

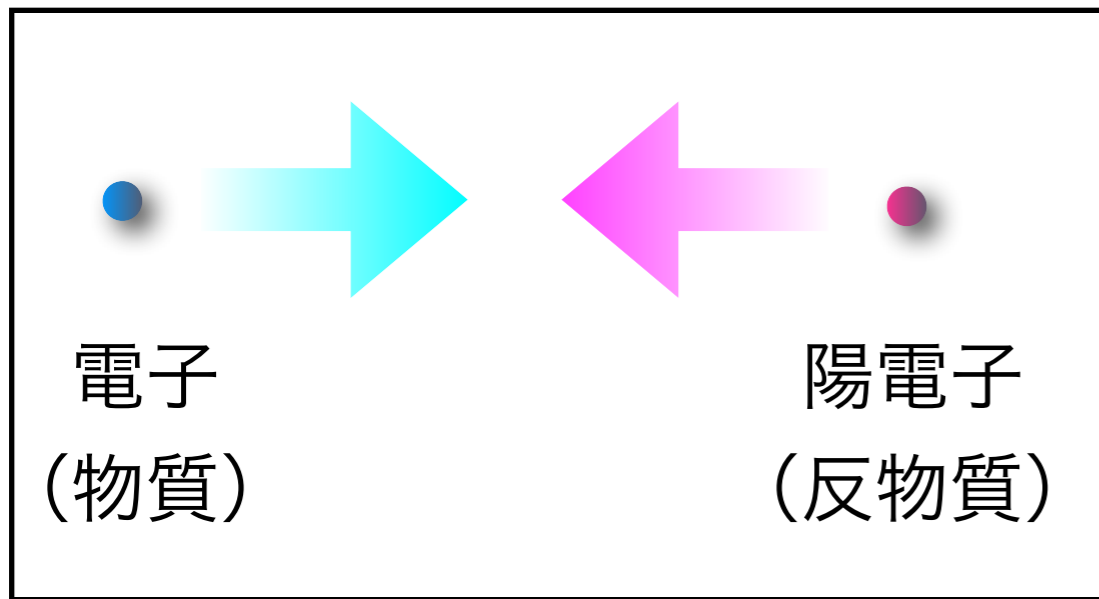
ルミノシティに 限界はあるか？

SuperKEKB 加速器

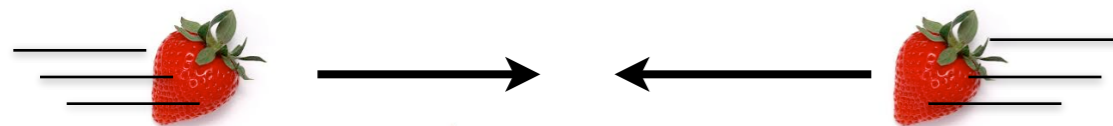
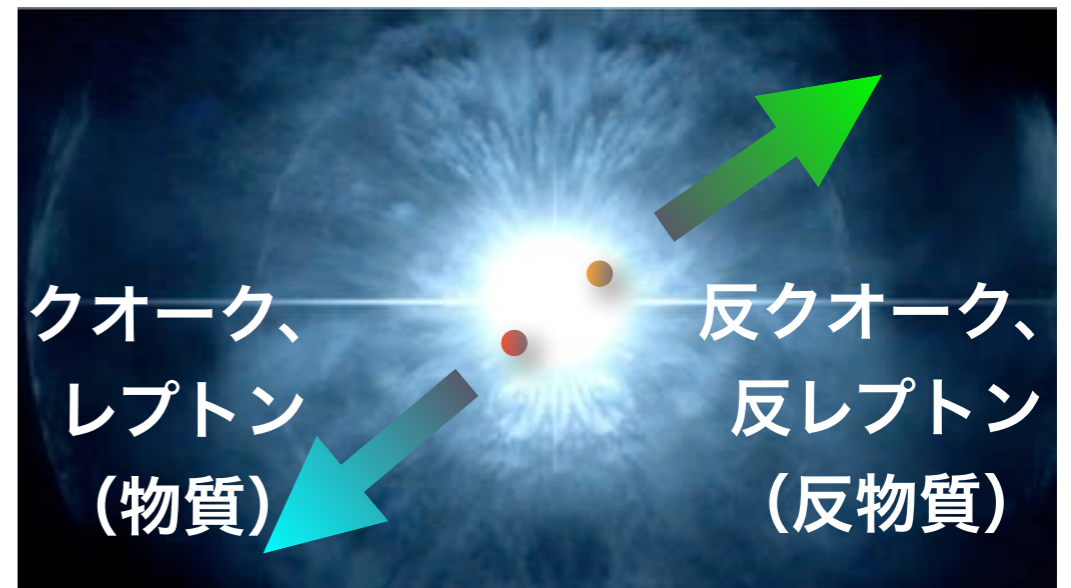
素粒子をぶつけて壊す！

互いに衝突させた方が、固定標的よりも
高いエネルギーに到達できる

高いエネルギーで衝突させる



高いエネルギーの塊 → 宇宙初期



時間の逆回し
関係

ビッグバン？

新しく素粒子が生まれる。
素粒子から陽子、中性子、中間子など
様々な粒子が生成、崩壊

イメージ図



加速器が生み出す宇宙から情報を得る

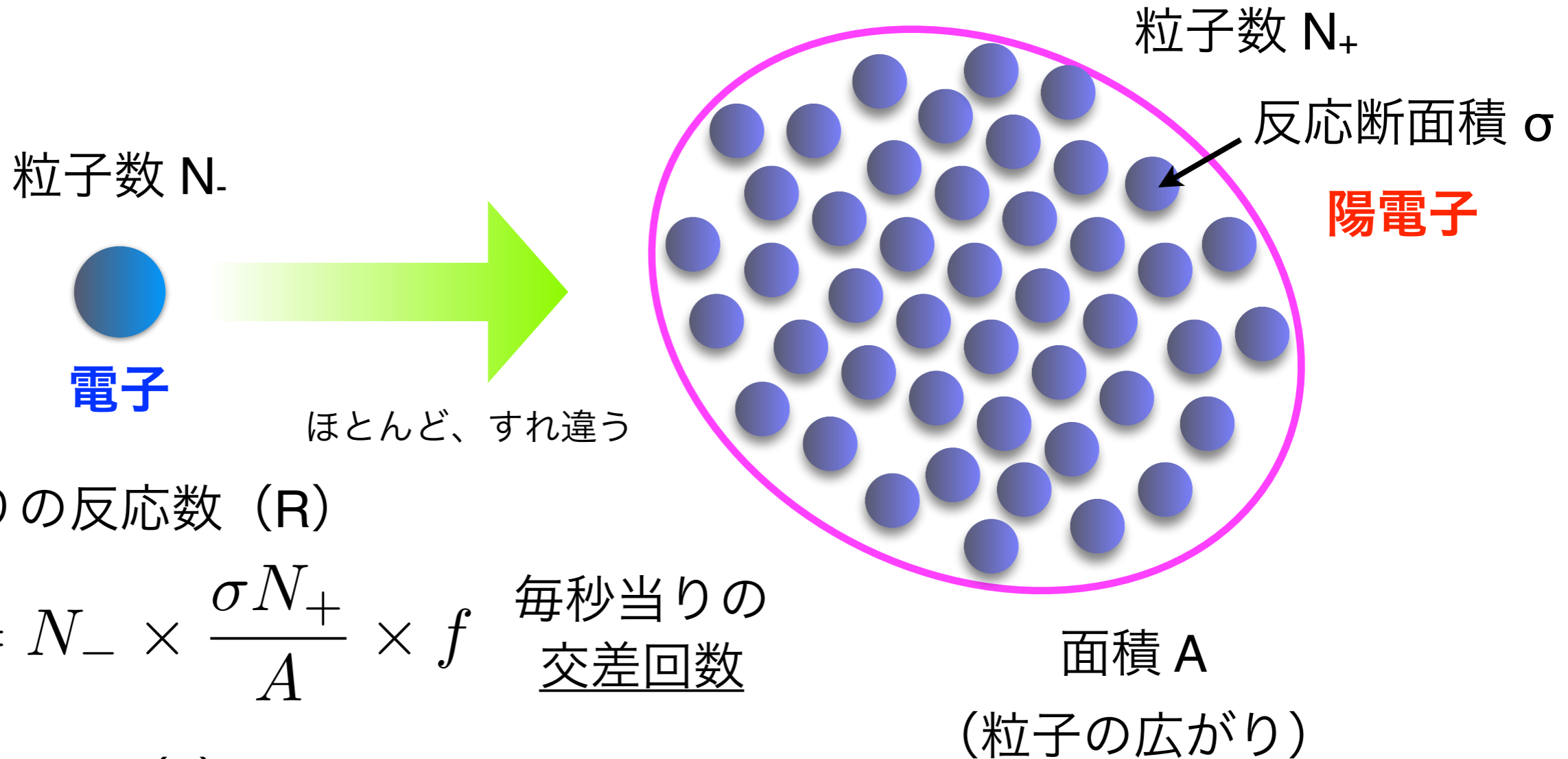
コライダー実験の戦略

- 衝突型加速器実験では、得られる物理事象の数は少ない。
 - ビーム：バンチ内の粒子数 $\sim 10^{10}$ 初期状態は、ほぼ明確
 - 固定標的：1立方センチあたりの粒子数 $\sim 10^{24}$
- あらゆる事象を記録し、同じデータについて様々な解析を行う。
- 物理事象数
$$N = \int_0^T L\sigma dt$$
 - L: ルミノシティ (人間の努力次第)
 - σ : 反応断面積 (自然界の法則)
 - T: 実験期間 (定年退職までの時間)

ルミノシティは、上式で定義される。

反B・B中間子の生成断面積が1 nb(10^{-33} cm²)とすると、 $L=10^{34}$ cm⁻²s⁻¹では毎秒10個。

年間200日実験を続けると、173 メガ個/年



毎秒当りの反応数 (R)

$$R = N_- \times \frac{\sigma N_+}{A} \times f$$

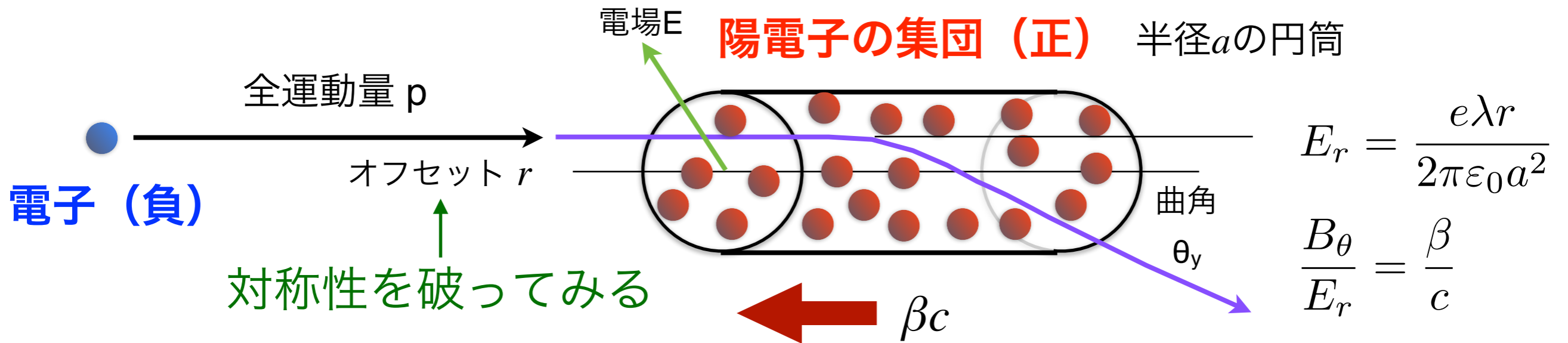
毎秒当りの
交差回数

ルミノシティ (L)

$$L = \frac{N_- N_+}{A} f$$

$$L = \frac{N_- N_+ n_b f_0}{2\pi \sqrt{\sigma_{x-}^2 + \sigma_{x+}^2} \sqrt{\sigma_{y-}^2 + \sigma_{y+}^2}}$$

ビームの広がりを小さくすれば、Lを無限に大きくできるわけではない。

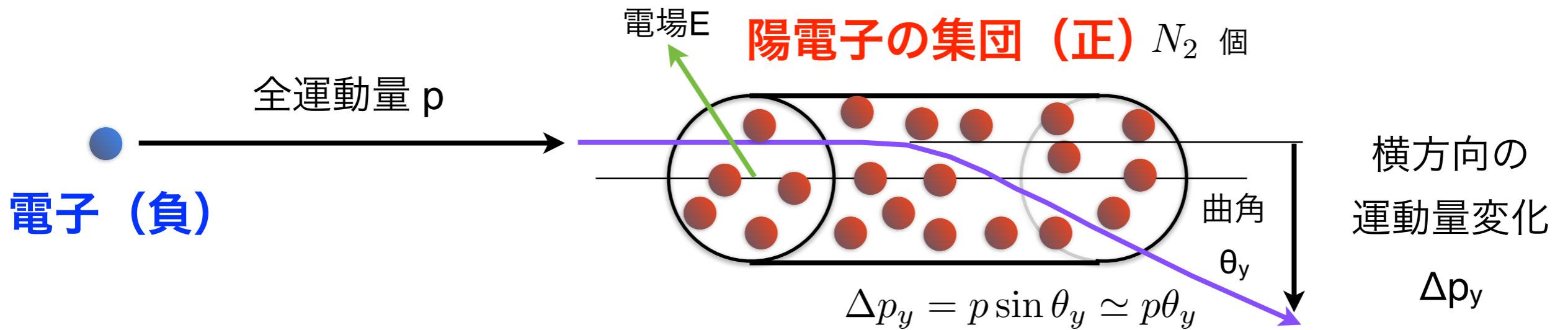


相手ビームの電磁力 (ローレンツ力) によって力を受ける、電気の符号が正負なので引力。
 (光子など中性粒子では、こんなことは起こらない)

$$F_r = e(E_r + c\beta B_\theta) = eE_r(1 + \beta^2) \simeq 2eE_r$$

相対論的領域では、 $\beta \sim 1$ なので、電場と磁場の足し算となる。

$$\Delta p_r = F_r \Delta t \quad \text{横方向の運動量変化は力積}$$



相手ビームの電磁力によって曲げられる。電気の符号が正負なので引力。
 曲角は、横方向の運動量の全運動量に対する割合

ルミノシティは曲角に比例して大きくなるが、あまりにも曲角が大きすぎると不安定になる。
 (ビームの広がりが大きくなり、ルミノシティの限界を迎える)

両方の曲角が同じ時に、効率よくルミノシティを高くすることができるはず。(相加平均と相乗平均の関係)

$$\theta_y = \frac{\Delta p_y}{p} = \frac{2eE_y \Delta t}{p}$$

横方向の運動量変化は、相手ビームの作る電場 E_y に比例する。

p はエネルギーに相当するので、エネルギーの逆比で、
 電場すなわち粒子数を調整する。

$$E_y = \frac{e\lambda y}{2\pi\epsilon_0 a^2}$$

オフセット y に比例
 した線形力

$$\frac{N_2}{p_1} = \frac{N_1}{p_2}$$

同じエネルギー
 なら同じ電流で

「エネルギー・トランスペアレント」な条件

$$\theta_y = \frac{\Delta p_y}{p} = \frac{2eE_y \Delta t}{p} \quad E_y = \frac{e\lambda y}{2\pi\epsilon_0 a^2}$$

$$L = \frac{N_- N_+ n_b f_0}{2\pi \sqrt{\sigma_{x-}^2 + \sigma_{x+}^2} \sqrt{\sigma_{y-}^2 + \sigma_{y+}^2}}$$

↑ ビーム・サイズ

なので、ルミノシティを高くしようと粒子密度を増やすと、ビームの作る電磁場が強くなり曲角(キック量)が大きくなってしまいます。ただし、エネルギーを高くすれば曲角(キック量)を安定領域に留めることができる。したがって、エネルギーを高くする方が、高いルミノシティを実現しやすくなる。

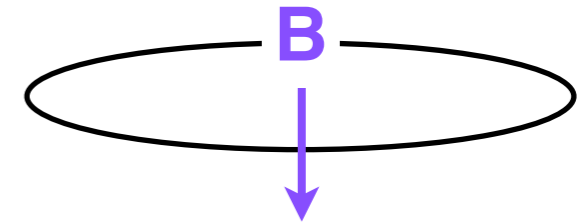
曲角に比例する量を、ビームビーム・パラメータと呼ぶ。

限界値は、ビームビーム・リミットと呼ばれる。

Ring Accelerator

- Proton Synchrotron

最高エネルギーは、最大磁場で決まる。



$$\rho \propto \frac{p}{B}$$

bending radius ρ 増大 \rightarrow 大きなリング
磁場 B 増大 \rightarrow 超伝導磁石

- Electron Synchrotron

最高エネルギーは、放射光放出で決まる。

単位時間あたりに失うエネルギーは、

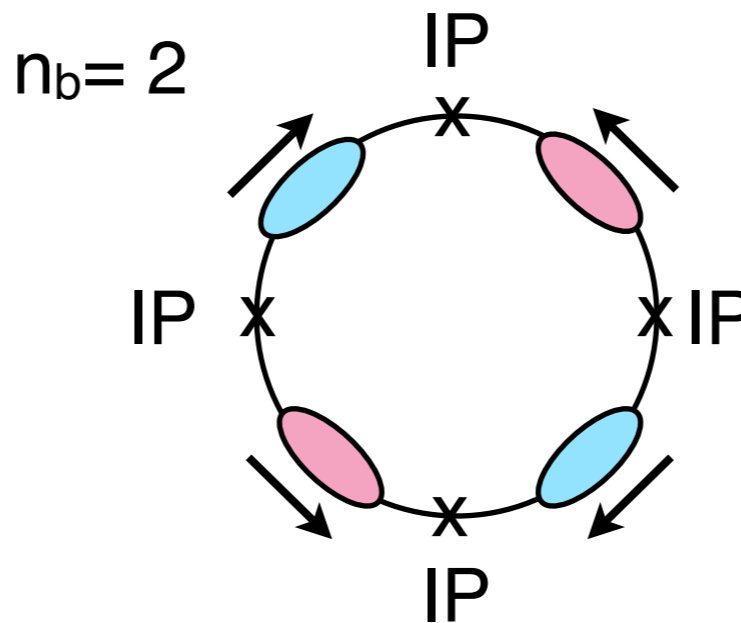
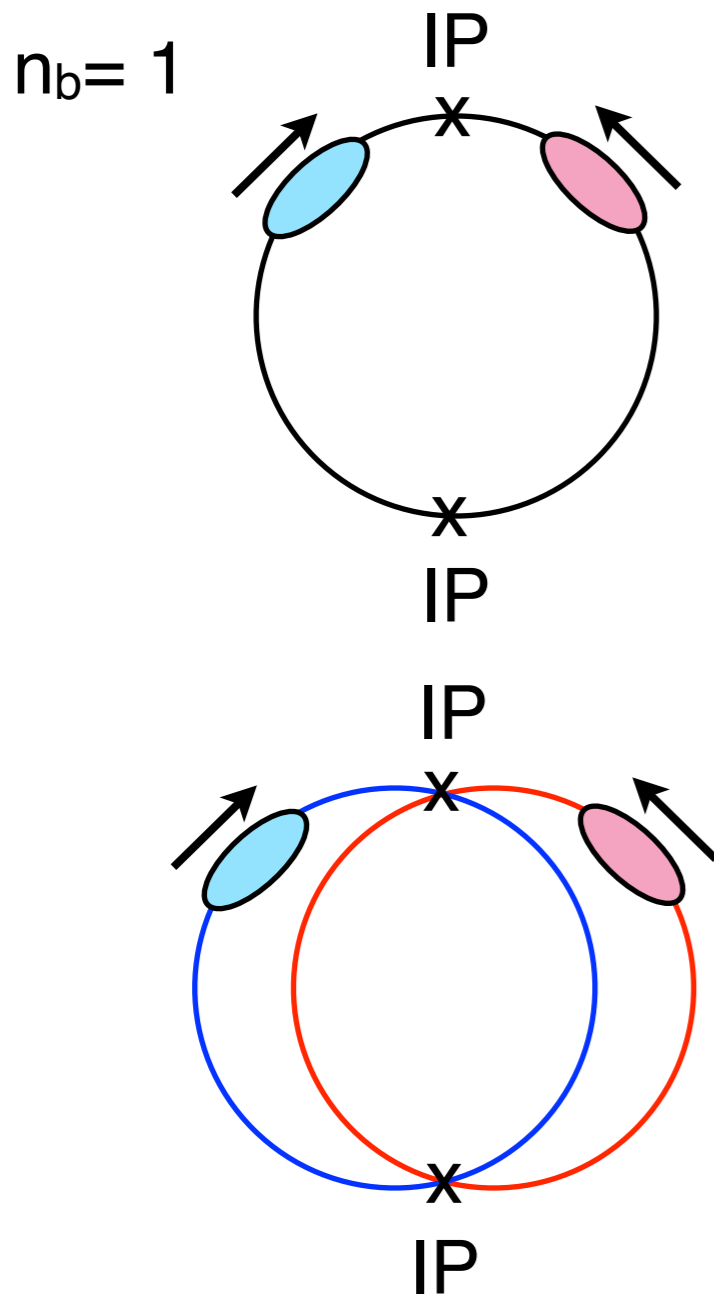
$$\Delta E \propto B^2 E^2 \quad \text{磁場一定なら } E^2 \text{ に比例 (基本式)}$$

$$\Delta E \propto \frac{E^4}{\rho^2} \quad \text{磁場を変えて半径を一定に保つ場合、} E^4 \text{ に比例}$$

周長を変化させない

Ring Collider

- 加速器内の粒子は、水が流れるように飛行しているわけではない。離散的なポテンシャルにトラップされるので「粒子の集合体」として飛行する。それをバンチと呼ぶ。

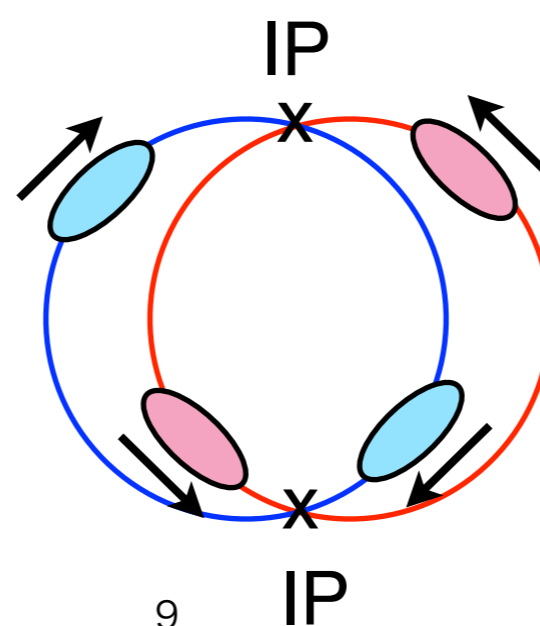
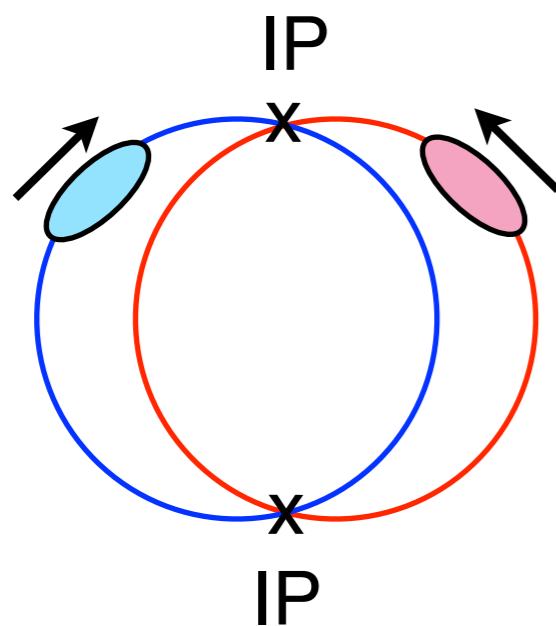


衝突点：IP

Single-ring

$$\#IP = 2n_b$$

(特別な場合を除いて)



Double-ring

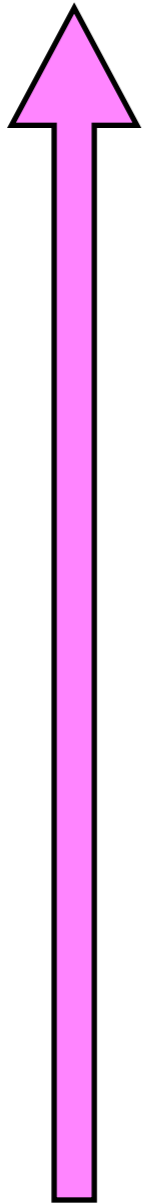
$$\#IP \leq 2$$

(バンチ数を増やしても)

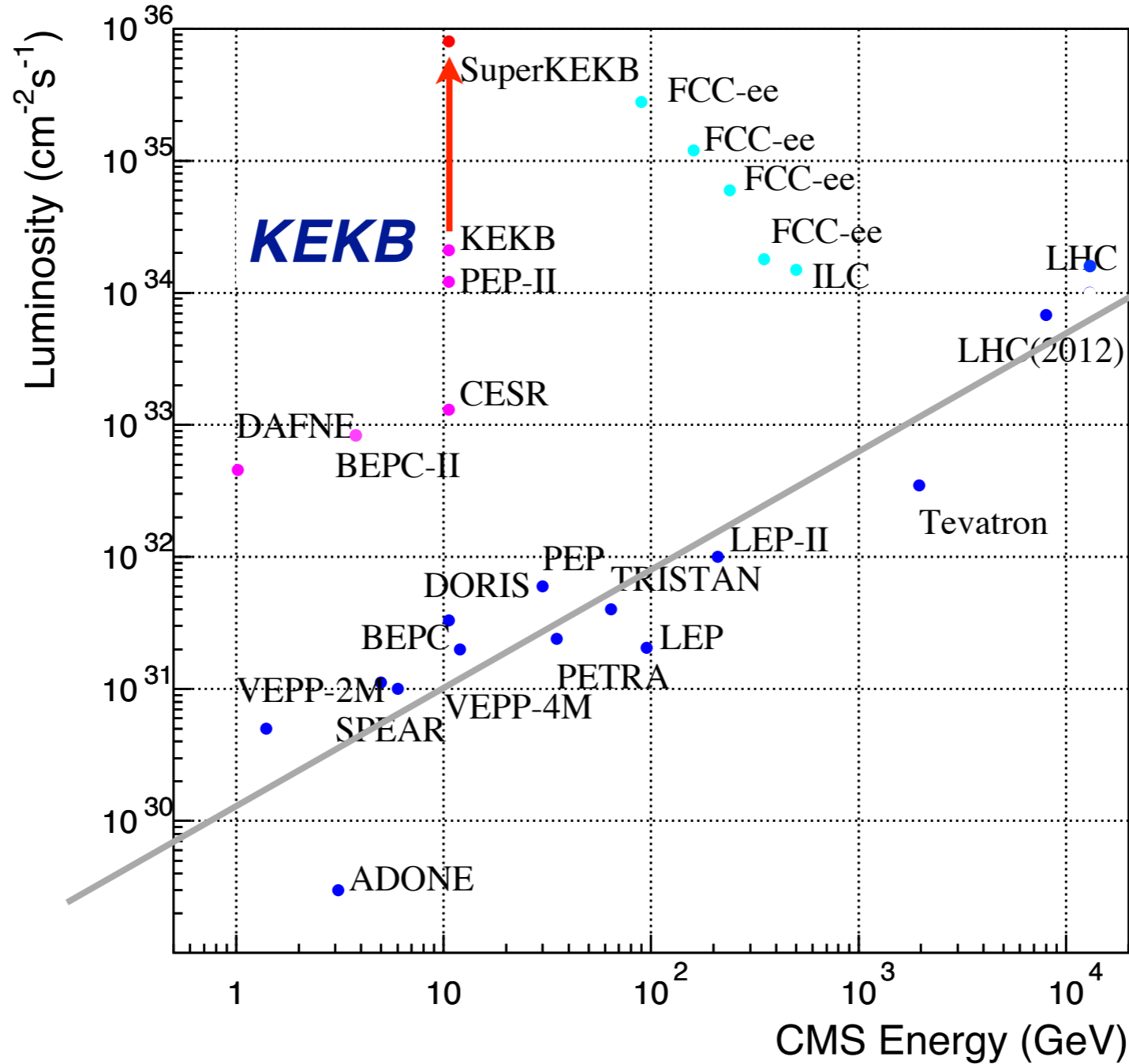
交差回数を増やせる！

Luminosity Frontier

$10^{36} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



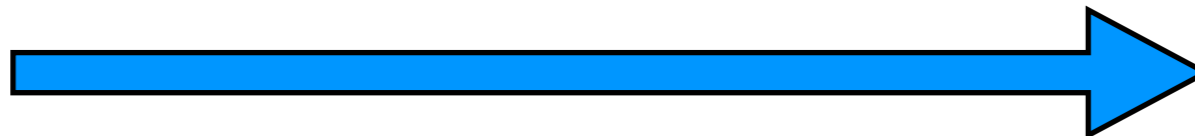
Factory machine
SuperKEKB



High energy machine

Lorentz factor

$$L = \frac{\gamma}{2er_e} \frac{I\xi_y}{\beta_y^*}$$



Energy Frontier

どうやって、粒子の広がりを小さくするか？

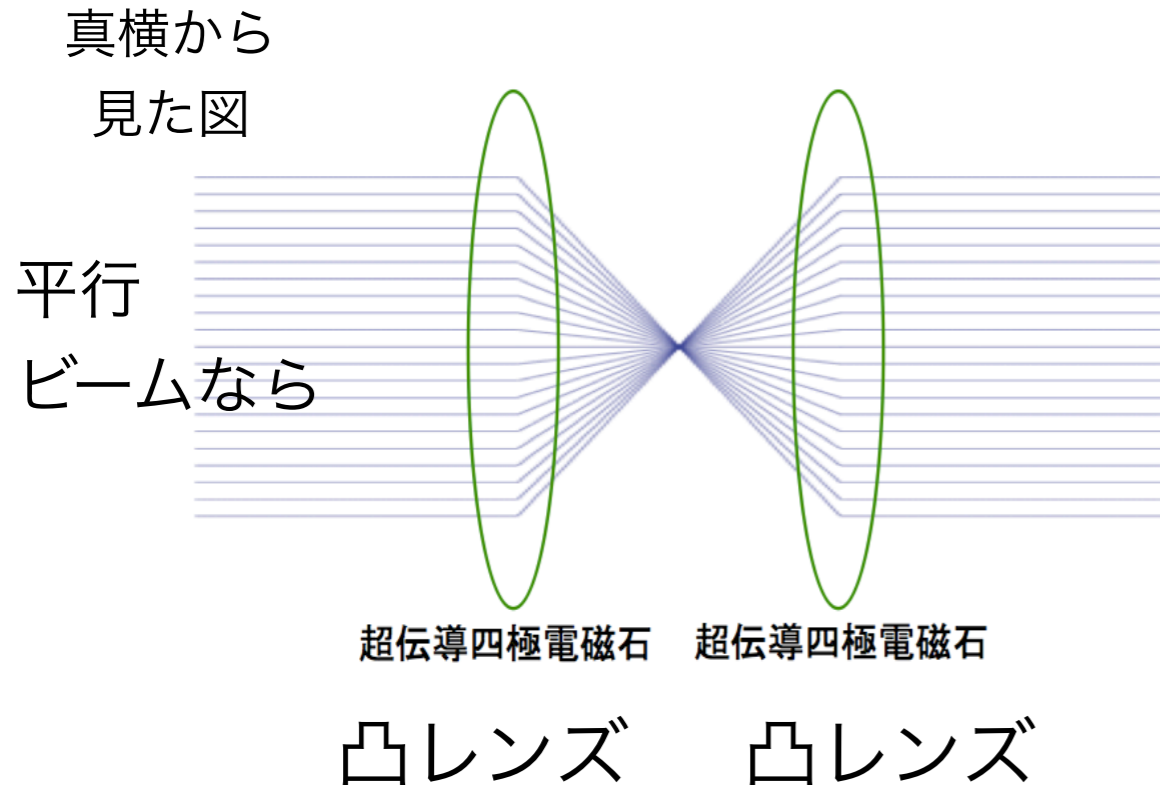
粒子の広がりのことを「ビームサイズ」と呼ぶ. (σ_x, σ_y)

- (1) 平行ビームに近づける。エミッタンスと呼ばれる量を小さくする.
- (2) 凸レンズを置いて、衝突する場所の被写界深度を浅くする.

衝突点近くでは、(2)の方法が取られている.

これは「最終収束システム」と呼ばれる.

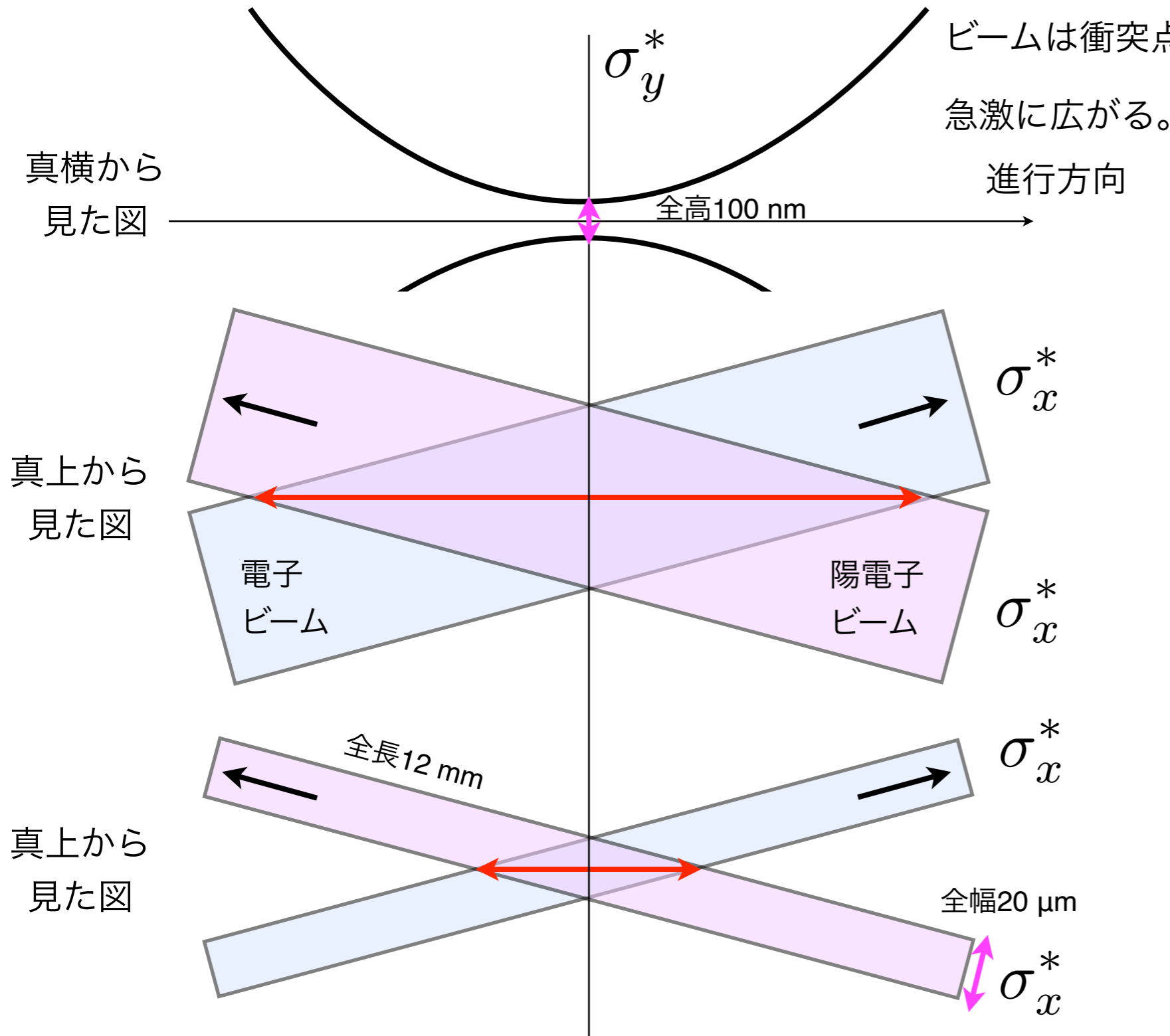
$$\sigma_y^* = \sqrt{\varepsilon_y \beta_y^*}$$



平行なビームなら衝突点で
ビームサイズをゼロにできるのだが...
現実、平行ビームは出来ない.

小さなビームサイズを達成するためには、
被写界深度を浅くする。「衝突点 β 関数」

衝突点で絞り込むためには、**細長いビームを斜めに傾けて衝突させる。**



強い凸レンズで絞る！

ピンぼけ

垂直ビームサイズの大きいところでも衝突

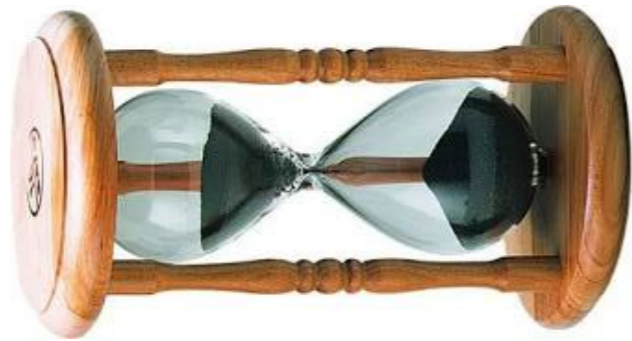
「砂時計効果」

ピントが合っている

垂直ビームサイズの小さいところで衝突

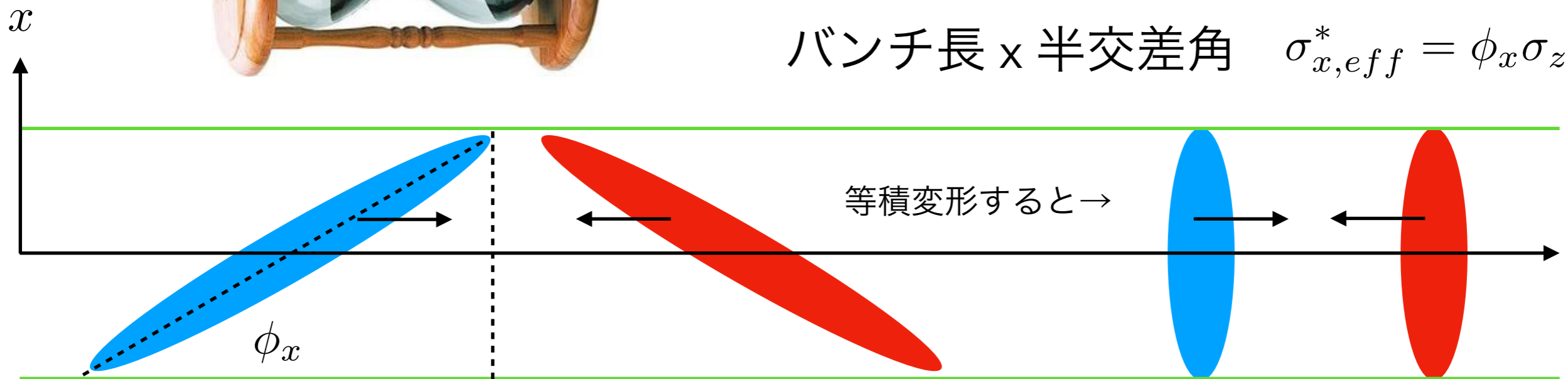
「ナノ・ビーム」方式

確かに、砂時計効果を回避できるが、



ビームは、水平方向に実質上広がって見える。

バンチ長 \times 半交差角 $\sigma_{x,eff}^* = \phi_x \sigma_z$



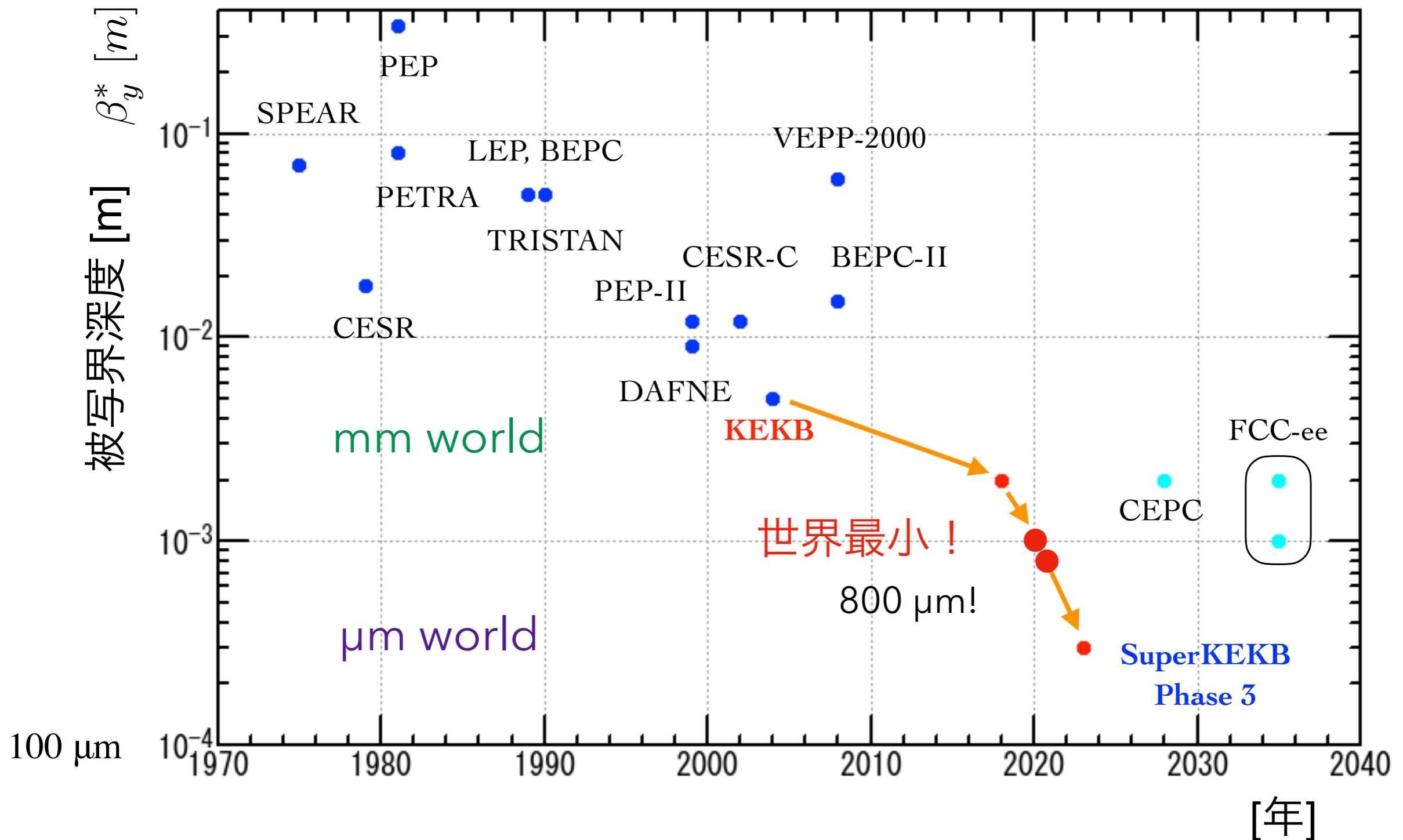
水平方向の広がり（幾何学的なロス）を、取り返すように垂直方向のビーム広がりを小さくしなければならない。

$$L \propto \frac{1}{\sigma_{x,eff}^* \sigma_y^*}$$

垂直ビームサイズが増大する要因はたくさんある。マシンエラー、ビームビームなど

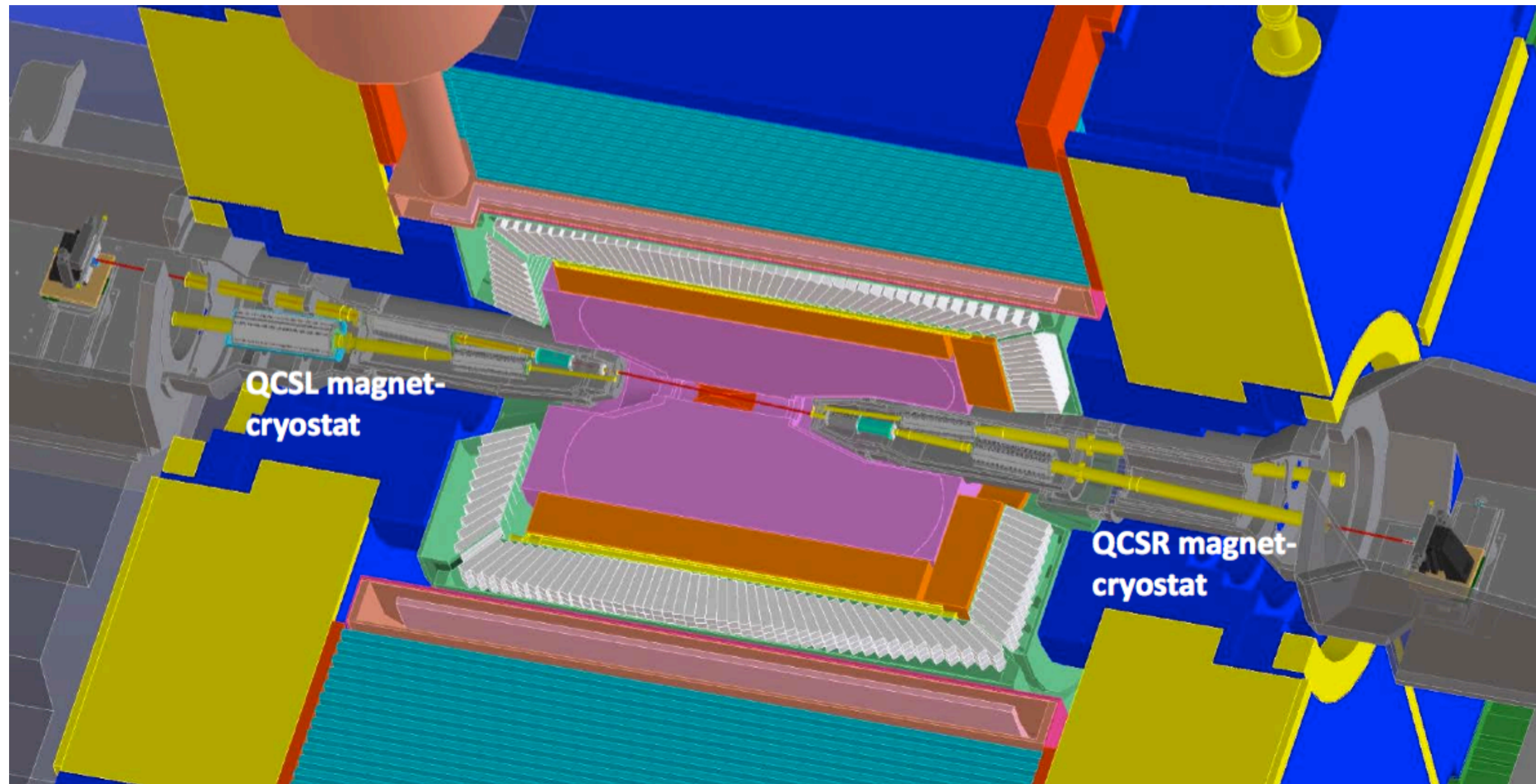
SuperKEKBは、世界最小の被写界深度をめざす。

「衝突点 β 関数」



目標とするルミノシティ (輝度) : $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$





1000万~1500万ボルトの加速電圧が必要

常伝導空洞(ARES) : 30台

LER:22, HER:8



$\pi/2$ mode
HOM-damped cavity

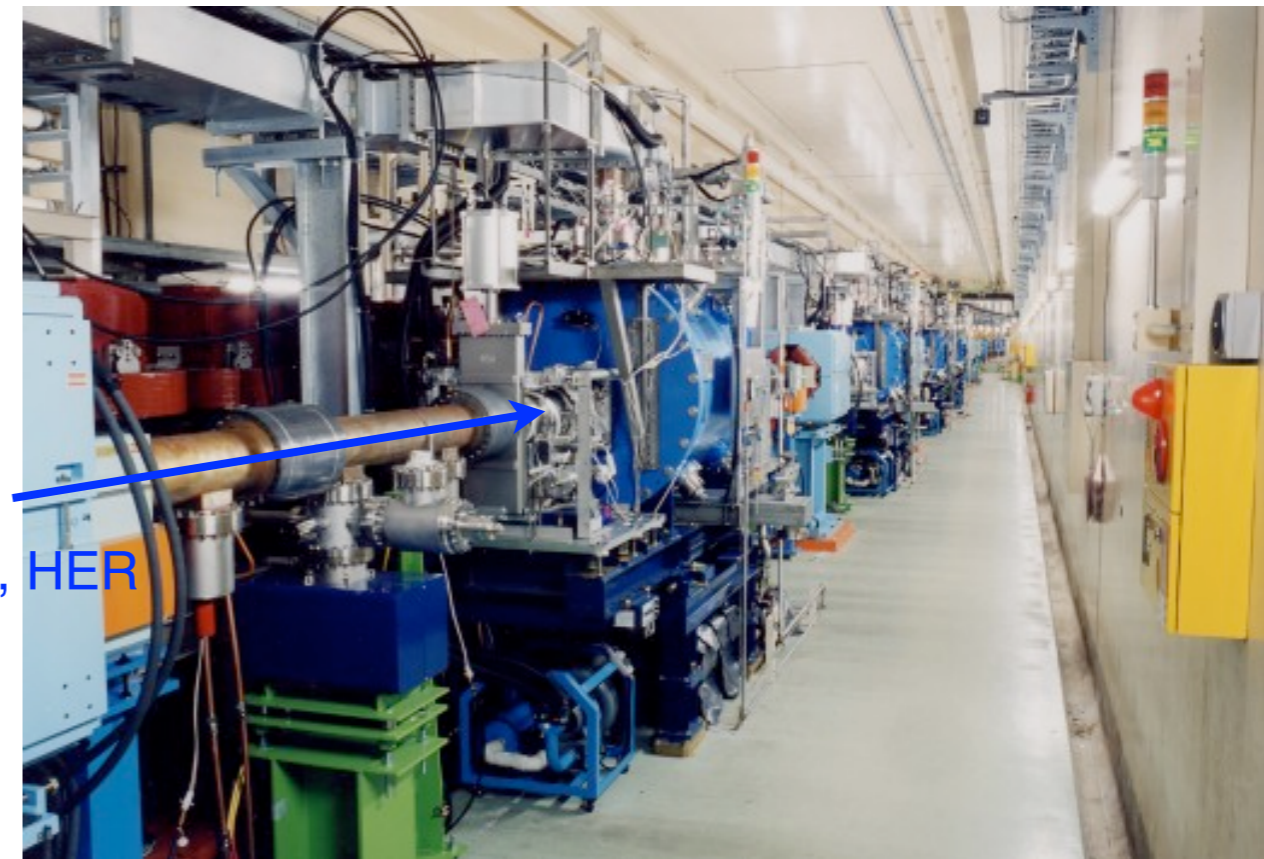
陽電子, LER

電子, HER

1台当り約50万ボルト

超伝導空洞(SCC) : 8台

HER:8



電子, HER

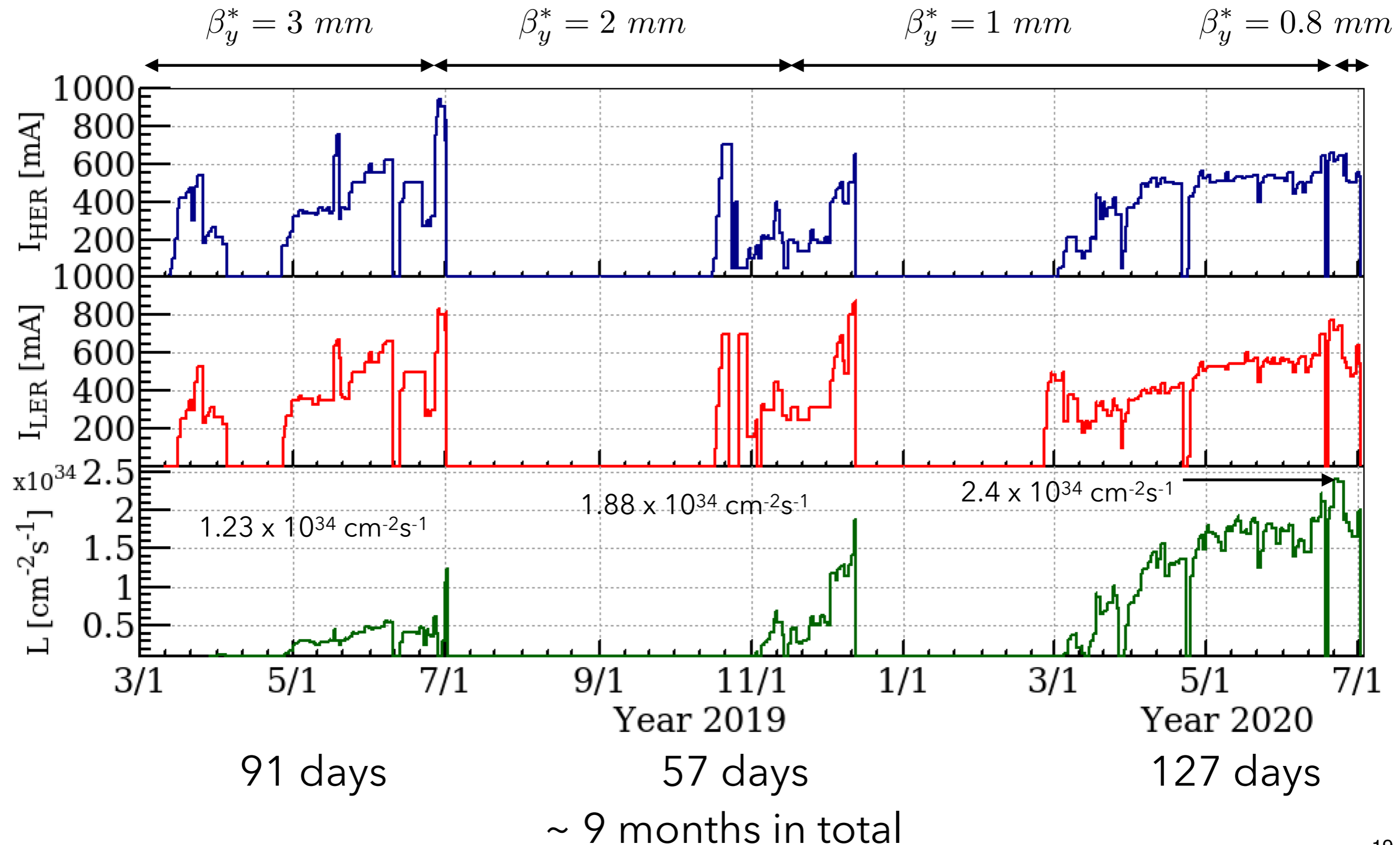
1台当り約150万ボルト

乾電池を直列に1000万個！

5 cm x 1000万個 = 500 キロメートル

東京ー岡山





ルミノシティ倍増計画進行中

	Phase 2 2018a/b	Phase 3.1 2019a/b	Phase 3.2 2019c	Phase 3.3 2020a/b	Remarks
Date	March 19 - July 17 2018	March 11 - July 1 2019	Oct. 15 - Dec. 12 2019	Feb. 25 - July 1 2020	
Operation time (days)	120	91 (fire : 21)	57	127	
Beta Function at IP (mm)	LER : 200 / 3 HER : 100 / 3	LER : 80 / 2 HER : 80 / 2	LER : 80 / 1 HER : 60 / 1	LER : 60 / 0.8 HER : 60 / 0.8	
Beam Currents (mA)	LER : 860 HER : 800	LER : 940 HER : 840	LER : 880 HER : 700	LER : 770 HER : 660	
Peak Luminosity (cm⁻²s⁻¹)	2.62×10^{33}	5.50×10^{33}	1.14×10^{34}	2.40×10^{34}	w Belle II
	5.55×10^{33}	1.23×10^{34}	1.88×10^{34}	-	w/o Belle II

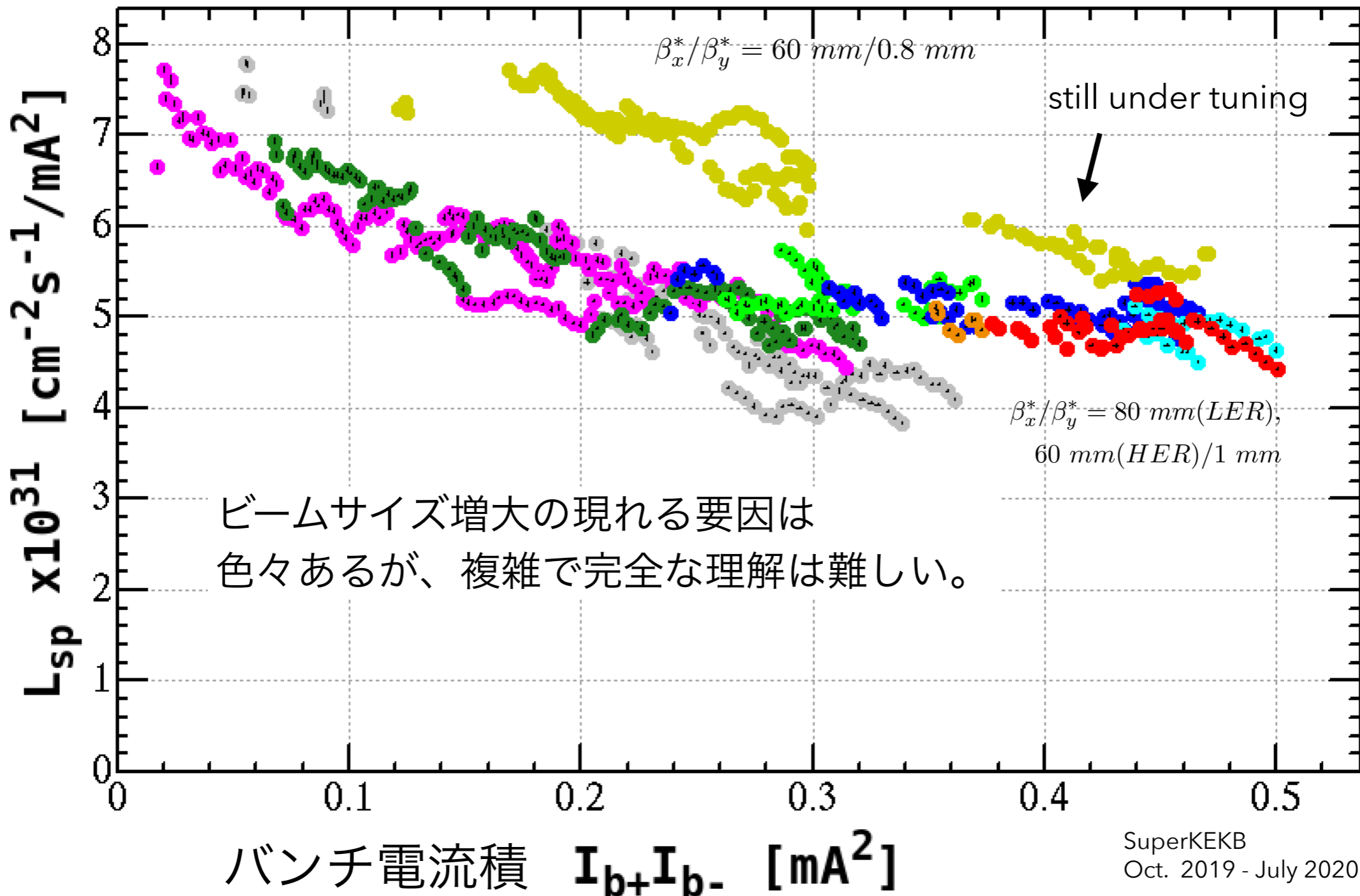
	KEKB : Nov. 15, 2006		SuperKEKB : June 21, 2020		SuperKEKB : final design		Unit
Ring	LER	HER	LER	HER	LER	HER	
Emittance	18	24	4.0	4.6	3.2	4.6	nm
Beam Current	1662	1340	712	607	3600	2600	mA
Number of bunches	1388		978		2500		
Bunch current	1.20	0.965	0.728	0.621	1.44	1.04	mA
Horizontal size σ_x^*	103	116	17.9	16.6	10.1	10.7	μm
Vertical cap sigma Σ_y^*	2.7		0.403		0.079		μm
Vertical size σ_y^*	1.9		0.285		0.048	0.062	μm
Betatron tunes ν_x / ν_y	45.505 / 43.534	44.509 / 41.565	44.523 / 46.581	45.531 / 43.577	44.53 / 46.57	45.53 / 43.57	
β_x^* / β_y^*	590 / 6.5	560 / 5.9	80 / 1.0	60 / 1.0	32 / 0.27	25 / 0.30	mm
Piwinski angle	0.75	0.66	10.7	12.7	19.3	19.0	
Beam-Beam parameter ξ_y	0.105	0.056	0.0389	0.0261	0.0881	0.0807	
Specific luminosity	1.07×10^{31}		5.43×10^{31}		2.14×10^{32}		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}/\text{mA}^2$
Luminosity	1.71×10^{34}		2.40×10^{34}		8×10^{35}		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

2.11×10^{34} (crab crossing)

crab waist

$$L_{sp} = \frac{L}{I_{b+} I_{b-} n_b} \propto \frac{1}{\sigma_{x,eff}^* \sigma_y^*}$$

スペシフィック・ルミノシティは、衝突点ビームサイズのみ関数となる。ビームサイズ増大がなければ一定。



ビーム - 残留ガス衝突、バンチ内散乱、入射ビームなどが要因
 ビーム由来のバックグラウンドを低減するためのコリメータの働きは重要

SuperKEKB collimators

このまわりに測定器が
 配置される。

Andrii Natochii
 中山浩幸氏提供

Collimation system

LER → 10 collimators:

- 7 horizontal: D06{H1,H3}, D03H1, D02H1, D02{H2,H3,H4}
- 3 vertical: D06{V1,V2}, D02V1

Two-sides

HER → 20 collimators:

- 11 horizontal: D01{H3,H4, H5}, D12{H1,H2,H3,H4}, D09{H1,H2,H3,H4}
- 9 vertical: D01V1, D12{V1,V2,V3,V4}, D09{V1,V2,V3,V4}

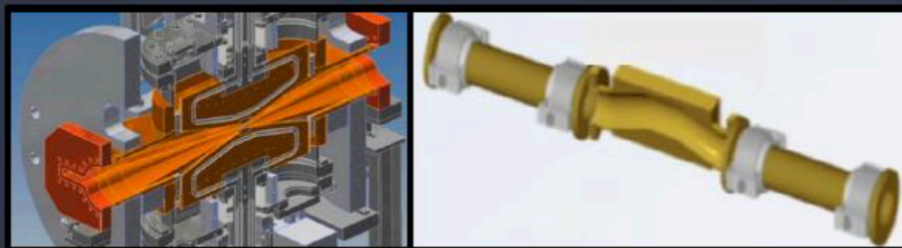
Two-sides

One-side

Two-sides

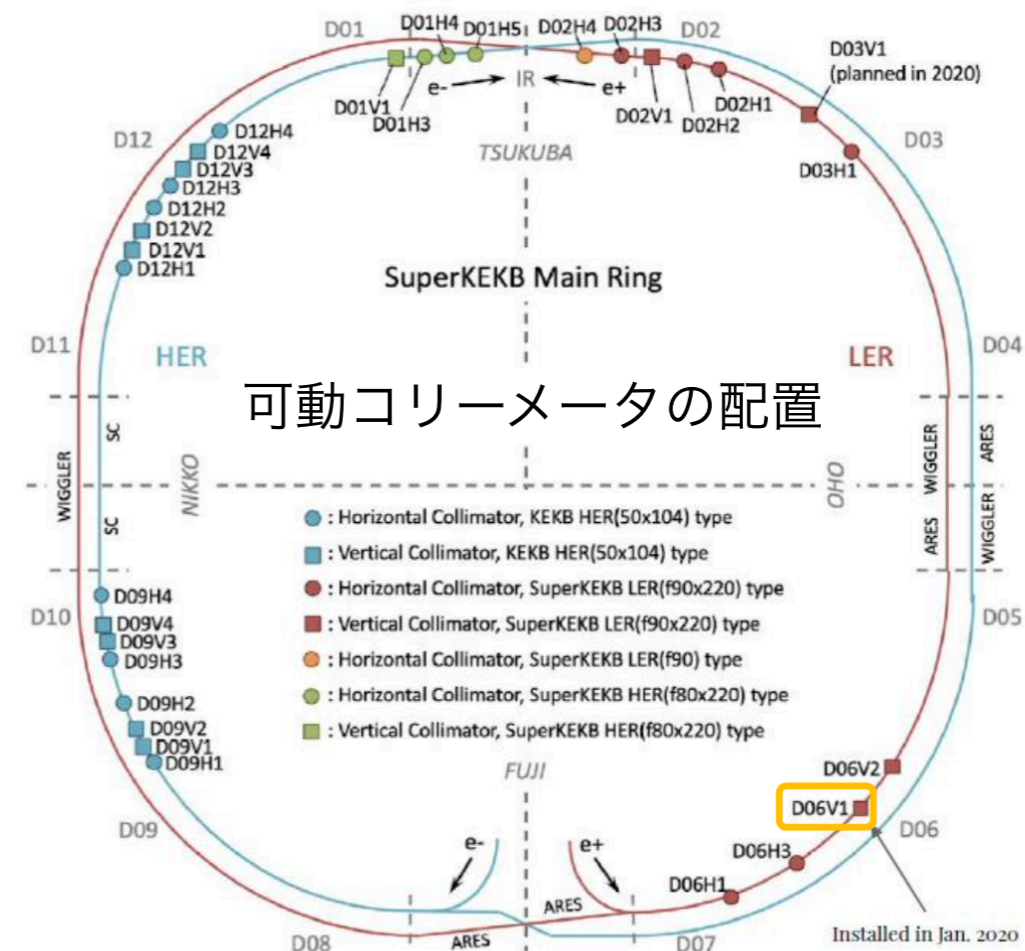
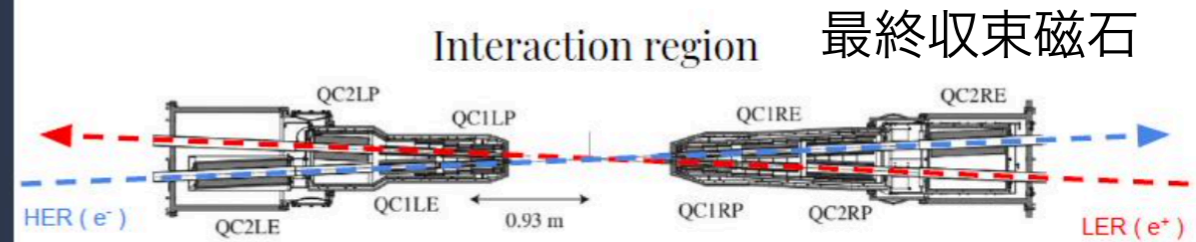
One-side

Have to be optimized to mitigate beam-induced BG



Two-sides collimator
 SuperKEKB-type

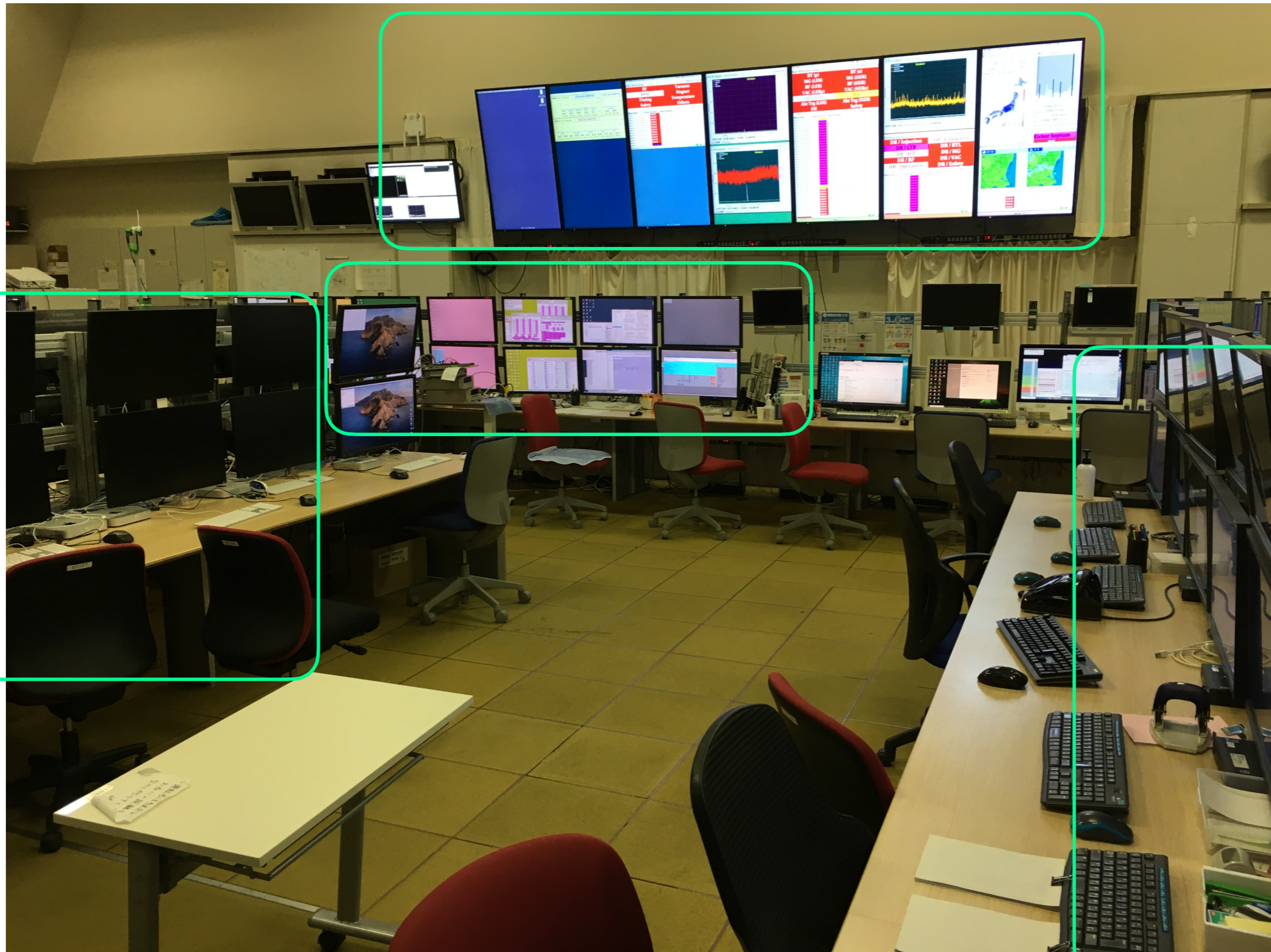
One-side collimator
 KEKB-type



SuperKEKB Control Room

注：シャットダウン中

MR
Control



さらさらに
端末群←

開発者
向け端末

→PF-AR
Control

Linac
Control

- ルミノシティには限界がある。
- 現在、SuperKEKBでは「ルミノシティ倍増計画」進行中である。
- 2020年末までに $4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、2021年末までに $8 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、2022年に $10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 到達を初期目標とする。ここまでくれば、大成功と言ってよいだろう。（私見）
- SuperKEKBの延長線上で、 $10^{36} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を超えるマシンは無理であろう。（私見）
- ルミノシティに拘らず、別のことを考えることをお勧めする。