

SuperKEKB/Belle2 実験の Luminosity

16–19.Feb.2025

第31回ICEPP シンポジウム @ 志賀高原

中村 勇/高工研

第13回高エネルギー物理春の学校 2025



- 於 ロワジュールホテル豊橋 (愛知県豊橋市藤沢町) **琵琶湖を離れての開催です**
- 2025年5月22日(木) — 24日(土) 2泊3日
- 今年の講師
山崎雅人(理論, 東京)、大谷航(測定器, ICEPP)、古賀太一郎(Belle II, KEK)、増渕達也(ATLAS, 大阪)
- 今年のOB/OG 講演
西村昇一郎(Muon, KEK, 3回)、谷川輝(Neutrino, KEK, 3回)
- 講義、講演、ポスター、学生参加型パネルディスカッション
- <http://www-conf.kek.jp/hepss2025/>
- 参加申し込みの締め切り **4月18日(金)**

序 Luminosity とは

- 重心系エネルギー \sqrt{s} と共に加速器の最重要パラメター
- ある物理事象の生成数は断面積とルミノシティを使って

$$N = \sigma(s) \int \mathcal{L} \cdot dt$$

- \mathcal{L} は瞬間 (instantaneous) ルミノシティと呼び

$$\mathcal{L} = \frac{N_+ N_- f}{4\pi\sigma_x^* \sigma_y^*} R_L \propto \frac{I_{\pm} \xi_{y\pm}}{\beta_y^*} \quad (\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$$

- ビームサイズを小さくする (ベータを絞る、エミッタンスを小さくする)
- 衝突する粒子数を多くする (電流を上げる)
と高くなる
- 本講演では**実験事実**と**平易な計算**を用いて SuperKEKB の Luminosity を解説します
 - SuperKEKB/Belle2 の Operation をしている人にとっては Trivial な事です

SuperKEKB 加速器

KEK と筑波山



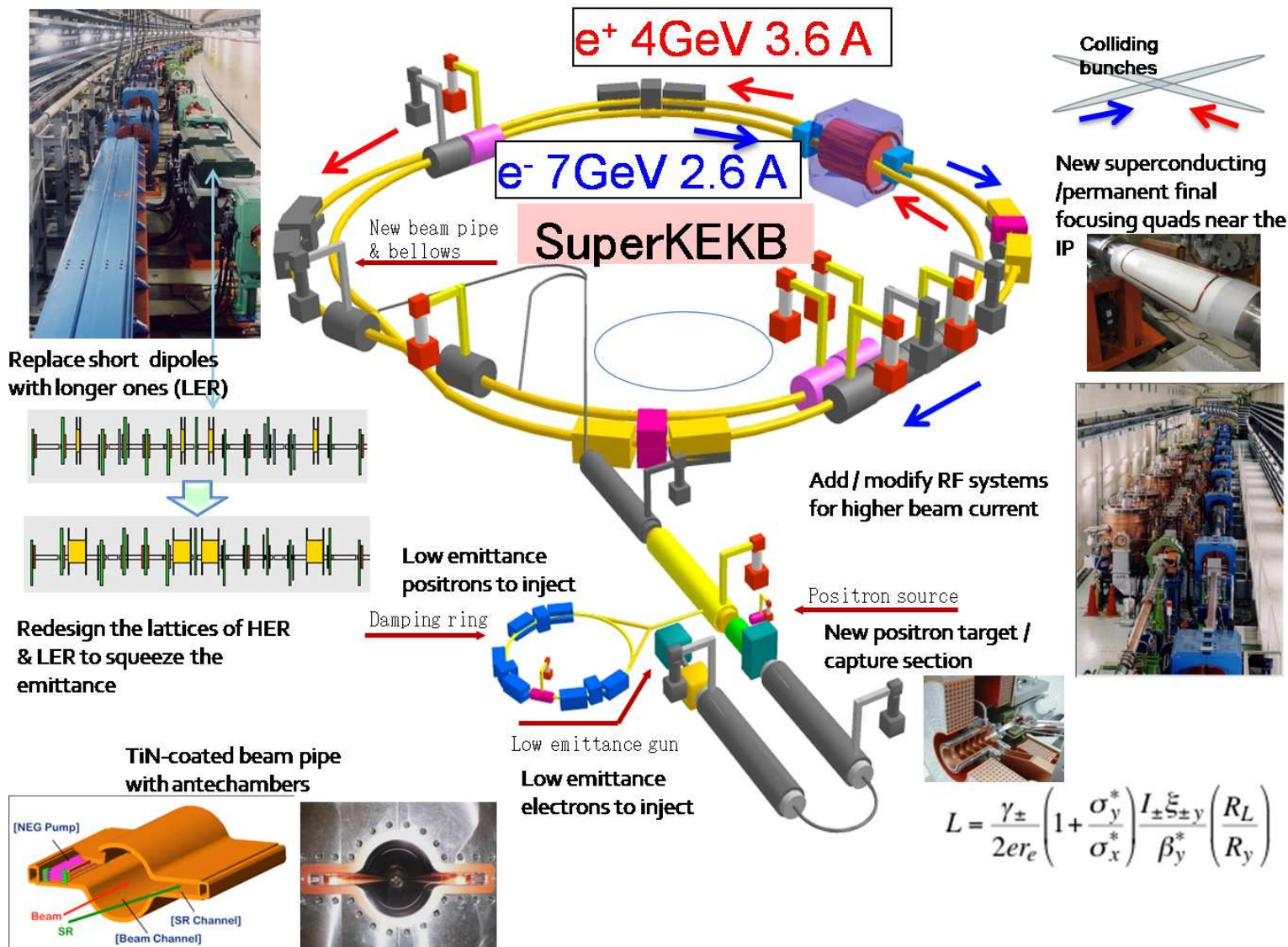
2023 年 5 月 24 日 撮影

KEK と富士山



撮 2018 年1 月12 日朝 於 不動峠

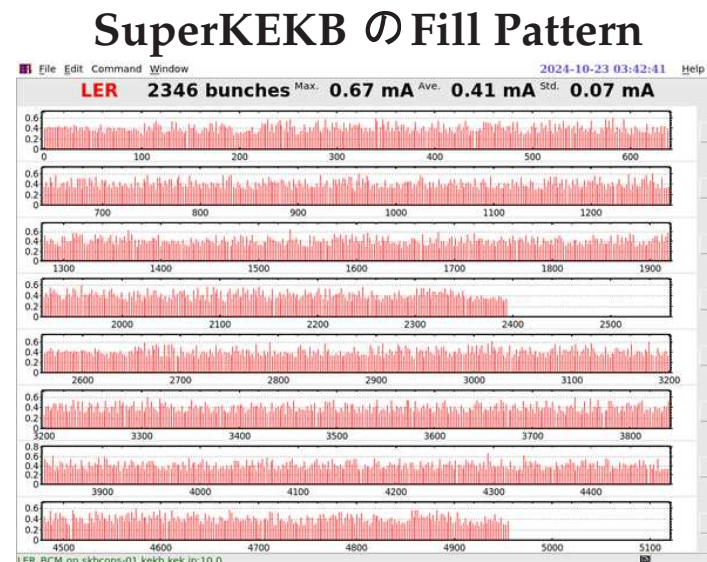
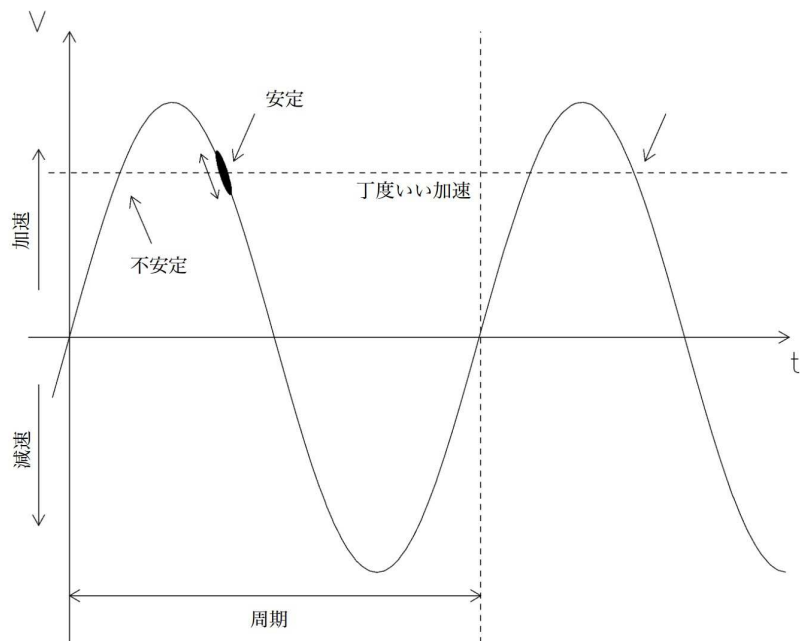
The SuperKEKB Accelerator



- 極限までビームサイズを小さくする (nano-beam scheme)
- 衝突運転中に入射し大電流を維持できる (Top-up 入射)

バンチ構造

- 加速器中の粒子はRF バケツ内に塊(バンチ) となって周回する



- SuperKEKB と LHC のバンチ構造

	RF (MHz)	周長 (km)	バケツ数	バンチ数	バンチ間隔 (ns)
SuperKEKB	508	3	5120	2346	4
LHC	400	27	35640	2808	25

- SuperKEKB は既に最大(目標)バンチ数(2346)で運転中
- 衝突はバンチ毎に独立 $\Rightarrow \mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{single}} \times N_{\text{bunch}} (= 2346)$

Specific Luminosity (1)

- 電子一個あたり？の衝突性能的なもので、加速器の基本性能

$$\mathcal{L}_{\text{sp}} \equiv \frac{\mathcal{L}}{I_{b+}I_{b-}N_b} = \frac{\mathcal{L} \cdot N_b}{I_+I_-} \quad [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}/\text{mA}^2]$$

I_b :バンチ電流 N_b :バンチ数

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{sp}} \cdot I_{b+}I_{b-}N_b = \mathcal{L}_{\text{sp}} \cdot \frac{I_+I_-}{N_b}$$

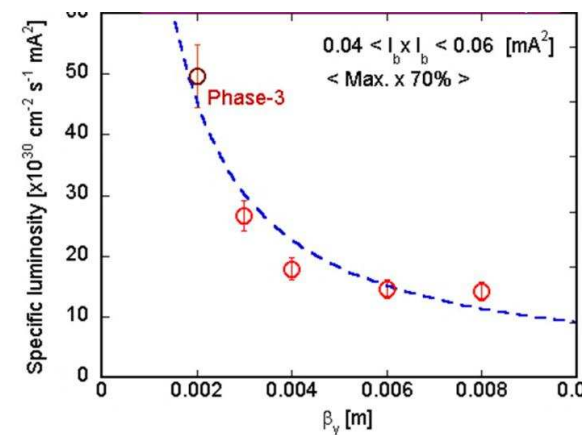
- \mathcal{L}_{sp} を決めるもの

- β_y^* : ビームの大きさのパラメーターで、SuperKEKB では、理想的には、

$$\mathcal{L}_{\text{sp}} \propto \frac{1}{\beta_y^*} \leftarrow \frac{1}{\sqrt{\beta_y^* \epsilon_y}} \quad (\text{次頁の図へ})$$

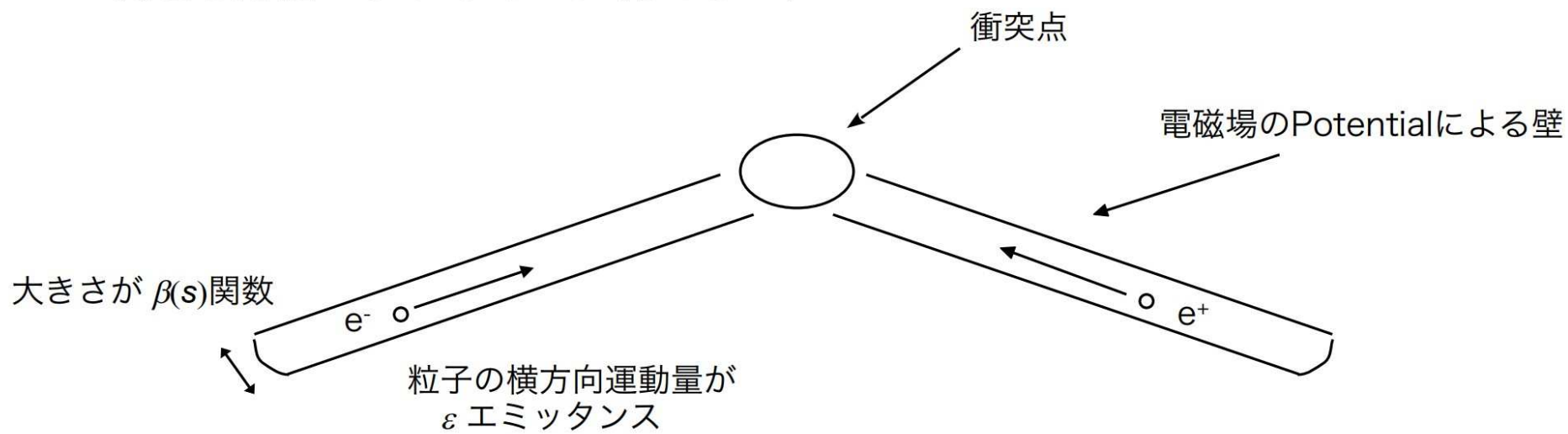
- Beam-beam blow-up

- 理想的には \mathcal{L}_{sp} はバンチ電流によらないが、実際は相手ビームの電荷でビームサイズが増大する
- 結果、バンチ電流が増えると \mathcal{L}_{sp} は低下する



Specific Luminosity (2)

ビーム軌道を雨樋のようなものに例えると、



$$\text{衝突確率 } \rho = 1/\sqrt{\beta\epsilon} \propto L_{sp}$$

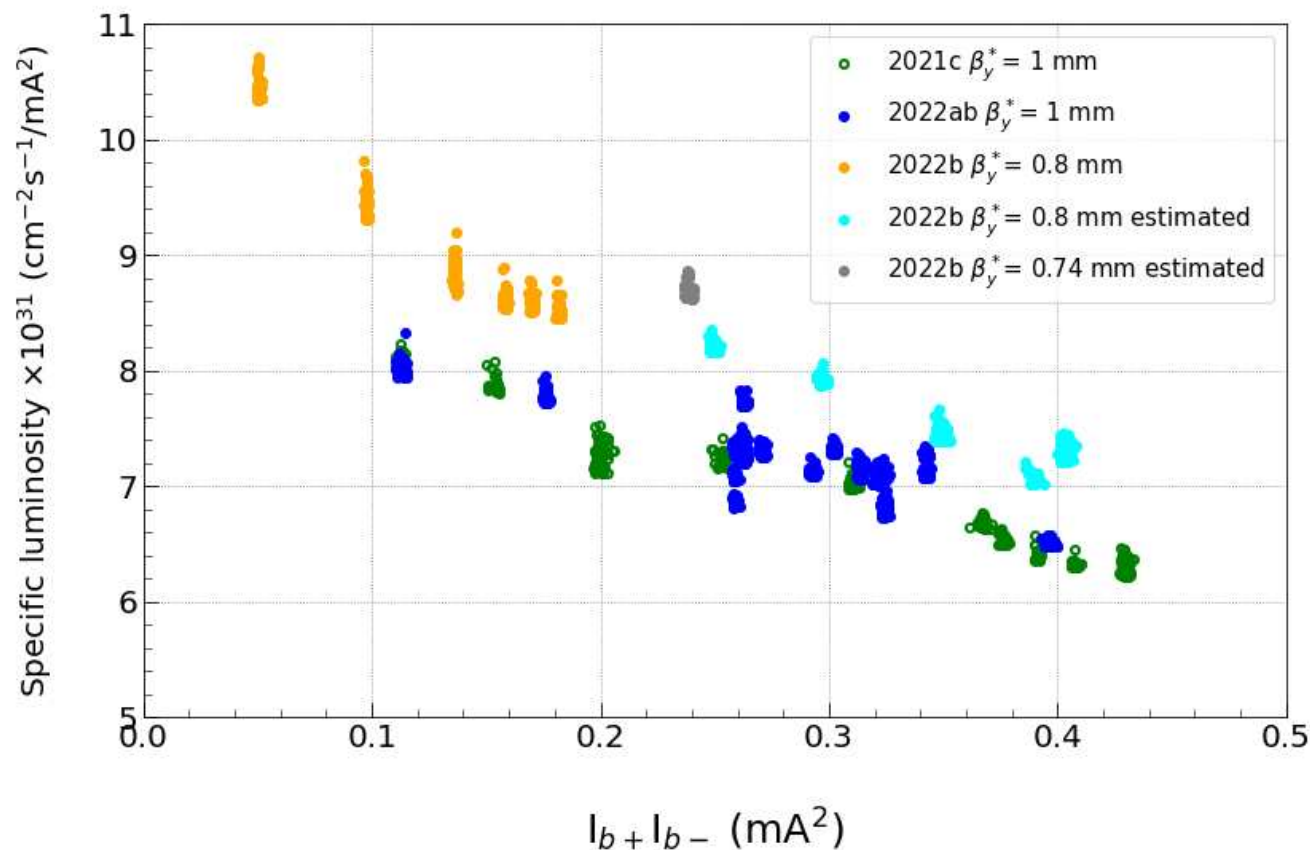


確率 ρ で衝突するとき
 $N \times N$ 個だと
確率は ρN^2



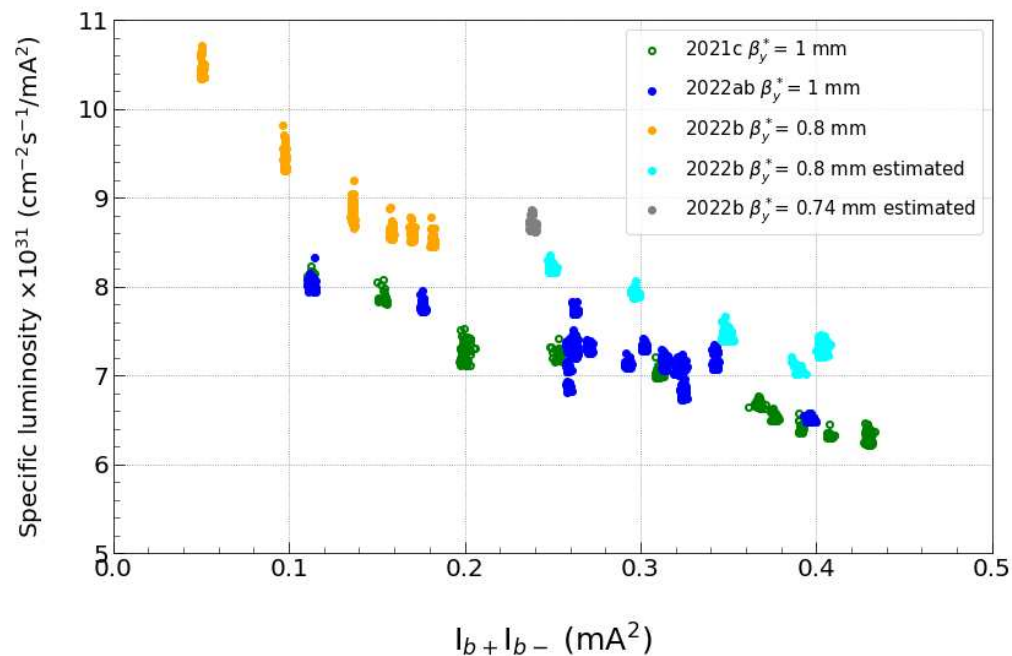
Specific Luminosity (3)

2022 年の Specific Luminosity



- β_y^* が小さいと \mathcal{L}_{sp} は上がっているが、期待程ではない
- バンチ電流積が増えると \mathcal{L}_{sp} が下がり、Beam-beam blow-up が起きている
- この図からバンチ数(蓄積電流)を決めると Luminosity が決まる

Specific Luminosity (4)



- 例えば $\beta_y^* = 1$ mm のときバンチ電流積 0.3 mA^2 とすると、 $\mathcal{L}_{\text{sp}} = 7.4$ と読める

電子と陽電子の電流は $I_{b-} = 0.8 \times I_{b+}$ の関係で運転しているので

$$I_{b+} = \sqrt{0.3/0.8} = 0.61 \text{ mA}, I_{b-} = 0.8 \times I_{b+} = 0.49 \text{ mA}$$

陽電子の蓄積電流 $I_+ = 1400 \text{ mA}$ とすれば、

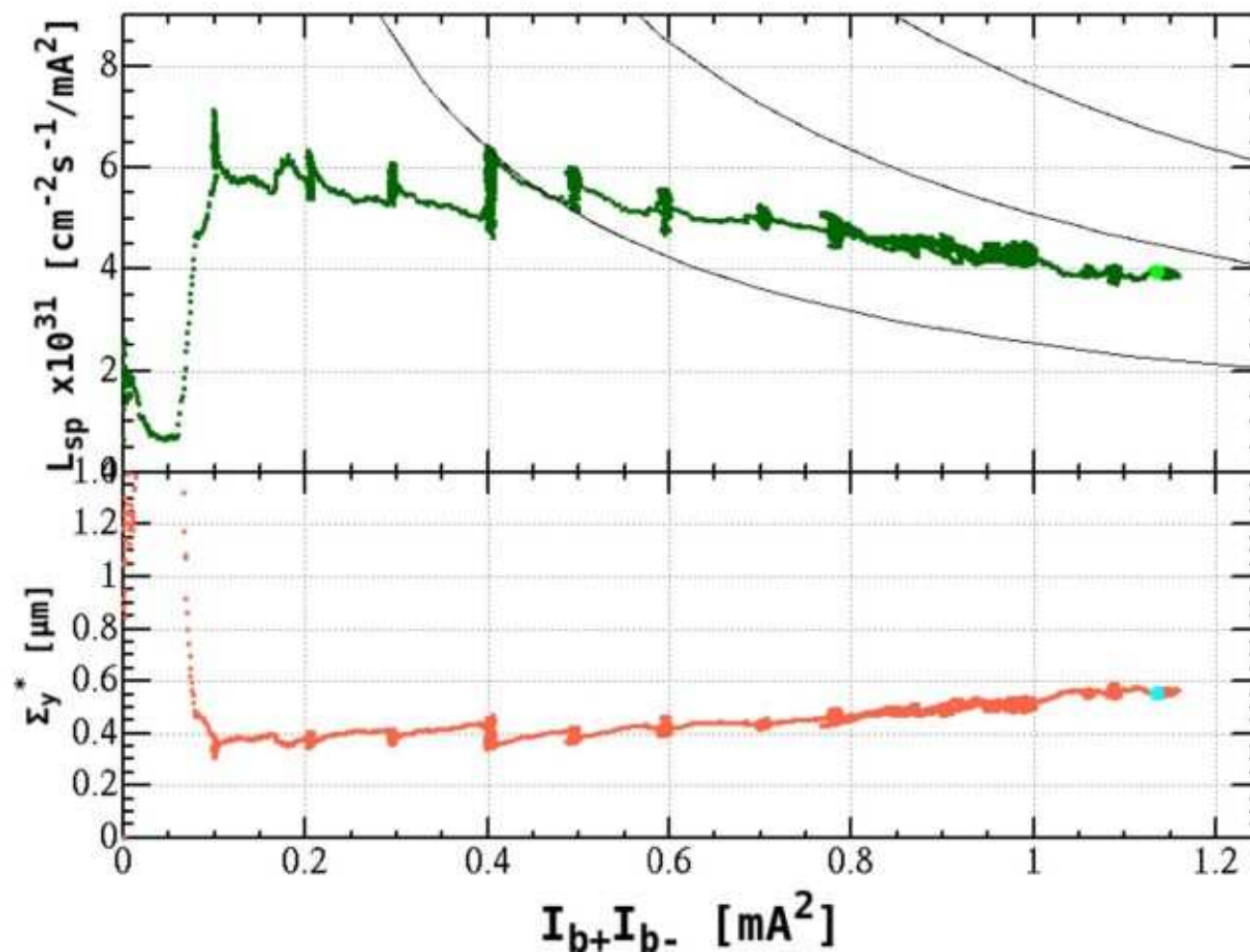
バンチ数 $N_+ = 1400/0.61 = 2295 (< 2346)$ となる

このとき Luminosity は

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{sp}} \cdot I_{b+}I_{b-}N_b = 7.4 \times 0.3 \times 2295 = 5094 \times 10^{31} \text{ となる}$$

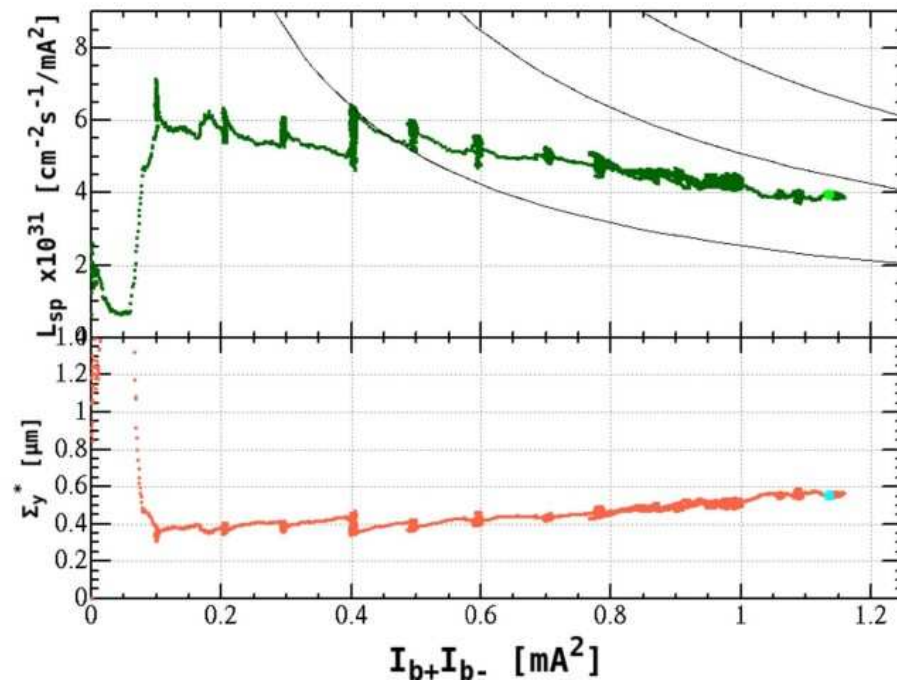
Specific Luminosity (5)

2022 High Bunch Current Study ($\beta_y^* = 1\text{mm}$) の結果




- バンチ数を減らして、バンチ電流が高いところでの振る舞いを調べた結果
- $I_{b+}(I_{b-}) = 1.2(1.0)$ mA 程度までは大丈夫そう

Luminosity Projection (1)

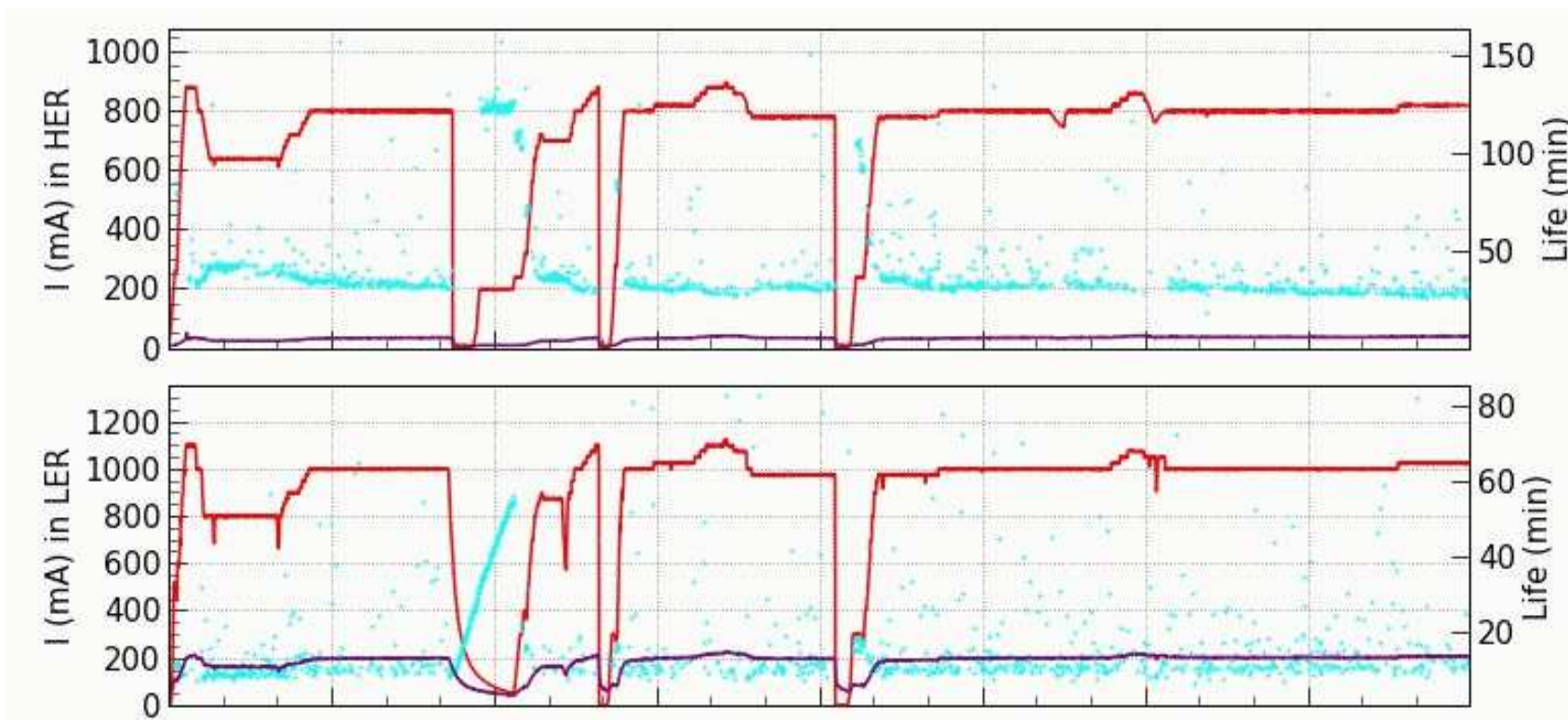


- 簡単な算数でどこまで行けるか確かめる
 - $N_b = 2346$ 、 $I_+(I_-) = 2800(2240)$ mA とすると
 - $I_{b+}(I_{b-}) = 1.2(0.96)$ mA
 - 図から、 $I_{b+}I_{b-} = 1.14$ のとき、 $\mathcal{L}_{sp} = 4$ と読むと
 - $\mathcal{L} = 4 \times 2800 \times 2240 / 2346 \Rightarrow 1.07 \times 10^{35}$
- 2024 年の目標はこれを達成することだったが、
 - 電流は少し上がったが、ビームサイズが大きくなってしまい、 \mathcal{L} は微増

Luminosity Projection (2)

- 到達可能 Luminosity の纏め
 - $\beta_y^* = 1 \text{ mm}$ 、 $N_b = 2346$ 、 $I_+(I_-) = 2800(2240) \text{ mA}$ で 1×10^{35}
 - $\beta_y^* = 0.8 \text{ mm}$ までは達成されているので、原理的には 1.3×10^{35} には到達できる
 - $\beta_y^* = 0.5 \text{ mm}$ まで絞れば 2×10^{35} も到達可能 (目標は $\beta_y^* = 0.3 \text{ mm} \Rightarrow 3.5 \times 10^{35}$)
 - 個人的には 2×10^{35} に到達すれば、 10 ab^{-1} は貯められるから、成功と言いたい
 - (例) HyperK の Fiducial Volume は SuperK の 8 倍
 - 2×10^{35} 、 10 ab^{-1} は共に Belle の 10 倍
- 
- 小蓄積電流で性能が証明されているので問題は電流を増やせるか
 - 大電流を安定に保てるか? \Rightarrow SBL (ダストによる急激なビームロス)
 - ビーム寿命と入射能力の兼ね合い

Beam Life vs Injection (1)



- LER(e⁺) の寿命はとても短い(現在~10分)
- 寿命を決めているのは Touschek 散乱
- $\tau_{\text{Touschek}} \propto (\text{バンチ電流})^{-1}(\text{ビームサイズ})$
- β_y^* を絞るとさらに寿命(の Touschek 成分) は短くなる
- Top-up 入射の能力が足りないと、寿命で減る分を補えなくなり、電流が保てない

Beam Life vs Injection (2)

- 寿命10分のとき、毎秒失われる割合は

$$1 - e^{-\frac{1}{600}} = 0.167\%$$

蓄積電流1 A なら1秒で1.67 mA 減少する

- SuperKEKB は一周3 km(10 μ s) なので、毎秒 10^5 回周回する
よって、1 C の電荷が蓄積されていると、蓄積電流は 10^5 A
毎秒1.67 mA 減少するなら、毎秒16.7 nC 継ぎ足さないと電流が維持できない
- 一方、入射の速度は
Q:入射器の電荷 ε :入射効率 N_b :同時入射数 f_{inj} :入射頻度として、

$$Q \times \varepsilon \times N_b \times f_{inj} \sim 2 \times 0.6 \times 1.5 \times 23 \sim 40 \text{ nC/s} > 16.7 \text{ nC/s}$$

- 2.8 A 寿命6分だとおおよそ80 nC/s 必要で、目標の4 nC でもぎりぎり
- beta を絞ると、バンチ電流を上げると寿命は短くなり、入射には限界(200 nC/s)があるので、ビーム寿命が蓄積電流、即ちLuminosity の上限を決める
- 現在のところ、上限は $1-2 \times 10^{35}$ 程度と見積もられている

纏め

- Luminosity は大事
- SuperKEKB のこれまでの運転実績と Study の結果からわかること
 - $\beta_y^* = 1 \text{ mm}$ での High Bunch Current Study の結果から電流さえ積みれば
 - $\beta_y^* = 1 \text{ mm}$ 、 $N_b = 2346$ 、 $I_+(I_-) = 2800(2240) \text{ mA}$ で、 1×10^{35} に、
 - $\beta_y^* = 0.8 (0.5) \text{ mm}$ まで絞れば、原理的には $1.3 (2.1) \times 10^{35}$ が達成可能
 - 高バンチ電流での beam-beam blow-up が抑えられれば、さらに向上する
- ビーム電流を増やすことが今後しばらくの課題
 - 入射の能力とビーム寿命が蓄積電流の上限、即ち Luminosity の上限を決める
 - さらなる入射電荷の増加、入射効率の向上
 - ビームの寿命の改善 (Dynamic Aperture の向上)
- もっと上に行くには beam-beam と寿命の問題解決が不可欠 (LS2 の課題)
- Belle2 も加速器の足を引っ張らないよう頑張れ !!
 - 弱い検出器を守るため、頻繁にビームを Abort している
 - 加速器由来バックグラウンドに弱すぎて加速器の運転を制限している

終

り