

KEKB加速器 アップグレード計画 SuperKEKB

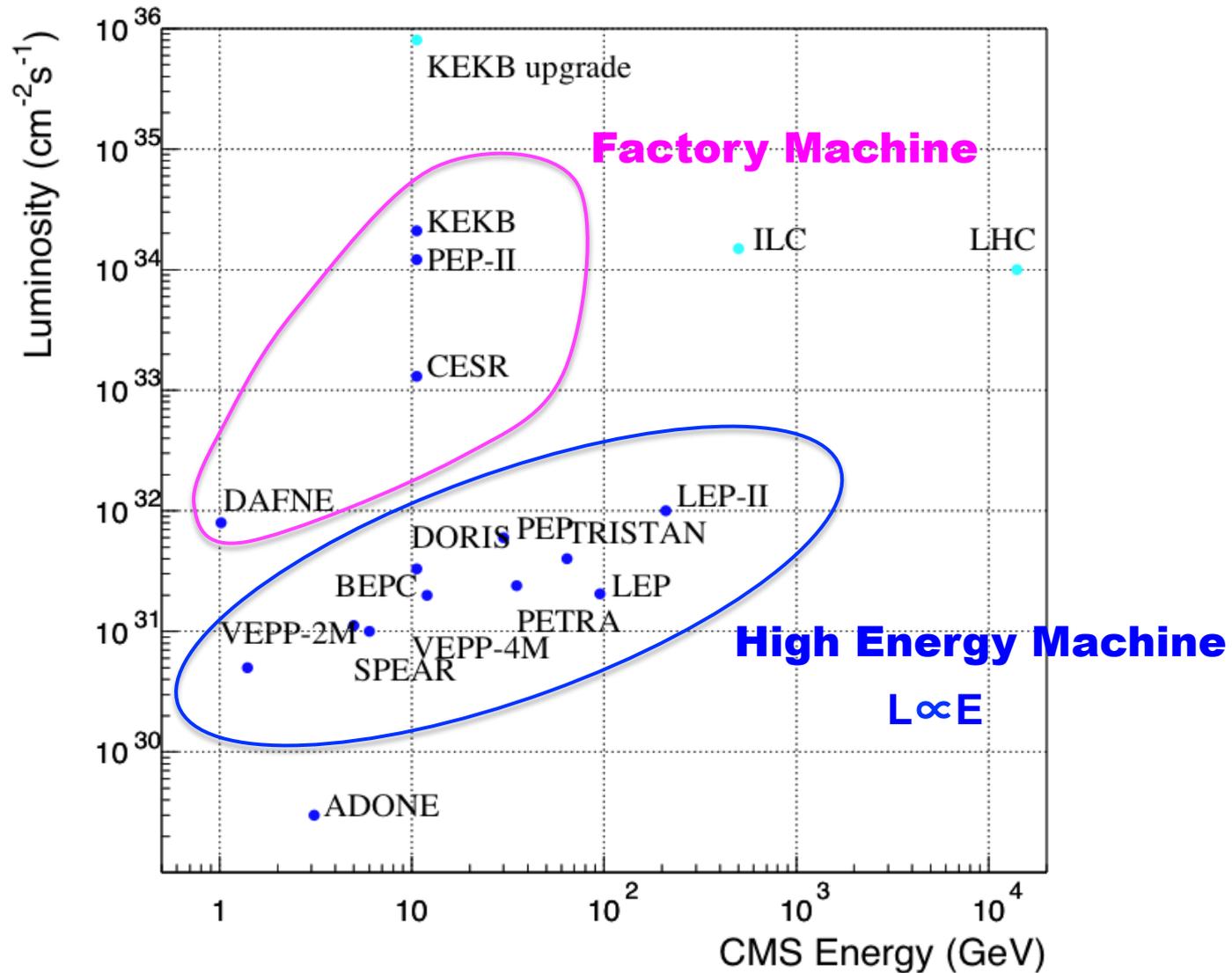
大西 幸喜

将来計画検討小委員会

@東京大学

11月7日、2009年

Luminosity of Collider



Luminosity

よく知られているルミノシティの式

バンチに含まれる陽電子の数

バンチに含まれる電子の数

バンチの衝突頻度

$f = n_b f_0$ n_b : バンチ数 f_0 : 周回周波数

$$L = \frac{N_+ N_- f}{4\pi\sigma_x^* \sigma_y^*} R_L$$

幾何学的ロス

衝突点での水平方向のビームサイズ

衝突点での垂直方向のビームサイズ

ルミノシティに限界があるとすれば、
話は単純ではない。

ルミノシティには限界があって ビーム・ビームで決まっている？

ビーム・ビーム パラメータ

Lorentz factor

ビーム電流

衝突点でビームが互いに及ぼし合う力の大きさ

$$L = \frac{\gamma_{e^\pm}}{2er_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \right) \left(\frac{I_{e^\pm} \xi_{\xi_y}^{e^\pm}}{\beta_y^*} \right) \left(\frac{R_L}{R_{\xi_y}} \right)$$

古典電子半径

衝突点でのx方向とy方向のビームサイズの比 0.5 ~ 1 % (flat beam)

衝突点でのy方向のβ関数

幾何学的な要因による補正係数 0.8 ~ 1 (short bunch)

衝突点でのビームの絞り量「焦点深度」

ルミノシティは、
ビーム電流とビーム・ビーム パラメータの積に比例し、 β_y^* 関数に反比例する。

ルミノシティを高くするためには

1. ビーム電流(I)を大きくする
2. ビーム・ビーム パラメータ(ξ)の限界を高くする
3. 衝突点の y 方向ベータ関数(β_y^*)を小さくする
4. ビーム エネルギー(γ)を大きくする
5. カップリング(σ_y^*/σ_x^*)を大きくする

ビーム エネルギーは目標とする物理で決定されるので自由なパラメータとはならない。

水平面上にリングを作ると基本的に水平面に運動量分散が生じるのでフラット ビーム ($\sigma_y^*/\sigma_x^* \ll 1$) となる。
 x 方向と y 方向、同時に衝突点ベータ関数を絞り込むことは非常に難しい。



1~3が標準的な努力目標

KEKB高度化の設計目標

- 目標ルミノシティは、 **$8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$**
- Nano-beam方式でKEKB加速器の40倍を目指すには、
 - **ビーム電流 1.7/1.4 → 3.6/2.6 A (～2倍)**
 - **ビームビーム・パラメータ 0.09 → 0.09 (～1倍)**
 - **衝突点垂直ベータ関数 5.9 → 0.27/0.42 mm (～20倍)**
 - **バンチ長6/5 mmと長くてもよい(KEKBと同等)。**
- **大交差角衝突なので、クラブ空洞の導入はなし。**
- 具体的なIR設計を含むリング全周のビーム光学系詳細設計が進行中
 - 現状でLER >600秒, HER >700秒に対応する力学口径がある。
 - ソレノイド 磁場を取り入れて, 光学系設計の精度を上げる作業中。

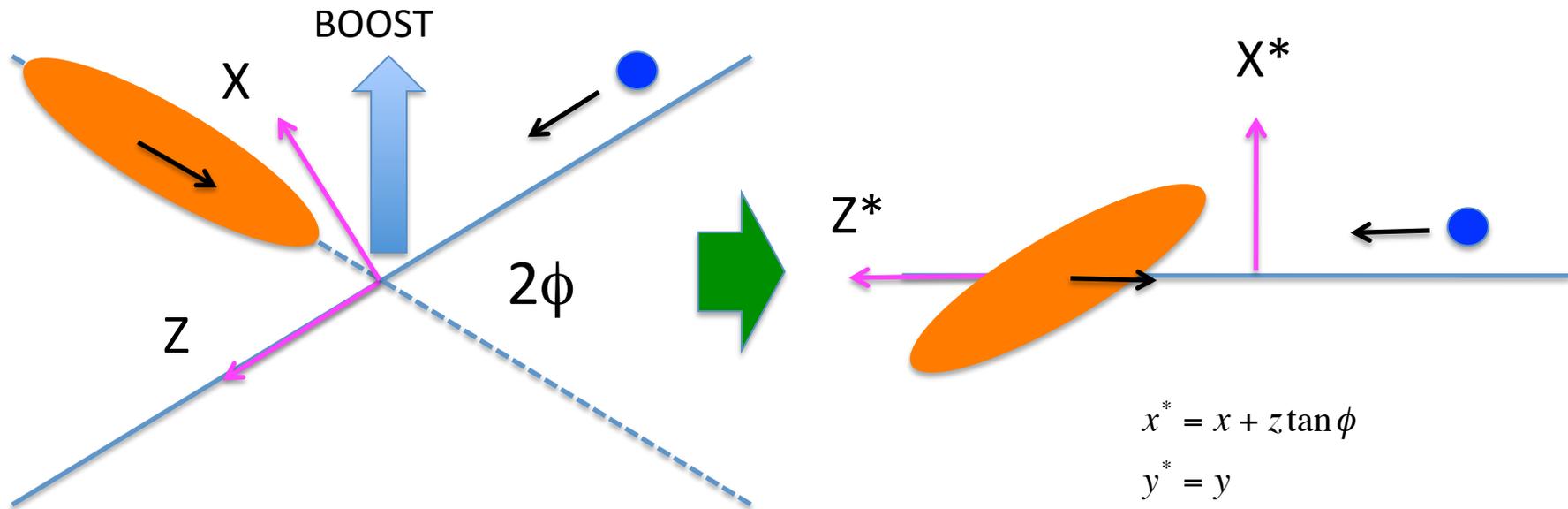
Beam Parameters

	KEKB Design	KEKB Achieved : with crab	SuperKEKB High-Current	SuperKEKB Nano-Beam
Energy (GeV) (LER/HER)	3.5/8.0	3.5/8.0	3.5/8.0	4.0/7.0
β_y^* (mm)	10/10	5.9/5.9	3/6	0.27/0.42
ϵ_x (nm)	18/18	18/24	24/18	3.2/1.7
σ_y (μm)	1.9	0.94	0.85/0.73	0.059
ξ_y	0.052	0.129/0.090	0.3/0.51	0.09/0.09
σ_z (mm)	4	~ 6	5/3	6/5
I_{beam} (A)	2.6/1.1	1.64/1.19	9.4/4.1	3.6/2.6
N_{bunches}	5000	1584	5000	2500
Luminosity ($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	1	2.11	53	80

Finite-Angle Crossing Collision

Laboratory Frame

Head-on Frame



Rotation in X-Z plane
and boost along X direction

$$x^* = x + z \tan \phi$$

$$y^* = y$$

$$z^* = z / \cos \phi$$

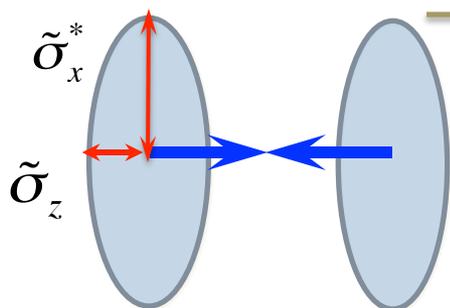
$$p_x^* = p_x / \cos \phi$$

$$p_y^* = p_y / \cos \phi$$

$$p_z^* = p_z - p_x \tan \phi$$

Collision Scheme

High Current Scheme



**overlap region
= bunch length**

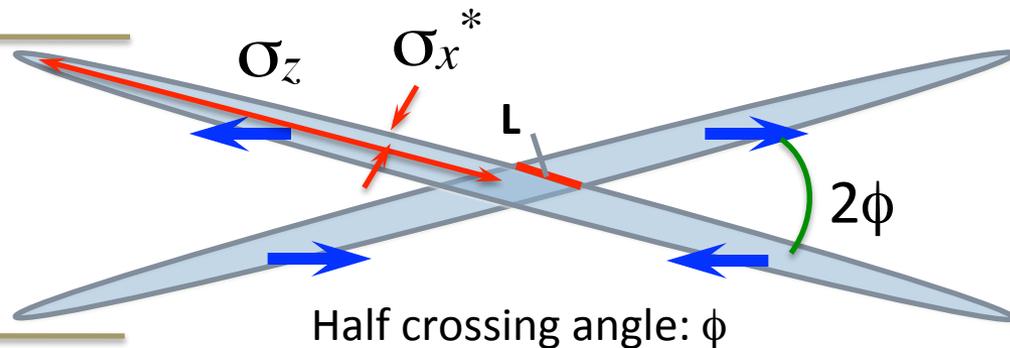
$$\tilde{\sigma}_z = \frac{\sigma_x^*}{\phi}$$

$$\tilde{\sigma}_x^* = \sigma_z \phi$$

Hourglass condition

$$\beta_y^* \geq \tilde{\sigma}_z$$

Nano-Beam Scheme



Head-on frame
(rotation and Lorentz boost)

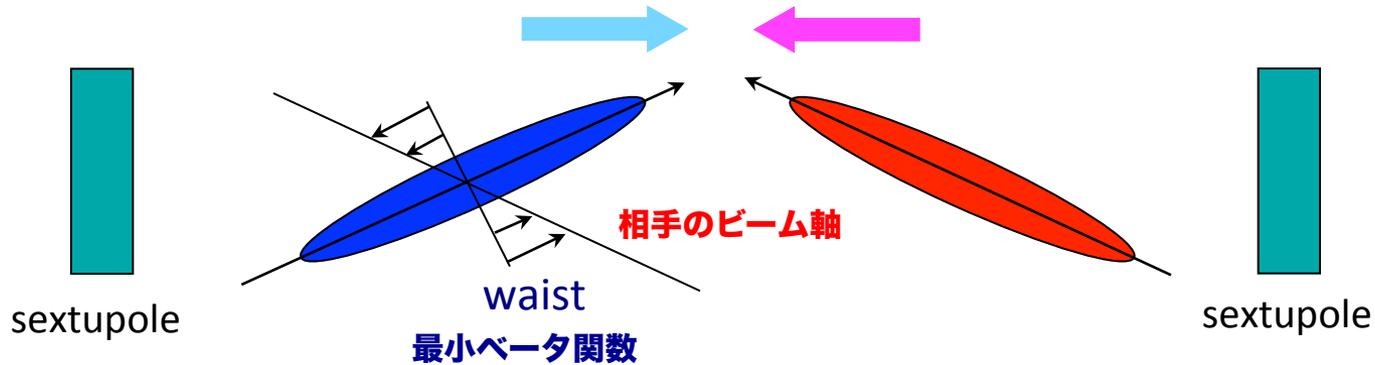
overlap region (\neq bunch length)

$$L = \frac{\sigma_x^*}{\phi}$$

Hourglass condition

$$\beta_y^* \approx L \quad \sigma_z \gg \tilde{\sigma}_z$$

Crab-waist



**ベータ関数が最小となるところを
相手のビーム軸に合わせる。
六極磁石で、進行方向に沿って、
キックが変化することを利用する。**

**Hourglass条件よりもベータ関数が絞れる。
ベータを絞った分ルミノシティは増加。
(2倍程度は行けそう)**

$$\beta_y^* \leq \sigma_x^* / \phi$$

Nano-Beam Schemeにおける Crab-waistの考え方

ダイナミックアパーチャ(力学口径)の減少
という問題。

KEKBアップグレードでは、
Crab-waistを使わなくても
 8×10^{35} のルミノシティが得られるように
パラメータ選択を行っている。

Crab-waistはバックアップ・オプション。

なぜ、 今までNano-beamに対して 消極的だったのか？

- **Crab-waist**が無いと駄目かも知れない。
 - ダイナミックアパーチャが著しく狭くなる。
- 長いバンチ長のビームに対するビーム・ビームシミュレーションが確立されていなかった。
- ビーム光学系（衝突点を除く）、リングの磁石を作り変えないという方針を取ってきた。
 - アップグレードのための建設期間短縮

最近の進展

- ビーム・ビーム シミュレーションがコンピューティング技術の発達(スパコン)とともに成熟してきた。
- crab-waistなし(効かない)で高いルミノシティが見込めるパラメータが見つかりつつある。
- 色収差補正等の確立とダイナミック・アパーチャの目処が立ちつつある。

KEKB高度化の設計方針

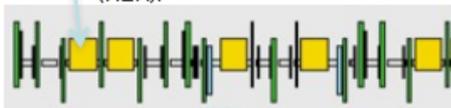
- 14-th KEKB Accelerator Review Committee (2009年2月) 以降、**ナノビーム方式**に基づいて設計を進めてきた。
 - The Committee recommends that the machine design work concentrate on the low emittance option for the next few months, with a focus on identifying any possible showstoppers.
- これまでのところ、致命的な問題は見つかっていない。
- 引き続きナノビーム方式の詳細設計を進め、建設開始に備える。

KEKBアップグレード の 概要

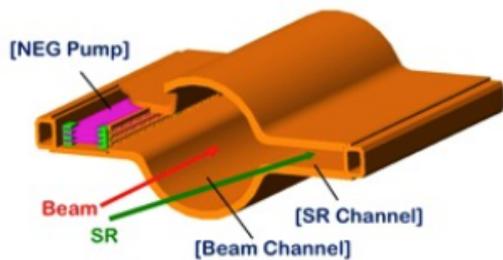
1. 低エミッタンス
2. 低ベータ関数@衝突点
3. 光学口径（入射、寿命）



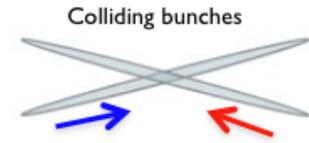
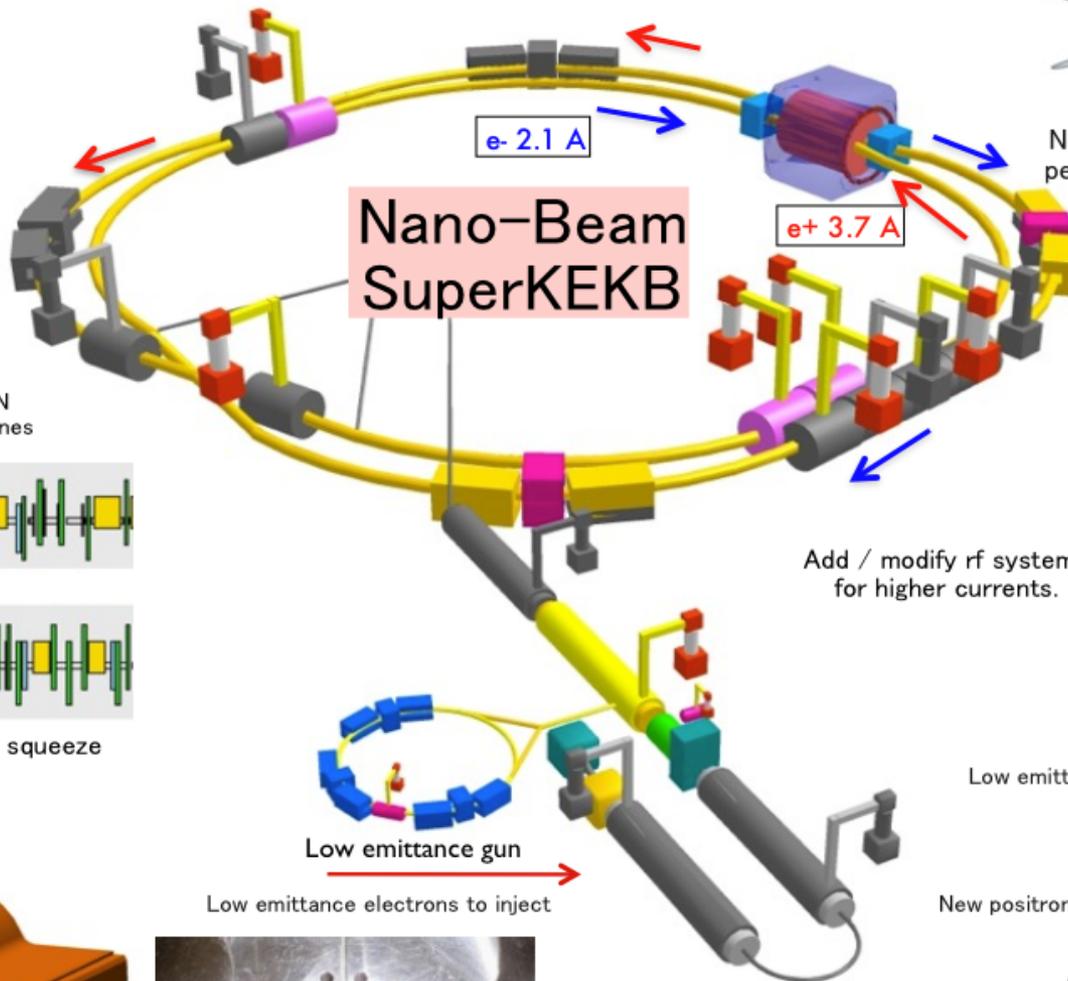
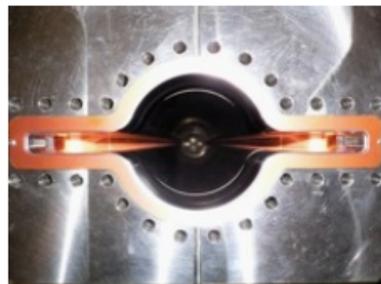
Replace long TRISTAN dipoles with shorter ones (HER).



Redesign the HER arcs to squeeze the emittance.



TiN coated beam pipe with antechambers



New Superconducting / permanent final focusing quads near the IP



Low emittance positrons to inject

New positron target / capture section

$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2e r_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \right) \left(\frac{I_{\pm} \xi_{\pm y}}{\beta_y^*} \right) \left(\frac{R_L}{R_y} \right)$$

x40 Gain in Luminosity

Machine Parameters

		LER	HER	
Emittance	ε_x	3.2	1.7	nm
Coupling	$\varepsilon_y/\varepsilon_x$	0.40	0.48	%
Horizontal beta at IP	β_x^*	32	25	mm
Vertical beta at IP	β_y^*	0.27	0.42	mm
Horizontal beam size	σ_x^*	10.1	6.5	μm
Vertical beam size	σ_y^*	0.059	0.059	μm
Bunch length	σ_z	6	5	mm
Half crossing angle	ϕ	41.3		mrad
Hourglass condition	σ_x^*/ϕ	0.245	0.157	mm
Beam Energy	E	4	7	GeV
Beam Current	I	3.6	2.6	A
Number of bunches	n_b	2500		
Beam-beam parameter	ξ_y	0.09	0.09	
Luminosity	L	8×10^{35}		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

item 1

Low Emittance



LER

**Longer
bends**



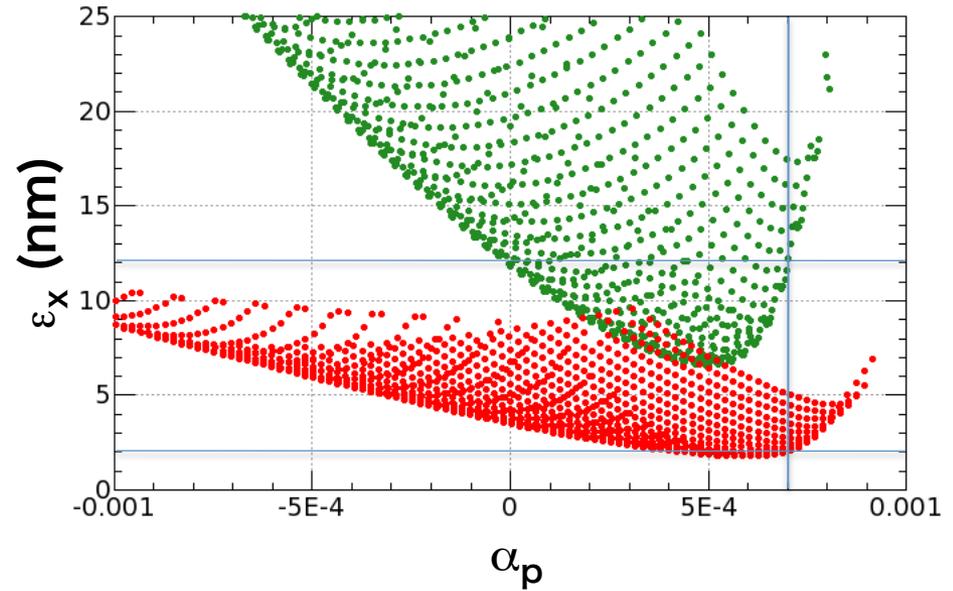
HER

**Increase
number
of arc cells
(small dispersion)**

LER Arc Cell

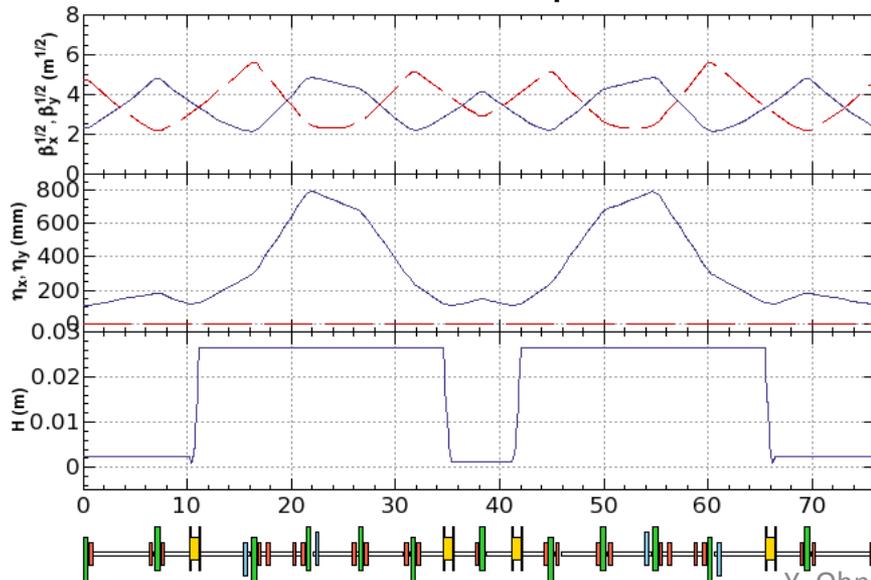
$$L_{\text{bend}} = 0.89 \text{ m}$$

→ 4 m



KEKB

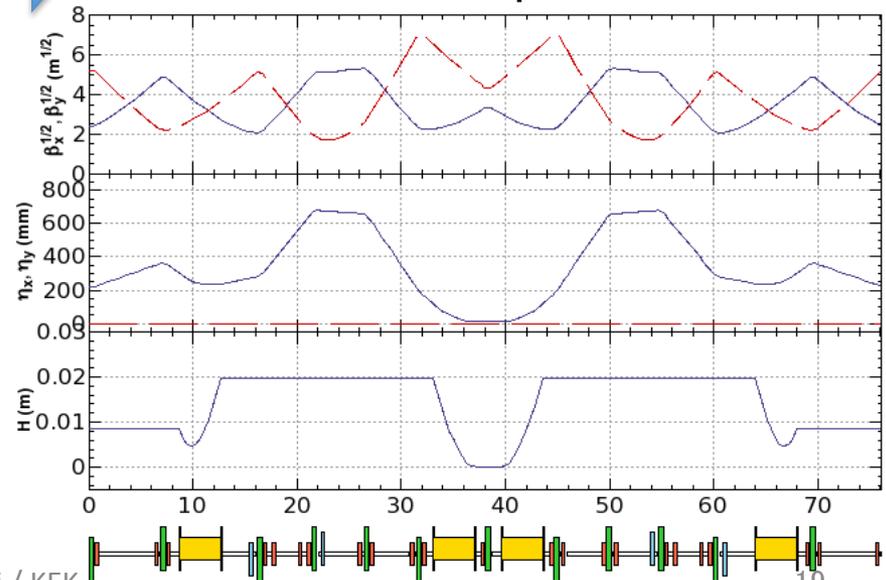
$$\epsilon_x = 8.8 \text{ nm} \quad \alpha_p = 3.3 \times 10^{-4}$$



Y. Ohnishi / KEK

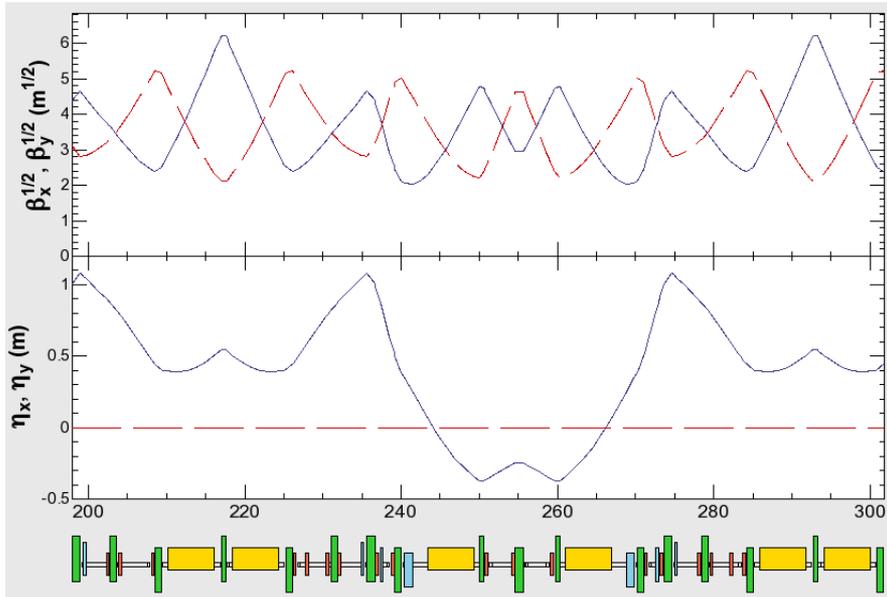
SuperKEKB

$$\epsilon_x = 2 \text{ nm} \quad \alpha_p = 4.4 \times 10^{-4}$$

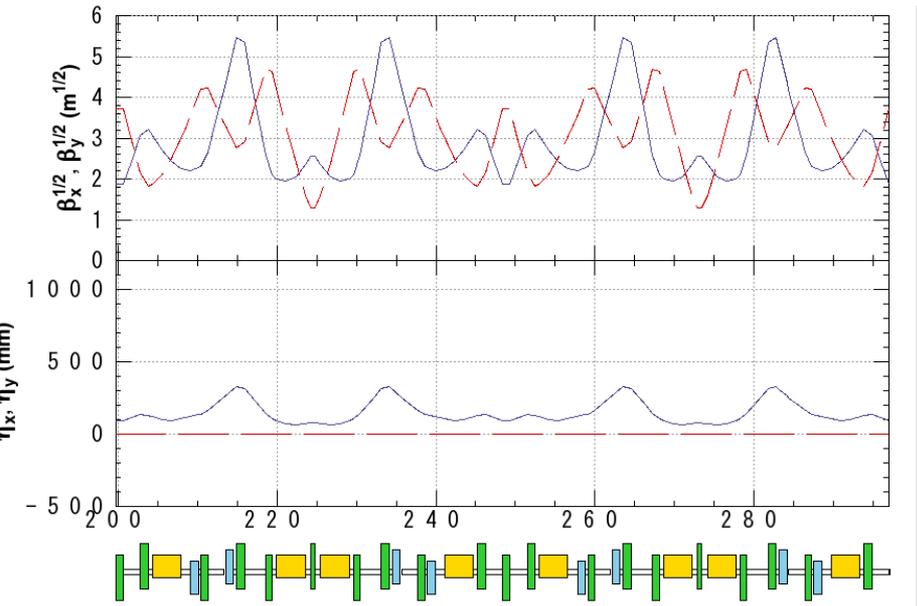


HER アーク部

HERのアーチ部は全面的に変更. セル数を増やす



現在のKEKB
24 nm



SuperKEKB
1.7 nm

item 2

Low Beta at IP

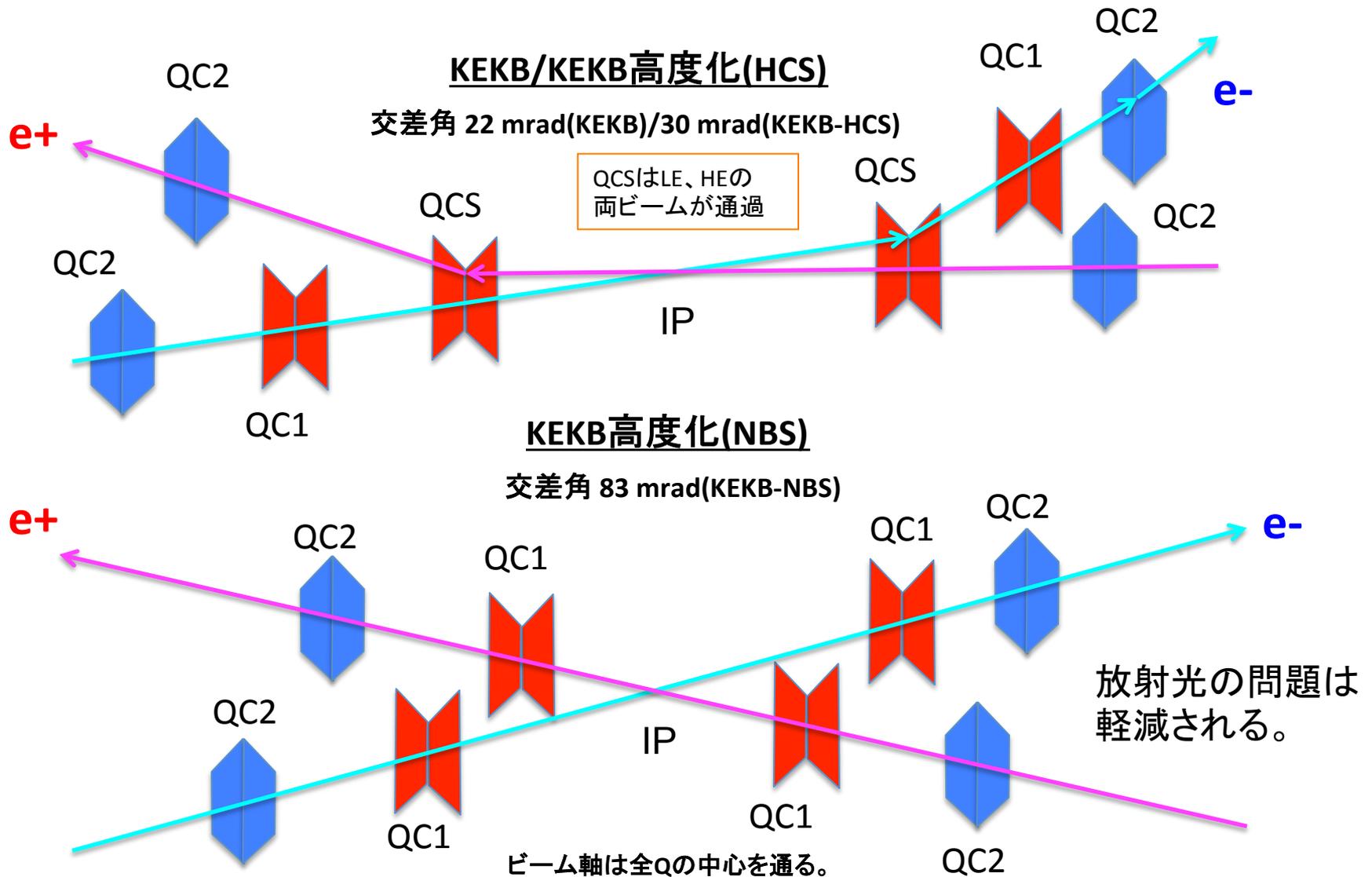


Separated final quads

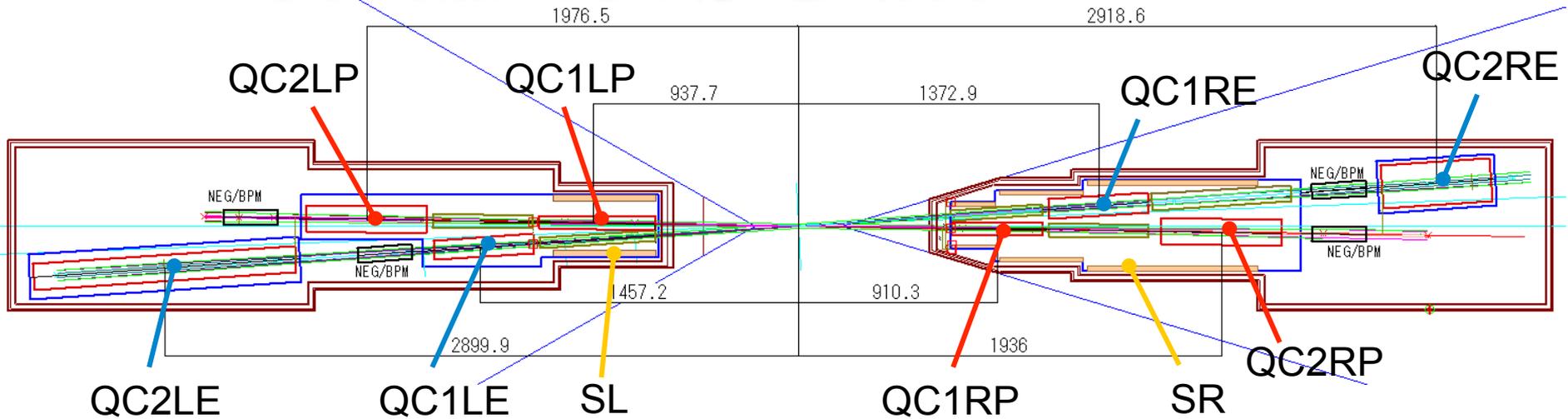
Closer to IP

Large crossing angle

最終収束系



衝突点超伝導電磁石システム



IR超伝導電磁石システム構成： 主4極電磁石8台、補正ソレノイド2台、補正コイル43台

ビーム衝突用超伝導4極電磁石（8台）

	磁場勾配 (T/m)	積分磁石強度 (T/m)・m	4極磁石超伝導補 正コイル	対向ビーム漏れ磁場 超伝導補正コイル
QC1RP	80.68	22.43	b_1, a_1, a_2, b_4	b_1, b_2, b_3
QC1RE	72.83	26.22	b_1, a_1, a_2, b_4	b_1, b_2, b_3
QC2RP	31.21	10.92	b_1, a_1, a_2	b_1, b_2, b_3
QC2RE	32.28	12.91	b_1, a_1, a_2	
QC1LP	58.74	22.91	b_1, a_1, a_2, b_4	b_1, b_2, b_3
QC1LE	72.49	26.03	b_1, a_1, a_2, b_4	b_1, b_2, b_3
QC2LP	31.32	10.96	b_1, a_1, a_2	
QC2LE	12.95	14.13	b_1, a_1, a_2	

ソレノイド磁場

衝突点付近には、
測定器ソレノイド(1.5 T)の影響を消すために、
補償ソレノイドが置かれる。

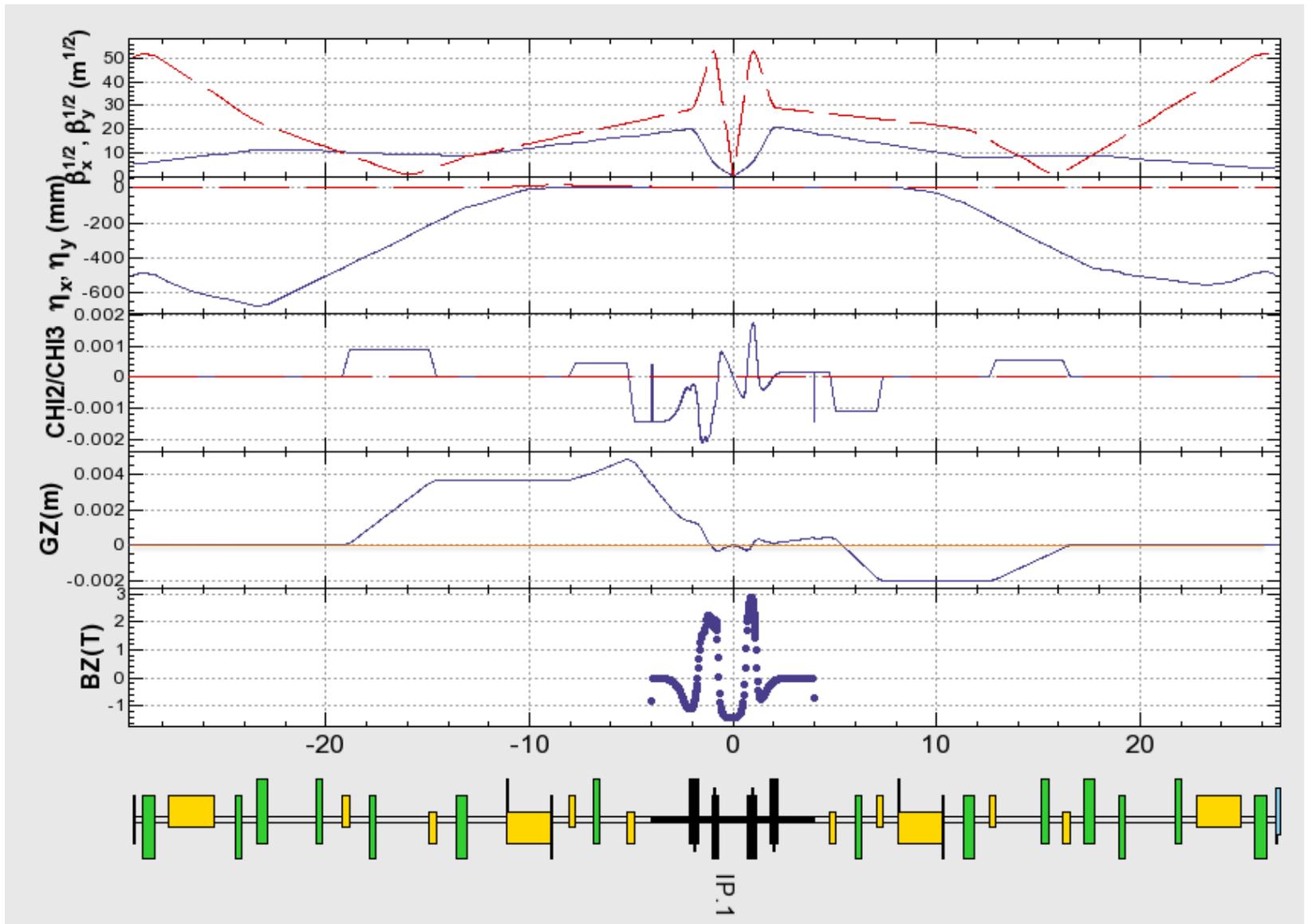
$$\int B_z(s)ds = 0$$

ビーム軌道は螺旋軌道となり3次元的である。
x-y軸は、ビーム軸に沿って回転する

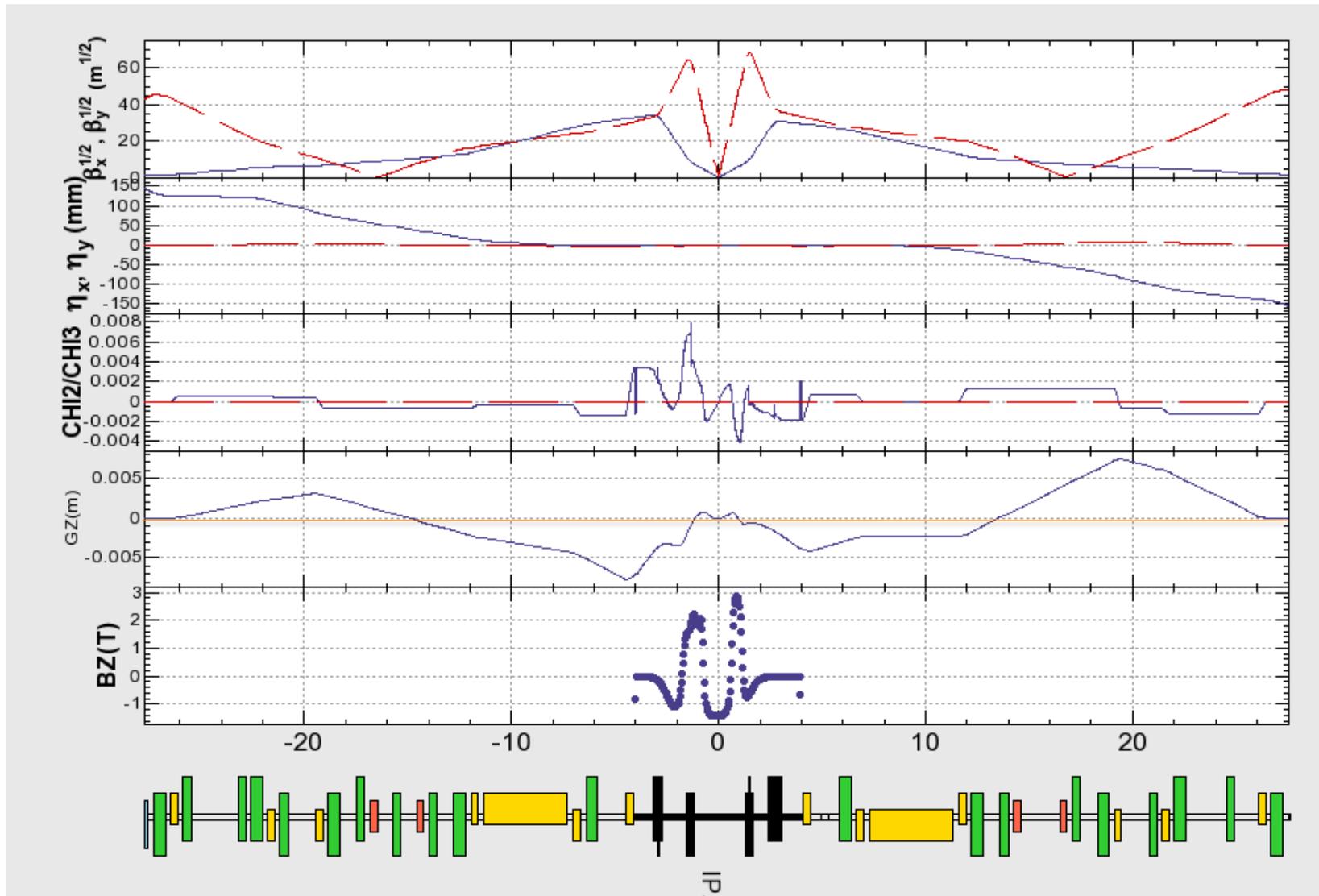
$$\varphi = \frac{e}{2p} \int_{IP} B_z(s)ds \quad \text{s: IPからの軌道に沿った距離}$$

ソレノイド磁場内にある最終四極磁石も
ビーム軸のまわりに回転して配置される。

Nano LER IR



Nano HER IR



item 3

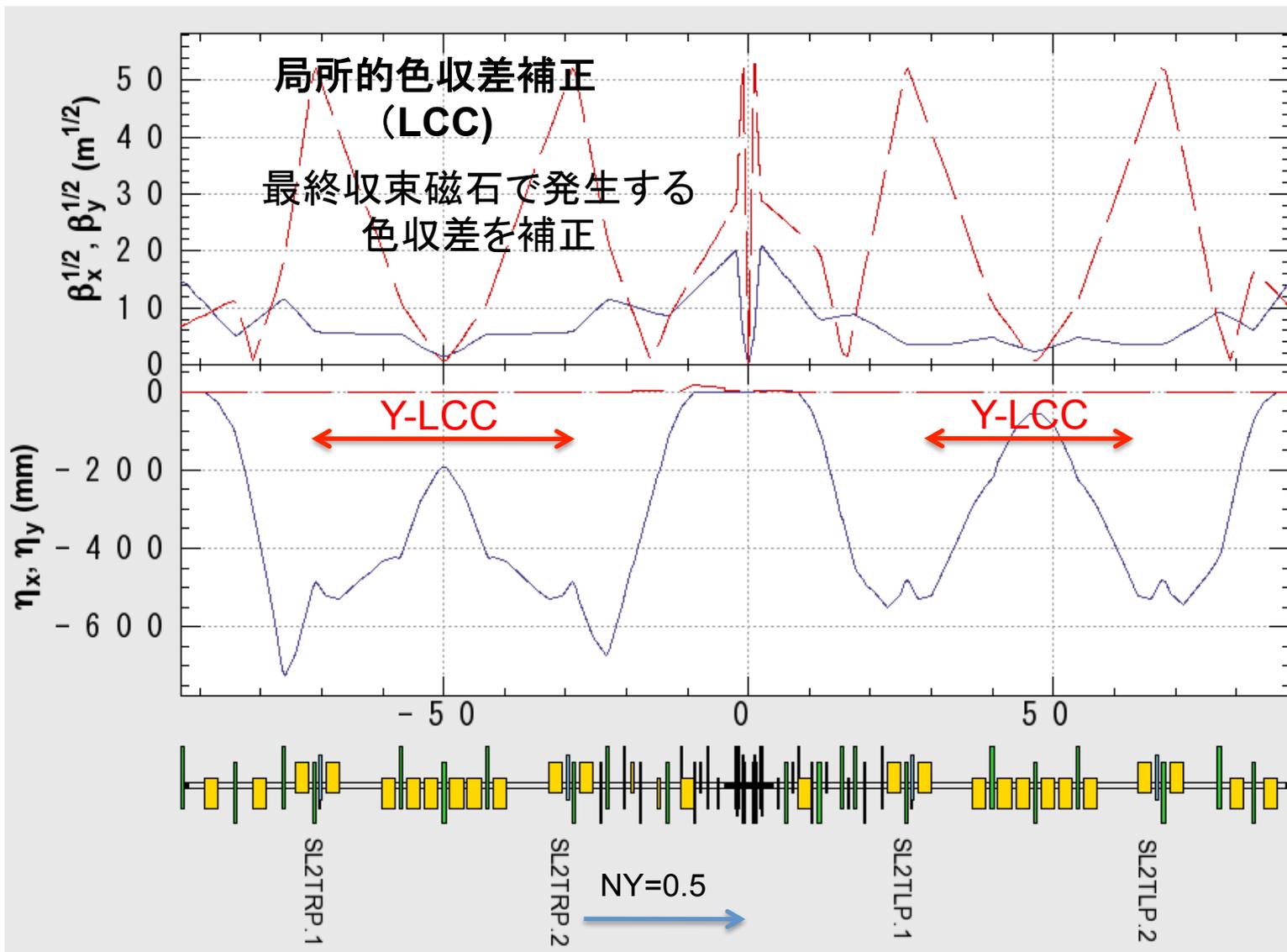
Dynamic Aperture* for injection, Touschek lifetime



Local Chromaticity Correction with small emittance in IR

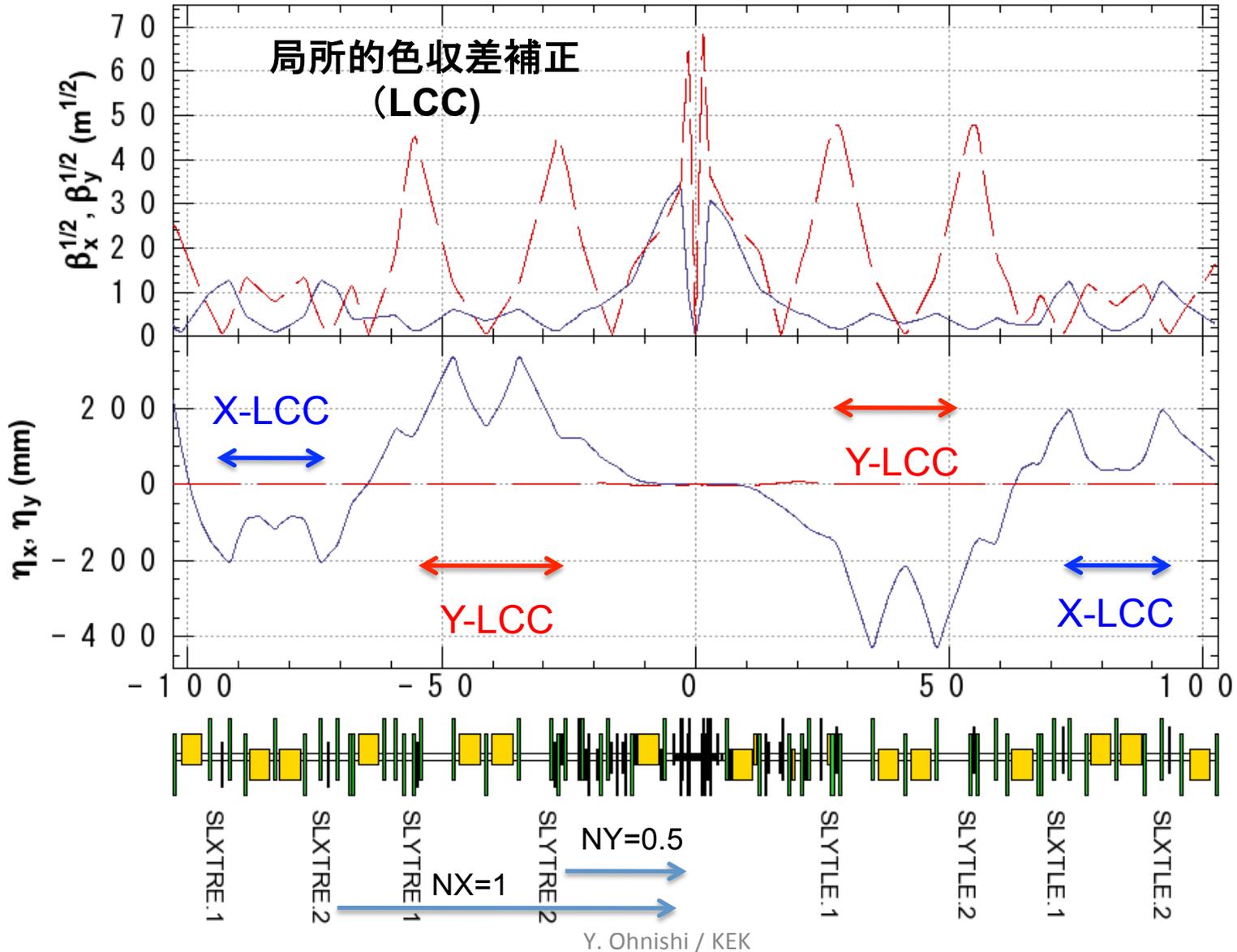
*Dynamic aperture: 光学口径、ビームの力学的安定領域

Nano-Beam LER



A. Morita

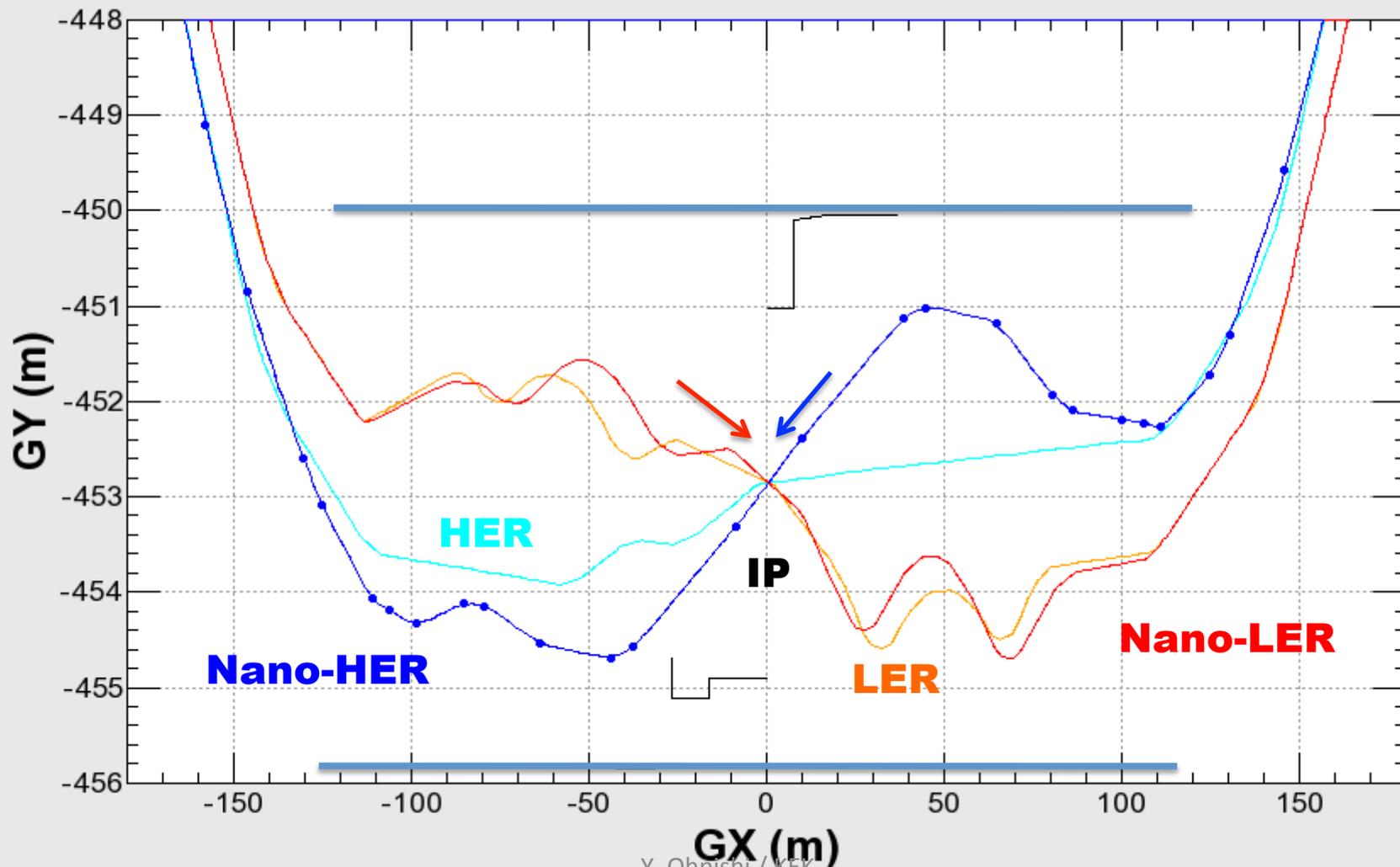
Nano-Beam HER



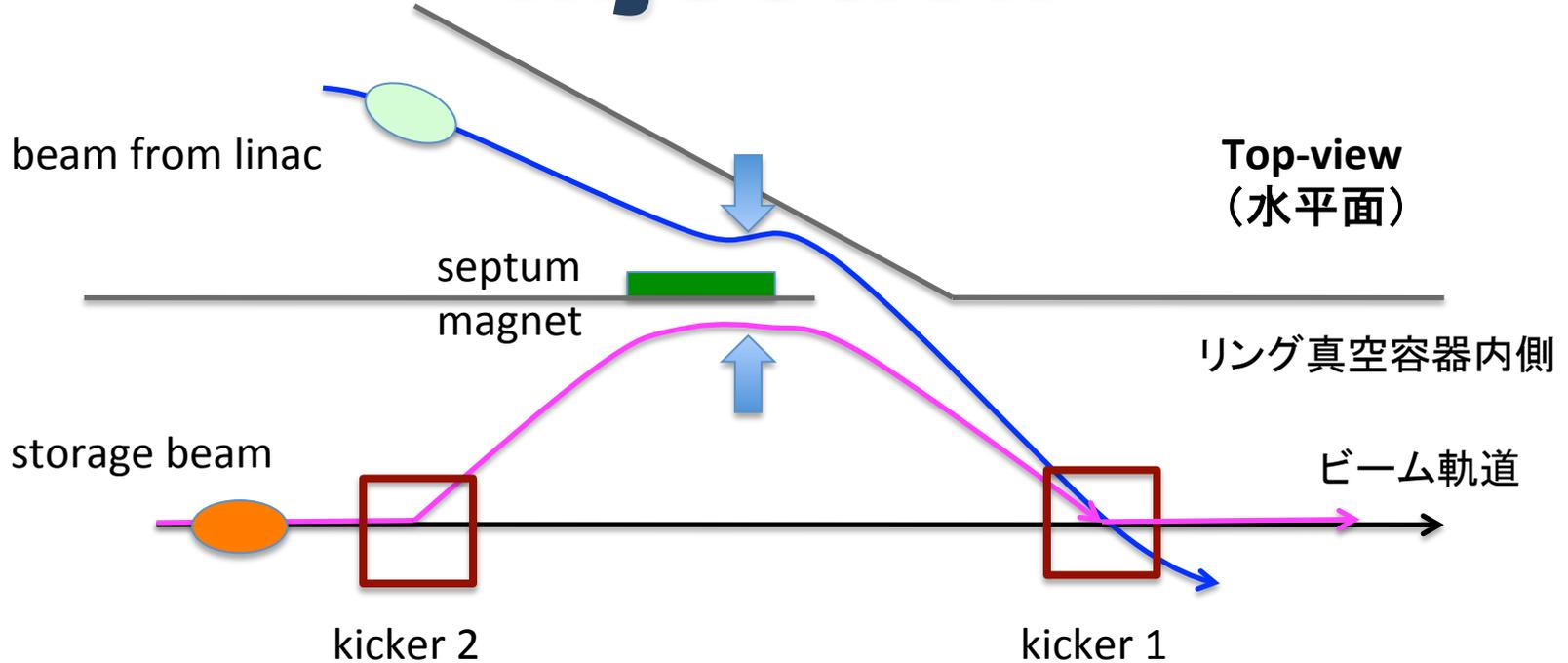
衝突点付近

OHO トンネル内ビームライン

NIKKO



Injection



- (1) 入射キッカーにより、蓄積ビームは閉じたバンプ軌道となる。
- (2) 入射ビームは、セプトラムで蓄積ビームに寄せられつつ、ベータトロン振動しながら、蓄積ビームと合流する。

入射振幅と入射ビームの大きさの合計が、要求されるアパーチャとなる。
また、入射ビームのバンチ長に相当するエネルギー方向のアパーチャも必要。
(物理的アパーチャおよびダイナミック・アパーチャ)

Injection Beam

入射振動は、入射ビーム・サイズおよび蓄積ビームと入射ビームの接近度合いで決まる。

低エミッタンスの実現

陽電子：ダンピングリング

電子：RF電子銃

セプタムの壁の厚み分の入射振動を

リングの安定領域に包含かつ

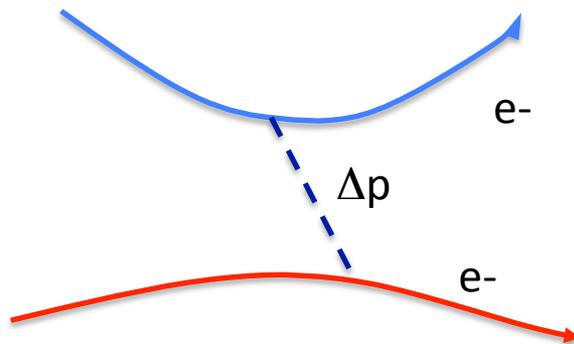
エネルギーアクセプタンスもバンチ長相当必要。

Touschek Lifetime

バンチ内粒子のメラー散乱。

粒子同士の衝突により、
進行方向の運動量を交換する。

基準粒子からずれた運動量を持つ粒子は、
ポテンシャルの安定領域から外れると失われる。



Touschek Lifetime (cont'd)

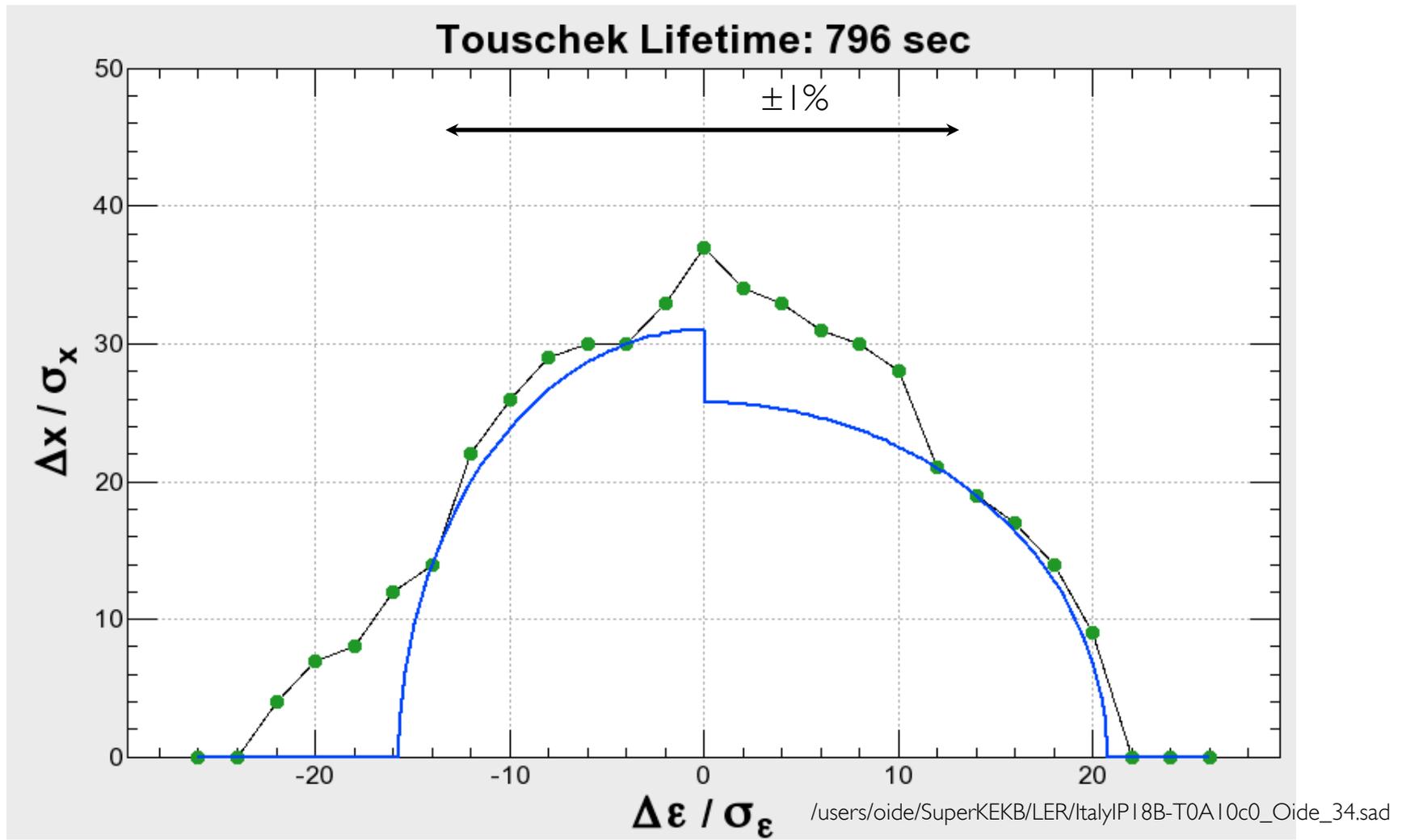
Touschek lifetimeを確保するために:

ダイナミック・アパーチャを最大限大きくする。
ビーム・エネルギーを最適化する。

$$\tau \propto \frac{E^3}{N}$$

LER(e+) x HER(e-)
4 GeV x 7 GeV

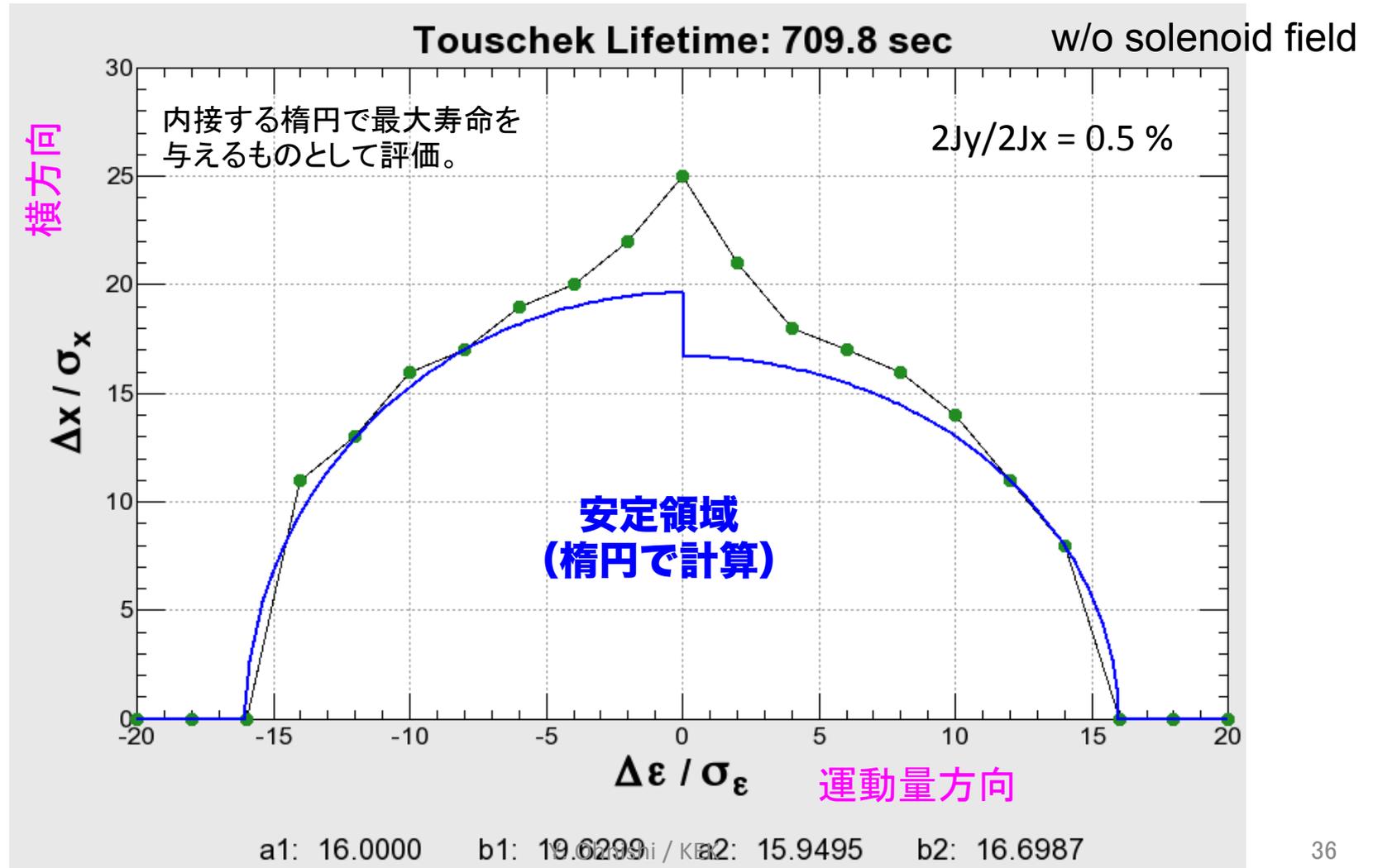
LER Dynamic Aperture (stored beam)



- Touschek Lifetime: Δx , Δz の内接楕円の内、ライフ最大のもので評価。
- Emittance: 3.1 nm with intrabeam (4 GeV, 3.6 A, 2500 bunches, 0.45% coupling)

生出

HER Dynamic Aperture (stored beam) Both X-LCC and Y-LCC scheme



加速器構成要素の高度化

真空システム

HSCと同じ基本設計。LERは銅からアルミ製としてコスト削減の可能性あり。

高周波加速システム

電流2倍に対応する増強。低電圧大パワー対応。

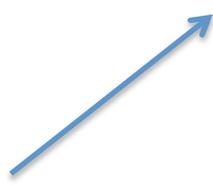
電磁石システム

ビームモニターシステム

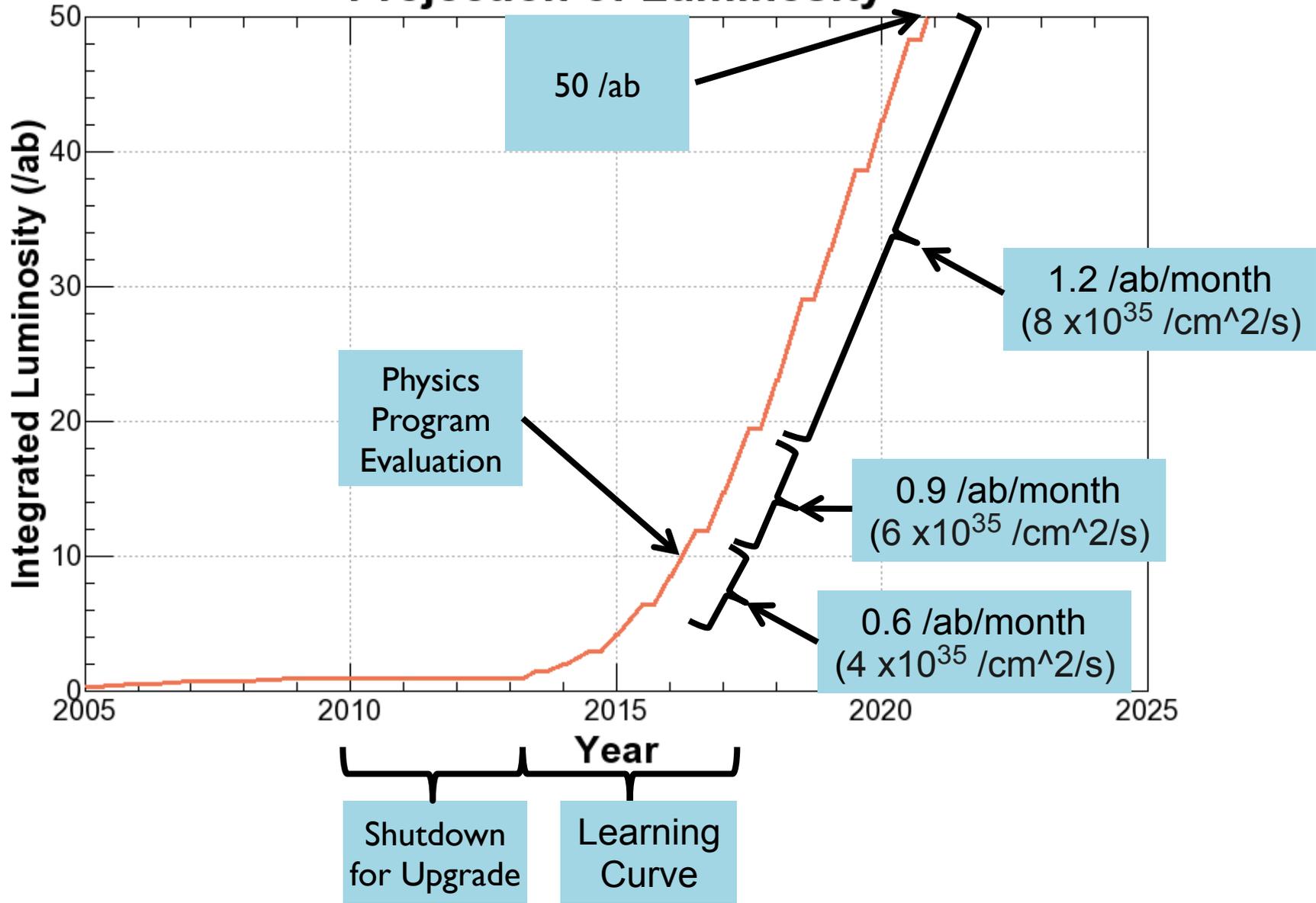
電力消費量 (放射光ロス)

(LER/HER)	KEKB Design	KEKB Achieved : with crab	SuperKEKB High-Current	SuperKEKB Nano-Beam
Energy (GeV)	3.5/8.0	3.5/8.0	3.5/8.0	4.0/7.0
U_0 (MeV)	1.64/3.48	1.64/3.48	1.23/3.48	2.293/2.145
I_{beam} (A)	2.6/1.1	1.64/1.19	9.4/4.1	3.6/2.6
P_{rad} (MW)	4.26/3.83	2.69/4.14	11.56/14.27	8.26/5.58
P_{rad} [LER+HER] (MW)	8.09	6.83	25.83	13.83

ランニング・コストの問題は低減。



Projection of Luminosity



エネルギーの自由度

ブーストを変えないで、
~3.6 GeVから10.86 GeVまで変えられるか？

衝突点ソレノイド領域でのビーム軌道の変化。
測定器ソレノイドの強さを変えない限り避けられない。

ソレノイド磁場ゼロというのが加速器にとって理想的。

磁石（偏向磁石、四極磁石等）の励磁特性の測定領域の問題。

$$L \propto E_{\pm} I_{\pm}$$

エネルギーに伴う
ルミノシティ依存は避けられない。

偏極ビームの可能性

- リングの衝突点領域にスピン・ローテターを入れる。
 - **transverse**を**longitudinal**に変換
 - **solenoid** (**dipole**は垂直エミッタンスが発生)
- 偏極ビーム(**vert.**)を入射する。
 - **long. polarization time**とビーム寿命の問題
- ビーム・エネルギーは任意に選べない？

まとめ

- **KEKB**高度化は、**Nano-Beam Scheme**でいく予定。
- 今のところ、致命的な困難に直面していない。
- ビームエネルギー、測定器ソレノイドの強さ等、加速器と測定器の共通課題には最適化の余地。
- エネルギー変更自由度と偏極ビームは今後の課題。

Appendix

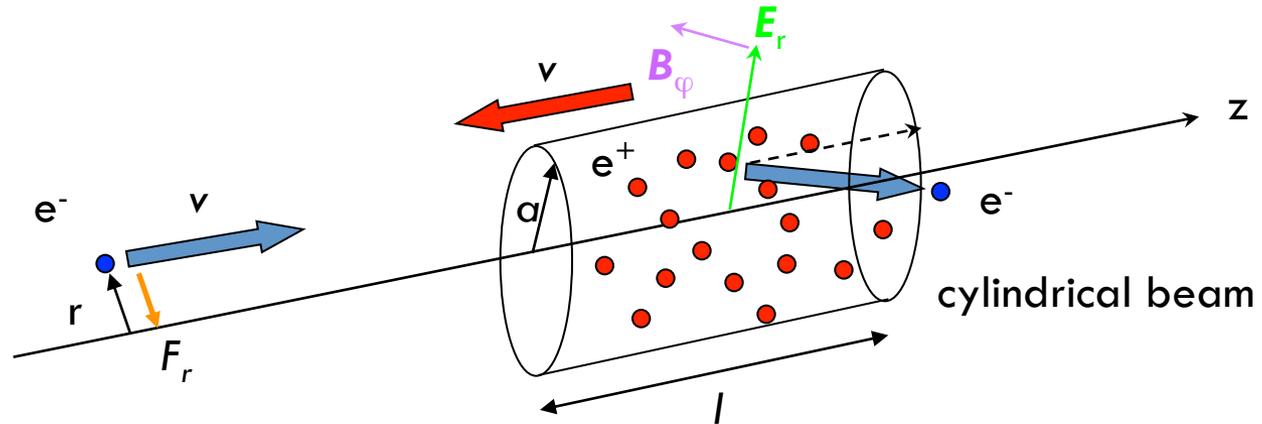
1. 高いビーム電流を 実現するために

加速空洞の増強
真空システムの増強

2. 高いビーム・ビーム パラメータを 実現するために

**力学的運動を単純化
する必要がある。**

Beam-beam force



- The electric and magnetic field can be written by:

$$E_r = \frac{\lambda r}{2\pi a^2 \epsilon_0} \quad B_\varphi = -\frac{\mu_0 \lambda r \beta c}{2\pi a^2} = -\frac{\beta}{c} E_r$$

λ is a longitudinal line charge density.

$$\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$$

- Lorentz force can be expressed by:

$$F_r = -e(E_r - c\beta B_\varphi) = -e(1 + \beta^2)E_r \cong -2eE_r \quad v \approx c$$

- Beam-beam force is proportional to the electric field and an attracting force.

Beam-Beam Parameter

In case of Gaussian beam:

$$F_x(x, y, \sigma_x^*, \sigma_y^*) - iF_y(x, y, \sigma_x^*, \sigma_y^*)$$

$$= -i \sqrt{\frac{2\pi}{\sigma_x^{*2} - \sigma_y^{*2}}} \left\{ w\left(\frac{x + iy}{\sqrt{2(\sigma_x^{*2} - \sigma_y^{*2})}}\right) - \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma_x^{*2}} - \frac{y^2}{\sigma_y^{*2}}\right) w\left(\frac{\frac{\sigma_y^{*2}}{\sigma_x^{*2}}x + i\frac{\sigma_x^{*2}}{\sigma_y^{*2}}y}{\sqrt{2(\sigma_x^{*2} - \sigma_y^{*2})}}\right) \right\}$$

Nonlinear Force

Error function

$$w(z) = \exp(-z^2) \{1 - \operatorname{erf}(-iz)\}$$

$$\xi_x \propto F_x$$

$$\xi_y \propto F_y$$

Linear part of beam-beam force
= Beam-Beam parameter ξ

**3次元運動を
独立した1次元運動 \times 3に転換できれば、
非線形力が増しても
安定な運動となる。**

クラブ空洞とベータトロンチューンを半整数共鳴に近づける。

x-z 相関を解消

x-y 相関を解消

**大きなビーム・ビームパラメータが
期待できる。**

**KEKBおよび
SuperKEKB(HCS)の指導原理**

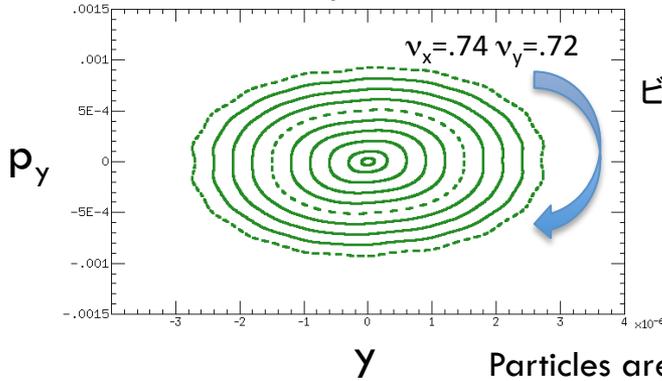
Beam-Beam effect and "Chaos"

↑ **1-dimensional**
 $x_0 = 0$



↕ **2-dimensional**
 $x_0 = 5\%$ of σ_x

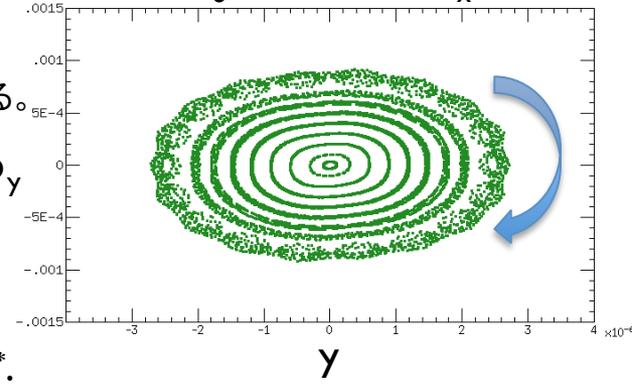
*near-integrable surface



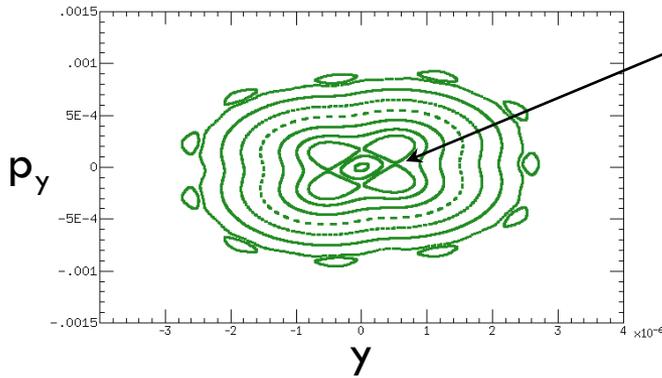
ビームは楕円上を回る。

$\xi_y = 0.02$

p_y

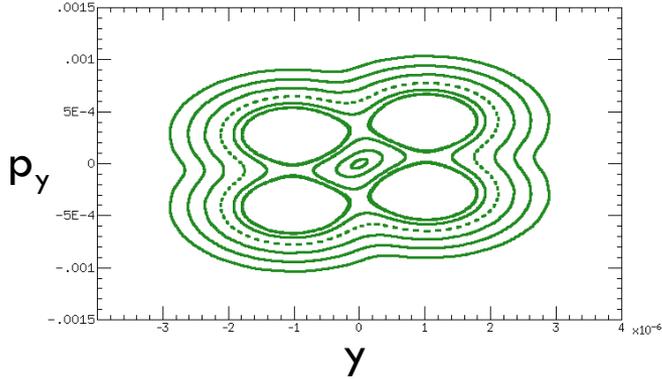
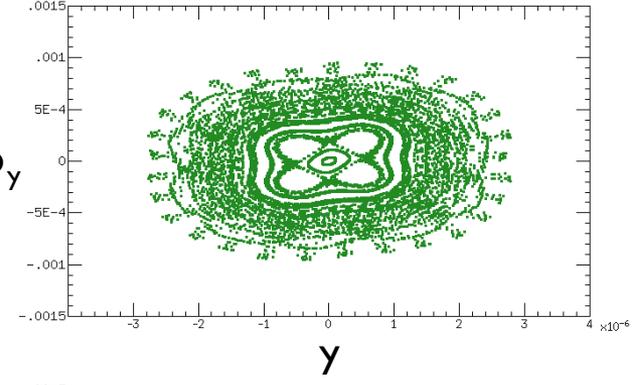


Particles are confined in KAM*.



$\xi_y = 0.053$

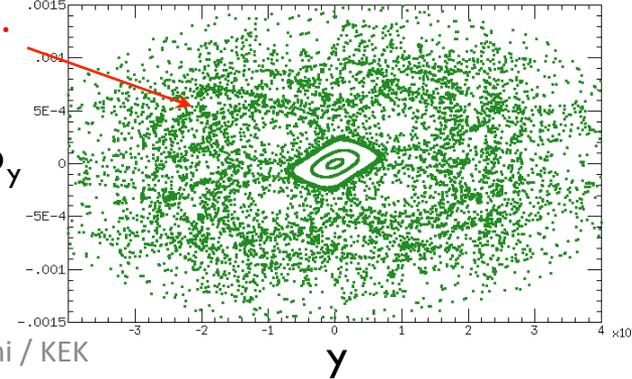
p_y



KAM is destroyed.
 Beam size growth

$\xi_y = 0.10$

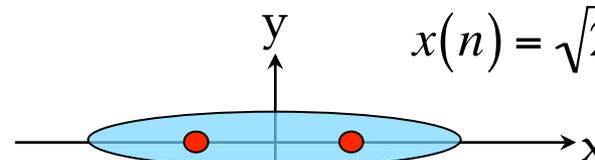
p_y



Large beam-beam parameter

Horizontal Tune close to Half Integer

- In the collision of two beams, particles interact with fixed beam at either x or $-x$ for $\nu_x=0.5$.



$$x(n) = \sqrt{2J_x \beta_x} \cos(2\pi \nu_x n + \psi_{x0})$$

n: turn number (integer)

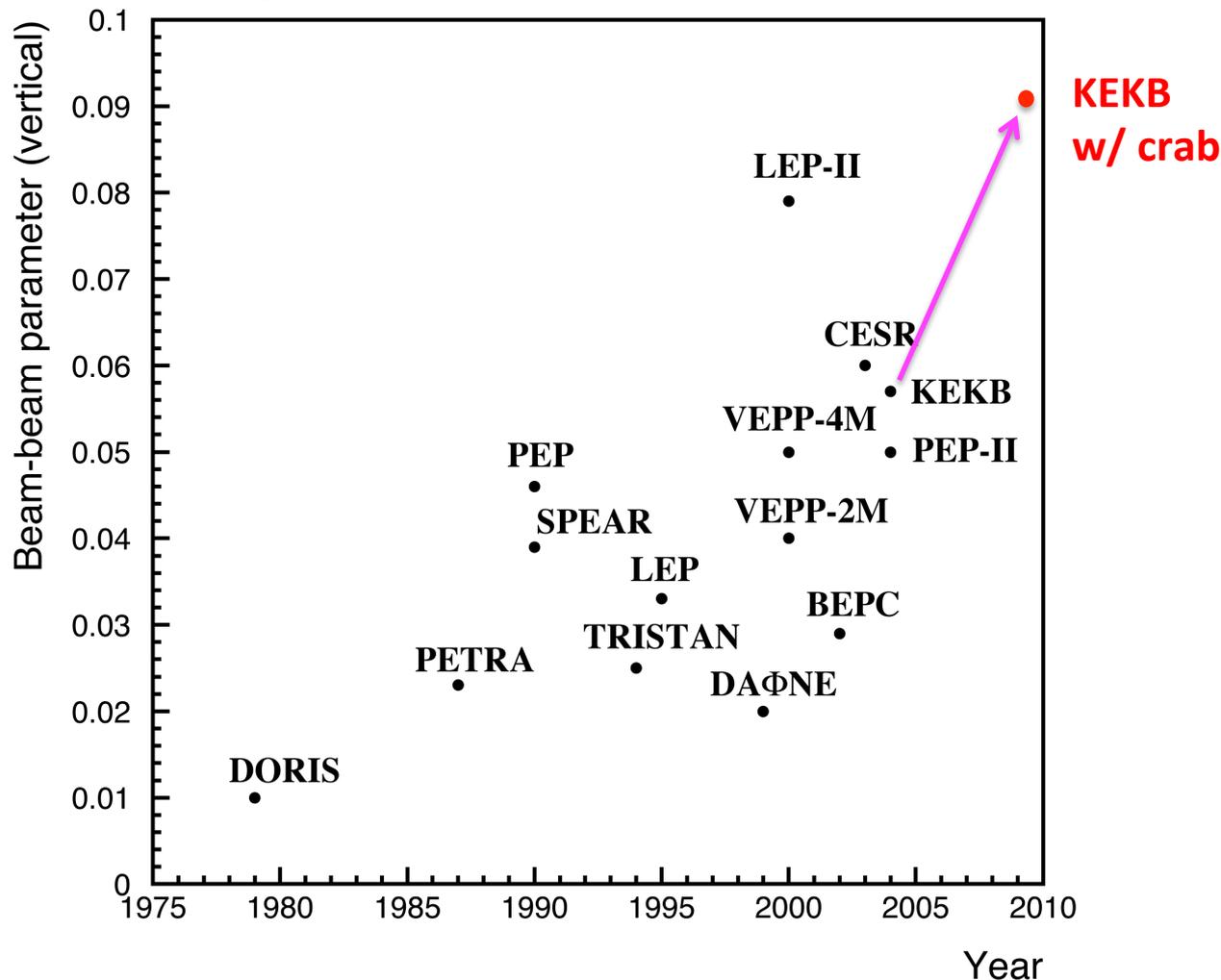
- In the case of **crab crossing**, the phase space structure in $y-p_y$ at x is the same as that at $-x$ because of symmetry of the fixed beam.

- System becomes one dimensional and avoids bad resonances, the beam-beam parameter can be increased.



- This technique realizes high luminosity at KEKB/HCS. To make this possible, machine errors must be reduced significantly.

History of Beam-Beam



ビーム・ビーム パラメータに限界はあるか？

**3. ベータ関数を
小さくするためには**

正面衝突では

**バンチ長も短くする
必要がある。**

Beam Spot Size near IP

$$\sigma_{x,y}^2(z) = \varepsilon_{x,y} \beta_{x,y}^* + \frac{\varepsilon_{x,y}}{\beta_{x,y}^*} z^2$$

$z = 0$ at IP

$$\theta_{x,y} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{x,y}}{\beta_{x,y}^*}}$$

ベータ関数最小、 $z=0$ をwaistと呼ぶ。

Angular divergence of the beam at IP

Hourglass effect

衝突点ベータ関数を絞れば絞るほど、衝突点から離れるにつれて
ビームサイズの大きくなる割合が大きくなる(z 依存が大きくなる)。

バンチ長が衝突領域長の場合、Hourglass効果を低減するために、
バンチ長をベータ関数と同程度または以下となるように短くする必要がある。

コヒーレント放射光 (CSR)

バンチ長よりも長い波長領域の放射光を、
コヒーレント放射光と呼ぶ。

長い波長からするとバンチ長は点と
見なせるので位相の揃った光が
各荷電粒子から放出される。

短いバンチほどコヒーレント放射光の
波長領域が増えるので深刻となる。

コヒーレント放射光

インコヒーレント放射光:

$$\text{電場 } E \sim N^{1/2}$$

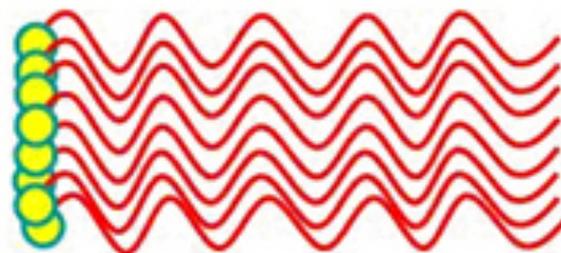
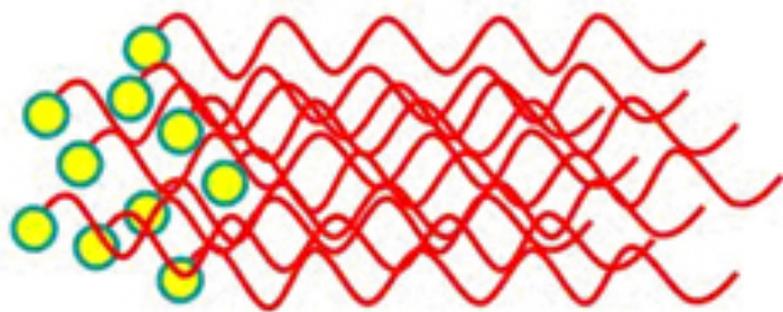
$$\text{放射パワー} \sim N$$

コヒーレント放射光:

$$\text{電場 } E \sim N$$

$$\text{放射パワー} \sim N^2$$

(N は、バンチ内荷電粒子数)



コヒーレント放射光 (cont'd)

(1) バンチの後方から放出されたコヒーレント放射光は、偏向磁石内を直進してバンチの前方に当たる。

(2) バンチの前方から放出されたコヒーレント放射光は、真空容器の壁で反射してバンチの後方に当たる。

以上のような仕組みでビームに悪影響を及ぼす。

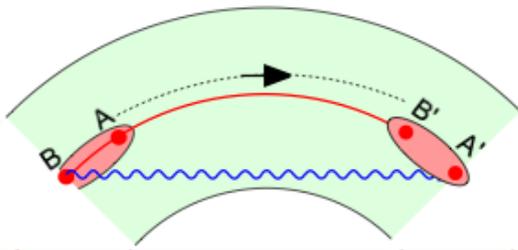


図 17: CSR の幾何学。電子の速さはほとんど光速なので、破線の長さと円弧 B→B'、A→A' の長さは同じ。

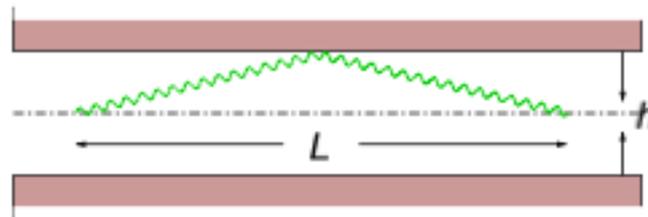


図 19: ビームパイプによる遮蔽。

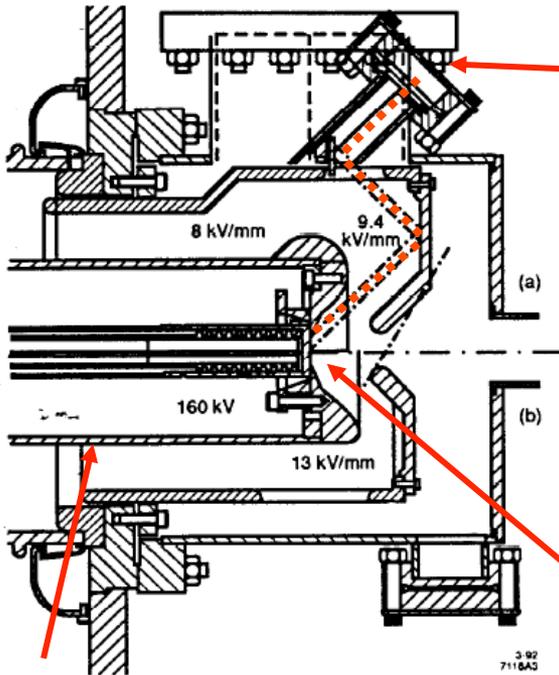
図の引用: OHO'07
横谷氏テキストより

大電流方式(HCS)での問題点

- 大電流, 短バンチ(3 mm), クラブ交差, 大ビームビームパラメータ(~ 0.3), 方式では,
 - クラブ交差でシミュレーションどおりの大きいビームビームパラメータを達成するには, さらにブレークスルーが必要.
 - 大ビームビームパラメータ, かつ, $\beta x^* = 20$ cm の現実的な衝突点設計ができていない. 特に放射光の取り扱い.
 - CSRの影響により LER のバンチ長は > 5 mm に伸びてしまう. ルミノシティを回復するには, Travel Waist の導入が必要になる.
- もともと, 10^{35} cm⁻²s⁻¹が目標であった(2001).

偏極電子銃

The Polarized Electron Gun for the SLC
D. C Schultz, J. Clendenin, J. Frisch, E. Hoyt, L. Klaisner,
M. Woods, D. Wright, M. Zolotorev
Stanford Linear Accelerator Center,
SLAC-PUB-5768, March 1992



laser light input

$7 \times 10^{10} e^-$ in 1 nsec

$q \approx 11 \text{ nC}$

$I \approx 11 \text{ A}$

$87\%(\text{inj}) \times 97\%(\text{ring}) = 85\%$

- 120 kV

GaAs photocathode

偏極陽電子

- 1. Compton**
- 2. Polarized Bremsstrahlung**
- 3. Selective Compton**

ビーム・ビーム パラメータ

運動方程式(垂直方向:y)は

$$\frac{dp_y}{dt} = F_r \sin \varphi = -2eE_r \sin \varphi$$

運動量の変化は、

$$\Delta p_y = - \int_{-\infty}^{+\infty} 2eE_r \sin \varphi \cdot dt$$

ビームが相手のビームの作る電磁場によってキックされる量は

$$\Delta y' = \frac{\Delta p_y}{p_0} \cong - \frac{4\pi\xi_y}{\beta_y^*} y$$

ξ をビーム・ビーム パラメータと呼ぶ。
水平方向(x)も同様。
作用としては、凸レンズ。

Beam-beam force (cont'd)

Analytic formula

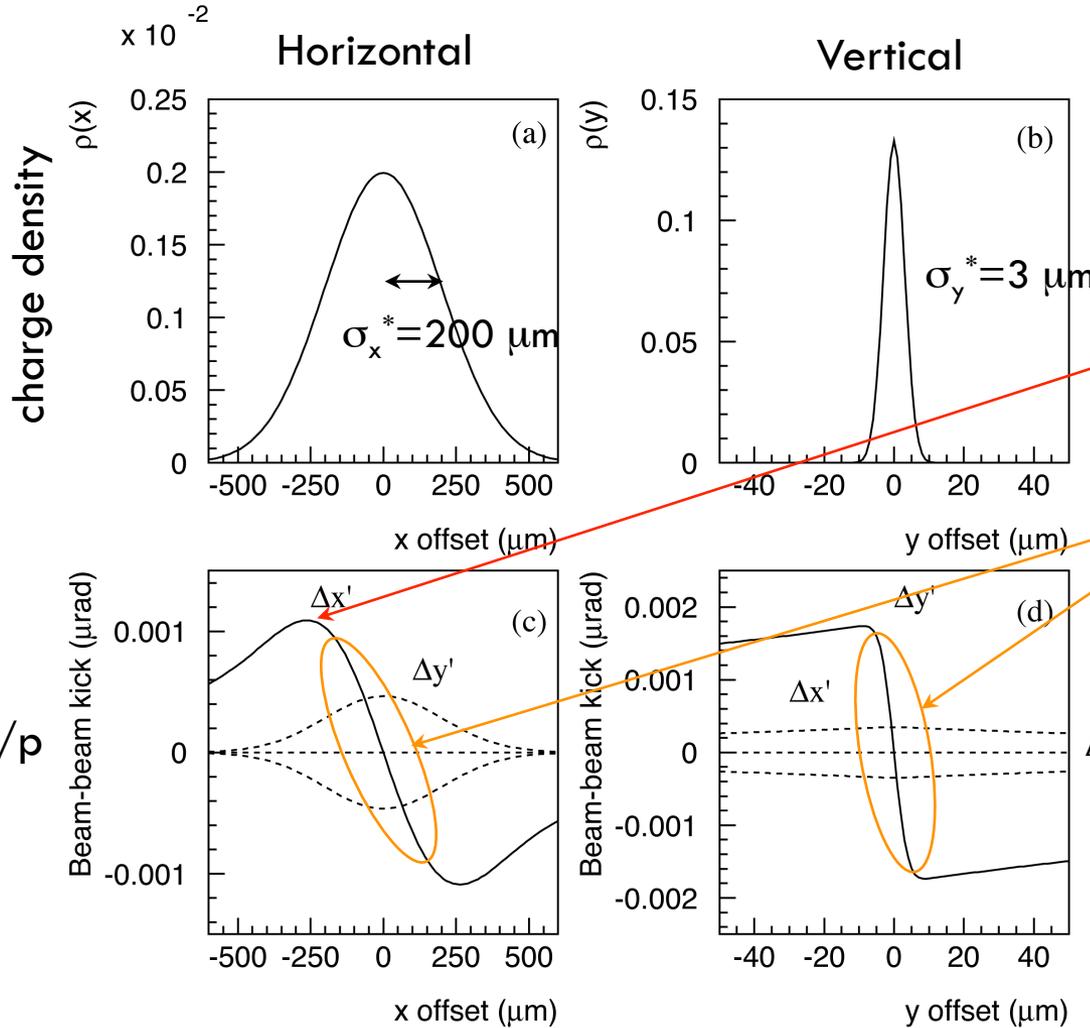
Beam-beam force is nonlinear.

This region is almost linear.

Focusing force

$$\frac{\Delta p_{x,y}}{p} = -\frac{4\pi\xi_{x,y}}{\beta_{x,y}^*} x,y$$

$$\xi_{x,y\pm} = \frac{r_e N_{\mp} \beta_{x,y}^*}{2\pi\gamma_{\pm} \sigma_{x,y}^* (\sigma_x^* + \sigma_y^*)} R_{\xi_{x,y}}$$



We call this slope ($\xi_{x,y}$) a beam-beam parameter.

Beam-beam parameter

$$\xi_y^\pm = \frac{r_e}{2\pi\gamma_\pm} \frac{N_{\mp} \beta_y^*}{\sigma_y^* (\sigma_x^* + \sigma_y^*)} R_{\xi_y}$$

Maximum luminosity is given by:

$$L \propto N_+ N_- = \xi_y^- \xi_y^+ \leq \left(\frac{\xi_y^- + \xi_y^+}{2} \right)^2 = \xi_{y,\max}^2$$

$$\xi_y^- = \xi_y^+ \rightarrow \frac{N_+}{\gamma_-} = \frac{N_-}{\gamma_+} \quad \sqrt{ab} \leq \frac{a+b}{2}$$

Beam-beam parameter

$$\xi_y^{\pm} = \frac{r_e}{2\pi\gamma_{\pm}} \frac{N_{\mp}\beta_y^*}{\sigma_y^* (\sigma_x^* + \sigma_y^*)} R_{\xi y}$$

In case of Nano-Beam scheme:

$$\xi_y^{\pm} = \frac{r_e}{2\pi\gamma_{\pm}} \frac{N_{\mp}}{\sigma_z \phi} \sqrt{\frac{\beta_y^*}{\varepsilon_y}} R_{\xi y}$$
$$\sigma_{x,y}^* = \sqrt{\varepsilon_{x,y} \beta_{x,y}^*}$$
$$\sigma_x^* = \sigma_z \phi$$
$$\varepsilon_y = K\varepsilon_x$$

垂直ベータ関数を絞りつつ、ビームビームパラメータを維持するためには、同時に垂直エミッタンスも小さくする必要がある。

SuperKEKB 入射に必要な電荷量 (陽電子)

- Loss rate

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \frac{dI}{dt} = -\frac{I}{\tau}$$

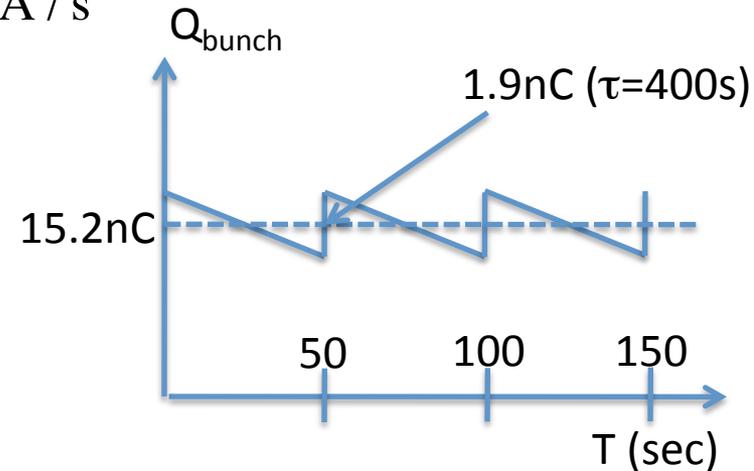
$$I_0 = 3.8 \text{ A}, \tau = 400 \text{ sec} \Rightarrow \frac{dI}{dt} = -9.5 \text{ mA / s}$$

- Injection rate

- Linac 4nC/bunch -> 8nC/pulse
- 25Hz -> 200nC/s -> 20mA/s
- Injection rate: 10mA/s
- (Injection eff. = 50%)

- imbalance of bunch charge

- $I_{\text{beam}} = 3.8 \text{ A}$, $N_b = 2500$ -> 1.52mA/bunch, 15.2nC/bunch
- 25Hz injection -> 50 bunches/s -> 50sec for whole bunches
- Charge imbalance -> 15.2nC +/- 1nC (+/- 6.6%)
 - Maybe somewhat worse in a real situation



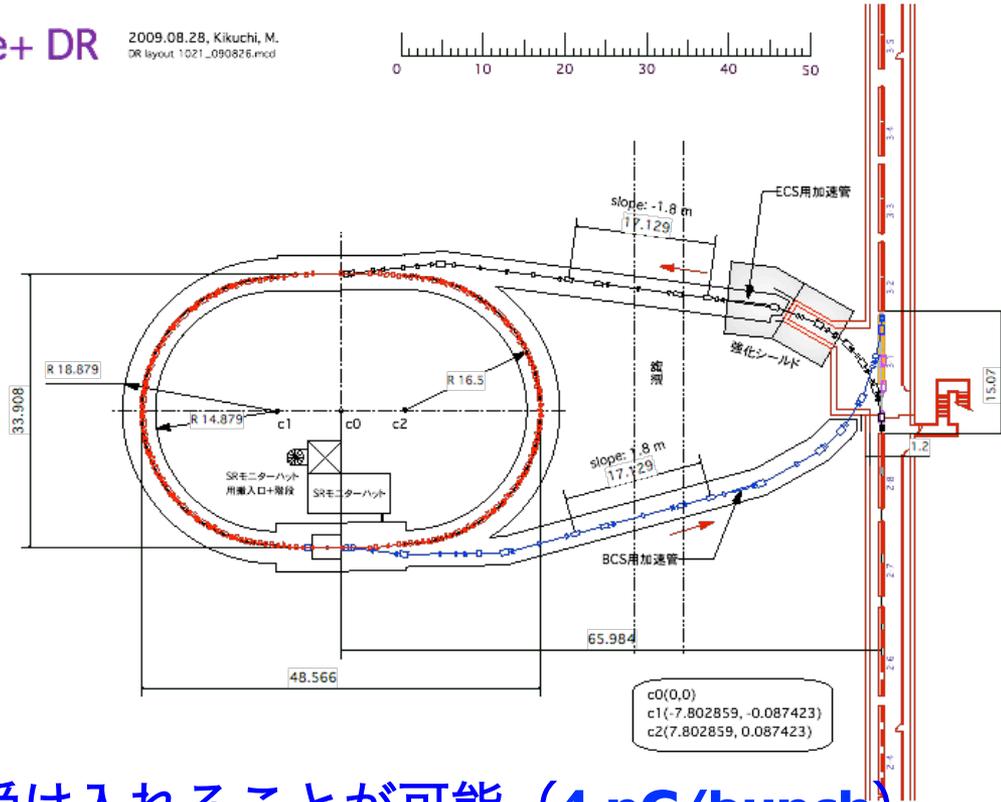
Positron Damping Ring

e+ DR 2009.08.28, Kikuchi, M.
DR layout 1021_090826.mcd



予定

- 2009年 施設の詳細設計を開始
- 2010年度 トンネル建設開始
- 2012年度 トンネル・建屋完成
- 2013年度 機器設置・運転調整開始



現在の4倍以上のバンチ電荷を受け入れることが可能 (4 nC/bunch)

Energy Compression System
Bunch Compression System を入出射路に装備

- 広い力学口径 ($A_x=25 \mu\text{m}$, Momentum aperture= $\pm 1.5\%$)
- 高いエミッタンス低減率: 2000 nm \rightarrow 13 nm

菊池

High Current

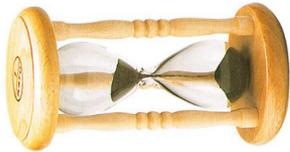
Nano-beam

Bunch length requirement :

$$\sigma_z < \frac{\sigma_x^*}{\phi} \rightarrow \infty (\phi \rightarrow 0)$$

$$\sigma_z > \frac{\sigma_x^*}{\phi}$$

Hourglass requirement :



$$\beta_y^* \geq \sigma_z$$

$$\beta_y^* \geq \frac{\sigma_x^*}{\phi}$$

Luminosity :

$$L \propto \frac{N_+ N_-}{\sigma_x^* \sigma_y^*}$$

$$L \propto \frac{N_+ N_-}{\phi \sigma_z \sigma_y^*}$$

Beam-beam parameter :

$$\xi_y \propto \frac{N_+}{\sigma_x^*} \sqrt{\frac{\beta_y^*}{\epsilon_y}}$$

$$\xi_y \propto \frac{N_+}{\phi \sigma_z} \sqrt{\frac{\beta_y^*}{\epsilon_y}}$$

Parameter Considerations

Beam current:

Keep luminosity:

$$L \propto E \cdot I$$

Increase E, decrease I
Decrease E, increase I

Damping time:

$$\tau_x = \tau_y = 2\tau_s = \frac{2ET}{U}$$

Increase E, increase U
Decrease E, decrease U

Bunch length:

Keep bunch length:

$$\sigma_z = \frac{C\alpha_p}{2\pi\nu_s} \sigma_\delta \propto \sqrt{\frac{\alpha_p E^3}{V_{RF}}}$$

Energy loss/turn $U \propto E^4$

Increase E, increase V_{RF}
Decrease E, decrease V_{RF}
if α_p is fixed.

Energy spread:

$$\sigma_\delta = \gamma \sqrt{\frac{C_q}{2\rho}} \propto E$$

σ_δ can not be controlled.
 $C_q = \frac{55}{32\sqrt{3}} \frac{\hbar}{mc} = 3.832 \times 10^{-13} \text{ m}$

Synchrotron tune:

$$\nu_s \propto \sqrt{\frac{\alpha_p V_{RF}}{E}}$$

Smaller ν_s is preferable.