



# 国際リニアコライダー計画と 研究開発

Masao KURIKI (Hiroshima U.)

# 素粒子=物質の根源

物質の根源は何か？素粒子物理学はギリシャ時代に始まる哲学的問題を科学的に探究する。

陽子、中性子：  
 $10^{-15}$  m

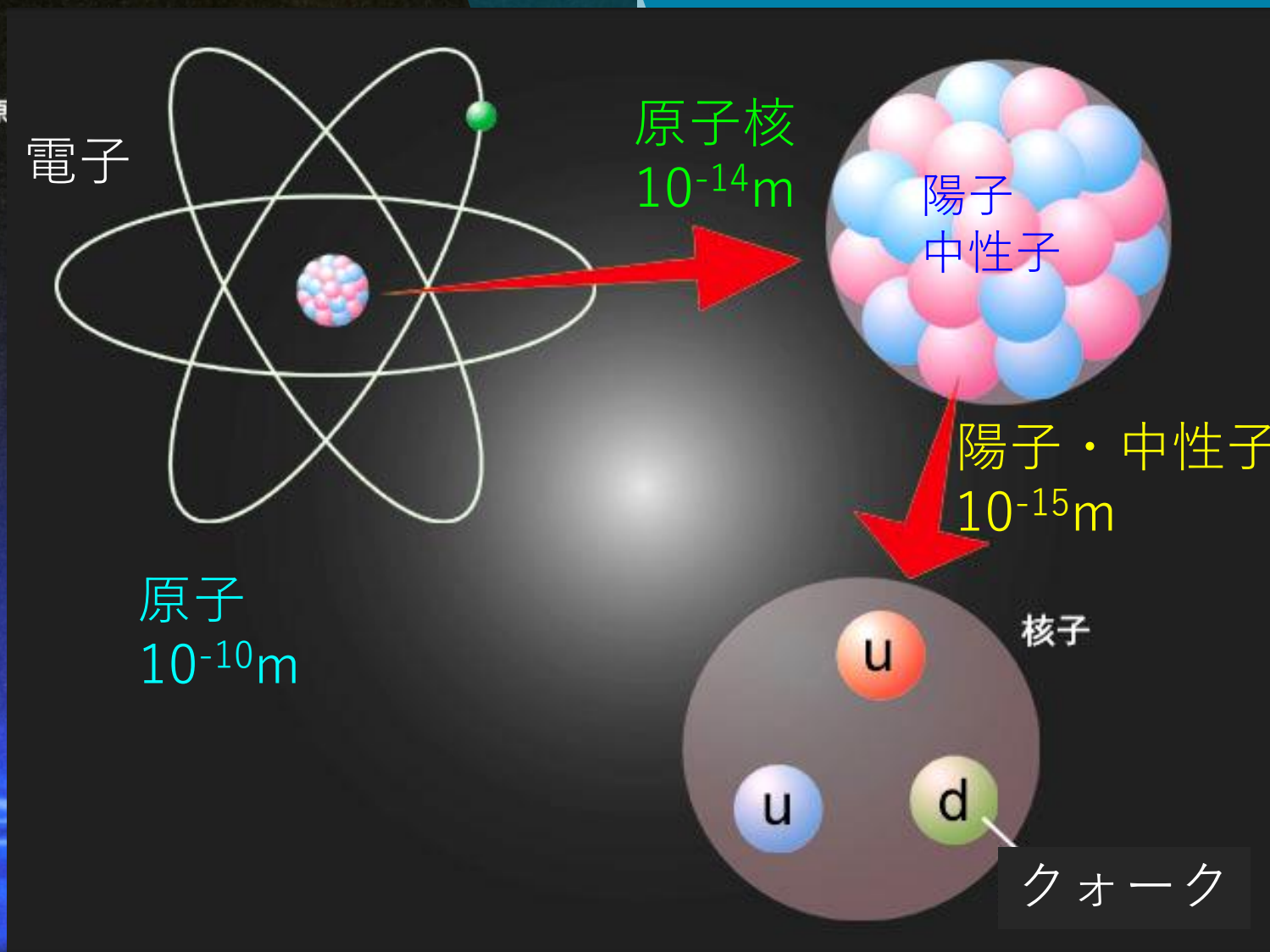
原子核： $10^{-14}$  m

原子： $10^{-10}$  m

水の分子： $10^{-9}$  m



素粒子って何？



# 現在分かっている素粒子 (= 人類の叡智の結晶)

1969



Murray Gell-Mann

1979



Sheldon Glashow



Abdus Salam



Steven Weinberg

1999



Gerard 't Hooft



Martinus Veltman

2004



David Gross



David Politzer



Frank Wilczek

数字は  
ノーベル賞  
受賞年

1988



Leon M. Lederman



Melvin Schwartz



Jack Steinberger

1976

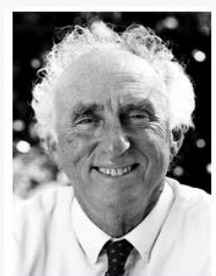


Burt Richter



Sam Ting

1995



Martin L. Perl

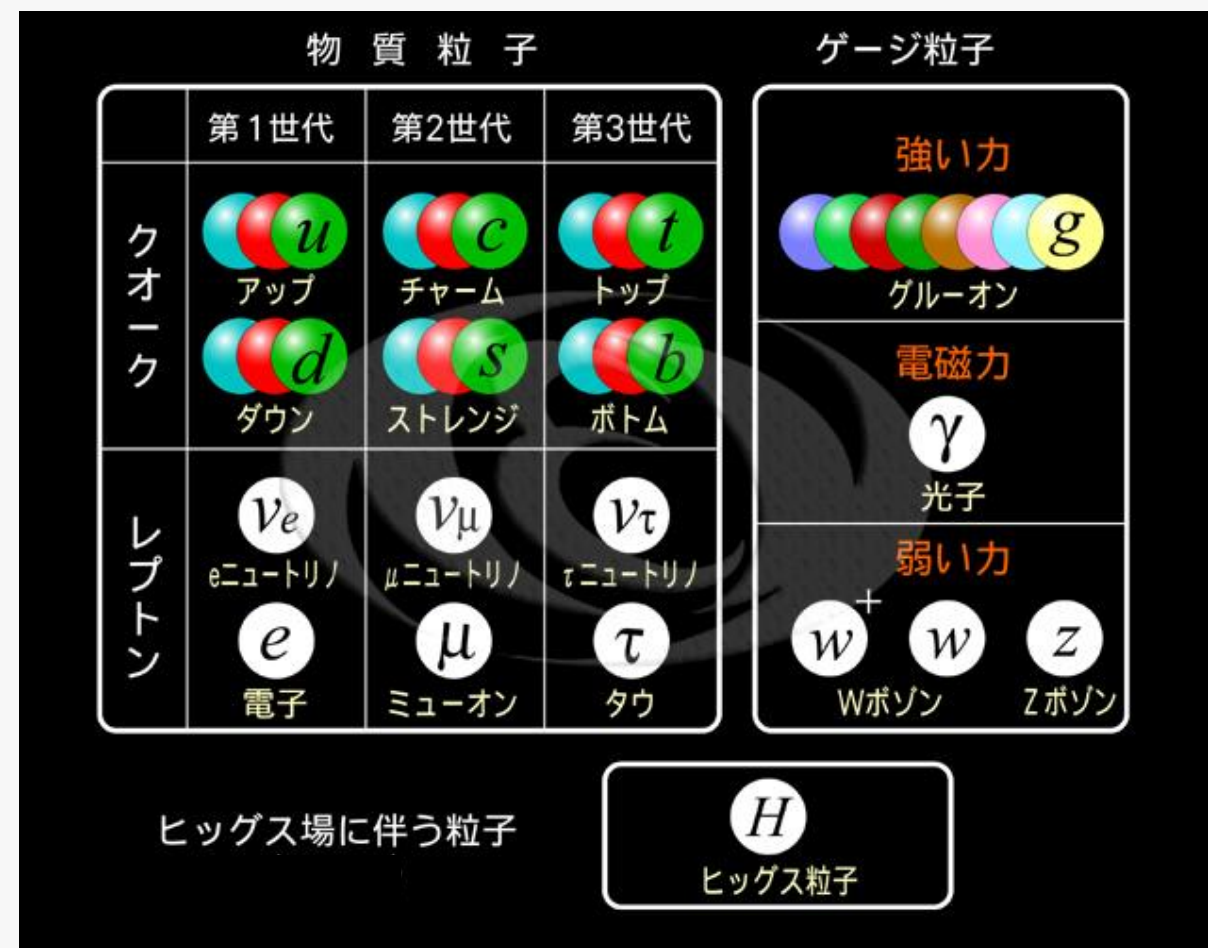


© University of California Regents  
Frederick Reines

1906



Joseph John Thomson



1965



Sin-Itiro Tomonaga



Julian Schwinger



Richard P. Feynman

1984

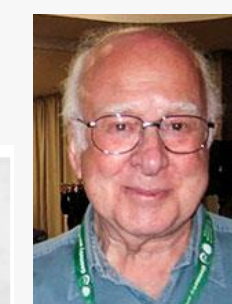


Carlo Rubbia



Simon van der Meer

2013



Peter Higgs



Francois Englert

1949



Hideki Yukawa

1936



Carl David Anderson

1957



Chen Ning Yang

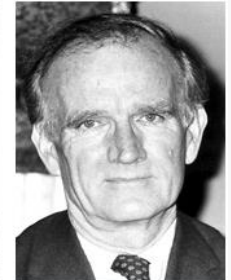


Tsung-Dao Lee

1980



James Watson Cronin



Val Logsdon Fitch

2008



Photo: University of Chicago  
Yoichiro Nambu



© The Nobel Foundation  
Photo: U. Montan  
Makoto Kobayashi



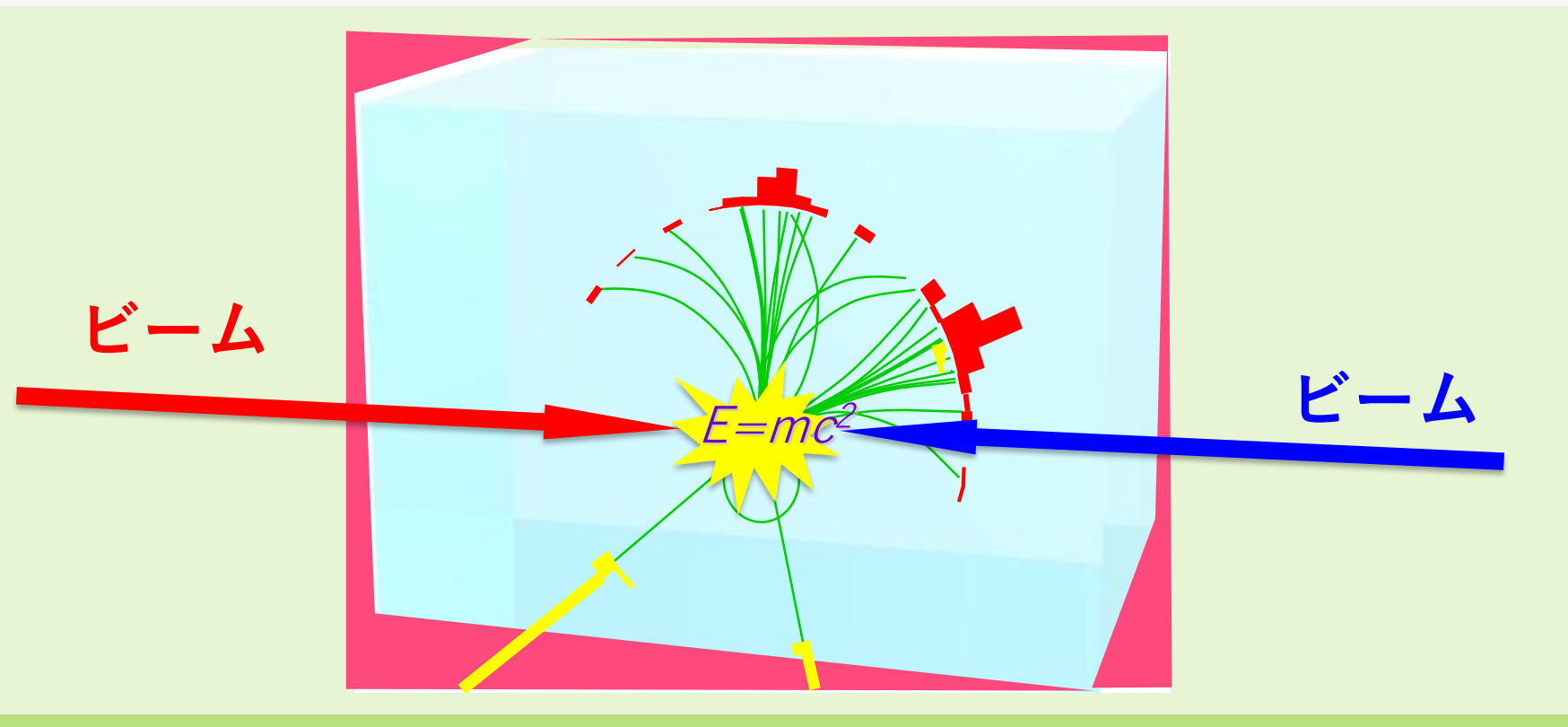
© The Nobel Foundation  
Photo: U. Montan  
Toshihide Maskawa

# 21世紀の素粒子物理

4つの力の統一のシナリオ

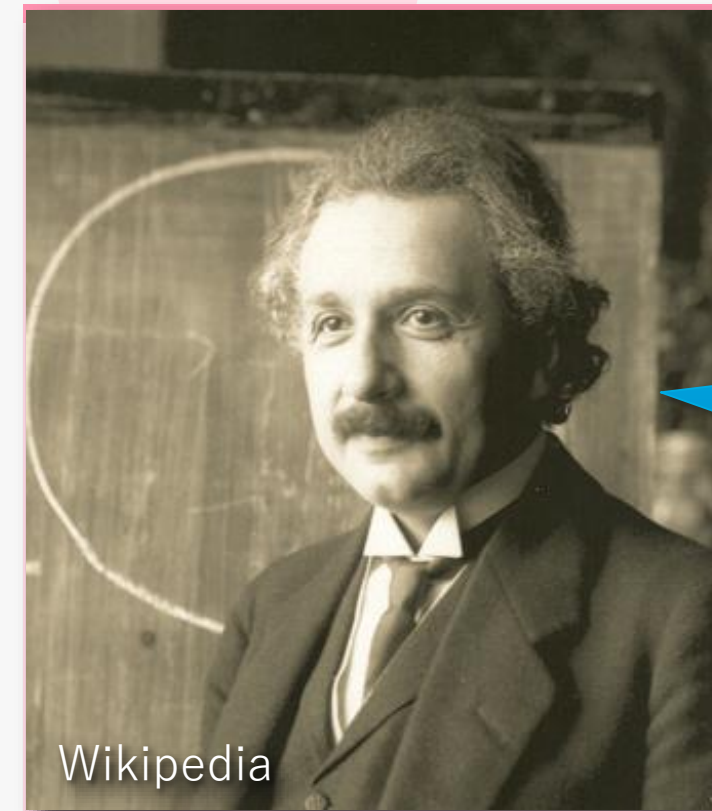


# どうやって宇宙の始まりを「創る」の？



衝突点で起きる事象を高性能測定器で記録する

より重い粒子を生成するには、より高いエネルギーが必要



Albert Einstein

『 $E=mc^2$ 』

質量とエネルギーは等価である

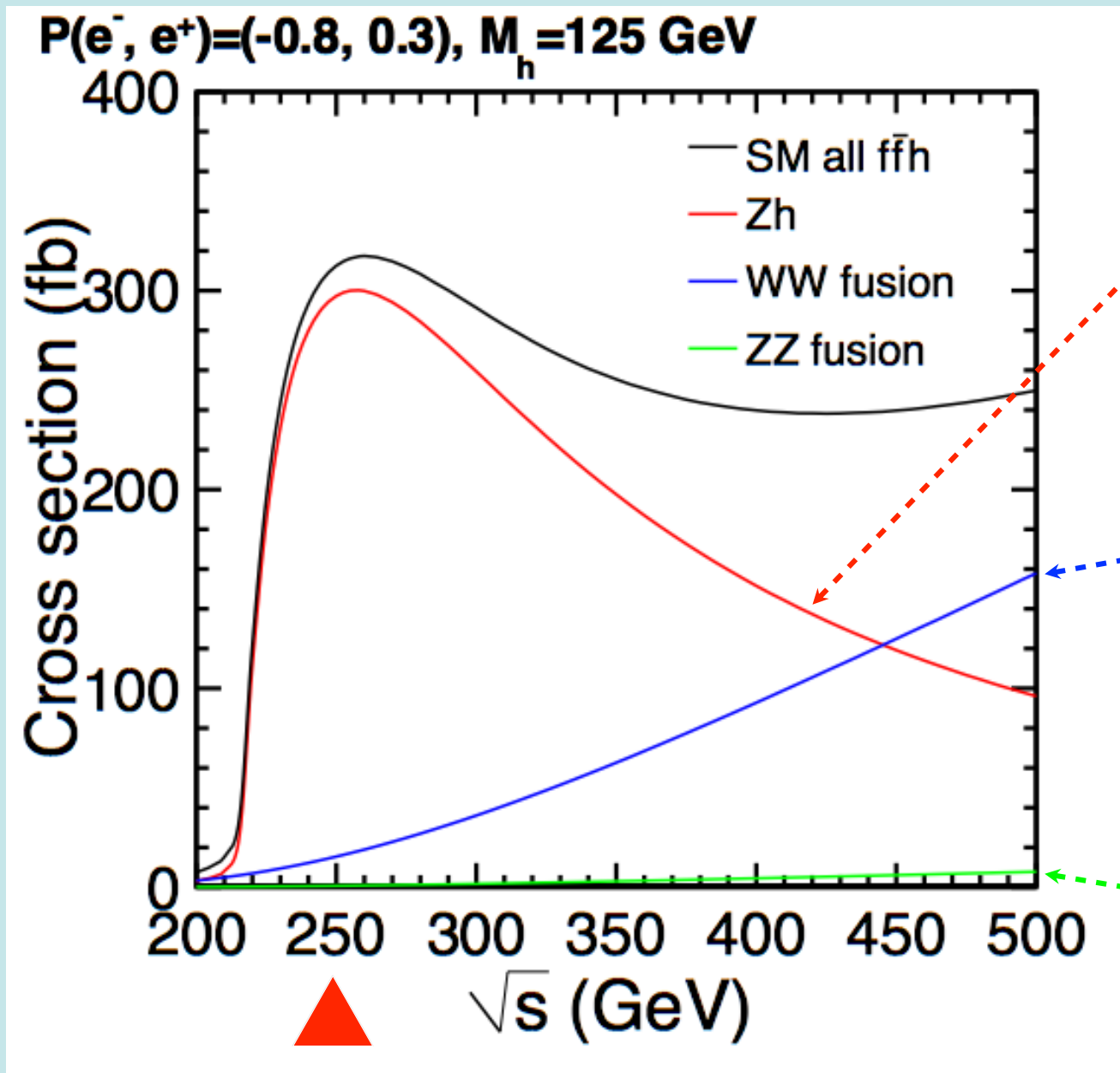
E:エネルギー  
m:粒子の質量  
c:光の速さ

宇宙の始まりに近い極限状態を局所的につくると、宇宙進化の鍵を握るヒッグス粒子などを作り出すことができる。

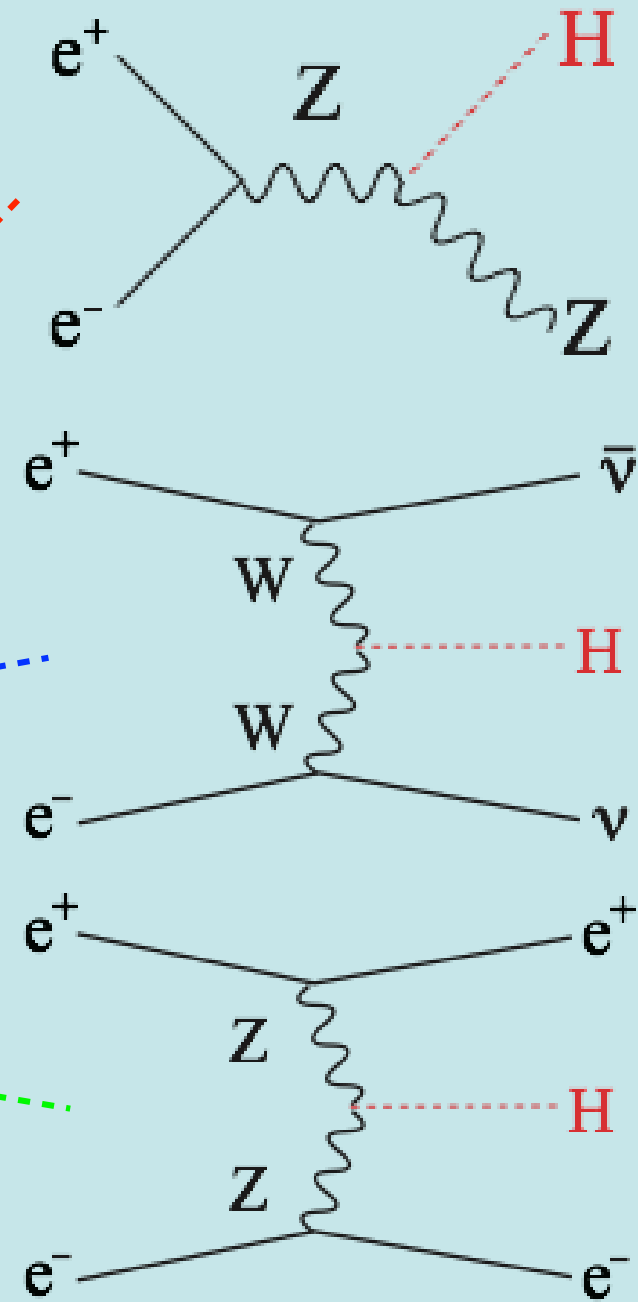
# 250 GeV is Special

## Single Higgs production is maximal

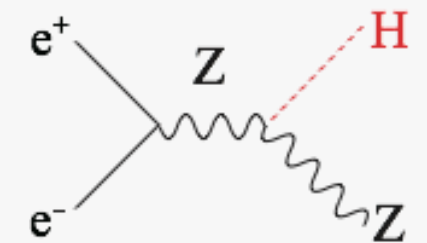
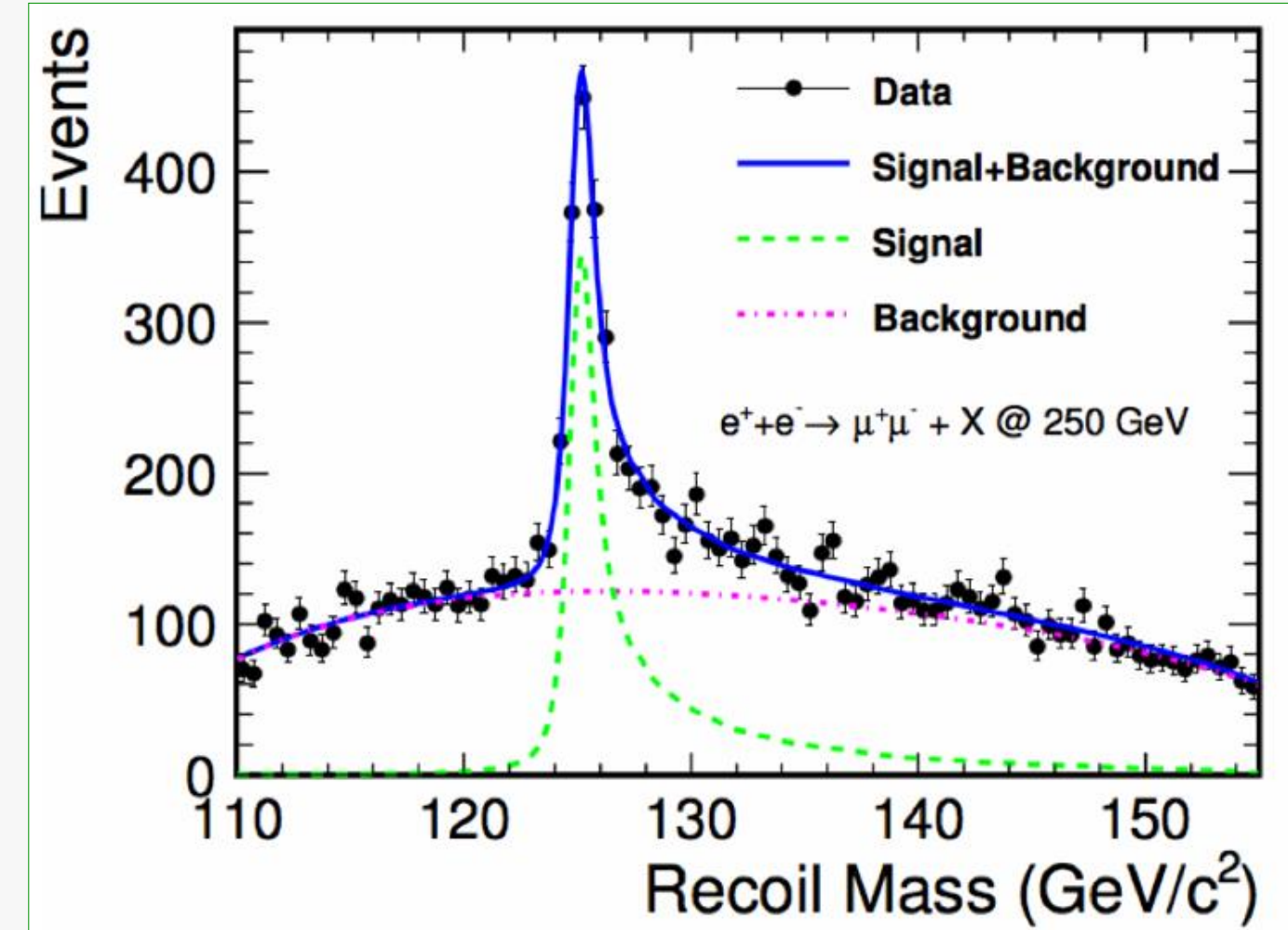
Production Cross Section  
 (=How often Higgs bosons are produced)



Approx. 0.5 million Higgs bosons with  $2 \text{ ab}^{-1}$  of data



Keisuke Fujii



Yan, Watanuki, Fujii, Ishikawa et al.  
 Phys. Rev. D94 (2016) no.11, 113002

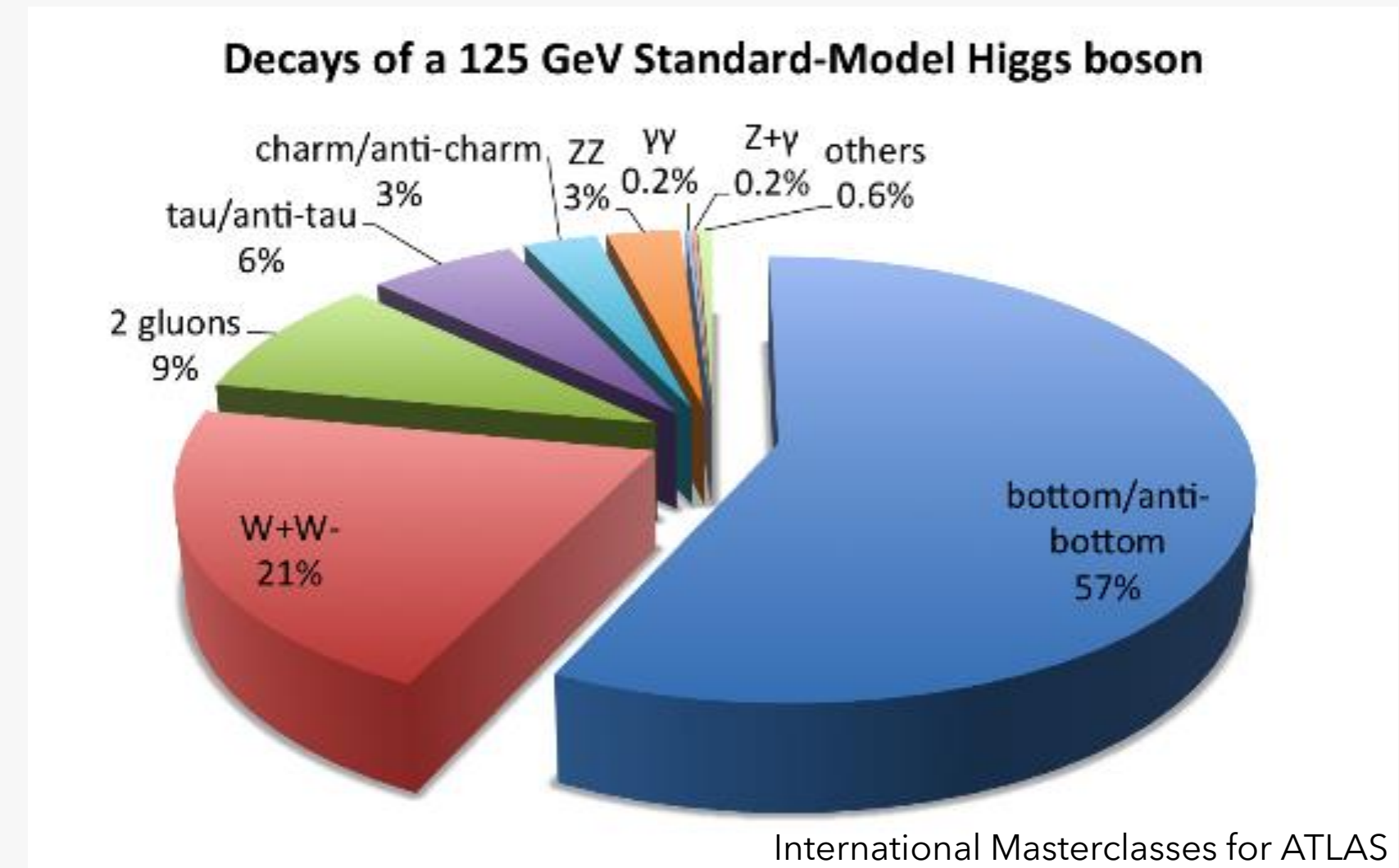
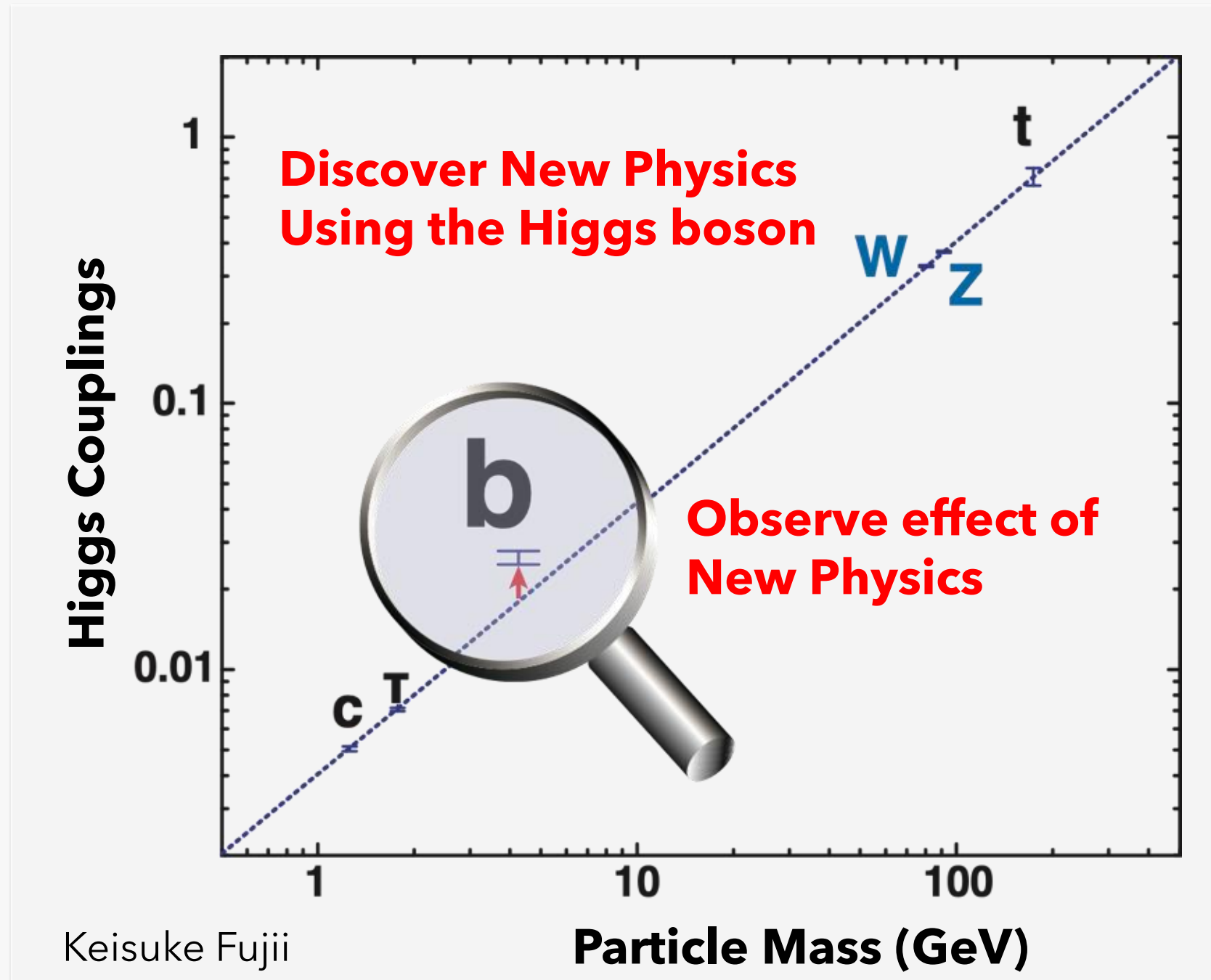
$$P_{ee} = P_Z + P_H$$

$$M_{\text{recoil}} = \sqrt{(P_{ee} - P_Z)^2}$$

**Produce many Higgs bosons, study them in detail for New Physics !!**

# Higgs Couplings

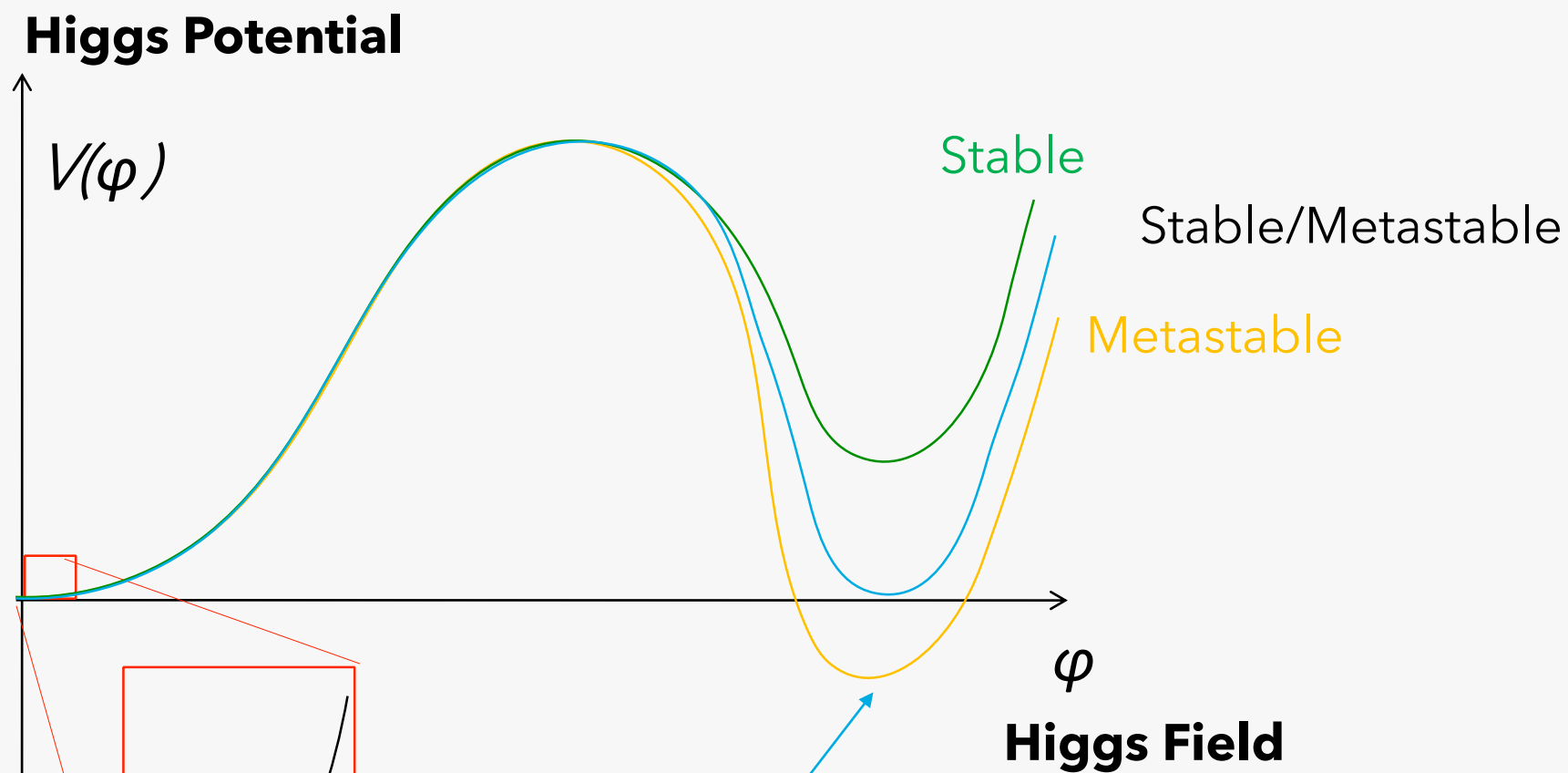
Effects of new physics manifest as deviations in the Higgs couplings (strength of interactions between the Higgs and SM particle)



→ If New Physics exists, these ratios are altered.

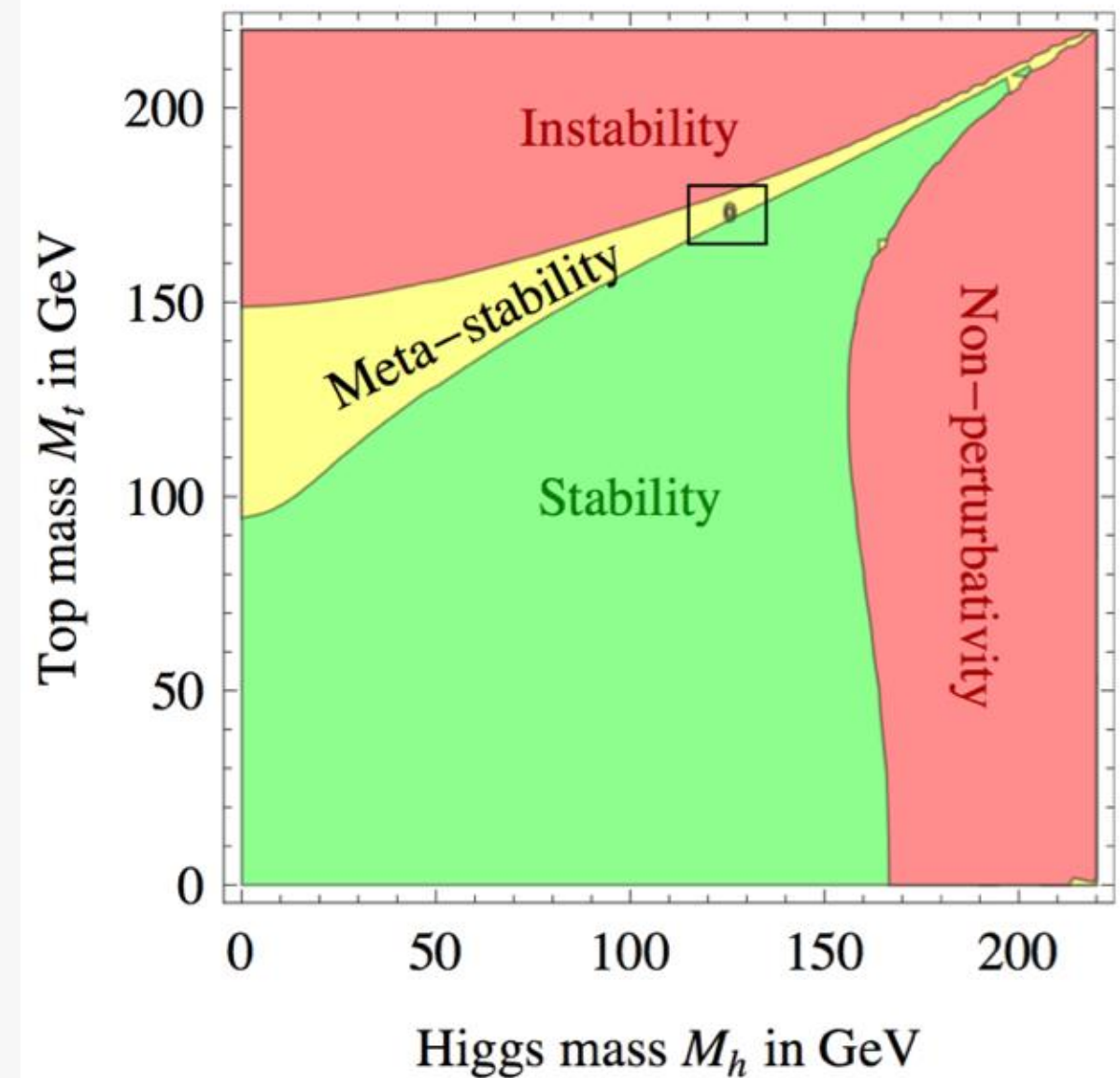
# 宇宙は未来永劫安定か？

## ヒッグス粒子とトップクォークの質量が、世界の行く末を決める



真に安定な宇宙？

今の宇宙



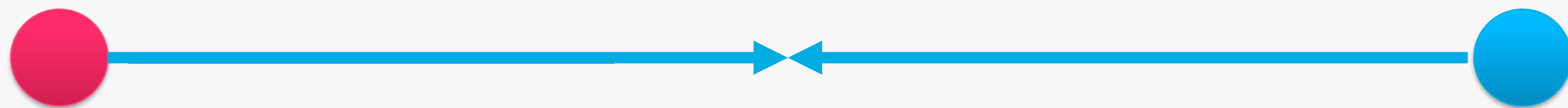
Degrassi, Di Vita, Elias Miró, Espinosa, Giudice, Isidori, Strumia  
JHEP 08 (2012) 098



# 電子・陽電子衝突

ILCは衝突型加速器

衝突型



ヒッグス粒子生成

125GeV + 125 GeV

固定型



62,500,000 GeV  
ILC 25万台分

衝突の後に粒子が動いてしまうので、極めて非効率

# 世界の衝突型加速器

Many colliders have been built.

EUROPE



PETRA

HERA

DÖRIS

ASIA



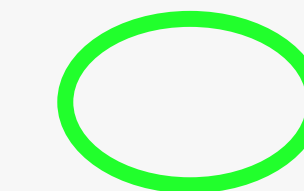
TRISTAN→KEKB

US

SPEAR

SLC

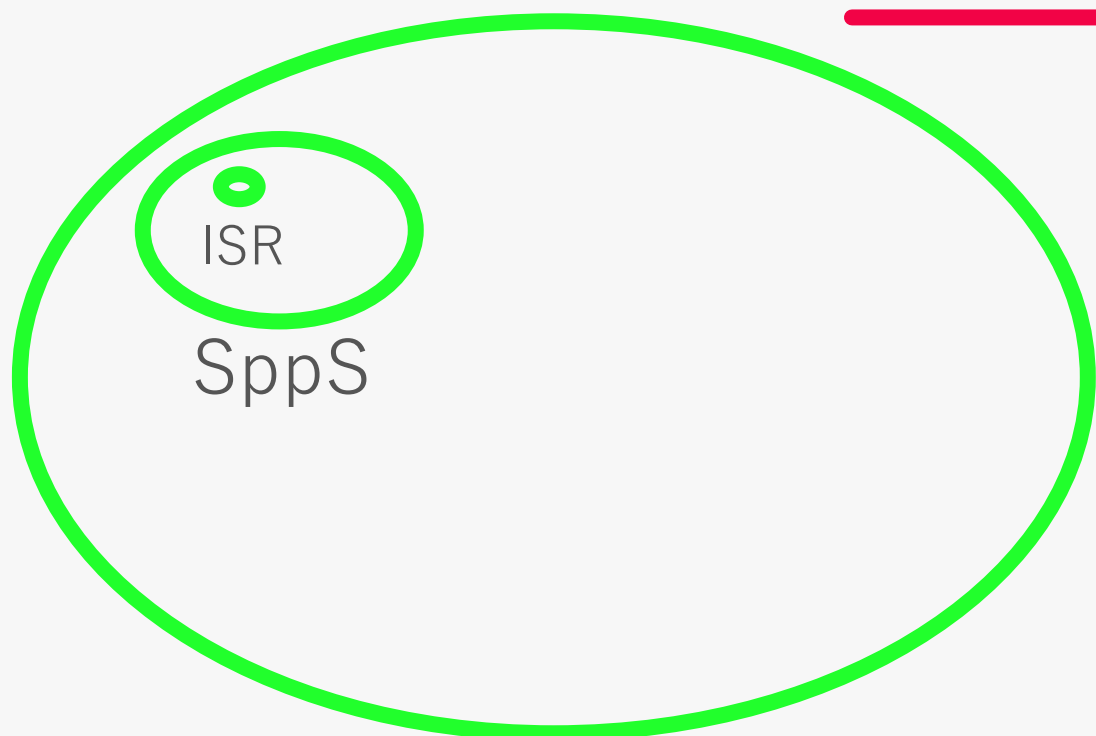
PEP



TEVATRON

SSC

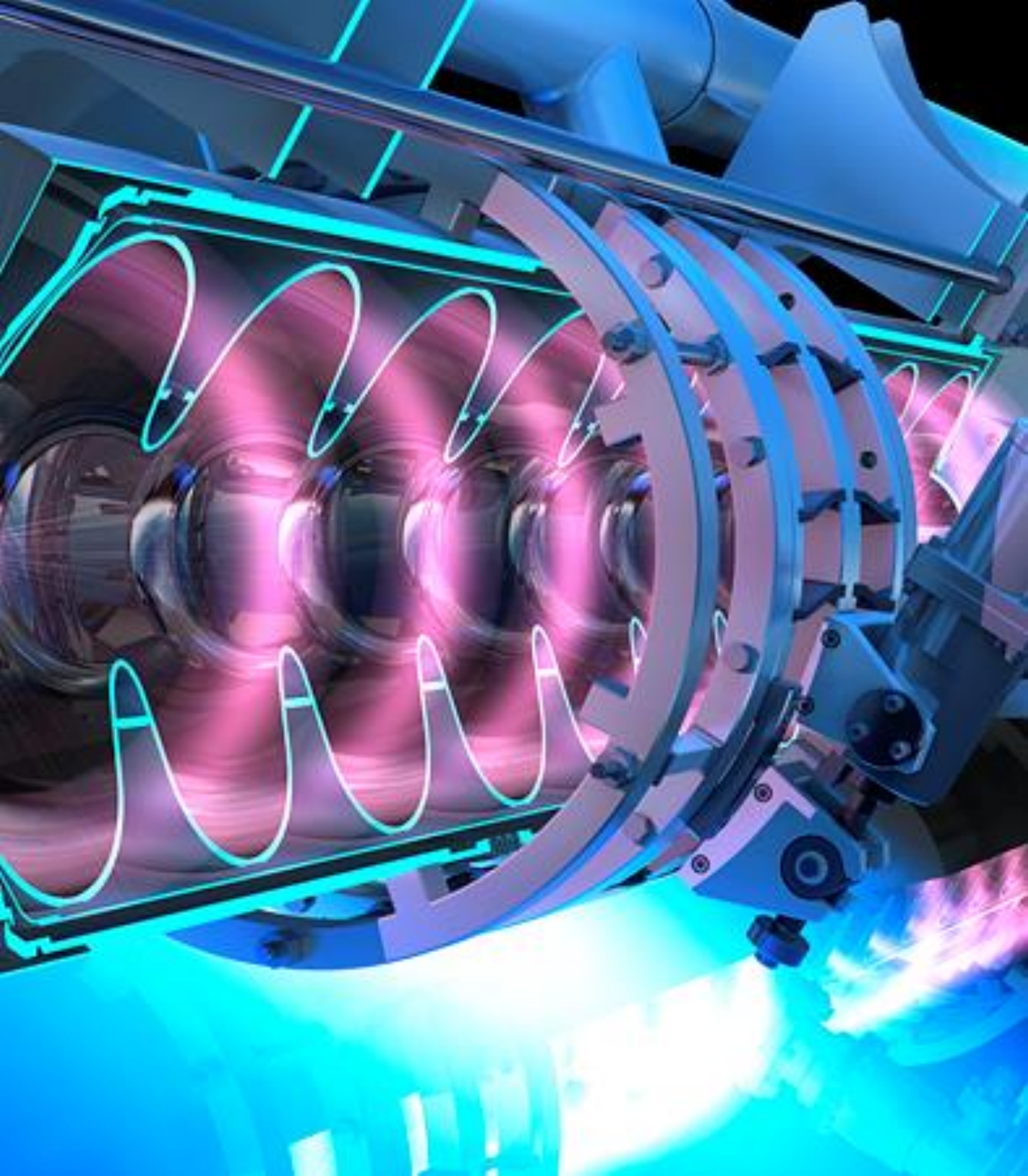
国際リニアコライダー



ISR

SppS

LEP→LHC

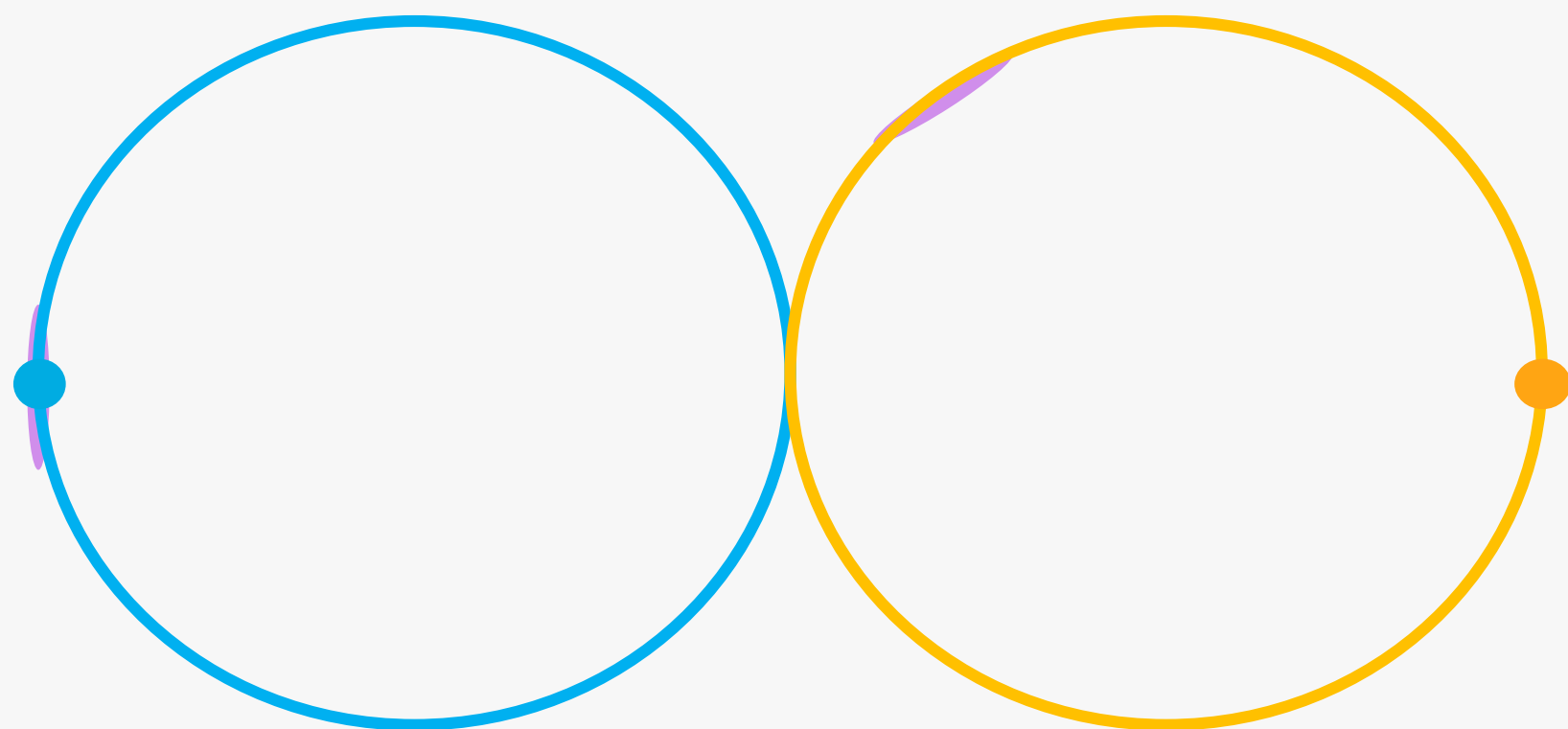


# なぜ直線？

---

# 衝突の二つのトポロジー

## リングと直線



1. 円形軌道を粒子が周回
2. 高いエネルギーになると、粒子が電磁波を放射。放射パワーはエネルギーの四乗で発散。
3. 加速が不可能に。限界はおよそ~100 GeV

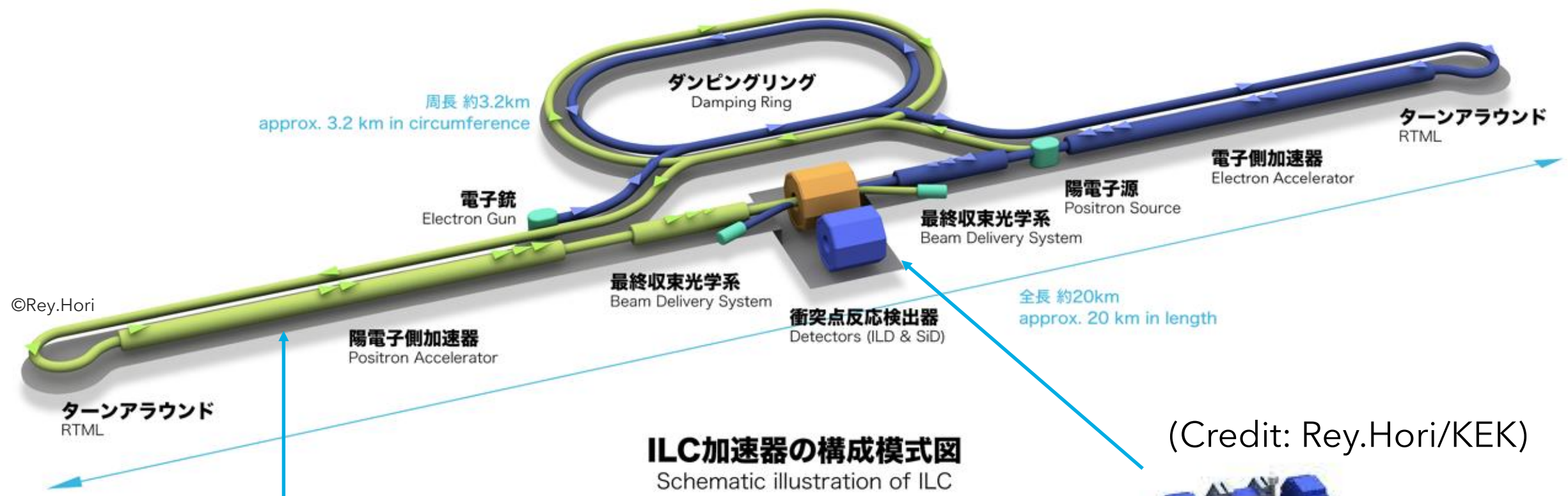


1. 粒子を直線型の加速器で加速。
2. 曲げないので、放射は無い。
3. 一回に必要なエネルギーまで到達する強力な加速器が必要。

# International Linear Collider

$e^+e^-$  linear collider

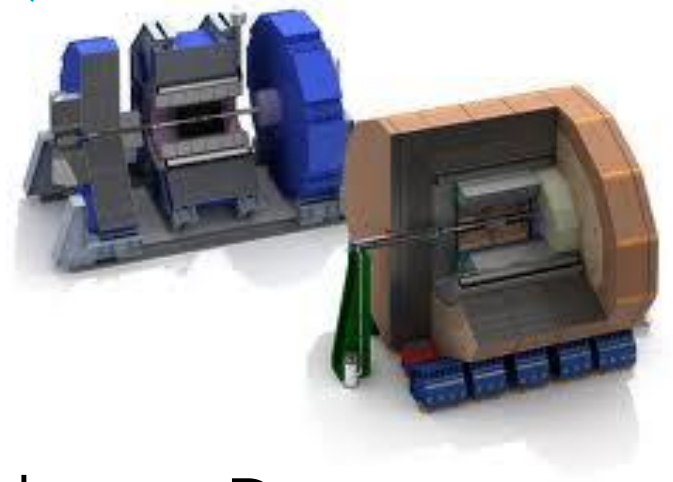
Candidate Site:  
Tohoku (Northeast), Japan



(Credit: Rey.Hori/KEK)



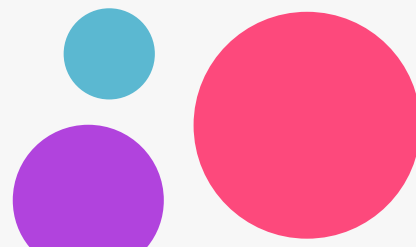
(Credit: Rey.Hori/KEK)



State-of-the-art Detector  
Currently two proposals: SiD, ILD

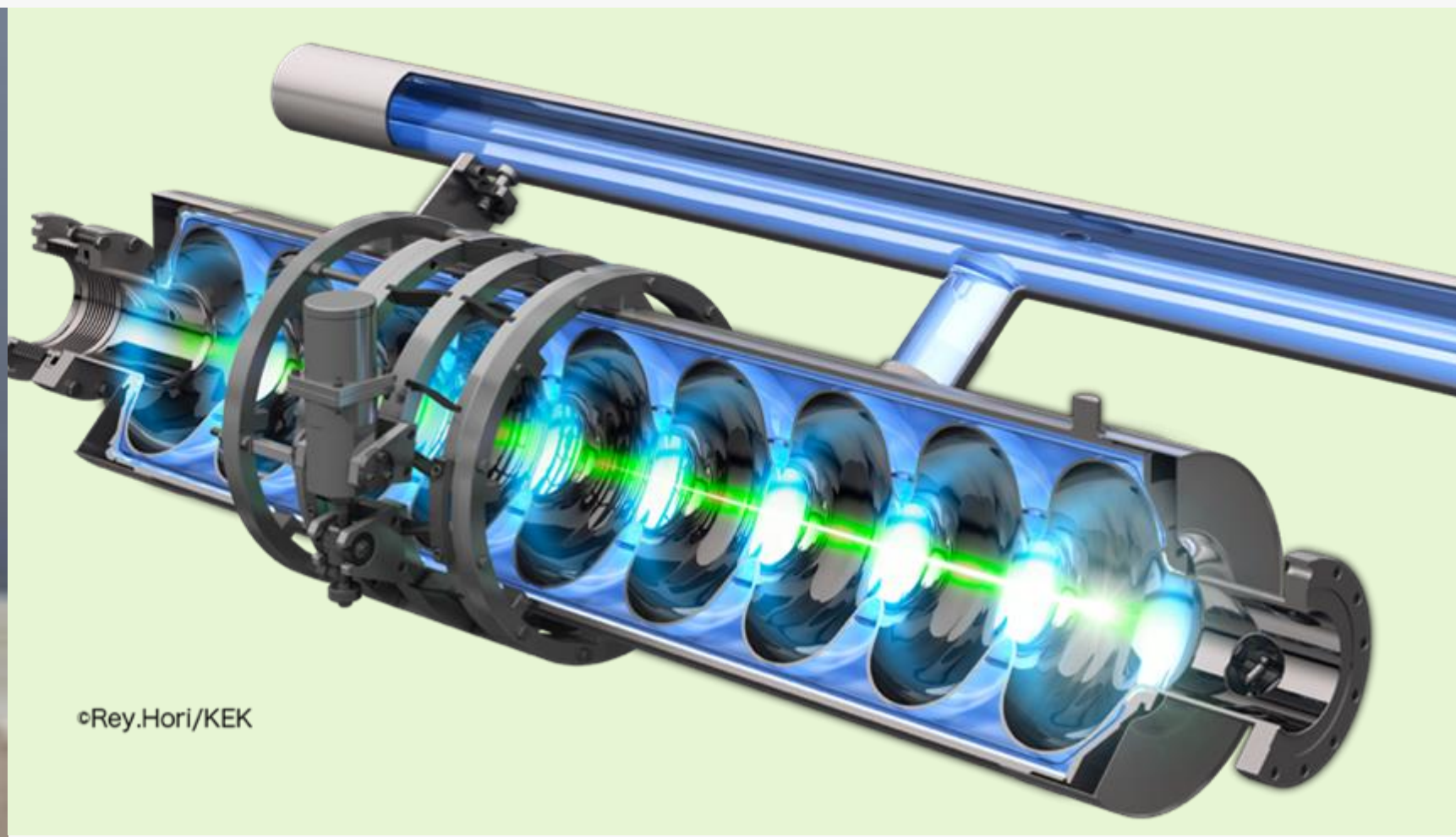
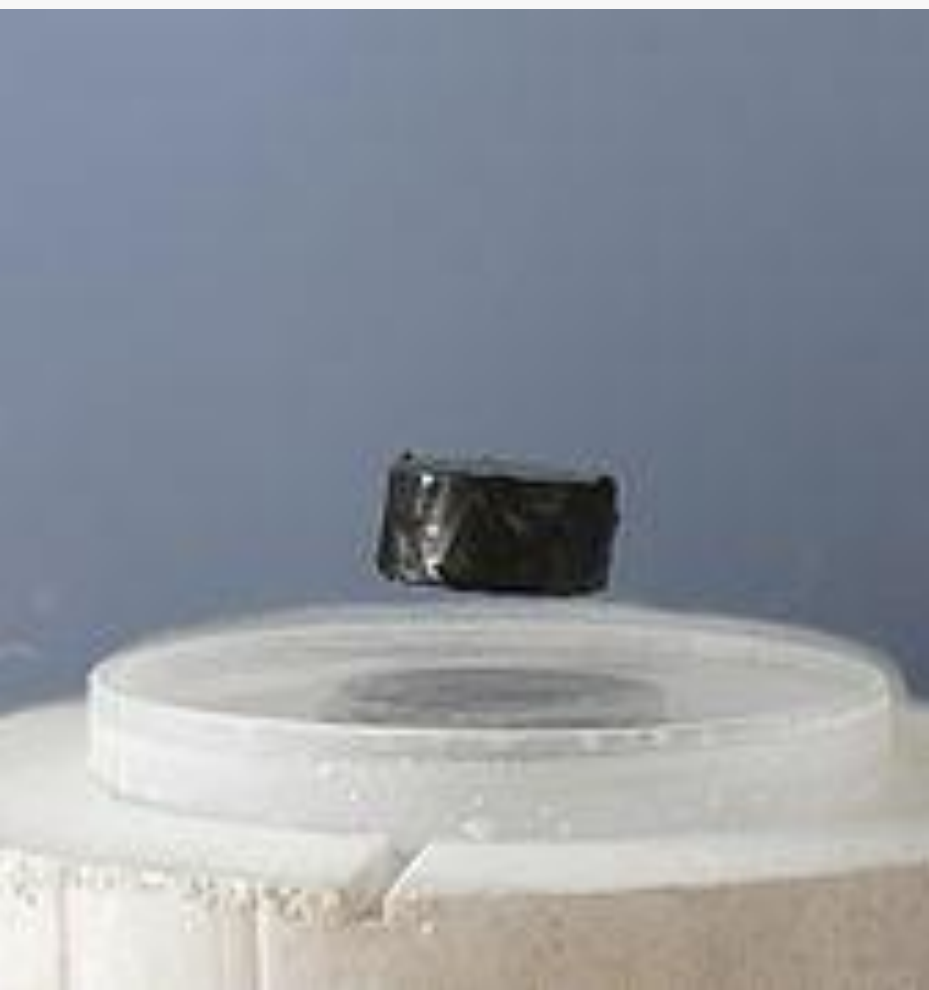
21km underground tunnel  
Superconducting RF acceleration technology:  
Accelerating gradient 31.5 MV/m

K. Kawagoe

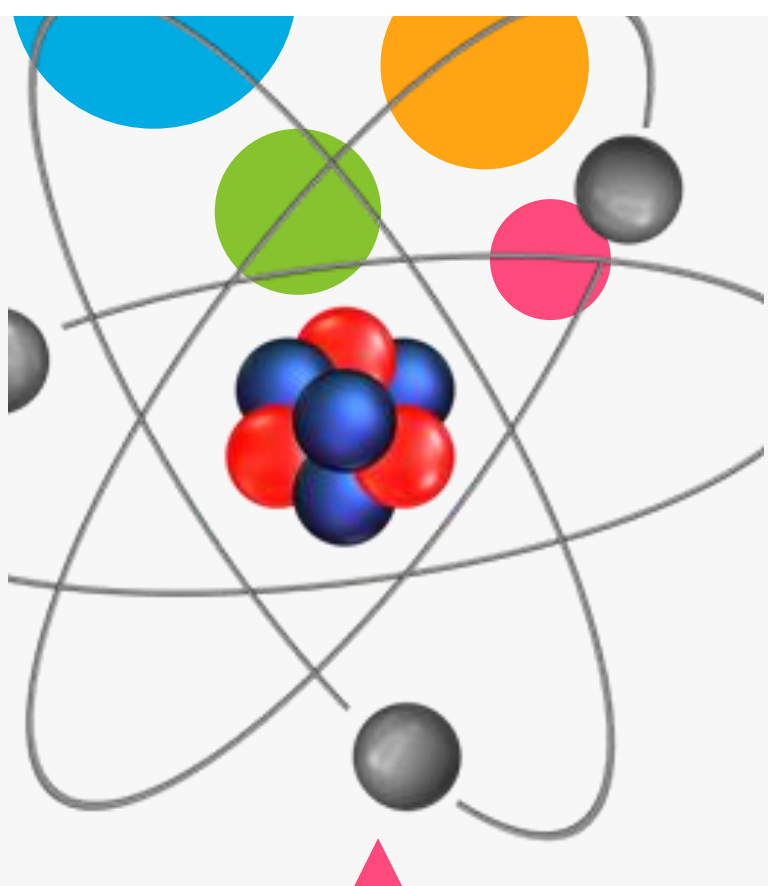



# 超伝導加速器

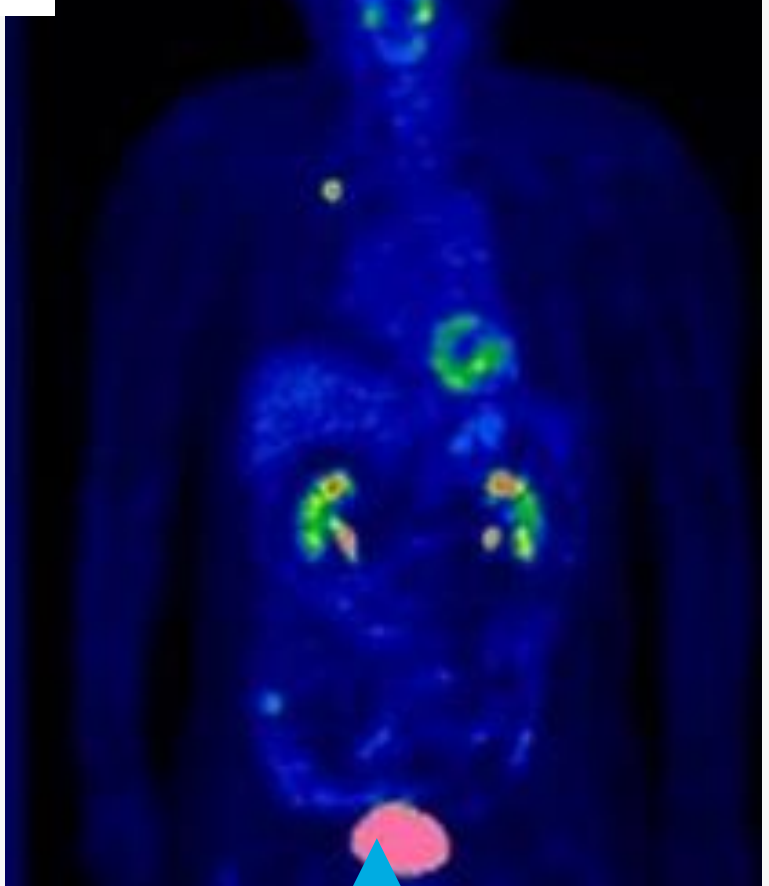
ILCを支えるクールガイ




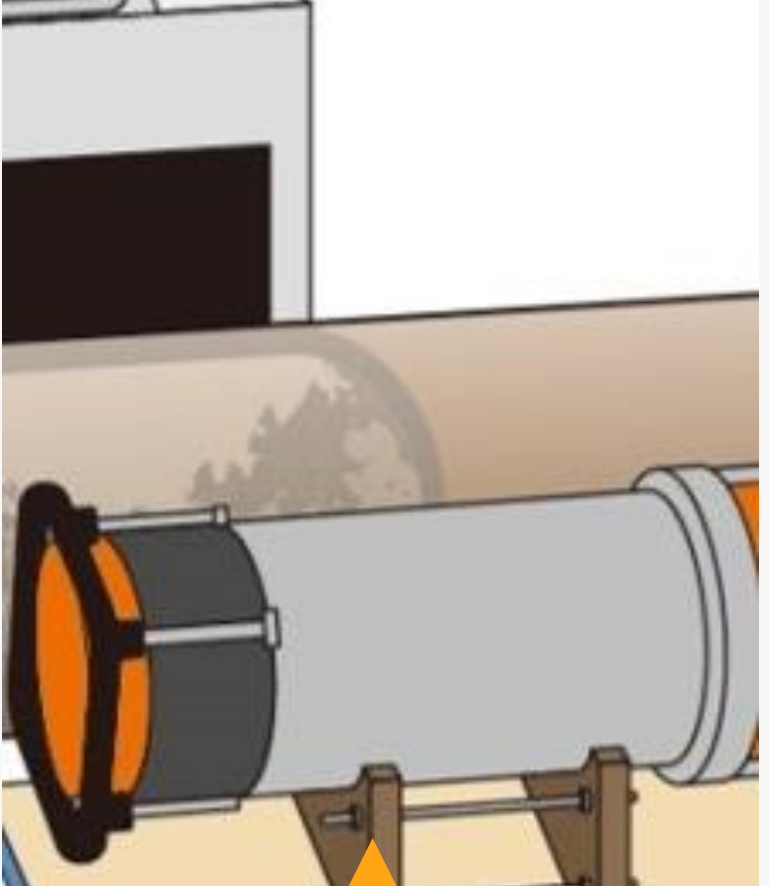
- 超流動ヘリウムにより2.0 Kという超低温まで加速器（Nb空洞）を冷却。超伝導にする。
- ほぼ電力損失が無い状態で、高い加速勾配 31.5 MV/mを実現。
- 一気の加速と消費電力の低減（エコ）を両立。




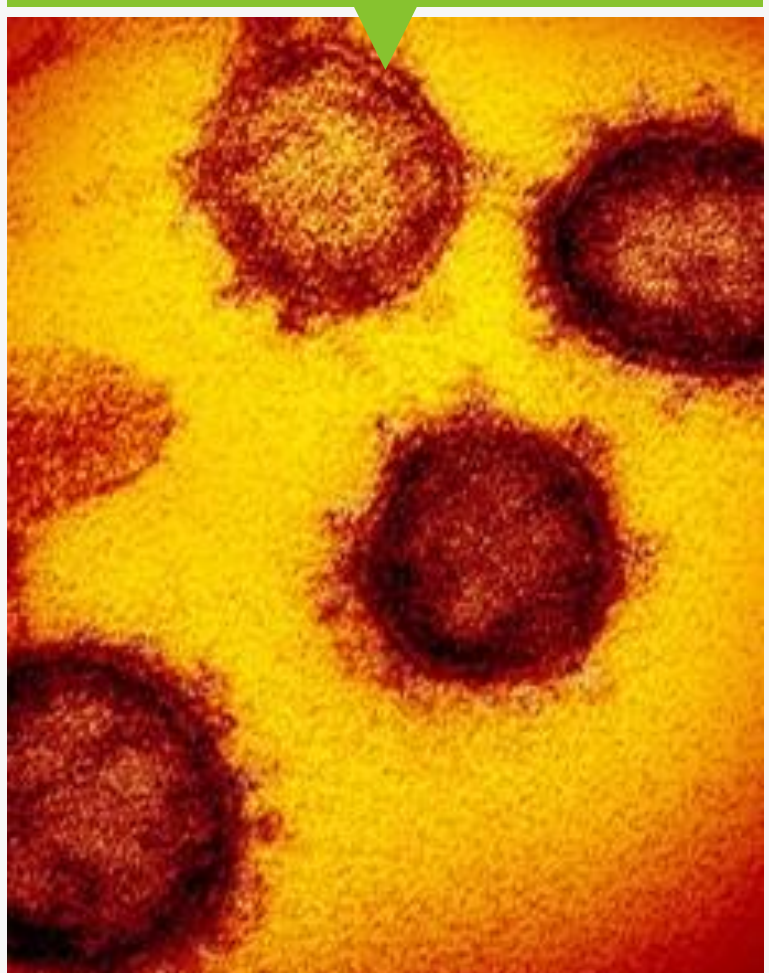
  
極微の世界  
細胞、病原菌、  
ウイルス、  
ナノ物質の解明



  
薬の開発  
タンパク質、酵素の  
構造と機能解析から  
新薬の設計



  
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

# 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。

炭素14

炭素12

## 加速器で分析

明確に分離。

炭素14

炭素12



CC Huthe Meow



AFP通信

## ルーブル美術館専用加速器

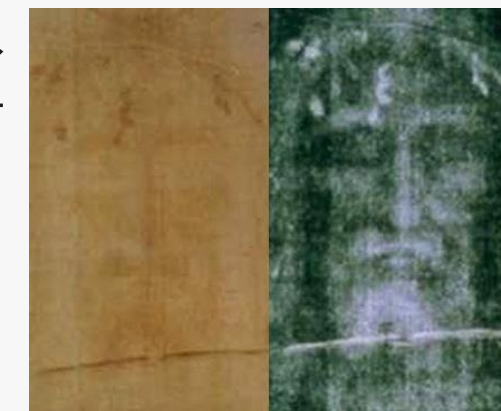


オックスフォードの研究者が偽物と鑑定したエジプト男子立像、加速器分析で本物と判明。



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。

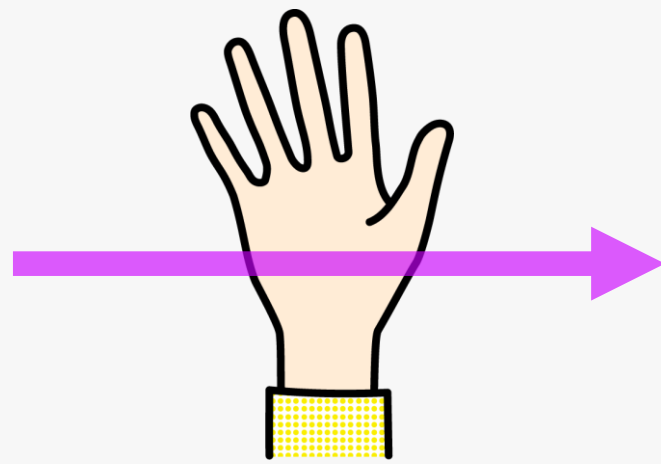


イタリア人画家、フェルナン・レジェの作品の一つが贗作であることが加速器を用いて判明。



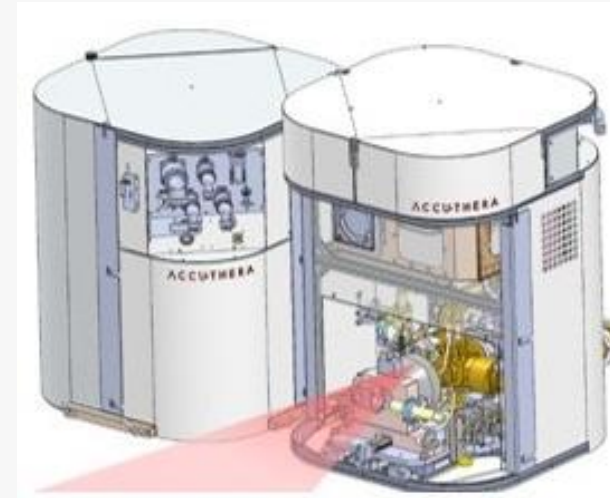


# 加速器ビームで内部を探る



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

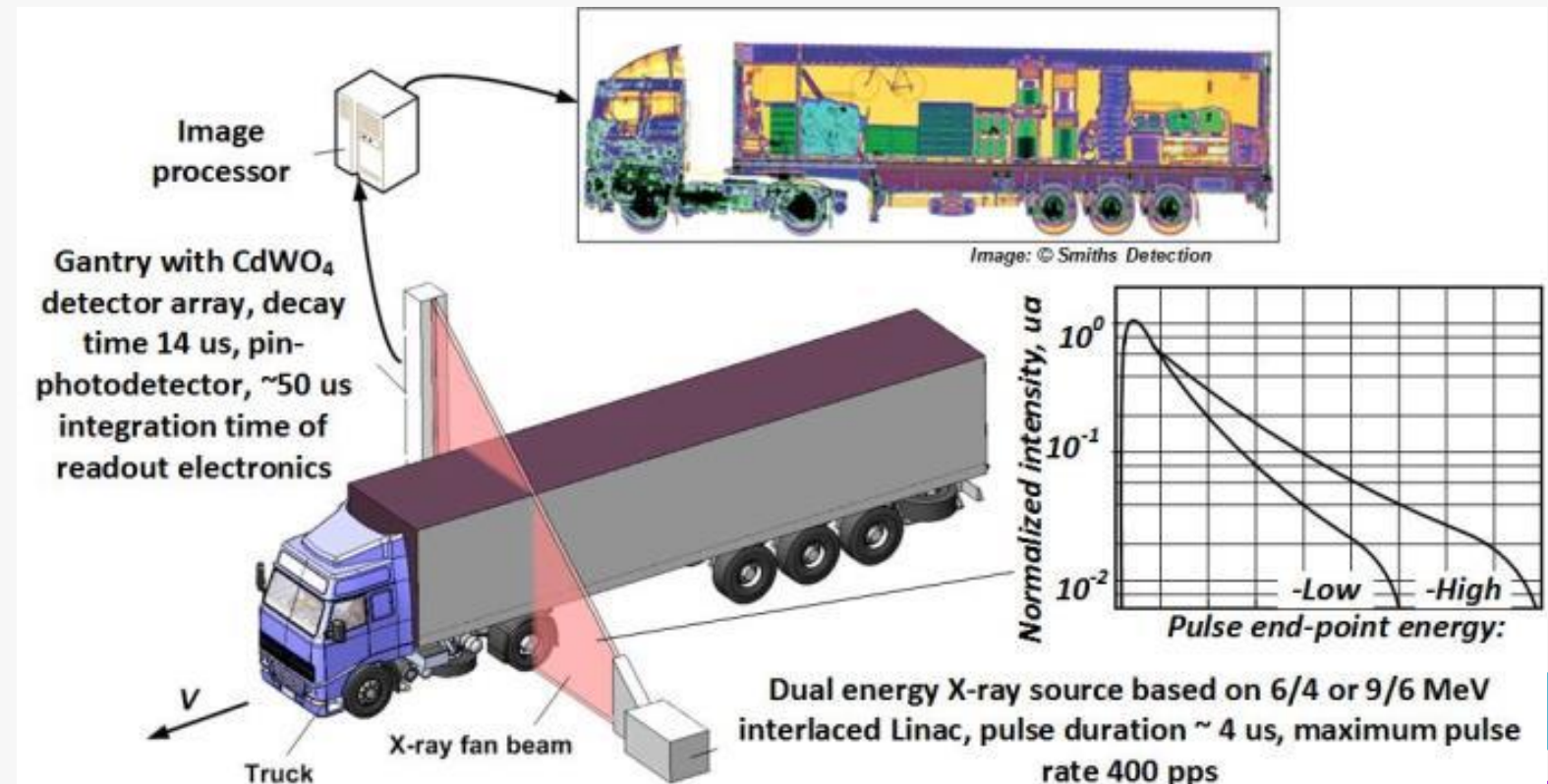
可搬型X線源



橋梁などの健全性検査



文化財調査



貨物検査システム

# ILC-Japan 共同研究タスクフォース

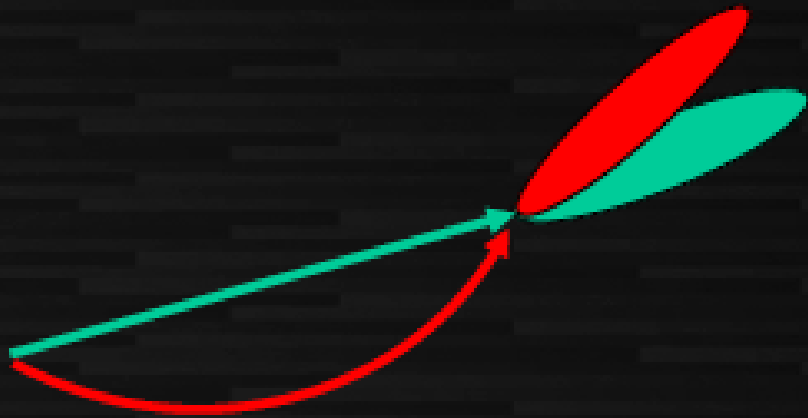
- 大型プロジェクトは、世界的にはCDプロセス(段階的实施)が常識だが、日本にはそのような仕組みがない。
- CD(Critical Decision) プロセス:計画立案、コンセプト設計、技術設計、工学設計、建設、実施、事後評価と、段階ごとに予算承認、次の段階への移行の可否を評価し、プロジェクトを管理。
- 日本にはそのような仕組みがないので、大型プロジェクトの立ち上げは、苦しいやりくりを迫られる。
- この苦しいやりくりを、既存の予算や仕組みを活用し、少しでも楽にするのがこのTFの目的。
- TF座長：栗木（広島大）



# Particle flow and new technologies

## Picosec timing

5-dimensional clustering

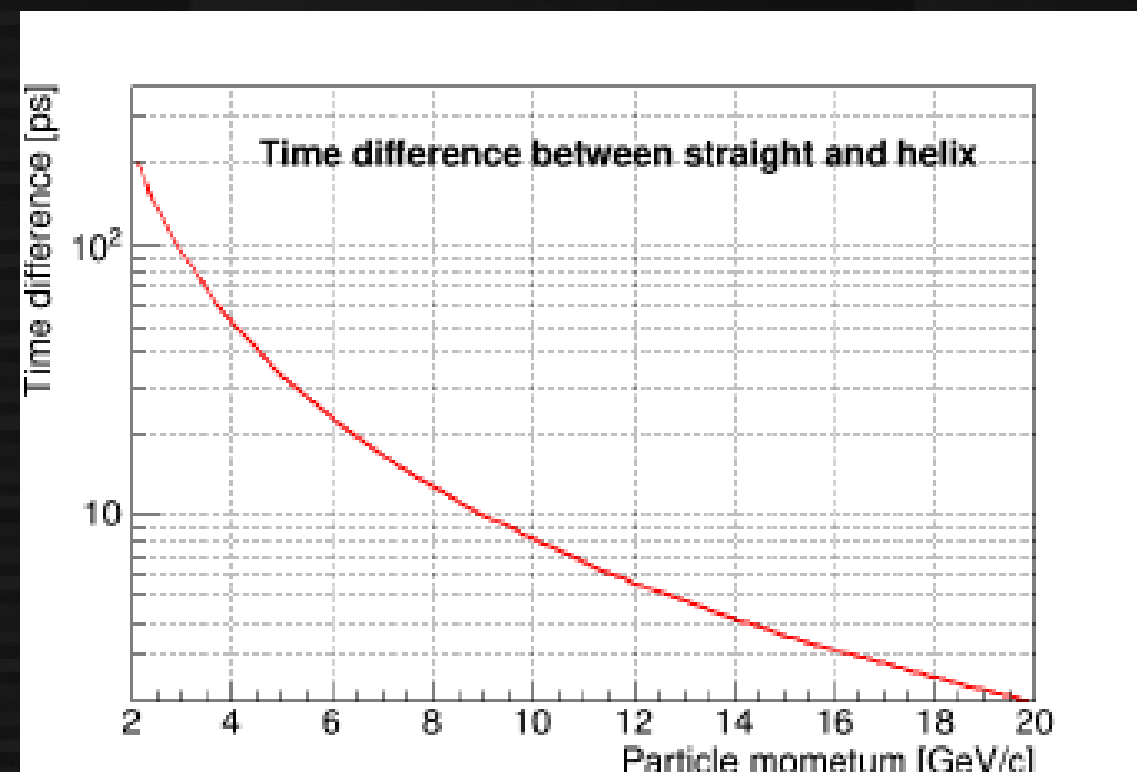


Timing resolution of EM cluster can be > 10 times higher than MIP thanks to averaging (intelligent pattern recognition necessary)

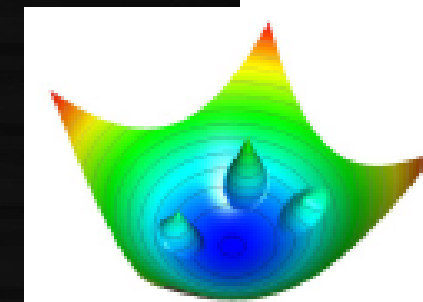
## Machine learning

- Current PFA is human-tuned → dependence on detector performance difficult to be seen
- 5D clustering with timing information
- Better performance for physics

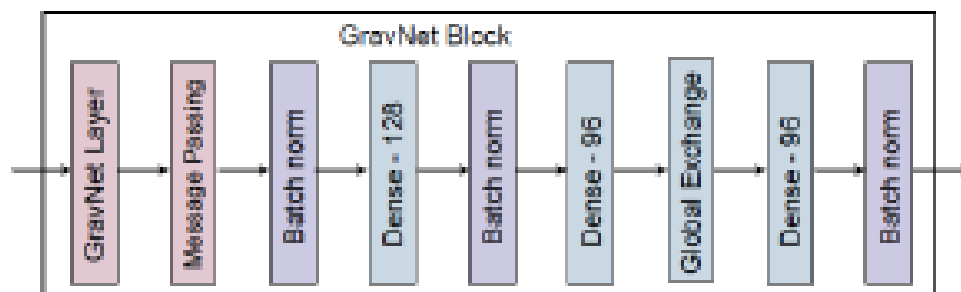
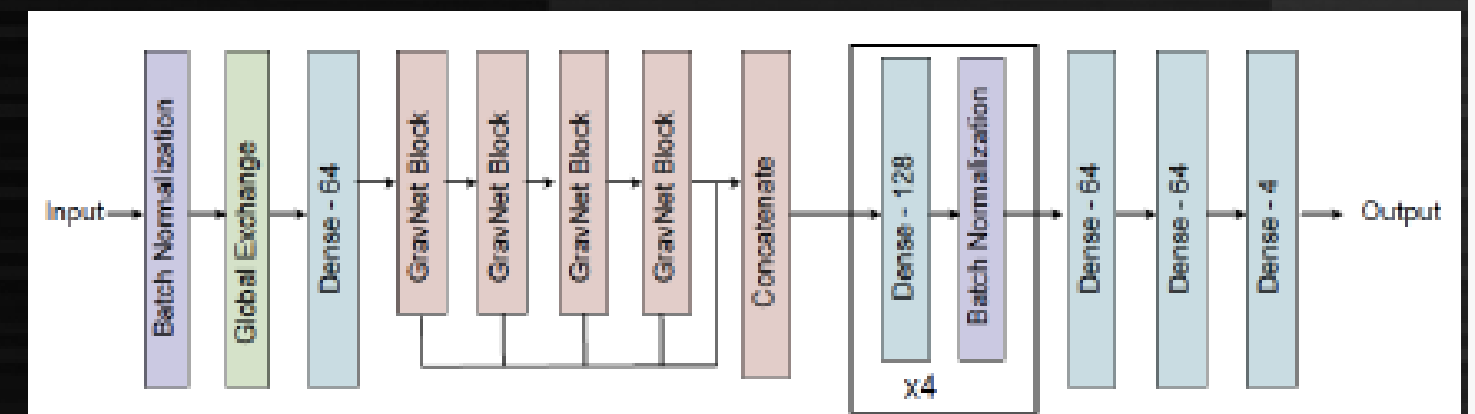
Timing difference on charged and neutral clusters



Loss function



< 10 psec cluster resolution preferred

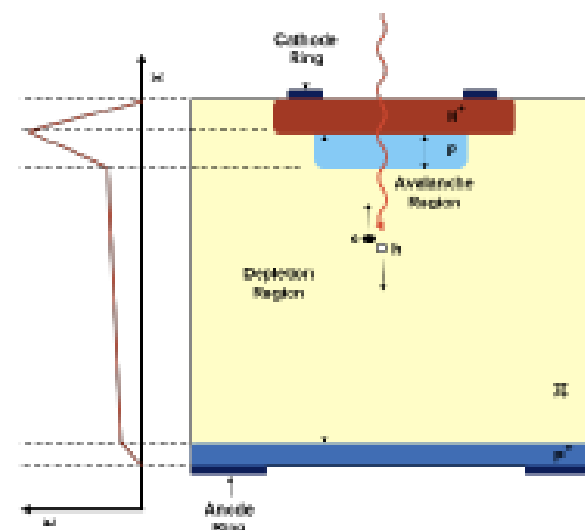


CMS HGCal algorithm  
Now trying to apply to ILC simulation

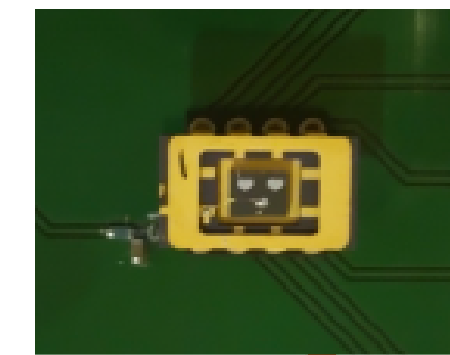
# Energy Frontier Group (ATLAS + ILC/ILD)

M. Tomoto

## 要素技術開発

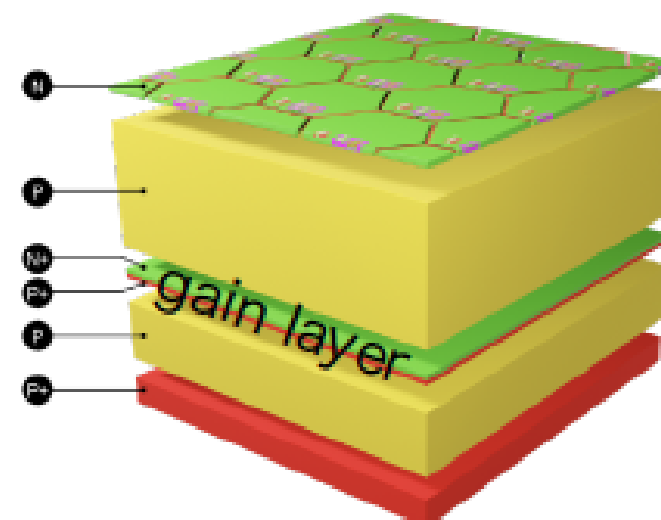


Low Gain Avalanche Diode (LGAD)



New material

radhard?



SiGe BiCMOS

Picosecond

~10 ps timing resolution

### Groups involved in MAPS @ Strasbourg




**Belle II**

- Monitoring of beam BKG
  - MIMOSA-26 (2008)
- Upgrade vertex detector (VTX)
  - OSFPIX sensor (~2024)




**ALICE**

- Contributed to Inner Tracking System 2 (ITS2)
  - All PIDE sensor (2017)
- Upgrade with ITS3
  - MOSS stitched sensor (~2025)



**Future e+e- collider**

- Continuous R&D to match requirements
- Intermediate contribution to CBM
  - MIMOSA sensor (~2025)



**Radiation measurement**

- X-ray (<10 keV) spectroscopy & counting
- Ions counting
  - Monolithic-Imager sensor
- Ion identification
  - TIMM sensor

Technical implementation + R&D  
by C4PI = core facility for CMOS pixel sensors

J. Baudot - MAPS activities of IPHC-Strasbourg - KEK, 2022/11/29

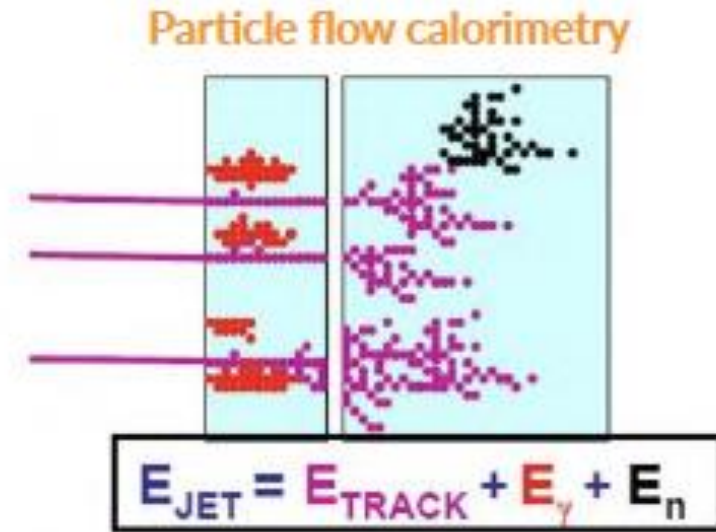
Monolithic CMOS

few  $\mu\text{m}$  spatial resolution

# Concept of Proposed Calorimetry

**Dual-Readout calorimetry**

Better performance at high energy, PID



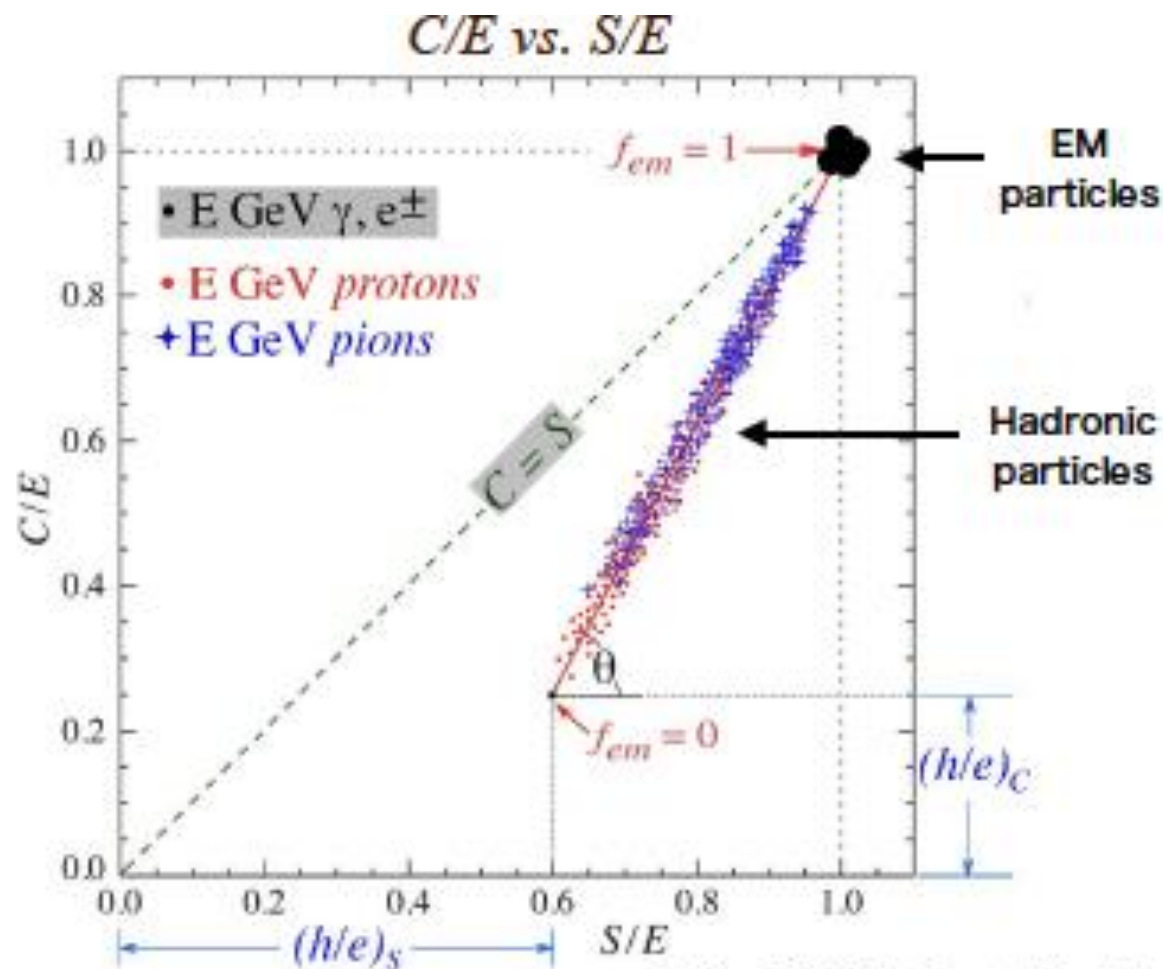
**High-Granularity calorimetry**

Better performance at low energy

**New calorimetry for future colliders**

**psec timing**

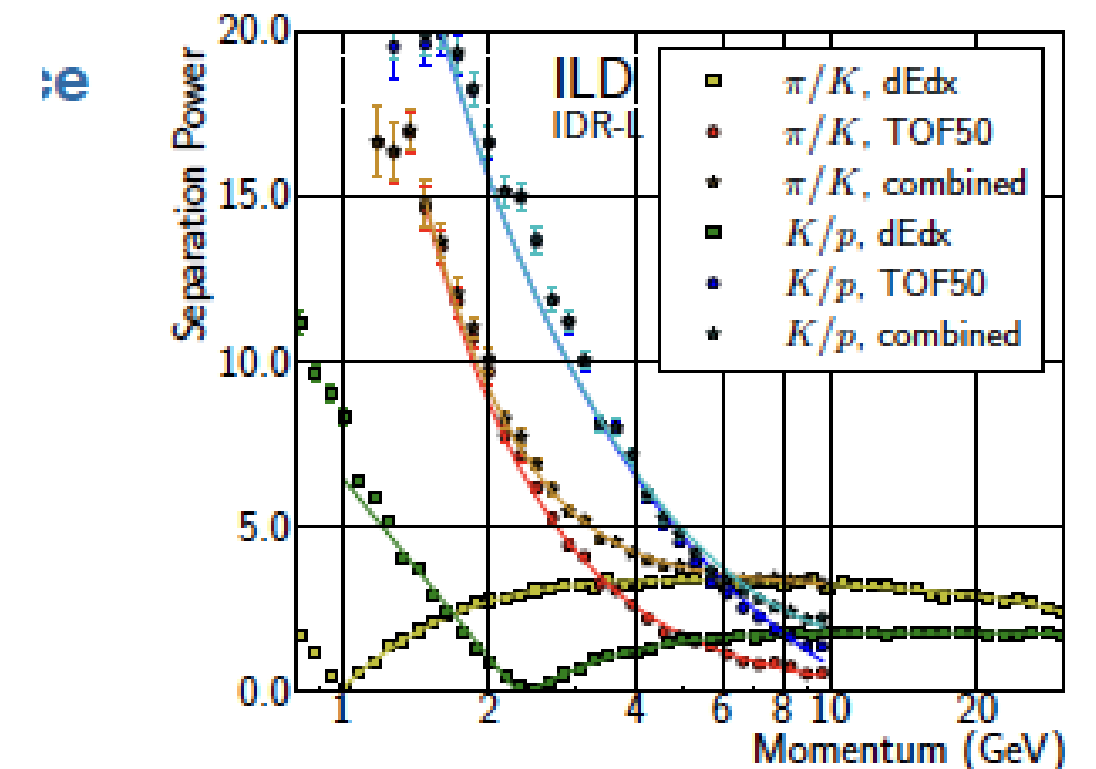
PID, BG reduction, improve PFA



Y. Kim, EIC Calorimeter Workshop 2021

Effect of TOF (res. 50ps) on particle ID performance

arXiv:2110.15115





# 研究開発カテゴリー

- 研究開発といっても、いろいろな性質のアイテムがある。
- 一般的な適用可能性を持つものは、いわゆる競争的資金で研究可能。
- プロジェクト特有の技術は、自然科学系の競争的資金では難しい。
- 産学連携などの異なる文脈では、実施可能なのではないか？

	技術の種類
1) 一般的	競争的資金で研究可能
2) プロジェクト特有	本来はプロジェクト経費で実施。 競争的資金では困難？

