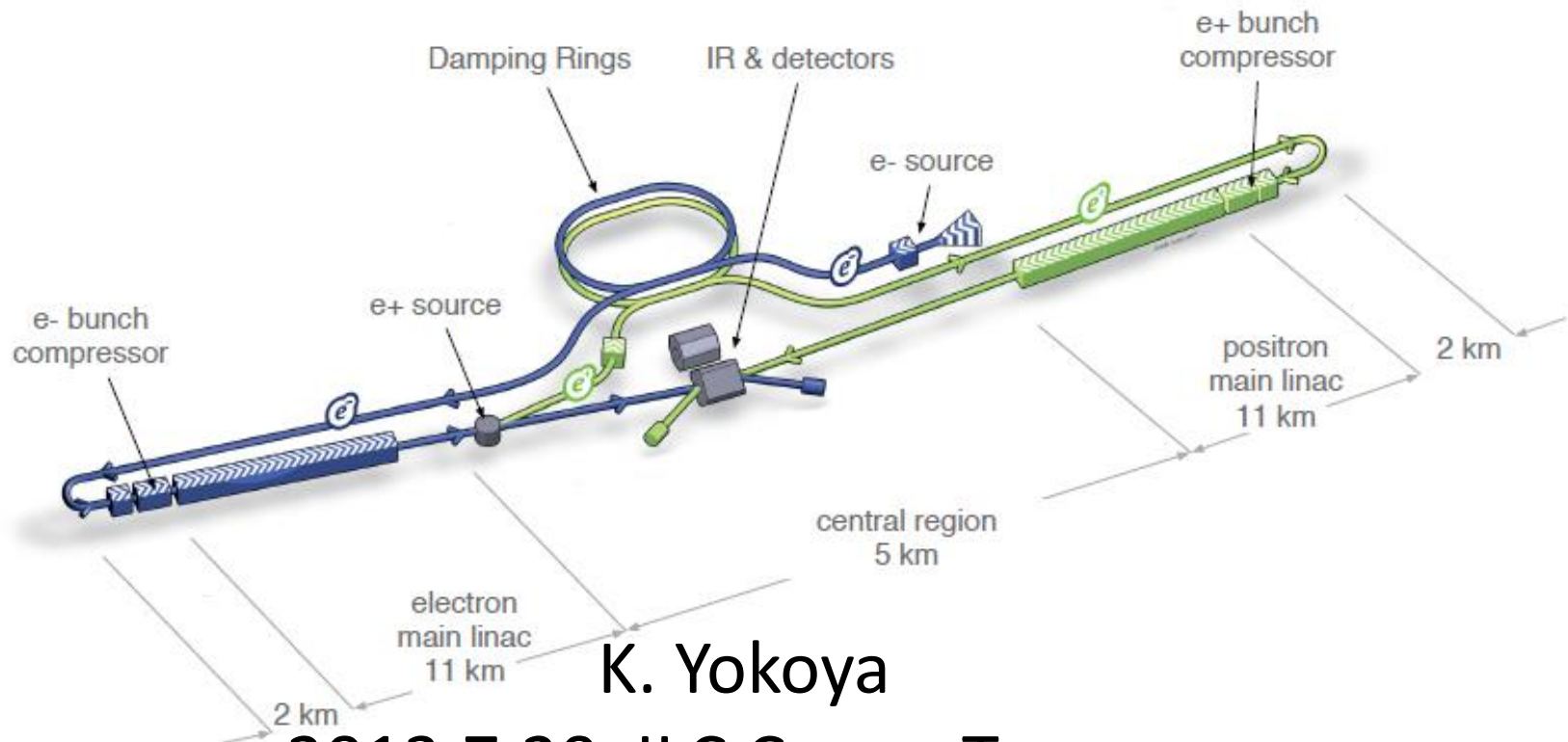


# ILC Accelerator Overview

ILC Accelerator  
Higgs Factories  
Far Future of ILC

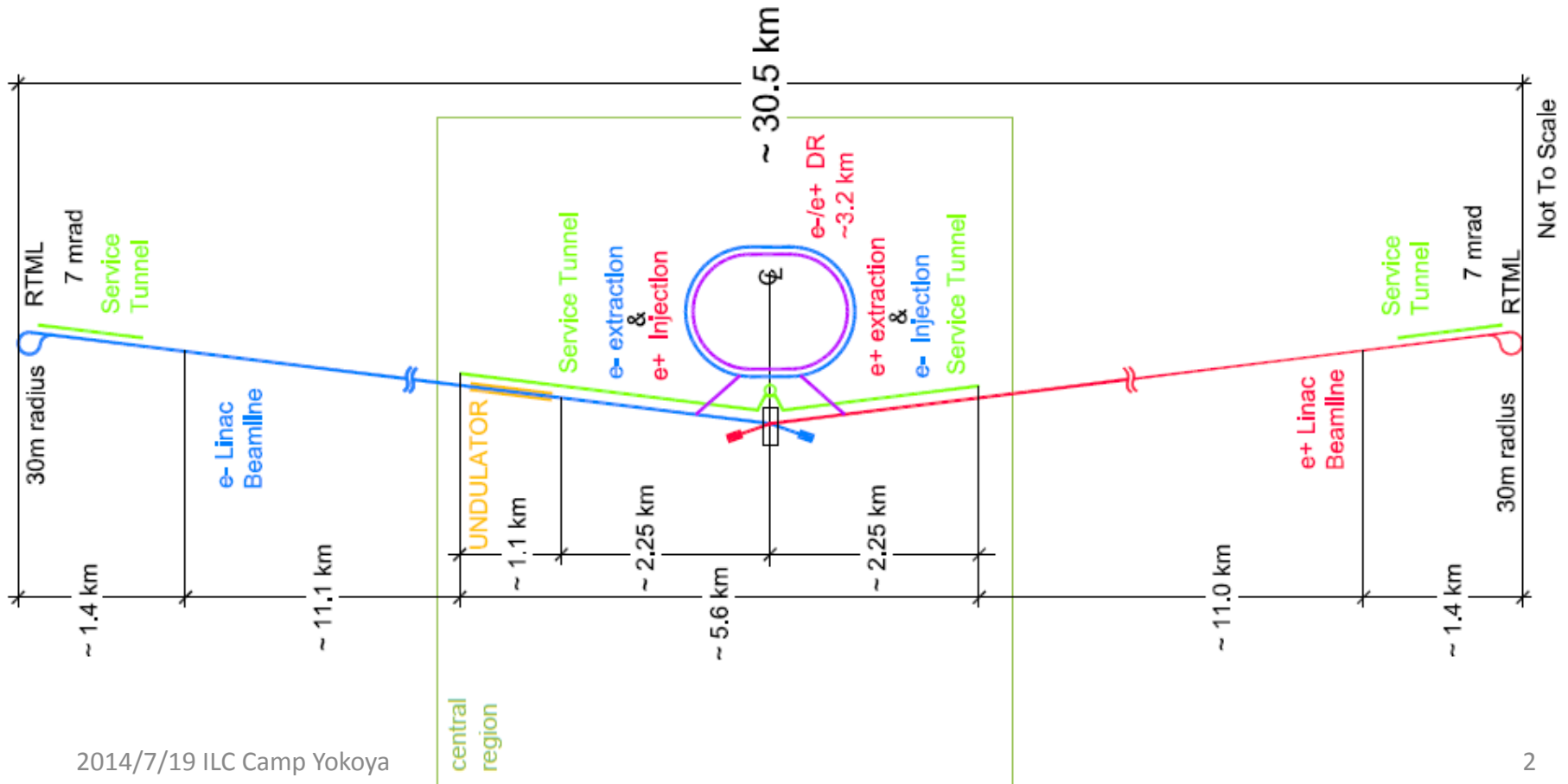


K. Yokoya

2013.7.20, ILC Camp, Toyama

# ILC Accelerator 概要

- レイアウト



# 加速器の構成

- 電子源
- 陽電子源
- 減衰リング (DR, Damping Ring)
- RTML (Ring To Main Linac)
- Main Linac
- BDS (Beam Delivery System)

			Baseline 500GeV Machine			L Upgrade	Energy Upgrade	
							A	B
Center-of-mass energy	$E_{CM}$	GeV	250	350	500	500	1000	1000
Collision rate	$f_{rep}$	Hz	5	5	5	5	4	4
Electron linac rate		Hz	10	5	5	5	4	4
Number of bunches	$n_b$		1312	1312	1312	2625	2450	2450
Bunch population	$n_b$	$\times 10^{10}$	2	2	2	2	1.74	1.74
Bunch separation	$\Delta t_b$	ns	554	554	554	366	366	366
Pulse current	$I_{beam}$	mA	5.8	5.8	5.8	8.8	7.6	7.6
Main linac average gradient		MV/m	14.7	21.4	31.5	31.5		
Average total beam power	$P_{beam}$	MW	5.9	7.3	10.5	21	27.2	27.2
Estimated AC power	$P_{AC}$	MW	122 <sup>1)</sup>	121	163	204	300	300
RMS bunch length	$\sigma_z$	mm	0.3	0.3	0.3	0.3	0.25	0.225
Electron RMS energy spread	$\Delta p/p$	%	0.19	0.158	0.124	0.124	0.083	0.085
Positron RMS energy spread	$\Delta p/p$	%	0.152	0.1	0.07	0.07	0.043	0.047
Electron polarization	$P_-$	%	80	80	80	80	80	80
Positron polarization	$P_+$	%	30	30	30	30	20	20
Horizontal emittance	$\gamma \epsilon_x$	$\mu m$	10	10	10	10	10	10
Vertical emittance	$\gamma \epsilon_y$	nm	35	35	35	35	30	30
IP horizontal beta function	$\beta_x^*$	mm	13	16	11	11	22.6	11
IP vertical beta function	$\beta_y^*$	mm	0.41	0.34	0.48	0.48	0.25	0.23
IP RMS horizontal beam size	$\sigma_x^*$	nm	729	683.5	474	474	481	335
IP RMS vertical beam size	$\sigma_y^*$	nm	7.7	5.9	5.9	5.9	2.8	2.7
Luminosity	$L$	$\times 10^{34}/cm^2s$	0.75	1	1.8	3.6	3.0 <sup>2)</sup>	4.9
Fraction of L in top 1%	$L_{0.01}/L$	%	87.1	77.4	58.3	87.1	59.2	44.5
Average energy loss	$\delta_{BS}$	%	0.97	1.9	4.5	4.5	5.6	10.5
Number of pairs/bunch crossing		$\times 10^3$	62.4	93.6	139	139	200.5	382.6
Total pair energy/bunch crossing		TeV	46.5	115	344.1	344.1	1338	3441
1) 129MW for 250GeV machine		2) TDR gives 3.6 (perhaps typo)						



# Beam Parameters

- ILCのbeam parameterは基本的には
  - Damping ringの性能
  - 超伝導加速
  - beam-beam interaction

で決まっている

- そこで、この講義はbeam-beam interactionから始め、ビーム源にもどり、ビームに沿って最後にinteraction pointを説明する

# Luminosity

- 最適化すべき量はluminosityである

$$\text{Number of events/sec} = \mathcal{L}\sigma$$

( $\sigma$  = cross section of the event)

$$\mathcal{L} = f_{rep} \frac{n_b N^2}{4\pi\sigma_x^* \sigma_y^*} \times H_D$$

- $f_{rep}$  beam pulseの繰返し周波数 (5Hz)
- $n_b$  1パルス内のバンチ数 (1312)
- $N$  1バンチ内の粒子数 ( $2 \times 10^{10}$ )
- $\sigma_x^*$ ,  $\sigma_y^*$  衝突点でのtransverse beam size ( $\sim 6\text{nm}$ ,  $\sim 500\text{nm}$ )
- $H_D$  Luminosity enhancement factor

括弧内はILCの標準的な値

# Beam-Beam 相互作用

- バンチの衝突継続時間は数psecにすぎないが、相手ビームの作る電磁場が非常に強いので、衝突の間の
  - ビームの変形
  - シンクロトン輻射 (Beamstrahlung) が重要な役割を演ずる。
- バンチ内部でのクーロン力は(ほとんど)無視できる。(電場の力と磁場の力の相殺)相手ビームのみ考えればよい

$$\begin{aligned} F &= e[E + v \times B] \\ &\approx e[E \pm v/c \times (v/c \times E)] \\ &\approx e[1 \pm (v/c)^2]E \end{aligned}$$

# Disruption Parameter

- ビームの変形が小さい場合を考える
- Gaussian beam の中心付近では

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{4Nr_e}{\gamma} n_L(z_2) \frac{x}{\sigma_x(\sigma_x + \sigma_y)} = 0$$

- 軸に平行に入った粒子 ( $x=x_0, dx/dt=0$ ) の場合、 $x$  の変化が小さければ

$$\left[ \frac{dx}{dt} \right]_{final} \approx - \frac{2Nr_e}{\gamma} \frac{x_0}{\sigma_x(\sigma_x + \sigma_y)}$$

- これは、薄い収束レンズの効果と同じ。バンチ長とこのレンズの焦点距離  $f_{x(y)}$  の比を Disruption Parameter と呼ぶ

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

- $D \sim 1$  ならビームの変形は小さい。ILCでは、 $D_x=0.1 \sim 0.3, D_y=25$

# Emittance

ここは久保さんが丁寧に説明するはず

- ビーム粒子の分布が  $(x, p_x)$  平面で占める面積 (を  $\pi$  で割ったもの)  $A$  を emittance と呼ぶ  
(規格化—normalized--エミッタンス)

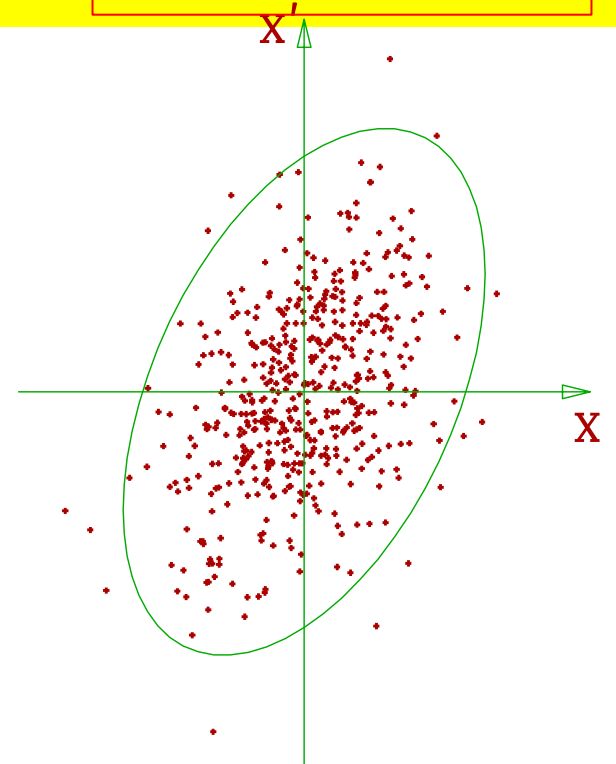
$$\epsilon_{n,x} = \frac{A}{mc}$$

- $(x, x')$  平面での面積を使う場合もある (幾何エミッタンス)

$$x' = p_x / p$$

$$\epsilon_{g,x} = \frac{\epsilon_{n,x}}{p/mc} \approx \frac{\epsilon_{n,x}}{\gamma}, \quad (\gamma \rightarrow \text{large})$$

- 規格化エミッタンスは加速してもかわらない (リウヴィルの定理)



# $\beta$ function

- 加速器のある点でのビームサイズは、その点での関数 $\beta_x$ を使って

$$\sigma_x(s) = \sqrt{\beta_x(s)\epsilon_{g,x}}$$

- $\beta$ は長さの次元
- ビームが $s=0$ の点で絞られているとき、その近傍(磁石のないところ)では、 $\beta_x$ は

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

のように変化する

- したがって

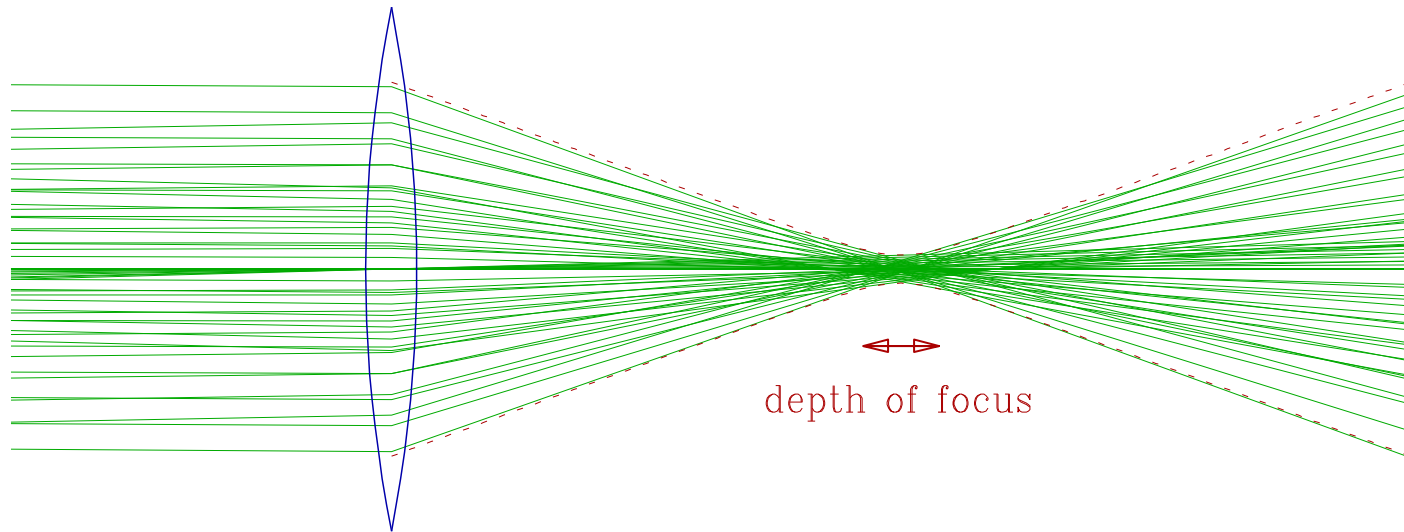
$$\sigma_x(s) = \sigma_x^* \sqrt{1 + \frac{s^2}{\beta_x^{*2}}}$$

# 砂時計 (hour-glass) 効果

- ベータ関数を絞りすぎると、焦点深度が浅くなって、luminosityが上がらない。限度は、

$$\beta_y^* > \approx \sigma_z$$

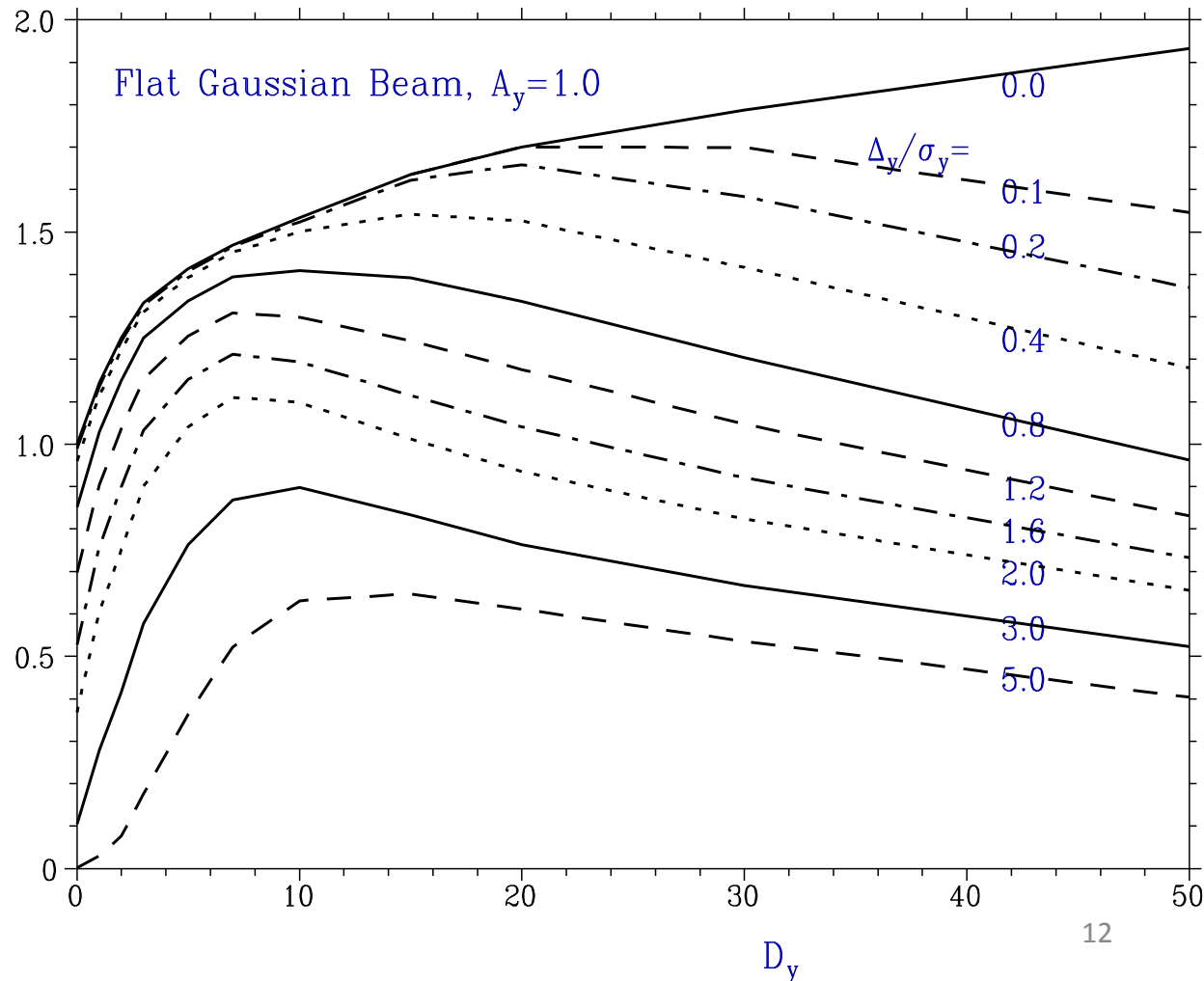
- Luminosity を上げるには、バンチを短くすること、エミッタンスを下げる必要がある。



# Luminosity Enhancement

- $D$ が大きい場合、クーロン力のため、幾何学的に求めたLumonosityより高くなる。(Pinch Enhancement)

Enhancement Factor vs. Disruption Parameter



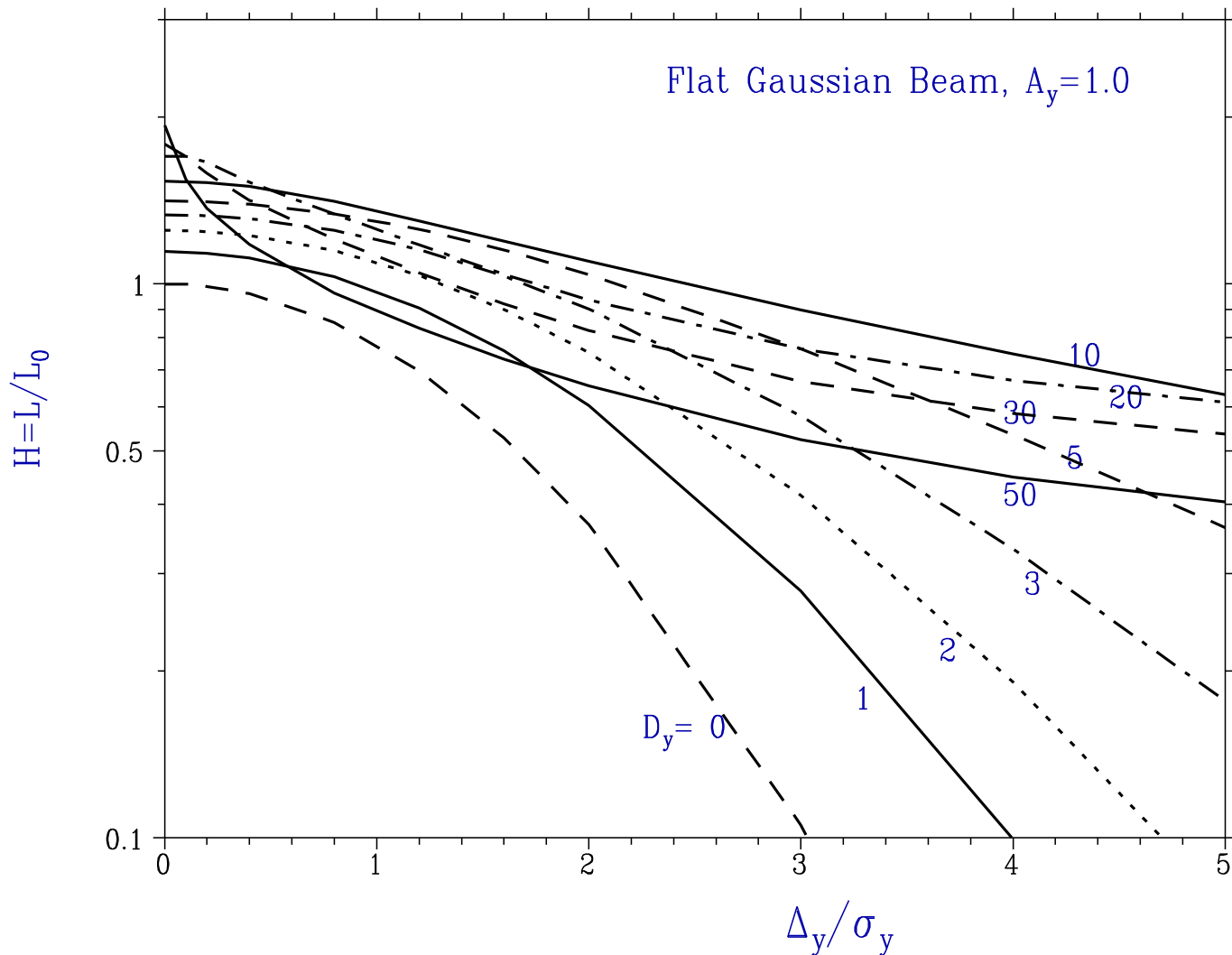
- $D_y$ とLuminosity enhancementの関係を、衝突前のビームの上下のズレ  $\Delta y$  ごとにプロットしたもの

$$A_y = \sigma_y / \beta_y$$



- しかし、 $D$  が大きすぎると、Luminosity は小さな誤差に敏感になる。

### Enhancement Factor vs. Offset

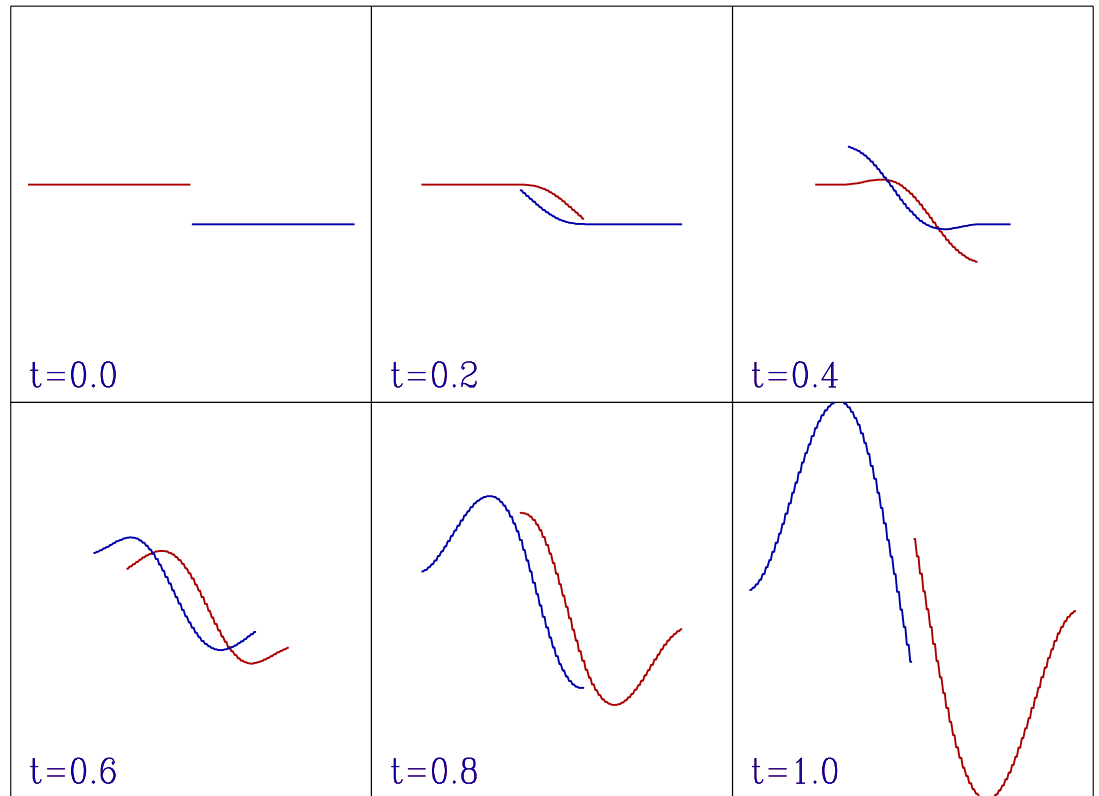


- 前のページと同じものを、 $\Delta y$  の関数としてプロットしたもの

# Kink Instability

- これは逆向きの2つのビームの系が不安定なためである。  
一般的にこれを、Two Stream Instability と呼ぶ

- ILCではほとんどの場合  $D_y \sim 25$
- これはやや大きすぎるが、feedback system でがんばる

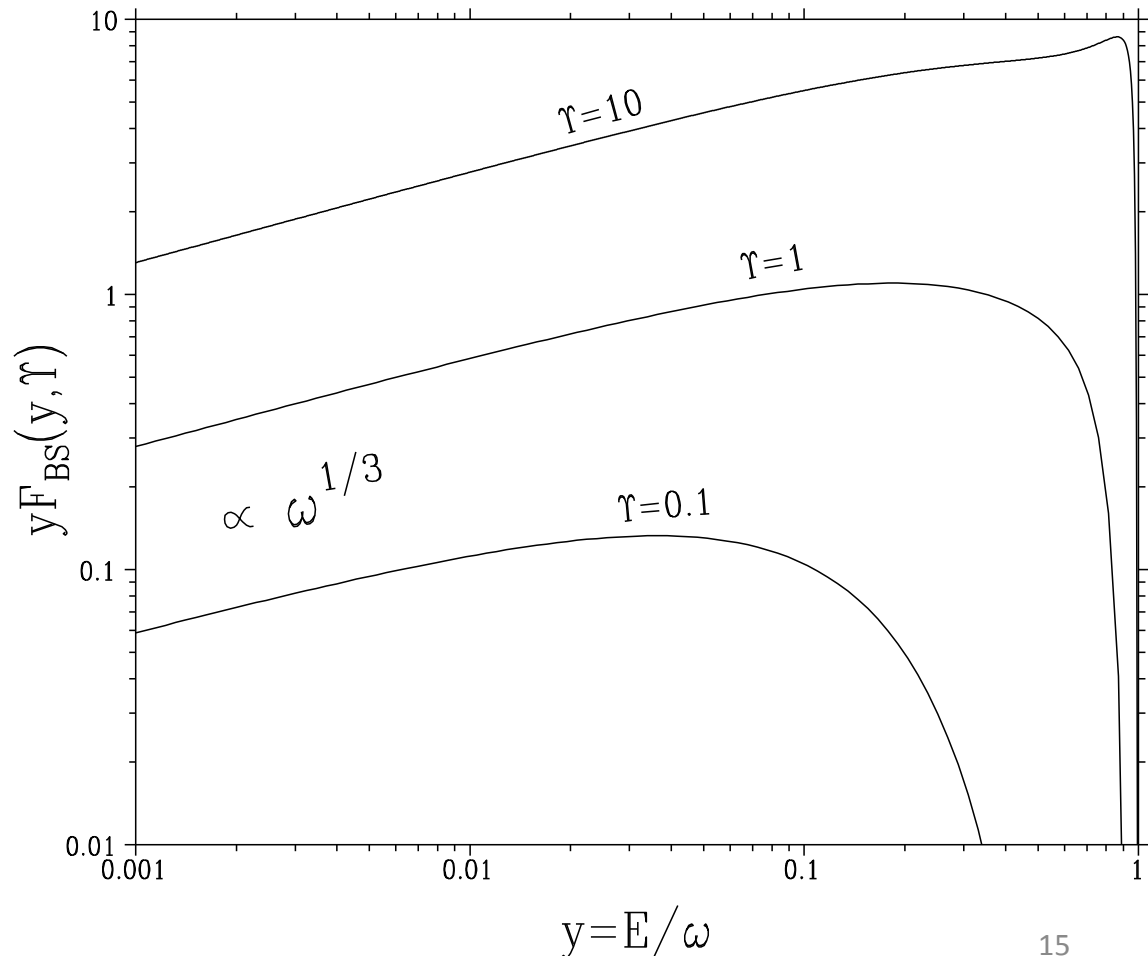


# Beamstrahlung

- 衝突中の相手ビームが作る磁場は数キロTeslaにおよぶ
- この磁場のための輻射を、Beamstrahlung とよぶ。

- この輻射は原理的にシンクロトロン輻射と同じであるが、critical energy がもとの電子エネルギーに比べて無視できないので、スペクトルの形は異なる。
- これは、Sokolov-Ternov が求めたもの。

Power Spectrum



# Upsilon Parameter

- Beamstrahlungのcritical energyは

$$\Upsilon \equiv \frac{2 \hbar \omega_c}{3 E} = \frac{\lambda_e \gamma^2}{\rho} = \gamma \frac{2B}{B_c} = \frac{e}{m^3} \sqrt{|(F_{\mu\nu} p^\nu)^2|}$$
$$B_c = m^2/e \approx 4.4 \text{G Teslas}$$

B の前のfactor 2は電場の寄与を考慮してもの

- Beam parameterで表すと

$$\Upsilon_{average} = \frac{5}{6} \frac{N r_e^2 \gamma}{\alpha \sigma_z (\sigma_x + \sigma_y)}$$

- 電磁場のLorenz不変量として、このほかに

$$F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}/m^4, \quad F^{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu}/m^4$$

があるが、リニアコライダーではこれらは小さい

# エネルギー損失、光子数

- 電子1個あたりの平均光子数

$$n_\gamma \approx 1.08 \frac{2Nr_e\alpha}{\sigma_x + \sigma_y} U_0(\gamma),$$

$$U_0(\gamma) \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \gamma^{2/3}}}$$

- 電子の平均エネルギー損失

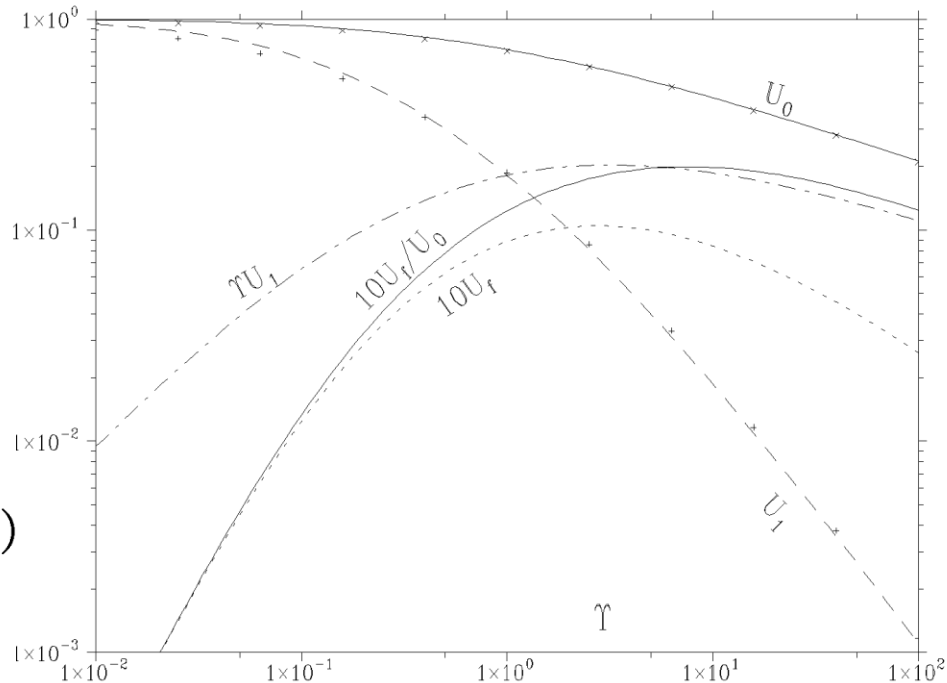
$$\delta_E = \left\langle -\frac{\Delta E}{E} \right\rangle$$

$$\approx 0.209 \frac{N^2 r_e^3 \gamma}{\sigma_z} \left( \frac{2}{\sigma_x + \sigma_y} \right)^2 U_1(\gamma)$$

$$U_1(\gamma) \approx \frac{1}{[1 + (1.5\gamma)^{2/3}]^2}$$

- 平均光子エネルギー

$$\left\langle \frac{\omega}{E} \right\rangle = \begin{cases} 0.462\gamma & (\gamma \rightarrow 0) \\ 16/23 = 0.254 & (\gamma \rightarrow \infty) \end{cases}$$

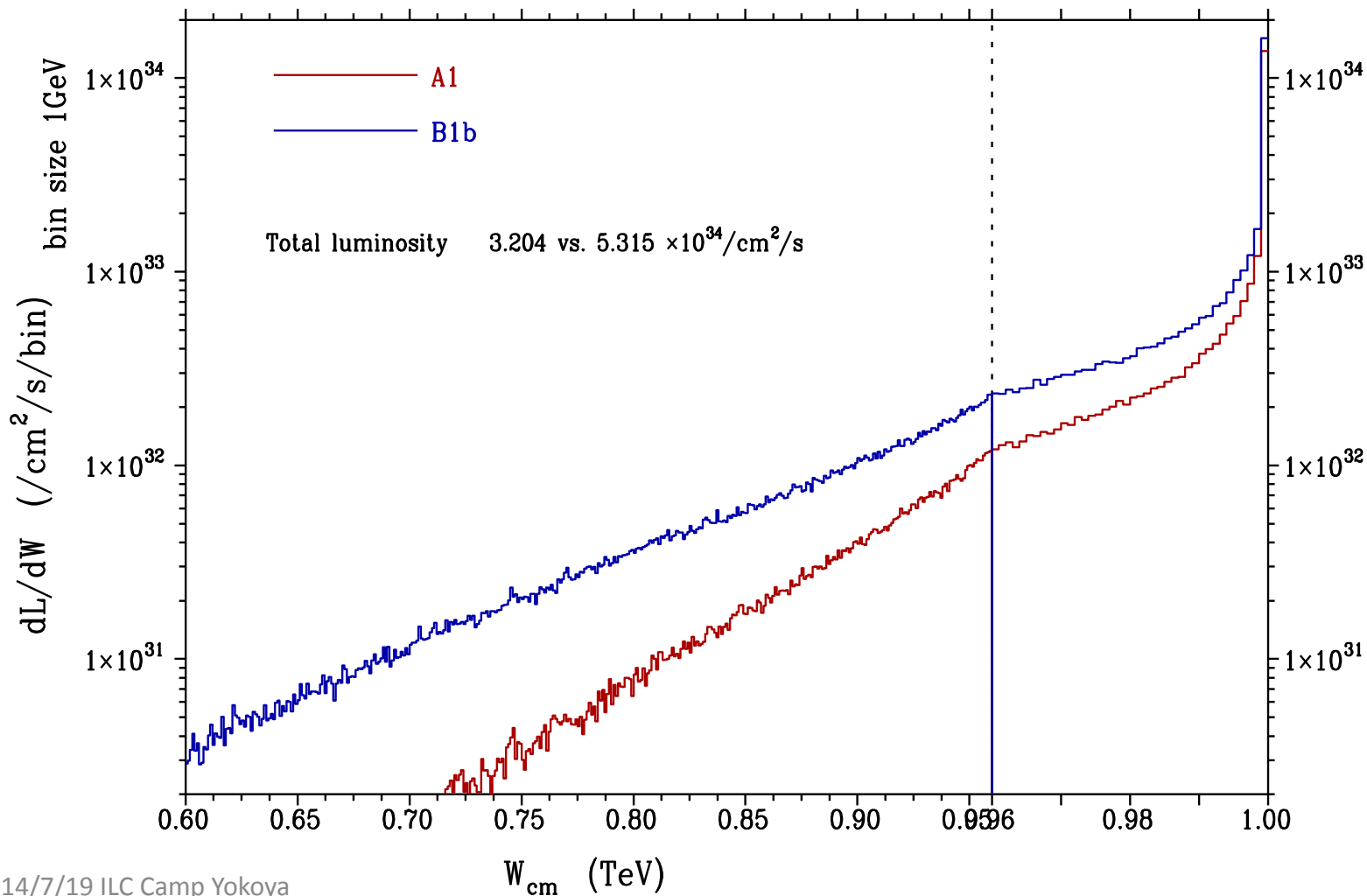


# Luminosity Spectrumの例: (1TeVの2つのParameter sets)

Luminosity Spectrum at 1TeV ( $e^-e^+$ )

20111206(171057)

CAIN2.42

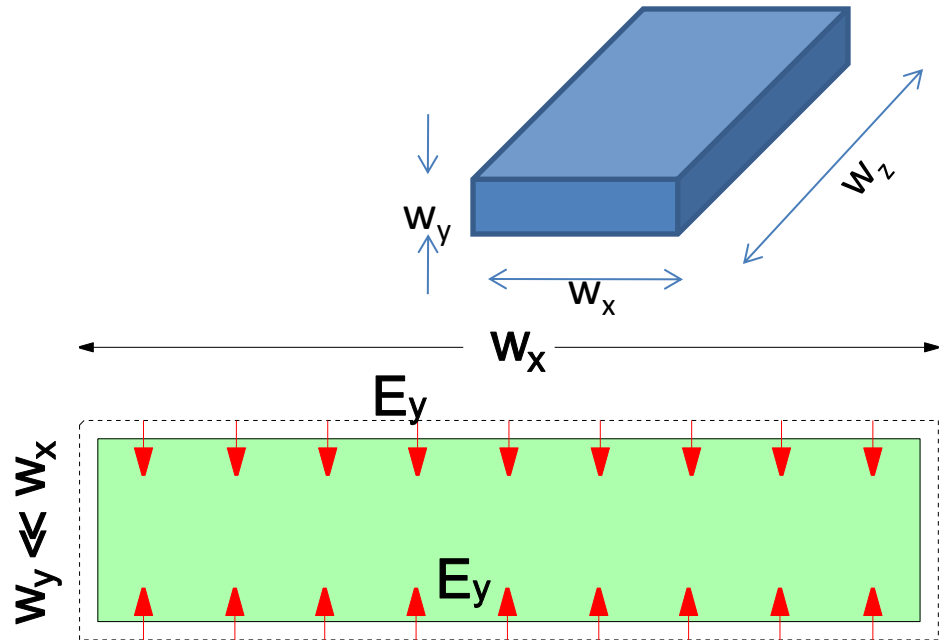


# Flat Beam

- 扁平にすると、同じ断面積で、電磁場を減らせる
- 分布を長方形とする
  - 幅 $w_x$ , 高さ $w_y$ , 長さ $w_z$
  - 両脇および進行方向の境界の部分を無視する
  - $E_y$  はほとんど  $y$  方向
- Gaussの定理により

$$\oint \mathbf{n} \cdot \mathbf{E} dS = Q/\epsilon_0$$

$$2w_x w_z E_y \approx \frac{eN}{\epsilon_0}$$



# Flat Beam (2)

- したがって

$$E_y \approx \frac{eN}{2\epsilon_0 w_x w_z}$$

これはビームの高さによらない。

- 一方、luminosityは、 $1/w_x w_y$  に比例
- したがって、 $w_y \rightarrow 0$  とすれば beamstrahlung の増加なしで luminosityがふやせる。  
( $w_z \rightarrow \text{infinity}$  は砂時計効果のためダメ)
- Flat beamの利点・欠点
  - Damping ringのvertical emittanceが小さいことを生かせる
  - Final Focusの色収差補正で、vertical planeに集中できる
  - 欠点は、vertical toleranceがきつくなること



# Luminosity Scaling

- Luminosityの公式を、beamstrahlungを使って表現すると

$$\mathcal{L} \approx C \frac{P_B}{E} \sqrt{\frac{\delta_{BS}}{\epsilon_{n,y}}} \times \sqrt{\frac{\sigma_z}{\beta_y}} \times \frac{H_D}{\sqrt{U_1(\gamma)}}$$

$$P_B = E f_{rep} n_b N, \quad : \text{beam power/beam}$$

$$= \eta P_{AC}, \quad P_{AC}: \text{AC power}$$

$$C = \frac{1}{4\pi \sqrt{0.836 r_e^3}}$$

- $\sigma_z/\beta_y$  は  $\sigma_z > \beta_y$  の場合 1 とする (hour-glass)
- $P_{AC}$  は社会的に、 $\delta_{BS}$  は物理実験上、限界がある
- Luminosityをあげるには
  - 電力効率を上げる
  - 減衰リングのvertical emittanceをさげる

# パルス構造

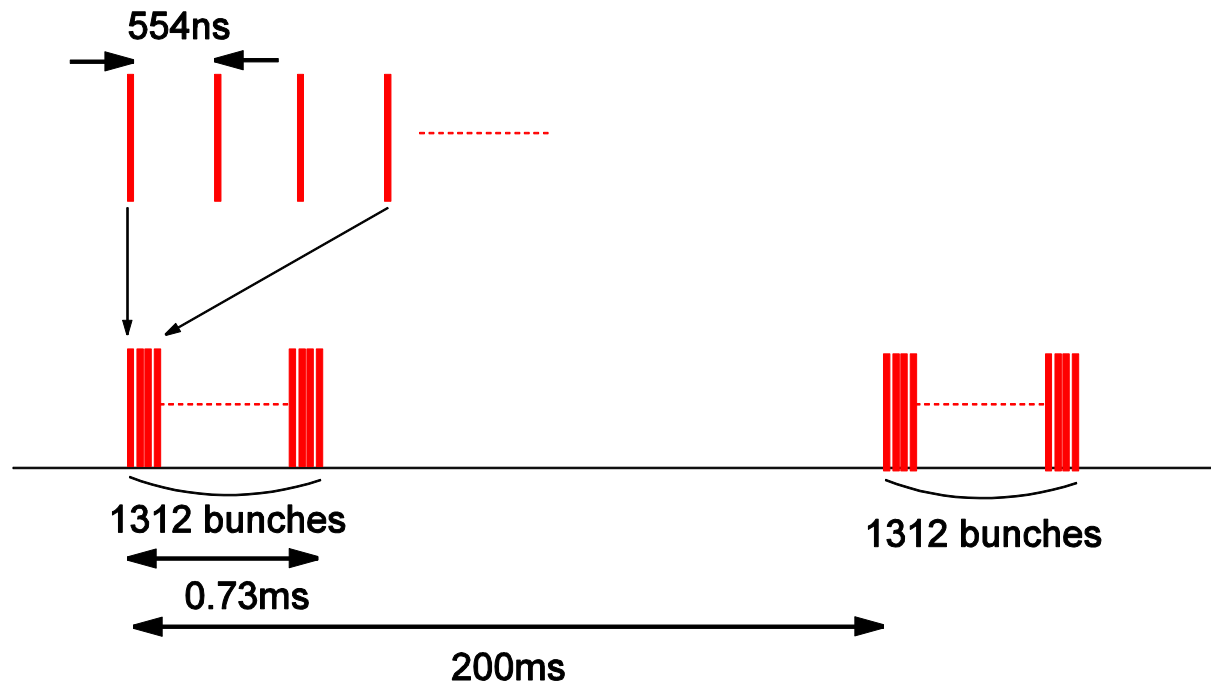
- $P_B = E \times f_{\text{rep}} \times n_b \times N$
- $P_B$ をどのように  $f_{\text{rep}}$ ,  $n_b$ ,  $N$  に分けるか
- もうひとつ、バンチ間隔  $t_b$
- これはlinacのoptimization
  - ビームのパルス電流  $I = eN/t_b$
  - ビームパルスの長さ  $n_b \times t_b$
- バンチの長さ
  - これはlinacの最適化とはほとんど関係しない
  - 衝突点でのベータ関数  $\beta_y^*$  が追いつける範囲でできるだけ短くする

# 基本的ビームパラメータ (baseline, 5Hz)

- 繰返周波数 5Hz
- パルスあたりバンチ数 1312
- バンチあたり粒子数  $2 \times 10^{10}$
- バンチ間隔 554 ns
- バンチ長 0.3 mm

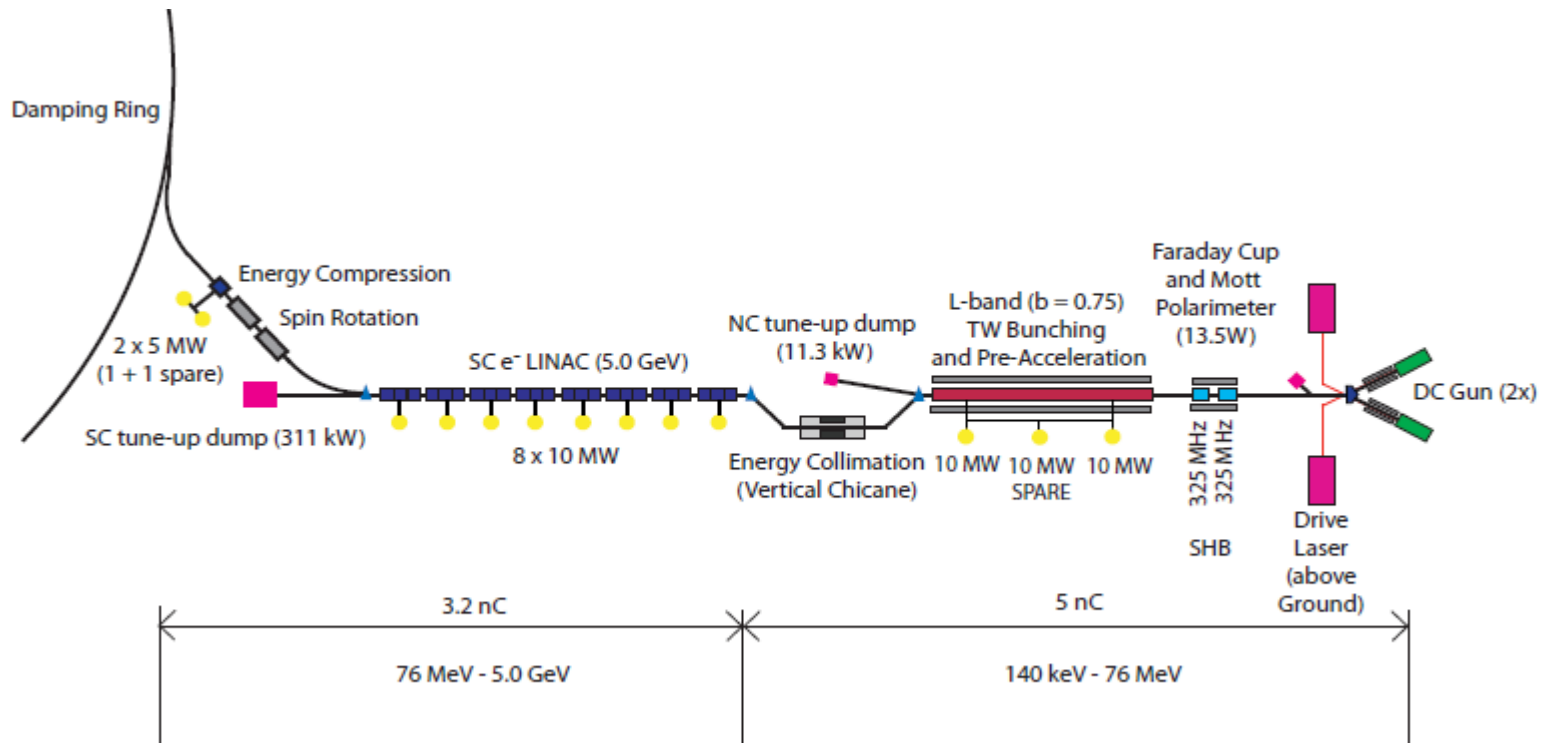
- 水平エミッタンス 10 mm
- 垂直エミッタンス 35 nm
- 衝突点水平ビームサイズ 474nm
- 衝突点垂直ビームサイズ 5.9nm

Beam Pulse Structure (Low Power)



# 電子源

- 偏極ビームが要求される (>80%)
- あまり問題はない。レーザーのみ。



# 陽電子源

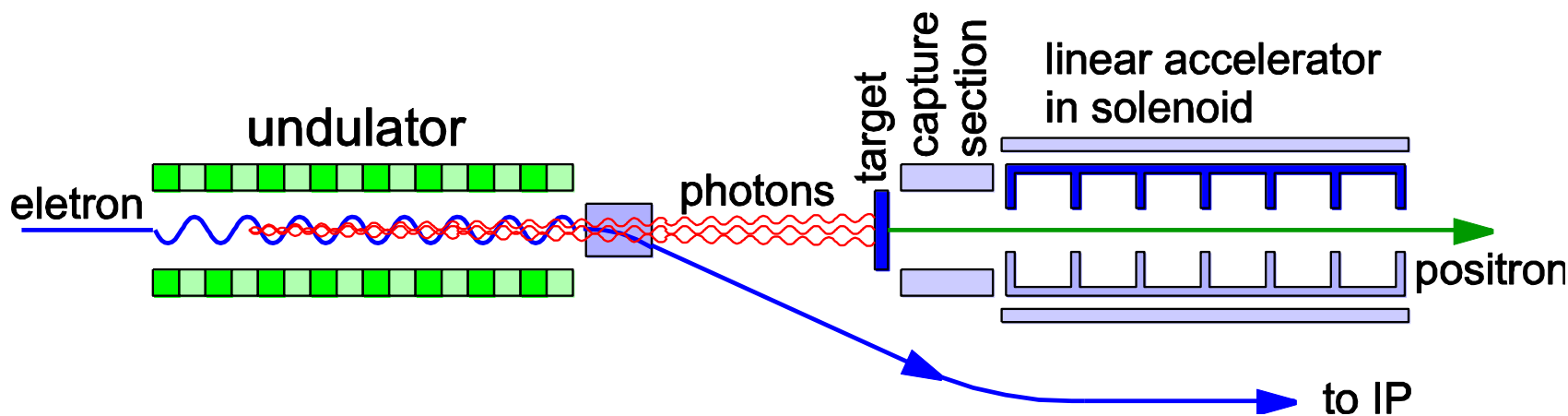
大森さん担当

## 陽電子生成の3つの方法

- Undulator法（ILC baseline で採用）
- Conventional Method（従来の方法）
  - 数GeVの電子を標的に当て、発生する陽電子を回収する。
  - これまでに頻繁に使われて、技術は確立されている
  - ILCへの応用上の問題点は
    - 標的が耐えられるか → OK（遅い運動標的試験中）
    - 発生する陽電子のエミッタンスがやや悪い → OK（DRの改良）
    - DRまでの輸送部分の設計ができていない
    - 偏極陽電子が得られない
- Laser-Compton法（将来の方法）

# Undulator法

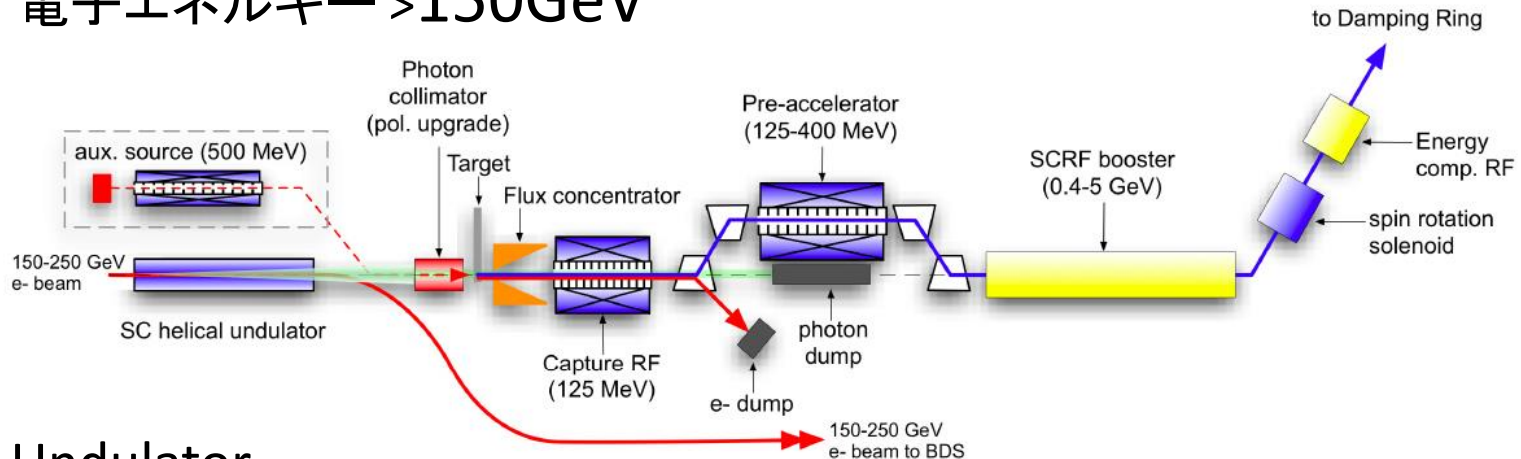
- 数100GeVの電子ビームを磁石 (undulator) により蛇行させると、数10MeVの輻射を出す。これを標的に当てて発生する陽電子を回収する。
- 平面上の蛇行でなく、螺旋状の運動 (Helical Undulator) なら、発生する輻射は円偏光し、偏極陽電子が得られる。



- この方法は各種の欠点を持つ
  - 電子・陽電子の運転が独立にできない
  - まだ実際に使われたことがない
  - undulatorについては小規模テストができない、などなど
  - 電子のエネルギーが低くなると急激に光子生成率がわるくなる
- であるが、偏極陽電子ができるという利点が高い

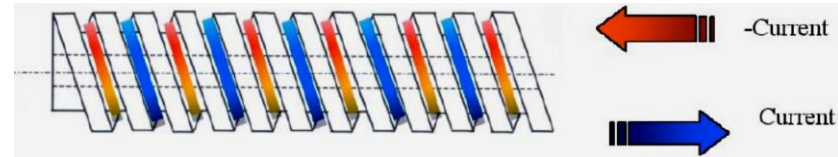
# ILCのBaseline設計 (undulator法)

- 電子エネルギー > 150 GeV



- Undulator

- 主電子リナック終端に置く
  - Helical, superconducting
  - 長さ ~150m (偏極陽電子が必要な場合~230m)
  - $K=0.92$ ,  $\lambda=1.15\text{cm}$ , (軸上で $B=0.86\text{T}$ )
  - beam aperture 5.85mm (直径)
- 標的はチタン合金の回転型
  - 陽電子回収には、Flux Concentratorを用いる
  - 400MeVまでは常伝導加速



# Undulator Radiation

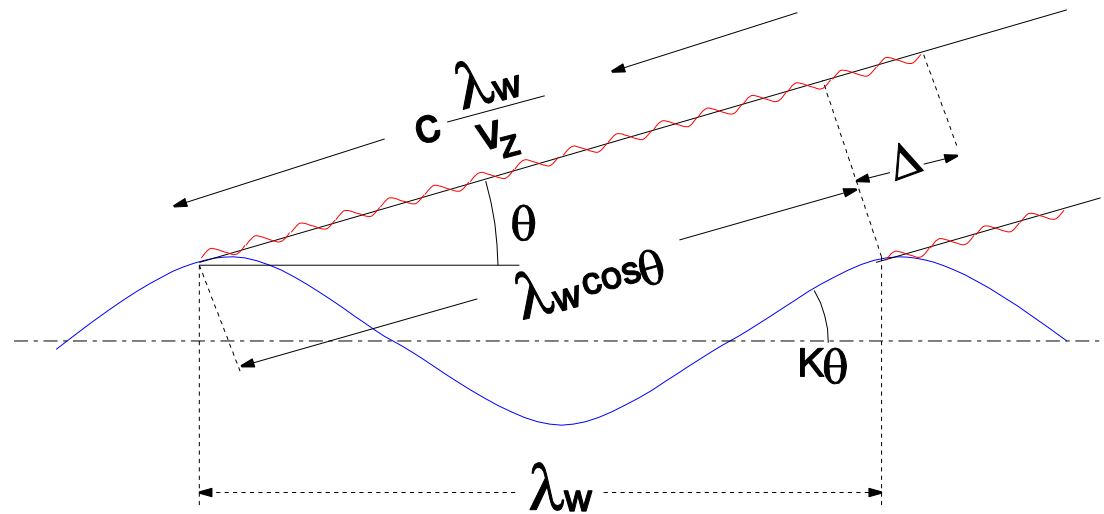
- 電子軌道上の2点からの輻射が干渉する条件

$$c \frac{\lambda_w}{v_z} - \lambda_w \cos \theta = n \lambda$$

- z方向の速度は

$$v_z = \sqrt{v^2 - v_x^2}$$

$$\Rightarrow \frac{v_z}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2} - \frac{K^2}{\gamma^2}}$$



- これより

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2n\gamma^2} \left[ 1 + K^2 + \theta^2 \gamma^2 \right]$$

ILCでは  $E_{\text{beam}} = 150 \text{ GeV}$  のとき、 $K = 0.92$



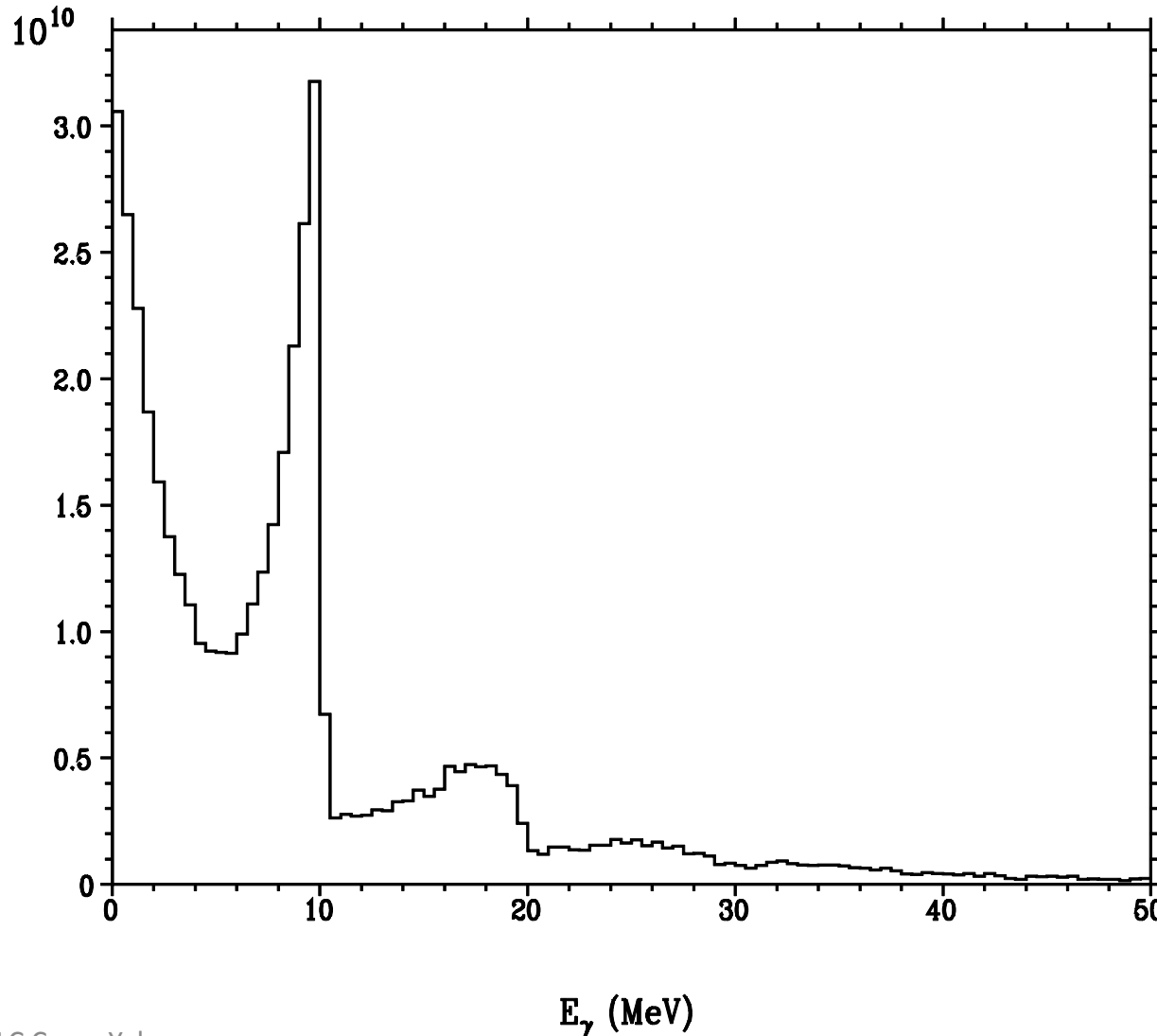
# 光子スペクトルの例

Undulator

20120713(084843)

CAIN2.42

Photon Energy Spectrum



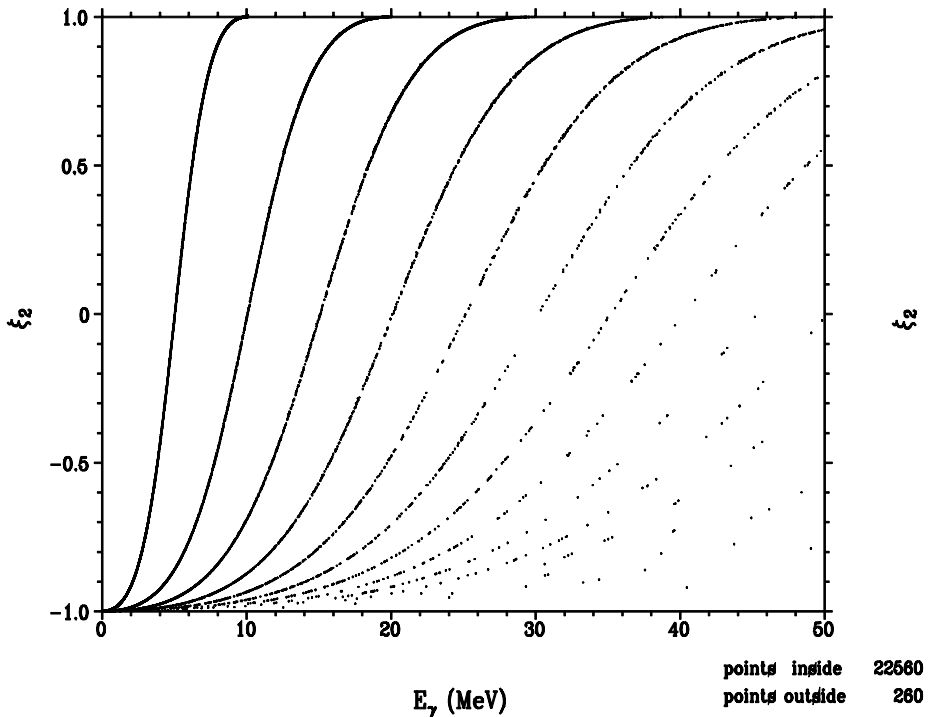
# of macro particles  
in bin range 76709  
out of range 978  
# of real particles  
in 4.542D+11  
out 5.791D+09

# Positron Polarization

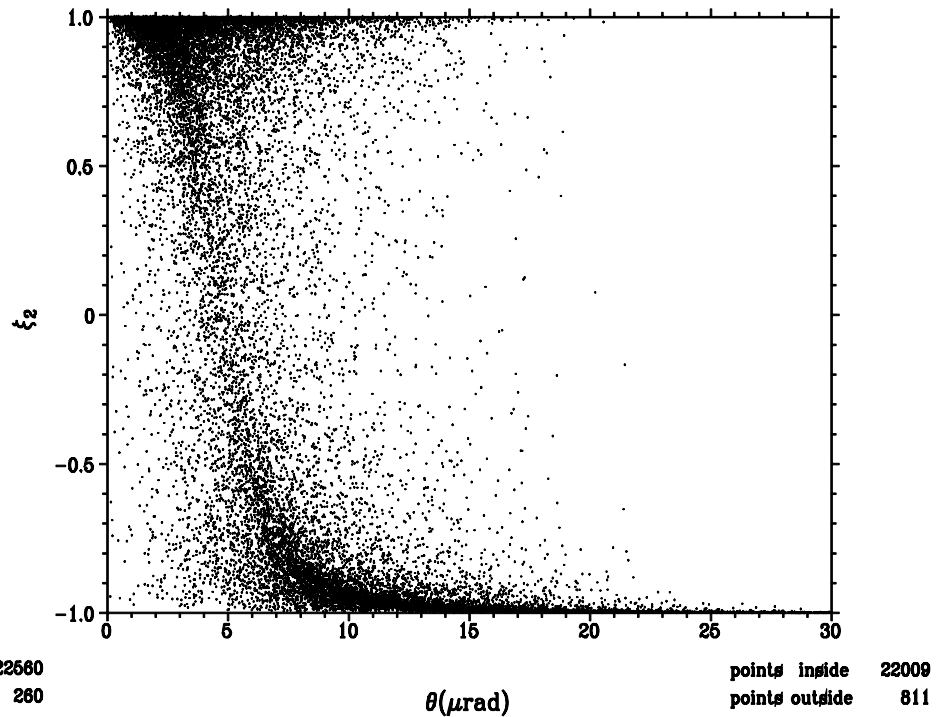
- photonのエネルギー・角度とpolarizationの間に相関がある
- 捕捉効率はエネルギー・角度によるので、生成された陽電子は自然に偏極している(30%程度)
- photonの角度とpolarizationとの相関を利用して、大角度のphotonをcollimatorで捨てれば、より高いpolarizationが得られる(~60%程度まで)
- Collimatorは設計中(baselineには入っていない)

Undulator 20120713(083126)ulrat@AIN2.42

Photon Helicity vs. Energy



Photon Helicity vs. Angle



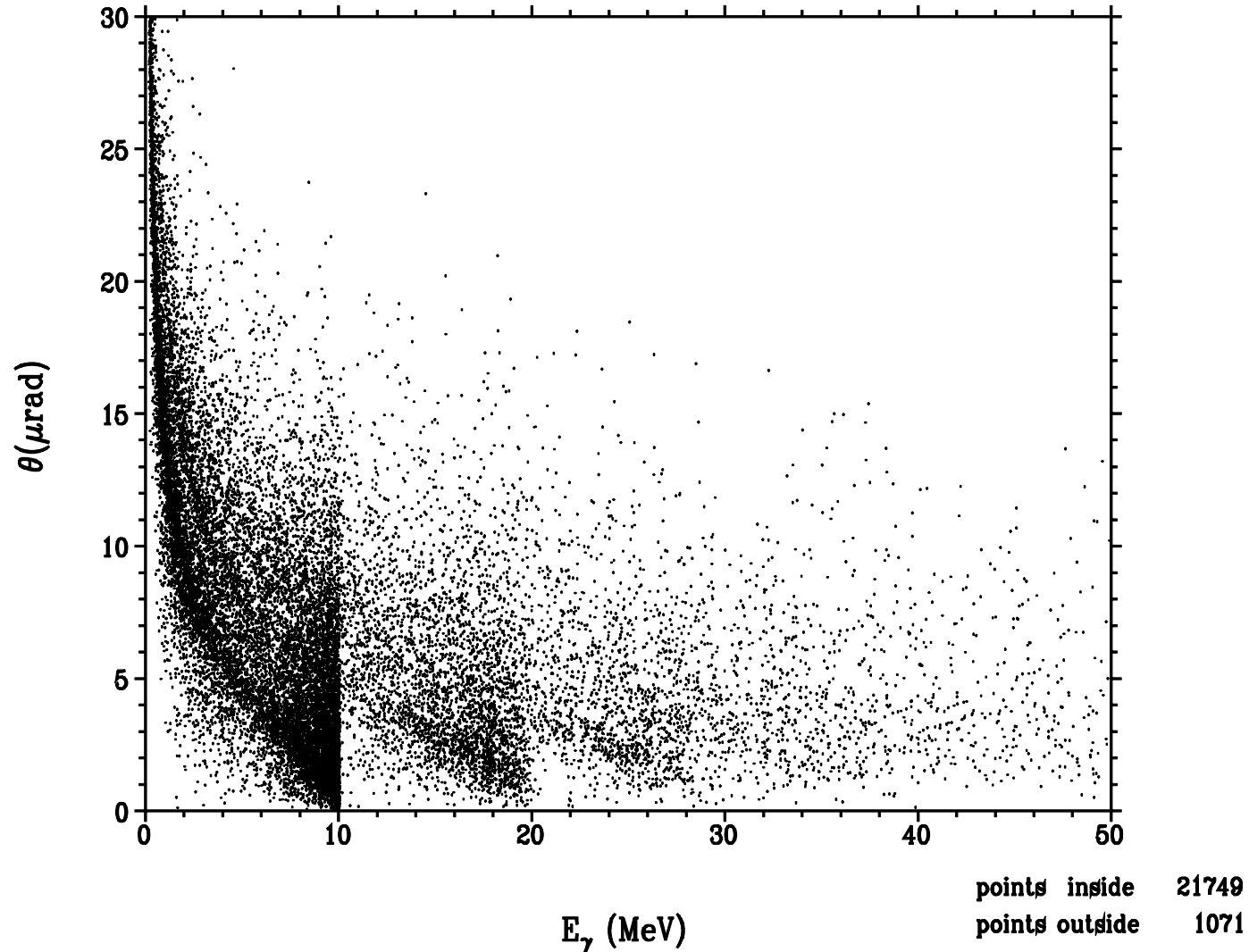
# 光子の角度とエネルギーの関係

Undulator

20120713(083125)

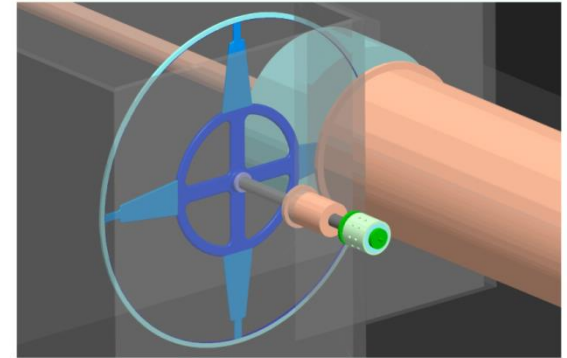
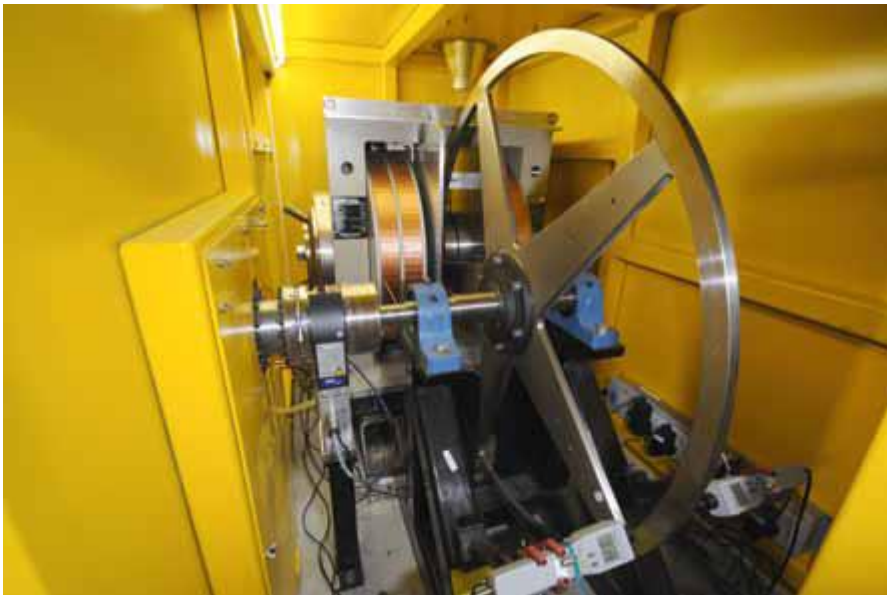
CAIN2.42

Photon Angle vs. Energy



# 標的

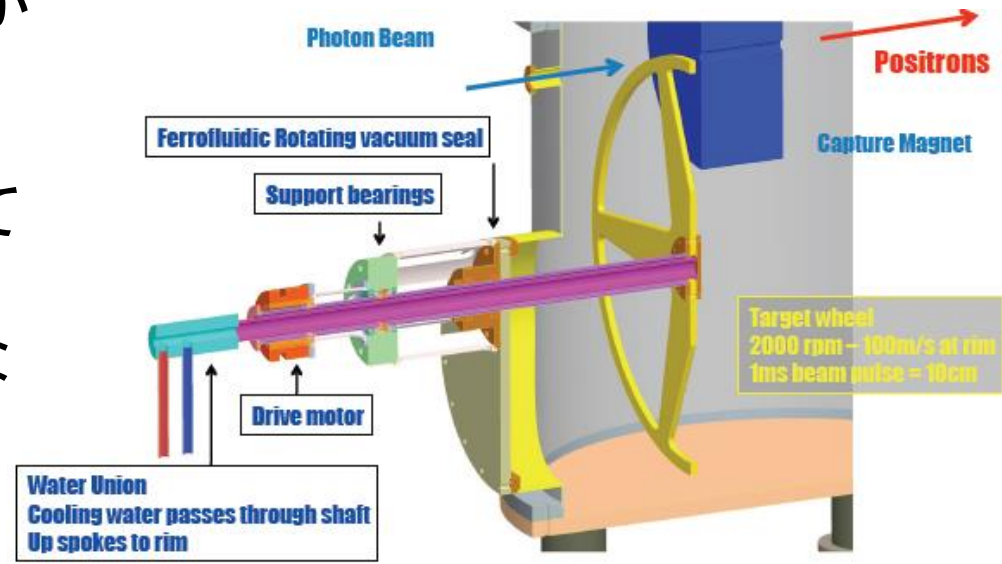
- チタン合金の車輪（直径1m）を、2000rpm（縁辺速度100m/s）で回す
- これは1msの間の熱の集積を防ぐため
- 円盤でなくスポーク形状になっているのは、磁場中の回転で発生する eddy current を減らすため



Cockcroft Insituteでeddu  
current試験中の回転標的。  
実際の標的は真空中で回  
転させる。

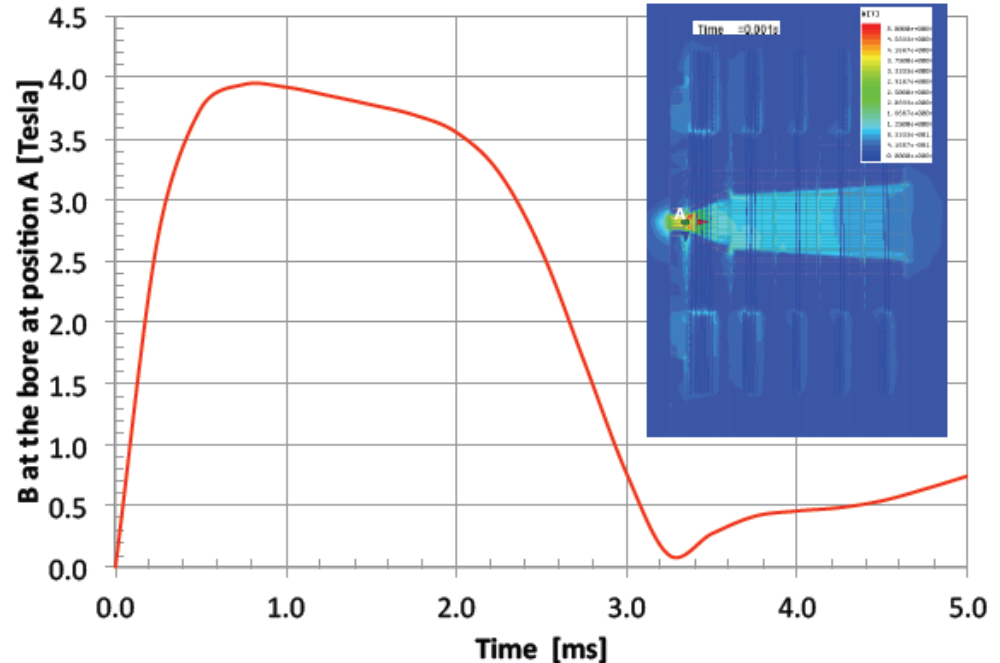
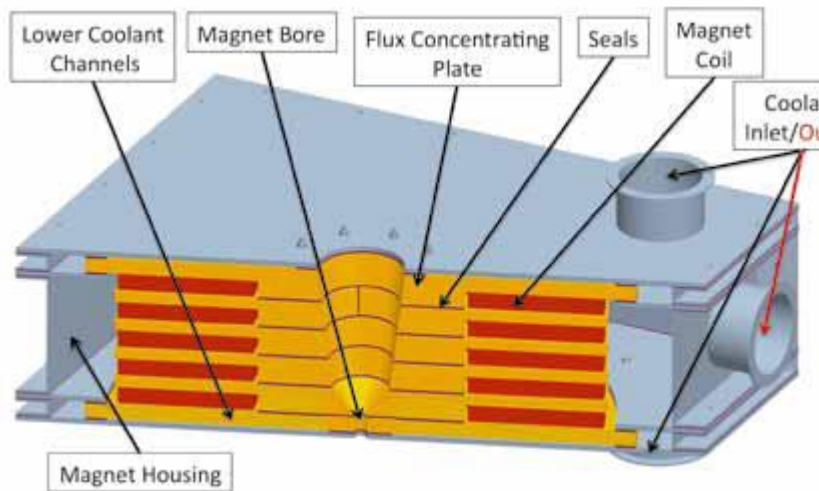
# 標的 (2)

- 真空中(直後に加速空洞がある)で100m/sで動く標的が必要
- LLNLで2社からの Ferromagnet sealをつかって試験中
- 十分な成果は上がっていない
  - Outgassing spikes still being observed
- More works needed
  - market products don't work
- 今年(2014年)5月の米国P5 reportのおかげで、予算がつく可能性がたかくなった



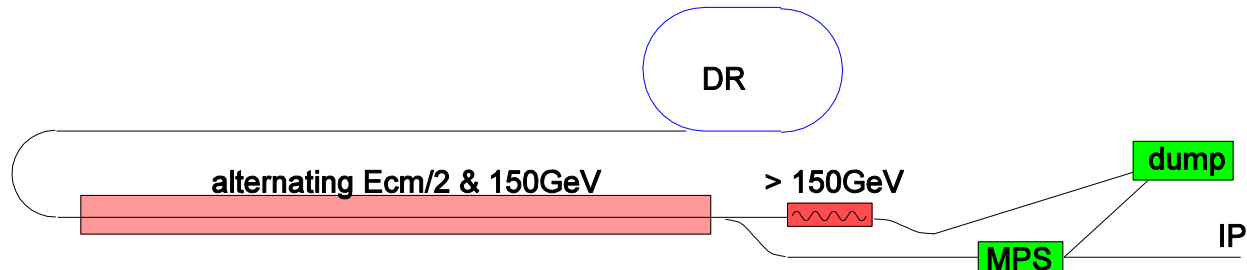
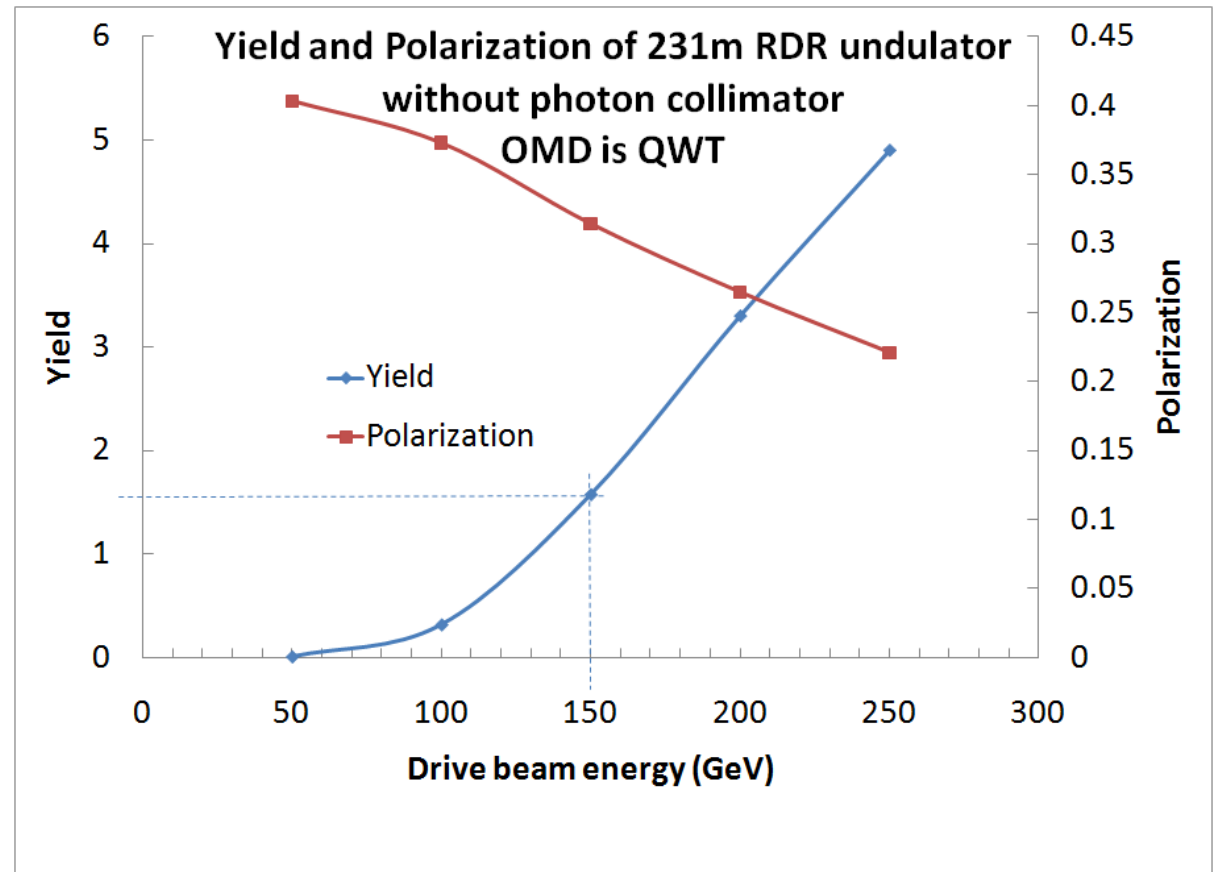
# Positron Capture

- Captureはflux concentratorをbaselineとする
  - これはRDRから変更なし
  - SB2009ではQWTを採用しかけたがこれはヤメ
  - ただし、max fieldは5T→3.5Tに下げる  
(simulationの結果、これで十分)



# 陽電子生成率

- Undulatorをリナック終端におくため、陽電子生成率は、電子エネルギー (=実験の重心系エネルギーの半分)による
- 150GeV以下では、陽電子が不足する



# 低エネルギー運転

- $E_{CM} < 300\text{GeV}$ では陽電子数が不足する
- $E_{CM} = 250\text{GeV}$ までなら
  - Undulatorの長さを147m→230mにのばせば足りる(スペースはもともと偏極陽電子のために用意してある)
  - 標的へのloadはOK(photon energyが下がること、photonの発散角 $1/\gamma$ が大きくなりスポットサイズが広がること)
- $E_{CM} < 250\text{GeV}$ ではこれでも不足
  - 電子リナックを10Hzで運転する
    - 5Hzは陽電子生成(使用後電子ビームのdump lineが必要)
    - 5Hzは衝突実験
    - Klystronの10Hz運転はOK
    - リナックは交互にエネルギーの違う粒子が通る
    - 軌道補正は衝突ビームに合わせる
  - Damping Ringは、100msecでダンプさせる(陽電子側も)
    - Damping wiggler、およびRFの増強が要る(Baselineに含まれている)
  - Z-pole, W pair threshold,  $E_{CM} < 250\text{GeV}$ のscanは必要か？



# Undulatorによる電子ビームのDegradation

- ピッチ  $\lambda_w$ , 長さ  $L_w$ , 強さ  $K_w$  のwiggler中での平均エネルギーロス

$$-\Delta E = \frac{2}{3} \frac{r_e L_w}{\lambda_w^2} K_w^2 mc^2 \gamma^2, \quad \lambda_w = \lambda_w / (2\pi)$$

- Photonの平均エネルギーは

$$\omega_\gamma \sim \frac{\lambda_e}{\lambda_w} \sqrt{1 + K_w^2 mc^2 \gamma^2}$$

- したがって平均Photon数は ( $\alpha$  はfine str. Const.)

$$n_\gamma \sim \frac{\Delta E}{\omega_\gamma} \sim \frac{\alpha}{\sqrt{1 + K_w^2}} \frac{L_w}{\lambda_w}$$

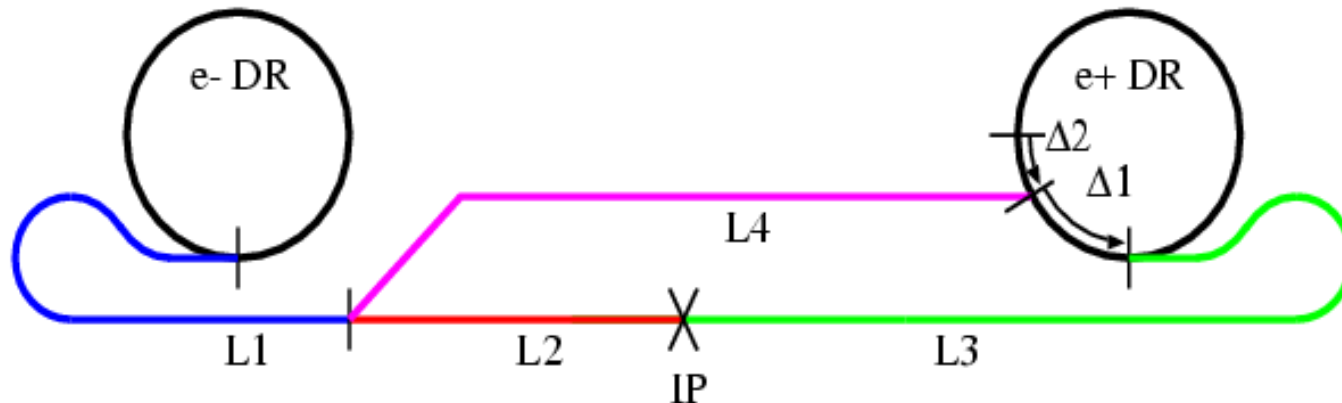
- ILCではエネルギー、 $K_w$  の設定によるが、 $\Delta E \sim 3\text{GeV}$ ,  $\omega_\gamma \sim 30\text{MeV}$ ,  $n_\gamma \sim 100$  くらい。

- これにより発生するenergy spreadは  $\Delta\sigma_E \sim \sqrt{n_\gamma} \omega_\gamma$

- Emittance, polarizationの変化は小さい

# Timing 問題

- 電子ビームを使って次の衝突用の陽電子を生成するために、陽電子軌道の全長に面倒な条件が加わる
- $(L_4 + \Delta_1 + L_3) - L_2 = n \times C_{DR}$

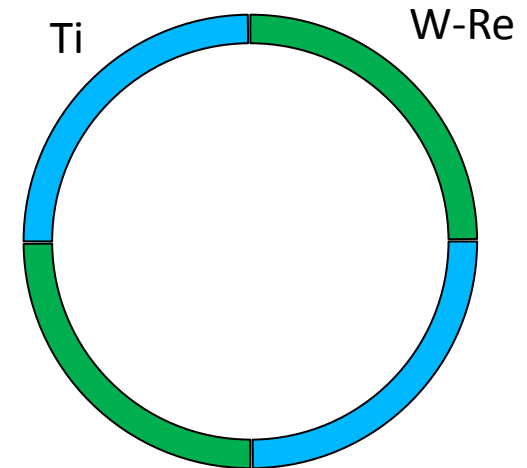


From Kuriki, BTR-DESY

- 概数でいえば、 $IP \leftrightarrow \text{図の右端} = n \times (C_{DR}/2)$
- リナック長が閾を越えた場合、
  - ✓ リナック長を  $C_{DR}/2 = 1.6\text{km}$  延ばさなければならなくなる。
  - ✓ あるいはDR周長を変える(設計段階で)。かなり連続的にできる。
- 運転時の微調整は、
  - ✓ DR周長のオンライン制御で可能 (現在、 $n$ は10程度)
  - ✓ シケインを陽電子ラインのどこかに挿入しておく

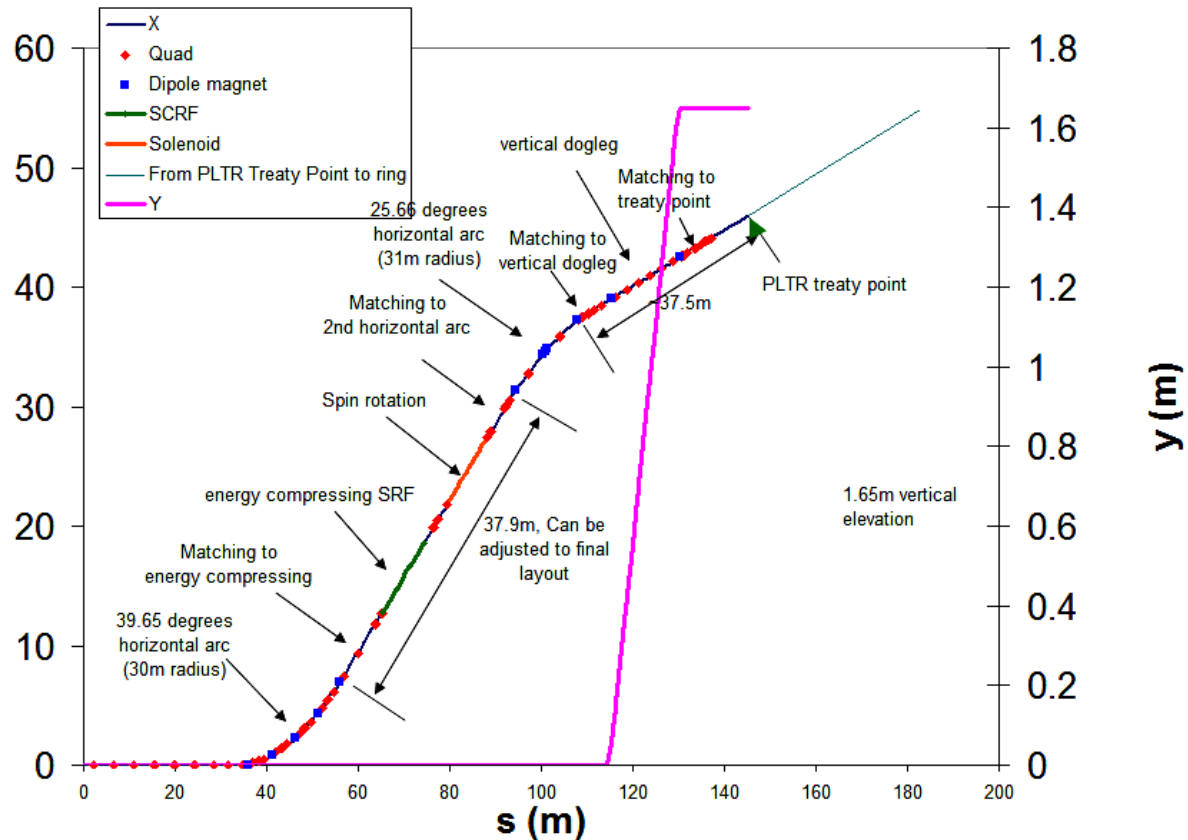
# 補助陽電子源

- Undulator法のばあい、電子側が止まっていると、陽電子側はビームtuningもできない
- これを補うため補助陽電子源が必要
- Auxiliary sourceは栗木案を採用
  - 500MeV S-band 常伝導linacを用いる
  - 標的は、undulatorと共用
  - $0.4X_0$ の厚みの場合、バンチ電荷2%
  - 可能なら $3X_0$ のタンゲステン標的とモザイクにする。この場合、~20%。
  - パルスあたり1バンチか。



# Damping RingへのTransport

- Spin flip
  - Capture → DRへの5GeV lineで longitudinal → transverse
  - Flipは超伝導ソレノイドの極性逆転
  - 高速flip (5Hz) については
    - 2ソレノイドの並行ラインがトンネルに入るか検討
    - 物理側の強い要求



- Remote handling
  - R&D体制を考える (標的システムの交換頻度が年1回くらいなら不要か)

# Damping Ring

久保さん担当

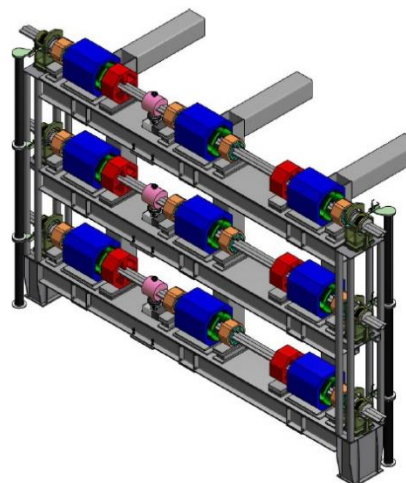
- Damping Ringの役割
  - 与えられた時間(200ms、10Hz運転の場合 100ms)内に Emittanceの小さいビームをつくる
  - 全バンチ(ILCの場合最大~2600)を一時貯蔵する
- メカニズム
  - 平衡エミッタンスの小さい曲線部
  - ウィグラー磁石により
    - さらに平衡エミッタンスを下げ、かつ
    - 減衰時間を短縮する

# Damping Rings

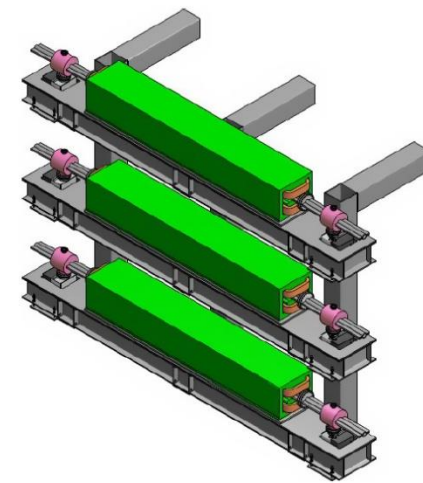
- 要求値

- $\gamma\varepsilon_x = 5.5 \mu\text{m}$ ,  $\gamma\varepsilon_y = 20\text{nm}$
- 減衰に使える時間は100ms
- 第1段階1312 bunches、最大2625 bunches
- bunch-by-bunch injection/extraction

- 一周 ~3km
- 第1段階では電子・陽電子各1リング
  - ✓ バンチ間隔~6ns
- 2625バンチに移る時点で、(必要なら)陽電子1リングを追加する
  - electron cloud次第
  - 電子は1リングのまま。バンチ間隔3ns

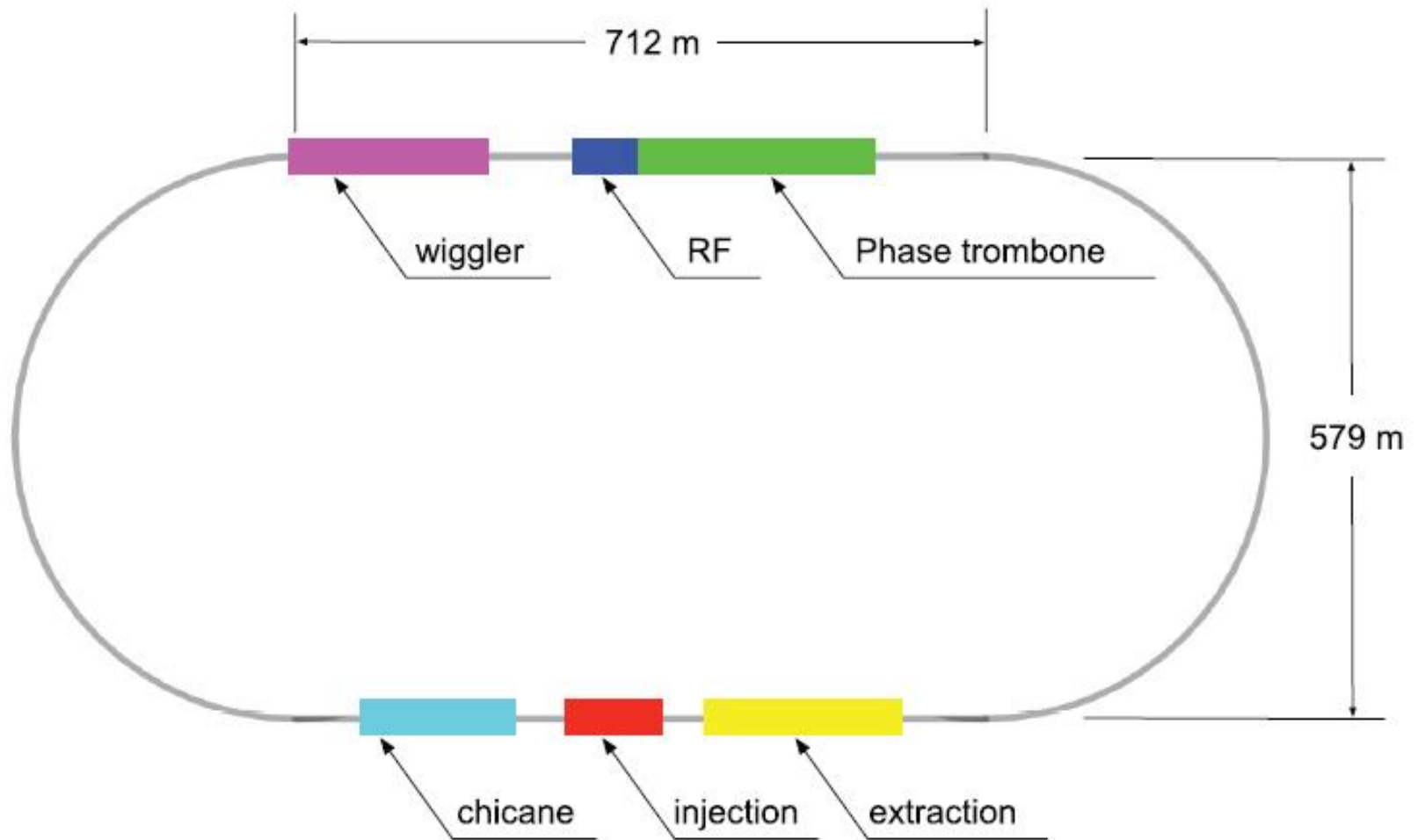


quadrupole section



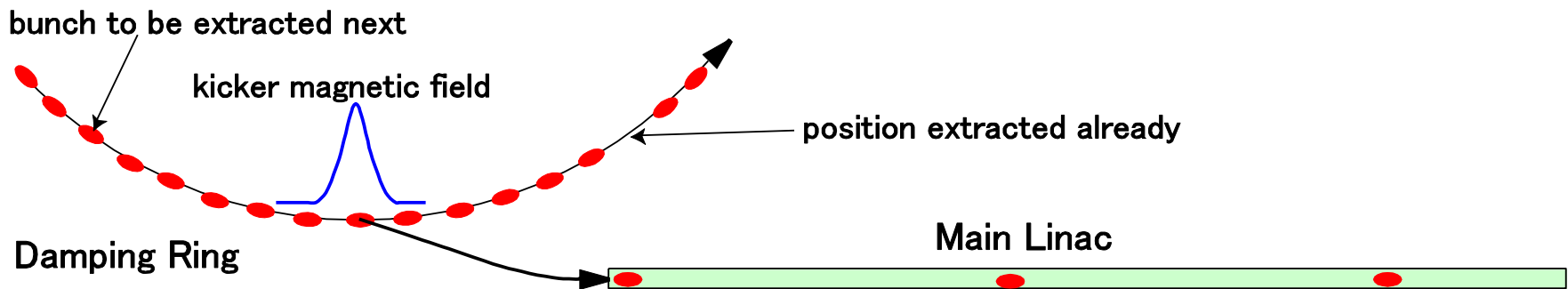
dipole section

# Damping Ring Configuration



# Injection/Extraction

- バンチ数が多い(1312~2625)
- 線形加速器ではバンチ間距離が長い(600~300ns)
- これをそのまま貯蔵するには、一周が  
 $2625 \times 300\text{ns} \times (3 \times 10^8 \text{m/s}) = 240\text{km}$   
のリングが必要
- したがって、バンチ間距離を圧縮して貯蔵する
- 出し入れは1バンチずつ、高速キッカーで行う
- キッカーの速さがリングの大きさを決める。
- この技術は、ATFでのR&DでほぼOK
- これは超伝導colliderの弱点と思っていたが、キッカーが可能であるなら、それほどでもない。CLICのdamping ringとのコストの差は小さい





# Damping Ring Requirements

Beam energy	5 GeV
Train repetition rate	5 ns
Main linac bunch separation	554 ns
Number of bunches per train	1312
Buncg population	2.00E+10
Injection requirements	
Normalized betatron amplitude $(A_x+A_y)_{max}$	0.07 m.rad
Energy range (full)	75 MeV
Bunch length (full)	66 mm
Extracted beam	
Normalized horizontal emittance	5500 nm.rad
Normalized vertical emittance	20 nm.rad
Rms relative energy spread	0.11 %
Rms bunch length	6 mm
Maximum allowed transfer jitter	0.1 $\sigma_x, \sigma_y$

# Damping Ring Parameters

		5Hz mode		10Hz mode	
		Low power	High lumi	positron	electron
Circumference	km	3.238		3.238	
Number of bunches		1312	2625	1312	
Bunch population		2.00E+10	2.00E+10	2.00E+10	
Maximum bunch current	mA	389	779	389	
Transverse damping time	ms	23.95		12.86	17.5
Longitudinal damping time	ms	12		6.4	8.7
Bunch length	mm	6.02		6.02	6.01
Momentum compaction factor		3.30E-04		3.30E-04	3.30E-04
Normalized horizontal emittance	μm	5.7		6.4	5.6
Horizontal chromaticity		-51.3		-50.9	-51.3
Vertical chromaticity		-43.3		-44.1	-43.3
Wiggler field	T	1.51		2.16	1.81
Number of wigglers		54		54	
Energy loss per turn	MeV	4.5		8.4	6.19
RF frequency	MHz	650		650	
Number of cavities		10	12	12	
Total voltage	MV	14		22	17.9
Voltage per cavity	MV	1.4	1.17	1.83	1.49
RF synchronous phase	deg	18.5		21.9	20.3
Power per RF coupler	kW	176	294	272	200

# 電子雲不安定性

- CESR-TA finished
- Gave recommendation for the mitigation method (table below)
  - Arc and wiggler sections requires antichamber
  - Full power in 3.2km ring needs aggressive mitigation plan
- No significant difference between 6.4km with 2600 bunches and 3.2km with 1300 bunches

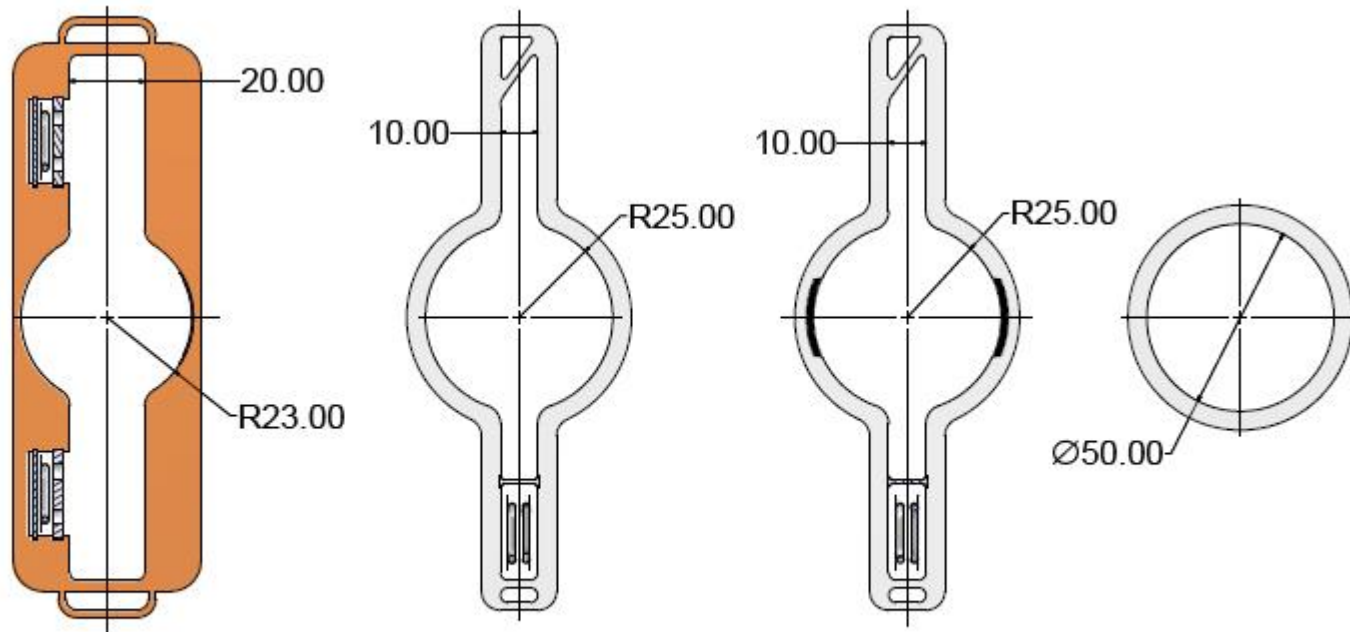
*EC Working Group Baseline Mitigation Recommendation*

	Drift*	Dipole	Wiggler	Quadrupole*
<b>Baseline Mitigation I</b>	TiN Coating	Grooves with TiN coating	Clearing Electrodes	TiN Coating
<b>Baseline Mitigation II</b>	Solenoid Windings	Antechamber	Antechamber	
<b>Alternate Mitigation</b>	NEG Coating	TiN Coating	Grooves with TiN Coating	Clearing Electrodes or Grooves

ECLLOUD`10 (October 13, 2010, Cornell University)

# Damping Ring Vacuum Chamber

- 陽電子リングでは、CESR-TA teamの推薦にしたがい下図のようにする
- 電子雲以外の不安定性はシリアスでない
- 電子リングでは、FII (Fast Ion Instability) がもっとも重要



(a) WIGGLER CHAMBER

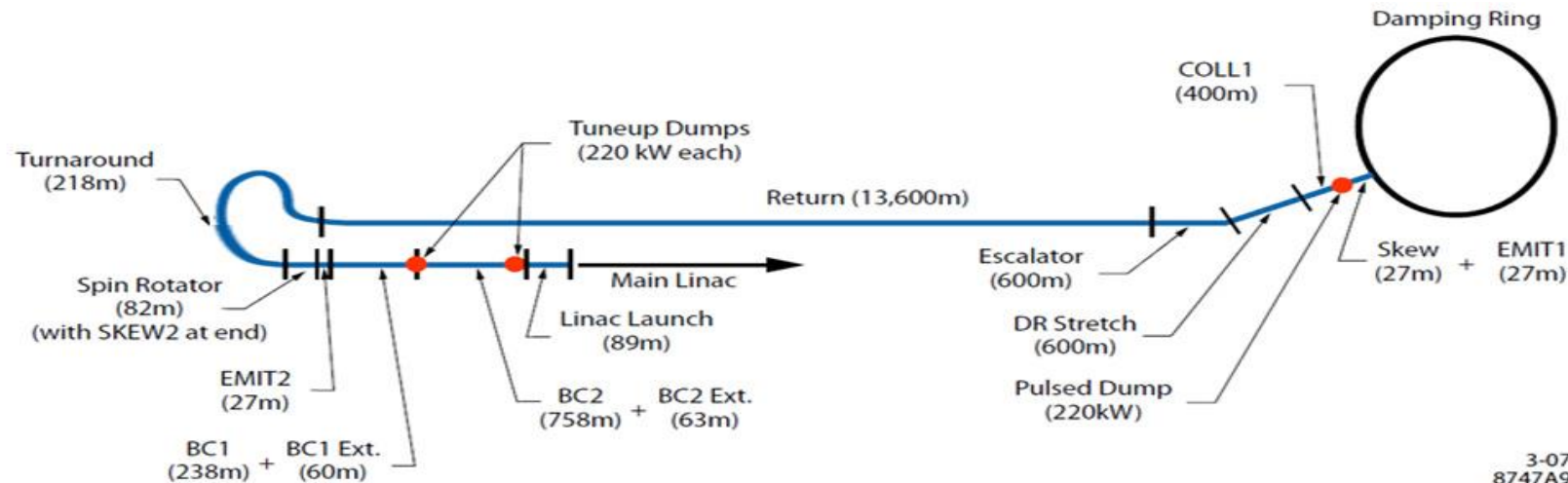
(b) ARC CHAMBER

(c) DIPOLE CHAMBER

(d) DRIFT CHAMBER

# RTML (Ring To Main Linac)

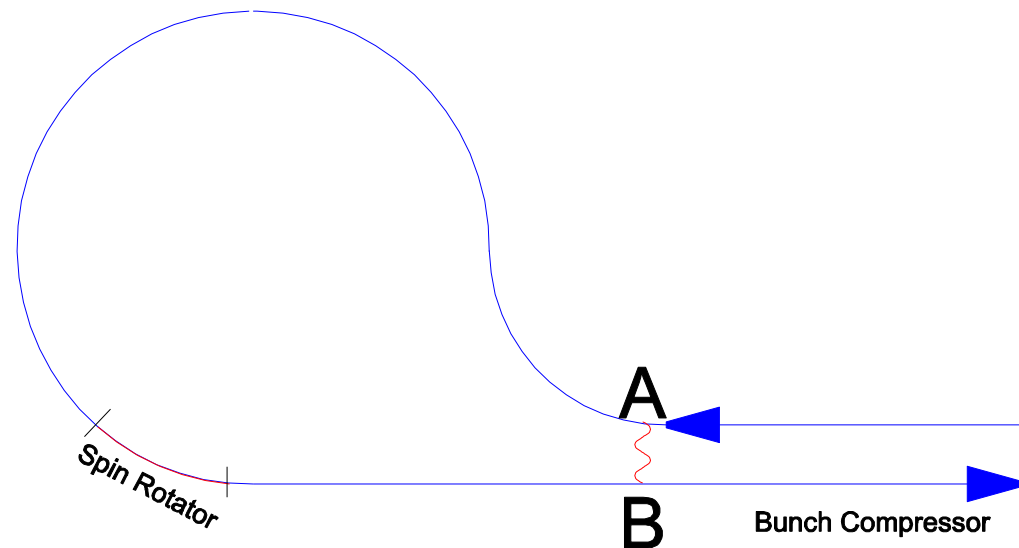
久保さん担当



- 減衰リングからリナックへのビームの輸送
- スピンの回転 (spinを垂直方向から水平面内に回す。solenoid + bend + solenoid)
- Feedforward
- バンチ長の圧縮
- ビームの中途ダンプ

# Feedforward

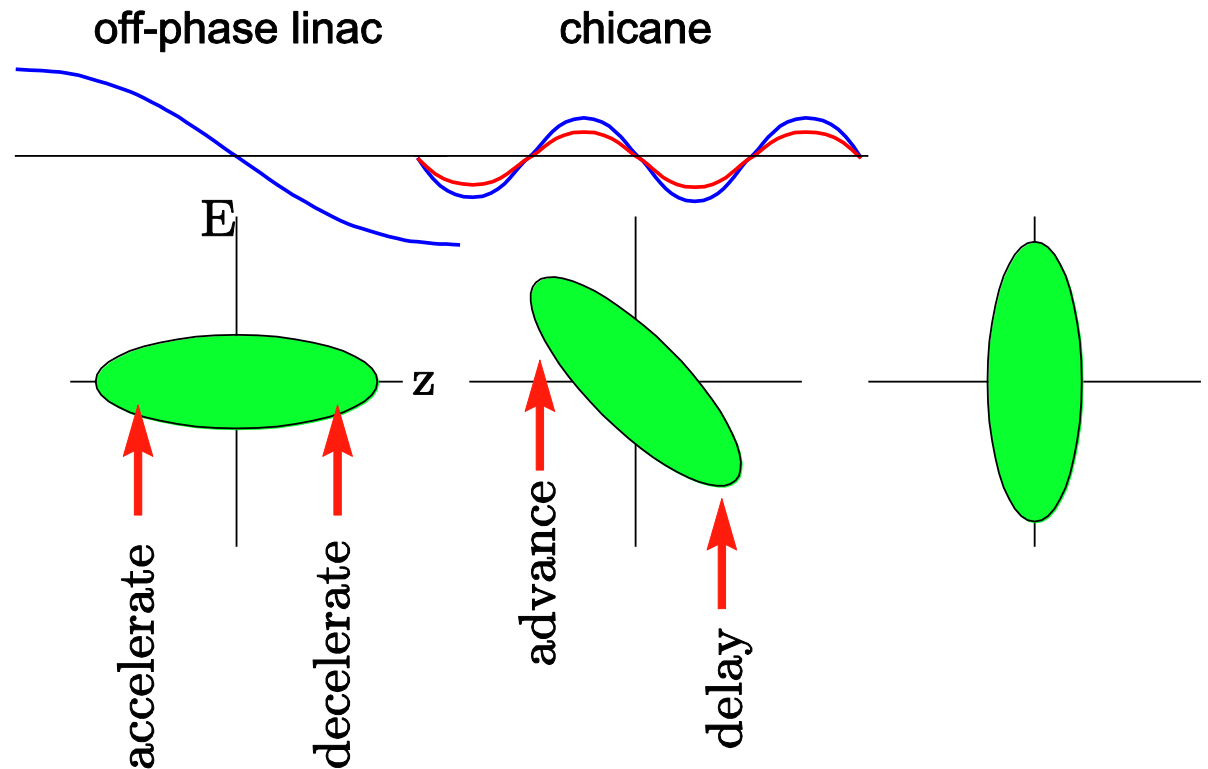
- Turn around を利用して、バンチ位置のfeedforward ができる。
- Turn around に入る直前のバンチ位置を測定し、もどって来たときに補正する。
- とくに、減衰リングの取出しキッカーのfluctuationの結果をなおすことができる。



# バンチ圧縮

- 衝突点での砂時計効果を緩和するためにバンチを短くする。
- 加速空洞とシケインの組合せ
- Damping Ringでの平衡バンチ長は 6mm。これを 300  $\mu\text{m}$  に圧縮する。

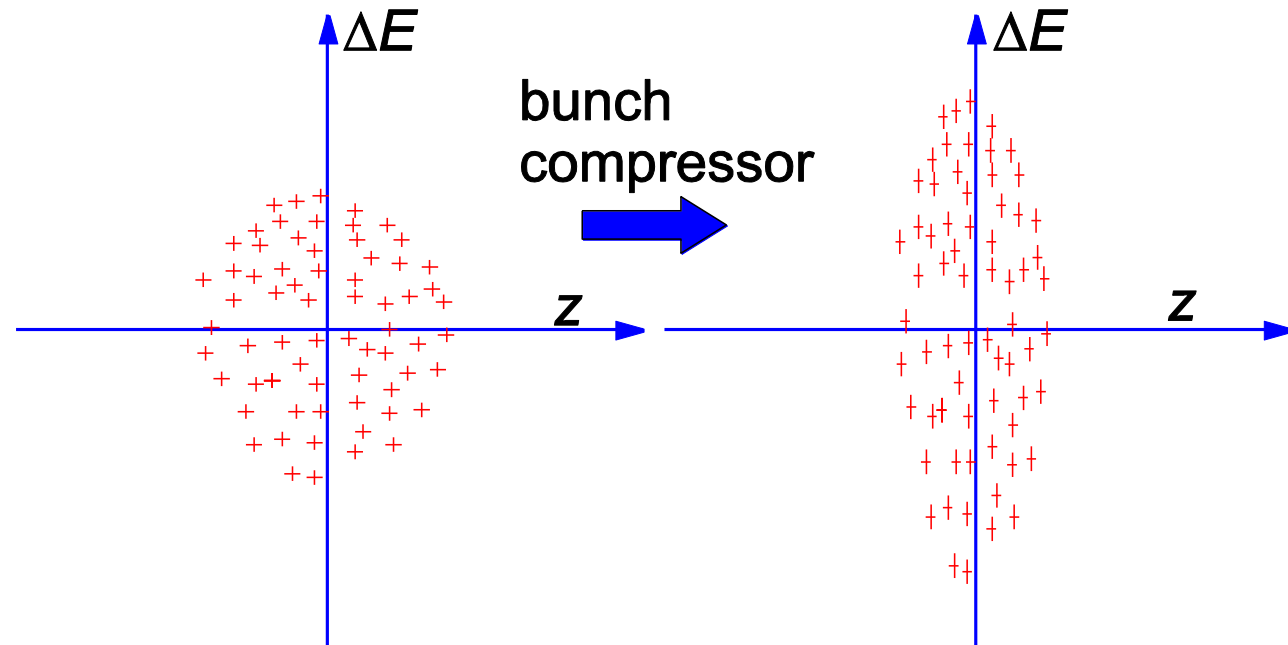
- RFの位相に誤差があると、そのまま衝突点でのビームのタイミングずれになる。  
0.5度  $\rightarrow$  300 $\mu\text{m}$



# バンチ圧縮(2)

- バンチ長を圧縮するとエネルギー幅が増加する。  
(longitudinal emittance の保存)
- $\Delta E/E$  が大きすぎるとエミッタンス増加などが起る。
- これを避けるために、bunch compressor は同時に加速もおこなって、 $\Delta E$  が増加しても、 $\Delta E/E$  の増加が小さくなるように設計する。

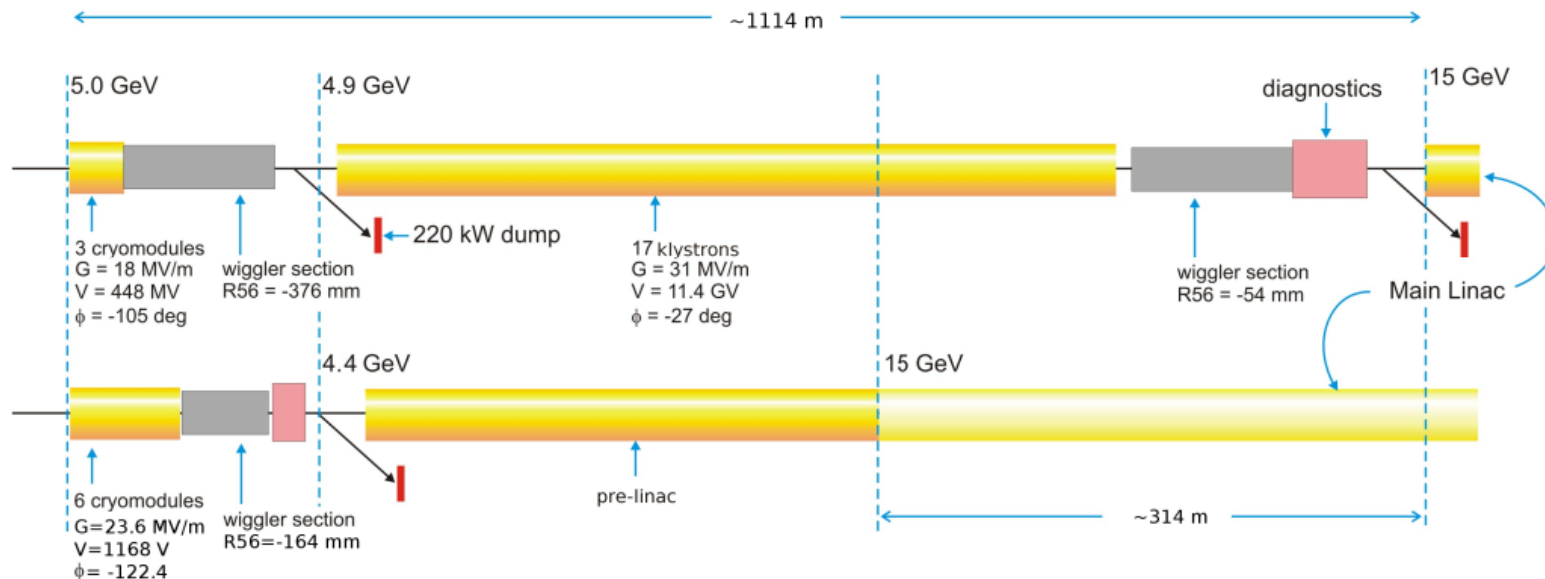
- 2段階圧縮(第1圧縮のあとに加速をいれてから再び圧縮する)にすれば中間の $\Delta E/E$ がさらに小さくなる





# Double-Stage Compressor

- バンチの長さを減衰リングでの6mmから、リナックでの300 $\mu$ m(1/20)に圧縮する (RDRでは9mm $\rightarrow$ 300 $\mu$ m(1/30))
- 加速・シケインの組合せ
- SB2009では1段で1/20にすることにしたが、TDRではRDRの2段式にもどす
- **2段式のほうが高価であるが、150 $\mu$ mまで圧縮できる性能がある。**
  - ただし、標準パラメータは300 $\mu$ m
- 誤差の許容値も大きい。たとえばRF phase error toleranceは
  - *correlated errors:*  $\Delta\phi \sim 0.16^\circ / 0.32^\circ$  - SB2009/ RDR
  - *uncorrelated errors:*  $\Delta\phi \sim 0.40^\circ / 0.6^\circ$  - SB2009/ RDR



# Main Linac

加速空洞 佐伯さん担当  
STF 早野さん担当

- Key area of ILC
  - ~2/3 of the total cost
- Gradient at vertical test
  - Average 35MV/m
  - Accept cavities  $> 35 - 20\% = 28\text{MV/m}$
  - $Q_0 > 0.8 \times 10^{10}$  at 35MV/m
  - yield  $> 90\%$  (Up to 2 surface treatment passes)
- Average operating gradient 31.5MV/m
  - Accept the range  $\pm 20\%$
  - $Q_0 > 1 \times 10^{10}$  at 31.5MV/m

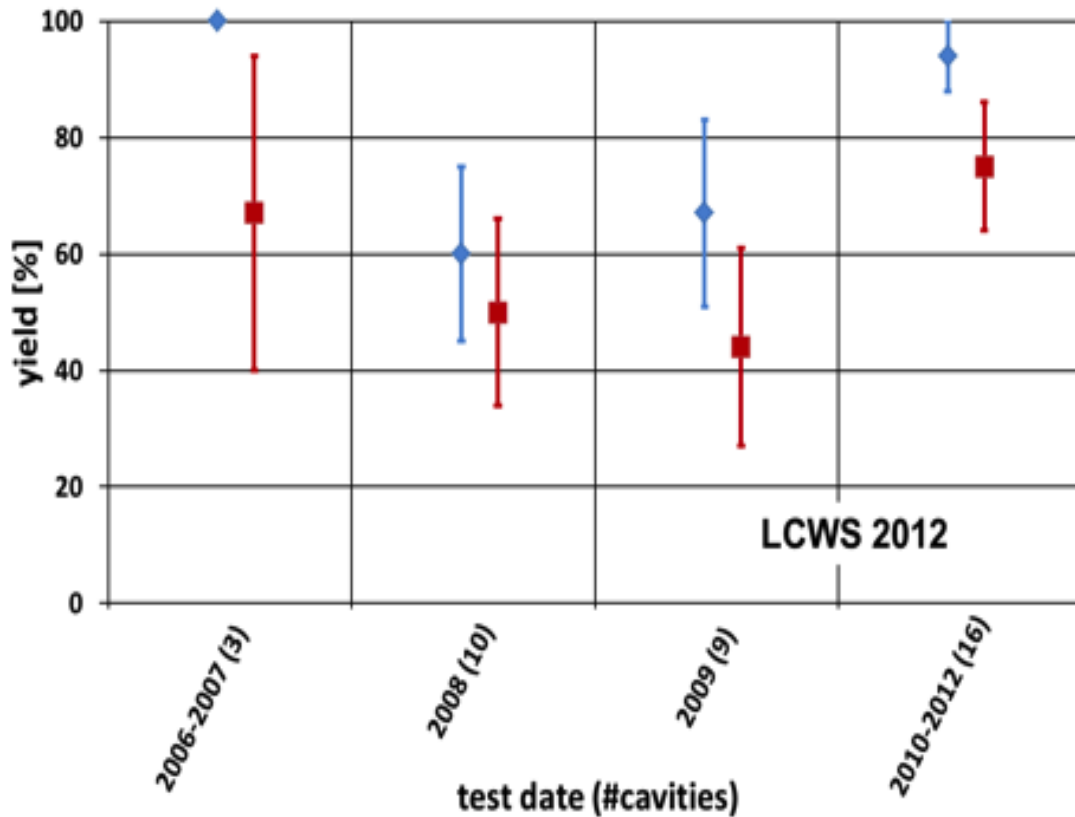
# Main Linac Parameters

MAIN Linac RF Parameters		
Cavity (9-cell TESLA elliptical shape)		
Average accelerating gradient	31.5	MV/m
Q factor Q0	1.00E+10	
Effective length	1.038	m
R/Q	1036	$\Omega$
Accepted operational gradient spread	+/-20	%
Cryomodule		
Total slot length	12.652	m
Type A	9	cavities
Type B	8	cvities incl. 1 SC quad
ML unit	A+B+A	
Number of units (e+/e-)	282/285	
Total component counts		
Cryomodule type A	564/570	
Cryomodule type B	282/285	
9-cell cavities	7332/7410	
SC quad	282/285	
Total linac length (flat site)		
	11027/11141	m
Total linac length (mountain site)		
	11072/11188	m
Effective average accelerating grad		
	21.3	MV/m
RF requirements (for average gradient)		
Beam current	5.8	mA
beam (peak) power per cavity	190	kW
Matched loaded Q (QL)	5.40E+06	
Cavity fill time	924	$\mu$ s
Beam pulse length	727	$\mu$ s
Total RF pulse length	1650	$\mu$ s
RF-to-beam power efficiency	44	%

# Progress in SCRF Cavity Gradient

2nd pass yield - established vendors, standard process

◆ >28 MV/m yield    ■ >35 MV/m yield



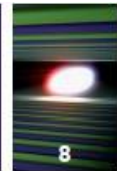
Production yield:  
94 % at > 28 MV/m,

Average gradient:  
37.1 MV/m

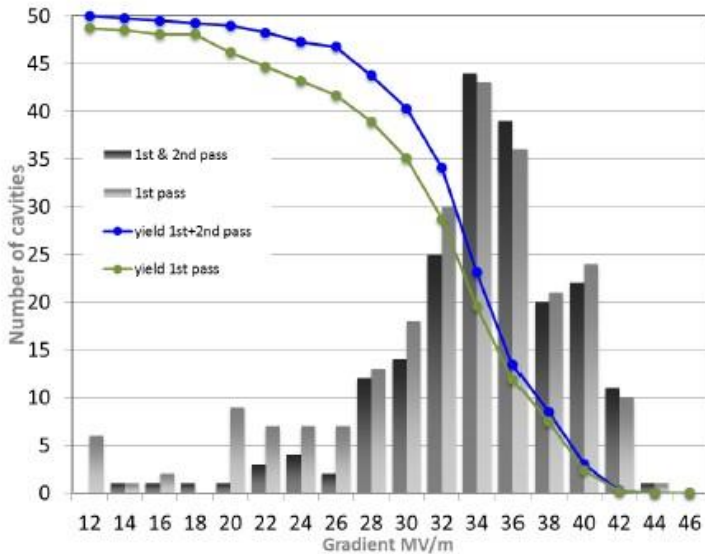
reached (2012)



# Yield of gradients: After 1. re-treatment (2. pass)



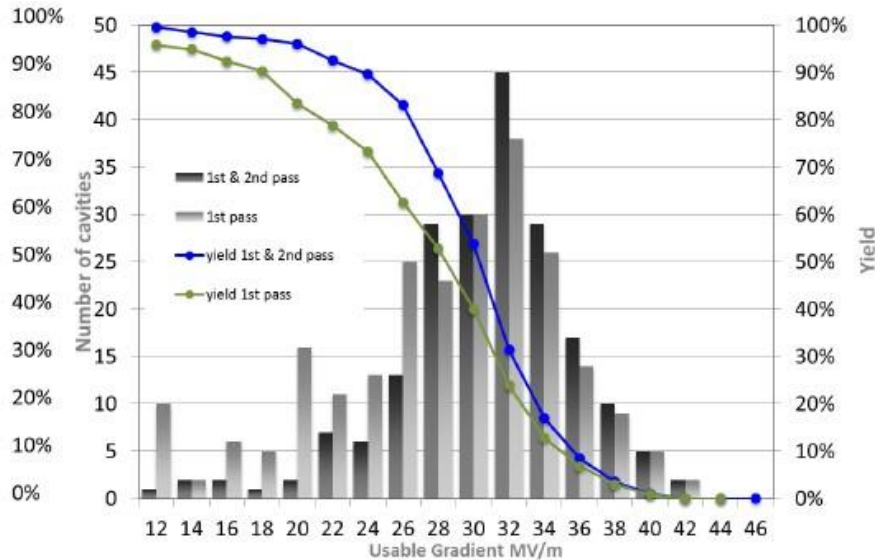
- Yield of usable and maximum gradient of ~207 cavities (2.pass) => 85% (cavities that passed in 1. pass + results of cavities after re-treatment)
- Average gradients increased + spread reduced



Average maximum gradient:

**(32.8 ± 4.9) MV/m**

given errors are standard deviation



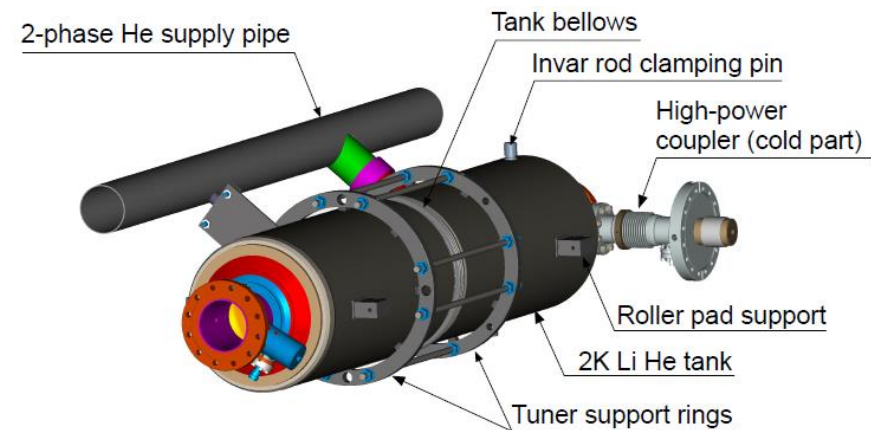
Average usable gradient:

**(29.3 ± 5.1) MV/m**

D. Reschke, TTC 2014

# Acceleration Test

- Confirm the gradient in modules (design margin: 10% from VT)
- At full spec with beam
- Energy stability, within a pulse, pulse-to-pulse
- Phase stability in vector sum
- Operational margin, klystron near saturation





# SCRF Beam Acceleration Test

## DESY: FLASH

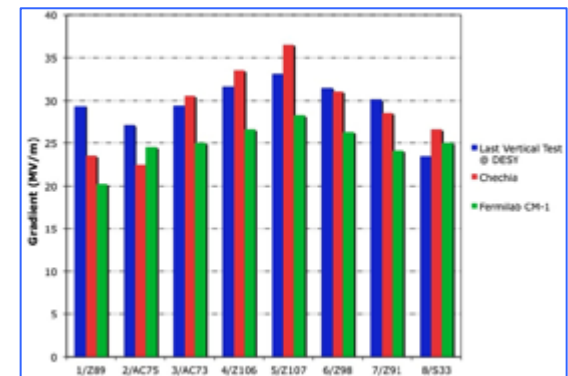
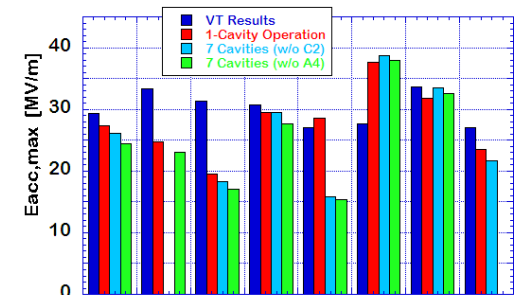
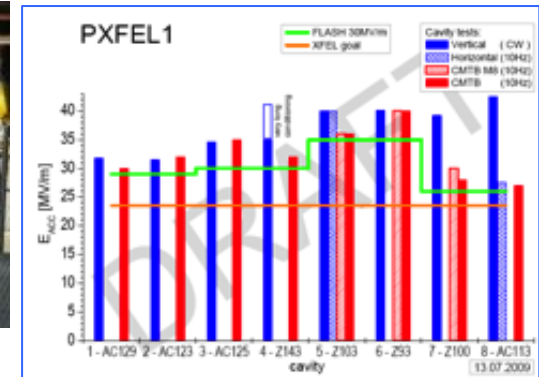
- SRF-CM string + Beam,
  - ACC7/PXFEL1 < 32 MV/m >
- 9 mA beam, 2009
- 800 $\mu$ s, 4.5mA beam, 2012

## KEK: STF

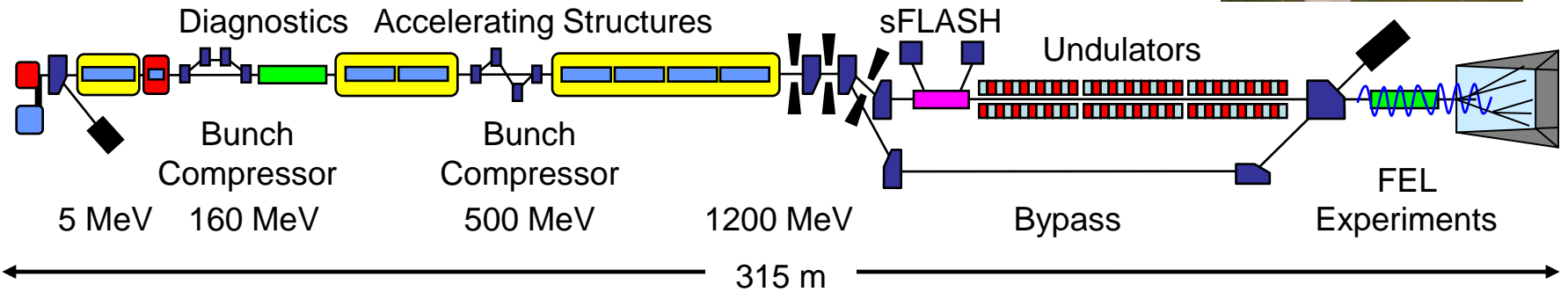
- S1-Global: complete, 2010
  - Cavity string : < 26 MV/m>
- Quantum Beam : 6.7 mA, 1 ms,
- CM1 & beam, 2014 ~2015

## FNAL: NML/ASTA

- CM1 test complete
- CM2 operation, in 2013
- CM2 + Beam, 2013 ~ 2014



# FLASH layout



A.Yamamoto, Higgs Hunting 2013



# FLASH 9mA Expt achievements: 2009-mid 2012

## High beam power and long bunch-trains (Sept 2009)

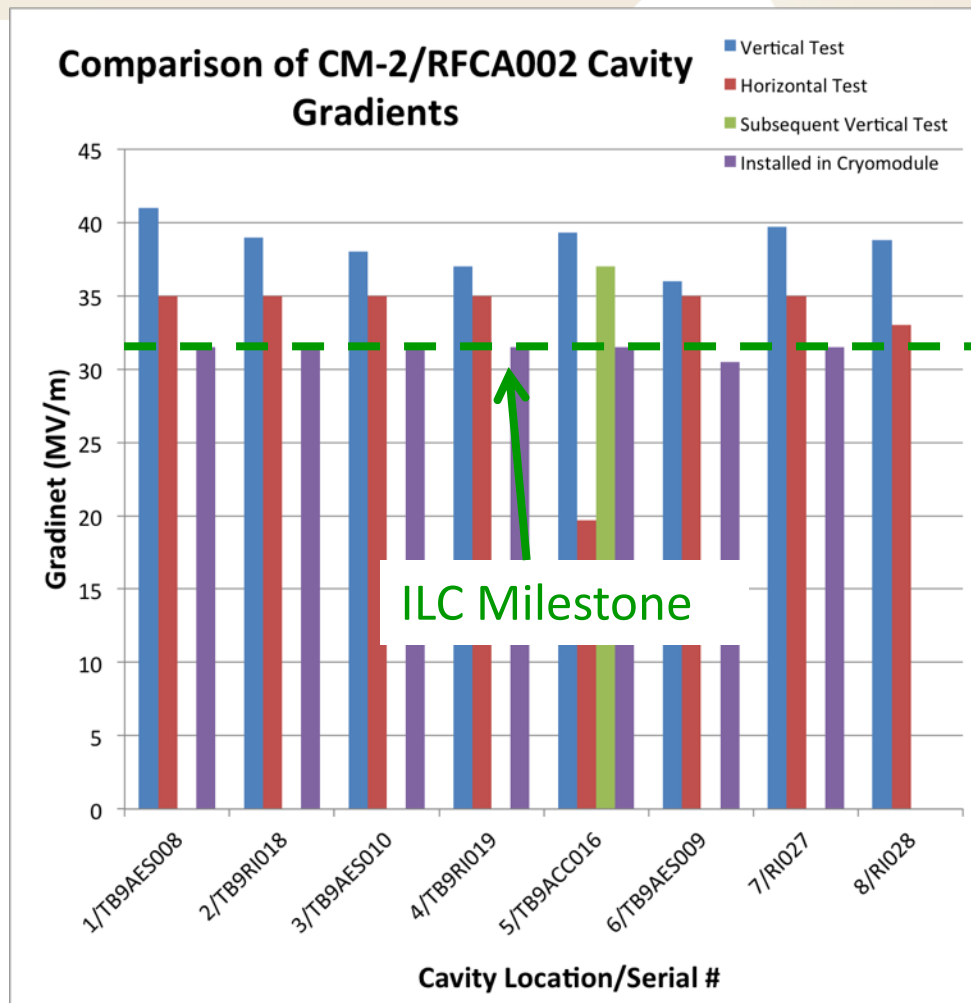
Metric	ILC Goal	Achieved
Macro-pulse current	9mA	9mA
Bunches per pulse	2400x 3nC (3MHz)	1800x 3nC 2400 x 2nC
Cavities operating at high gradients, close to quench	31.5MV/m +/-20%	4 cavities > 30MV/m

## Gradient operating margins (Feb 2012)

Metric	ILC Goal	Achieved
Cavity gradient flatness (all cavities in vector sum)	2% $\Delta V/V$ (800 $\mu$ s, 5.8mA) (800 $\mu$ s, 9mA)	<0.3% $\Delta V/V$ (800 $\mu$ s, 4.5mA) <i>First tests of automation for Pk/QI control</i>
Gradient operating margin	All cavities operating within 3% of quench limits	Some cavities within ~5% of quench (800 $\mu$ s, 4.5mA) <i>First tests of operations strategies for gradients close to quench</i>
Energy Stability	0.1% rms at 250GeV	<0.15% p-p (0.4ms) <0.02% rms(5Hz)

# A recent result at FNAL

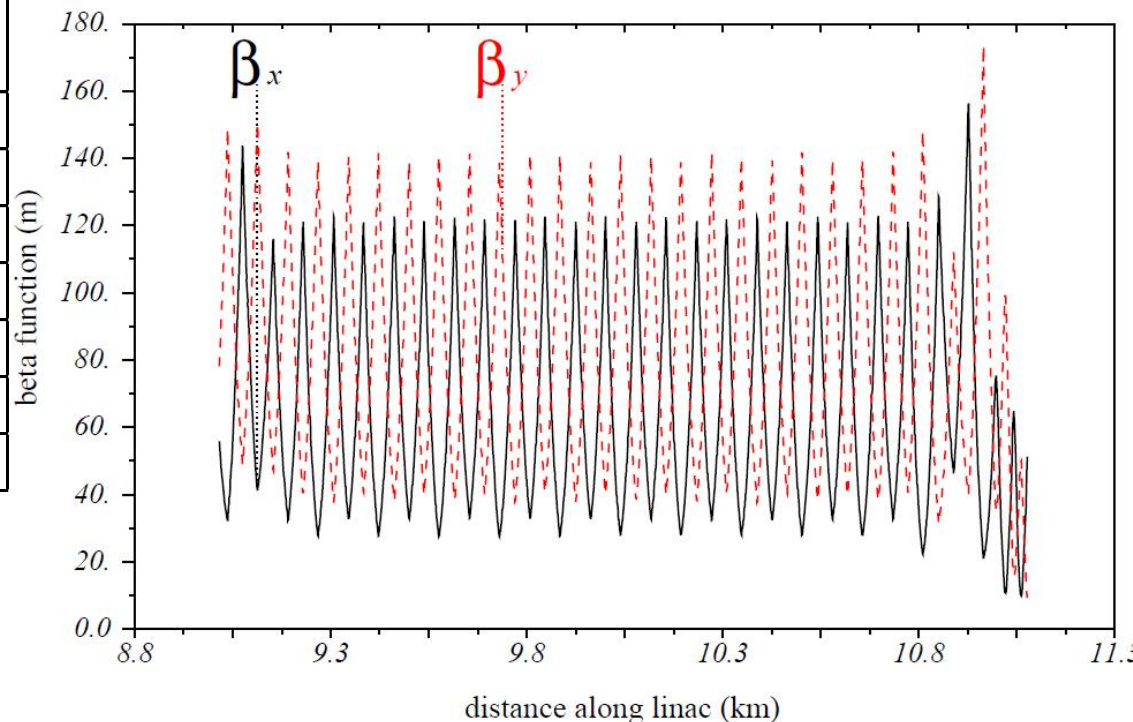
## Performance to Date - Gradient



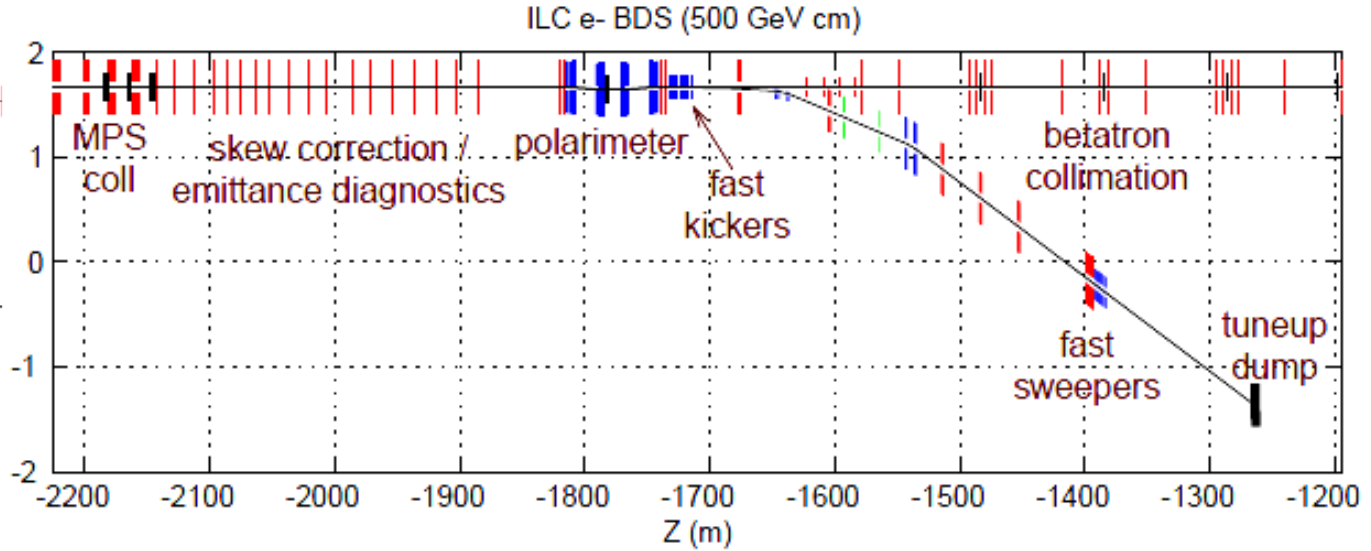
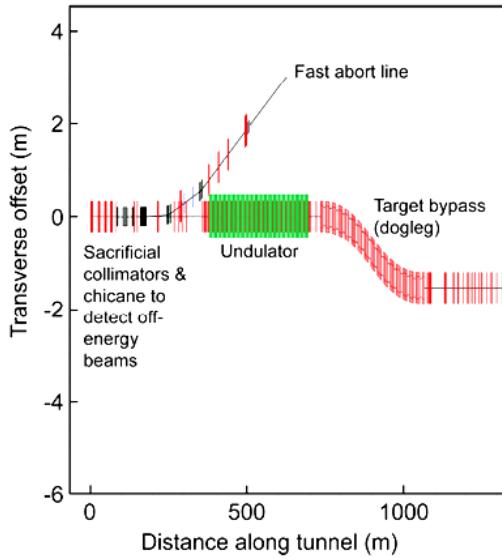
# Linac Beam Dynamics

- Main linac alignment tolerances

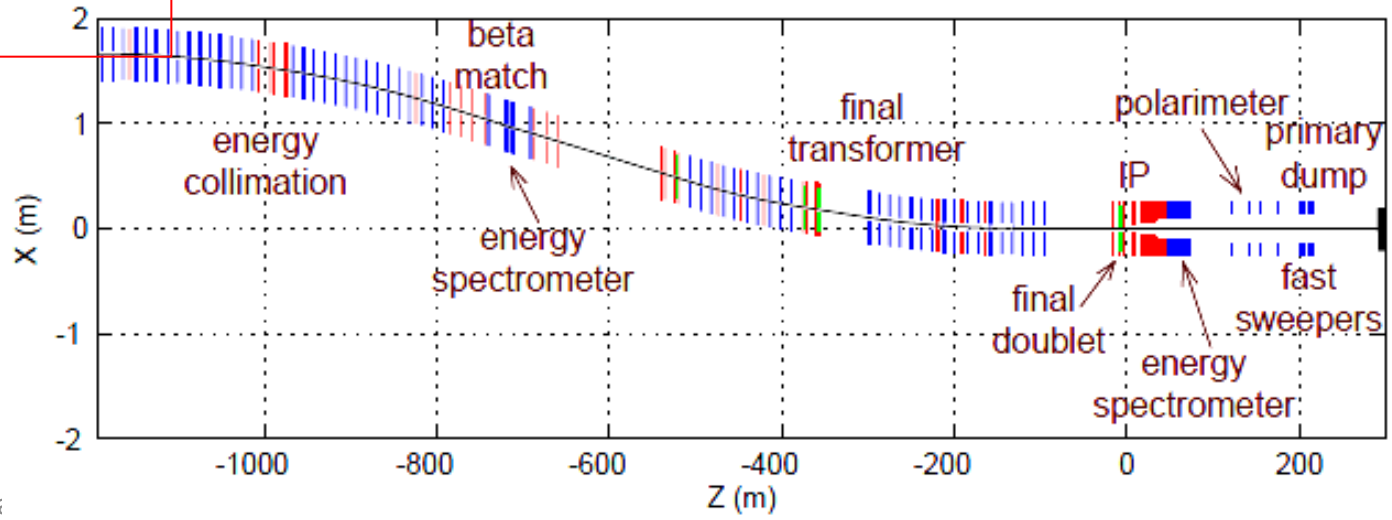
	with respect to	value		$\Delta\gamma\epsilon\gamma$ (nm)
Cavity offset	module	300 $\mu\text{m}$		0.2
Cavity tilt	module	300 $\mu\text{rad}$		<0.1
BPM offset	module	300 $\mu\text{m}$		400
Quadrupole offset	module	300 $\mu\text{m}$		<0.1
Quadrupole roll	module	300 $\mu\text{rad}$		2.5
Module offset	perfect line	200 $\mu\text{m}$		150
Module tilt	perfect line	20 $\mu\text{rad}$		0.7



# BDS (Beam Delivery System)



奥木さん担当。  
ATFについては  
黒田さん



# BDSの構成

- BDSの役割は最終的にはビームを衝突点で絞ることであるが、それ以外に多数の装置が並んでいる
- Machine Protection System (これはundulatorより上流)
- Tune-up/emergency dump
- Collimator
- Beam diagnostics section (beam energy, emittance, polarization)
- Muon absorber
- Crab cavity
- Feedback system
- Main beam dump

# 色収差

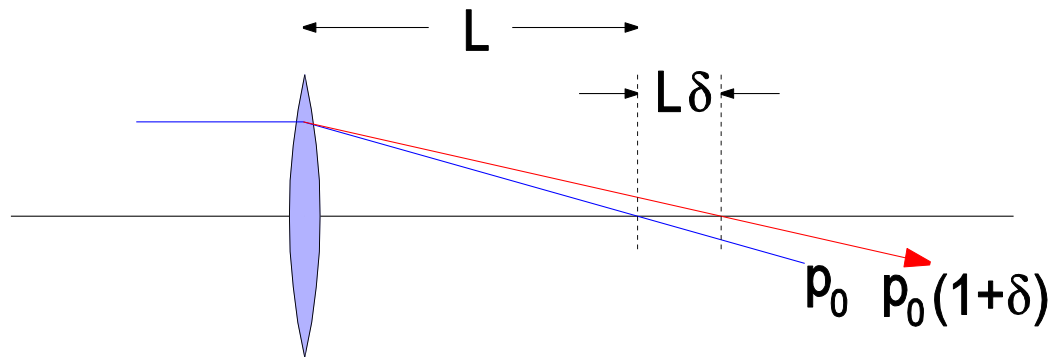
- 最後の4極磁石から焦点 ( $s=0$ ) までの距離を  $L$  とする。
- $p=p_0$  の粒子はこの点で絞られている。
- $p=p_0(1+\delta)$  の粒子は、4極磁石から  $L(1+\delta)$  あたりに焦点がくる。  
この焦点は、 $s=0$  から  $L\delta$  だけずれているから、そこでのベータ関数は

$$\beta = \beta_0 + \frac{(L\delta)^2}{\beta_0} = \beta_0 \left[ 1 + \left( \frac{L\delta}{\beta_0} \right)^2 \right]$$

- したがって色収差の目安は

$$\xi\delta, \quad \xi = \frac{L}{\beta_0}$$

- ILCでは、 $\beta_y = 0.4\text{mm}$ 、 $L \sim 6\text{m}$ 、 $\delta \sim 1/500$ 、  
したがって  $\xi\delta = 30$



# 通常のリングでの色収差補正

- 通常のリングでは次のように補正する
- 4極磁石の磁場は、 $B_{quad} = a(xe_y + ye_x)$
- 運動量 $p=p_0(1+\delta)$ の粒子にとっては、effectiveに

$$\frac{B_{quad}}{1+\delta} = a(xe_y + ye_x) - a\delta(xe_y + ye_x)$$

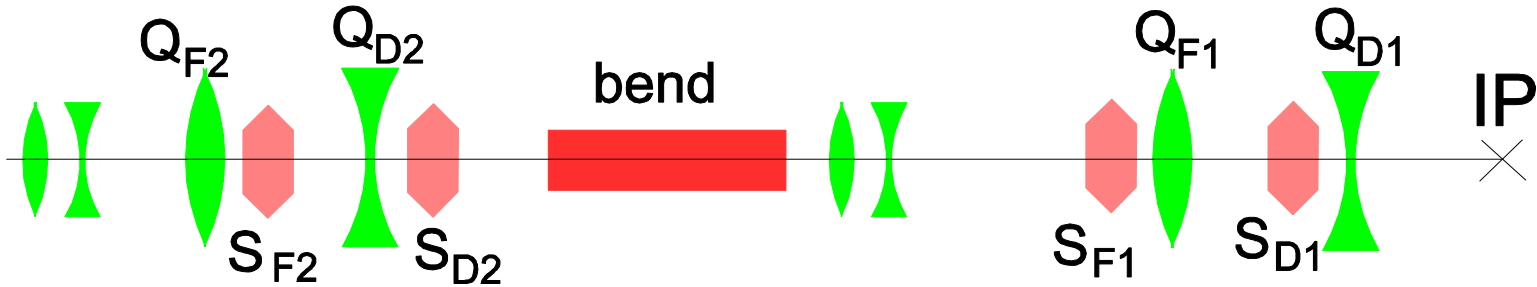
- この第2項が色収差である。
- 6極磁石の磁場は、 $B_{sext} = b[(x^2 - y^2)e_y + 2xye_x]$
- Dispersion  $\eta_x$ のある場所なら、運動量 $p=p_0(1+\delta)$ の粒子は $\eta_x\delta$ だけx座標がずれるから

$$\begin{aligned} B_{sext} &= b\left[\left((x + \eta\delta)^2 - y^2\right)e_y + 2(x + \eta\delta)ye_x\right] \\ &= \delta\text{に無関係な項} + 2b\eta\delta(xe_y + ye_x) + \delta^2\text{の項} \end{aligned}$$

- したがって、4極磁石と6極磁石をほとんど同じ場所におき、かつ $b\eta=a/2$ としておけば、 $\delta$ の項が消せる
- ただし、6極磁石のために $x,y$ の非線形項(上の $\delta$ に無関係な項)が現れる

# Local Chromaticity Correction

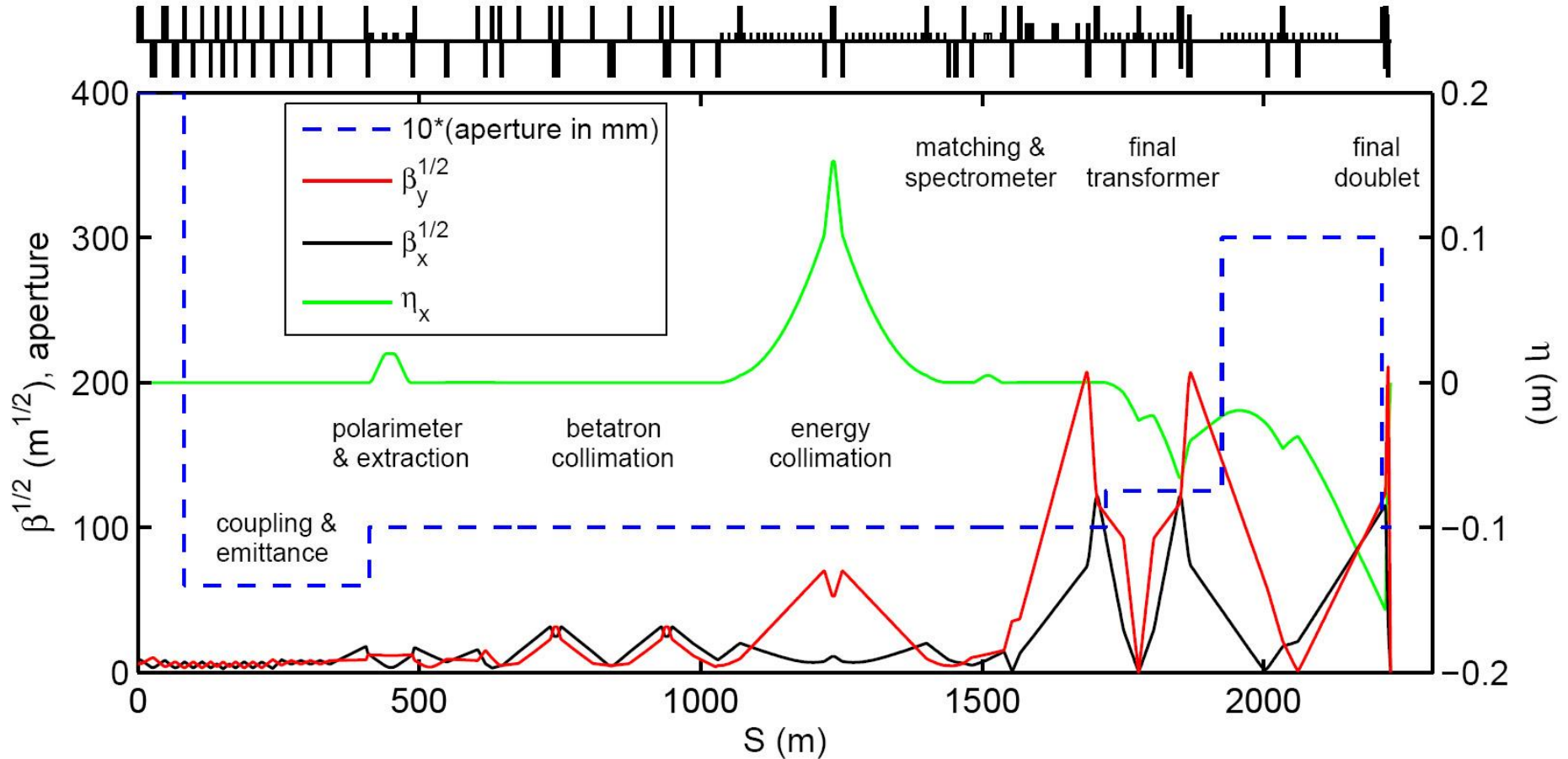
- 現在のILCの設計では、dispersion関数のゼロでない場所に、4極磁石と6極磁石を並べて置き、その場で色収差を消す方法をとっている（つまり、通常の方法）。



- 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目的で置かれている。
- この方式は ATF2 で採用されている
- IPでdispersion  $\eta_x$  は消えるが、その微分  $\eta_x'$  は残る



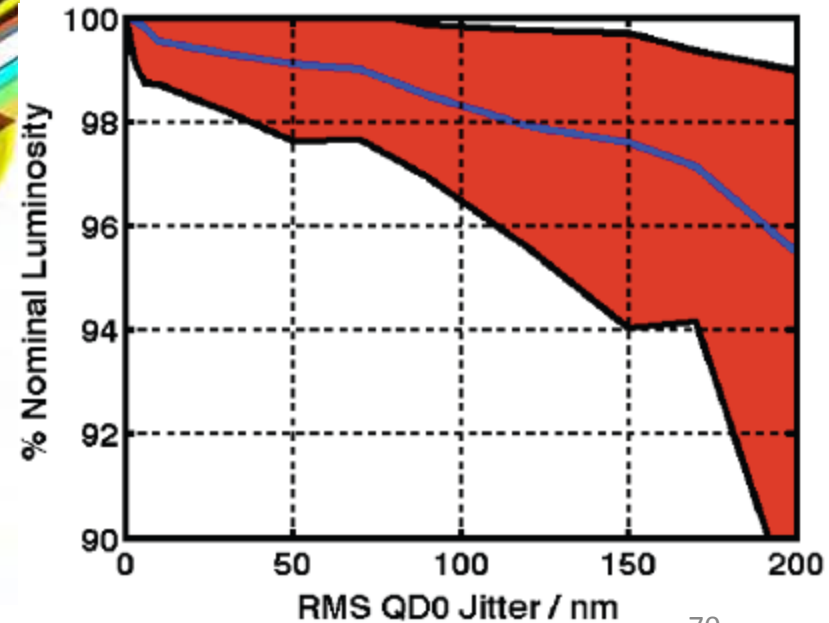
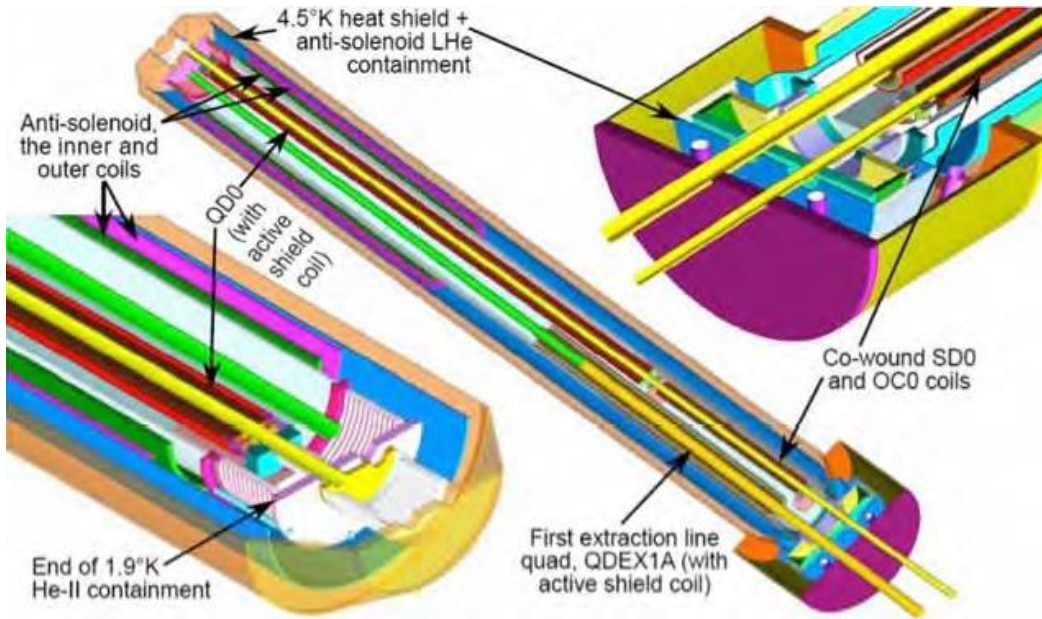
# FF Optics



Single IR BDS optics (2006e)

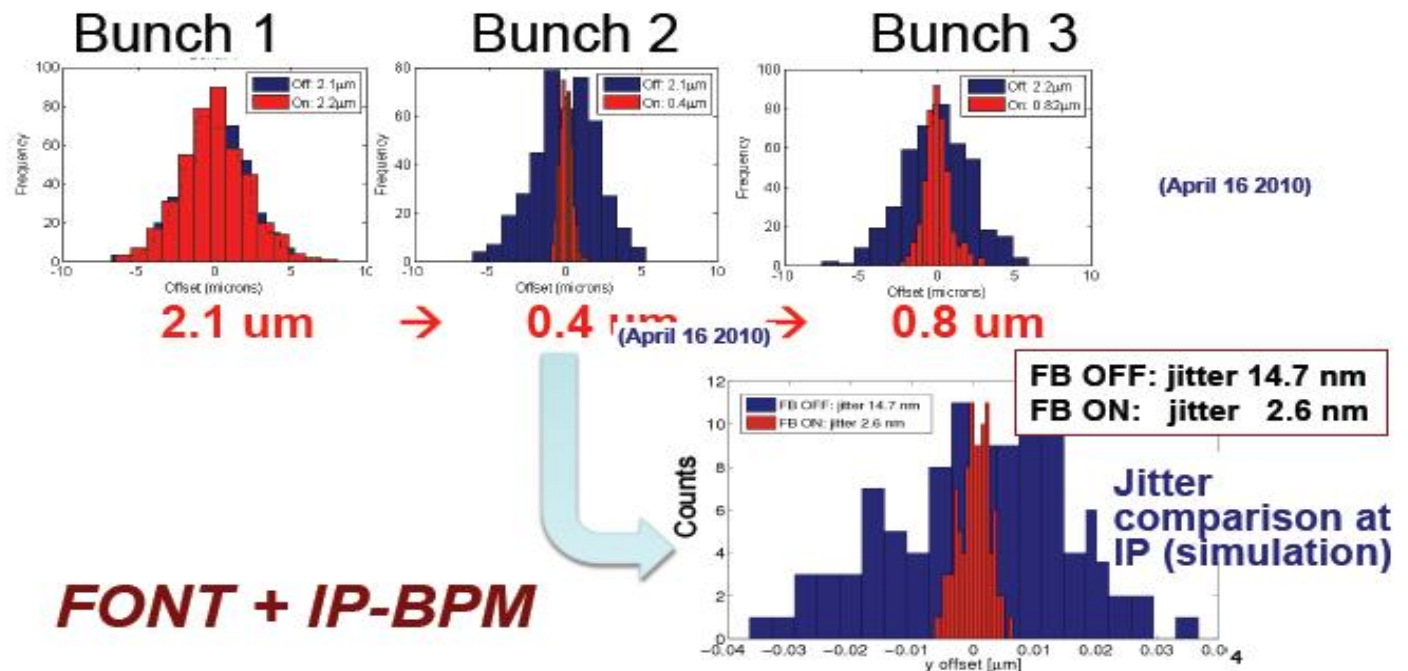
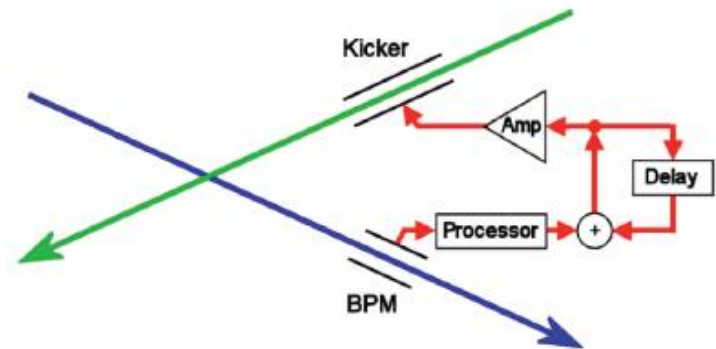
# Final Doublet

- Final doublet
  - Under study at BNL
  - Split QD0 (2m) into 2 pieces
  - Easier mechanical support
  - Flexibility for low energy optics
- QD0 Jitter
  - Simulation by White below
  - Shows average, 10%, 90% CL
  - Luminosity loss 1%  
→ jitter < 50nm rms



# IP Feedback

- Bunch interval is long enough for intra-train digital feedback
  - Advantage of SC collider
- Large disruption parameter
  - $D_y = 25$



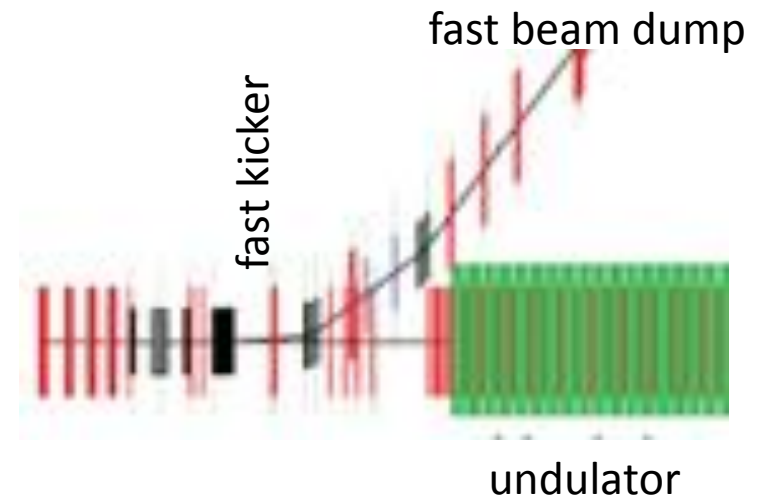
**FONT + IP-BPM**

PAC'11, NY, March  
30, 2011

N. Terunuma, KEK ATF Beam  
Instrumentation Program

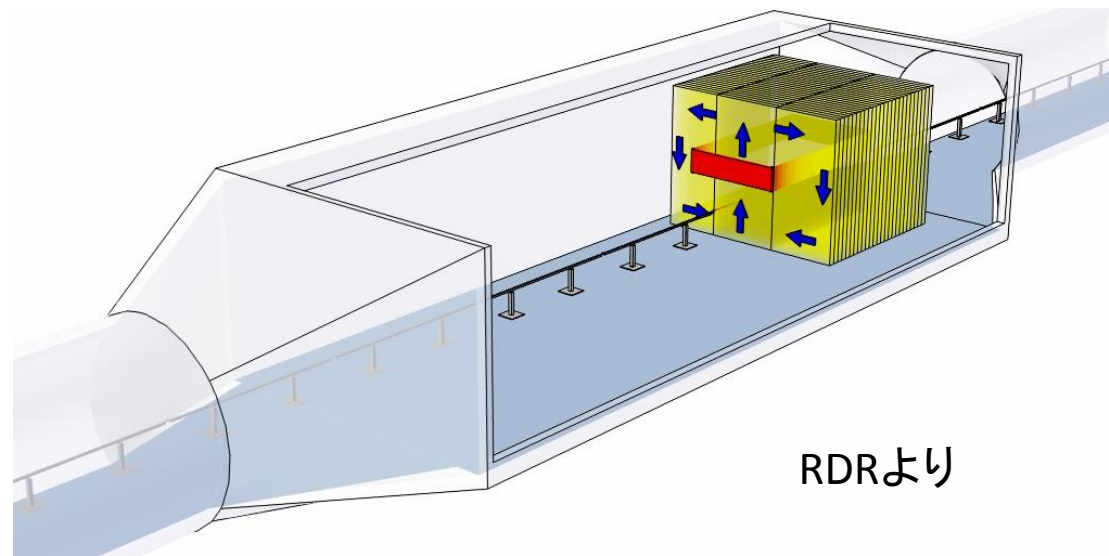
# MPS (Machine Protection System)

- Main linacはエネルギーずれ20%のビームでも通せるが、BDSの許容幅は極めて小さい
  - ML aperture 70mm
  - Undulator aperture 6mm
  - BDS aperture 20mm (collimator ~1mm)
- Main linacのなんらかのトラブルでエネルギーの大きく異なるビームがBDSに入るとmachine/detectorをこわす可能性がある
- これを止めるために、undulatorの上流にMPSを置く
- シケインとBPM (Beam Position Monitor)によりそのようなバンチを検出して、後続のバンチをfast kickerで蹴りだす



# Muon Wall

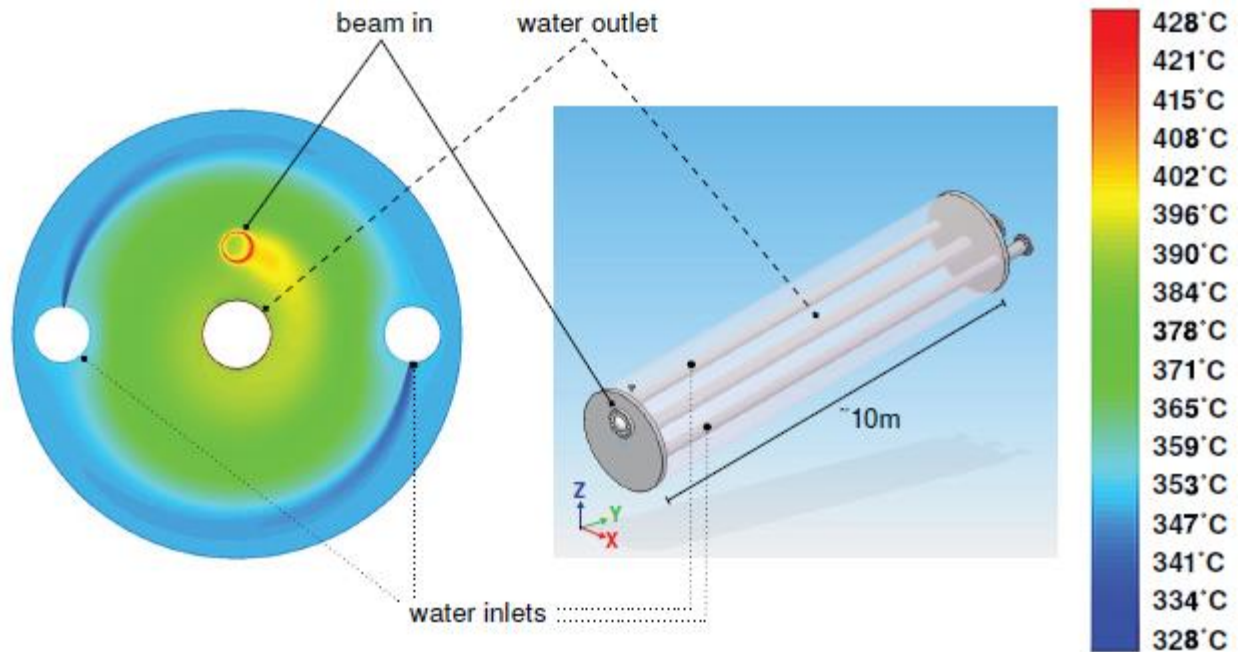
- Collimatorに衝突した粒子の一部はmuonを発生する
  - これはほとんどとまらずにdetectorに達する
- 
- これを阻止するために、トンネル断面をほとんど覆う磁化した鉄を使う
  - IPから350m
  - ~1.5Tesla.
  - 5m(19mまで延長可)





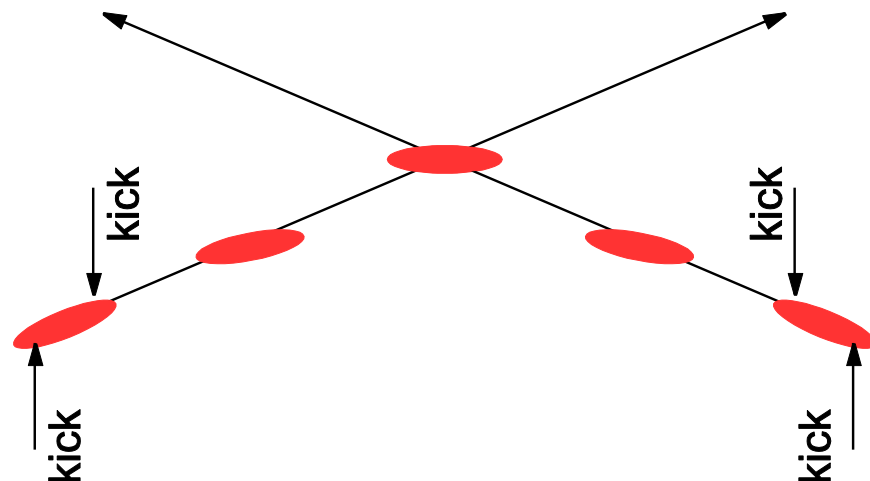
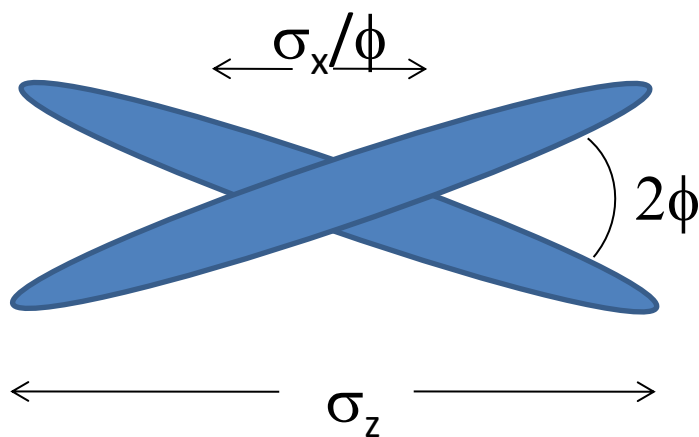
# Beam Dump

- Main dumpは4カ所、いずれも最大18MW。これは1TeV運転を見越している。
- ステンレス容器、直径1.8m、長さ11m ( $10X_0$ )
- 高圧水(10気圧)で沸点を上げる
- 窓は直径30cm厚さ1mmのチタン
- 1msの間、ビームは半径6cmの円を描く
- 水温は最高摂氏155度まで



# Crab Crossing

- 実験へのbackgroundをさけるため、ILCでは14 mradの交差角をつける
- $14\text{mrad} \gg \sigma_x / \sigma_z$  であるためこのままではluminosityがほとんどなくなる
- ILCではcrab crossingは必須
- 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



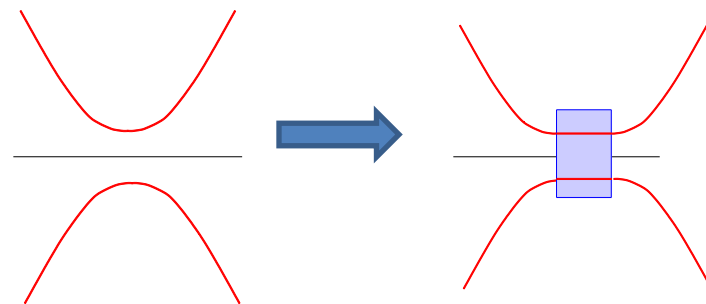
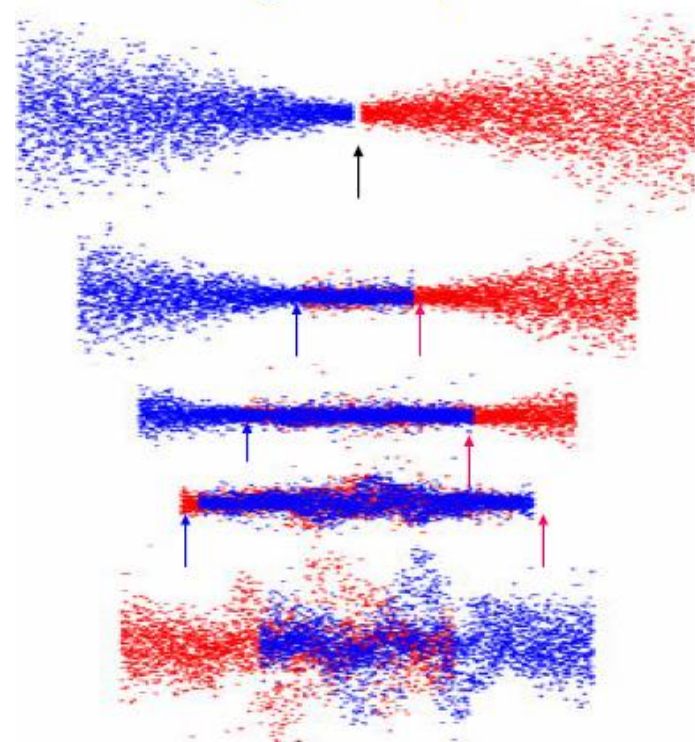
3.9GHz prototype (実物は9セル)



# Traveling Focus

- $\beta_y \ll \sigma_z$  ではhour-glassが厳しい
- 焦点の位置に収束レンズがあれば拡がりを抑えられる
- 相手のビームをレンズとして使える
- $D_y$  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のもんだがある
- 欠点
  - crab cavityのわずかな誤差が問題
  - このため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、運転時にかんがえればよい)

Travelling Focus  $\beta^* < \sigma_z$





# Waist Shift

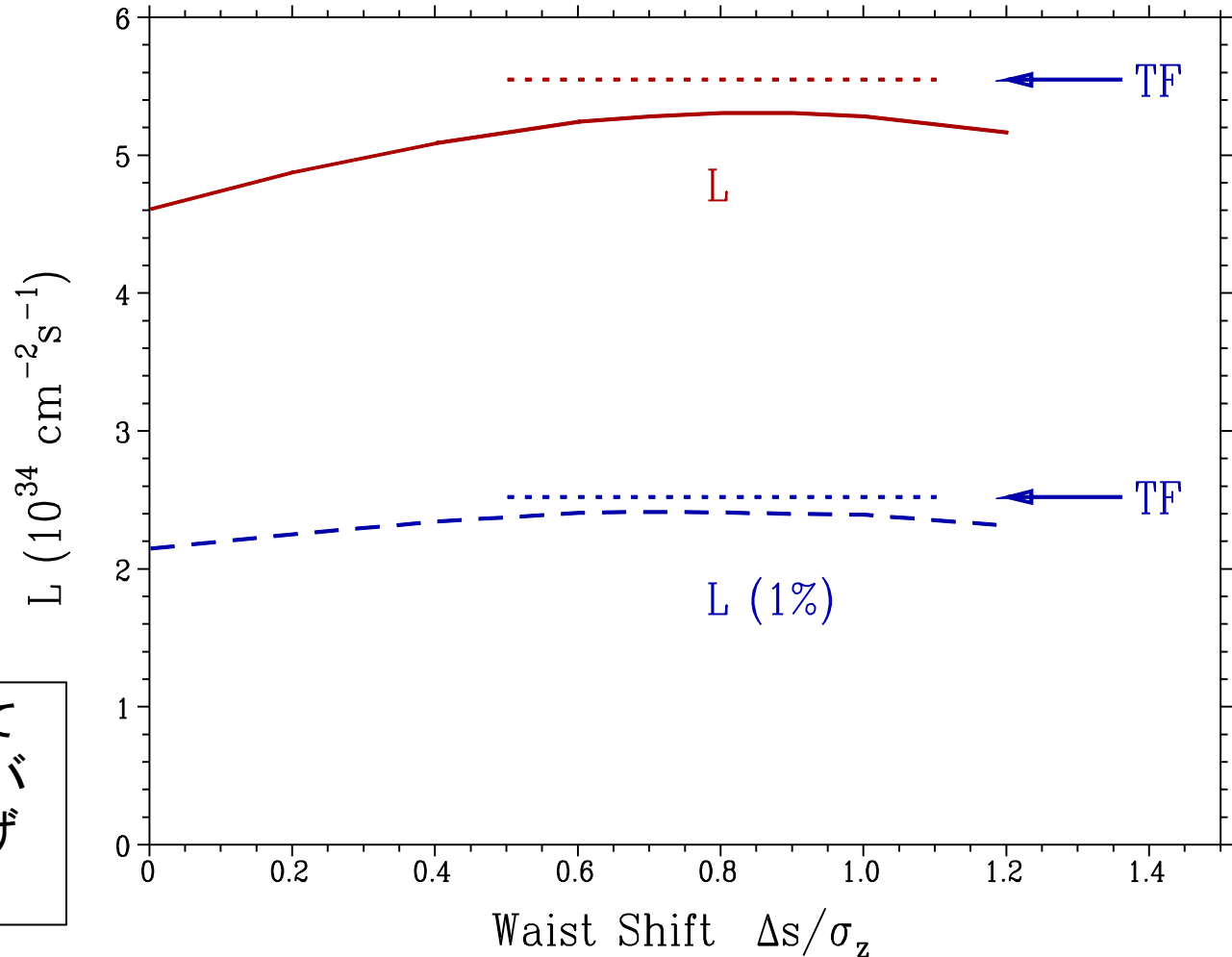
- 相手ビームの頭付近に焦点を作れば、焦点位置をバンチ上位置とともに動かさなくても、かなりの効果がある
- 焦点をnominal interaction pointの手前に置く
- ILCのパラメータの場合、 $0.8 \sigma_z$  あたりが最適
- Official parameter setではこれを採用

# Luminosity Enhancement by Waist Shift (B1b)

- Maximum around  $\Delta s = 0.8\sigma_z$
- 15% for L, 12% for L(1%) to be compared with ~20% by TF
- No change in beamstrahlung
- No change in pair angle (pair angle comes from Coulomb tail)

この図は2625バンチとして  
いる。TDR 1TeVでは2450バ  
ンチなので、6.6%ほど下げ  
る

Luminosity vs. Waist Shift (1TeV, B1b)



# Pair Creation

- 衝突中に次のような過程で電子・陽電子対が発生する

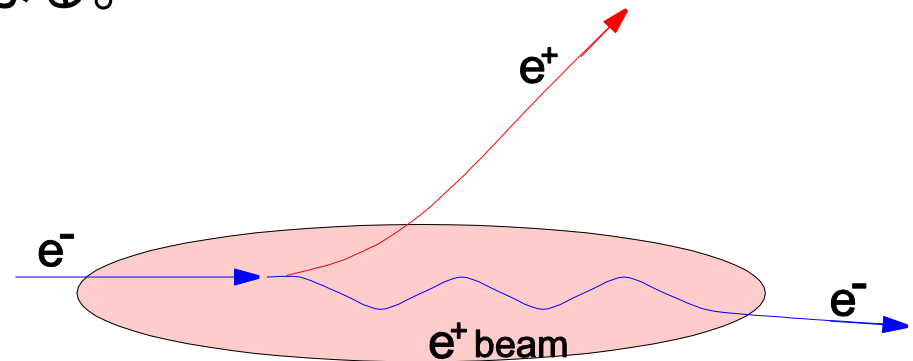
$$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^- \quad (\text{Breit-Wheeler process})$$

$$e^\pm + \gamma \rightarrow e^\pm + e^+ + e^- \quad (\text{Bethe-Heitler process})$$

$$e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^- + e^+ + e^- \quad (\text{Landau-Lifshitz process})$$

(左の  $\gamma$  は、beamstrahlungの光子)

- 数はバンチ衝突あたり  $10^5 \sim 10^6$  程度
- この対のうち、電荷の符号が相手の粒子と同符号のものはクーロン力ではじかれ、大きな角度で飛出すので、background noise の原因になる。



# Out-coming Angle of Pairs

- 対粒子のエネルギー  $\varepsilon E_0$  ( $\varepsilon \ll 1$ )
- 対向ビームと同符号の電荷とする
- 出射角は、水平方向・鉛直方向ほぼ同じ
- 粗い近似で

$$\theta \sim \left[ \frac{\log(4\sqrt{3}D_x/\varepsilon)}{\sqrt{3}\varepsilon D_x} \right]^{1/2} \frac{2Nr_e}{\gamma(\sigma_x + \sigma_y)}$$
$$D_x = \frac{2Nr_e}{\gamma} \frac{\sigma_z}{\sigma_x(\sigma_x + \sigma_y)}$$

- 対数因子を無視すると

$$\theta \propto \left[ \frac{2Nr_e}{\gamma\varepsilon\sigma_z} \right]^{1/2} \Rightarrow p_T \propto \sqrt{\varepsilon}$$

- これはほとんど線電荷密度  $N/\sigma_z$  できまり、transverse sizeによらない

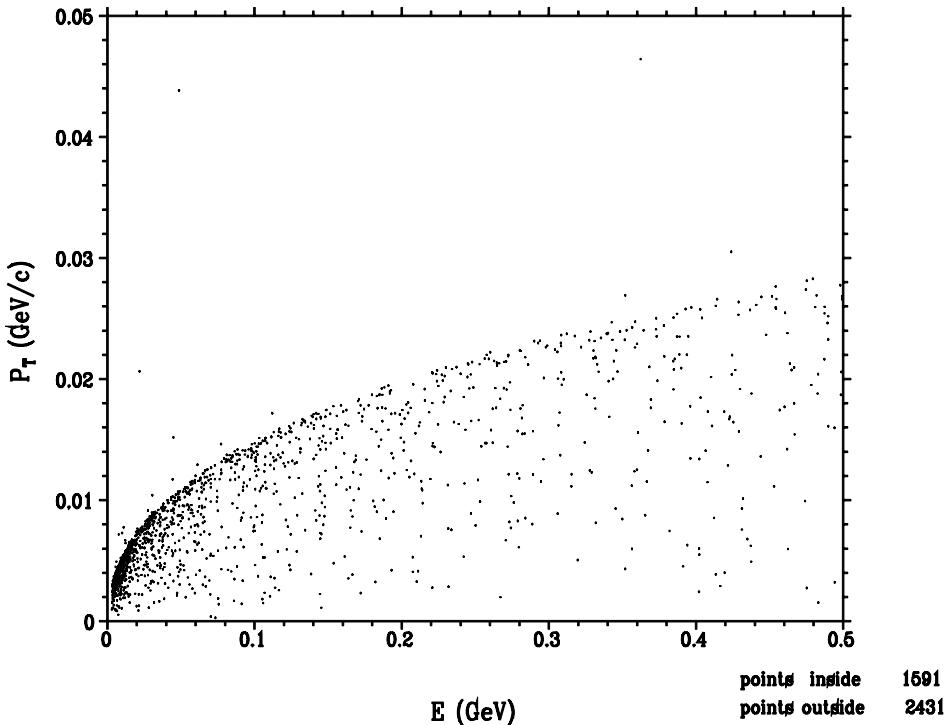
# Pair Angle分布の例

- 1TeV, short and long bunch
- 横軸: ペア粒子エネルギー、縦軸  $P_T$

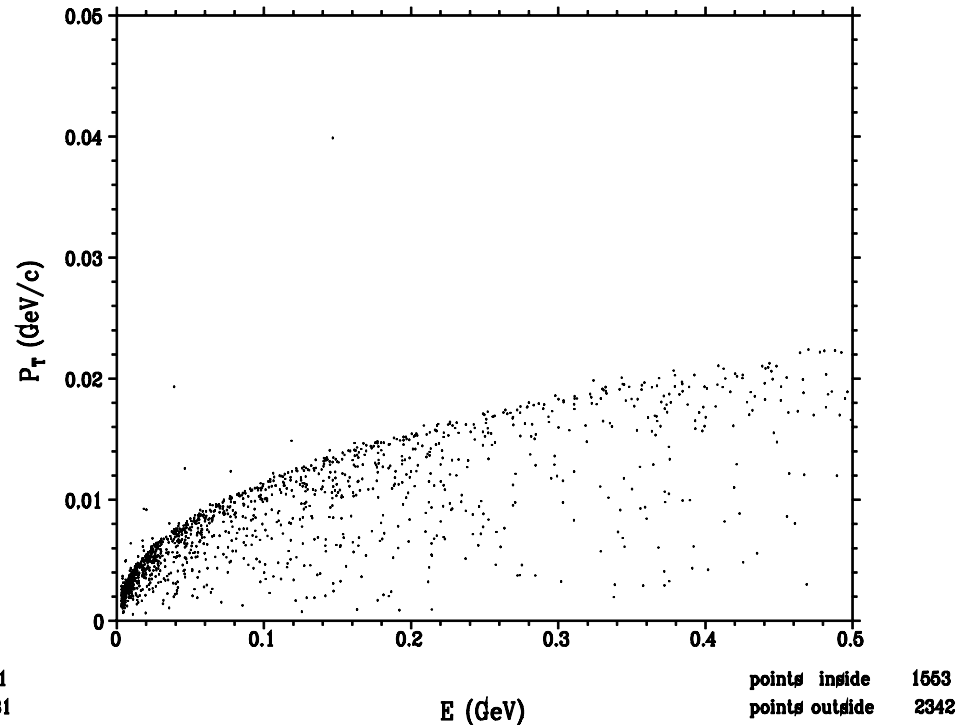
10% 150  $\mu\text{m}$

10% 300  $\mu\text{m}$

cap10%pairTF  
Incoherent Pair Energy-PT Distribution

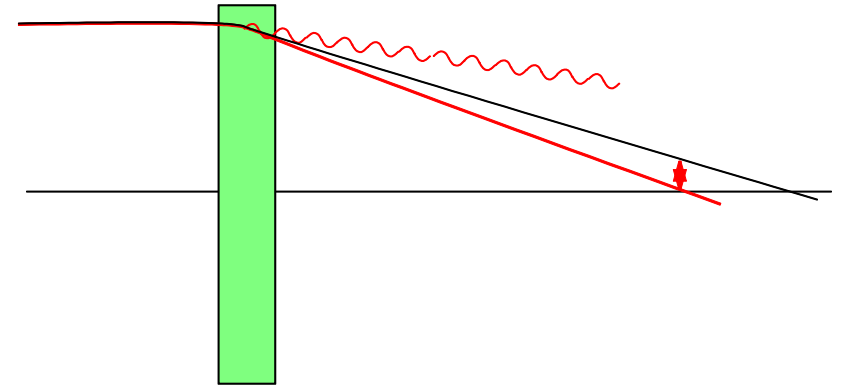


20110927(083023) cap10%longBunch2TF  
Incoherent Pair Energy-PT Distribution



# Oide Limit

- 最後の4極磁石中のsynchrotron輻射により焦点がぼやける



$$(\sigma^*)^2 = \epsilon_g \beta^* + C (\epsilon_g / \beta^*)^{5/2}$$

C: 収束系の詳細によるパラメータ

$$\sigma_{min}^* = \text{const} \times C^{1/7} \epsilon_g^{5/7}$$

- ほとんどC (つまり収束系の設計)によらない
- ILCではほとんど効かないが、CLICでは重要

# Luminosity Upgrade

- Baseline (1326 bunches)
  - $E_{CM}=250\text{GeV}$ では、全体の繰返しを上げて、Luminosityを倍にすることが可能
    - Collision rate 10Hz ---- detectorの用意が要る
  - $E_{CM}=500\text{GeV}$ では、電力が不足する
  - $E_{CM}=350\text{GeV}$ では、7Hzくらいまで可能
- High power (2625 bunches)
  - RF system増強、およびe-cloudの状況によってはpositron DRの追加が必要
  - $E_{CM}=250\sim 500\text{GeV}$ にわたってLuminosity倍増が可能

Luminosity ( $\times 10^{34}$  /cm<sup>2</sup>/s)

	#of bunches	Collison freq.	250GeV	350GeV	500GeV
Baseline	1312	5	0.75	1.0	1.8
		10(7)	1.5	(1.4)	
Hi power	2625	5	1.5	2.0	3.6
		10(7)	3.0	(2.8)	

# Higgs Factories

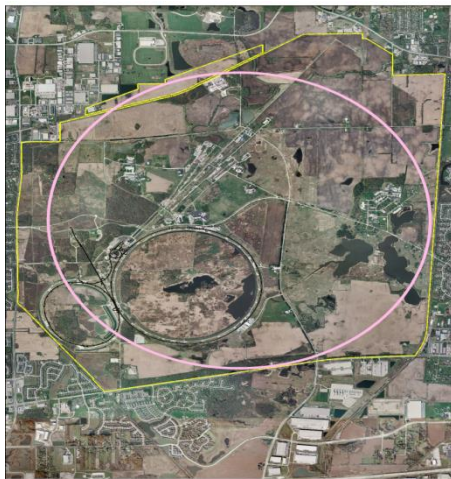


# Possible Higgs Factories

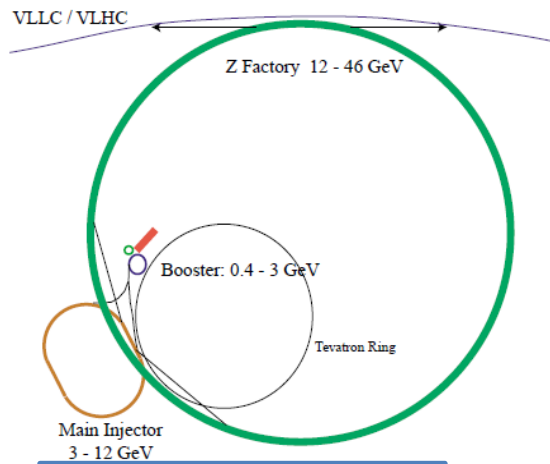
- **$e^+e^-$  LC**
  - ILC
  - CLIC
  - NLC/GLC-type (klystron-based normal-conducting LC)
- **$e^+e^-$  Ring Colliders**
  - Ring Colliders
    - FCCee, SuperTRISTAN, FNAL site filler, CEPC, .....
- **$\mu^+\mu^-$  Collider**
- **$\gamma\text{-}\gamma$  Collider**
  - SC Linac-based
    - ILC-based
    - Recirculating linac
    - ERL based
  - NC Linac-based
    - CLIC-based
    - NLC/GLC-type
    - SLC-type

# Revival of e+e- Ring Colliders ?

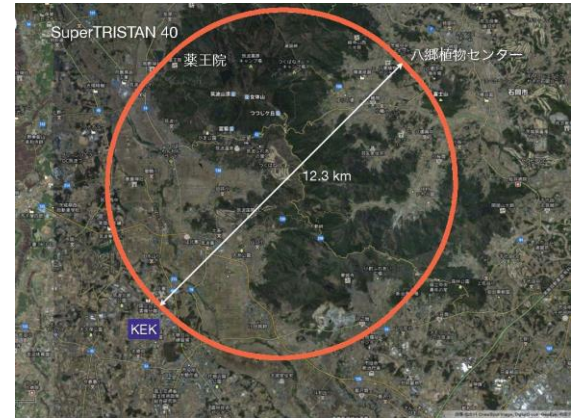
- To create Higgs by e+e- → ZH requires  $E_{CM} \sim 240\text{GeV}$
- This is not too high compared with the final energy 209GeV at LEP



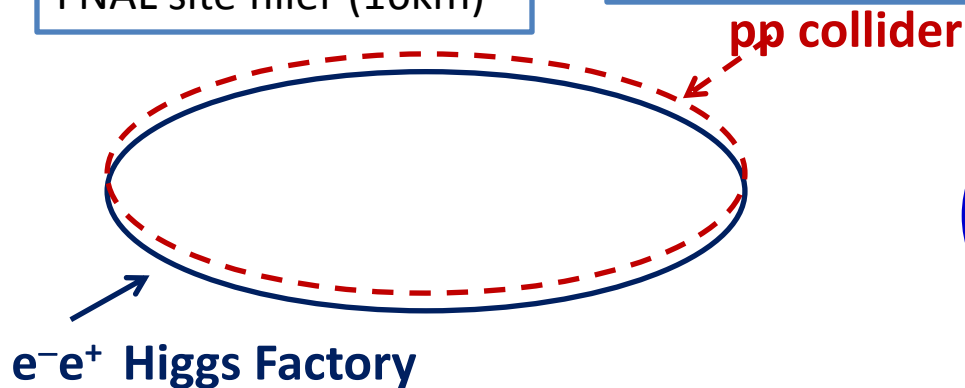
FNAL site filler (16km)



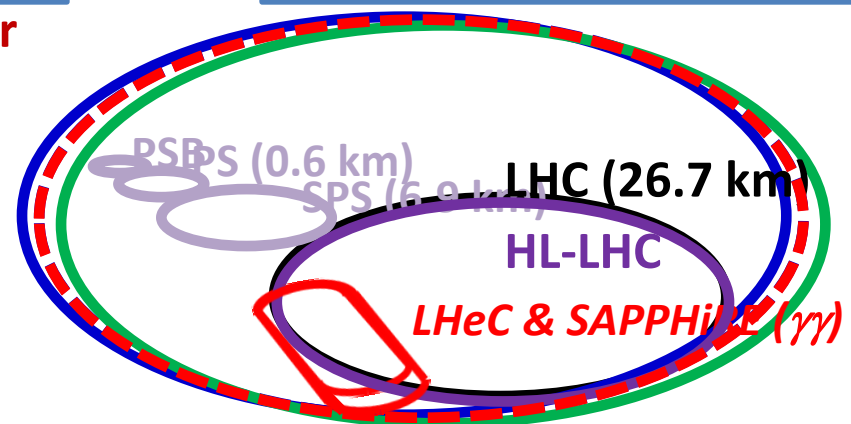
VLCC (233km)



SuperTRISTAN (40km, 60km)



CEPC (China) (50km, 70km)



FCCee (100km)

## 2 Aspects of Synchrotron Radiation Loss

- Energy loss by individual particles must be compensated for

$$U = 0.088 \frac{E^4 [\text{GeV}]}{\rho [\text{m}]} \quad [\text{MeV}]$$

- This (almost) determines RF **voltage** per turn
  - ~7GeV in LEP tunnel
  - Still possible owing to the improvement of superconducting cavity technology
- But, to get required electric power, you must multiply the beam current
  - Real limitation comes from the wall-plug power
  - Reduce the beam current
  - Small beam size for high luminosity

# Beamstrahlung による $e^+e^-$ Ring Colliderの限界

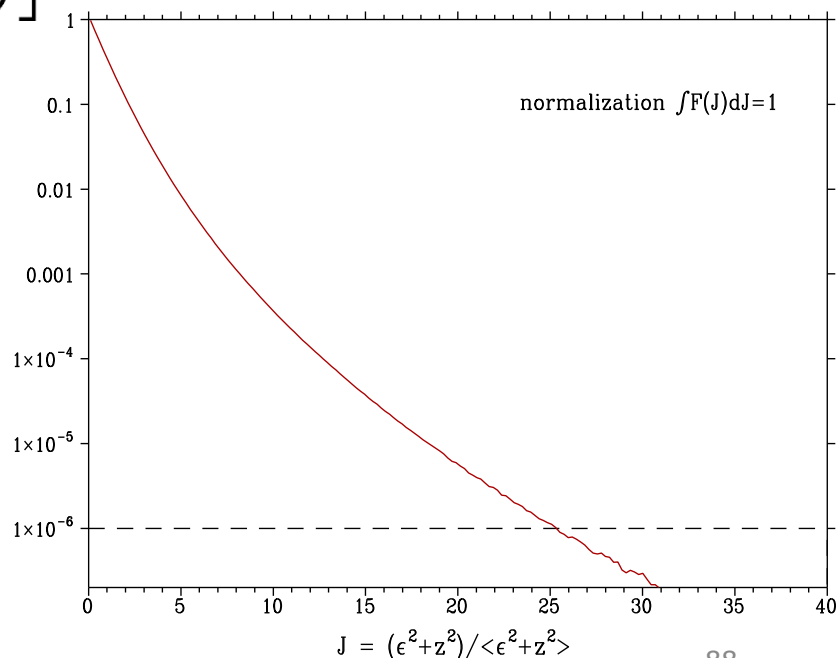
- Beamstrahlung の high-energy tail は電子・陽電子のおおきなエネルギー損失をもたらす

$$\Upsilon_{max} \approx \frac{2Nr_e^2\gamma}{\alpha\sigma_z(\sigma_x + \sigma_y)}$$

$$\frac{dW}{d\omega} \propto \exp\left[-\frac{2\omega}{3\Upsilon(E_e - \omega)}\right]$$

- 損失の大きい粒子は周回運動を続けられない (momentum band-width)
- ビーム寿命に影響
  - Top-up ringが必要
- したがって、ring colliderはLCよりもbeamstrahlung に対して弱い

Distribution of Longitudinal Action J



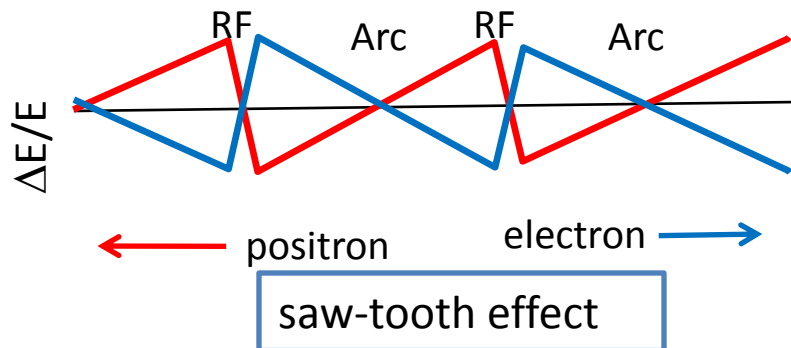
# Ring $e^+e^-$ Colliderの(宣伝されている)利点

- 240GeV (TLEP-H) でのluminosity は、ILCよりずっと高い(衝突点1つでも)
  - $10^{36} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  at Z-pole (TLEP-Z)
- t-tbar threshold (TLEP-t)でのluminosity はILCなみ
- 複数の IPが可能 (often use 4)
- 十分経験済の技術
  - Luminosity for sure
  - TDR soon
- ILCより安い
  - Used to be said “~half of ILC?”
- トンネルは 100TeV程度までのppに再利用できる

		CEPC	FCCee IPAC14				
		2014Jun ICHEP	Z	Z(crab w.	W	H	t
<b>Top Level Parameters</b>							
Energy (center of mass)	GeV	240	91	90	160	240	350
Luminosity (per IP)	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	1.77	28	219	12	6	1.7
No. of IP		2	4	4	4	4	4
Size (length or circumference)	km	50	100	100	100	100	100
<b>Other Important Parameters</b>							
Bending radius	km	6.2	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4
Ne	$10^{10}$ per bunch	35.2	18	10	7	4.6	14
nb (number of bunches) per beam		50	16700	29791	4490	1360	98
I(beam)	mA	16.9	1450	1431	152	30	6.6
$\Delta E(\text{synch})$	GeV/turn		0.036	0.035	0.348	1.76	7.98
P(synch) per beam	MW	50	50	50	50	50	50
Critical energy of synch. rad.	MeV	0.62	0.02	0.02	0.11	0.37	1.14
$\epsilon_{x,n}$	mm-mrad	1620	2582	12	517	221	685
$\epsilon_{y,n}$	mm-mrad	4.93	5.34	0.09	1.10	0.47	0.68
$\epsilon_{x,g}$	nm	6.9	29	0.14	3.3	0.94	2
$\epsilon_{y,g}$	nm	0.021	0.06	0.001	0.007	0.002	0.002
beta_x IP	mm	800	500	500	500	500	1000
beta_y IP	mm	1.2	1	1	1	1	1
$\sigma_x$ , IP	nm	74300	121000	8000	26000	22000	45000
$\sigma_y$ , IP	nm	160	250	32	130	44	45
$\sigma_z$ , IP	mm	2.12	1.64	1.9	1.01	0.81	1.16
sigma_E, IP	%	0.13	0.04	0.04	0.07	0.1	0.14
$\sigma_z$ , IP (incl.beamstr)	mm	2.42	2.56	6.4	1.49	1.17	1.49
sigma_E, IP (incl.beamstr)	%	0.150	0.06	0.12	0.09	0.14	0.19
Full crossing angle	mrad	0	0	30	0	0	0
Beam lifetime due to radiative Bhabha	sec	3238.8	17220	2280	4320	1800	1380
b-b tune shift x		0.097	0.031	0.032	0.06	0.093	0.092
b-b tune shift y		0.069	0.03	0.175	0.059	0.093	0.092
Longitudinal damping time	turns	40	1320	1338	243	72	23
RF frequency	GHz	0.70	0.8	0.3	0.8	0.8	0.8
RF Voltage	GV	6.87	2.5	0.54	4	5.5	11
Momentum compaction		4.00E-05	1.80E-04	2.00E-05	2.00E-05	5.00E-06	5.00E-06
Synchrotron oscillation tune		0.196					
Natural polarization time	hour	0.335	240	254	14.3	1.88	0.286
Geometric Luminosity /IP (no hour-glass)	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	2.486	42.7	2776	15.5	7.09	2.26
hour-glass factor		0.704	0.64	0.94	0.79	0.8	0.73

# Ring $e^+e^-$ の技術的課題(1)

- Optics
  - 低emittance
    - 最近の設計では、FCCeeは $\varepsilon_{yg}=2\text{pm} = \text{LEP2の}1/100$
    - CEPCは21pm
    - $\beta y^* \sim 1\text{mm}$ のもとで大きなmomentum bandwidth ( $> 2\%$ )
  - Saw-tooth effects
- Machine configuration
  - 2 collider rings (FCCee) or single ring with pretzel (CEPC)
  - RF sectionを2リングで共有する(FCCee, 日ghえねrgy)
  - Top-up ring はdetectorをbypassしなければならない

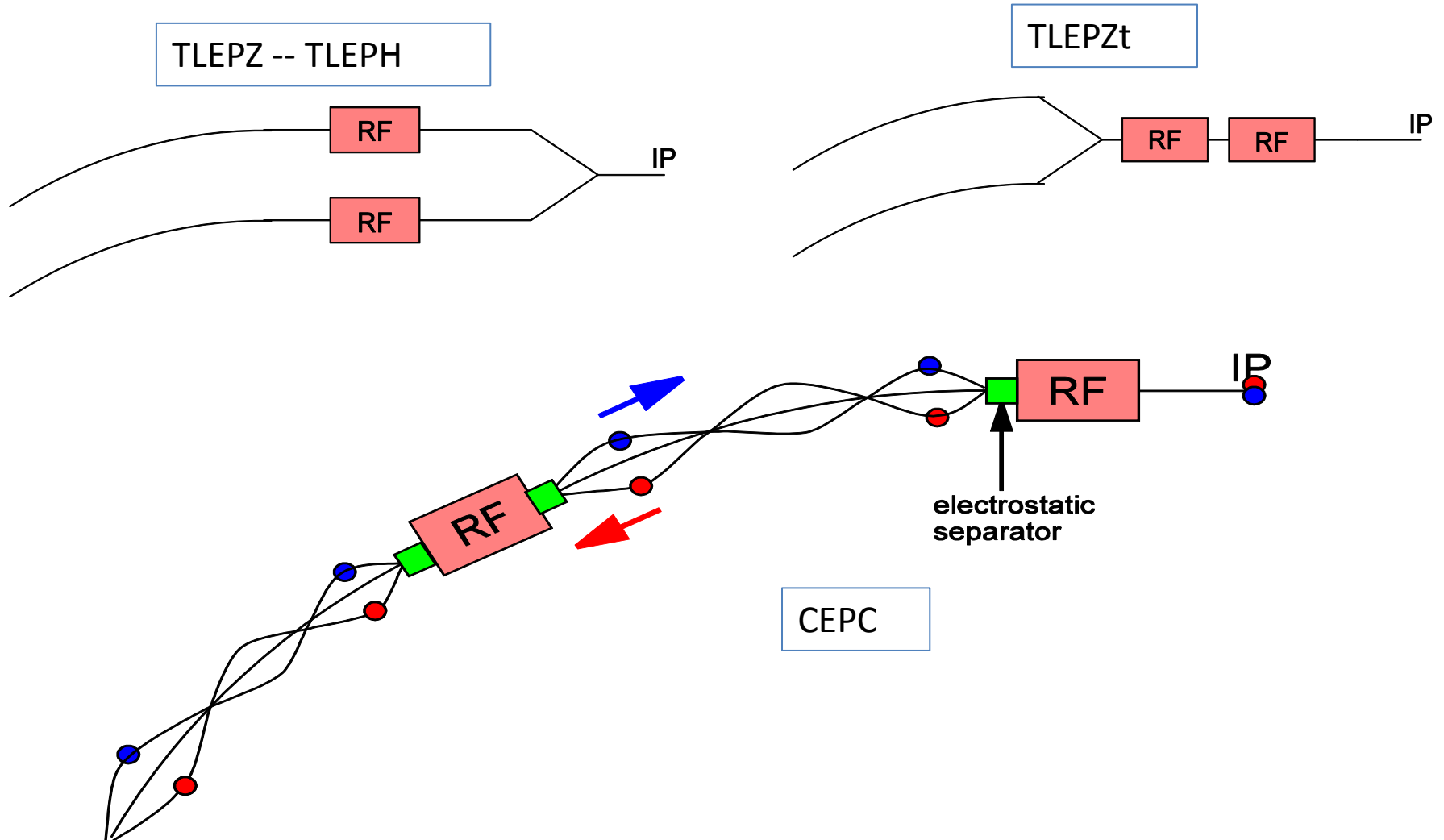


# TLEP技術的課題(2)

- Beam 力学
  - Beam-beam 相互作用
    - 複数IPの効果
    - 大きなhour-glass因子 ( $\beta_y=1\text{mm}$ ,  $\sigma_z=1-2\text{mm}$ )
    - 速い synchrotron 振動 (FCCee at tt 0.7, CEPC 0.2)
  - 長い RF section (~600m)に起因する不安定性 (特に FCCEE at Zpole)
- RF
  - power coupler (CW)
    - >100MW into 600m cavity section
    - 1.3GHz は無理。700MHz ならOKか。Need R&D. FCCeeは400MHz?
    - CEPCは700MHz
- 真空
  - Synchrotron radiation のシールド
    - critical energy  $\sim 1.5\text{MeV}$   $\rightarrow$  neutronの発生
    - C=100kmの結果critical energy  $\sim 1.1\text{MeV}$  に緩和

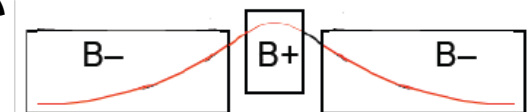


# Configuration of Collider Ring(s)

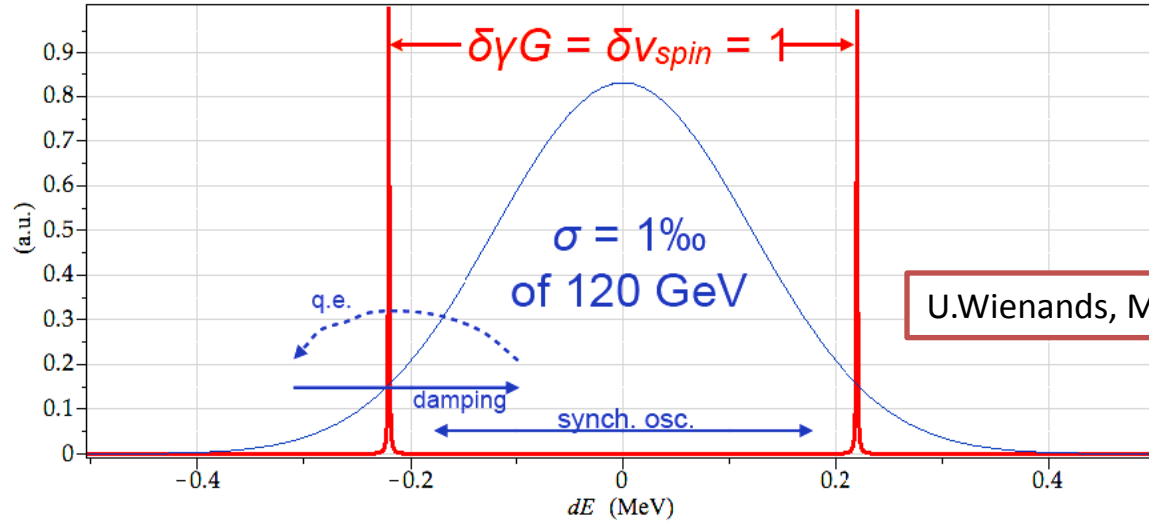


# Ring $e^+e^-$ Colliderでのビーム偏極

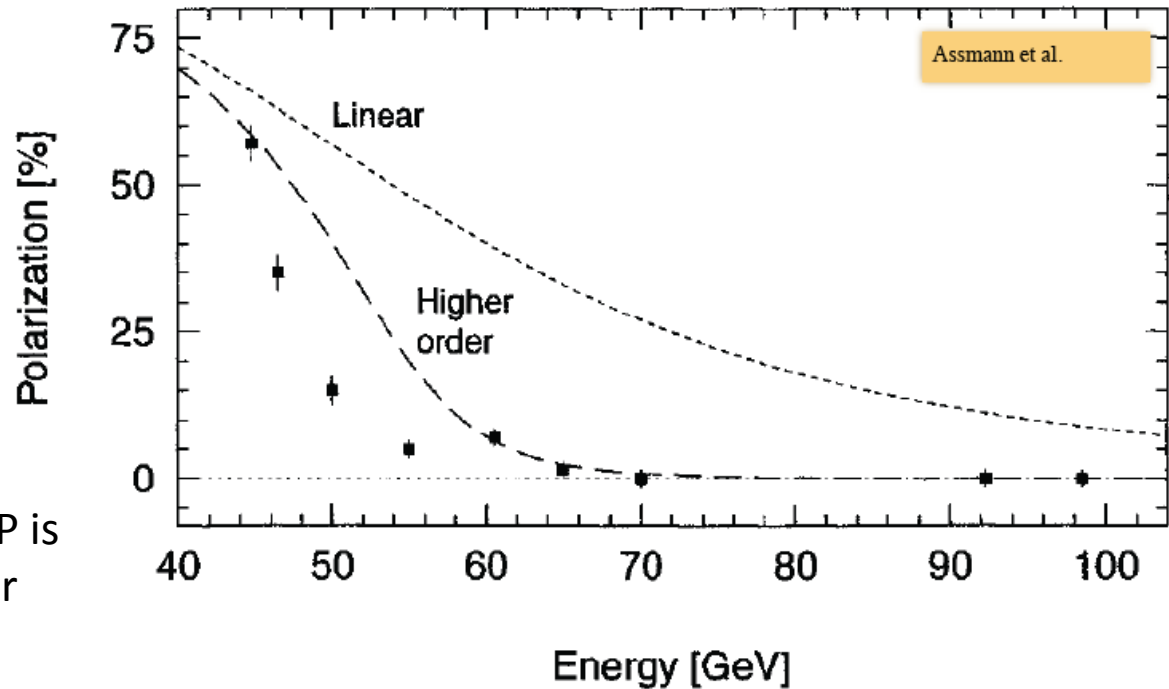
- 偏極の用途
  - A) Beam energy calibration (LEPで  $\Delta M_Z \sim 2\text{MeV}$  の実績)
  - B) Polarized colliding beam experiment
- Sokolov-Ternovの自発偏極
  - 偏極時間は、FCCee at Zpoleで、 $\tau_{\text{pol}} = 240$ 時間 (propto.  $\rho^3/E^5$ )、 $W_{\text{pair}}$  thresholdで14時間
  - ビームエネルギー幅 ( $E^2/\sqrt{\rho}$ に比例)が、スピン共鳴間隔  $0.44\text{GeV}$  ( $=mc^2/a$ ) に比べて無視できなくなると、depolarizationが起こる。 $W_{\text{pair}}$  thresholdでギリギリ。Higgs領域では偏極不可能。
- A)のためには、pilot bunchesが使える
  - 偏極度は $\sim 5\%$ でよい。
  - Pilot bunchesは衝突しないので寿命が長く、自然偏極時間近くまでもつ。したがって、 $\Delta M_Z$ の改善は有力。 $\Delta M_W$ はエネルギー幅のためギリギリ。
  - ただし、到達精度は??
  - Pilot bunchesとcolliding bunchesのエネルギー差? ビームエネルギー幅の $\sim 1/100$ までできるか? この精度ではcolliding bunchesのエネルギー分布は多分非対称
- B)のためには、
  - Colliding bunchesの寿命(1時間程度以下)が偏極時間よりはるかに短いので、polarization wigglerが必要
  - しかし、偏極時間を $1/100$ にすると、1粒子のシンクロトロン放射が100倍になる
  - さらに、スピンをlongitudinalに回転しなければならない
  - したがって、B)はZ-poleでも望み薄



Depolarization due to energy spread



Polarization at LEP  
Comparison of theory and observation



Energy scale for TLEP is  $3^{1/4} = 1.3$  times higher

# Power consumption for TLEP at 175 GeV (MW)

2013年4月のもの。新しい評価がない

	TLEP
Wall-plug RF power	218 <sup>(1)</sup> [181 w/o RF feedback]
RF cryo power	24 <sup>(2)</sup>
Magnet system power	6 <sup>(3)</sup>
Cooling and ventilation	60 <sup>(4)</sup>
Experiments	25 <sup>(5)</sup>
General services	15 <sup>(5)</sup>
SPS & PS as pre-injectors (20 & 3.5 GeV)	5 <sup>(6)</sup>
e-/e+ source & pre-pre-injector	1 <sup>(7)</sup>
<b>Total</b>	<b>354</b> [318 w/o RF feedback]

(1): wall power efficiency: power converters: 95%; klystron efficiency: 65%; transmission losses 7%; overall 55% (from the LHeC design report); includes 36 MW for RF feedback margin (which may not be necessary)

(2): 60% of LHeC ; cryo power depends on cavity  $Q_0$  (34 kW at 2 K for 1200 cavities with  $Q_0 = 2.5e10$ )

(3): from LHeC ring-ring magnet design; power for 1 magnet (5.4 m, 0.075 T) = 270 W; assuming 2x80 km of magnets at 0.065 T (dipole field for 175 GeV beam energy)

(4): TLEP three times more than LHC; maximum capacity for LEP

(5): as for LHC (see appendix)

(6): conservative estimate scaled from higher-energy proton operation

(7): L. Rinolfi, private communication

TLEP WS, Apr.2013

# TLEP cost breakdown – extremely rough (GEuro)

	TLEP
Bare tunnel	3.1 <sup>(1)</sup>
Services & Additional infrastructure (electricity, cooling, ventilation, service cavern, RP, surface structure, access roads)	1.0 <sup>(2)</sup>
RF system	1.0 <sup>(3)</sup>
Cryo system	1.0 <sup>(4)</sup>
Vacuum system & RP	0.5 <sup>(5)</sup>
Magnet system for collider & injector ring	0.8 <sup>(6)</sup>
Pre-injector complex SPS reinforcements	0.5
<b>Total</b>	<b>7.9</b>

(1): J. Osborne, Amrup study

(2): very rough guess, conservative escalated extrapolation from LEP

(3): B. Rimmer, SRF cost per GeV or per Watt for CEBAF upgrade, 2010

(4): ½ LHC system [also, possibly some refurbished LHC plants could be reused]

(5): factor 2.5 higher than KEK (K. Oide) estimate for 80 km ring

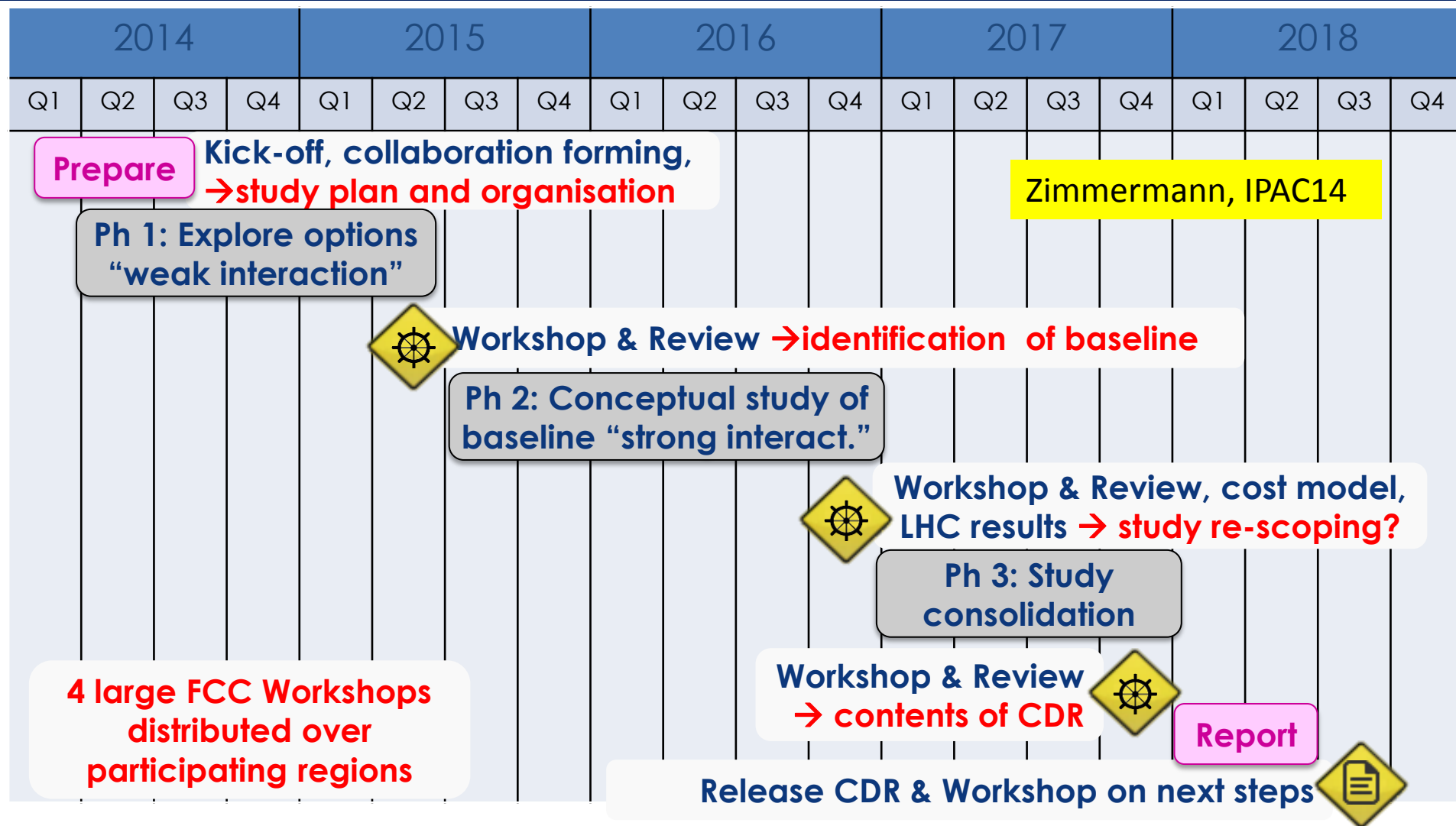
(6): 24,000 magnets for collider & injector; cost per magnet 30 kCHF (LHeC); 10% added; no cost saving from mass production assumed

2014/7/19 ILC Camp Yokoya

Note: detector costs not included

Zimmermann, TLEP WS, Apr.2013<sup>7</sup>

# FCC global design study – time line



- presently discussions with potential partners (MoUs)
  - first international collaboration board meeting at CERN
- on 9 & 10 September 2014

# tentative time line

SLAC

1980 1990 2000 2010 2020 2030 2040

LHC



Zimmermann, IPAC14

HL-LHC



LHeC/SAPPHiRE?



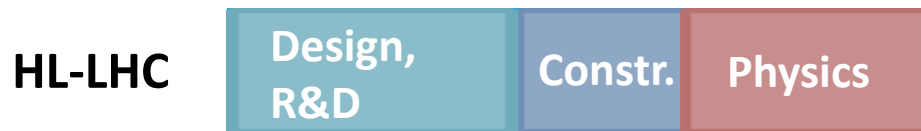
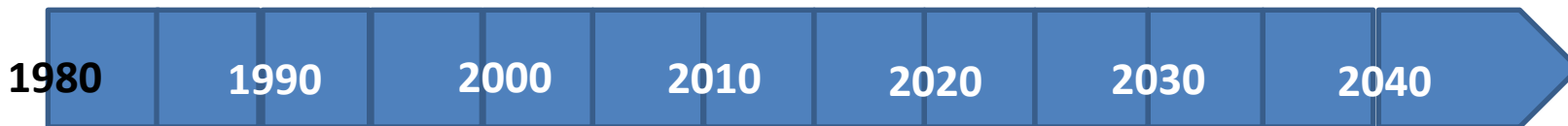
FCC

*ee*  
*hh*  
*he*



# Tentative time line

Zimmermann, TLEP WS, Apr.2013





# Timeline (dream)

- **CPEC**

- Pre-study, R&D and preparation work

- Pre-study: 2013-15

- Pre-CDR by the end of 2014 for R&D funding request

- R&D: 2016-2020

- Approaching the Chinese government in 2015 for R&D funding (next 5-year planning: 2016-2020)

- Engineering Design: 2015-2020

- Construction: 2021-2027

- Data taking: 2028-2035

- **SppC**

- Pre-study, R&D and preparation work

- Pre-study: 2013-2020

- R&D: 2020-2030

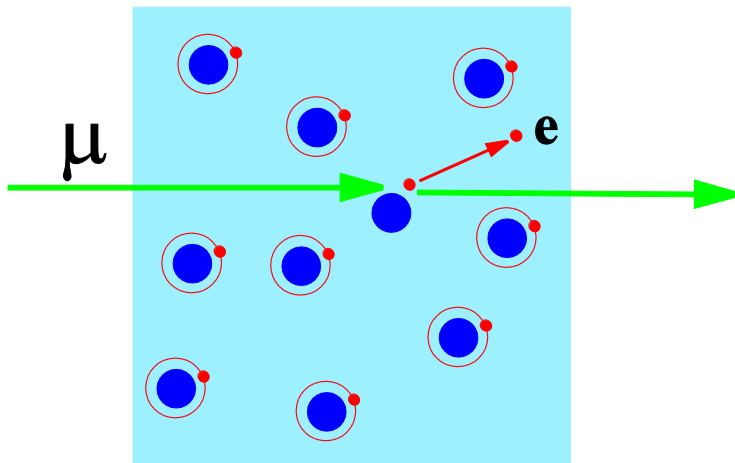
- Engineering Design: 2030-2035

- Construction: 2035-2042

- Data taking: 2042 -

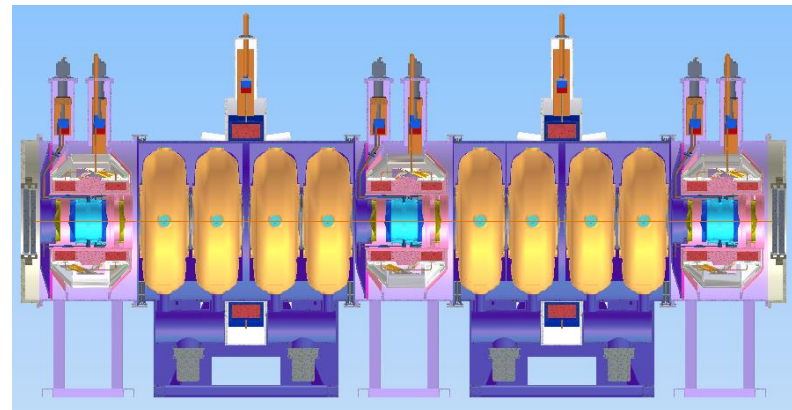
# Muon Collider

- $\mu$  の性質は電子・陽電子ときわめて相似している
  - $e^+e^-$  ができることは、 $\mu^+\mu^-$  でもできる
- しかし  $\mu$  は200倍重い → 円型加速器で高エネルギーまで加速可能
- $\mu^+\mu^-$  collider は  $e^+e^-$  collider よりずっとクリーン (beamstrahlung negligible)
  - ただし muon decay からの background の問題あり
- しかし muon ビームは自然には存在しない
  - antiproton の場合のようにビーム冷却が必要
- “ionization cooling” invented by Skrinsky-Parkhomchuk 1981, Neuffer 1983



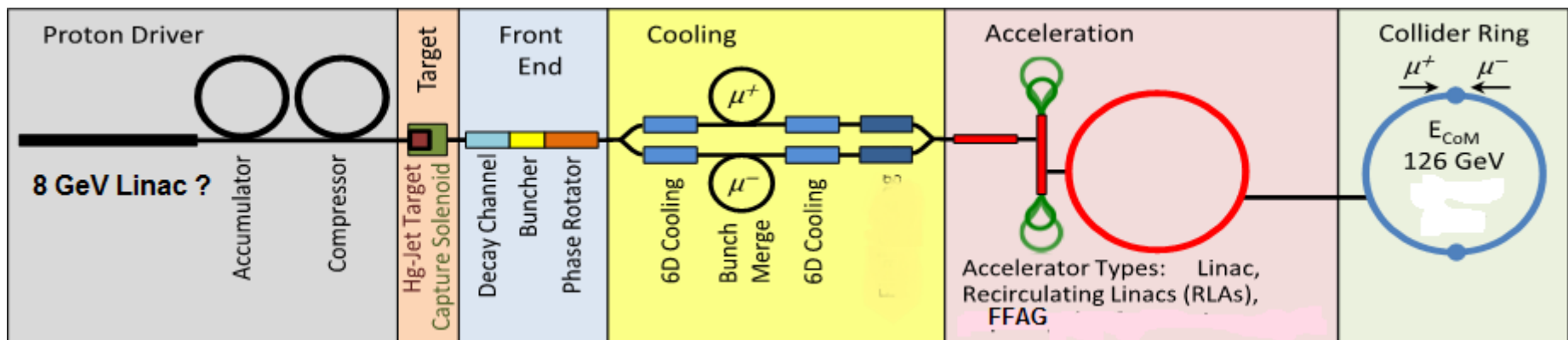
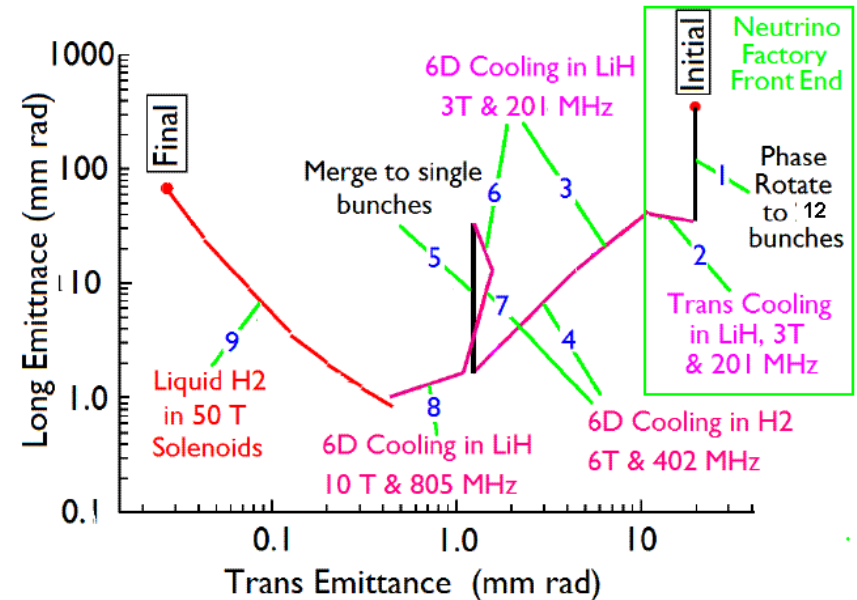
Ionization cooling test at MICE

To be terminated (P5)?



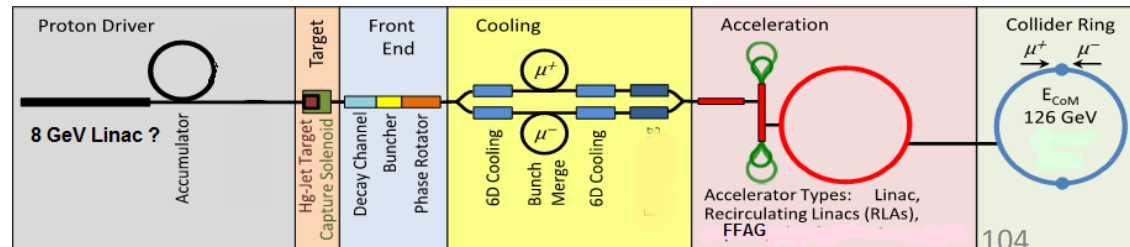
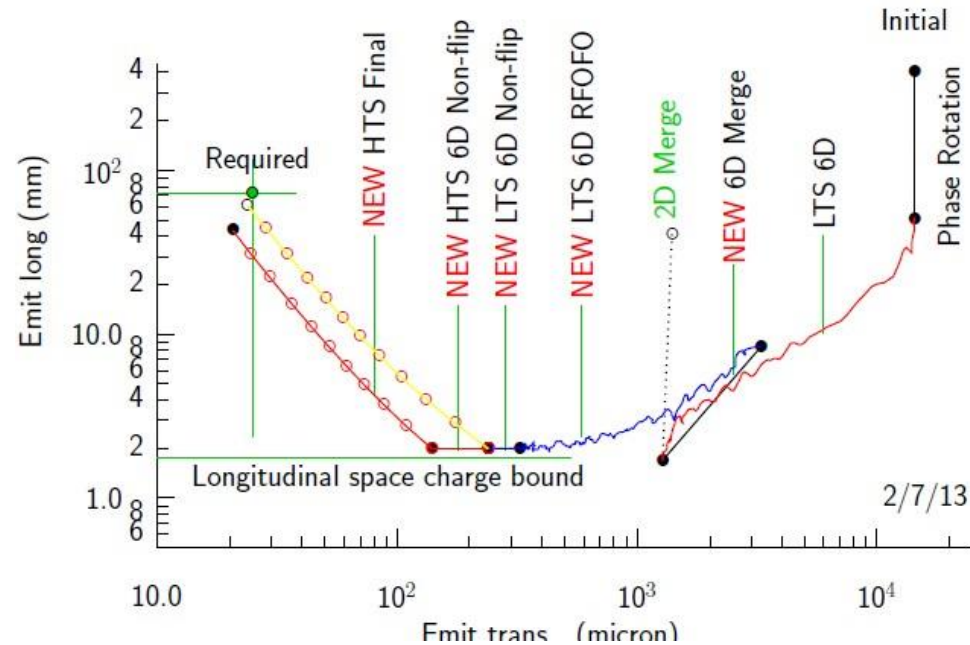
# Create and Cool Muon Beam

- Hadron collisionでpionをつくり、muonにdecayさせる
- Muons は静止系では  $2\mu\text{s}$  で崩壊
  - すばやい加速が必要
- 段階的計画
  - Higgs factory at  $E_{\text{cm}}=126\text{GeV}$
  - Neutrino factory
  - TeV muon collider
- colliderまでは遠い

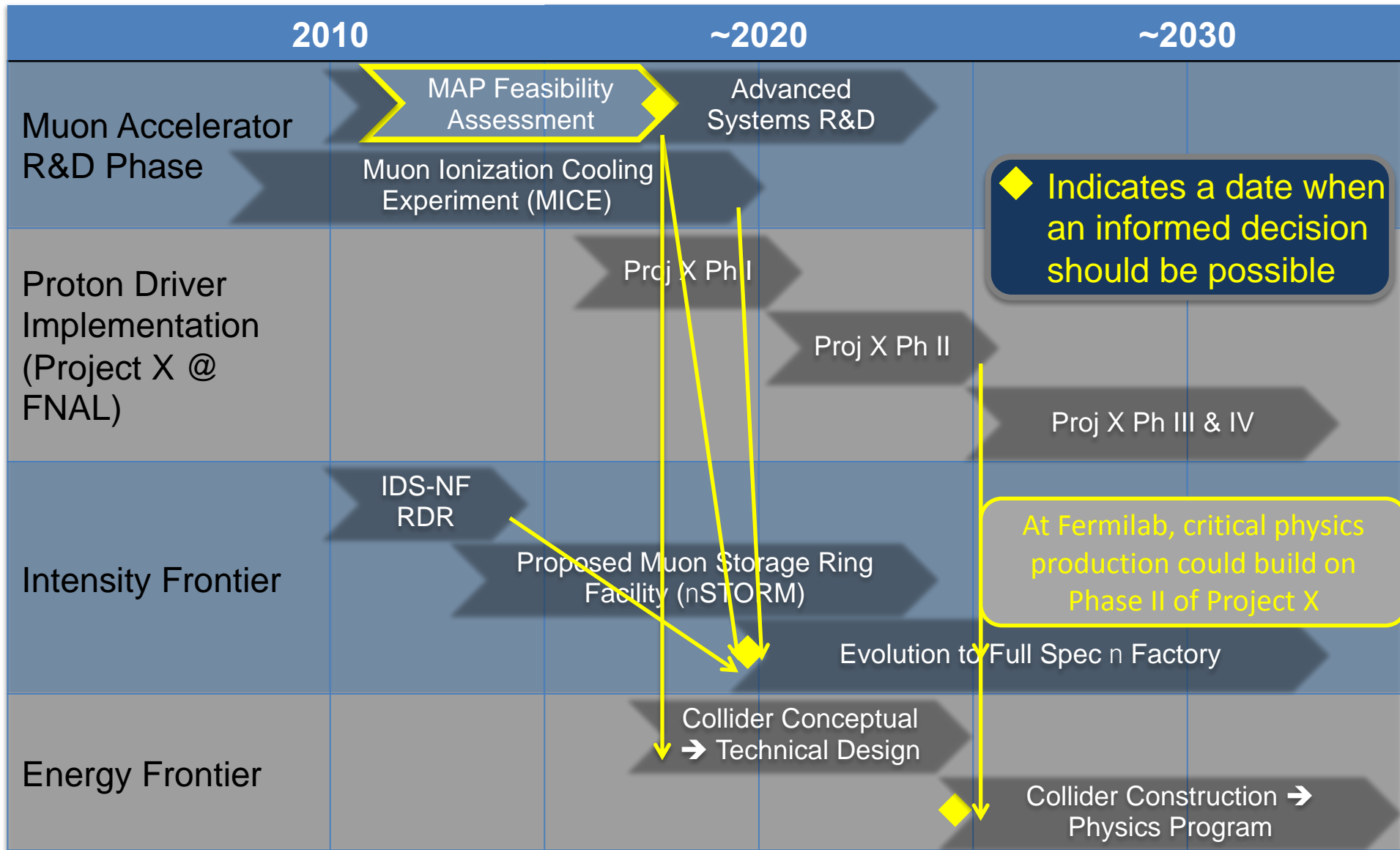


# Muon Collider as Higgs Factory

- s-channel Higgs production  
 $\mu^+ \mu^- \rightarrow H$ 
  - lowest energy Higgs factory
  - エネルギー幅数MeVのビームもつくれる
- ただし TeV collider に必要なkey facilities のほとんどが、Higgs factory でも必要 (冷却の最終段階以外)
  - 数MW のProton driver
  - 数MW の標的
  - イオン化冷却
    - $\sim 10^6$  in 6D emittance,  $10^3$  in  $\epsilon_L$  to  $\sim 1\text{mm}\cdot\text{rad}$
  - collider ring の問題 (muon decay, etc)
- 数10年のR&Dが必要
- 安くはない



# The Muon Accelerator Program Timeline



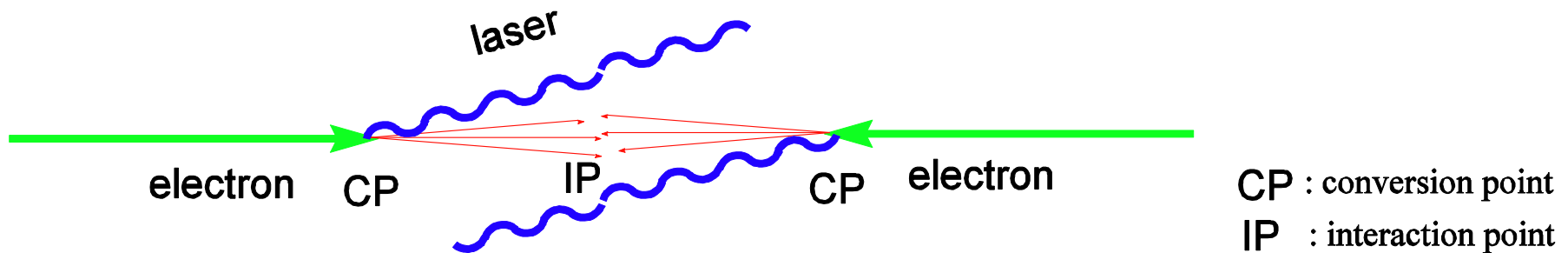
# Muon Collider Concluding Remarks...

- The unique feature of muon accelerators is the ability to provide cutting edge performance on both the Intensity and Energy Frontiers
  - This is well-matched to the direction specified by the P5 panel for Fermilab
  - The possibilities for a staged approach make this particularly appealing in a time of constrained budgets
- World leading Intensity Frontier performance could be provided with a Neutrino Factory based on Project X Phase II
  - This would also provide the necessary foundation for a return to the Energy Frontier with a muon collider on U.S. soil
- A Muon Collider Higgs Factory
  - Would provide exquisite energy resolution to directly measure the width of the Higgs. This capability would be of crucial importance in the MSSM doublet scenario.

***The first collider on the path to a multi-TeV Energy Frontier machine?***

# Gamma-Gamma Collider

- 電子・電子コライダーの衝突点直前に、レーザー光を照射
- 逆コンプトン散乱で高エネルギー光子を作り、衝突させる
- 陽電子は不要

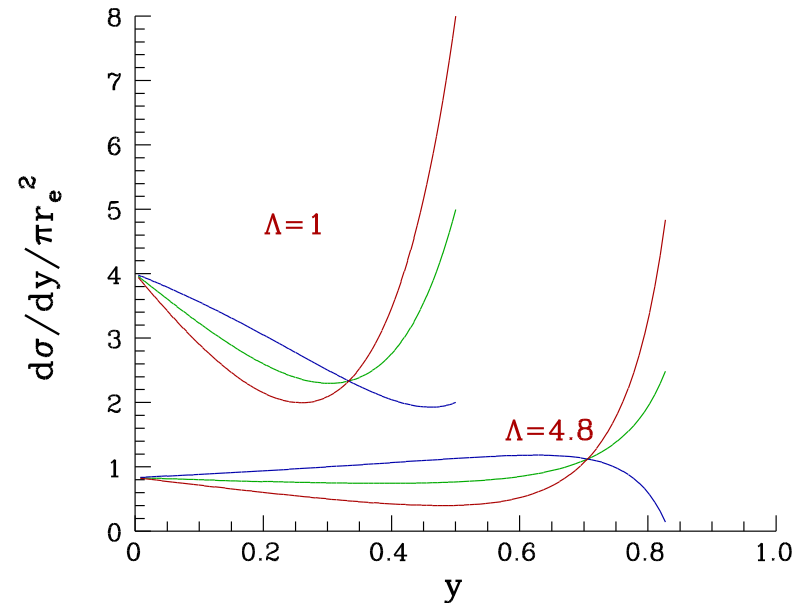


# Kinetics of gamma conversion

- 光子の最高エネルギー

$$\omega = \frac{x}{1+x+\xi^2} E_e, \quad x \equiv \frac{4E_e\omega_L}{m^2}$$

- 電子の偏極 (longitudinal) は、シャープな光子エネルギースペクトルのために essential

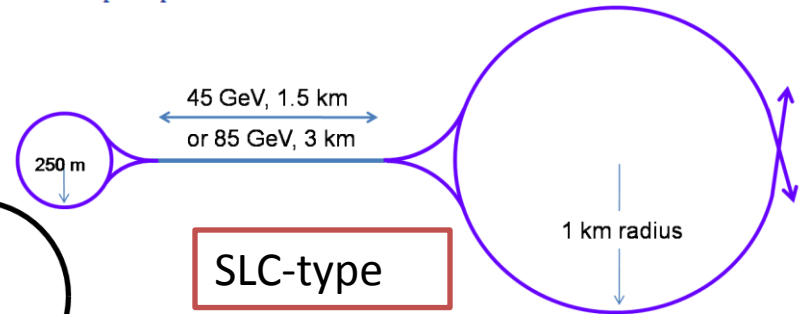
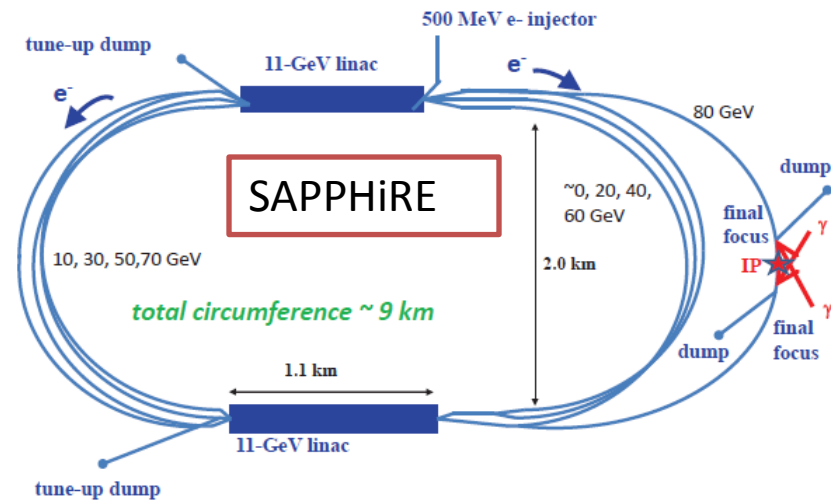
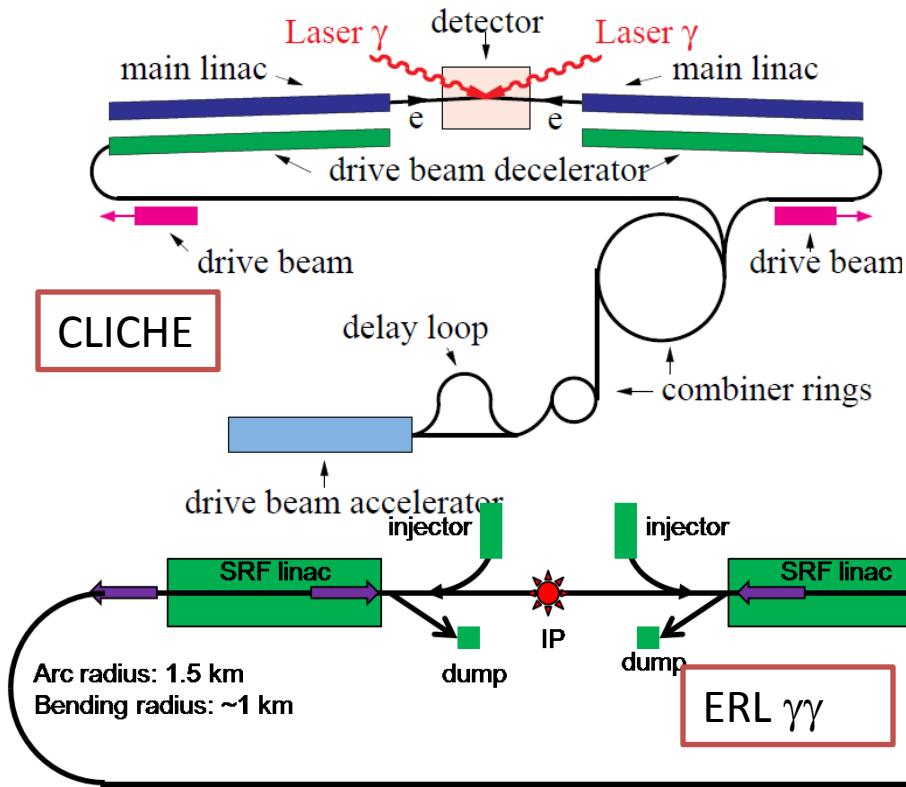


- 最適なレーザーは長  $\lambda = \lambda_0$   
 $\lambda_0 = 1\mu\text{m} * (E_e / 250\text{GeV})$  (  $x=4.83$ に対応)
  - $\lambda < \lambda_0$  では対生成がおこる
  - $\lambda > \lambda_0$  では光子エネルギーが低くなる
- 大部分の電子を光子に変換するために必要なレーザーの flush energy は数(5-10) ジュール (詳細は電子バンチ長に依る)



# Various Possibilities of $\gamma\gamma$ Colliders

- e+e- linear collider (ILC, CLIC)  $\gamma\gamma$  collider(にコンバートできる)
- 80GeV e- on 80GeV e- converted by laser with  $x=4.83$  gives 66GeV on 66 GeV  $\gamma\gamma$  collider  
(lowest energy to produce H except muon collider)
- CLICHE (2003)
- SAPPHiRE (2012)



# Gamma-Gamma General Status

- $\gamma$ - $\gamma$  技術はまだ未成熟
  - > 5 年以上の R&Dが必要
- このため、速い時点の計画開始のために、低エネルギー  $\gamma$ - $\gamma$  からスタートするのは現実的でない
  - need 100% confidence at the time of project approval
- 技術的にみれば ZH での  $e^+e^-$  から始め、必要なら後で  $\gamma$ - $\gamma$  に移行すべき
  - importance of  $\gamma$ - $\gamma$  must be evaluated before the construction of  $e^+e^-$  (possible constraints in IR, e.g., the crossing angle)

Yokoya, Arlington, Oct.2012

# (personal) Conclusions

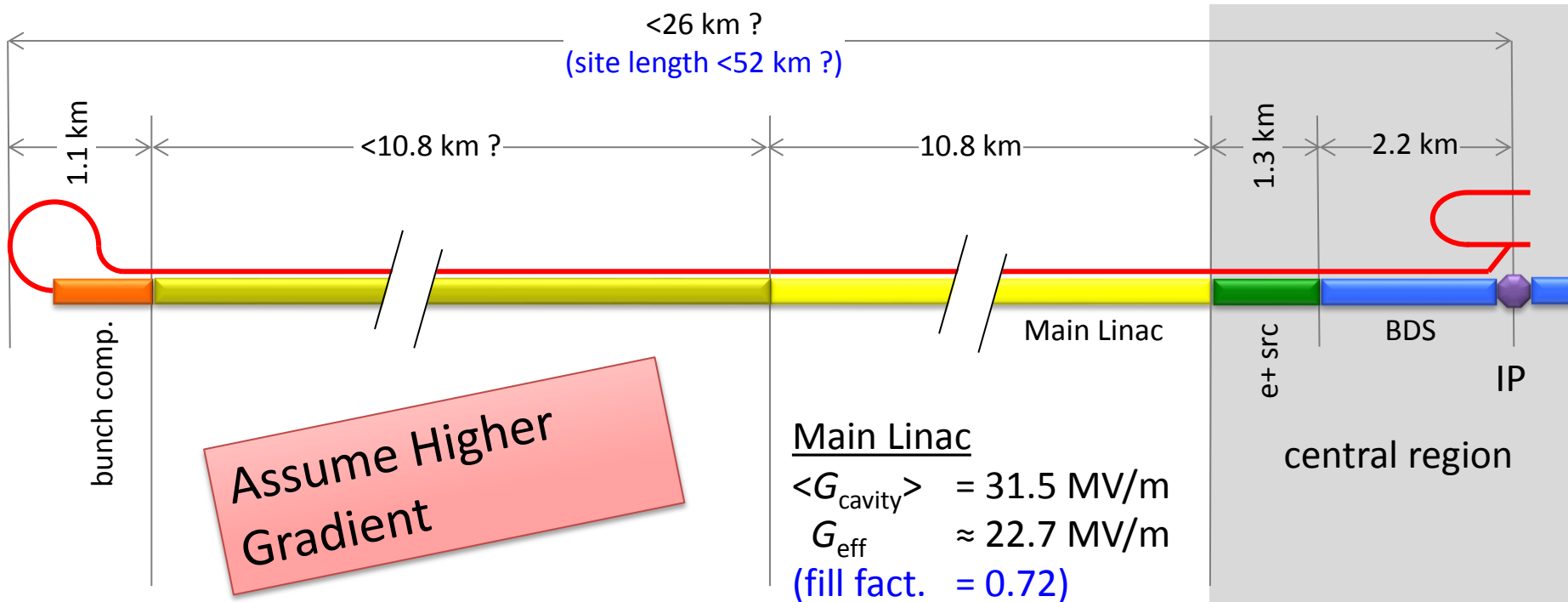
- ILC/CLIC Higgs factory are obvious if 500GeV is feasible
  - cost and staging issues
  - CLIC has maturity problem for early start
- $e^+e^-$  Ring Colliders
  - Technology not trivial
    - Good exercise of accelerator physics (till an LC starts)
  - LEP3 (27km, 240GeV) & TLEP (80km, 350GeV) are just at the border of feasibility
  - Can be a choice if higher energy with  $e^+e^-$  is not needed at all
- $\gamma\text{-}\gamma$  Colliders
  - technology immature
  - good target as a second stage of linear colliders
- Those who are not satisfied with personal conclusions, go to FNAL →

Yokoya, Arlington, Oct.2012

# Far Future of ILC

- Extension by high gradient SCRF
- CLIC technology
- Plasma accelerator

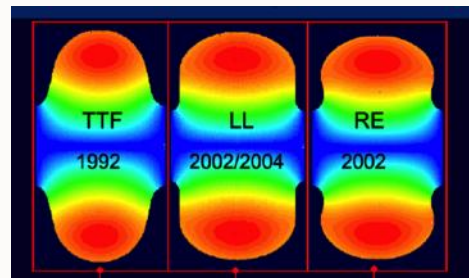
# TeV Upgrade : From 500 to 1000 GeV



Snowmass 2005 baseline  
recommendation for TeV upgrade:

$$G_{\text{cavity}} = 36 \text{ MV/m} \Rightarrow 9.6 \text{ km}$$

(VT  $\geq 40 \text{ MV/m}$ )



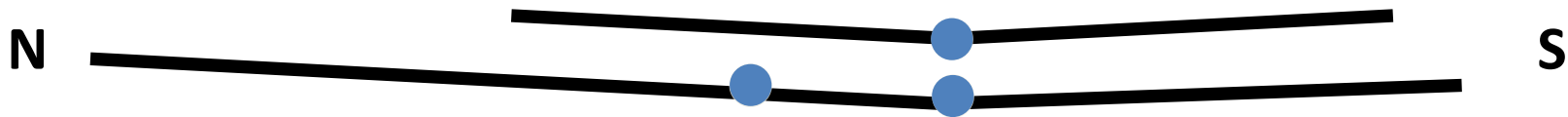
Based on use of  
 low-loss or re-entrant cavity  
 shapes

# CM Energy vs. Site Length

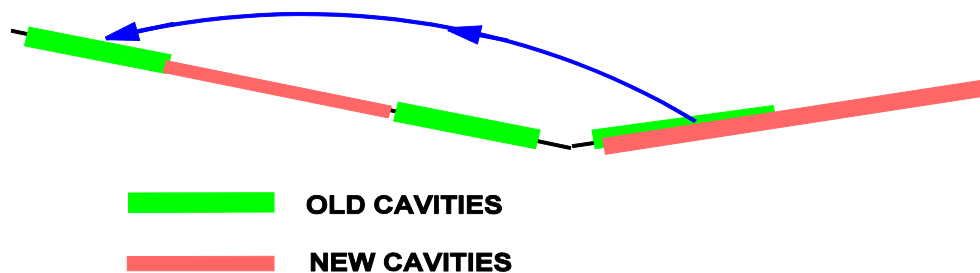
- Under the assumption
  - Scenario B (i.e., keep the 500GeV linac as the high energy part)
  - Available total site length  $L$  km
  - Operating gradient  $G$  MV/m  
(to be compared with 31.5 in the present design)
  - Assume the same packing factor
- Then, the final center-of-mass energy is
$$E_{cm} = 500 + (L-31) \cdot (G/45) \cdot 27.8 \quad (\text{GeV})$$
  - e.g.,  $L=50\text{km}, G=31.5\text{MV/m} \rightarrow 870\text{GeV}$
  - $L=50\text{km}, G=45\text{MV/m} \rightarrow 1030\text{GeV}$
  - $L=67\text{km}, G=45\text{MV/m} \rightarrow 1500\text{ GeV}$
  - $L=67\text{km}, G=100\text{MV/m} \rightarrow 2700\text{ GeV}$
- This includes the margin  $\sim 1\%$  for availability
- But does not take into account the possible increase of the BDS for  $E_{cm} > 1\text{TeV}$ 
  - Present design of BDS accepts 1TeV without increase of length
  - A minor point in increasing BDS length: laser-straight

# A Local Problem at Kitakami

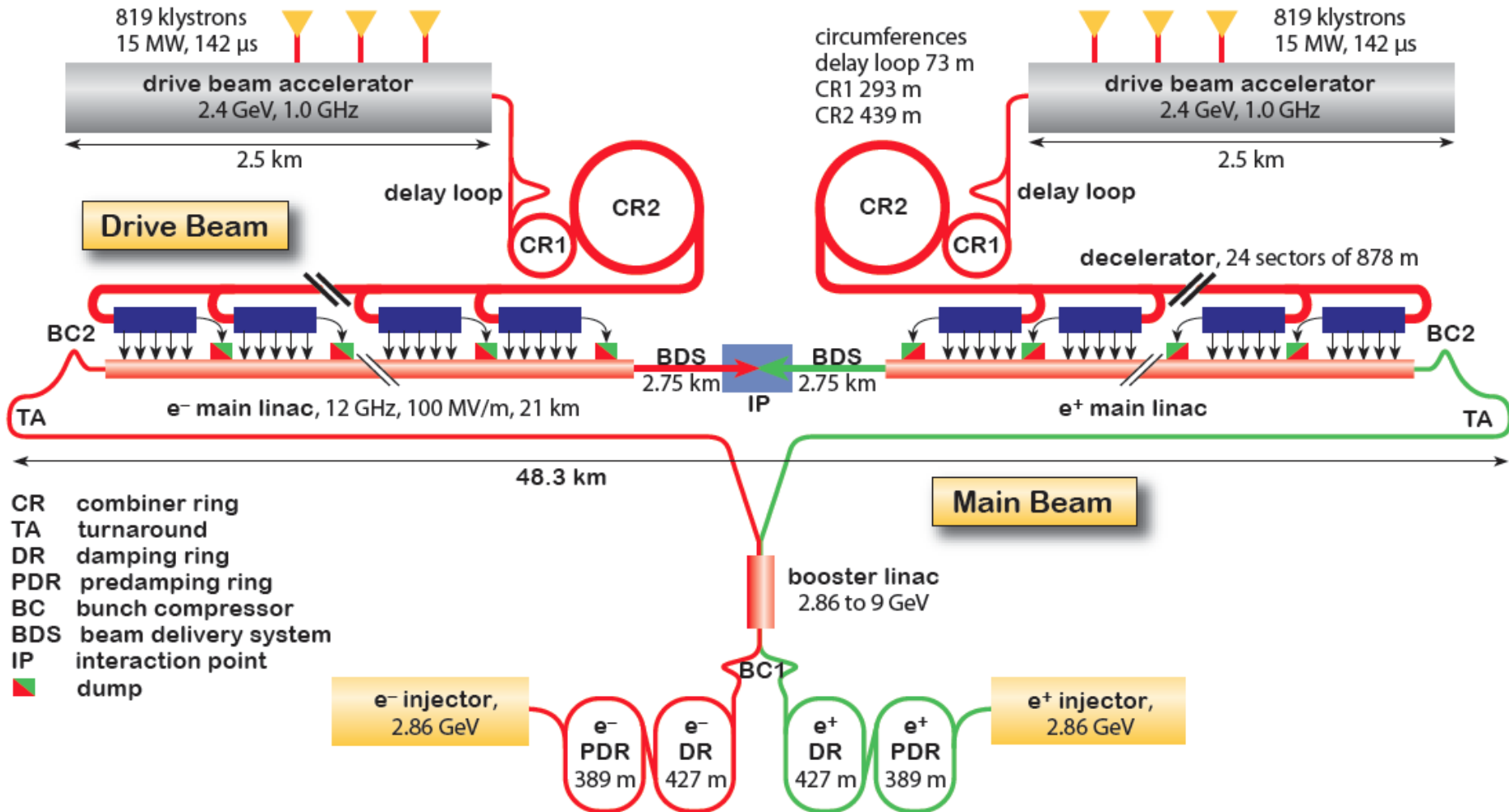
- Once the first stage machine is built, it is almost impossible to move the IP (interaction point) in later stages because of the crossing angle



- Asymmetric collider may be acceptable
  - Asymmetric accelerator
  - Asymmetric energy
  - Asymmetric energy can be avoided to some extent by moving all the old cavities in the south arm to the north at the time of upgrade



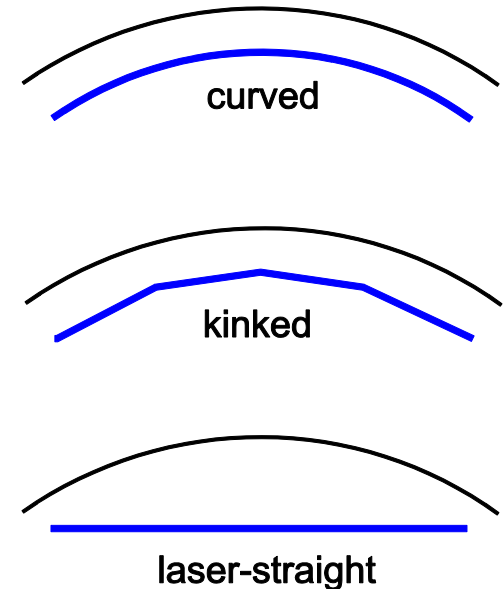
# CLIC (CERN Linear Collider)





# CLICとILCのGeometryの違い

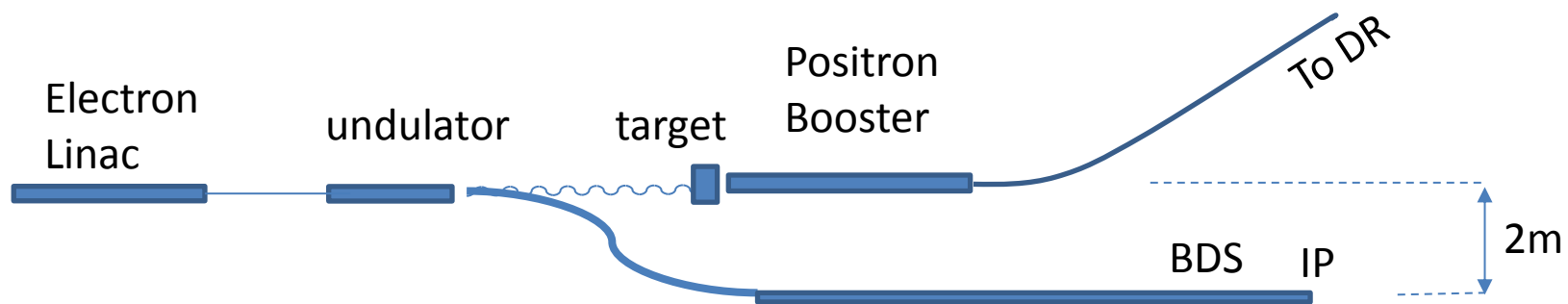
- Crossing Angle
  - ILC 14mrad
  - CLIC 20mrad (3TeVにoptimize)
  - これは14mradでも多分なんとかなる(多少luminosityがおちるか)
- Linac tunnel
  - ILC geoid-following
  - CLIC laser straight
  - Synchrotron radiationはgeoid-followingでも問題ない
  - BPMのcalibration error → 将来なんとかなるだろう



# CLICとILCのGeometryの違い(2)

## Undulatorの後のdogleg

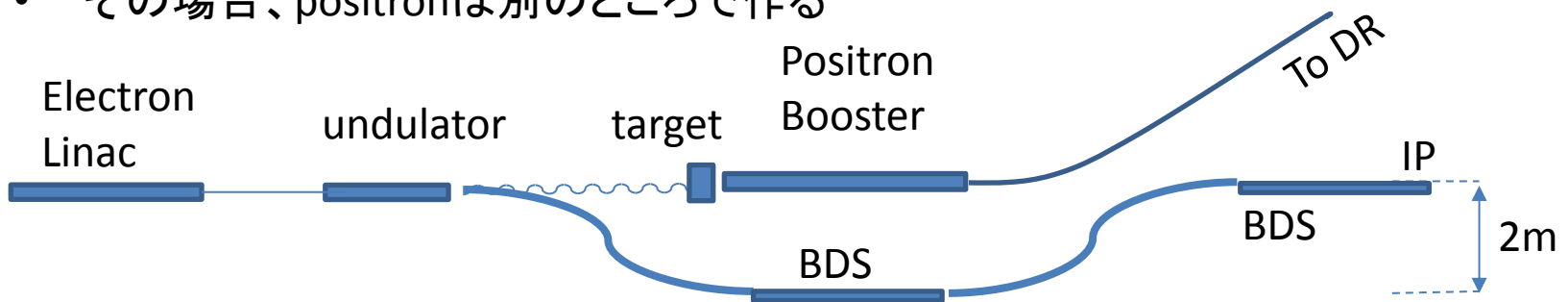
- TDR設計ではundulatorの後、photonとelectronを分離するために、doglegにより2mのoffsetを作っている
- この部分でのシンクロトロン輻射により、horizontal (normalized) emittanceがDRの値より  $8\% * (E_{CM}/1\text{TeV})^6$  だけ増加する(久保)。1.5TeVではほとんど100%になる。
- CLICのように小さいhorizontal emittanceの場合は、1TeVでも問題あり。
- このdoglegをなくしてまっすぐ伸ばすと、衝突点が100m以上(2m/0.014rad) longitudinalにずれてしまう。



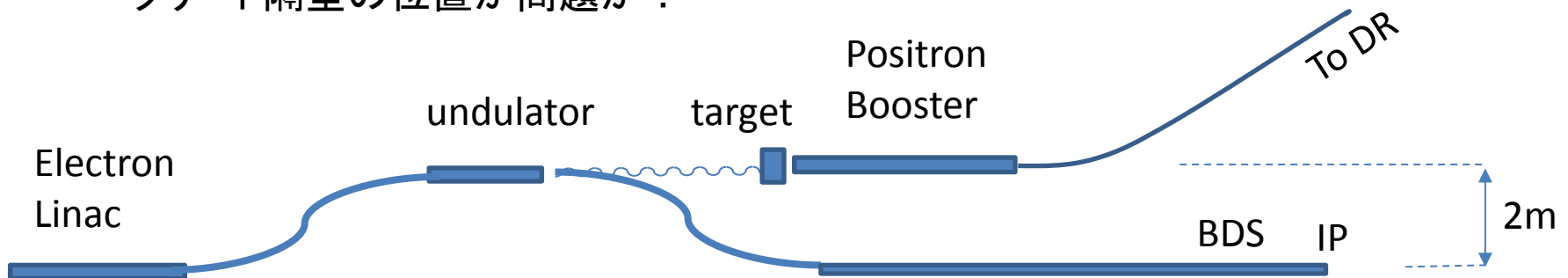
# CLICとILCのGeometryの違い(2)

## Undulatorの後のdogleg (continued)

- 遠い将来>1TeVを考えるなら、このdoglegによるoffsetを、もうひとつのdoglegでもとに戻す必要がある
- トンネル長~400m 増加。ビームライン+トンネルで~30M\$ くらいか。
- >1TeVではundulatorをとりはずして、まっすぐにする
- その場合、positronは別のところで作る



- このdoglegは、linacの直後(undulatorの前)におくことも可能
- この場合、conventional positron sourceでスタートする際は、まっすぐでよい。コンクリート隔壁の位置が問題か？



# Plasma Accelerator

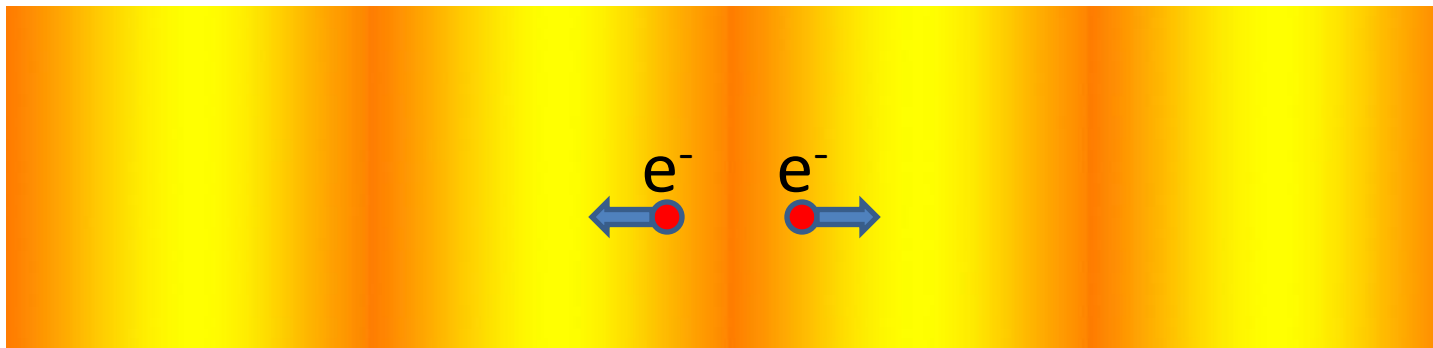
- Linac in the past has been driven by microwave technology
- Plane wave in vacuum cannot accelerate beams: needs material to make boundary condition
- Breakdown at high gradient
  - binding energy of matter:  $\text{eV}/\text{angstrom} = 10\text{GeV}/\text{m}$
- Need not worry about breakdown with plasma
  - can reach  $> 10\text{GeV}/\text{m}$

# Plasma Wave

- Plasma is a mixture of free electrons and nucleus (ions), normally neutral
- By perturbation, electrons are easily moved while nuclei are almost sitting, density modulation created.
- The restoring force generates plasma wave
- Charged particles on the density slope are accelerated, like surfing.
- Plasma oscillation frequency and wavelength are given by

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2}{\epsilon_0 m_e} n_0}, \quad \lambda_p = \frac{2\pi c}{\omega_p} = \frac{3.3 \times 10^4}{\sqrt{n_e [\text{cm}^{-3}]}} \quad [\text{m}]$$

$n_e = \text{plasma density}$



# How to Generate Plasma Wave

- PWFA (Plasma Wakefield Accelerator)
  - Use particle (normally electron) beam of short bunch
- LWFA (Laser Wakefield Accelerator)
  - Use ultra-short laser beam
- In both cases the driving beam
  - determines the phase velocity of plasma wave, which must be close to the velocity of light
  - must be shorter than the plasma wavelength required
  - can also ionize neutral gas to create plasma

# LWFA

- laser pulse length  $\leftarrow$  plasma wave wavelength  $\leftarrow$  plasma density
- Laser intensity characterized by the parameter  $a_0$ 
  - $a_0 < 1$  : linear regime
  - $a_0 > 1$  : blow-out regime

$$a_0 \approx 8.5 \times 10^{-10} \lambda_L [\mu\text{m}] I^{1/2} [\text{W}/\text{cm}^2]$$

- Accelerating field

$$E = E_0 \frac{a_0^2/2}{\sqrt{1 + a_0^2/2}}$$

$$E_0 = cm_e \omega_p / e = 96 n_0^{1/2} [\text{cm}^{-3}]$$

# Blowout and Linear Regime

- The gradient can be higher in the blowout regime but

- difficult to accelerate positron
- very narrow region of acceleration and focusing

acceleration field

plasma density

transverse field

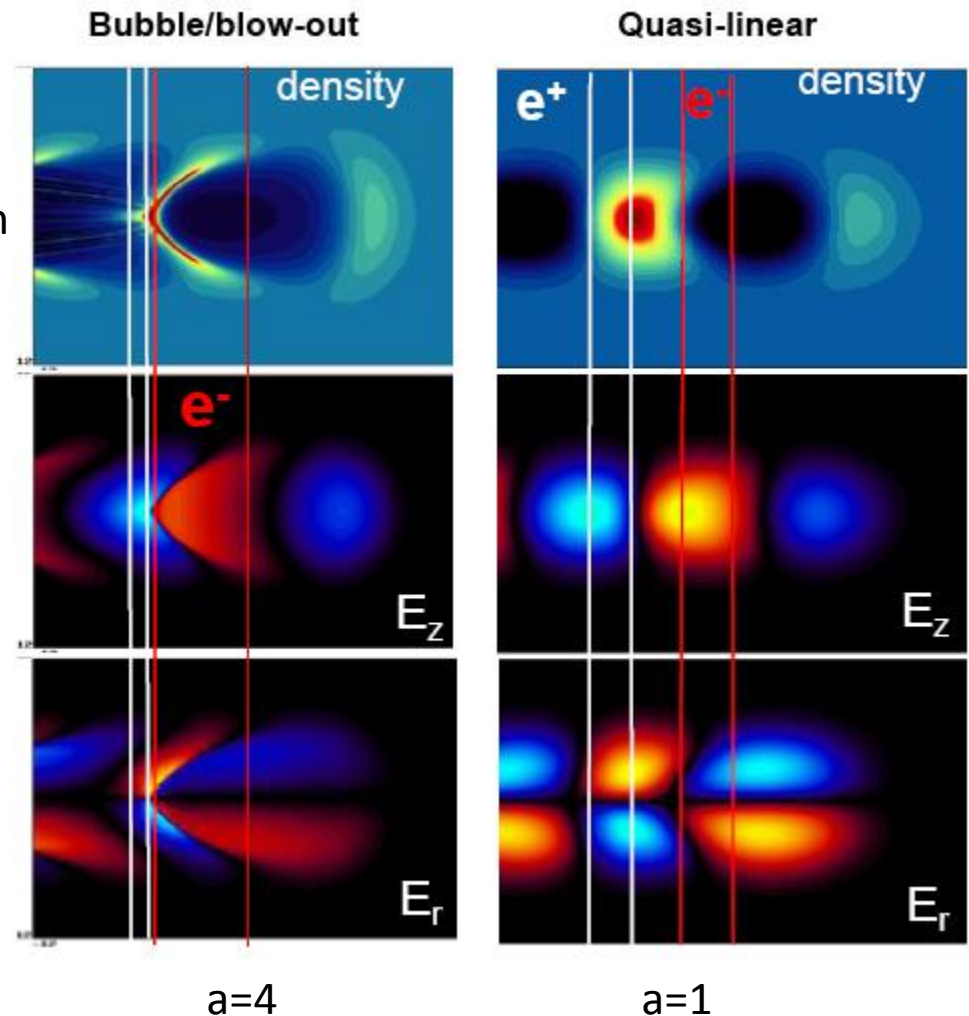


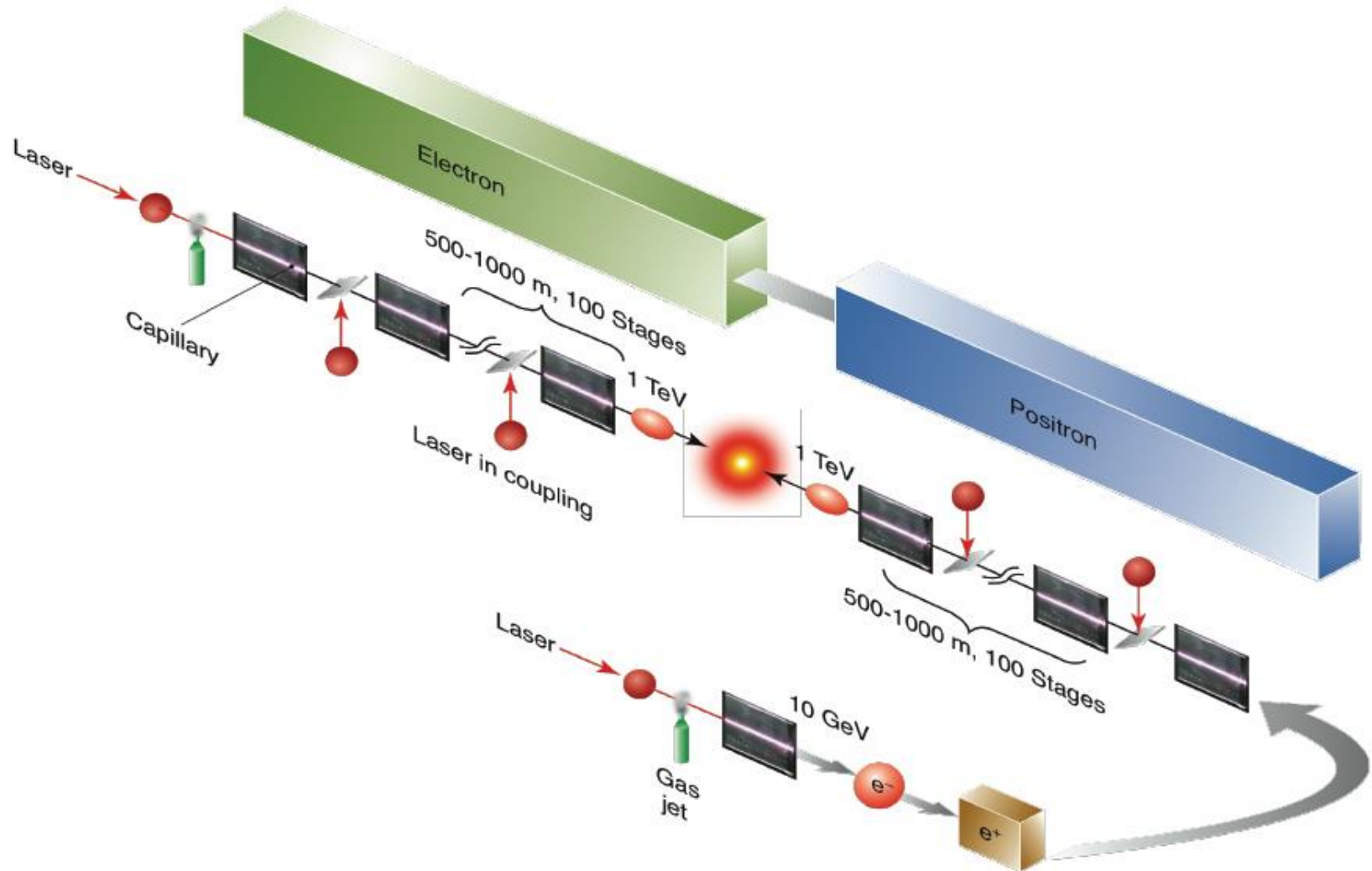
Figure from ICFA Beamdynamics News Letter 56



# Limitation by Single Stage

- Laser must be kept focused (Rayleigh length)
  - solved by self-focusing and/or preformed plasma channel
- Dephasing: laser velocity in plasma
  - longitudinal plasma density control
- Eventually limited by depletion
  - depletion length proportional to  $n_0^{-3/2}$
  - acceleration by one stage proportional to  $I/n_0$
- Multiple stages needed for high energy, introducing issues
  - phase control
  - electron orbit matching

# Concept of LWFA Collider



# Example Beam Parameters of 1/10TeV Collider

Case: CoM Energy (Plasma density)	1 TeV ( $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )	1 TeV ( $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ )	10 TeV ( $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )	10 TeV ( $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ )
Energy per beam (TeV)	0.5	0.5	5	5
Luminosity ( $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	2	2	200	200
Electrons per bunch ( $\times 10^{10}$ )	0.4	2.8	0.4	2.8
Bunch repetition rate (kHz)	15	0.3	15	0.3
Horizontal emittance $\gamma \epsilon_x$ (nm-rad)	100	100	50	50
Vertical emittance $\gamma \epsilon_y$ (nm-rad)	100	100	50	50
$\beta^*$ (mm)	1	1	0.2	0.2
Horizontal beam size at IP $\sigma_x^*$ (nm)	10	10	1	1
Vertical beam size at IP $\sigma_y^*$ (nm)	10	10	1	1
Disruption parameter	0.12	5.6	1.2	56
Bunch length $\sigma_z$ ( $\mu\text{m}$ )	1	7	1	7
Beamstrahlung parameter $\Upsilon$	180	180	18,000	18,000
Beamstrahlung photons per e, $n_\gamma$	1.4	10	3.2	22
Beamstrahlung energy loss $\delta_E$ (%)	42	100	95	100
Accelerating gradient (GV/m)	10	1.4	10	1.4
Average beam power (MW)	5	0.7	50	7
Wall plug to beam efficiency (%)	6	6	10	10
One linac length (km)	0.1	0.5	1.0	5

From ICFA Beamdynamics News Letter 56

# Example Laser Parameters of 1/10TeV Collider

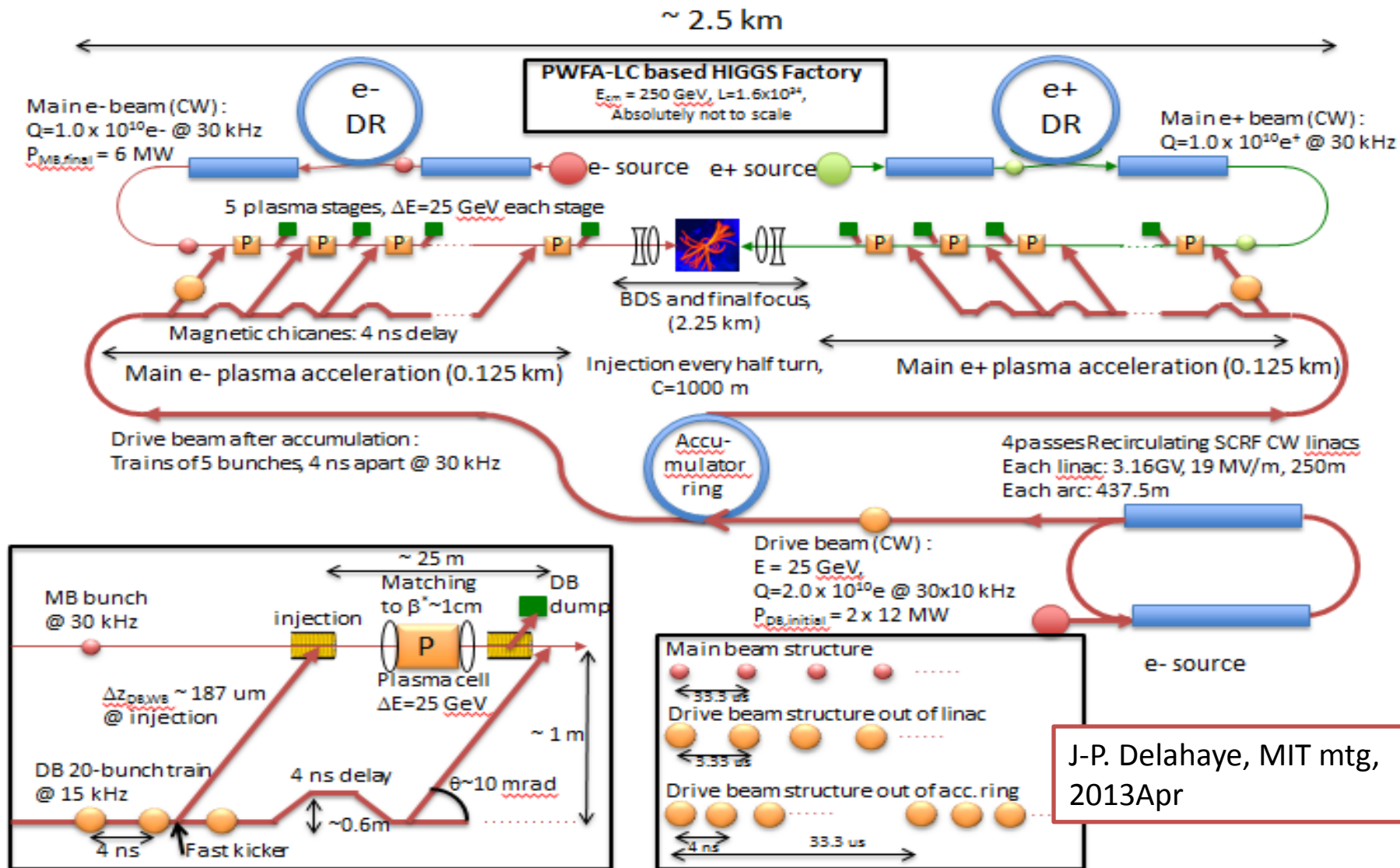
Case: CoM Energy (Plasma density)	1 TeV ( $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )	1 TeV ( $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ )	10 TeV ( $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )	10 TeV ( $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ )
Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	1	1	1	1
Pulse energy/stage (kJ)	0.032	11	0.032	11
Pulse length (ps)	0.056	0.4	0.056	0.4
Repetition rate (kHz)	15	0.3	15	0.3
Peak power (PW)	0.24	12	0.24	12
Average laser power/stage (MW)	0.48	3.4	0.48	3.4
Energy gain/stage (GeV)	10	500	10	500
Stage length [LPA + in-coupling] (m)	2	500	2	500
Number of stages (one linac)	50	1	500	10
Total laser power (MW)	48	3.4	480	34
Total wall power (MW)	160	23	960	138
Laser to beam efficiency (%) [laser to wake 50% + wake to beam 40%]	20	20	20	20
Wall plug to laser efficiency (%)	30	30	50	50
Laser spot rms radius ( $\mu\text{m}$ )	69	490	69	490
Laser intensity ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )	$3 \times 10^{18}$	$3 \times 10^{18}$	$3 \times 10^{18}$	$3 \times 10^{18}$
Laser strength parameter $a_0$	1.5	1.5	1.5	1.5
Plasma density ( $\text{cm}^{-3}$ ), with tapering	$10^{17}$	$2 \times 10^{15}$	$10^{17}$	$2 \times 10^{15}$
Plasma wavelength (mm)	0.1	0.75	0.1	0.75

From ICFA Beamdynamics News Letter 56

# What's Needed for Plasma Collider

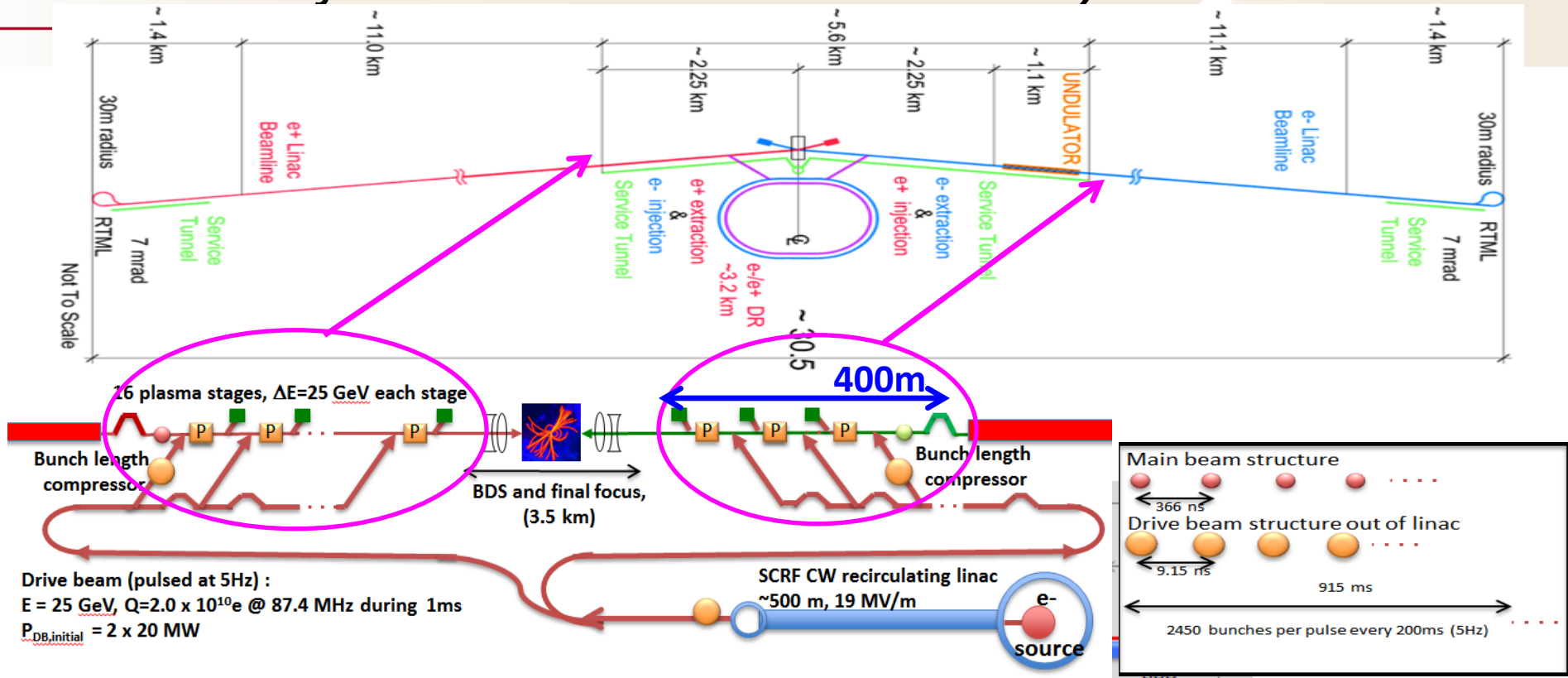
- High rep rate, high power laser
- Beam quality
  - Small energy spread  $\ll 1\%$
  - emittance preservation
- High power efficiency from wall-plug to beam
  - Wall-plug  $\rightarrow$  laser
  - Laser  $\rightarrow$  plasma wave
  - plasma wave  $\rightarrow$  beam
- Staging
  - laser phase
  - beam optics matching
- Very high component reliability
- Low cost per GeV
- Colliders need all these, but other applications need only some of these
- Application of plasma accelerators (not for colliders) would start long before all these requirements are established

# Novel concept of a beam driven PWFA Linear Collider : A 2.5km HIGGS Factory (250m acceleration)



J.-P. Delahaye, MIT mtg, 2013Apr

# An alternative ILC upgrade by PWFA from 250GeV to 1 TeV and beyond?



One possible scenario could be:

- 1) Build & operate the ILC as presently proposed up to 250 GeV (125 GeV/beam): total extension 21km
- 2) Develop the PWFA technology in the meantime (up to 2025?)
- 3) When ILC upgrade requested by Physics (say up to 1 TeV), decide for ILC or PWFA technology:
- 4) Do not extend the ILC tunnel but remove latest 400m of ILC linac (beam energy reduced by 8 GeV)
- 5) Reuse removed ILC structures for PWFA SC drive beam accelerating linac (25 GeV, 500m@19MV/m)
- 6) Install a bunch length compressor and 16 plasma cells in latest part of each linac in the same tunnel for a 375+8 GeV PWFA beam acceleration (382m)
- 7) Reuse the return loop of the ILC main beam as return loop of the PWFA drive beam.