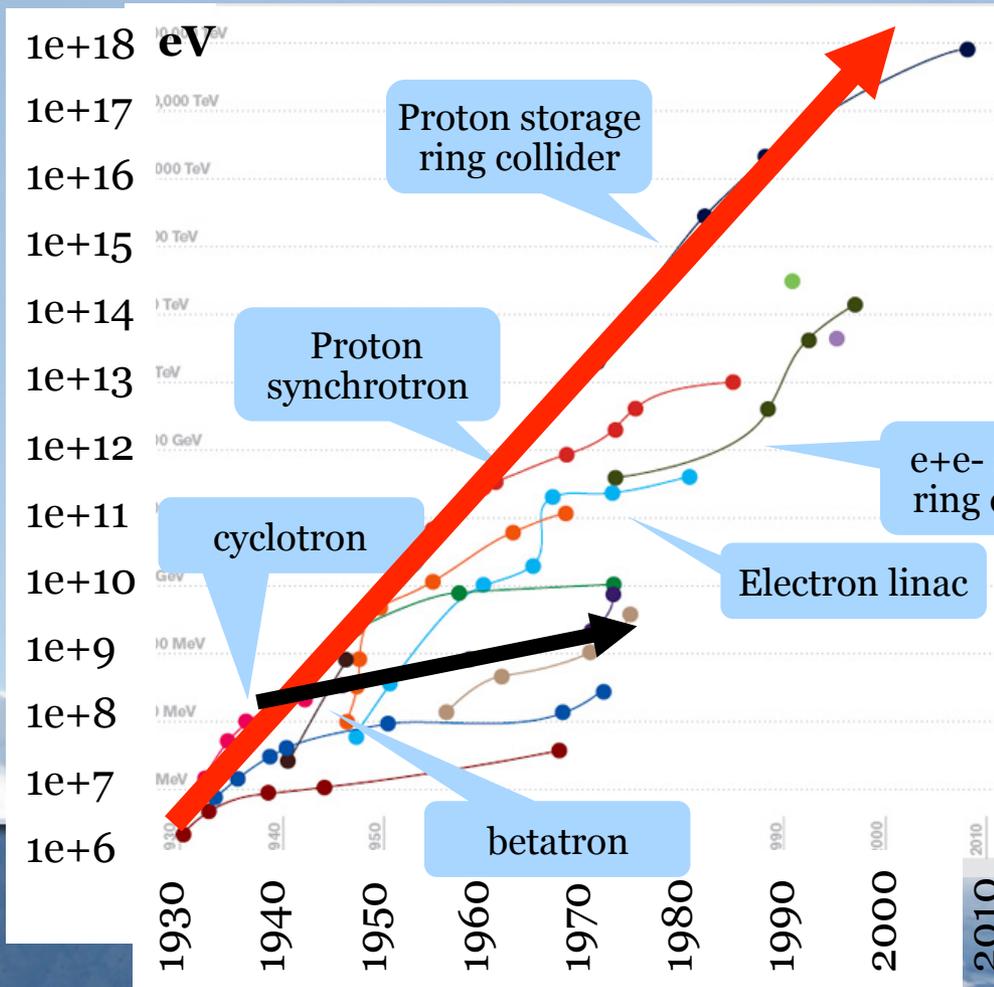


第10回物理学教室談話会
加速器科学の動向と、
国際リニアコライダー計画の位置づけ

2014年11月25日
栗木雅夫(広島大学、先端物質科学研究科)

Livingston Plot : 加速器界のムーアの法則



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

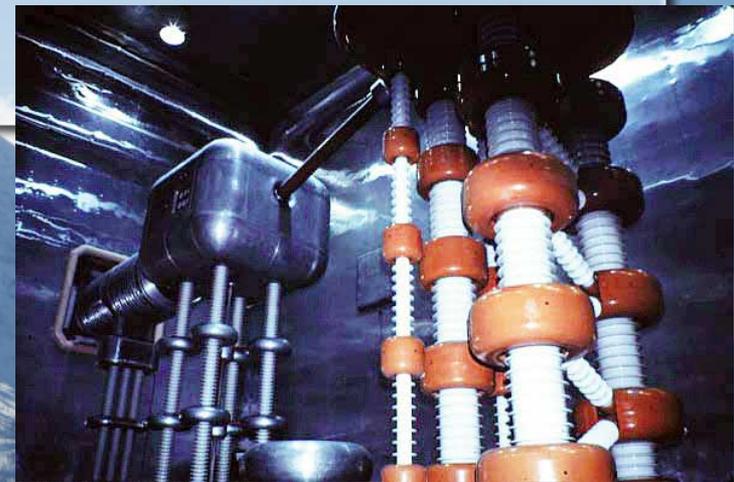
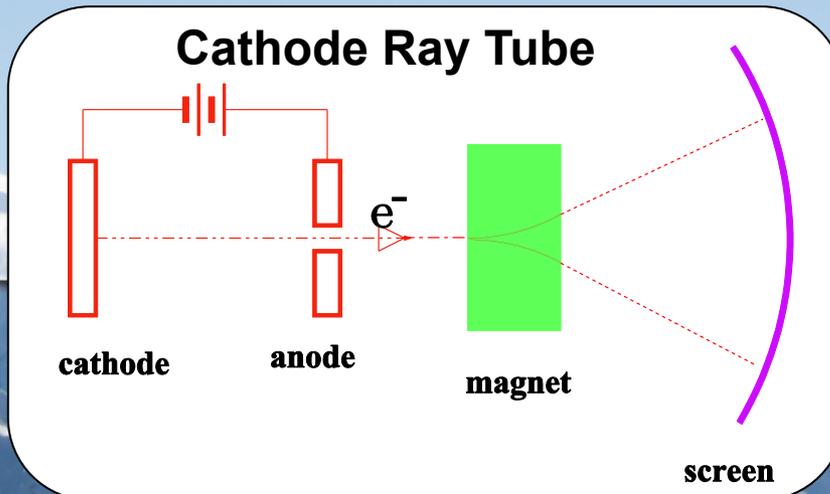
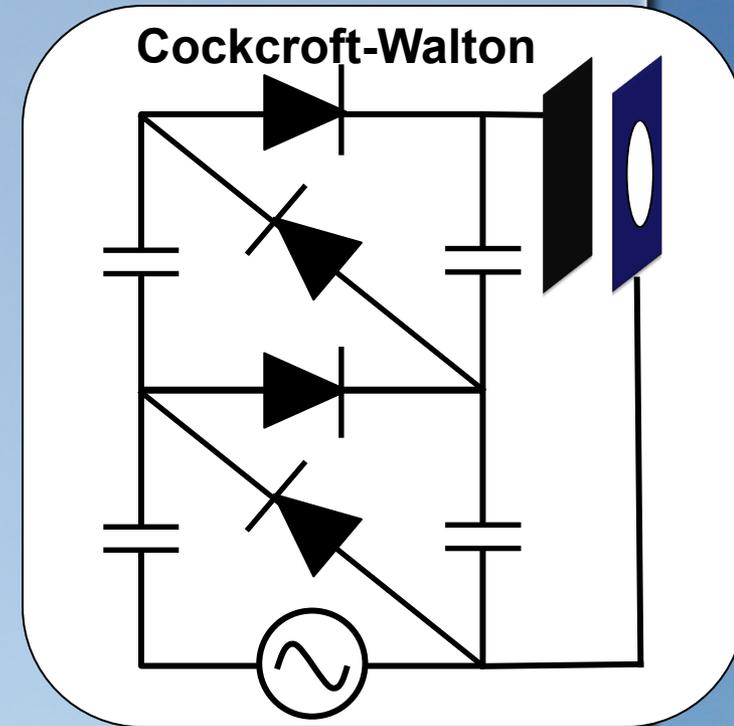
多段ロケット式発展



From Symmetry Magazine

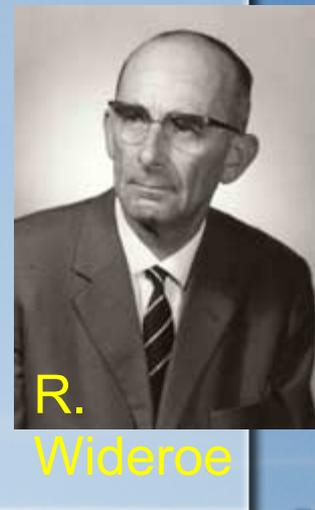
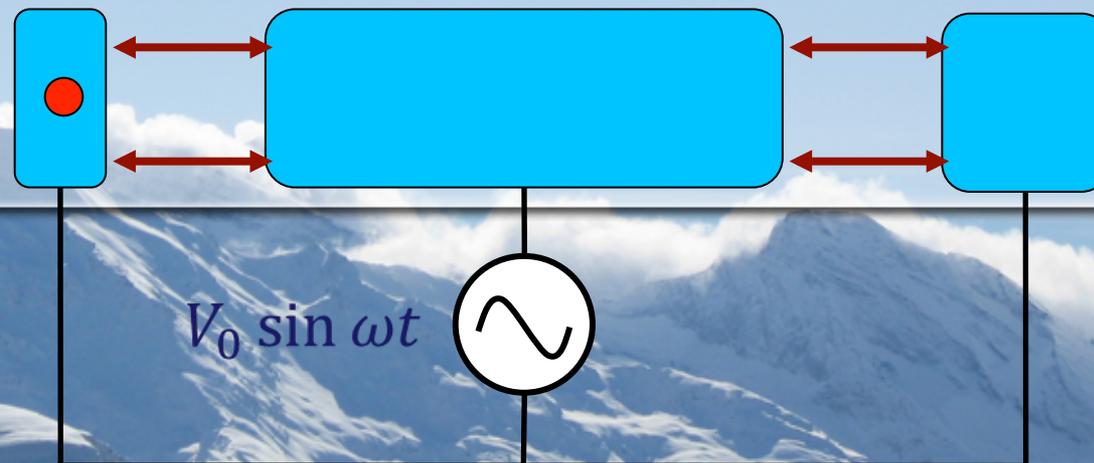
靜電加速器

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



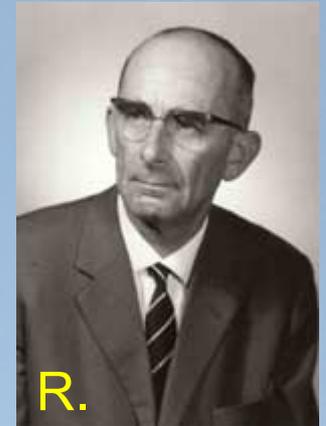
隠れた大発明：RF加速

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

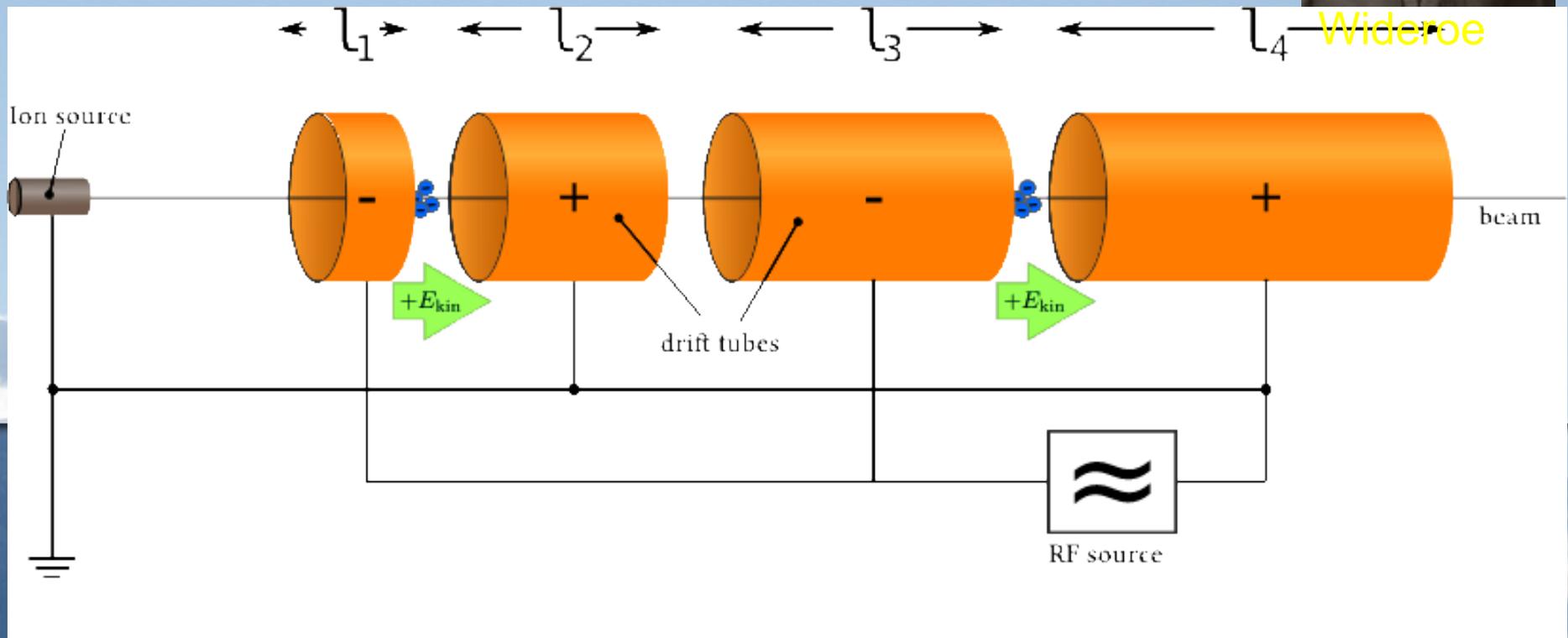


Wideroe-Linac:最初のRF加速器

- 世界初の繰り返し加速可能な加速器。
- 電極毎に反対の極性（位相差180度）の高周波。
- $E_{kin} = eN_{gap}V_{RF}$, $l = v/2f$.

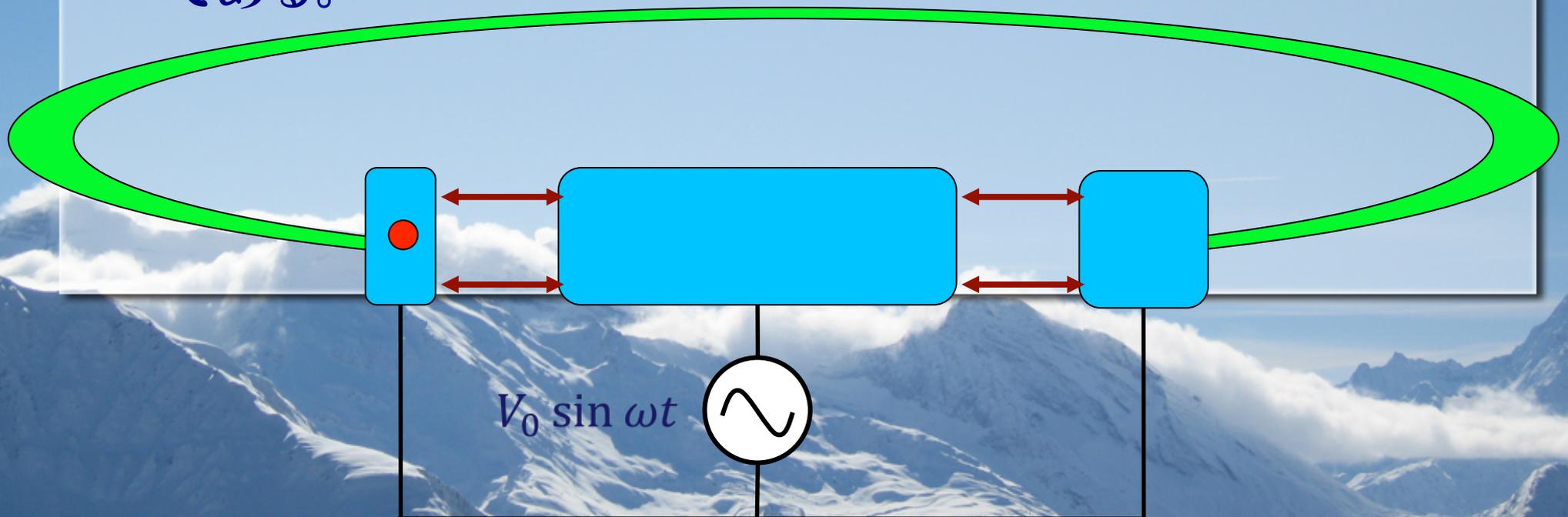


R.
Wideroe



Wideroe is also initiator of Ring accelerator

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



What is Collider?

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

Fixed target



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

Collider

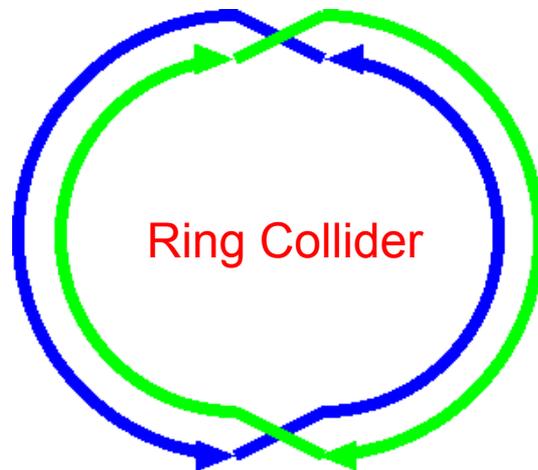
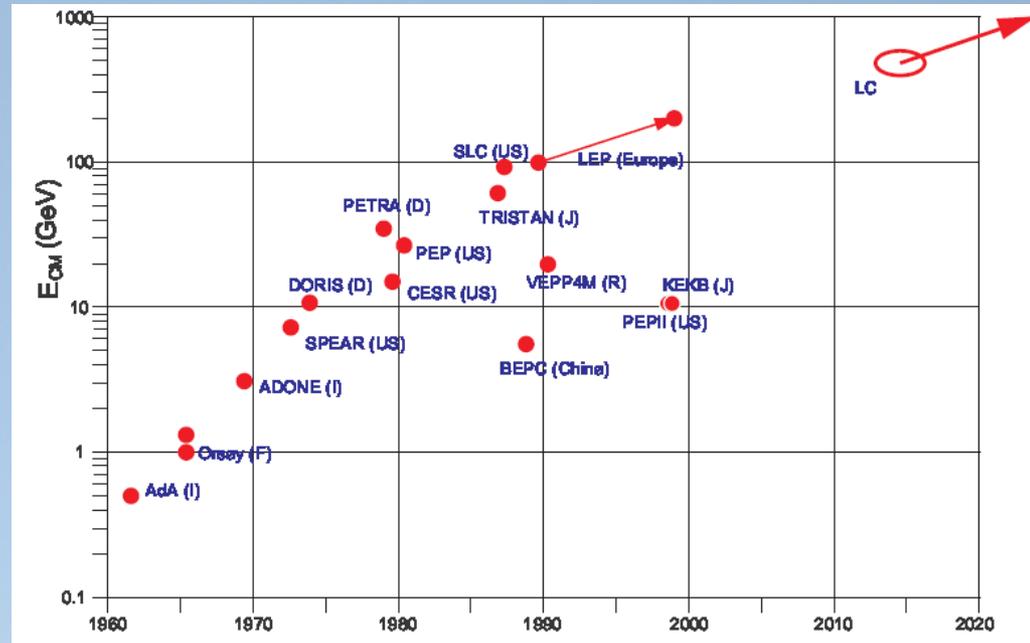


$$E_{CME} = 2E$$

Colliderの歴史

•コライダーの歴史は高エネルギー加速器の歴史。

•ほとんどが円形コライダー。(除くSLC)



Linear Collider



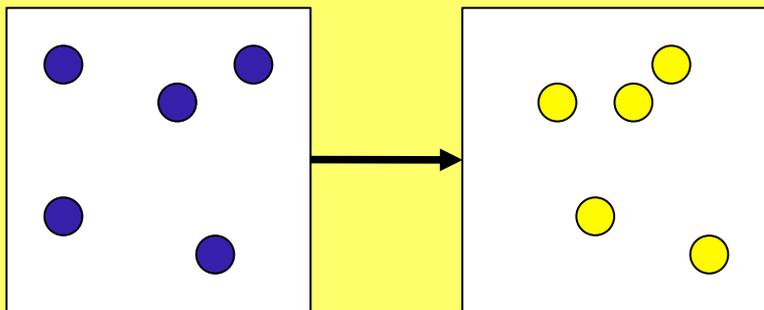
コライダーはLuminosityが命

- 単位時間あたりの反応数 = コライダーの性能

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

L: ルミノシティ。行き違う粒子の密度レート。工夫の余地あり。

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



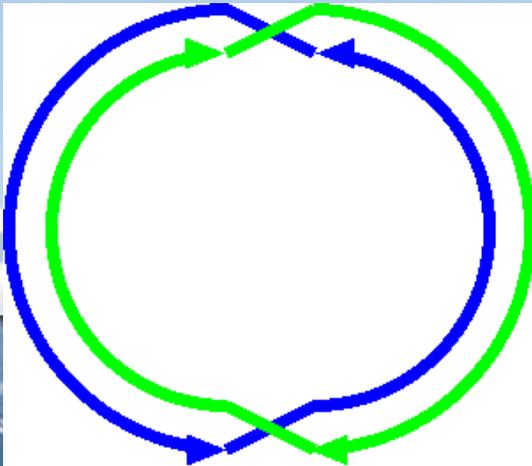
σ : 断面積 ~ 反応が生じる有効面積。

神様が決める。



Why Ring Collider?

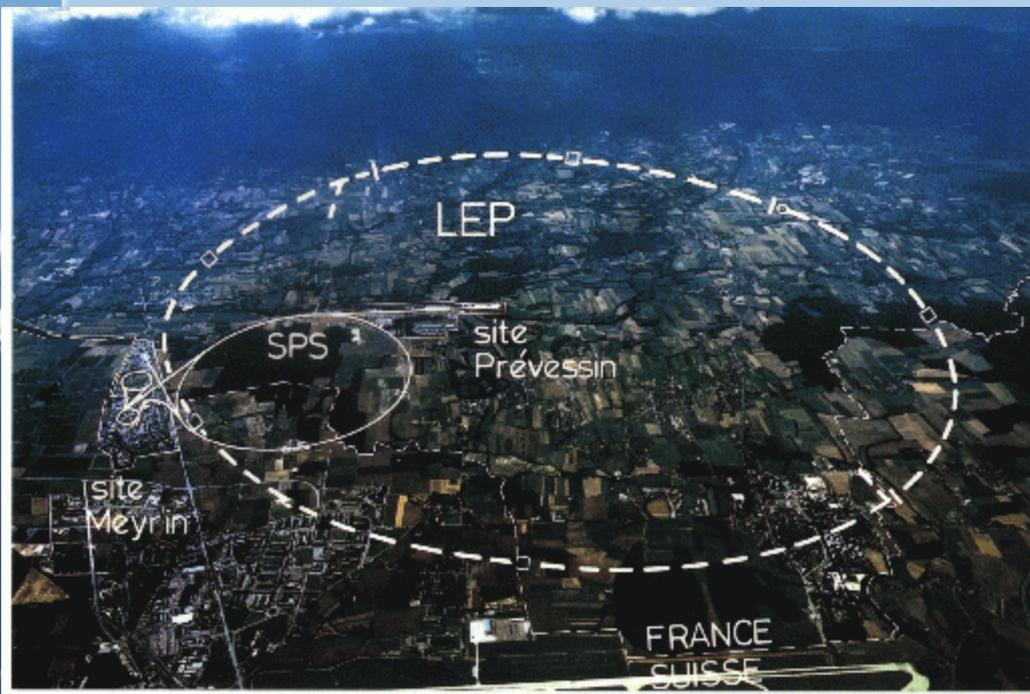
- いままで建設されてきたコライダーは（SLCという加速器を除き）すべてリングコライダー。
- 同じビームが軌道を周回するので、ビーム衝突の繰り返し周期は自然と大きくなる。
- 高いルミノシティが容易に得られる。



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

LEP加速器

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



Synchrotron Radiation

- なぜLEP加速器はCME 209GeVで止めてしまったのか？もうちょっとエネルギーを増やせば125GeV Higgsが見えたのに。（結果論ですが、 Z^0 H threshold energy 215 GeV)
- 209GeVはLEPの限界。
- 原因：シンクロトロン放射

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



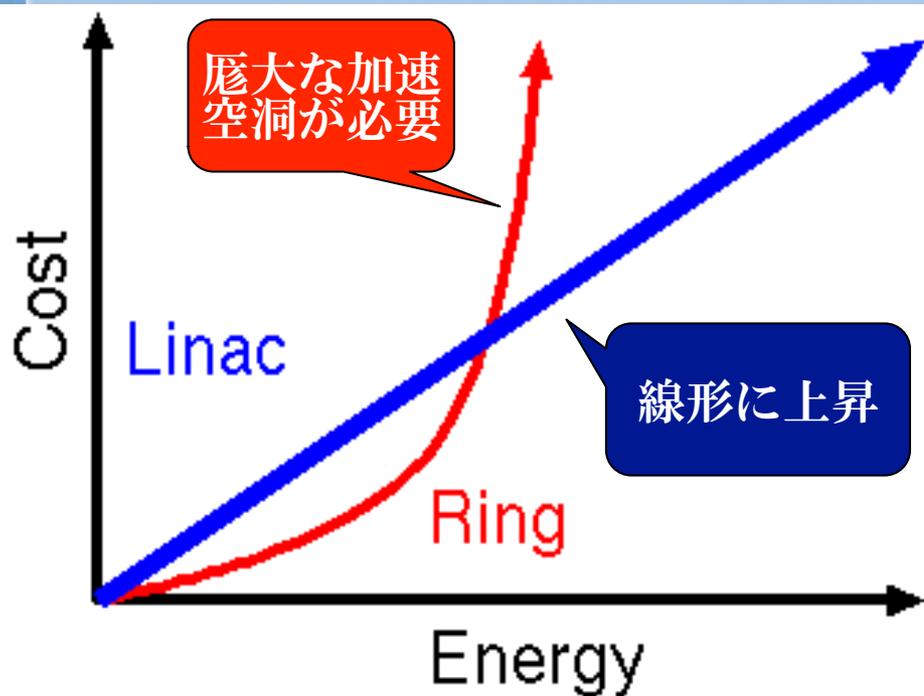
- LEP 104 GeVビームが一周する間に、エネルギーは2GeV程度低下。LEPの加速空洞の限界。
- LEPでCME 500GeVの時、一周あたりのエネルギー損失は150GeV.

Ring collider and Linear collider

Energy loss

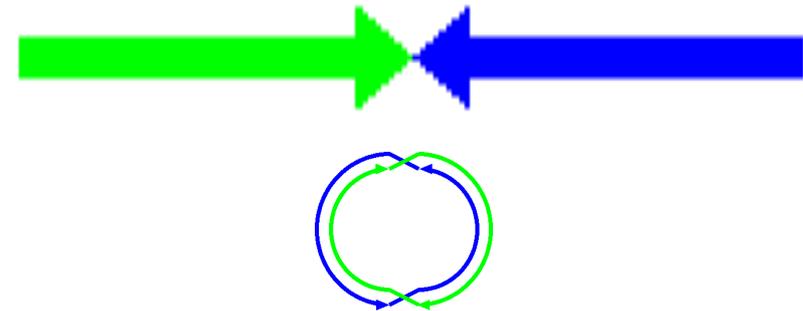
Linac : zero

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



RECOMMENDED

Linear Collider



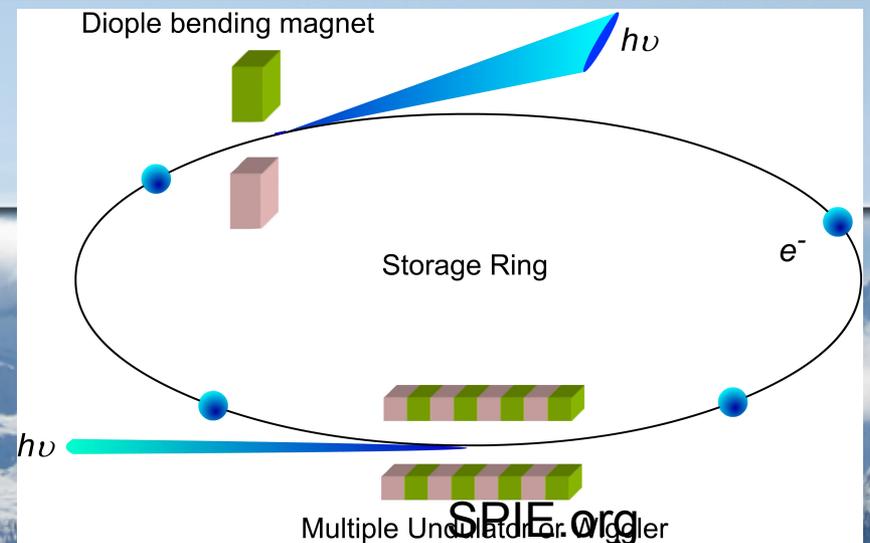
Linac光源

- Linac はLinear Colliderだけでなく、光源としても注目されている。
- ビームの品質：エミッタンス（乱雑さ、ビームの温度）
- エミッタンスが良ければ
 - 高輝度な放射光、コヒーレンス
 - 極小スポットでの照射
- よいエミッタンスのビーム=高輝度コヒーレンス放射光

Ring Light Source

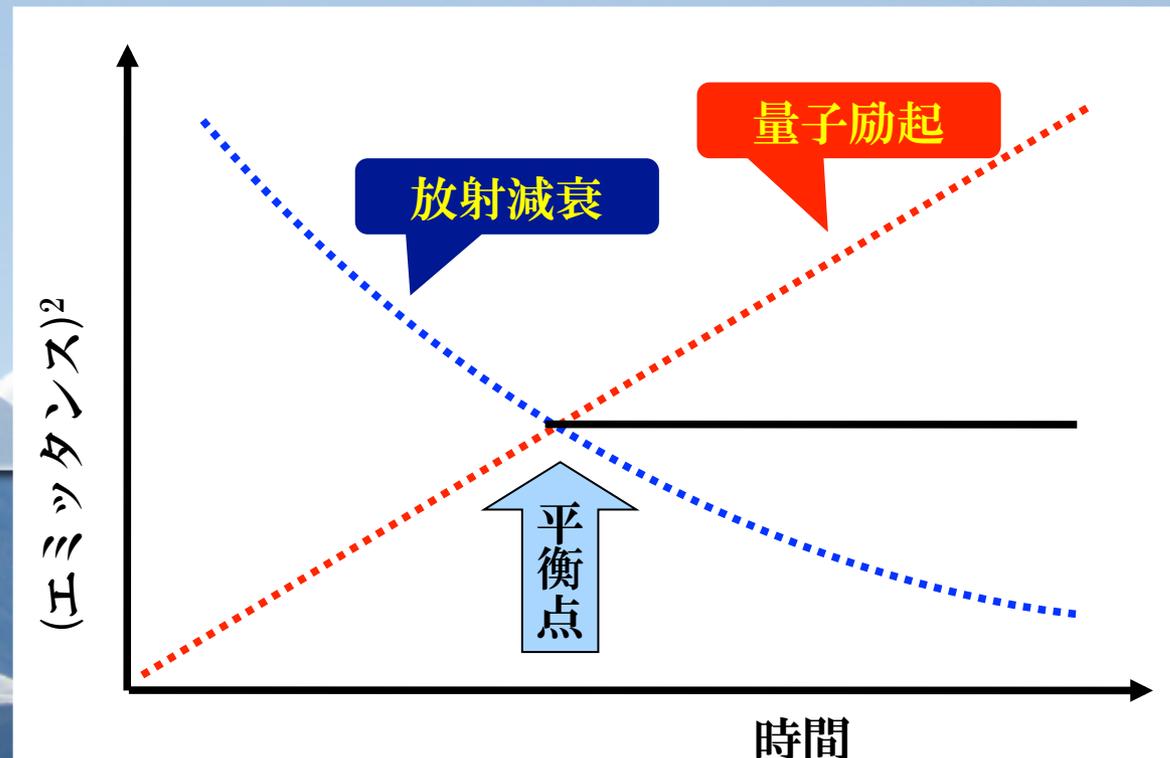
(namely 3rd Generation light source)

- Storage ring for Synchrotron radiation facility.
- It can store extremely high average current (several 100mA) and extremely small emittance beam.



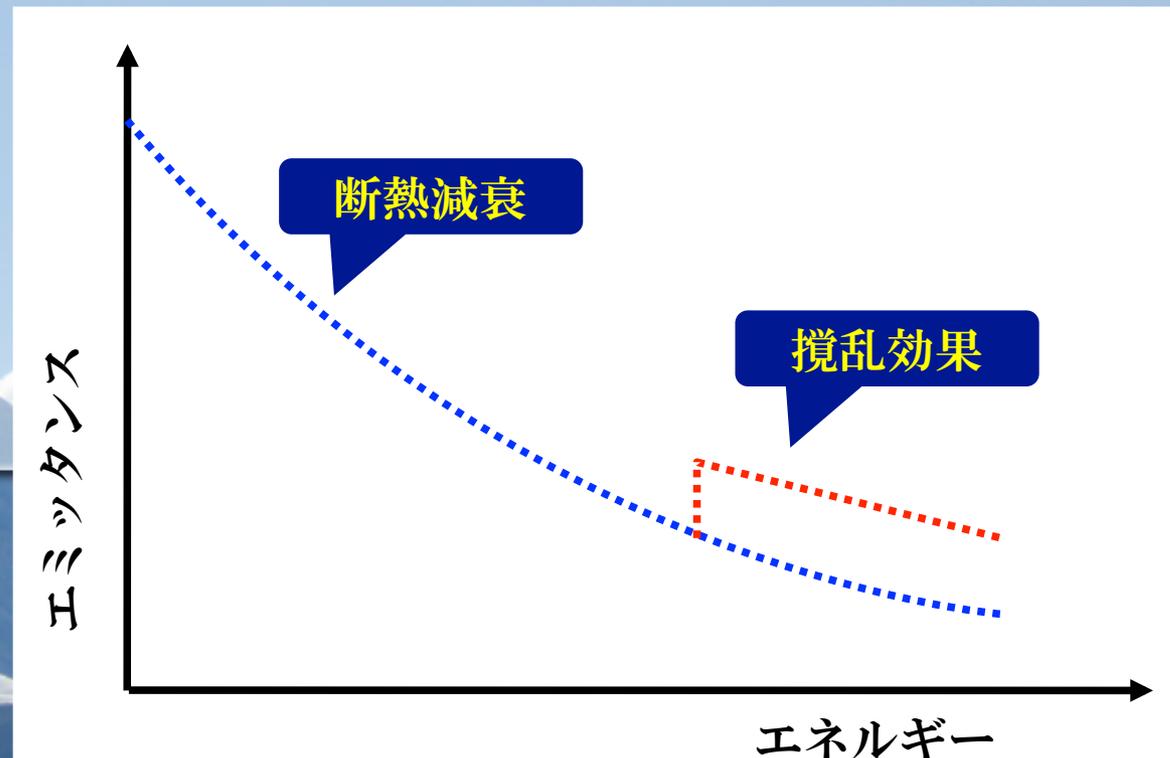
Ring Light Sourceの限界

- 周回軌道中のビームエミッタンス（温度）は、力学的平衡状態としてきまる。
- 冷却効果（放射減衰）と加熱効果（量子励起）が釣り合った状態が平衡エミッタンス。
- 実現されているエミッタンスは設計値と等しい＝原理的限界



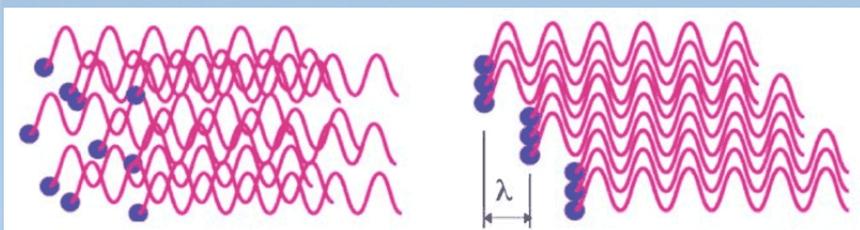
Linacのエミッタンス

- Linacでのエミッタンスは次の要素で決まる。
 - 初期エミッタンス（電子ビームの初期温度）
 - 断熱減衰（相対論的効果による冷却）
 - 攪乱効果（磁石のミスアラインメント、空間電荷効果など）
- 原理的境界にはまだ達していない。



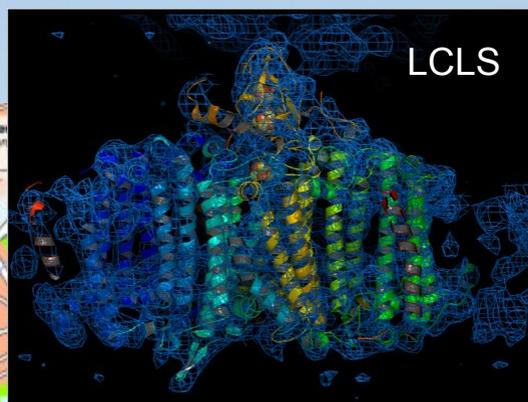
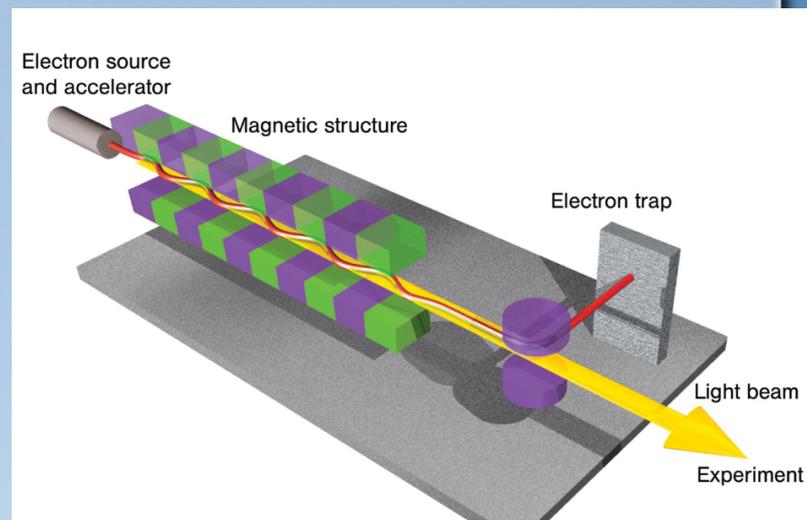
FEL (Free Electron Laser)

- Linacのつくる究極の低温ビームを利用した、超高輝度、短パルス、コヒーレント光源。
- 第四世代光源と呼ばれ、日、米、欧でそれぞれX線領域のFELが稼働中・建設中。



FEL coherent emission

PSI



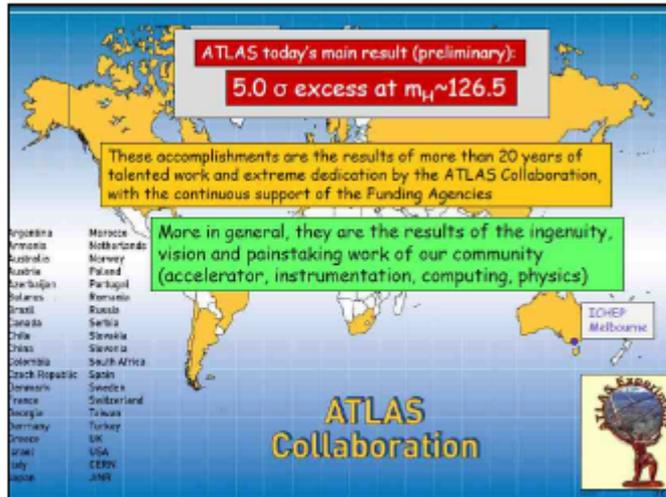
Euro XFEL

LHC got a big success!

July 4, 2012

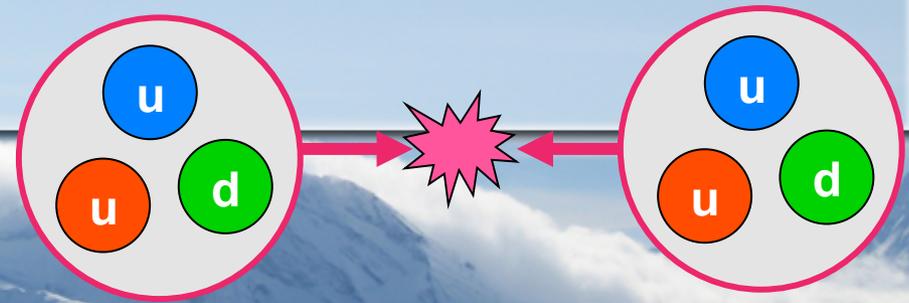
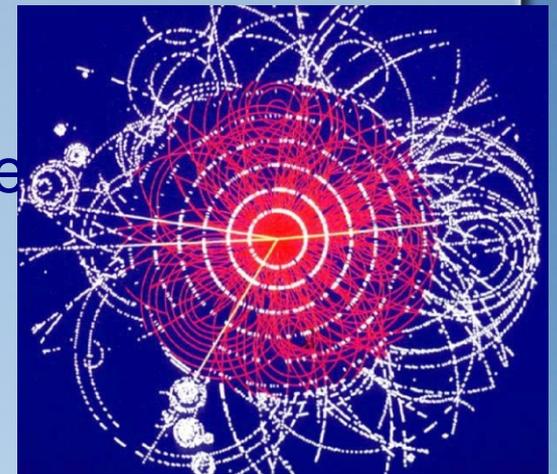
In summary

We have observed a new boson with a mass of 125.3 ± 0.6 GeV at 4.9σ significance!



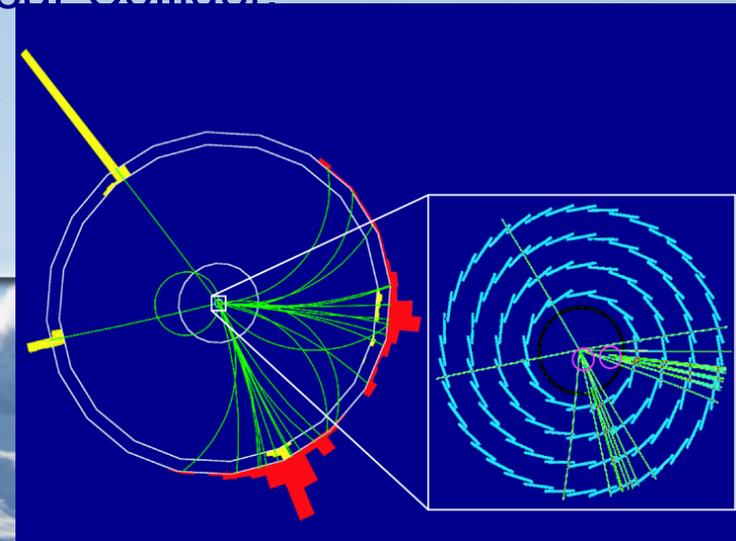
Hadron Collider

- Hadron (proton/antiproton) is easier to accelerate to high energy owing to the absence of synchrotron radiation.
- Events are complicated because proton is not an elementary particle (uud + sea quarks + gluon).
- Initial state is distributed statistically.
- Energy reach is large, but resolution is not ideal.



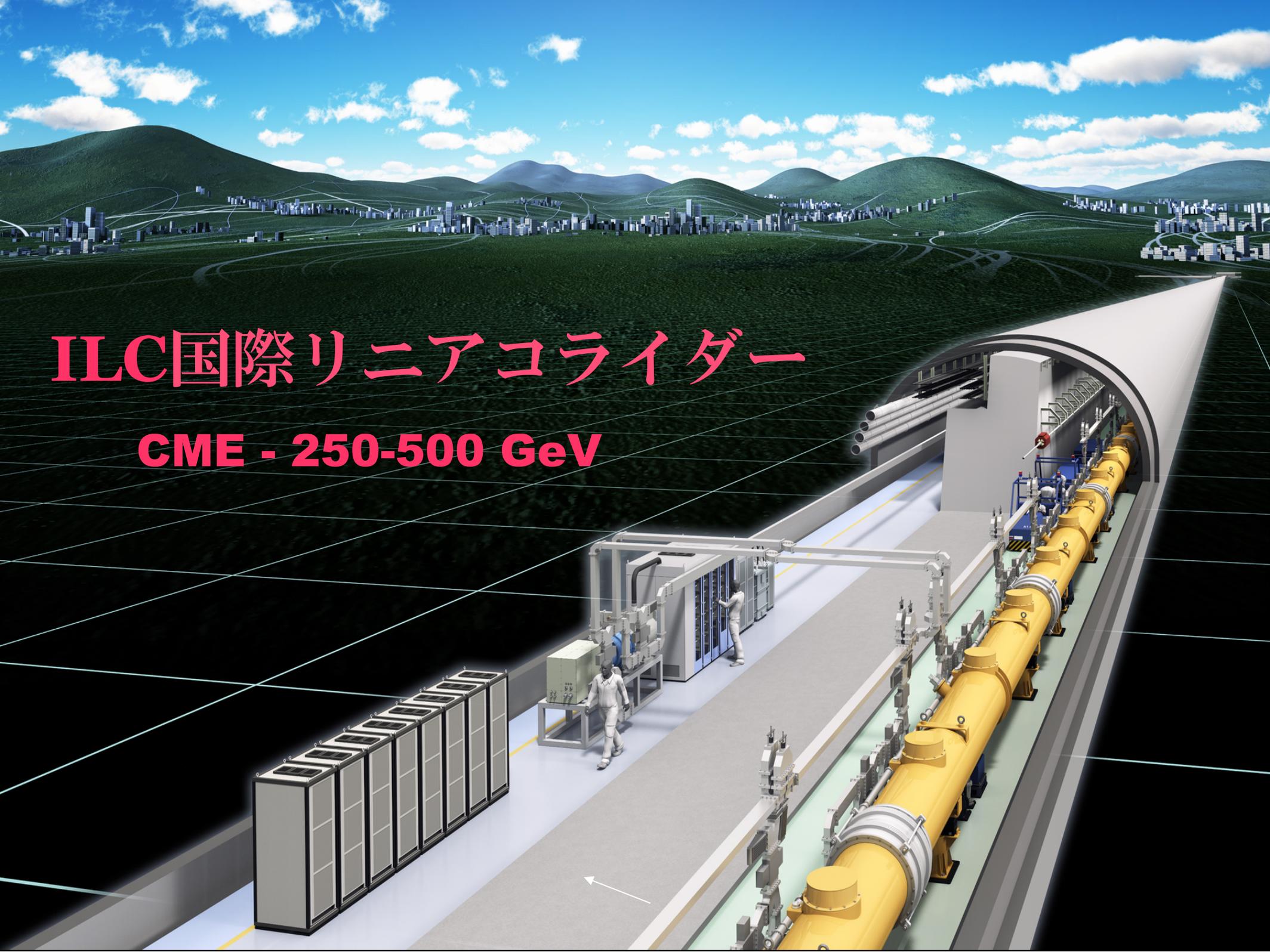
Lepton Collider

- Lepton Collider (e^+e^-) is an ideal experiment to study particle physics.
 - Collision between elementary particles
 - Well defined initial state.
- In the ring collider (LEP), synchrotron radiation is obstacle. Two solutions.
 - Use heavier elementary particle : muon collider (still takes time).
 - Use Linac instead of synchrotron: Linear Collider.



ILC国際リニアコライダー

CME - 250-500 GeV



でも Linear Collider の ルミノシティって..

- 繰り返し周期 f をあまり大きくできないので、ルミノシティをおおきくするのが Linear Collider での課題。

- ビームスポットを極小にすればいいそう。

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

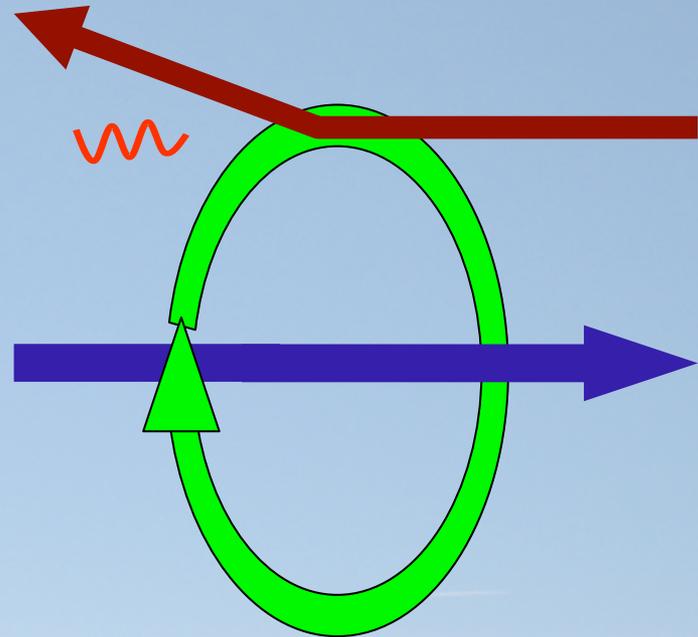
- Beamstrahlung : ビームのつくる磁場によるシンクロトロン放射。エネルギー広がりを大きくして、精度を悪化させる。
- Disruption: クーロン場によるビームの変形。衝突制御を難しくする。
- ビーム径を小さくすると、これらの効果も大きくなる。

Beamstrahlung

- Synchrotron radiation with magnetic field induced by the beam.

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

$$\Delta \frac{E}{E} \propto \frac{B^2 E^2 \sigma_z}{E} \propto \frac{N^2 E}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) \sigma_z}$$



Beam-Beam effect

- ビーム間のクーロン相互作用.

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

- Disruption parameterで特徴つけられる

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

- このパラメーターが大きいとビーム制御が困難となる。小さくしたい。

リニアコライダーと非対称ビーム

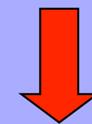
$\sigma_y \ll \sigma_x$
(非対称ビーム)

ルミノシティ



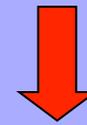
$$L = \frac{f_{rep} n_b N^2}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$$

Beamstrahlung



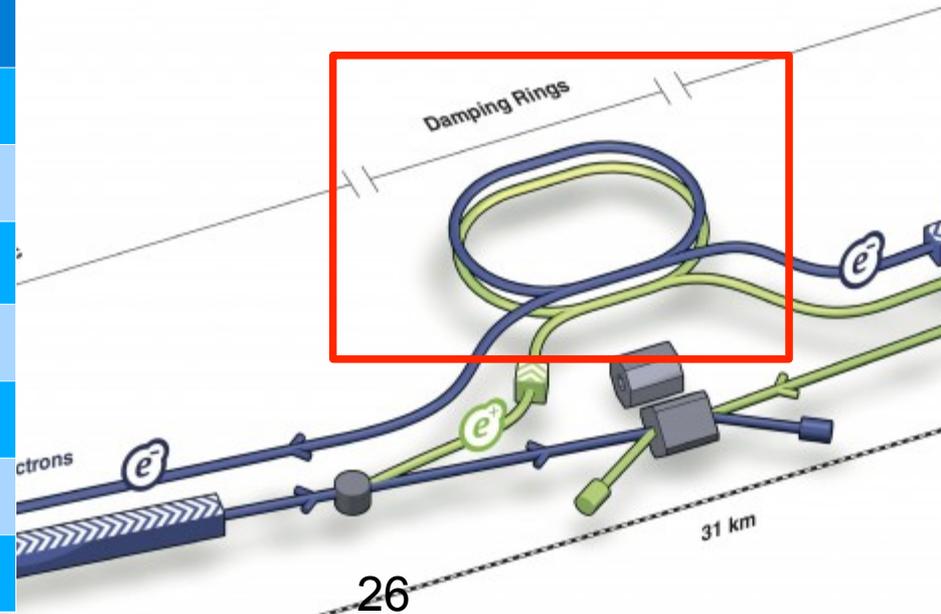
$$\frac{\Delta E}{E} \propto \frac{N^2 E}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) \sigma_z}$$

Disruption



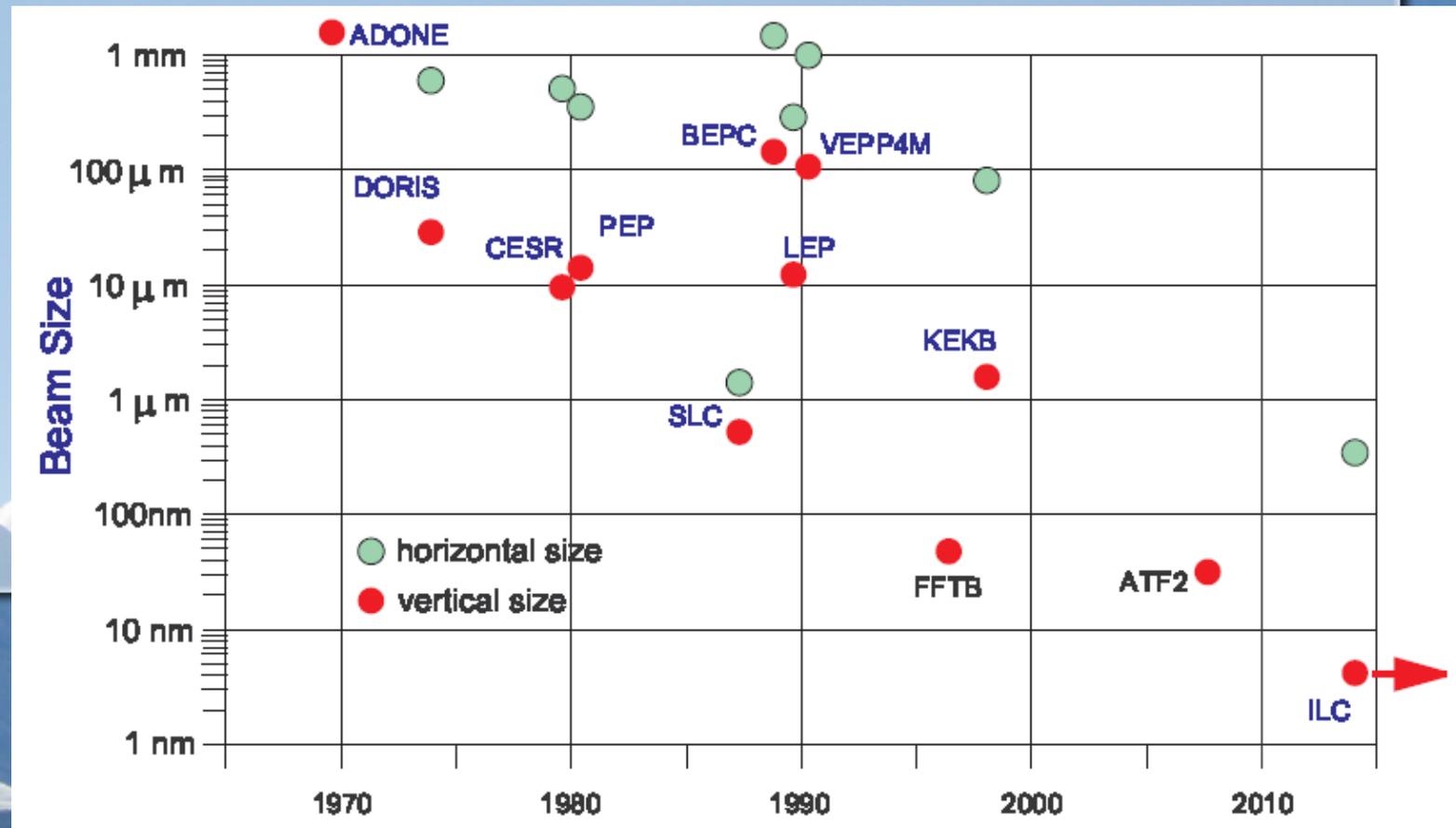
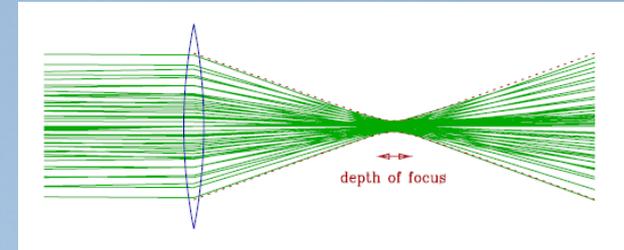
$$D_{x,y} = \frac{2Nr_e}{\gamma} \frac{\sigma_z}{\sigma_{x,y}(\sigma_x + \sigma_y)}$$

Parameter	Value
Horizontal size	640 nm
Vertical size	5.7 nm
Bunch length	300 μm
Vertical Disruption	19.4
RMS energy by BS	2.4%
Horizontal emi.	10 mm.mrad
Vertical emi.	0.04



Extremely Small spot

- ILC requires a few nm.
- It is already achieved.

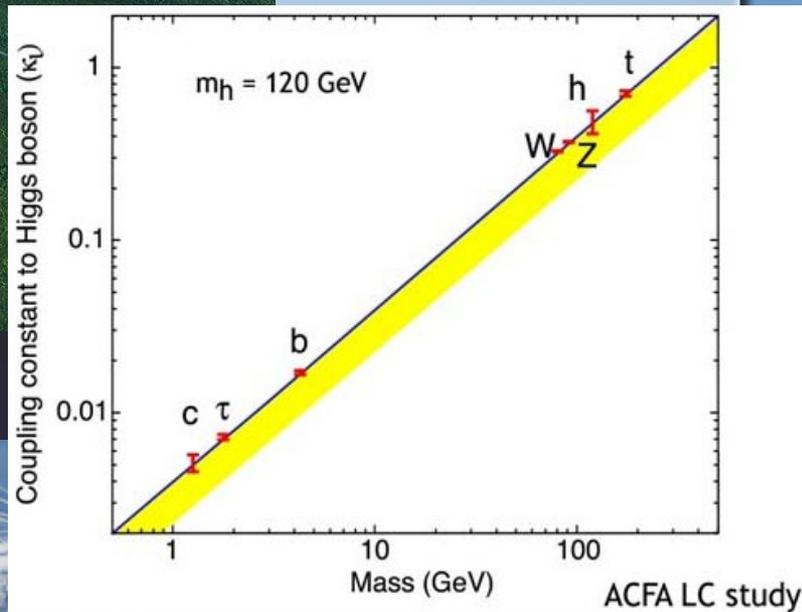
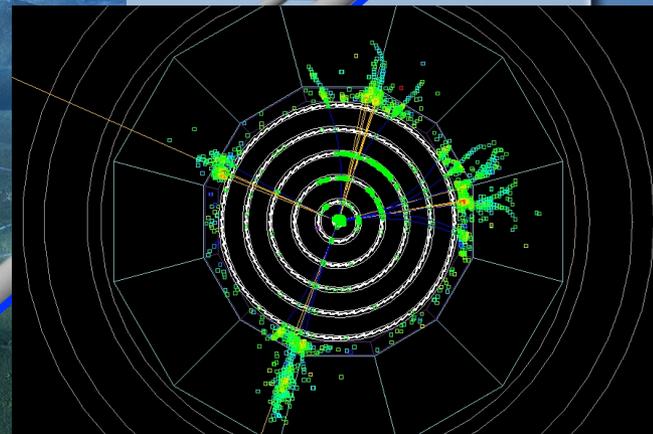
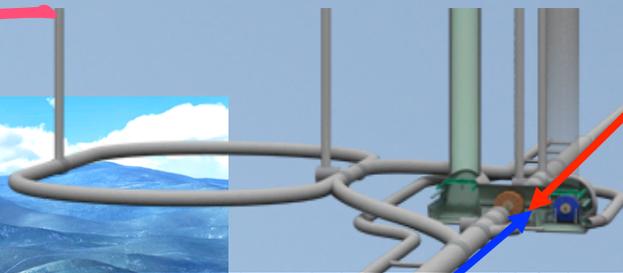


ILC国際リニアコライダー

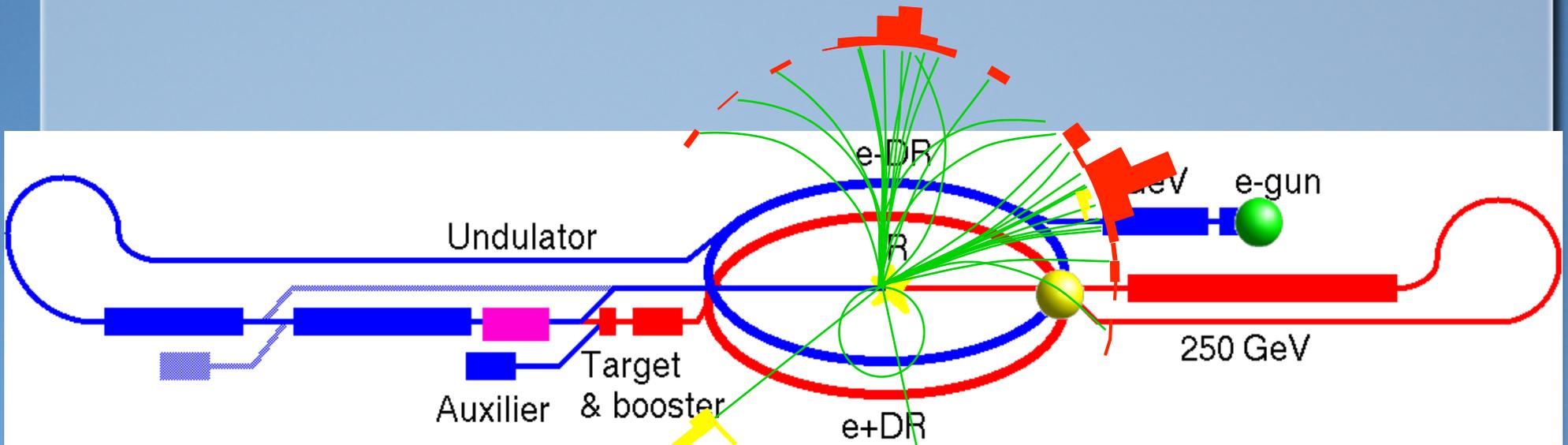
From KEK to Kashiwa

Main Accelerator

CG by R. Horii



ILC 加速器の概要

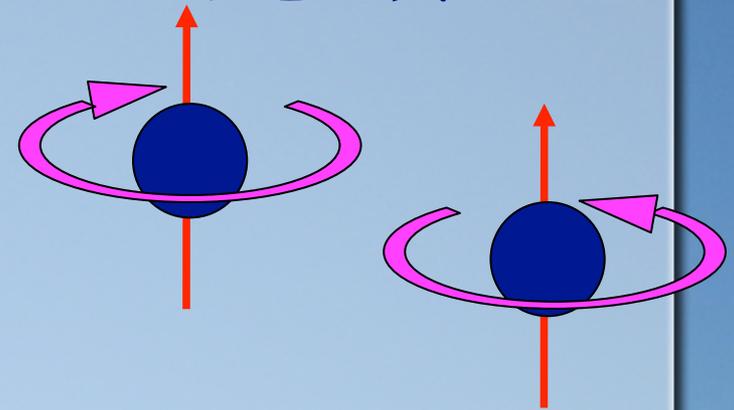


- ▶ シンクロトロン放射のない線形加速器によるコライダー。
- ▶ ルミノシティ確保のため、高アスペクト比の極薄ビームによる衝突。
- ▶ 偏極かつ超低エミッタンスビーム生成。
- ▶ 超伝導線形加速器による加速。

偏極電子

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

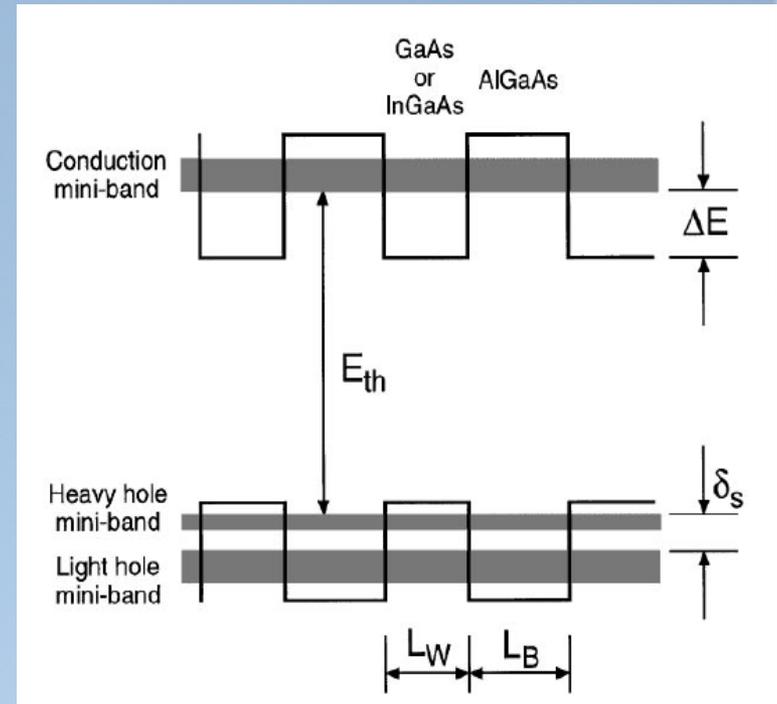
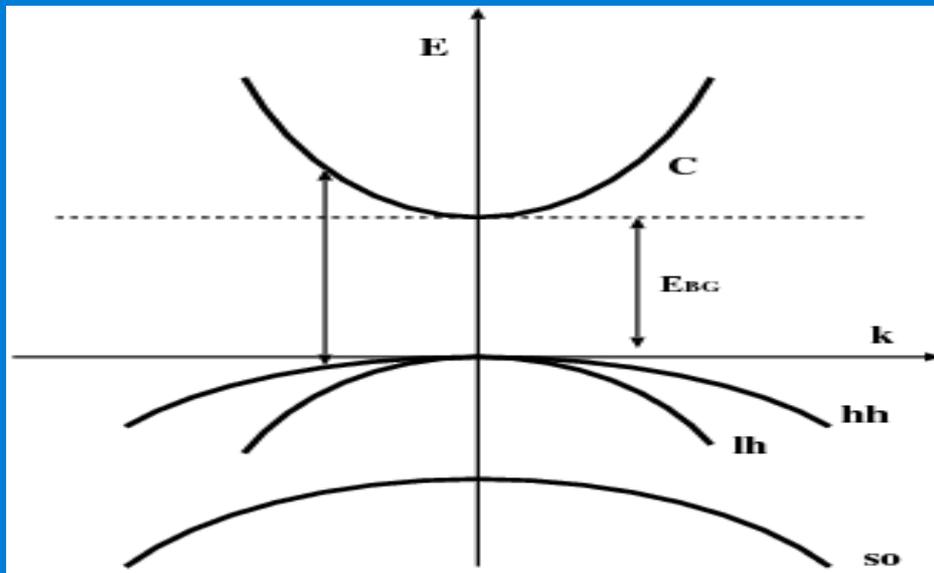
$$l_L \equiv \begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L \end{pmatrix} \quad I_W = \frac{1}{2}, \quad Y_W = -1$$
$$e_R \quad I_W = 0, \quad Y_W = -2$$



- 初期状態のエネルギー、スピンを厳密に定義：精密実験
- スピンを揃える(偏極)は初期状態の粒子を定義すること。

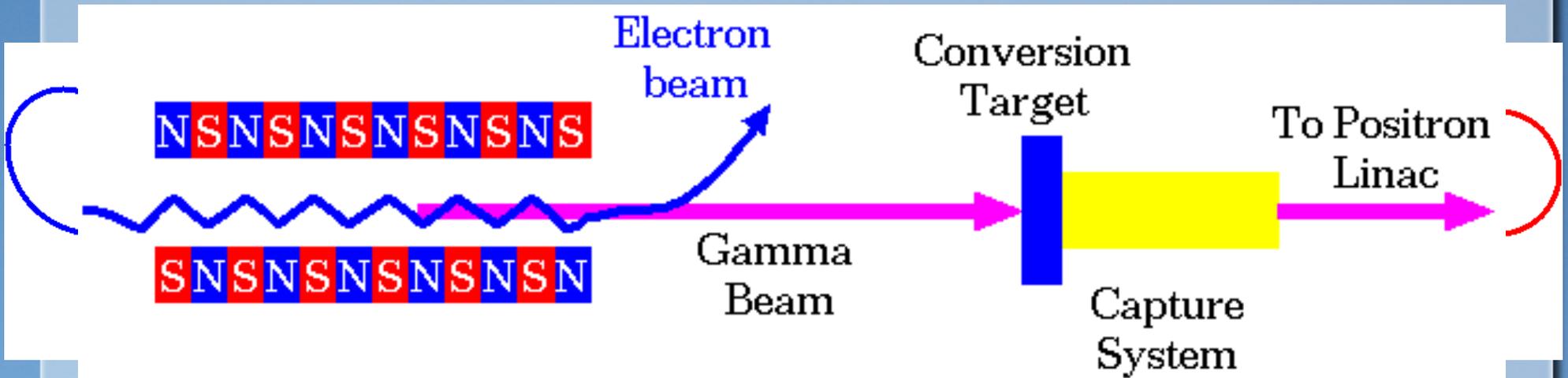
$$P \equiv \frac{N_R - N_L}{N_R + N_L}$$

偏極電子源



- ▶ リニアコライダーにとって偏極ビームは極めて重要。電子の偏極度は80%以上。
- ▶ 現在のところ、80%以上の偏極電子が生成可能な技術はNEA-GaAs/GaAsP超格子フォトカソード。
- ▶ 光電効果により偏極電子ビームを生成。

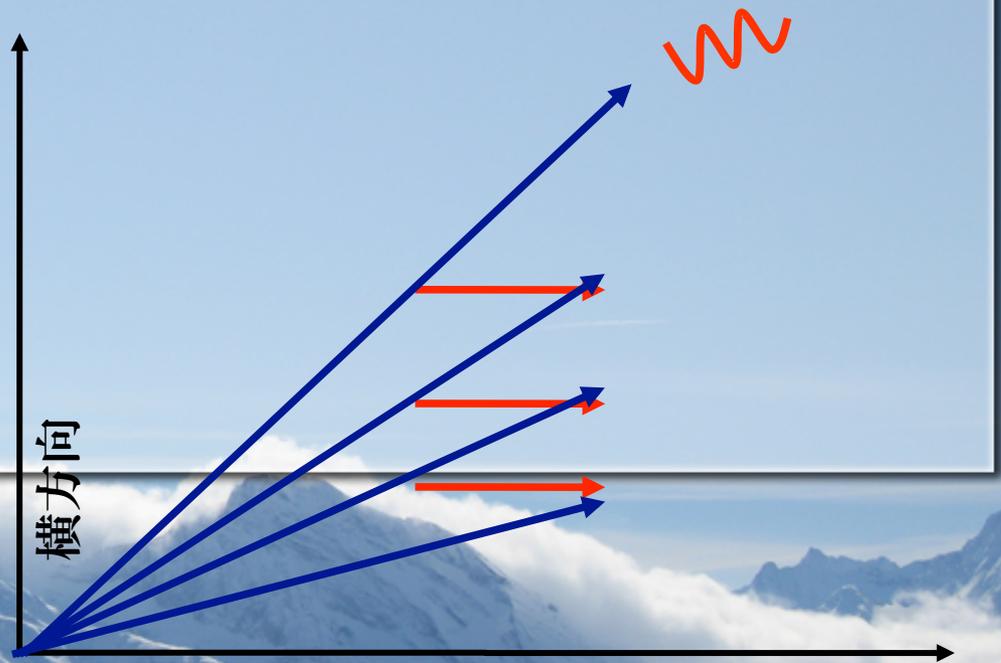
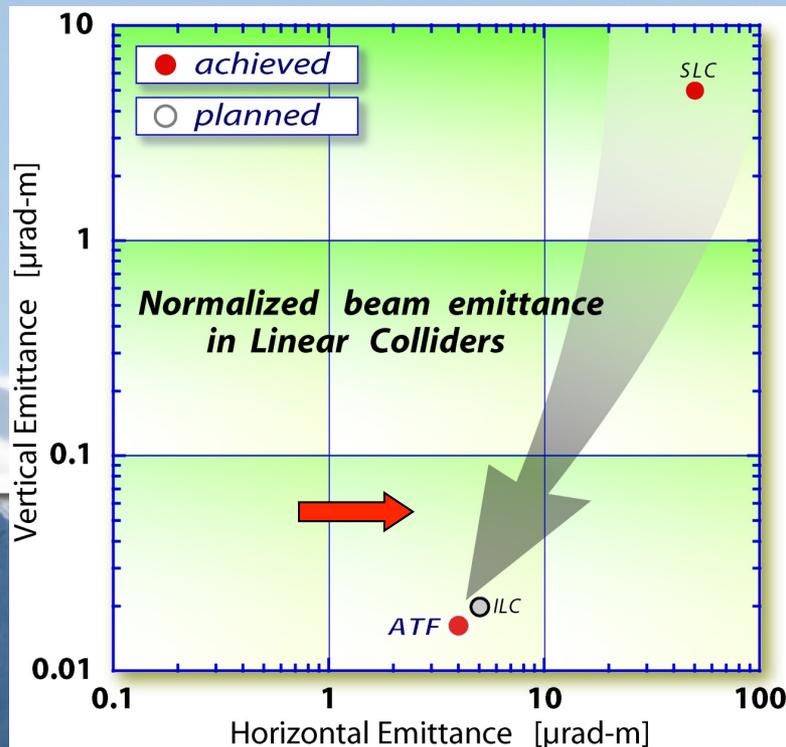
ILC Positron Source (アンジュレーター方式)



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

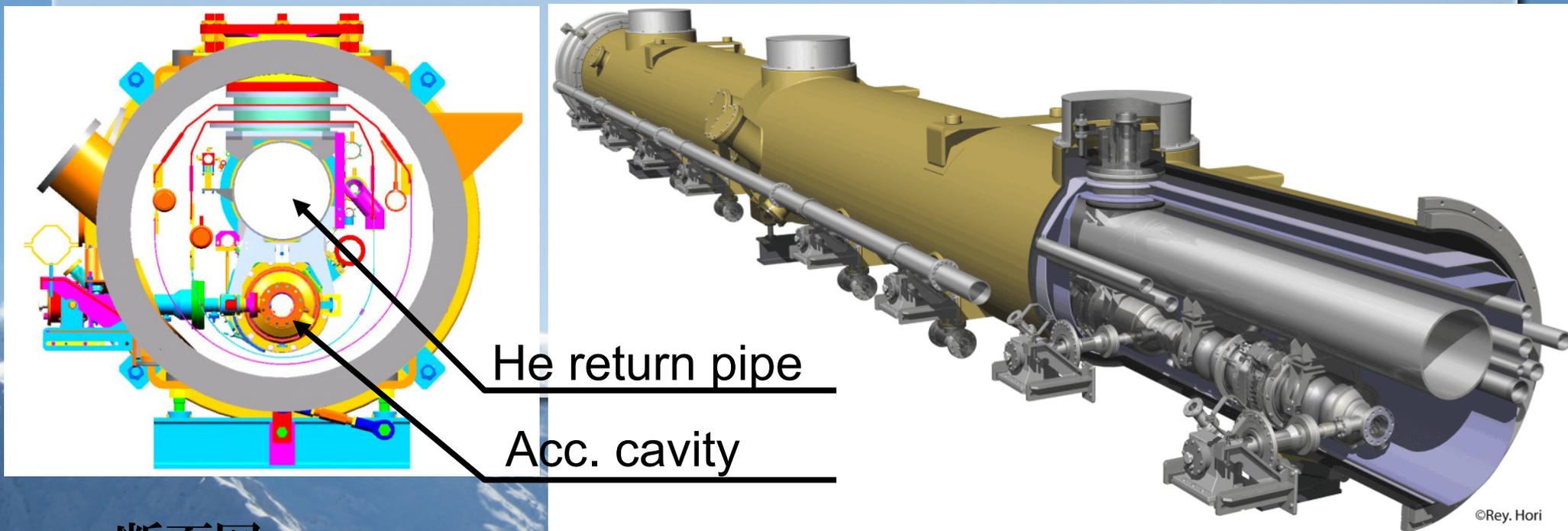
DRでの放射減衰

- リング蓄積中に電子、陽電子はシンクロトロン放射によりエネルギーを失う。
- RF空洞による再加速でエネルギーは一定に。
- 放射の度に横方向運動量は減少し、超平行ビームが得られる。



ILC主線形加速器

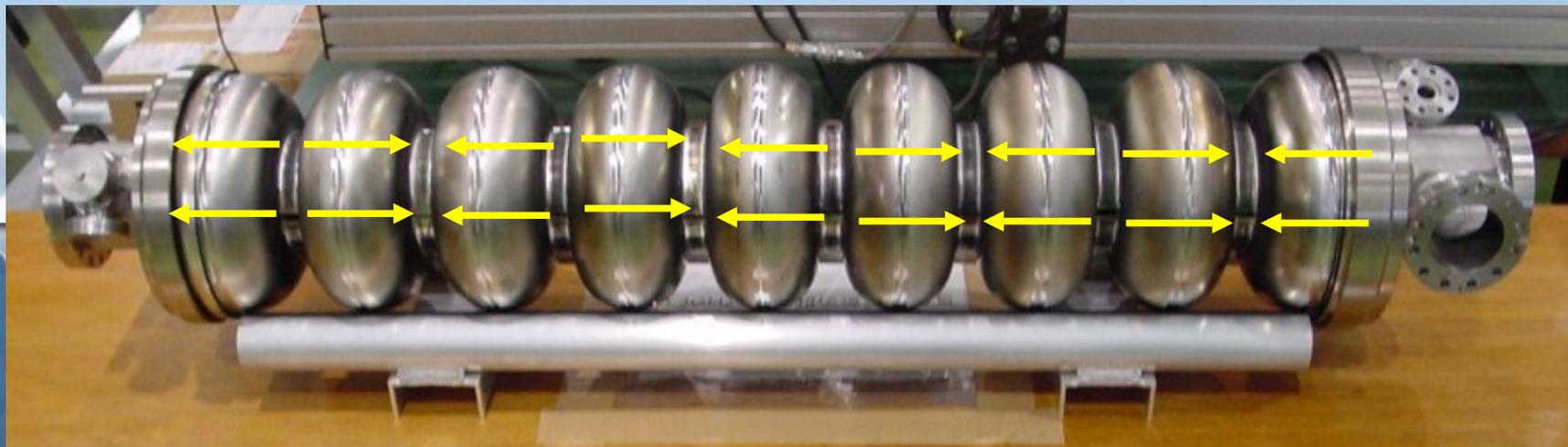
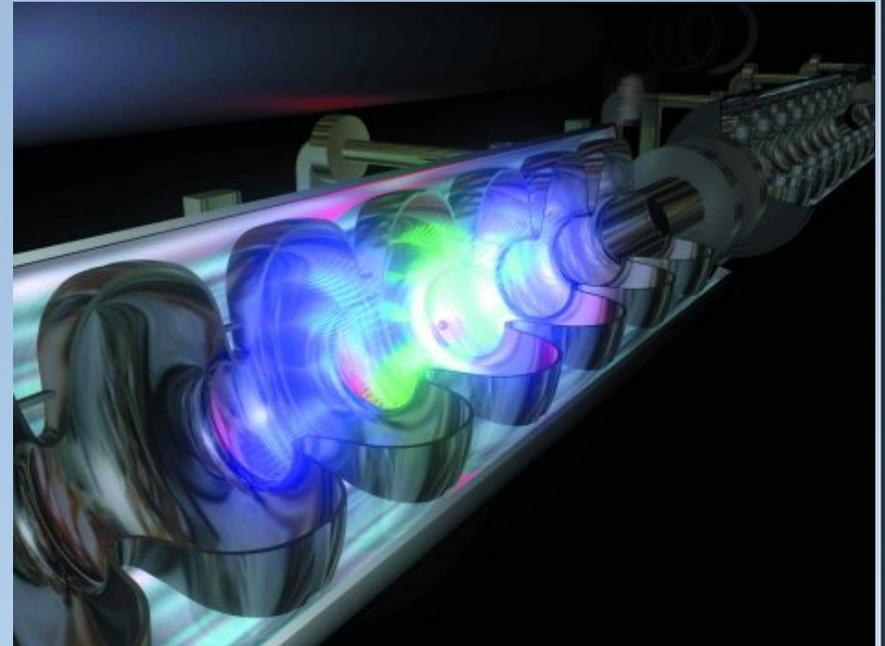
- ▶ 2Kの超流動ヘリウムによるNb超伝導加速空洞。
- ▶ 断熱した容器内でヘリウムを減圧して2 Kを維持。
- ▶ 一つの容器に8あるいは9台の超伝導空洞（約1m）。
- ▶ 必要性能は実証済み。



断面図

Acceleration in ILC cavity

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



Fabrication / Industrialization

Production yield:

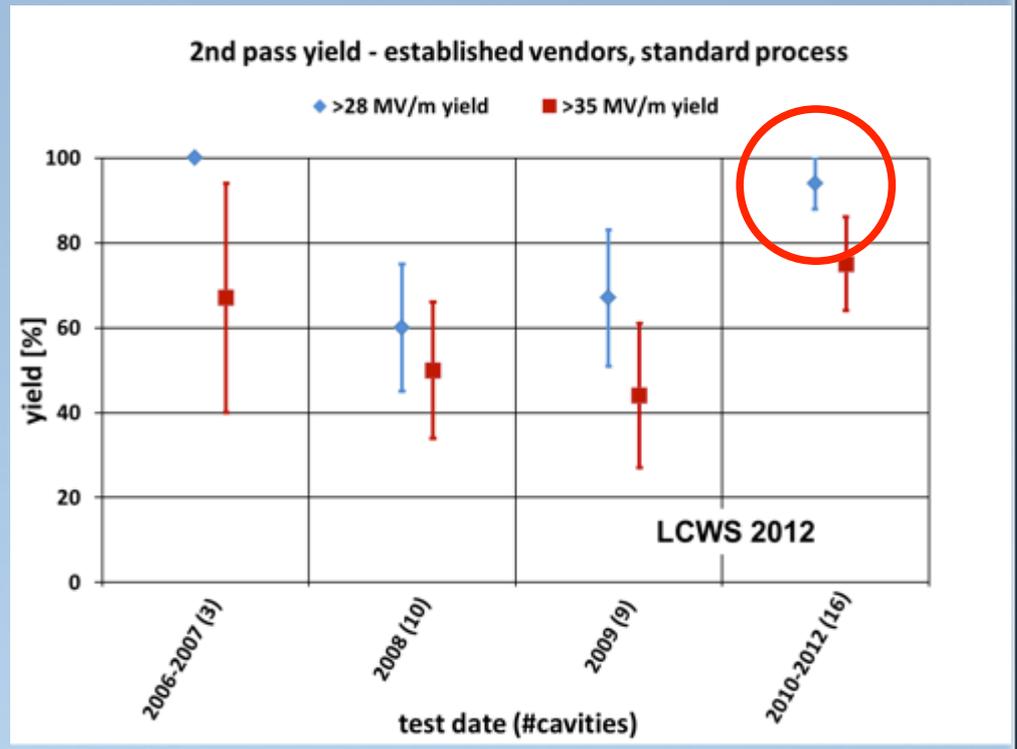
94 % @ > 28 MV/m,

Average gradient:

37.1 MV/m

Design average gradient:

35 MV/m

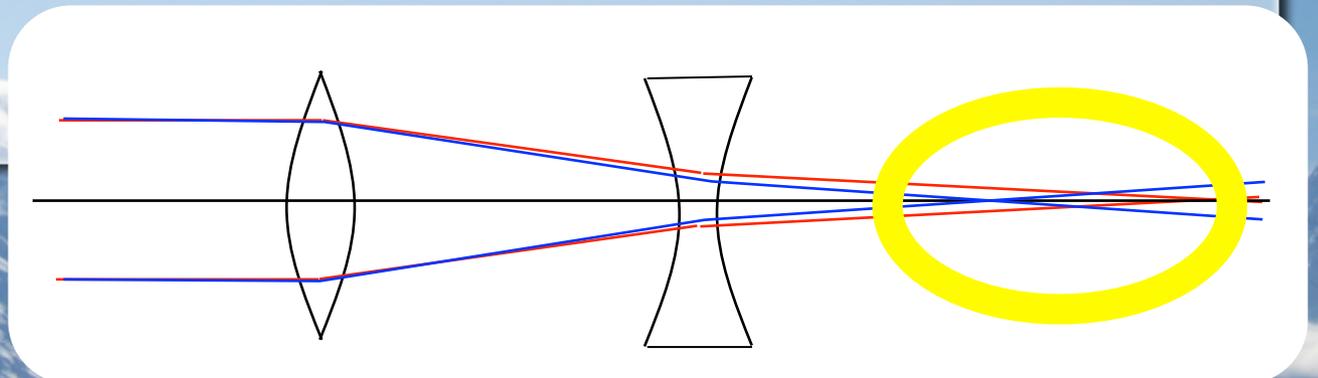


It is ready for production!



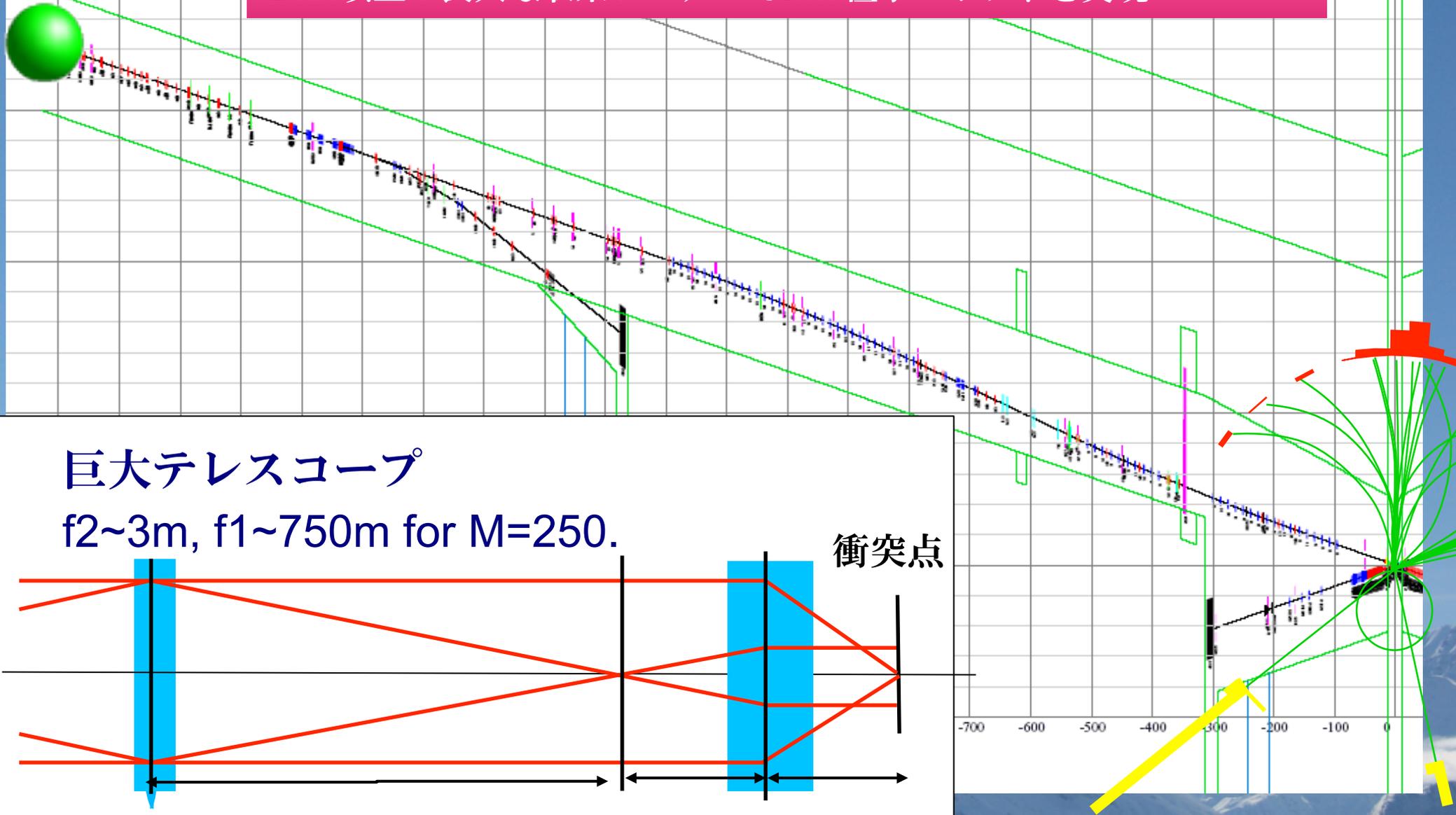
最終収束

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



ILC Final Focus

1 km以上の長大な収束システムで5nm極小スポットを実現



巨大望遠鏡

$f_2 \sim 3\text{m}$, $f_1 \sim 750\text{m}$ for $M=250$.

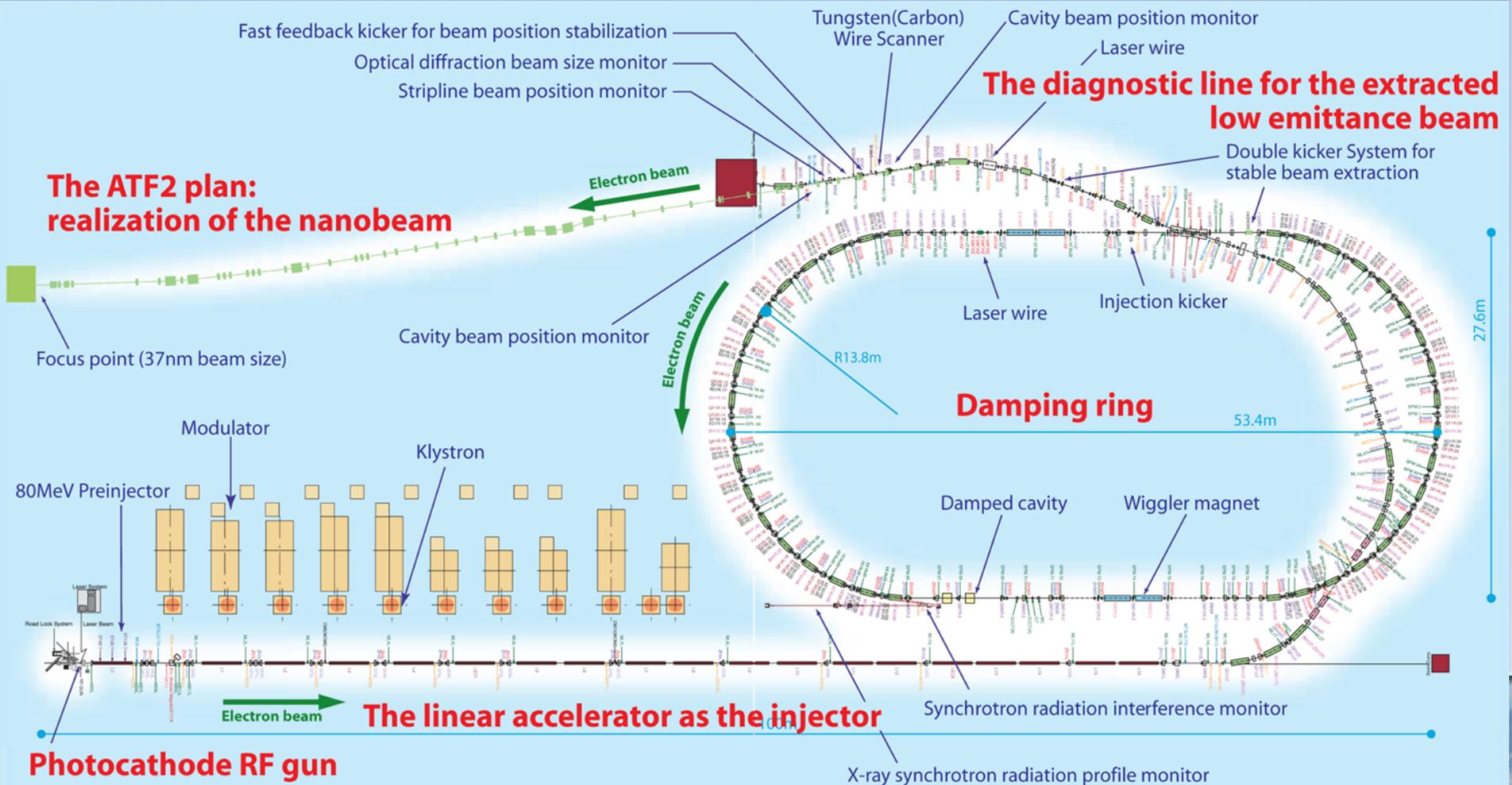
衝突点

f_1

f_2

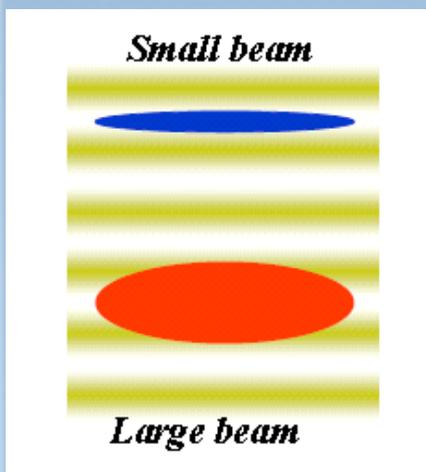
f_2

Final Focus Test (ATF2)

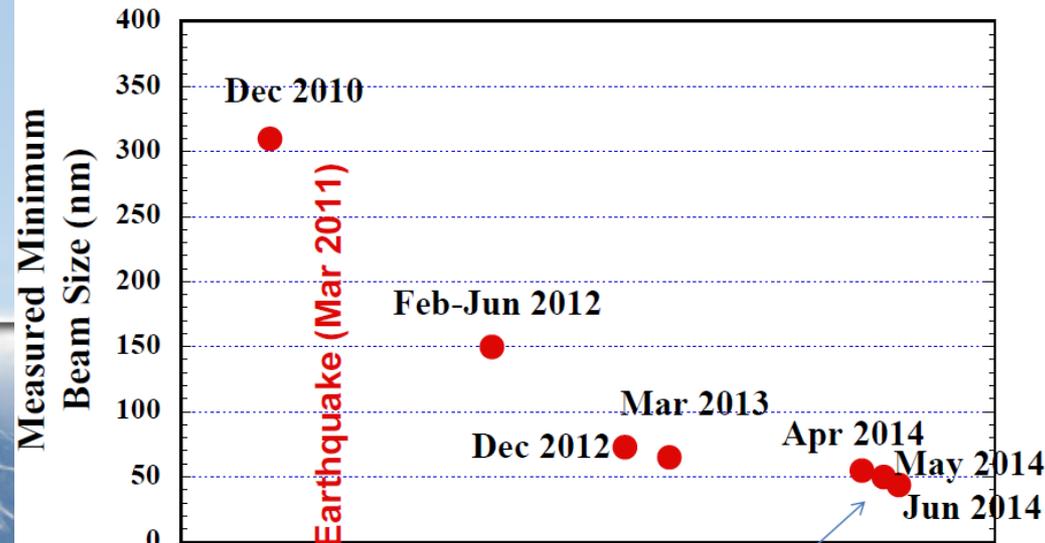
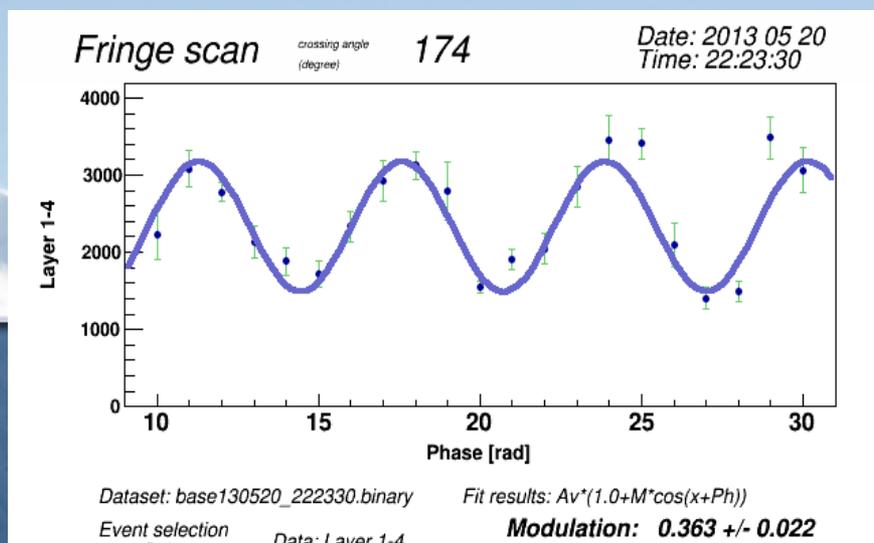


We are approaching!

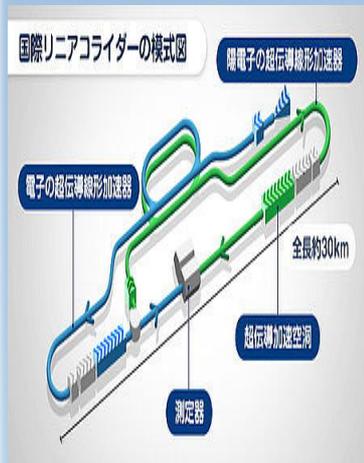
- ATF2で極小ビームサイズ実現とその計測の実証。
- 45nm の実測に成功。
- 37nm (1.3 GeV ATF2) は5.7nm (250 GeV, ILC) とほぼ等価。



K. Kubo, weza01, IPAC14



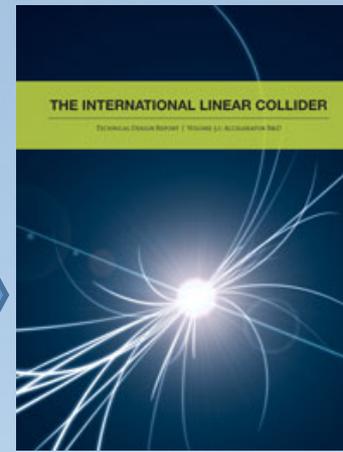
実現へ！



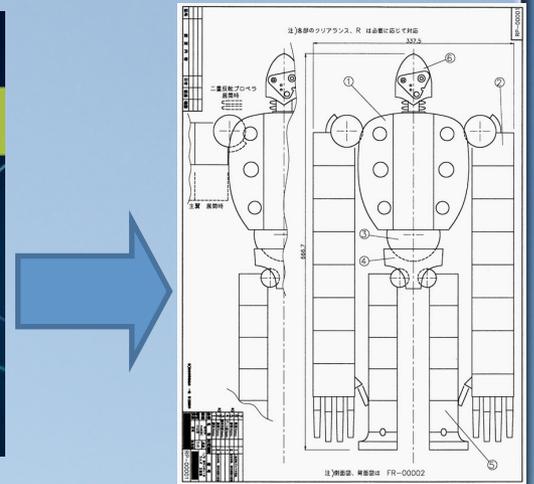
**Baseline design
2007**



**Reference design
2011**



**Technical design
2013**



**Engineering design
2015**

国内候補地

【プレスリリース】 ILC戦略会議
2013年8月23日
ILCの国内候補地として、北上サイトを最適と評価する。

地質、アクセス、研究所や地上設備の建設場所の確保、生活環境、社会的影響、自然環境への影響等を考慮し候補地を決定。



世界からの期待



European Strategy for Particle Physics



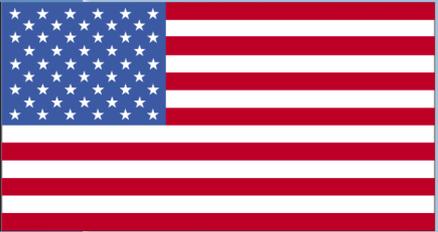
There is a strong scientific case for **an electron-positron collider, complementary to the LHC**, that can study the properties of the Higgs boson and other particles with unprecedented precision and whose energy can be upgraded. (中略) **The initiative of the Japanese particle physics community to host the ILC in Japan is most welcome, and European groups are eager to participate.** Europe looks forward to a proposal from Japan to discuss a possible participation”.

European strategy (欧州の物理の将来についての会議)

e+e-コライダーILCとppコライダーLHCは車の両輪。
欧州は日本がILCをやるなら大歓迎。

ヨーロッパも参加を執望する。

世界からの期待



HEPAP Facilities sub-panel:

Measuring Higgs properties and searching for Beyond the Standard Model effects are of primary scientific significance. The LHC ... upgrades and the 500 GeV ILC in Japan can address these questions in complementary fashions and are absolutely central to progress in high energy physics. e+e-collider at $\sqrt{s}=500$ GeV in Japan is only lepton collider ready for construction in next decade.... Should an agreement be reached the US particle

LHCと500GeV-ILCは、相補的に重要。

500GeV電子・陽電子コライダーは、ここ十年内に実現しうる唯一のコライダー。

米国コミュニティはILCへの参加を熱望。

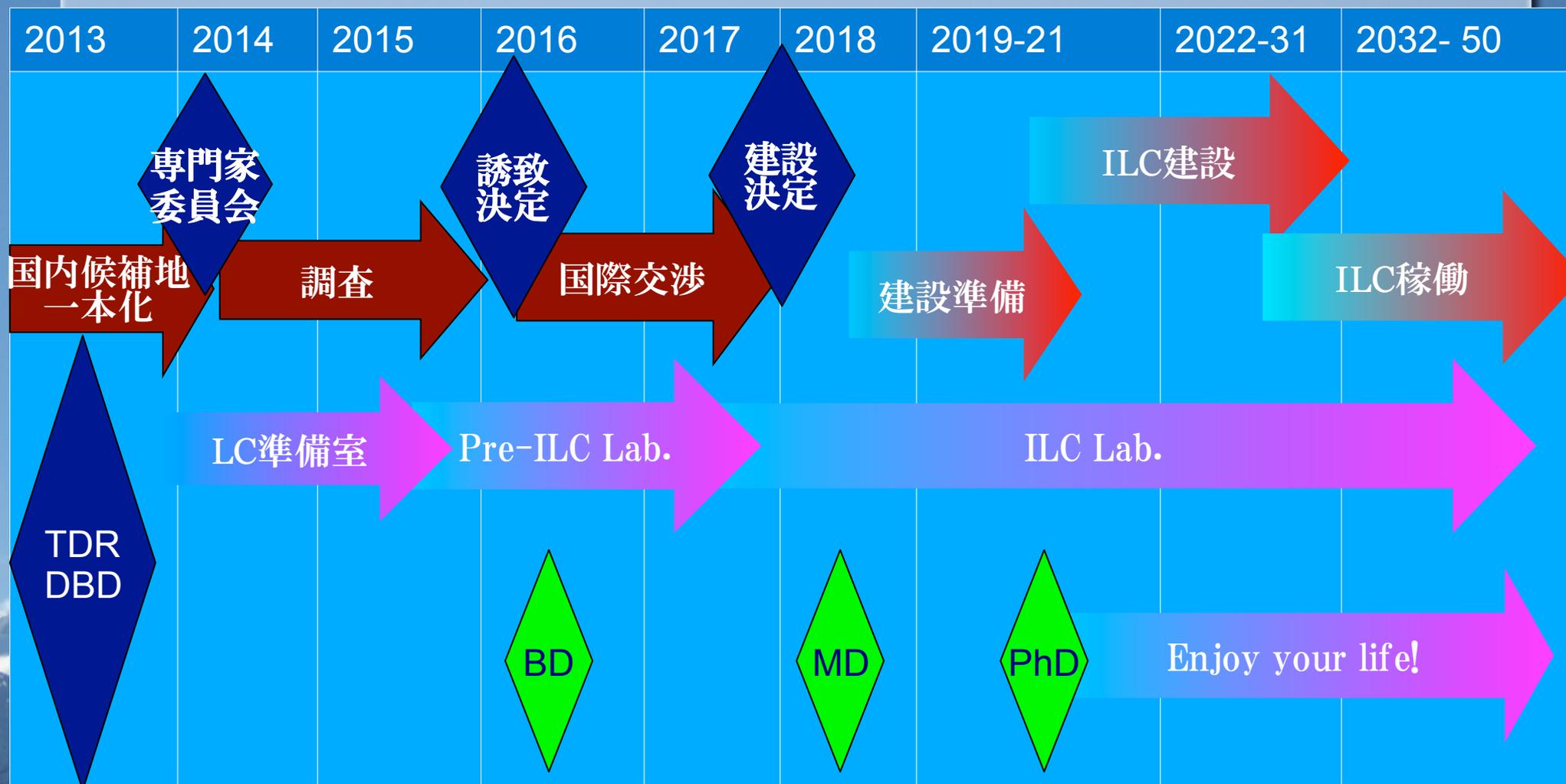
participate in construction.

日本学術会議



- ILC計画におけるヒッグス粒子やトップ・クォークの精密測定とそれらを通じた標準模型を超える物理の探索について、素粒子物理学としての学術的意義は認められる。
- 電子・陽電子衝突型加速器の次期計画として現時点で最も検討が進んでいるのがILCである
- ILC計画は、その必要経費や人的資源の規模からして、単独の国や地域では実施し得ないものであること、その実施には参加国・地域による持続的な国際協力へのコミットメントが不可欠であること、が明白である。
- ILC計画の実施の可否判断に向けた諸課題の検討を行うために必要な調査等の経費を政府においても措置し、2～3年をかけて当該分野以外の有識者及び関係政府機関を含めて集中的な調査・検討を進めること、を提言する。

ILC timetable



IILC実現への道

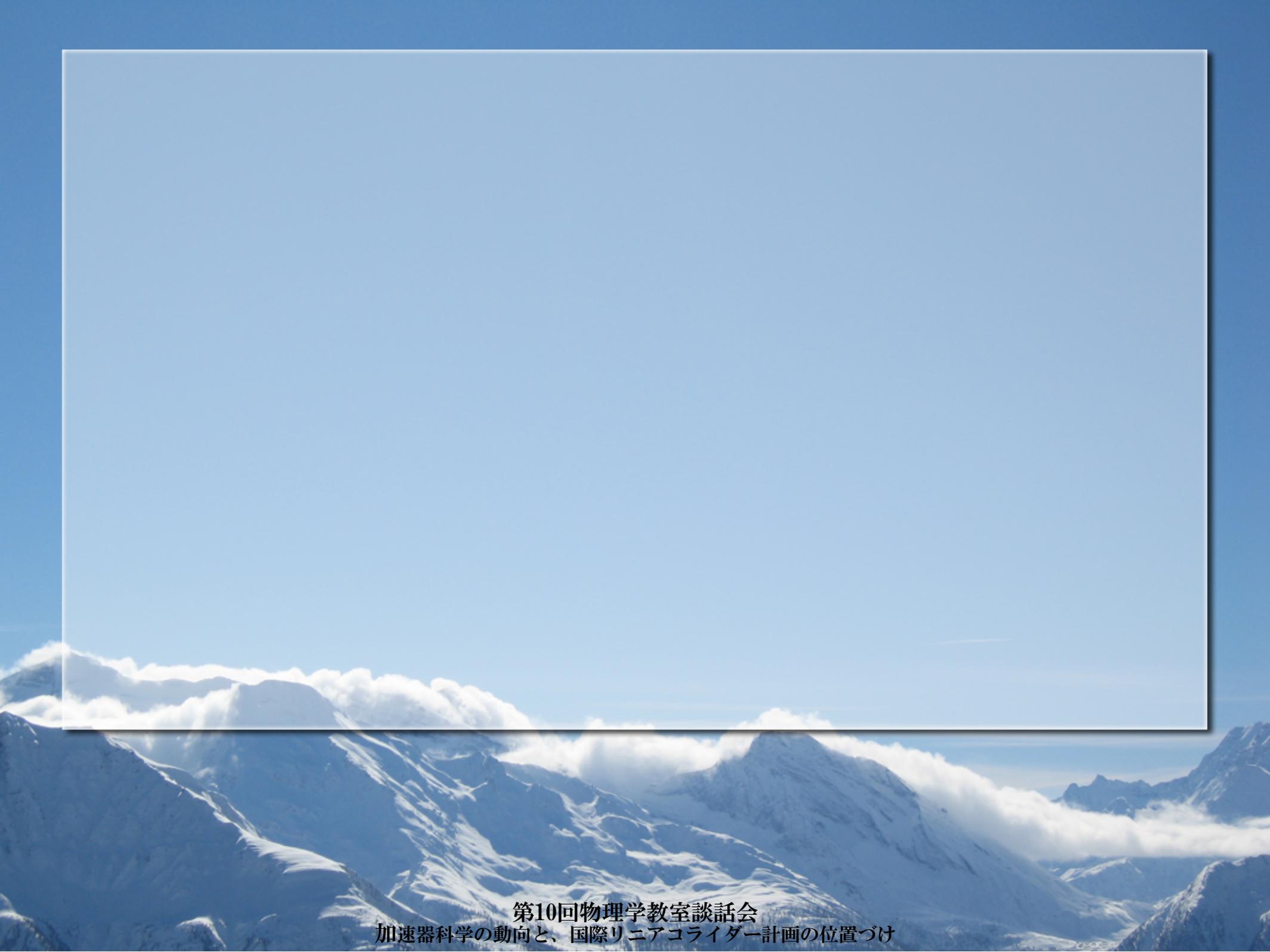
- 競争的に建設することはコスト的に不可能。世界が協力して建設するしかない。いままでにない世界の挑戦。
- 世界は日本がホストすることを望んでる。
- 新しい国際協力の形である。
- 日本が真のアジアのリーダー、国際国家となれるかどうかを試されている。

独占ではなく、国際チームを束ね、単独の国の能力を超えた大事を成すことが新しい時代のリーダーシップ

Harold Shapiro, Charting the Course for Elementary Particle Physics, NRC, 2006



埼玉県ときがわ町HP



第10回物理学教室談話会
加速器科学の動向と、国際リニアコライダー計画の位置づけ

まとめ

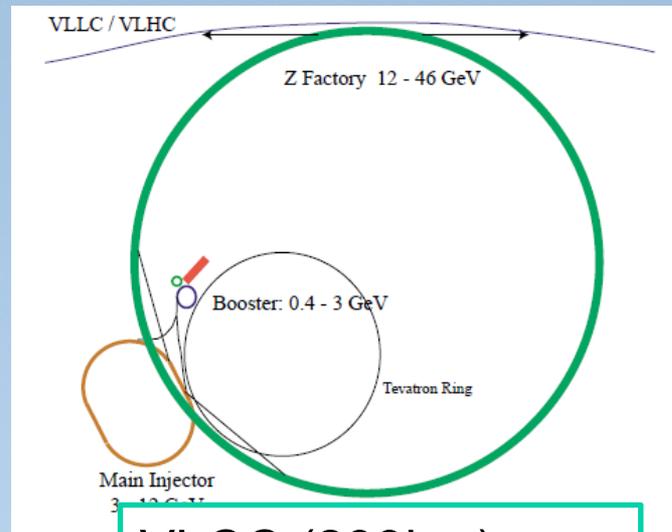
- 加速器はエネルギー等性能の飛躍的向上により、自然科学の発展を支えてきた。しかしそれは、次々と生まれる新しいアイデアによるもの。
- 素粒子物理学、放射光科学諸分野にたいして、円形加速器が過去数十年にわたり大きな貢献をしてきた。
- 円形加速器の技術的成熟にともない、原理的境界に達しつつある。
- その境界を越える方法として、線形加速器によるプロジェクトが次々と走り出している。その代表が自由電子レーザーとリニアコライダーである。
- 物理的要請からも、リニアコライダーをぜひ日本で実現すべきである。

Revival of e+e- Ring Colliders ?

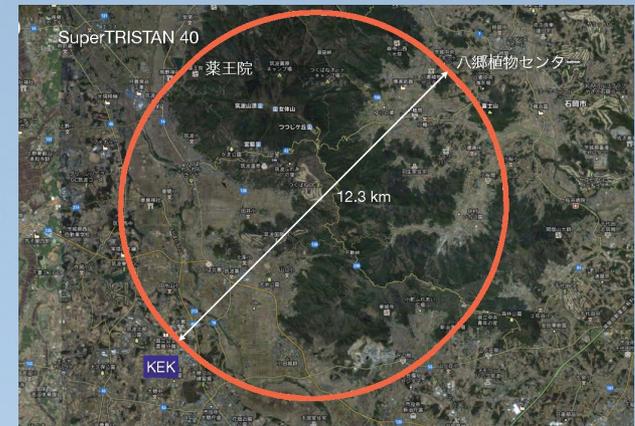
- To create Higgs by $e^+e^- \rightarrow ZH$ requires ECM~240GeV
- This is not too high compared with the final energy 209GeV at LEP
- They are stray sheeps without any foresights as energy frontier.



FNAL site filler
(16km)



VLCC (233km)
pp collider



SuperTRISTAN (40km,
60km)



e^-e^+ Higgs Factory

CHF (China) (50km, 70km)



LEP3 (27km), TLEP (80km)

Synchrotron Radiation Loss

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

- This (almost) determines RF **voltage** per turn
 - ~7GeV in LEP tunnel
 - Still possible owing the latest cavity technology.
 - But, **the electric power is huge! (e.g. 1.4GW)**
- US power consumption : 400GW.

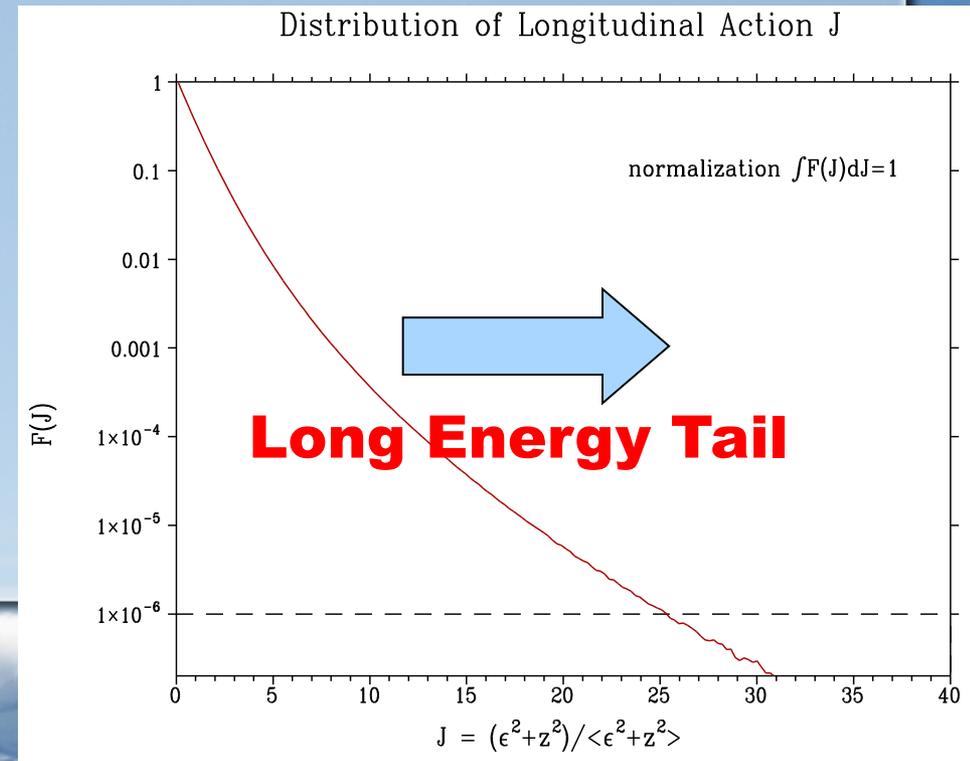
Beamstrahlung of e+e- Ring Colliders

Beamstrahlung causes significant energy loss

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

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

- Particles with large energy loss will be lost.
- Short beam lifetime.
- Hence, ring colliders are much more fragile than LCs.



Luminosity vs. Energy

- Luminosity is limited by Beamstrahlung, too.
- CME $> \sim 350\text{GeV}$, there is no possibility at all.
- At the lower energy, the luminosity is comparable to LC with much larger construction and operation costs.

example with

- $\eta = 2\%$
- $\xi_y = 0.15$
- $\epsilon_{yg} = 0.1\text{nm}$

