

国際リニアコライダー 加速器の概要

ILC夏の合宿2015

2015年7月18日

栗木雅夫（広島大学、先端物質科学研究科）

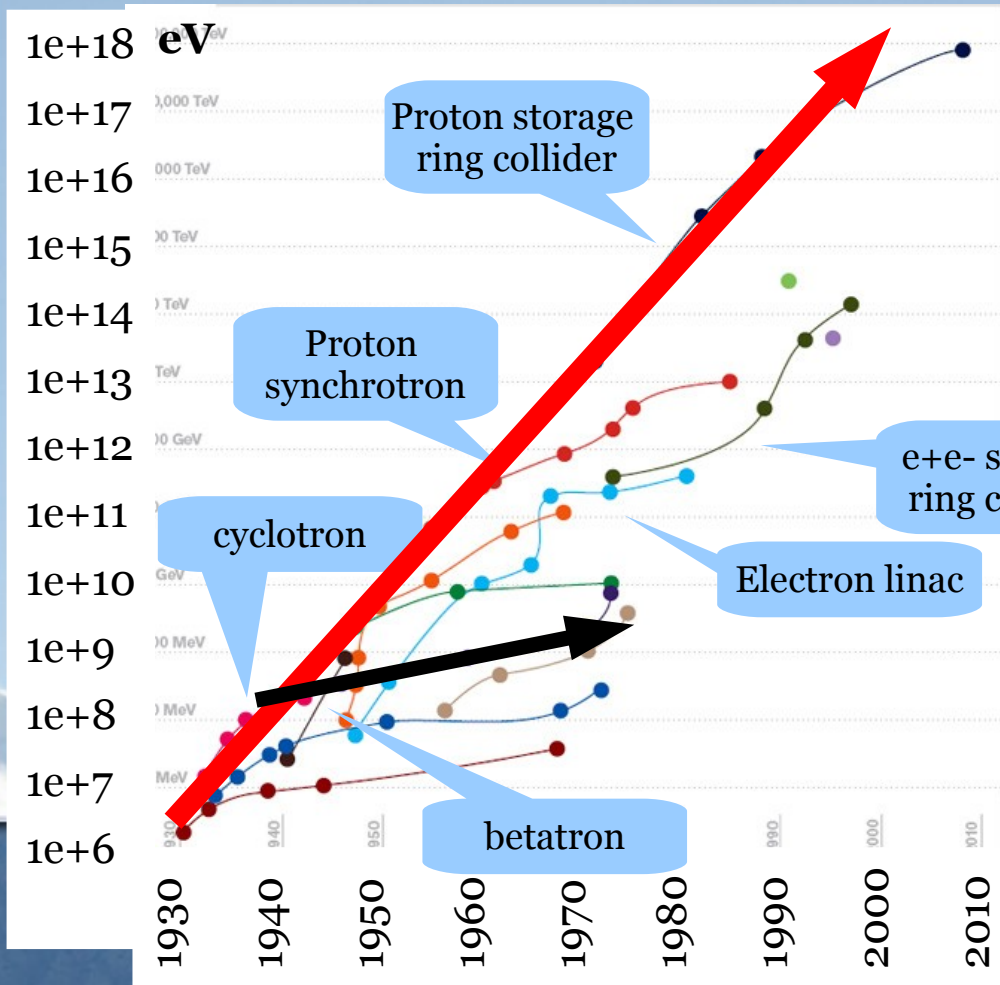
Collider

- 粒子: 電子、陽電子
- エネルギー: 125 – 500 GeV (CME 250 – 1000 GeV)
- ルミノシティ: $>1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$$N[s^{-1}] = L[cm^{-2} s^{-1}] \times \sigma[cm^2]$$

Livingston Plot :

加速器界のムーアの法則



- 新しい加速器が急激に発展。
- 暫くすると停滞。
- 次々と続く新加速器の発明により、結果として急激な発展が続いている。

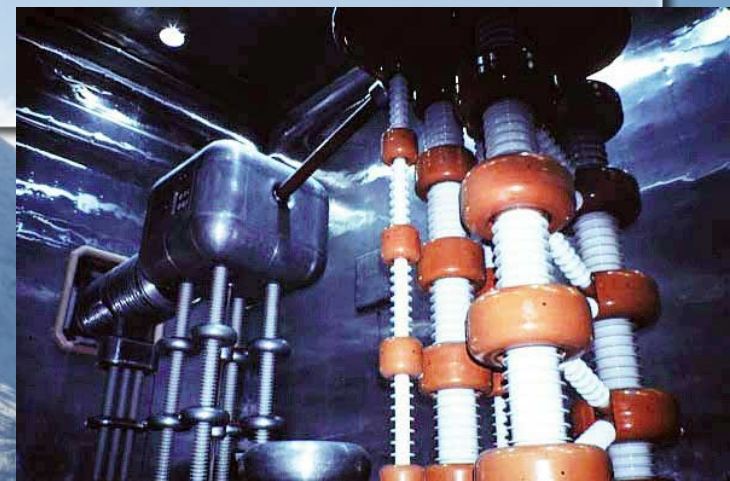
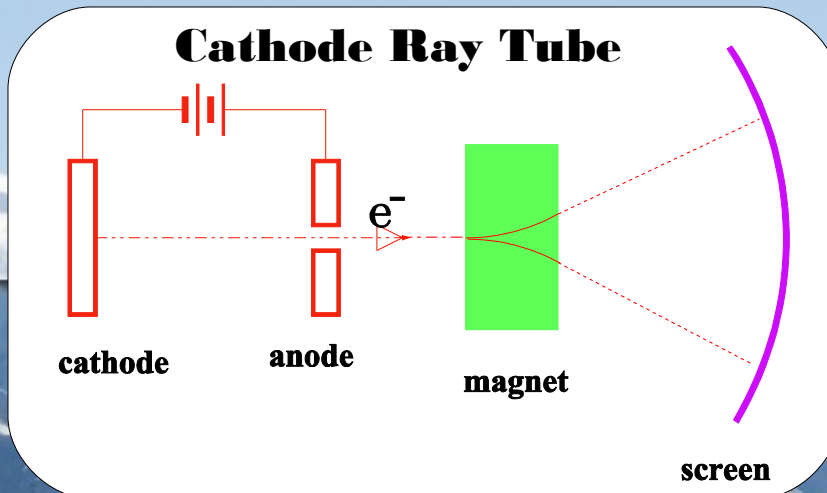
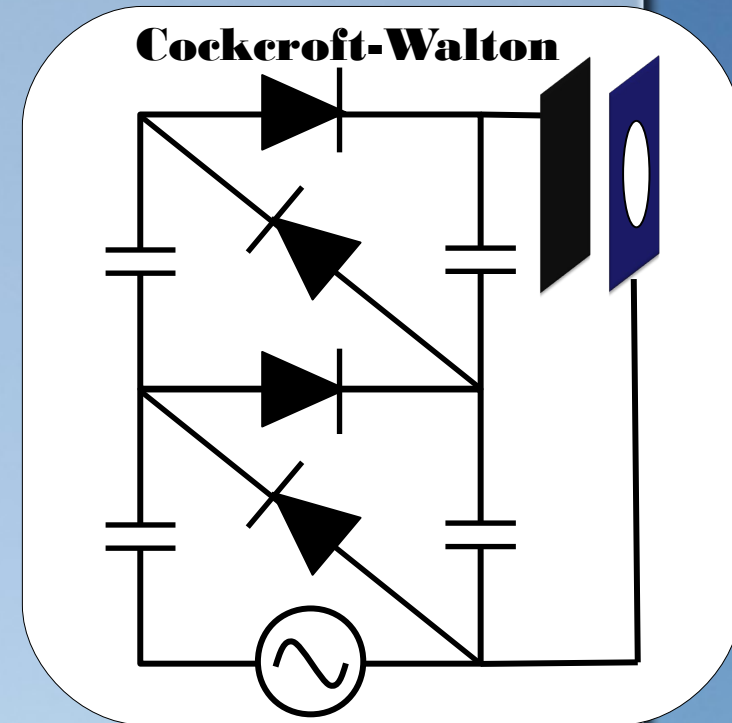
多段ロケット式発展



From Symmetry Magazine

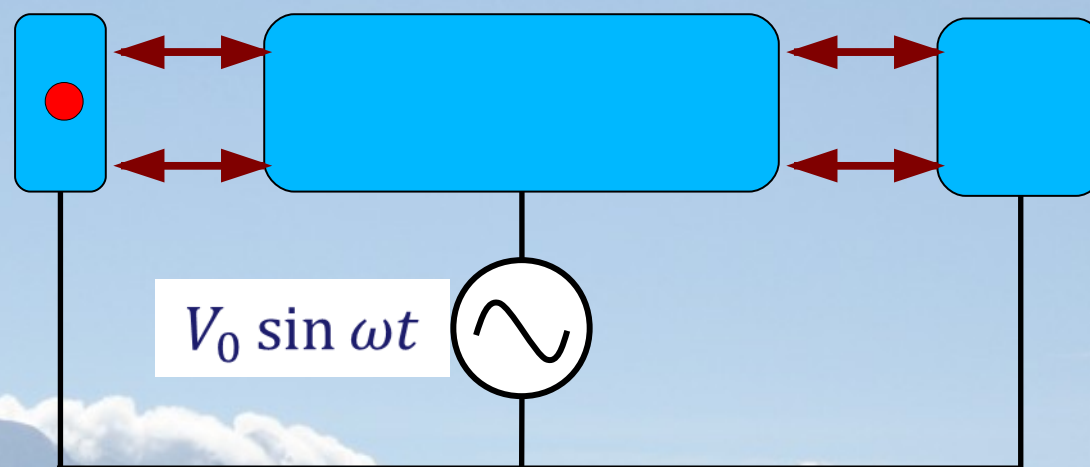
静電加速器

- First accelerator was DC type.
- It still shares the largest population in the world.
- It is simple, but the highest energy is limited by surface breakdown.
- The practical limit is 1~2 MeV.



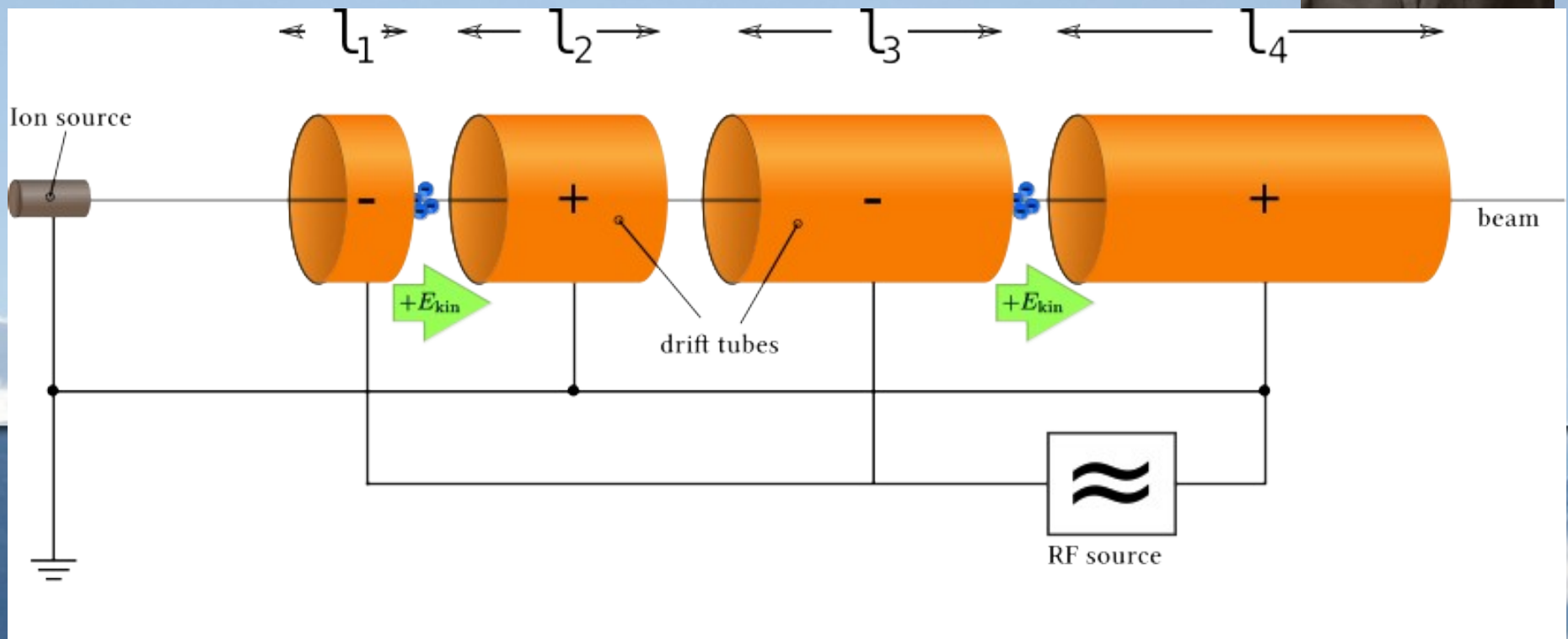
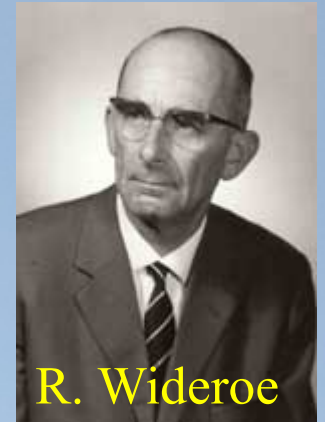
隠れた大発明：RF加速

- R. Wideroeさんが交流加速（現在の高周波加速）の原理を考えた。おそらく加速器史上最大の発明。
- これにより、一回の加速量は限定的でも、繰り返し加速により、原理的にどこまでも加速が可能になった。



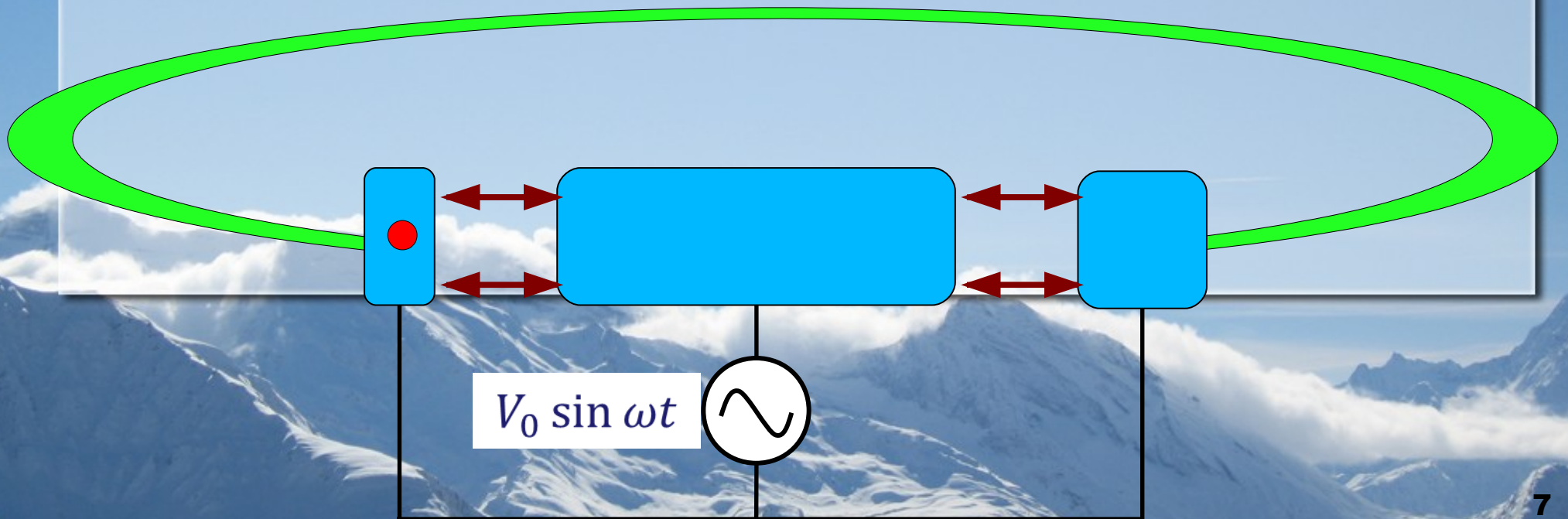
Wideroe-Linac:最初のRF加速器

- 世界初の繰り返し加速可能な加速器。
- 電極毎に反対の極性(位相差180度)の高周波。
- $E_{kin} = eN_{gap} V_{RF}$; 数を増やせば高エネルギーへ行けます
- $l = v/2f$: 粒子速度と構造長を同期させてね



Wideroe is also initiator of Ring accelerator

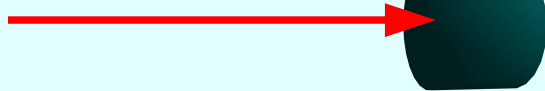
- Wideroeの”RF空洞”に周回軌道をつければ、無限にくり返し加速が可能。
- Synchrotronの仕組みとほぼ同じ。
- 世界最高エネルギーはいまだにProton Synchrotron (LHC)である。



What is Collider?

- 同じビームエネルギーでも、座標系の取り方で重心系エネルギーは大きく異なる。
- 偉大な発明コライダー:ビームエネルギーをフルに活用。
- GeV以上の高いエネルギーで圧倒的に有利

Fixed target



$$E_{CME} = \sqrt{2mE}$$

Collider



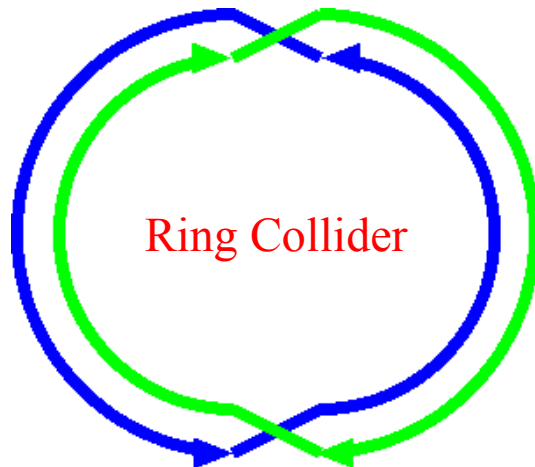
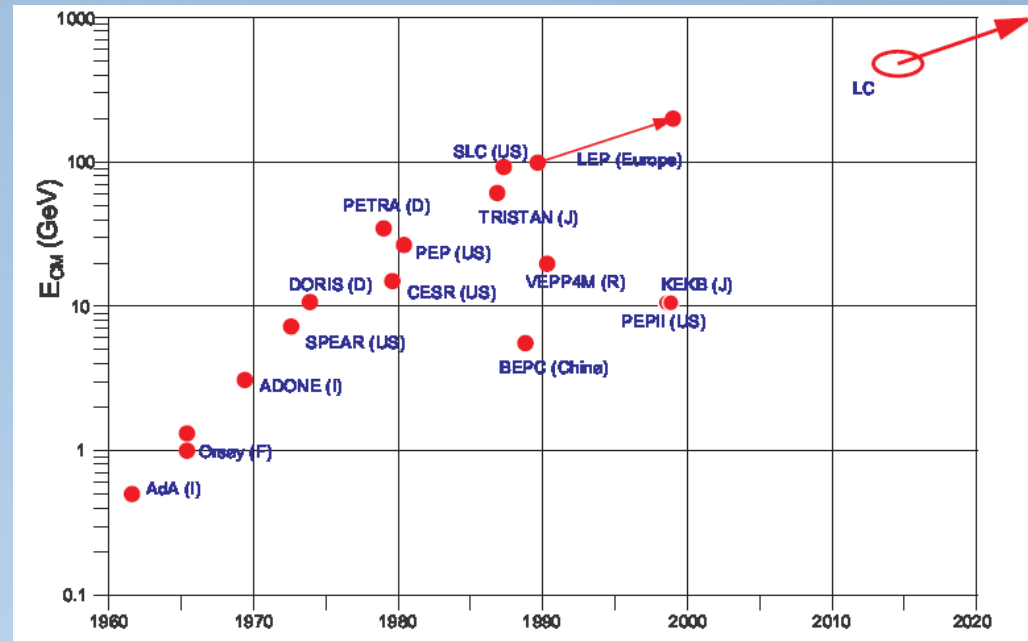
$$E_{CME} = 2E$$

Colliderの歴史

コライダーの歴史は高エネルギー加速器の歴史。

ほとんどが円形コライダー。(除くSLC)

何故か？



Linear Collider



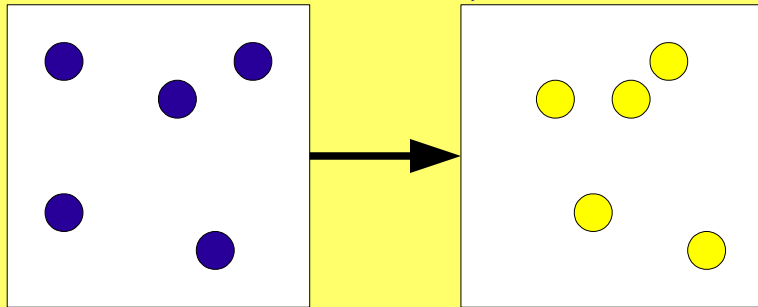
コライダーはLuminosityが命

- 単位時間あたりの反応数=コライダーの性能

$$N[s^{-1}] = L[cm^{-2}s^{-1}] \times \sigma[cm^2]$$

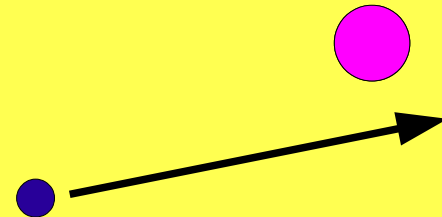
L: ルミノシティ。行き違う粒子の密度レート。工夫の余地あり。

$$L = \frac{f N^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$



σ : 断面積~反応が生じる有効面積。

神様が決める。



Why Ring Collider?

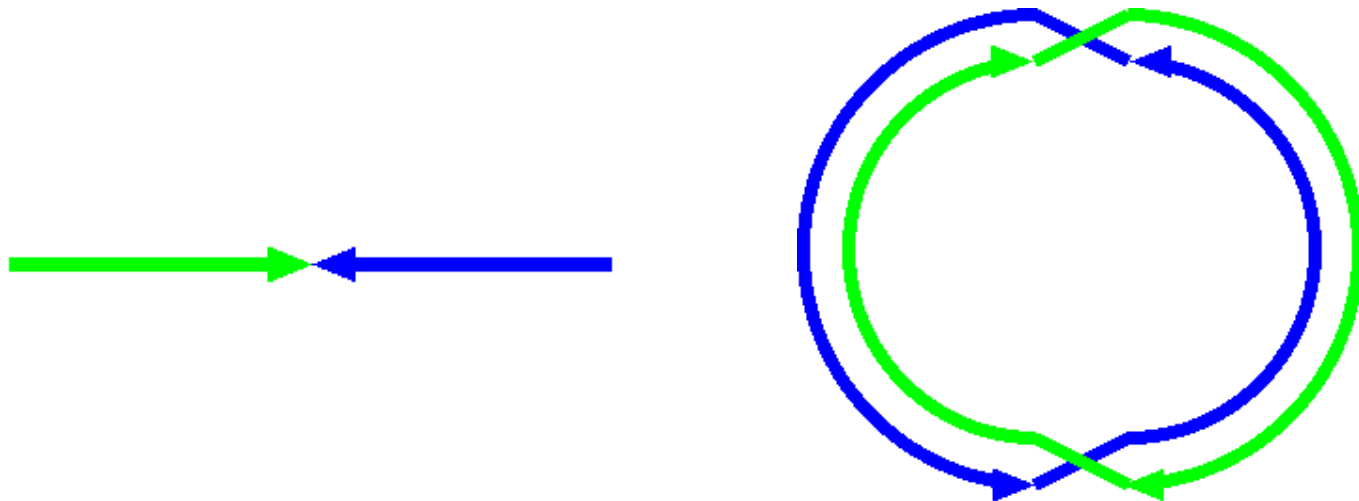
- いままで建設されてきたコライダーはSLCを除きすべてリングコライダー。
- ビームは軌道を周回するので、必要なパワーはビームロス、およびシンクロトロン(SR)放射損失の補填分

$$P_{WALL} = \eta \left(\frac{1}{\tau} E + U_{SR} \right) I \sim \eta U_{SR} I \ll \eta I E$$

- SRが大きくない条件では、消費電力に制限されず、 f あるいはビーム電流 I を大きくできる。

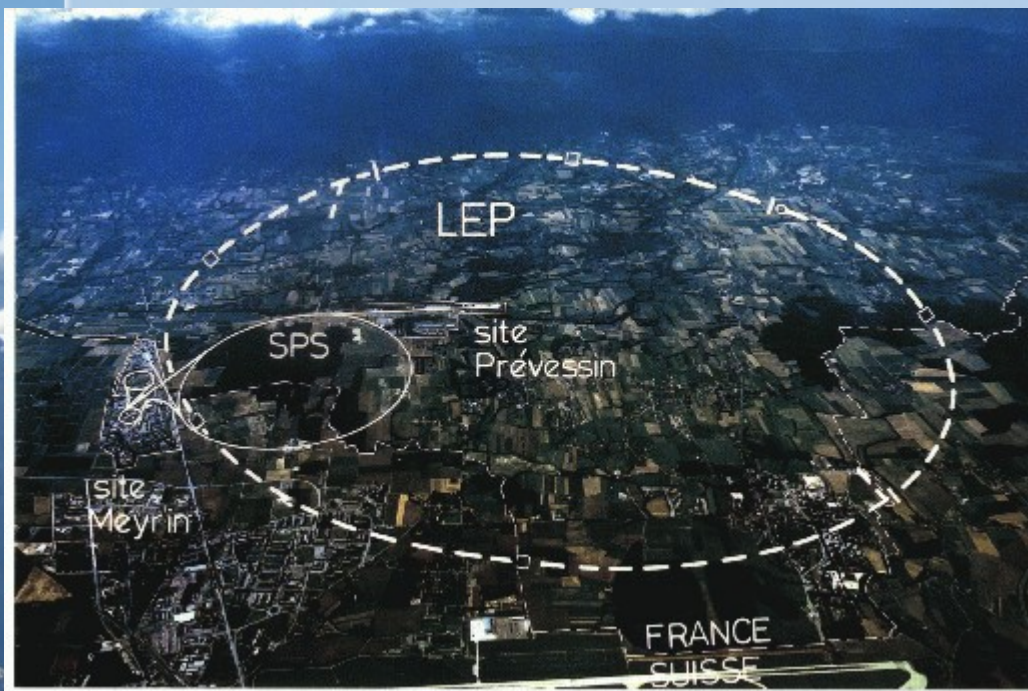
$$L = \frac{f n_b N^2}{4 \pi \sigma_x \sigma_y}$$

ビームビーム効果のためあまり小さくできない。



LEP加速器

- 周長およそ27km. スイスジュネーブ近郊のCERN(欧州原子核物理研究機構)に設置.
- 1989年運転開始。45 GeV x 45 GeV at Z^0 .
- 2000年運転終了。最高エネルギー104 GeV x 104 GeV.
- 現在はトンネルをLHC加速器として利用。



Synchrotron Radiation

- なぜLEP加速器はCME 209GeVで止めてしまったのか？もうちょっとエネルギーを増やせば125GeV Higgsが見えたのに。(Z⁰H threshold energy 215 GeV)
- 209GeVはLEPの限界。
- 原因: シンクロトロン放射

$$P[\text{turn}^{-1}] = \frac{4\pi}{3} e^2 \frac{\beta^4 \gamma^4}{\rho}$$



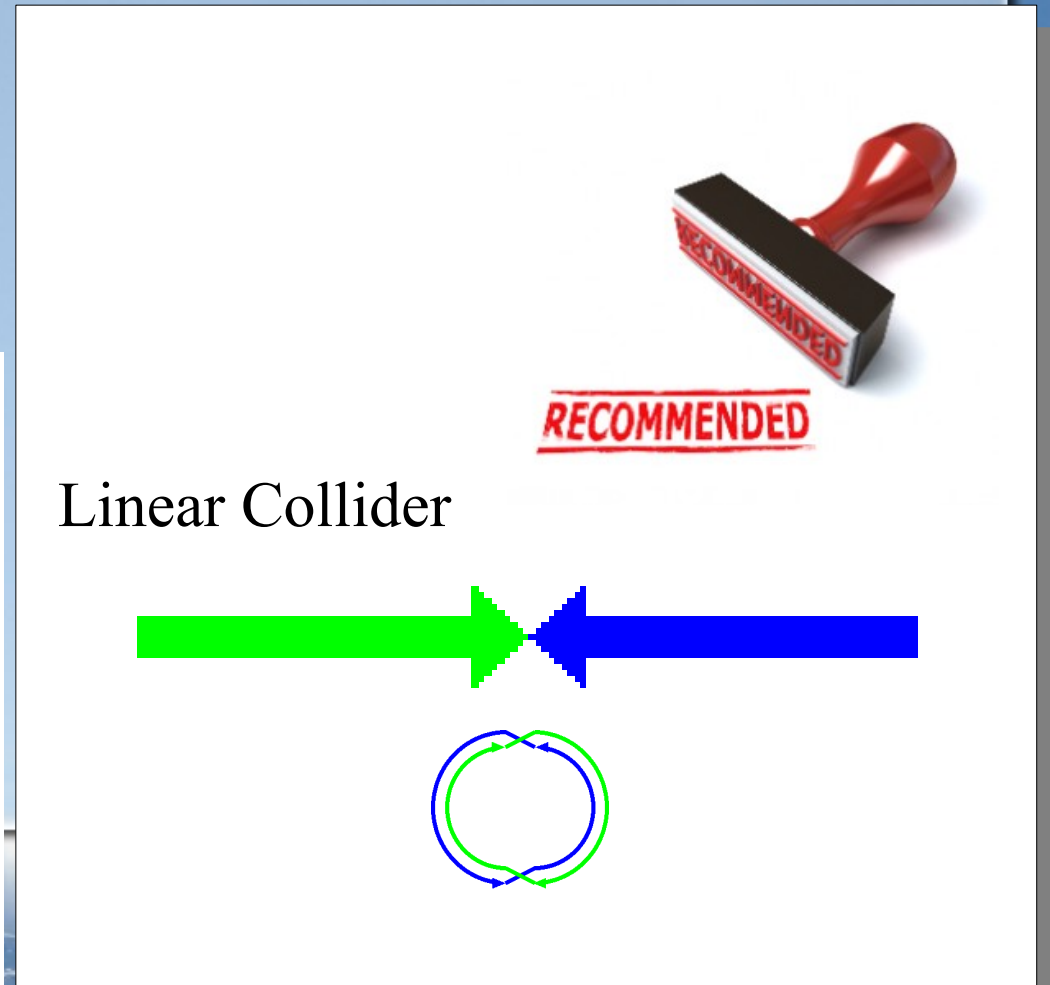
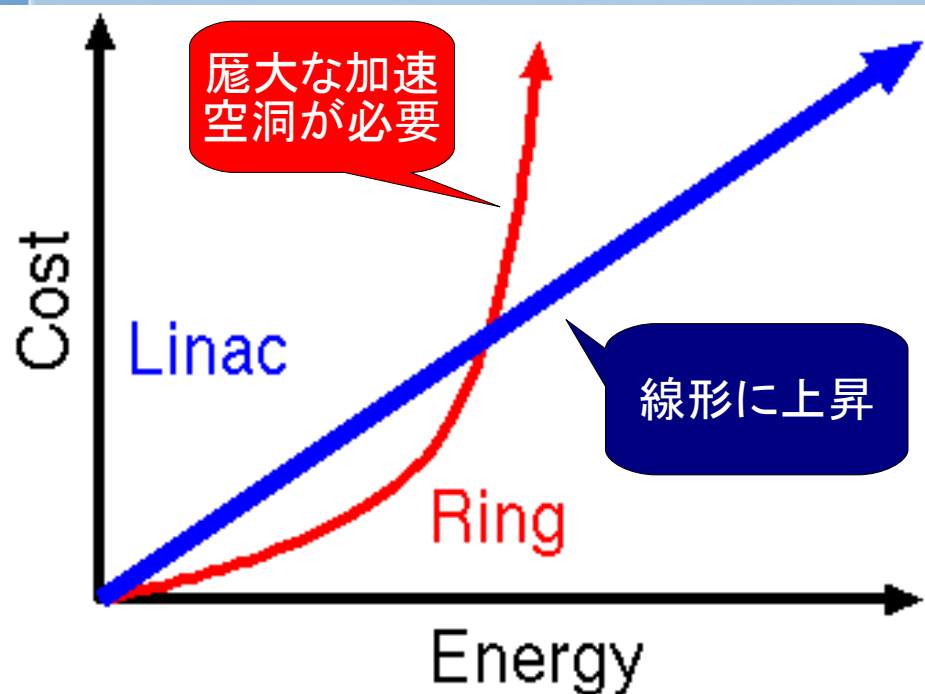
- LEP 104 GeVビームが一周する間に、エネルギーは2GeV程度低下。LEPの加速空洞の限界。
- LEPでCME 500GeVの時、一周あたりのエネルギー損失は150GeV。

歴史の転換点

Energy loss

Linac : zero

$$\text{Ring : } \Delta E = \frac{C_y E^4}{\beta \rho}$$



Linear Collider Concept

- リングコライダーのように、ビーム電流を大きくすることは、電力効率の点から、困難。
- その代わりに、ビームスポット σ_x および σ_y を小さくする。
- 懸念はビームビーム相互作用。
 - Beamstrahlung : ビームのつくる磁場によるシンクロトン放射。エネルギー広がり大きくして、精度を悪化させる。
 - Disruption: クーロン場によるビームの変形。衝突制御を難しくする。
- リニアコライダーではビームが使い捨てなので、これらに対する許容値はリングコライダーよりも高い。(横谷さんが説明してくれる)

消費電力抑制のため
大きくしない

$$L = \frac{f N^2}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$$

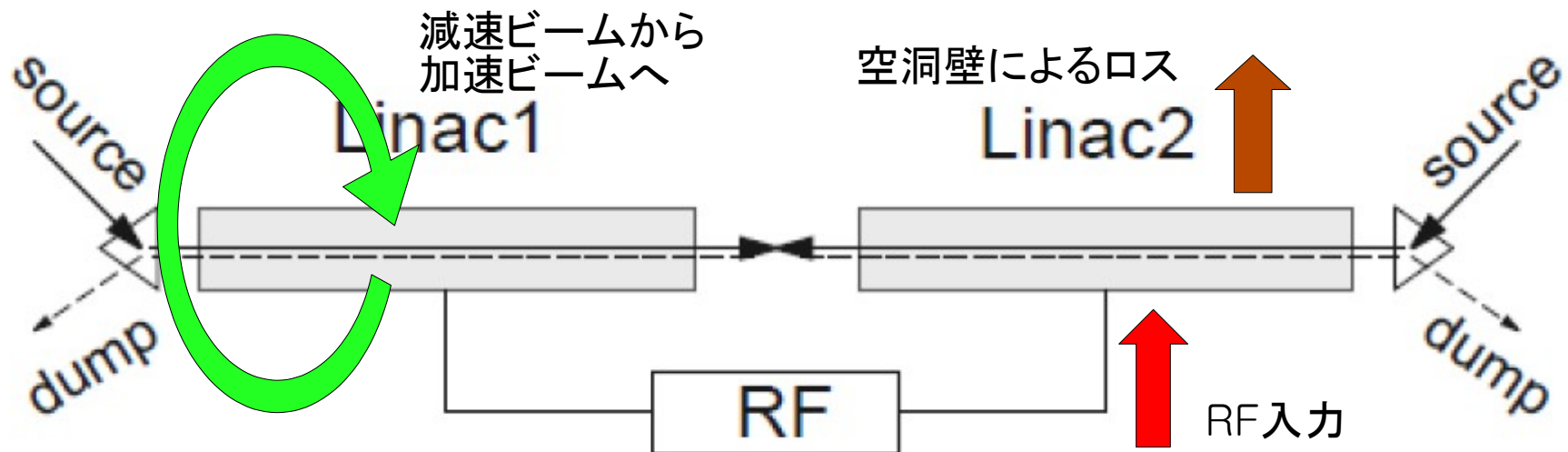
ビームビーム相互作用には強いので、こちらを最適化

LCの利点、弱点、課題

- 利点
 - シンクロトロン放射によるエネルギー損失が無い。
 - 偏極電子(陽電子)が使える。
 - ビームビーム相互作用に強い。
- 弱点(課題)
 - ビームパワーを高くできない。
 - ビームは使い捨て。
 - 高い加速勾配が必要。(そうでないと、敷地が巨大となる)

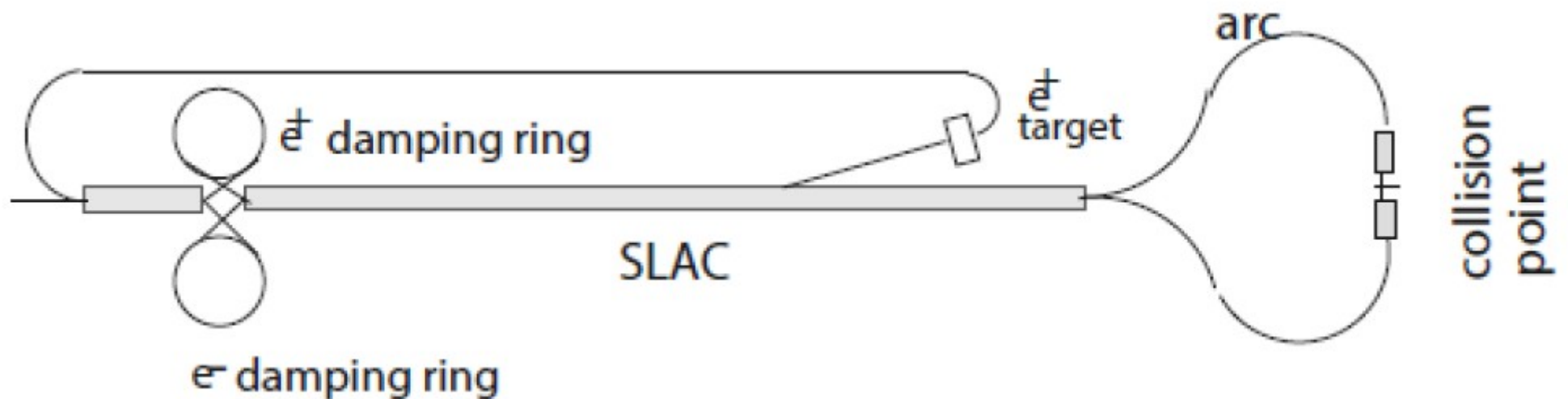
LC in History

- 1965年にコーネル大学のM. Tignerにより提案。
- エネルギー効率の悪さを克服するため、エネルギー回収という概念を導入。
- 現在、超伝導加速空洞を利用したエネルギー回収型ライナックは、第四世代放射光源として検討が進められている。



SLC(SLAC Linear Collider)

- 世界初のリニアコライダー
- 一つのライナックで電子、陽電子を同時に加速。(逆位相に乗せる)
- 加速後、大きなアークで衝突点へと導く。



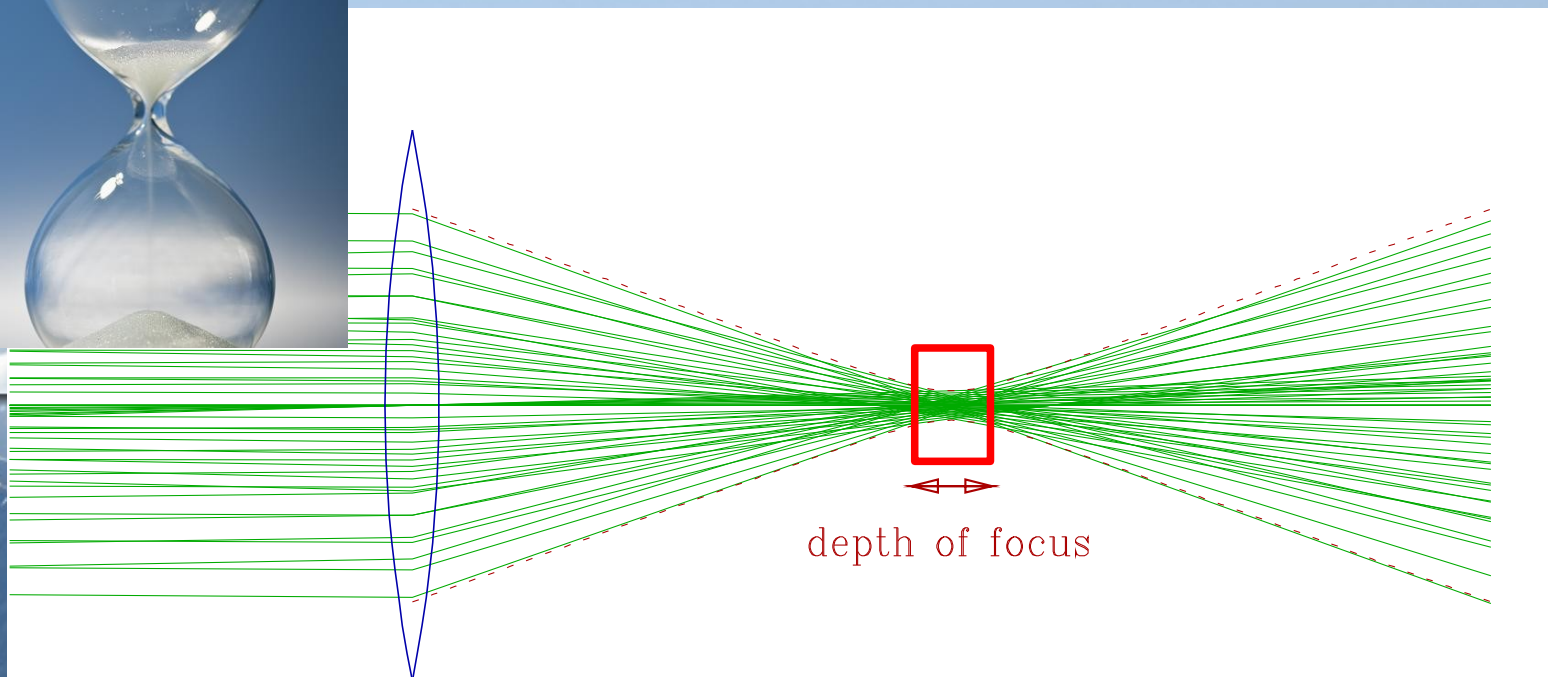
LCのルミノシティ

$$L = \frac{f n_b N^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y} H_D$$

- f : ビームパルスの繰り返し周期(5Hz)
- n_b : 1パルスあたりのバンチ数(1300)
- N : バンチあたりの粒子数(2×10^{10})
- σ_x, σ_y : 衝突点での横方向ビームサイズ(6nm, 500nm)
- H_D : Enhancement factor(1.5)
- L : $1-2e+34 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

ビーム収束

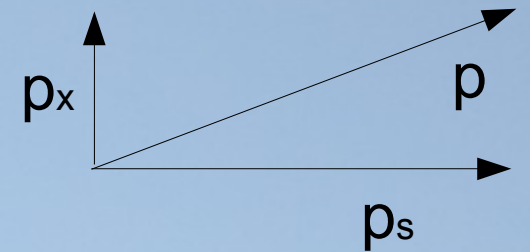
- ビームを収束し、焦点で衝突させれば良い。
- ビームを収束させても、ビームサイズは有限、かつ収束されているのは、焦点深度程度の領域のみ(砂時計効果)
- あまり絞り過ぎると、焦点深度が浅くなり、非効率。
- 調度よい絞り具合を決める。



ビーム力学超入門

Emittance is defined as area in the phase space, x and $x'=dx/ds$.

$$\dot{x} = \frac{dx}{ds} = \frac{v_x}{v_s} = \frac{p_x}{p_s} \sim \frac{p_x}{p}$$

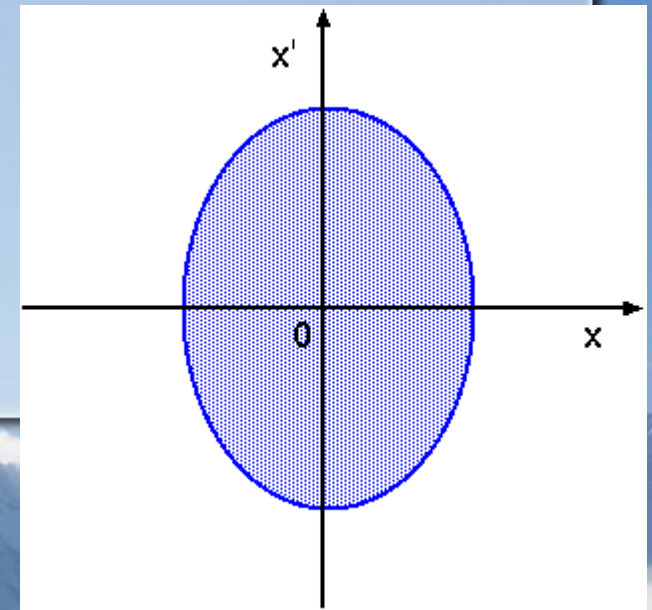


In general, RMS emittance is given as

$$\epsilon_x = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x x' \rangle^2}$$

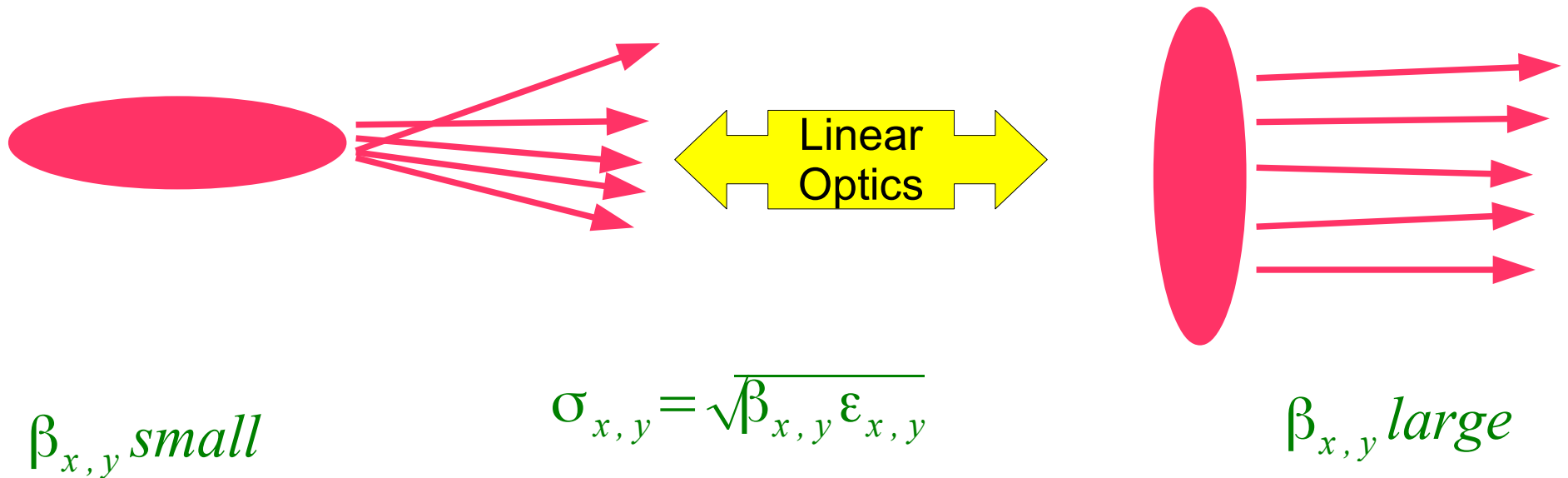
If there is no correlation between x and x' ,

$$\epsilon_x = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle}$$



ビーム力学超入門

- Emittance shows the quality of the beam.
- The shape of the beam depends on the optics, but the emittance is invariant in the frame of the linear optics.



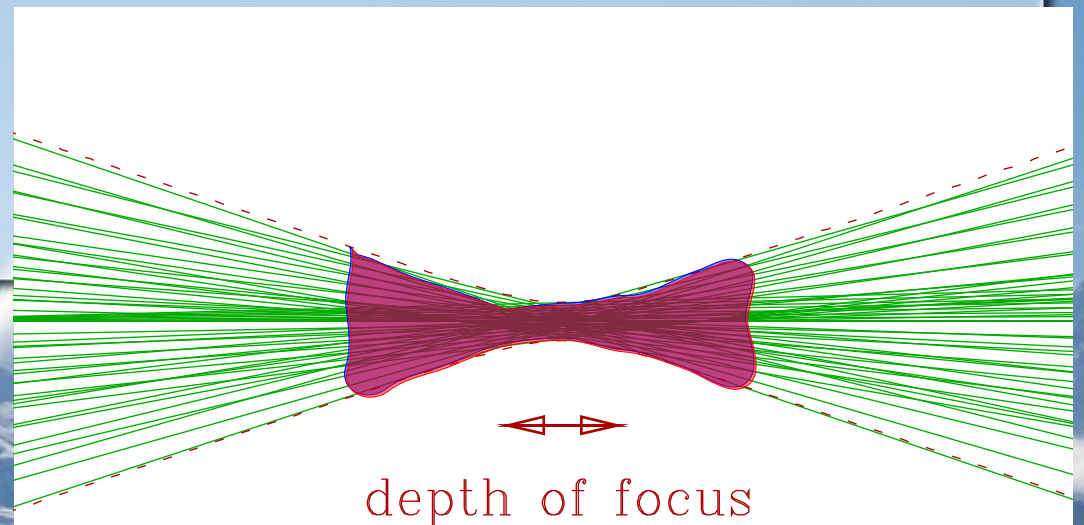
ビーム収束

- ある場所でのビームサイズ
- 焦点近傍でのベータ関数
- 衝突点近傍でのビームサイズ
焦点深度= β_y
- $\sigma_z > \beta_y$ の場合、ルミノシティ
が大きい領域はバンチの一部。
平均のルミノシティは小さい。

$$\sigma_y(s) = \sqrt{\beta_y(s) \varepsilon_y(s)}$$

$$\beta_y(s) = \beta_y^* + \frac{s^2}{\beta_y^*}$$

$$\sigma_y(s) = \sqrt{\beta_y^* \varepsilon_y} \sqrt{1 + \frac{s^2}{(\beta_y^*)^2}}$$



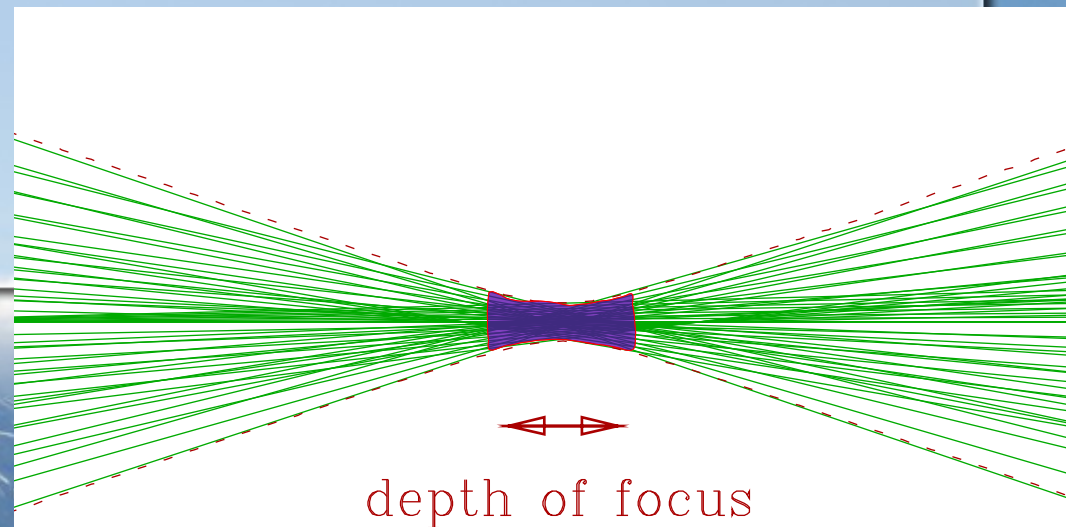
ビーム収束

- ある場所でのビームサイズ
- 焦点近傍でのベータ関数
- 衝突点近傍でのビームサイズ
焦点深度= β_y
- $\sigma_z = \beta_y$ の場合、バンチ全体が
ルミノシティの高い状態
となる。
- $\sigma_z < \beta_y$ になっても、ルミノシティ
はほぼ一定。

$$\sigma_y(s) = \sqrt{\beta_y(s) \varepsilon_y(s)}$$

$$\beta_y(s) = \beta_y^* + \frac{s^2}{\beta_y^*}$$

$$\sigma_y(s) = \sqrt{\beta_y^* \varepsilon_y} \sqrt{1 + \frac{s^2}{(\beta_y^*)^2}}$$



Disruption

- ビームサイズは、ベータatron振動に加えて、ビーム間のクーロン相互作用により影響される。

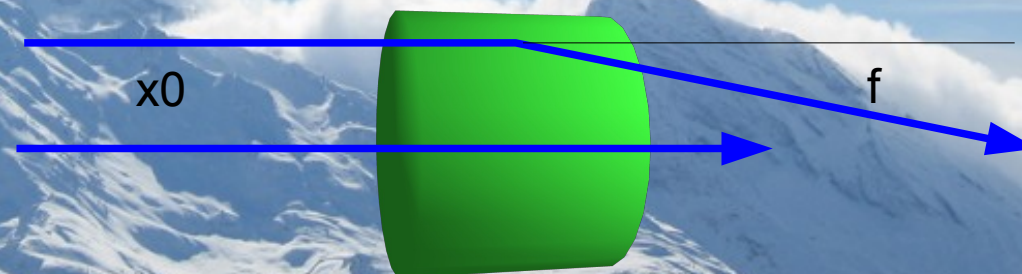
$$\ddot{x} + K_x x = 0, \quad \ddot{y} + K_y y = 0$$

- ガウスビームを仮定し、かつ入射ビームを平行とすると、クーロン力による収束作用は

$$\frac{dx}{dt} \sim -\frac{2Nr_e}{\gamma} \frac{x_0}{\sigma_x(\sigma_x + \sigma_y)} = \frac{-x_0}{f}$$

- Disruption parameter: f と σ_z との比、ビームの収束力

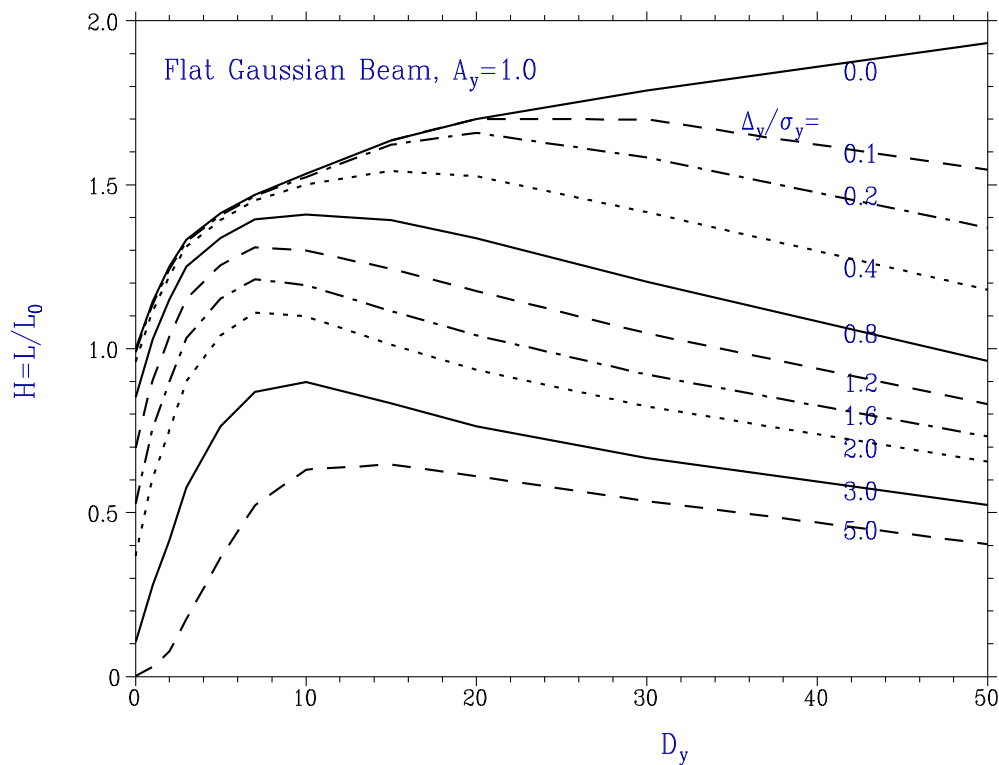
$$D_{x,y} \equiv \frac{\sigma_z}{f_{x(y)}} = \frac{2Nr_e}{\gamma} \frac{\sigma_z}{\sigma_{x,y}(\sigma_x + \sigma_y)}$$



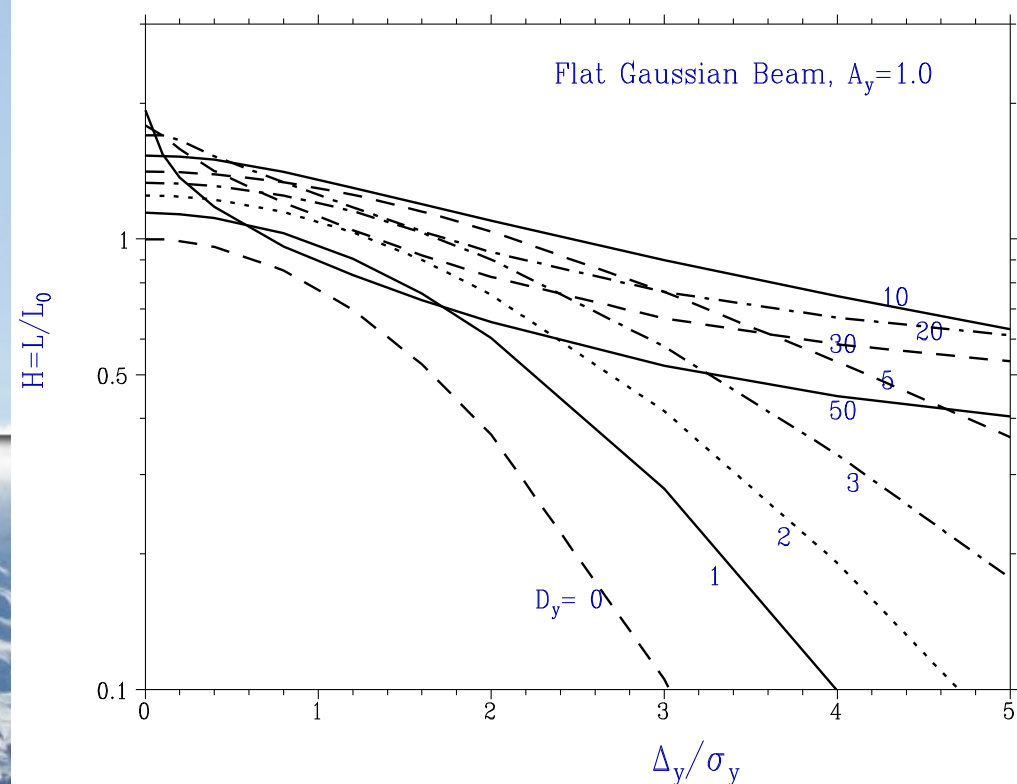
Luminosity Enhancement

- Disruptionにより、ルミノシティは上昇する。(電子と陽電子の間にクーロン引力が働くため)
- しかし、ビームオフセットがあると、over focusが生じ、ルミノシティは急激に減少する。
- $\Delta_y=0.5$ 、現状のデザインでは $D_x=0.5$, $D_y=25$

Enhancement Factor vs. Disruption Parameter



Enhancement Factor vs. Offset

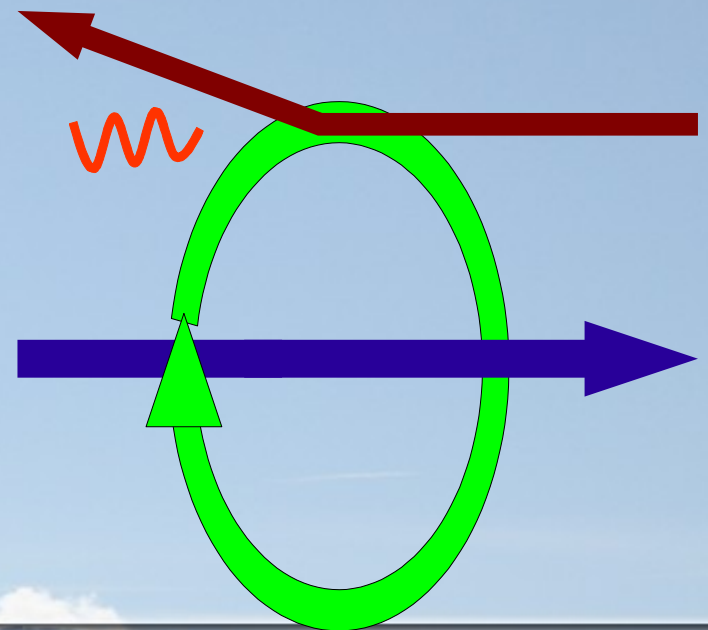


Beamstrahlung

- 衝突相手のつくる磁場によるシンクロトロン放射。
- バンチ長が短く、径も小さいので、磁場は数kTにもなる。
- 放射により、エネルギーが広がる。
- Critical energy (シンクロトロン放射を特徴付けるエネルギー)

$$Y \equiv \frac{2}{3} \frac{\hbar \omega_c}{E} = \gamma \frac{2B}{B_c} \quad B_c = \frac{m^2}{e} \sim 4.4 \text{ GT}$$

- ビーム全体では
$$Y_{average} = \frac{5}{6} \frac{Nr_e^2 \gamma}{\alpha \sigma_z (\sigma_x + \sigma_y)}$$



Beamstrahlung

電子あたりの光子の
放出数

$$n_y \sim 1.08 \frac{2 N r_e \alpha}{\sigma_x + \sigma_y} U_0(Y)$$
$$U_0(Y) \sim \frac{1}{\sqrt{1 + Y^{2/3}}}$$

BSにより生じるエネルギーひろがり

$$\delta_E = \left\langle -\frac{\Delta E}{E} \right\rangle \sim 0.209 \frac{N^2 r_e^3 \gamma}{\sigma_z} \left(\frac{2}{\sigma_x + \sigma_y} \right)^2 U_1(Y)$$
$$U_1(Y) \sim \frac{1}{[1 + (1.5 Y)^{2/3}]^2}$$

Flat Beam

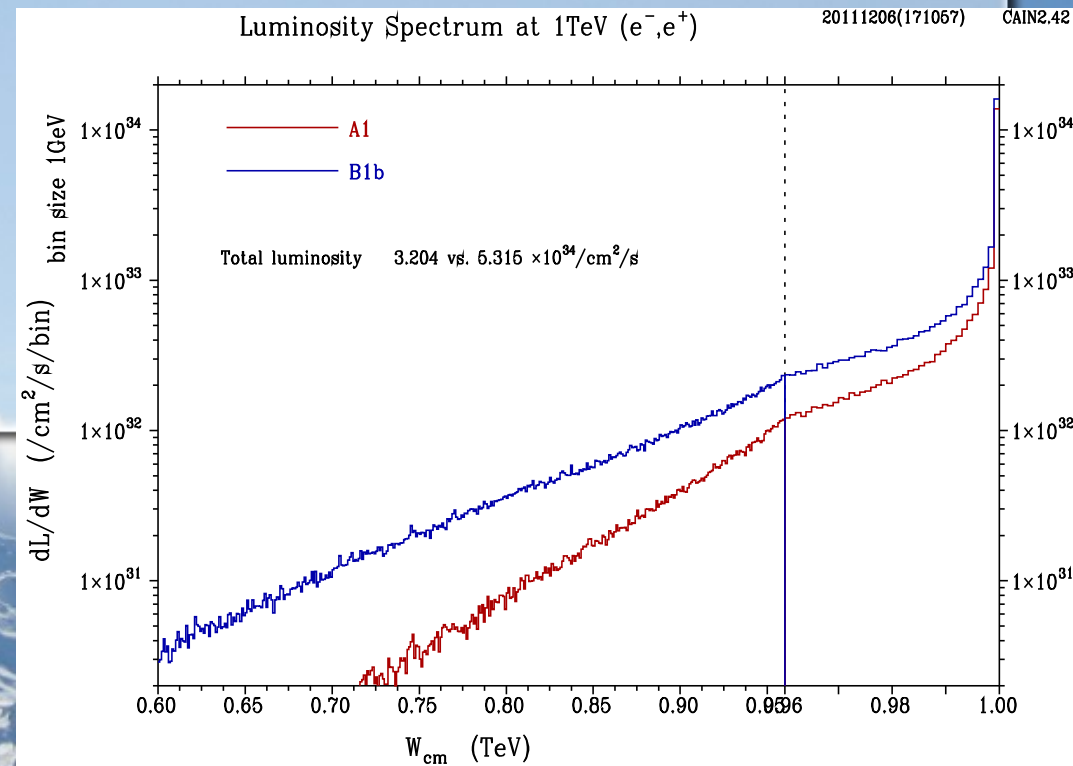
- $\sigma_x \gg \sigma_y$ とすると、磁場は σ_x のみに依存。対称の場合の高々二倍程度。

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \sim \frac{\mu_0 eN}{2\pi \sigma_x \sigma_z / c}$$

- ルミノシティは $\propto 1/(\sigma_x \sigma_y)$ なので、一方のサイズを減少させると、増大する。

$$\delta_E = \left\langle -\frac{\Delta E}{E} \right\rangle \sim 0.209 \frac{N^2 r_e^3 \gamma}{\sigma_z} \left(\frac{2}{\sigma_x + \sigma_y} \right)^2 U_1(Y)$$

- 非対称ビームは、Beamstrahlungを抑制し、ルミノシティを最大化
- LCパラメーターでは δ_{BS} は1%程度。



Flat Beam Concept

- Damping Ring (後述)では、自然と軌道に垂直な方向のエミッタンス(ε_y)が小さくなる。
- 衝突点で、xはそこそこ、yはがんばって絞る。これにより、Beamstrahlungを抑制し、ルミノシティを最大化する。
- 砂時計効果を抑えるため、 β_y^* は σ_z 程度にする。
- Y方向のDisruption(クーロン散乱)がきついが、フィードバック等のビーム制御で頑張る。

Luminosity Scaling

- 消費電力(Wall plug power)
ηは電力効率
- ビームサイズ
- Beamstrahlung
- ルミノシティを表示すると

$$P_{beam} = eE f n_b N = \eta P_{wall}$$

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{\frac{\epsilon_{x,y} \beta_{x,y}}{y}}$$

$$\delta_{BS} \sim \frac{N^2 E}{\sigma_x^2 \sigma_z}$$

$$L = \frac{\eta P_{beam}}{E} \sqrt{\frac{\delta_{BS}}{\epsilon_y}} \sqrt{\frac{\sigma_z}{\beta_y}} \sim \frac{\eta P_{beam}}{E} \sqrt{\frac{\delta_{BS}}{\epsilon_y}}$$

Luminosity Scaling

- 消費電力(Wall plug power)
 η は電力効率
- ビームサイズ
- Beamstrahlung

$$P_{beam} = eE f n_b N = \eta P_{wall}$$

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{\frac{\epsilon_{x,y} \beta_{x,y}}{y}}$$

$$\delta_{BS} \sim \frac{N^2 E}{\sigma_x^2 \sigma_z}$$

$$L = \frac{\eta P_{beam}}{E} \sqrt{\frac{\delta_{BS}}{\epsilon_y}} \sqrt{\frac{\sigma_z}{\beta_y}} \sim \frac{\eta P_{beam}}{E} \sqrt{\frac{\delta_{BS}}{\epsilon_y}}$$

規格化ルミノシティ

$$\frac{L}{P_{beam}} \sim \frac{\eta}{E} \sqrt{\frac{\delta_{BS}}{\epsilon_y}}$$

Normalized Luminosity

電力効率を改善せよ

エネルギー広がりを
許容せよ

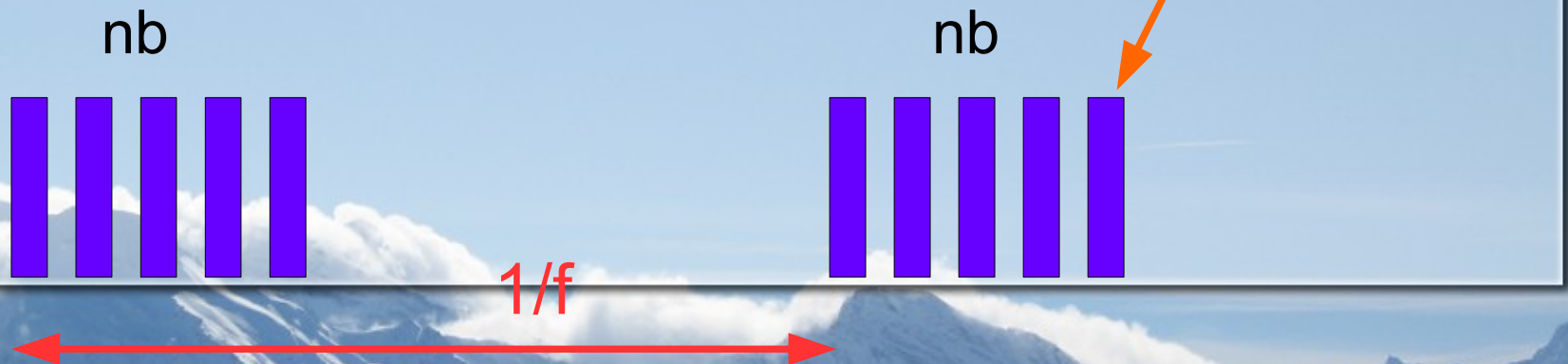
$$\frac{L}{P_{beam}} \sim \frac{\eta}{E} \sqrt{\frac{\delta_{BS}}{\epsilon_y}}$$

エミッタンスを
極小化せよ

Beam Format

- ルミノシティは平均電流のみに依存する。
- 加速器の構成により、最適なフォーマットがおおよそ決まる。

$$P_{beam} = eE f n_b N$$

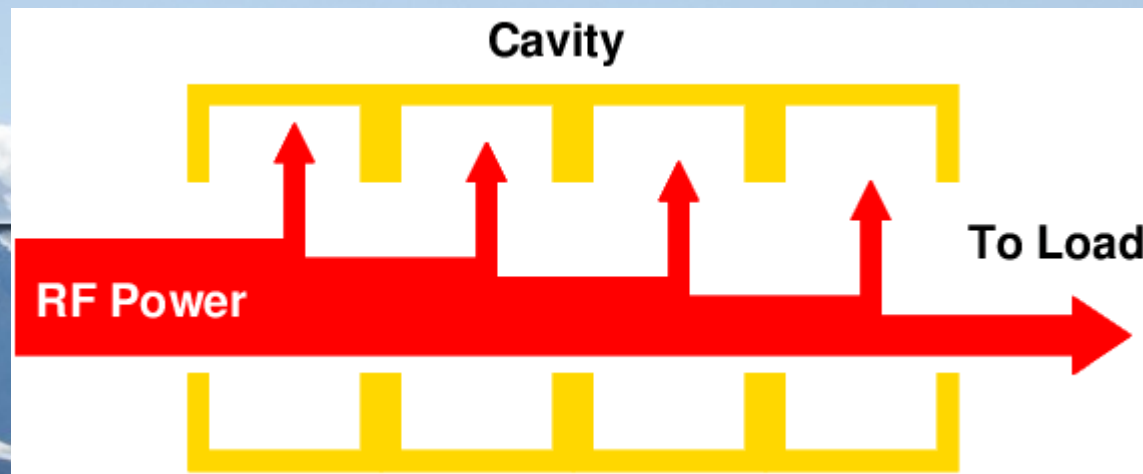


パルス構造と効率

- 超伝導加速空洞の特徴
 - 電気抵抗がきわめて低い(ゼロでは無い)
 - 低温に冷却しなければならない。
 - 群速度がゼロの定在波空洞。
 - 空洞に電磁波を溜め込むのに長い時間が必要。

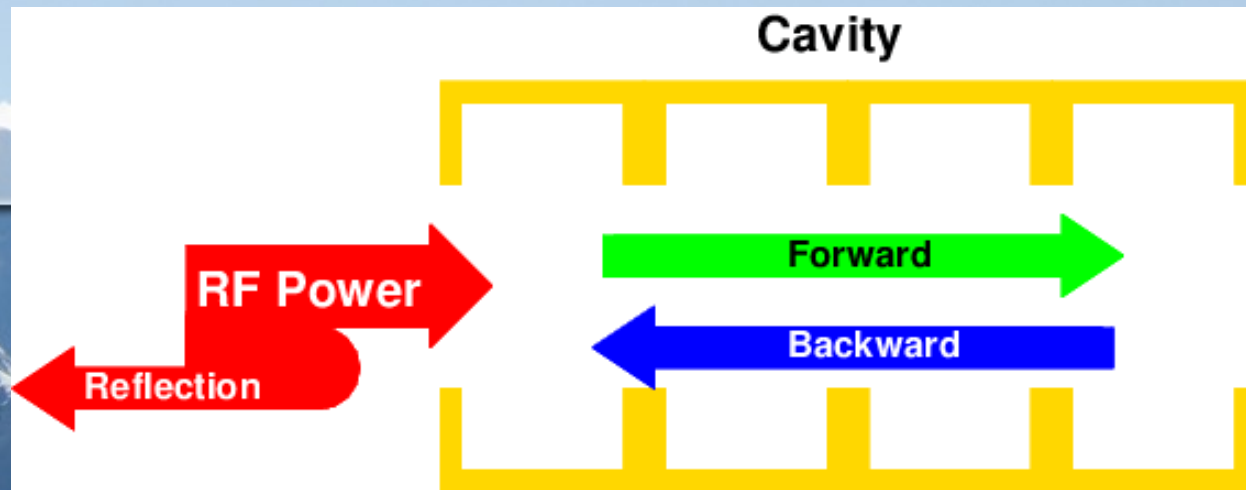
進行波型加速管

- 入力RFパワーが有限の群速度で管内を進行。
- 管内に準静的にたまっているパワーにより電場が生成。
- 余ったパワーは出口から出て行く。
- 各セルで同じパワーがたまる=勾配を一定とするため、精密な周波数調整が必要。超伝導空洞ではそれが困難。
- ロードは冷凍容器の外部、その分熱侵入が増える。
- 超伝導空洞で進行波管が使われたことはまだない。



定在波型加速管

- 群速度ゼロの定在波。
- 二つの進行波の重ね合わせ(ネットの群速度ゼロ)。
- RFパワーはビルドアップ(空洞内外のパワー密度差により流入)。必然的にRFパワーの一部は反射される。
- 空洞内にパワーがたまっていくに従い、反射波は減少。
- 一旦蓄積されたRFパワーは効率的に維持されるため、超伝導空洞と相性が良い。
- 超伝導空洞は現状ではすべて定在波。



定在波加速管

- 空洞電圧の時間変化。
- RFとビームローディングによる電圧変化は、同じ時定数 T_0 を持っている。
- 二つの振幅が等しい場合、加速電圧が一定となる。

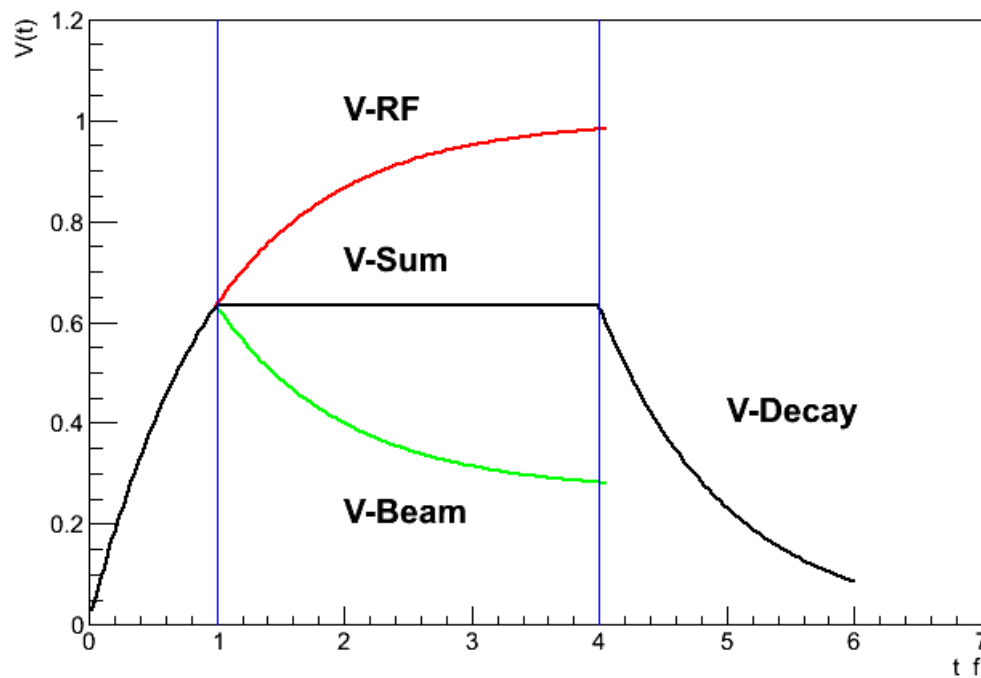
入力RF

$$V(t) = \frac{2\sqrt{\beta}P_0rL}{1+\beta} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}}\right)$$

$$- \frac{IrL}{1+\beta} \left(1 - e^{-\frac{-t-t_b}{T_0}}\right)$$

ビームによる電圧
(Beam loading)

$$T_0 = \frac{Q}{\omega(1+\beta)}$$



SC vs NC

常伝導加速管に必要な電力

$$P = \frac{V^2}{(R/Q)Q} + I_{Beam} V,$$

Q およそ 10^4

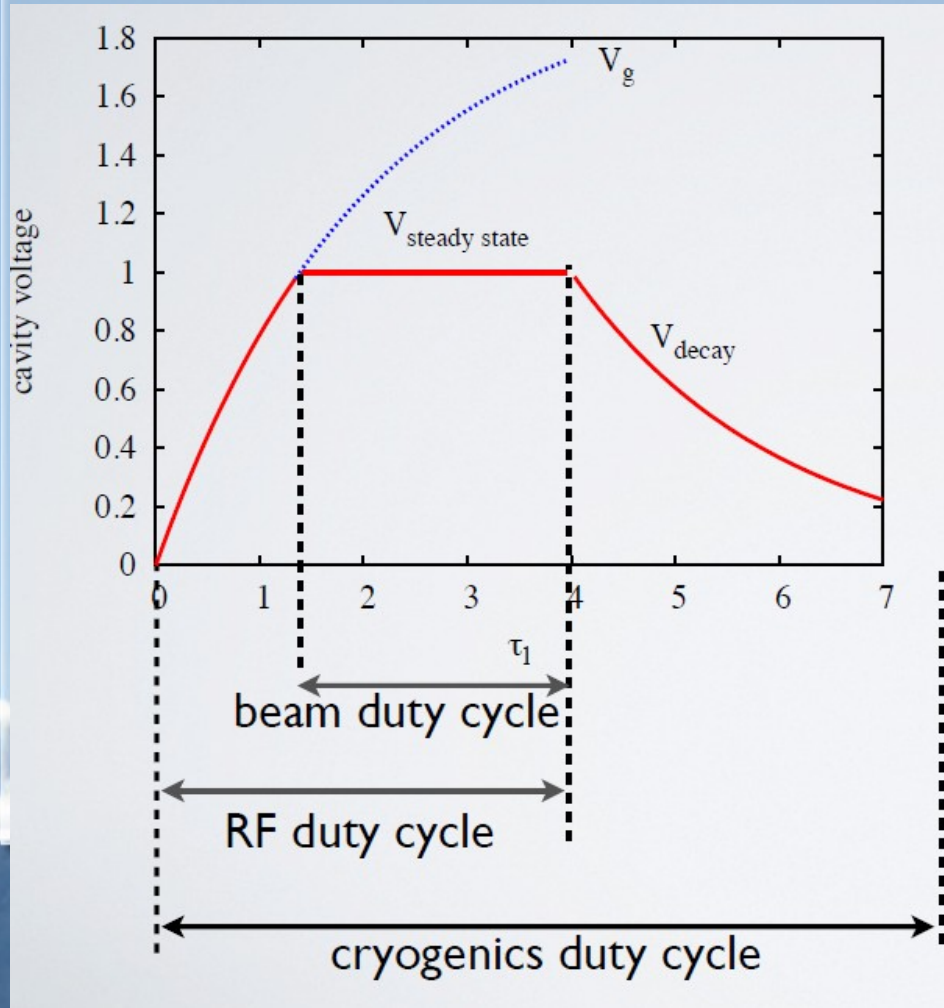
超伝導加速管に必要な電力 $P = \frac{V^2}{(R/Q)Q_0} + I_{Beam} V \sim I_{Beam} V,$

Q_0 およそ 10^{10}

超伝導加速管は極めて高い効率。
他方で長い充填時間

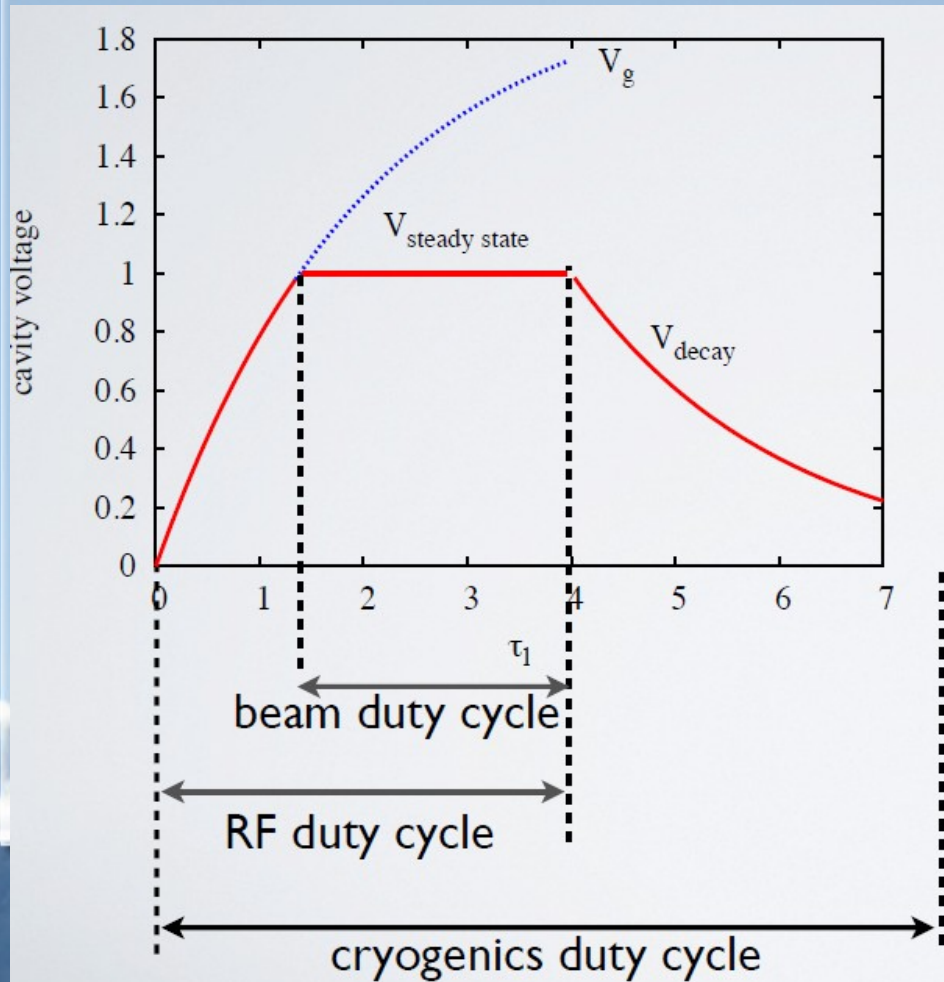
$$T_0 = \frac{Q_L}{\omega} = \frac{Q_0}{\omega(1+\beta)},$$

SC operation cycle



- 高い効率＝長い充填時間。
- RFが充填され、減少するまで冷却を維持する必要。
- ビーム加速の時だけでなく、充填時間もふくめてRFが必要。

SC operation cycle



$$\eta_{beam} = \frac{t_{beam}}{t_{cycle}},$$

$$\eta_{RF} = \frac{1.39\tau + t_{beam}}{t_{cycle}},$$

$$\eta_{cryo} = \frac{1.55\tau + t_{beam}}{t_{cycle}},$$

消費電力としては、冷却パワーが支配的。

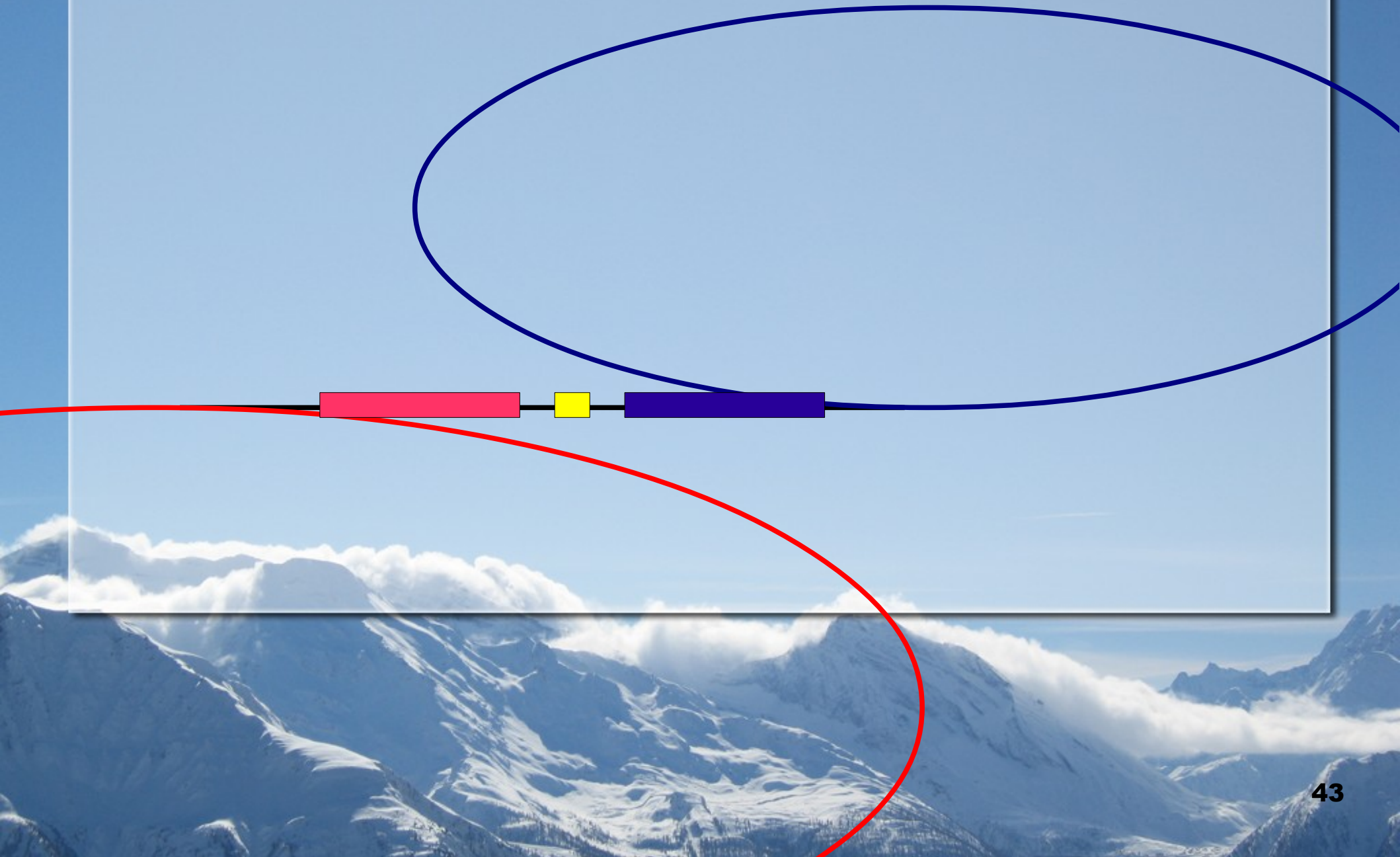
$$\frac{\eta_{cryo}}{\eta_{beam}} = \frac{1.55\tau + t_{beam}}{t_{beam}}$$

超伝導加速器は、 t_{beam} を長くすればするほど効率が上がる。

How To Fix T_{beam} ?

- 超伝導加速器の効率を考えると、 t_{beam} は長ければ長いほど良い。TESLAパラメーターではおよそ $T_0=0.5\text{ms}$. これよりは長くしたい。
- ただし、 t_{beam} はむやみに長くできない。
 - IPで非対称超低エミッタンスビームをつくるため、DRに数msから数百ms程度、蓄積しなくてはならない。
 - パルス長 $\times c(\text{光速}) = \text{DR周長}$: 0.5msの場合、150km.

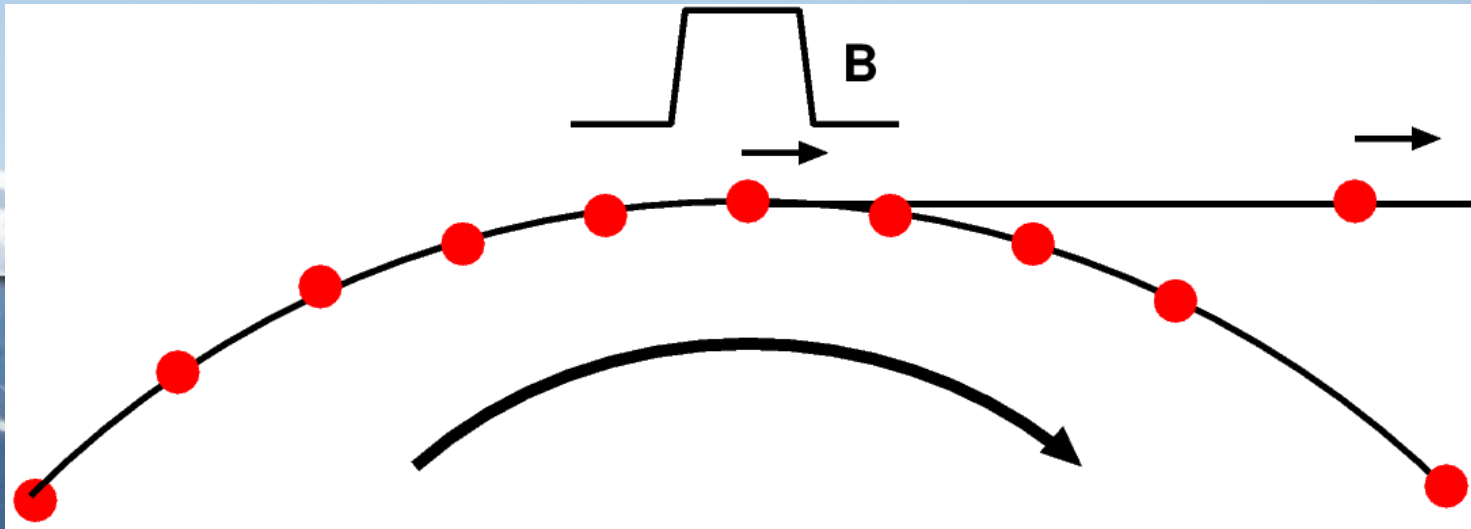
Stupid Linear Collider



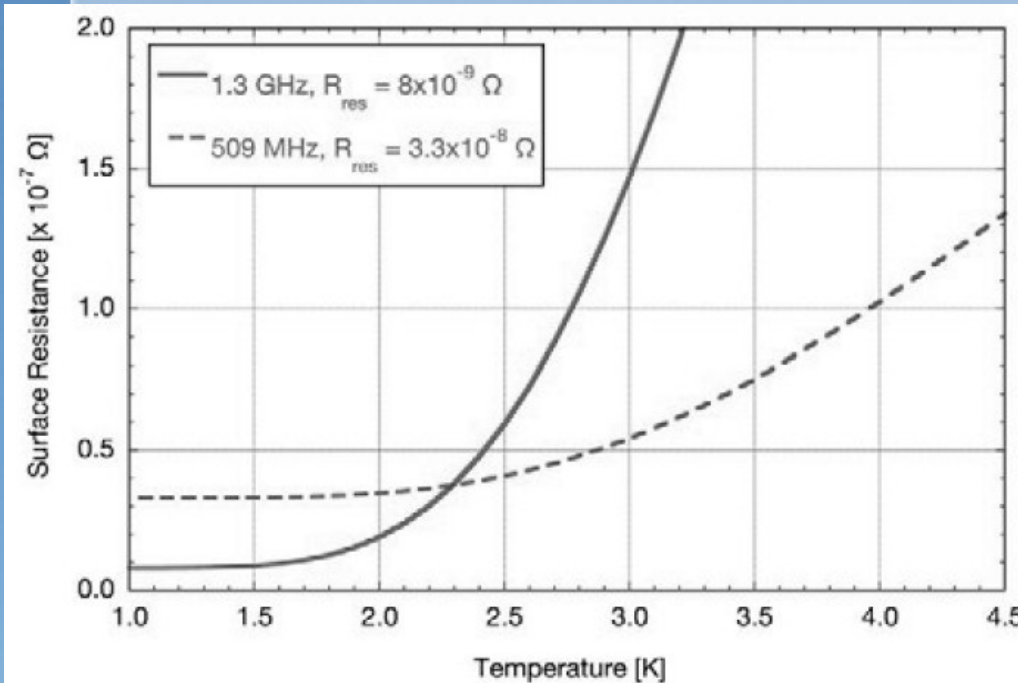
DR周長

- 0.5ms程度のパルスをそのままDRに收容しようとする、 $C=150\text{km}$.
- そこで、DRには圧縮蓄積して、取り出すさいにバンチ間隔を伸ばす。
- 実際には、 $t_{\text{bunch}}(\text{ML}) = 500\text{ns}$, $t_{\text{bunch}}(\text{DR})=6\text{ns}$, 圧縮比85程度。DR周長は3.1km.
- t_{beam} はDR周長, $t_{\text{bunch}}(\text{DR})$ および $t_{\text{bunch}}(\text{ML})$ から決定。
- $t_{\text{bunch}}(\text{DR})$ は取り出しキッカーの立ち上がり、たち下がり時間から決定。

$$t_{\text{beam}} = \frac{C_{\text{DR}}}{c} \frac{t_{\text{bunch}}(\text{ML})}{t_{\text{bunch}}(\text{DR})}$$



超伝導空洞の温度



- 超伝導空洞のRF抵抗は完全にはゼロにならない。(=残留抵抗)
- 残留抵抗は低温になるほど減少。
- 一方、低温になるほど、冷却効率が減少し、冷却に電力が必要。
- LCは2.0Kを選択。

表2 室温での冷凍必要仕事量

Temp.	Carnot eff	Refrig. eff	Combined eff	Room temp. W/W
70K	30.43%	20%	6.09%	16
4.5K	1.52%	20%	0.30%	328
1.8K	0.60%	10%	0.06%	1657

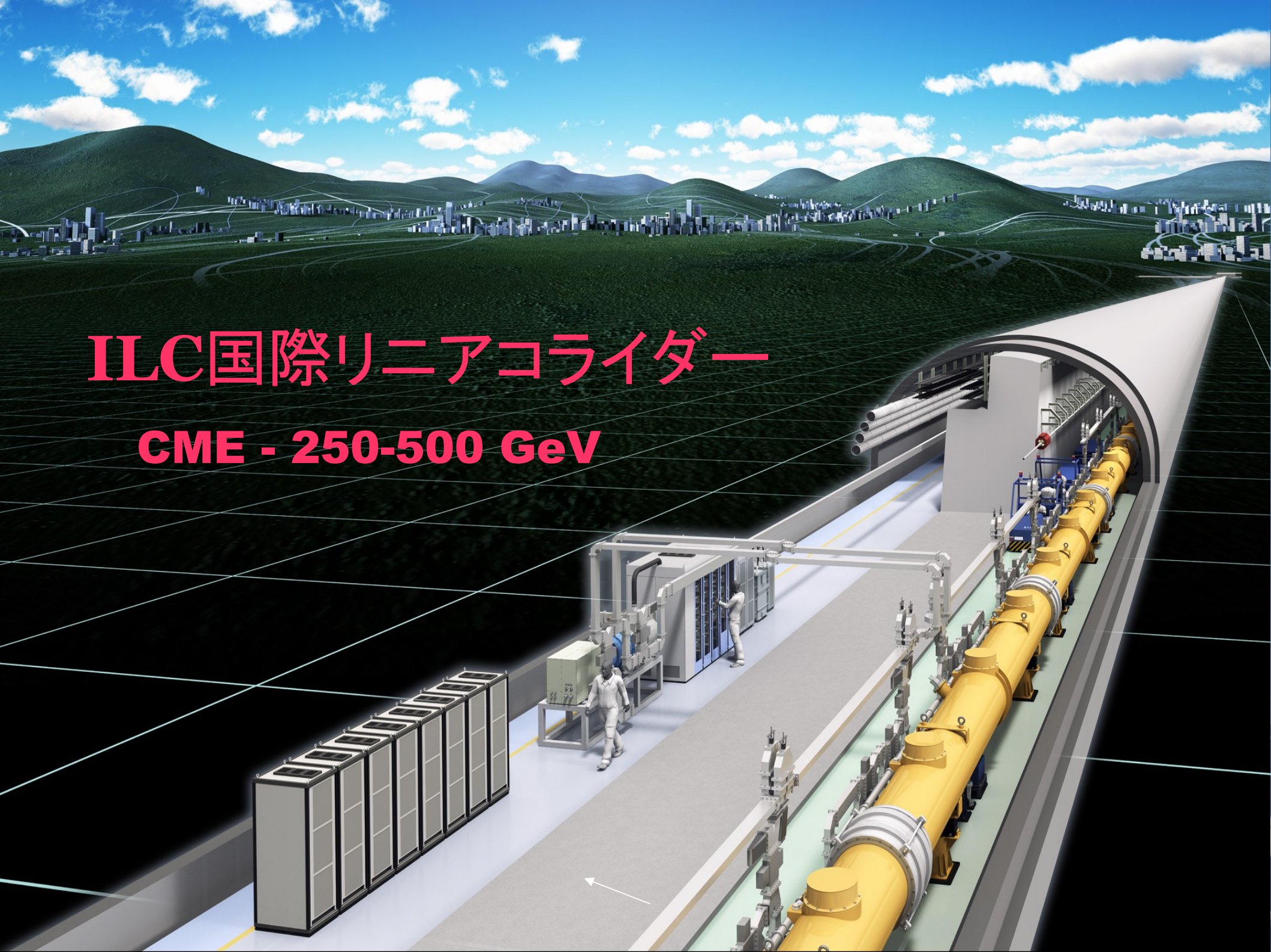
$$\eta_{Carnot} = \frac{T_C}{T_0 - T_C}$$

Beam Parameter Summary

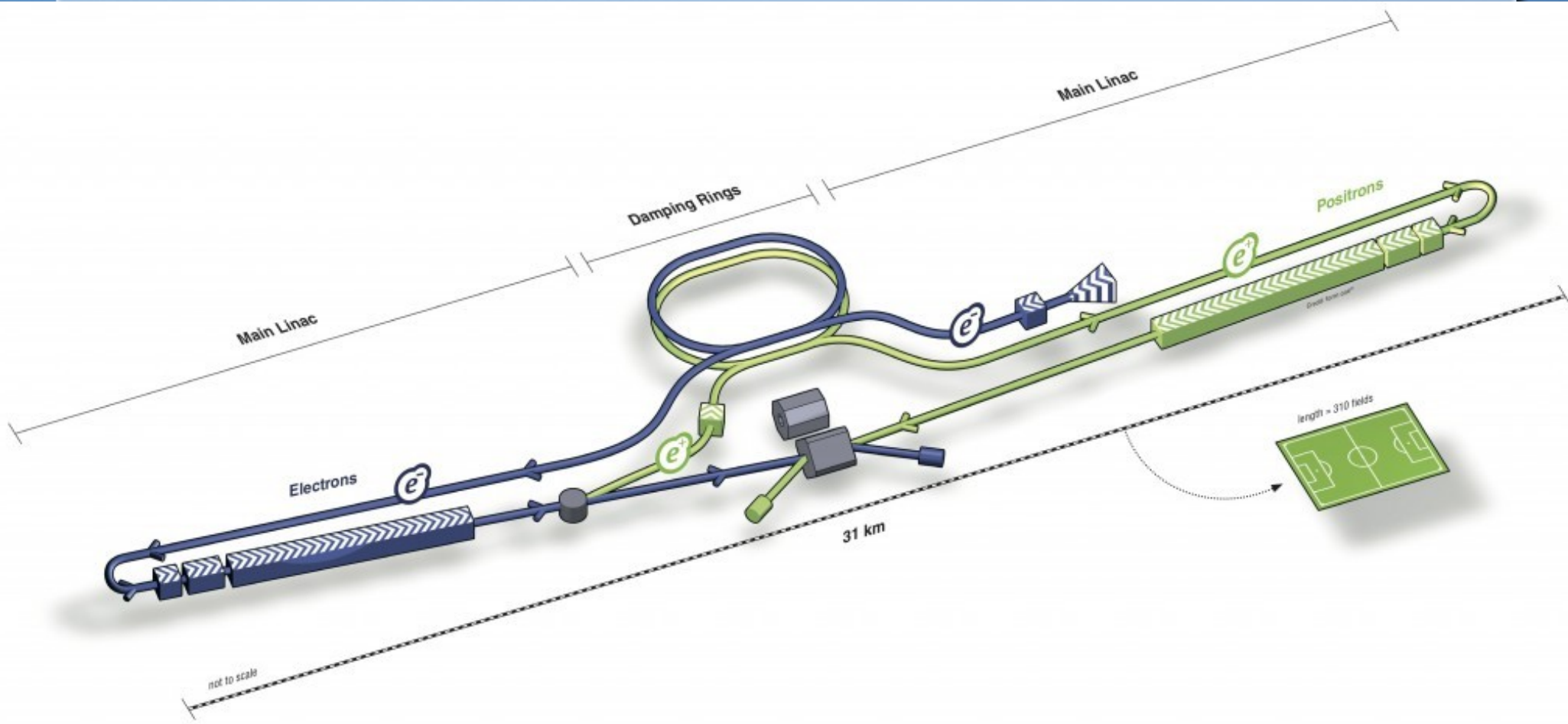
Parameterby	Unit	500GeV	Luminosity Upgrade	ECM upgrade 1TeV
ECM	GeV	500	500	1000
f_{rep}	Hz	5	5	4
# of bunches		1312	2625	2450
Bunch内粒子数	$\times 10^{10}$	2	2	1.74
MLバンチ間隔	ns	554	366	366
パルス内ビーム電流	mA	5.8	8.8	7.6
加速勾配	MV/m	31.5	31.5	38.2
ビームパワー	MW	10.5	21.0	27.2
供給電力	MW	163	204	300
RMSバンチ長	mm	0.3	0.3	0.25
水平エミッタンス	mm.mrad	10	10	10
垂直エミッタンス	mm.mrad	0.035	0.035	0.030
β_x	mm	11	11	26
β_y	mm	0.48	0.48	0.25
Luminosity	$10^{34} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	1.8	3.6	3.0
Luminosity in 1% dE/L	%	58.3	87.1	59.2

ILC国際リニアコライダー

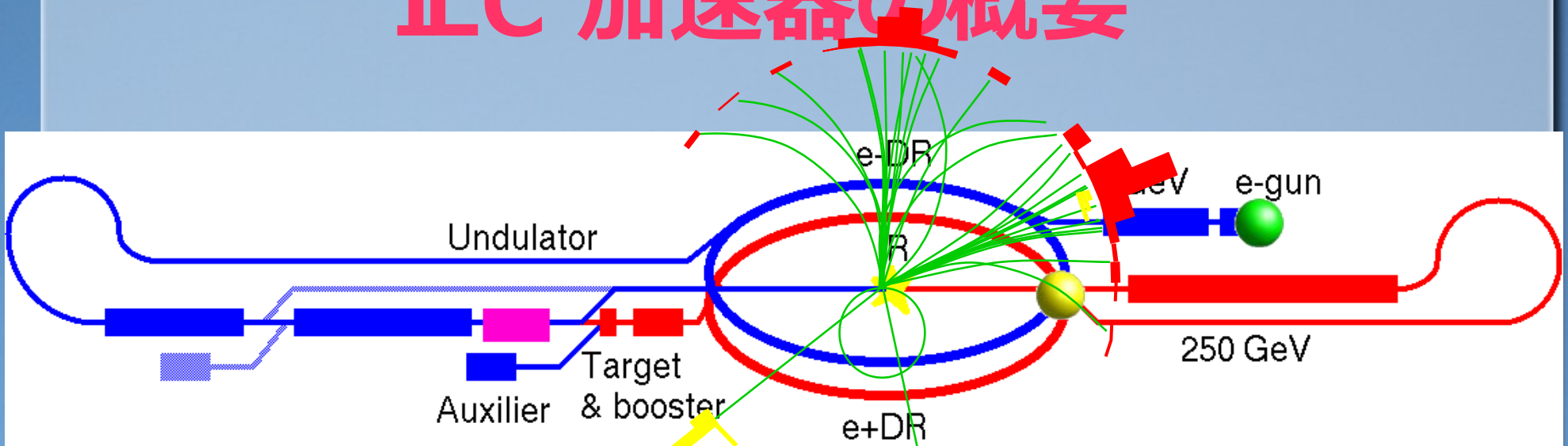
CME - 250-500 GeV



なぜこういう形になっているかを説明しようと思う。

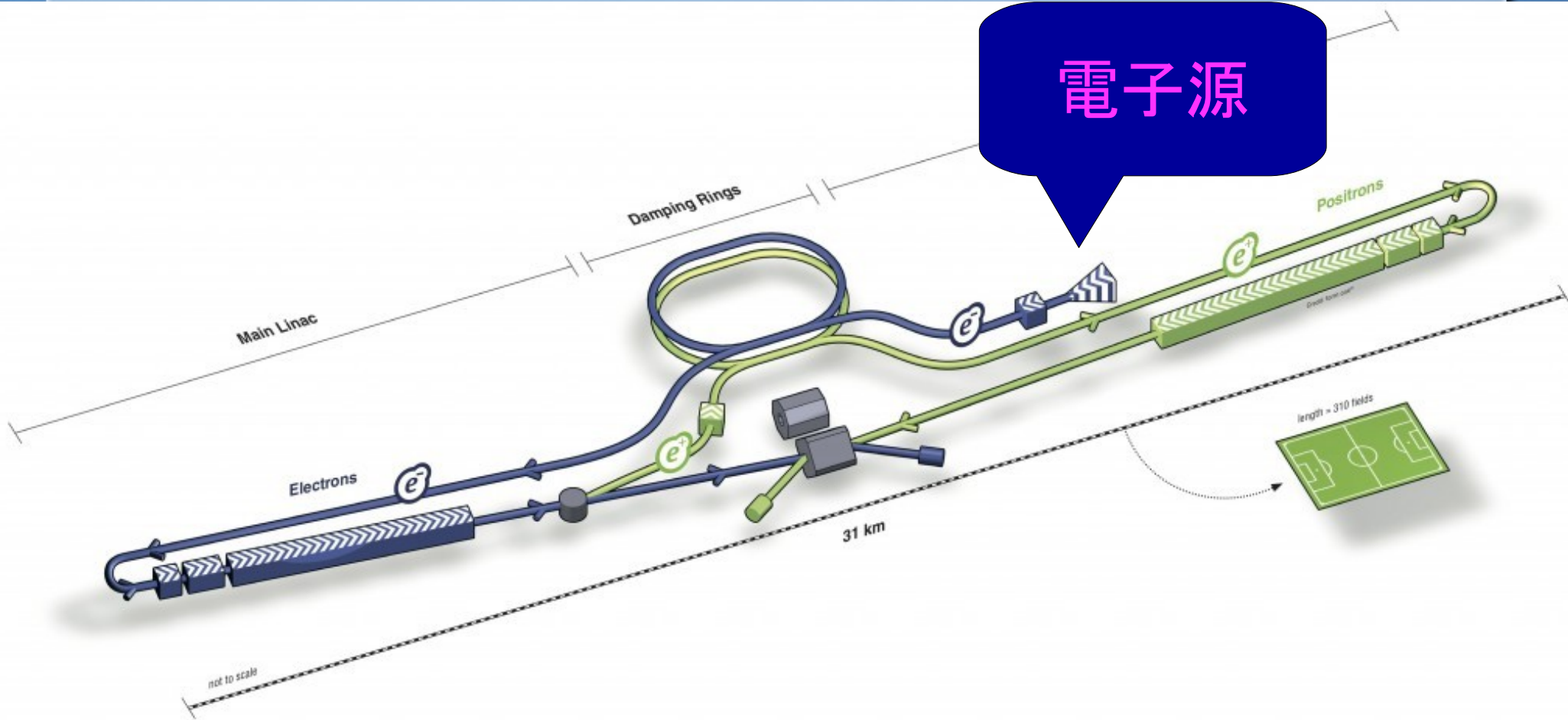


ILC 加速器の概要



- ▶ シンクロトロン放射のない線形加速器によるコライダー。
- ▶ スピン偏極、超低エミッタンスビーム生成。
- ▶ 超伝導線形加速器による加速。
- ▶ ルミノシティ確保のため、高アスペクト比の極薄ビームによる衝突。

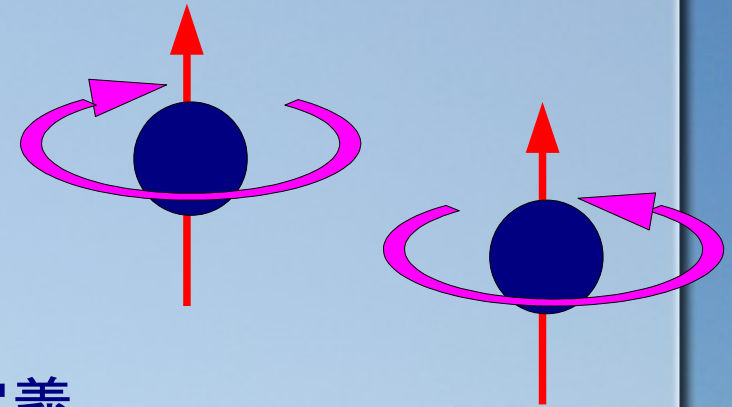
電子源



入射器 (詳しくは高橋さん)

- 電子・陽電子はスピン1/2のフェルミオン。
二つの固有状態。
- SU(2)xU(1)ゲージ理論では、二つのスピン状態は異なる量子数を有する異なる粒子。

$$l_L \equiv \begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L \end{pmatrix} \quad I_W = \frac{1}{2}, \quad Y_W = -1$$
$$e_R \quad I_W = 0, \quad Y_W = -2$$

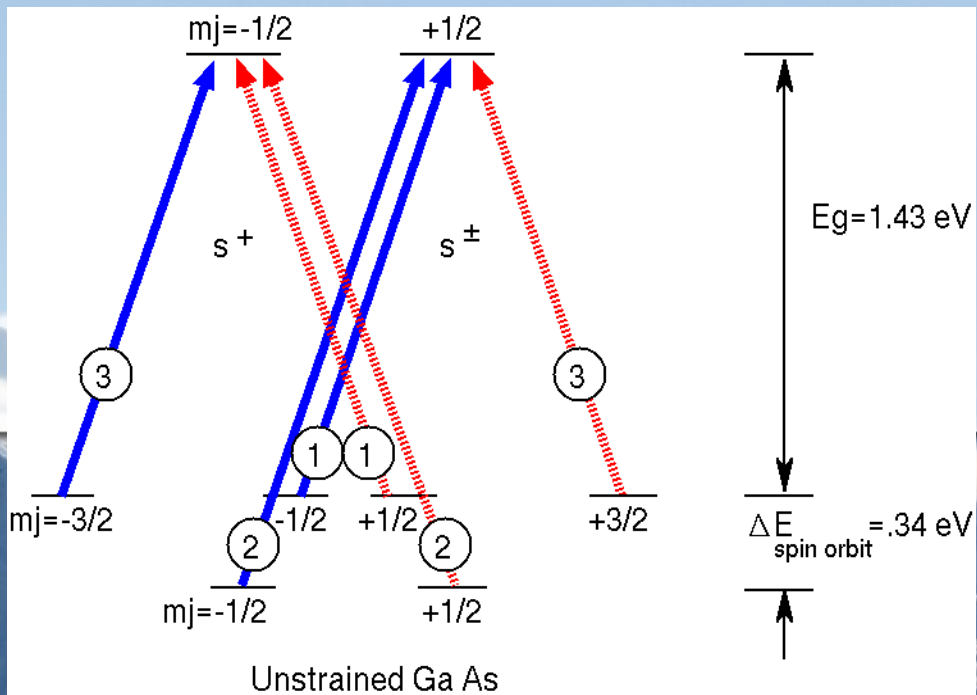
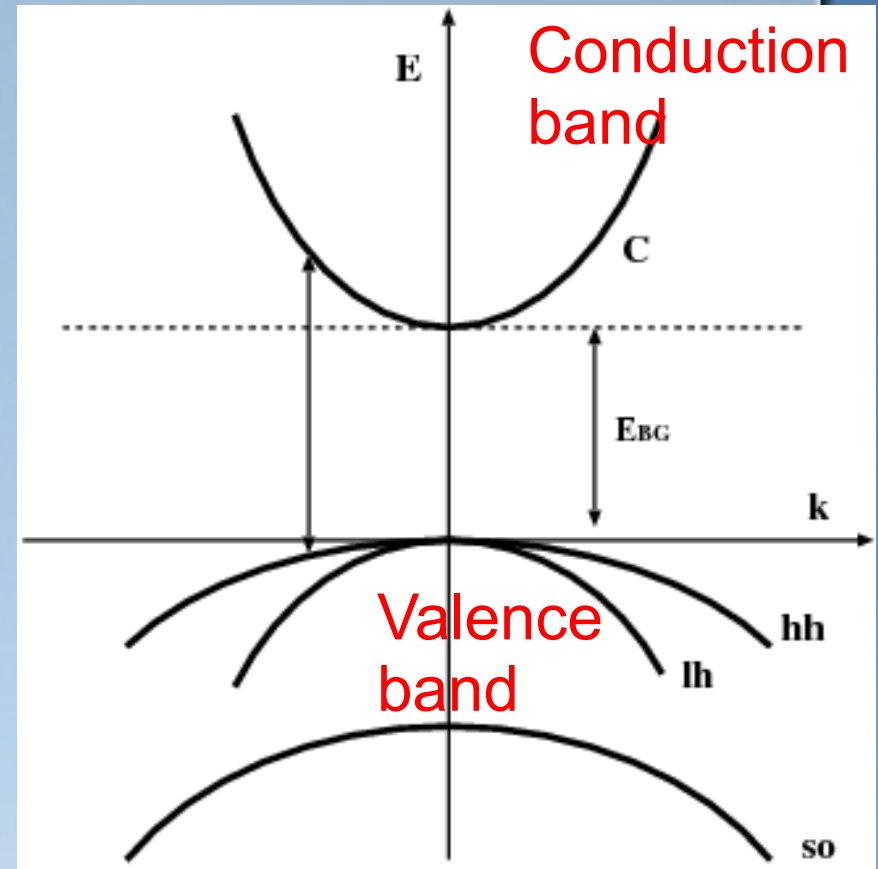


- スピン偏極状態: 厳密な初期条件の定義。

$$P \equiv \frac{N_R - N_L}{N_R + N_L}$$

Polarized Electron from GaAs

- Band gap of GaAs is Γ point ($k=0$).
 - Valence Band:
 - $J=|3/2, \pm 3/2\rangle$ (heavy hole)
 - $J=|3/2, \pm 1/2\rangle$ (light hole).
 - Conduction Band:
 - $J=|1/2, \pm 1/2\rangle$



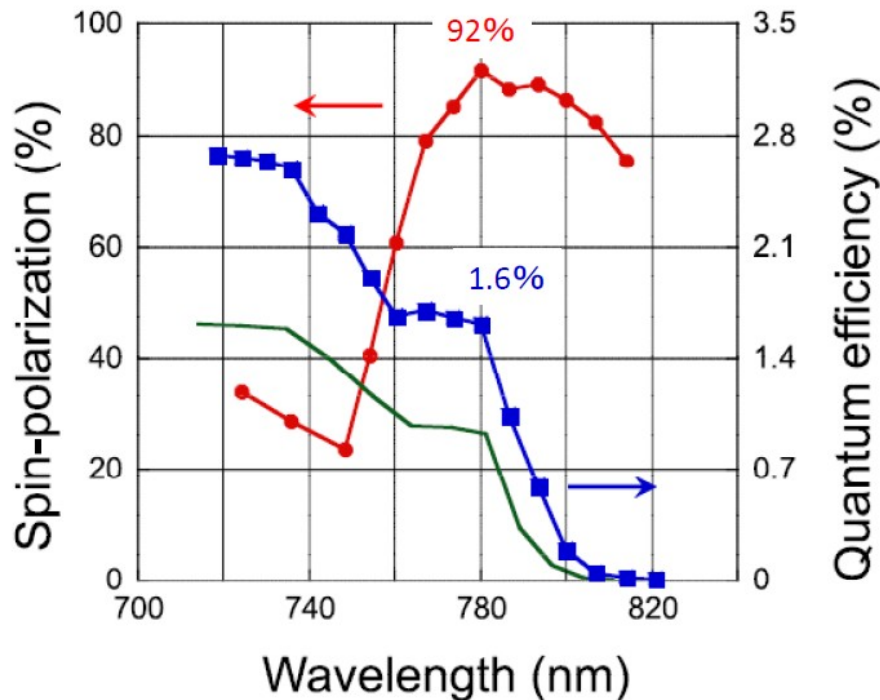
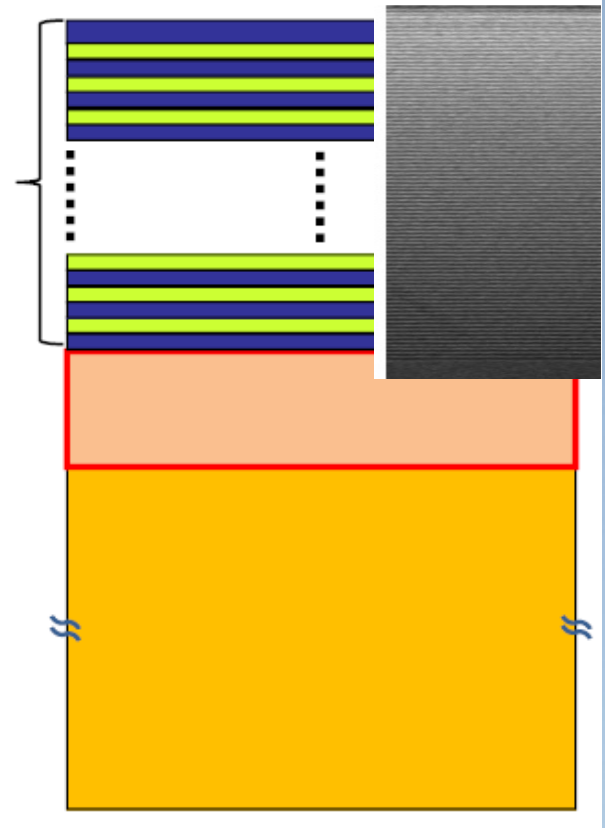
Polarization Enhancement

- Further enhancement by breaking the degeneration.
- It is achieved by GaAs/GaAsP Superlattice Crystal.

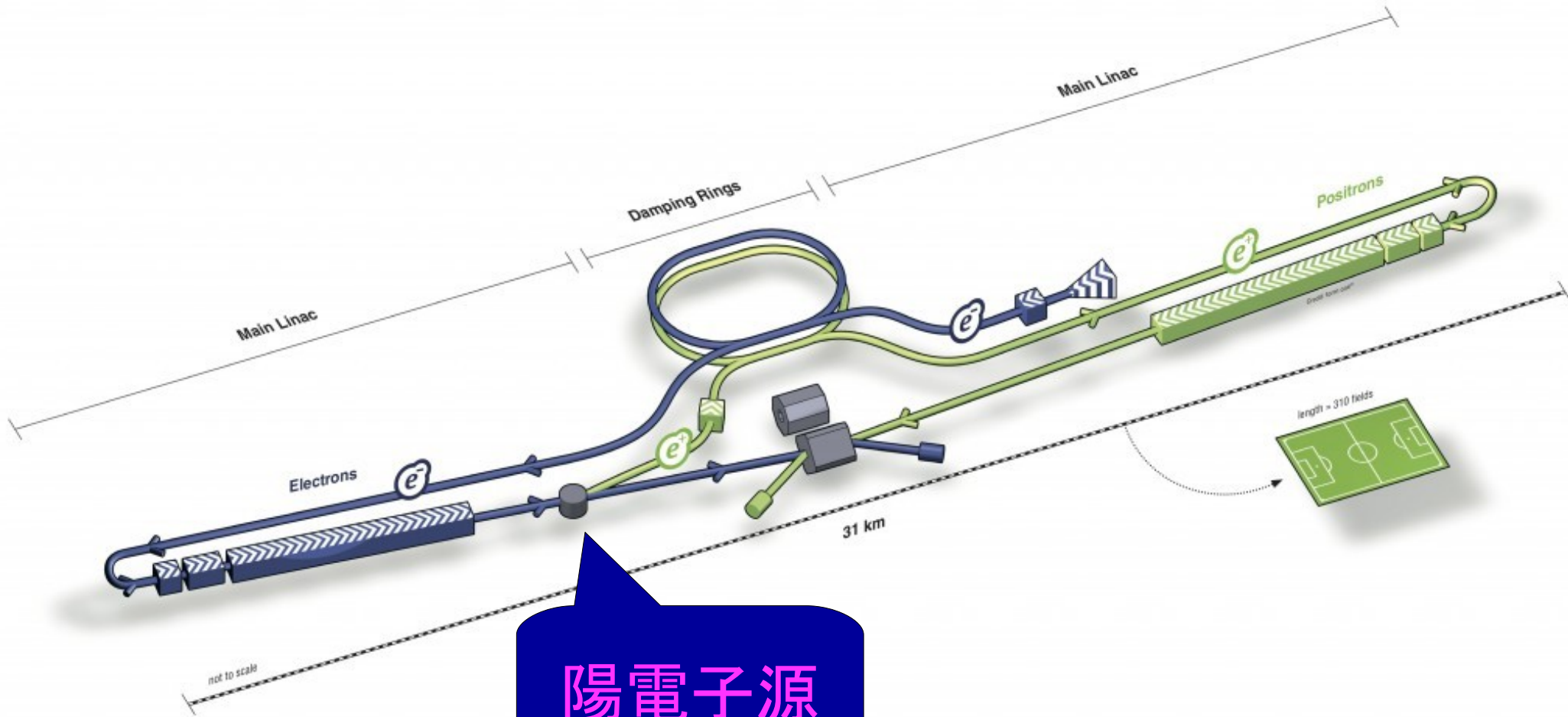
$\text{GaAs} / \text{GaAs}_{0.62}\text{P}_{0.38}$
歪み補償超格子
24周期

$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}_{0.81}\text{P}_{0.19}$
バッファ層 (500 nm)
(励起光透過可能)

GaP基板



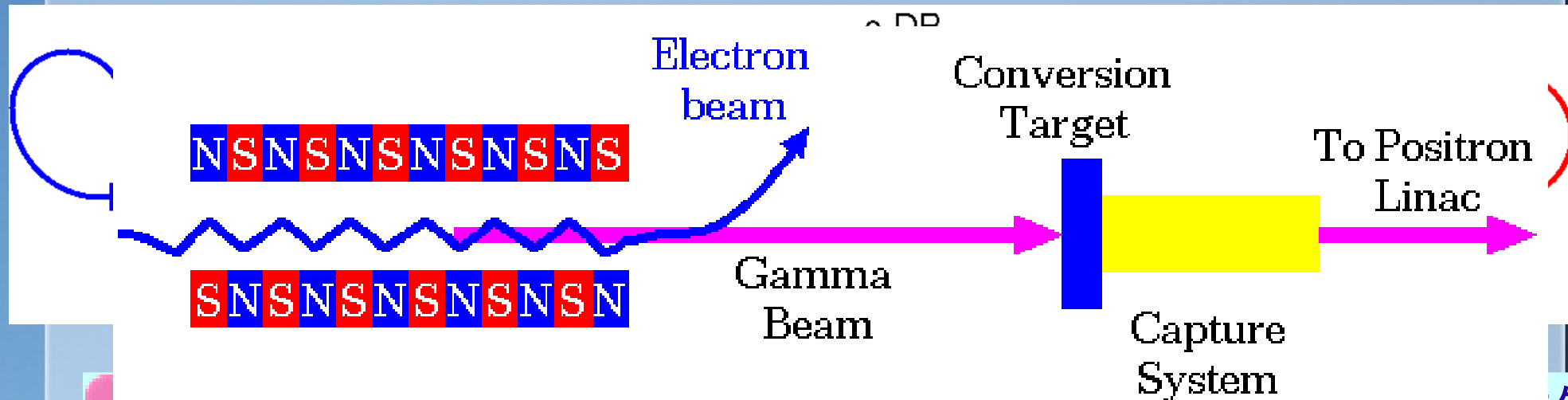
- 92% polarization, 1.6% QE



陽電子源

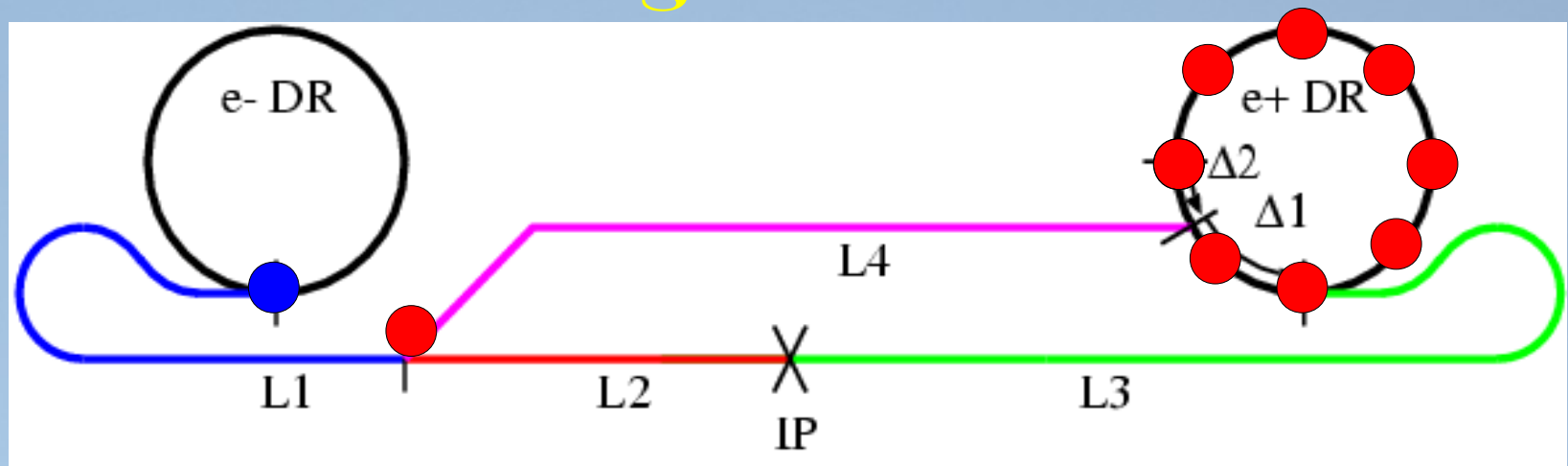
ILC Positron Source

(アンジュレーター方式)



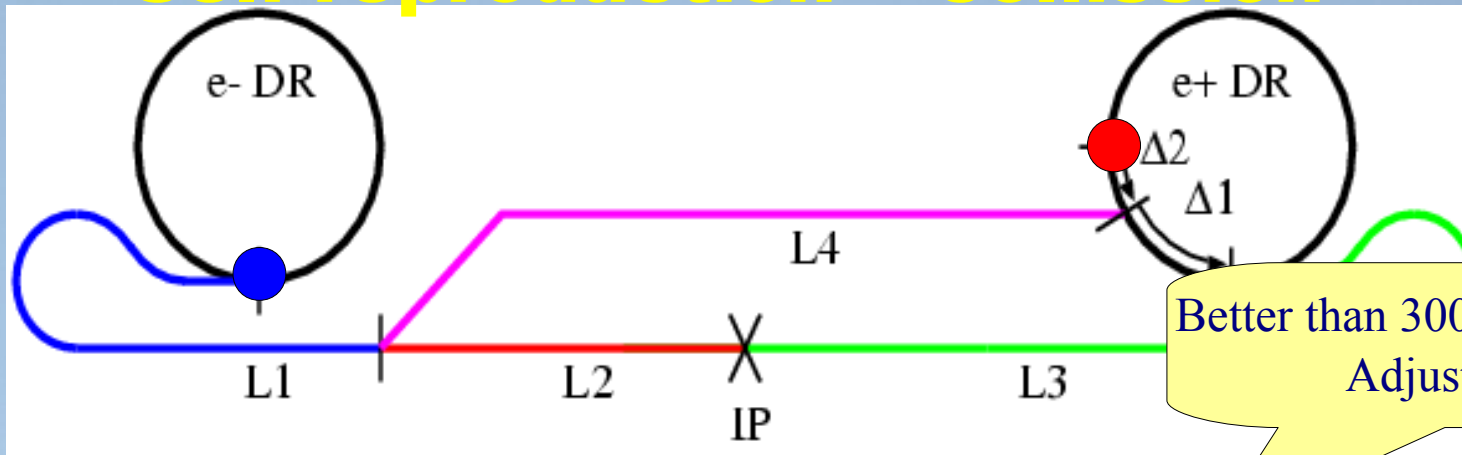
- 250 GeV 電子ビームがアンジュレーター内で生成するガンマ線の対生成反応から陽電子をつくる。
- アンジュレーターを通過した電子は衝突に使用する。
- つくられた陽電子は次回の衝突で使用する。
- 電子ビーム、あるいはレーザーコンプトン散乱により陽電子ビームを生成する方法も検討されている。

Path Length Condition



- 陽電子は電子により生成される。
- 陽電子は次の衝突に使われるので、DRで200ms待っている。
- 衝突と陽電子生成は同時に行われるので、DRの中にはまだ衝突前の陽電子が沢山いる。
- 陽電子が入る部屋をDRに用意しなくてはならない。
- 作られた陽電子は、親となる電子の衝突相手の陽電子が居た場所に入るようにするのがよい。

Pathlength condntion: Self-reproduction + collission



Better than 300um (bunch length)
Adjusted by $\Delta 2$.

•Collision condition:

$$L_1 + L_2 = \Delta_1 + \Delta_2 + L_3,$$

•Self-reproduction condition: $L_1 + L_4 = \Delta_2 + nC_{DR},$

$$L_3 + L_4 + \Delta_1 = L_2 + nC_{DR},$$

Better than RF bucket height (5mm)
Adjusted by physical length.

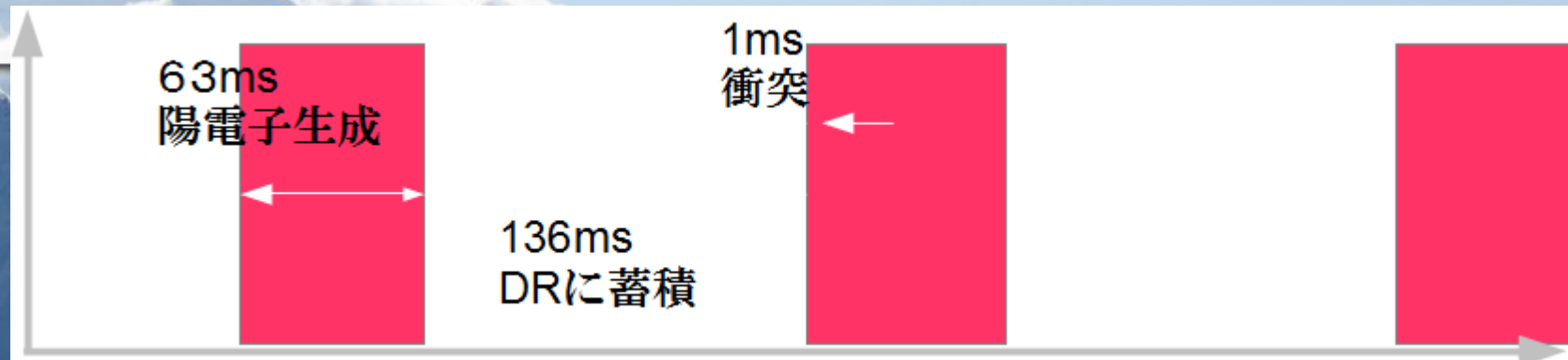
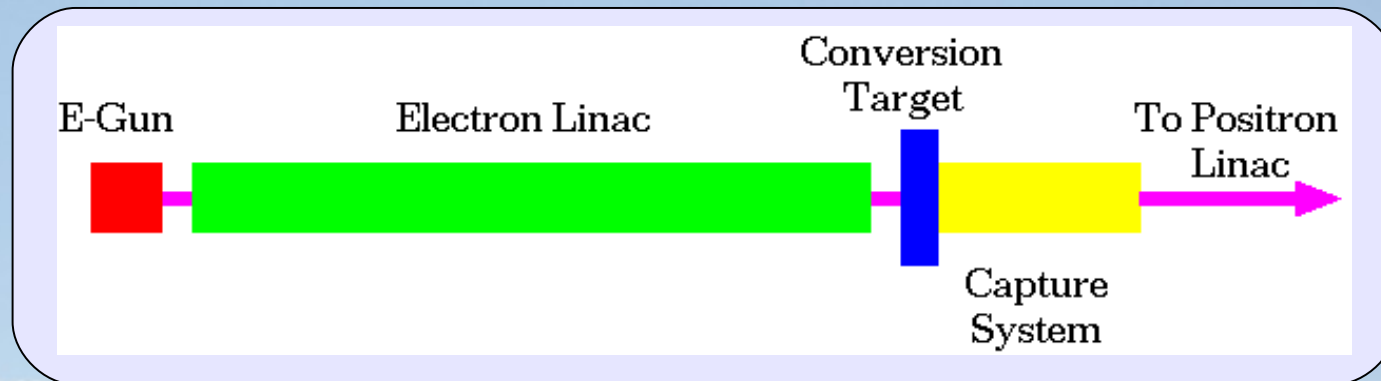
Physical path length has to be adjusted.

Adjustment

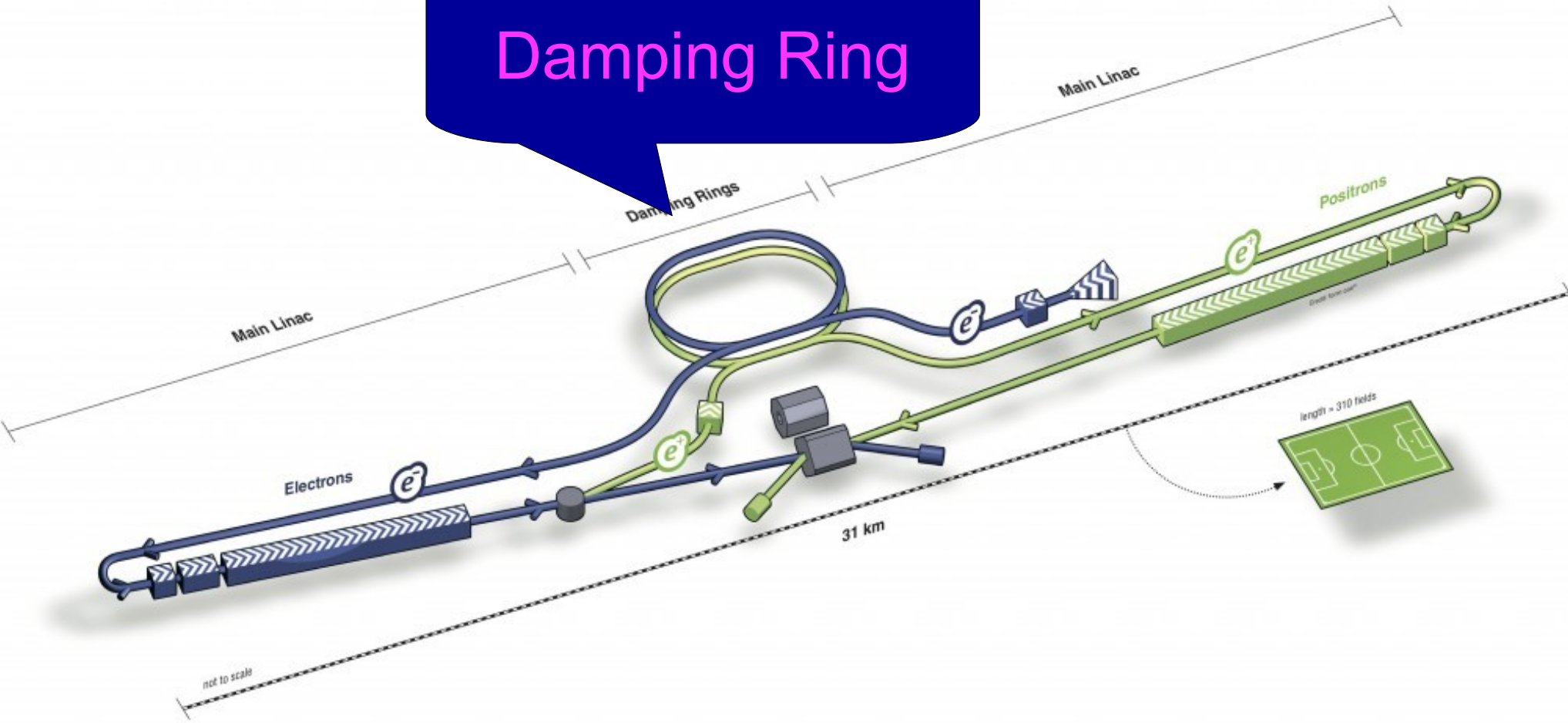


電子ビームドライブ方式

- 従来方式によるバックアップ案。
- 6 GeV 電子ビームを W-Re標的に入射。
- ILCには、SLCに比べて、時間あたり50倍の陽電子が必要。
- 主加速器でのパルス長に比べて、およそ80倍(64ms)の時間をかけて、陽電子を生成。標的の破壊を回避。

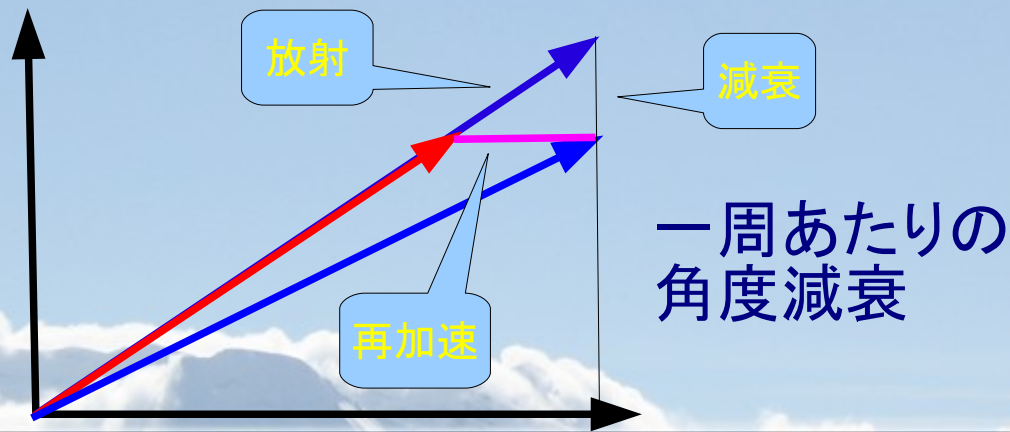


Damping Ring

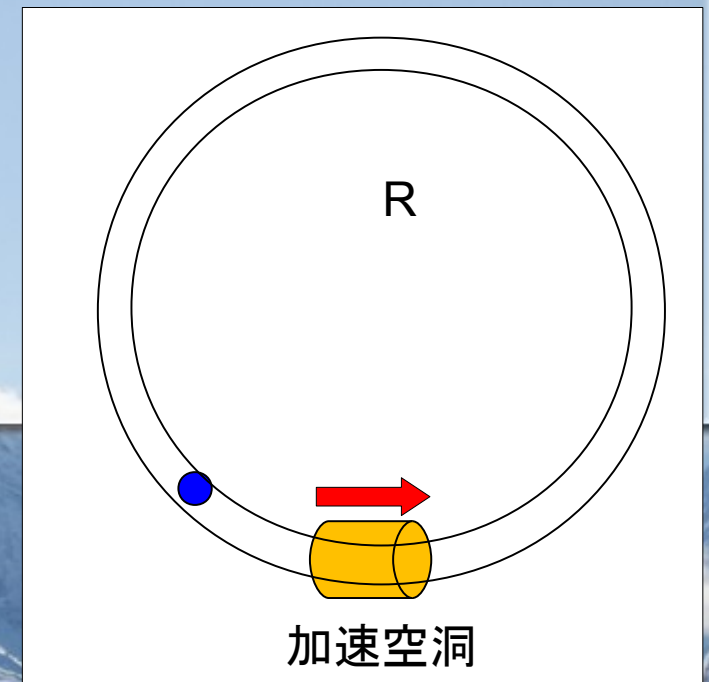


放射減衰：横方向

- シンクロトロン放射は横方向運動量、縦方向運動量を等しく減少させる。
- 再加速により、縦方向運動量のみ与えられ、エネルギーは一定に保たれる。
- 多数回周回することにより、横方向運動量は減衰する。

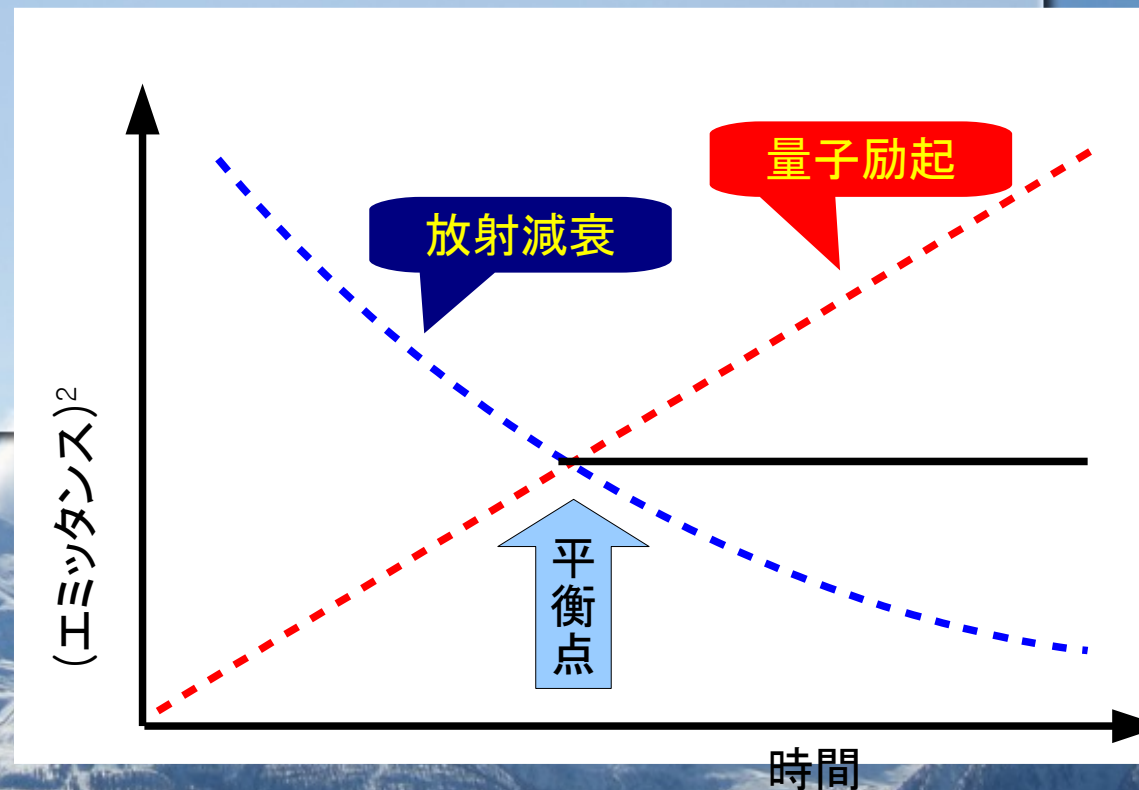


$$x' \rightarrow \frac{E_0}{E_0 + U_0} x'$$



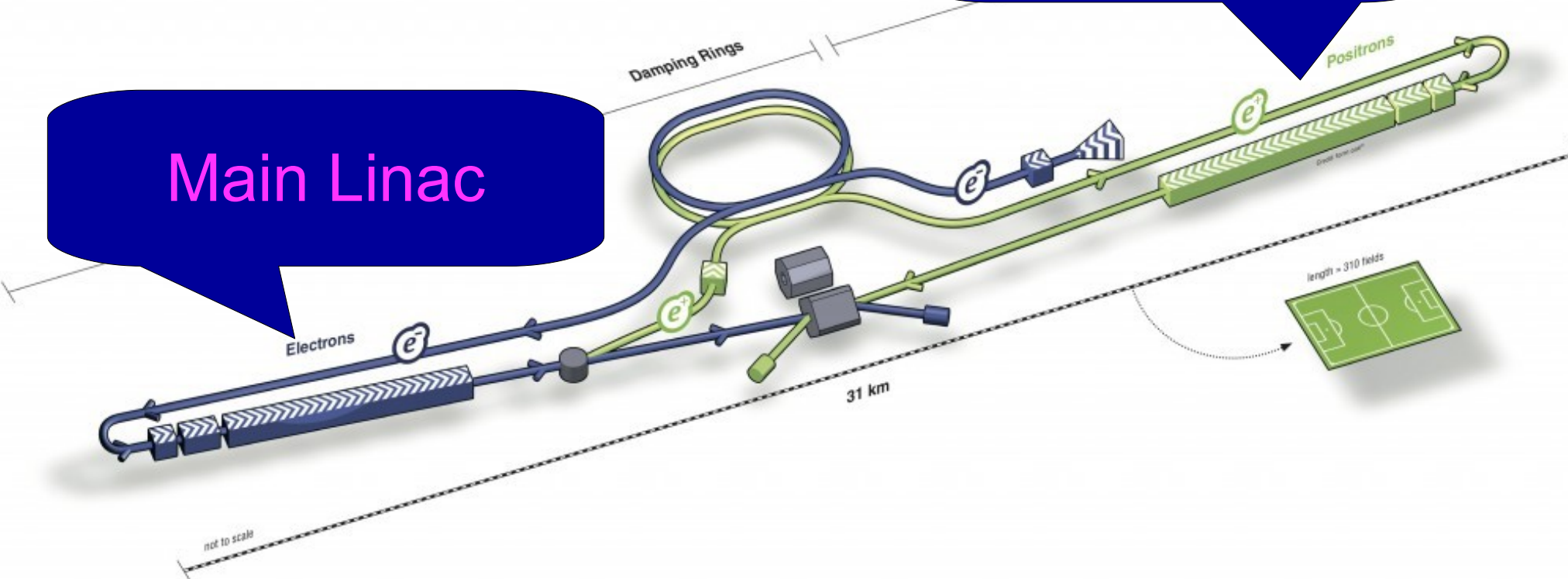
エミッタンスの限界

- 前のスライドだと、エミッタンスはゼロに収束しそうだが、そうはならない。
- 減衰とともに、量子励起と呼ばれる加熱過程がある。
- 量子励起を一言で言えば、位相空間におけるランダムウォークである。初期値からのずれは、時間とともに増大。
- 量子励起による加熱と、放射減衰による冷却の平衡状態でビームエミッタンスが決まる。
- 詳しくは、久保さんが説明してくれます。



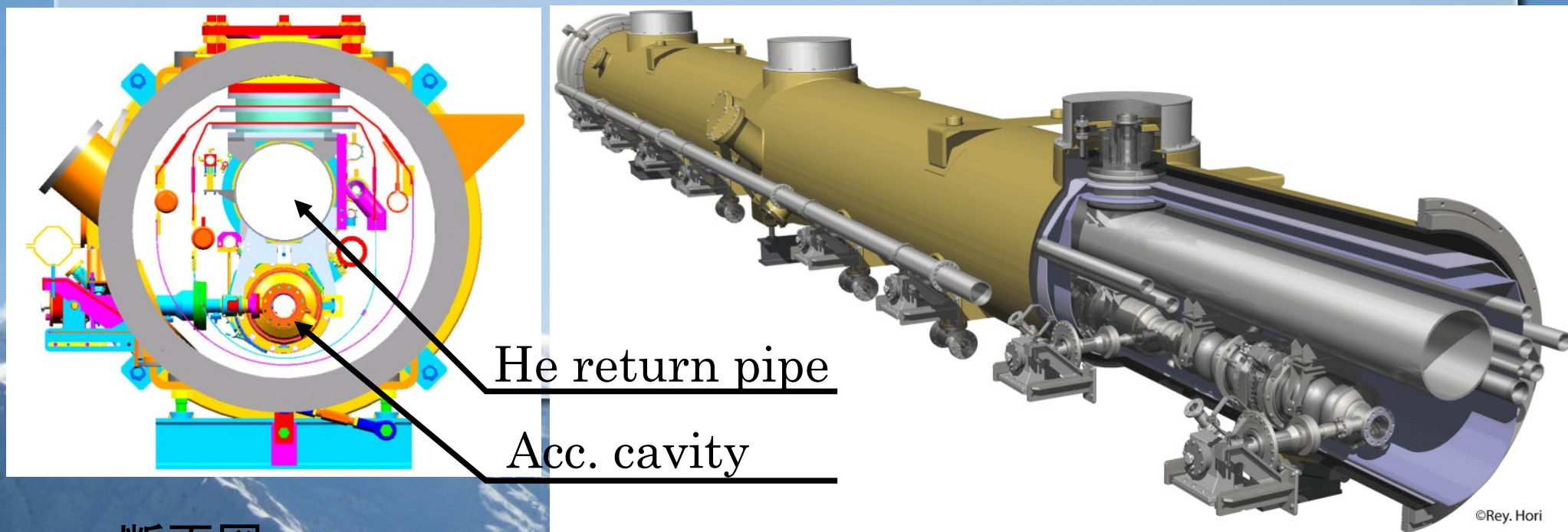
Main Linac

Main Linac



ILC主線形加速器(詳しくは早野さん)

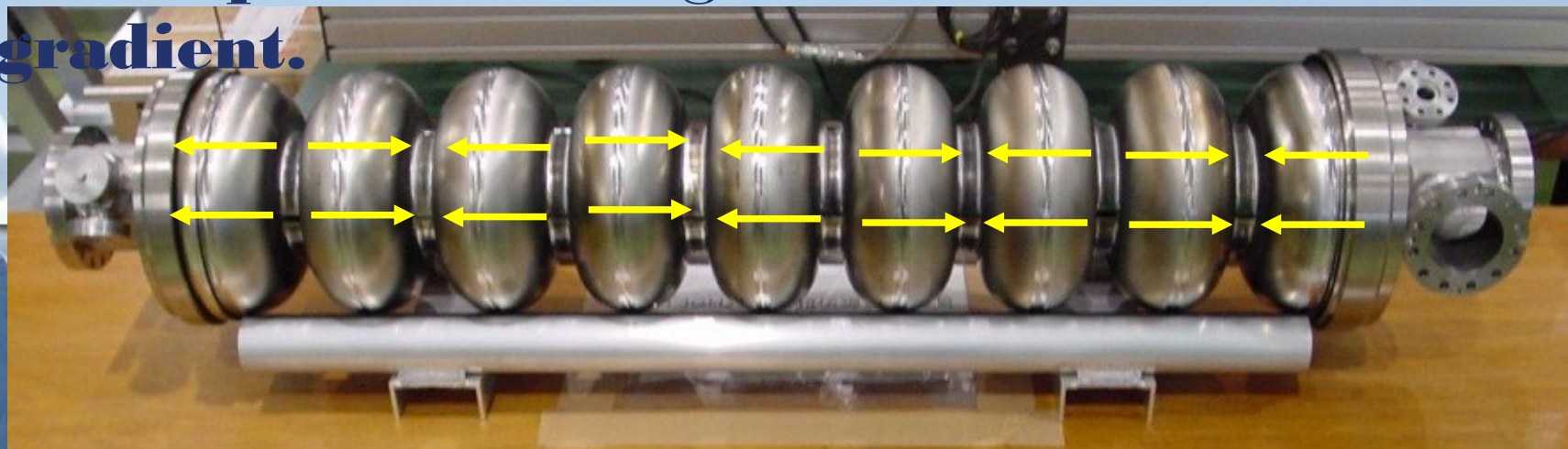
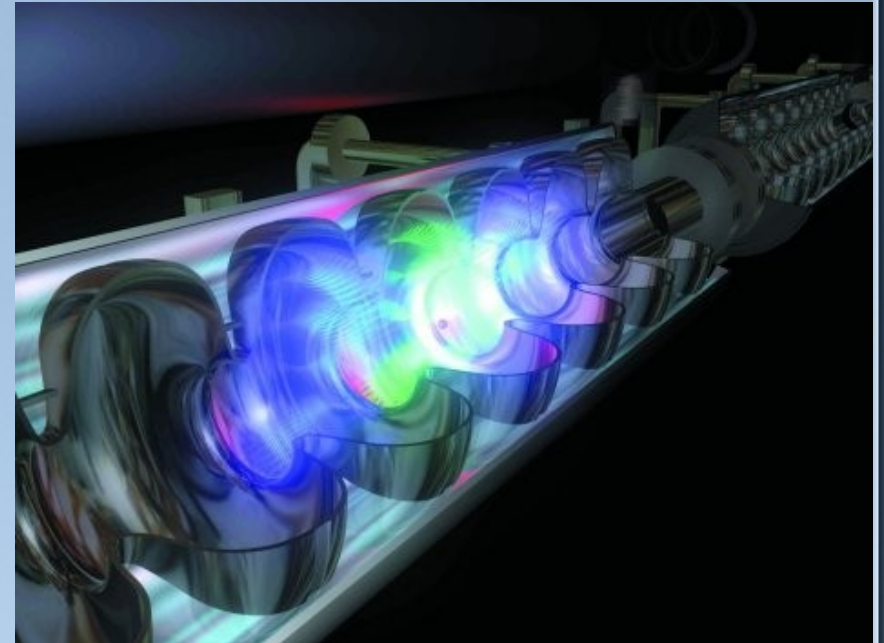
- ▶ 2Kの超流動ヘリウムによるNb超伝導加速空洞。
- ▶ 断熱した容器内でヘリウムを減圧して2Kを維持。
- ▶ 一つの容器に8あるいは9台の超伝導空洞(約1m)。
- ▶ 必要性能は実証済み。



断面図

ILC cavity

- ▶ **1.2m, 9 cells.**
- ▶ **Accelerator gradient : 31.5MV/m.**
- ▶ **Standing wave (pi-mode).**
- ▶ **Electro-polishing technique for the high gradient.**



Fabrication / Insutorialization

Production yield:

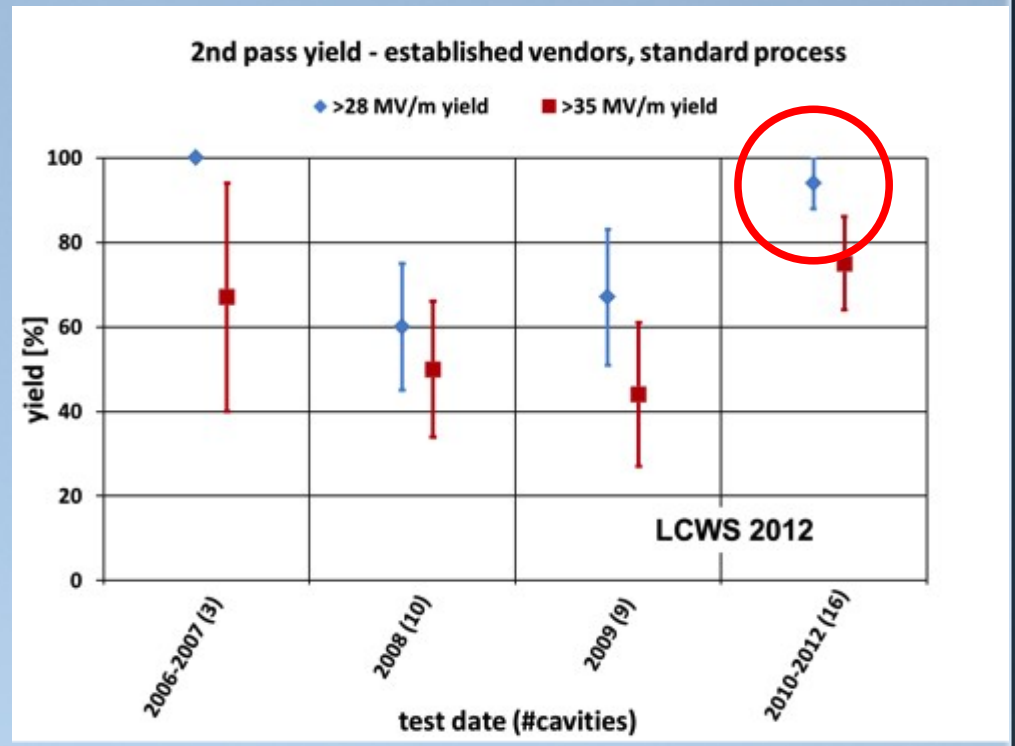
94 % @ > 28 MV/m,

Average gradient:

37.1 MV/m

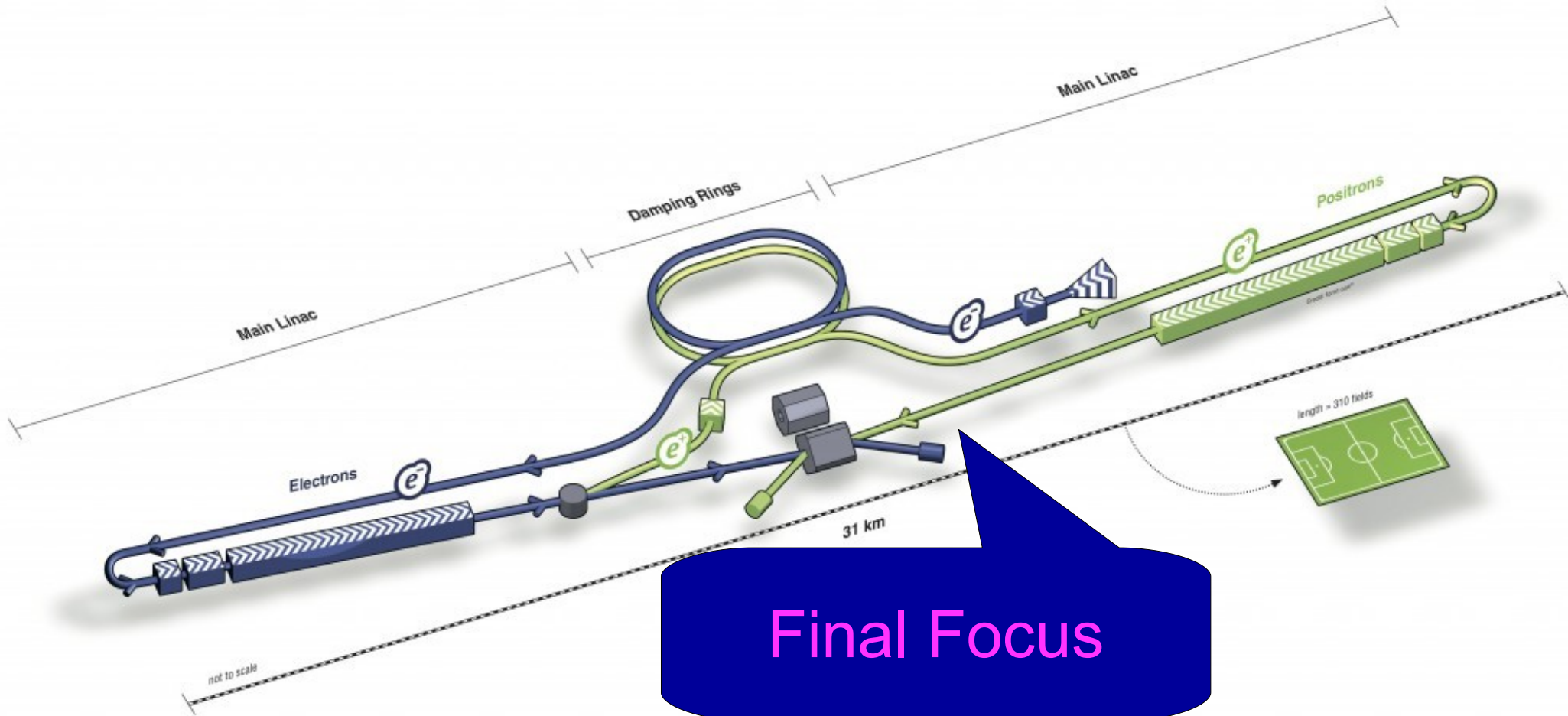
Design average gradient:

35 MV/m



It is ready for production!

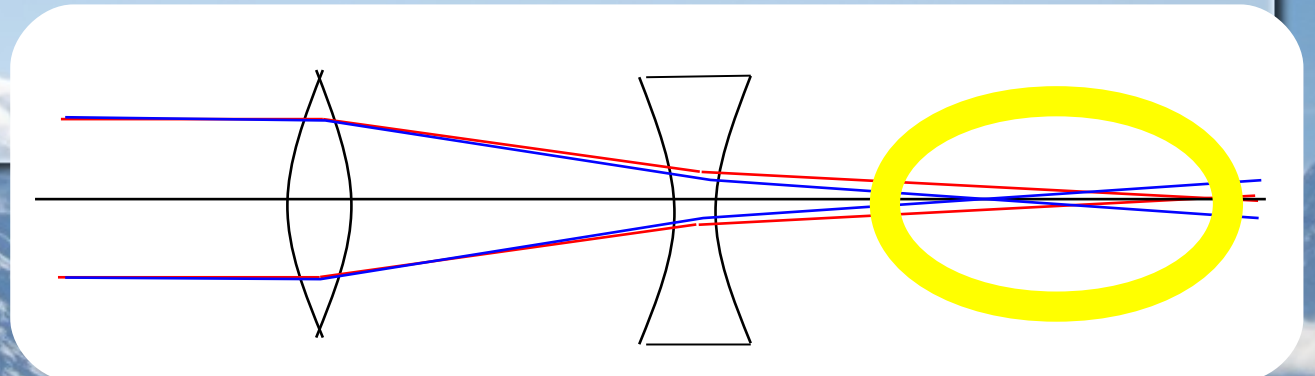




Final Focus

最終収束(詳しくは奥木さん)

- 加速後、衝突点にてビームサイズを5.7nmまで収束。
- 色収差(エネルギー広がりによるボケ)の補正が鍵。
- 色収差補正: 非線形光学素子
 - 可視光光学: 色消しレンズ
 - ビーム光学: 六重極磁場(非線形光学素子)

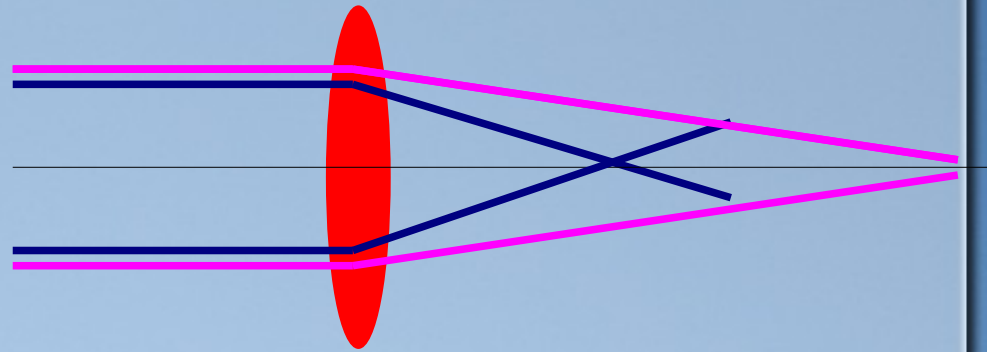


色収差補正

四重極による
収束

$$\frac{dx'}{ds} = -g x$$

$$g \equiv \frac{e G L}{p_0}$$



運動量の違いによる変分

$$dg = \frac{dg}{dp} \Delta p = \frac{-g}{p_0} \Delta p \sim -g \delta$$

$$\frac{dx'}{ds} = -g(1-\delta)x$$

エネルギーにより収束力が異なる

色収差補正

- Dispersion有限の場所に六極磁場を配置

エネルギーに比例した
収束力

$$\frac{dx'}{ds} = \frac{-eH}{p_0} \left[(\eta_x \delta + x_\beta)^2 - y^2 \right] \sim \frac{-2eH}{p_0} \eta_x \delta x_\beta$$

(高次の項は無視)

- 四重極と六重極を合わせて

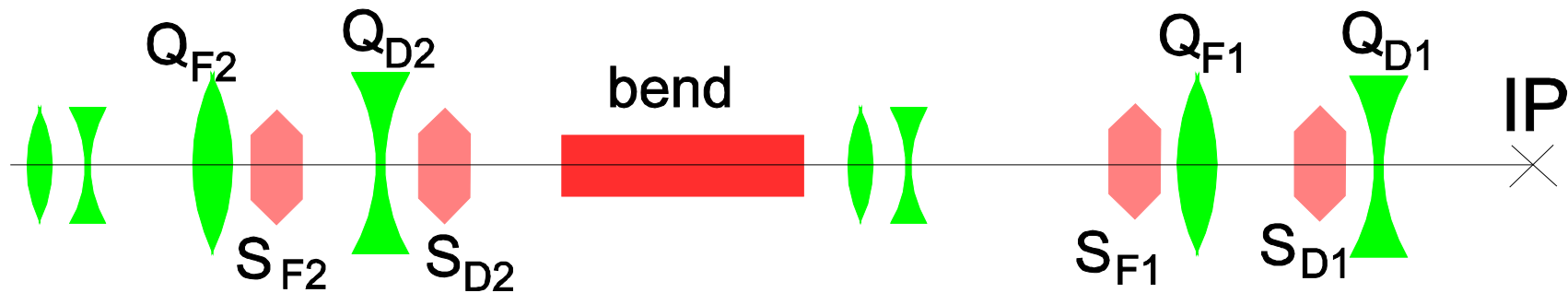
$$\frac{dx'}{ds} = -g(1-\delta)x_\beta - \frac{2eH}{p_0} \eta_x \delta x_\beta = -g x_\beta$$

色収差と打ち
消しあってゼロ

$$g = \frac{2eH}{p_0} \eta_x$$

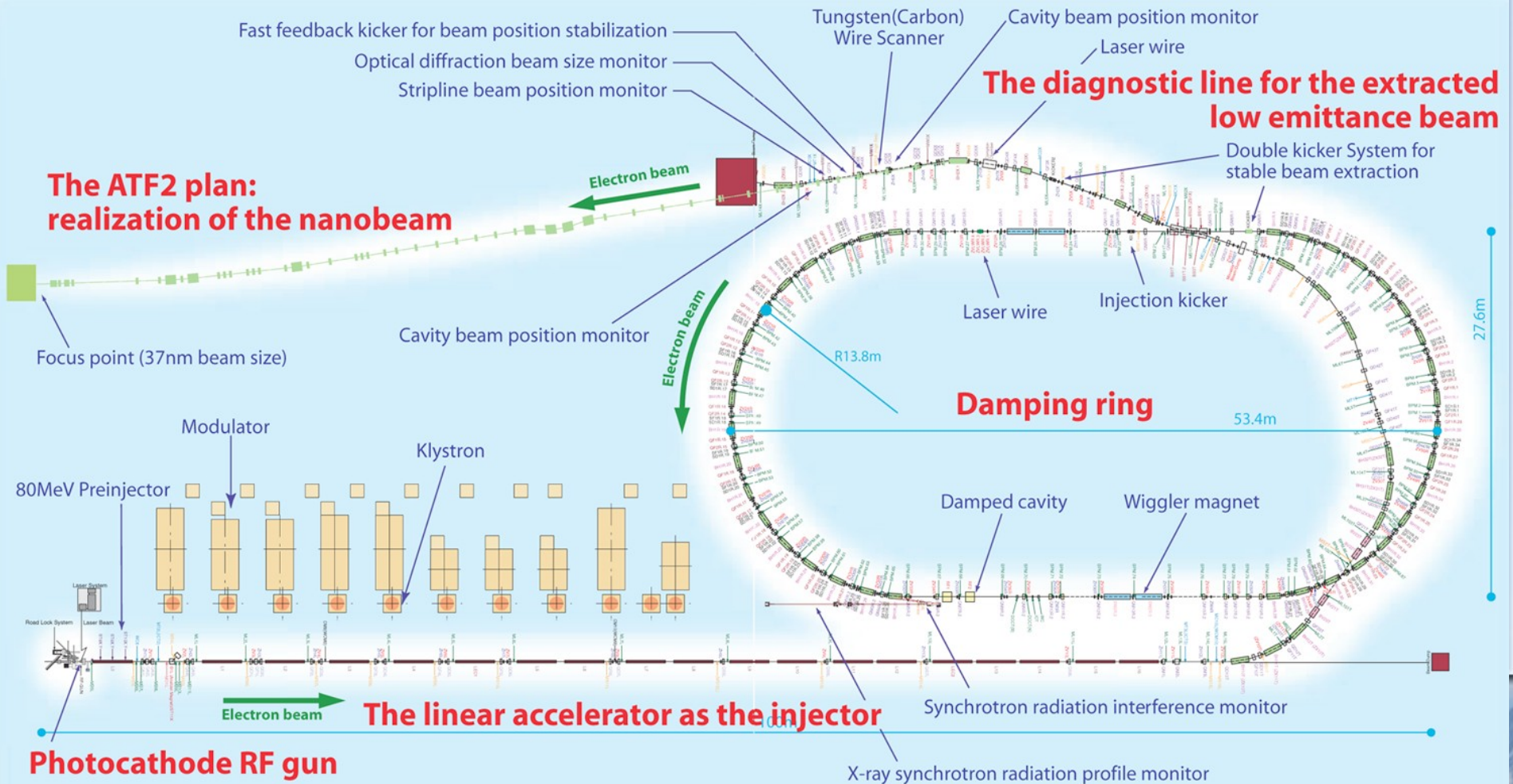
Local Chromaticity Correction

- 現在のILCの設計では、dispersion関数のゼロでない場所に、4極磁石と6極磁石を並べて置き、その場で色収差を消す。



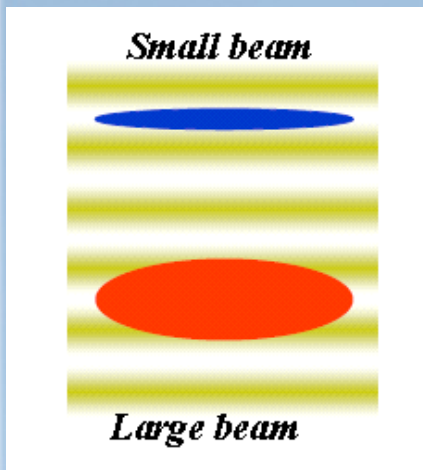
- 右側の6極磁石の組は、Final Doublet (最後の2つの4極磁石)が作る色収差を消す。
- 左側の6極磁石の組は、右側の組がつくった非線形性を相殺する。
- この方式は ATF2 で試験されているものと、同じ。
- IPでdispersion η_x は消えるが、その微分 η'_x は残る

Final Focus Test (ATF2)

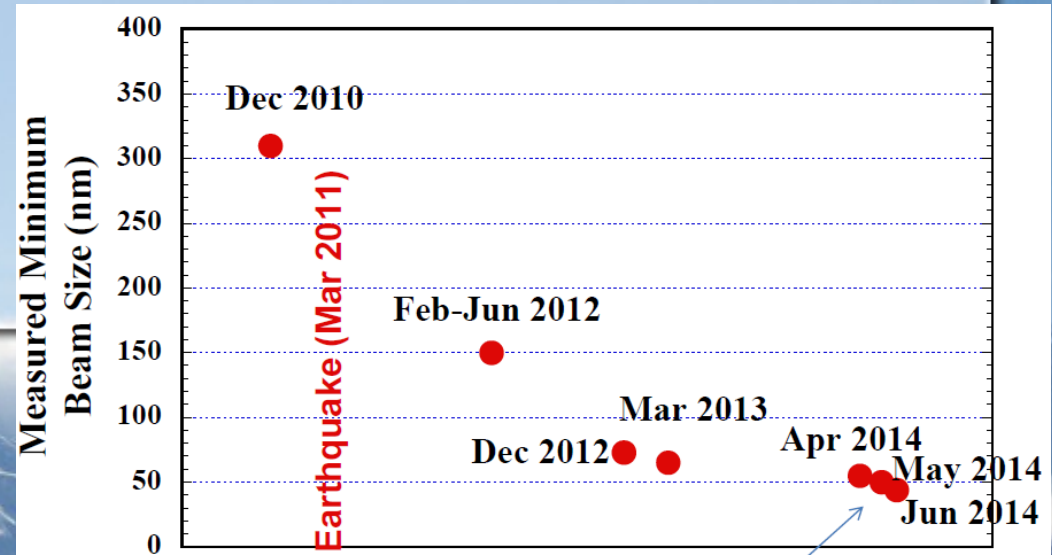
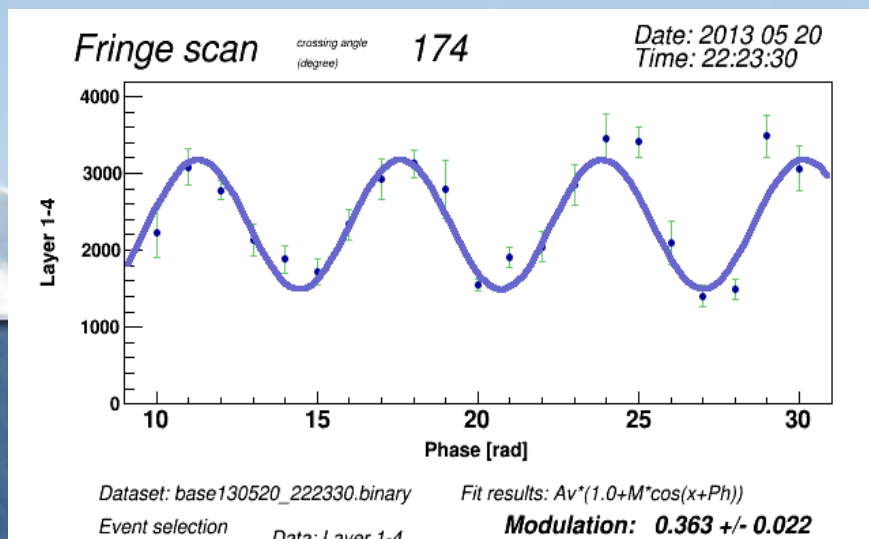


We are approaching!

- ATF2で極小ビームサイズ実現とその計測の実証。
- 45nm の実測に成功。
- 37nm (1.3 GeV ATF2) は5.7nm (250 GeV, ILC) とほぼ等価。

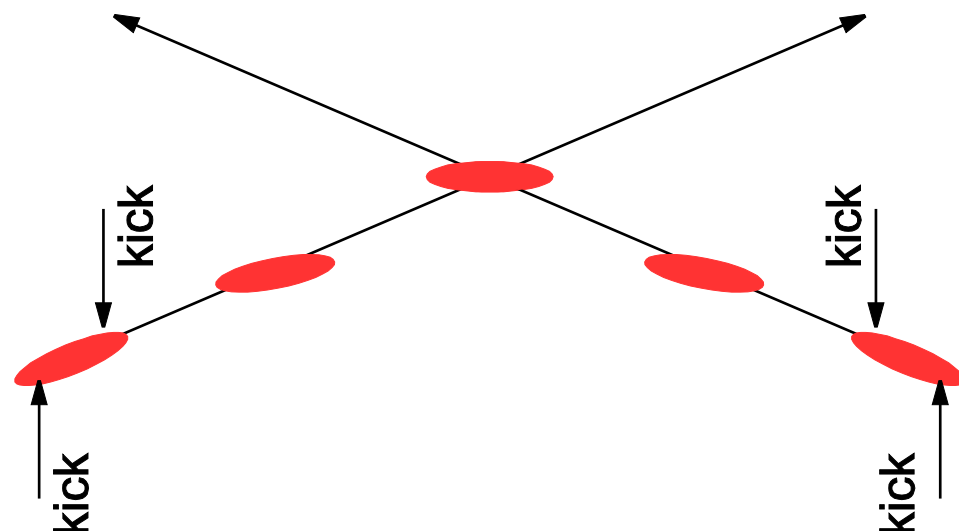
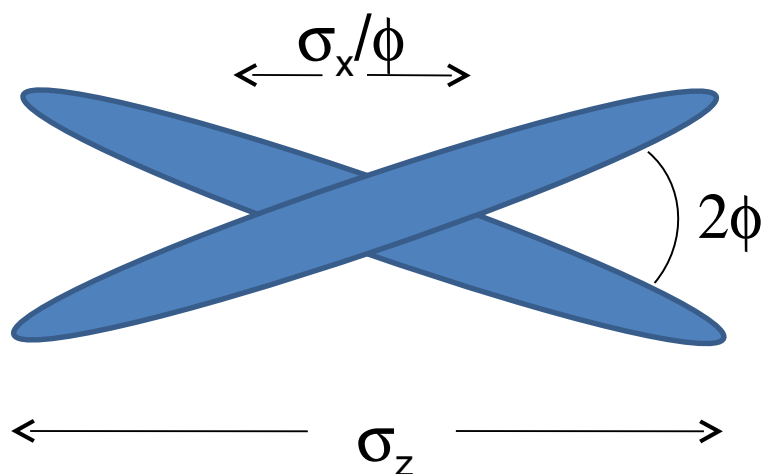


K. Kubo, weza01, IPAC14



Crab Crossing

- 実験へのbackgroundをさけるため、ILCでは14 mradの交差角
- $14\text{mrad} \gg \sigma_x / \sigma_z$ であるためバンチの幾何的な重なりが小さくなり、luminosityがほとんどなくなる
- Crab crossingにより、バンチを傾け、ルミノシティを回復する。
- IPから13.4m
- 電子・陽電子側のクラブ空洞のタイミング誤差の許容値がきびしい



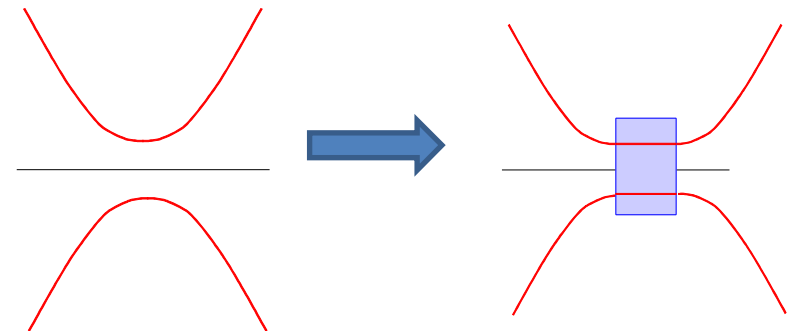
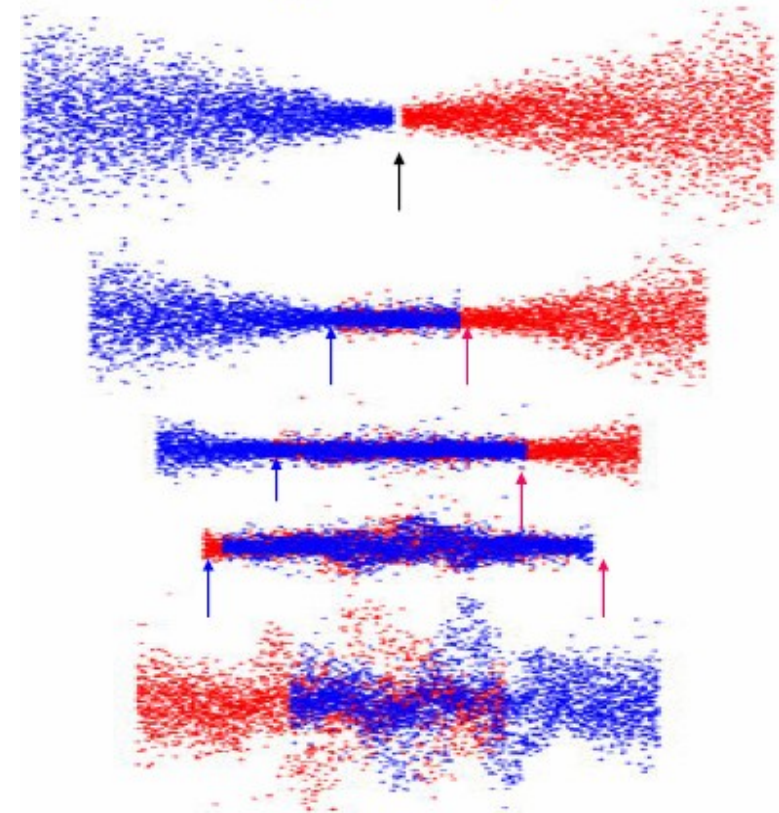
3.9GHz prototype (実物は9セル)



Traveling Focus

- $\sigma_y \ll s_z$ ではhour-glassが厳しい
- 焦点の位置に収束レンズがあれば、 $s_y \ll s_z$ でも広がりを抑えて、ルミノシティを稼げる。
- 相手のビームをレンズとして使う。
- D_y が大きくなると効果が薄い
- ただし、相手のビームは動いている
 - 相手ビームの頭と遭遇する位置を焦点とすればよい
 - バンチの先端と後端で焦点の位置を変える
- 方法
 - crab cavity + sextupole magnet
 - Energy slope + chromaticity
 - 後者は energy spreadが大きくなりすぎて、色収差補正・重心系エネルギーのひろがりなど副作用が大きい
- 欠点
 - crab cavityの誤差に敏感
 - 標準パラメータにはしない
(しかし、crab空洞だけで、ほとんどタダのできる
ので、運転時に試せばよい)

Travelling Focus $\beta^* < \sigma_z$



超低エミッタンス

偏極ビーム

バンチング

超伝導加速器

極小
非対称ビーム

低いビームパワーで
高いルミノシティ

生まれながらのエコ？

- ILCのビームパワー:

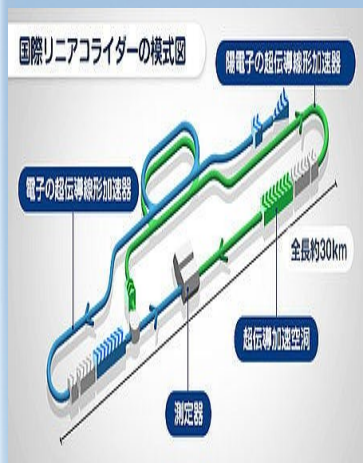
$$P_{beam} = 250 \text{ GeV} \times 10 \text{ mA} \times 1 \text{ ms} \times 5 \text{ Hz} \times 2 = 25 \text{ MW}$$

- LEPのビームパワー:

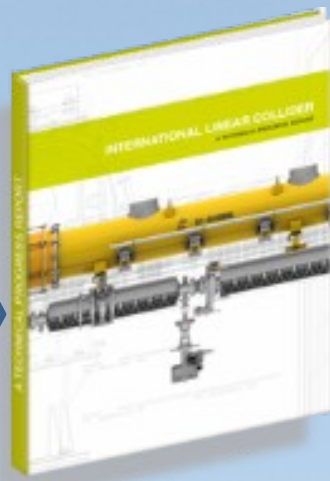
$$P_{beam} = 45 \text{ GeV} \times 3 \text{ mA} \times 2 = 270 \text{ MW}$$

- ILCは、low powerコライダーである。
- ビームビーム相互作用が強い条件で、ビームパワーあたりのルミノシティを最適化した加速器。

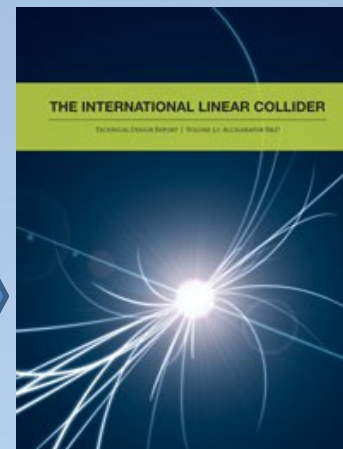
実現へ！



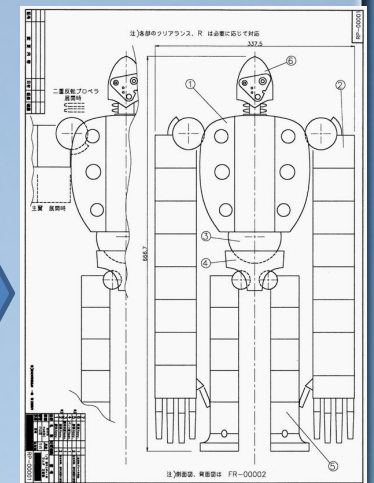
**Baseline design
2007**



**Reference design
2011**



**Technical design
2013**



**Engineering design
2015**

ILC実現への道

- 競争的に建設することはコスト的に不可能。世界が協力して建設するしかない。いままでにない世界の挑戦。
→ LCC (Linear Collider Collaboration) under LCB (Linear Collider Board)
- 新しい国際協力の形である。
- 世界は日本がホストすることを望んでる。
- 日本が、基礎科学において、世界に貢献をする大きなチャンス。

まとめ

- 加速器はエネルギー等性能の飛躍的向上により、自然科学の発展を支えてきた。しかしそれは、次々と生まれる新しいアイデアによるもの。
- 円形コライダーは、過去数十年にわたり素粒子物理の発展に大きな貢献をしてきた。シンクロトン放射による損失で円形レプトンコライダーは限界を迎えている。
- シンクロトン放射の無いリニアコライダーがエネルギーフロンティアを引き継ぐべきである。
- 極小スポット(ビームビーム効果が強い状態)、少ないビームパワーでルミノシティを稼ぐのが、リニアコライダーの特徴。
- 基本設計、必要なコンポーネント開発は成熟している。