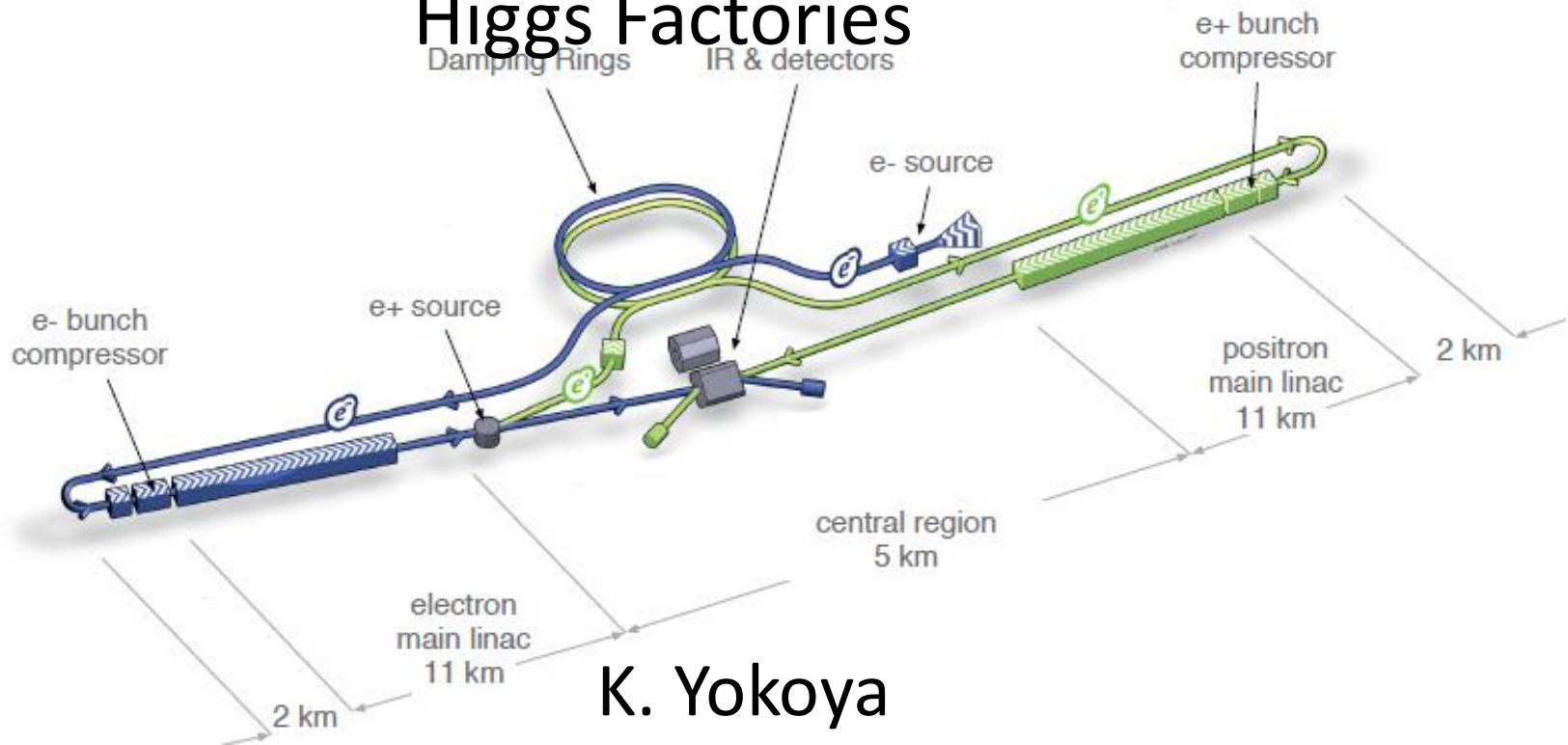


# ILC Accelerator Overview

## ILC Accelerator Higgs Factories

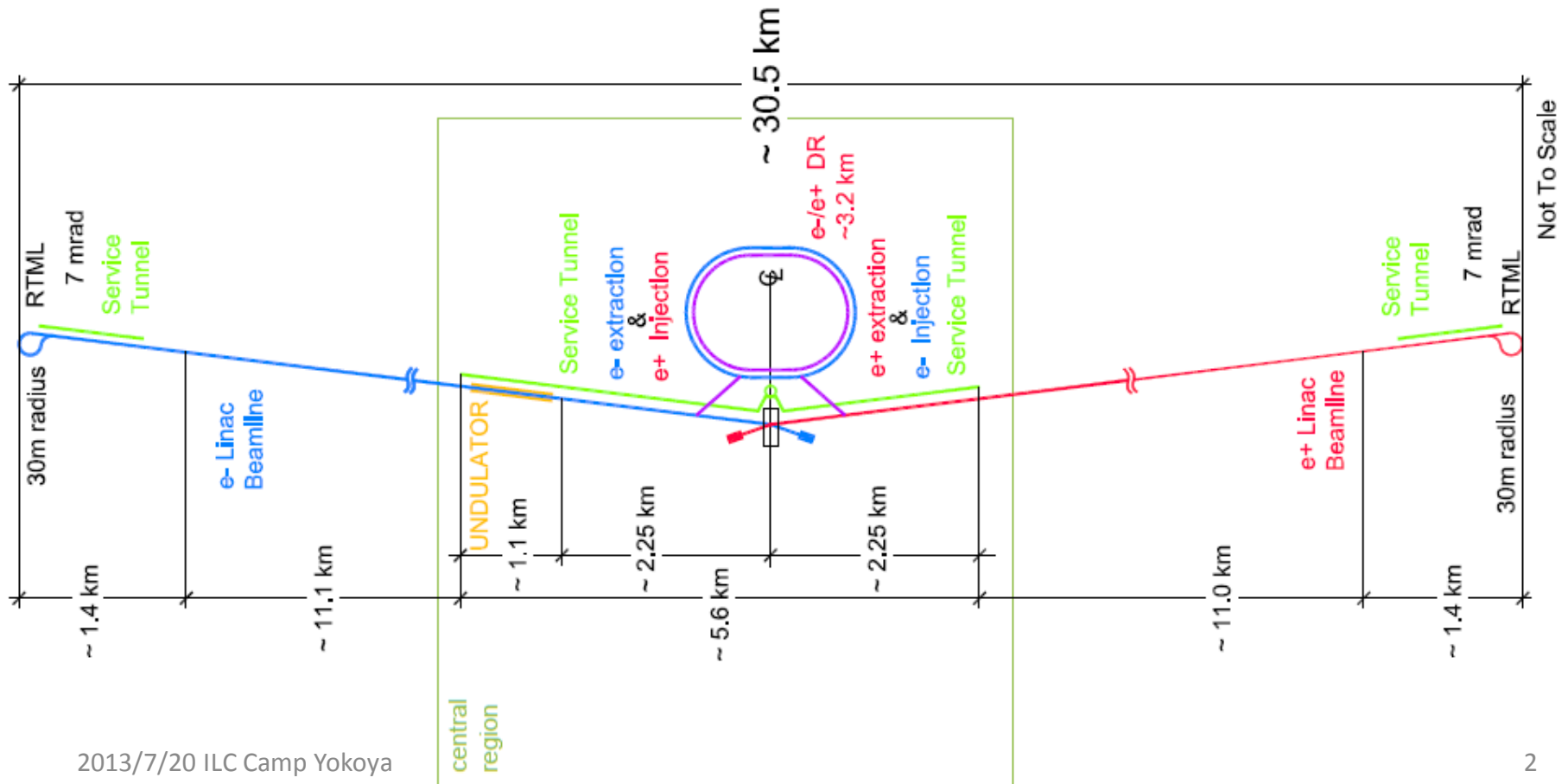


K. Yokoya

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)

ILC Parameters (TDR Executive Summary)			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	3.6	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

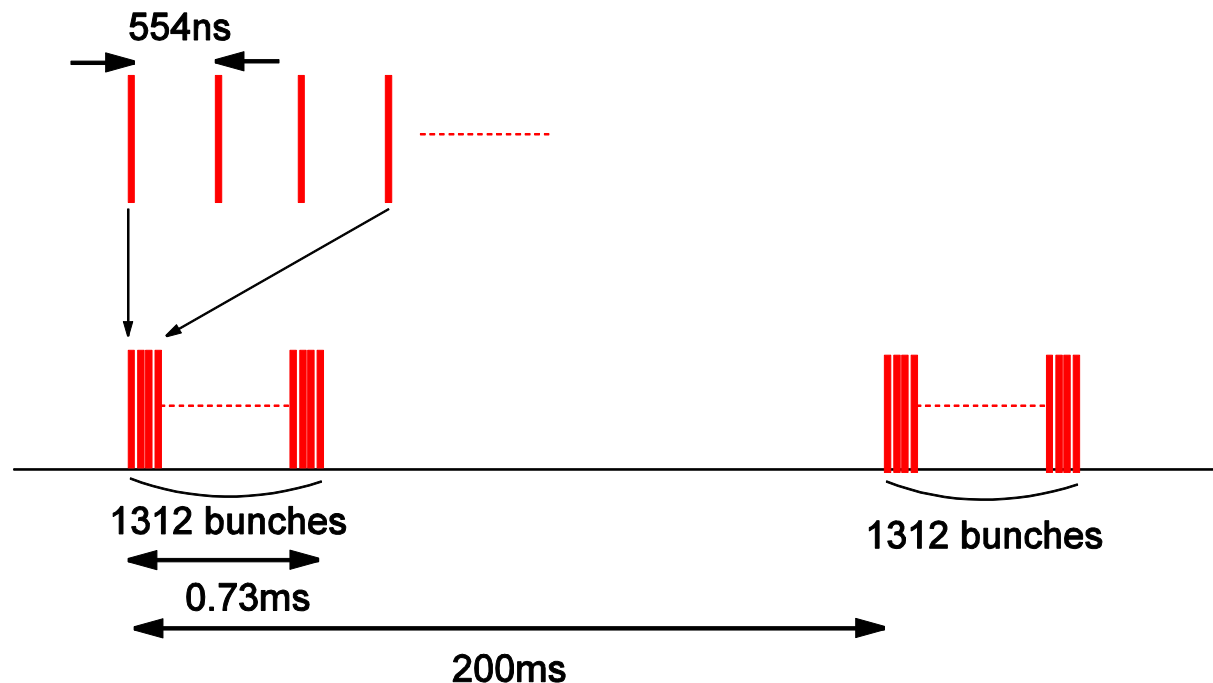
1) 120MW for 250GeV machine

# 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)



# 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

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

- $D \ll 1$  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

- 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)

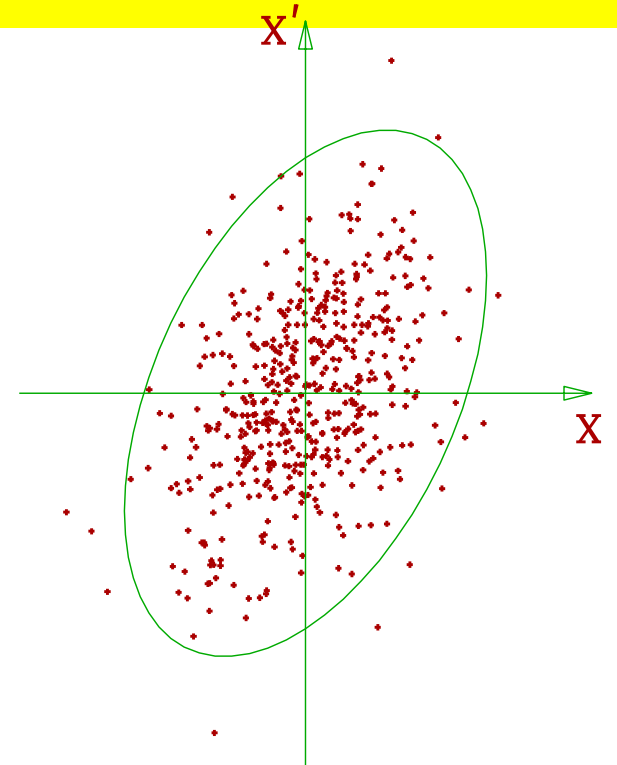
$$\epsilon_{n,x} = \frac{A}{mc}$$

- $(x, x')$  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

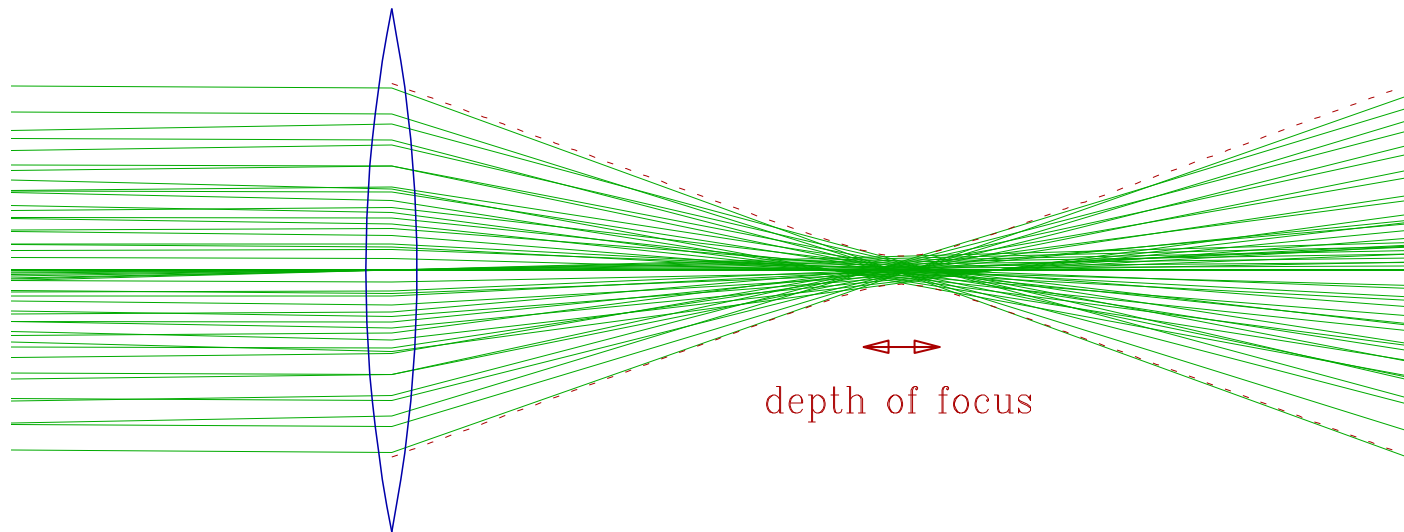
$$\sigma_x(s) = \sigma_x^* \sqrt{1 + \frac{s^2}{\beta_x^{*2}}}$$

# 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。

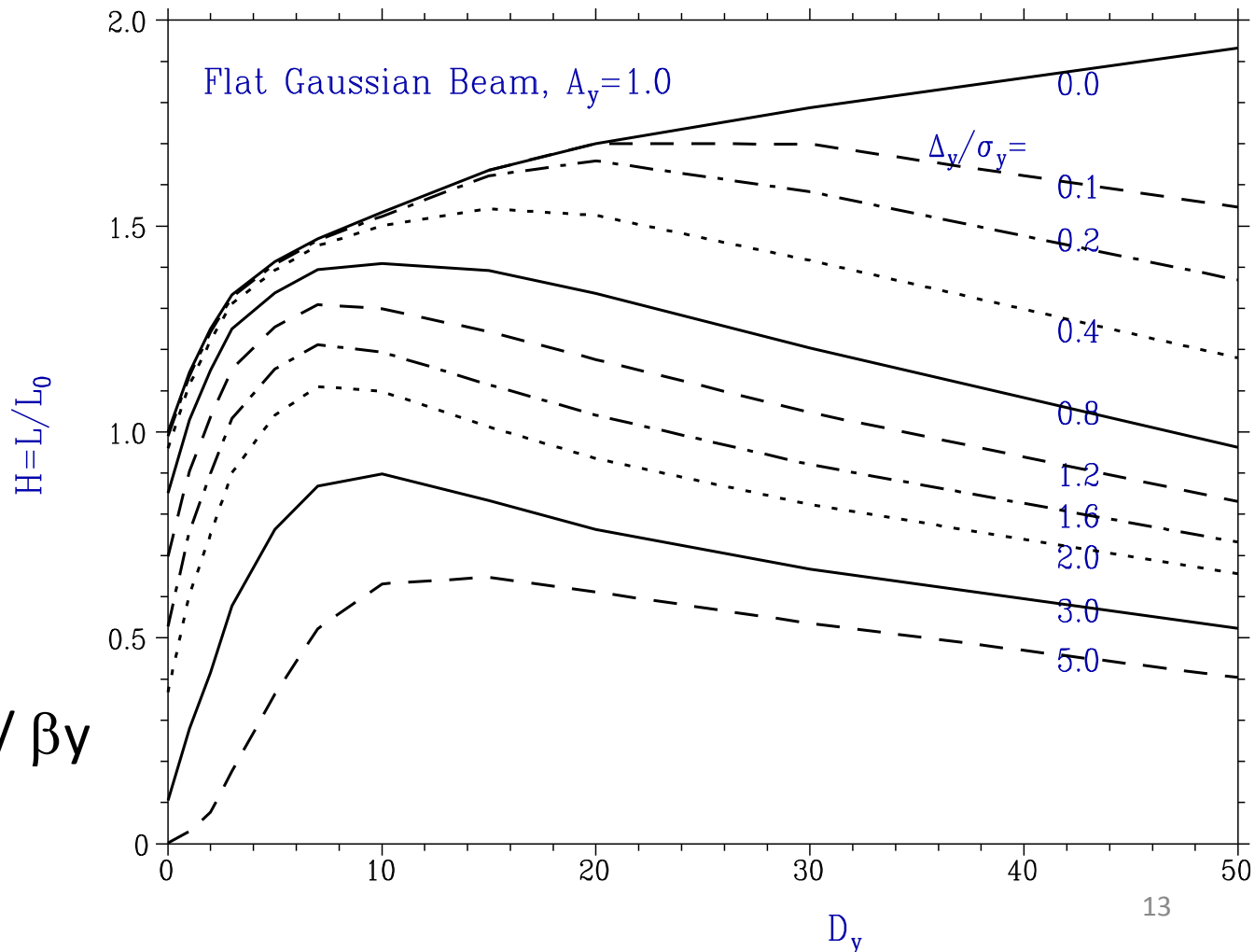


# Luminosity Enhancement

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

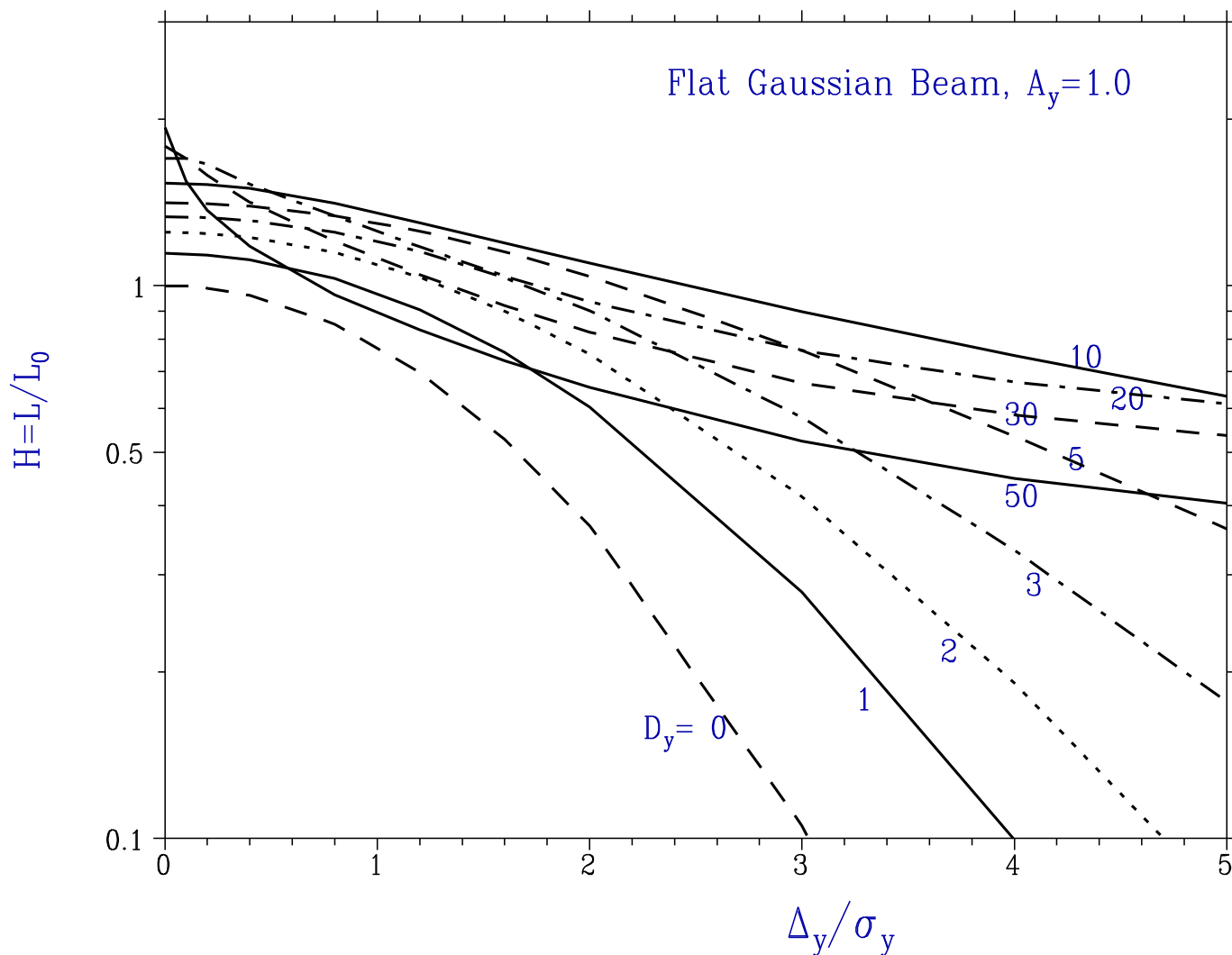
Enhancement Factor vs. Disruption Parameter

- $D_y$ 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



- 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

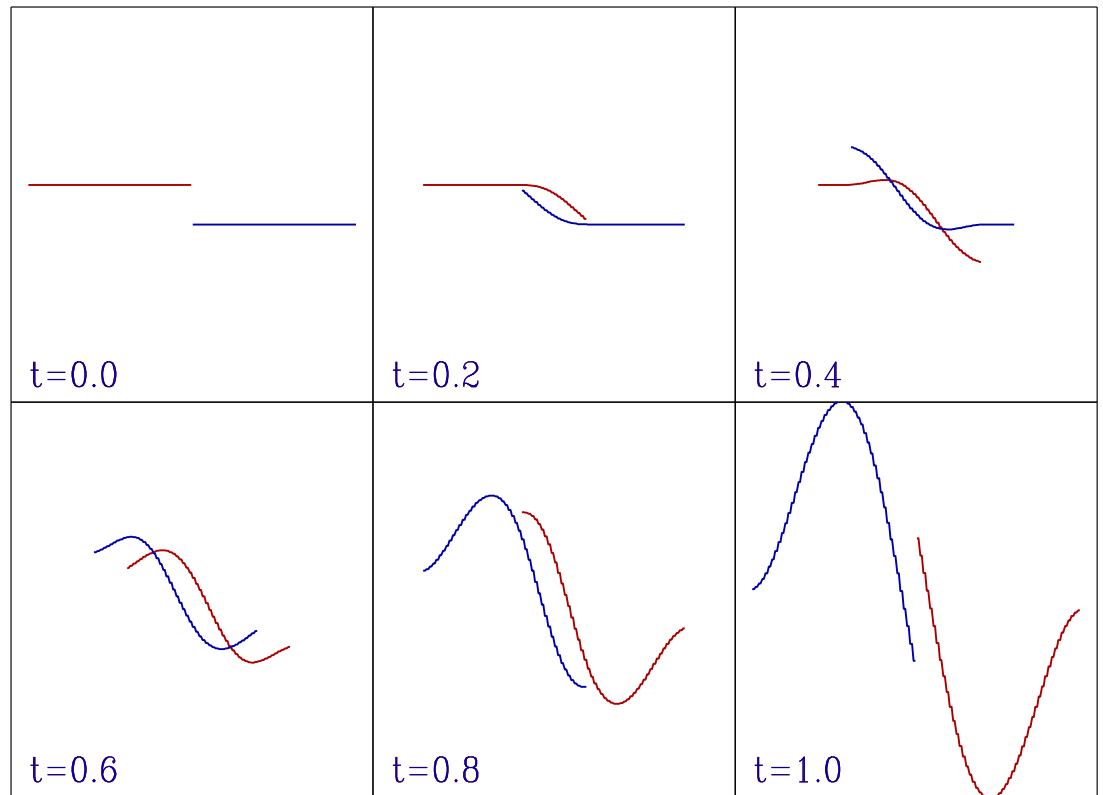


- 前のページと同じものを、 $\Delta y$  の関数としてプロットしたもの

# 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

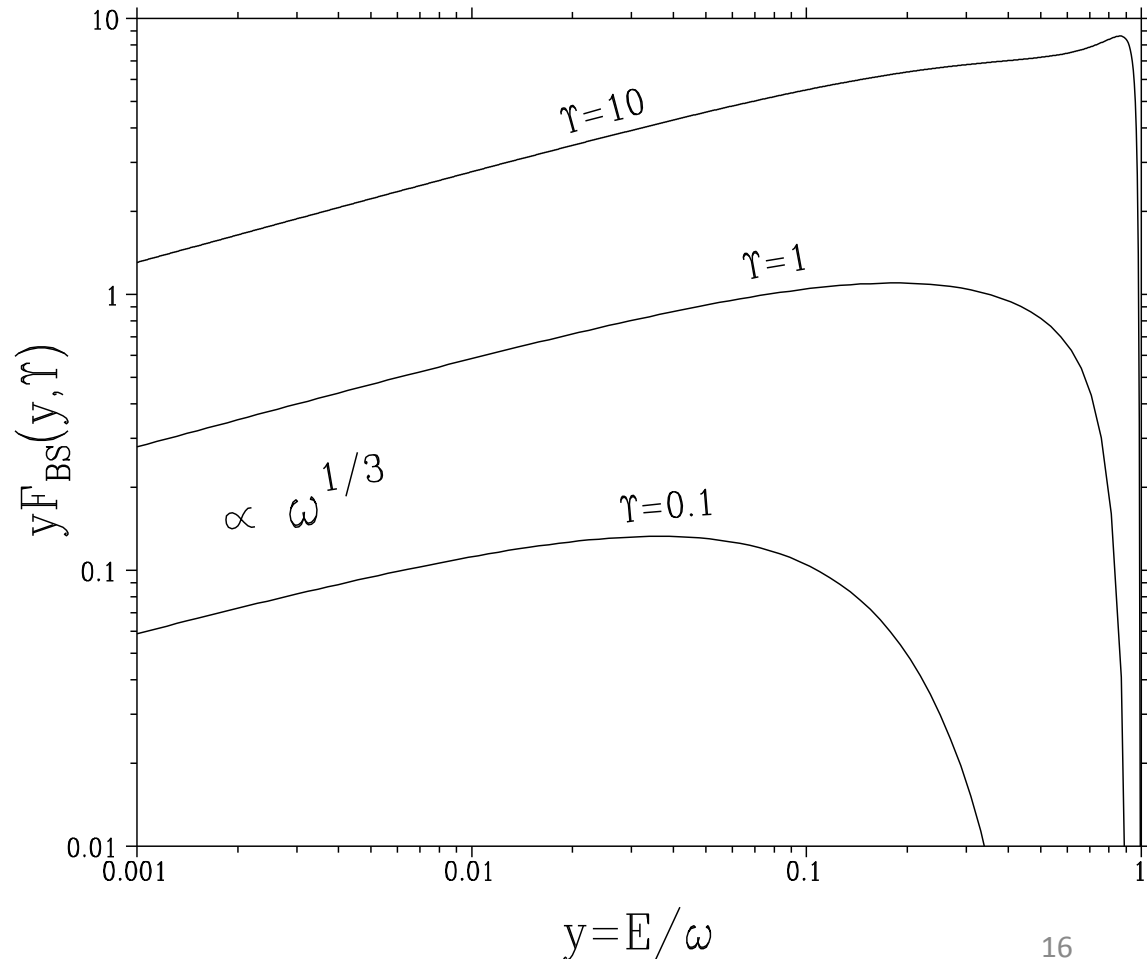


# Beamstrahlung

- 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。

Power Spectrum

- 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。





# 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

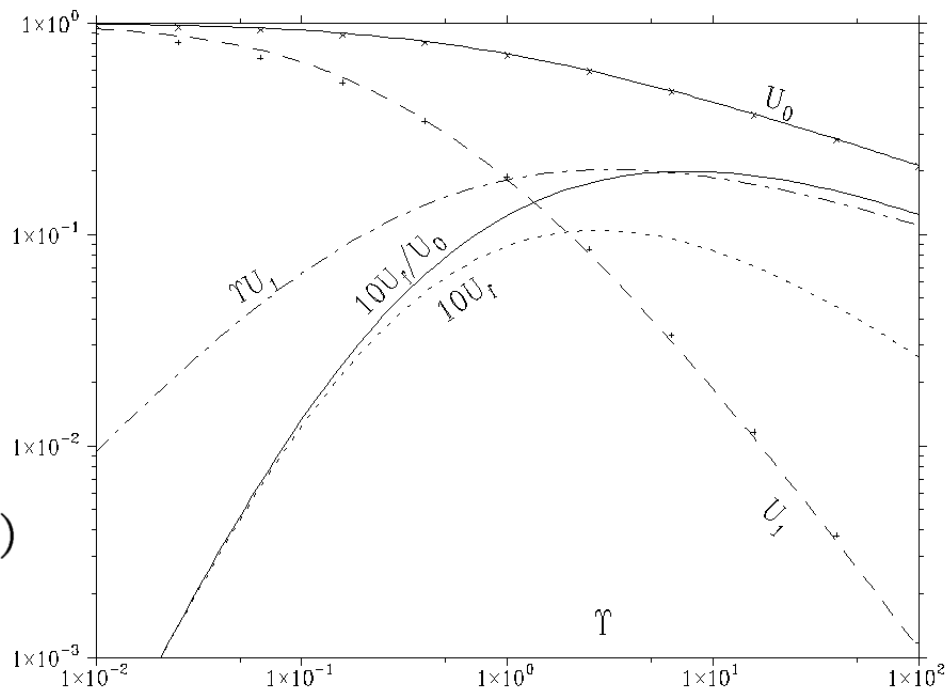
$$\delta_E = \left\langle -\frac{\Delta E}{E} \right\rangle$$

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

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

- 平均光子エネルギー

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

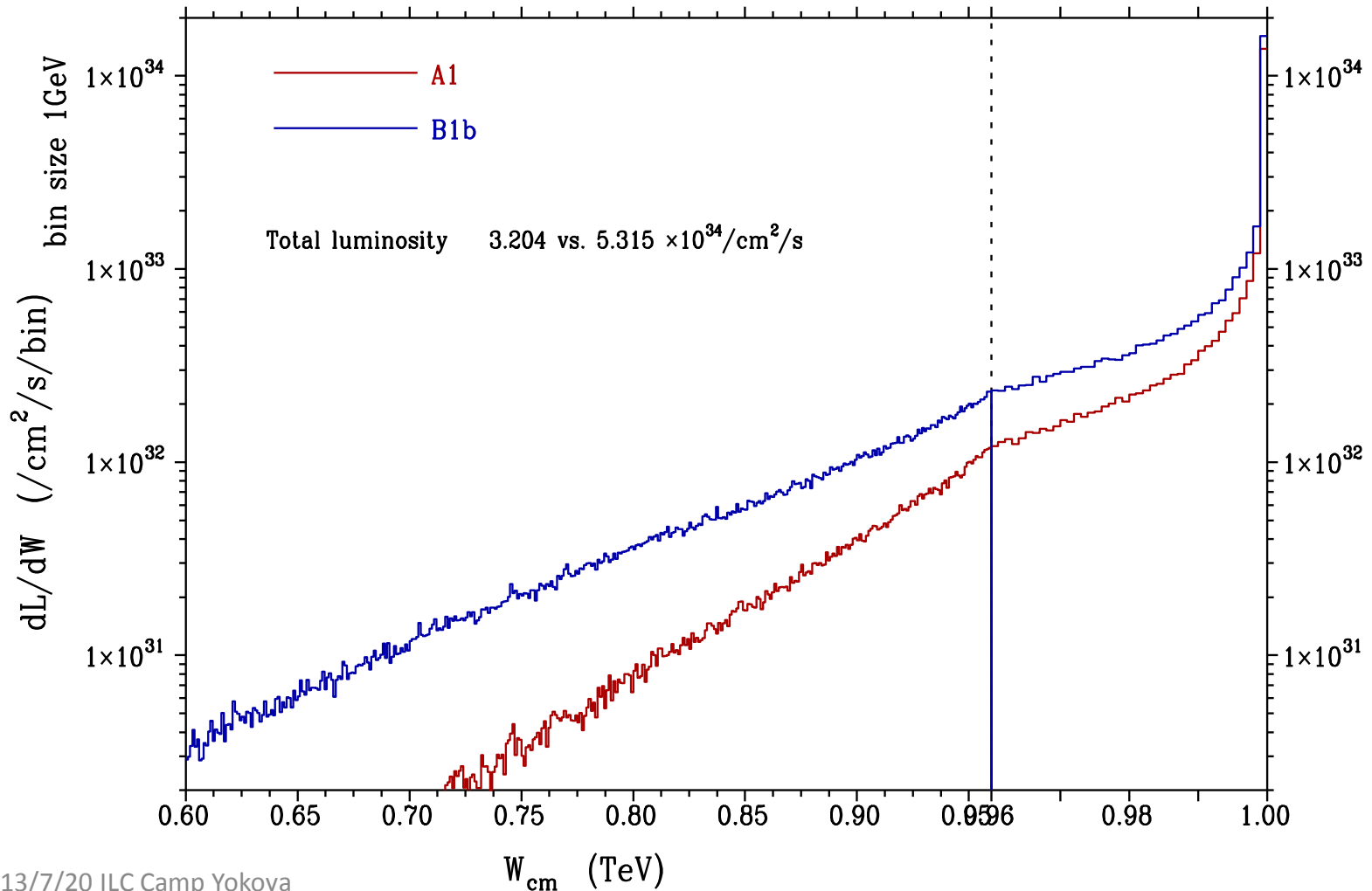


# Luminosity Spectrumの例: (1TeVの2つのParameter sets)

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

20111206(171057)

CAIN2.42

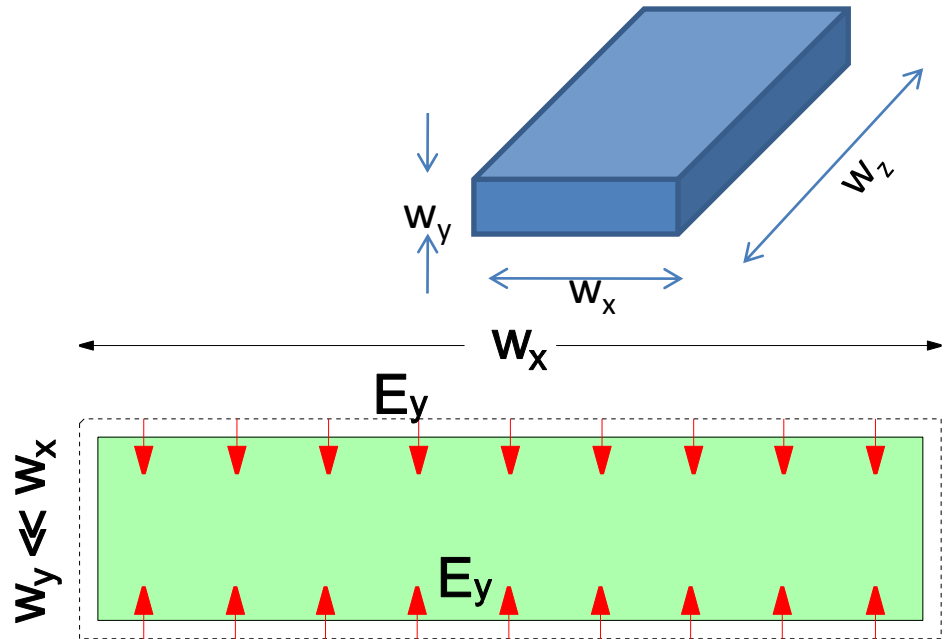


# Flat Beam

- 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

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

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

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

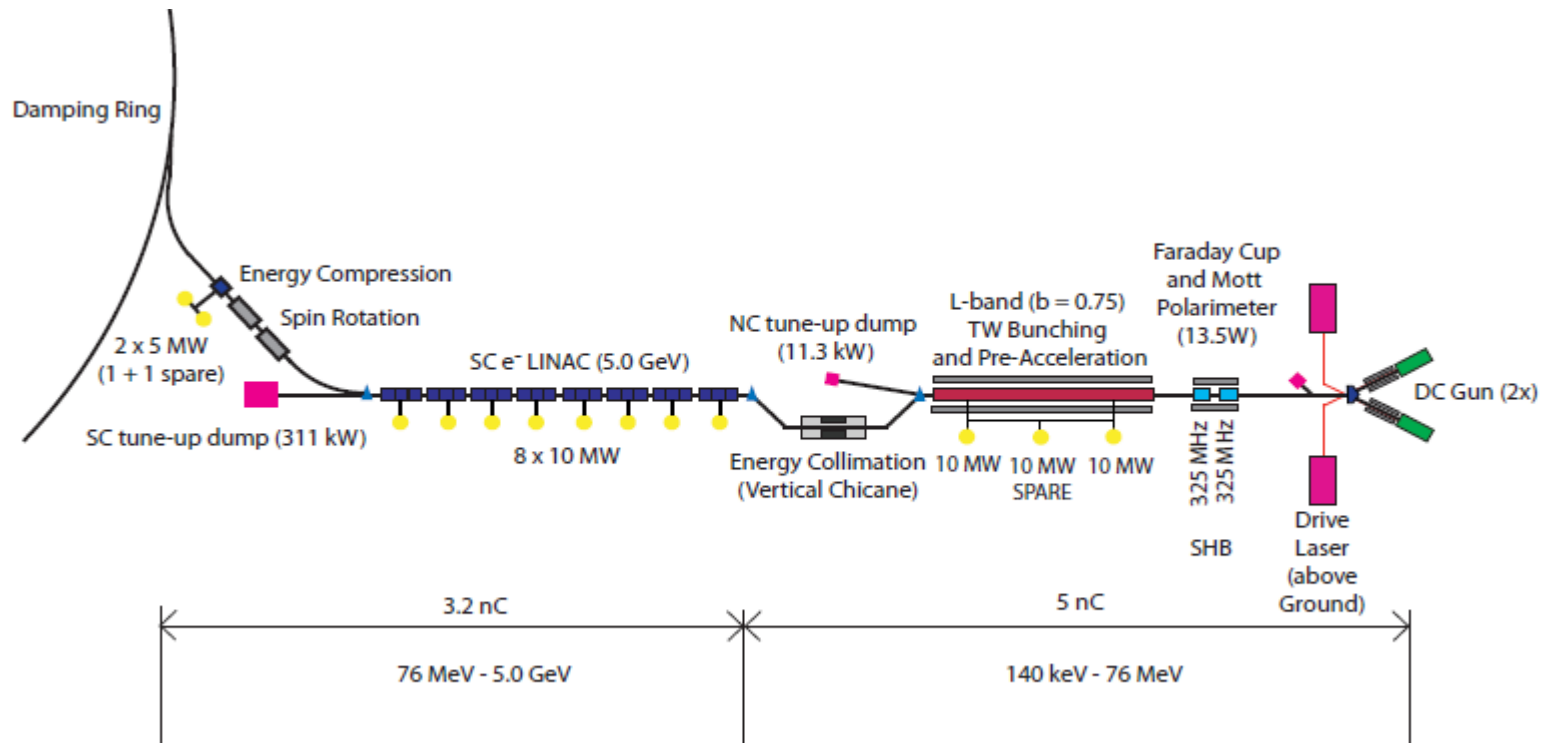
$$C = \frac{1}{4\pi \sqrt{0.836 r_e^3}}$$

- $\sigma_z/\beta_y$  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

# 電子源

## 栗木さん担当

- 偏極ビームが要求される (>80%)
- あまり問題はない



# 陽電子源

栗木さん担当

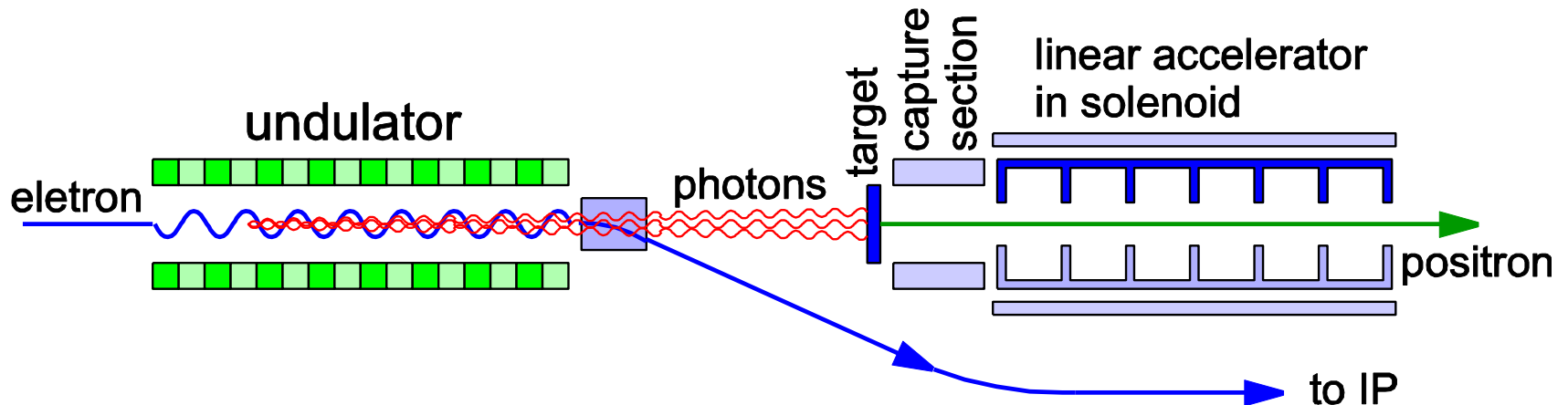
## 陽電子生成の3つの方法

- 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

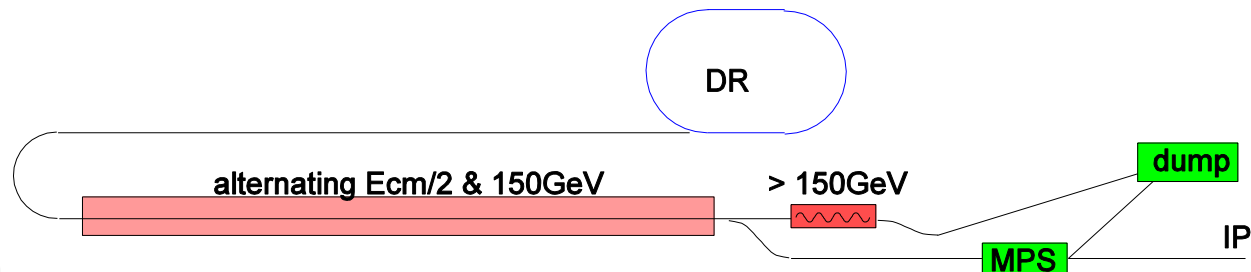
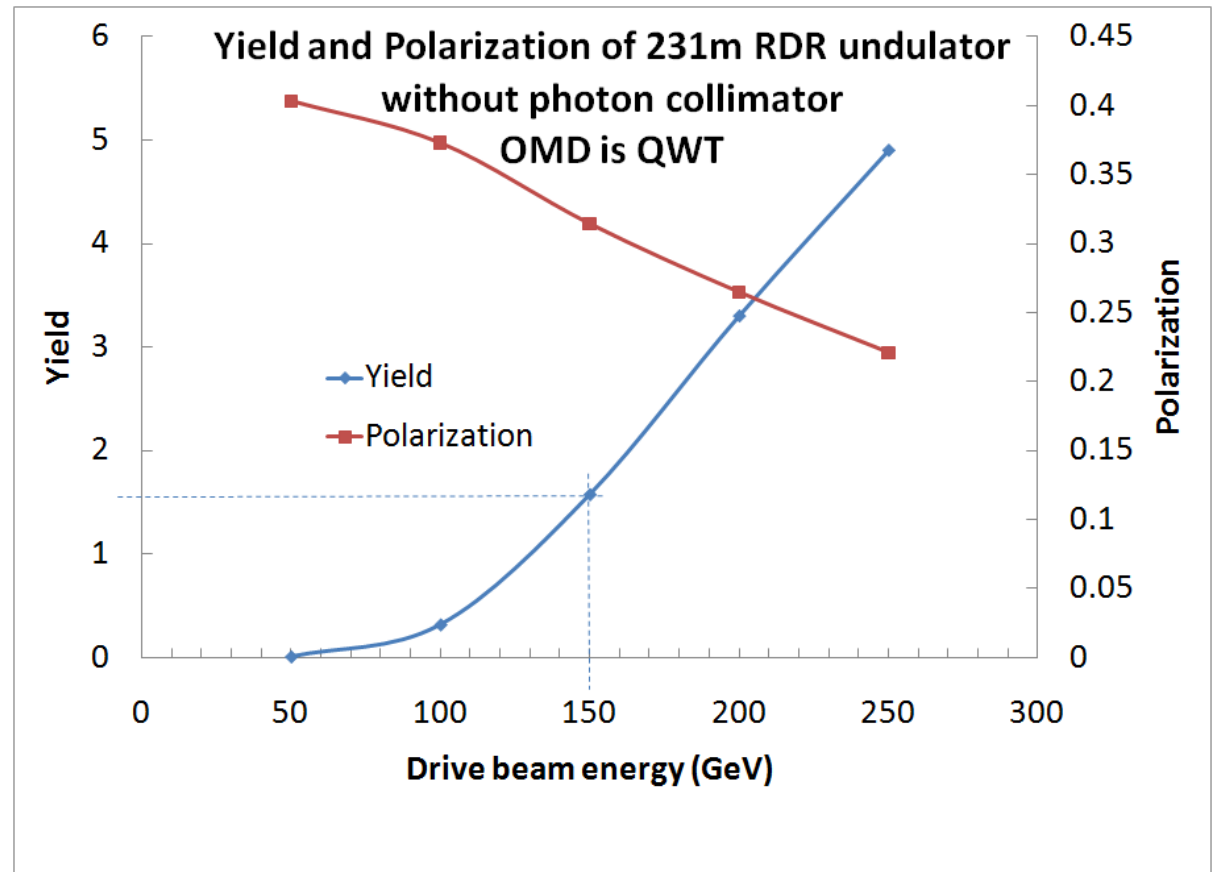
- 数100GeVの電子ビームを磁石 (undulator) により蛇行させると、数10MeVの輻射を出す。これを標的に当てて発生する陽電子を回収する。
- 平面上の蛇行でなく、螺旋状の運動 (Helical Undulator) なら、発生する輻射は円偏光し、偏極陽電子が得られる。



- 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強いの

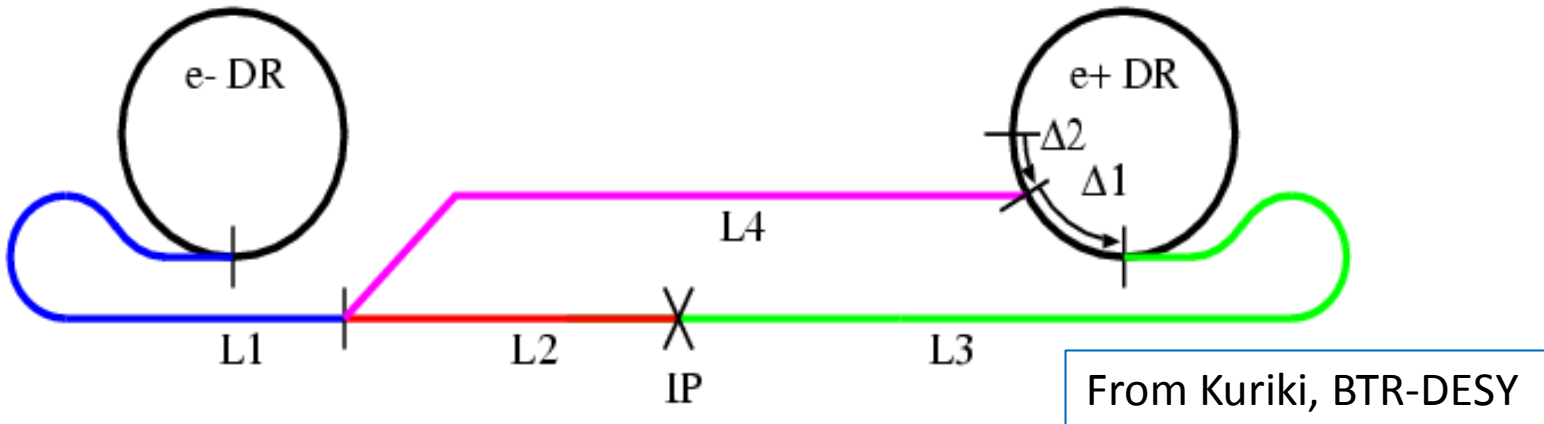
# 陽電子生成率

- 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
- ILCでは、これ以下の場合、電子側を10Hz運転することで、Luminosityをかせぐ



# 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
- $(L_4 + \Delta_1 + L_3) - L_2 = n \times C_{DR}$



- 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ると、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。
- 微調整は、DRの周長制御で可能（現在、 $n$  は10程度）

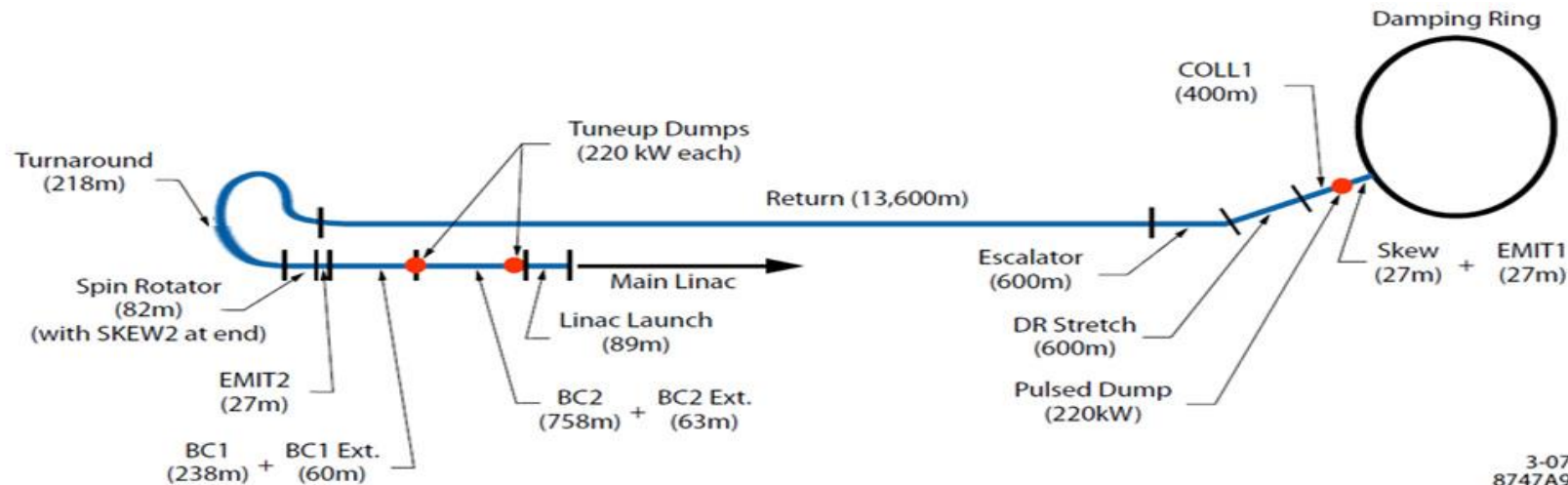
# Damping Ring

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~3000)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

# RTML (Ring To Main Linac)

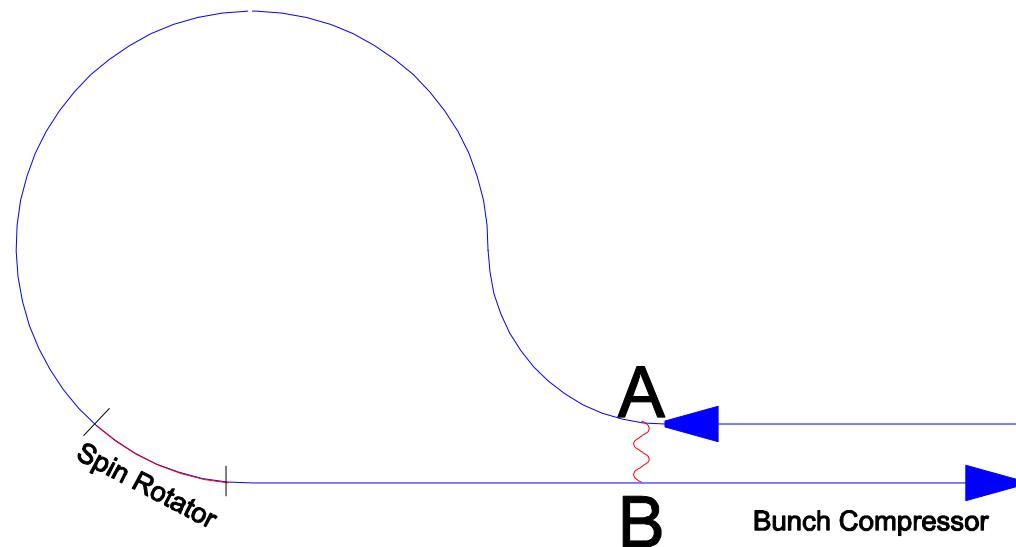
久保さん担当



- 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

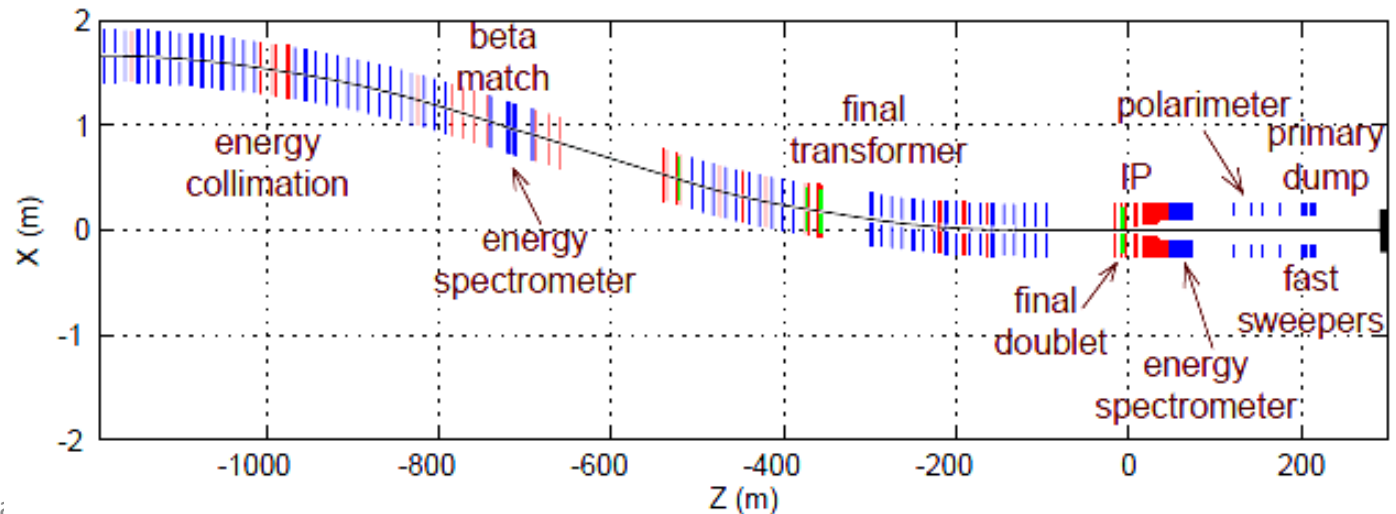
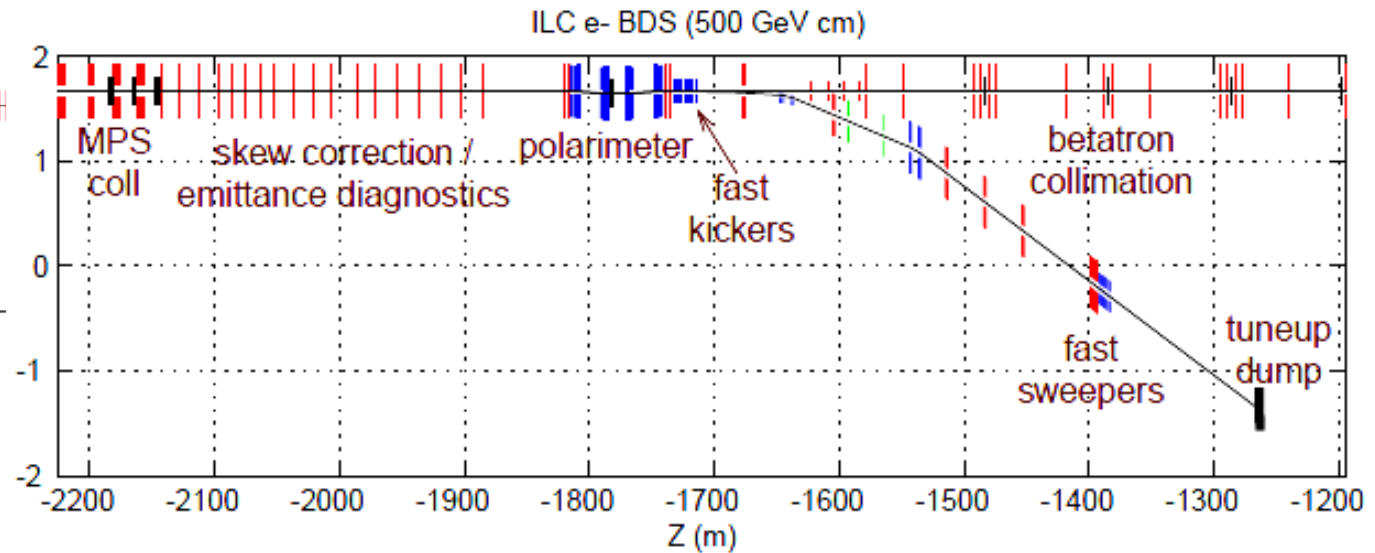
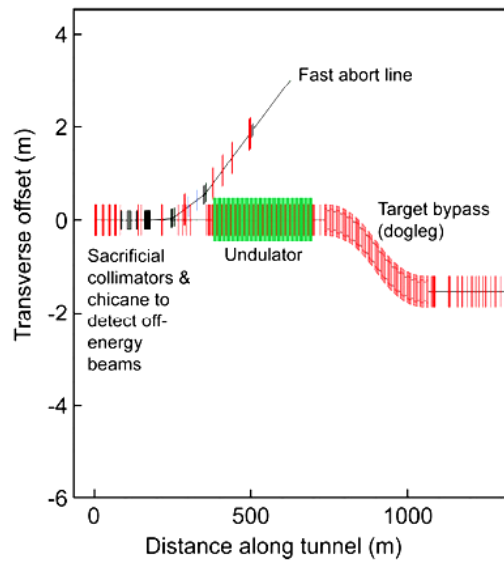
- Turn around を利用して、バンチ位置のfeedforward ができる。
- Turn around に入る直前のバンチ位置を測定し、もどって来たときに補正する。
- とくに、減衰リングの取出しキッカーのfluctuationの結果をなおすことができる。



# Main Linac

- Main Linacは
  - 超伝導技術 山本(明)さん担当
  - 加速空洞 佐伯さん担当
  - 空洞製作施設 山中さん担当

# BDS (Beam Delivery System)



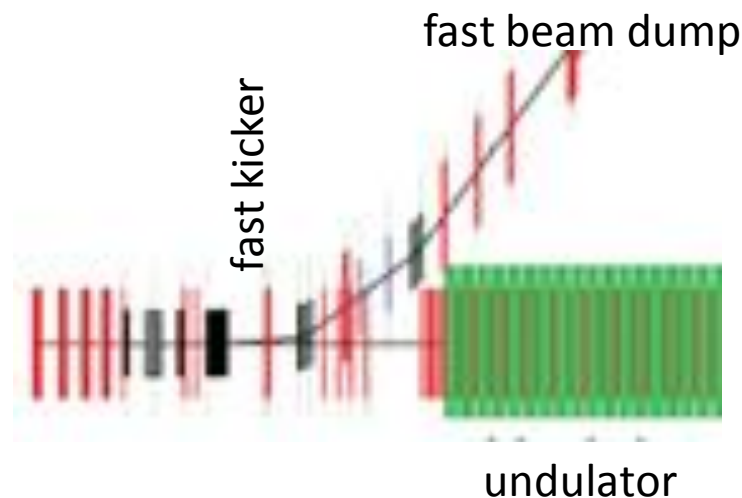


# BDSの構成

- 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
- Tune-up/emergency dump
- Collimator
- Beam diagnostics section (beam energy, emittance, polarization)
- Muon absorber
- Crab cavity
- Feedback system
- Main beam dump

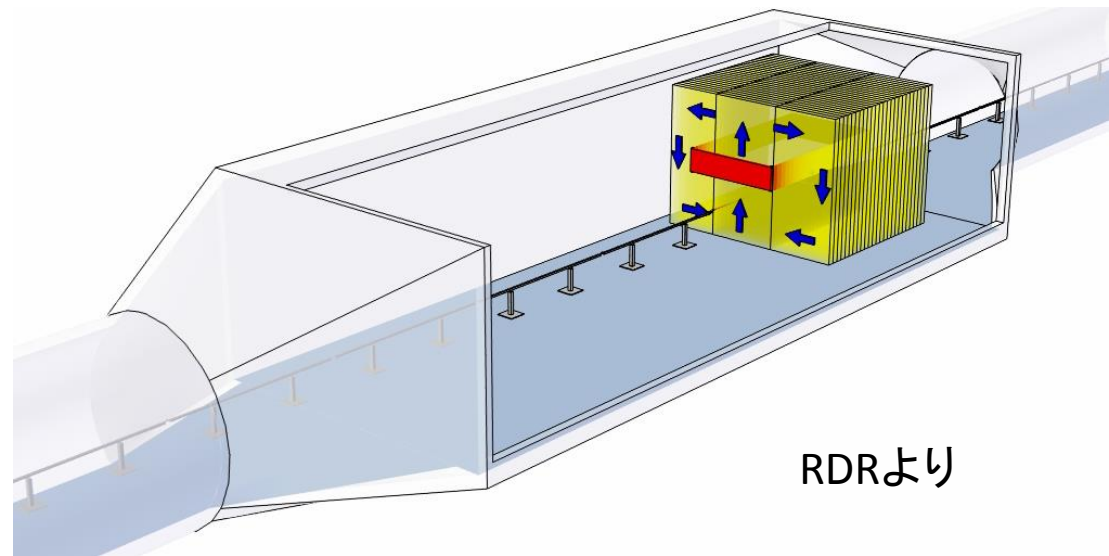
# MPS (Machine Protection System)

- 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 12mm
- 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



# Final Focus System

- BDSのもっとも重要な部分
- 長さ500m余のビームライン

# 色収差

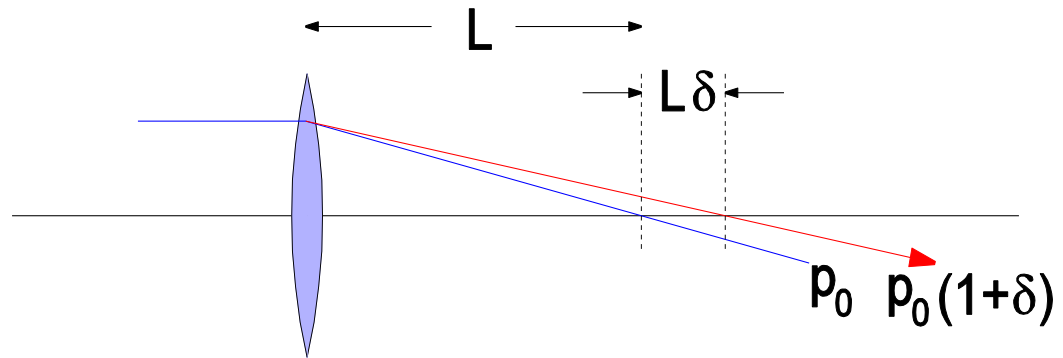
- 最後の4極磁石から焦点 ( $s=0$ ) までの距離を  $L$  とする。
- $p=p_0$  の粒子はこの点で絞られている。
- $p=p_0(1+\delta)$  の粒子は、4極磁石から  $L(1+\delta)$  あたりに焦点がくる。  
この焦点は、 $s=0$  から  $L\delta$  だけずれているから、そこでのベータ関数は

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

- したがって色収差の目安は

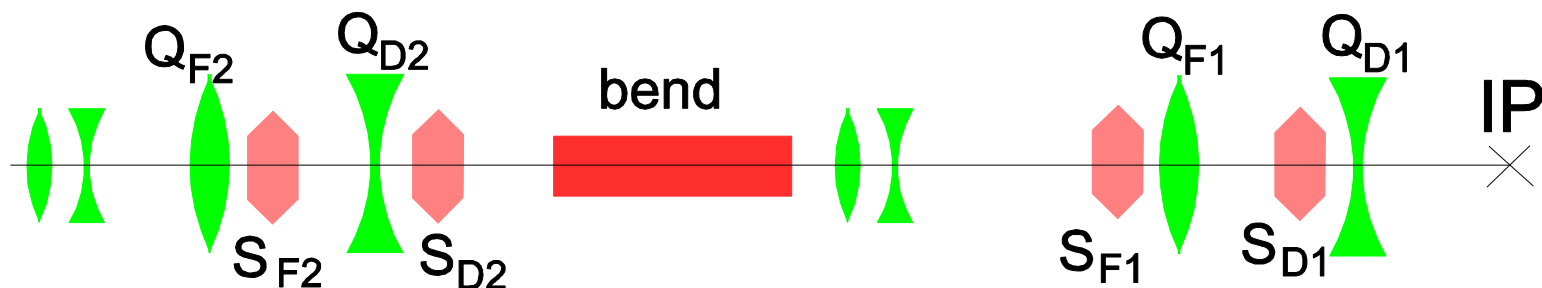
$$\xi = \frac{L\delta}{\beta_0}$$

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



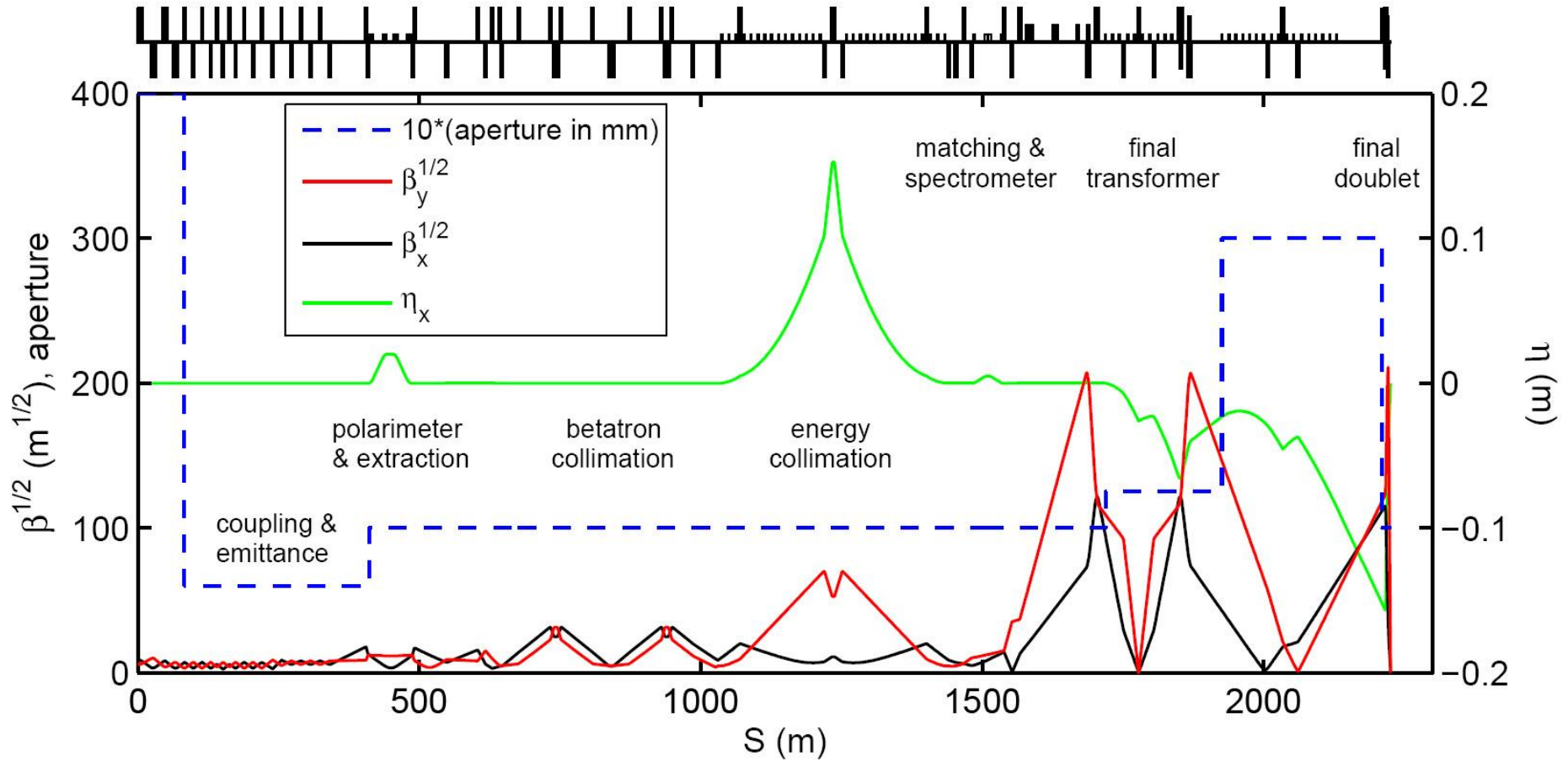
# Local Chromaticity Correction

- 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。



- 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

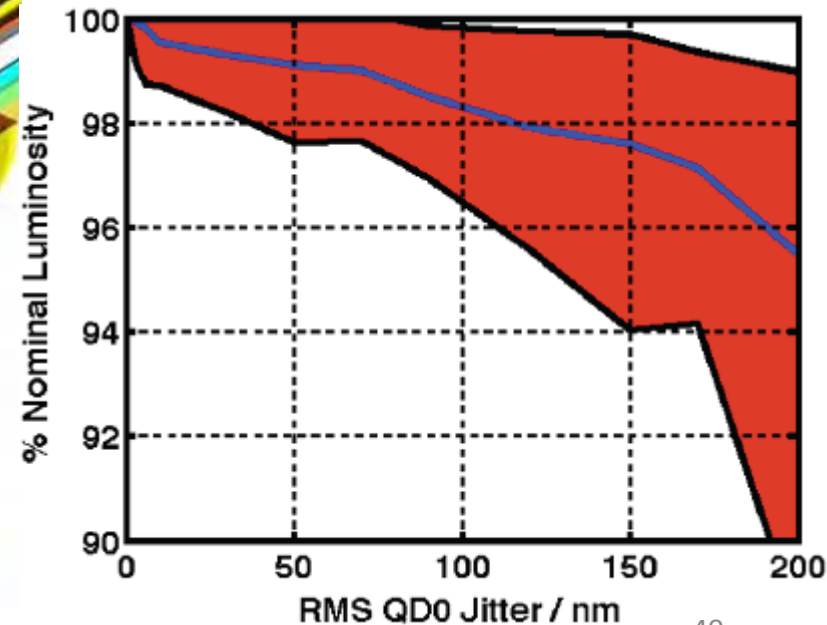
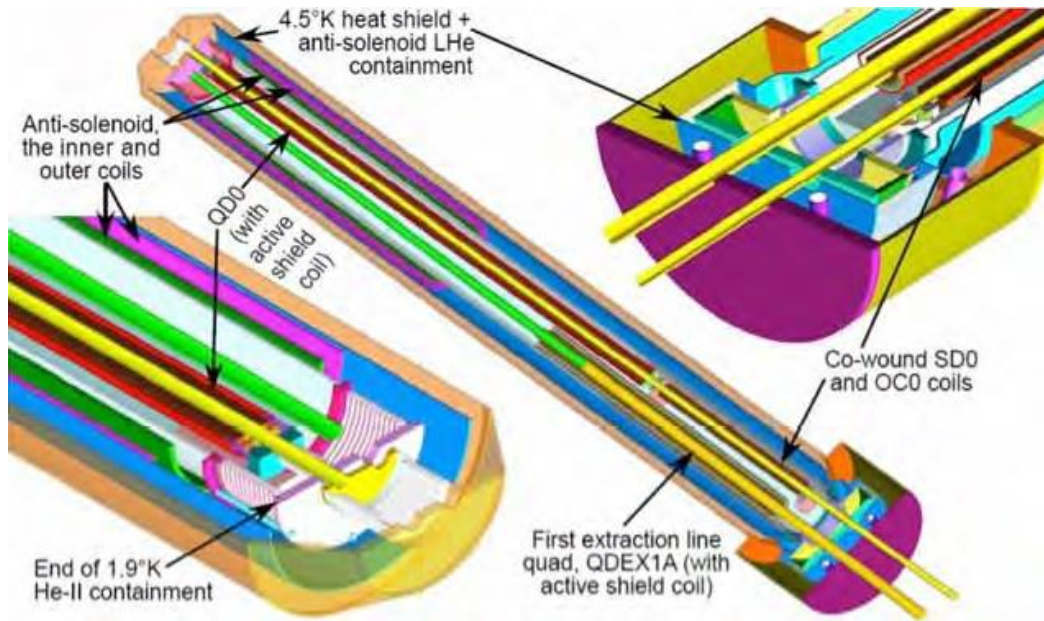
# FF Optics



Single IR BDS optics (2006e)

# Final Doublet

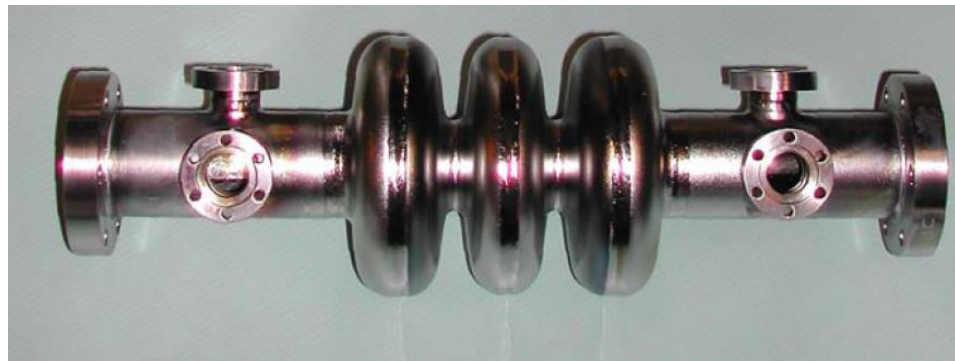
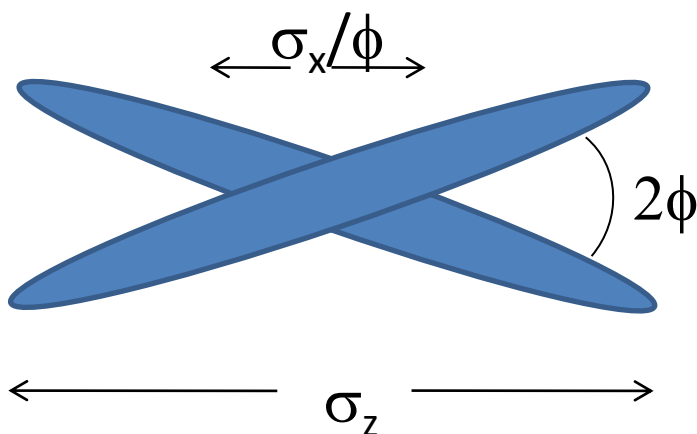
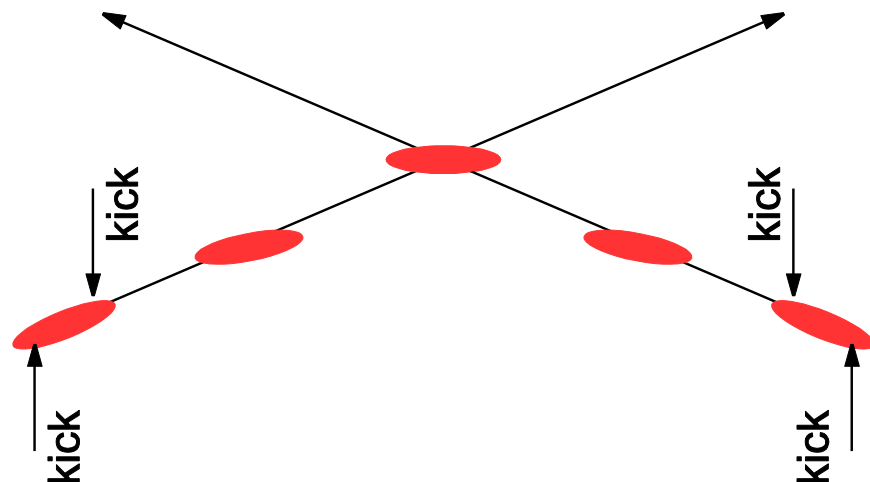
- Final doublet
  - Under study at BNL
  - Split QD0 (2m) into 2 pieces
  - Easier mechanical support
  - Flexibility for low energy optics
- QD0 Jitter
  - Simulation by White below
  - Shows average, 10%, 90% CL
  - Luminosity loss 1%  
→ jitter < 50nm rms





# Crab Crossing

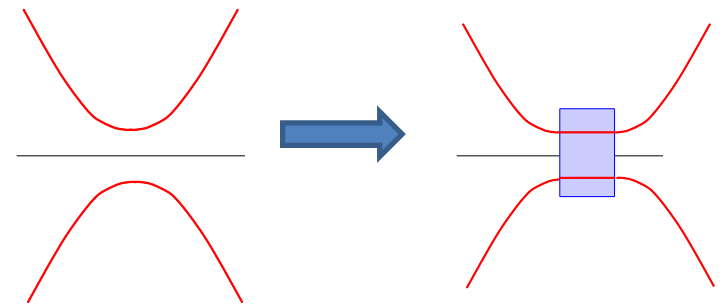
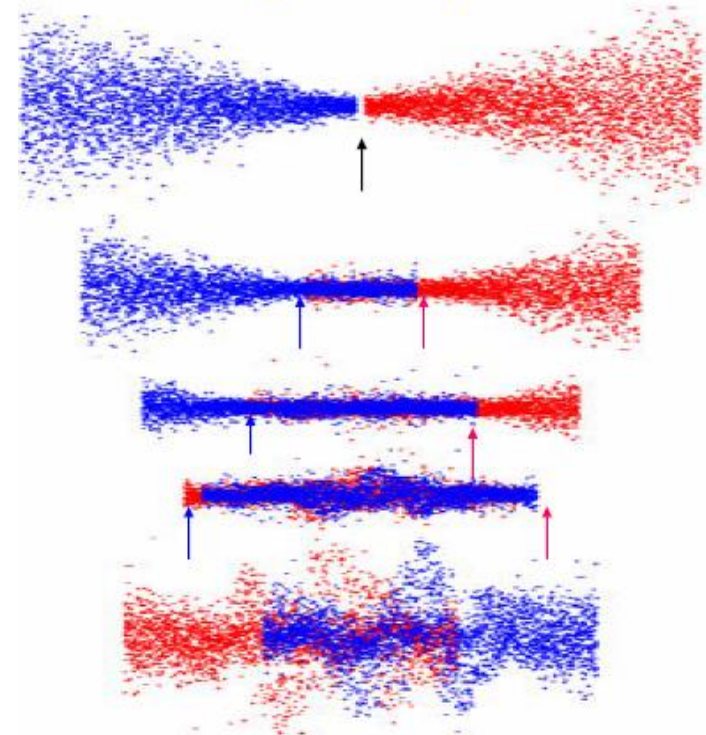
- 実験へのbackgroundをさけるため、ILCでは14 mradの交差角をつける
- $14\text{mrad} \gg \sigma_x / \sigma_z$  であるためこのままではluminosityがほとんどなくなる
- ILCではcrab crossingは必須
- 電子・陽電子側のクラブ空洞のタイミング誤差の許容値がきびしい



# 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

Travelling Focus  $\beta^* < \sigma_z$

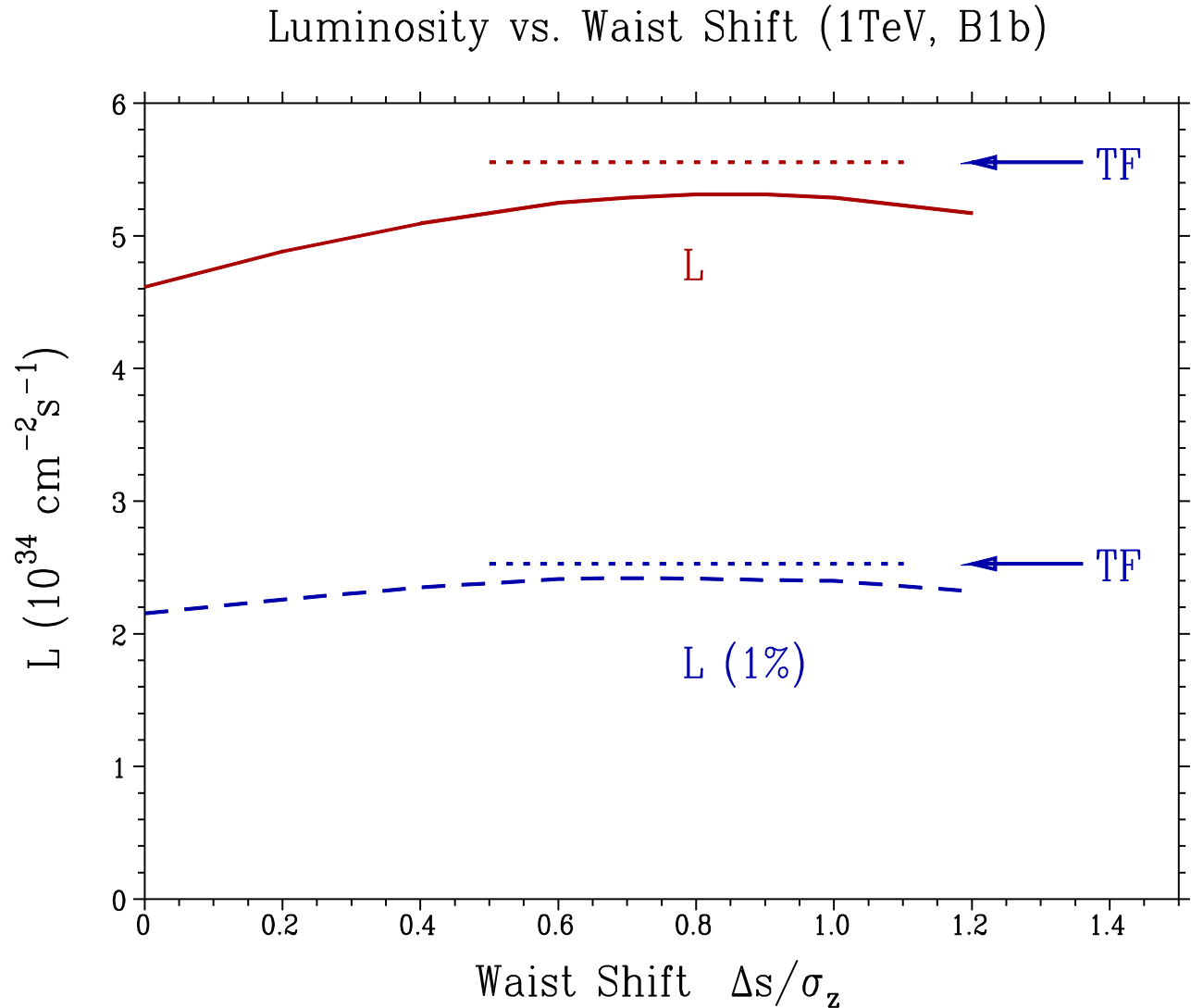


# Waist Shift

- 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)



# 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

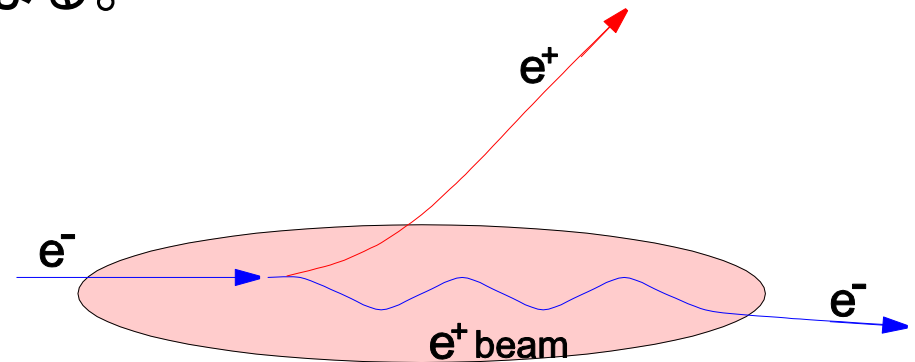
$$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^- \quad (\text{Breit-Wheeler process})$$

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

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

(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、大きな角度で飛出るので、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

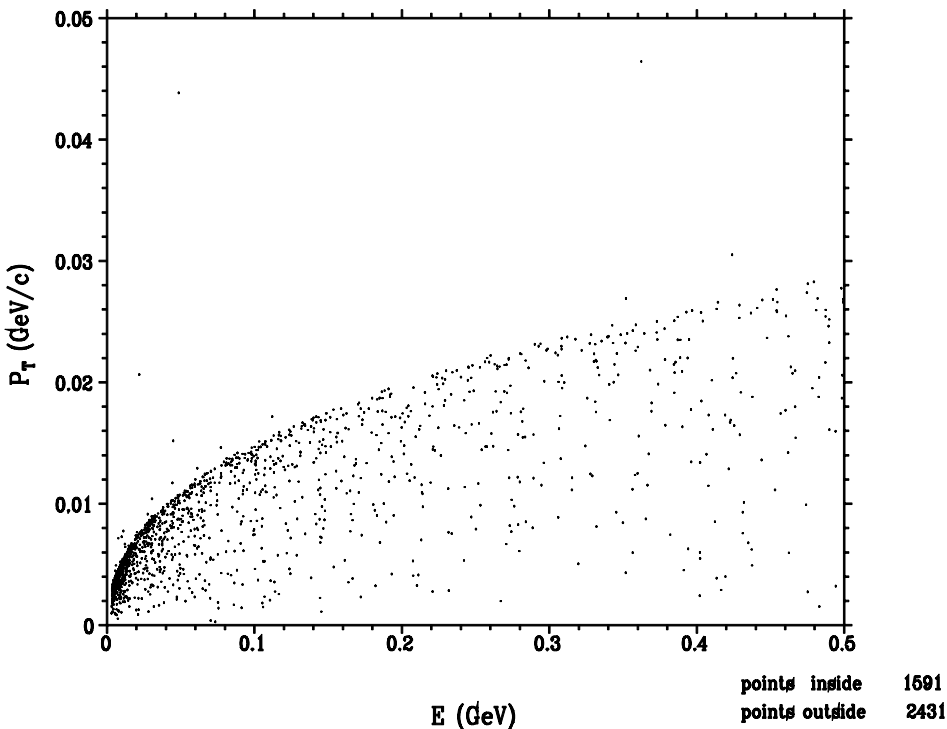
# Pair Angle分布の例

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

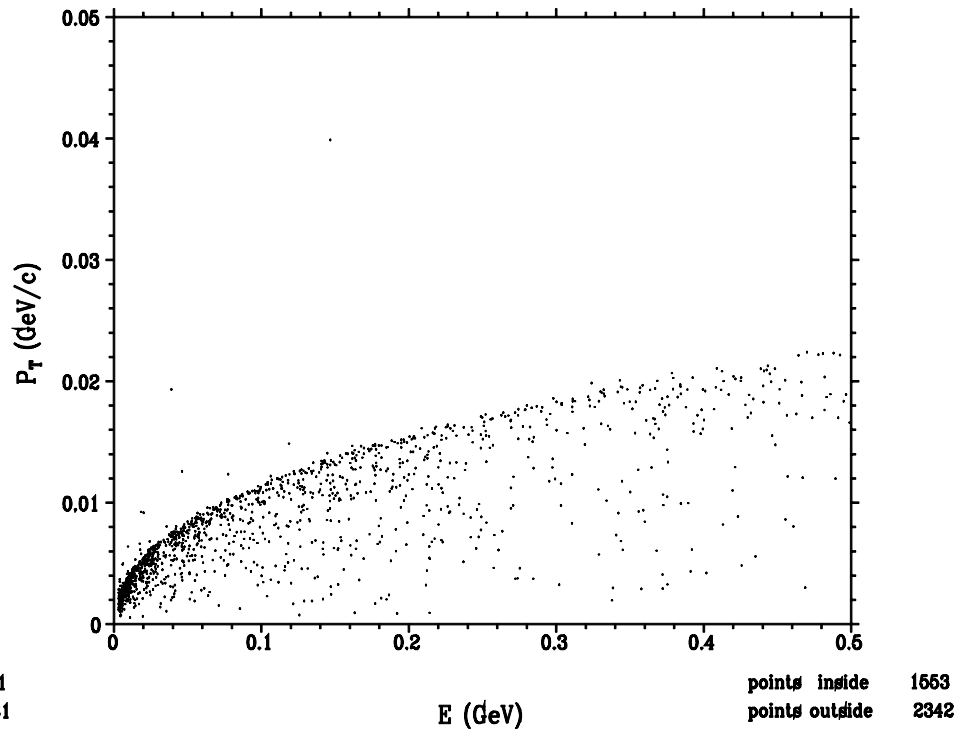
10% 150  $\mu\text{m}$

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

20110927(083023) case10% pairPT  
Incoherent Pair Energy-PT Distribution

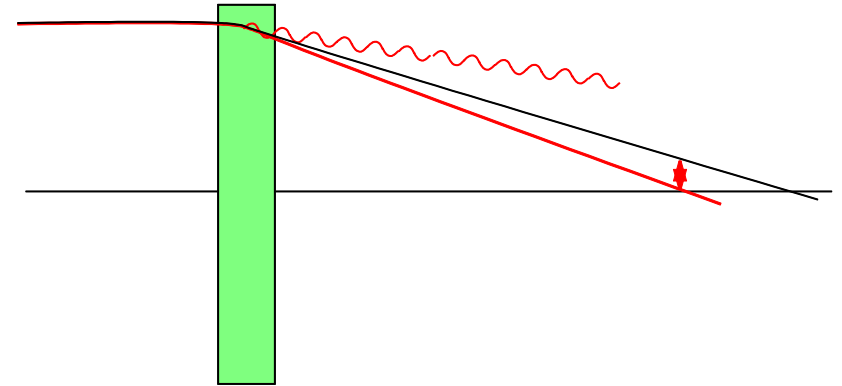


20110927(073621) case10% longBunch2PT  
Incoherent Pair Energy-PT Distribution



# 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



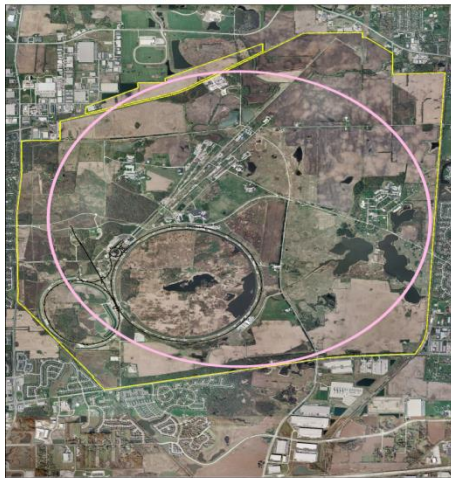
# Higgs Factories

# Possible Higgs Factories

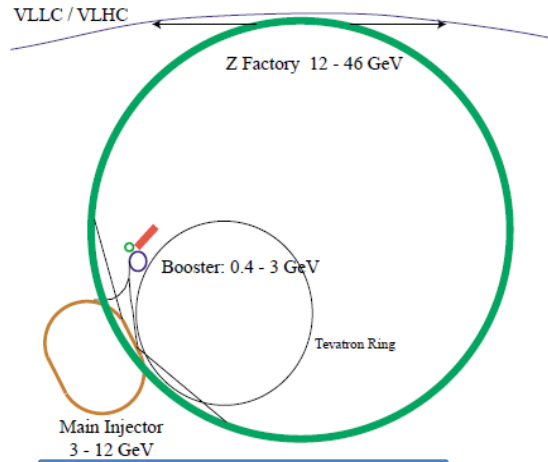
- **$e^+e^-$  LC**
  - ILC
  - CLIC
  - NLC/GLC-type (klystron-based normal-conducting LC)
- **$e^+e^-$  Ring Colliders**
  - Ring Colliders
    - LEP3, TLEP, SuperTRISTAN, FNAL site filler, CHF, .....
- **$\mu^+\mu^-$  Collider**
- **$\gamma\text{-}\gamma$  Collider**
  - SC Linac-based
    - ILC-based
    - Recirculating linac
    - ERL based
  - NC Linac-based
    - CLIC-based
    - NLC/GLC-type
    - SLC-type

# Revival of e+e- Ring Colliders ?

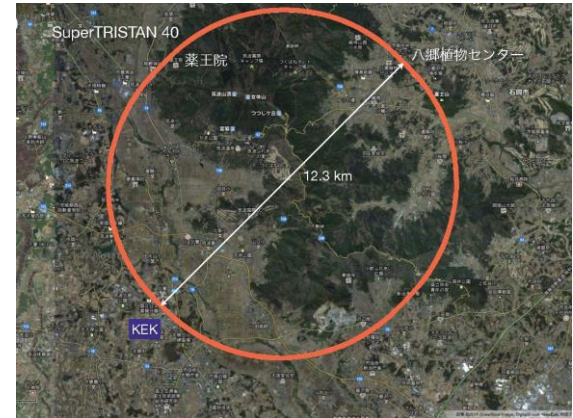
- To create Higgs by  $e^+e^- \rightarrow ZH$  requires  $E_{CM} \sim 240\text{GeV}$
- This is not too high compared with the final energy 209GeV at LEP



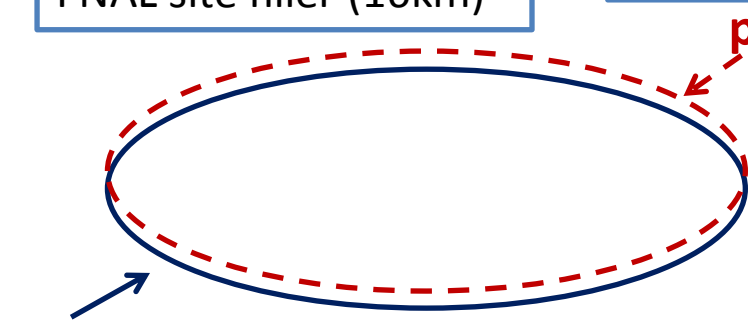
FNAL site filler (16km)



VLCC (233km)

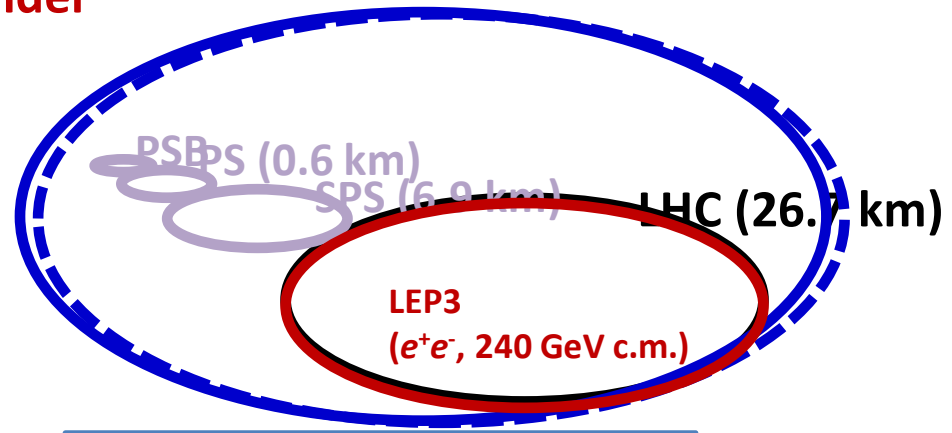


SuperTRISTAN (40km, 60km)



CHF (China) (50km, 70km)

pp collider



LEP3 (27km), TLEP (80km)

## 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

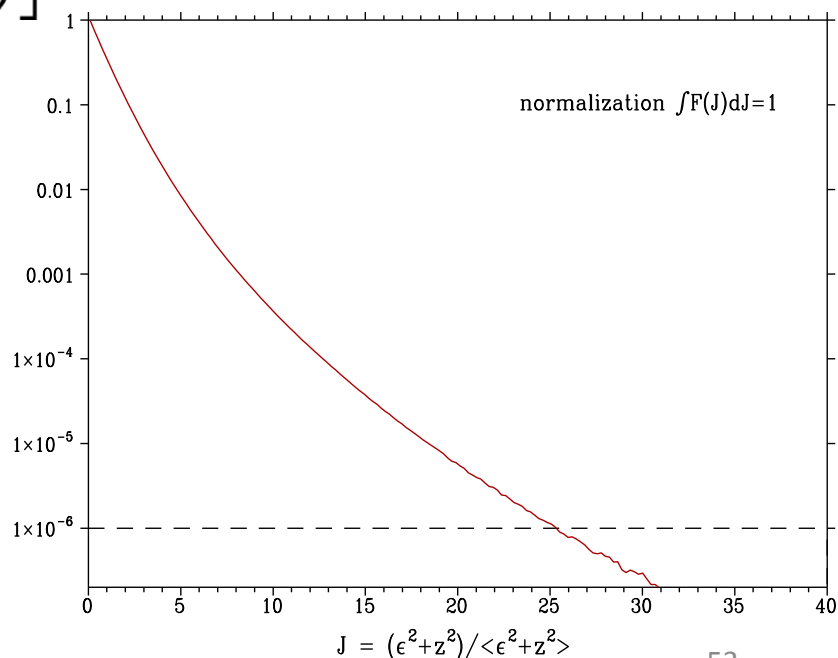
- Beamstrahlung の high-energy tail は電子・陽電子のおおきなエネルギー損失をもたらす

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

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

- 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



# Luminosity Scaling of $e^+e^-$ Ring Colliders

V. Telnov, arXiv:1203.6563v, 29 March 2012

- For given Upsilon, the momentum band width must be

$$\eta \equiv [\Delta p/p]_{max} \gtrsim 15\Upsilon$$

- Then, the luminosity at beamstrahlung limit and tune-shift limit is given by

$$\mathcal{L} \propto \frac{\rho P_{SR}}{E^{13/3}} \left( \frac{\xi_y \eta^2}{\varepsilon_{g,y}} \right)^{1/3}$$

$P_{SR}$  : syn.rad.power

$\rho$  : bending radius

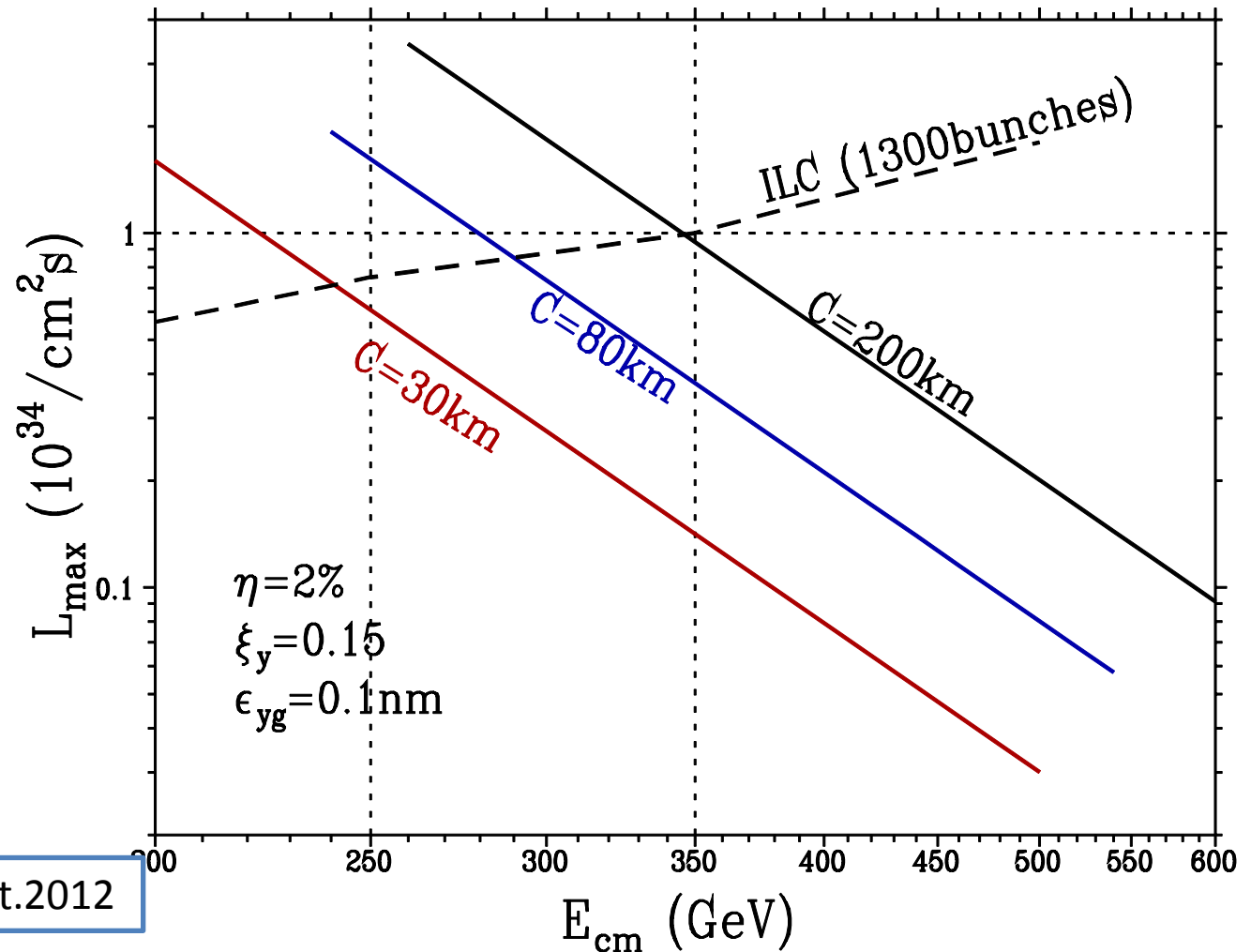
$\xi_y$  : tune-shift

$\varepsilon_{g,y}$  : geometric emit.

# Luminosity vs. Energy

example with

- $\eta=2\%$
- $\xi_y=0.15$
- $\epsilon_{gy}=0.1\text{nm}$
- SR 100MW



Yokoya, Arlington, Oct.2012

# Circular e+e- Collidersの現状

- LEP3 は議論の外
  - CERN の将来の programに合わない
  - 将来の merit がない (トンネルを ppに使うこと)
  - European Strategyでreject
- その他のe+e- ring collidersは現実味がない
  - CHF (China) はゼロからスタートしなければならない
  - FNAL site filler (16km) は利点がない (no pp)
- **TLEPに集中**
  - 20GeV までの injectors はすでにある
  - トンネルは 100TeV までのppに使える
  - 最早で 2030 実験開始(HL-LHC の運転に並行して建設)
  - Study supported by European Strategy?



# TLEPの(宣伝されている)利点

- 240GeV (TLEP-H) でのluminosity は、ILCより~5倍高い(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)
- 十分経済済の技術
  - 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

# LEP3/TLEP parameters -1

soon at SuperKEKB:  
 $\beta_x^* = 0.03$  m,  $\beta_y^* = 0.03$  cm

	LEP2	LHeC	LEP3	TLEP-Z	TLEP-H	TLEP-t
beam energy $E_b$ [GeV]	104.5	60	120	45.5	120	175
circumference [km]	26.7	26.7	26.7	80	80	80
beam current [mA]	4	100	7.2	1180	24.3	5.4
#bunches/beam	4	2808	4	2625	80	12
#e-/beam [ $10^{12}$ ]	2.3	56	4.0	2000	40.5	9.0
horizontal emittance [nm]	48	5	25	30.8	9.4	20
vertical emittance [nm]	0.25	2.5	0.10	0.15	0.05	0.1
bending radius [km]	3.1	2.6	2.6	9.0	9.0	9.0
partition number $J_\epsilon$	1.1	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0
momentum comp. $\alpha_c$ [ $10^{-5}$ ]	18.5	8.1	8.1	9.0	1.0	1.0
SR power/beam [MW]	11	44	50	50	50	50
$\beta_x^*$ [m]	1.5	0.18	0.2	0.2	0.2	0.2
$\beta_y^*$ [cm]	5	10	0.1	0.1	0.1	0.1
$\sigma_x^*$ [ $\mu\text{m}$ ]	270	30	71	78	43	63
$\sigma_y^*$ [ $\mu\text{m}$ ]	3.5	16	0.32	0.39	0.22	0.32
hourglass $F_{hg}$	0.98	0.99	0.59	0.71	0.75	0.65
$\Delta E_{loss}^{SR}/\text{turn}$ [GeV]	3.41	0.44	6.99	0.04	2.1	9.3

SuperKEKB:  $\epsilon_y/\epsilon_x = 0.25\%$

even with 1/5 SR power (10 MW) still  $> L_{ILC}$ !

# LEP3/TLEP parameters -2

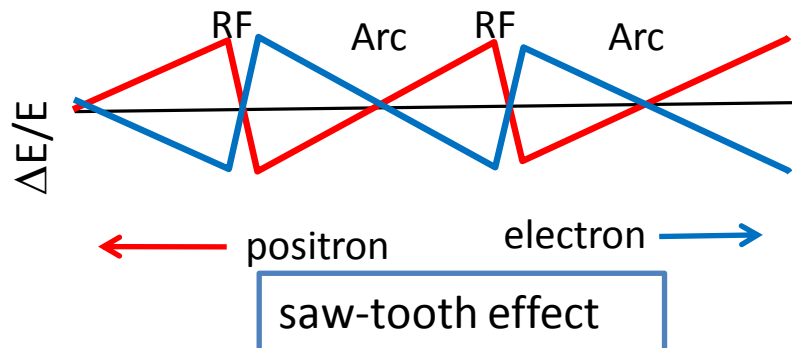
LEP2 was not beam-beam limited

	LEP2	LHeC	LEP3	TLEP-Z	TLEP-H	TLEP-t
$V_{RF,tot}$ [GV]	3.64	0.5	12.0	2.0	6.0	12.0
$\delta_{max,RF}$ [%]	0.77	0.66	5.7	4.0	9.4	4.9
$\xi_x/IP$	0.025	N/A	0.09	0.12	0.10	0.05
$\xi_y/IP$	0.065	N/A	0.08	0.12	0.10	0.05
$f_s$ [kHz]	1.6	0.65	2.19	1.29	0.44	0.43
$E_{acc}$ [MV/m]	7.5	11.9	20	20	20	20
eff. RF length [m]	485	42	600	100	300	600
$f_{RF}$ [MHz]	352	721	700	700	700	700
$\delta_{rms}^{SR}$ [%]	0.22	0.12	0.23	0.06	0.15	0.22
$\sigma_{z,rms}^{SR}$ [cm]	1.61	0.69	0.31	0.19	0.17	0.25
$L/IP [10^{32} cm^{-2} s^{-1}]$	1.25	N/A	94	10335	490	65
number of IPs	4	1	2	2	2	2
Rad.Bhabha b.lifetime [min]	360	N/A	18	37	16	27
$\Upsilon_{BS} [10^{-4}]$	0.2	0.05	9	4	15	15
$n_v/collision$	0.08	0.16	0.60	0.41	0.50	0.51
$\Delta\delta^{BS}/collision$ [MeV]	0.1	0.02	31	3.6	42	61
$\Delta\delta_{rms}^{BS}/collision$ [MeV]	0.3	0.07	44	6.2	65	95

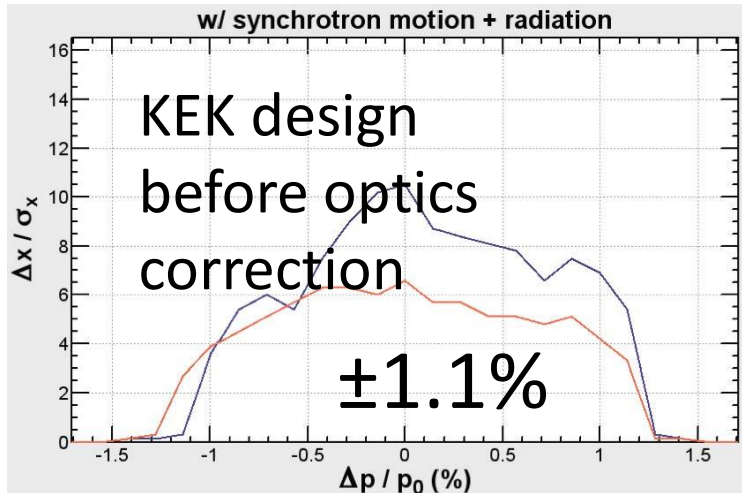
LEP data for 94.5 - 101 GeV consistently suggest a beam-beam limit of  $\sim 0.115$  (R.Assmann, K. C.)

# TLEP の技術的課題(1)

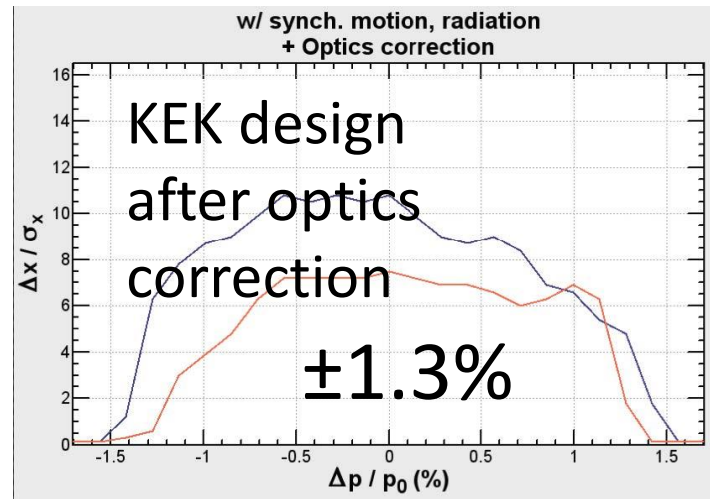
- Optics
  - 低emittance
  - $\beta y^* \sim 1\text{mm}$  のもとで大きなmomentum bandwidth ( $> 3\%$ )
  - Saw-tooth effects
- Machine configuration
  - parasitic collisionを避けるためPretzelが必要? (TLEP-Z)
    - 2 collider rings needed?
  - Top-up ring はdetectorをbypassしなければならない



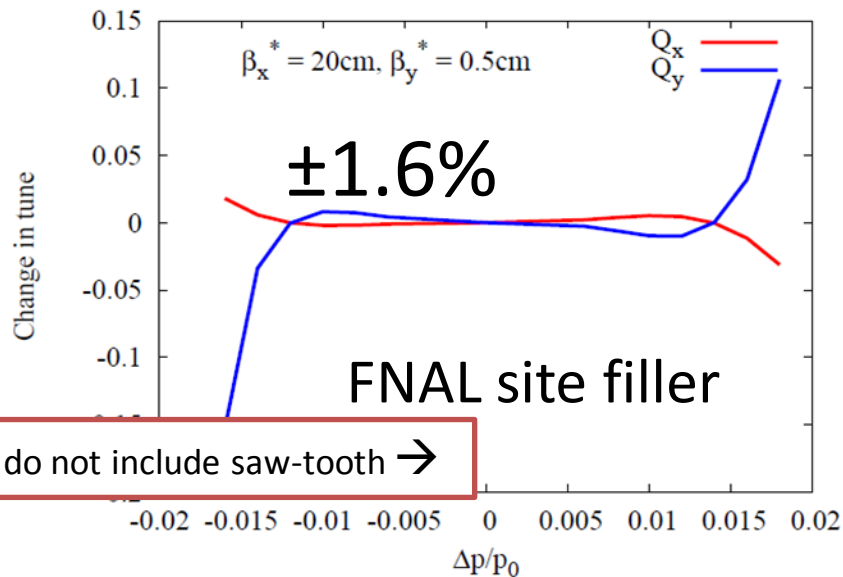
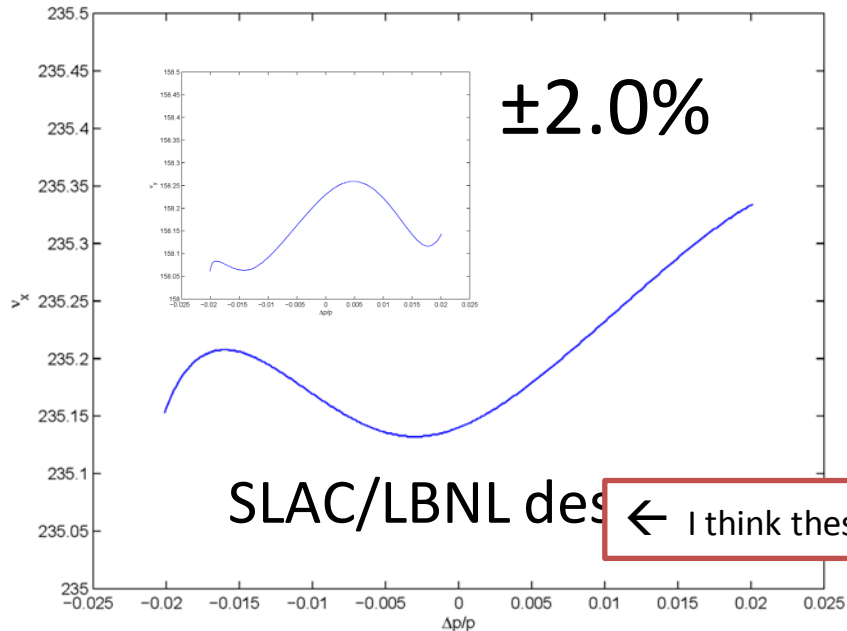
# circular HFs - momentum acceptance



with  
synchrotron  
motion &  
radiation  
(sawtooth)



K. Oide



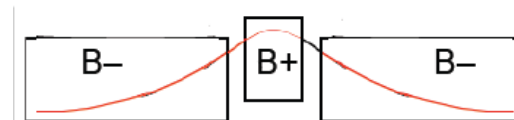
← I think these do not include saw-tooth →

# TLEP技術的課題(2)

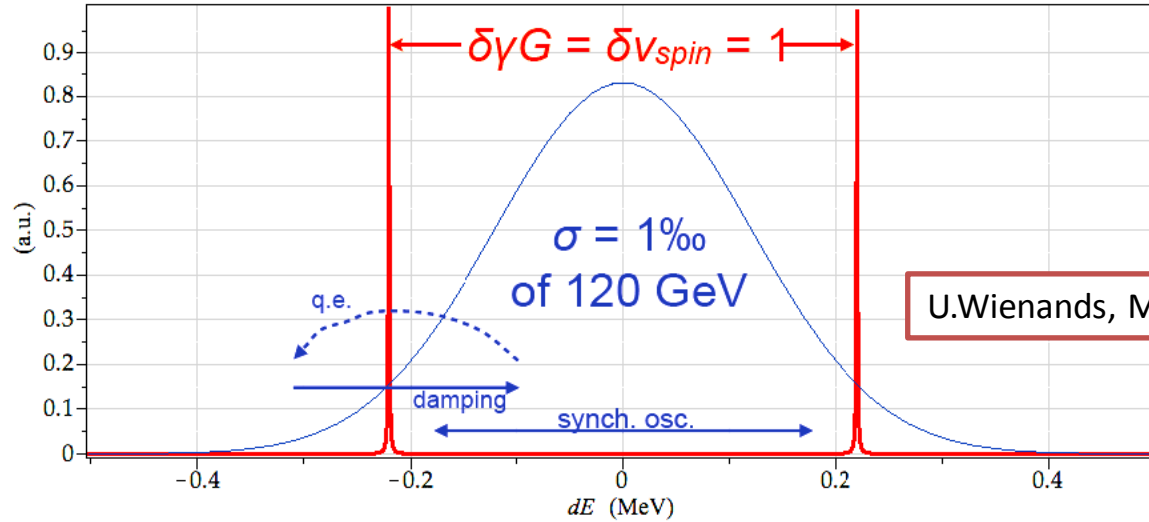
- Beam 力学
  - Beam-beam 相互作用
    - 複数IPの効果
    - 大きなhour-glass因子 ( $\beta_y=1\text{mm}$ ,  $\sigma_z=3\text{mm}$ )
    - 速い synchrotron 振動
  - 長い RF section ( $\sim 600\text{m}$ )に起因する不安定性 (特に TLEP-Z)
- RF
  - power coupler  $> \sim 200\text{kW}$  CW
    - $> 100\text{MW}$  into 600m cavity section
    - TLEP-Z, TLEP-H, TLEP-t に共通
    - 1.3GHz は無理。700MHz ならOKか。Need R&D.
- 真空
  - Synchrotron radiation のシールド (特に TLEP-t)
    - critical energy  $\sim 1.5\text{MeV}$   $\rightarrow$  neutronの発生

# Beam Polarization at TLEP

- Sokolov-Ternov self-polarization
  - High pol. expected at TLEP-Z but  $\tau_{\text{pol}}=150\text{hrs}$  (propto.  $\rho^3/E^5$ )
    - may be accelerated by asymmetric wiggler
  - $\tau_{\text{pol}}\sim 10\text{min}$  at  $E_e=175\text{GeV}$  is acceptable but
- Beam energy spread (propto.  $E^2/\sqrt{\rho}$ ) causes depolarization at higher energies
  - Spin precession tune =  $E_e/0.44\text{GeV}$  ( $=mc^2/a$ )
  - Resonance spacing =  $0.44\text{GeV}$  ( $=mc^2/a$ )
  - LEP  $E_e=45\text{GeV}$  corresponds to  $45\times 3^{1/4} = 60\text{GeV}$  at TLEP
  - Siberian snake can make the spin tune 0.5 independent of particle energy but destroys self-polarization (also, polarization could not be used for energy calibration)
- Inject pre-polarized beam is possible but
  - must preserve polarization in all injectors
  - polarized positron is hopeless
- Spin rotator to re-direct the spin longitudinal is anyway needed
  - but not needed if energy calibration only (pol. level  $\sim 5\%$  sufficient)
- **Lots of enjoyable excercises**

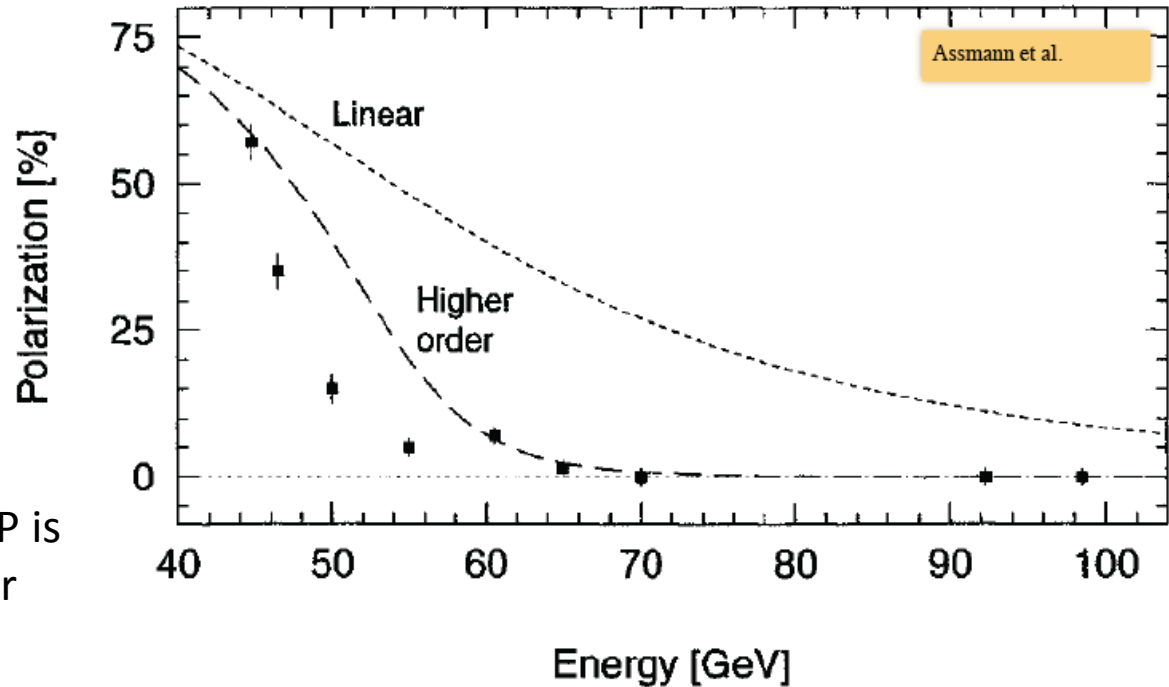


Depolarization due to energy spread



U.Wienands, MIT WS

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)

	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

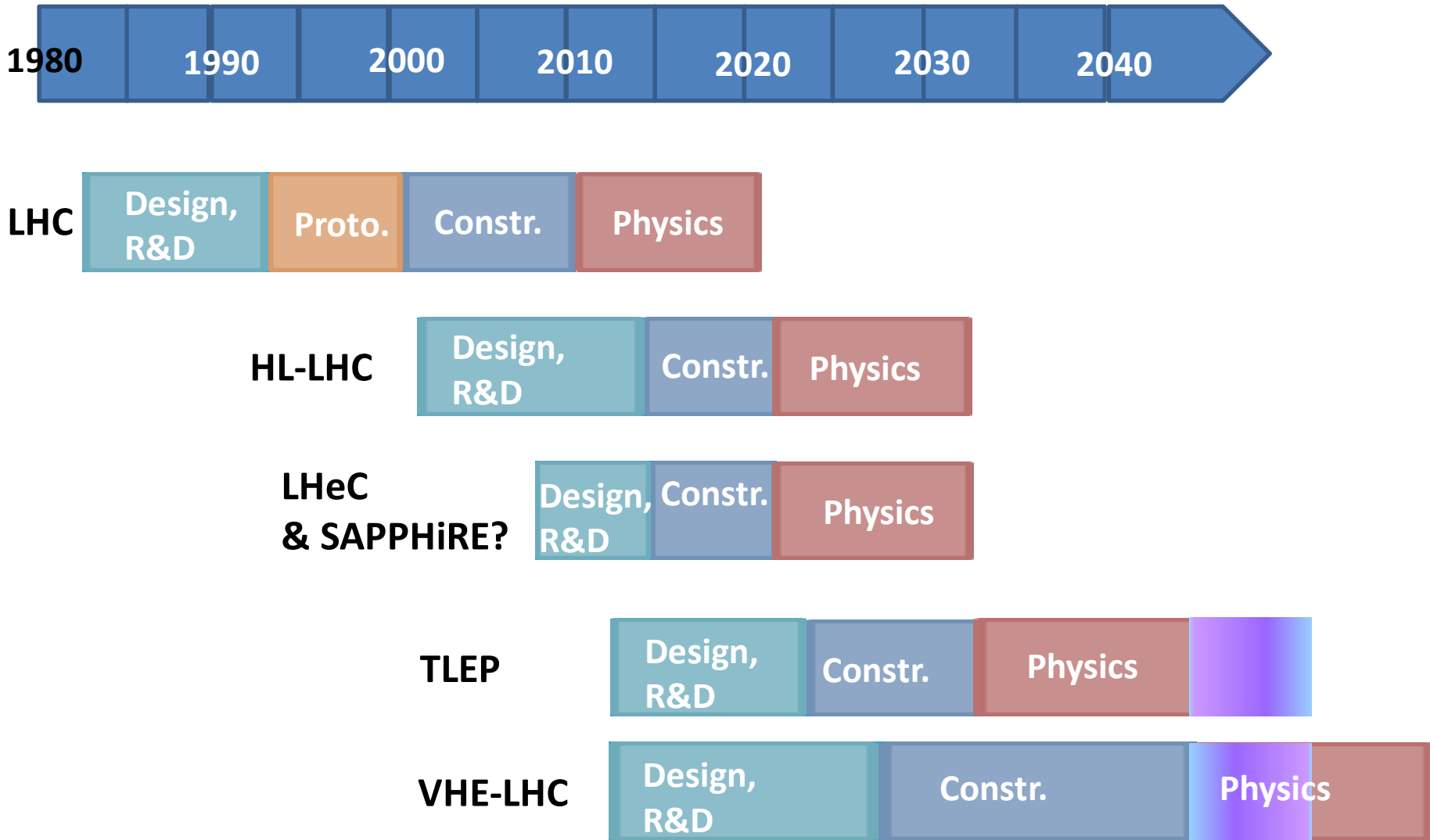
2013/7/20 ILC Camp Yokoya

Note: detector costs not included

Zimmermann, TLEP WS, Apr.2013<sup>6</sup>

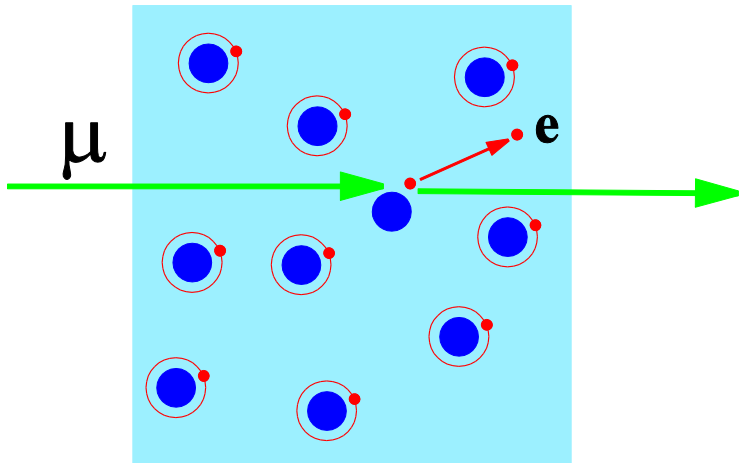
# Tentative time line

Zimmermann, TLEP WS, Apr.2013

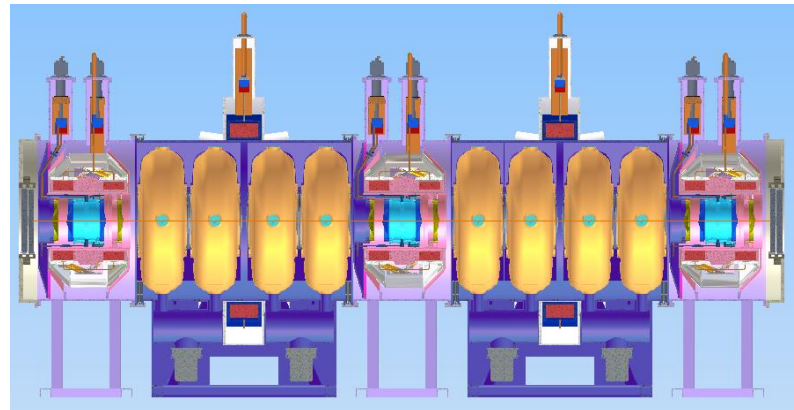


# Muon Collider

- $\mu$  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

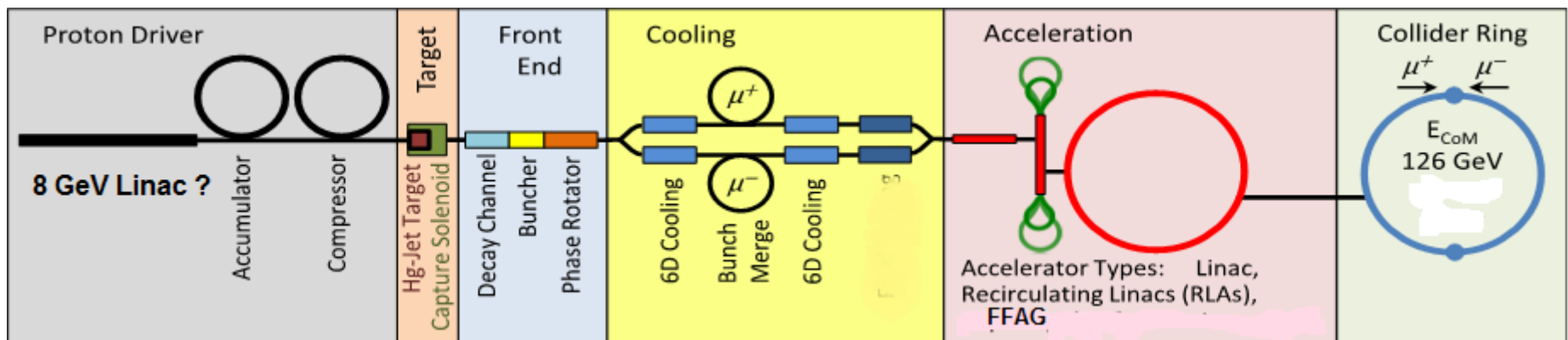
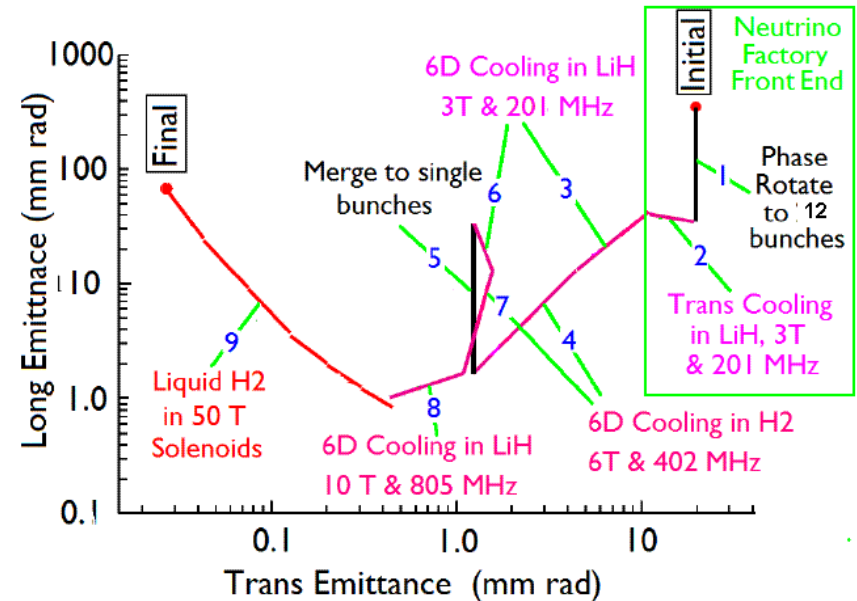


Ionization cooling test at MICE



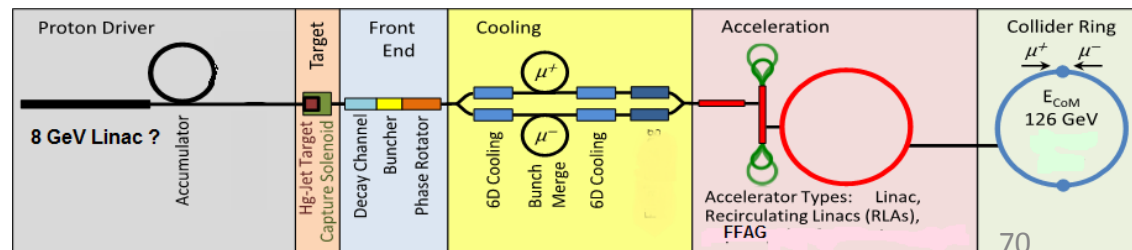
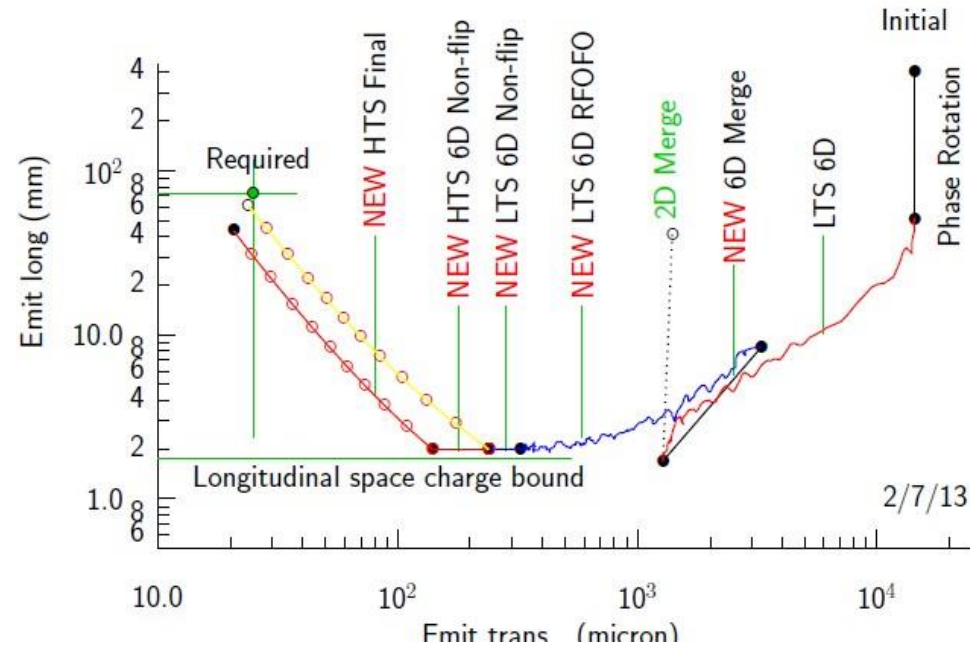
# Create and Cool Muon Beam

- 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

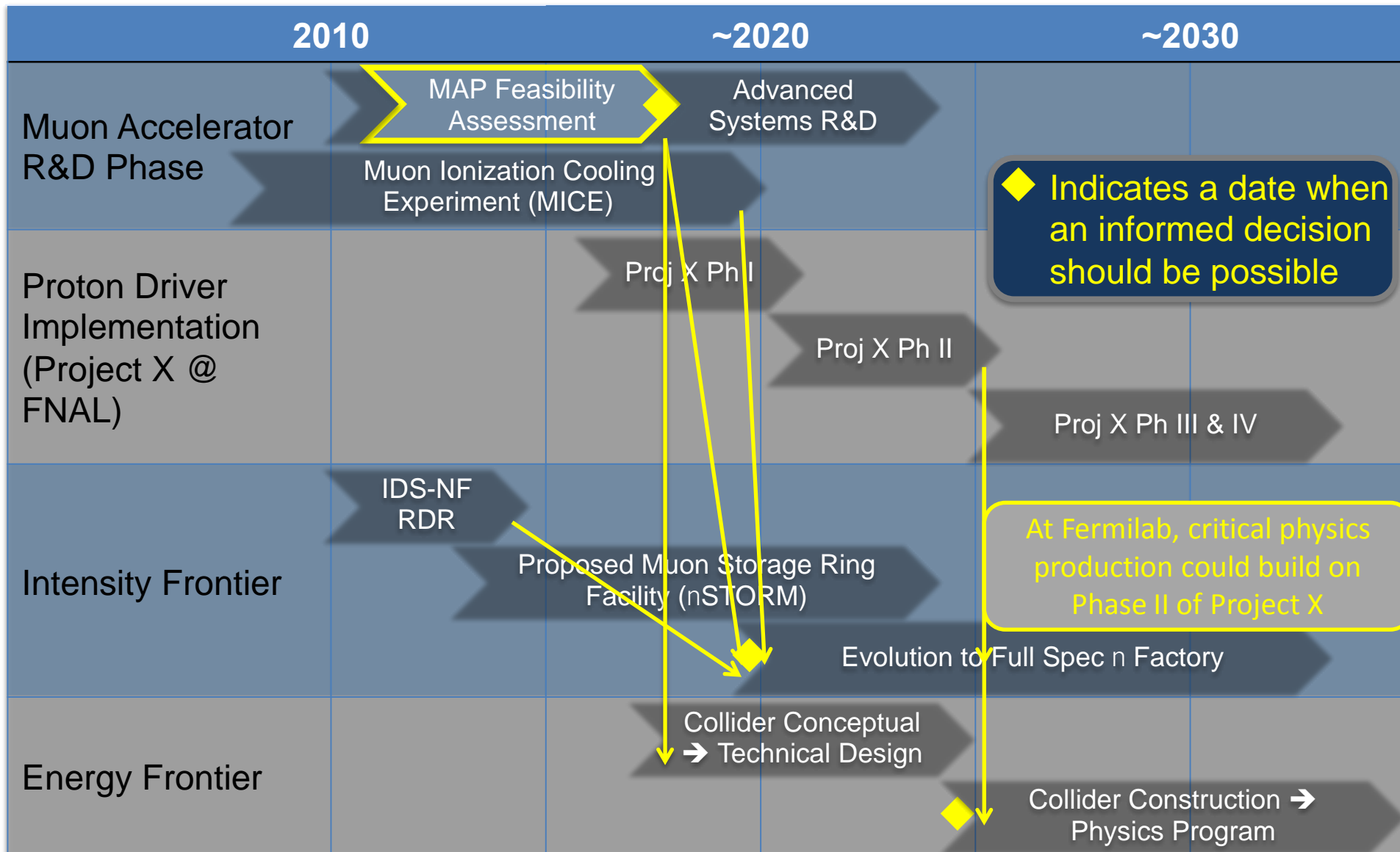


# Muon Collider as Higgs Factory

- 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 most kfor TeV collider に必要な 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...

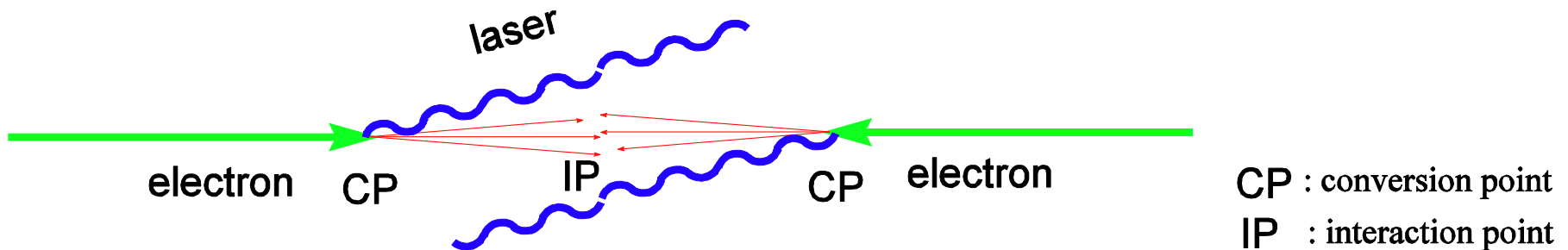
- The unique feature of muon accelerators is the ability to provide cutting edge performance on both the Intensity and Energy Frontiers
  - This is well-matched to the direction specified by the P5 panel for Fermilab
  - The possibilities for a staged approach make this particularly appealing in a time 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

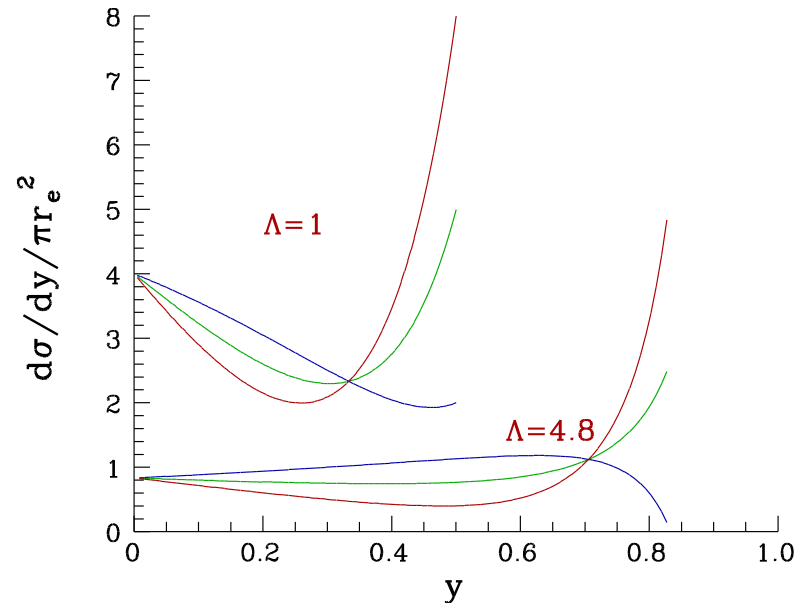


# Kinetics of gamma conversion

- 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



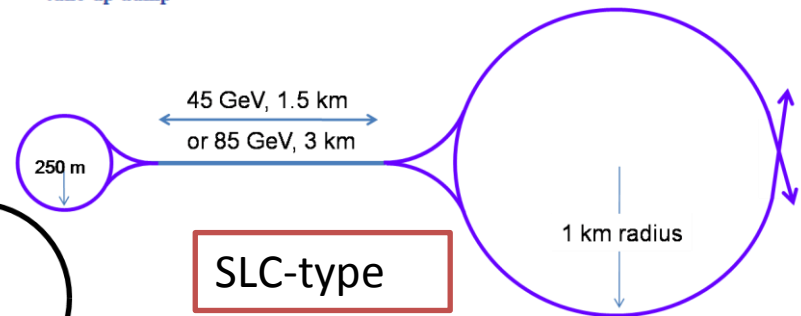
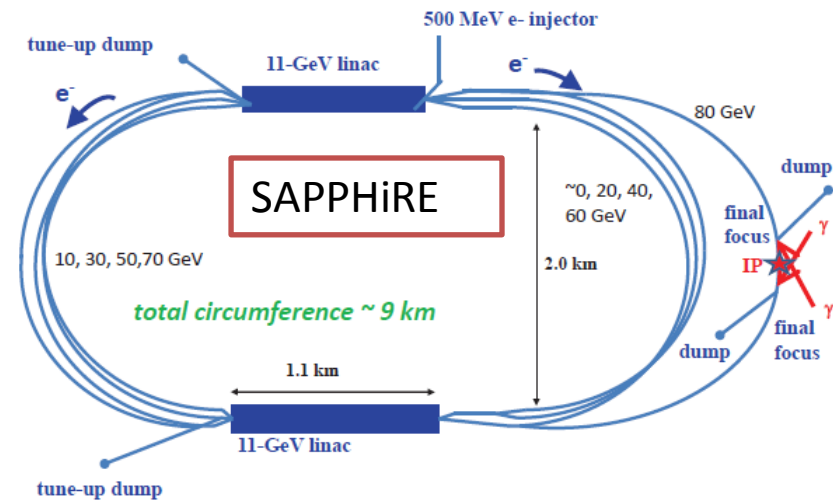
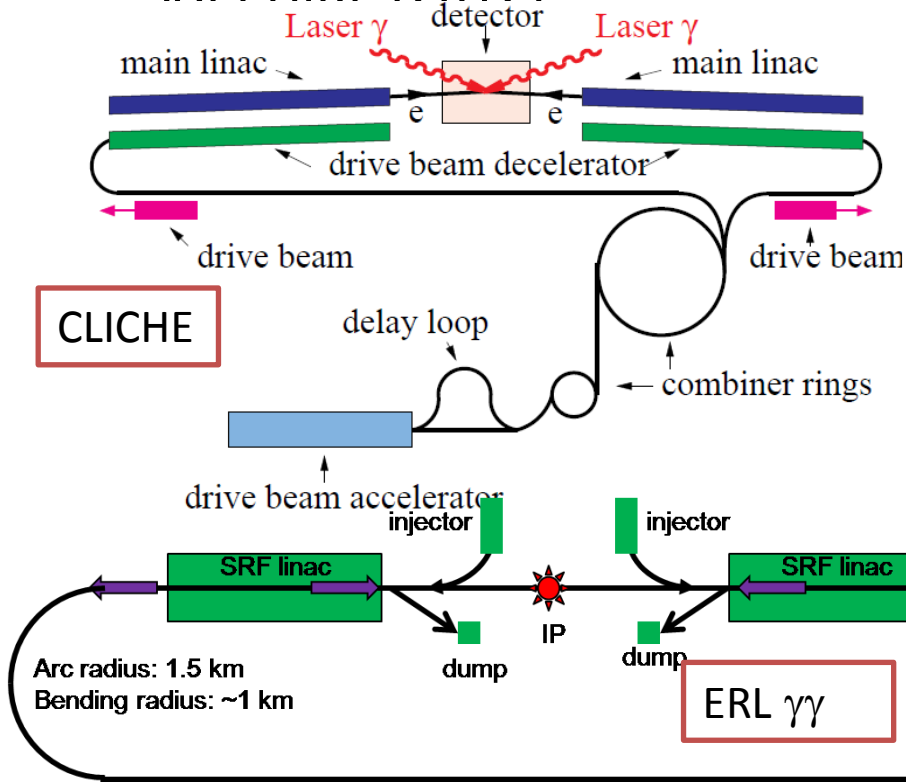
- 最適なレーザーは長  $\lambda = \lambda_0$   
 $\lambda_0 = 1\mu\text{m} * (E_e / 250\text{GeV})$  (  $x=4.83$ に対応)
  - $\lambda < \lambda_0$ では対生成がおこる
  - $\lambda > \lambda_0$ では光子エネルギーが低くなる
- 大部分の電子を光子に変換するために必要なレーザーの flush energy は数(5-10) ジュール (詳細は電子バンチ長に依る)

# 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

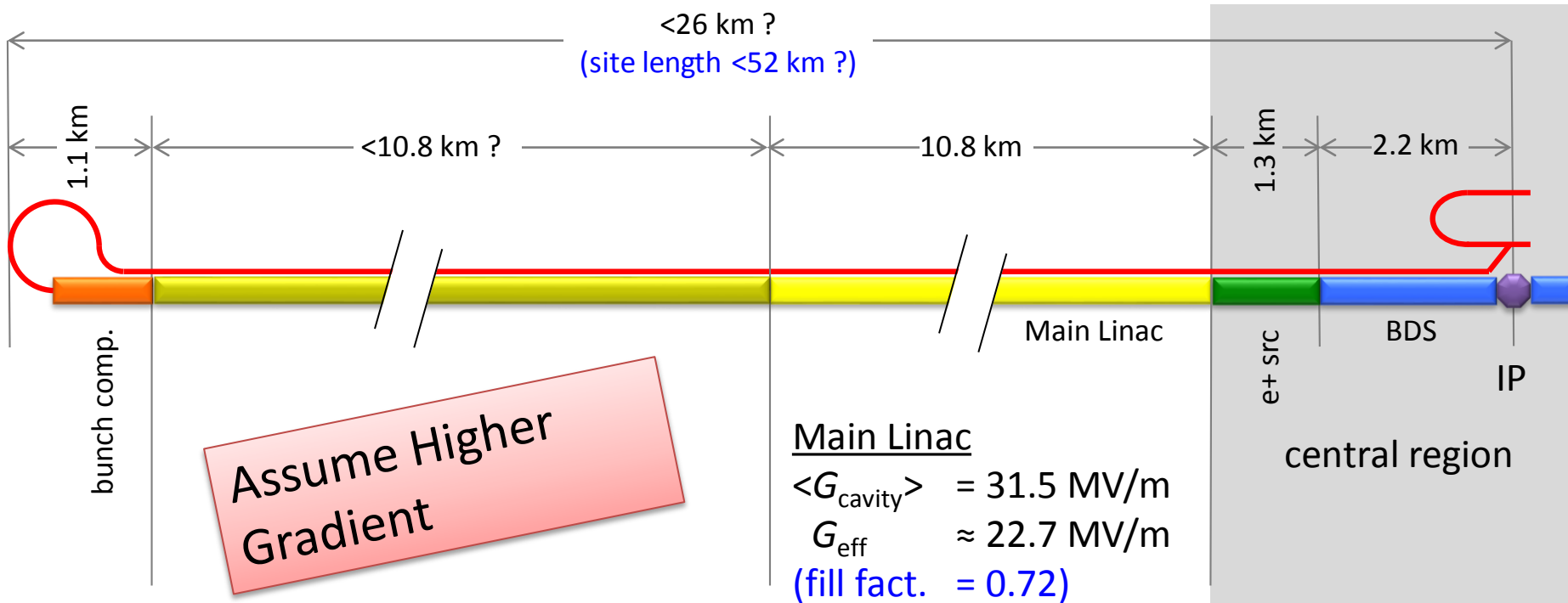
# (personal) Conclusions

- 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

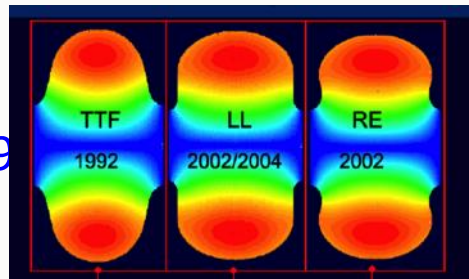
# Future of ILC

# TeV Upgrade : From 500 to 1000 GeV



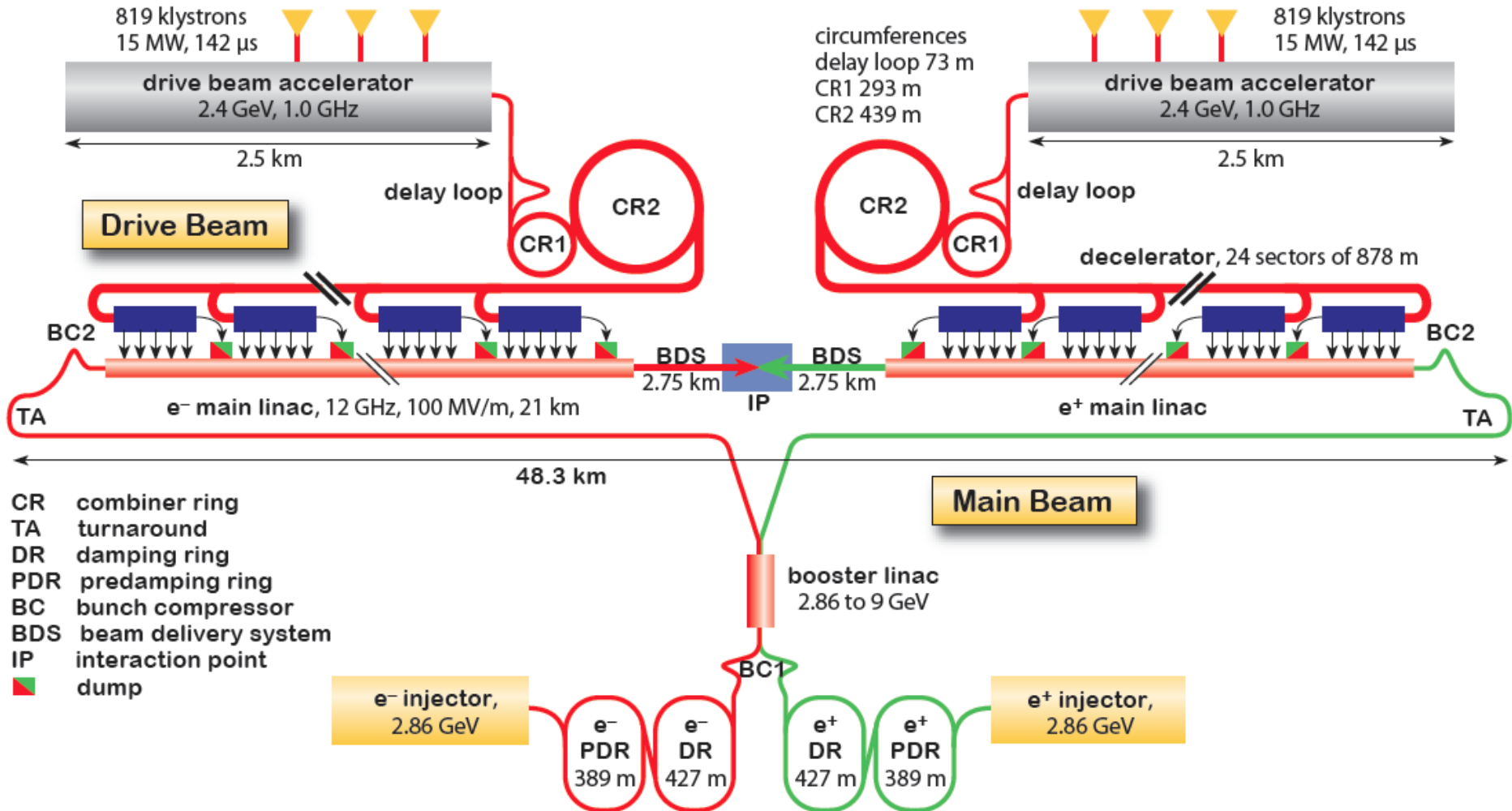
Snowmass 2005 baseline recommendation for TeV upgrade:

$G_{\text{cavity}} = 36 \text{ MV/m}$   
 $\Rightarrow 9 \text{ km}$   
 (VT  $\geq 40 \text{ MV/m}$ )



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

# CLIC (CERN Linear Collider)





# Plasma Accelerator

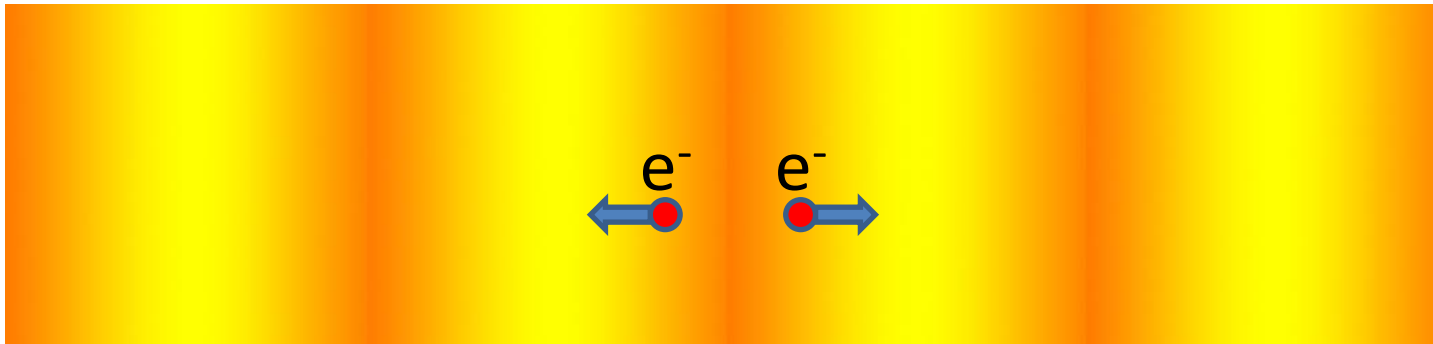
- Linac in the past has been driven by microwave technology
- Plane wave in vacuum cannot accelerate beams: needs material to make boundary condition
- Breakdown at high gradient
  - binding energy of matter:  $\text{eV}/\text{angstrom} = 10\text{GeV}/\text{m}$
- Need not worry about breakdown with plasma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

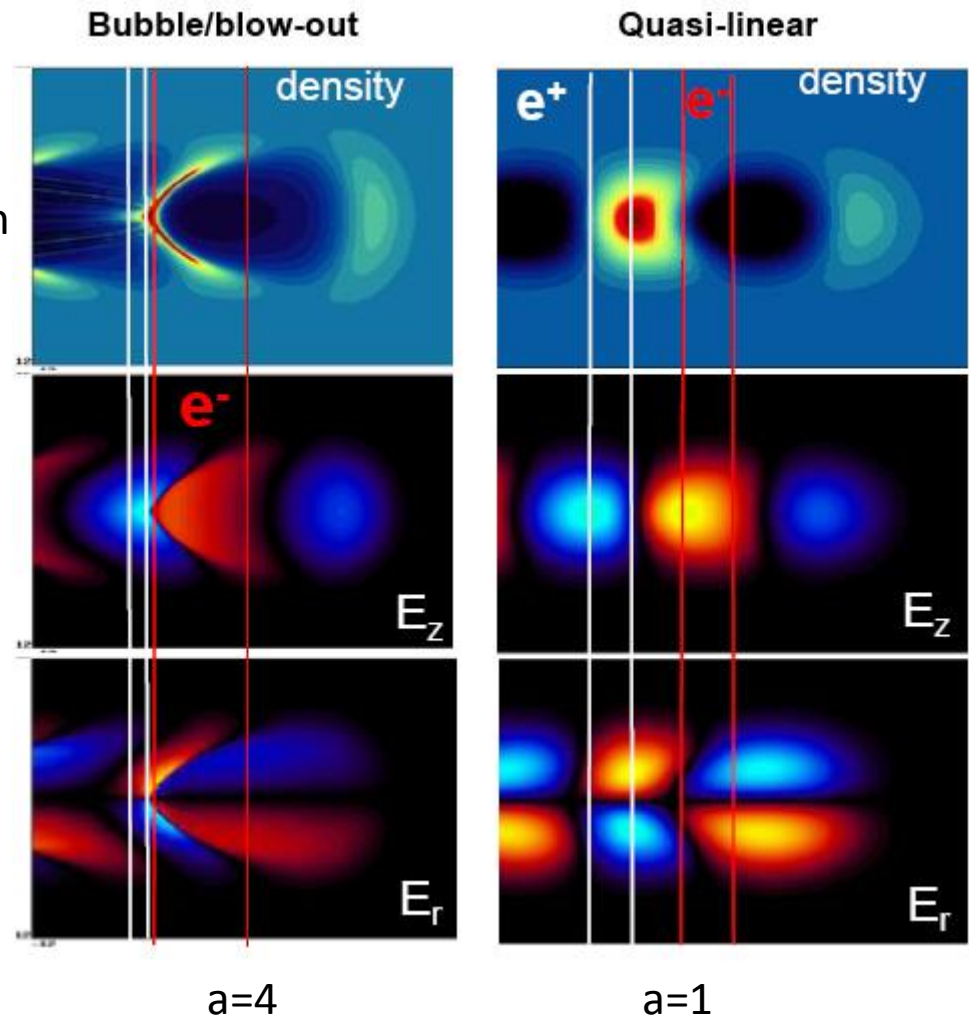
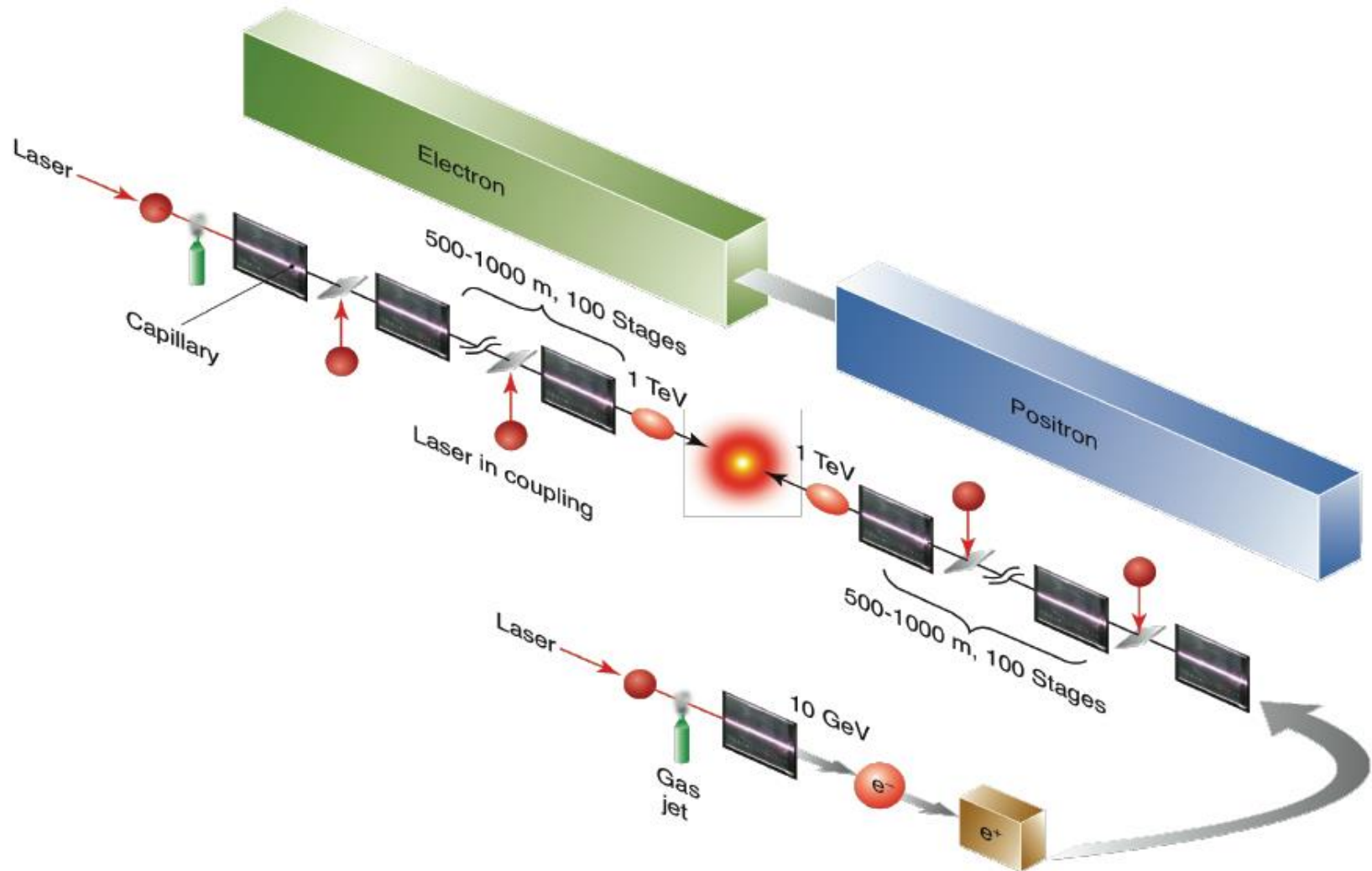


Figure from ICFA Beamdynamics  
News Letter 56

# 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

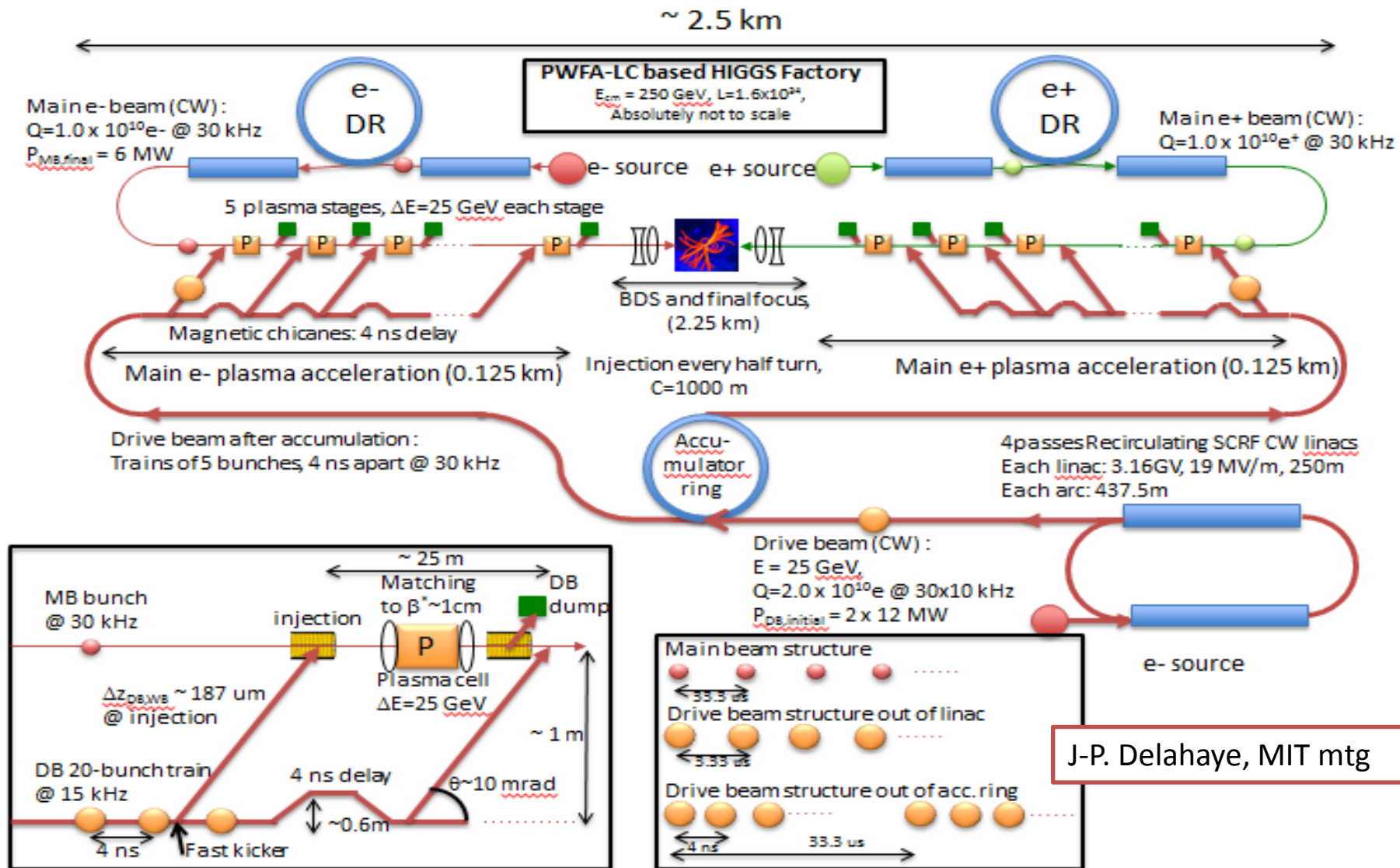
Case: CoM Energy (Plasma density)	1 TeV ( $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )	1 TeV ( $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ )	10 TeV ( $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )	10 TeV ( $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ )
Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	1	1	1	1
Pulse energy/stage (kJ)	0.032	11	0.032	11
Pulse length (ps)	0.056	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

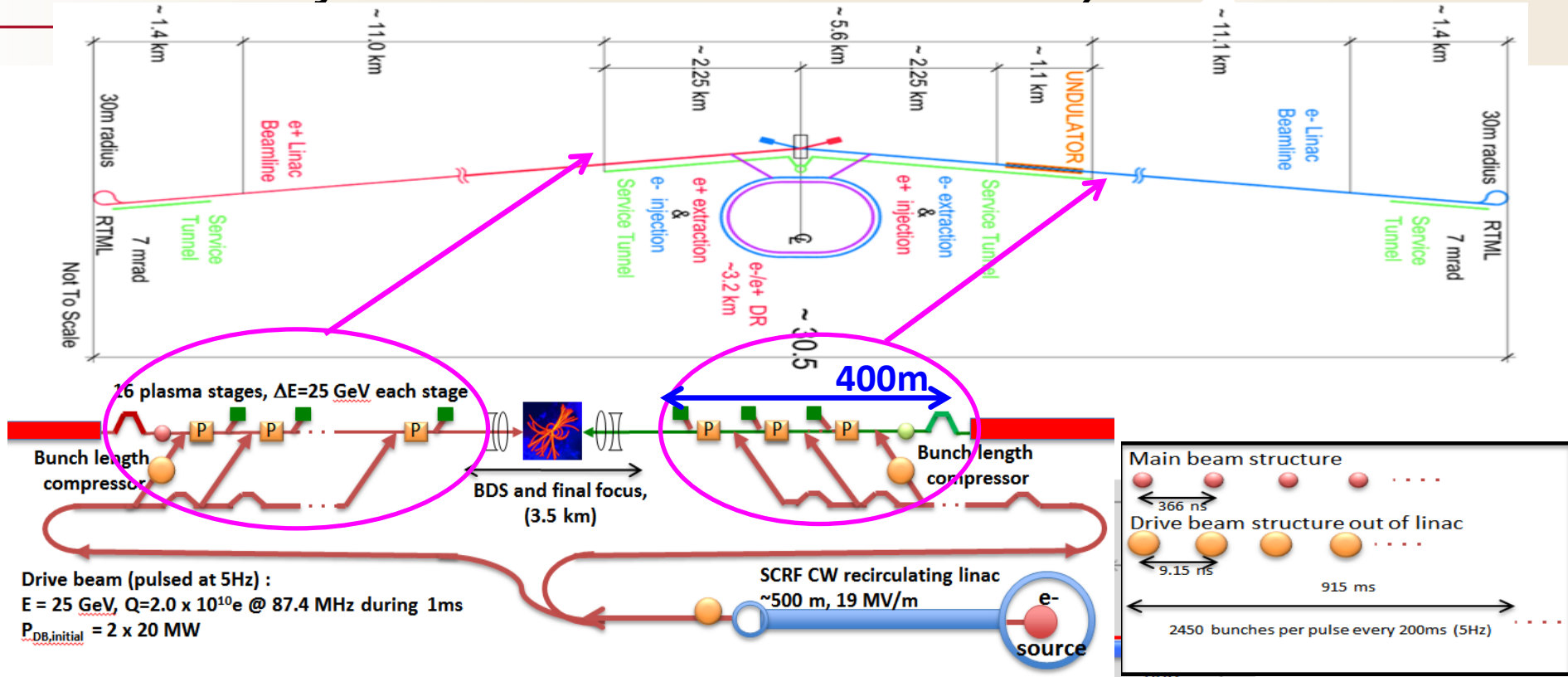
# What's Needed for Plasma Collider

- 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 plasmas accelerators would start long before these requirements are established

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



# 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.