

e+e- Ring Collider

Kaoru Yokoya, KEK
2015.7.18 ILC Camp

Many materials taken from
Pre-CDR of CEPC, Feb.2025

<http://cepc.ihep.ac.cn/preCDR/volume.html>

and

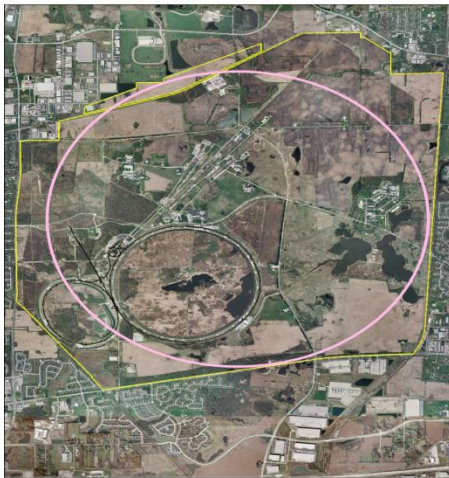
FCC Week at Washington, Mar.2015

<http://indico.cern.ch/event/340703/>

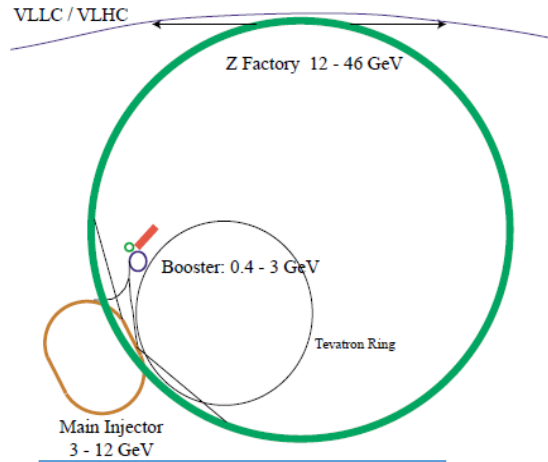
Revival of e+e- Ring Colliders ?

As of 3 years ago

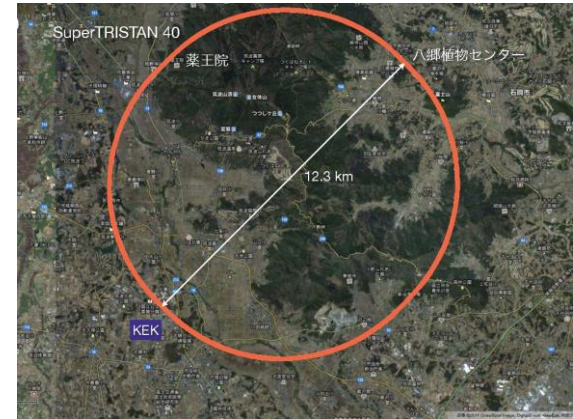
- To create Higgs by e+e- → ZH requires $E_{CM} \sim 240\text{GeV}$
- This is not too high compared with the final energy 209GeV at LEP



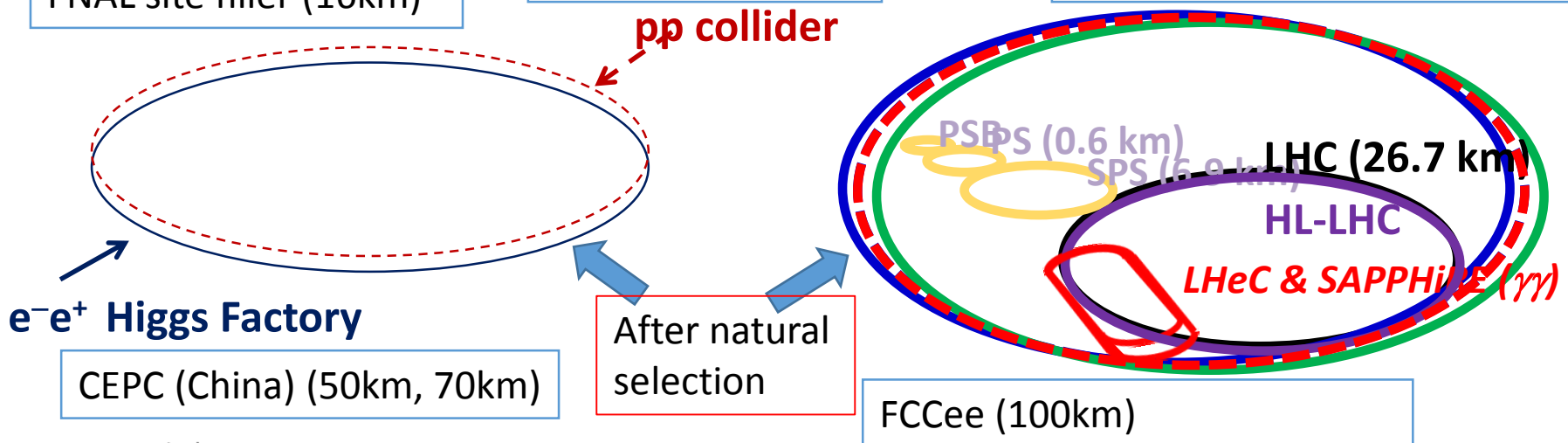
FNAL site filler (16km)



VLCC (233km)



SuperTRISTAN (40km, 60km)



Future Circular Collider Study - SCOPE

CDR and cost review for the next ESU (2018)

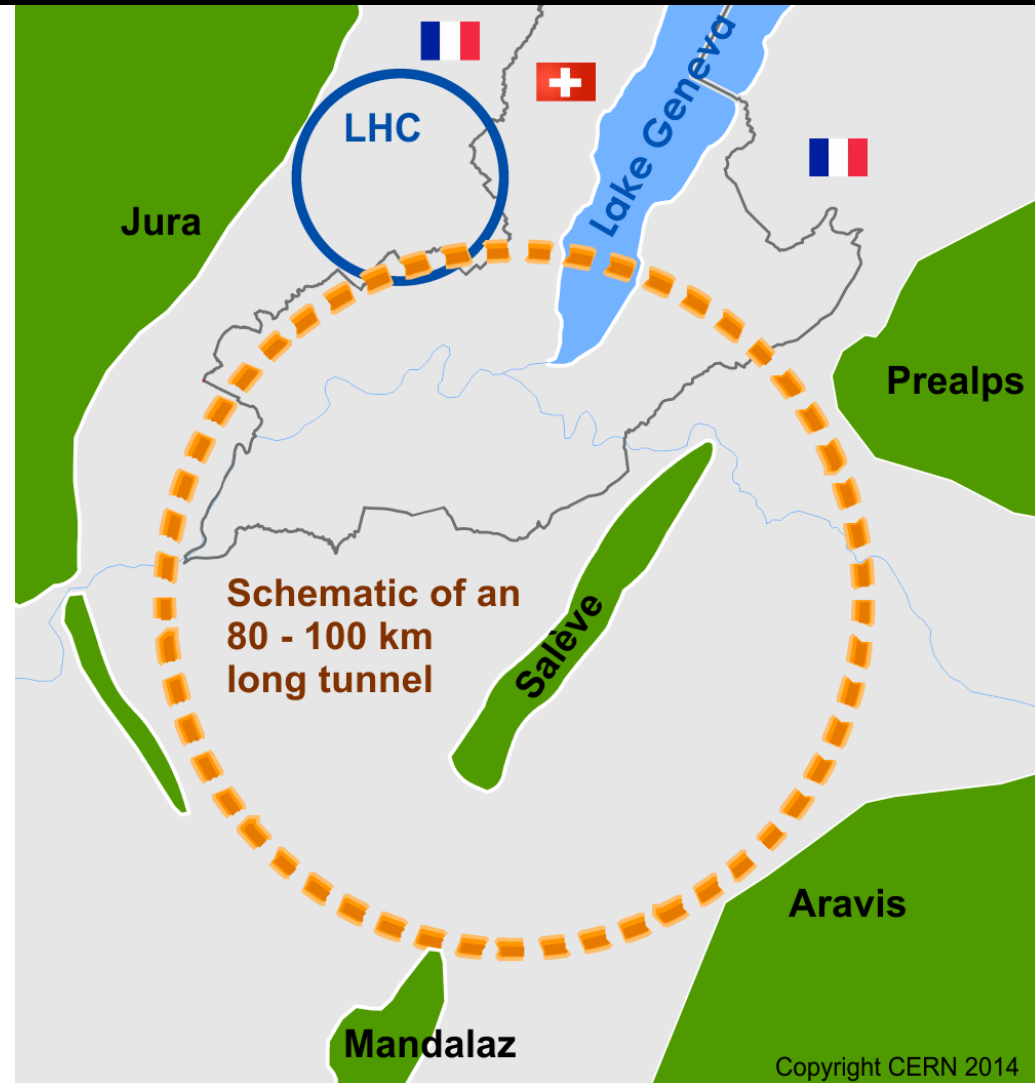
Forming an international collaboration to study:

- **pp -collider (*FCC-hh*)**
→ main emphasis,
defining infrastructure

~16 T \Rightarrow 100 TeV pp in 100 km

~20 T \Rightarrow 100 TeV pp in 80 km

- **80-100 km infrastructure** in Geneva area
- **e^+e^- collider (*FCC-ee*)** as potential intermediate step
- **$p-e$ (*FCC-he*) option**

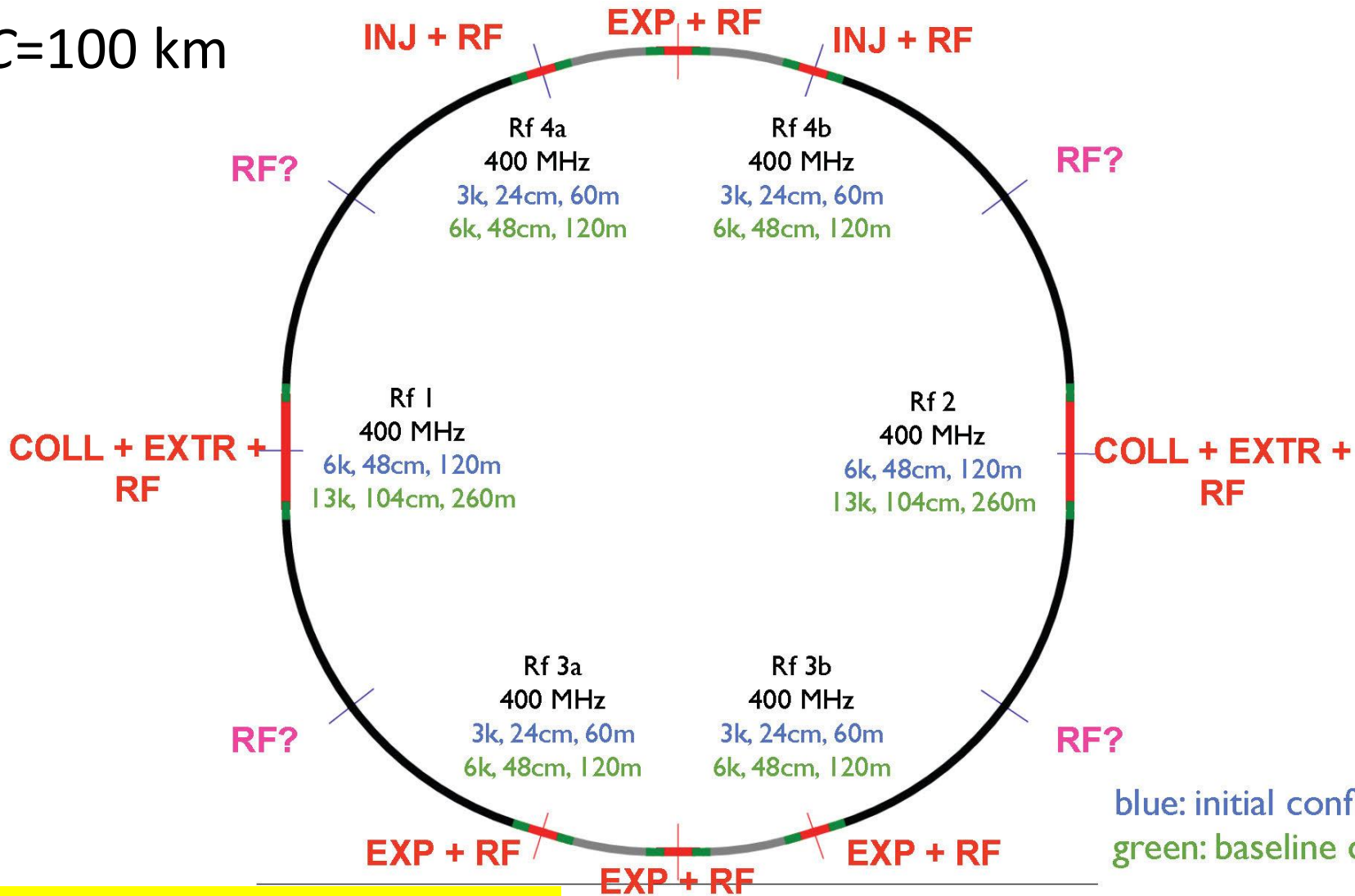




FCC-ee preliminary layout



C=100 km



P. Lebrun, J. Osborne,
D. Schulte, U. Wienands

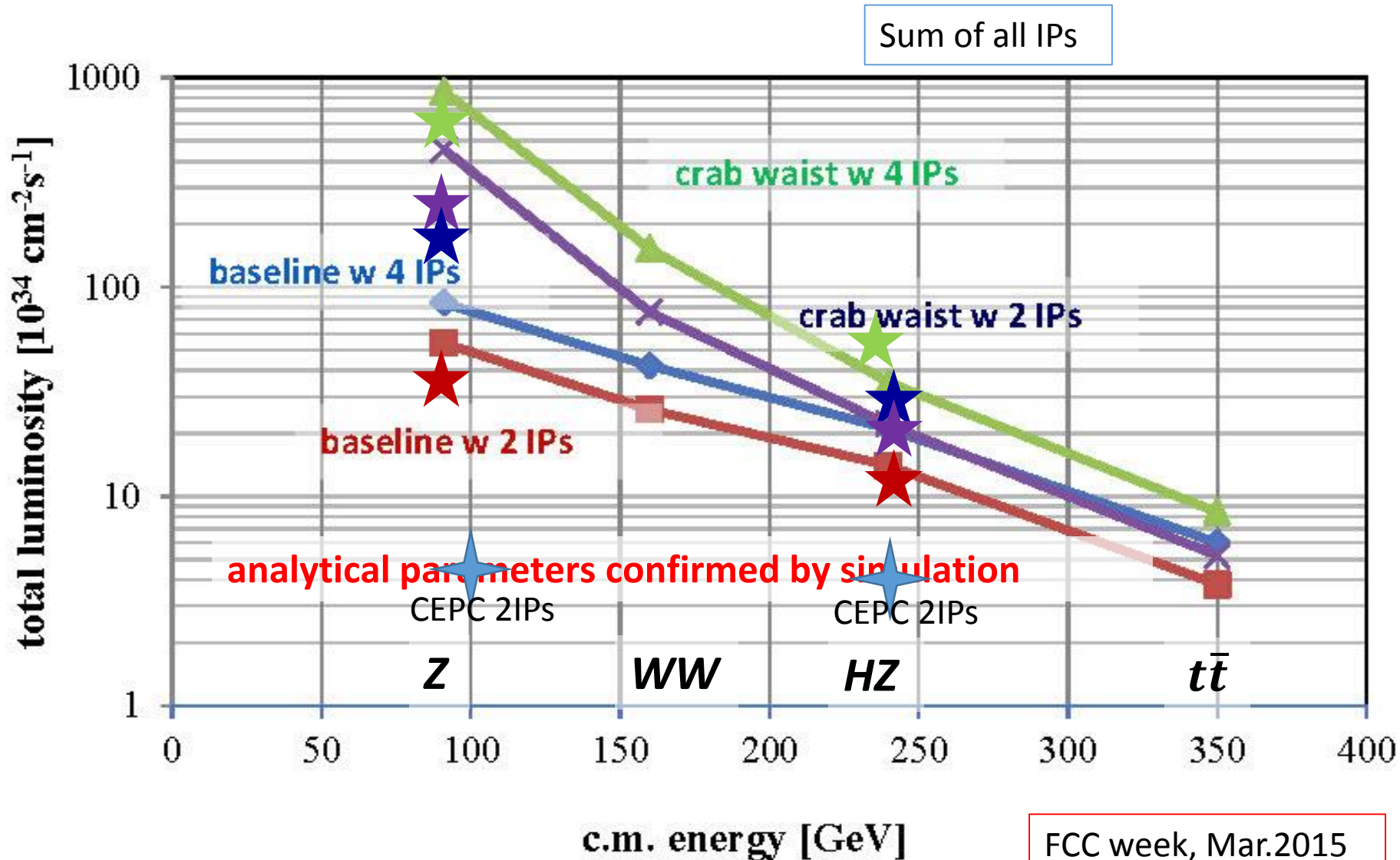
- ✓ consistent with *FCC-hh* layout
- ✓ RF staging scenario defined

CepC/SppC study (CAS-IHEP), CepC CDR Feb. 2015, e^+e^- collisions ~2028; pp collisions ~2042



Ring e^+e^- Colliderの(宣伝されている)利点

- 240GeV (FCC-H) でのluminosity は、ILCより高い(衝突点1つでも)
 - 5.3×10^{34} at ZH (2×10^{34} in CEPC) (3×10^{34} at full ILC)
 - Low energyではさらに高い $20 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ at Z-pole (FCC-Z)
 - Crab waist なら10倍高い
- t-tbar threshold (FCC-t)でもluminosity はILCなみ
 - 1.5×10^{34} ($1-2 \times 10^{34}$ in ILC)
- 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?”
 - ただし、最近ではコストのことを聞かない
- トンネルは 100TeV程度までのppに再利用できる



FCC week, Mar.2015
CEPC added by KY

★ beam-beam simulations by K. Ohmi (tunes not optimized)

CEPC Parameters (PreCDR)		LEP		FCCee				CEPC	
		LEP1	LEP2	Z	W	H	t	Z	H
Circumference	km	26.7	26.7	100	100	100	100	54.374	54.374
Bending radius	km	3.1	3.1	11	11	11	11	6.094	6.094
Beam Energy	GeV	45.4	104	45.5	80	120	175	45	120
Beam current	mA	2.6	3.04	1450	152	30	6.6	223	16.6
Bunches per beam		12	4	16700	4490	1360	98	1792	50
Bunches per train								64	1
Bunch population	10 ^{11}	1.8	4.2	1.8	0.7	0.46	1.4	1.4	3.79
Horizontal emittance	nm	20	22	29.2	3.3	0.94	2	16	6.12
Vertical emittance	pm	400	250	60	7	1.9	2	140	18.4
Momentum compaction	1.00E-05	18.6	14	18	2	0.5	0.5		3.36
Horiz. Beta function at IP	m	2	1.2	0.5	0.5	0.5	1	0.692	0.8
Vert.	mm	50	50	1	1	1	1	3	1.2
Horiz. Beam size at IP	micron	224	182	121	41	22	45	105	69.97
Vert.	micron	4.5	3.2	0.25	0.084	0.044	0.045	0.65	0.15
Energy spread (SR)	%	0.07	0.16	0.04	0.07	0.1	0.14		0.13
Energy spread (with BS)	%	0.07	0.16	0.06	0.09	0.14	0.19	0.05	0.16
Bunch length (SR)	mm	8.6	11.5	1.64	1.01	0.81	1.16		2.14
Bunch length (with BS)	mm	8.6	11.5	2.56	1.49	1.17	1.49		2.65
Energy loss per turn	GeV	0.12	3.34	0.03	0.33	1.67	7.55	0.05955	3.11
SR power per beam	MW	0.3	11	50	50	50	50	13.4	51.7
Total RF voltage	GV	0.24	3.5	2.5	4	5.5	11		6.87
RF frequency	MHz	352	352	800	800	800	800		650
Longit. Damp. Time	turn	371	31	1320	243	72	23		39
Energy acceptance (RF)	%	1.7	0.8	2.7	7.2	11.2	7.1		5.99
Synchrotron tune		0.065	0.083	0.65	0.21	0.096	0.1		0.18
Polarization time	min	252	4	11200	672	89	13		(21)
Hour glass factor		1	1	0.64	0.77	0.83	0.78		0.68
Crossing angle	mrad							0.8	
Luminosity per IP	1.00E+34	0.002	0.012	28	12	6	1.8	2.27	2.04
Number of IPs				4	4	4	4	2	2
Horiz. Beam-beam param		0.0440	0.0400	0.0310	0.0600	0.0930	0.0920	0.0440	0.1180
Vert.		0.0440	0.0600	0.0300	0.0590	0.0930	0.0920	0.0310	0.0830
Lum. Life (Bhabha only for CE)	min	1750	434	298	73	29	21		50.61
Upsilon_max	2015/7/19 ILC合宿 Yokoya	1.77E-05	8.73E-05	1.12E-04	3.90E-04	9.11E-04	1.55E-03		1.04E-03
nBS		0.040	0.115	0.066	0.077	0.094	0.139	0.059	0.241

Latest Parameters of FCCee

FCC Week, Mar.2015		Baseline 4IP				Baseline 2IP				Crab Waist 4IP			
		Z	W	H	t	Z	W	H	t	Z	W	H	t
		blanck: same as baseline 4IP											
E	GeV	45	80	120	175								
Circumference	km	100											
Bending radius	km	10.424											
I	mA	1450	152	30	6.6								
PSR(tot)	MW	100	100	100	100								
n bunches		16700	4490	1360	98	12846	3453	1046	75	59581	3143	625	68
N	E11	1.8	0.7	0.46	1.4	2.37	0.91	0.6	1.82	0.5	1	1	2
eps-x	nm	29	3.3	0.94	1.4					0.13	0.42	0.94	2
eps-y	pm	60	1	2	2					1	1	1	2
beta x	m	0.5	0.5	0.5	1					0.5	0.5	0.5	0.5
beta y	mm	3	1	1	1					1	1	1	1
sigx	micron	121	41	22	45					8	14	22	31
sigy	nm	424	84	44	45					32	29	31	45
RF frequency	MHz	400	400	400	400								
RF voltage	GV	2.5	4	5.5	11					0.3	1	3.6	11
momentum compaction	E-5	18	2	0.5	0.5					0.5	0.5	0.5	0.5
synchrotron tune		0.458	0.145	0.068	0.07					0.03	0.035	0.053	0.07
sigz (SR)	mm	3.29	2.02	1.62	2.31					0.97	2.08	2.08	2.31
sigz (total)	mm	3.8	2.27	1.8	2.45	3.84	2.29	1.81	2.46	3.24	3.49	2.58	2.8
sigE (SR)	%	0.052	0.092	0.139	0.202					0.037	0.092	0.139	0.202
sigE (total)	%	0.061	0.104	0.154	0.215	0.061	0.104	0.155	0.216	0.124	0.155	0.172	0.245
hourglass factor		0.53	0.67	0.73	0.65					0.94	0.87	0.81	0.75
xi-x per IP		0.03				0.04				0.04	0.04	0.0124	0.03
xi-y per IP		0.05	0.06	0.092	0.091	0.07	0.077	0.121	0.118	0.137	0.143	0.097	0.092
L/IP	E34	21	10.4	5.3	1.5	27	13	7	1.9	215	38	8.7	2.1
tau-beam (4IPs)	min	403	84	32	25	620	130	50	39	38	23	20	18

ABC of Ring Collider

- Luminosity

- f_{rev} : revolution frequency
- n_b : ビームあたりバンチ数
- N : バンチあたり粒子数
- σ_x^*, σ_y^* : 衝突点ビームサイズ

$$\mathcal{L} = \frac{f_{\text{rev}} n_b N^2}{4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*}$$

- Beam-beam tune shift

- Beam-beam 収束力のためbetatron tuneが上がる
- 強い非線形力
- その目安として線型tune-shiftが使われる
- $\beta_{x(y)}^*$: 衝突点ベータ関数、 σ_z : バンチ長
- Linear Colliderの Disruption Parameterに似ている
 $\sigma_z \rightarrow \beta_{x(y)}^*/(4\pi)$

$$\xi_{x(y)} = \frac{2Nr_e}{\gamma} \frac{\beta_{x(y)}^*}{4\pi\sigma_{x(y)}^*(\sigma_x^* + \sigma_y^*)}$$

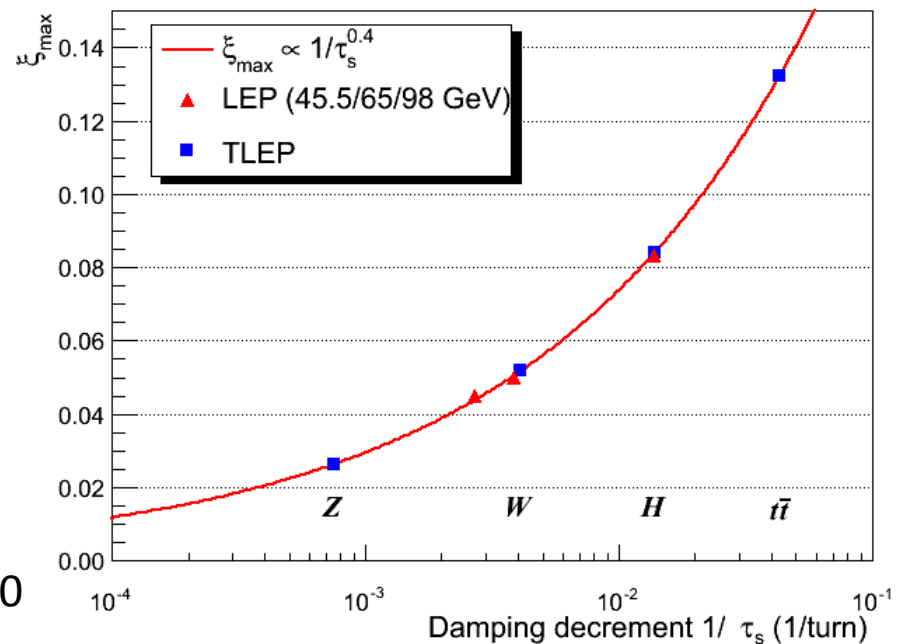
$$D_{x(y)} = \frac{2Nr_e}{\gamma} \frac{\sigma_z}{\sigma_{x(y)}^*(\sigma_x^* + \sigma_y^*)}$$

Tune-Shift Limit

- Ring colliderのluminosityの限界は、まず第一に tune-shiftの大ききで決る
- 昔から電子陽電子の設計の際には、 $\xi_x \sim \xi_y \sim 0.05$ 前後が経験的に使われてきたが、現在ではsimulationでかなり予想できる
- 衝突点の数に対する依存性はまだ異論がある
- 放射減衰時間 τ_s が重要。→ proton ringでは $\xi_x \xi_y$ は非常に小さい → simulationでは再現が難しい
- 1つのリングにおけるtune-shift limitのエネルギー依存性はほぼ

$$\xi_{y,max} \propto \frac{1}{\tau_s^{0.4}} \propto E^{1.2}$$

R. Assmann & K. Cornelis, EPAC2000



Tune-shift Limited Luminosity (traditional)

- ビームサイズとエミッタンスの関係

$$\sigma_x^* = \sqrt{\epsilon_x \beta_x^*}, \quad \sigma_y^* = \sqrt{\epsilon_y \beta_y^*}$$

を使うと、ビーム電流に制限のない状況では

$$\mathcal{L} = f_{rev} n_b \frac{\pi \gamma^2 \xi_x \xi_y \epsilon_x}{r_e^2 \beta_y^*} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \right)^2$$

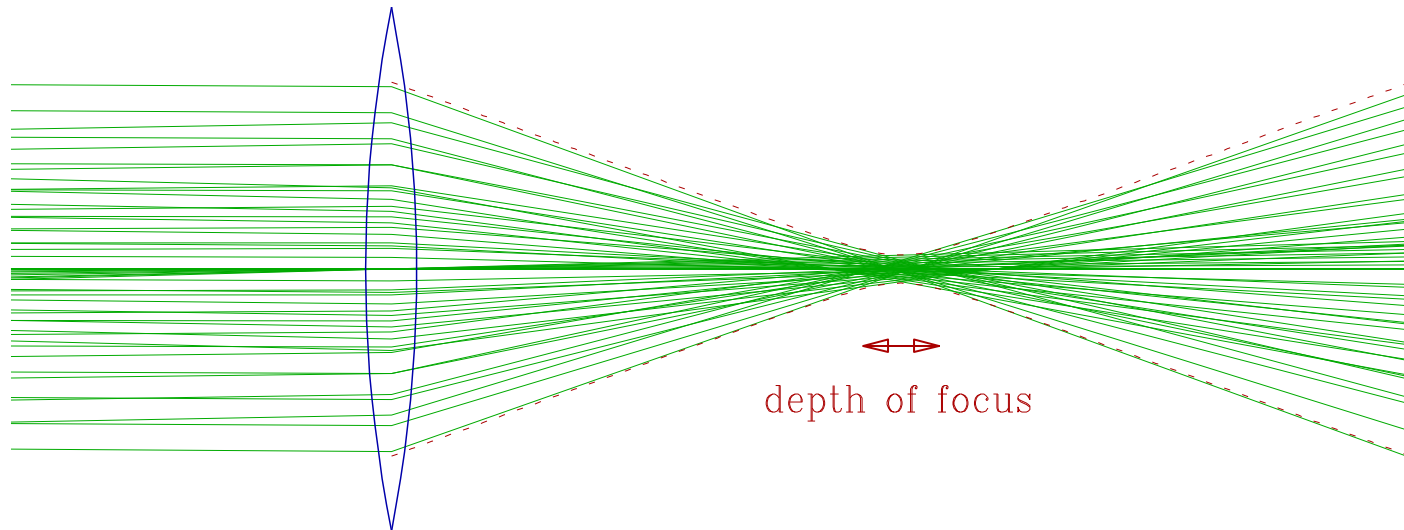
- Luminosity を上げるには
 - Larger emittance ϵ_x (エミッタンスは大きいほうがよい!!)
 - Smaller β_y^*
 - Round beam $\sigma_x^* = \sigma_y^*$
 - Larger n_b

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。



Synchrotron Radiation

- 1周あたりの各粒子のエネルギー損失
 - 加速空洞にこれ以上の「電圧」を与えて損失を補わなければならない
→ 加速空洞セクションの長さ

$$U_0 = \frac{4\pi}{3} \frac{r_e}{(m_e c^2)^3} \frac{E^4}{\rho} = 88.46 \frac{E_{[\text{GeV}]^4}}{\rho_{[\text{m}]}} \text{ [keV]}$$

ρ : 磁石内での軌道曲率半径 (bending radius)

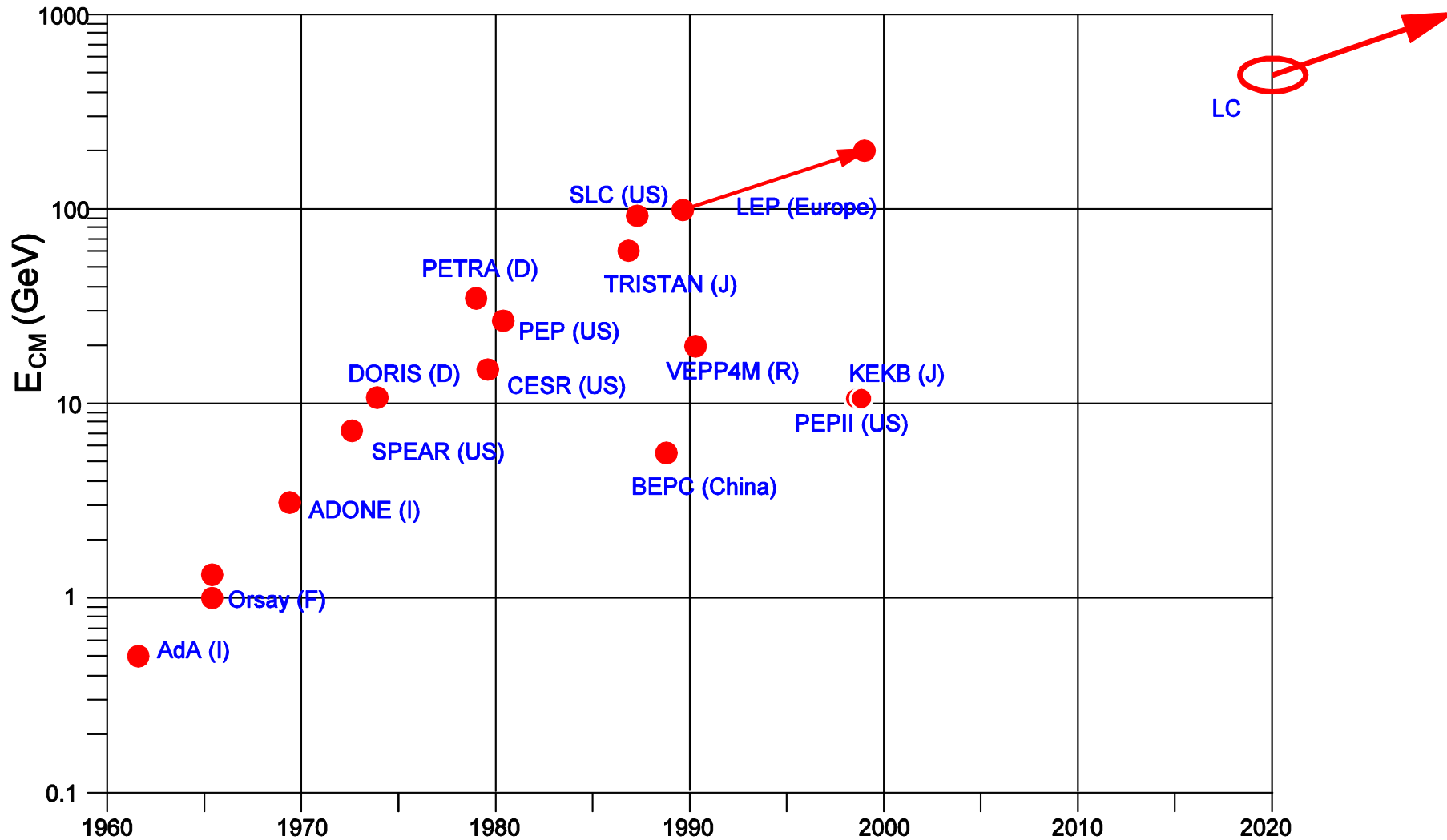
	FCC-Z	FCC-W	FCC-H	FCC-T	CEPC-Z	CEPC-H
U_0 (GeV)	0.03	0.33	1.67	7.55	0.60	3.11
V_{RF} (GV)	2.5	4	5.5	11	?	6.87

- 単位時間当たりのビーム全体のエネルギー損失
 - この分だけビームに「電力」をあたえなければならない
→ 消費電力、発熱

$$P_{\text{SR}} = U_0 I_{\text{beam}} = U_0 f_{\text{rev}} e N n_b$$

- この2つの条件から、ビーム電流の上限が決る
 - $I_{\text{beam}} = P_{\text{SR}} / U_0$
 - これをいくつのバンチに分けるか？については、さまざまな問題がからむ

Evolution of Electron-Positron Colliders



Critical Energy

- Typicalなphoton energyは $\hbar\omega_c = 2.218 \frac{E_{[\text{GeV}]^3}}{\rho_{[\text{m}]}} [\text{keV}]$

	FCC-Z	FCC-W	FCC-H	FCC-t	CEPC-Z	CEPC-W
ω_c (MeV)	0.019	0.10	0.35	1.08	0.033	0.63

- Photon のenergy分布は、high energy tailでは、 $\exp(-\omega/\omega_c)$ に比例
- ω_c がEとcomparableになると補正が必要
 - Linear Colliderでは重要であるが、Ring Colliderでは不要

$$\frac{dn_\gamma}{d\omega dt} = \frac{\alpha}{\sqrt{3}\pi\gamma^2} \int_{\omega/\omega_c}^{\infty} K_{5/3}(x) dx, \quad (\Upsilon \ll 1)$$

Radiation Damping

- 同じ磁場中では、輻射は高いエネルギーの粒子のほうが強い
 - $dE/dt = -\text{const} \times B^2 \times E^2$ (B: 磁場)
 - その結果、synchrotron振動が減衰する(エネルギー幅・バンチ長が短くなる)

$$\tau_s = \frac{E}{U_0} T_0 = 0.2369 [\text{ms}] \frac{\rho_{[\text{m}]} R_{[\text{m}]}}{E_{[\text{GeV}]^3}}$$

R: 平均軌道半径 = 周長/2 π

- 横方向の振動減衰も起こる

- 減衰時間は、synchrotron振動減衰時間の約2倍
(磁石配置でいくらか加減できるが、 $1/\tau_s + 1/\tau_x + 1/\tau_y$ は保存される)
- この「2」は、上の式の E^2 から来る

$$\tau_{x,y} = 2\tau_s$$

- この減衰のおかげで、tune-shift limitが上がり、リニアコライダーの減衰リングも可能になる

SR & Tune-shift Limited Luminosity

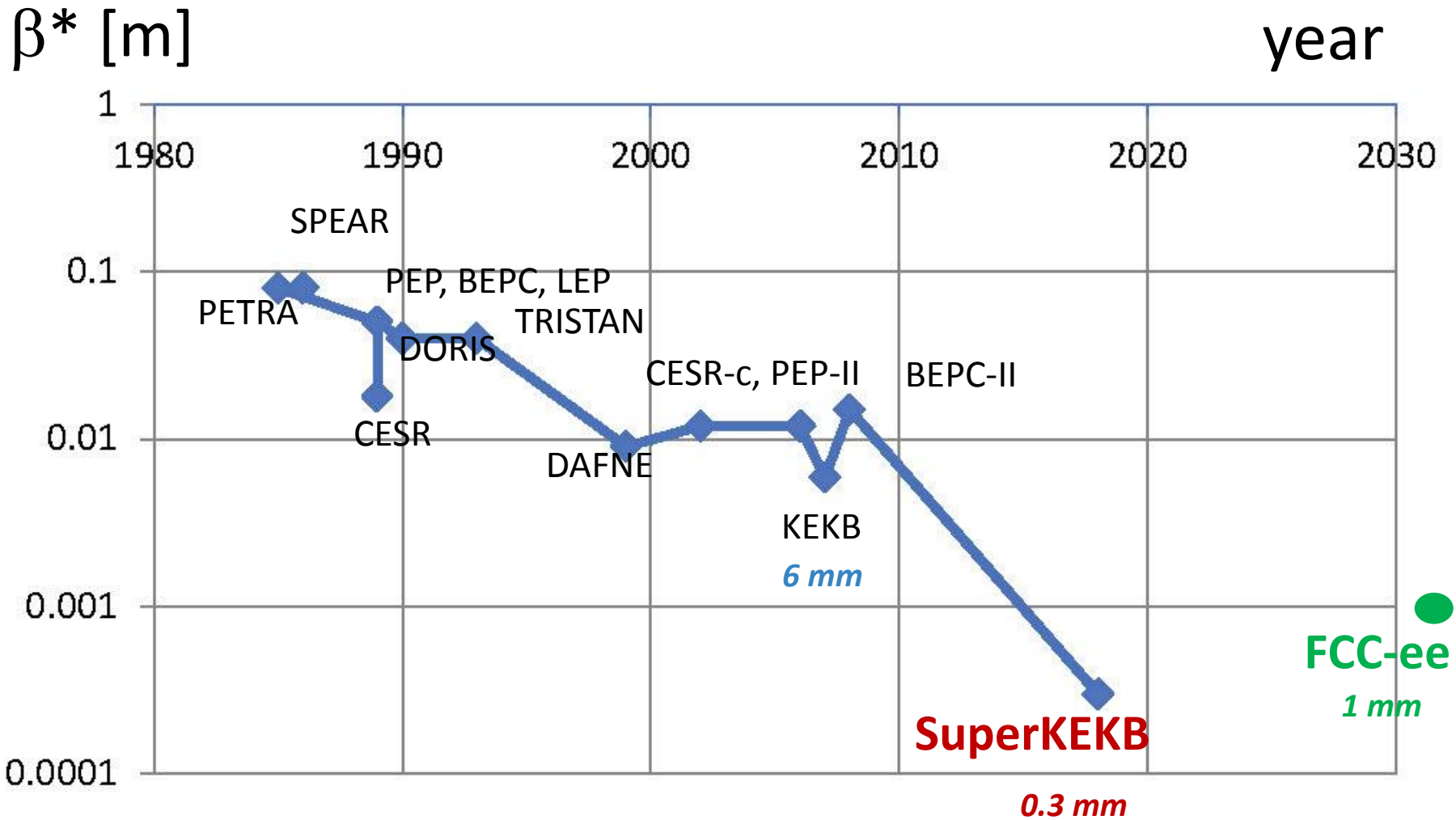
- シンクロトロン輻射によってビーム電流が制限されている場合の、tune-shift limitのluminosityは

$$\mathcal{L} \propto \frac{\rho P_{SR}}{E^3} \frac{\xi_y}{\beta_y^*} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \right)$$

- $\xi_y \sim E^{1.2}$ を入れると、energy dependenceは $L \sim E^{-1.8}$ に緩和される
- Luminosityを上げるには
 - Smaller β_y^* がほとんど唯一の方策
 - この式にはemittanceはexplicitに現れないが、 $\xi_y/\beta_y \sim 1/\sigma_x\sigma_y$ であるから、暗黙に小さなemittanceを要求している
 - 原理的には、丸いビームbeam $\sigma_x^* = \sigma_y^*$ でいくらか稼げるはずであるが、これは電子・陽電子リングでは非現実的
 - ただし、丸いビームでは、tune-shift limit ξ_y があげられるという理論・実験があるが



β_y^* evolution over 40 years



entering a new regime for ring colliders –

SuperKEKB will pave the way towards $\beta^* \leq 1$ mm

FCC week, Mar.2015

New Feature : Beamstrahlung

- Beam-beam fieldのため、衝突中にsynchrotron輻射が起こる
- Typicalなパラメータとして、linear colliderでは Upsilon を使う

$$\Upsilon \equiv \frac{e\hbar}{m^3c^4} \sqrt{p_\mu F^{\mu\lambda} p^\nu F_{\lambda\nu}} = \gamma \frac{E + B}{B_c}$$

$$\omega_c = \frac{3}{2} \Upsilon E_e \qquad B_c = \frac{m^2c^3}{e\hbar} = 4.4\text{GTesla}$$

- Beam parameterで表すと、

$$\Upsilon_{max} = \frac{2r_e^2\gamma N}{\alpha\sigma_z(\sigma_x^* + \sigma_y^*)} \qquad \Upsilon_{avr} \approx \frac{5}{12} \Upsilon_{max}$$

$$\omega_{c,max} = \frac{3}{2} \Upsilon_{max} E_e$$

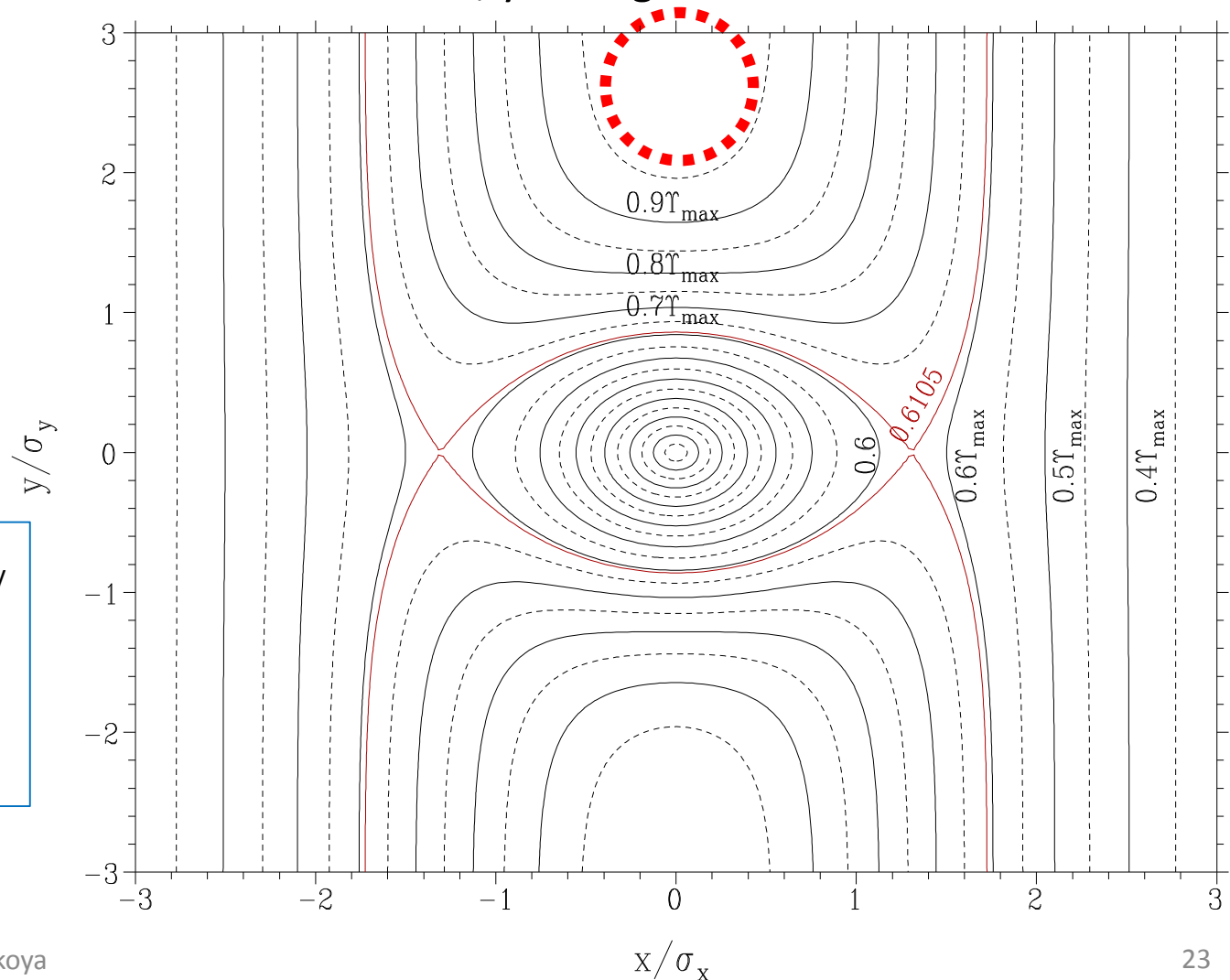
- 平均値はring colliderでは重要でない

Beamstrahlung Effects in Ring Colliders

- Linear colliderでは、beamstrahlungによるエネルギー損失は、実験へのperturbationになるが、加速器としては、10%程度までなら許される
 - 使用後ビームの処理(無事にビームダンプまで運ぶ)
- Ring colliderでは衝突後のビームがリングを回り続けなければならないので、大きな損失は許されない。
- もっとも寄与するのはspectrumのhigh energy tailで、これがビーム寿命を決める要素になる
 - たとえば、平均1%の損失があれば、3%失う粒子も多数あり、そのような粒子はリングを回れないので、ビームはたちまちなくなる
 - High energy tailは、(x,y)平面で最もbeam-beam forceの大きい場所から来る(次ページ)
- したがって、大きな $\Delta E/E$ 粒子に対するDynamic apertureの大きなリングを設計することが肝心

Distribution of Upsilon parameter

- Contour of Upsilon/Upsilon_{max} in (x,y) plane
- 扁平なビームでは、最大値は、 $x \sim 0, y \rightarrow \text{large}$ の場所で起こる



この図は、 $\sigma_x \sigma_y$ が無限大の場合であるが、 $\gg 10$ なら大差ない

Tail Spectrum

- 1回のバンチ衝突によって発生する平均光子数は電子1つあたり

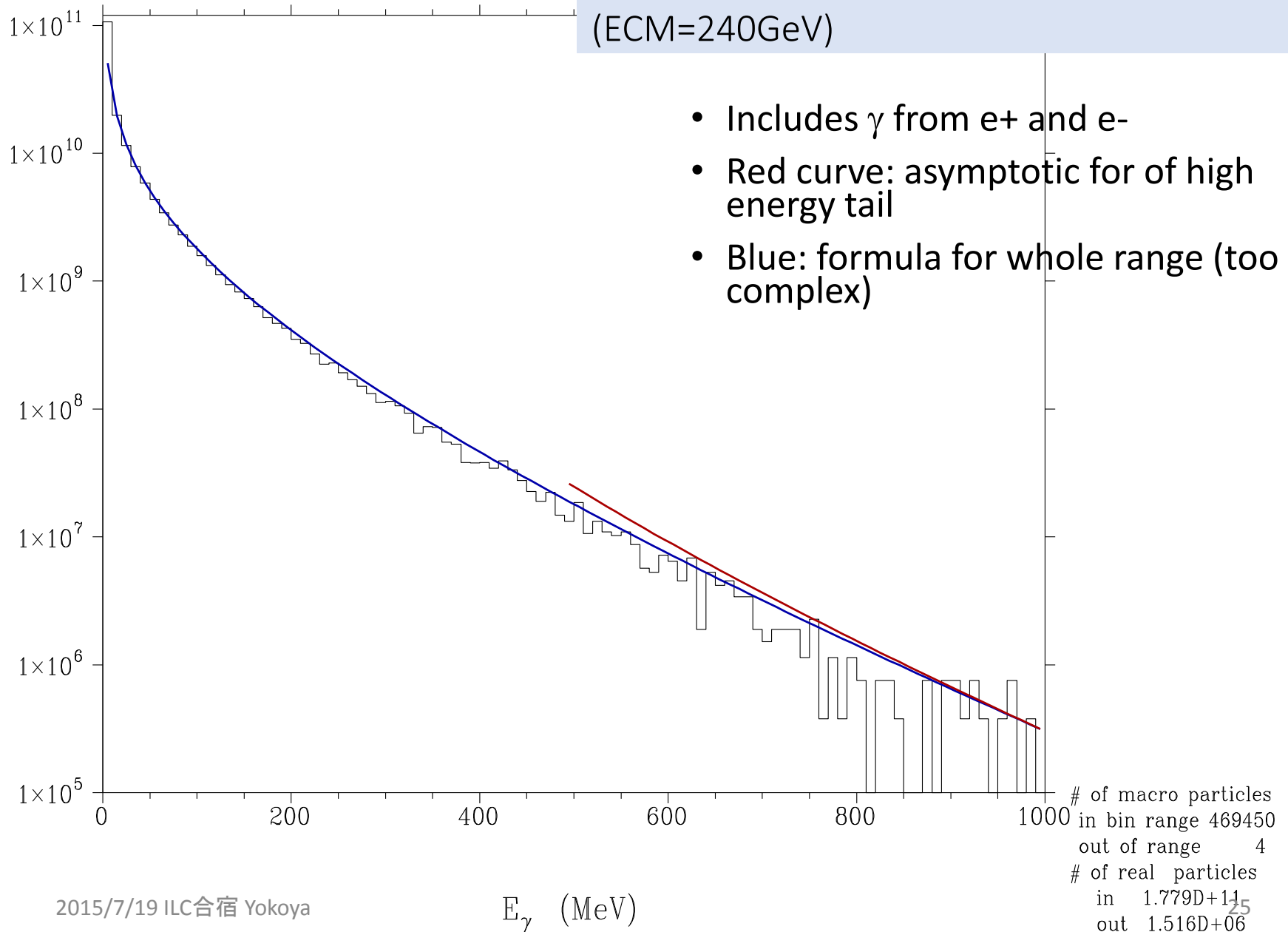
$$\langle n_\gamma \rangle = 2.16 \frac{\alpha N r_e}{\sigma_x^*}, \quad (\sigma_x^* \gg \sigma_y^*)$$

- High energy tailはMaximum Upsilon付近の寄与で決まる

$$\frac{d \langle n_\gamma \rangle}{dx} \approx 0.426 \langle n_\gamma \rangle x^{-5/2} e^{-x}, \quad x = \frac{\omega}{\omega_{c,max}} \gg 1$$

$$\int_x^\infty dx \frac{d \langle n_\gamma \rangle}{dx} \approx 0.426 \langle n_\gamma \rangle x^{-5/2} e^{-x}, \quad (x \gg 1)$$

Beamstrahlung Energy Spectrum

Simulation with CEPC Parameters
(ECM=240GeV)

Beam Life Time

- Beam life due to Beamstrahlung

$$\tau_{BS} = \frac{T_0}{0.426 \langle n_\gamma \rangle n_{IP}} x^{5/2} e^x \quad x = \frac{\omega}{\omega_{c,max}}$$

n_{IP} = number of interaction points

- For example, in CEPC (54km, $E_{CM}=120\text{GeV}$, $\langle n_\gamma \rangle = 0.24$, $\omega_{c,max}=187\text{MeV}$, $n_{IP} = 2$), the dynamic aperture must accept up to $x=9.5$ for the beam life 60 minutes (luminosity life 30 minutes)
→ $\omega = 1.78\text{GeV} = 1.48\%$ of E
- Beam Life due to Radiative Bhabha scattering
 - Beam loss due to the energy loss by the scattering $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma$
 - Proportional to the luminosity
 - Low energyではこれがdominant

$$\tau_{RBS} = \frac{N n_b T_0}{\mathcal{L} \sigma_{eff}}$$

SR & tune-shift & Beamstrahlung- limited Luminosity

- Beamstrahlungによるbeam lifeの式で、 $T_0=2 \times 10^{-4}$ sec, $\tau_{BS} \geq 2000$ secとすると、その他の因子は1のオーダーだから、 $x > 10$ が要求される
 $10^{5/2} \times e^{10} = 10^{6.8}$
- したがって、momentum band-widthを η とすると、 $\eta > 10 \times [(3/2) \text{Upsilon}_{max}]$ 、すなわち

$$\eta \gtrsim 10 \times \frac{3Nr_e\lambda_e\gamma}{\sigma_x^*\sigma_y^*}$$

	FCC-Z	FCC-W	FCC-H	FCC-T	CEPC-Z	CEPC-H
UPS-max	1.12E-4	3.90E-4	9.11E-4	15.5E-4	0.60	10.4E-4
nBS	0.040	0.077	0.094	0.139	0.059	0.241

Luminosity Scaling of e^+e^- Ring Colliders

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

- 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

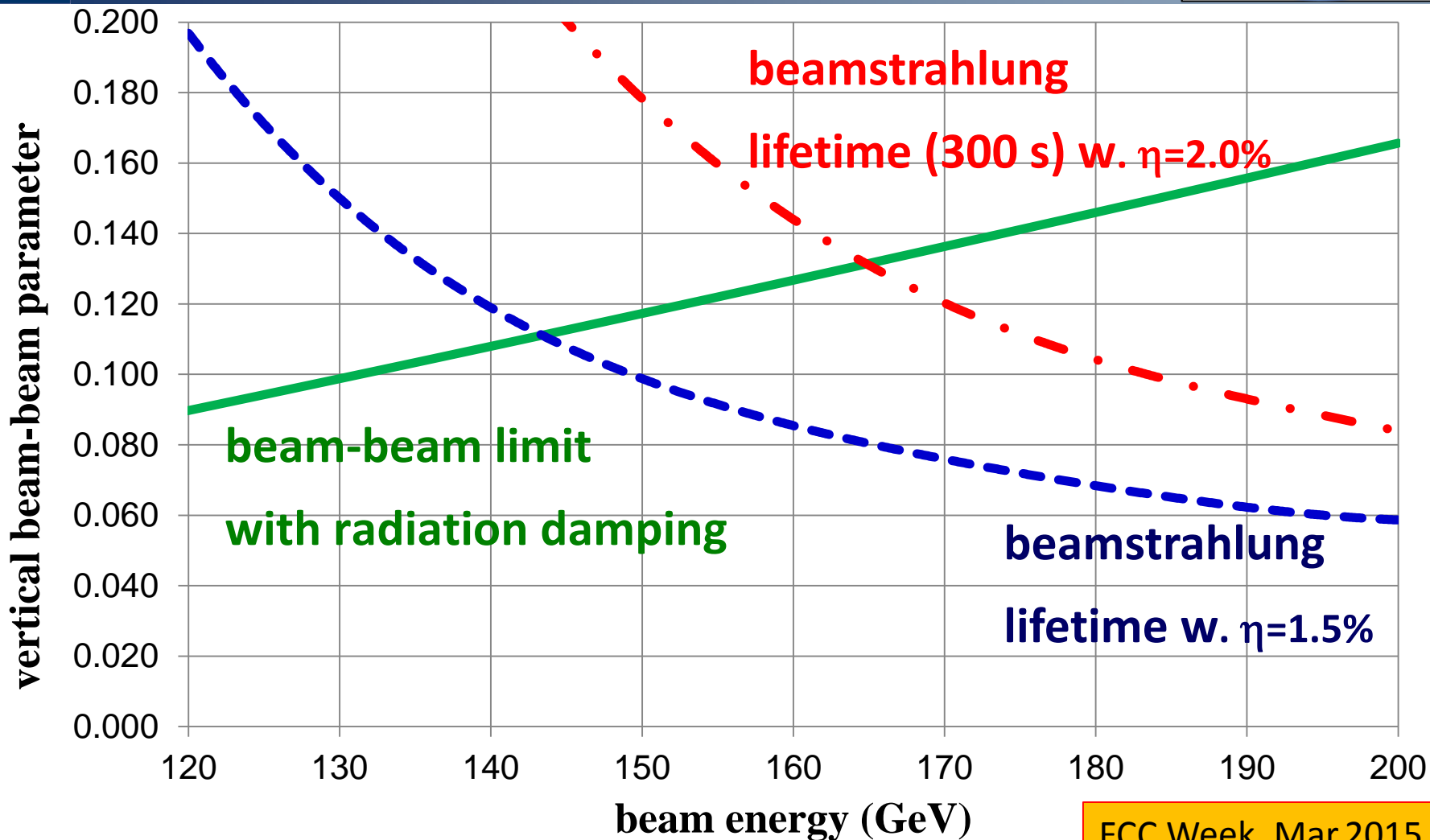
ρ : bending radius

ξ_y : tune-shift

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



beam-beam limits: 2 regimes



FCC Week, Mar.2015

$$\varepsilon_y = 2 \text{ pm},$$

$$\beta_y^* = 1 \text{ mm}$$

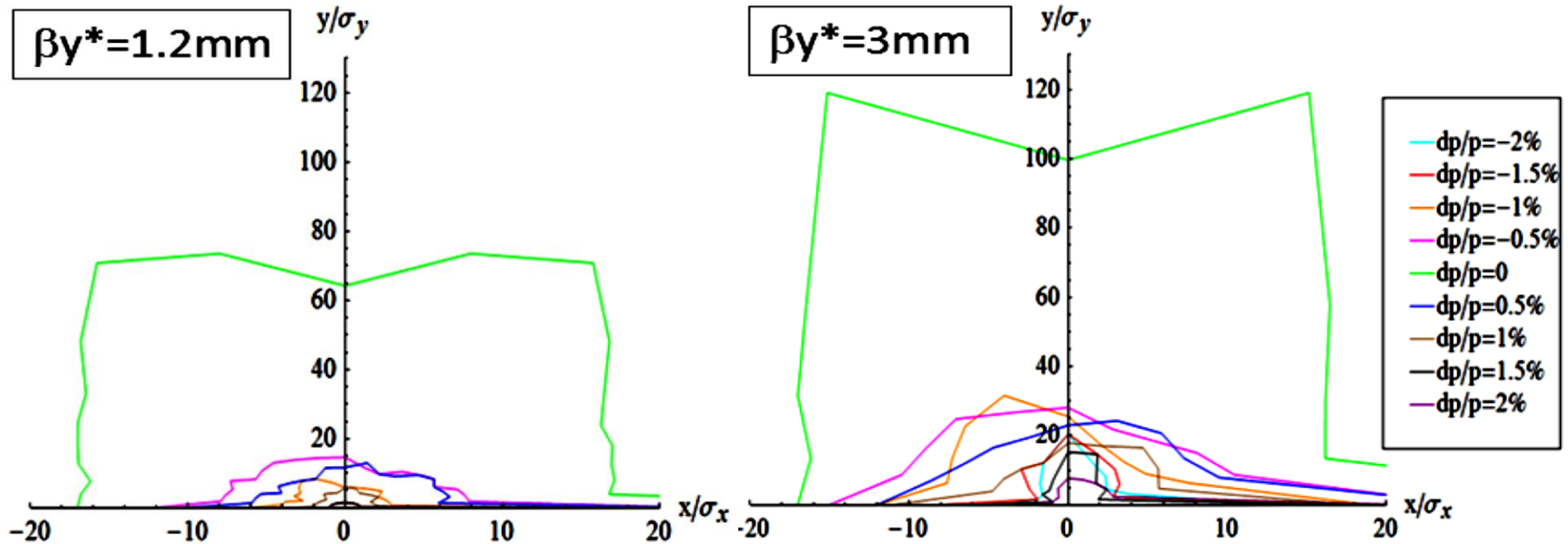
M. Koratzinos, A. Bogomyagkov, E. Levichev, D. Shatilov, K. Yokoya, V. Telnov, K. Oide, ...

Dynamic Aperture

- 前記のように、off-momentum 粒子 (エネルギーのずれた粒子) に対する dynamic aperture が重要
 - $\eta = \Delta E/E$
- FCCee, CEPC は $\eta = 1.5-2\%$ あたりを目標としている
 - SuperKEKB の設計では、 $\sim 1.5\%$
 - 以前はもっとおおきな値を考えていたようであるが、この程度が妥当であろう
 - Telnov の scaling law では、luminosity は、 $\eta^{2/3}$ に比例

CEPC Dynamic aperture

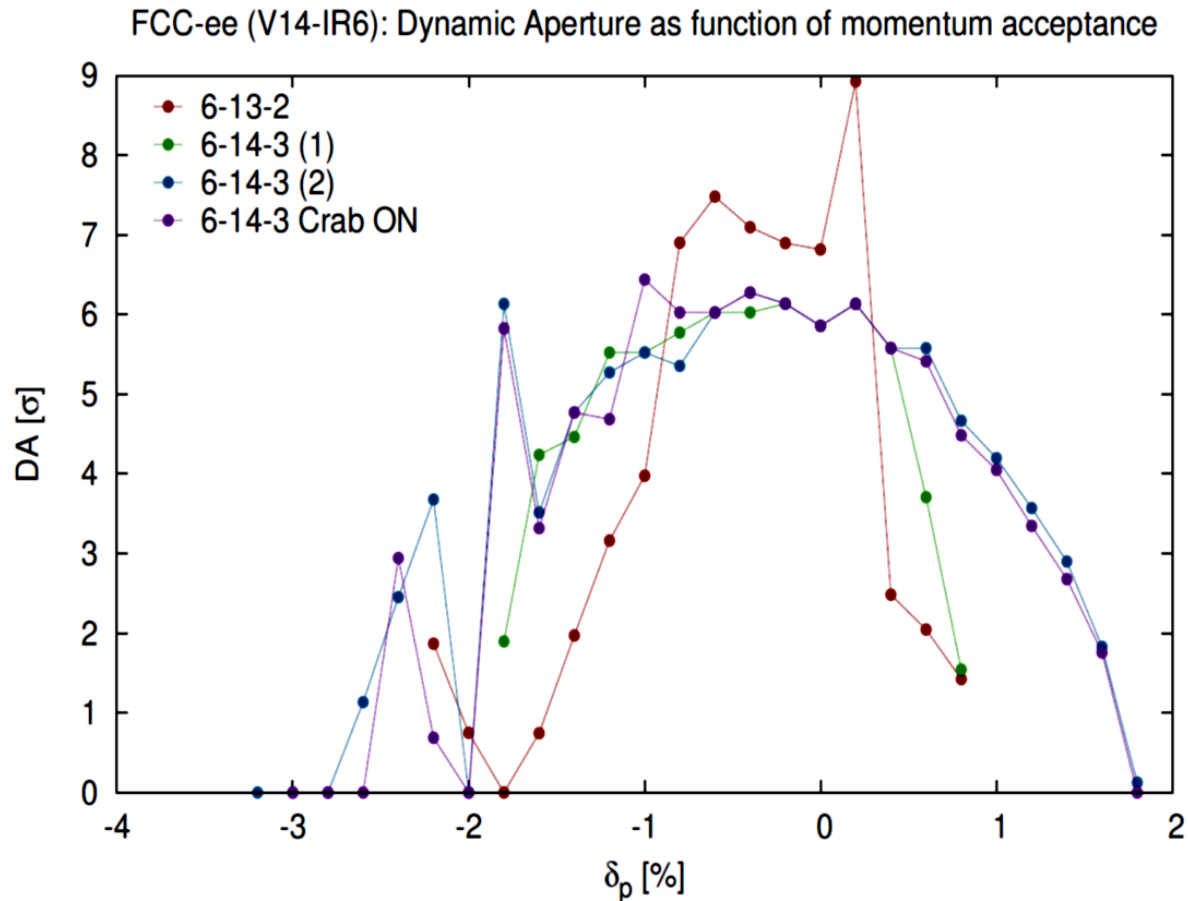
- CEPC also considering the possibility of $\beta y^* = 3\text{mm}$ instead of 1.2mm in the baseline.



Dynamic aperture of CEPC (Pre-CDR). Includes arc, FFS, synchrotron oscillation, but, perhaps, not prezel, sawtooth, beam-beam, etc.

Example from FCC

DA tracking studies

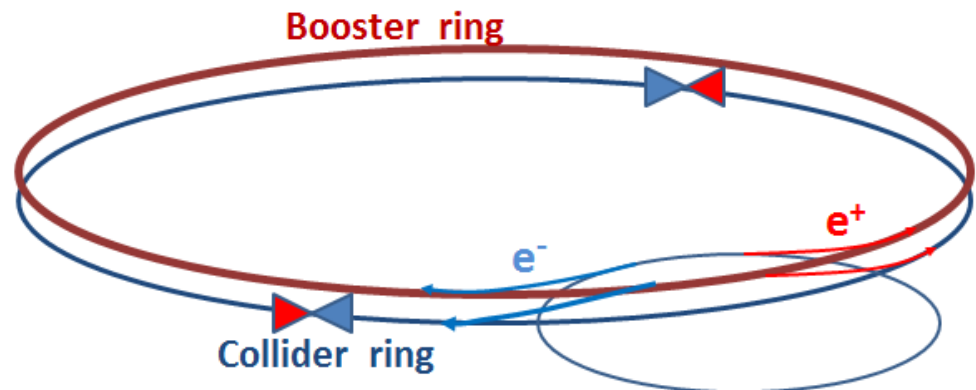


Method:

- PTC tracking
- 4 IPs
- Radiation off
- Solenoid off

Top-up Injection

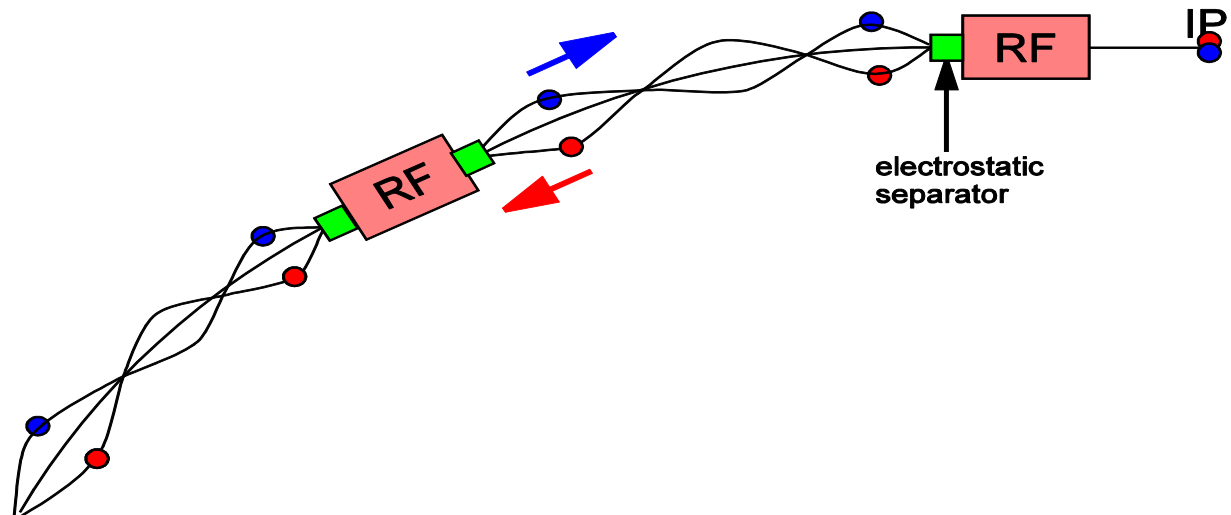
- 高いluminosityを目標とするため、Beam lifeはbeamstrahlungの効果がなくても非常に短い
- Top-up injectionが必要 → booster ring
- Booster ringでは、1粒子あたりの輻射損失はcollider ringと同じ → ほぼ同じ加速電圧が必要
- ただし、電流が低いので、電力消費は小さい → high frequency RF が使える (e.g., 1.3GHz)
- 10秒に一回程度の繰返しは可能とみられている
- 実験ホールのbypassが必要
- Injection energy 5-20GeV (field quality is an issue if too low)



	FCC-Z	FCC-W	FCC-H	FCC-t	CEPC-Z	CEPC-W
Lum.life(min)	298	73	29	21	?	50.6

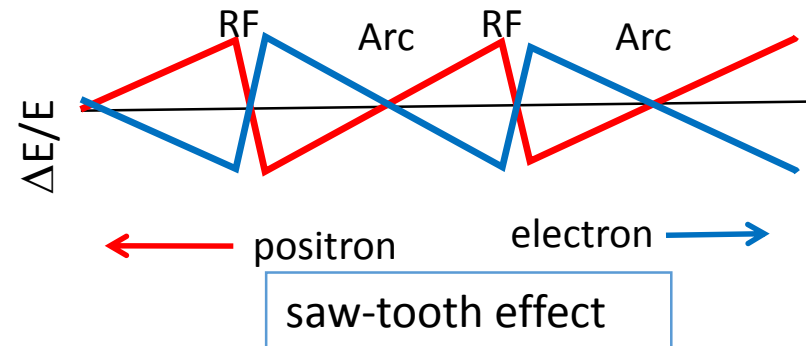
Single Collider Ring

- CEPCはコストを下げるために1リングにしている
 - バンチ数が数個なら、electro static separatorで無駄な衝突を回避できるが、バンチ数はもっと増やしたい
 - → 衝突点以外での遭遇を避けるためにpretzel軌道にする (CESRで最初に)
 - CEPCでは、 $5\sigma_x$?のhorizontal separation
 - RF sectionではビームを空洞中心を通るべき (synchro-beta coupling)



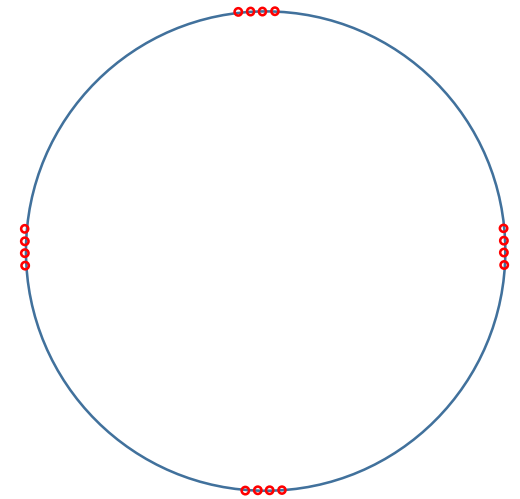
Pretzel Schemeの課題

- ビームが6極磁石の中心を通らないため軌道位置によりoptics (beta and dispersion) が変わる
- 分離されていてもbeam-beam deflectionは受けるので、正確なビーム位置は相手ビームの電流による(電流はビーム損失のため変動している)
- Sawtooth効果は問題をさらに複雑にする
 - CEPCでのsawtoothによる軌道位置の差は $\pm 0.6\text{mm}$ (pretzel自身による差より1桁小さいが)



Bunch Train

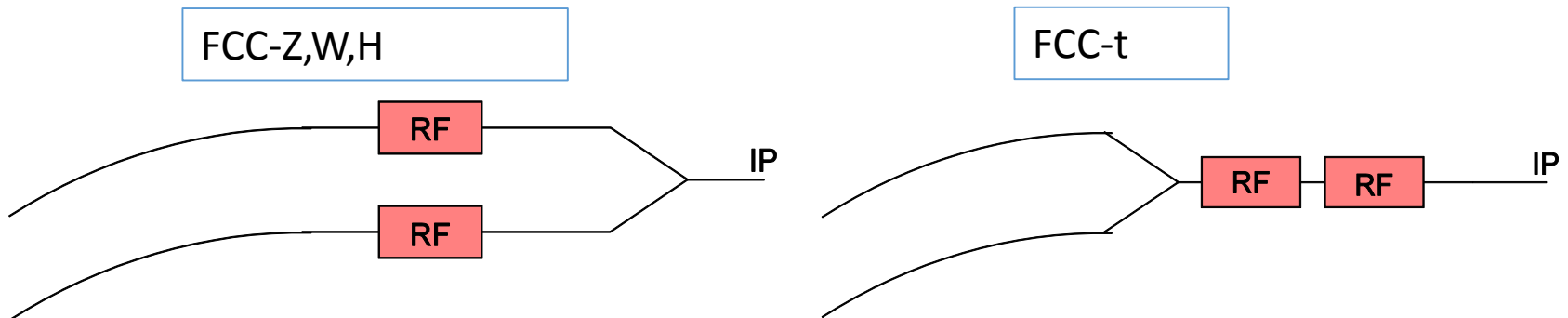
- バunchを狭い間隔で集団化 (train) すれば、pretzelなしで (electro-static separatorのみで) バunch数を増やせる
 - Train内のバunch間距離は、衝突点前後のparasitic crossingで制限される
 - RF beam-loadingの不均一が問題になる
- CEPC-Zでは、バunch数をさらに増やすため、集団化とpretzelを併用している
 - CEPC-Hでは50バunch、一様
 - CEPC-Zでは、64バunch (間隔1.38m=3 RF bucket)、24群、合計1792バunch
 - ただし、これはAppendixにのみ記載されている
- 衝突点前後でのparasitic crossingは避けられない。これを緩和するために、crossing angleをつける
 - LHCではこの効果を緩和するために、crossing angleのほかさらにwire currentによる補正も行っている



FCC : 2 Collider Rings

- FCCでは、電子・陽電子別々のリングを考えている (booster ringを加えて、同じトンネルに3リング)
- コスト節約のため、high energyでは電子・陽電子がRF sectionを共有することを考えている
 - 必要な電圧は、Z,W,H,t それぞれ、2.5, 4, 5.5, 11 GV
 - SR powerはどのエネルギーでも、各ビーム50MW
 - したがって、FCC-tにする場合は、RFを直列にすればよい

	FCC-Z	FCC-W	FCC-H	FCC-T	CEPC-Z	CEPC-H
U_0 (GeV)	0.03	0.33	1.67	7.55	0.60	3.11
V_{RF} (GV)	2.5	4	5.5	11	?	6.87

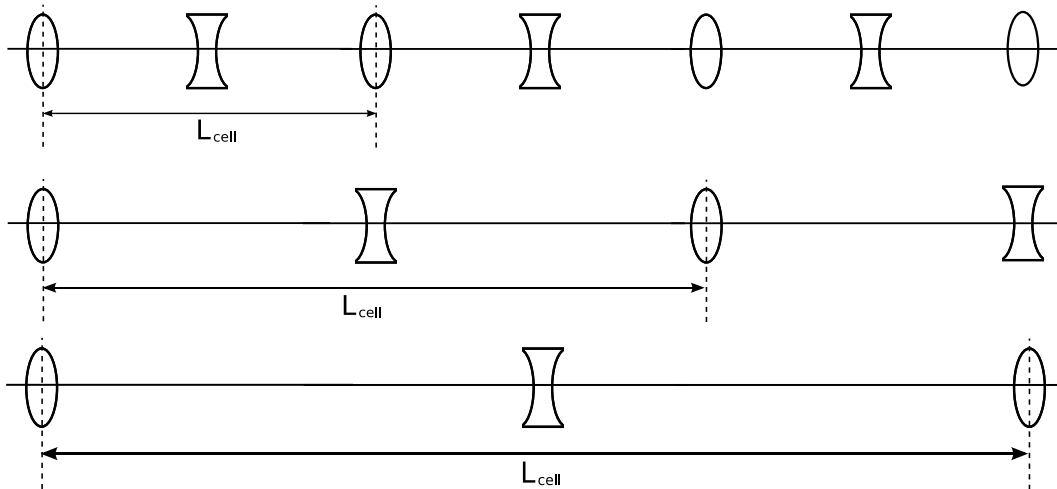


Emittance

- 当初の設計からもっとも大きく異なるパラメータはエミッタンス
 - $\epsilon_y = 100\text{pm} \rightarrow 1\text{pm}$ (LEP2では~250pm)
 - Colliderではこの小さなemittanceは経験がないが、最近の数GeVの放射光リングでは普通になっている
- Vertical emittanceを下げるには、まずHorizontal emittanceを下げる
- Horizontal emittanceはarcの構造で決る
($N_{\text{cell}} = \text{FODO cellの数}$)

$$\epsilon_x \propto \frac{E^2}{N_{\text{cell}}^3} \times F(\text{phase advance / cell})$$

- 同じ ϵ_x を得るには、high energyでは N_{cell} を大きく(L_{cell} を短く)する

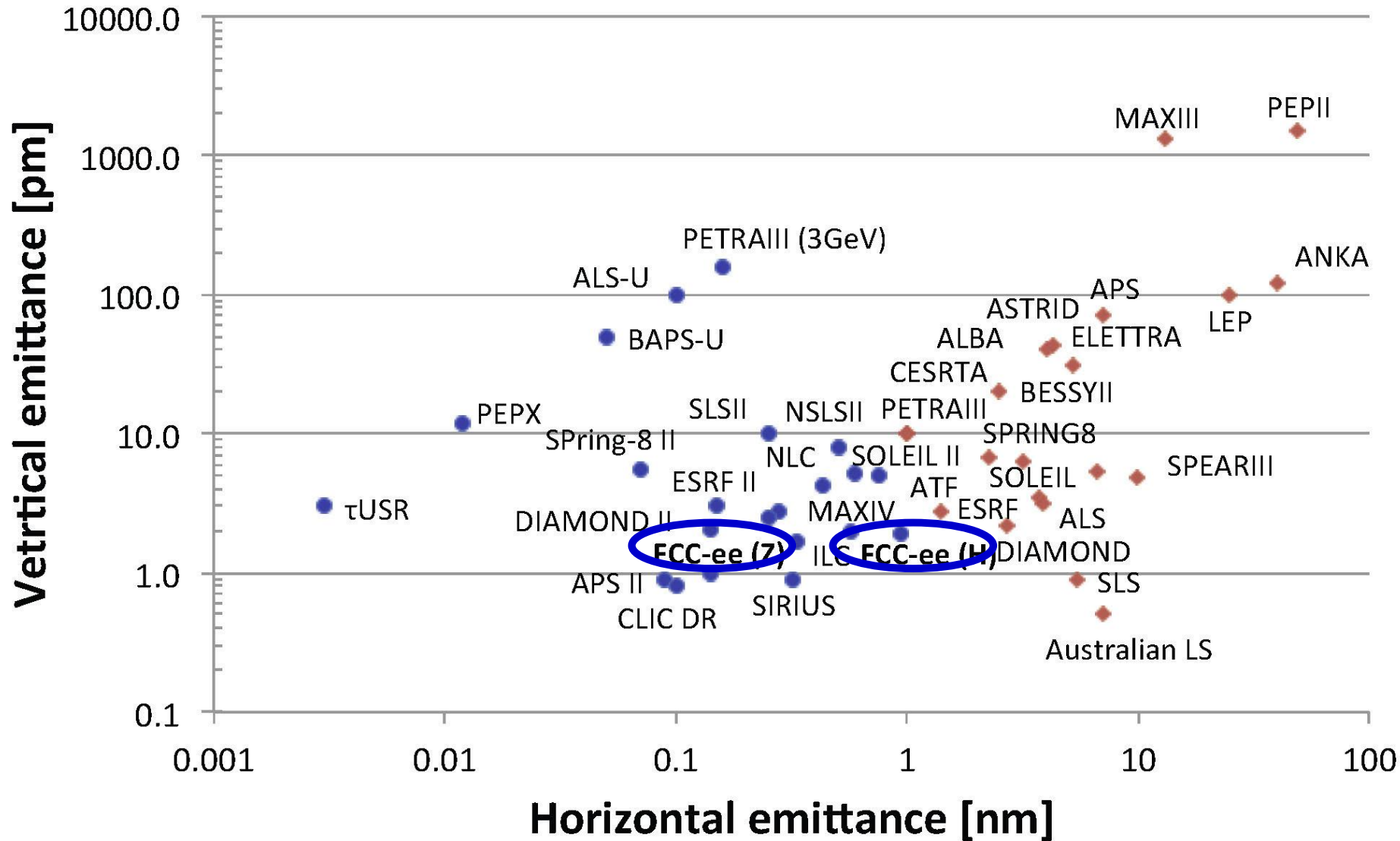


B.Haerer, FCC Week,
Mar.2015

$L_{\text{cell}}=150\text{m}$

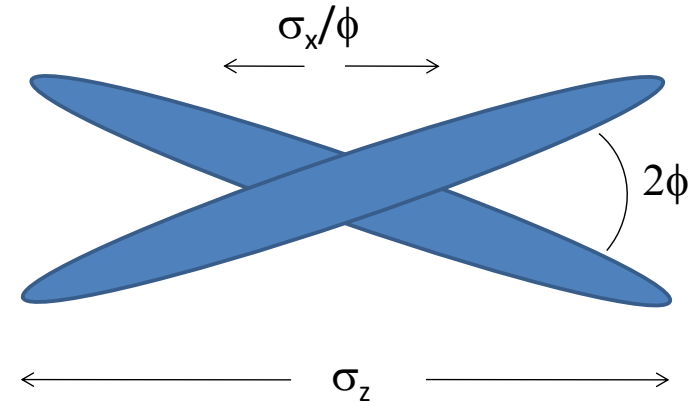


transverse emittances



Nanobeam Scheme (or Crab Waist)

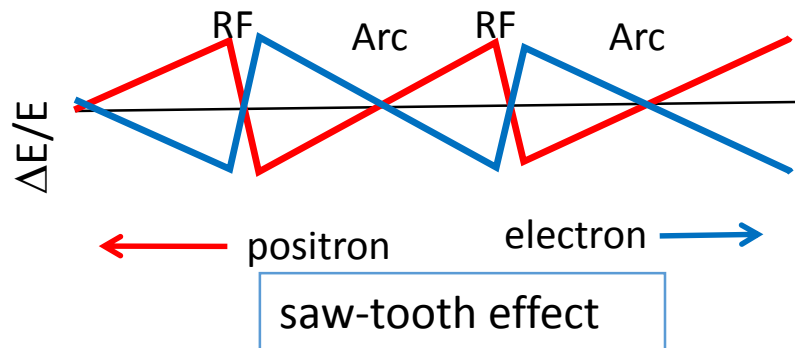
- 大きな交差角 $\gg \sigma_x/\sigma_z$
(クラブ空洞による補正はしない)
- 実効的なバンチ長が短くなる
 - 高いRF電圧を使わずに
- バンチ数を増やしたのと同様な効果
- したがって、 β_{y^*} を小さくしても、砂時計効果が効かない
 - リニアコライダーでも原理的には可能であるが、 β_{y^*} を今以上に小さくすることはむずかしい



- FCC-Zでは通常のパラメータの10倍のluminosityが期待できる
- ただし、beamstrahlung 問題の解決にはならない

Ring e^+e^- の技術的課題のまとめ(1)

- Optics
 - 低emittance
 - 最近の設計では、FCCeeは $\varepsilon_{yg}=1\text{pm} = \text{LEP2の}1/250$
 - CEPCは18pm
 - $\beta y^* \sim 1\text{mm}$ のもとで大きなmomentum bandwidth ($> 1.5\text{-}2\%$)
 - Saw-tooth effects
 - Machine configuration
 - Choice of 2 collider rings (FCCee) or single ring with pretzel (CEPC)
 - RF sectionを2リングで共有する (FCCee, high energy)



Ring e^+e^- の技術的課題のまとめ(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 (~ 0.5 at FCC-Z)
 - 長い RF section ($\sim 600\text{m}$) に起因する不安定性 (特に FCC-Z)
- RF
 - power coupler (CW)
 - Input power per cell $\sim 40\text{kW}$
 - 1.3GHz は無理。700MHz ならOKか。Need R&D.
 - 最近の FCCee は 400MHz, CEPC は 650MHz
 - HOM damping
 - Booster ring はビーム電流が低いので問題ない
 - ただし、電圧はほとんど同じ
- 真空
 - Synchrotron radiation のシールド
 - リングが当初より大きくなったので問題は緩和されている
 - critical energy $\sim 1.0\text{MeV}$ at FCC-H
 - FCC で ECM=500GeV にすると critical energy $\sim 3\text{MeV}$ \rightarrow neutron の発生

Beam Polarization

- Use of beam polarization
 - Energy calibration
 - Z mass = 91.1876 ± 0.0021 GeV measured at LEP
 2.3×10^{-5}
 - ~5% polarization enough for this purpose
 - Polarized colliding beam experiments (longitudinal polarization) like at HERA
 - Need spin rotator
 - 30-40 % polarization at least
- How to get polarized beam
 - Spontaneous radiative polarization (Sokolov-Ternov effect)
 - Injection and acceleration of polarized beam

Radiative Polarization

- 電子・陽電子は、円軌道上で、spin up-down間のtransition rateの差により自発偏極する

$$W_{\uparrow\downarrow} = \frac{5\sqrt{3} r_e \gamma^5 \hbar}{16 m |\rho|^3} \left(1 \pm \frac{8}{5\sqrt{3}} \right)$$

$$P_{eq} = \frac{W_{\uparrow\downarrow} - W_{\downarrow\uparrow}}{W_{\uparrow\downarrow} + W_{\downarrow\uparrow}} = \frac{8}{5\sqrt{3}} = 92.38\%$$

- Polarization build-up

$$P(t) = P_{eq} \left[1 - e^{-t/\tau_p} \right] \quad \tau_p^{-1} = \frac{5\sqrt{3} r_e \gamma^5 \hbar}{8 m |\rho|^3}$$

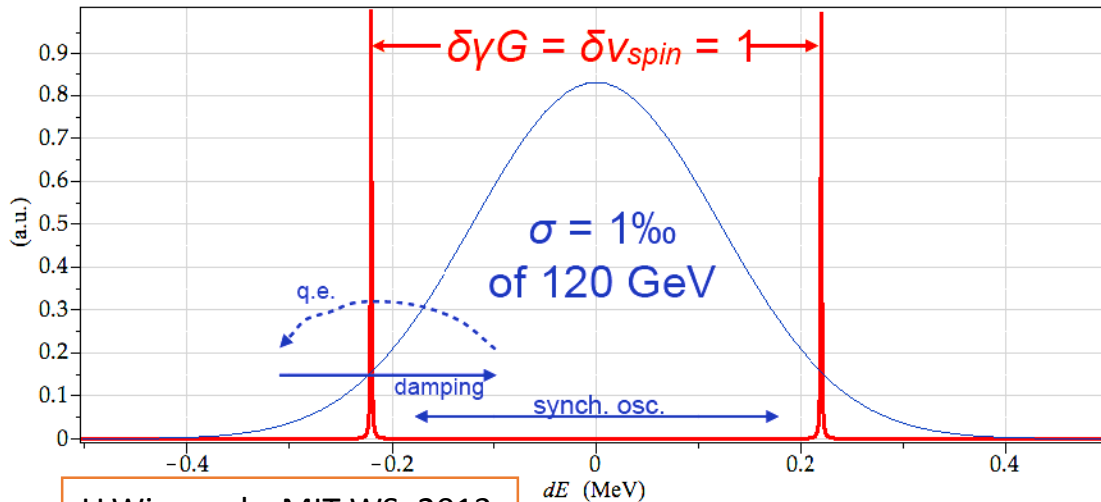
- Polarization time

$$\tau_p = 98.67 \times \frac{R_{[m]} \rho_{[m]}^2}{E_{[GeV]}^5}$$

Spin Resonance

- 単純なリングでは、リング1周あたりのprecessionの回数 (spin tune) は
$$n_{\text{spin}} = E/0.44\text{GeV}$$
- 加速中にこれが整数になる(あるいは整数+ ν)と、軌道運動との共鳴が起こり、共鳴の強さによって減偏極が起こる
- ビームエネルギー幅が、共鳴間隔440MeVにくらべて無視できない場合も減偏極が起こる
- このため、FCC-H, FCC-t, CEPC-H では自発偏極は望めない
 - FCC-Z, CEPC-Z は問題ない
 - FCC-W はボーダーライン。Energy calibrationに必要な~5%はOKか。
- これを避ける方法として、Siberian snakeなるものがある。これはエネルギーに関係なくspin tuneを0.5にするものであるが、spontaneous polarizationを活かしたままでSiberian snakeを挿入することはむずかしい

Depolarization due to Energy Spread

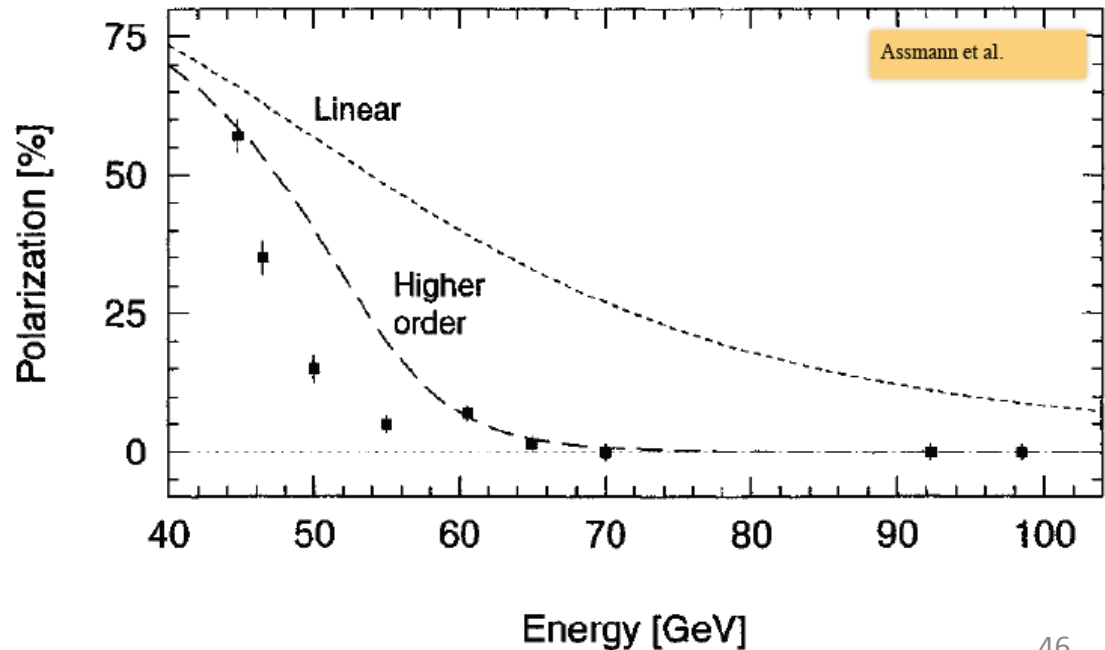


U.Wienands, MIT WS, 2013

- This explanation is too simplistic
- Lots of sophisticated theories since late 1970's

Polarization at LEP
Comparison of theory and observation

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



Radiative Polarization Time

- FCC-Z, CEPC-Z ではenergy spreadの問題はないか、自発偏極が極めておそく、偏極時間がビーム寿命より長い

		FCCee (4IP)			CEPC		
		Z	W	H	Z	W	H
Circumference	km	100	100	100	54.374	54.374	54.374
Bending radius	km	10.424	10.424	10.424	6.094	6.094	6.094
E beam	GeV	45.6	80.4	120	45.6	80.4	120
σ_E (SR)	MeV	24	74	167			156
σ_E (with BS)	MeV	28	84	185			192
U0	GeV	0.037	0.355	1.76	0.063	0.607	3.01
Pol τ	hours	240	14.1	1.90	44.7	2.62	0.35
Beam life		6.7	1.4	0.5			0.8

More Complex Ring including negative bends

$$P_\infty = \frac{8}{5\sqrt{3}} \frac{\alpha_-}{\alpha_+}, \quad \tau_p = \left[\frac{5\sqrt{3} r_e^2}{8} \frac{\gamma^5 c \alpha_+}{\alpha} \right]^{-1} = \frac{98.67 \text{ s}}{E_{[\text{GeV}]}^5 \alpha_{+[\text{m}^{-3}]}}$$

$$\alpha_+ = \frac{1}{C} \oint ds \frac{1}{|\rho|^3} \left[1 - \frac{2}{9} (\mathbf{n} \cdot \hat{\mathbf{v}})^2 + \frac{11}{18} \left| \gamma \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \gamma} \right| \right]_s$$

$$\alpha_- = \frac{1}{C} \oint ds \frac{1}{|\rho|^3} (\hat{\mathbf{a}} \times \hat{\mathbf{v}}) \cdot \left[\mathbf{n} - \gamma \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \gamma} \right]_s$$

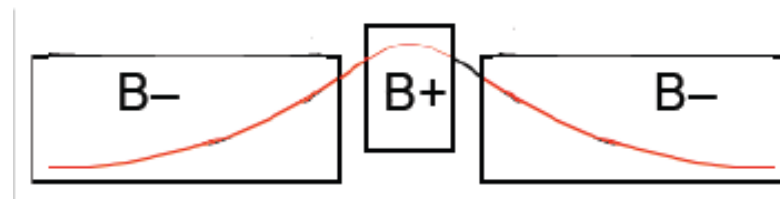
- Planar ring

$$\alpha_+ = \frac{1}{C} \oint ds \frac{1}{|\rho|^3}, \quad \alpha_- = \frac{1}{C} \oint ds \frac{1}{\rho^3}$$

For Faster Polarization

- LEP type asymmetric wiggler can increase α_+ , hence reduce the polarization time.

- But the energy spread and SR loss also increase.



$$\sigma_E \propto \sqrt{\frac{I_3}{I_2}} \quad U_0 \propto I_2 \quad I_3 = \oint ds / |\rho|^3, \quad I_2 = \oint ds / \rho^2$$

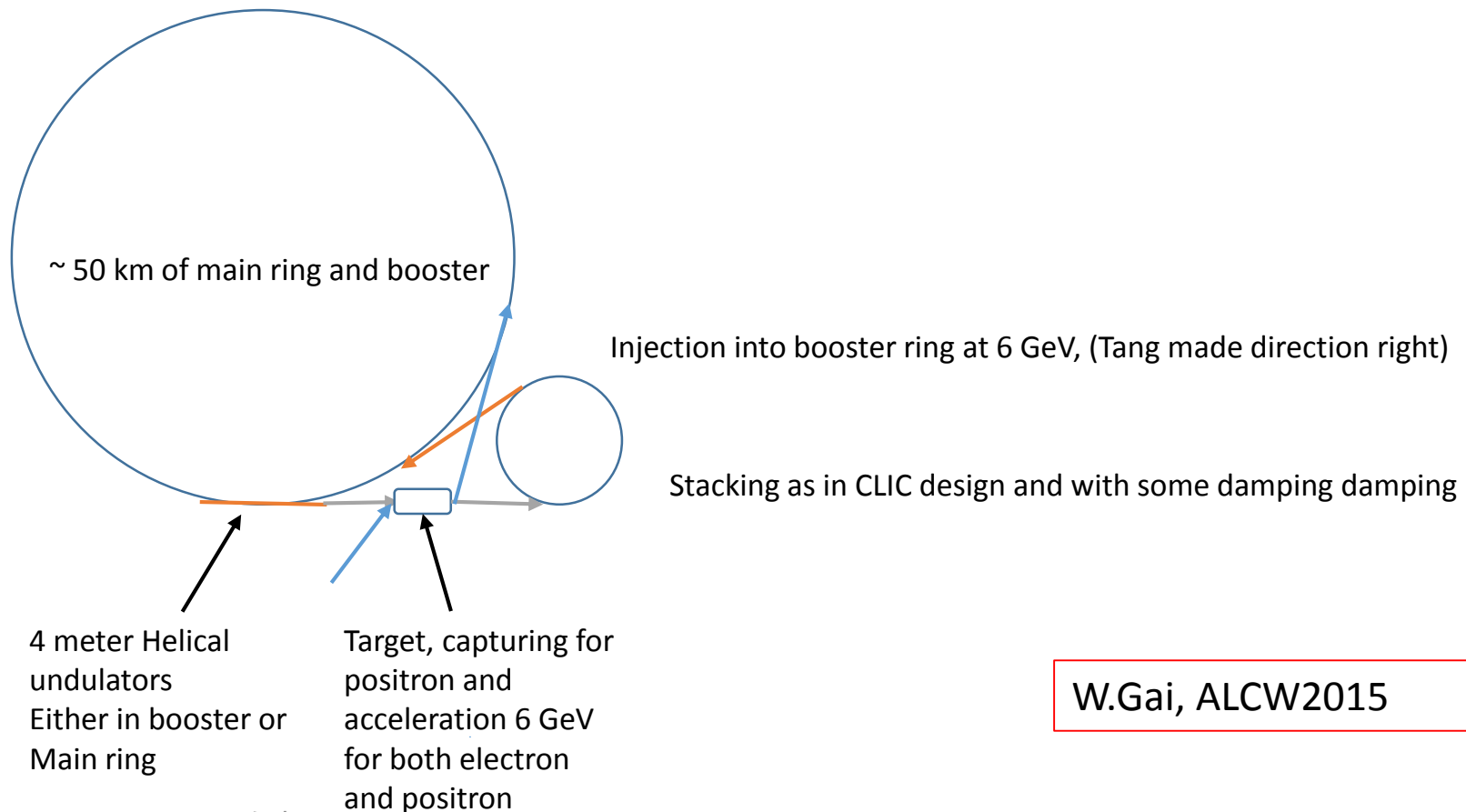
- Hence,
 - $A_p = A_E^2 \times A_U$
 - A_p = improvement factor of τ_p
 - A_E = increase of σ_E , A_U = increase of U_0
- FCC-Z では偏極ビーム実験のためには、少なくとも $A_p \sim 100$ (crab waistの場合 ~ 1000) が必要
 - A_E は高々 1.5-2 しかゆるされない (energy spread depol.)
 - したがって、 $A_U \sim 40$ となり、ビーム電流をこれだけさげなければならない
 - Asymmetric wiggler での local SR は極めて強い
 - さらに、longitudinal polarization のための spin rotator が必要
- Energy calibration のためには pilot bunch が使える
 - ビーム寿命は長い

Injection and Acceleration of Polarized Beam

- Sokolov-Ternovがだめなら、偏極ビームを入射加速することも考えられる
- 陽電子については、CBAF方式？ Undulator方式？
 - ILCで必要な $n(e+)/\text{sec}$ よりはるかに小さい
- この場合、「radiative polarization time」は、「depolarization time」になる
- 必要なもの
 - 偏極ビーム源
 - Booster ringでの共鳴通過 → double Siberian snake
 - Collider ringでの spin rotator (longitudinal polarization)

An Idea of Polarized Positron Source

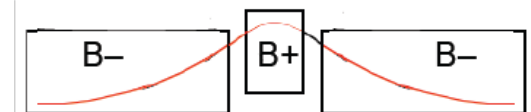
- Undulator based positron source can be adapted for FCC and CEPC



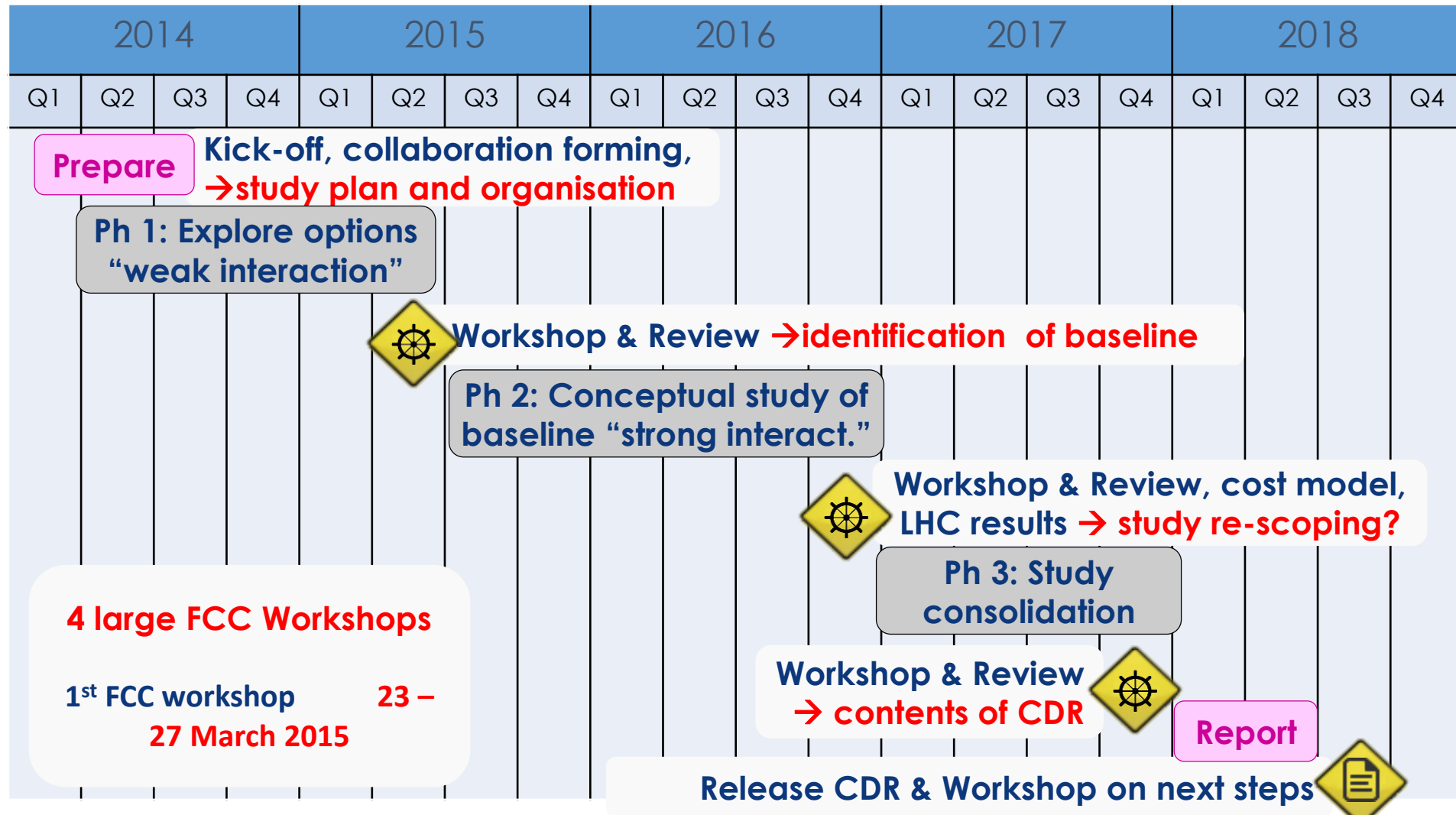
W.Gai, ALCW2015

Ring e⁺e⁻ Colliderでのビーム偏極、圧縮まとめ

- 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. ρ^3/E^5)、Wpair 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 0.44GeV ($=mc^2/a$) に比べて無視できなくなると、depolarizationが起こる。Wpair 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、 ΔM_Z の改善は有力。 ΔM_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
 - Spin matching
 - Rotator中でのlocalized SR
 - したがって、B)はZ-poleでも望み薄



FCC work plan study phase



Possible Time Line of CEPC+SppC

- R&D budget for CEPC: 1B-RMB = 160M\$ in 5 years (2016-2020)

CEPC



1st Milestone: pre-CDR (by the end of 2014) → R&D funding request to Chinese government in 2015 (China's 13th Five-Year Plan 2016-2020)

SppC



Pre-CDR