# SuperKEKB 加速器

渡邉 謙(KEK)

Flavor physics workshop 2022 2022/11/7 (Mon) 14:50~15:40

1

#### <u>目次</u>

講義+質疑応答 14:50~15:40

・加速器の話

・SuperKEKB加速器

※SuperKEKB加速器のパンフレット「もっと知りたいSuperKEKB加速器」が参考になる。

<u>もっと知りたい!SuperKEKB加速器 | デジタルライブラリ | KEK</u>

<u>Belle II 実験 - 新しい物理法則を探る - | デジタルライブラリ | KEK</u>

<u>SuperKEKB Project | デジタルライブラリ | KEK</u>



### はじめに

- 加速器といえば?
  - □原子核·素粒子実験の道具 (励起、核破砕、素粒子生成 など)
     ✓ SuperKEKB、J-PARC(MR)、RIBF、LHC、...
  - □ 光源 (物質の構造解析 など)
     ✓ SPring-8、PF、PF-AR、J-PARC(MLF)、...
  - □荷電粒子による測定装置 (微視的な世界を観察)
     ✓ 電子顕微鏡
  - □医療装置 (透過性の違いを利用、ピンポイントの照射で分子構造を破壊、薬剤製造)
     ✓ X線撮影、放射線癌治療、放射性同位元素生成
  - □産業用途

✓ 食品照射(殺菌、発芽抑制)、非破壊検査、無機・有機材料の性能向上 など

水加速品ハントノックより		
・加速器: 電子、陽子、各種 粒子を高速に加速する装置であ	イオンなど ある。	荷電

シンカい市 空 リン・ドブックトの

20世紀に飛躍的な発展を遂げた原子核物理 や素粒子物理など、物質の究極構造に迫る研 究のために開発された。

#### 電場、磁場により荷電粒子を制御する。

・加速器の中の粒子の運動は、基本的には電磁 気学と特殊相対性理論によって記述される。加 速器の装置を構築するにあたり、高度な電磁気 技術や真空技術など多くの要素技術が必要とな る。1930年代以降、加速器は物質構造を研究 するための中心的な実験装置となり、そこから数 多くの革新的な研究成果が生まれた。

実際に1930年代以降のノーベル物理学賞を 見ると、その約1/4が何らかのかたちで加速器を 用いた実験に関係していることがわかる。

・加速器は、その構造上、大きくは粒子源と加速 装置に分けられる。粒子源は加速粒子によってそ れぞれ異なり、電子は電子銃から、陽子や原子 核などイオンはイオン源であり、陽電子や反陽子な ど自然には存在しない粒子については、生成反応 によって人工的につくる。

### 加速器(Particle Accelerator)

#### 荷電を持つ粒子を加速する装置のこと

- 加速を含めた粒子の操作にローレンツカ F = q(E + v × B)を用いる。
   電場、磁場(電磁気力)を任意に発生させることで粒子の運動を制御する。
- 物質との散乱などによる減衰を避けるため、超高真空中が必要である。
   ⇒気体分子の排気装置、ガス放出を減らすための表面処理
- 真空中の荷電粒子(ビーム)を非破壊でモニターする必要がある。
   ⇒ビームモニター(ビームが発生させる電場・放射光)、高速信号処理(精度)
- 用途に応じたエネルギーに加速する必要がある(電場)。
   ⇒静電場(直流)、誘導(交流:低周波)、高周波(交流:高周波)
- 荷電粒子をハンドリングする必要がある(磁場、電場)。
   ⇒電磁石(直流電源、パルス電源)、電極(パルス電源)



### 加速器の分類

• 加速粒子

✓電子、陽子、イオン、分子、… これらの反物質(陽電子、反陽子 など)

•形状

✓線形加速器、円形加速器、八の字

• 加速原理

✓ 静電加速器、誘導加速器、高周波加速器

• 収束原理

✓弱収束、強収束

• 光学系

✓ 機能複合型、機能分離型

などなど、様々な分類方法がある。

SuperKEKB加速器をあえて分類すると、

#### 非対称エネルギー電子・陽電子ダブルリングコライダー と言える。

### 衝突型加速器

#### 衝突実験に特化した素粒子・原子核実験用加速器

衝突実験

#### 固定標的実験

$$\longrightarrow$$

$$mc^{2}(1 + (pc/mc^{2})^{2})^{1/2}, p)$$
 (mc<sup>2</sup>, 0)

$$E_{CM} = 2^{1/2} mc^2 (1 + (1 + (pc/mc^2)^2)^{1/2})^{1/2} \\ \sim \sqrt{2mc^2 pc} \\ (pc \gg mc^2)$$

- 重心エネルギーE<sub>CM</sub>は運動量の平方根に比例する。
- 標的が十分に大きければ必ず当たる。
- 照射するビームの焦点を標的上に設定すれば衝突頻度は上がる。
- $(mc^{2}(1 + (pc/mc^{2})^{2})^{1/2}, p) \quad (mc^{2}(1 + (pc/mc^{2})^{2})^{1/2}, -p)$  $E_{CM} = 2mc^{2}(1 + (pc/mc^{2})^{2})^{1/2}$  $\sim 2pc \quad (pc \gg mc^{2})$
- 重心エネルギーE<sub>CM</sub>は運動量に比例する。
- 当てるための制御が必要である。
- 両方のビームを同じ場所で収束させなければ衝突頻度は上がらない。

衝突実験の方が、同じ加速でより高いエネルギーの現象を発生できるが、衝突頻度を上げるために、 より繊細なビーム制御技術が必要となる。実験方式の決定は、粒子検出器の状況に依存する。 ※検出器が泡箱の場合、固定標的実験となる(1980年代までの話)。

6

### 衝突型加速器の性能指標

#### 衝突実験に求められる基本要求

■衝突エネルギー

- 必要な現象を発生させるのに十分な重心エネルギー
  - ✓ 原子核反応であればクーロン障壁を超えるエネルギー (MeV)
  - ✓素粒子反応であれば、目的とする中間状態・粒子の固有エネルギー(GeV~TeV)

#### □現象の発生頻度

- 現実的な時間で必要な統計量を得られる発生頻度
  - ✓ 反応断面積で除した指標を" Luminosity [L<sup>-2</sup>T<sup>-1</sup>] "という

#### □現象の時間構造

- 計数測定と時間分解測定とでは、適切な時間構造が異なる。
  - ✓ 計数測定では、計測器のパイルアップを防ぐために時間当たりのイベント数に制限がある。
  - ✓ 時間分解測定では、イベント群に十分な間隔が必要。

ロコスト

• 建設・運転コストが許容できるか (線形加速器か、円形加速器か、を選択する)

#### (例) KEK (つくばキャンパス) 内にある加速器は?

#### ・所内にも大小さまざまな加速器がある。 ・東海キャンパスには、J-PARCがある(陽子)。

最も重要なところ→ 粒子源でもある「Linac」 その役割は、:4つのリングへ粒子の種類、エネルギー、電荷量の異なる ビームを供給する。

#### 4リング同時入射

さらに、LINACはKEKBの他に2つの放射光リングにもビームを供給しなければならない。





### Luminosity

ビームの粒子数 衝突頻度  

$$L = \frac{N_e + N_e - f}{4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*} = \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}\right) \frac{\xi_{y\pm} I_{\pm}}{\beta_{y\pm}^*}$$
衝突点でのビームサイズ



衝突型加速器のルミノシティは、

- 電流: *I*+
- ・ 衝突点の重直方向ベータ関数: β<sup>\*</sup><sub>ν±</sub>
- ・ ビーム・ビームパラメータ:  $\xi_{y\pm}$ でほぼ決まる。

ビーム・ビームパラメータ: 
$$\xi_{y\pm} = \frac{r_e}{2\pi\gamma_{\pm}} \frac{\beta_{y\pm}^* N_{\mp}}{\sigma_{y\mp}^* (\sigma_{x\mp}^* + \sigma_{y\mp}^*)}$$

OHO'11 SuperKEKBのマシンパラメータ~ナノビーム方式と低エミッタンス、船越義裕

## 蓄積されるビームの状態



10

### リング内で加速されるビームの状態

ビーム(Beam): KEKBの場合、電子や陽電子のこと

#### リングの中でビームはどう加速されているの?



偏向電磁石 <u>磁場</u>でビームを誘導する(放射光を出してビームのエネルギーが下がる) 高周波加速空洞

電場によってビームにエネルギーを補給する(ビームが加速される)

加速と言っても、KEKBリングの場合、エネルギーを上げるわけでありません。

・円形加速器のことを「リング」と呼ぶ。

・リング中の真空容器(ビームパイプ、Chamber)の中 に多数のバンチ(粒子の塊)が蓄積され、光速で周回。

・バンチが安定に蓄積されるには?
 →交流電場による加速制御で対応。

・電磁石を適切(周期的)に配置することで、ビームが 真空容器などに当たらないように粒子の塊を閉じ込める。

・蓄積できるバンチ数は、リングの周長と交流電場の周波 数に依存する。

・バンチ電流の最大値は、様々な要因で決まる。

例えば、検出器周りのBG、加速器全体の冷却など多数のパラメーターに依存し、SukerKEKB加速器の運転でも一番の課題となっている。

### 高周波加速空胴による位相安定性の原理



### ビーム光学(電磁石の種類)

加速器中の荷電粒子(ビーム)の輸送は主に磁場を用いて行う。



Bx, By:磁場(電流と巻き数)

※運動するビーム(荷電粒子の集合体)がビームパイプなどに当たらないように力場を形成、閉じ込めることを行う。 各磁石の組み合わせ・強弱によって、加速器中のビームの挙動を変えることで達成させる。詳細はAppendixを参照のこと。 ※四極、六極電磁石は、中心軸上から外れるとその磁場分布から偏向電磁石として機能する。このため、正常に動作させるに あたり、磁場中心にビームを通す必要がある。基本、四極、六極電磁石の下流側にはビーム位置モニターが設置される。

# ビーム光学 (ビームサイズ: $\sigma_x, \sigma_y$ )

$$\sigma_x = \sqrt{\beta_x \varepsilon_x + \left(\eta_x \frac{\Delta p}{p}\right)^2} \qquad \sigma_y = \sqrt{\beta_y \varepsilon_y + \left(\eta_y \frac{\Delta p}{p}\right)^2}$$

- Beta 関数 と Emittance ・電磁石の設定で変わる  $\beta_{x,y}$ Beta function (Optical parameter): リングの場所に依存 600 (**աա**) <sup>600</sup> 400 <sup>400</sup> **հե** <sup>x</sup> <sup>200</sup>  $\boldsymbol{\varepsilon}_{x,y}$ Emittance: リングの場所に依存しない不変量・粒子の運動量の比 - Energy 分散関数 と energy 広がり Energy dispersion (Optical parameter): リングの場所に依存  $\eta_{x,y}$ ・電磁石の構造に依存 8B3F-F B2P.3 QF2P. QD1P.  $\Delta p$ Energy spread:バンチ内の粒子のエネルギーの分布の広がり Beam リングの場所に依存しない不変量 p ・加速器の設計で決まる。 Emittance(ビームの品質を表す量)が求められる。



### ビーム光学(ベータ関数とベータトロン振動)



s : ビームの進行方向の座標系 x : " 横方向の座標系 k (s):磁場の分布により決まる β(s):ベータ関数

x 🗸

曲率R

となる。

Aと $\Phi_0$ は粒子の初期条件によって決まる保存量で、 $\beta(s)$ と $\Phi(s)$ は光学系k(s)で決まる光学関数と呼ばれる。

OHO'19ビームダイナミックスの基礎(単粒子力学)、杉本寛 15

### ビーム光学(ベータトロン振動と分散関数)

光学系k(s)に周期性があるとき、ベータ関数β(s)=β(s+C)となり、位相Φ(s)の進みを2πで割った値をチューン(v)と呼ぶ。

$$v = \frac{\phi(C) - \phi(0)}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \int_0^C \frac{ds}{\beta(s)}$$

チューンは1周期分のベータトロン振動数(単位:Hz)である。

・分散関数(Dispersion)

$$\Delta x = \eta_x(s) \frac{\Delta p_x}{p}$$

Δx:中心軌道からのズレ

η<sub>x</sub>(s):分散関数(偏向電磁石のパートを通過することで発生する。)

有限のビームサイズを持つことや、個々の粒子が持つエネルギー広がりが影響する。 Δp<sub>x</sub>/p:エネルギー広がり(バンチ内の粒子のエネルギー分布)

電子ではガウス分布の1σで表すことが多い。リング内で保存される量。

※ビームの広がりから、エネルギーに関するビームの品質を評価できる。



## ビーム光学(エミッタンス)

#### エミッタンス (Emittance)

- ・ビームの位相空間での面積をπで割った値
- 加速器では通常、水平・垂直方向それぞれの値をもちいる
- ビームの品質を表し、小さいほど運動量のばらつきやビームサイズが小さくなる。
- ・進行方向と横方向のエネルギーの比が品質を決める。





・衝突するビームが、互いに相手から受ける力によって生じるベータトロン振動(チューン)の変化量のこと。ビーム・ビームチューンシフトともいう。

$$\xi_{y\pm} = \frac{r_e}{2\pi\gamma_{\pm}} \frac{\beta_{y\pm}^* N_{\mp}}{\sigma_{y\mp}^* (\sigma_{x\mp}^* + \sigma_{y\mp}^*)} \qquad \qquad L = \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}\right) \frac{\xi_{y\pm} I_{\pm}}{\beta_{y\pm}^*}$$

衝突点の垂直方向ベータ関数(β<sub>y</sub>)を小さくするとビームサイズ(σ<sub>y</sub>)も小さくなる。 ビーム・ビームパラメータが一定になるように、水平方向ベータ関数を小さくしてビームサイズを絞 るような条件を整えると、ルミノシティはベータ関数(β<sub>y</sub>)を小さくするほど大きくなる。

⇒加速器の設計段階で、ビームパラメータを決定する際に重要な指標となる。

#### Luminosityの歴史



### 二種類の衝突型加速器

ルミノシティ・フロンティア

・ファクトリー加速器

高いルミノシティで特定の中間子対な どの粒子を大量に生成する加速器の こと

KEKB/SuperKEKB、PEP-IIはB中間 子を大量に生成することを目的として 運転している(た)。



20

# SuperKEKB加速器





### SuperKEKB加速器の諸元

- ・周長約3kmの電子・陽電子衝突型加速器
- 構成
  - □線形加速器
    - ✓ 長さ~700m
    - ✓ 電子と陽電子を同じ加速管で加速
    - ✓ SuperKEKB以外にPF、PF-ARへ電子を供給する
  - □ 陽電子ダンピングリング
    - ✓ 周長~136m✓ エネルギー 1.1GeV
  - ロメインリング
    - ✓ 周長~3016m
    - ✓ 電子リング(HER) 7GeV
    - ✓ 陽電子リング(LER) 4GeV

#### □ 測定器

✓ Belle II







Phase 1:

Basic machine test without collision / Low emittance beam tuning / Vacuum scrubbing

Phase 2:

Squeezing beta at IP / "nano-beam scheme" collision tuning / Physics run w/o VXD starts with BG study

Phase 3:

Physics run starts with a fully equipped Belle II detector Further collision tuning and collimator tuning / cont. inj.

### 加速器の基礎要素



### 粒子源(Linacに配置される)



### 高周波加速空胴(線形加速器)

・粒子源から導かれた電子・陽電子を所 定のエネルギーまで加速するための装置

・KEKのLinecでは、ビームは50Hzで入射 され、それぞれのリングへ出射される。

・線形加速器で使用される加速管は進行波型と言われるものである。

パルス状の高周波電力(数µsec、>数 +MW)を入力することで、数+MV/m という高い加速電界を得ることができる。

※連続波(CW)での運転を考えると、銅を用いた 加速空洞の場合、熱的な問題などがあり、 ~数 MV/mで制限される。 **銅(無酸素銅)による加速空洞** 共振周波数:2.856GHz 加速勾配:20MV/m





#### KEK 線形加速器トンネル内



・一般に電磁波は光速で伝搬するが、導体で囲われた空間内を伝搬するときは、光速より遅くなる (Vg~0.6\*c)。位相速度(Vp)は光速になるように空洞形状を決める。一方、3MeV以上のエネル ギーを持つ電子・陽電子はほぼ光速で移動する。 ・その時間差を利用して、ビームが通過するときだけ、 電界が立つように運転される(波乗り加速)。

27

### 高周波加速空胴(リング内)

#### 常伝導加速空胴



\*ARES: Accelerator Resonantly coupled with Energy Storage

・LER、HERともにKEKBで実績のある ARES型空胴を導入。

・貯蔵空胴に高周波電力を貯めることで、大電流ビームでも加速できる。

509 MHz ~0.5 MV LER 22台 HER 8台





・液体ヘリウム温度(4.2K)ま
 で冷却し、Nbを超伝導状態で
 利用する空胴。

・高電圧が出せるとともに、貯 蔵空胴がなくとも大電流ビーム を加速できる。

509 MHz ~2 MV HER 8台



バンチ化されたビーム

高周波加速されたビームはバンチ化され、リングに入射、蓄積される。

- ビーム電流:I
  - 周回周波数:*f*<sub>0</sub>
  - バンチごとの粒子数: $N_b$  $I = nN_b e f_0$
- リング内最大バンチ数(ハーモニクス数): h
  - RF周波数: $f_{RF}$  $h = \frac{f_{RF}}{f_0}$   $f_{RF} \sim 508.9 \text{ MHz}$ h = 5120
- ・ 最小バンチ間隔: $t_b$  $t_b = \frac{1}{f_{RF}}$

 $t_{
m h}\sim$  2 ns

**SuperKEKB** 

周長約3 km

n = 2500

 $f_0 \sim 100 \text{ kHz}$ 



Bunchの連なり:Bunch train Bunch train間の間隔:Train gap

なぜ、すべてのBunchにビームを入れないのか? 様々な不安定性を抑える。ビームアボートの都合など。

## リングへのビーム入射、出射



THE A



 $\rightarrow$  t

セプタム電磁石

HER Bunch Current Monitor 783 bunches Mac. 0.19 mA Ave. 0.17 mA





・荷電粒子であるビームは、大気中(10<sup>5</sup>Pa)では安定に周回できないため、 超高真空(10<sup>-7</sup>Pa)状態をパイプ中に作って、ビームを周回させる。

・真空状態を作るために、様々な排気ポンプが用いられている。 e.g.) スクロールポンプ、ターボ分子ポンプ、NEGポンプ等



## シンクロトロン放射光

加速度を受けた荷電粒子は、加速度と直行する面内で等方的な電磁波を放射する(電子双極子放射)。 偏向されるビームでは、ビームの進行方向にローレンツブーストされた電磁波として観測され、シンクロトロン放射と呼ばれる。

• 放射角度

 $\varphi = 1/\gamma$  [rad]

- 放射される光子数  $N_t$ [photon·s<sup>-1</sup>] = 8.08 × 10<sup>20</sup>E[GeV]/[A]
- 臨界エネルギー
  - $u_c[eV] = 2.22 \times 10^3 E^3 [GeV] / \rho[m]$
- リング全体で放射されるパワー

 $P_t[W] = 88.5 \times 10^3 E^4 [GeV] I[A] / \rho[m]$ 

※放射光で失われた進行方向のエネルギーを加速空胴で供給する。 横方向のエネルギーは失われたままなため、周回するごとにビームのエミッタンスは よくなっていく(やがて飽和する)。

#### LER

- E = 4 GeV  $1/\gamma \sim 0.13$  mrad
- I = 3.6 A $N_t = 1.16 \times 10^{22}$

$$\rho = 74.5 \text{ m}$$
  
 $u_c = 1.9 \text{ keV}$ 





放射光がビームパイプの内壁に当たった際に発生する電子(光電子放出)や、光電子がビームバンチの作る電場で加速 されて再度ビームパイプ内壁に衝突した際に発生する電子(二次電子放出)によって形成される。

#### 電子雲によって、主に陽電子ビームが不安定となる

多バンチ不安定性







電子雲とビームの干渉を 妨げる必要がある。 形状:アンテチェンバー 内壁:TiNコーティング 外力:ソレノイド磁場 等々



ビームを周回させたり、途中で発散しないように収束させるために、電磁石とそれに電流を供給する電源がある。 電磁石の磁場が変われば、周回軌道やベータ関数などのビームパラメータが変わるため、高い安定度が求められる。





#### ビームパイプ中のビームを直接、目で見ることはできない。 ビームによって励起される電気信号や放射光を測定することによって、ビームの位置やサイズ、電流量を測定する。

ビーム位置検出モニター



・電荷が作る電場を利用。電荷、電極間の距離に依存 し発生する電圧を検出することで位置を求める。





 CT (Current Transformer) DCCT (DC Current Transformer)



バンチごとの電流(電 荷量)をモニターする。



パルス状の電場を用いてビー ム位置を微調整。



### アライメント(構成機器の設置精度は?)





アライメント(Alignment)

・各機器の設置精度は非常に重要である。測量により構成機器
 を精度よく設置すると共に、ビームを通してその結果を確認する
 (BBA: Beam Based Alignment)。

・リング内側に設置された測量基準点を繋ぎ合せて、基準となる 座標系を構築する。その座標系に合わせて、電磁石や加速空洞 およびビームモニターの設置を行う。

・アライメントの精度は目標値に対して標準偏差で0.1mm以内で 合うように行っている。

・レーザートラッカーという高精度3次元測量器を主に用いるが、ラフな位置調整ではレーザー墨出し器や望遠鏡を用いる(要求される設置精度に依存する)。

・実際の機器では、その機械的中心と電磁場的中心は異なることが多い。事前にその差を測定しておき、アライメントに反映させている。



レーザートラッカーを使った偏向電磁石アラインメント



### 加速器制御

様々な機器を操作、監視する必要がある加速器では、それらに入出力される信号だけで数万点にのぼる。 SuperKEKBではEPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)を採用し、運用している。

# 

#### Local Control Room





#### SuperKEKB制御室



### その他の様々な要素

ビームシミュレーション

実際の加速器中のビームの振る舞いは解析的には解けないので、モデル計算や粒子トラッキングなどの計算機シミュ レーションが重要となる。

・ 安全(人、機械)システム

加速器は放射線発生装置であるため、放射線安全のための監視装置や、安全・確実にビームを捨てるためのビームアボートシステムが求められる。

• ビームロスモニター

ビームモニターの一種で、加速器中のどこでビームがロスしたかを計測する。ロスしたビームによって機器が放射化するため、場所や量の特定が必要となる。

測量(地形・地盤の変化)

1周3kmのSuperKEKBトンネル内に、0.1mmの精度で電磁石は設置されている。それらの確認や、トンネルの沈下 量の経時変化を適宜行っている。

• 冷却水、空調

トンネル内の電磁石やビームパイプ、地上の電源棟にある各種電源および装置を冷却するための冷却水は、量・温度 ともに安定な運転を行うために重要な要素である。また、空調が貧弱であれば、トンネル内は結露することもあるため、 機器の保全のために欠かすことはできない(環境を維持できないと、機器の寿命は短くなっていく)。

例として、トンネル内の湿度が上昇したことにより、気中の耐電圧が低下、結果、トンネル内に設置されたイオンポンプの 高電圧印加部が放電し、碍子が損傷、真空リークが発生した、ということもあった。

## SuperKEKBのマシンパラメータ

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

物理ラン開始後、3年で。

	KEKB Design	KEKB Achieved with crab	SuperKEKB Design	2022ab 0.8/0.8
Energy (GeV) LER/HER	3.5/8.0	3.5/8.0	4.0/7.0	またまた絞る。
Crossing angle (mrad)	22	0 (crab)	83	
β* <sub>y</sub> (mm)	10/10	5.9/5.9	0.27/0.30 🖌	×1/20
ε <sub>x</sub> (nm)	18/18	18/24	3.2/4.6	
σ <sub>y</sub> (μm)	1.9	0.94	0.062	2022ab
ξ	0.052	0.129/0.090	0.088/0.081	1.46/1.14 KEKB EDUbty) X 基语需
σ <sub>z</sub> (mm)	4	~6	6/5	流で。
I (A)	2.6/1.1	1.64/1.19	3.6/2.6	×2
Number of bunches	5000	1584	2500	
Luminosity (10 <sup>34</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	1	2.11	80 •	<b>×40</b>
			-	4.65 (x 2.3)

・衝突点でのビームサイズ(o<sub>y</sub>)を極限まで細く絞ることで達成させる。又、バンチ数およびバンチ電流の増加を行う。

・衝突点付近のベータ関数は  $\beta(s) = \beta^* + \frac{s^2}{\beta^*}$ 

ビームを絞ることで衝突頻度を上げたいが、衝突点で絞りすぎると、 衝突点の両側でビームがふくれる(砂時計のように)。

Hourglass効果と呼ばれる



ベータ関数を進行方向のビームサイズ  $\sigma_z$  以下にしても、 「Hourglass効果のために」衝突の過程全体で見た平均ビームサ イズが大きくなり、ルミノシティは増えない。

・正面衝突、有限角度衝突、クラブ衝突、いずれの場合も、 ビームの重なる長さ程度までしか絞れない。

・バンチ長を  $\sigma_z$  を短くできれば同時に $\beta_y$ を効果的に絞れるが、加速電圧 ( $V_0$ )の限界と、ビームが誘起するHOM (Higher Order Mode) によ る真空容器への負荷、それに伴うビーム不安定性があるため難しい。



### 解決案:ナバーム衝突

#### P. Raimondiが発案 SuperKEKBで初めて採用される方式







## 最終収束超伝導電磁石(QCS)@衝突点



超伝導線にNbTiを採用した 最終収束用超伝導電磁石群 (The final focus magnet system : QCS)

- 補正ソレノイド:4台
- 四極電磁石:8台
- 各種補正電磁石:35台
- 漏れ磁場補正コイル:8台

Yoke	None	Perm.	Perm.	Iron	43
Lem	333.6	373.1	409.9	537.0	[mm]
Rc	25.0	33.0	53.8	59.3	[mm]
ld	1.8	2.0	1.0	1.25	[kA]
Gd	76.37	91.57	31.97	36.39	[T/m]
Mag.	QC1P	QC1E	QC2P	QC2E	

<b>して2日間</b> 派
----------------

#### 安定な衝突 ≈ 安定な磁場 ≈ 安定な電流

定電流源としての電磁石用電源は、磁場の一定性を保つ ために、高い安定度が求められる。 QCS電源では、1ppmの安定度を達成するために、電流モ ニターや制御基板を恒温槽に入れるなど、外乱(室温等)の 影響を受けにくい工夫を行っている。





**Rated Output** 

2000A, 15V

±70A, ±10V

# of PS's

8

43

Magnet

Main Quads

Correctors

### 振動(地面、クライオスタット)

Belle II検出器がロールインする前に、QCSを収めたクライオ スタットと架台の振動測定を行った。

それぞれ3個の加速度センサーを用い、三軸(x, y, z)方向の 測定をしている。





設計パラメータでのビームサイズ  $\sigma^*_{x} \approx 10 \ \mu m, \ \sigma^*_{y} \approx 60 \ nm$ 



## 衝突フィードバック制御(iBump)

#### KEKBから導入されている衝突点<u>垂直方向</u>軌道フィードバックシステム

BPMの信号をもとに、ステアリング電磁石を操作し、衝突点にバンプ軌道をつくる。 8台のVertical Steeringと4台のHorizontal Steeringを衝突点付近のHERに設置する。





# 衝突フィードバック制御(Dithering)

#### PEP-IIで実績のある衝突点水平方向軌道フィードバックシステム

MG\_LIA:X:MAG

ビームをわざと揺らして(Dithering)ルミノシティを変動させ、その位相を測定することで ルミノシティピークを求める。



### Fast Luminosity Monitors

#### LumiBelle2

•single crystal CVD diamond sensors • $4 \times 4 \times 0.5/0.14 mm^3$ •Fast charge/current amplifiers •Digital electronics and processing

#### ZDLM (Zero Degree Luminosity Monitor)

Cherenkov and scintillator detectors
15 × 15 × 64 mm<sup>3</sup> LGSO non-organic scintillator and ES-crystal (quartz)
Photomultipliers
Analog & digital processing









SuperKEKB workshop, SuperKEKB: Challenges for the High Luminosity Frontier, 30-31 Jan. 2020 Fast Luminosity monitor, P. Bambade

#### Crab Waist Scheme

Crab Waist Scheme (CW) Y. Ohnishi 六極電磁石を用いて、β\*、が最小となる場所をバンチ内の水平方向  $\beta_x^* = 80 \ mm$ top view でずらす方法。  $\beta_y^* = 1 \ mm$ SuperKEKBでは衝突点付近の六極電磁石を用いて行った。 Waist shift (100 %) S  $\Delta s = -$ LER  $\tan 2\phi_x$ Beam blowup due to Beam-Bam effect  $\beta_n^* = 1 \ mm \text{ and } 0.8 \ mm$ Y. Ohnishi  $\sigma_v^* = 0.19 \,\mu m$ outer  $\beta_{\pi}^{*}/\beta_{...}^{*} = 60 \ mm/0.8 \ mm$ sextupole collision tuning  $\sigma_v^* = 0.22 \,\mu m$ with physics run still under tuning magnets for CW  $\sigma_v^* = 0.26 \,\mu m$  $2\phi_x$ Vertical  $\sigma_v^* = 0.31 \,\mu m$ Defocus 2019c No Crab Waist 2020a CW(LER/HER) 40/0 %  $\beta_x^*/\beta_u^* = 80 \ mm(LER).$ HER х10<sup>31</sup> 2020a CW(LER/HER) 60/0 % 60 mm(HER)/1 mm 3 2020b CW(LER/HER) 60/0 % (V-angle) **Crab Waist** 2020b CW(LER/HER) 60/40 % Collimator tuning 2020b CW(LER/HER) 60/40 % (HER H-angle) Linac/BT improvement 2020b CW(LER/HER) 80/40 % (High Eemittance) 2020b CW(LER/HER) 80/40 % (LER chrom. XY) Vertica  $2020b \beta_v = 0.8 \text{ mm}$ Focus 0.2 0.3 0.4 0.5 0.1  $I_{b+}I_{b-}$  [mA<sup>2</sup>] Oct. 2019 - July 2020 The LER waist (the minimum beam size) can be shifted KEKBで行ったクラブ衝突(ビームを進行方向に対して傾けることで、 proportional to the horizontal orbit offset at the IP 軌道は角度を持って交差するが、ビーム同士は実質的に正面衝突 and aligned on the HER beam line.

させる方法)とは異なる。

49

# Sudden Beam Loss (SBL)



・あるバンチ電流を超えると、不意にビームロスが生じる現象が問題となっている。 ・これが発生すると、コリメーターの破壊、Belle II 検出器の破壊、QCSのクエンチ など、加速器自体を壊しかねない状況に陥る。 ・更なるルミノシティを達成するにあたり解決しなければけない問題である。 ee F A C T 2 O 2 2 Y. Ohnishi, KEX Frascati, Italy





・この辺りの詳細は、本ワークショップ(FPWS2022)でBelle-Gの方々が発表されています。 Study of "Sudden beam Loss" of SuperKEKB baed on fast loss monitor system for Belle II, Yuxin Liu et al., Beam loss at SuperKEKB: an analysis with the new loss monitor system for the Belle II experiment, Michele Aversano et al., など

September 12, 202

#### Movable collimator to reduce beam background

S. Terui T. Ishibashi Y. Suetsugu

#### Damage due to beam loss





Vertical collimator: D02V1 (LER) tantalum (Ta) head with 10 mm long tip







June 8, 2021



Horizontal collimator: D06H3 (LER) tungsten (W)

Stored beams hit the collimator head due to misfire of injection kicker.

### まとめ(SuperKEKBの現状とこれから)



・2019年からPhase3に移行し、マシンスタディを行いながら、Physics Runを行っている。2022ab時点でKEKB加速器の2倍以上のピークルミノシ ティを達している。また、単位消費電力あたりの積分ルミノシティをKEKB時と比較してみると、同量の消費電力で2倍近い積分量が得られており、 衝突方式の違いが鮮明に表れている。衝突点まわりのビームをさらに絞り、最適化することで更なる効率化が可能となる。

# 現在のマシンパラメーター

#### **Machine Parameters**

	SuperKEKB :	SuperKEKB : June 8, 2022		SuperKEKB : May 22, 2022		
Ring	LER	HER	LER	HER		
Emittance	4.0	4.6	4.0	4.6	nm	
Beam Current	1321	1099	744	600	mA	
Number of bunches	2249		1565			
Bunch current	0.587	0.489	0.475	0.383	mA	
Horizontal size $\sigma_x^*$	17.9	16.6	17.9	16.6	μm	
Vertical cap sigma Σ <sub>y</sub> *	0.303		0.250		µm*1	
Vertical size σ <sub>y</sub> *	0.215		0.177		µm*²	← twice the size o COVID-19 virus
Betatron tunes $v_x / v_y$	44.525 / 46.589	45.532 / 43.573	44.525 / 46.589	45.532 / 43.574		alle
β <sub>x</sub> * / β <sub>y</sub> *	80 / 1.0	60 / 1.0	80 / 0.8	60 / 0.8	mm	A CAR S.
Piwinski angle	10.7	12.7	10.7	12.7		
Crab waist ratio	80	40	80	40	%	
Beam-Beam parameter $\xi_y$	0.0407	0.0279	0.0309	0.0219		
Specific luminosity	7.21 x 10 <sup>31</sup>		8.74 x 10 <sup>31</sup>		cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> /mA <sup>2</sup>	
Luminosity	4.65 x 10 <sup>34</sup>		2.49 x 10 <sup>34</sup>		cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	

^1) estimated by luminosity with assuming design bunch length  $^{\star2)}$  divide  $^{\star1}$  by  $\surd2$ 



 Beam Background & Beam loss (Aborts) 機器の放射化やコリメーターの破損、Belle II検出器へのダメージ

Sudden Beam Lossの理解と その対策が今後重要となるテーマである。

Collimator Impedance
 Beam Backgroundの低減のために、コリメーターは狭くしたい
 ⇔TMCI (Transverse Mode Coupling Instability)

#### • Short Lifetime

Small dynamic aperture and/or small physical aperture

Physical aperture : 物理口径。ビームパイプの口径など、二次元空間でビームが通過できる領域 Dynamic aperture : 力学口径。ビームを安定に蓄積できる六次元位相空間での領域

- Beam-Beam Blowup
   ビーム同士の衝突に伴ってビームサイズが増加する。原因調査中。
- Insufficient Understood of Injection Beam
   エミッタンスが大きくないか?軌道がドリフトしていないか?エネルギーの広がりはどうか?

- ・最先端を目指す加速器はF1カーのようなもの。
   ✓安全マージンは取るが、性能を極限まで引き出す努力は惜しまない。
- 「予定通り進むこと」が一番ではあるが、「トラブルが発生したときのリカバリー」も重要となる。

✓体感しない地震でもビームは揺さぶられ、ビームアボートの原因となった。
✓予期しない事象によってビームが不安定となることもある。原因の究明とその対策をしていく。

- ナノビーム衝突方式を採用し、世界最小のβ<sup>\*</sup><sub>y</sub>と peak Luminosityを更新していく SuperKEKBにおいて、類似の施設はない。
   ✓教科書・参考書・マニュアル・ノウハウは自分で作る。
- SuperKEKBが完成するのはシャットダウンするとき。
   ✓シャットダウンするときまで改良を続ける。

•Appendix

#### 偏向電磁石(Dipole Magnet)

偏向電磁石
 粒子の向きを変える。
 エネルギーの高い粒子
 は大回りする。







57

#### <u>四極電磁石(Quadrupole Magnet)</u>

- 四極電磁石
  - 中心から外れた軌道を
     通る粒子に対して収束
     カ(発散力)を与える。







・通常は極性が異なる2台を組み合わせて使用する。

•Focus, Defocus。

・磁石の名称として、QF01、QD01といったように付けることが多い。

#### <u>六極電磁石(Sextupole magnet)</u>

- 六極電磁石
  - エネルギーの違う
     粒子に対して異なる
     る収束力を与える。
  - 色収差補正に使われる

$$Bx = axy$$
$$By = \frac{1}{2}a(x^2 - y^2)$$







高周波加速

	2020b : June 21, 2020		2021b : June 22, 20	Unit	
Ring	LER	HER	LER	HER	
Emittance	4.0	4.6	4.0	4.6	nm
Beam Current	712	607	790	687	mA
Number of bunches	978		1174		
Bunch current	0.728	0.621	0.673	0.585	mA
Lifetime	760	1270	540	1320	sec
Horizontal size $\sigma_x^*$	17.9	16.6	17.9	16.6	μm
Vertical cap sigma $\Sigma_y^*$	0.403		0.324		μm*1
Vertical size $\sigma_y^*$	0.285		0.229		μm*²
Betatron tunes v <sub>x</sub> / v <sub>y</sub>	45.523 / 43.581	44.531 / 41.577	44.524 / 46.596	45.532 / 43.581	
β <sub>x</sub> * / β <sub>y</sub> *	80 / 1.0	60 / 1.0	80 / 1.0	60 / 1.0	mm
Piwinski angle	10.7	12.7	10.7	12.7	
Crab Waist Ratio	80	40	80	40	%
Beam-Beam parameter $\xi_y$	0.039	0.026	0.046	0.030	
Specific luminosity	5.43 x 10 <sup>31</sup>		6.76 x 10 <sup>31</sup>		cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> /mA <sup>2</sup>
Luminosity	2.40 x 10 <sup>34</sup>		3.12 >	cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	

\*1) estimated by luminosity with assuming design bunch length \*2) divide \*1 by  $\sqrt{2}$