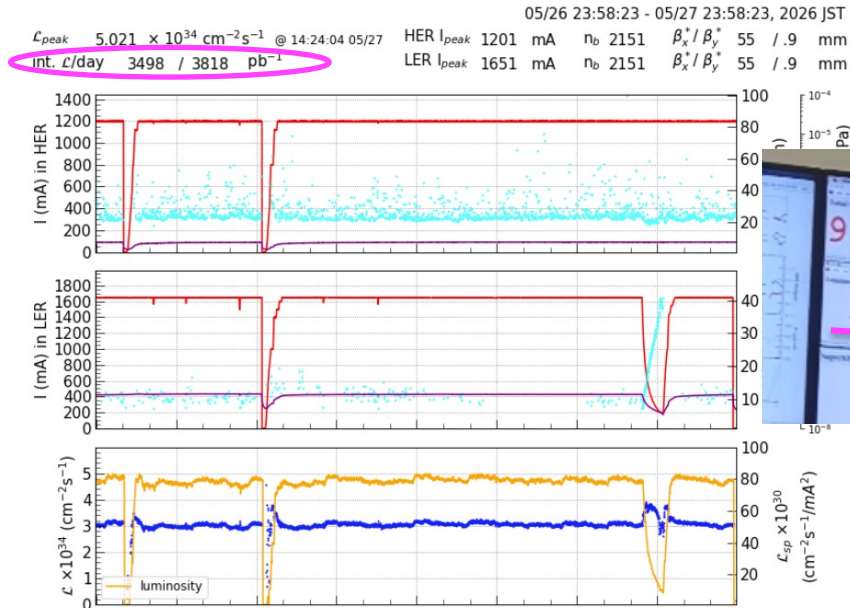




SuperKEKB/Belle II実験の現状と展望

宇野 健太 (KEK IPNS)

Flavor Frontier

2026年9月2日



2026/9/2



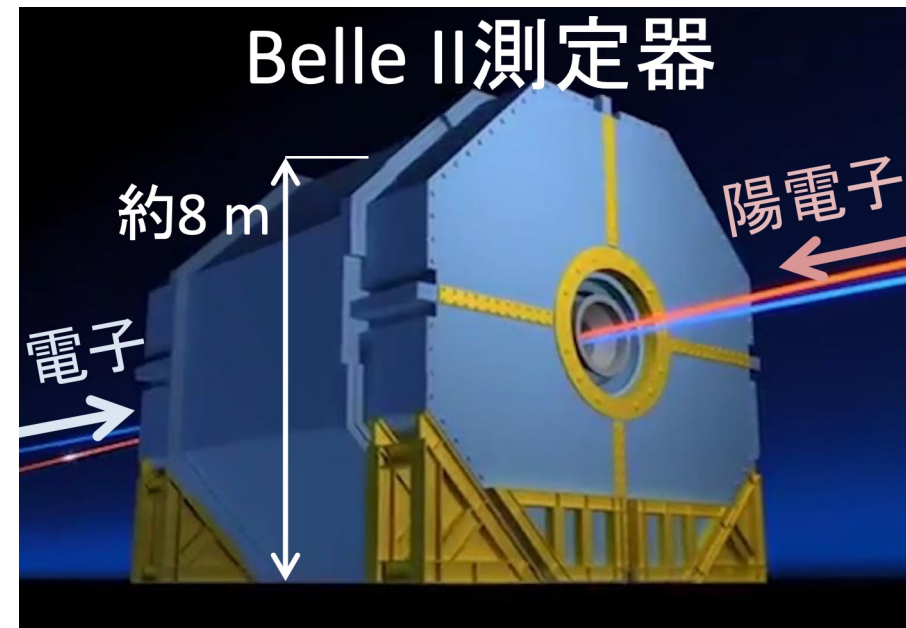
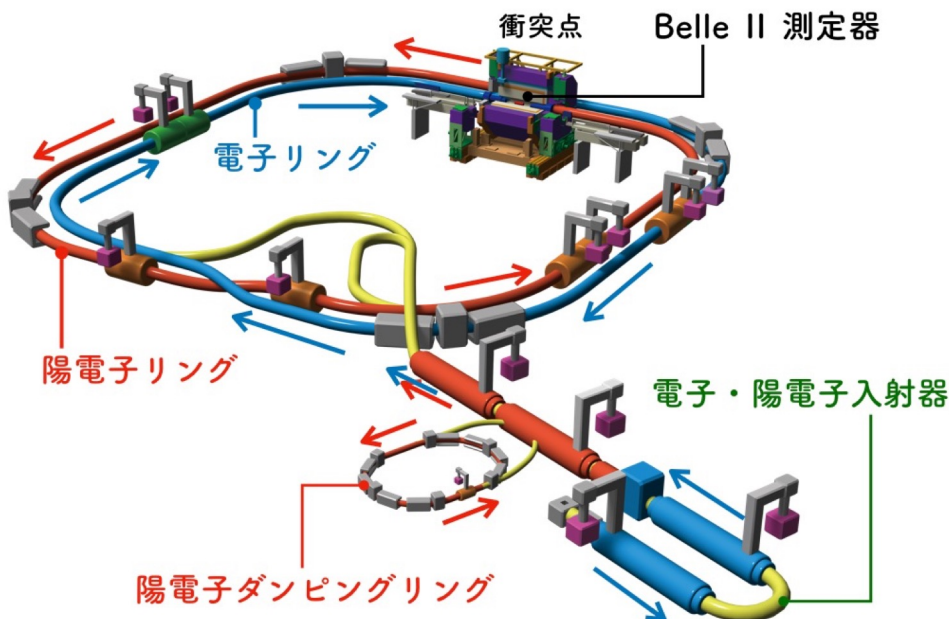
SuperKEKB/Belle II実験

茨城県つくば市で行われているBファクトリー実験 (2018 -)

- 新しい「ナノビーム衝突方式」により、世界最高の衝突性能を実現
- 電子 (7 GeV)と陽電子 (4 GeV)を衝突
- 重心系エネルギー ($\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$)

→ 前身のKEKB/Belle実験の**50倍のデータ**をためる (50 ab^{-1})

B中間子対、 τ 対、 c 対、それぞれ約500億個に相当

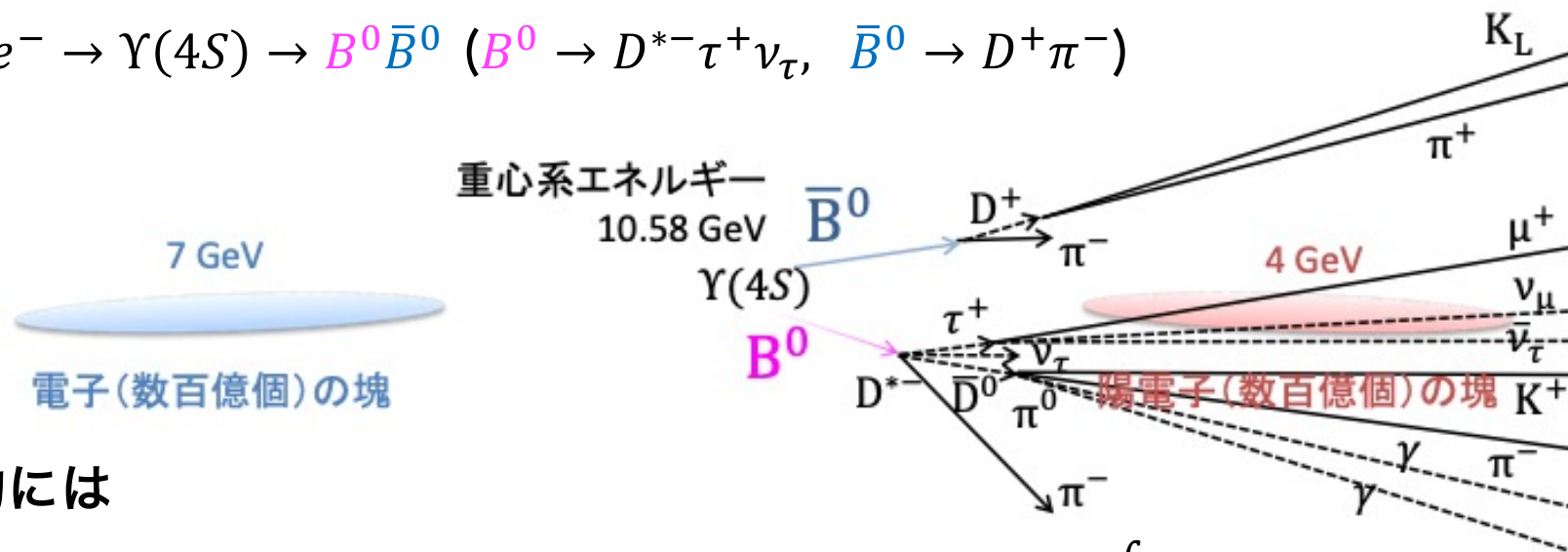


どのようにデータを集めるか？

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



実験的には

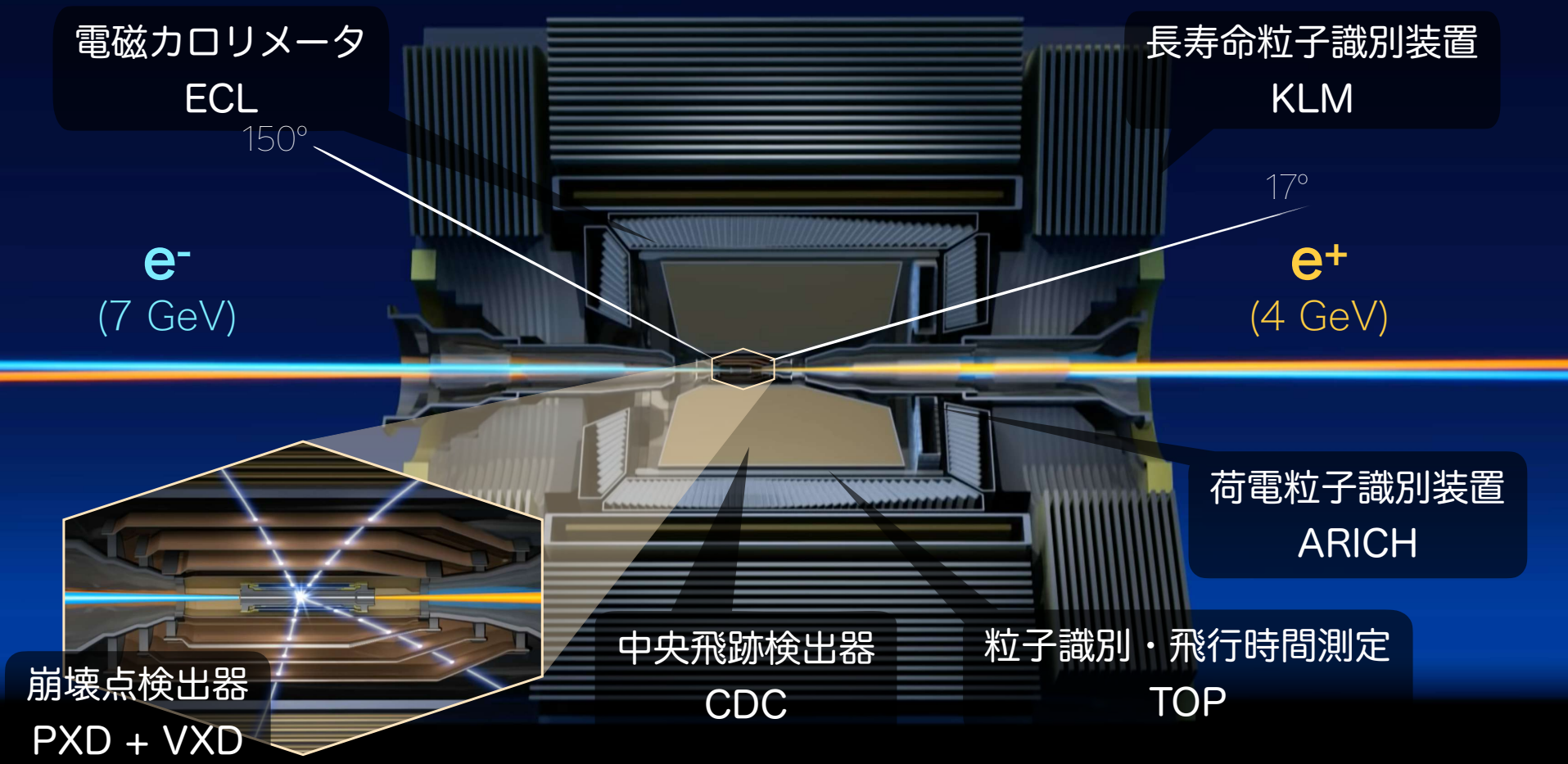
$$N = \underbrace{\sigma(e^+e^- \rightarrow B^0 \bar{B}^0) \times \mathcal{B}(B^0 \rightarrow D^{*-} \tau^+ \nu_\tau) \times \mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow D^+ \pi^-)}_{\text{生成断面積、崩壊分岐比 (自然が決める)}} \times \underbrace{\epsilon}_{\text{検出効率}} \int L dt$$

SuperKEKB/Belle II実験の挑戦

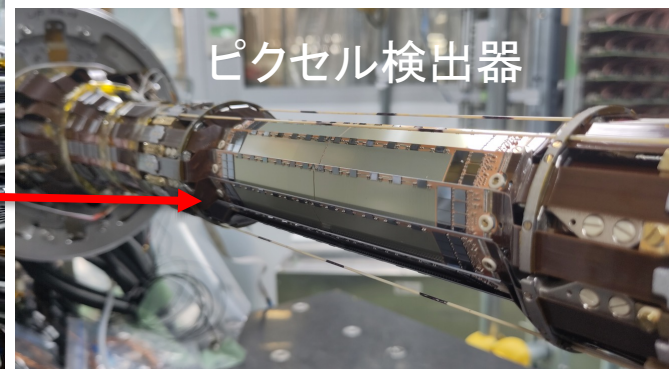
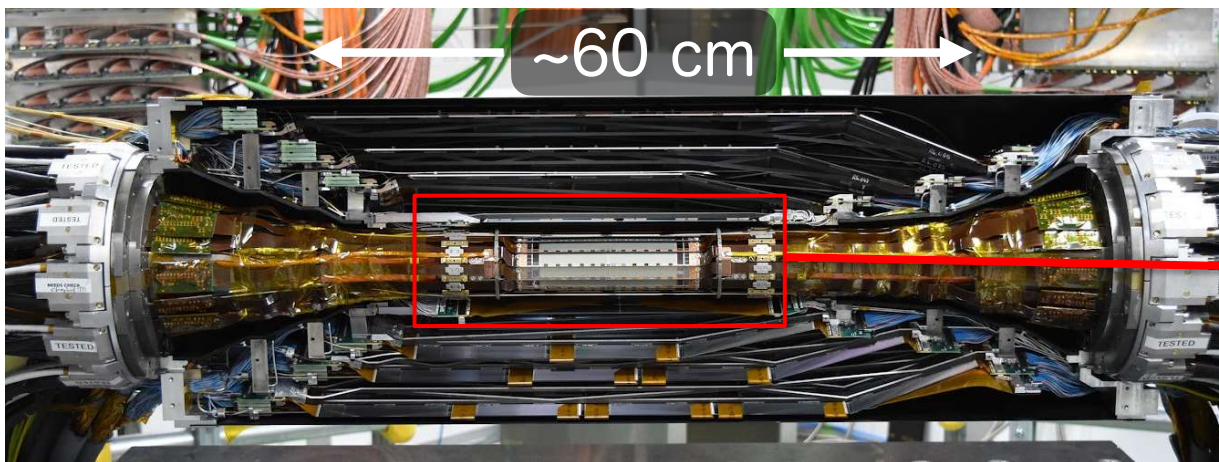
- 検出効率を最大化させるために、測定器性能や解析手法の改善を行ってきた/ている
- 加速器性能 (ルミノシティ)を段階的に向上させる
- 加速器/測定器の運転を安定させ、実験時間をなるべく長くする

Belle II測定器

Belle II Detector @ 1.5T



測定器改善例: 崩壊点検出器



最内層にピクセル検出器 (PXD)を設置

- 最小のピクセルサイズ $55\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$
- 数: 約7.6メガピクセル

例. Impact parameter, d_0 への影響

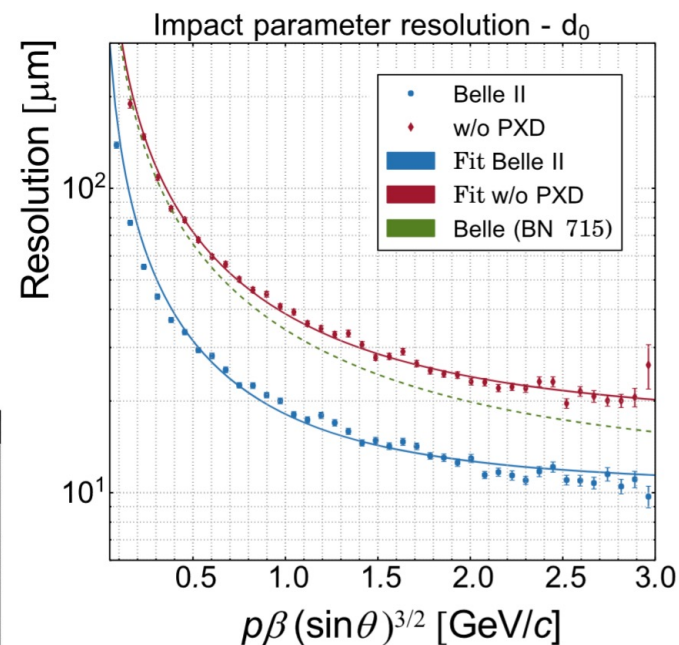
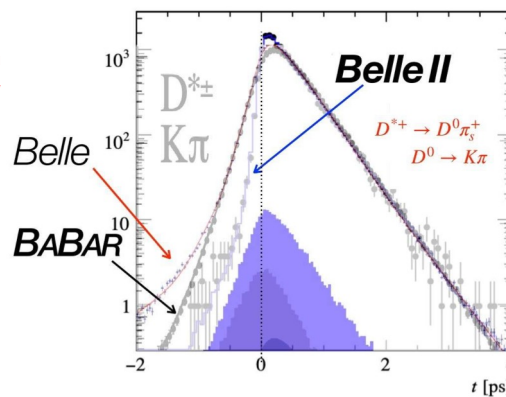
- 崩壊点検出器の導入で、Belleに比べて約2倍精度が向上

CPVの解析や短寿命粒子の精密測定
に効果を発揮

約2倍良いdecay-time resolution

→ 72 fb^{-1} で世界最高精度の寿命測定

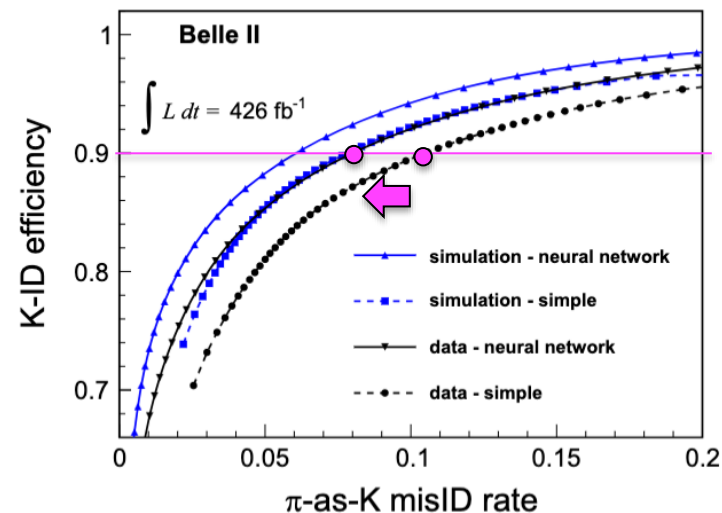
2026/9/2



解析手法の改善例

粒子識別に機械学習を有効活用 (e, μ, π, KID)

- K/π 識別: DNNを用いた識別アルゴリズムが標準
→ $\pi \rightarrow K$ 誤同定率が10% → 7-8%へ (K eff~90%)



新しい解析手法が次々出てきて、想定以上の感度改善が得られている

- 例1. Inclusiveタグを用いた $B \rightarrow K\nu\nu$ 解析 → 365 fb^{-1} でこの過程を初観測
- 例2. 機械学習を有効的に活用して $\tau \rightarrow \mu\mu\mu$ 解析

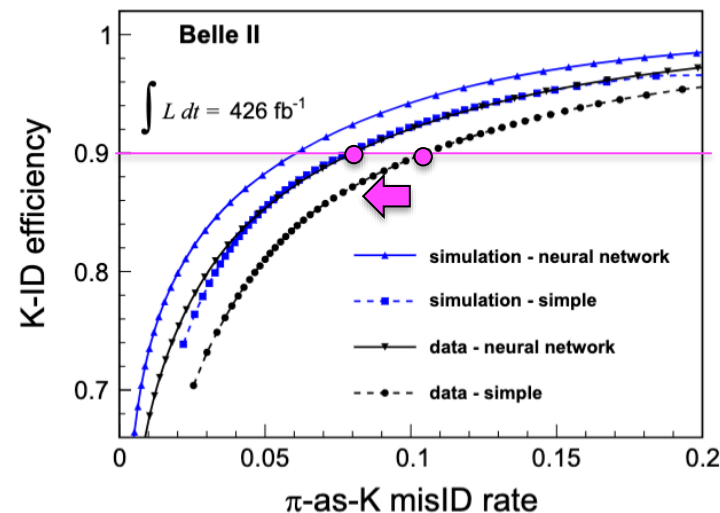
	Upper Limit at 90% CL
Belle	$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\mu\mu) < 2.1 \times 10^{-8} (\mathcal{L} = 782 \text{ fb}^{-1})$
BaBar	$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\mu\mu) < 3.3 \times 10^{-8} (\mathcal{L} = 468 \text{ fb}^{-1})$
CMS	$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\mu\mu) < 2.9 \times 10^{-8} (\mathcal{L} = 131 \text{ fb}^{-1})$
LHCb	$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\mu\mu) < 4.6 \times 10^{-8} (\mathcal{L} = 2.0 \text{ fb}^{-1})$
Belle II	$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\mu\mu) < 1.9 \times 10^{-8} (\mathcal{L} = 424 \text{ fb}^{-1})$

Belleの半分のデータセット

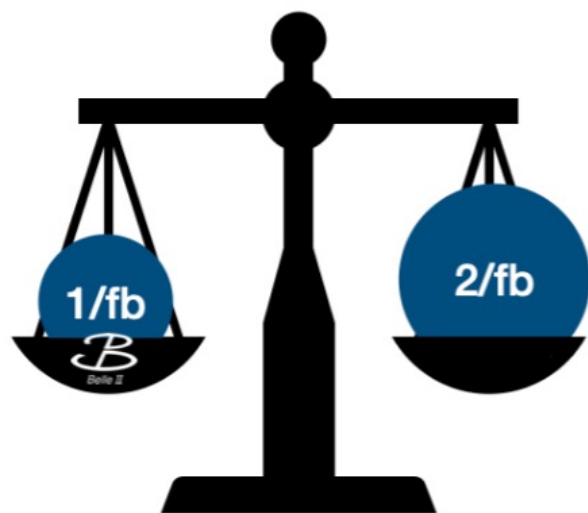
解析手法の改善例

粒子識別に機械学習を有効活用 (e, μ, π, KID)

- K/π 識別: DNNを用いた識別アルゴリズムが標準
→ $\pi \rightarrow K$ 誤同定率が10% → 7-8%へ (K eff~90%)



少し言い過ぎだと思いますが、



Rough rule of thumb:

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

* exceptions of course do exist

~~$\times$ ab^+ のデータがないと議論できない~~

0.5X ab^{-1} でも議論可能になりつつある(はず)

この後話しますが、Belle IIの取得データ: 914 fb^{-1}

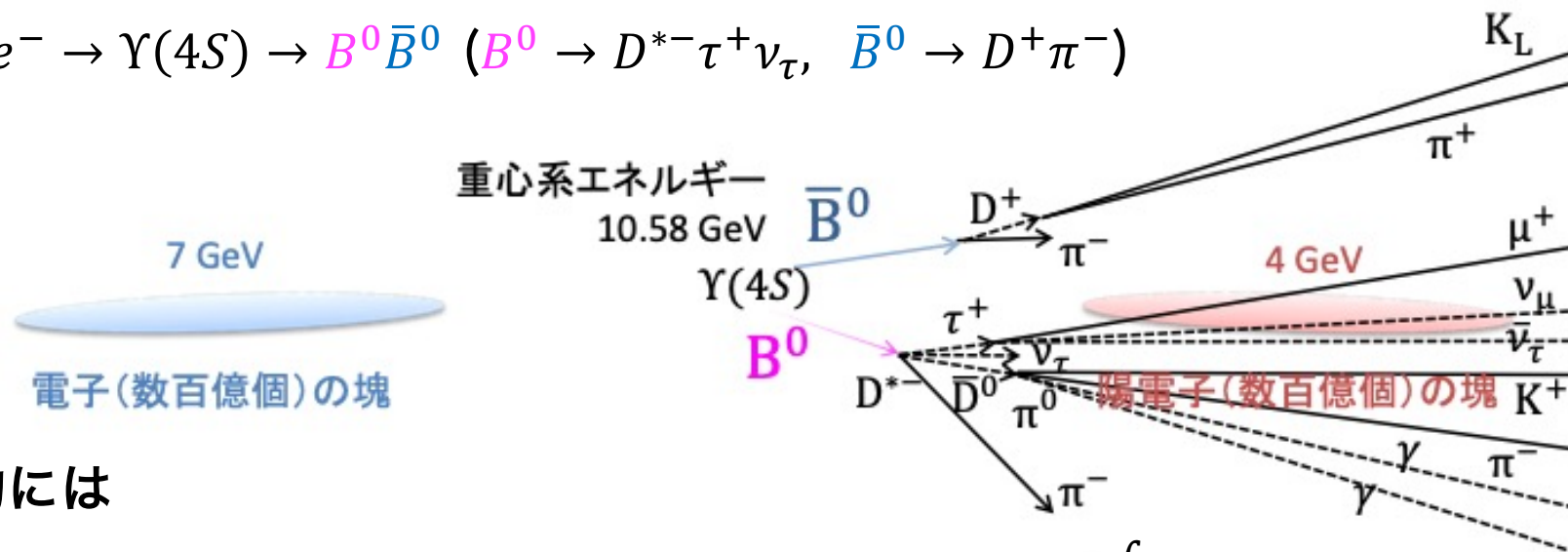
1月からまたデータ収集再開予定です。どんどんデータ溜まっていくので、今フレーバーアノマリーを議論するのはGoodだと思う

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



実験的には

$$N = \underbrace{\sigma(e^+e^- \rightarrow B^0 \bar{B}^0) \times \mathcal{B}(B^0 \rightarrow D^{*-} \tau^+ \nu_\tau) \times \mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow D^+ \pi^-)}_{\text{生成断面積、崩壊分岐比 (自然が決める)}} \times \underbrace{\epsilon}_{\text{検出効率}} \int L dt$$

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、実験時間になるべく長くする



ルミノシティ

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



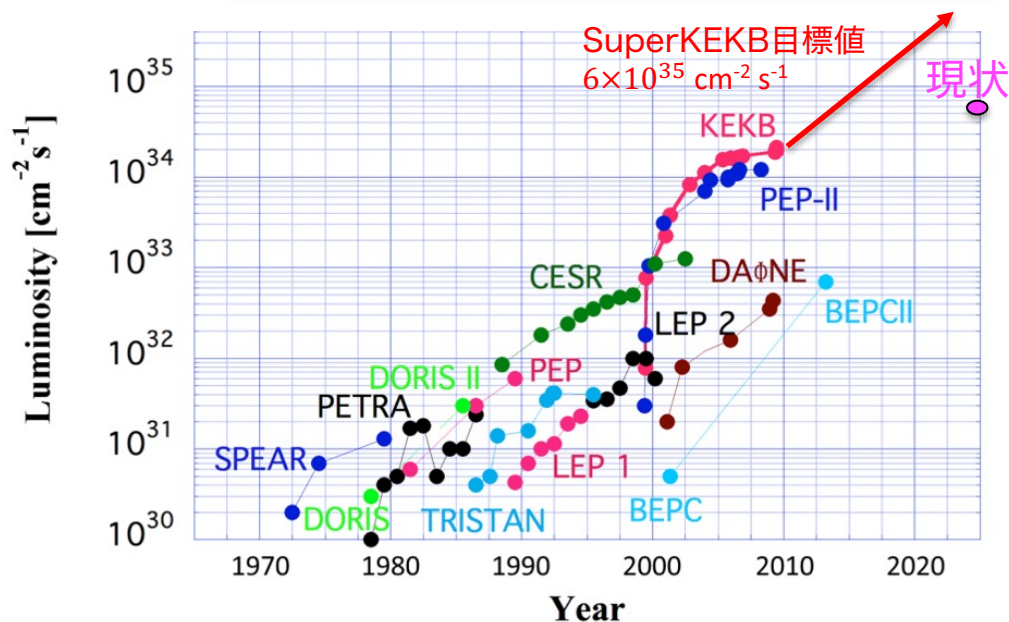
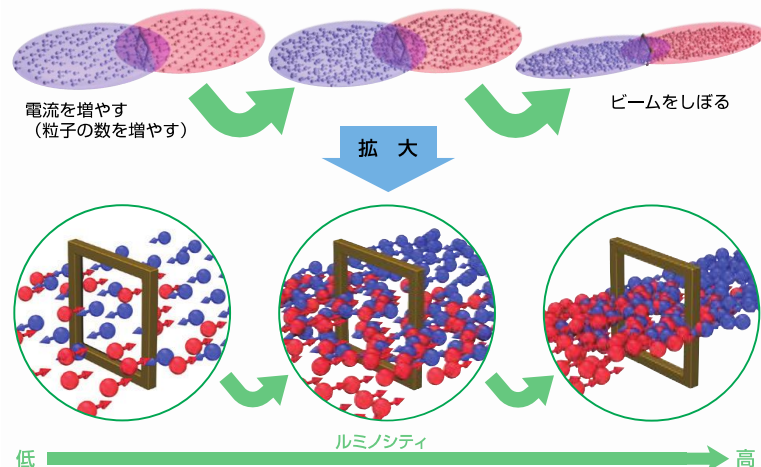
ルミノシティを上げるには

- 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
 - $\sigma_y \sim 50 \text{ nm}$ (KEKBの約1/20)
- ビームに対して鉛直方向 ($\beta_y^* = 0.3 \text{ mm}$, $\epsilon_y \sim 8 \text{ pm}$ に相当)

KEKB: $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \rightarrow$ SuperKEKBの目標値: $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

「もっと知りたい! SuperKEKB加速器」

ルミノシティ… ● と ● が の中で「出会う」回数



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

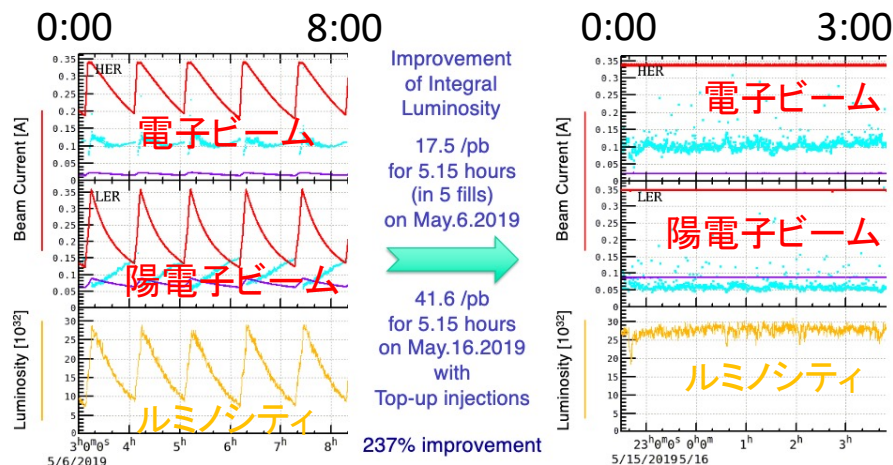


Figure 6: The experimental performance of SuperKEKB was improved by 237% employing the simultaneous top-up injections.

高い電流をキープできる

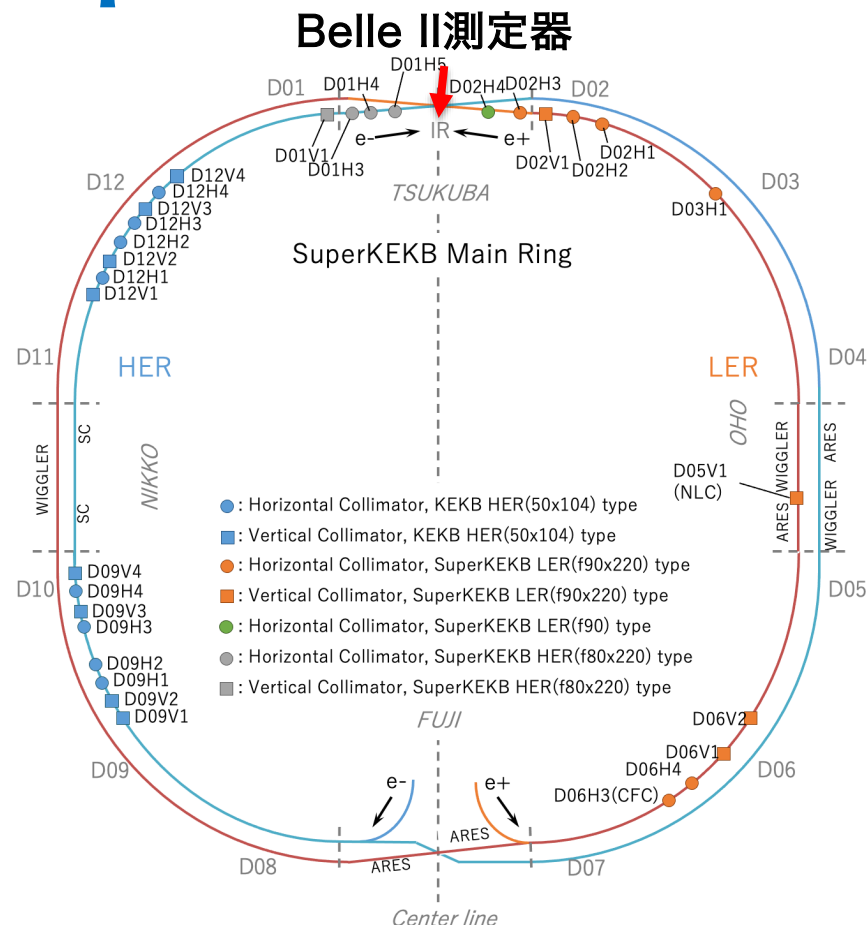
- 高ルミノシティを保ったままデータ取得可

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!

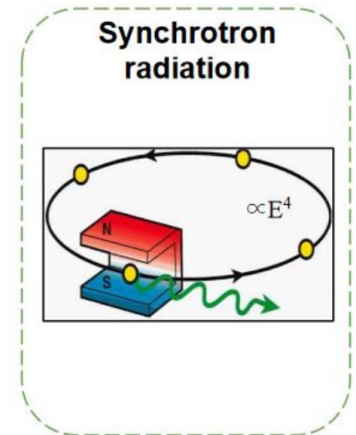
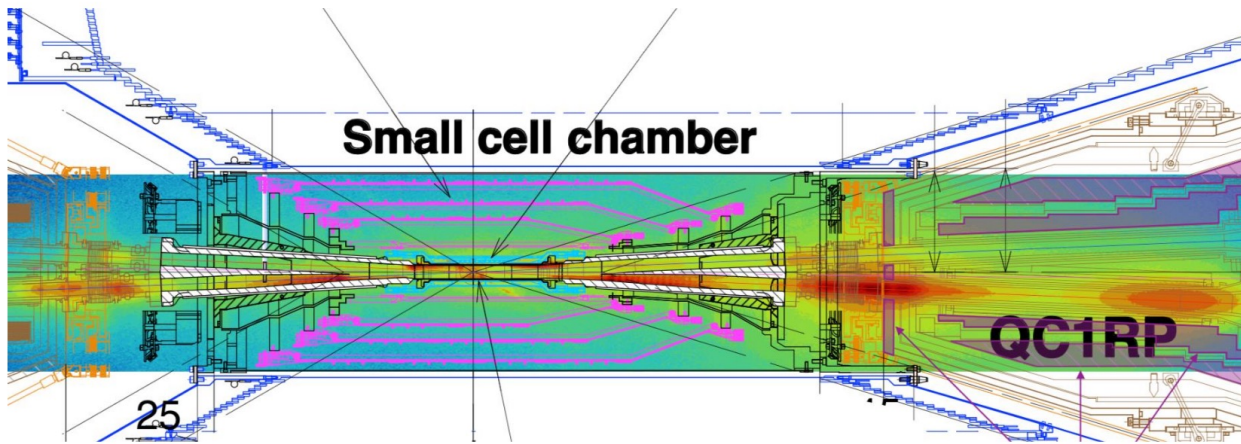
陽電子ビーム: 1.3 – 1.5 A (2024年) → 1.6 – 1.75 A (2025-2026年) → > 2.0 A (2027年)

着実に高電流へ

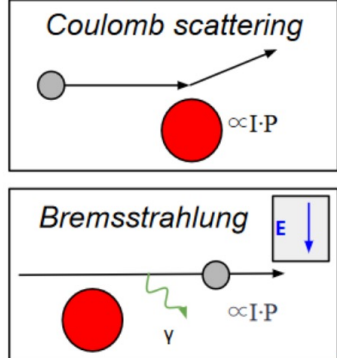
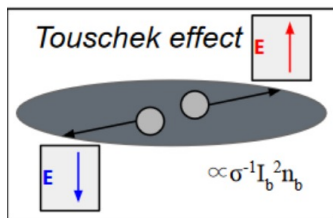


大電流運転におけるBelle IIへの影響

- 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

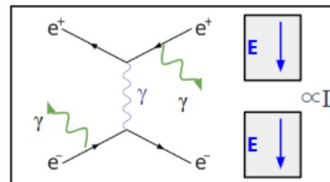


Particle scattering

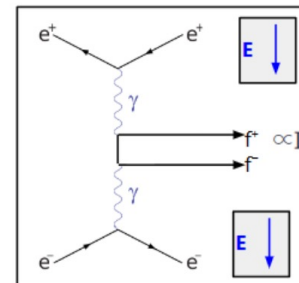


Colliding beams (Luminosity)

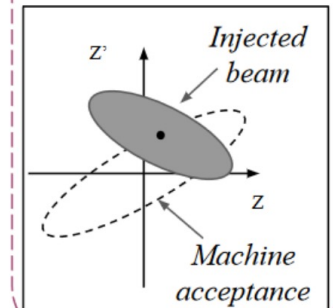
Radiative Bhabha proc.



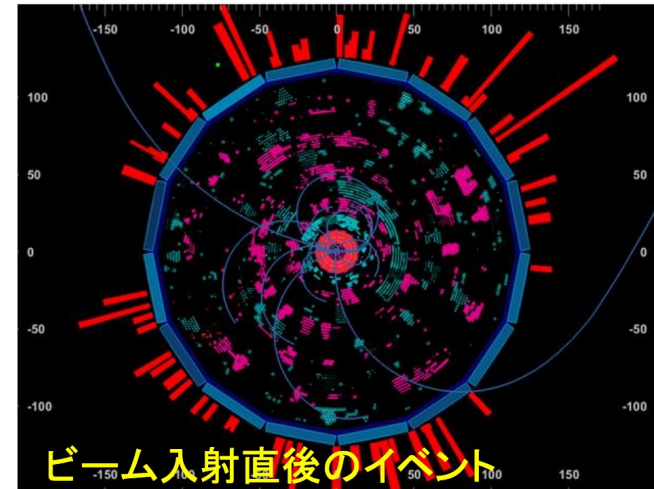
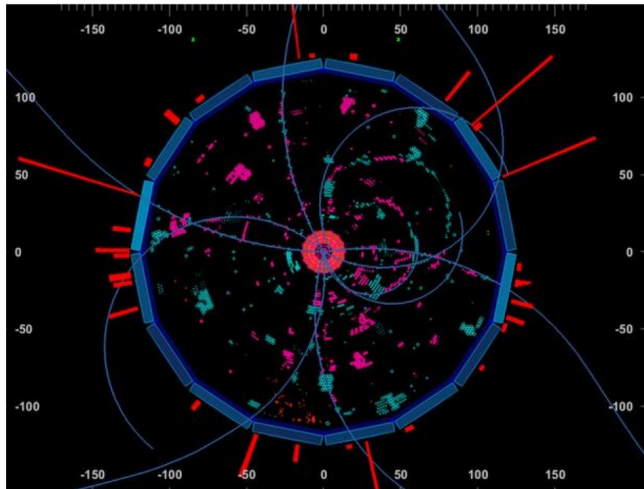
Two-photon proc.



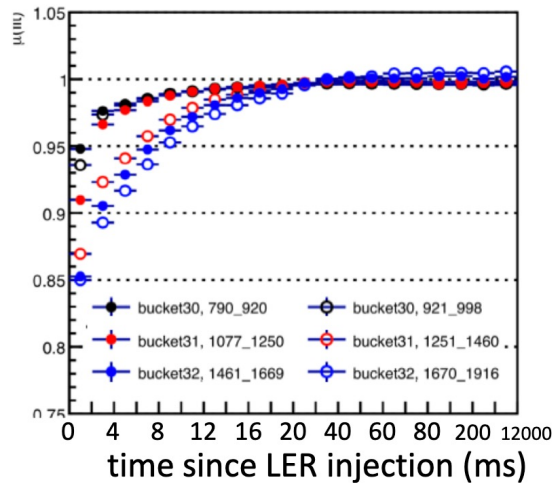
Injection (top-up, continuous)



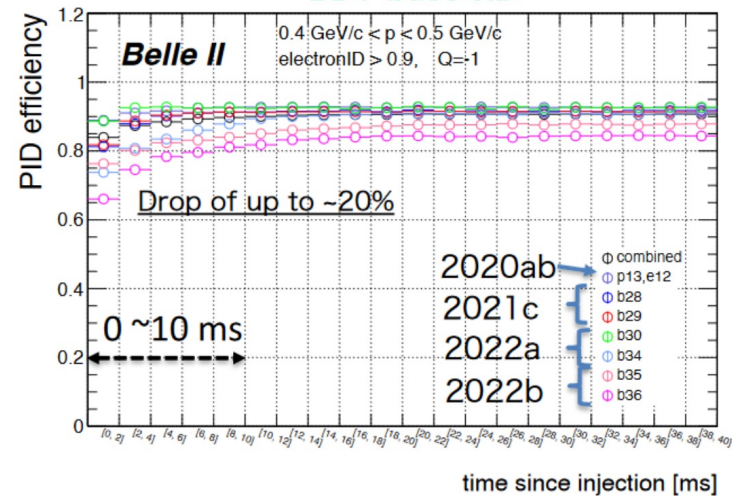
入射ビームによる性能劣化



CDC dE/dx mean



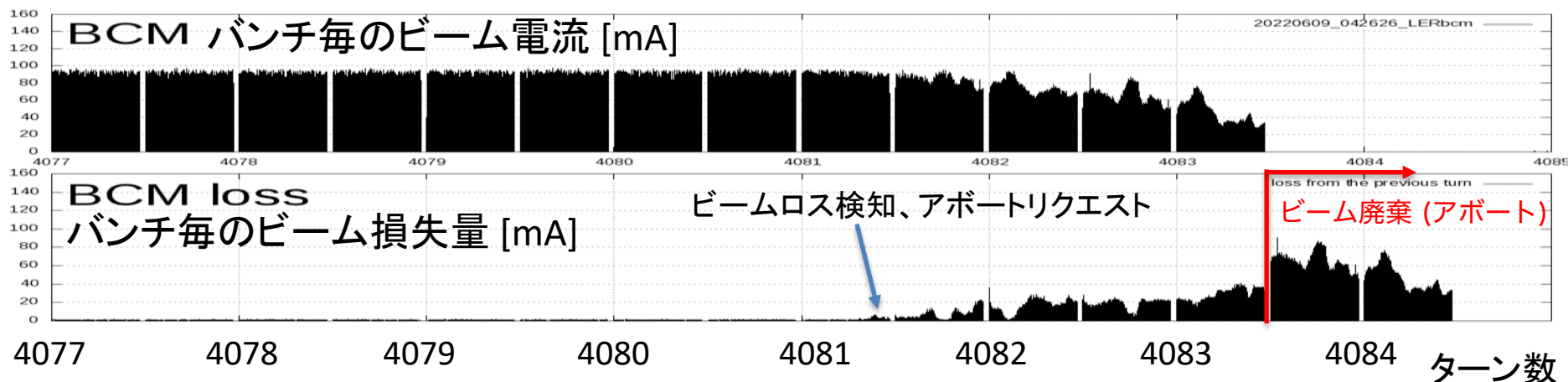
BDT-base eID



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

この実験の大きな課題: SBL

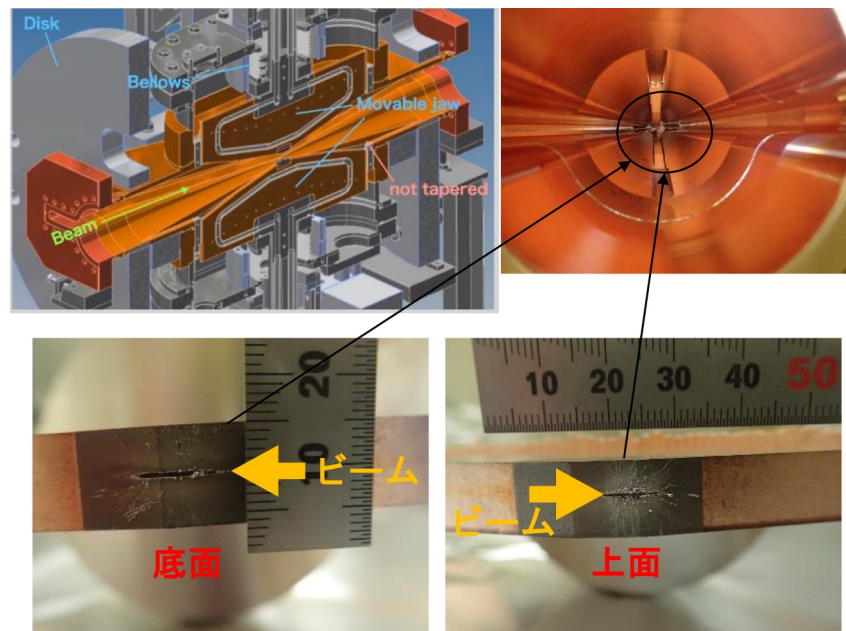
Sudden Beam Loss: ビーム電流が1, 2周で数割損失する現象



突発的に発生し、原因不明 (だった)

- 高電流ほどSBL頻度増 → 電流上げづらい
 - ひどい時は1-2時間に1回
- 測定器や加速器機器を損傷させる
 - PXDを2024年5月から一時的にOFF

加速器/Belle IIが一丸となり、
この未知の現象の理解に取り組んだ



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

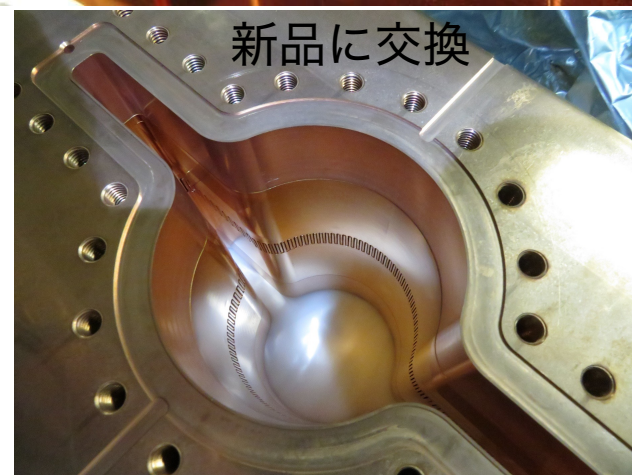
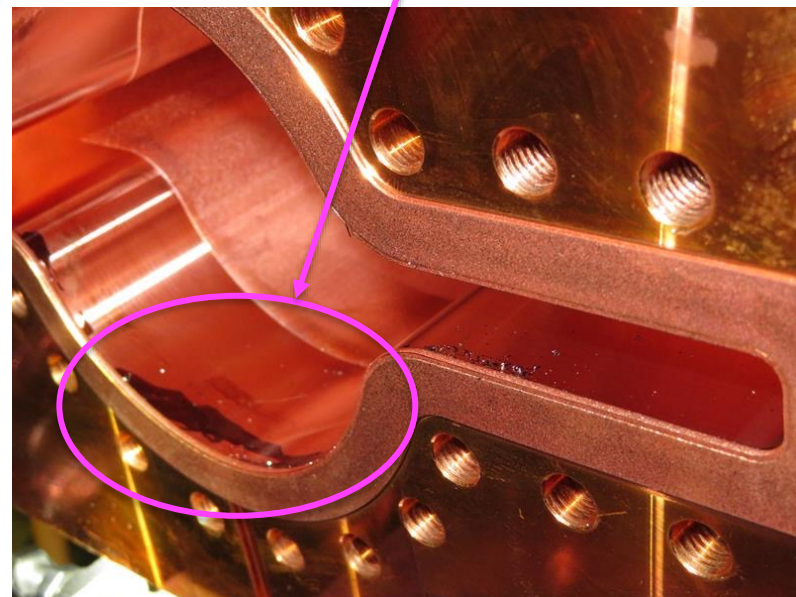
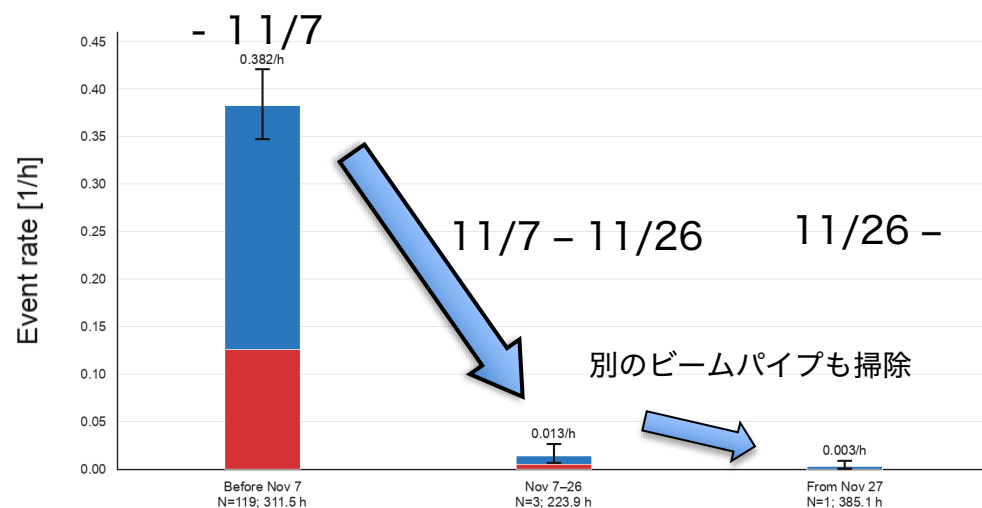
- 2024年11月にビームパイプを開けて内部確認

→ 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

2026年運転開始前: $\sim 600 \text{ fb}^{-1}$

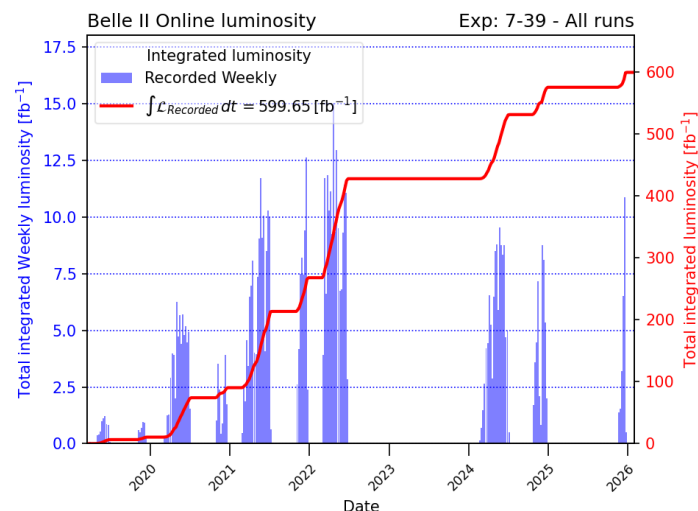
1/26 - 6/30の155日間のビーム運転

- 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 $> 5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 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

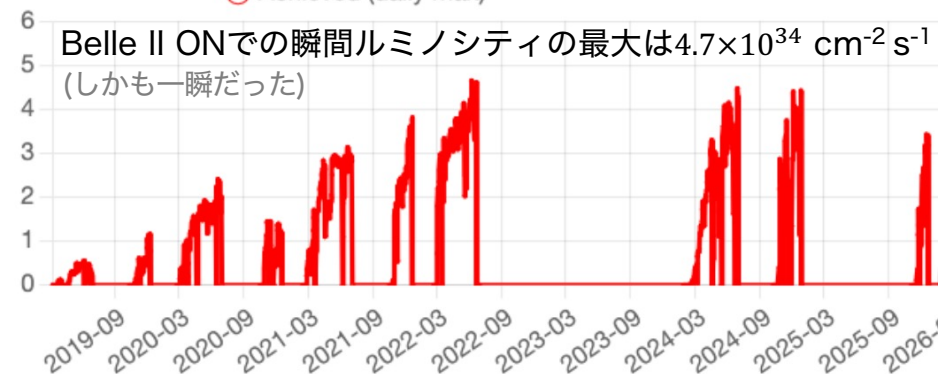
155日のうち、約8割物理運転、かつ加速器効率85%, data-taking eff 90%



2026年運転開始前での瞬間ルミノシティ

○ Achieved (daily max)

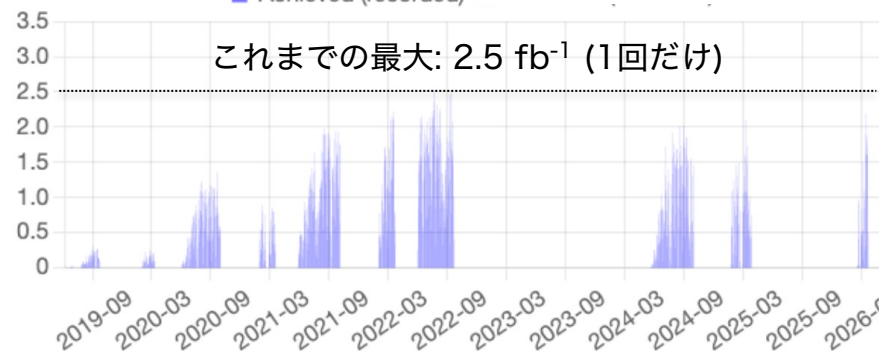
Belle II ONでの瞬間ルミノシティの最大は $4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
(しかも一瞬だった)



2026年運転開始前でのdaily int. luminosity

■ Achieved (recorded)

これまでの最大: 2.5 fb^{-1} (1回だけ)



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?)

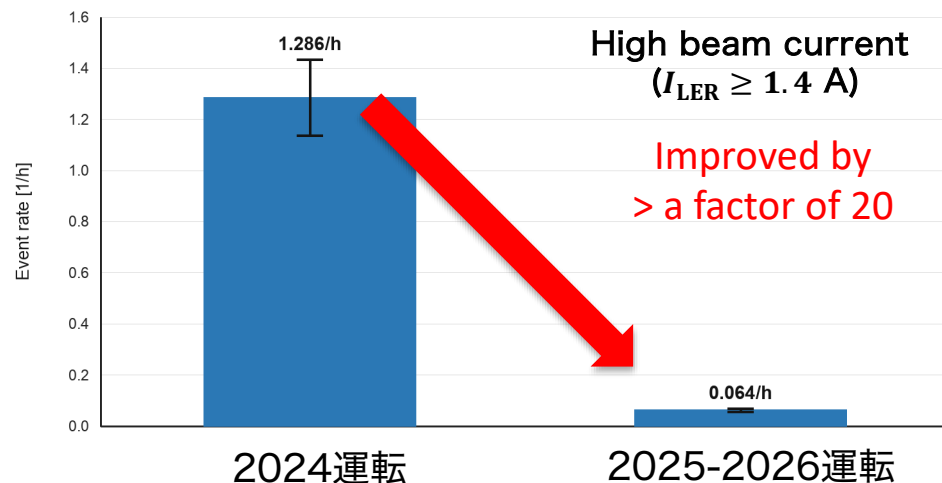
しかし、SBL対策や入射効率対策、運転調整の自動化など進んでいたもので希望あった
24時間休みなく実験。マラソン

SBL対策の効果

2024年運転 vs 2025-2026年運転

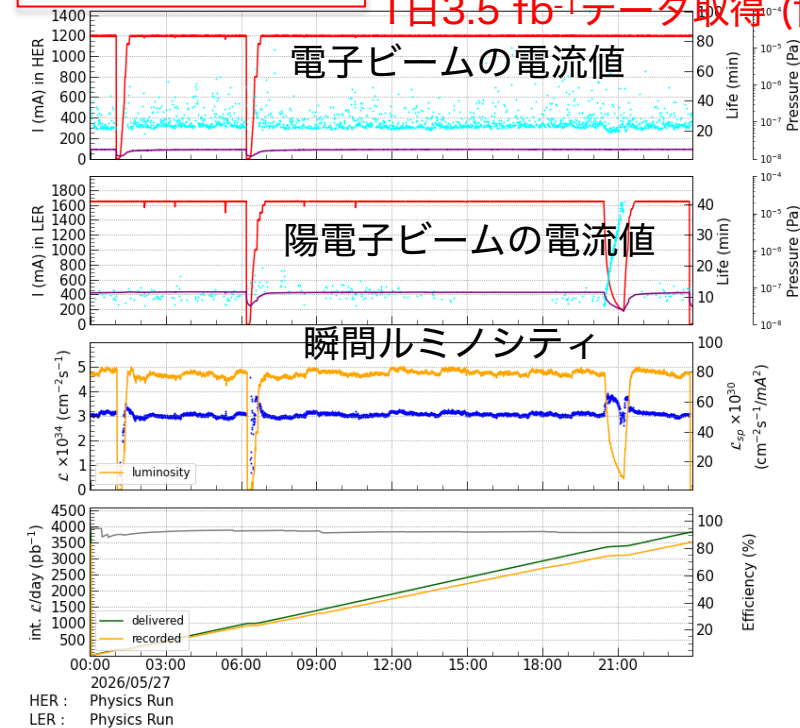
- ビームロスによるアボートが格段に減った
 - 1.29 /h → **0.06 /h** ($I_{\text{LER}} \geq 1.4$ A)
- 高電流で安定運転する時間が激増!
 - 58.3時間/200日 → **1886時間/192日**

ビームロスによる陽電子リングのアボート頻度



05/26 23:58:23 - 05/27 23:58:23, 2026 JST
 $\mathcal{L}_{\text{peak}} 5.021 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ @ 14:24:04 05/27
int. $\mathcal{L}/\text{day}$ 3498 / 3818 pb^{-1}
HER I_{peak} 1201 mA η_0 2151 β_x^*/β_y^* 55 / 9 mm
LER I_{peak} 1651 mA η_0 2151 β_x^*/β_y^* 55 / 9 mm

1日3.5 fb⁻¹データ取得 (世界記録)!



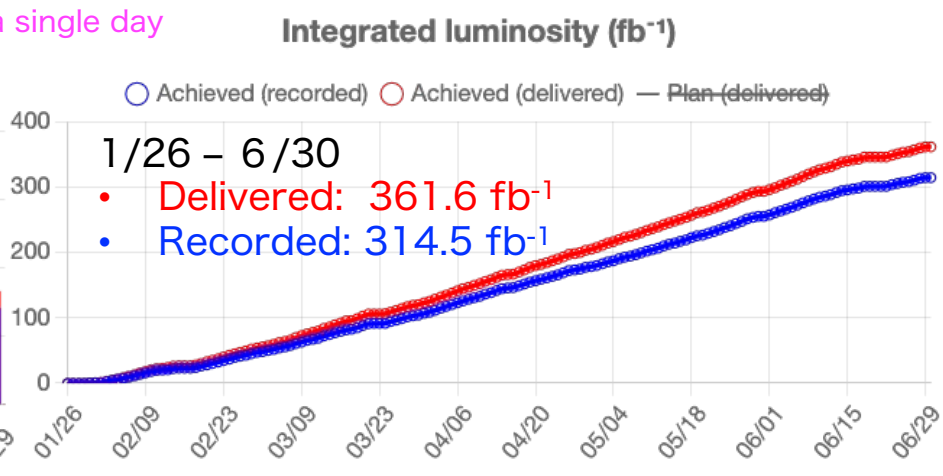
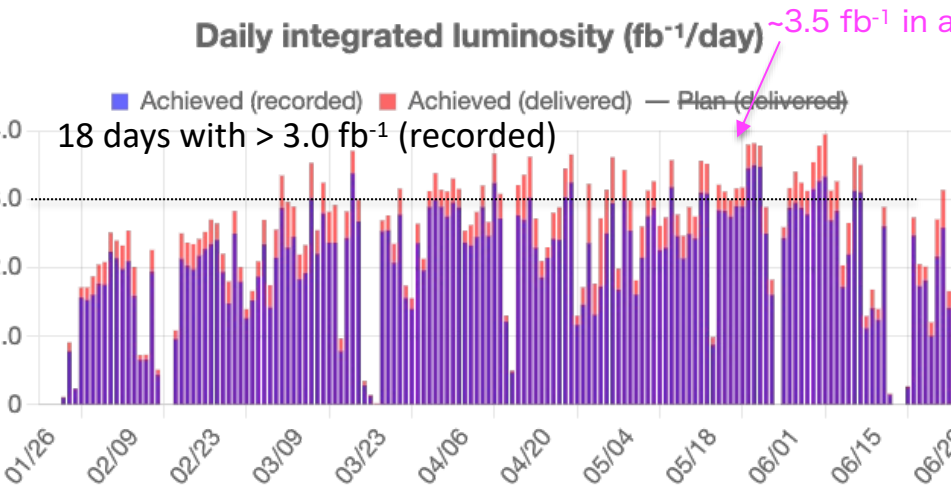
2026年運転

- 陽電ビームの電流値1.6-1.7 Aで安定運転可能に
- **$4.5 - 5.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 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

2026/9/2

2026年運転まとめ

c.f.
159.7 fb⁻¹ (2022運転)
103.6 fb⁻¹ (2024運転)



	Υ(4S)	Off-reso	10.75 GeV
Run1 (offline)	365.3 fb ⁻¹	42.7 fb ⁻¹	19.8 fb ⁻¹
2024abc (offline)	133.1 fb ⁻¹	18.3fb ⁻¹	0 fb ⁻¹
2025c (online)	24.0 fb ⁻¹	0 fb ⁻¹	0 fb ⁻¹
2026ab (online)	287.1 fb ⁻¹	27.4 fb ⁻¹	0 fb ⁻¹
Total	809.5 fb ⁻¹	88.4 fb ⁻¹	19.8 fb ⁻¹

c.f. 711 fb⁻¹ (Belle)

Bele II surpassed Belle Y(4S) dataset

Press release: <https://www.kek.jp/en/press/202606051400>

Belle IIが世界最大のΥ(4S)のデータを蓄積

より精密な測定で標準模型を超える新物理の探索へ

加速器研究施設

素粒子原子核研究所

#研究成果

公開日 2026/06/05

本研究成果のストーリー

Mission

KEKの基幹プロジェクトであるSuperKEKB加速器におけるBelle II実験は、標準模型を超える新しい物理法則を探るために、電子・陽電子対消滅によるΥ(4S) (ウプシロン・4S) 共振での膨大な数のB中間子のデータの蓄積します。そのために、さまざまな課題を解決して、世界最高性能を絶えず追求してゆきます。

Achievements

加速器の精密な運転調整を着実に進め、前身であるKEKBにおけるBelle実験よりも大幅に高いリミノシティでの安定した運転を実現しました。このことにより、B中間子崩壊の研究に必要なΥ(4S) 共振エネルギーでのデータセットについて、Belle実験のデータ量を超える世界最大のデータを蓄積しました。

Meaning

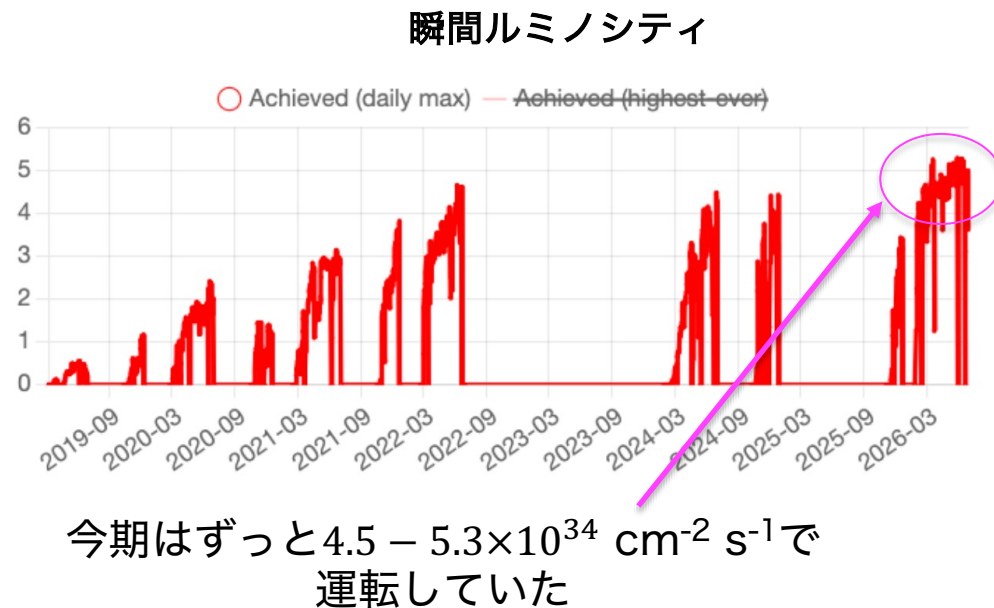
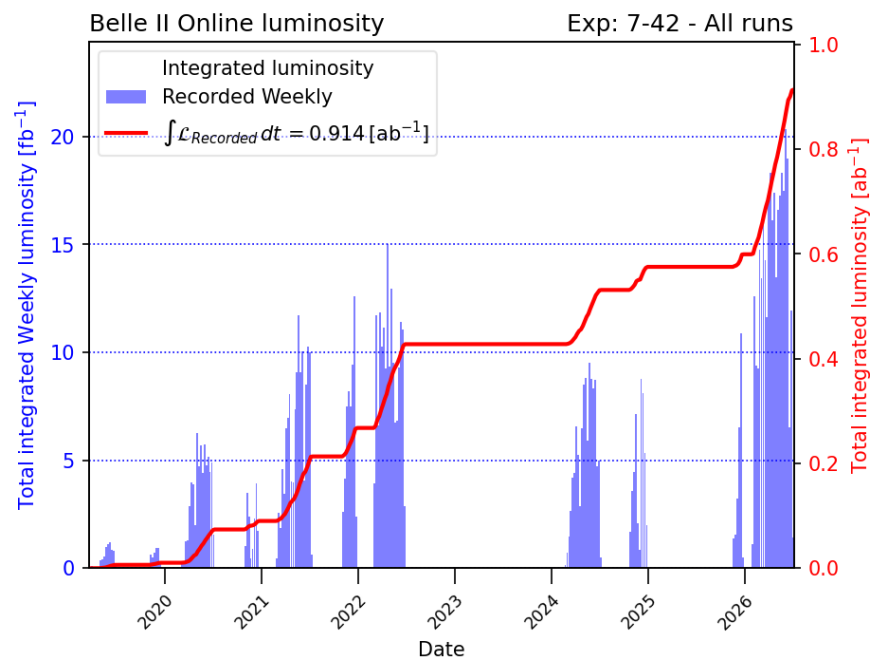
世界最大のデータセットを手に入れたことで、Belle IIは新たな時代への一歩を踏み出しました。電子・陽電子対消滅の強みである「クリーンさ」を最大限に活かし、より精密な測定を行い、標準模型を超える新物理の探索を進めます。

KEKの Belle II 実験が蓄積するΥ(4S)のデータがBelleを超えて世界最大に！Υ(4S)共振エネルギーでの電子・陽電子対消滅から得られるB中間子データのクリーンさを最大限に活かし、標準模型を超える新物理の探索を次の段階へと進めます。

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: $5.3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



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

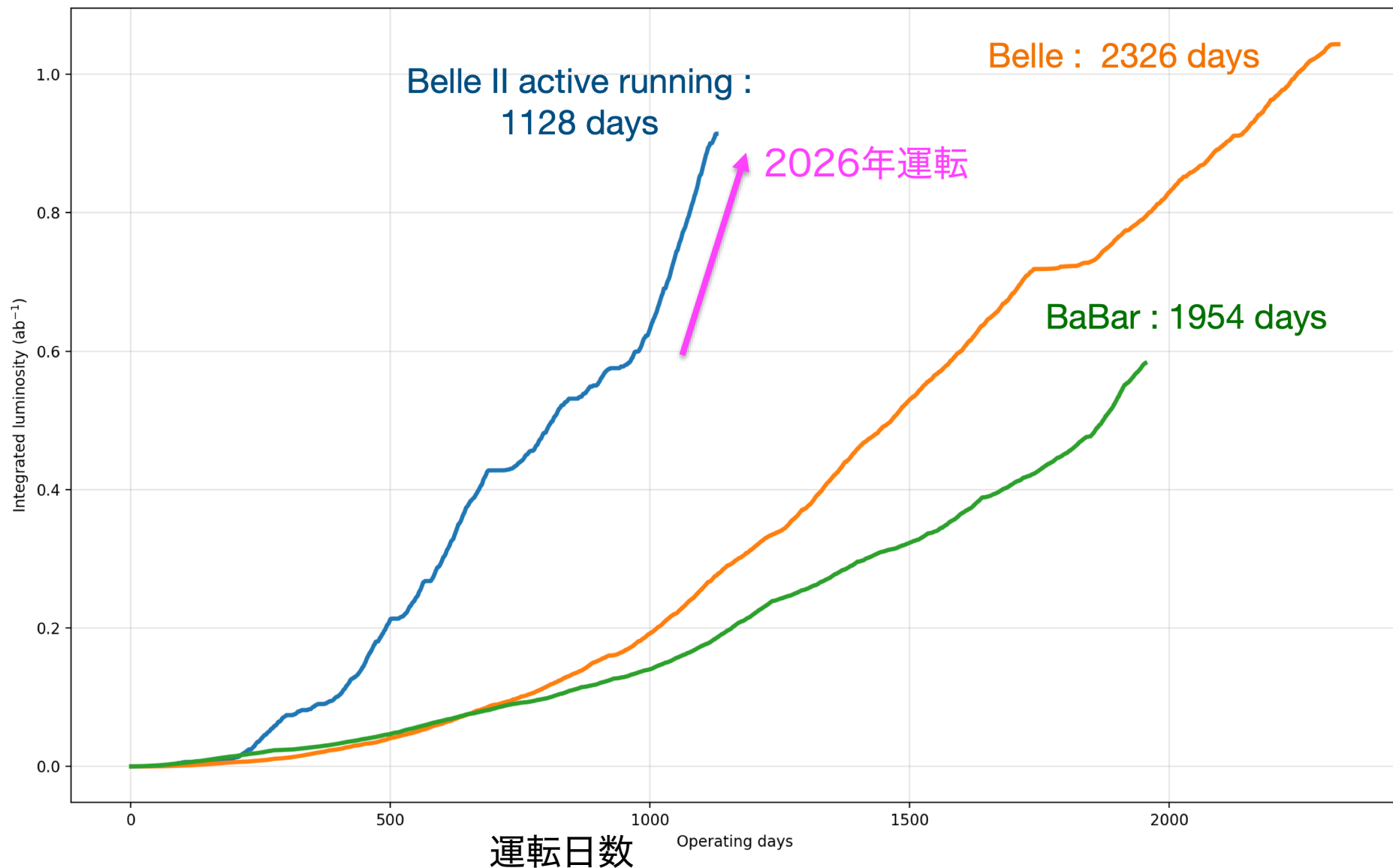


> 3.0 fb⁻¹/dayが標準のレベルまで到達

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



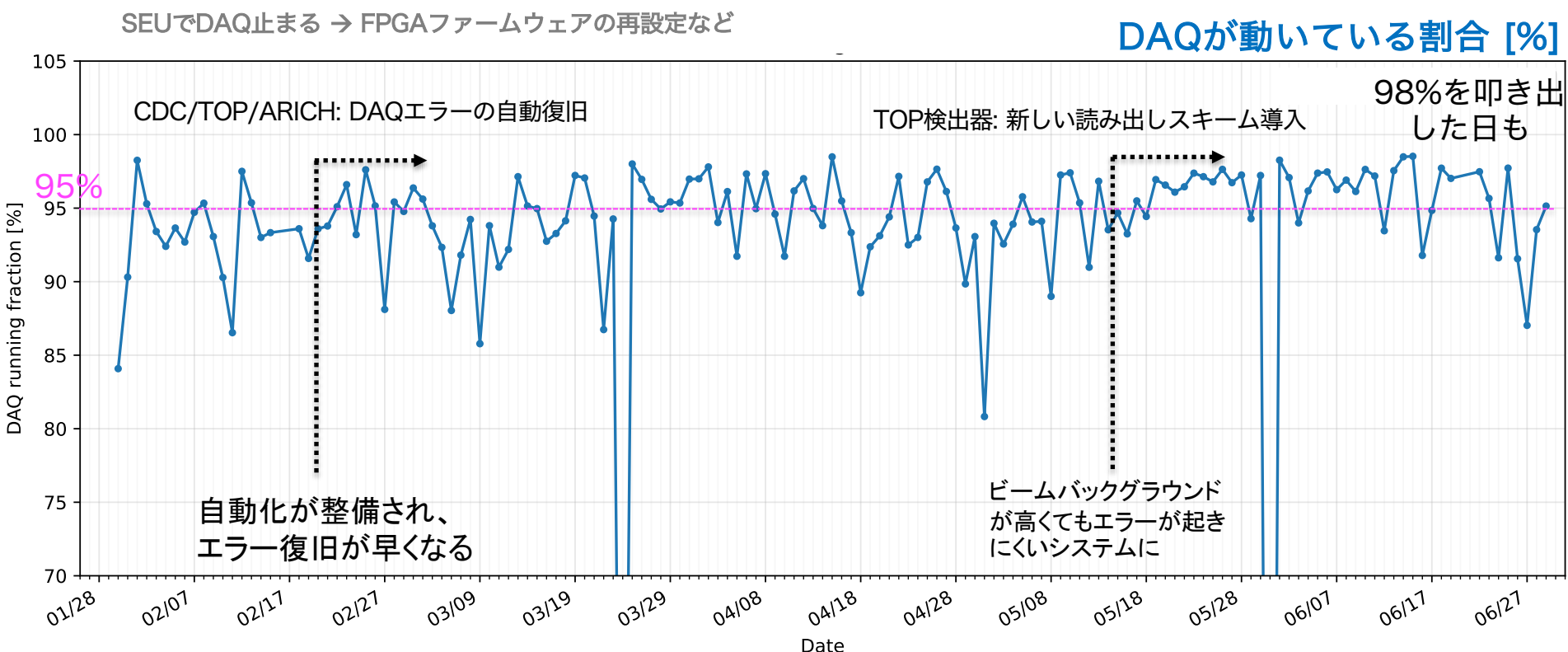
Belle II測定器の安定性向上も寄与

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

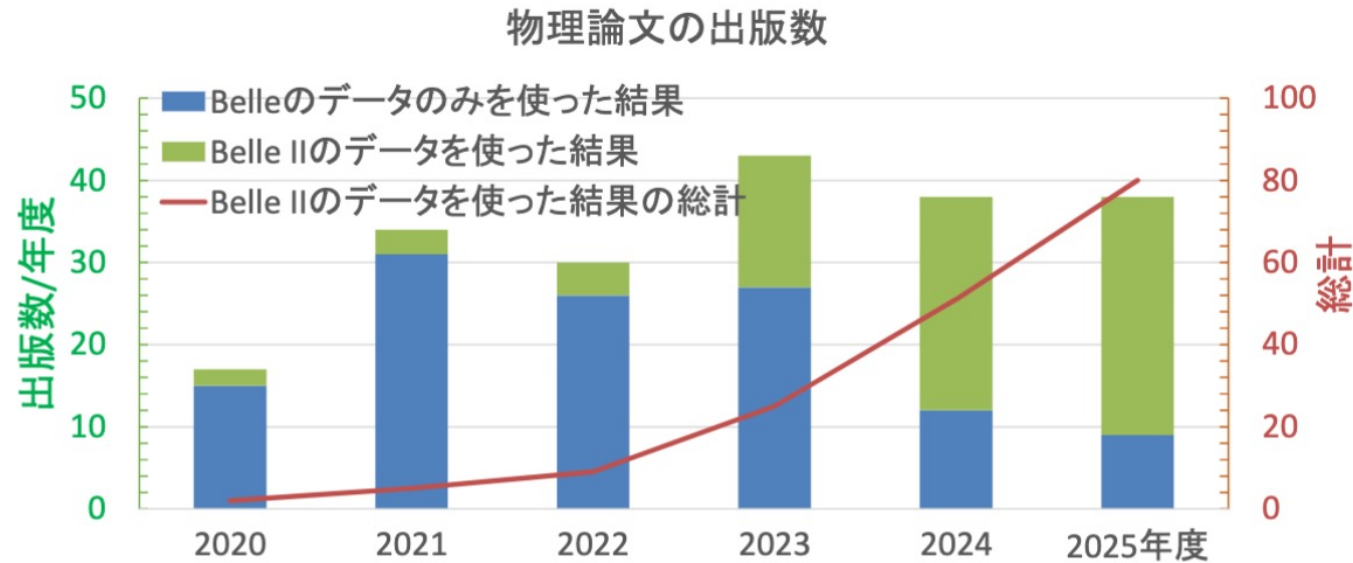
- 放射線により読み出し回路が異常動作して、DAQが止まること → 実験屋の腕の見せ所



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

SuperKEKB/Belle II実験の展望 次のランに向けて

物理成果も着実に増やしている



Belle IIのデータを使った80の物理論文のうち、
引用数TOP10% 16報、TOP1% 1報

- 1% Evidence for $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ decays
- 4% Search for axionlike particles produced in e^+e^- collisions at Belle II
- 5% Search for $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ decays using an inclusive tagging method at Belle II
- 5% Test of lepton flavor universality with a measurement of $R(D^*)$ using hadronic B tagging at the Belle II experiment

ほとんどの結果が2022年まで取得したデータでの解析結果

これからデータを増やした解析結果が増えてくる予定: 914 fb⁻¹の結果もそのうち！

2027年運転

予定: 1月から6月末まで運転予定 (150-160日間?)

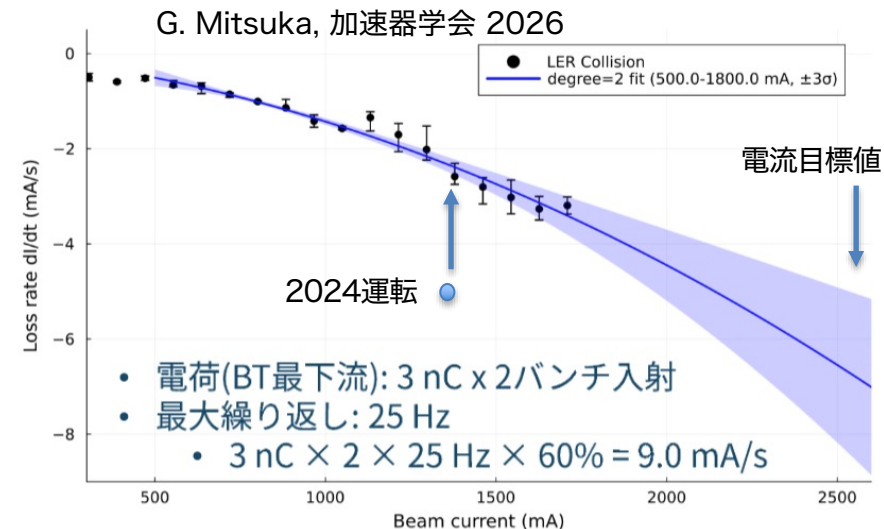
- 達成したことは引き継いで更なる性能向上へ!
 - 瞬間ルミノシティの記録も更新. **目指せ $1 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$**
 - (私の意見) $314 \text{ fb}^{-1} \rightarrow 500 \text{ fb}^{-1}$ は取りたい

解決すべき課題の例: 陽電子ビームの寿命

- 高電流で急にLifeが短くなる. Loss rate大
→ 毎秒失われるビーム電流を補充するので精一杯

検討事項

- ビームガス散乱がまだ寄与大 → 真空度の改善
- 6極最適化における力学口径大
- 陽電子電荷量の向上 (機械学習による軌道最適化)
- ..

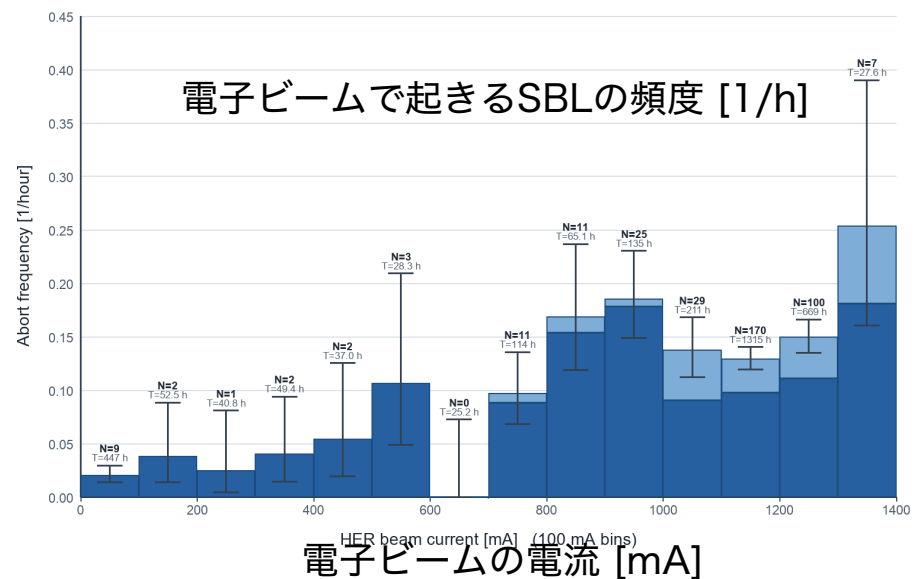
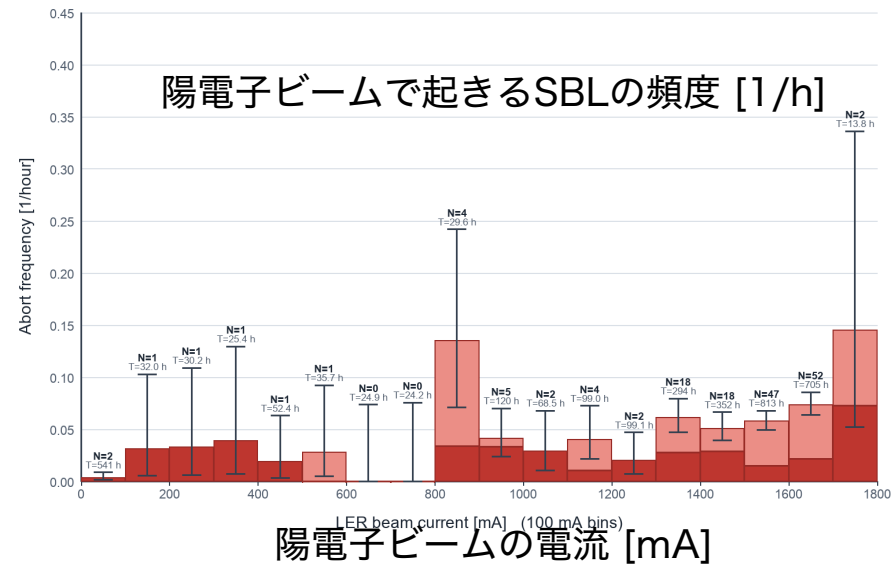


AI/MLタスクフォースチームを立ち上げ、最適化等に貢献できるよう取り組んでいる

リーダーは古賀さん

SBLの更なる対策

SBLの頻度は減ったが、まだ十分ではない！



陽電子ビームでのSBLもまだ残っている。ダストを取り除きれていない？他の原因？

電子ビームでのSBLの原因が完全に理解できていない

- アバート頻度も高電流で非常に高い。安定運転を阻害している
 - バンチの振動データに特徴あり. Ion trapping? 詳細調査中。頻度を減らせる可能性十分にある

SBL TFを立ち上げ、来期運転までに解決できるように取り組んでいる

リーダーは私

ピクセル検出器の現状と展望

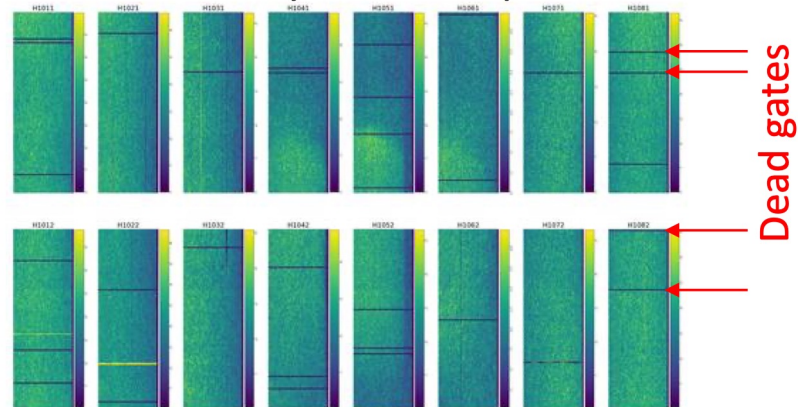
2024年にSBLでPXDの一部が損傷

- 2%ほどのgateが損傷
- ASICの暗電流が増加
 - PXD ladderの温度が上がり、deformationの危険

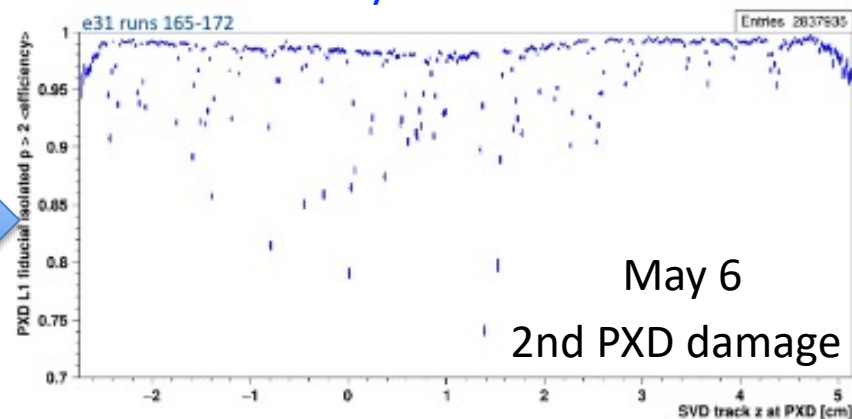
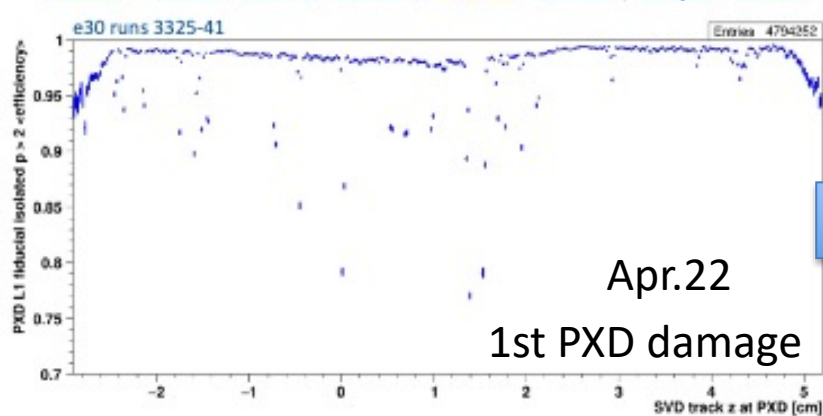
→ 20 ladderのうち2 ladderの電圧を下げた

SBL頻発のため、PXDを一時OFF (2024, 5/6 -)

PXD Layer 1 hit map



ピクセル検出器のモジュールのhit efficiency



SBLの頻度は減ってきているが、ONにしてデータを取りたいが。。

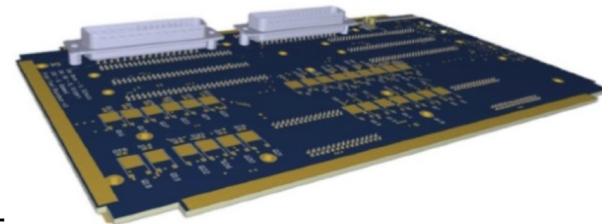
- 1週間に1回しか発生しなくても毎回PXD損傷してたら問題。しかし、頻度ゼロは現実的でない

→ SBLが発生してもPXDを守れる機構が必須！

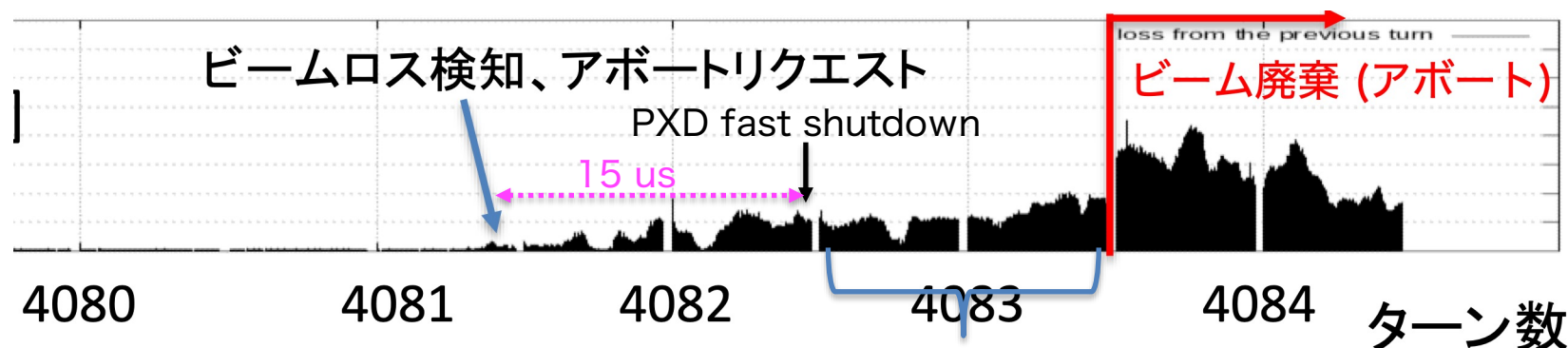
PXD早期シャットダウン機構

PXDの電源をすぐに落とす: 200 us $\rightarrow$ ~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 $\rightarrow$ 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) $\rightarrow$ 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 $\rightarrow$ 現状でもある程度の放射線をPXD ONで浴びずに済む



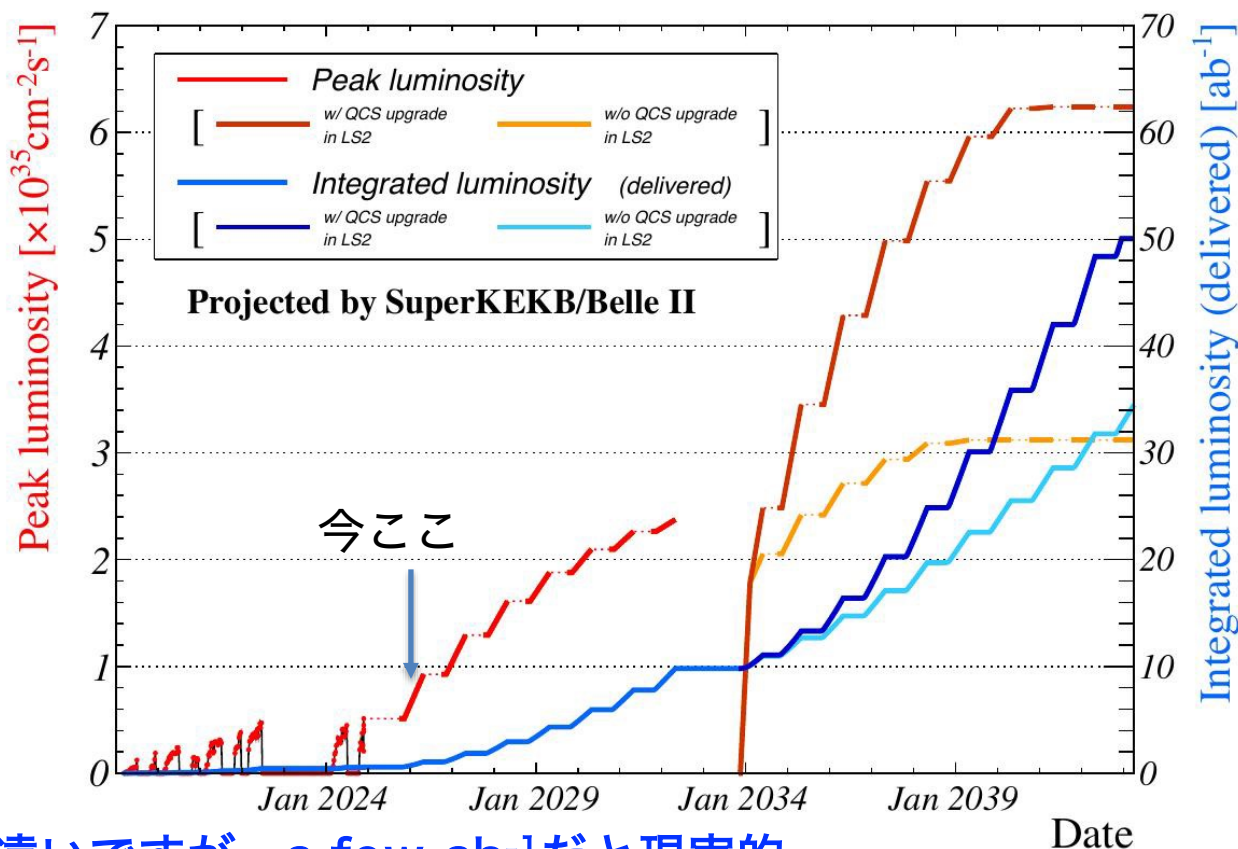
PXD OFFなので損傷のリスクを低下できる

**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
 $\rightarrow$ 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 $7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \rightarrow \sim 630 \text{ fb}^{-1}$ (5ヶ月運転)

データ量

- 平均 $8 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \rightarrow \sim 720 \text{ fb}^{-1}$ (5ヶ月運転)

914 $\text{fb}^{-1} \rightarrow 1500 \text{ fb}^{-1} \rightarrow 2XXX \text{ fb}^{-1}$

- 平均 $1 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \rightarrow \sim 900 \text{ fb}^{-1}$ (5ヶ月運転)

やるよ!

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)

電子と陽電子の衝突

電子 ← 陽電子

B中間子対等の生成と崩壊

$\bar{B}^0$ B^0 測定したい物理過程

娘粒子の検出

$B^0 \rightarrow D^{*-} \tau^+ \nu_\tau \rightarrow \pi^- K^+ \nu_\tau$
 $B^0 \rightarrow \bar{D}^0 \pi^0 \rightarrow \pi^- \pi^0$
 $B^0 \rightarrow \pi^- \gamma$
 $B^0 \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

崩壊事象の再構成

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

現状と展望を話そうと思ったら加速器の話ばかりになりました、すみません。

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 → この後の物理講演で
- 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で議論できるように！

私見

SuperKEKBの技術は将来の電子陽電子加速器に必須

FCCee, CEPC, STCF ..

ここでの技術開発を進めていき、将来に繋げる責任もある

皆様のサポート、どうぞよろしくお願いいたします





Backup

電流増加の課題

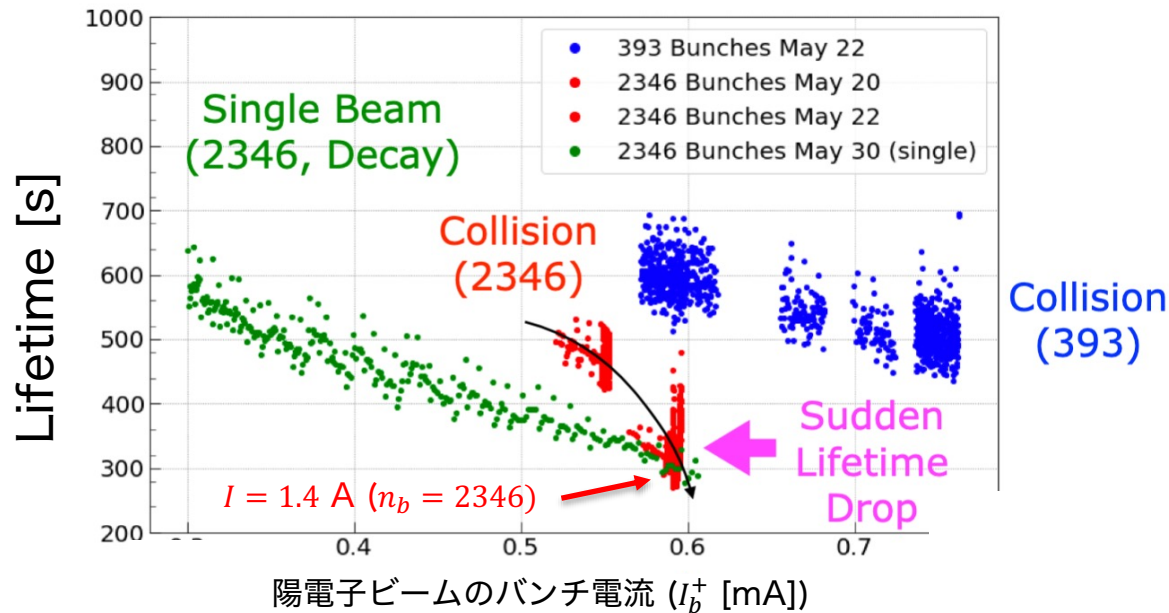
陽電子ビーム: 高電流で急にLifeが短くなる

- 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

2024年運転

Lifetime VS Bunch Current



なぜここまでLifetimeが短いかわ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..