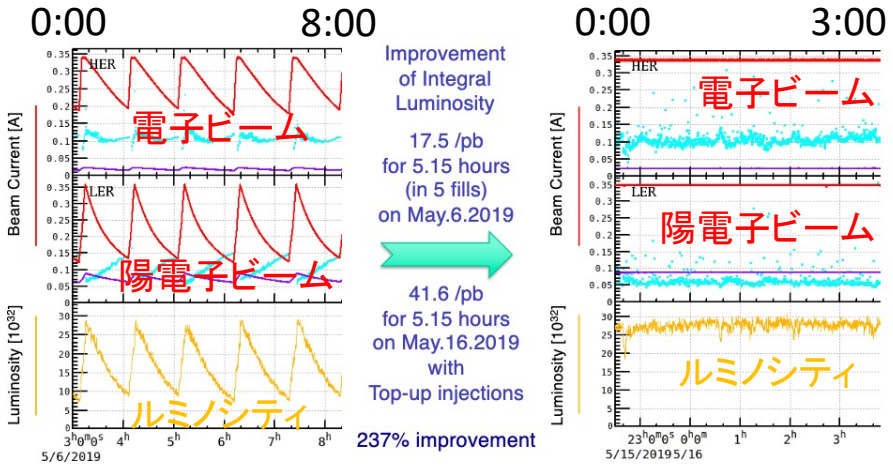
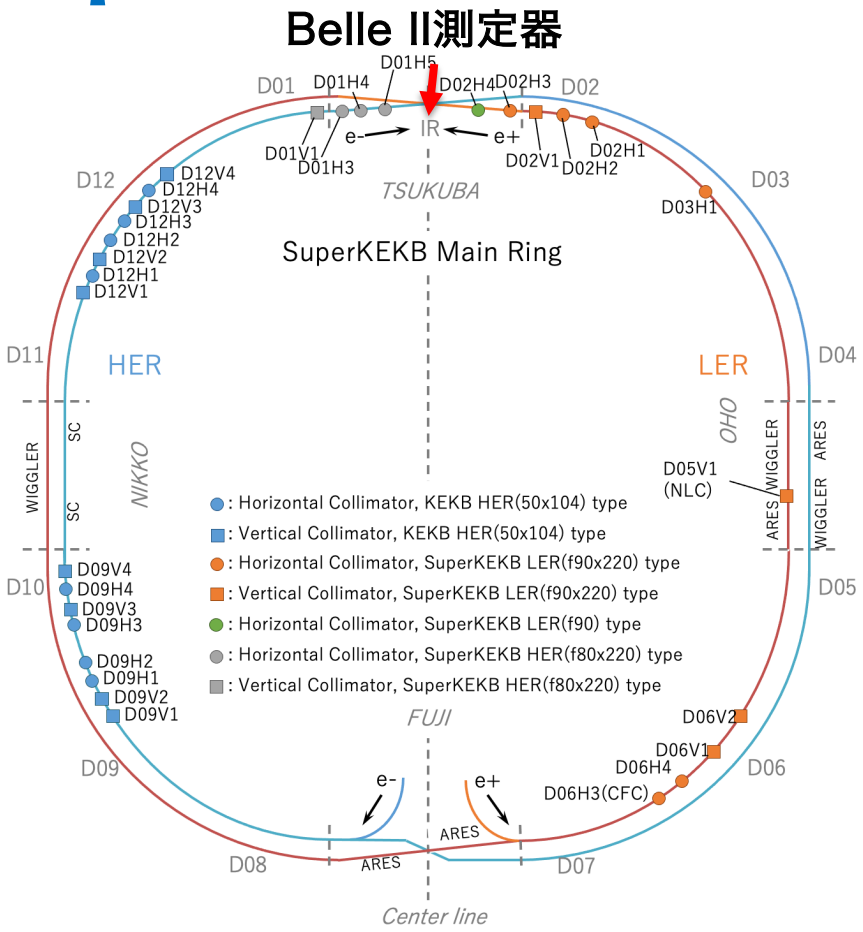


Figure 6: The experimental performance of SuperKEKB was improved by 237% employing the simultaneous top-up injections.



高い電流をキープできる

- 高ルミノシティを保ったままデータ取得可

高電流運転への大きな課題

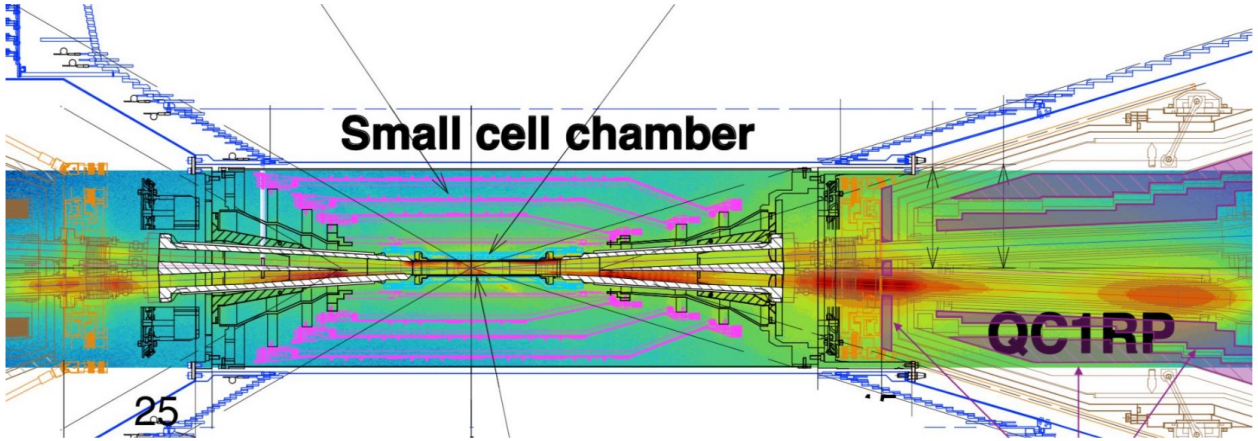
- ビーム電流の減少量が入射電荷より大きいと電流を維持できない → ビーム寿命を長くする!
- 入射器から送られてくるビームの質をなるべく保持しリングに → 入射効率を良くする!

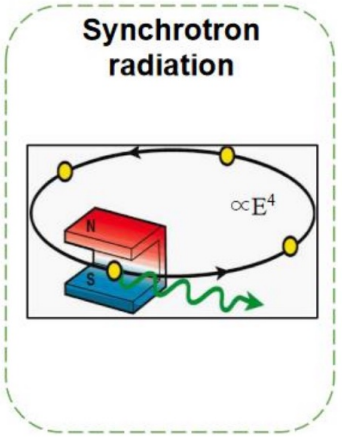
陽電子ビーム: 1.3 – 1.5 A (2024年) → 1.6 – 1.75 A (2025-2026年) → > 2.0 A (2027年)

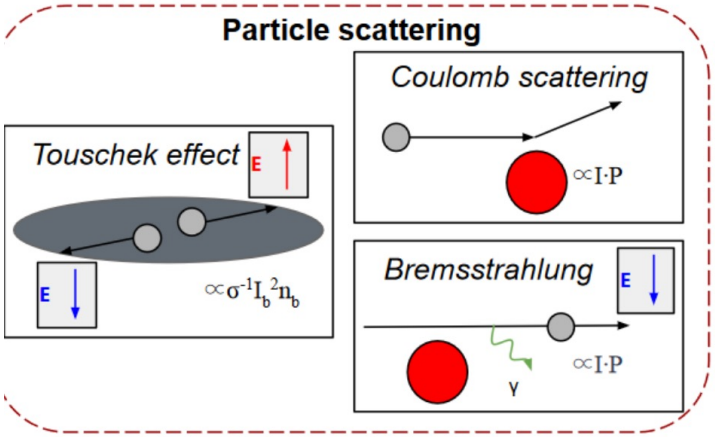
着実に高電流へ

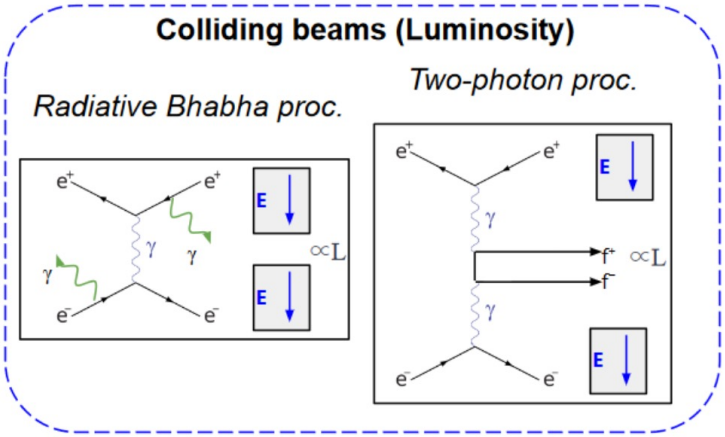
大電流運転におけるBelle IIへの影響

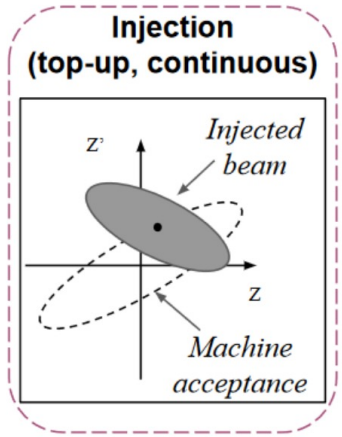
- 軌道を逸れたビーム粒子は、最終的にビームパイプ等に当たって失われる
  - 当たる場所が測定器に近いと、そこで生じる電磁シャワー等がバックグラウンドに



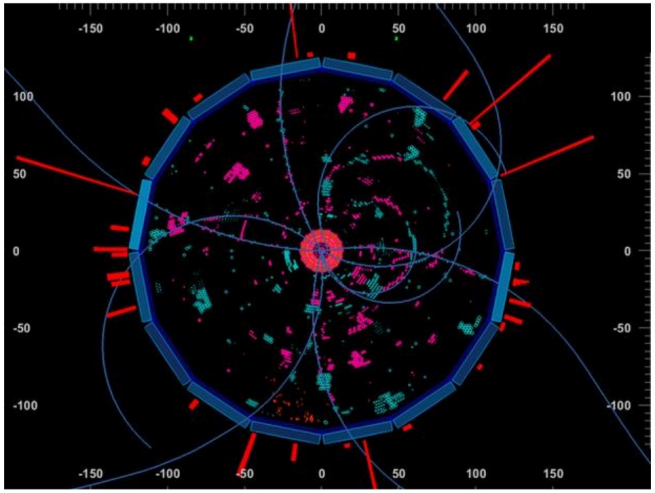


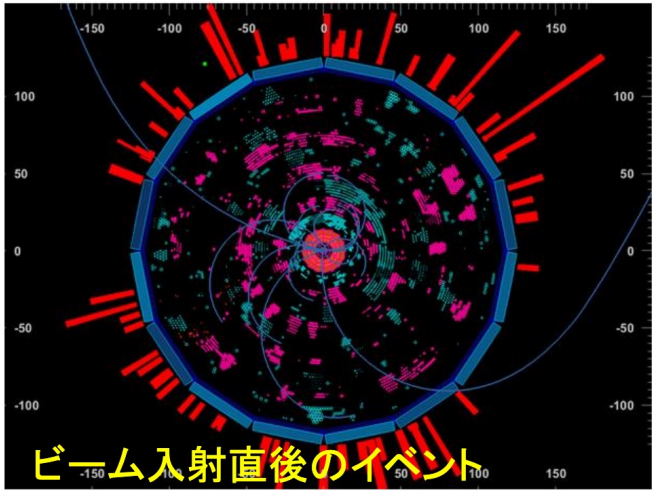


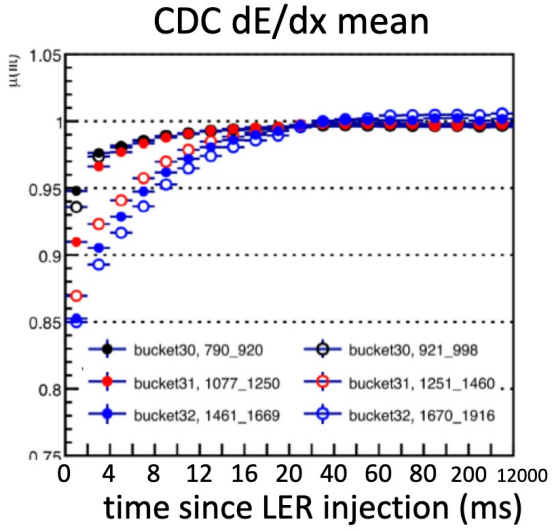


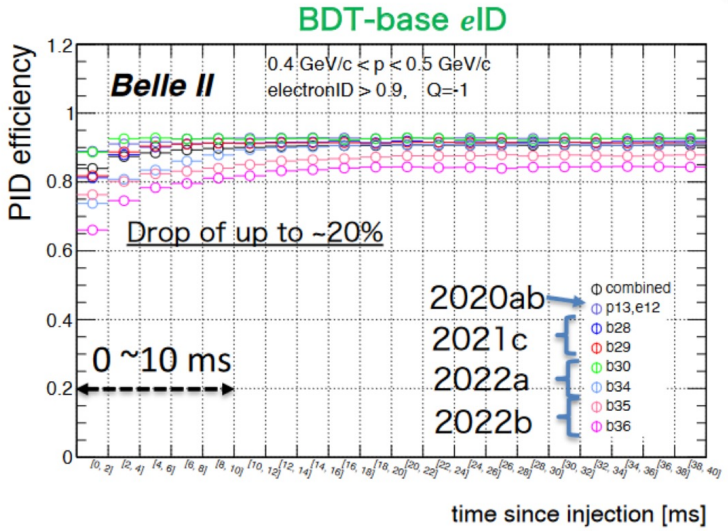


入射ビームによる性能劣化







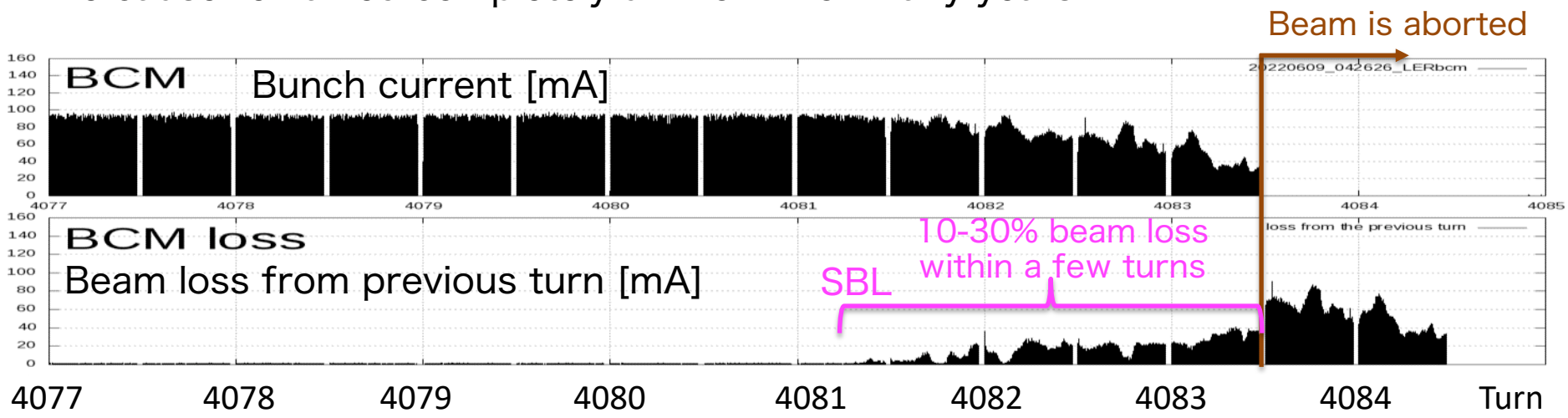


入射の状態をよくすることはBelle IIデータの質を保つために大事

Sudden Beam Loss (SBL)

The beam is suddenly lost without clear precursors

- The cause remained completely unknown for many years



- Damage the detector and accelerator components
  - PXD temporarily off since May 7, 2024
- SBL frequency increases with beam currents

→ Limits beam currents and luminosity



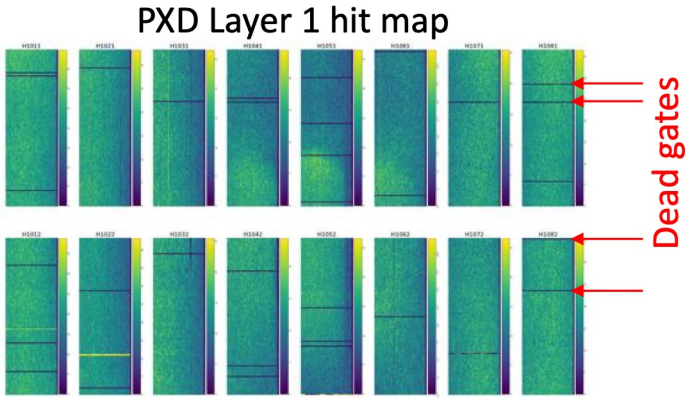
Understanding and suppressing SBL became a top priority for stable/high-luminosity operation

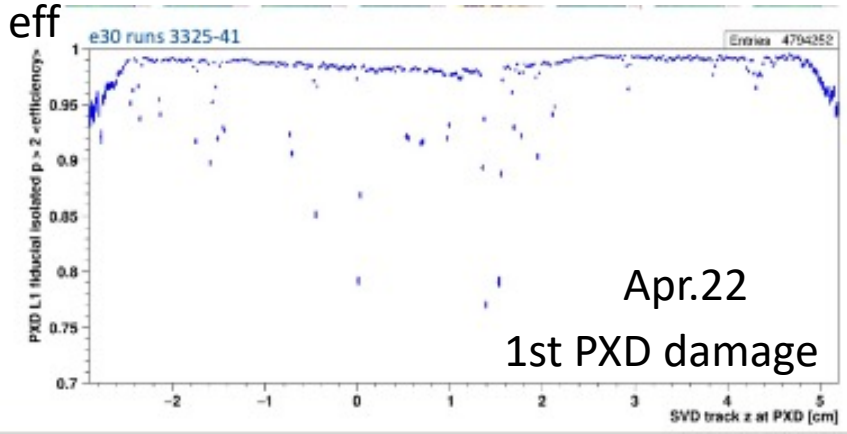
悲しい出来事: PXD一時的にOFF

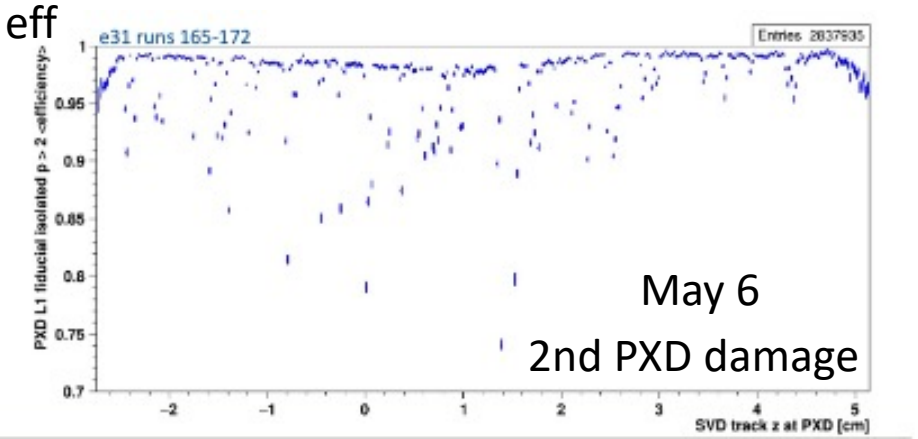
電子陽電子ビームがBelle IIに飛び込み、PXDにダメージ..

- PXDの2%ほどチャンネルがdeadに
- ASICの電流が増加
  - PXDのラダーの温度が上昇
    - deformationの可能性が上がる

→ 温度を抑えるために20ラダーの内2ラダーをOFFに







そろそろONにします..

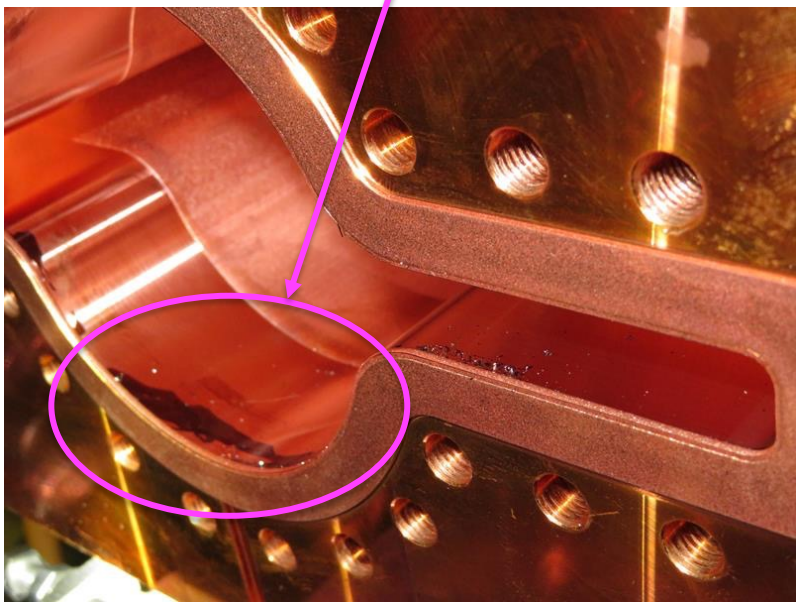
SBL: 進展

真空シール剤が内部に染み出し、放射化？
して黒くなる → ダスト

SBL発生時、特定の場所で異常な圧力上昇が頻繁に観測された

- 2024年11月にビームパイプを開けて内部確認

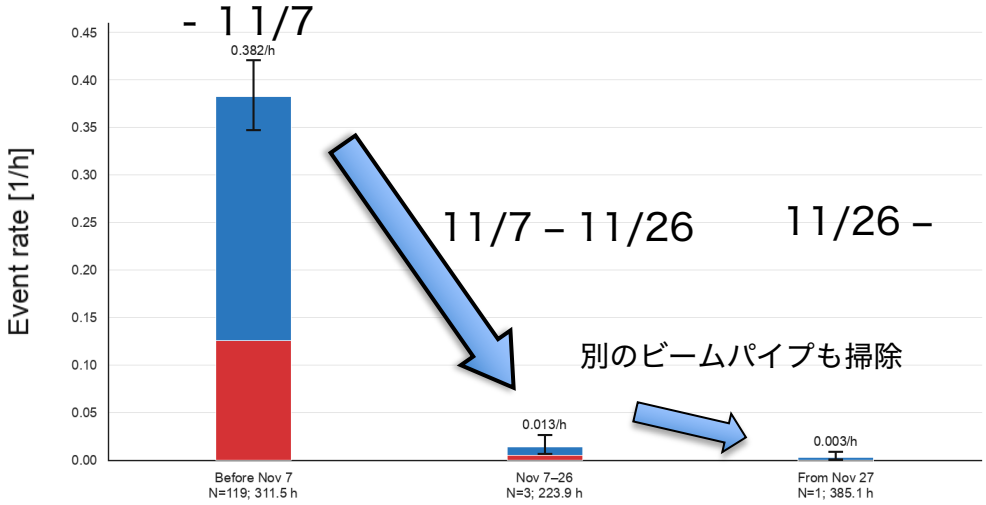
→ 黒いシミ発見!

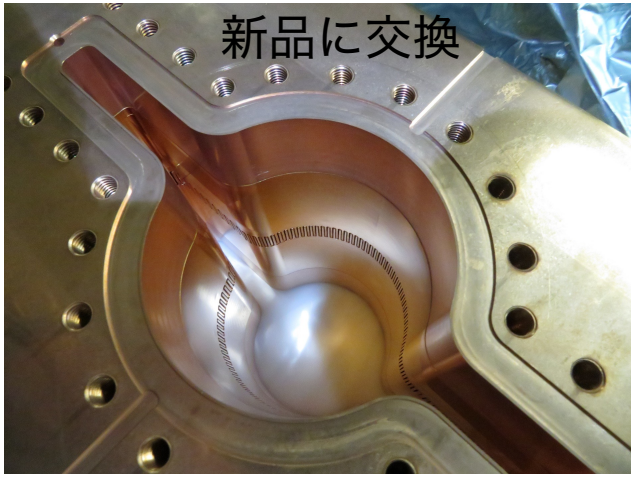


新品に交換後、SBLの頻度激減

- ダストとSBLが関係あることは明白

2024年のSBL頻度





2024年のビーム運転後、多くのビームパイプを開けて清掃を行った

2026年運転: 勝負の年

1/26 – 6/30の155日間のビーム運転

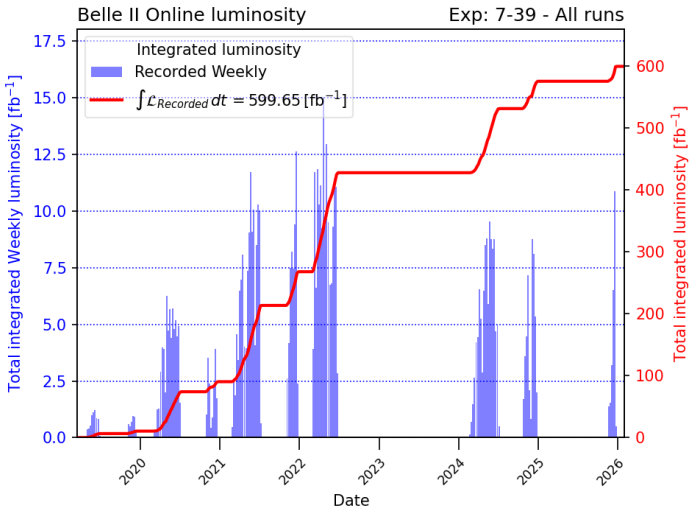
- 積分ルミノシティ 1 ab^{-1}に到達することが最重要課題

400 fb^{-1}を取得するためには

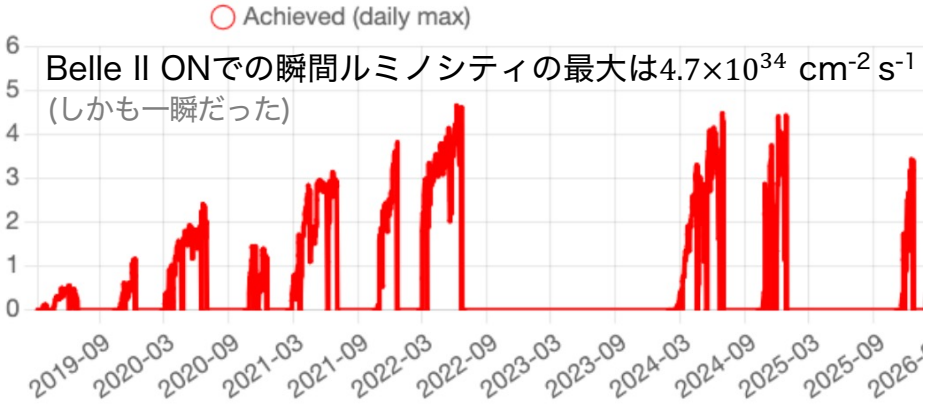
- 瞬間ルミノシティ $> 5\times10^{34}$ cm^{-2} s^{-1}で安定運転が必須
- 1日平均 3 - 3.5 fb^{-1}のデータ取得が必須

155日のうち、約8割物理運転、かつ加速器効率85%, data-taking eff 90%

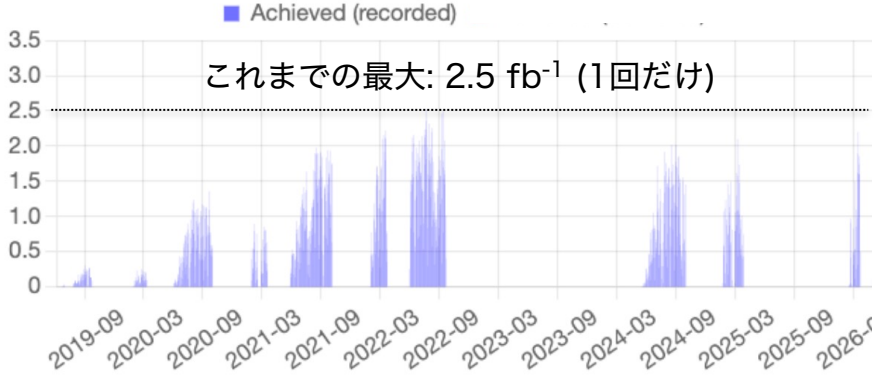
2026年運転開始前: ~600 fb^{-1}



2026年運転開始前での瞬間ルミノシティ



2026年運転開始前でのdaily int. luminosity



これまでの実績を考えるとかなり挑戦的. (200 fb^{-1}も取得できるのか？)

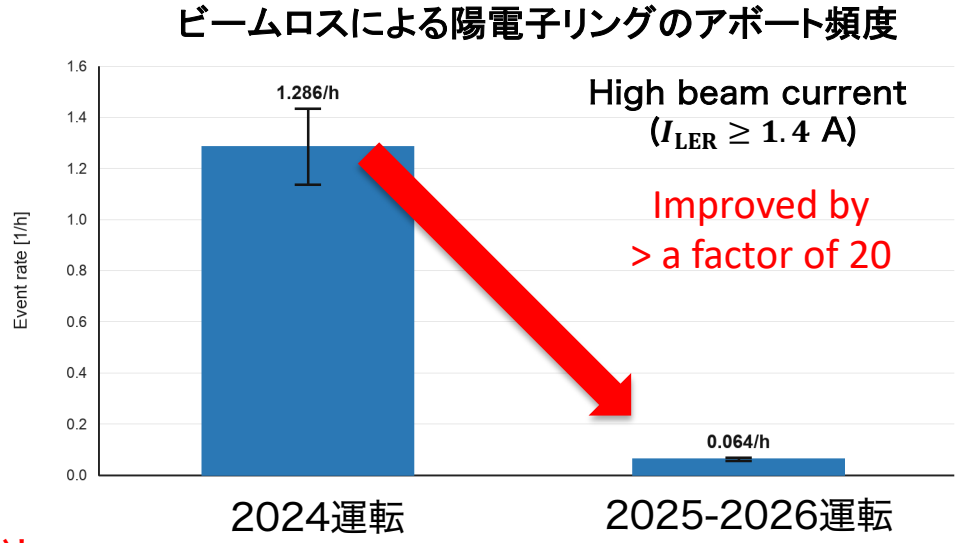
しかし、SBL対策や入射効率対策、運転調整の自動化など進んでいたので希望あった

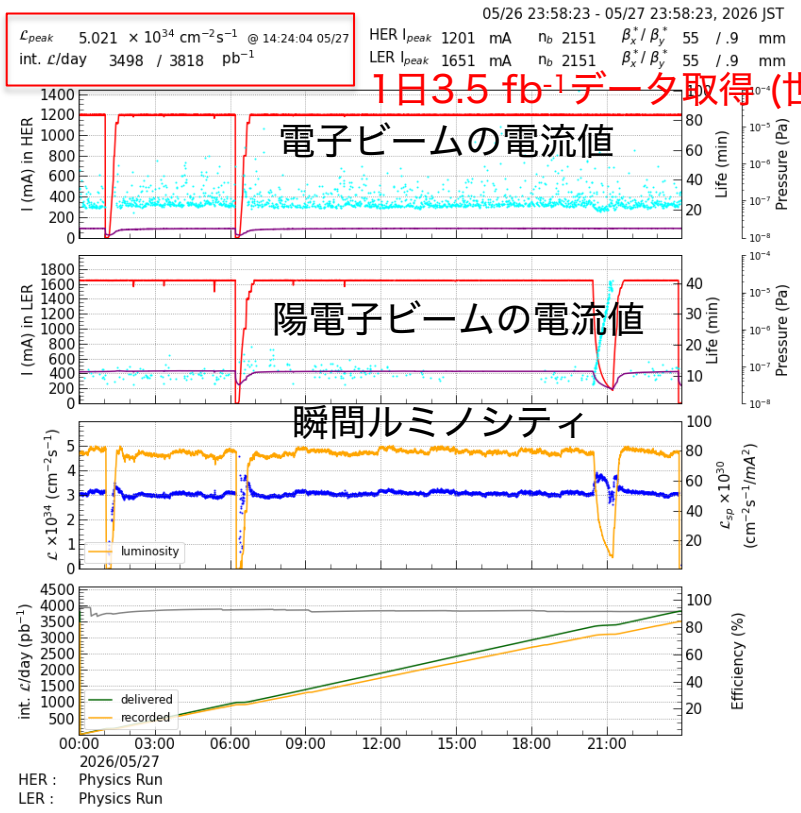
24時間休みなく実験。マラソン

SBL対策の効果

2024年運転 vs 2025-2026年運転

- ビームロスによるアボートが格段に減った
  - 1.29 /h → 0.06 /h ($I_{\mathrm{LER}} \geq 1.4$ A)
- 高電流で安定運転する時間が激増!
  - 58.3時間/200日 → 1886時間/192日





1日3.5 fb^{-1}データ取得(世界記録)!

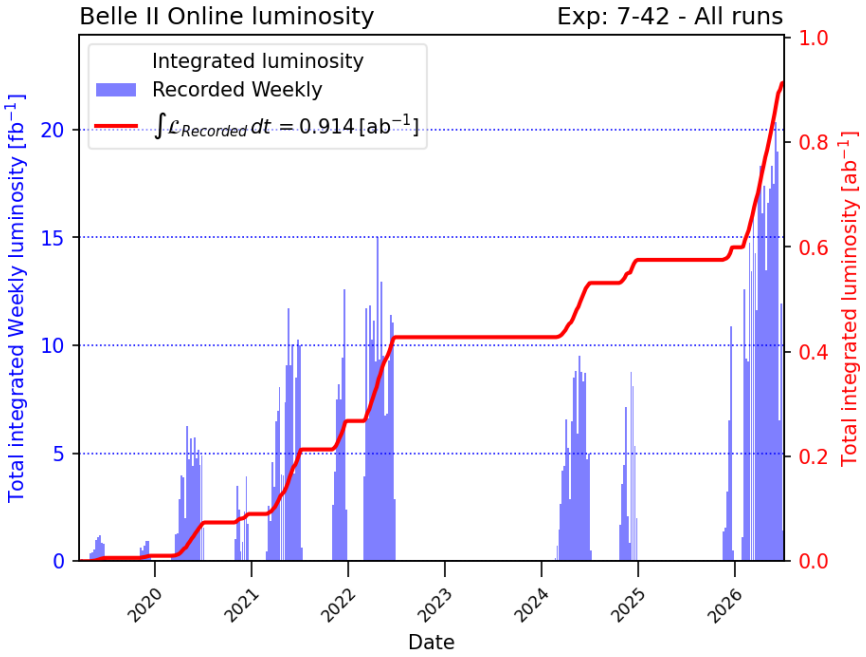
2026年運転

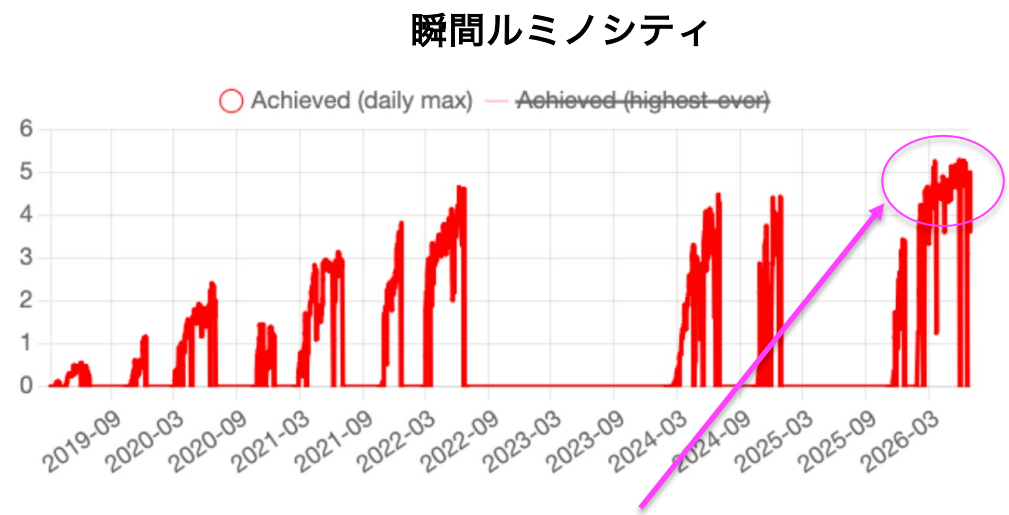
- 陽電ビームの電流値1.6-1.7 Aで安定運転可能に
- $4.5 - 5.0\times10^{34}$ cm^{-2} s^{-1}での運転を確立!
- 頻度は減ったがSBLはまだ発生する。特に高電流
  - 対策協議中。2027運転で更なる改善へ

現在までの積分ルミノシティ

914 fb^{-1} (速報値)のデータ取得: 1 ab^{-1}にわずかに足りず..ただ過去一の結果

- 瞬間ルミノシティの記録も更新: **5.3×10^{34} cm^{-2} s^{-1}**





今期はずっと$4.5-5.3\times10^{34}$ cm^{-2} s^{-1}で運転していた

Daily, Weekly integrated luminosityなども記録更新

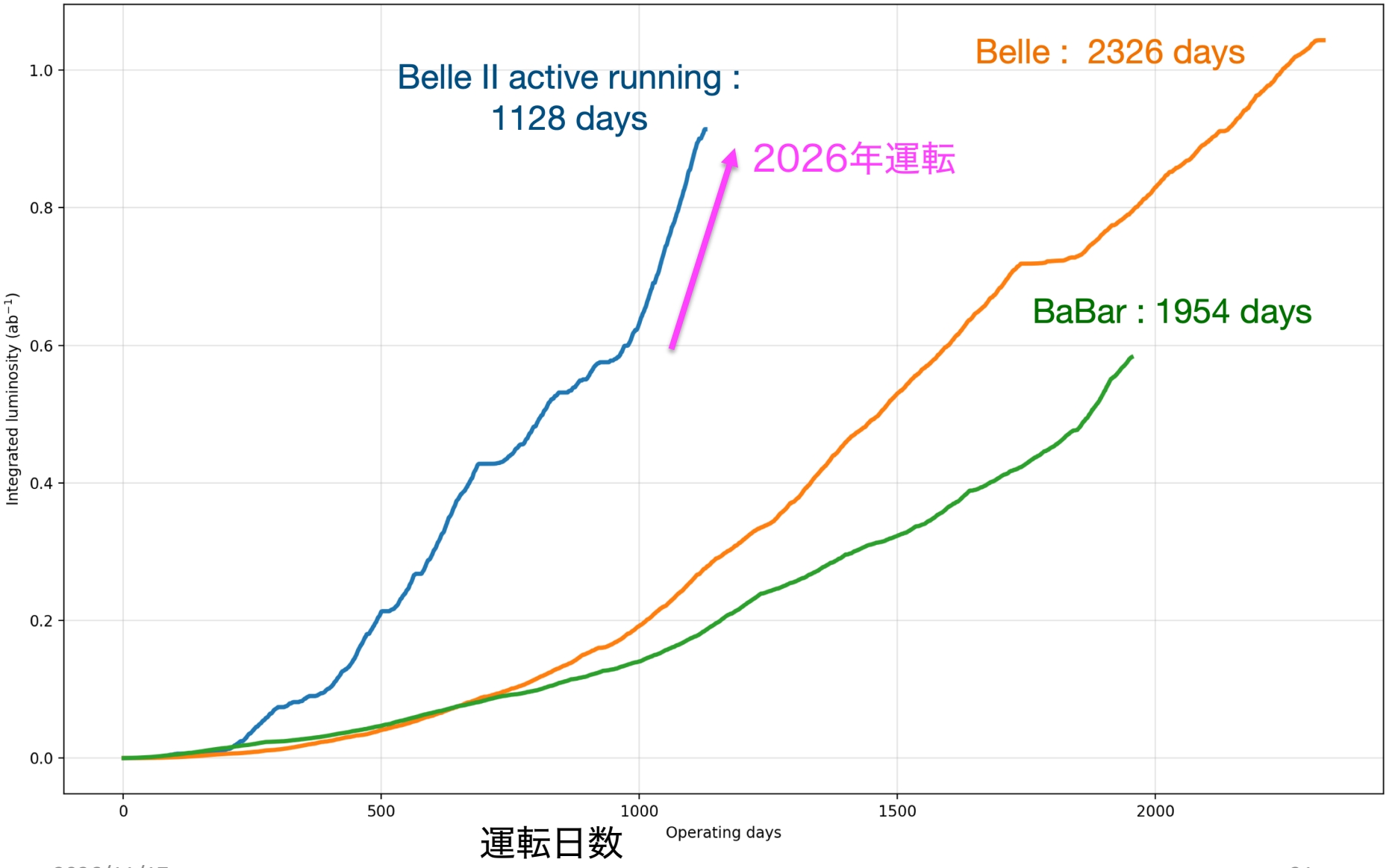
- 8時間でのデータ取得量: 1.25 fb^{-1}
- 1日でのデータ取得量: 3.5 fb^{-1}
- 1週間でのデータ取得量: 21.8 fb^{-1}

> 3.0 fb^{-1}/dayが標準のレベルまで到達

今までは2.5 fb^{-1}がやっとだったのですごい進歩

運転日数と積分ルミノシティ

2026年はBelleより5-6倍早いペースでデータ取得



運転日数

Recorded 808 fb^{-1} at $\Upsilon(4S)$ (> Belle), and 914 fb^{-1} in total

Belle II accumulates the world's largest Y(4S) dataset

for more precise searches for new physics beyond the Standard Model

Accelerator Laboratory | Institute of Particle and Nuclear Studies

Research News

Kobayashi-Maskawa Institute for the Origin of Particles and the Universe

[Research] Belle II accumulates the world's large Y(4S) dataset for more precise searches for new physics beyond the Standard Model

2026.06.05

Research

Next step in the matter-antimatte mystery: World's largest B-meso

06/23/2026

Brookhaven National Laboratory Newsroom Media & Communications Office

Newsroom | Photos | Videos | Fact Sheets | Lab History | News Categories

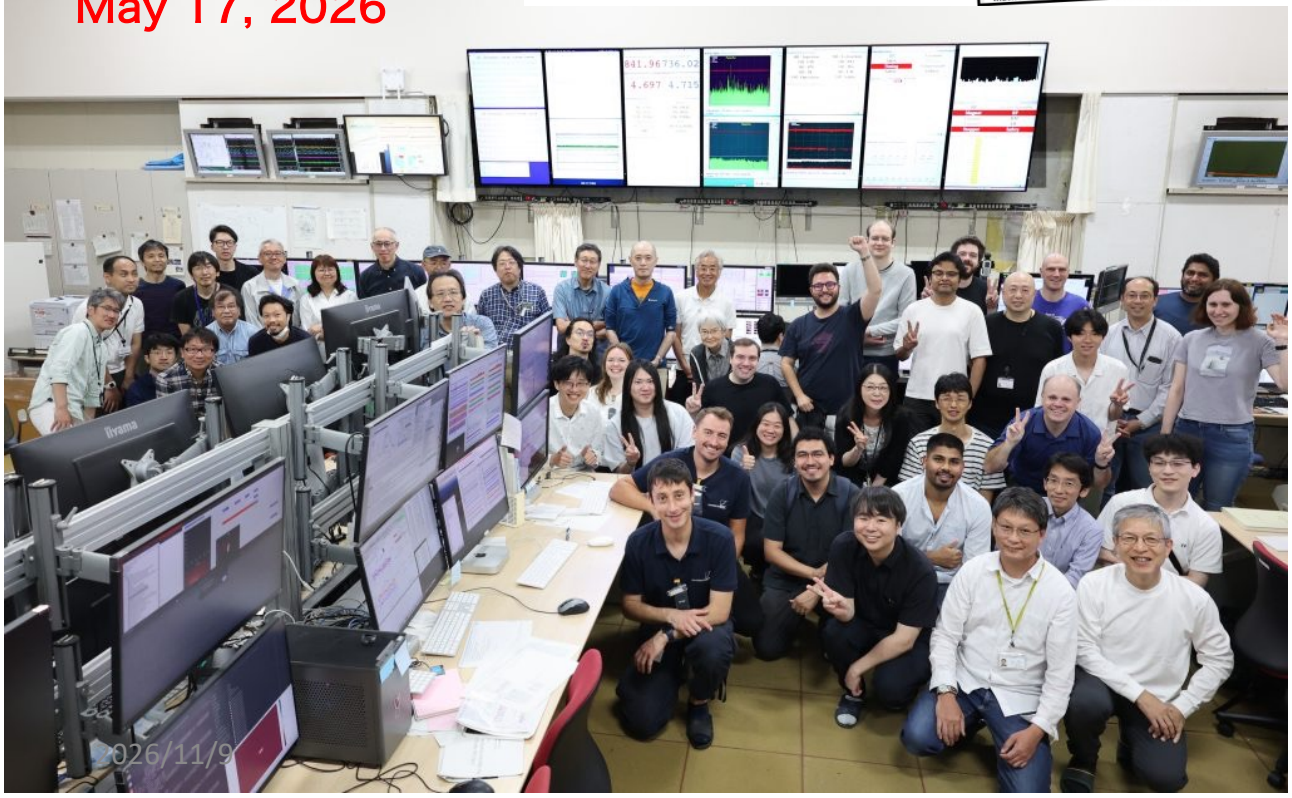
share:

Belle II Accumulates the World's Largest Y(4S) Dataset

For more precise searches for new physics beyond the Standard Model

June 5, 2026

May 17, 2026



IN MY ab^{-1} ERA

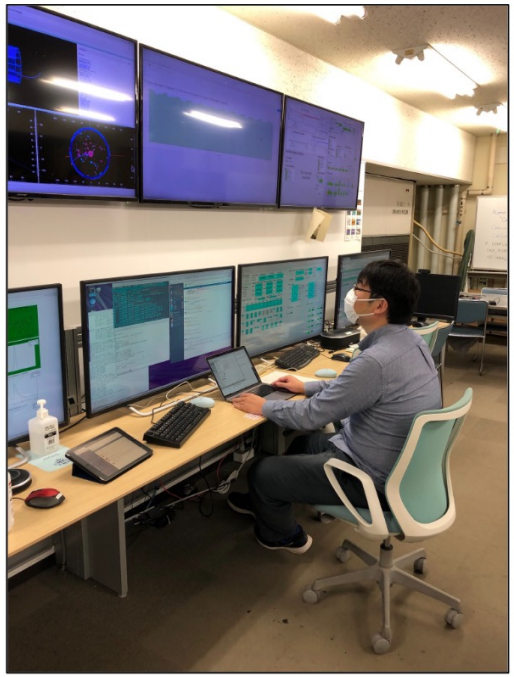
Belle II実験の動かし方

24時間ずっと実験します

8時間1シフトとして、みんなで協力して実験を進めます

- コントロールルームシフト (CR shift)
  - 検出器の状態をモニター。異常が起きたらエキスパートに電話

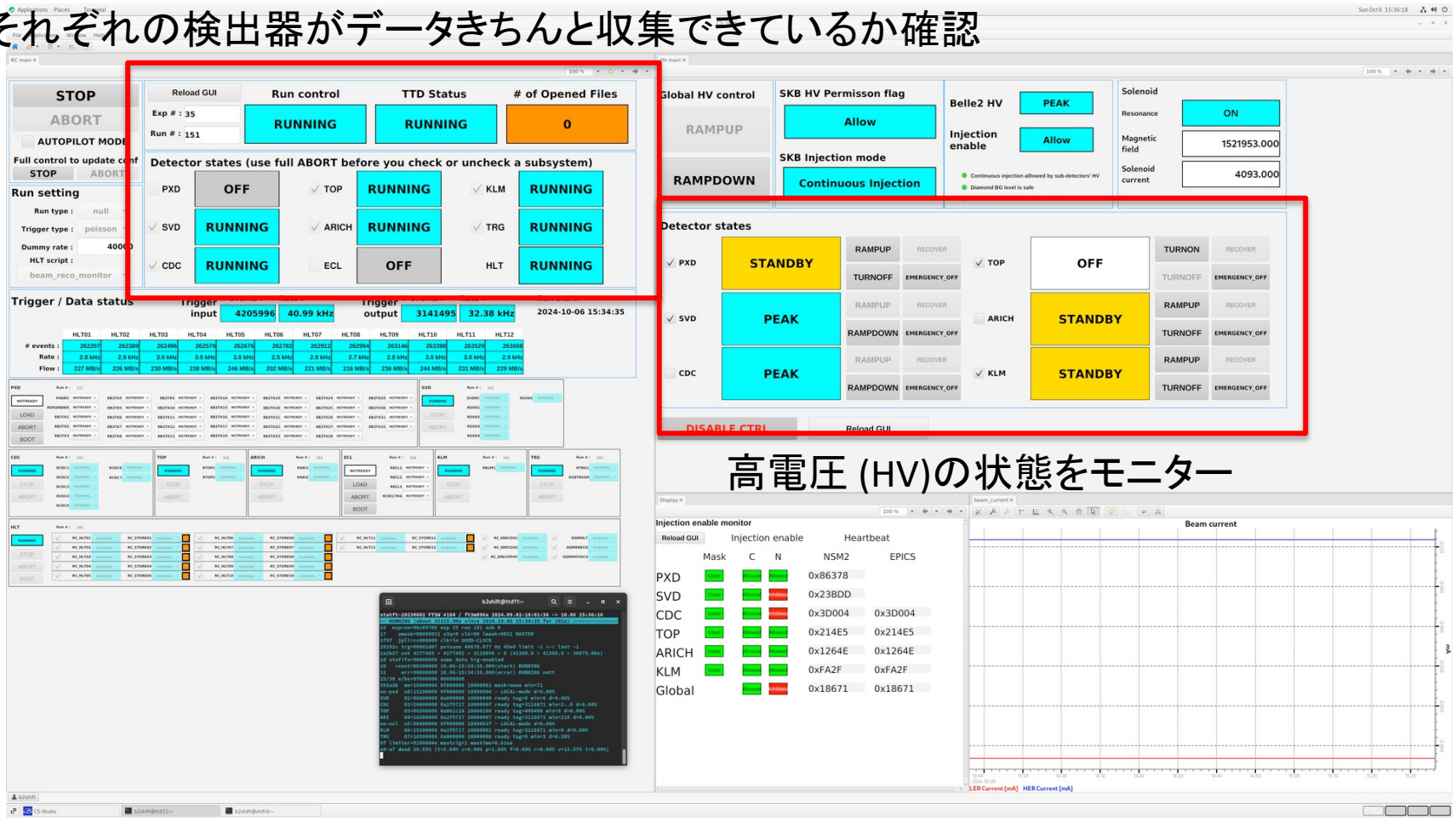
Local CR shift





何をモニターしているの？

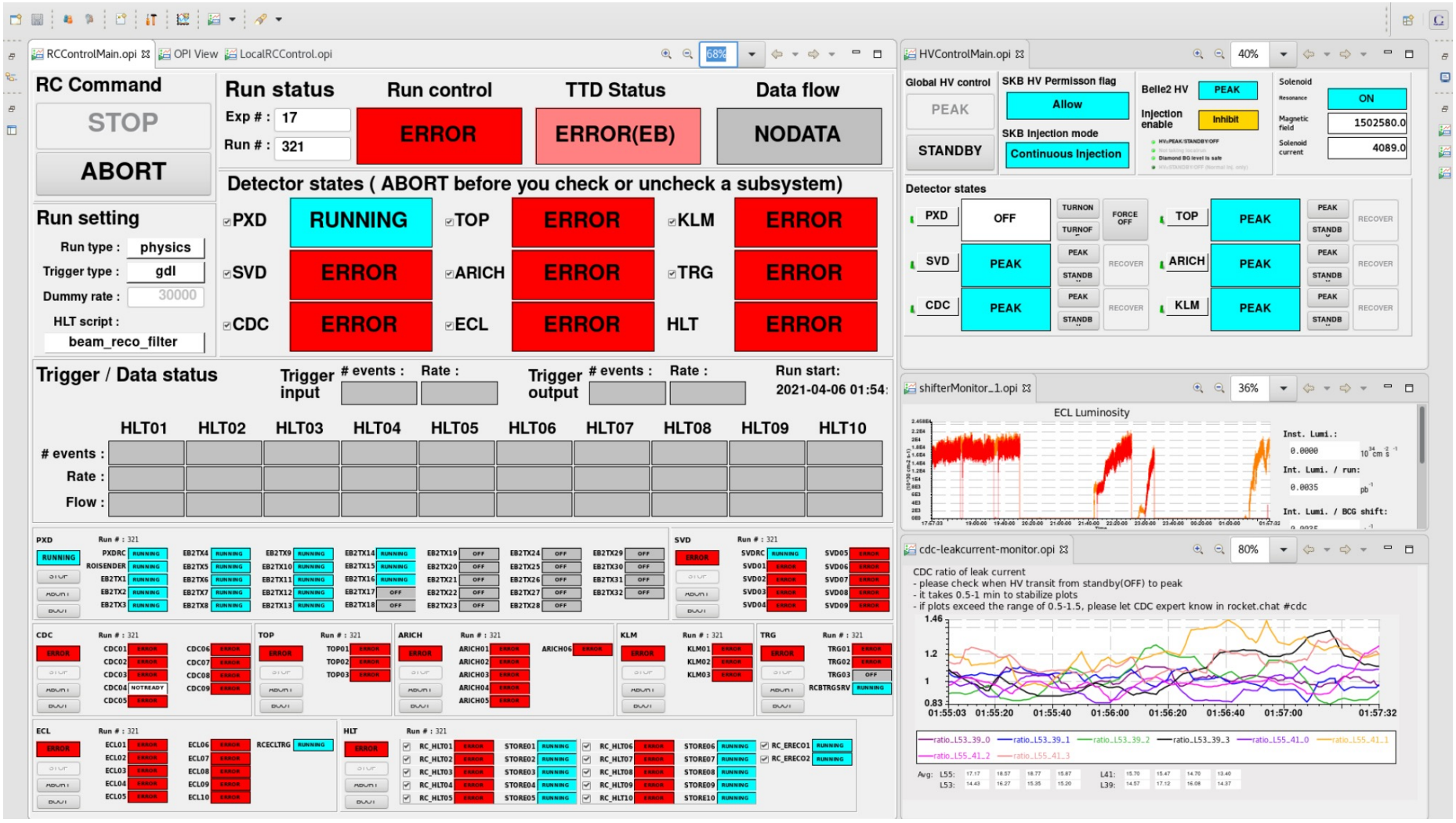
それぞれの検出器がデータきちんと収集できているか確認



高電圧 (HV)の状態をモニター

全く難しくない。異常かどうかは色見ればわかるようになってる

こうなったら終わり



ホントです。いろんなエキスパートが呼び出され原因究明した

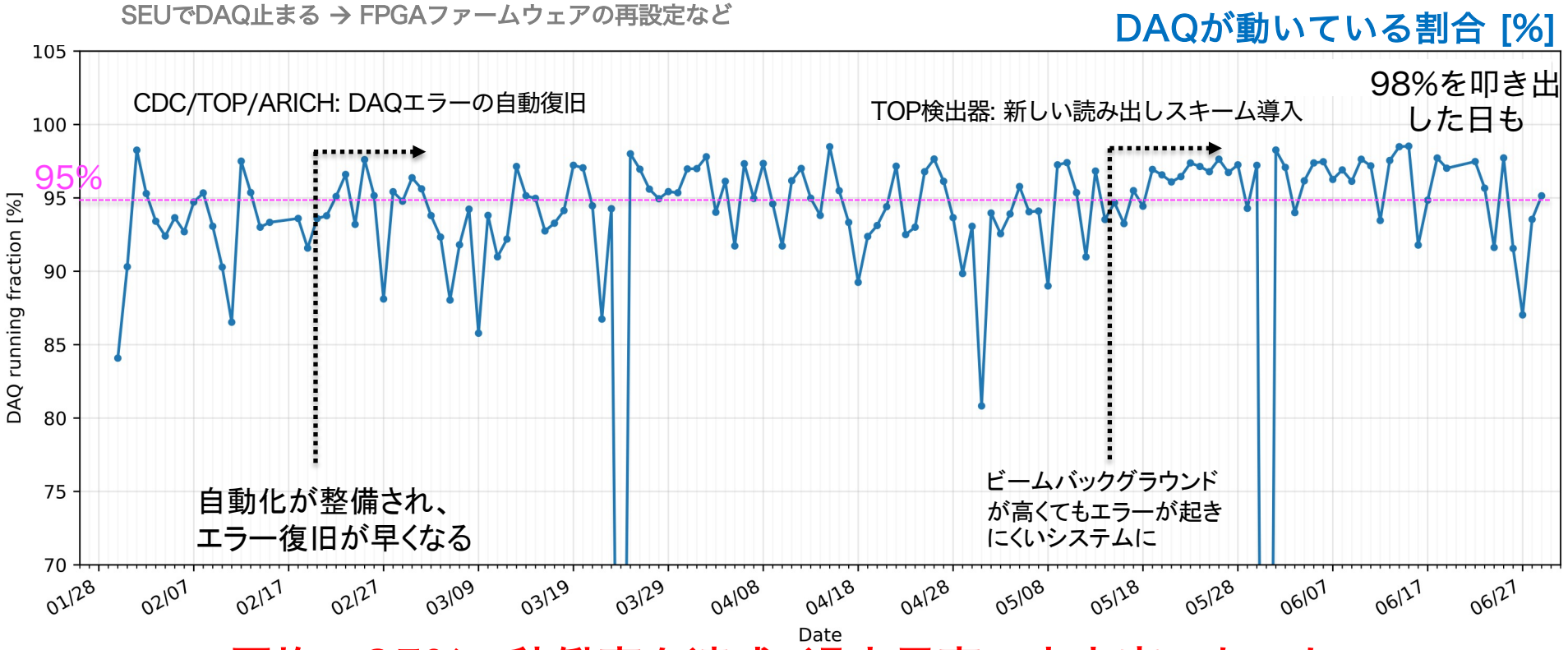
Belle II測定器の安定性向上も寄与

加速器のルミノシティが改善しても、Belle IIがデータ取得できなければ意味なし

→ **DAQが動いている割合**が非常に重要　　実際はDAQ deadtime込みの効率が重要であるが、今回は割愛

ルミノシティが高くなると、Belle IIが受ける放射線量も高くなる

- 放射線により読み出し回路が異常動作して、DAQが止まること → 実験屋の腕の見せ所

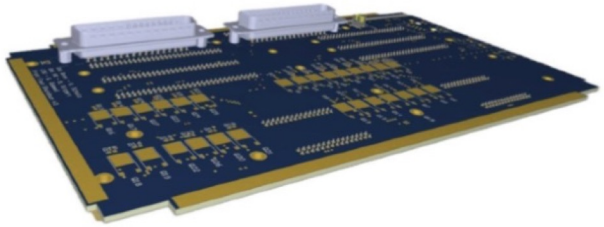


平均で95%の稼働率を達成: 過去最高の安定度であった

衝突データをわずかでも逃さないような仕組み

来季へ: PXD 早期シャットダウン

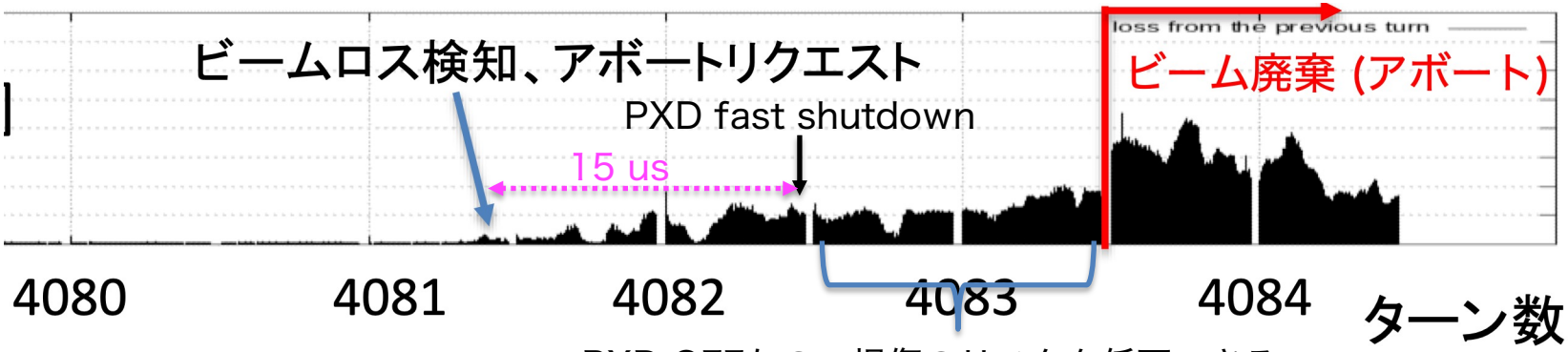
PXDの電源をすぐに落とす: 200 us → ~15 us



- **PXD OFFになっていれば、SBL発生しても問題 (多分)**
- 専用のモジュールを開発 → 現在、モジュールの試験中
  - ASICにかかっている制御電圧をハードウェアで強制的に落とす

200 us (リング20周分) → ビーム異常を早く検知しても、電源落ちる頃には大量の放射線浴びる

15 us → 現状でもある程度の放射線をPXD ONで浴びずに済む



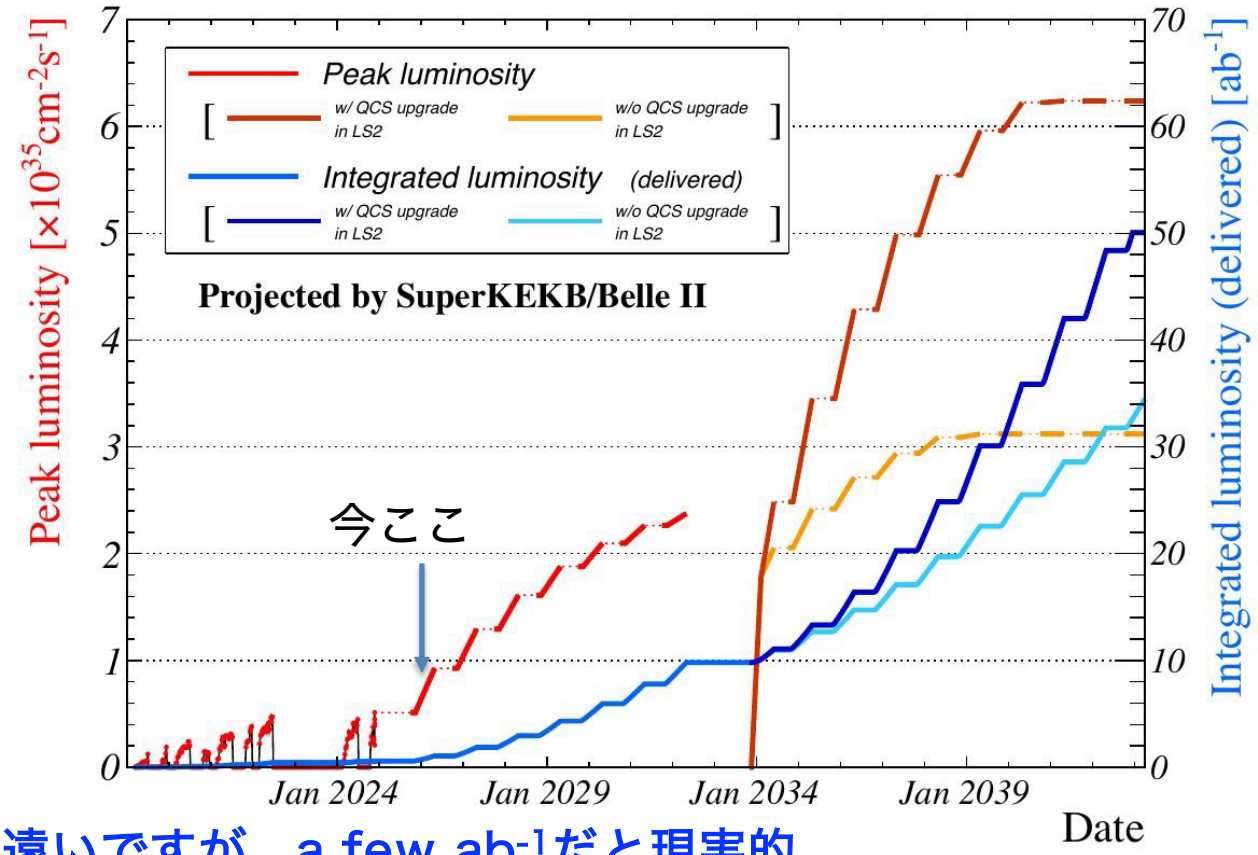
PXD OFFなので損傷のリスクを低下できる

SBLから完全にPXDを守るためには、
大きなビーム損失が発生する~15 us前に異常を検知する必要あり

SuperKEKB/Belle IIで、予兆の信号を探索中
→ いくつか候補はあり、評価中

2027運転でPXDを復活させ、Belle II本来の性能を出したい

将来の展望



50 ab^{-1}はまだ遠いですが、a few ab^{-1}だと現実的

- 今期の達成した加速器効率、データ収集効率、運転日数を用いてルミノシティだけ上げると
  - 平均 7×10^{34} cm^{-2} s^{-1} → ~630 fb-1 (5ヶ月運転)
  - 平均 8×10^{34} cm^{-2} s^{-1} → ~720 fb-1 (5ヶ月運転)
  - 平均 1×10^{35} cm^{-2} s^{-1} → ~900 fb-1 (5ヶ月運転)

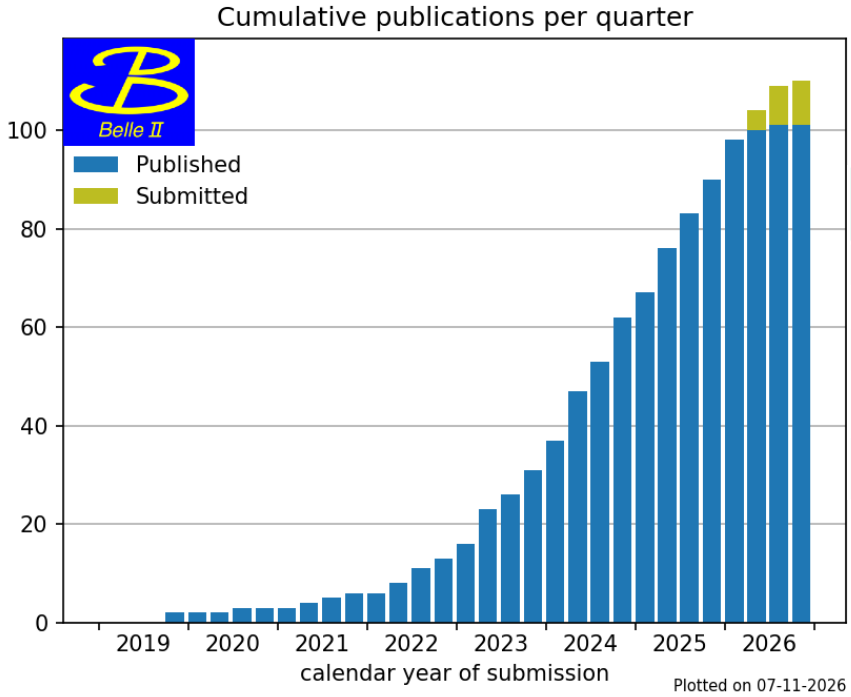
データ量

914 fb^{-1}→ 1300 fb^{-1} → 2XXX fb^{-1}

やるよ!

もちろん物理結果も..

110 papers and 101 accepted



Rank	Title	Year	Citation count
1	Evidence for $B^+ \to K^+ \nu\bar{\nu}$ decays	2024	295
2	Search for Axion-Like Particles produced in e^+e^- collisions at Belle II	2020	204
3	Search for $B^+ \to K^+ \nu\nu$ decays using an inclusive tagging method at Belle II	2021	111
4	Search for an Invisibly Decaying Z' Boson at Belle II in $e^+e^- \to \mu^+\mu^-(e^\pm\mu^\mp)$ Plus Missing Energy Final States	2020	97
5	Test of lepton flavor universality with a measurement of $R(D^*)$ using hadronic B tagging at the Belle II experiment	2024	82

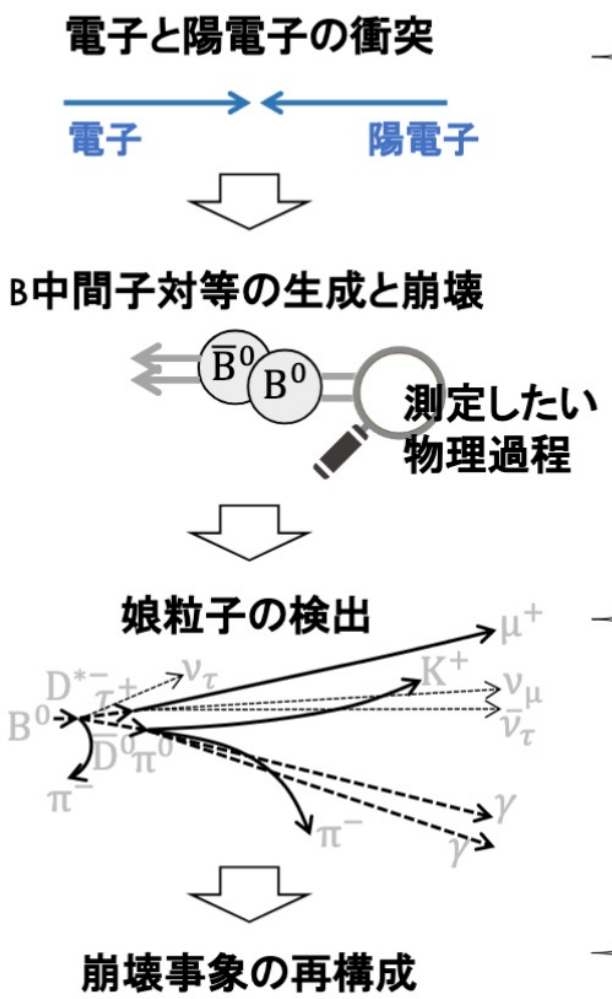
Most results use data collected through 2022 (365 fb^{-1} at $\Upsilon(4S)$)

- Now, more than 2 × the previous dataset

→ More results with larger datasets come soon! (from winter conference?)

最後に: 計画の進捗具合

2026年運転が遅れを取り戻すきっかけに



（運転時間の不足分を加味して）2022年時計画の約半分

SuperKEKB加速器の衝突性能（ルミノシティ）

＝ 一定時間内にどれだけの粒子衝突を発生させられるか

× 運転時間 × 運転効率

ほぼ計画通り

＝ 2019年からの総運転日数約1100日
/約6年（LS1の1.5年を除く）＝ 約6ヶ月/年
（2022年時計画と比べて約1.5年の不足）

Belle II測定器の性能（効率・精度）

設計通り

データ解析の手法（効率・精度）

当初想定の2倍以上

＝ いかに背景事象を正しく理解し、信号のみを抽出できるか

まとめ

SuperKEKB/Belle II実験: 前人未到の衝突性能を達成し、データの大量収集を目指す

- 測定器や解析手法の改良/改善を行い、検出効率を最大化
  - 機械学習などの活用で想定以上の感度改善が得られている
- 加速器性能の向上を徐々に上げてきており、世界最高記録を更新し続けている

2026年まで運転状況: データ収集量 914 fb^{-1}

- $\Upsilon(4S)$中間子のデータはBelleを超え世界最高の統計量へ
- 2026年のデータ収集ペースを落とさず、どんどん上げていくため準備中！
- a few ab^{-1}の解析結果を理論屋さんと議論できるように！



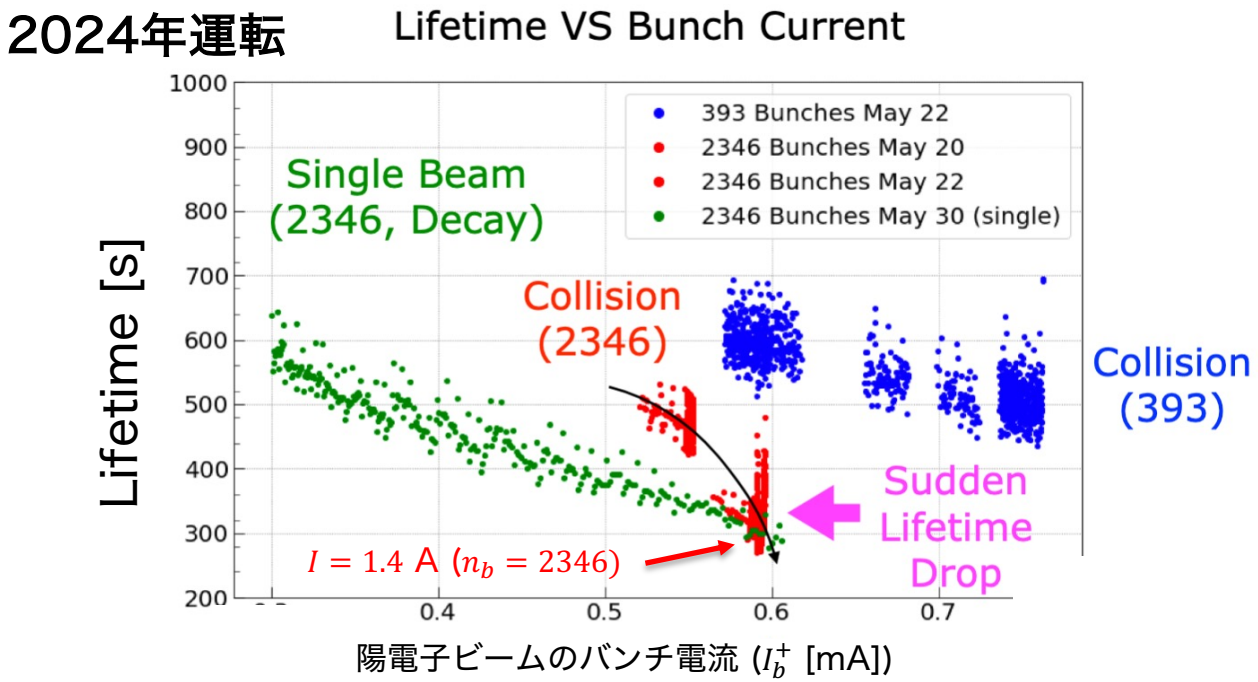
Backup

電流増加の課題

陽電子ビーム: 高電流で急にLifeが短くなる

- Lifetime 5分 = Loss rate -4.7 mA/s

→ 毎秒失われるビーム電流を補充するので精一杯



なぜここまでLifetimeが短いかまだ完全に理解できていない

- リングの真空度と相関有 → 長時間高い電流で運転し続けることが大事 (焼き出し)

→ 安定的に運転できれば、徐々に電流上げられるはず。しかし、Sudden Beam Lossという別問題が..