ILCの推進状況に関する第３回勉強会

栗木雅夫

広島大学　先進理工系科学研究科

2021/8/25（水）

目次

1 加速器超入門
加速器とは何か？

2 活躍する加速器
ダークマターから歯科治療まで

3 どうしたらビッグバンが作れますか？
コライダーという魔法の道具

4 21世紀のコライダーはリニア？
砲丸投げとやり投げ、どっちが遠くまで届くか？

5 ILC加速器の概要
超クールな加速器

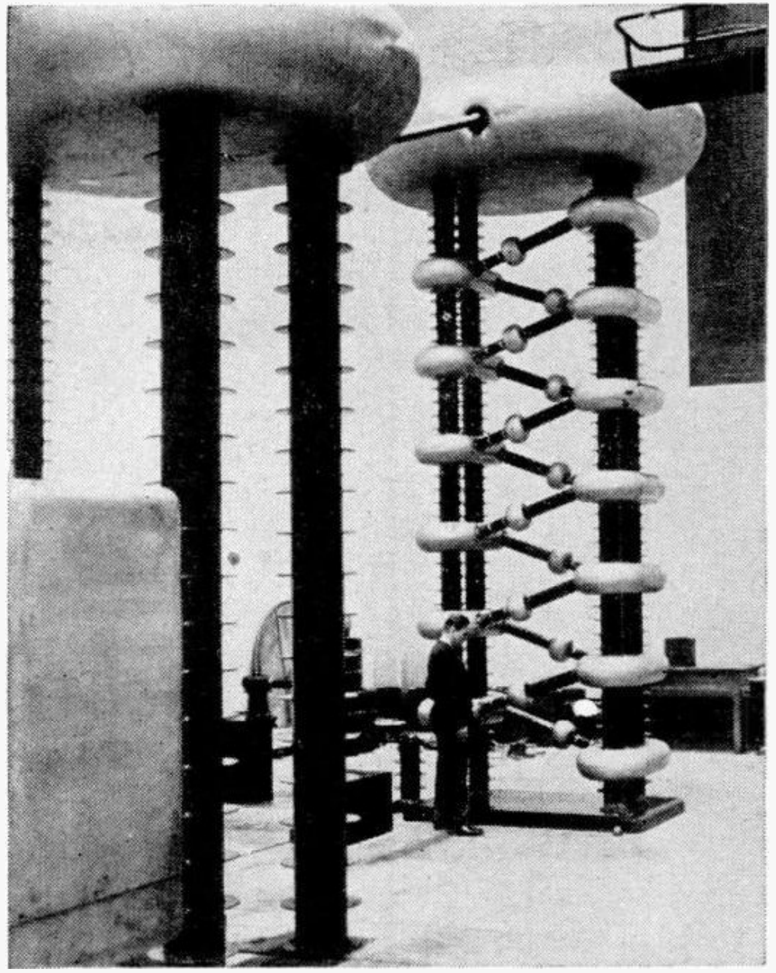
6 まとめ
そして旅は始まったばかり

加速器超入門

加速器＝エネルギーを増やす装置

電場（電圧）

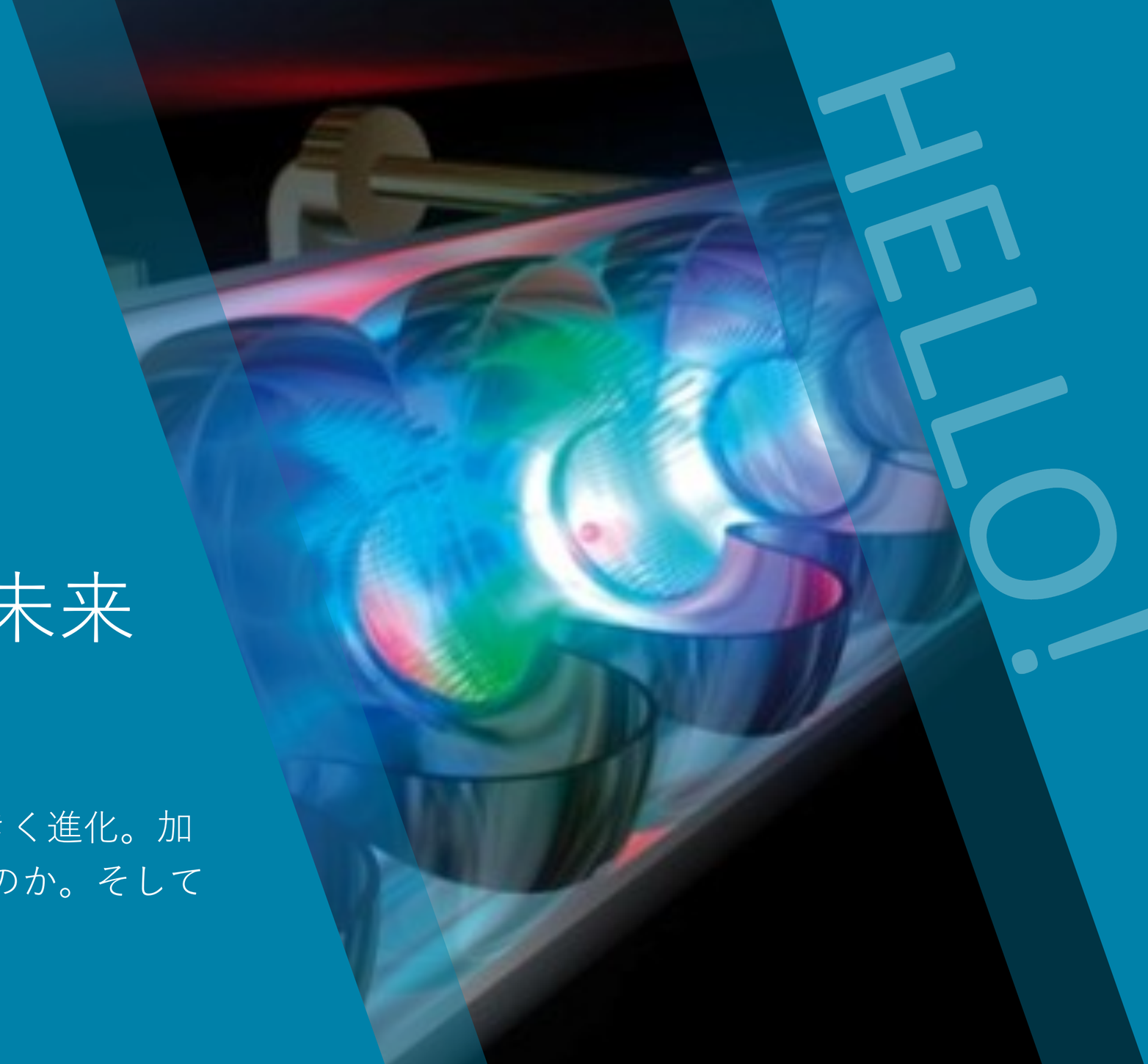
粒子



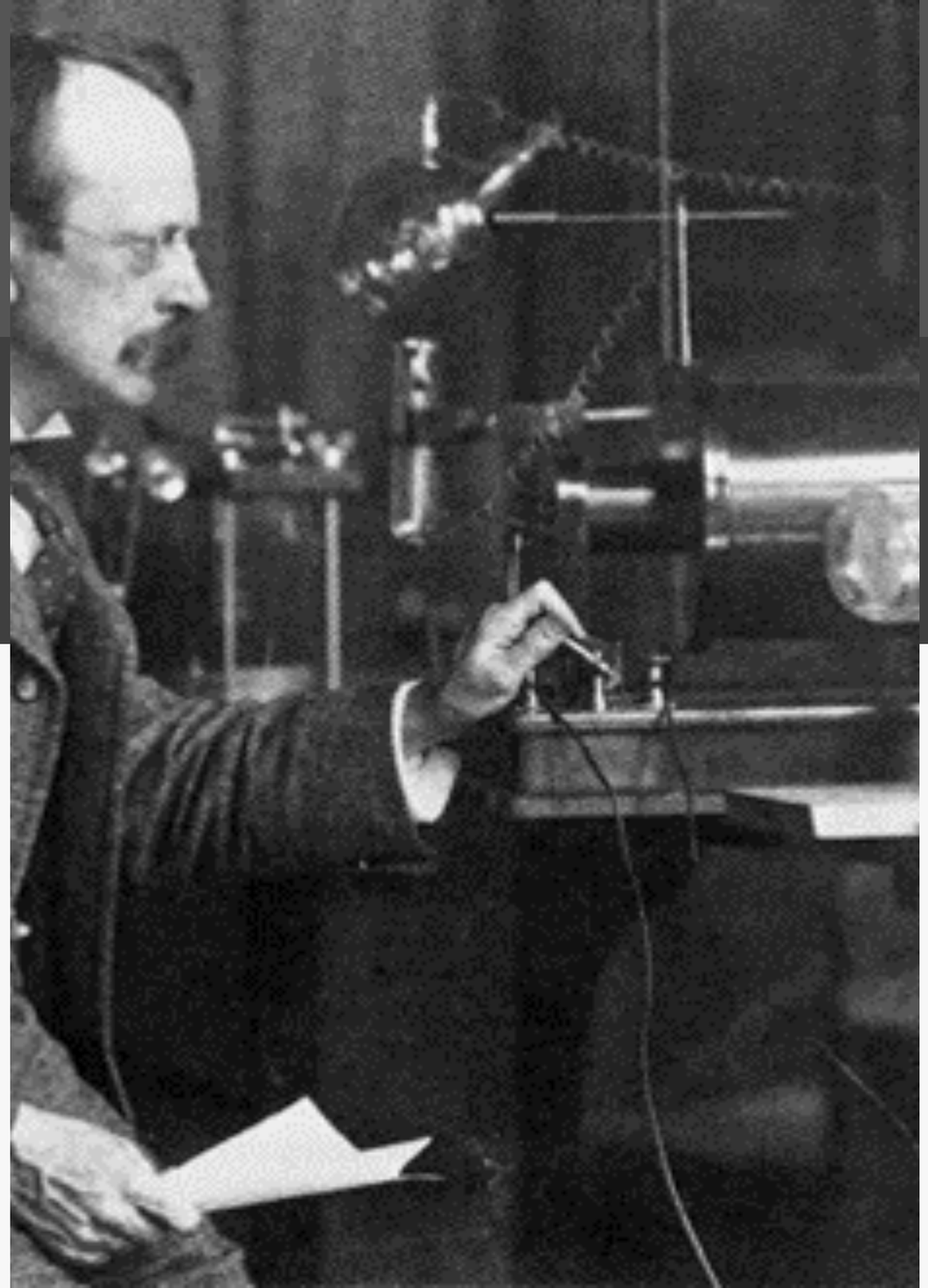
初期の加速器
Oxford大のCockcroft Walton加速器
（1960年代の未来のイメージ）

加速器が拓く未来(21世紀)

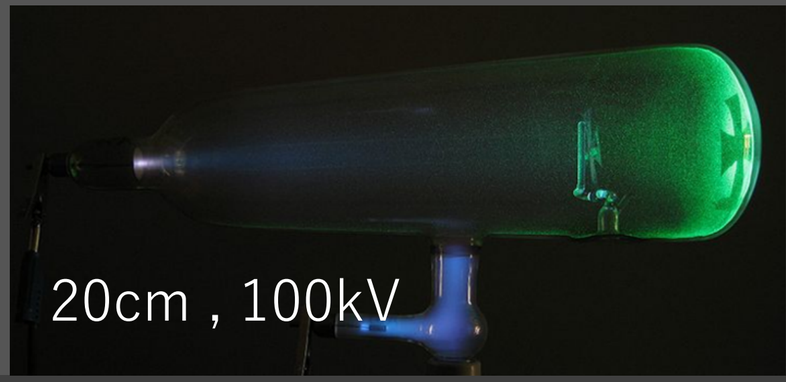
この100年の間に加速器も大きく進化。加速器は我々に何をもたらしたのか。そしてこれから何をもたらすのか？



HELLO!



1897 陰極線管を使い、電子を発見
人類と素粒子との初めての出会い

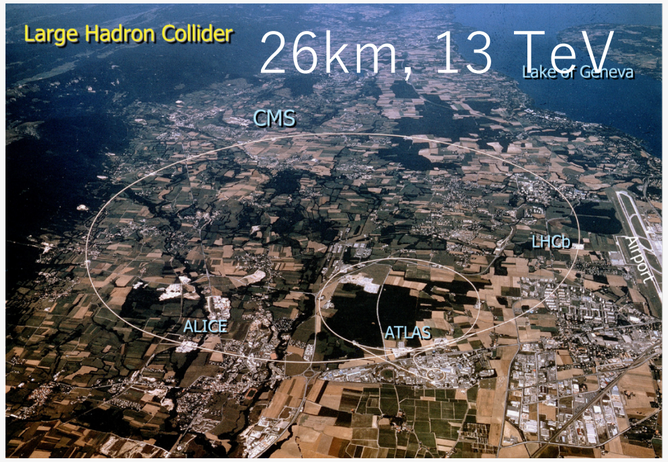


J. J. Thomson

初めて素粒子に出会った男

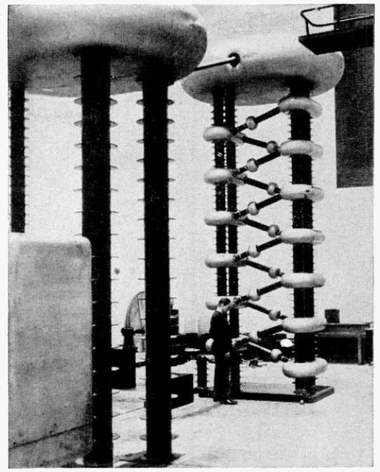
2008 LHC（CERN)稼働開始

110年で、
大きさ13万倍、
エネルギー13億倍



加速器発展の歴史

新たな加速器は新たな扉を開く

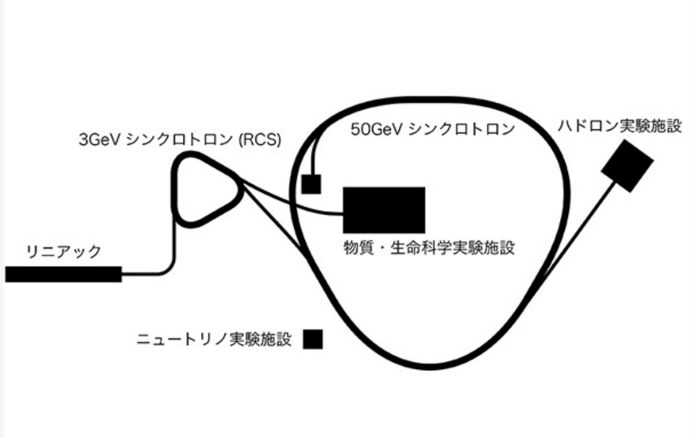


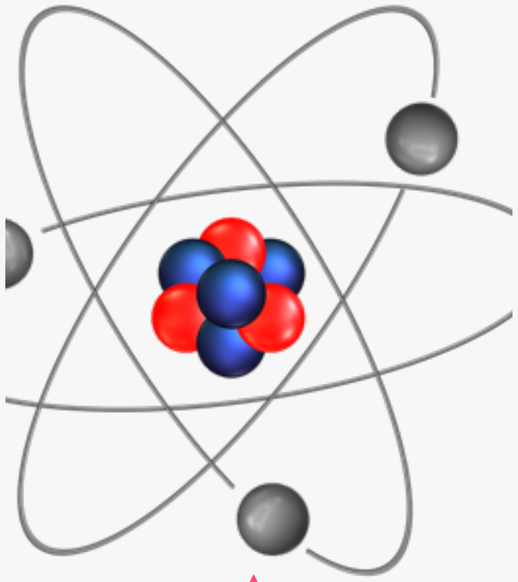
静電型加速器　とにかく高電圧だ　100,000 eV

サイクロトロン　渦巻加速　200,000,000 eV

シンクロトロン　シンクロ（同期）せよ、さらば加速されん　7,000,000,000,000 eV

コライダー　衝突は創造





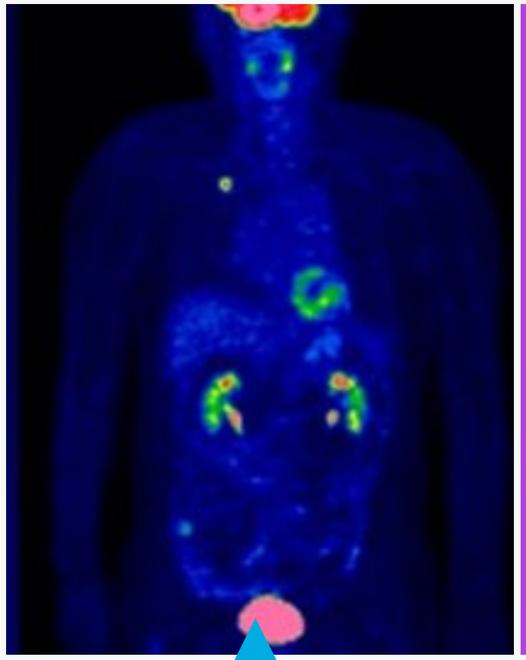
微小な世界

極微の世界を探る。

細胞、病原菌

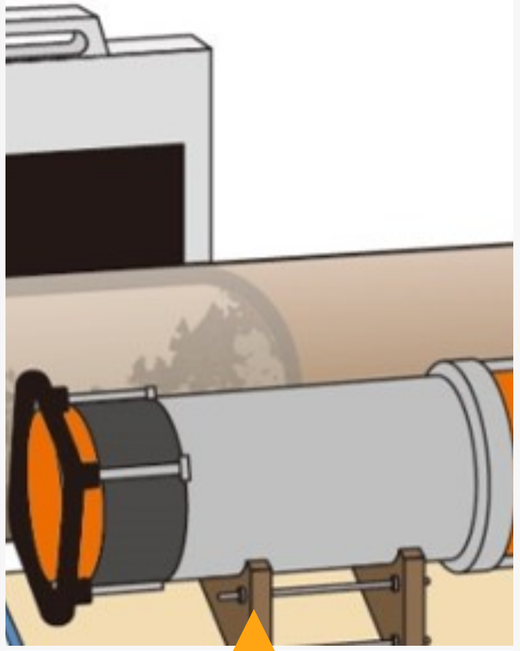
ウイルス

ナノサイエンス



薬を設計せよ

タンパク質、酵素の構造と機能解析により、新薬を設計。

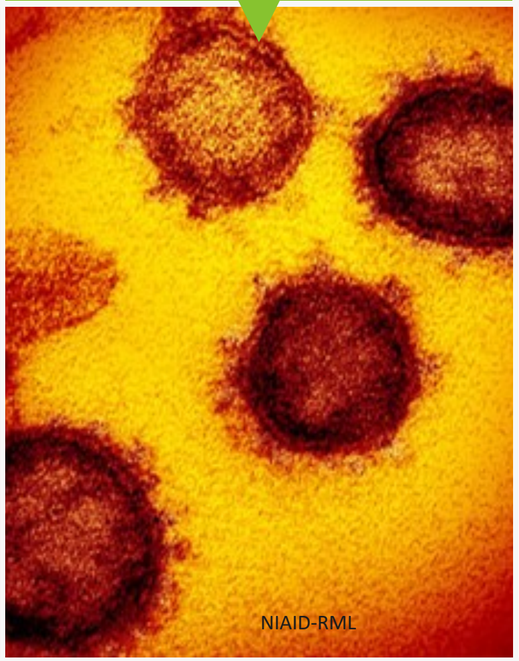


究極の物質

物質の最小単位は？

質量はどう生まれたか？

宇宙の構造は？



健康を支える

レントゲン透視撮影

CT

PETガン診断

ガン放射線治療

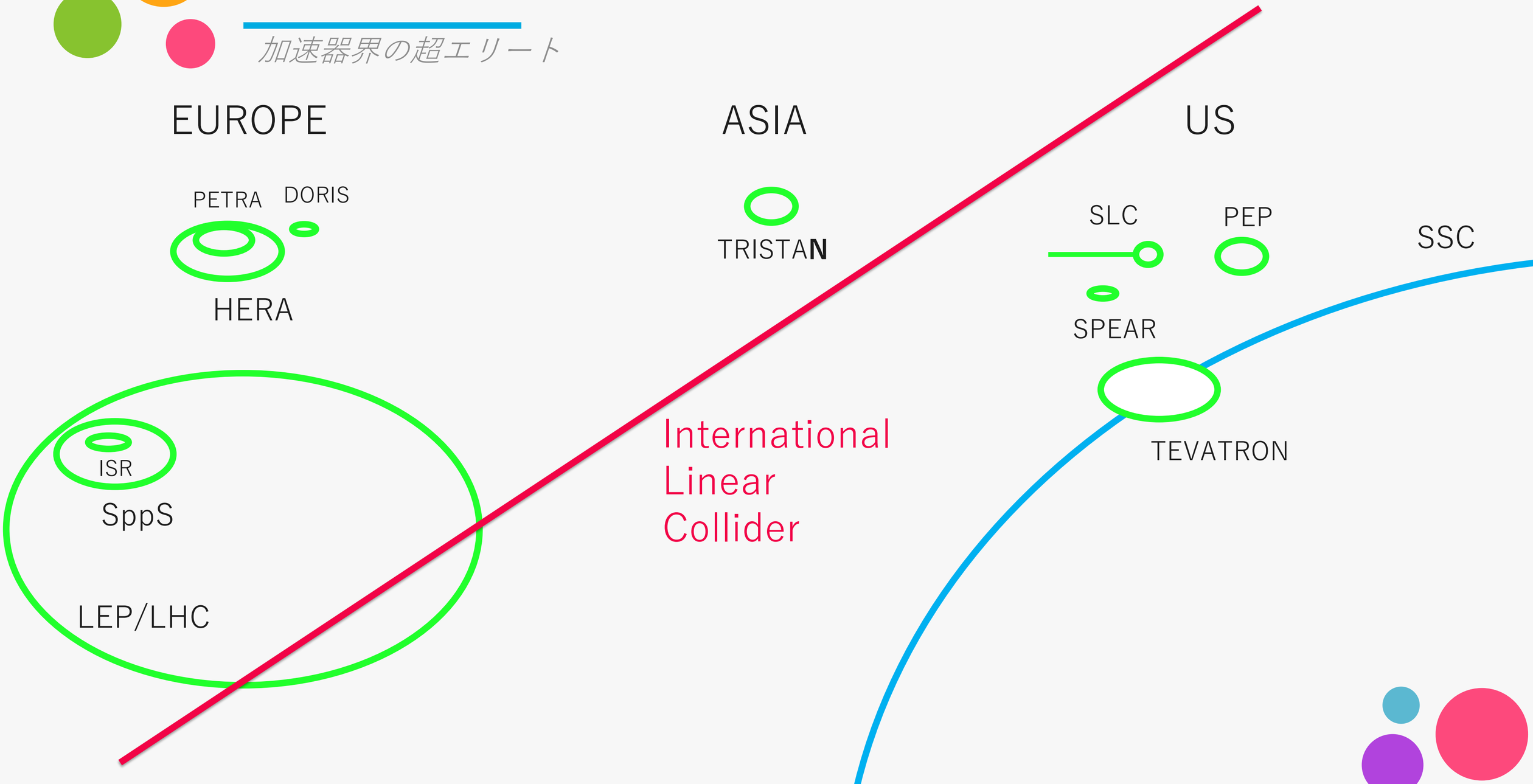
安全を支える

構造物の非破壊検査（耐久性確認）

セキュリティ検査

エネルギーフロンティア

加速器界の超エリート

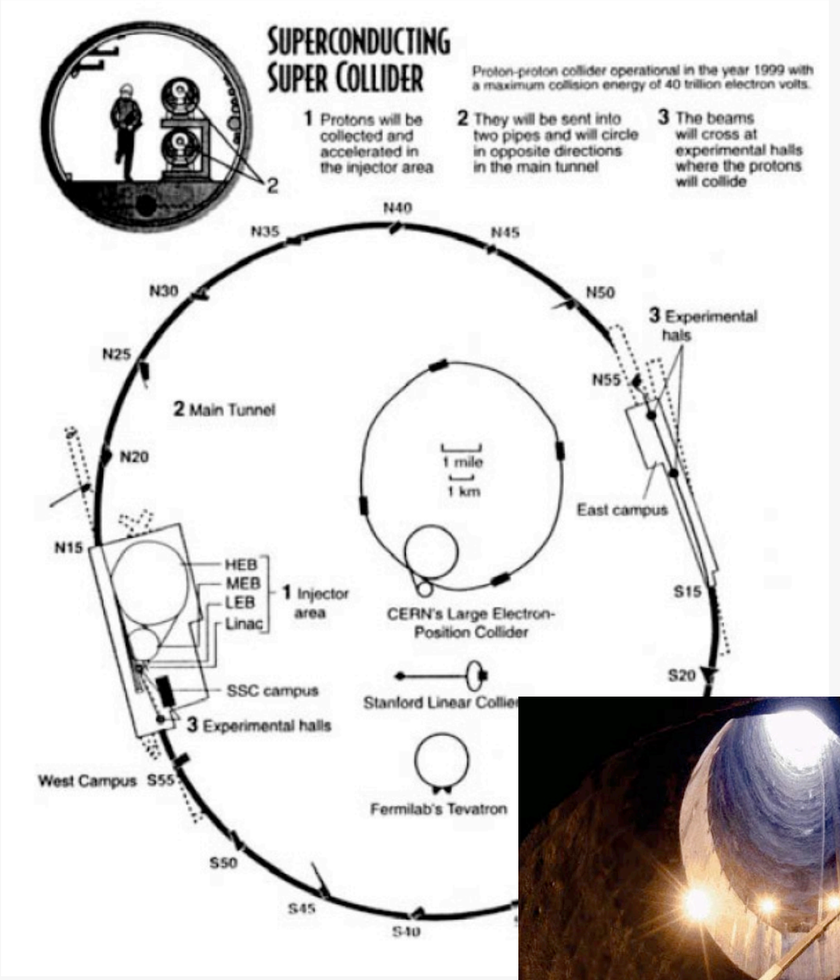


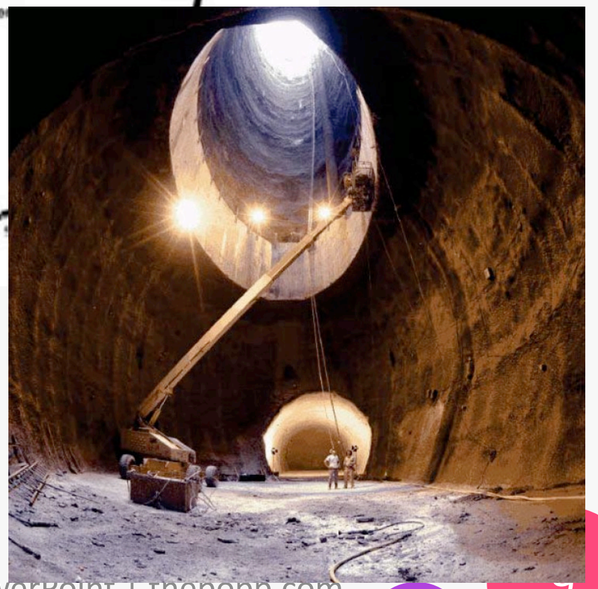
SSC

Superconducting Super Collider

項目	SSC	LHC
周長	87km	27㎞
重心系エネルギー	40TeV	13 TeV

- 陽子＋陽子コライダー.LHCの3倍の規模。
- 1986年 CDR（Conceptual Design Report).
- 1987年 SSC計画を政府が承認.
- 1989年 Texas州ダラス近郊に建設開始, 5.9BUSD.
- 1991年 加速器仕様変更. コスト8.3BUSD.
- 1993年 予算により工期を3年延長, 11BUSD.
- 1993年10月21日　両院協議会でSSC中止を決定。

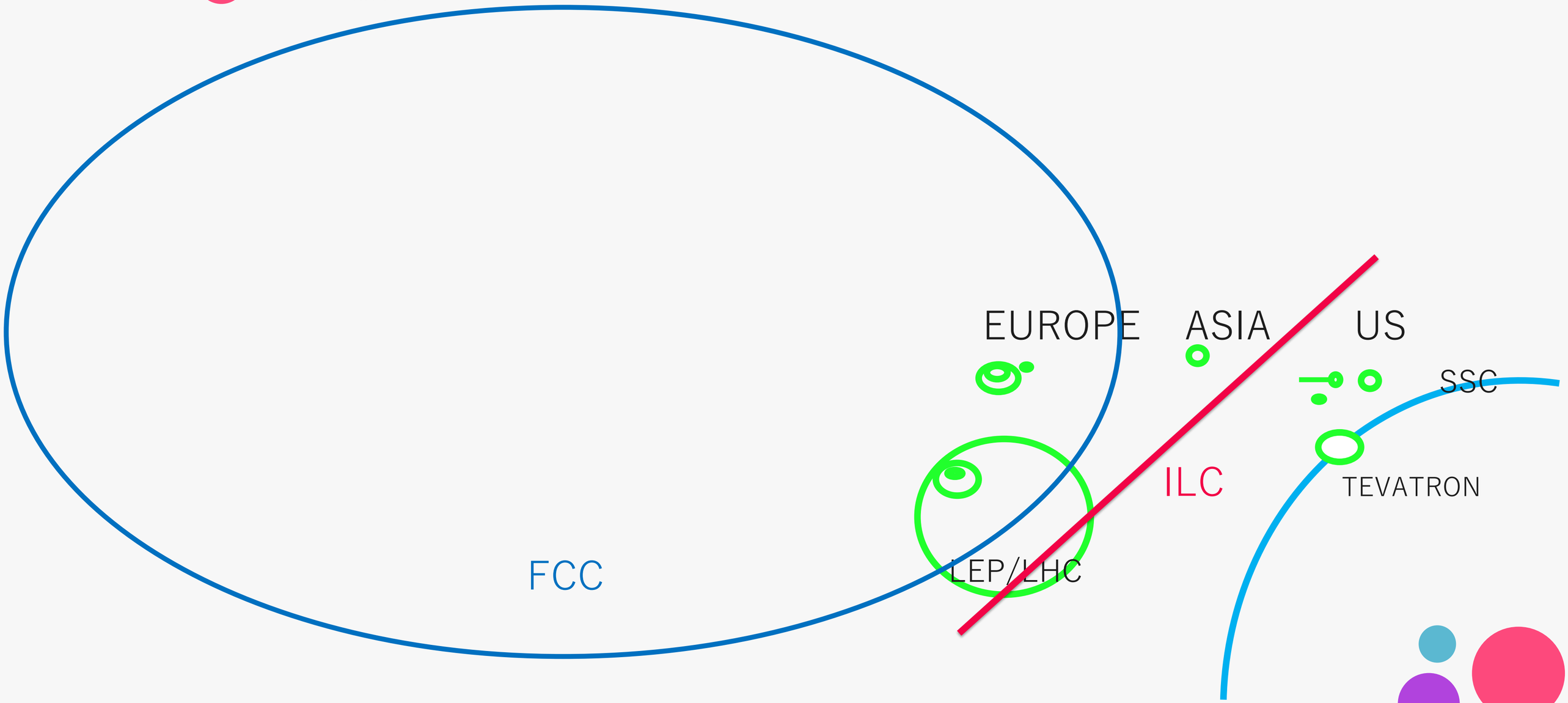




仕様	変更前	変更後
磁極口径	4cm	5cm
HEB入射エネルギー	1 TeV	2 TeV
MEB入射エネルギー	100 GeV	200 GeV
主リング周長	83km	87km

エネルギーフロンティア

加速器界の超エリート



コライダー

動いてはいけない

ヒッグス粒子をつくるには

コライダー（効率的）

ビームエネルギー
125GeV + 125 GeV
（ILC1台分）

固定標的（運動エネルギーの分だけ損）

ビームエネルギー
62500000 GeV
（ILC250000台分）

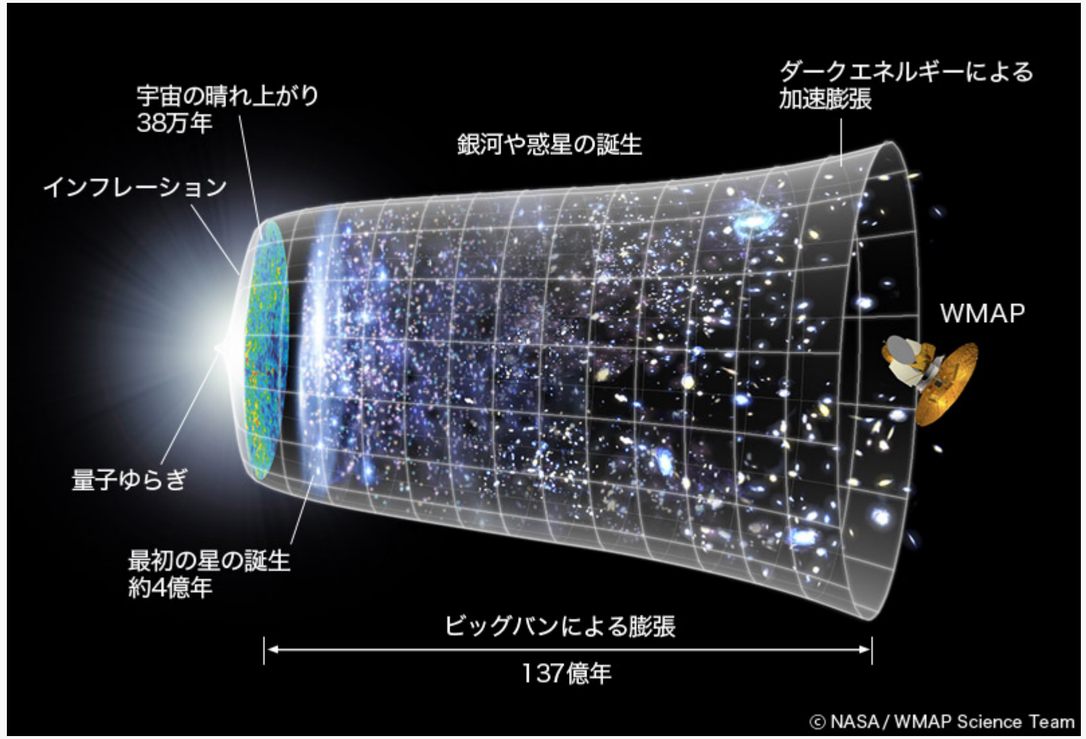
衝突した後、粒子が動いていると、運動エネルギーの分だけ無駄となる。

純粋なエネルギーの塊

全ては無から始まる

無から生じるビッグバン

エネルギーだけで、外に何もない状態＝ビッグバン。これをつくる方法は、物質と反物質の消滅。



物質

エネルギー

反物質

どうしたらビッグバンをつくれますか？

先生の解答

加速した電子と陽電子を衝突させて、消滅させましょう。

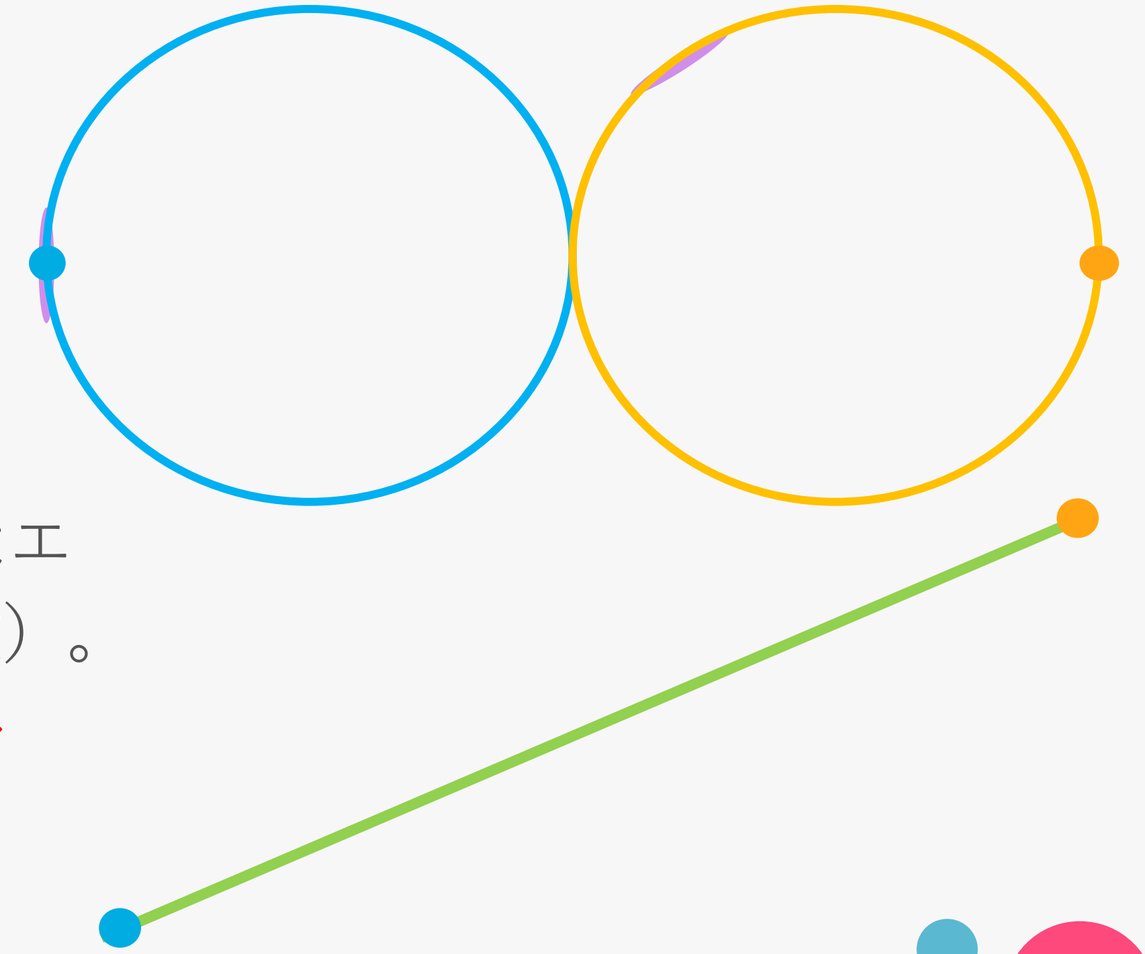
電子

エネルギー

陽電子

21世紀のコライダーはリニア

新しい酒は新しい革袋に



20世紀のコライダーの多くは円形コライダー

1. 多数回の加速で高エネルギー。

2. 曲げるとエネルギーがこぼれおち、その量はエネルギーが高くなるほど多くなる（四乗で発散）。

21世紀のコライダーは曲げない加速器＝リニア

限界の無い加速器、リニアコライダー

技術の進歩により再現なく進化

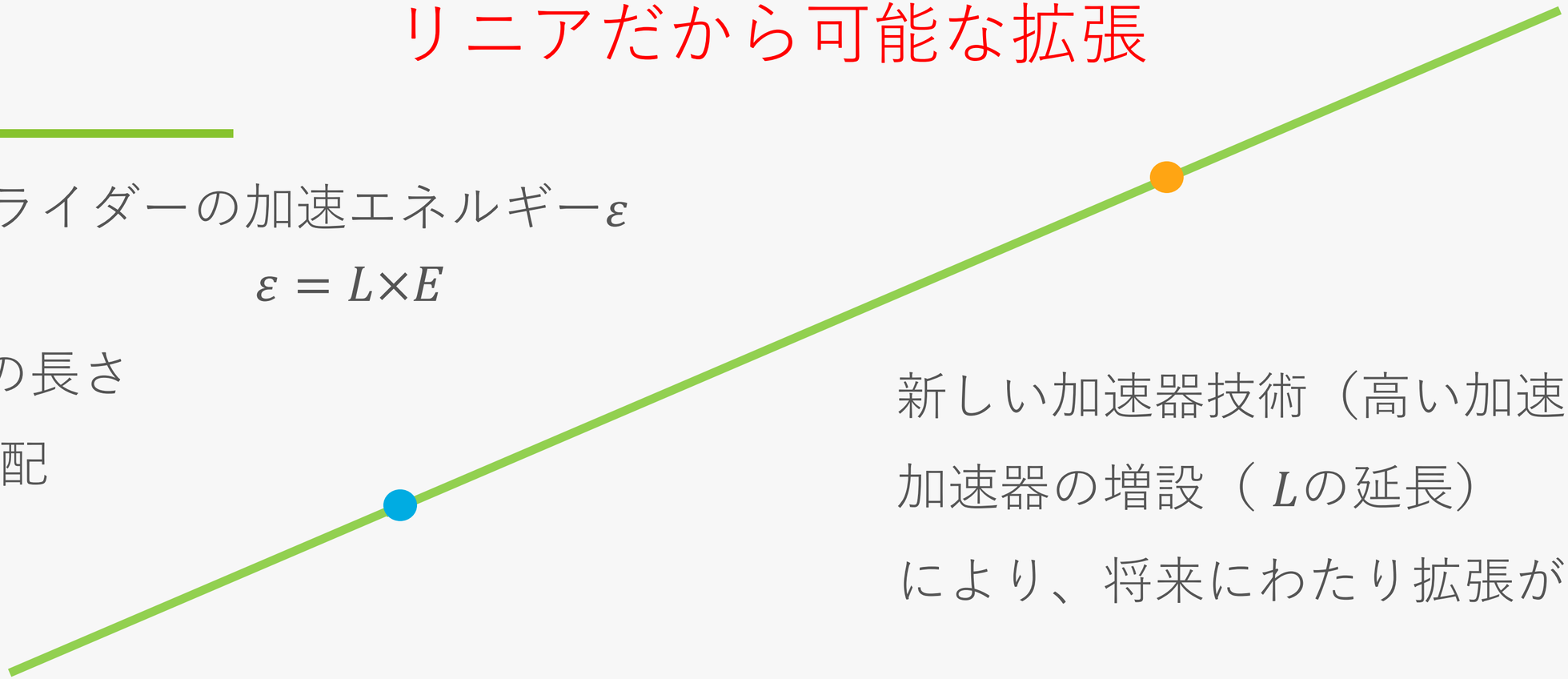
リニアだから可能な拡張

リニアコライダーの加速エネルギーε

$$\varepsilon = L \times E$$

L:加速器の長さ

E :加速勾配



新しい加速器技術（高い加速勾配E ）

加速器の増設（ Lの延長）

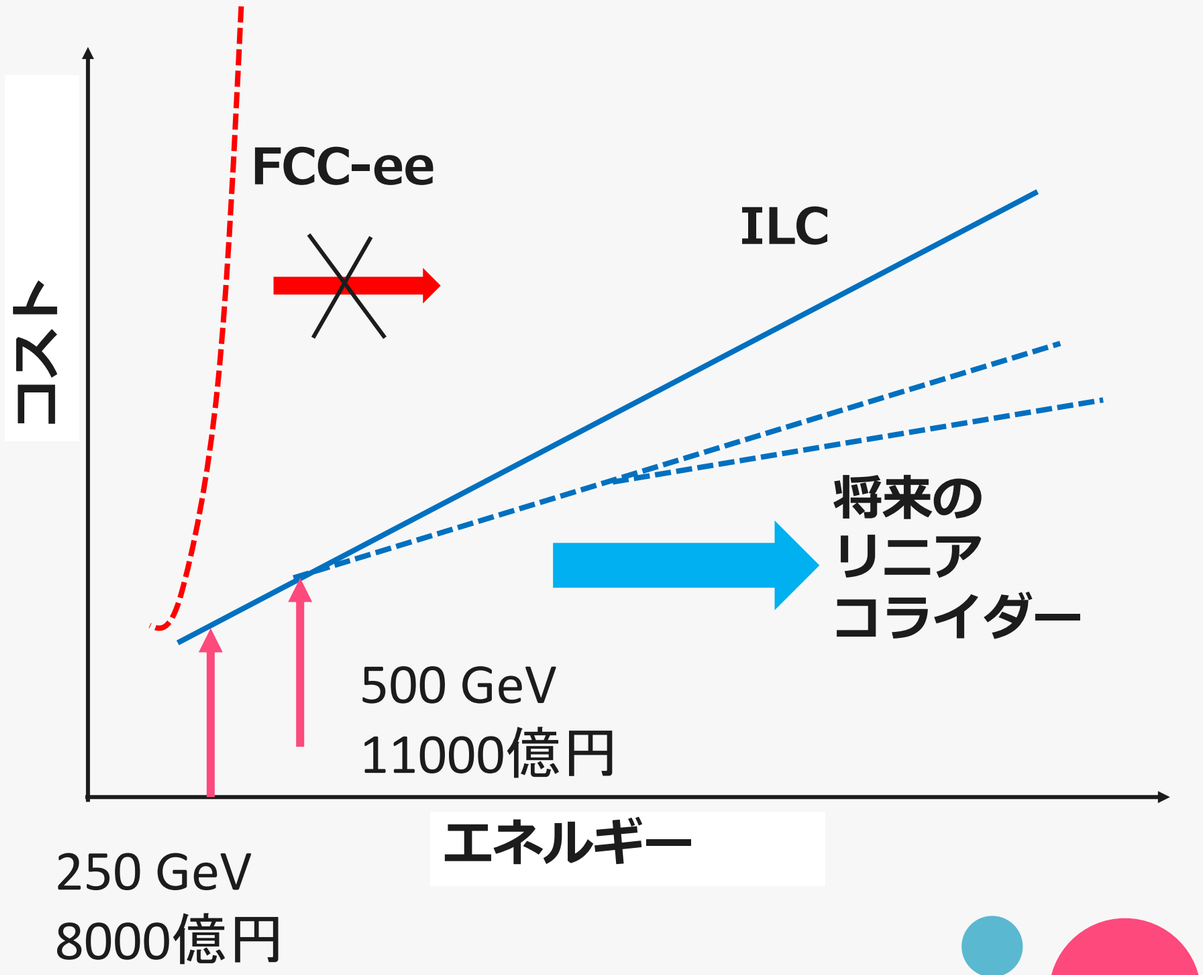
により、将来にわたり拡張が可能

ILCは未来のコライダー

FCC-eeは最後のリングコライダー

電子リニアコライダーの時代

- 原理的な限界が無いので、新しい加速技術を導入し、距離を延ばせば、エネルギーは際限無く上がる。
- リングコライダーは強いシンクロトロン放射（エネルギーの四乗に比例）による損失により、新技術を導入しても、エネルギーを上げられない。



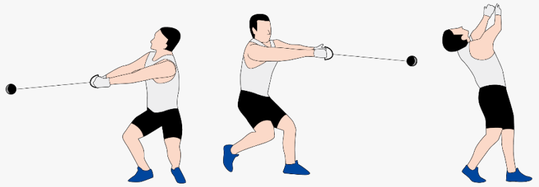
リニアコライダー、その挑戦

新しい時代の新しい挑戦

強烈な一撃

加速は一度きり。強力な加速器。

⇔円形コライダーはハンマー投げ。繰り返し加速。



遠くの的を狙え

WIKIPEDIA

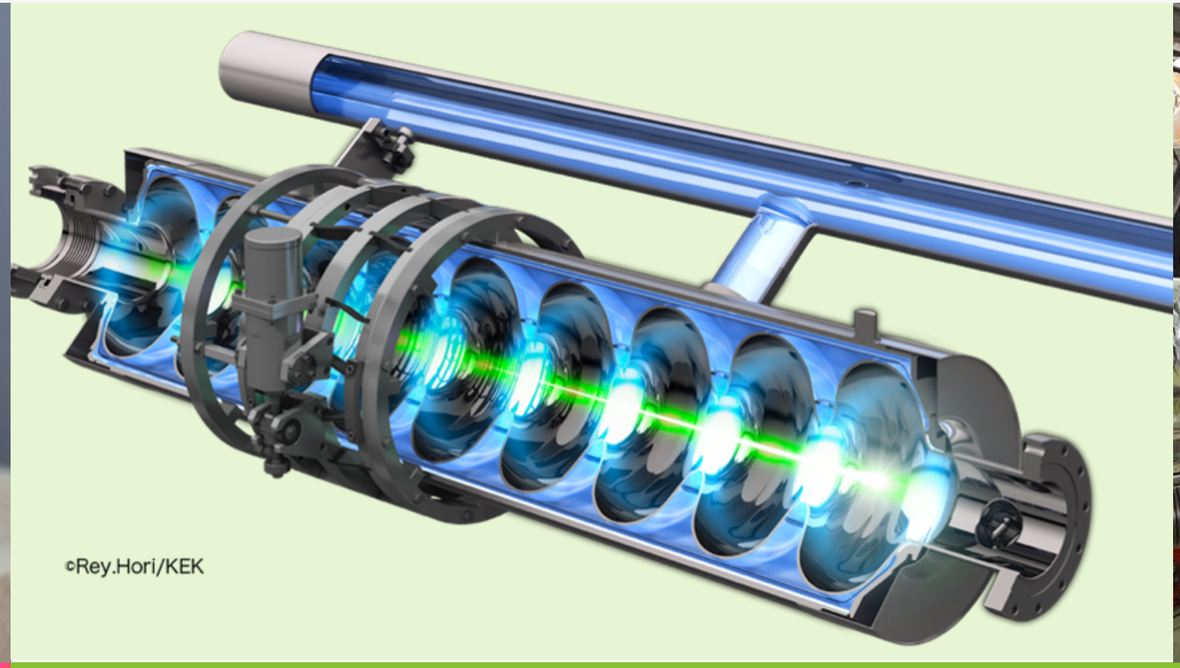
「大きさの無い」電子と陽電子を正面衝突させる。名人を超える衝突精度。

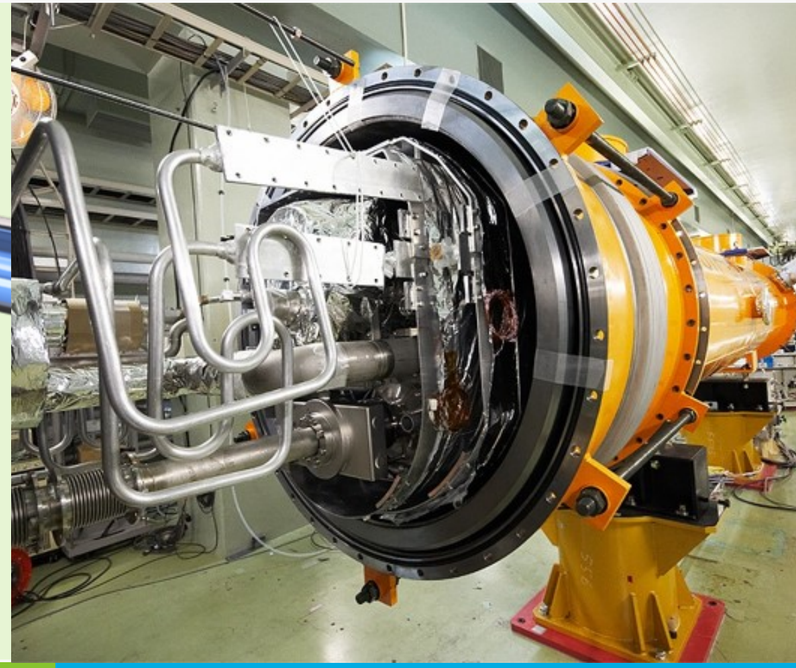
生まれながらのエコ

ビームは再利用できない。大切な少ないビームを効率的に利用。

超伝導加速器

ILCは超クール





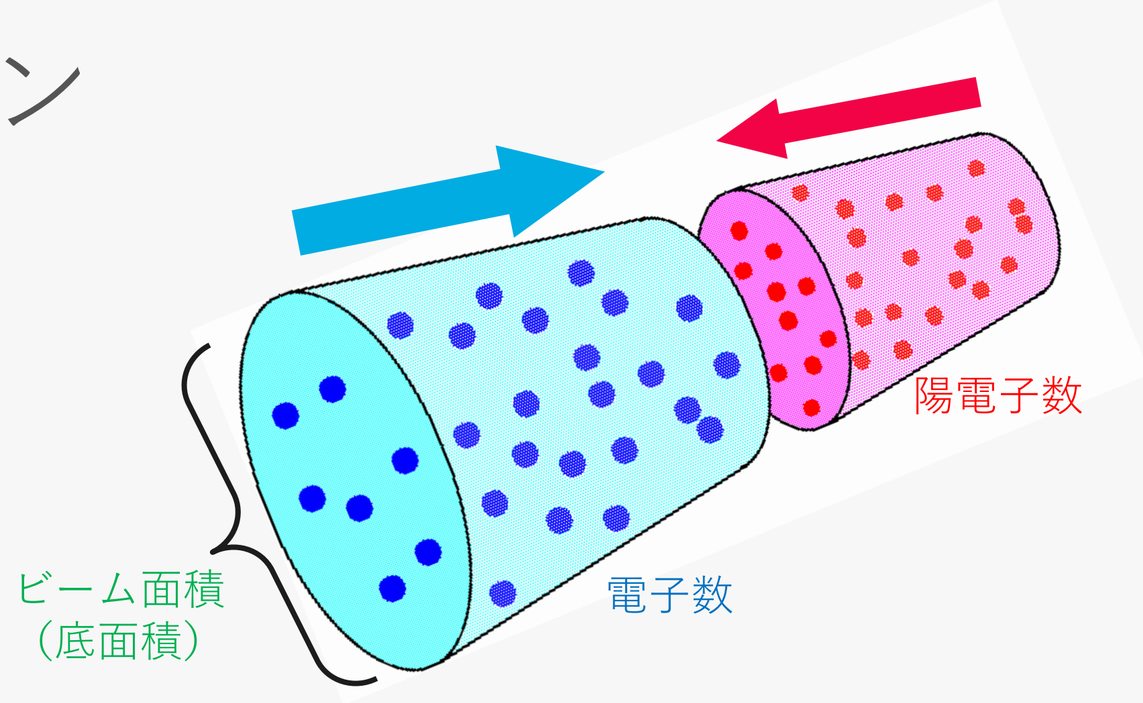
超流動ヘリウムにより2.0 Kという超低温まで加速器（Nb空洞）を冷却。超伝導にする。

ほぼ電力損失が無い状態で、高い加速勾配 31.5 MV/mを実現。

一気の加速と消費電力の低減（エコ）を両立。

100万回のビッグバン

ILCはエコなビッグバン工場



一秒あたりのビッグバンの回数

少ない電流、ナノビームで
衝突させると、たくさんの
対消滅反応

省電力で、
大量のビッグバンを生成

二つのコライダー

ハイパワーか、エコか

Tokai U.

リニアコライダー

省電力（小さいビーム電流）で大量のビッグバンを生成。小さい電力で最大のパフォーマンスを発揮できるように最適化されたシステム。

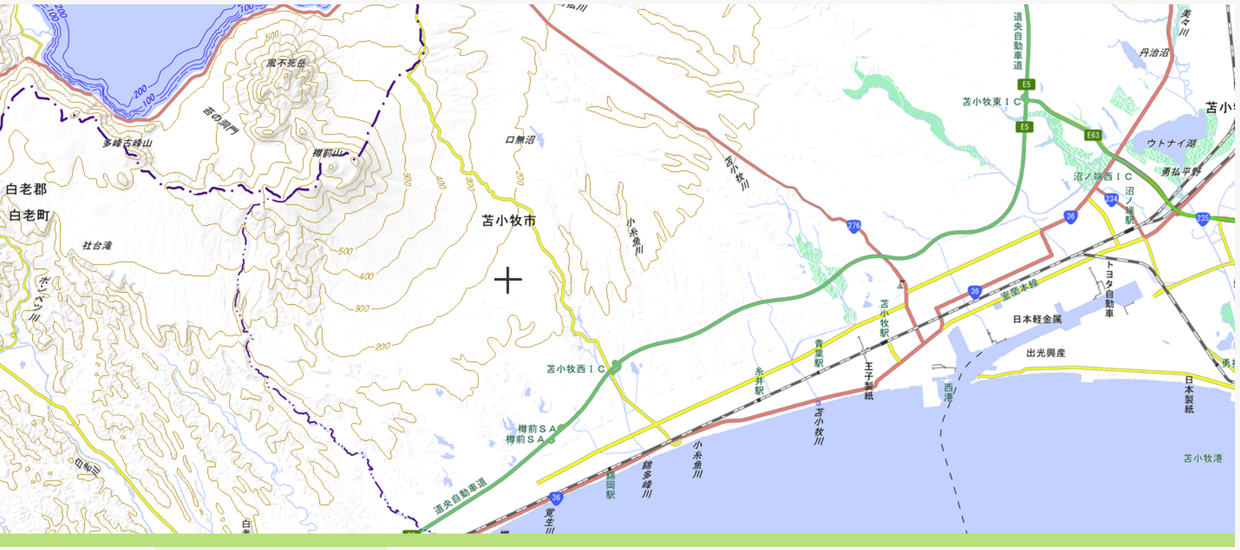
リングコライダー

WIKIPEDIA

大電流ビームで、大量のビッグバンの生成を目指す。出力を最大化することで、最高のパフォーマンスを得ることを目指すシステム。

ナノビームへの道

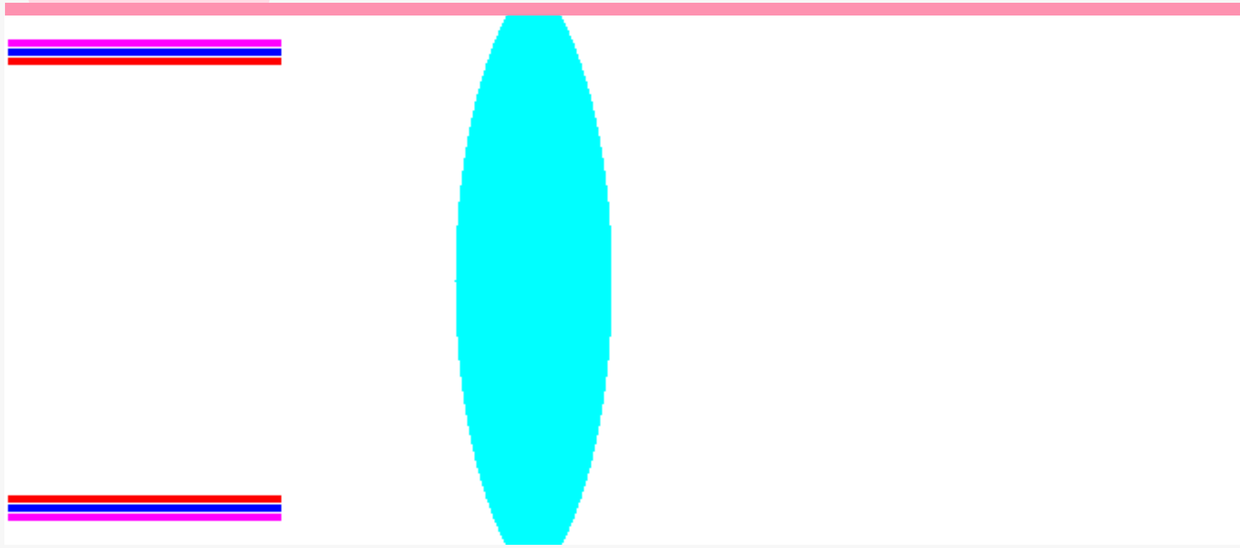
良質なものだけが究極に至る



世界で最も平行なもの

ILCビームの角度広がりは4.0x10^{-14} rad.
日本の鉄道最長直線区間(28.7km, 室蘭本線）進んでも、そのずれは1.2ナノメーター。

色を消せ



ビームエネルギーのわずかな広がりで、絞られ方に差がでて、うまく絞れない（色収差）。非線形磁場を導入し、色収差を補正して、ボケの無いナノビームを生成。

ナノビームの実証

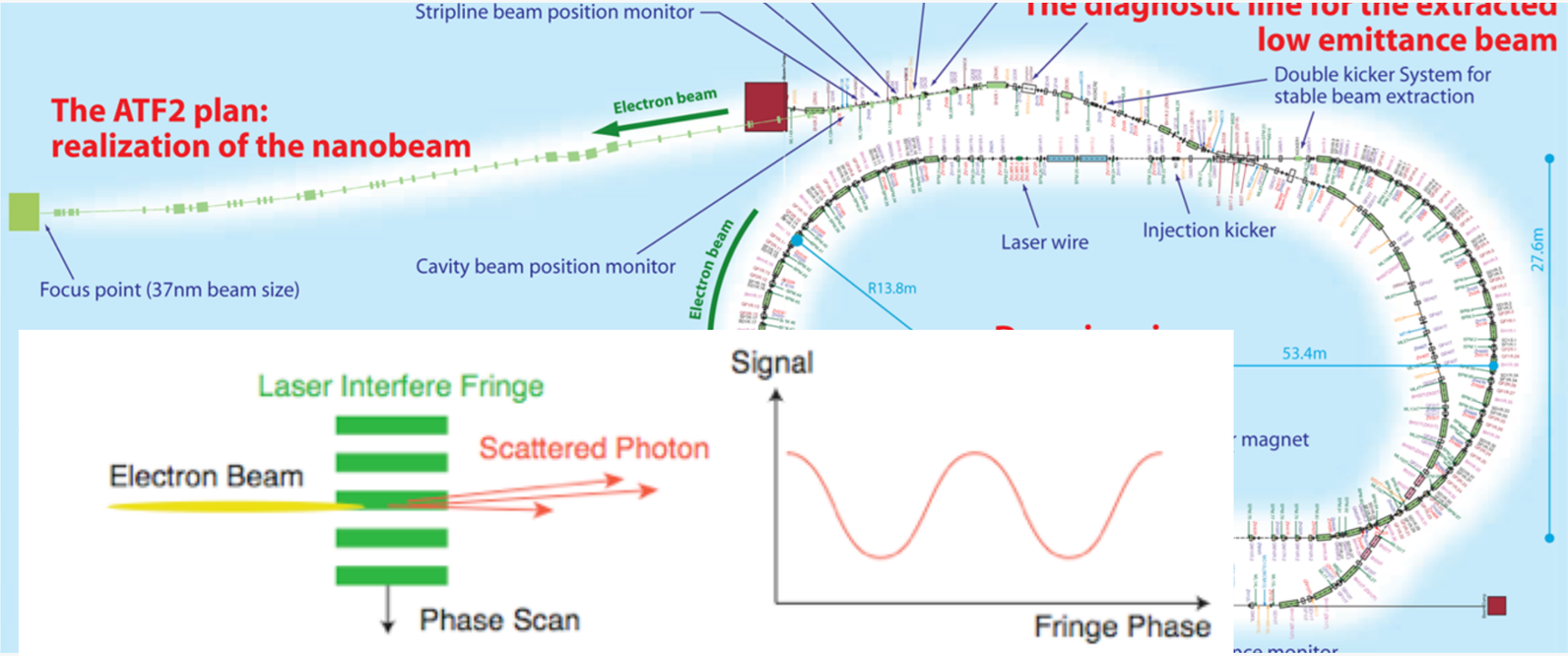
すでに我が手にあり

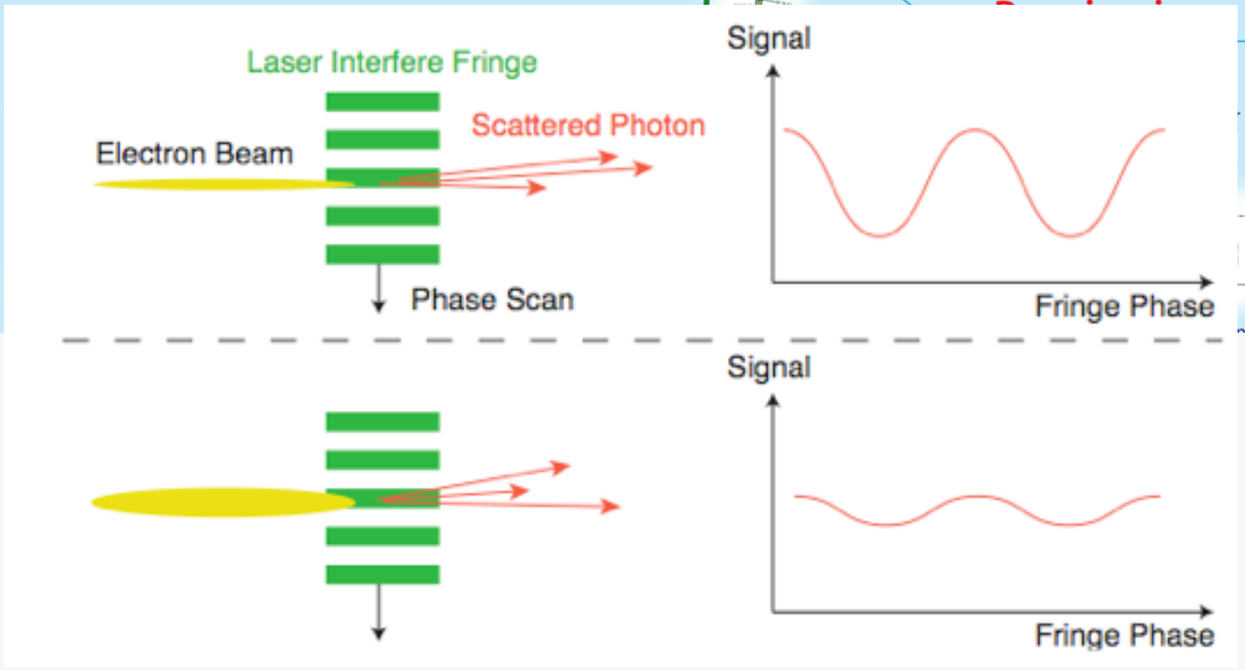
KEK（茨城県、つくば市）

ATF 2 試験加速器で

45nm極小ビームを実証

（ILC最終目標37nm）





レーザーの干渉縞を電子ビームでスキャンし、電子ビームの大きさを測定。

ILC加速器、まとめ

時代を切り拓く加速器

ダークマターから歯科治療まで

加速器は基礎物理研究から、身近な医療、健康、安全まで、社会の進歩と維持・発展に大きく貢献。これからもその活躍の場は広がることでしょう。

どうしたらビッグバンを起こせますか？

真空中で電子と陽電子を衝突させましょう。
それにはコライダーという加速器が最適です。

新しい時代のコライダー、それがリニアコライダー

省エネ型のナノビームで大量のビッグバンを作り出す、それがリニアコライダー。

エネルギー拡張も容易で、リングコライダーに代わり、これからの電子コライダー実験を担います。