

# $e^+e^-$ коллайдеры сверхвысокой энергии: ВОЗМОЖНОСТИ И проблемы

---

Е.Б. Левичев

ЦКП «СКИФ»/ИЯФ СО РАН

Physics at future high-energy electron-positron colliders

5 July 2025, JINR, Dubna

# Оглавление

История

Высокая энергия

Crab Waist

CW примеры: DAΦNE и Super KEKB

FCC-ee & CEPC

План «Б» - Z-фабрики

Заключение

# История

12/2011	Blondel, Zimmermann, LEP3, ArXiv:1112.2518	LEP3 (26 km), 120 GeV.
02/2012	Oide, SuperTristan, KEK Semirar	SuperTristan (80 km)
03/2012	Telnov, single beamstrahlung, ArXiv:1203.6563	Ограничение светимости
06/2012	CERN 1 <sup>st</sup> LEP3 meeting	
07/2012	<b>CMS Higgs observation, ArXiv:1207.7235</b>	
09/2012	1 <sup>st</sup> CEPC-SppC meeting (China)	Китайцы включились в гонку
11/2012	1 <sup>st</sup> ICFA Higgs Factories WS (Fermilab)	+ pp коллайдер
05/2013	ESPP Update	ЦЕРН получил задание от Европы
06-09/2013	Три междунар. совещания	FCC-ee: 45.5 ГэВ – 175 ГэВ
11/2013	ИЯФ предлагает CW	Светимость на низкой энергии ↑
02/2014	FCC Kick-off meeting, Geneva U.	Официальный старт
05/2014	BINP-CERN FCC MoU	
10/2014	ICFA Higgs Factories WS, IHEP, China	
03/2015	1 <sup>st</sup> FCC week in Washington	
07/2015	CW is a basic variant for FCC-ee	
09/2015	CEPC-SppC IAC in Beijing	Международ.сотрудничество с Китаем
2019	Three CDRs (FCC-ee, FCC-hh, FCC-eh) are published	

CERN-OPEN-2011-047

20 January 2012

Version 2.9

arXiv:1112.2518v1 [hep-ex]

A High Luminosity  $e^+e^-$  Collider in the LHC tunnel to study the Higgs Boson

Alain Blondel<sup>1</sup>, Frank Zimmermann<sup>2</sup>

<sup>1</sup>DPNC, University of Geneva, Switzerland; <sup>2</sup>CERN, Geneva, Switzerland

**Abstract:** We consider the possibility of a 120x120 GeV  $e^+e^-$  ring collider in the LHC tunnel. A luminosity of  $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$  can be obtained with a luminosity life time of a few minutes. A high operation efficiency would require two machines: a low emittance collider storage ring and a separate accelerator injecting electrons and positrons into the storage ring to top up the beams every few minutes. A design inspired from the high luminosity b-factory design and from the LHeC design report is presented. Statistics of about  $2 \times 10^4$  HZ events per year per experiment can be collected for a Standard Higgs Boson mass of 115-130 GeV.

# Энергия (СИ)

Потери на СИ быстро растут с увеличением энергии электронов:

$$U_{o,electron} (keV) = \frac{e^2 \gamma^4}{3\epsilon_0 \rho} = 88.46 \frac{E(GeV)^4}{\rho(m)}$$

$$P_{electron} (kW) = \frac{e \gamma^4}{3\epsilon_0 \rho} I_b = 88.46 \frac{E(GeV)^4 I(A)}{\rho(m)}$$

Большая длина приветствуется!

Для e+e- коллайдеров большой энергии принято ограничение ≤50 МВт/пучок. Чтобы его выполнить, приходится с увеличением энергии уменьшать ток пучка и, соответственно, светимость:

$$L = \frac{\gamma}{2er_e} I \cdot \frac{\xi_y}{\beta_y^*} \propto P_{SR} \frac{\rho}{E^3} \frac{\xi_y}{\beta_y^*}$$

$$\frac{L_{FCC}}{L_{ZUNK}} = \frac{C_{FCC}}{C_{ZUNK}} \approx \frac{100 \text{ km}}{20 \text{ km}} = 5$$

	E (ГэВ)	L (km)	U(MeV)	P(MW)	I (mA)
LEP2	104.5	26.7	3.41	11	4
ZUNK	45.6	20.8	216	50	232
FCCee(Z)	45.6	91	39.1	50	1280
FCCee(tt)	182.5	91	10000	50	5

(при прочих равных условиях)

# Энергия (СИ)

Новый тип неустойчивости наблюдается, когда мощность СИ из квадрупольных линз (финального фокуса), начиная с некоторого отклонения частицы, становится сравнима с мощностью излучения из поворотных магнитов. **(Нелинейности отсутствуют!)**

Затухание  
бет.колебаний

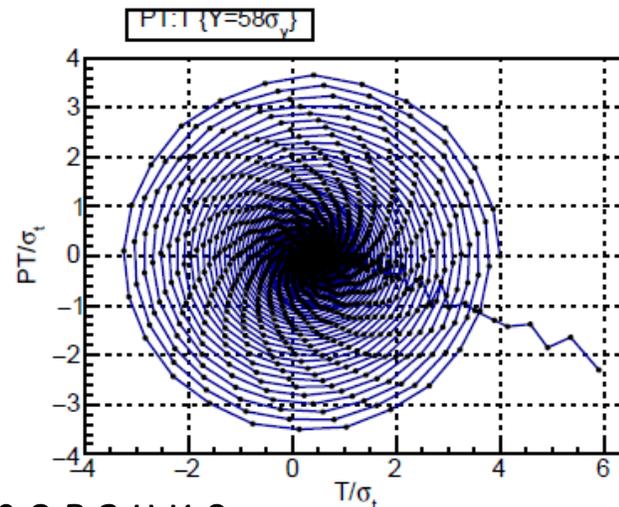
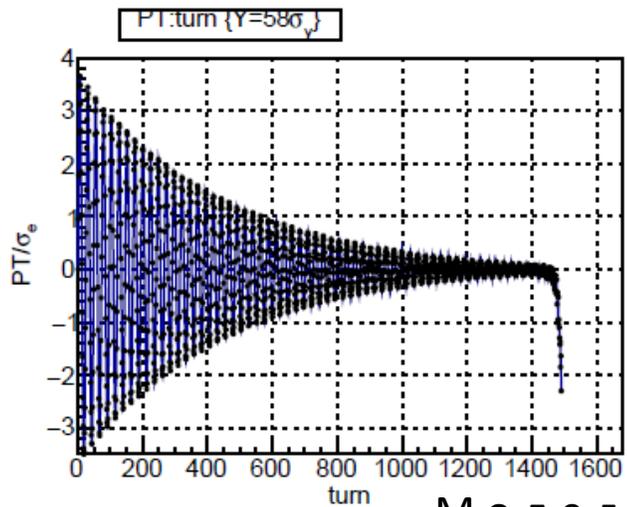
Фокусировка и  
резон.раскачка

Продольн.импульс,  
модулированный двойной  
частотой бет колебаний

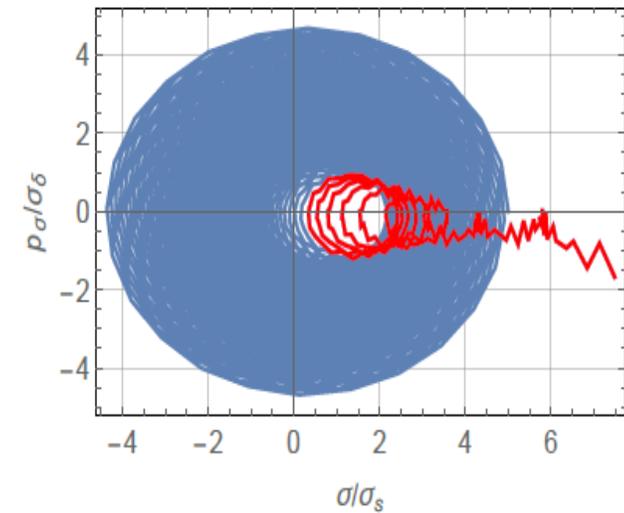
$$\frac{d^2y}{ds^2} + \Gamma K_0^2(s) \frac{d^2y}{ds^2} - K_1(s)[1 - p_\sigma(s)]y = 0$$

$$p_\sigma(s) \propto \cos\left(\frac{2\nu_y + n}{R} \cdot s + \chi_0\right)$$

«Самонаводящийся» (на любой частоте бет.колебаний) параметрический резонанс.



Моделирование

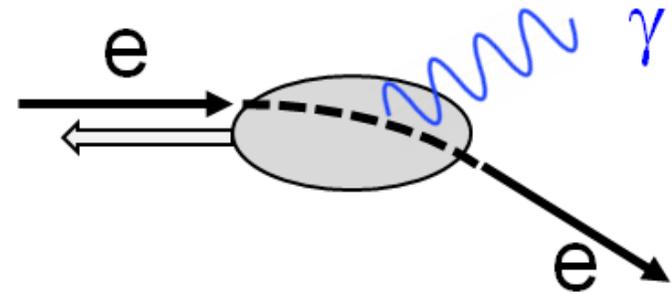


Теория

# Энергия (beamstrahlung)

Электрон высокой энергии может излучить в коллективном поле встречного сгустка (beamstrahlung) настолько жесткий гамма-квант, что оказывается за границей энергетической области устойчивости  $\eta \approx 1-2\%$

$$\tau_{bs} \propto \exp\left(\text{const} \cdot \frac{\eta \cdot \rho_b}{\gamma^2}\right) \cdot \frac{\rho_b \sqrt{\eta \cdot \rho_b}}{L_i \cdot \gamma^2} \quad \frac{1}{\rho_b} \propto \frac{N_p}{\gamma \sigma_x \sigma_s} \propto \frac{\xi_y}{L_i} \sqrt{\frac{\varepsilon_y}{\beta_y^*}}$$



При  $E > 100$  ГэВ однократное пучковое излучение (single beamstrahlung) определяет время жизни и светимость. Требуется большой энергетический акцептанс  $\eta$  и большой радиус поворота в поле встречного сгустка  $\rho_b$ . **CW преимуществ не имеет.**

[Telnov V. I.](#) arXiv:1203.6563,  
29 Mar 2012.

При  $E < 100$  ГэВ многократное пучковое излучение (multiple beamstrahlung) увеличивает продольный размер пучка и светимость при лобовой встрече падает из-за hour-glass. **Для CW этого нет и светимость может быть сильно увеличена.**

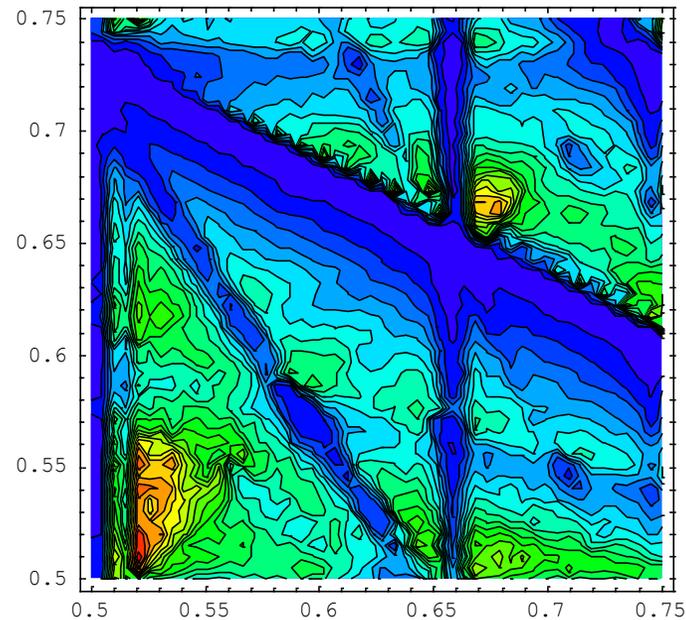
*Bogomyagkov A., Levichev E., Shatilov D.* Phys. Rev. ST Accel. Beam 17, 28 April 2014.

# “Обычные” эффекты встречи

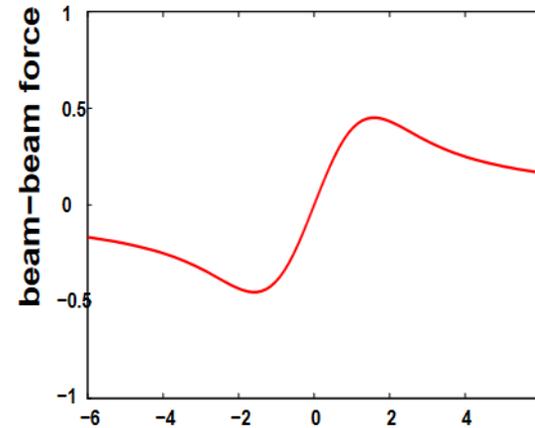
Ограничение светимости в «обычных» коллайдерах вызывается коллективным (нелинейным!) полем одного сталкивающегося сгустка, действующим на частицы другого сгустка.

$$L = f \cdot \frac{N^2}{4\pi\sigma^2} = f \cdot N \frac{\xi \cdot \gamma}{r_e \beta} = \frac{I}{e} \cdot \frac{\xi \cdot \gamma}{r_e \beta}$$

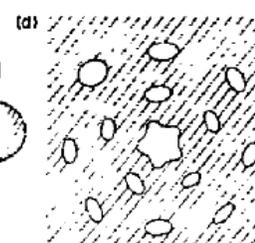
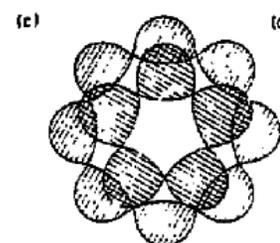
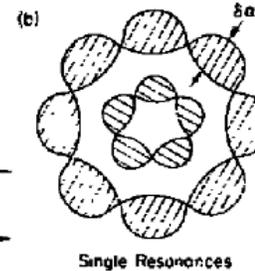
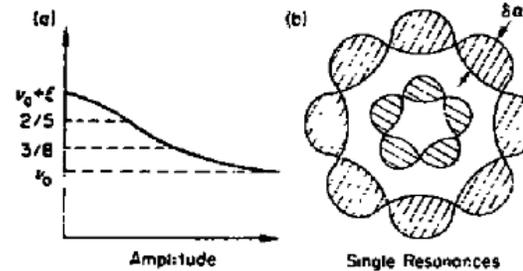
$$\Delta\nu = \xi = \frac{N \cdot r_e \beta}{4\pi\sigma^2 \gamma} = \frac{r_e}{4\pi} \cdot \frac{N}{\varepsilon \gamma}$$



beam-beam force, round beams



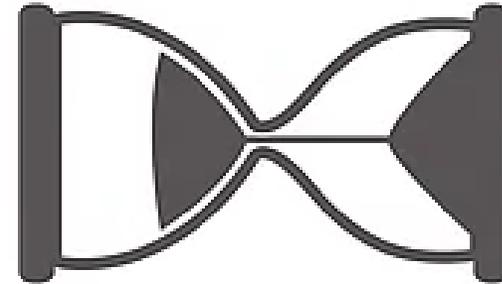
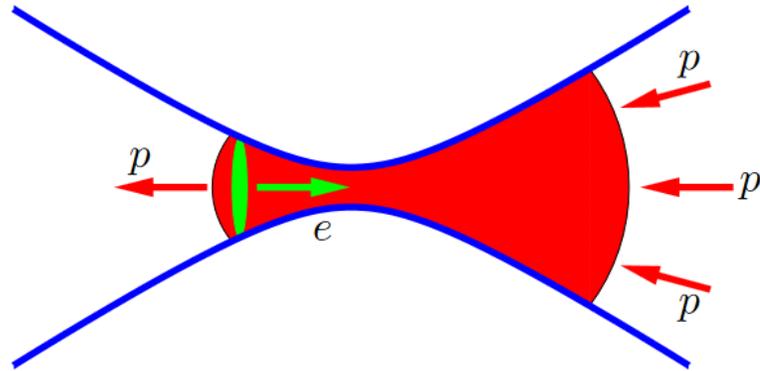
amplitude



Machine	E (GeV)	$\gamma$	$\xi_y$ (Gao)	$\xi_y$ (experimental value)
DAFNE	0.51	998	0.0292	0.02
BEPC	1.89	3698	0.0423	0.04
BEPCII	1.89	3698	0.0422	0.04
PEP-II(L)	3.12	6106	0.0570	0.06
PEP-II(H)	8.99	17593	0.0474	0.048
KEKB(L)	3.5	6849	0.0592	0.069
KEKB(H)	8.0	15656	0.0527	0.052
SuperKEKB(L)	4.0	7828	0.0325	
SuperKEKB(H)	7.0	13699	0.0463	
SuperB(L)	4.2	8219	0.0382	
SuperB(H)	6.7	13111	0.0696	
LEP-I	45.6	88062	0.0275	0.033
LEP-II	104.5	191781	0.0639	0.079
LEP3	120	234834	0.0798	
CEPC	120	234834	0.0739	

# Hour-glass effect

Фокусировка «длинного» пучка неоднородна по длине. Учет этой неоднородности приводит к уменьшающему светимость фактору (HG-effect)



$$\mathcal{L} = \left( \frac{N_1 N_2 f N_b}{8\pi \sigma_x^* \sigma_y^*} \right) \frac{2 \cos \frac{\phi}{2}}{\sqrt{\pi} \sigma_s} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-s^2 \Lambda}}{1 + \left(\frac{s}{\beta^*}\right)^2} ds \quad F_{\text{HG}}$$

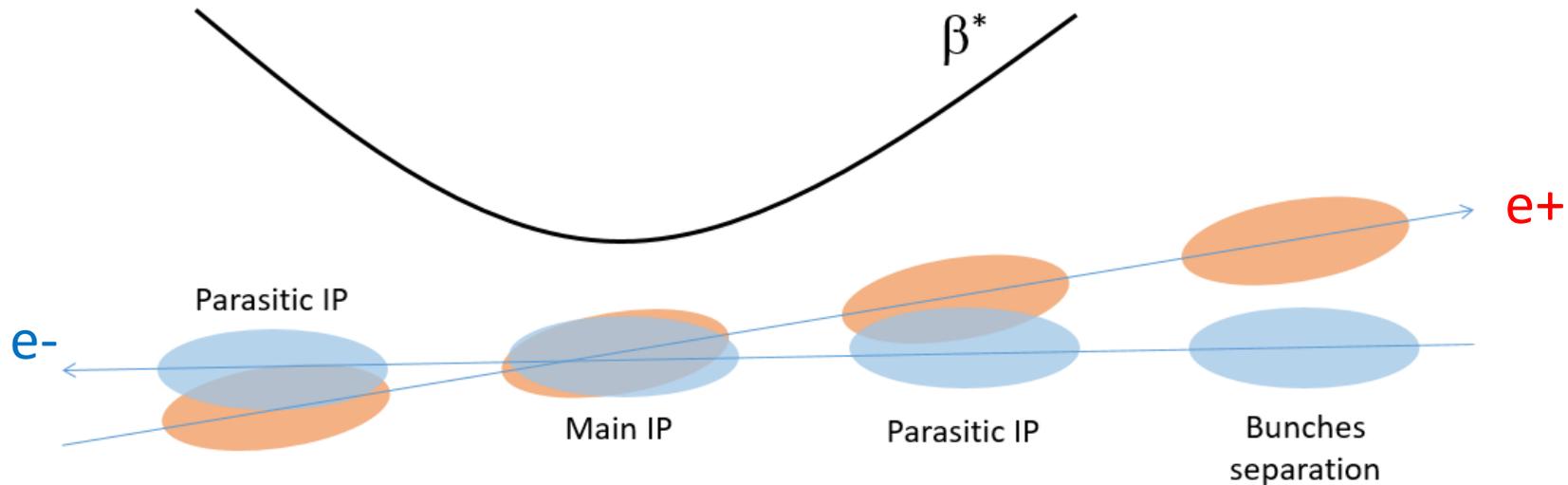
$$F_{\text{HG}} = \max$$

$$\beta_y \approx L_{\text{int}} \approx \sigma_z$$

$$A = \frac{\sin^2 \frac{\phi}{2}}{(\sigma_x^*)^2 [1 + (\frac{s}{\beta^*})^2]} + \frac{\cos^2 \frac{\phi}{2}}{\sigma_s^2}.$$

# «Паразитные» места встречи

Если сгустков  $e^+$  и  $e^-$  много, они, двигаясь вдоль одной орбиты, будут встречаться не только в центре детектора (Main IP), но и в других местах, увеличивая нежелательное действие нелинейной силы.



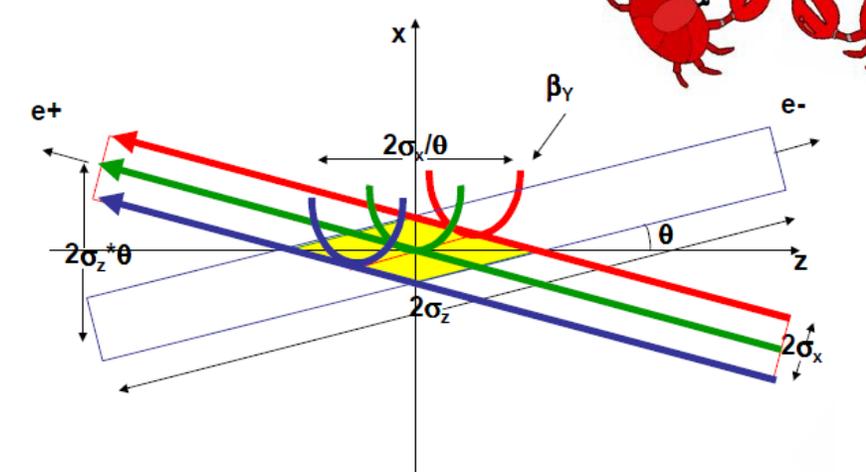
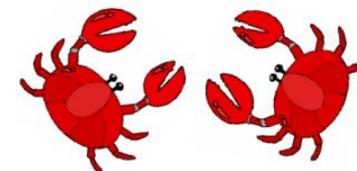
Рецепт: развести пучки по разным орбитам → встреча под углом → два отдельных кольца для  $e^+$  и  $e^-$ .

Проблема: встреча под углом порождает большое число резонансов связи (бетатронных и синхробетатронных)

# Crab Waist collision (преимущества)

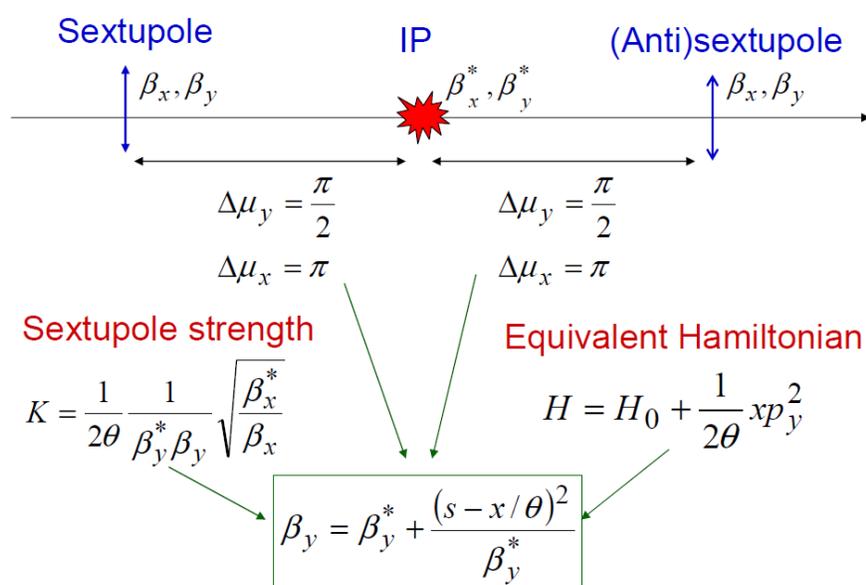
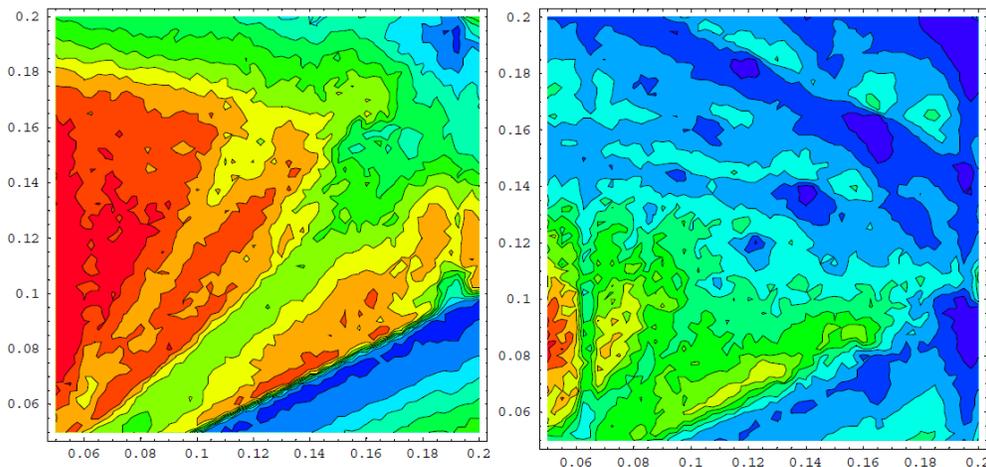
CW – схема встречи плоских пучков, предложенная в 2006 г. П.Раймонди. Позволяет увеличить светимость в  $\sim 10$ -100 раз не увеличивая интенсивности пучков и не уменьшая длины сгустка.

- Большой угол пересечения  $\sim 30 \div 100$  мрад (+ нет проблем с паразитными местами встречи)
- Малая область пересечения  $\rightarrow$  малая  $\beta_y \approx 0.3 \div 1$  мм  $\ll \sigma_z$
- «Крбовые» секступоли разворачивают перетяжку пучков в точке встречи и подавляют резонансы связи.



Crab On

Crab Off



Raimondi P. Status of the SuperB effort, 2nd SuperB Workshop, LNF, Frascati, March 2006; Raimondi P. et al. LNF-07/003 (IR) 2007, Zobov M. et al. Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 174801.

# CW vs head-on



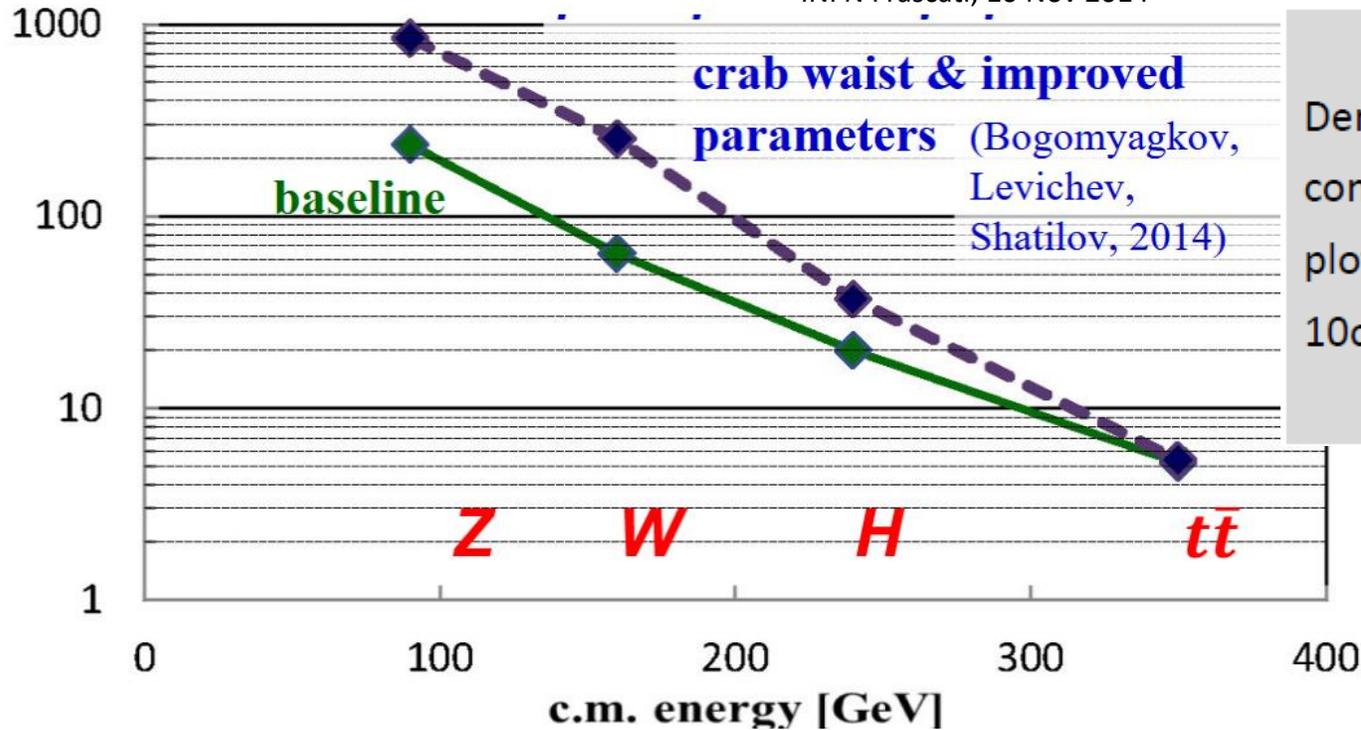
FCC-ee luminosity vs energy



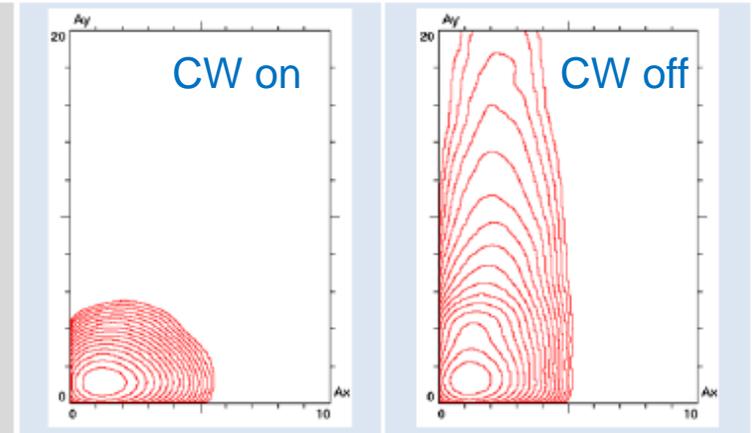
luminosity [ $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ]

F Zimmermann, DAFNE test facility,  
INFN Frascati, 10 Nov 2014

$E_b = 45.5 \text{ ГэВ}$



Density  
contour  
plots  
 $10\sigma_x \times 20\sigma_y$



На порядок большая светимость на Z определила то, что вариант коллайдера со схемой встречи CW был принят базовым для FCC-ee.

Однако есть ложка дегтя...

# Crab Waist collision (проблемы)

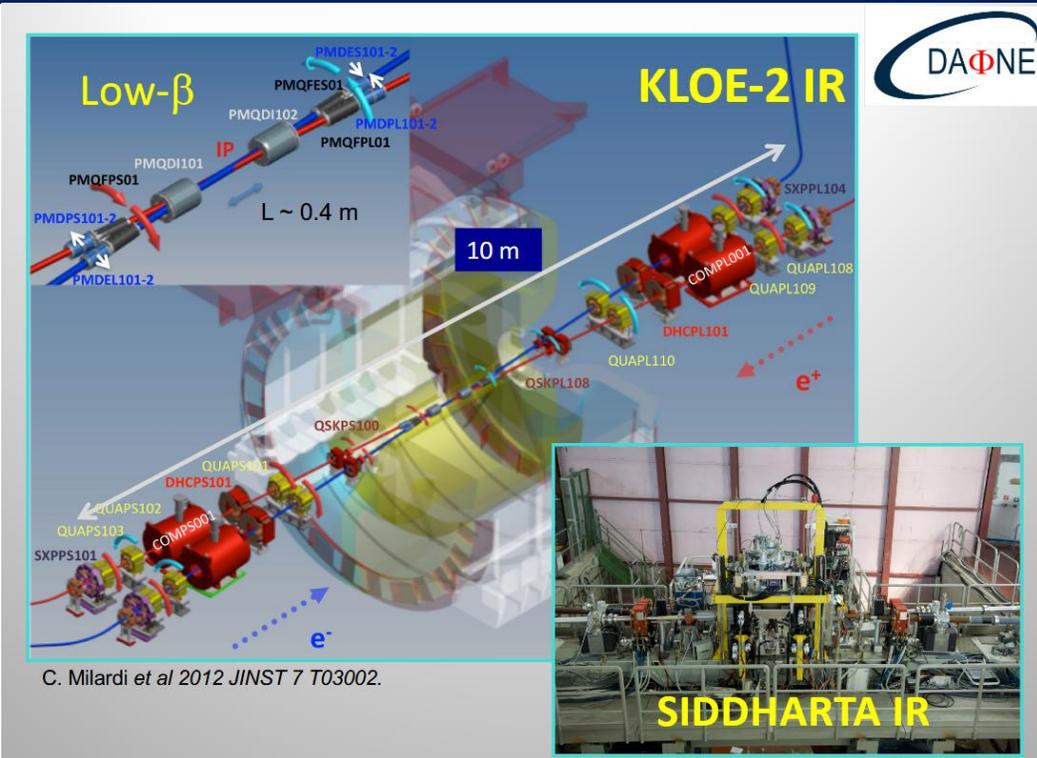
- Малая бета в IP – кинематические нелинейности.
- Сильные «крабовые» секступоли.
- Локальная коррекция большого хроматизма сильными секступолями.
- Малый эмиттанс → жесткая фокусировка → большой хроматизм, сильные секступоли в арках.



Многочисленные нелинейности приводят к серьезным проблемам с динамической апертурой.

- Малая бета в IP – сильные сверхпроводящие линзы финального фокуса приходится размещать как можно ближе к точке встречи глубоко внутри детектора. Конструкция супер-компактная, сложная, фоны и т.д.

# Crab Waist collision (DAPHNE)



Parameter	KLOE	FINUDA	SIDDHARTA
Date	September 2005	April 2007	June 2009
Luminosity ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	$1.53 \times 10^{32}$	$1.60 \times 10^{32}$	$4.53 \times 10^{32}$
$e^-$ current (A)	1.38	1.50	1.52
$e^+$ current (A)	1.18	1.10	1.00
Number of bunches	111	106	105
$\epsilon_x$ (mm mrad)	0.34	0.34	0.25
$\beta_x$ (m)	1.5	2.0	0.25
$\beta_y$ (cm)	1.8	1.9	0.93
Bunch length, $\sigma_z$ (cm)	1.5–2.0	1.5–2.0	1.5–2.0
Crossing angle (mrad)	$2 \times 12.5$	$2 \times 12.5$	$2 \times 25$
$\xi_y$	0.025	0.029	0.044

- Большой угол пересечения ✓
- «Крабовое» преобразование ✓
- Малая область пересечения ✗
- Малая бета<sub>y</sub>\* ✗

SW подавил  $b\bar{b}$ -резонансы связи и позволил увеличить светимость в  $\approx 3$  раза.

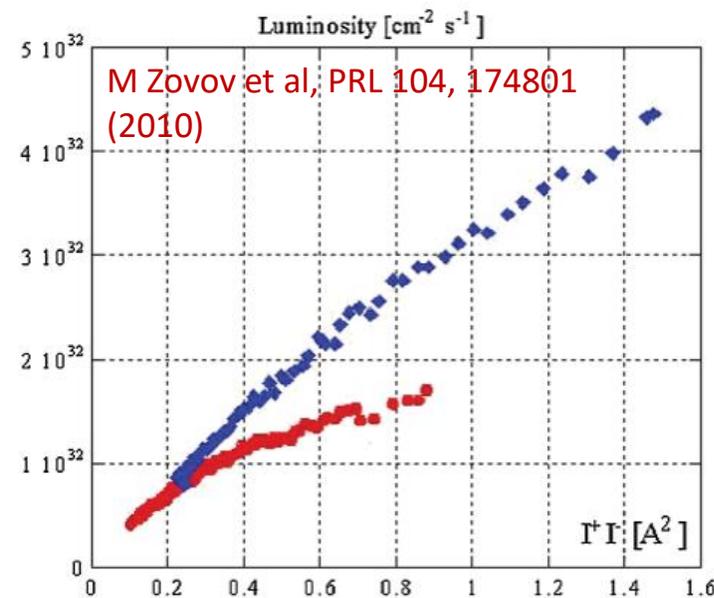


FIG. 4 (color). Measured luminosity as a function of beam current product for crab sextupoles on (blue) and off (red).

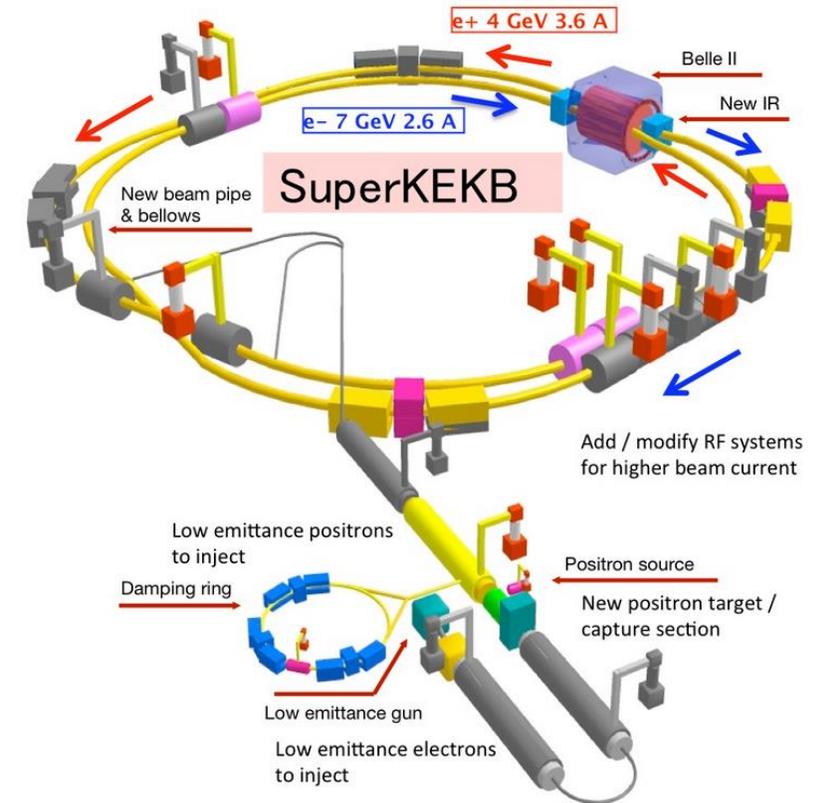
# Super KEKB

## Проект

2017/September/1	LER	HER	unit
E	4.000	7.007	GeV
I	3.6	2.6	A
Number of bunches	2,500		
Bunch Current	1.44	1.04	mA
Circumference	3,016.315		m
$\epsilon_x/\epsilon_y$	3.2(1.9)/8.64(2.8)	4.6(4.4)/12.9(1.5)	nm/pm
Coupling	0.27	0.28	
$\beta_x^*/\beta_y^*$	32/0.27	25/0.30	mm
Crossing angle	83		mrad
$\alpha_p$	$3.20 \times 10^{-4}$	$4.55 \times 10^{-4}$	
$\sigma_\delta$	$7.92(7.53) \times 10^{-4}$	$6.37(6.30) \times 10^{-4}$	
$V_c$	9.4	15.0	MV
$\sigma_z$	6(4.7)	5(4.9)	mm
$v_s$	-0.0245	-0.0280	
$v_x/v_y$	44.53/46.57	45.53/43.57	
$U_0$	1.76	2.43	MeV
$T_{x,y}/T_s$	45.7/22.8	58.0/29.0	msec
$\xi_x/\xi_y$	0.0028/0.0881	0.0012/0.0807	
Luminosity	$8 \times 10^{35}$		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

## Достигнуто

	December 27, 2024	
Ring	LER	HER
Emittance	4.0	4.6
Beam Current	1632	1259
Number of bunches	2346	
Bunch current	0.696	0.537
Horizontal size $\sigma_x^*$	15.5	16.6
Vertical cap sigma $\Sigma_y^*$	0.375	
Vertical size $\sigma_y^*$	0.265	
Betatron tunes $\nu_x / \nu_y$	44.525 / 46.589	45.531 / 43.599
$\beta_x^* / \beta_y^*$	<b>60 / 1.0</b>	<b>60 / 1.0</b>
$\sigma_z$	4.6 (6.0*)	5.1 (6.1*)
Piwinski angle	<b>12.3</b>	<b>12.7</b>
Crab waist ratio	80	60
Beam-Beam $\xi_y$	0.036	0.027
Specific luminosity	$5.8 \times 10^{31}$	
Luminosity	<b><math>5.1 \times 10^{34}</math></b>	



Февраль 2016 – первый пучок, март 2018 – начало работ с недоукомплектованным детектором Belle II, март 2019 – с полным детектором.

Достижения 2024 (проект):  $\beta_y^* = 1$  мм (0.3 мм),  $\xi_y = 0.036$  (0.09),  $I_{\max} = 1.63$  A (3.6 A),  $L = 5.1 \times 10^{34}$  ( $8 \times 10^{35}$ )  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Из причин, которые пока не объяснены: рост эмиттанса с током, малая  $\xi_y$ , маленькая динамическая апертура и, как следствие, низкое время жизни пучка.

# Super KEKB

2024 Version

## ~~Five~~ Big Issues (SBI) Six

### 1. Injection and Touschek background

Dynamic Aperture  
with sextupole optimization  
Low emittance of injected beam

CW and IR sextupoles  
Background due to injection

### 2. SR from QC1/QC2

+ Dipole magnet in the arc section  
→ Beam pipe deformation → Quad. movement with BPM  
→ Orbit deviation at sextupoles → Optics degradation

### 3. Collimator

Precise control of collimator head  
Usage of nonlinear collimator  
Impedance

→ Detector background,  
Quenches of FF quads

### 4. Machine error and optics correction

How to manage orbit  
at sextupoles  
Understanding of IR optics

→ FF and IR arrangement

### 5. Beam-Beam interaction (inc. continuous injection, iBump FB)

Synchro-beta and betatron resonance  
Beta squeezing at IP  
Beam-Beam blowup

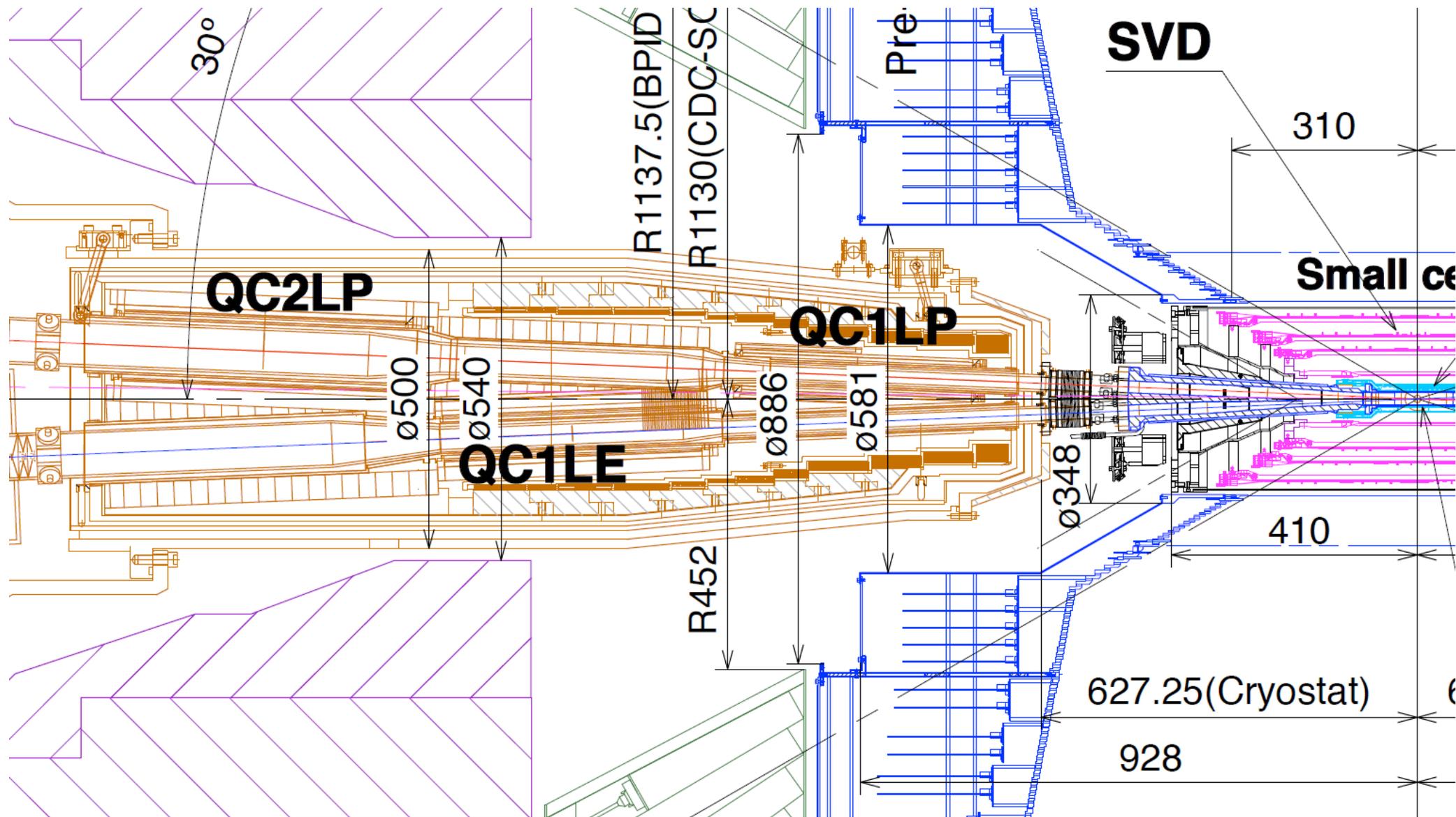
→ Single bunch BB, FF  
arrangement for beta-  
squeezing

### 6. SBL

Remove of "VACSEAL" is enough ?

Значительная доля проблем связана с CW-встречей (BB), конструкцией финального фокуса и промежутка встречи, где размещаются сильные «крабовые» секступоли и секступоли секций коррекции хроматизма

# Super KEKB MDI



# Особенности e+e- коллайдеров высокой энергии

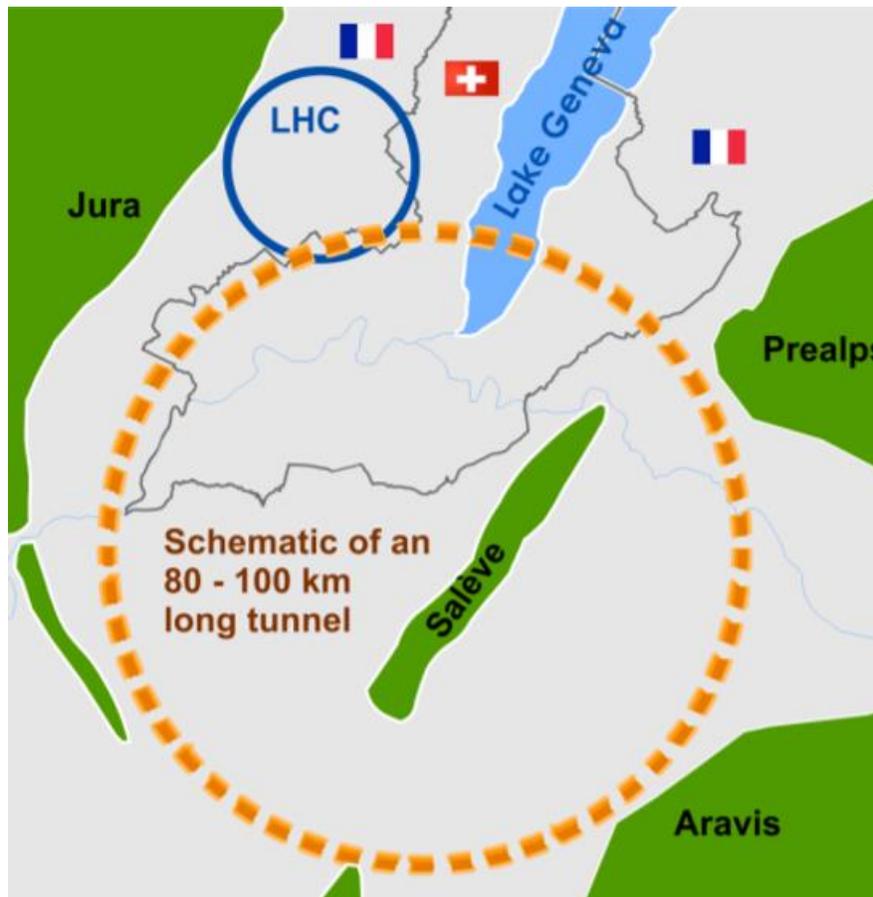
СИ (ограничение по мощности, приемлемые энергетический разброс и эмиттанс и т.д.) → огромные размеры

СИ → новые типы ограничений и неустойчивостей (beamstrahlung, излучение из квадруполов и т.д.)

СИ → технические проблемы (мощная и дорогая сверхпроводящая ВЧ-система, фон детектора, модуляция магнитного поля вдоль орбиты, рад.нагрузка на элементы и т.д.).

Все проекты e+e- коллайдеров будущего на сверхвысокую энергию используют CW-встречу для увеличения светимости → борьба за динамическую апертуру, очень сложный финальный фокус и промежуток встречи. Магнитная структура с малым эмиттансом – проблемы современных источников СИ, но в масштабе  $\times 100$  (100 км против 1 км).

# FCC-ee



Parameter	Z	WW	H (ZH)	ttbar
beam energy [GeV]	45	80	120	182.5
beam current [mA]	1280	135	26.7	5.0
number bunches/beam	10000	880	248	36
bunch intensity [ $10^{11}$ ]	2.43	2.91	2.04	2.64
SR energy loss / turn [GeV]	0.0391	0.37	1.869	10.0
total RF voltage 400/800 MHz [GV]	0.120/0	1.0/0	2.08/0	4.0/7.25
long. damping time [turns]	1170	216	64.5	18.5
horizontal beta* [m]	0.1	0.2	0.3	1
vertical beta* [mm]	0.8	1	1	1.6
horizontal geometric emittance [nm]	0.71	2.17	0.64	1.49
vertical geom. emittance [pm]	1.42	4.34	1.29	2.98
horizontal rms IP spot size [ $\mu\text{m}$ ]	8	21	14	39
vertical rms IP spot size [nm]	34	66	36	69
luminosity per IP [ $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	182	19.4	7.3	1.33
total integrated luminosity / year [ $\text{ab}^{-1}/\text{yr}$ ] 4 IPs	87	9.3	3.5	0.65
beam lifetime (rad Bhabha + BS+lattice)	8	18	6	10

4 years  
 $5 \times 10^{12} \text{ Z}$   
 $\text{LEP} \times 10^5$

2 years  
 $> 10^8 \text{ WW}$   
 $\text{LEP} \times 10^4$

3 years  
 $2 \times 10^6 \text{ H}$

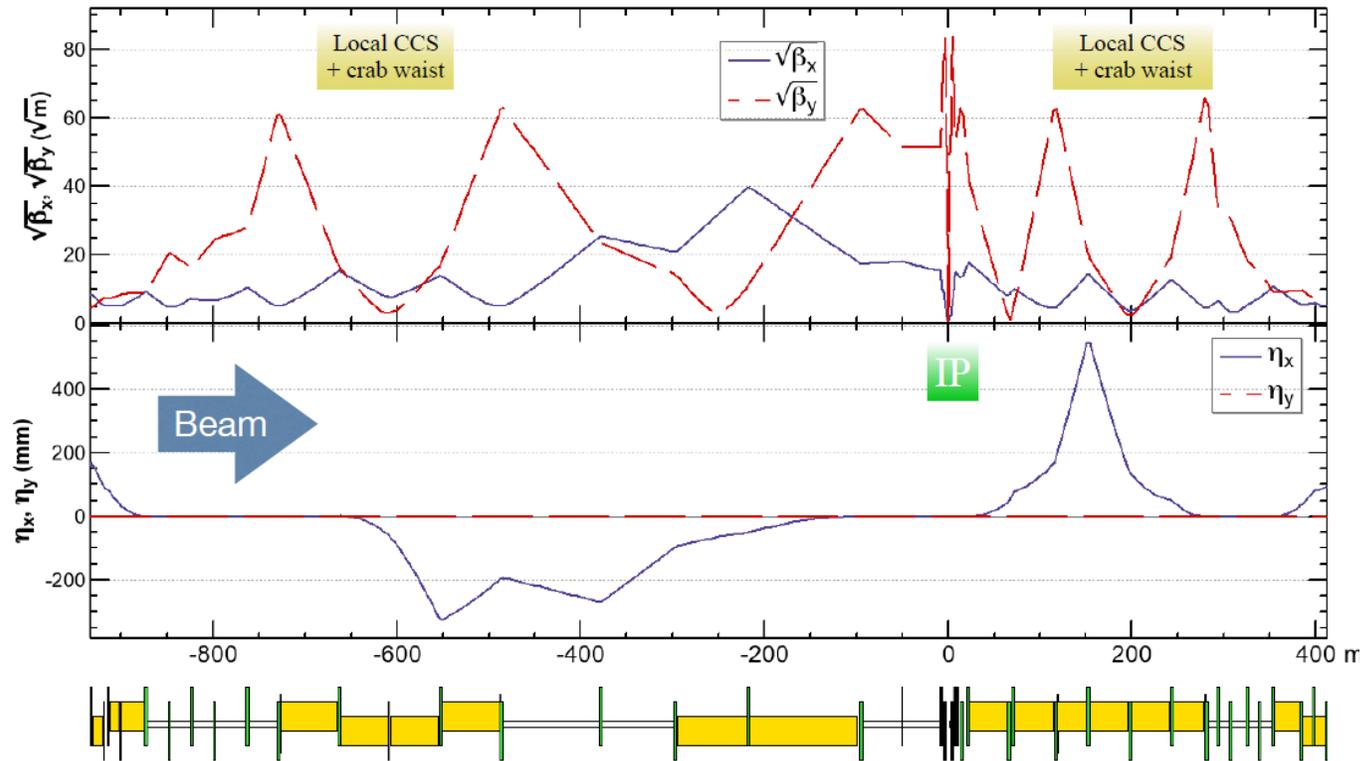
5 years  
 $2 \times 10^6 \text{ tt pairs}$

- x 10-50 improvements on all EW observables
- up to x 10 improvement on Higgs coupling (model-indep.) measurements over HL-LHC
- x10 Belle II statistics for b, c,  $\tau$
- indirect discovery potential up to  $\sim 70 \text{ TeV}$
- direct discovery potential for feebly-interacting particles over 5-100 GeV mass range

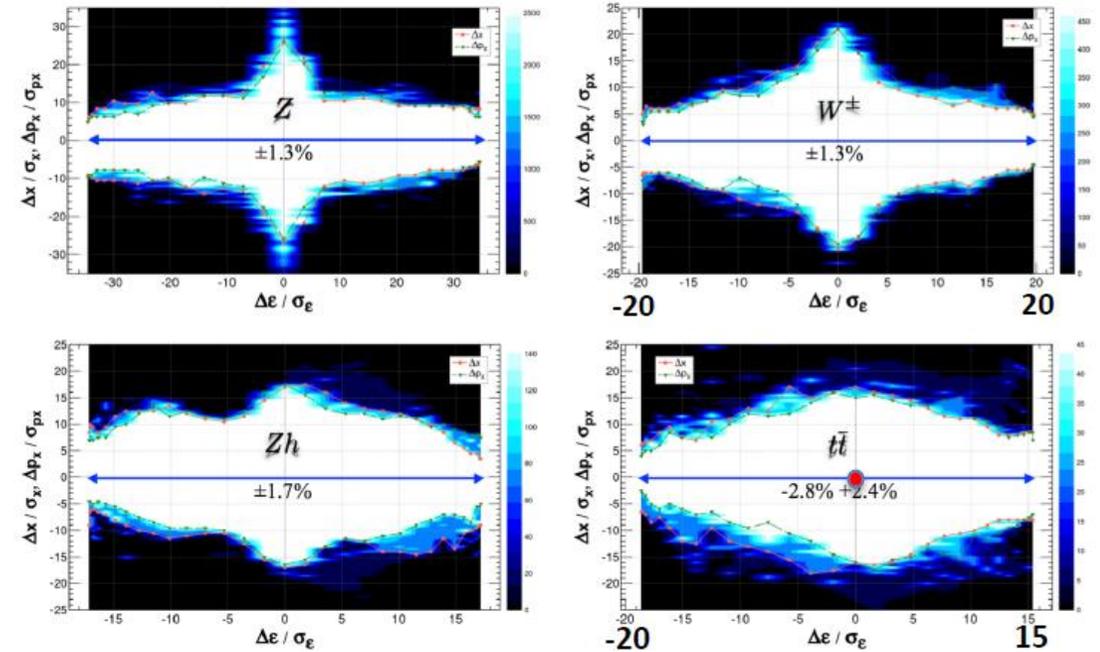
Up to 4 interaction points  $\rightarrow$  robustness, statistics, possibility of specialised detectors to maximise physics output

2 кольца (90.7 км). 2 (4) места встречи. CW-метод встречи. Ограничение – не больше 50 МВт потери на СИ в каждом кольце.

# FCC-ee optics and dynamics



FCC-ee optical functions close to IP.  
Maximum  $\beta_y \approx 7.5$  km !

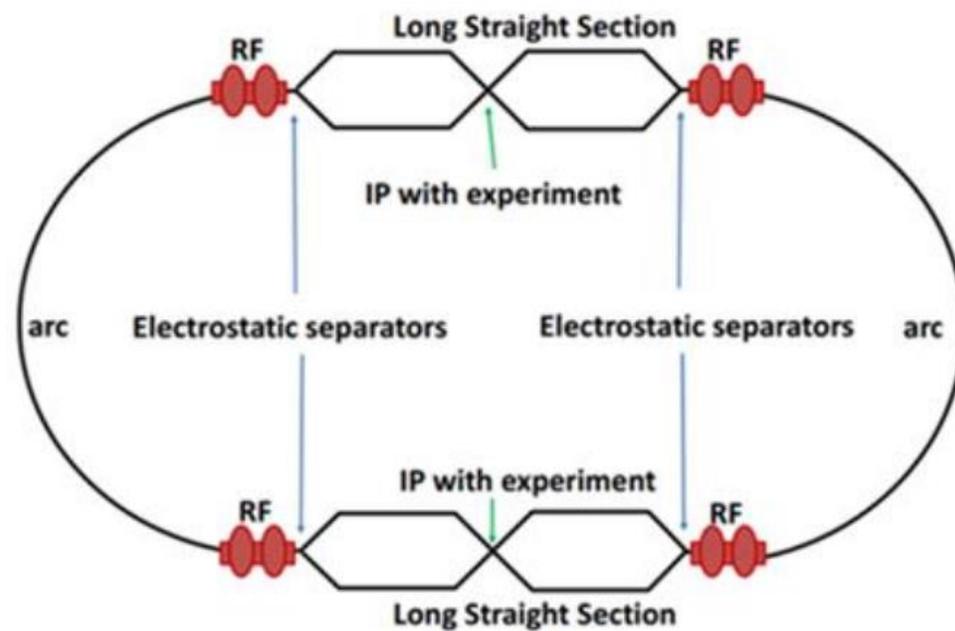


Dynamic aperture and dynamic momentum acceptance is a serious problem for future colliders

# CEPC начальный

Первый вариант – Partial Double Ring – быстро, дешево, выгодно (2015)

	Pre-CDR	H-high lumi.	H-low power	W	Z
Number of IPs	2	2	2	2	2
Energy (GeV)	120	120	120	80	45.5
Circumference (km)	54	54	54	54	54
SR loss/turn (GeV)	3.1	2.96	2.96	0.59	0.062
Half crossing angle (mrad)	0	15	15	15	15
Piwinski angle	0	2.5	2.6	5	7.6
Ne/bunch ( $10^{11}$ )	3.79	2.85	2.67	0.74	0.46
Bunch number	50	67	44	400	1100
Beam current (mA)	16.6	16.9	10.5	26.2	45.4
SR power /beam (MW)	51.7	50	31.2	15.6	2.8
Bending radius (km)	6.1	6.2	6.2	6.1	6.1
Momentum compaction ( $10^{-5}$ )	3.4	2.5	2.2	2.4	3.5
$\beta_{IP\ x/y}$ (m)	0.8/0.0012	0.25/0.00136	0.268 /0.00124	0.1/0.001	0.1/0.001
Emittance x/y (nm)	6.12/0.018	2.45/0.0074	2.06 /0.0062	1.02/0.003	0.62/0.0028
$\xi_y/IP$	0.083	0.11	0.11	0.074	0.073
Energy spread (%)	0.13	0.13	0.13	0.09	0.05
$L_{mrr}/IP$ ( $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	2.04	2.96	2.01	3.09	3.09



CEPC partial double ring scheme.

# СЕРС сейчас



	Higgs	Z	W	$t\bar{t}$
Number of IPs	2			
Circumference (km)	100.0			
SR power per beam (MW)	50			
Half crossing angle at IP (mrad)	16.5			
Bending radius (km)	10.7			
Energy (GeV)	120	45.5	80	180
Energy loss per turn (GeV)	1.8	0.037	0.357	9.1
Damping time $\tau_x/\tau_y/\tau_z$ (ms)	44.6/44.6/22.3	816/816/408	150/150/75	13.2/13.2/6.6
Piwinski angle	4.88	29.52	5.98	1.23
Bunch number	446	13104	2162	58
Bunch spacing (ns)	355 (53% gap)	23 (10% gap)	154	2714 (53% gap)
Bunch population ( $10^{11}$ )	1.3	2.14	1.35	2.0
Beam current (mA)	27.8	1340.9	140.2	5.5
Momentum compaction ( $10^{-5}$ )	0.71	1.43	1.43	0.71
Beta functions at IP $\beta_x^*/\beta_y^*$ (m/mm)	0.3/1	0.13/0.9	0.21/1	1.04/2.7
Emittance $\epsilon_x/\epsilon_y$ (nm/pm)	0.64/1.3	0.27/1.4	0.87/1.7	1.4/4.7
Betatron tune $\nu_x/\nu_y$	445/445	266/267	266/266	445/445
Beam size at IP $\sigma_x/\sigma_y$ (um/nm)	14/36	6/35	13/42	39/113
Bunch length (natural/total) (mm)	2.3/4.1	2.7/10.6	2.5/4.9	2.2/2.9
Energy spread (natural/total) (%)	0.10/0.17	0.04/0.15	0.07/0.14	0.15/0.20
Energy acceptance (DA/RF) (%)	1.6/2.2	1.3/1.5	1.2/2.5	2.0/2.6
Beam-beam parameters $\xi_x/\xi_y$	0.015/0.11	0.0045/0.13	0.012/0.113	0.071/0.1
RF voltage (GV)	2.2	0.1	0.7	10
RF frequency (MHz)	650			
Longitudinal tune $\nu_z$	0.049	0.032	0.062	0.078
Beam lifetime (Bhabha/beamstrahlung) (min)	39/40	86/400	60/700	81/23
Beam lifetime (min)	20	71	55	18
Hourglass Factor	0.9	0.97	0.9	0.89
Luminosity per IP ( $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	8.3	192	26.7	0.8

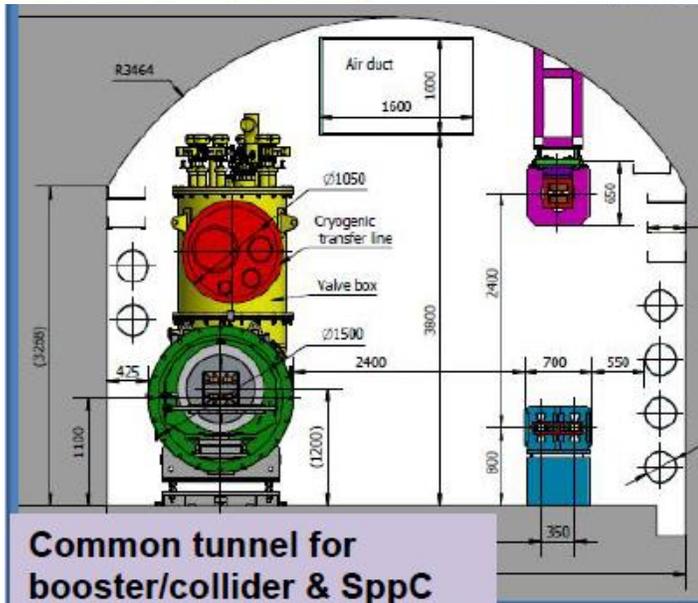
FCC-ee

7.3

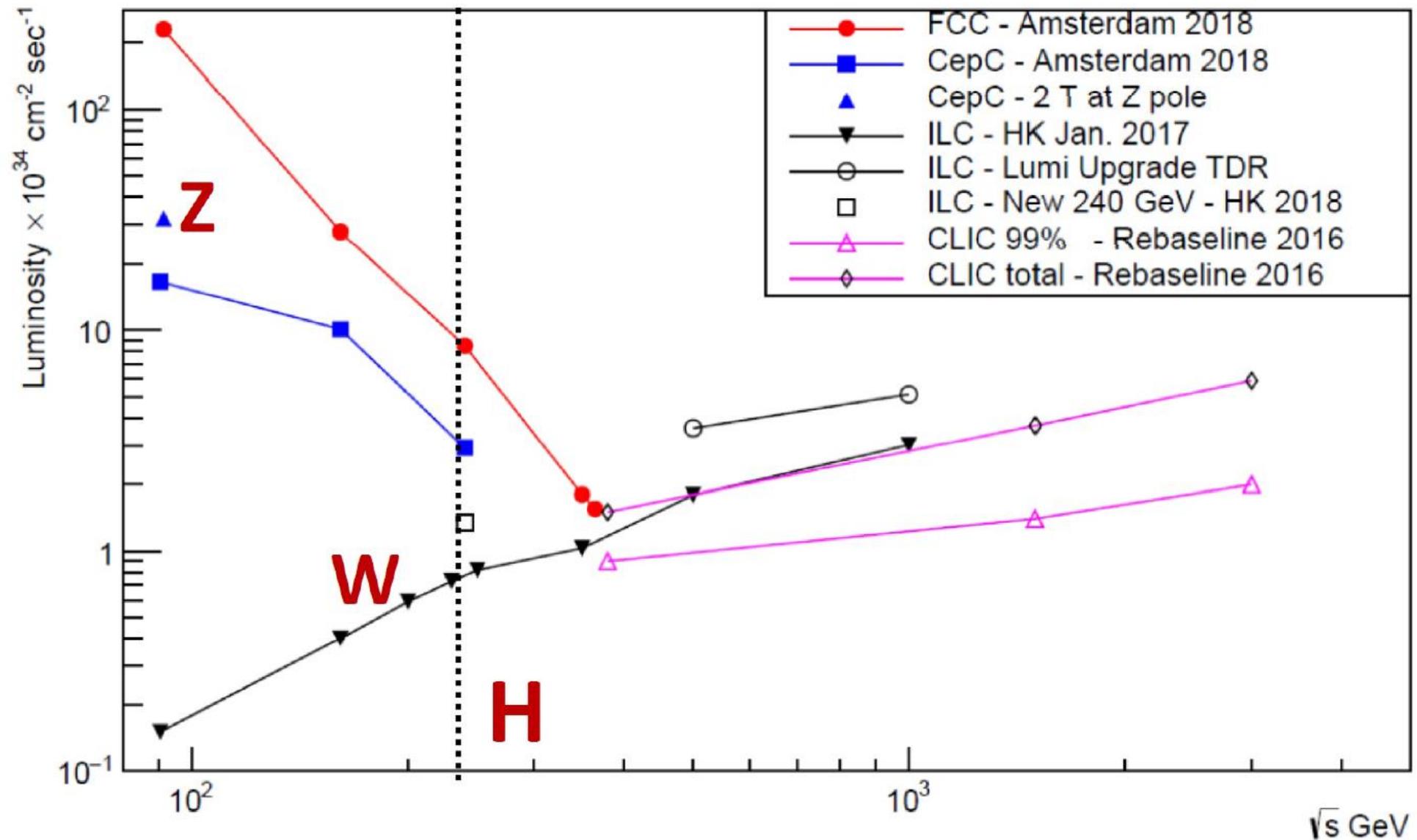
182

19.4

1.33



# Lepton colliders



# Гигасайнс в России? Z-фабрика в Протвино

По опыту СКИФ, строительная и инженерная инфраструктура – это очень долго и дорого. Использовать готовую – огромный выигрыш!

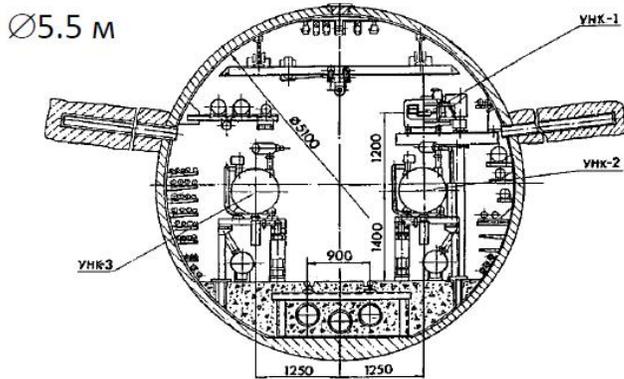
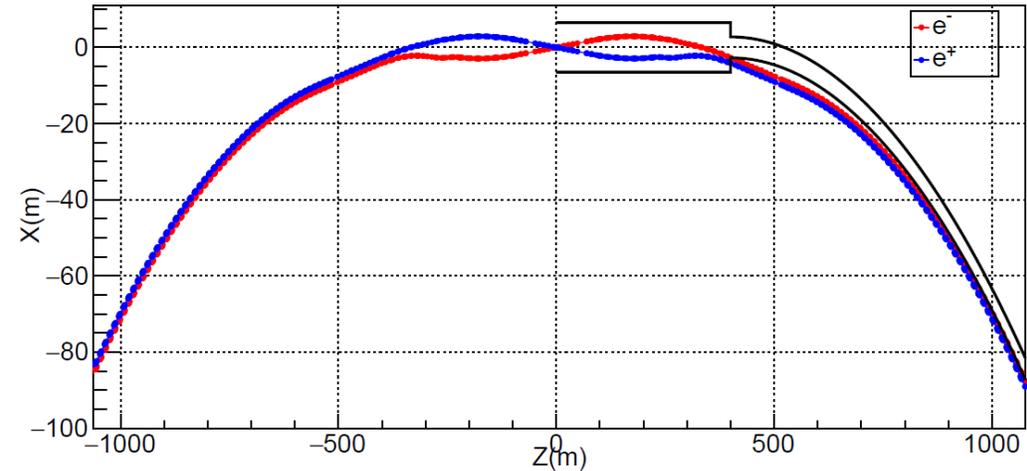


Рис. 2.2. Поперечное сечение тоннеля УНК.



# Z-фабрика в Протвино

Parameter	LEP	FCC-ee	CEPC	ZUNK	ZUNK	ZUNK
Beam energy (GeV)	45.6	45.6	45.6	45.6	80	120
Circumference (km)	26.7	91.1	100	20.8	20.8	20.8
Beam current (mA)	2.6	1280	803	232	24.5	4.6
Bunch No	12	10000	11951	332	20	4
Bunch intensity ( $10^{11}$ )	1.8	2.43	1.4	3	5	5
SR energy loss/turn (MeV)	120	39.1	37	216	2000	10400
RF voltage (MV)	240	120	120	250	2250	10900
Bunch length (mm)	8.6	12	8.7	11	7	6
Horizontal beta* (m)	2	0.1	0.13	0.15	0.15	0.15
Vertical beta* (mm)	50	0.8	0.9	1	2	3
Horizontal emittance (nm)	20	0.71	0.27	4	12	28
Vertical emittance (pm)	400	1.42	1.4	40	122	275
Horizontal spot size* ( $\mu\text{m}$ )	224	8	6	24.4	42	64
Vertical spot size* ( $\mu\text{m}$ )	4.5	0.034	0.035	0.2	0.5	0.9
Long.damping time (turns)	371	1170	340	211	40	11.6
Beam-beam parameter	0.044	0.12	0.127	0.06	0.04	0.02
Luminosity/IP ( $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	0.002	182	115	11.5	1	0.09



Ограничение: не больше 50 МВт СИ из одного кольца.

Возможен partial CW: 2 кольца на протяжении 500 м, сливающиеся в одно электростатическими сепараторами

# План «В» для ЦЕРН

## A Possible Future Use of the LHC Tunnel\*

Marco Drewes<sup>†a</sup>, Elena Shaposhnikova<sup>‡b</sup>, and Mikhail Shaposhnikov<sup>§c</sup>

<sup>a</sup>Centre for Cosmology, Particle Physics, and Phenomenology,  
Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve B-1348, Belgium

<sup>b</sup>CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland

<sup>c</sup>Institute of Physics, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland

### Abstract

The FCC program at CERN provides an attractive all-in-one solution to address many of the key questions in particle physics. While we fully support the efforts towards this ambitious path, we believe that it is important to prepare a mitigation strategy in case the program faces unexpected obstacles for geopolitical or other reasons. This approach could be based on two components: I) a circular electron-positron collider in the LHC tunnel that operates at the Z-pole energy of 45.6 GeV and II) a high-energy electron-positron linear collider which acts as a Higgs, top quark and W-boson factory, and that can further be extended to TeV energies. The former could reach a high luminosity that is not accessible at a linear collider, the latter could probe the high energy regime with higher sensitivity and discovery potential than LEP3. The program should be flanked

## 3 A Plan B for particle physics?

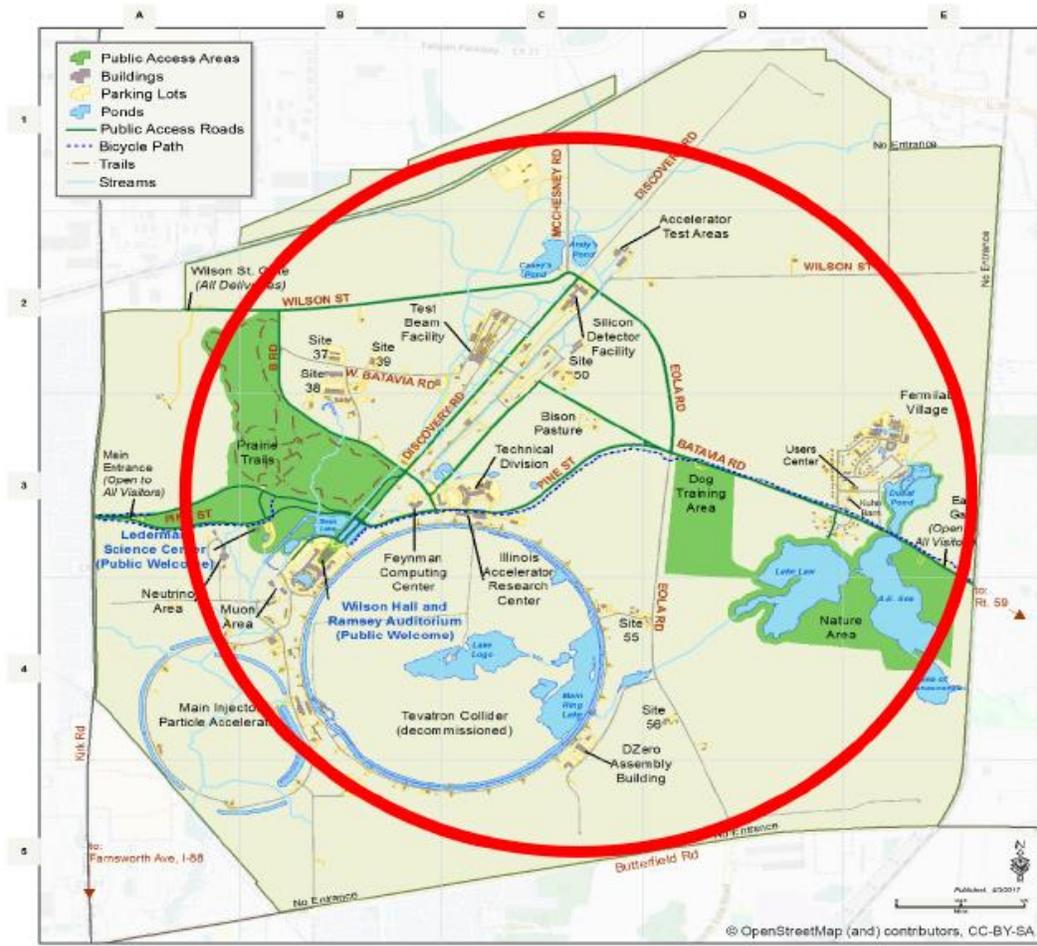
While the scientific excellence of these programs is beyond doubt and, presumably, this Plan A has the support of a large fraction of high energy physicists, some risks have been pointed out in discussions within both the scientific community and the public. One challenge concerns the long time scales on which these projects are expected to be completed. Another potential risk lies in the availability of funding for these multi-billion euro projects. Given the current geopolitical situation, we believe it is advisable for the community to explore all possible avenues for discovery and to have a Plan B in case the favourite option faces major obstacles.

Our primary focus is on an experimental program that aims at the discovery of new elementary particles as well as studies of the Higgs boson and the top quark. We consider below a potential mitigation strategy, in case Plan A faces major obstacles, with the following criteria in mind: A) *Timeliness*: flagship projects can be realised within a time frame that enables discoveries as early as possible and permits once junior scientists to work on real data before they retire, B) *Sustainability*: use the existing infrastructure as much as possible, C) *Feasibility*: proposals should be based on designs with studied and confirmed feasibility, and D) *Risk reduction*: implementing key parts of the program independently at different sites. This approach reduces reliance on individual institutions or governments while also fostering technological diversification in both development and application.

Our proposal includes the following components

- I) *Z-factory*: A circular electron-positron collider that primarily operates at the Z-pole, performing precision tests of the SM and searches for new elementary particles with luminosities not achievable at a linear collider.
- II) *Higgs/top-factory*: A high-energy linear electron-positron collider that overpasses the WW production, acts as a Higgs factory, can reach the  $t\bar{t}$  threshold and can potentially be extended to TeV energies.

# Кольцевой коллайдер (Site Filler)



	Higgs Factory	Z factory
Circumference [km]	16	16
Beam energy [GeV]	120	45.6
Total synchrotron radiation power [MW]	100	60
Beam current [mA]	5.	140
$N$ [ $10^{11}$ ]	8.3	1.67
Number of bunches	2	279
$\beta_x^*$ [m] / $\beta_y^*$	0.2 m / 1 mm	0.2 m / 1 mm
$\epsilon_x / \epsilon_y$ [nm]	21 / 0.05	26.1 / 0.065
$\sigma_z$ [mm]	2.9 (SR)	6.45
beam-beam tune shift per IP	0.075/0.11	0.032 / 0.045
RF frequency [MHz]	650	650
RF voltage [GV]	12	0.24
Momentum acceptance (RF) [%]	$\pm 3$	$\pm 9$
$\tau_{bs}$ [min]	9 - 36	
$\tau_{Bhabha}$ [min]	8.7	37
$\mathcal{L}$ per IP [ $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ]	1.0	6.3
Production cross-section	200 fb	61 nb
Particle production/year	Higgs: 39751	Z: $7.64 \times 10^{10}$

Table 1: Parameters of the 2012 Fermilab  $e^+e^-$  Higgs and Z Factories

# Заключение

Будущее электрон-позитронных коллайдеров – FCC-ee (CERN) и CEPC (Китай). Параметры очень похожи. Вопрос: кто первый стартует? К сожалению, для этого нет никаких намеков ни там, ни там.

Китайские товарищи за 10 лет демонстрируют очень впечатляющий прогресс в деле создания технологий, систем, элементов, устройств, необходимых для реализации CEPC. Недостаток – не развитое международное сотрудничество (по сравнению с ЦЕРН), несмотря на большие усилия.

Намек на некоторый «кризис» – разговоры о «плане В», в качестве которого рассматривается электрон-позитронный коллайдер на меньшую энергию, меньшую (но все еще привлекательную) светимость, использование существующей инфраструктуры и, соответственно, существенно меньших стоимости и сроков реализации (Z-фабрики?).