

## 課題名 (和文) 円形加速器におけるビームビーム及び空間電荷効果

## 課題名 (英文) Beam-beam and space charge effects in circular accelerators

代表者氏名 大見 和史

所属 高エネルギー加速器研究機構

### 1. 研究目的

課題名は円形加速器としたが、今年は実質 SuperKEKB におけるビームビーム及び空間電荷効果の研究を行った。SuperKEKB は B 中間子生成工場としての超高ルミノシティの電子陽電子衝突加速器である。前身の KEKB はルミノシティ  $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を達成した。ちなみにルミノシティは対象とする反応の衝突断面積を掛けることで、そのイベント数になる。

SuperKEKB の目標ルミノシティは  $80 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  という値である。このとてつもないルミノシティの達成のために超低エミッタンスビームを衝突点で超低ベータに絞り込むというこれまでにない手法を採用した。大交差角とクラブウェストを組み合わせ、新世代の電子陽電子衝突器の先駆けとして設計、建設され、2018 年に運転が開始された。これ以降建設が計画されているタウチャーム、ヒッグス、Z、W、t ファクトリーなどはこの手法で設計されている。そのため SuperKEKB の成功は将来の電子陽電子衝突器の未来を決定すると言ってもいい。

ルミノシティは両ビームの粒子数の積に比例し、衝突点での水平垂直ビームサイズの積に反比例する ( $L \sim N_+ N_- / \sigma_x \sigma_y$ )。ルミノシティ性能を決めるのは衝突させたときの互いのビームのマクロな電磁相互作用により、ビームサイズが想定以上に大きくなりかどうかが決まる。ビーム粒子数が増やしていくと、ビームサイズの増えていく想定値、およびルミノシティをシミュレーションで求めることが最初の目標である。

SuperKEKB 設計時は計算機資源が限られていたため、加速器の周回を 6 次元位相空間の変換である  $6 \times 6$  行列で表し、しかも片側ビームを固定したガウス分布のビームで近似するシミュレーション法を多用していた。KEKB の時代は粒子分布が任意に変化する Particle In Cell (PIC) 法を用いていた。交差角が小さいためバンチの進行方向スライスが 10 程度で十分だったため、PIC からポテンシャルを求めるための FFT 計算は 1 回の衝突あたり  $10 \times 10 = 100$  回だった。SuperKEKB になりスライスを 100-200 に増やす必要があり 2 桁以上増えることで、GPU が欠かせなくなった。

### 2. 研究成果の内容

ビームビーム、空間電荷効果の計算のために、PIC を用いたシミュレーションコードを GPU 上で開発してきた。  $1 \cdot 2 \times 10^6$  個のマクロ粒子で表されたビームの衝突を互

この電荷分布によるポテンシャルを PIC により粒子分布を求め、FFT により 2 次元ポアソン方程式を解くことで求め、その電磁場から互いのビーム（マクロ粒子）の運動をシミュレーションする。大交差角での衝突のためビーム（バンチ）を進行方向に 200 スライスし、1 回の衝突あたり  $200 \times 200 = 40,000$  のスライス毎の衝突計算をし、平衡状態を再現するために 10,000 回の衝突を計算する。つまり PIC, FFT の計算は  $10^9$  回に及ぶ。計算はビームを構成するマクロ粒子の相互作用なので、分散型計算機では相互作用に対応するデータ通信のオーバーヘッドで対応できず、GPU が唯一の選択肢である。

加速器はビーム粒子の運動を電磁石、加速空洞により特定の軌道上にとどめている。数 1000、磁石のモデリングによっては 10,000 を超える磁石内の運動もシミュレーションするが衝突計算と同程度の時間を要する。そのシミュレーションは衝突計算と違い並列に行うことができる。

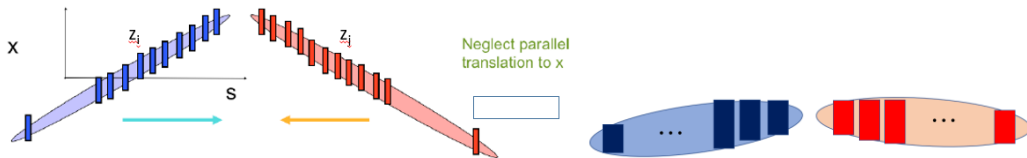


図 1 SuperKEKB (左) と KEKB (右) の衝突の様子

BBSCL というコードがこのシミュレーションのために開発され、この 2-3 年に実用に使えるようになった。図 2 に SuperKEKB でのシミュレーション結果を示す。実験とおおむね一致している。このシミュレーションは現在中国合肥 USTC のタウチーム、欧州 CERN の FCCee のシミュレーションにも使われている。

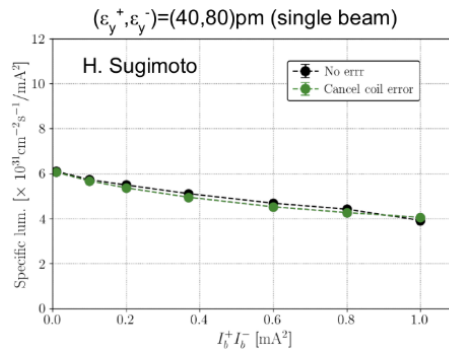


図 2 BBSCL シミュレーションにより求められたルミノシティ

### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

KEK には 2016 年までスーパーコンピュータが稼働していたが、廃止になっている。KEK スパコン時代には多くのラティス QCD のグループの中で、加速器ビーム物理グループとして 10 年以上活動を続けてきた。KEK スパコン廃止以降、J-PARC に絡め

て原研を使用したりしたが、**SuperKEKB** の研究は対象外のため、ビーム物理シミュレーションを対象にできる本学際共同利用プログラムの意義は大きい。

4. 今後の展望

**SuperKEKB** の成功は将来の電子陽電子衝突器の未来を決定する。そのために実際のルミノシティパフォーマンスのシミュレーションによる理解と、シミュレーションの実用性は、妥当性の検証は将来の加速器設計に必須である。

5. 成果発表

- (1) 学術論文
- (2) 学会発表
- (3) その他

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus	○	5,000		5,000
Miyabi-G				
Miyabi-C				
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				