

A stylized circular graphic composed of several concentric, overlapping arcs in various colors (orange, purple, green, blue, pink). Four large colored dots (pink, blue, green, purple) are positioned along the top arc, and three small black dots are positioned along the bottom arc. The text "新時代を開く加速器ILC" is overlaid in the center of the graphic.

新時代を開く加速器ILC

栗木雅夫

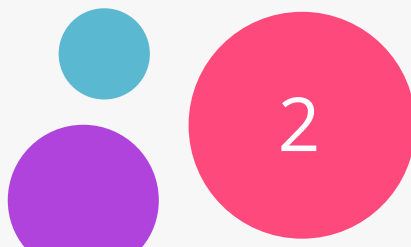
広島大学 先進理工系科学研究科

国際リニアコライダー講演会

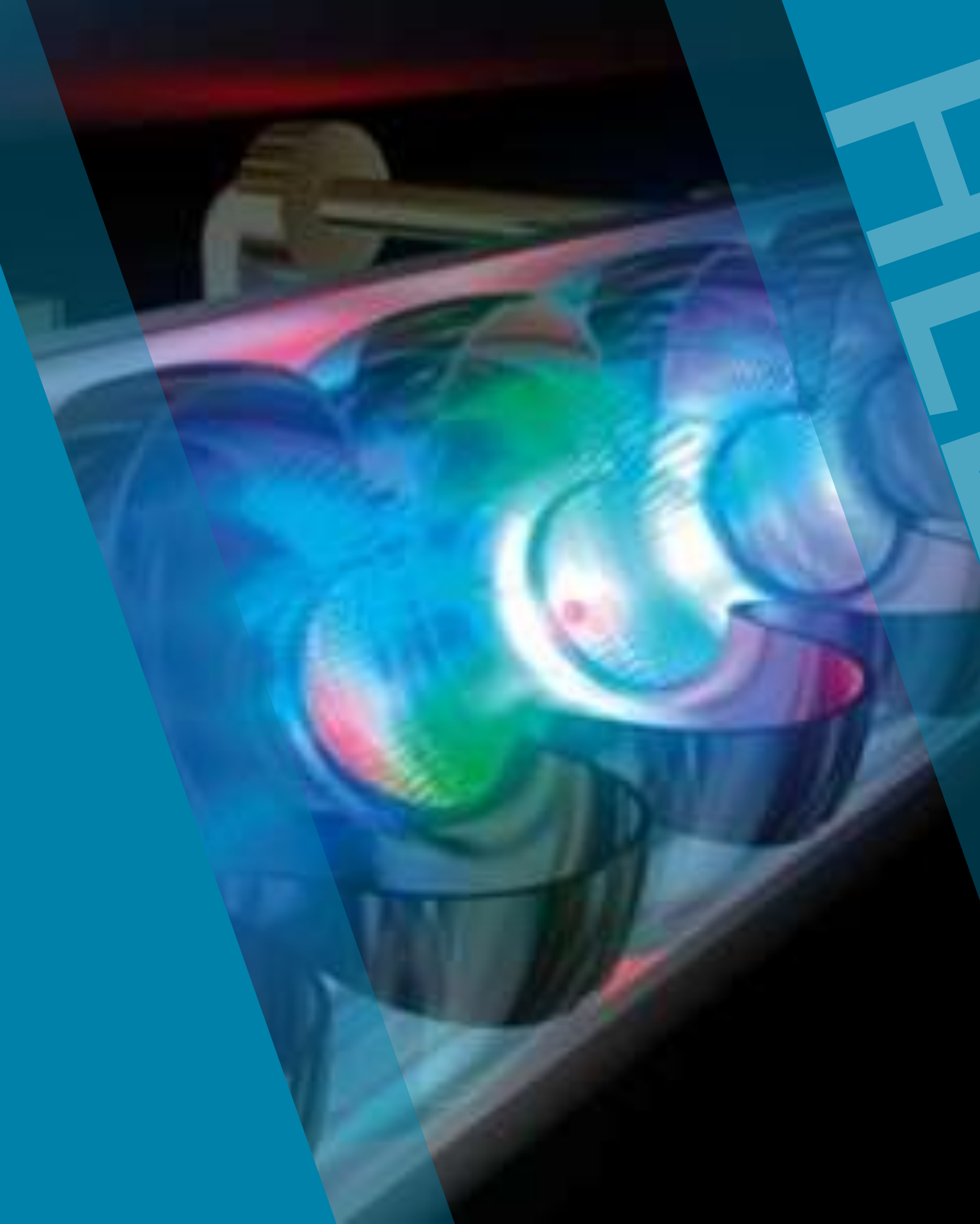
2023/1/23 (月)

新時代を 開く加速器 ILC

- 1 加速器とは？
宇宙の謎から絆創膏まで
- 2 加速器で宇宙をつくる
宇宙の謎を調べる実験室
- 3 21世紀のコライダーはリニア
新時代の加速器
- 4 国際リニアコライダー計画
今まさに始まる革新
- 5 まとめ



加速器とは？



THE
IOI

加速器とは？

物体に力が働くと加速される

粒子を加速する装置



加速器 = 電気力で粒子を加速

電気力で粒子を加速

粒子

+

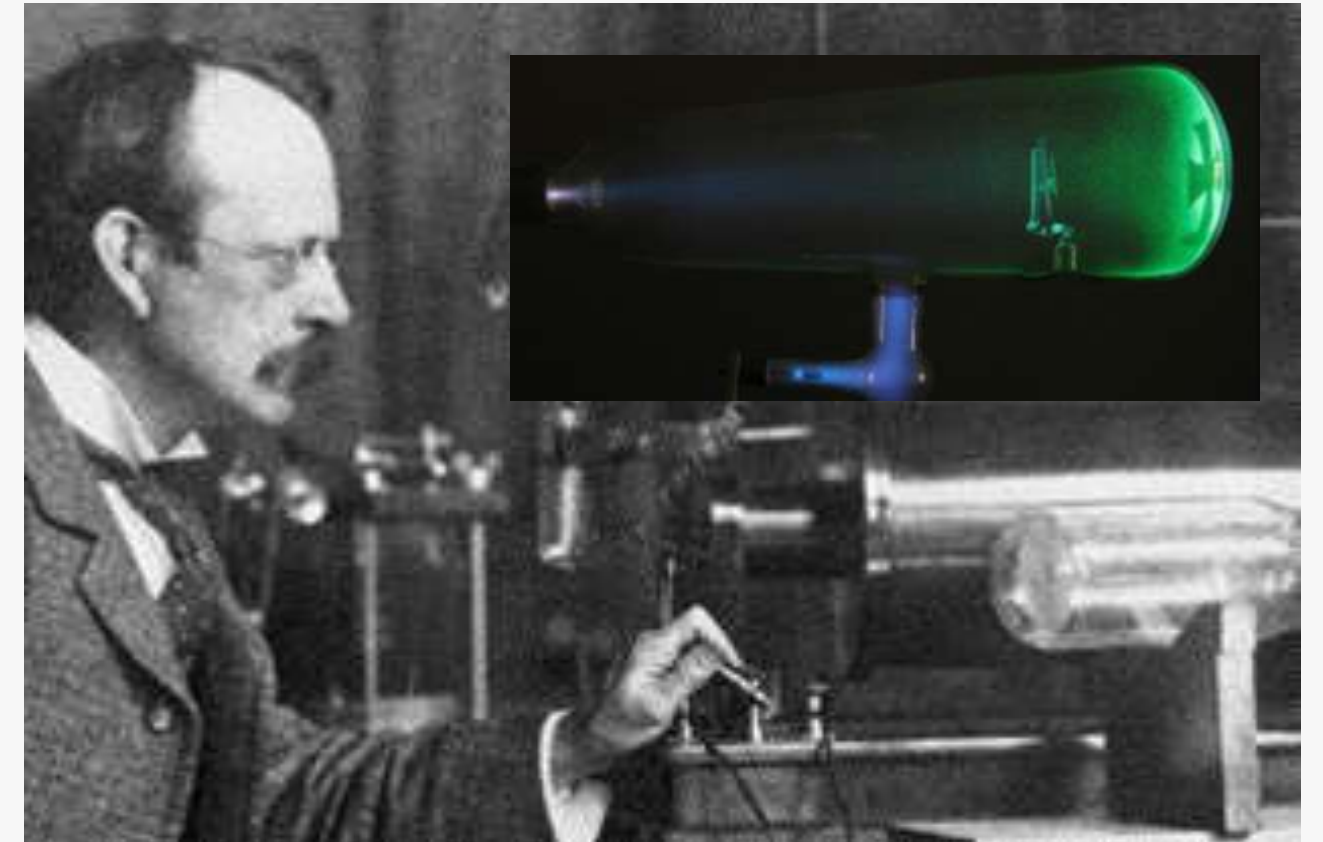
+

電場 (電圧)

-

1897 陰極線管で
電子を発見

20cm , 100kV

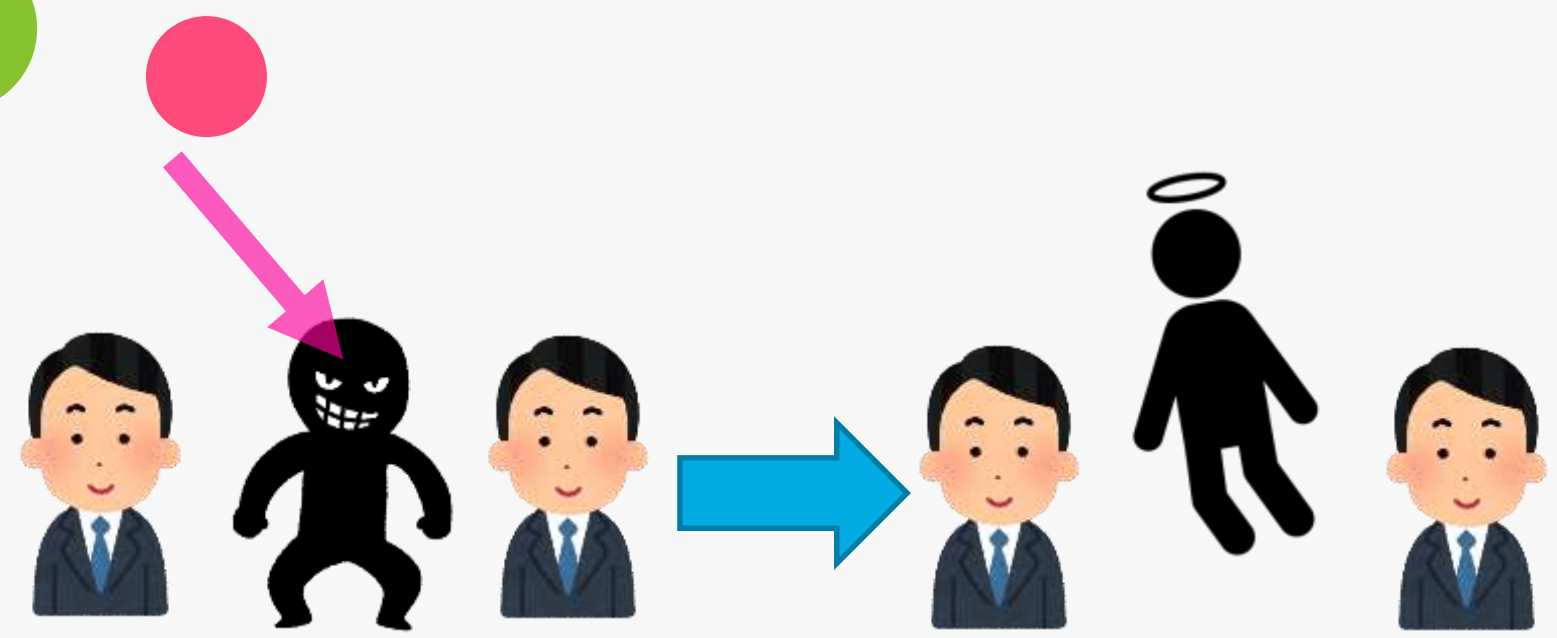


2011 LHC加速器で
ヒッグス粒子を発見

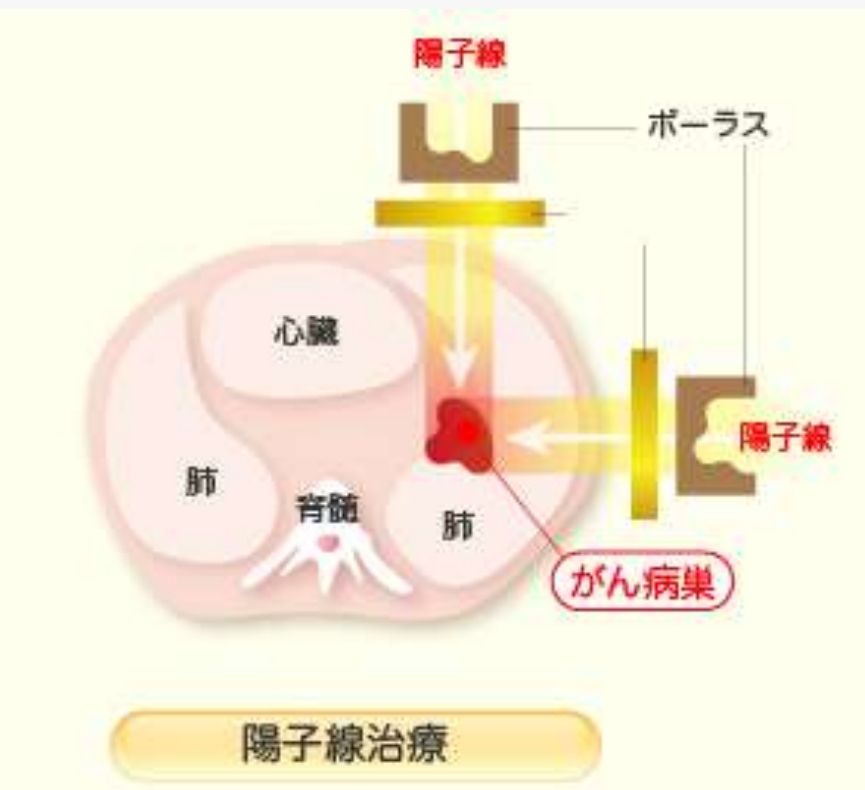
27km, 13.6 TeV



身近な加速器：加速器でがんを治療



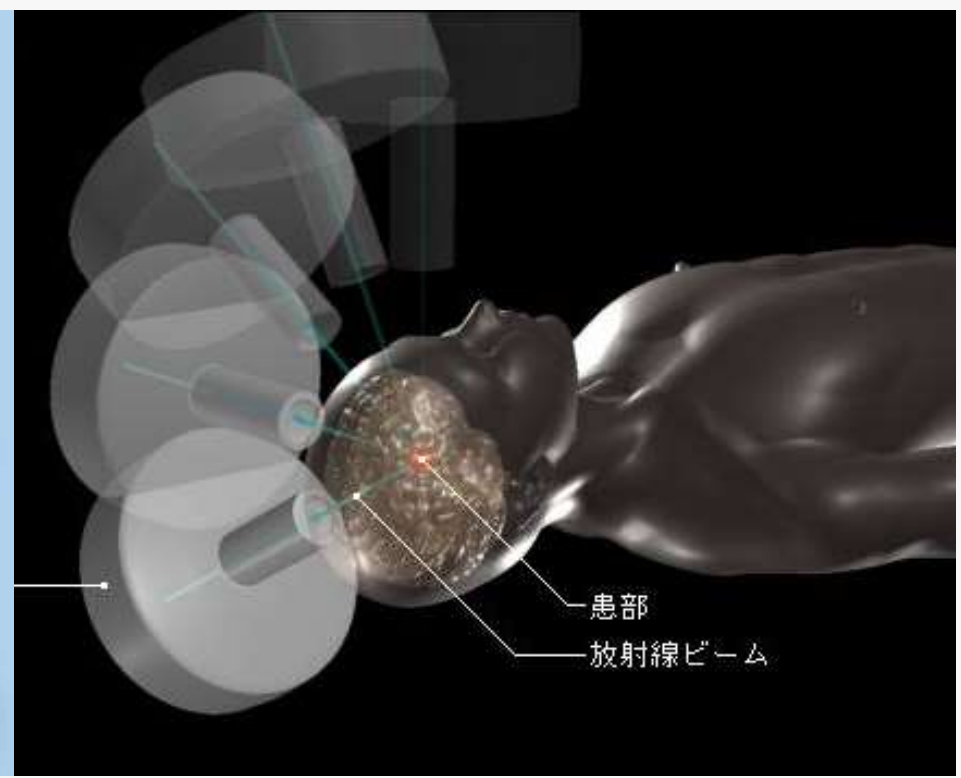
正常組織を傷つけずにがん細胞のみを狙い撃ち。体に優しい治療。



陽子線，重イオン治療

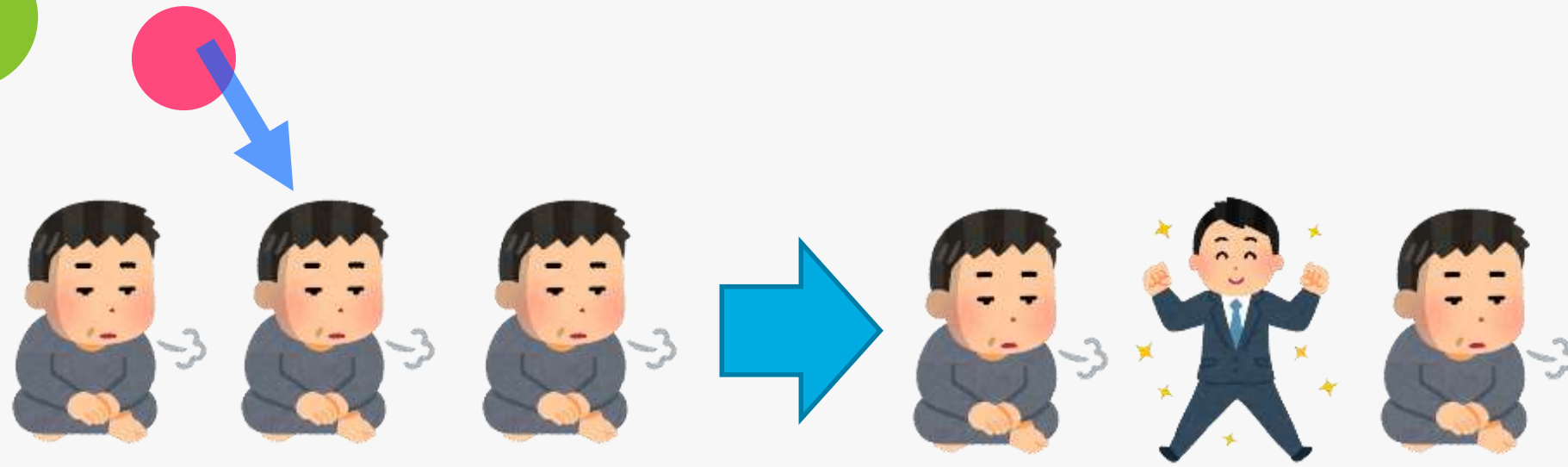


X線治療

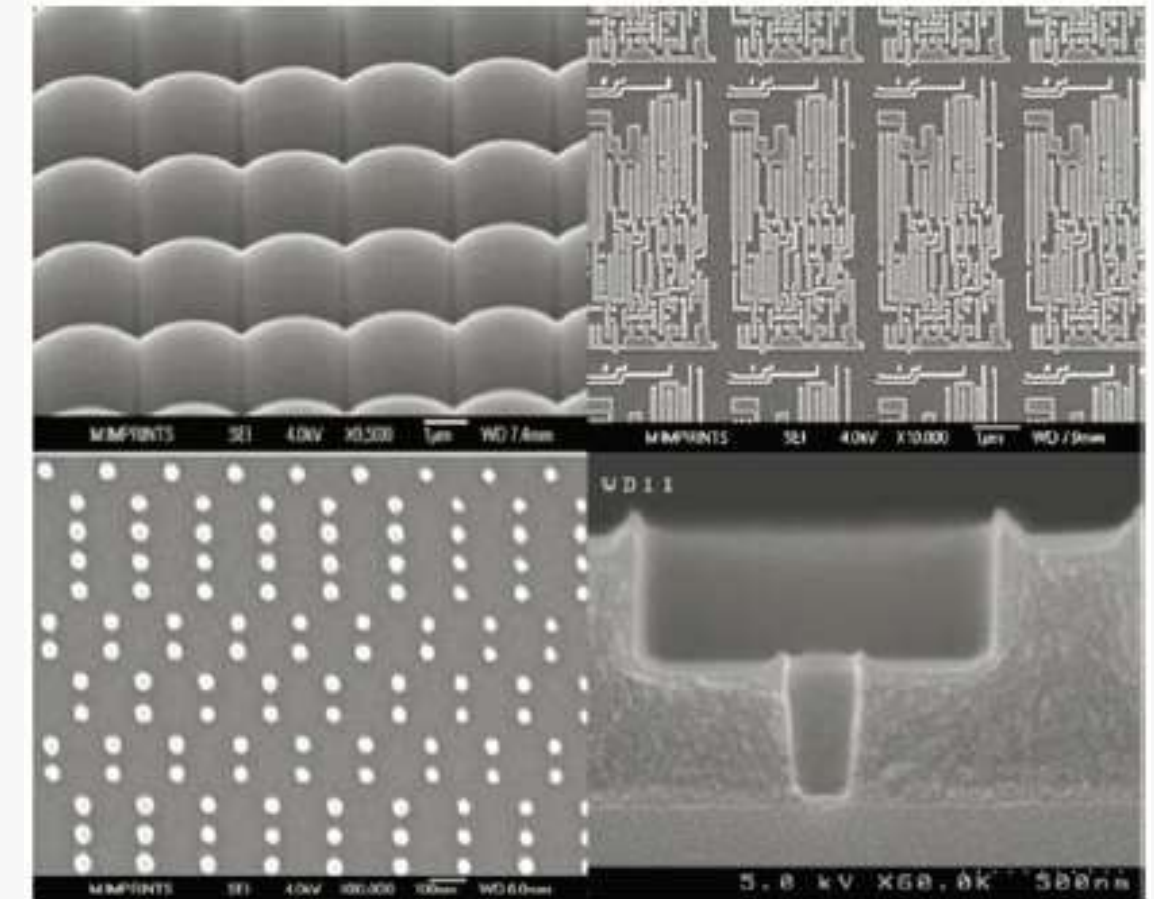
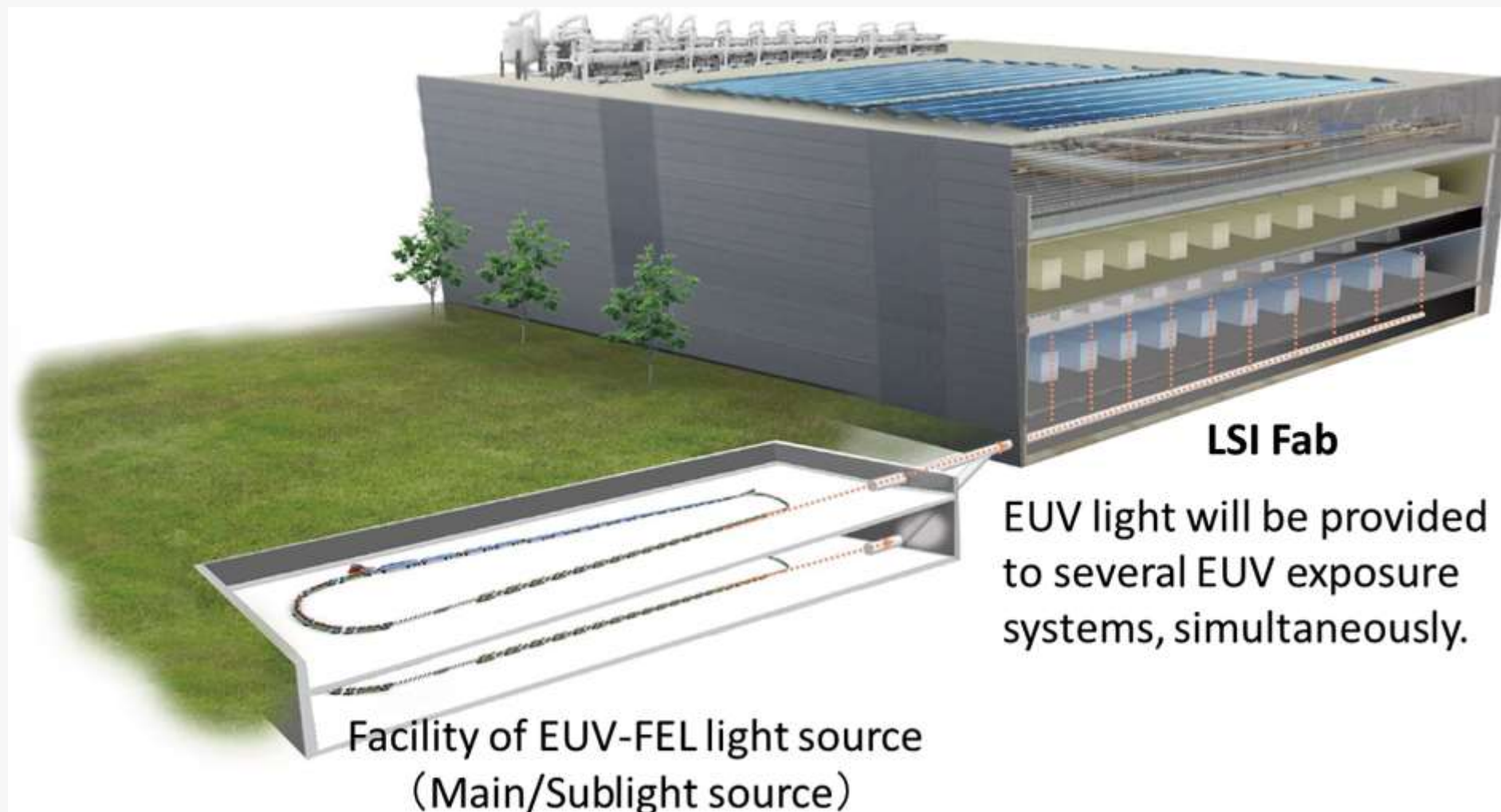


定位放射線（X線）

加速器がひらく次世代半導体



加速粒子によるナノ加工
高集積次世代半導体製造に利用



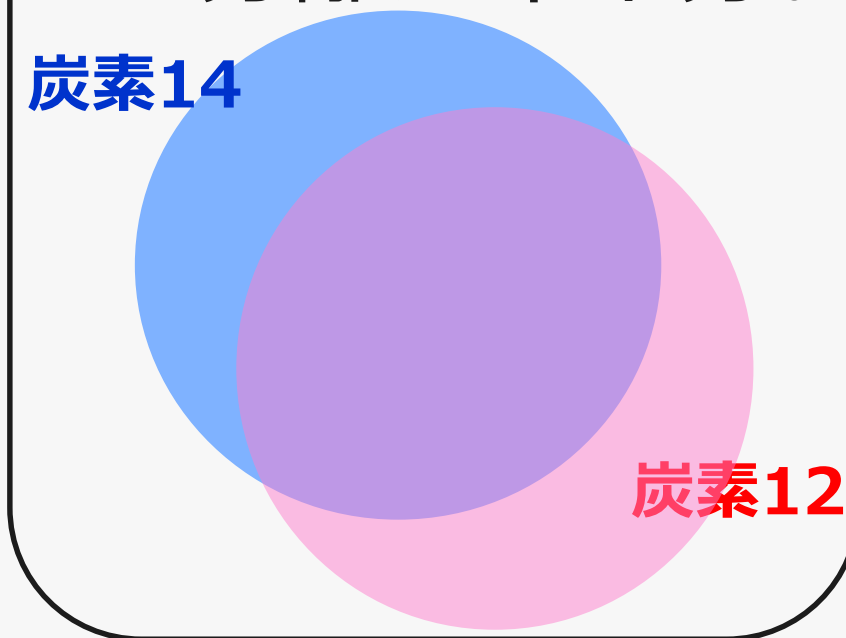
加速器による半導体製造工場

加速器でさぐる歴史と文化

- 炭素14の割合から年代を推定。
- 加速器ビームの高い分析力を利用し、数十年という高精度で同定。
- ルーブル美術館は、分析専用の加速器(AGLAE)を所有。

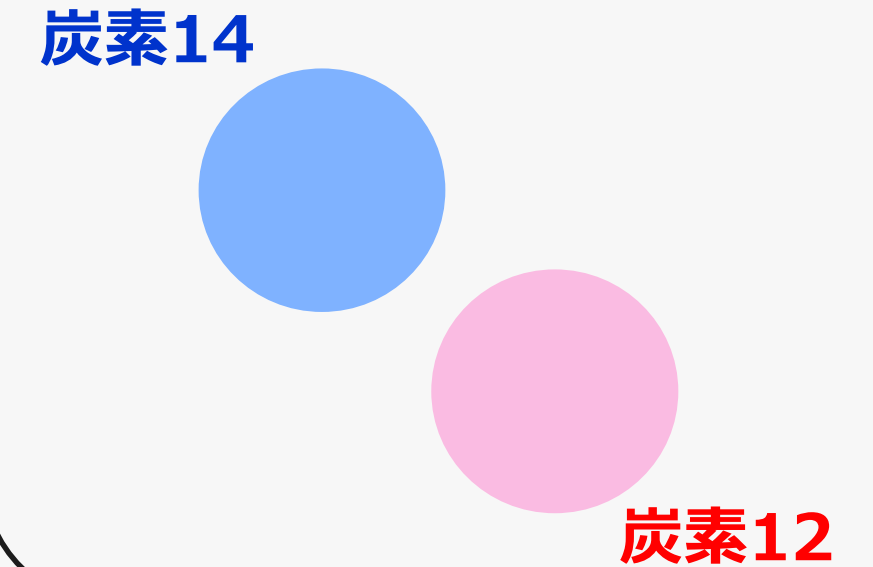
従来法

分離が不十分。



加速器で分析

明確に分離。



AFP通信

ルーブル美術館専用加速器

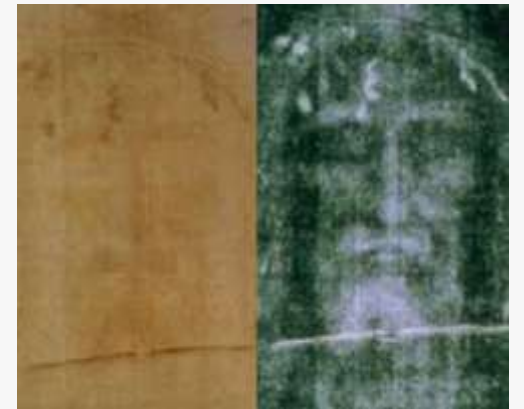


オックスフォードの研究者が偽物と鑑定したエジプト男子立像、加速器分析で本物と判明。



青森県大平山元遺跡の土器を加速器で分析し、縄文時代が16000年前からはじまっていたことが判明。

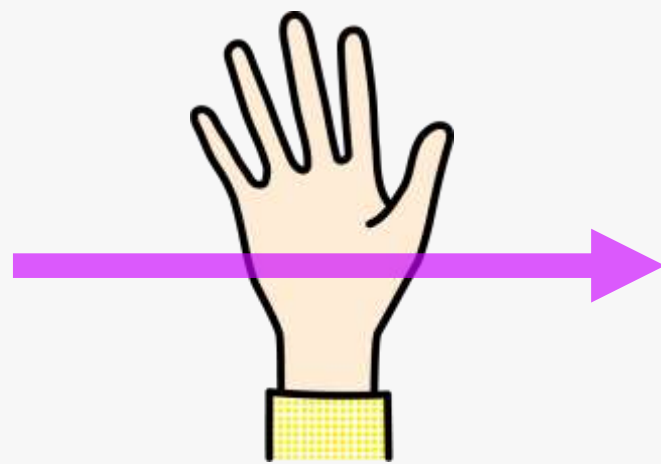
トリノの聖骸布は、加速器による分析から、キリストの遺骸を包んだ布ではなく、11世紀(1000-1050AD)に作られた聖画像であると判明。



イタリア人画家、フェルナン・レジエの作品の一つが贗作であることが加速器を用いて判明。

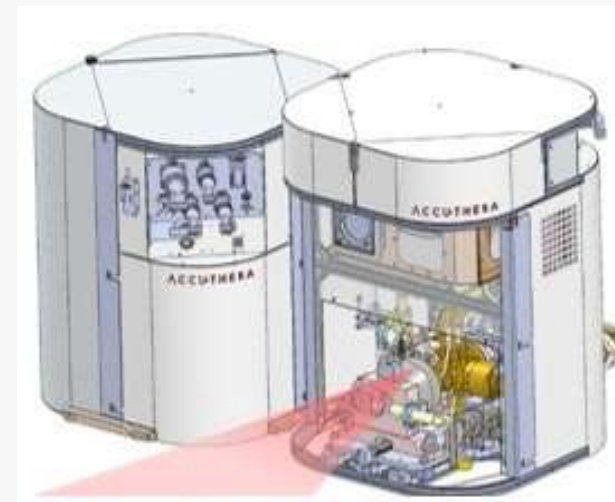


加速器ビームで内部を探る



レントゲンの妻の手

加速器ビームの透過性を利用



東大、長谷川研

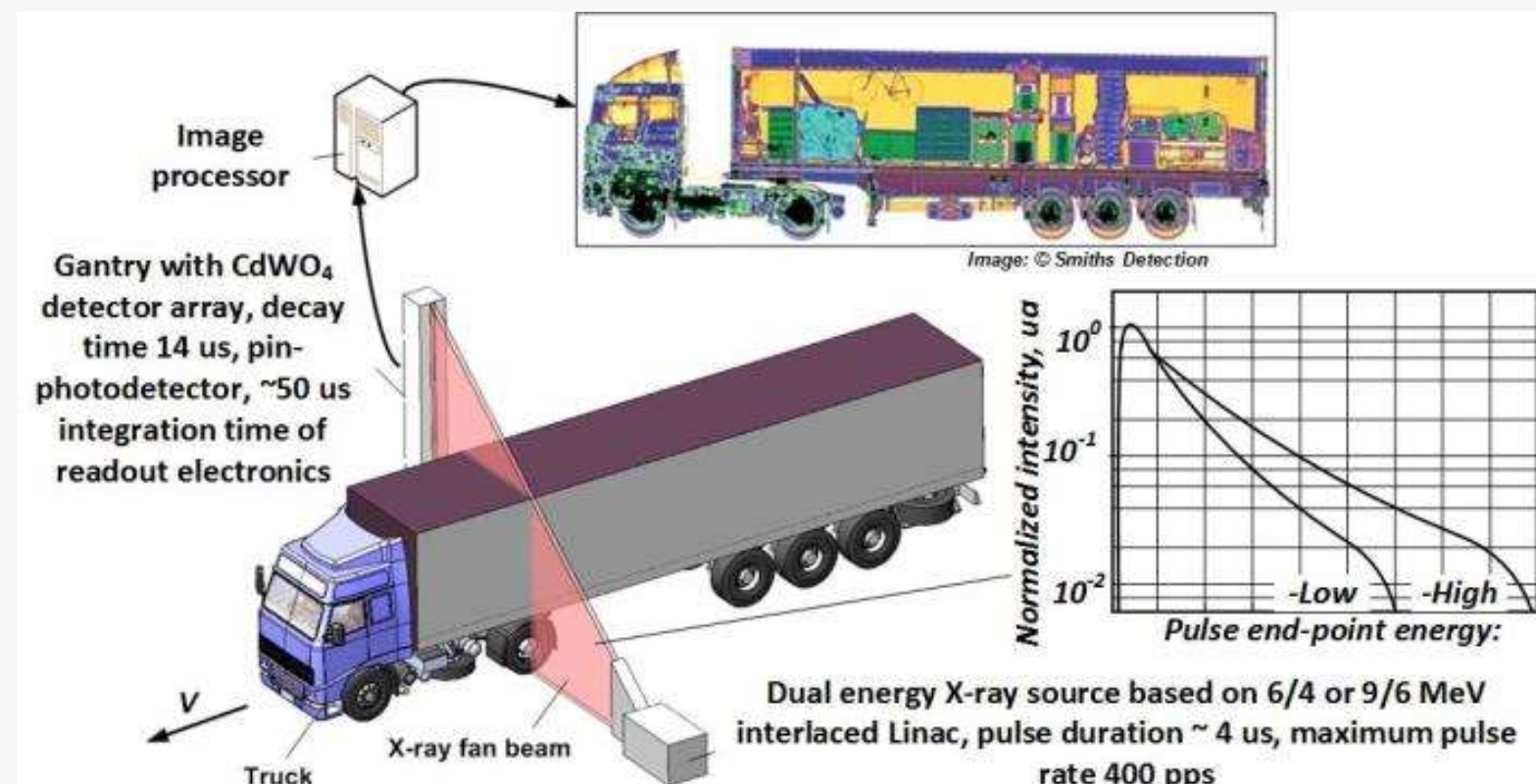
可搬型X線源



橋梁などの健全性検査



文化財調査



貨物検査システム



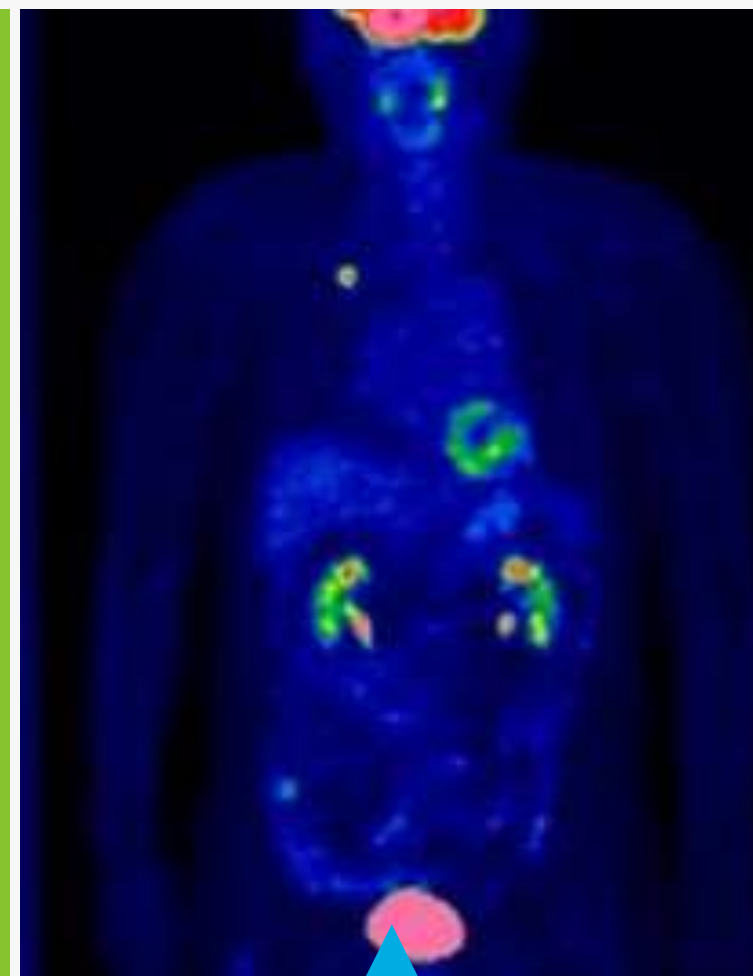
微小な世界

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

タンパク質、酵素の
構造と機能解析によ
り、新薬を設計。

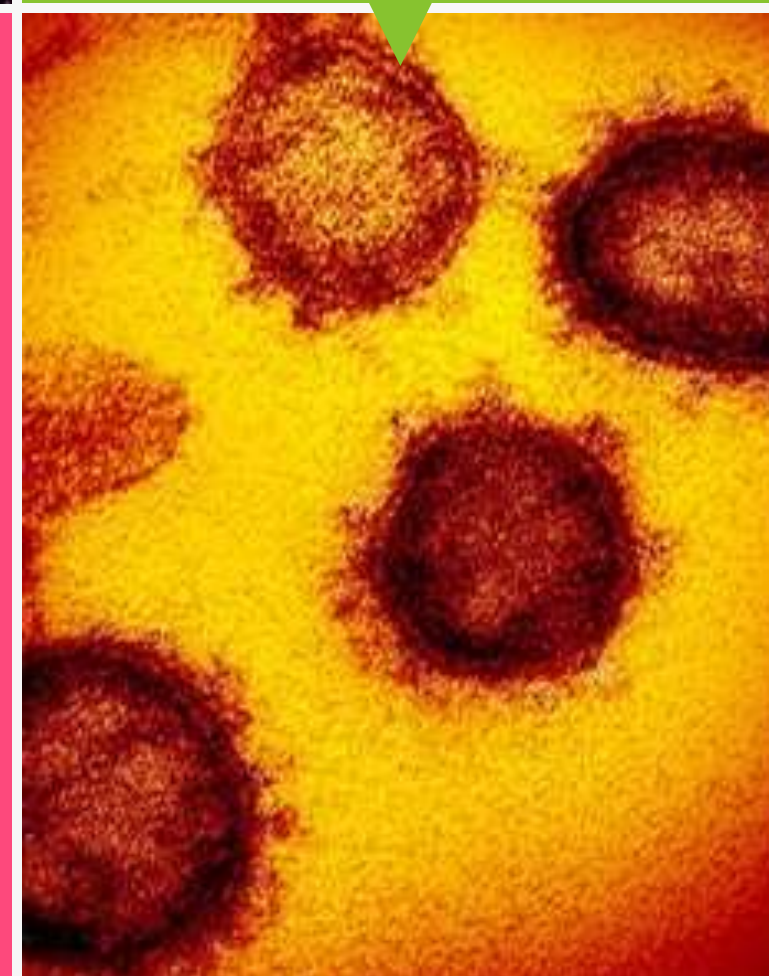


究極を探る

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



生活を支える

構造物の非破壊検査

セキュリティ検査

生活を支える素材

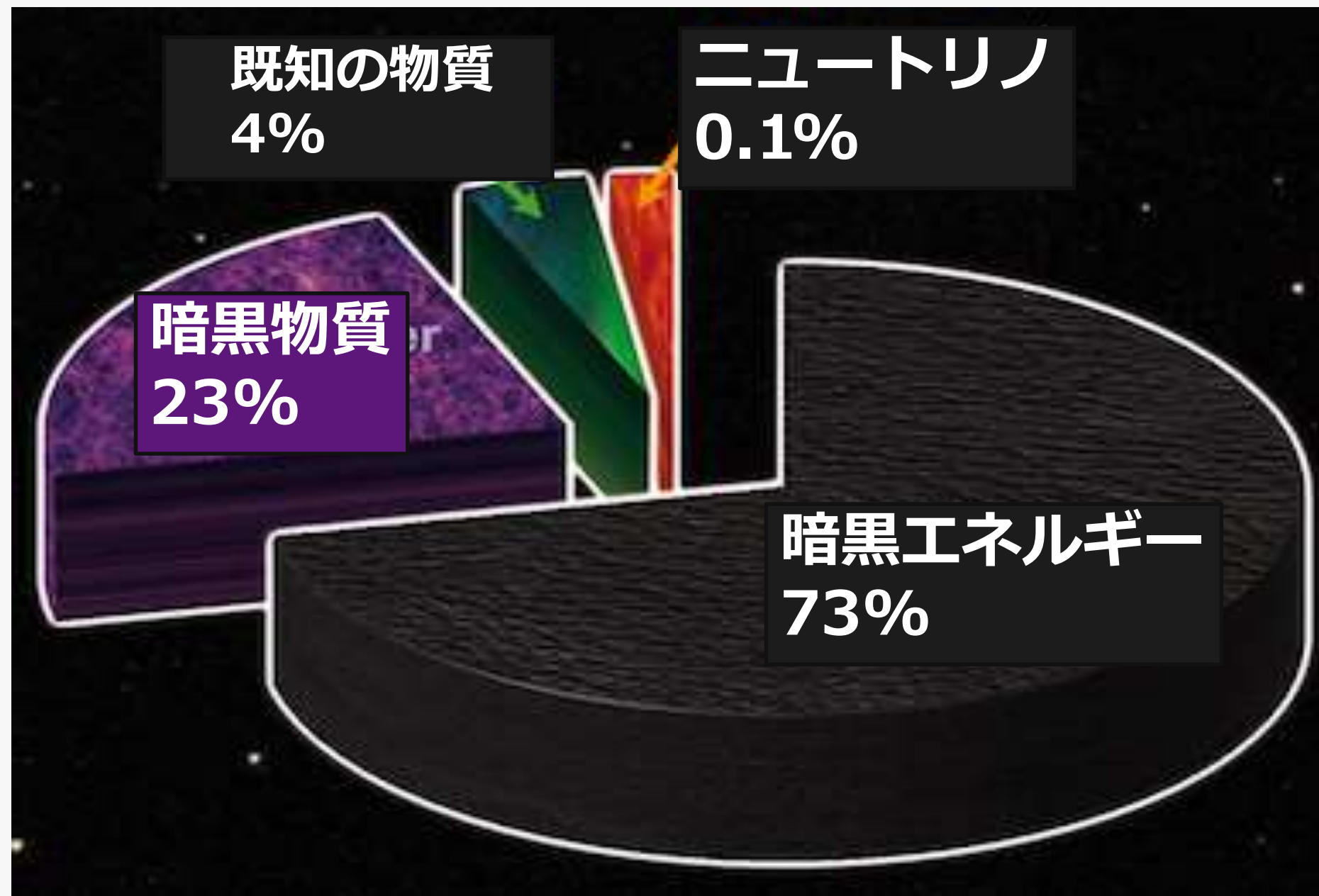
(タイヤ、防水絆創膏、絶縁材)

加速器で宇宙をつくる

正
理
の
力

宇宙の謎

宇宙の95%は正体不明！



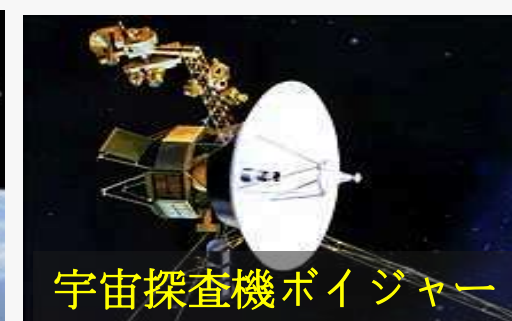
我々がわかっているのは宇宙のたった5%。

残りの95%は全くの謎！

● 宇宙に行く



国際宇宙ステーション

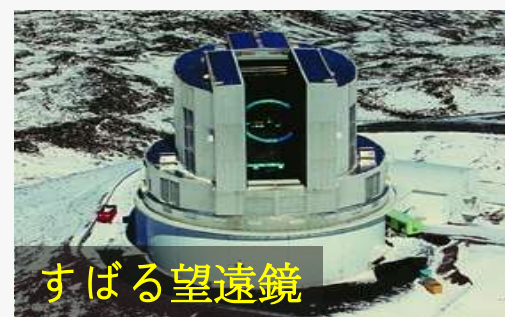


宇宙探査機ボイジャー

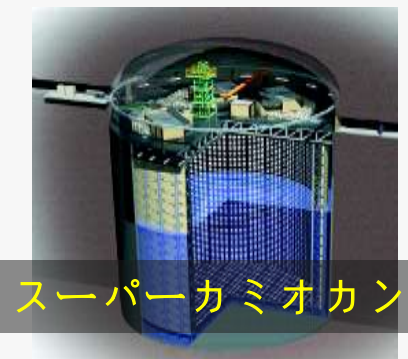


はやぶさ

● 宇宙を見る



すばる望遠鏡



スーパーカミオカンデ

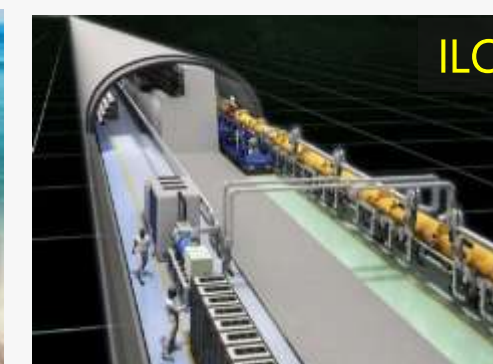


KAGRA

● 宇宙を創る



LHC



ILC

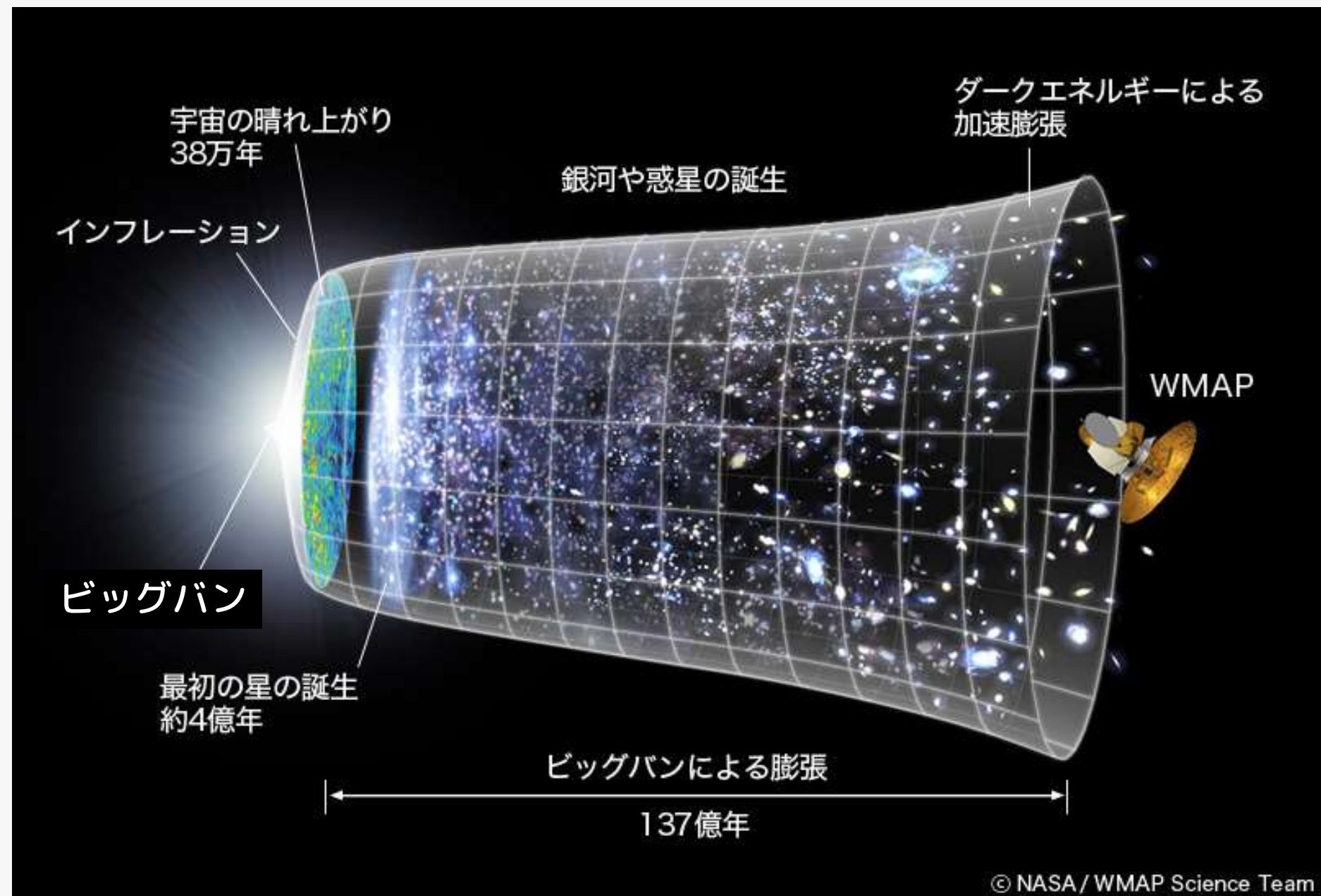


SKEKBファクトリー

小さなビッグバン

ビッグバン=宇宙の始まり

ビッグバンとは真空中にエネルギーのみがある状態で、これが宇宙の始まり。実験室で再現して、宇宙の謎に迫る。



粒子

エネルギー

反粒子

粒子 = 電子
反粒子 = 陽電子

ある家庭の夏休み



電子



エネルギー

ビッグバンをつくるにはどうするの？

すごいね、ママ！

陽電子

電子と陽電子（粒子と反粒子）を加速してぶつけばいいのよ。簡単でしょ。



21世紀の コライダーはリニア

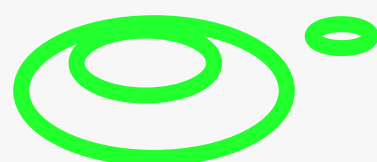


リニア

コライダー加速器

EUROPE

PETRA DORIS



HERA

ASIA



TRISTAN

US

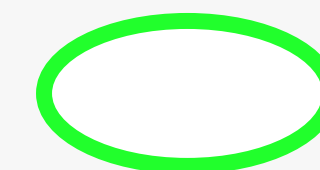
SLC



PEP



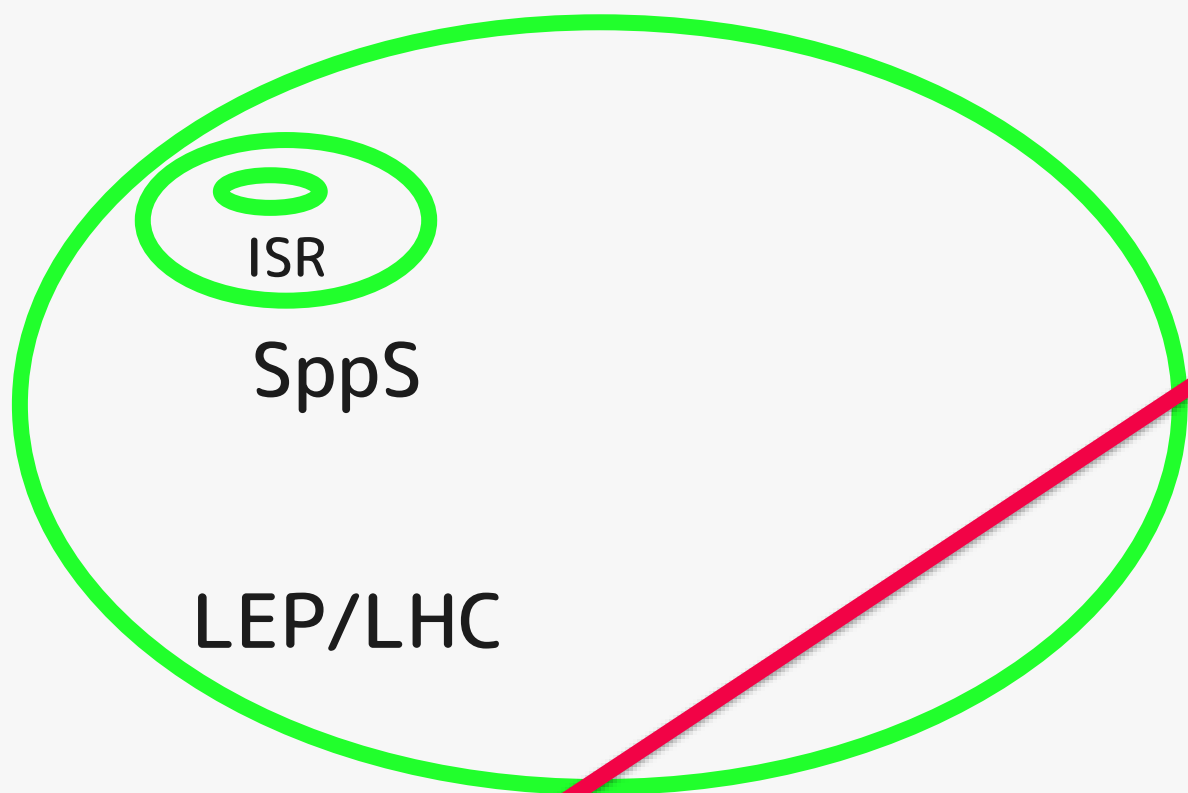
SPEAR



TEVATRON

**International
Linear
Collider**

世界初の本格的なリニアコライダー



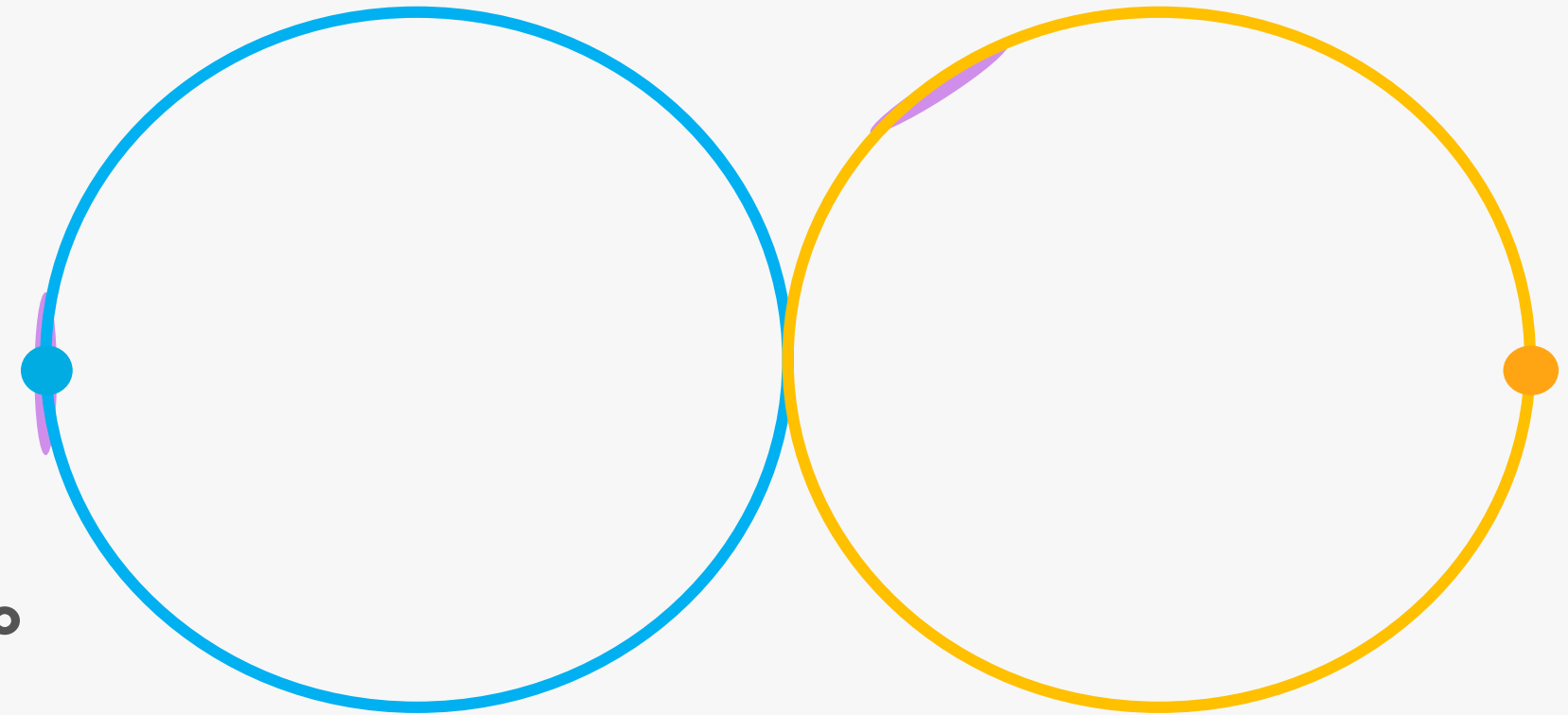
ISR

SppS

LEP/LHC

20世紀に大活躍した円形加速器

20世紀のコライダーの多くは円形コライダー
多数回の加速で高エネルギービームが得られる。
エネルギーが高くなると、曲げるたびにエネルギーがこぼれ落ちて、これ以上加速できなくなる。



円形加速器の限界！

21世紀はリニアコライダーの時代

技術の進歩により際限なく進化

曲げないので、エネルギーがこぼれない。
効率的な加速器。

新しい加速器技術、加速器の増設
により、エネルギー増大が可能

100年加速器リニアコライダー(ILC)

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

1,000,000 eV



サイクロトロン

20,000,000 eV



シンクトロン

100,000,000,000 eV



リングコライダー

2x100,000,000,000 eV



リニアコライダー

2x2,000,000,000,000 eV



リニアコライダー (ILC)は新時代の100年加速器

国際リニアコライダー ILC



正
理
の
力

ILC国際リニアコライダー

歴史と由緒ある正統派

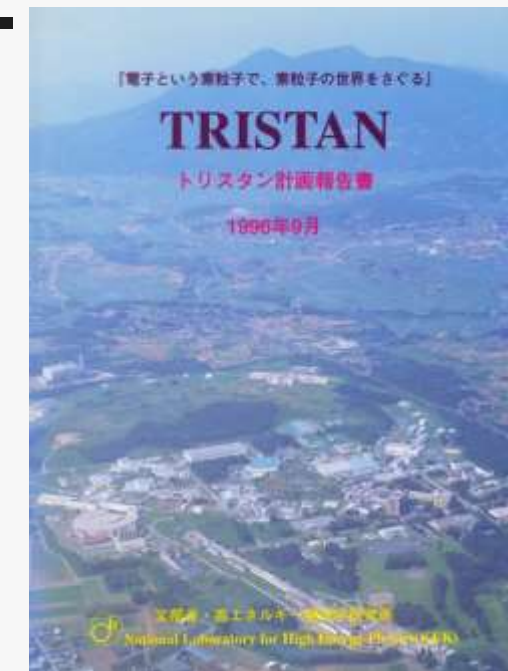
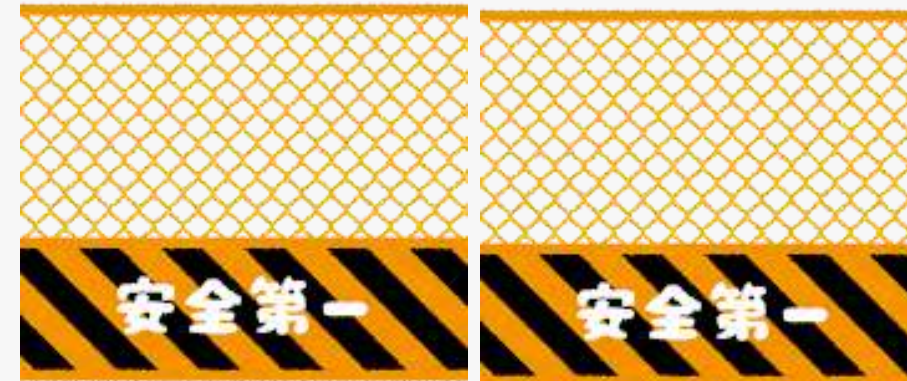
1980年代

今はリングコライダーが主流だけど、いずれリニアコライダーの時代がくる。いまから研究しておこう。

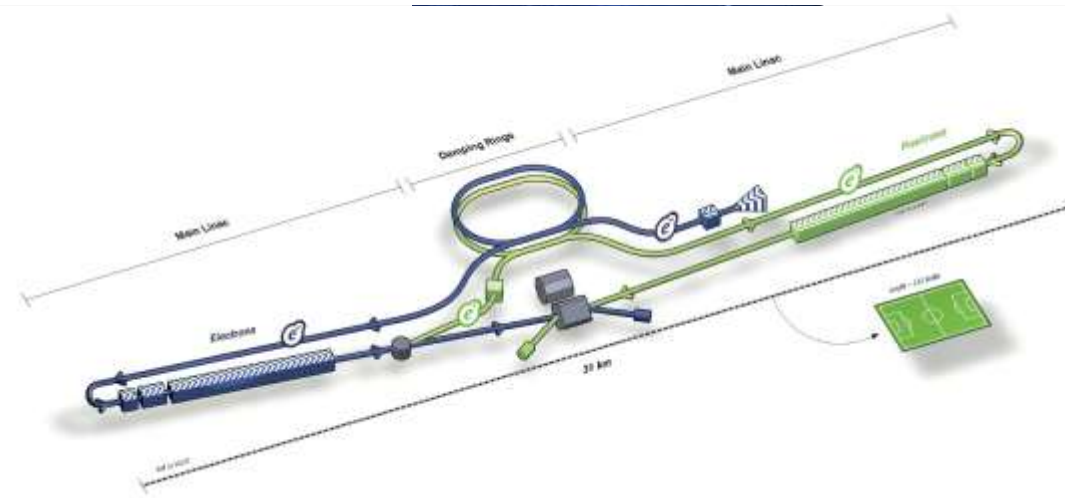
横谷馨先生



日本初のリングコライダー
トリスタン建設現場
1986年稼働開始



2004年 世界統一プロジェクトILC発足



リニアコライダーの構成要素：加速

粒子を生成し、
必要なエネルギーまで加速する



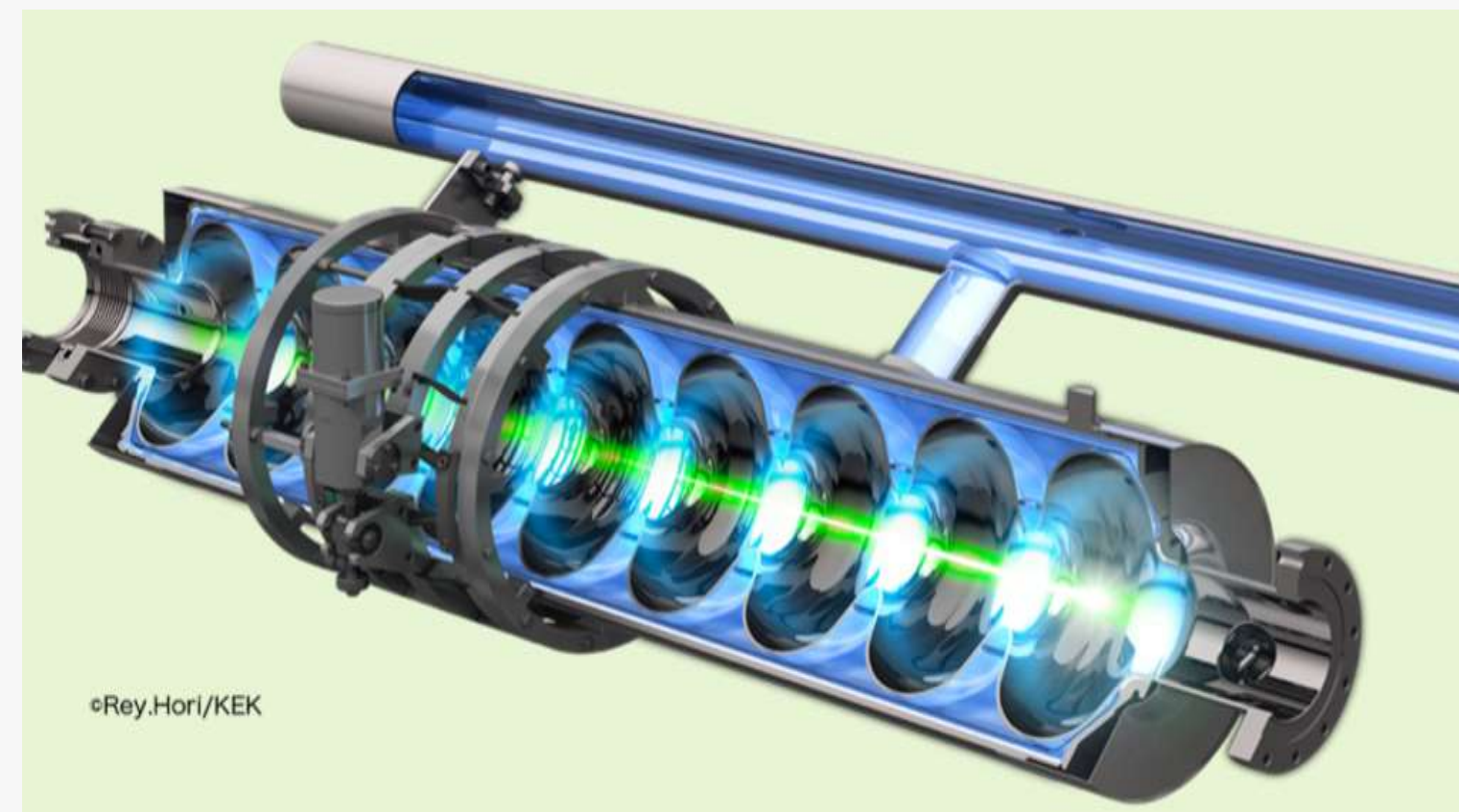
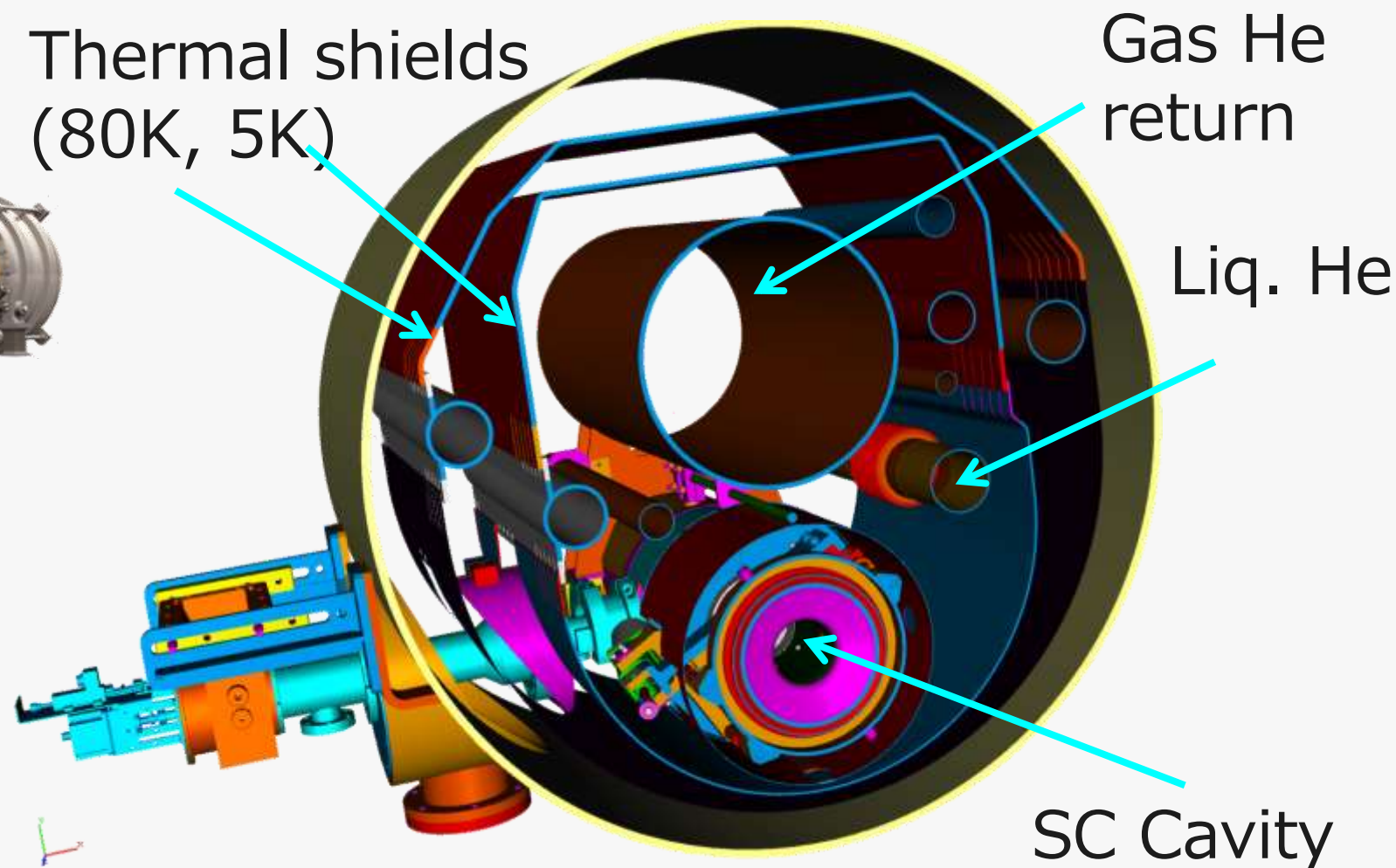
加速は一度きりなので、強力な
加速器が必要。1%でも不足し
たら、実験ができない！



超伝導加速器



冷凍容器
内部は 2 K
(8 あるいは 9 台の 加速器)



超伝導加速空洞

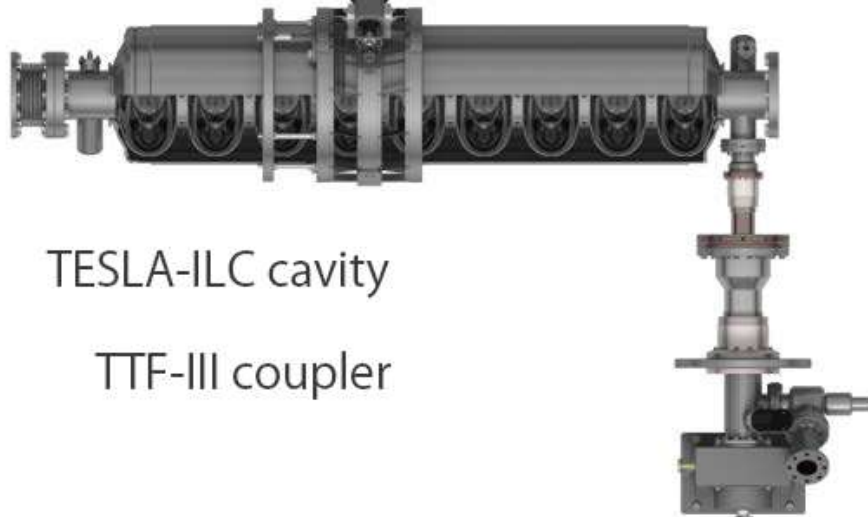
- 断熱容器内で、超流動ヘリウムにより 2.0 K(-273°C)に加速器を冷却。
- 超伝導=省電力で、高い加速勾配 31.5 MV/mを実現。

異なる加速空洞を一つの容器に



- 異なる研究所で作成した、異なる設計の超伝導空洞モジュールを一つの冷凍容器に入れて運転。
- 設計や規格(metric vs imperial)の違いを吸収し、互換性を確保する仕様 (Plug-compatibility)の技術実証試験。

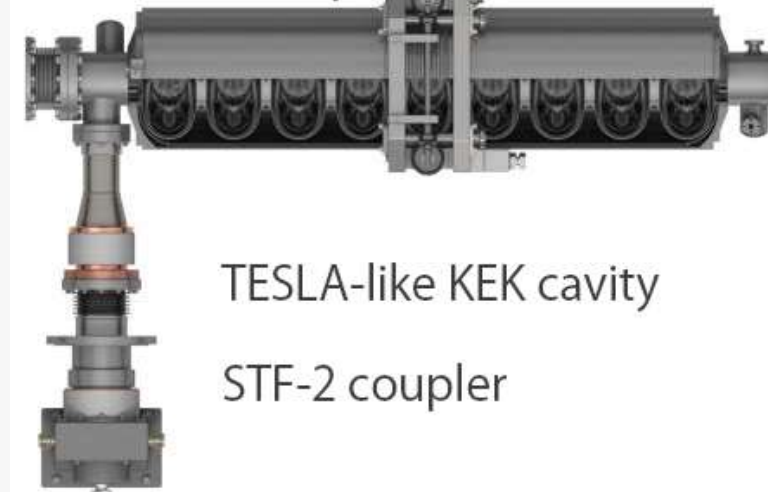
Blade tuner



Lever-arm tuner



Slide-jack tuner (center)

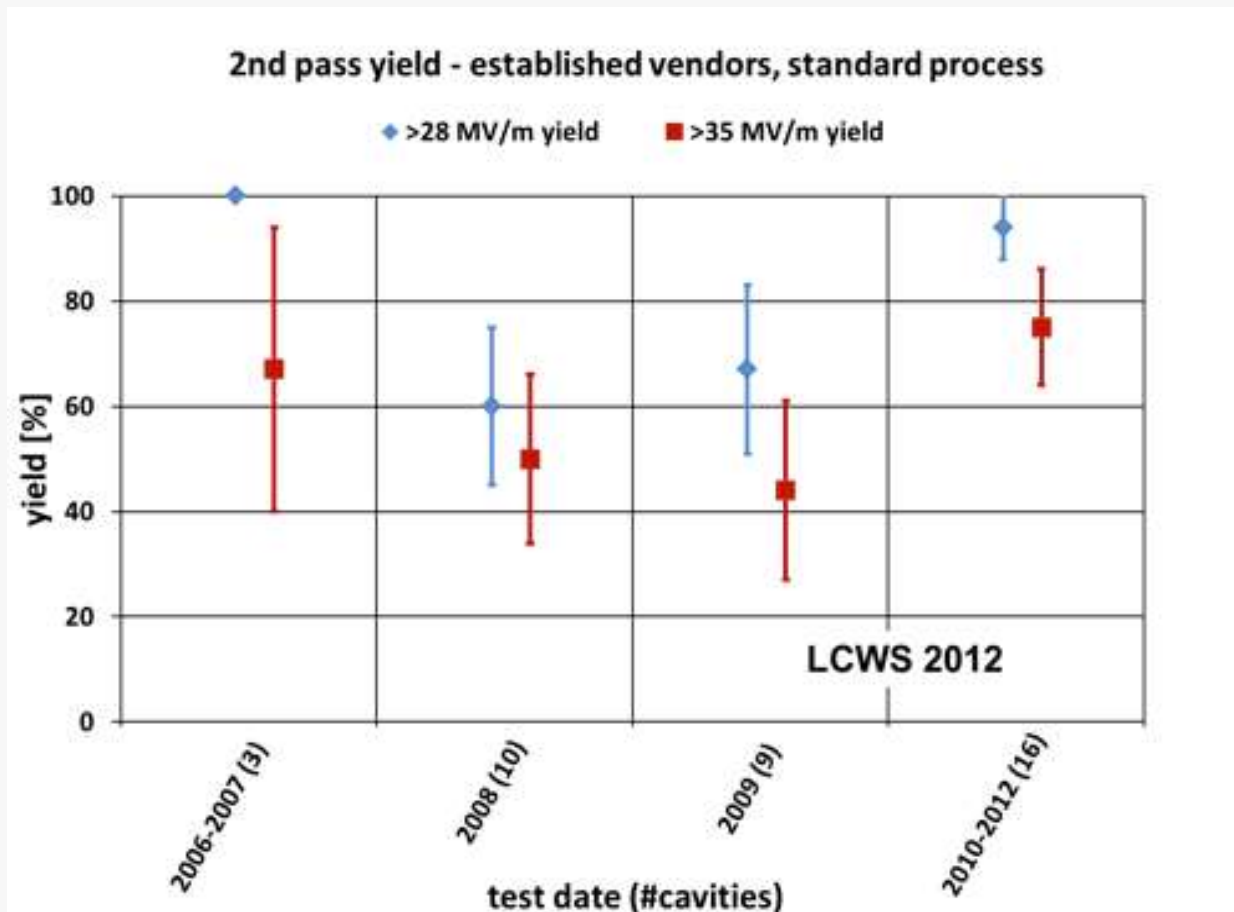
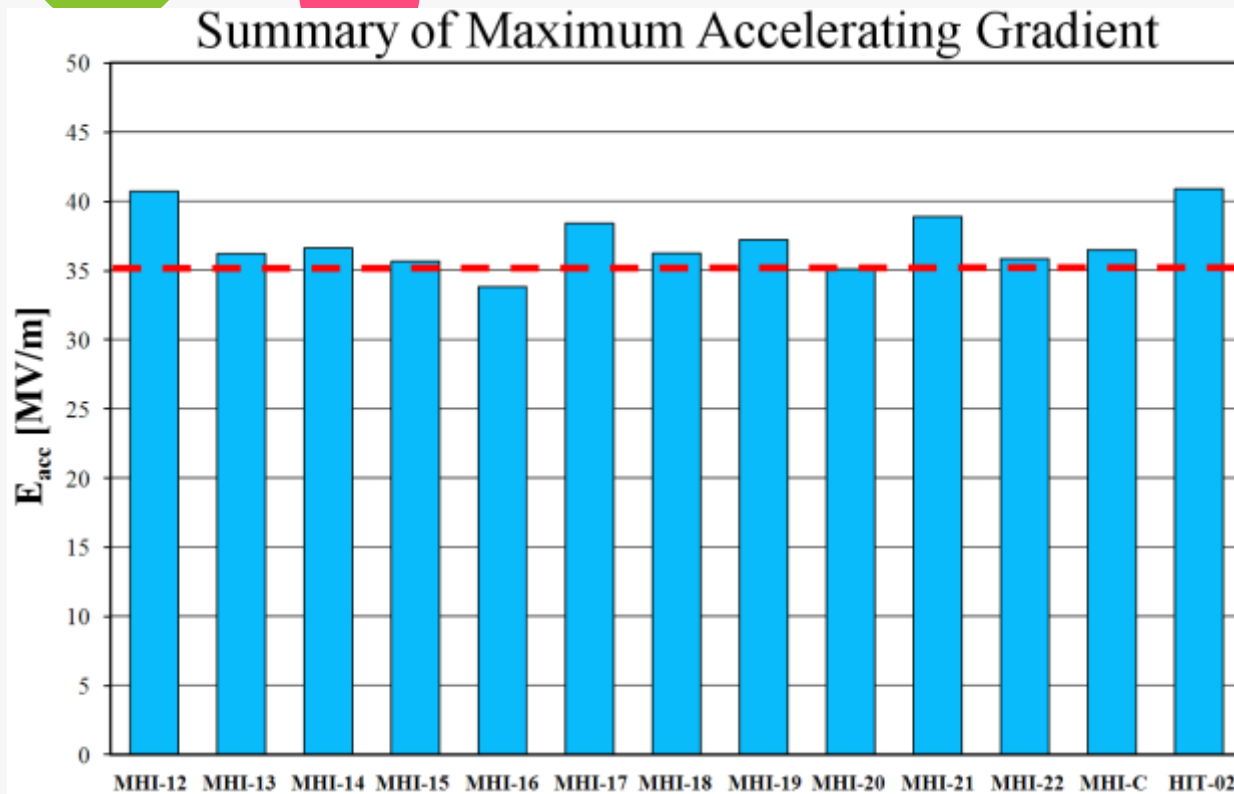


Slide-jack tuner (end)



加速試験

- ビーム加速試験(STF-Phase II)を行い、全ての空洞がILCの仕様(35 MV/m \pm 20%)を満たしていることを確認。
- ILC仕様を満たす空洞の製造歩留まりは、2012年の時点で90%。
- 生産、品質管理、技術的互換性を含め、ILCの超伝導加速器技術は成熟しており、高い信頼性がすでに確認されている。



リニアコライダーの構成要素：ナノビーム

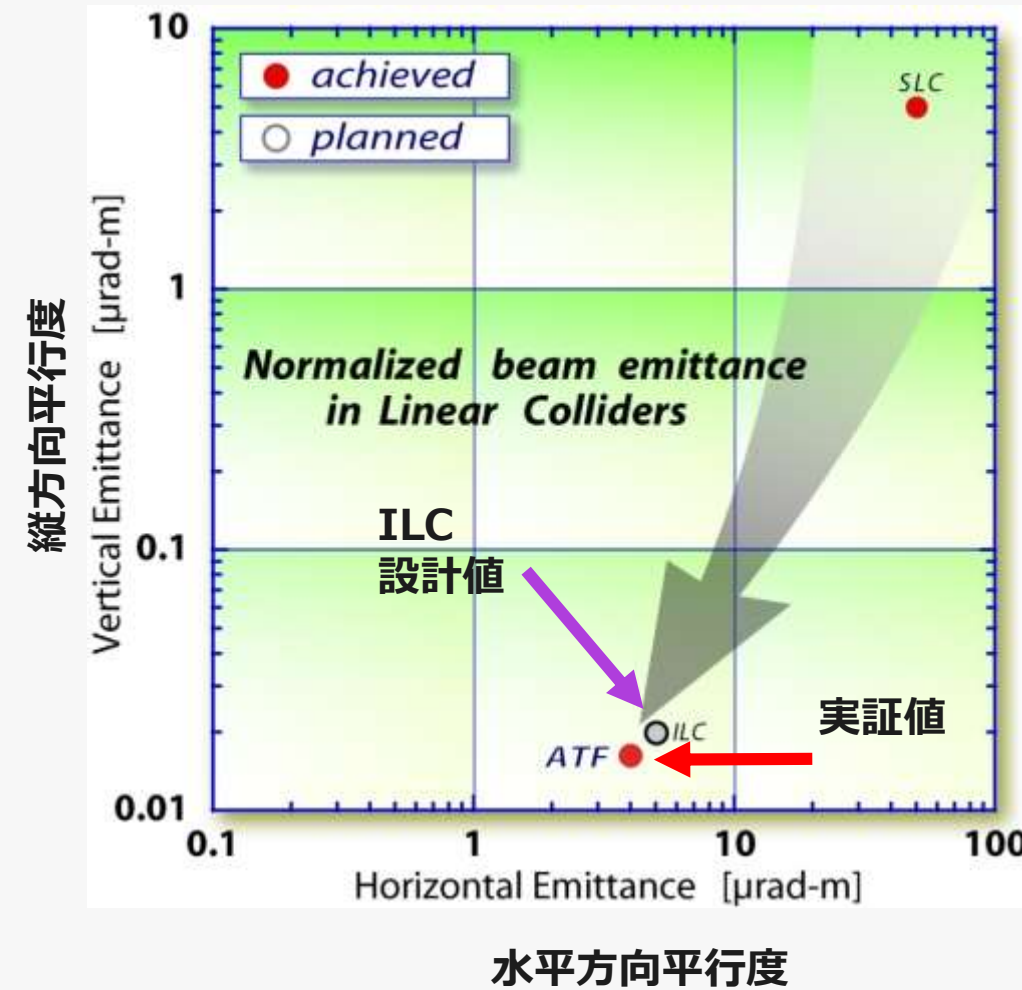
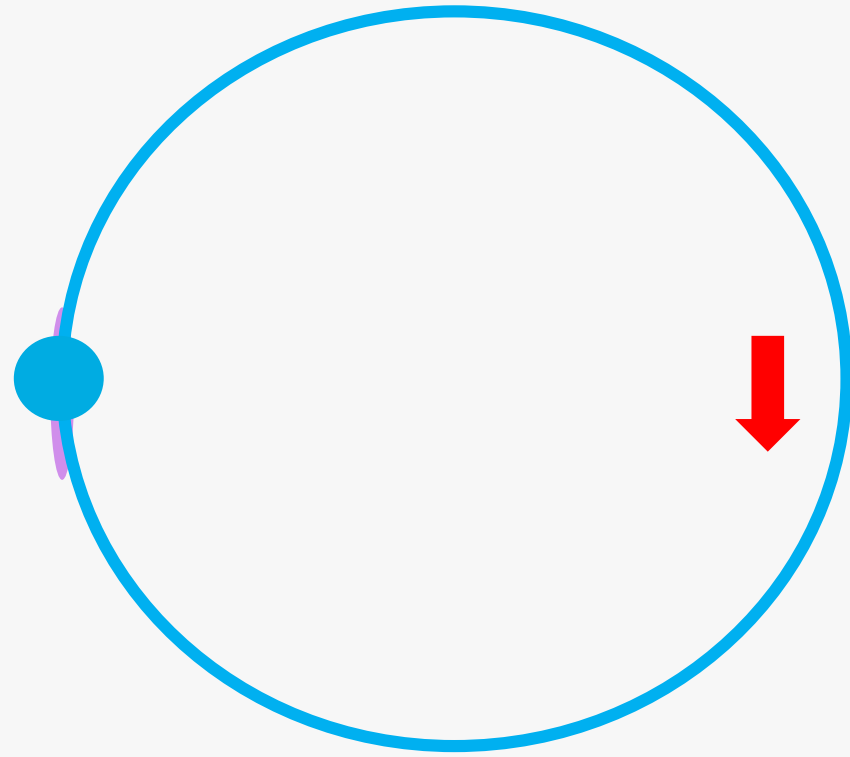
加速したビームをナノサイズまで絞って、正確に衝突させる！

ナノサイズにすることで、確実に
衝突させる（ビームの有効利用）

超平行ビーム + 収束 = ナノビーム



超平行ビーム

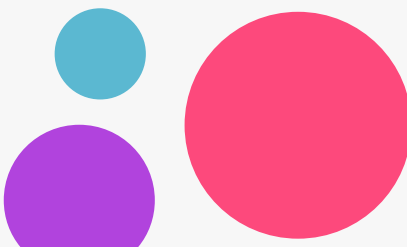
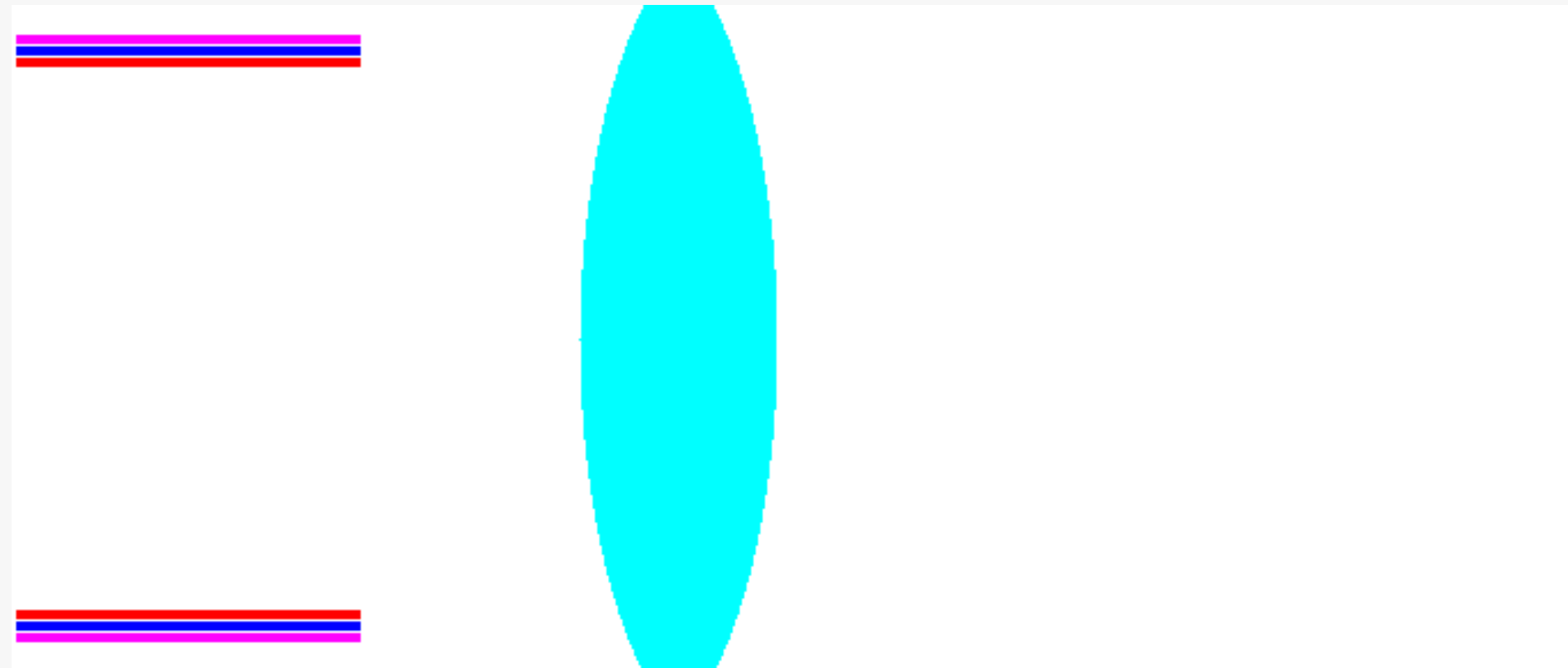


- ビームをリングで周回させると、エネルギーがこぼれ落ちるので、それを補うために、周回毎に加速。
- 加速方向は正確に正面方向なので、徐々にビームの方向が揃ってくる。(放射減衰)

- ILCに必要な値は、試験施設ATFですでに実証済。
- ATFで実証されたILCビームの角度広がりには世界で最も平行なもののひとつ。
- 日本の鉄道最長直線区間(28.7km, 室蘭本線)に相当する長さを飛ばしても、そのずれは1.2ナノメートル。

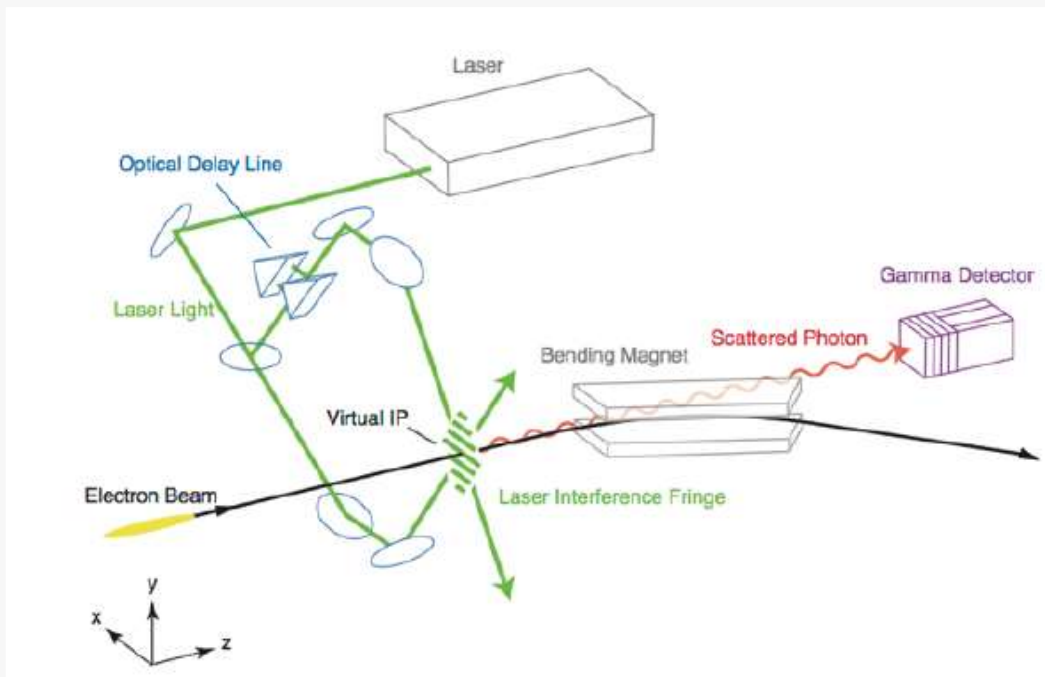
ナノフォーカス

- ビームはほぼ同じエネルギーだが、0.1%くらい広がりがある。
- エネルギー幅のあるビームをすべて同じ点に収束させる、工夫が必要。
- 色収差補正により、ナノサイズまで絞り込む。



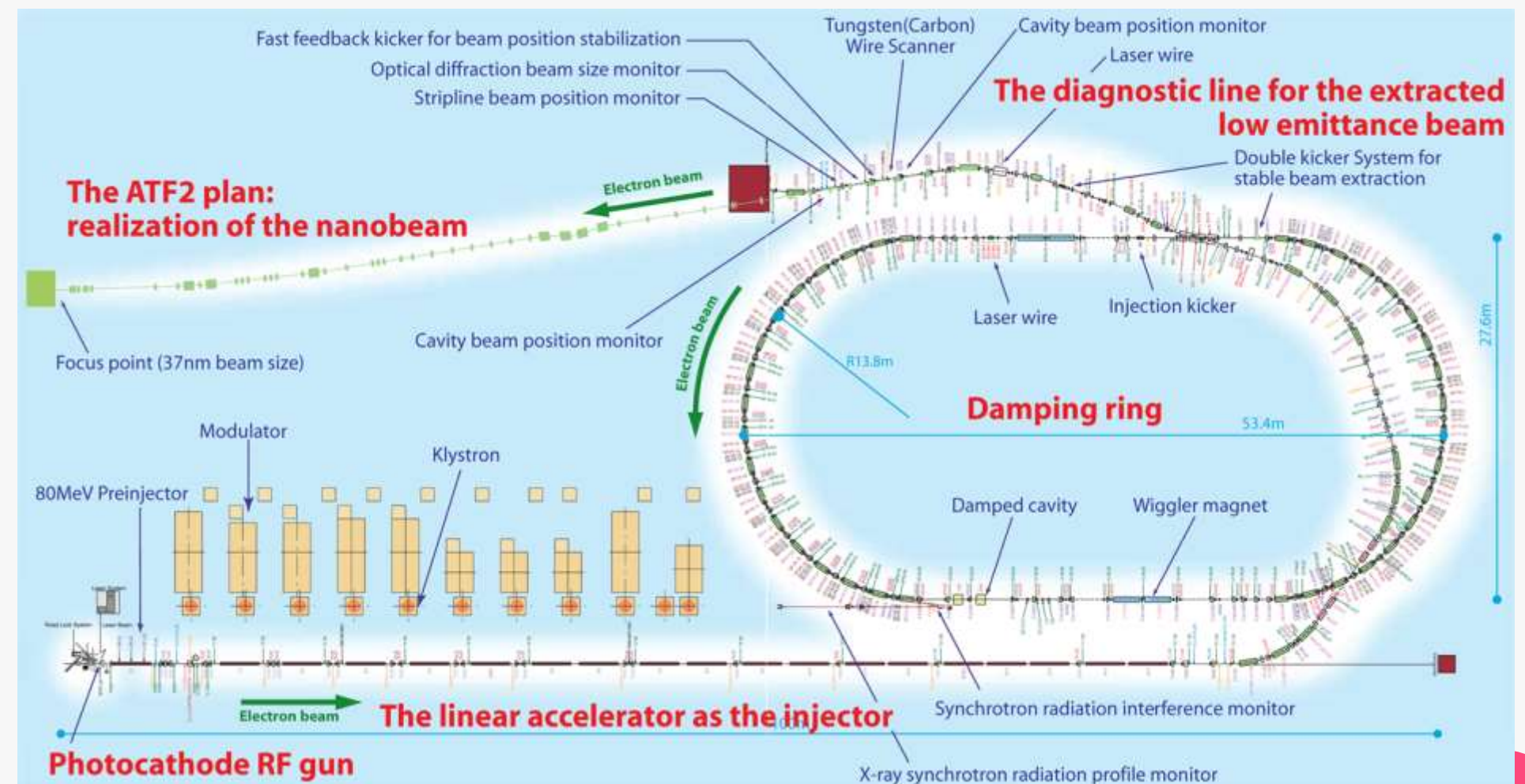
ナノビームの実証

- リングで超平行なビームをつくり、それを実際にナノサイズまで絞り込む実験をKEKのATF加速器で実施中。
- ナノサイズビームは日本発の技術（レーザー干渉計モニター 新竹教授の発明）で計測。
- エネルギー1.3GeVのATFで41 nm のビームサイズを直接観測。ILCの仕様75.5nm(1.3 GeV)を余裕で達成。



ビームサイズのエネルギー依存性
(ビームサイズはエネルギーEの $1/\sqrt{E}$ に比例)

エネルギー	ATFでの実証値	ILCの設計値
1.3 GeV	41 nm	75.5 nm
125 GeV	4.2 nm	7.7 nm

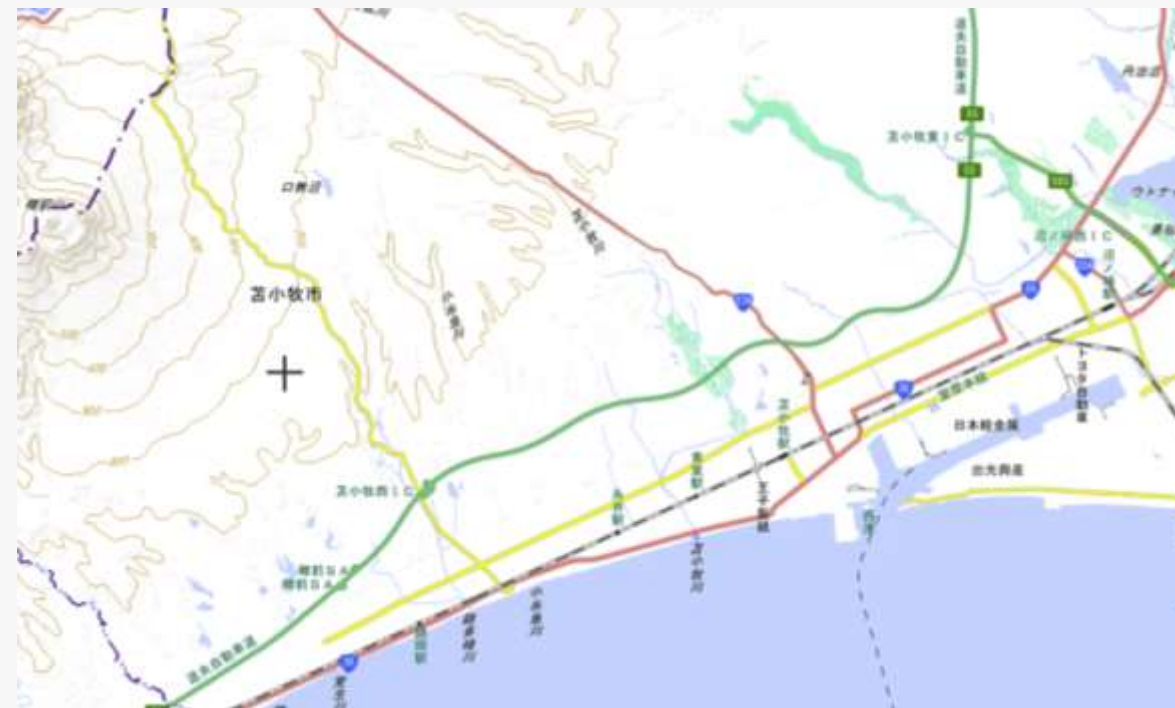


リニアコライダーの基本技術

強烈な一撃



超平行ビーム



ボケの無いくっきり画像



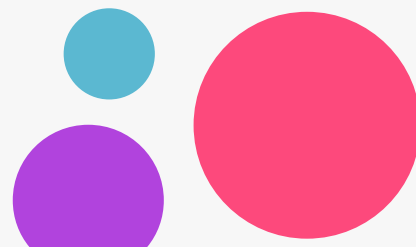
加速は一度きり。強力な加速器が必要。しーエコーじゃないと。



ビームの方向を揃えた、世界一平行なビーム。くわくわく走っても、その広がりが2mm.



ナノサイズまで絞り込み、正面衝突する



リニアコライダー実現への技術的課題

- 基本技術は出来上がったが、まだ多くの課題がある。
 - 性能向上
 - 信頼性向上
 - 工学設計
 - サイト検討、設計
 - 製造法検討、決定
 - 組織設計
 - 国際交渉
- これをやるのが準備研究所。ILCの国際組織ICFA-IDTが現在提案中。
<https://doi.org/10.5281/zenodo.4742018>



ILC陽電子源コラボレーション

ILC陽電子源の工学設計に向けた協力体制



岩手県工業技術センター

<https://www.joho-iwate.or.jp/>



岩手県産業振興センター

<https://www.joho-iwate.or.jp/>



近藤設備

<https://www.konsetu-iwate.com/>



東北精密

<http://www.tohokuseimitsu.co.jp/>

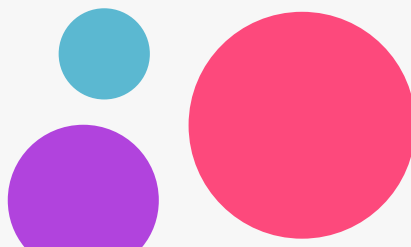


金属技研株式会社



Rigaku

岩手大、KEK、早大、広島大



新時代を開く加速器ILC

加速器は身近な最先端

最先端の研究から、歯科治療、絆創膏まで。加速器の用途は広い。

リニアコライダー=加速+ナノビーム

リニアコライダーには、高性能加速器とナノビームが必要不可欠。

新時代のコライダーILC

円形加速器の限界を超えて、ミニビッグバンをつくる装置、それがリニアコライダー。

ILCに踏み出す時、それは今

必要な基本技術はすべて実証。建設の準備作業に取り掛かる時、それは今。