

研究責任者名 Name	大見 和史 Ohmi Kazuhito	所属機関 Affiliation	KEK 加速器
受理番号 Proposal No.	(T)11-03	研究課題名 Program title	加速器におけるビームビーム効果、ビーム不安定性の研究

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

成果の概要

Abstract

(和文)

LHC におけるビームビーム限界について SR16000 を用いて研究した。線形周回行列とビームビーム衝突からなる単純なモデルをまず評価する。交差角、衝突からスタートし様々な効果を取り入れ、どういった効果がどの程度ルミノシティに影響するかを調べた。

(英文)

The beam-beam limit in LHC is studied using SR16000. First luminosity performance is evaluated by using a simple toy model. The simple model is extended to include crossing angle, collision offset, interaction region nonlinearity, and external noise.

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読付きの学術論文数	プロシーディング論 文数	その他（投稿中を含 む）
	0	1	3	0

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表

1. IPAC2012 招待講演, THYB01

査読付きの学術論文(URL を記載)

1. K. Ohmi, R. Tomas et al., Physical Review ST-AB, 14, 111003 (2011)

プロシーディング論文(URL を記載)

1. K. Ohmi, Proceedings of IPAC'12, THYB01

2. K. Ohmi, "Strong-strong simulation for Super B factories", Proceeding of IPAC'11, THPZ008, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2011/papers/thpz008.pdf>

3. K. Ohmi, M. Tobiyama, "Beam-beam interaction under external force oscillation", Proceedings of PAC'11, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2011/papers/mops057.pdf>

その他（学位論文、紀要、投稿中の論文を含む）（URL を記載）

特記（本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など）

研究責任者 大見和史

所属機関 KEK、加速器

研究課題名 加速器におけるビームビーム効果、ビーム不安定性の研究

研究組織 大見和史、多和田正文

## 実施報告の詳細

LHCにおけるビームビーム限界についてSR16000を用いて研究した。ビームビーム限界はビームビームチューンシフトで表現される。ビームビームチューンシフトとはビームビーム衝突により設計軌道の周りのベータatron振動の位相のずれを $2\pi$ で割ったものであり、以下の式で表される。

$$\xi = \frac{N_p r_p \beta^*}{4\pi \gamma \sigma_r^2} \quad L = \frac{N_{p1} N_{p2}}{4\pi \sigma_r^2} f_{rep} = \frac{N_p \gamma f_{rep}}{r_p \beta^*} \xi_{IP} \quad (1)$$

ここで $N_p$ はバンチ内陽子数、 $\beta^*$ は衝突点のベータ関数、 $\sigma_r$ はビームサイズ、 $f_{rep}$ は衝突繰り返し、 $r_p$ は古典陽子半径である。チューンシフトが大きくなると、ビームのエミッタンスが大きくなる現象が現れ、ルミノシティが低下する。この現象をシミュレーションするために以下のモデルを使う。シミュレーションする変数は粒子の座標(x,px,y,py,z,pz)である。x-yはビーム進行方向に垂直な面、一般医水平方向をx垂直方向をyにとる。ビーム進行方向ビーム中心からのずれをzにとる。運動量変化は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta p_r &= \frac{2N_p r_p}{\gamma} \frac{1}{r} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right) \right] \\ \Delta p_z &= \frac{N_p r_p}{\gamma} \frac{1}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right) \frac{d\sigma_r^2}{dz} \end{aligned} \quad (2)$$

加速器内の粒子の運動は単純にみると調和振動であり、初期条件に対して終条件の座標は行列で表現できる。衝突後の座標を初期条件とするとビームの周回、次に衝突するまでの運動は以下のような線形変換で表される。

$$M = \begin{pmatrix} M_x & 0 & 0 \\ 0 & M_y & 0 \\ 0 & 0 & M_z \end{pmatrix} \quad M_i = \begin{pmatrix} \cos \mu_i & \beta_i \sin \mu_i \\ -\sin \mu_i / \beta_i & \cos \mu_i \end{pmatrix} \quad (3)$$

ビームの分布をガウス分布で乱数発生させる。変換はまずバンチを進行方向に10スライスにわけ、式(2)を10回計算し、次に(3)により周回変換をさせ、また式(2)に戻って同じことを繰り返し計算していく。LHCは1日 $10^9$ 周するが、 $10^6$ 周計算し、フィットにより周回あたりのルミノシティ減衰率を求める。

図1に周回毎のルミノシティの変化(左)と減衰率(右)を示す。左図にビームビームチューンシフトごとに線が描かれ、右図に3種類のチューンでのチューンシフトに対するルミノシティ減衰が描かれている。左図は周回毎のルミノシティで0.15で減衰がみられる。この減少として1M周で0.06%なので1日で半減までしない。この減衰はエミッタンスから起きているが、実際の加速器ではビーム自身の減少の方が大きい。右図はビームビームチューンシフトに対するルミノシティの減衰率をまとめたものである。いくつかのチューン(図左下)に対してプロットされている。この図から減衰率 $-1 \times 10^{-9}$ を下回るチューンシフト値を求めると、チューンが $(n_x, n_y) = (0.31, 0.31)$ ,  $(0.31, 0.32)$ の場合ビームビームチューンシフト限界は0.2か、それ以上ということになる。

一般に陽子衝突加速器のビームビーム限界は0.01程度だと考えられていた。LHCも0.0077という値で設計されている。この値が大きくとれるということは設計より遙かに大きなルミノシティを得ることができることになる。電子陽電子衝突器でも同様のことがいえる。チューンを半整数

の上に近づけ、クラブ衝突を行えばビームビーム限界が 0.2 以上にできる。実際には様々なエラーでそこまでは大きなチューンシフトまで達成できない (KEKB では 0.09) が、エラーを評価して陽子衝突器でどこまでビームビーム限界が達成できるか研究することは LHC の高ルミノシティの道筋を決めていくために欠かせない。

衝突交差角は  $0.00015\mu\text{rad}$  (設計値) の場合と、衝突オフセットがある場合を考える (図 2)。図 3 にそれぞれの場合のルミノシティ減少率を示す。衝突角がある場合チューンシフトが 0.05 を超えると急激に減衰率が大きくなる。一方オフセット衝突の場合は同じく 0.05 程度で減衰率が大きくなるが程度は遙かにマイルドである。

この減衰は何が原因かという、対称性の破れである。式(2)の力が交差角衝突の場合  $p_x$  に対して非対称になる。一方オフセット衝突の場合  $x$  に対して非対称になる。ちなみに図 1 で (0.31, 0.31) が以上に減衰しないのは  $x-y$  で運動が対称的で、 $x-y$  面内の角運動量 ( $L=xp_y-yp_x$ ) が保存 (積分可能) しているためである。

すぐあとでわかるが、この非対称の程度は同じ程度である。次の問題として同じ程度非対称なのになぜルミノシティ減衰に大きな差になるのか。図 4 にシンクロトロン振動 (前後方向の振動) を考慮した場合としない場合 (故意に振動を止める) のルミノシティ減衰を示す。左図はシンクロトロン振動  $v_s=0.0019$  (LHC の設計値) と  $v_s=0$  の場合の周回毎の減衰を示す。大きな違いがわかる。右図はシンクロトロン振動を止めた場合の交差角衝突とオフセット衝突のルミノシティ減衰を示す。ほぼ同じ減衰である。これが前述の  $x-p_x$  の対称性のずれの程度は同じと書いた理由である。右図は図 3 の 2 つの図と比べるべき図である。交差角衝突だけがシンクロトロン振動で大きな減衰を示す。その理由は  $z$  方向の対称性の破れにある。図 2 よりオフセット衝突はバンチ内の  $z$  位置によって力が変わらない一方、交差角衝突は  $z$  位置に依存する。

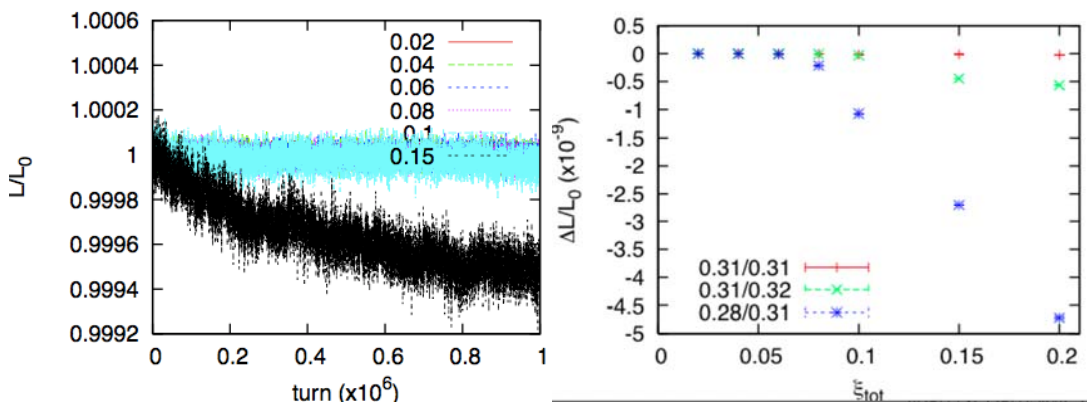


図 1: 周回毎のルミノシティの変化(左)と減衰率(右)

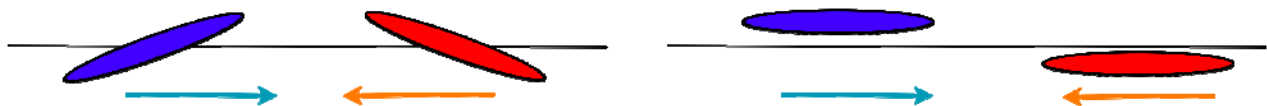


図 2: 交差角衝突(左)とオフセット衝突(右)の模式図

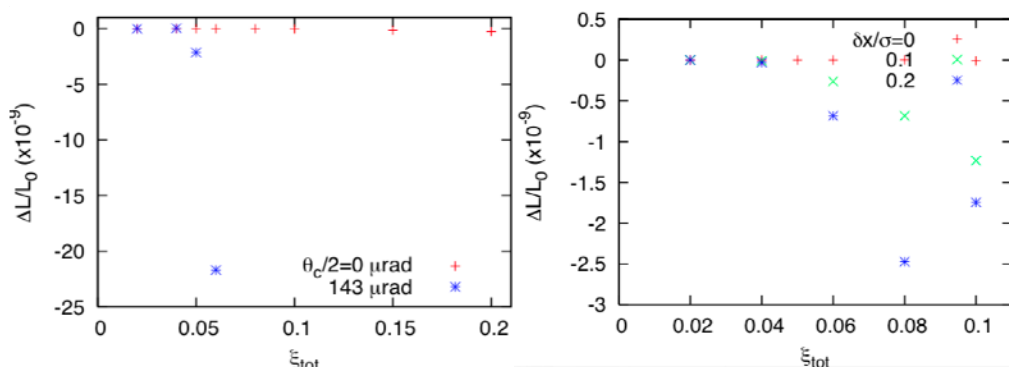


図 3: 交差角衝突(左)とオフセット衝突(右)によるルミノシティ減衰

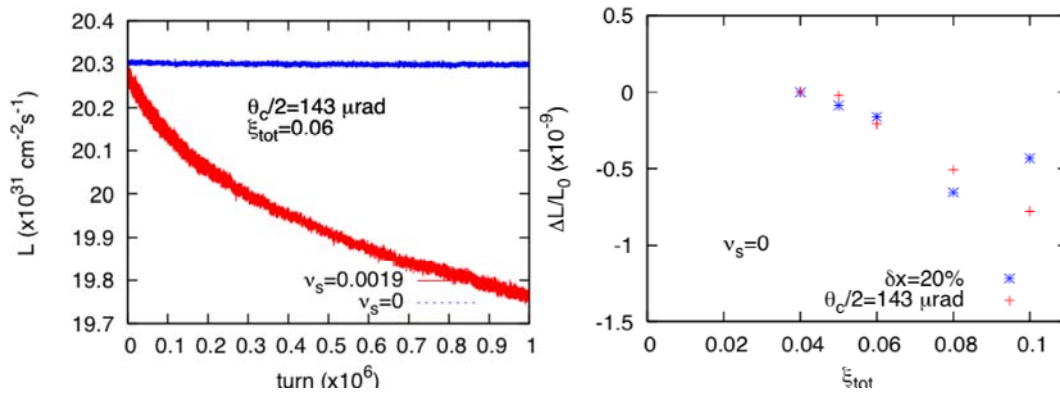


図 4: 左図は交差角衝突におけるシンクロトロン振動の有無によるルミノシティ減衰。右図はシンクロトロン振動を無くした場合の交差角衝突とオフセット衝突のルミノシティ減衰率。