

# ICEPP研究紹介

## MEG実験 / ILC計画

担当教員：森俊則・大谷航

# 残された多くの謎

暗黒物質

消えた反物質

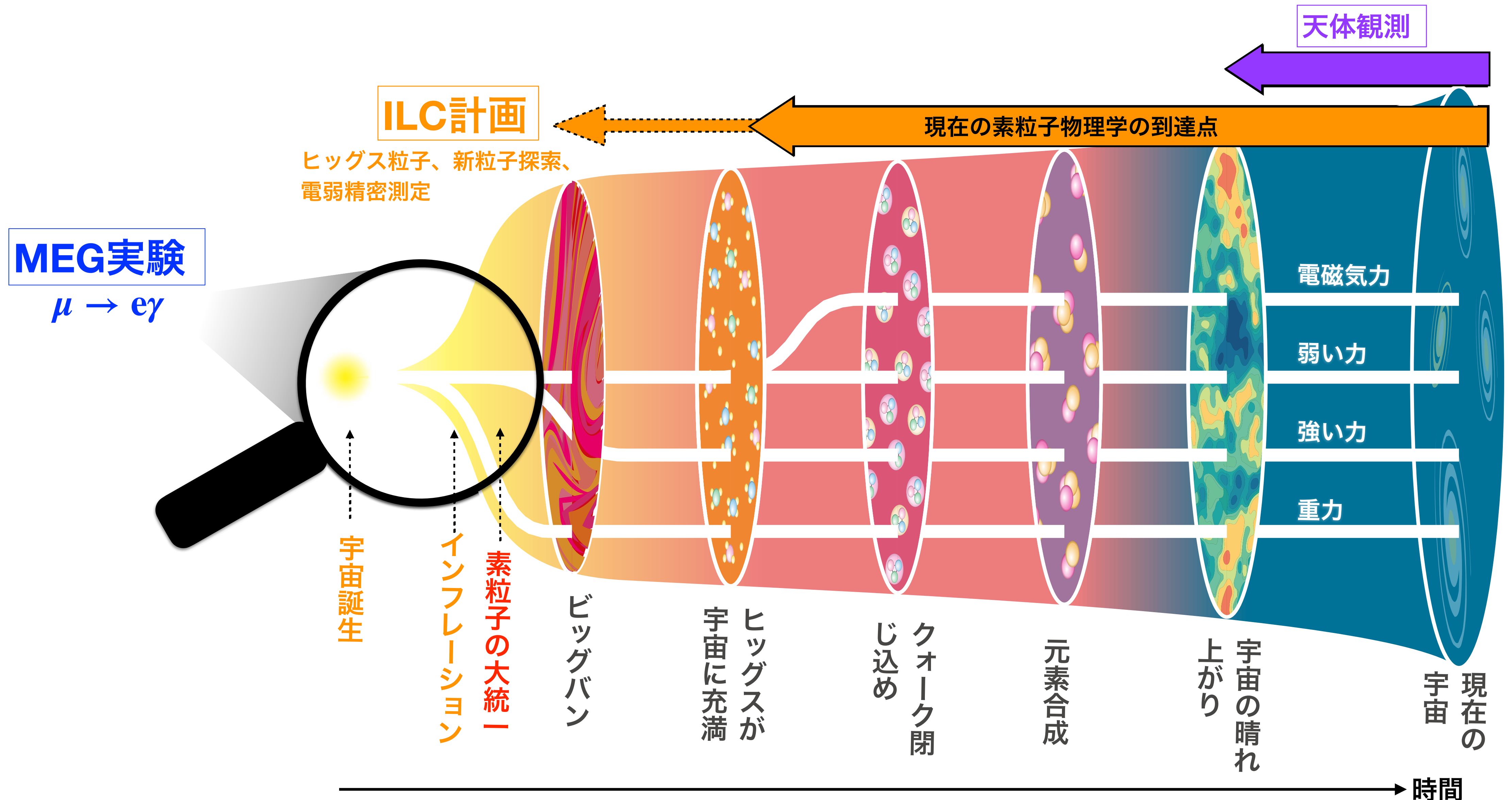
暗黒エネルギー

素粒子の大統一

インフレーション

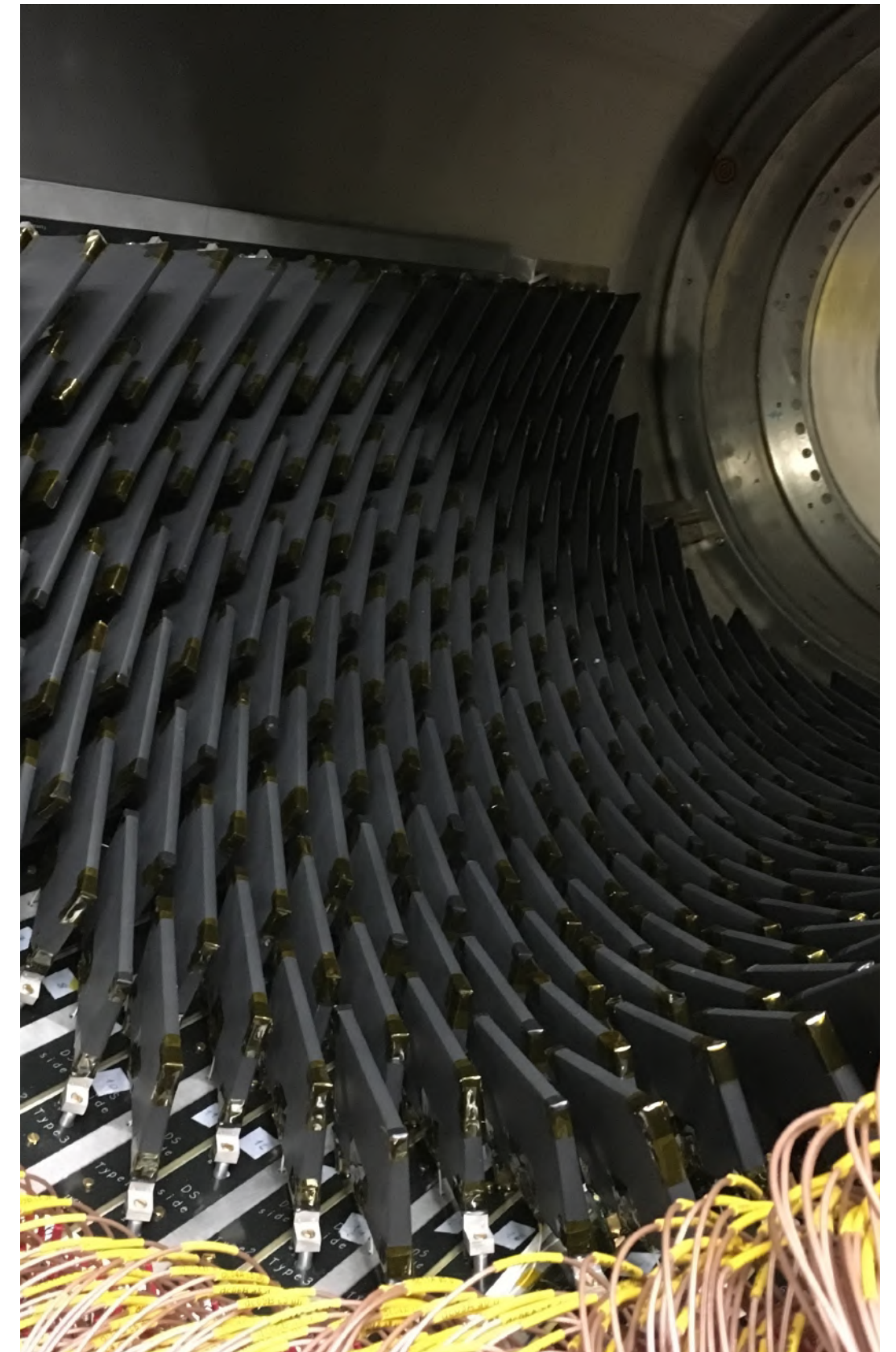
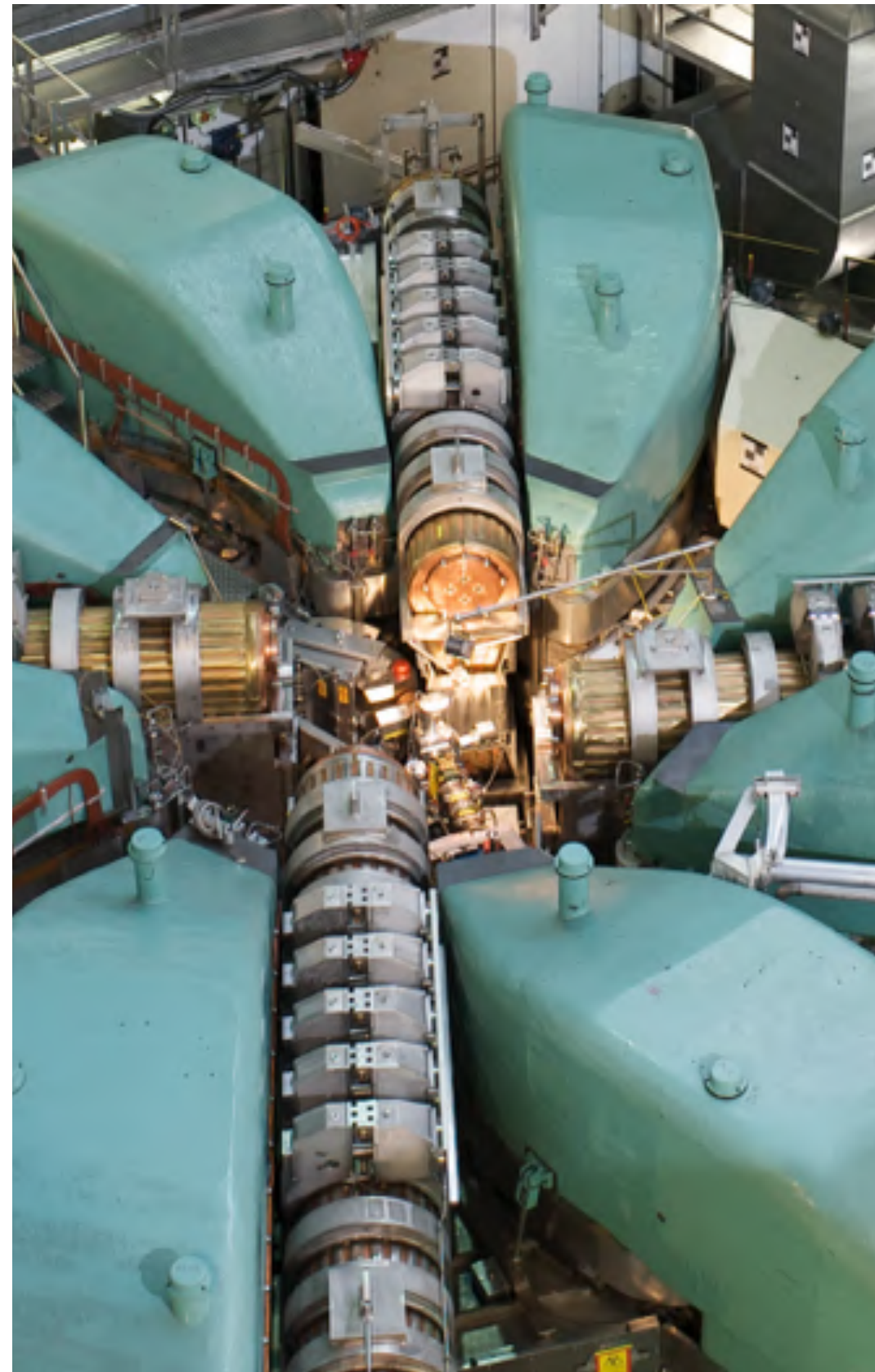
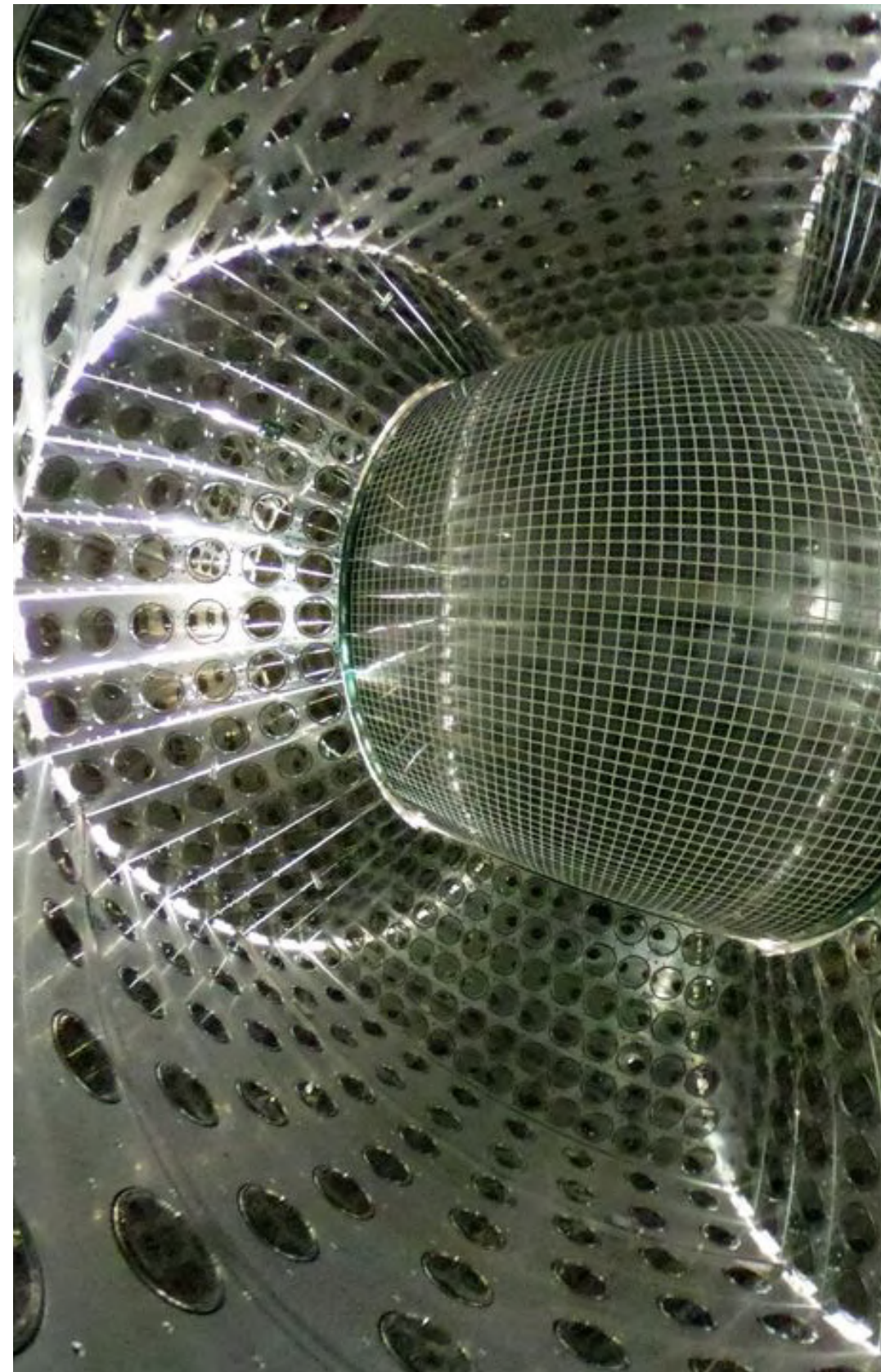
ニュートリノ質量

# 素粒子の統一理論、宇宙誕生の謎の解明に向けて

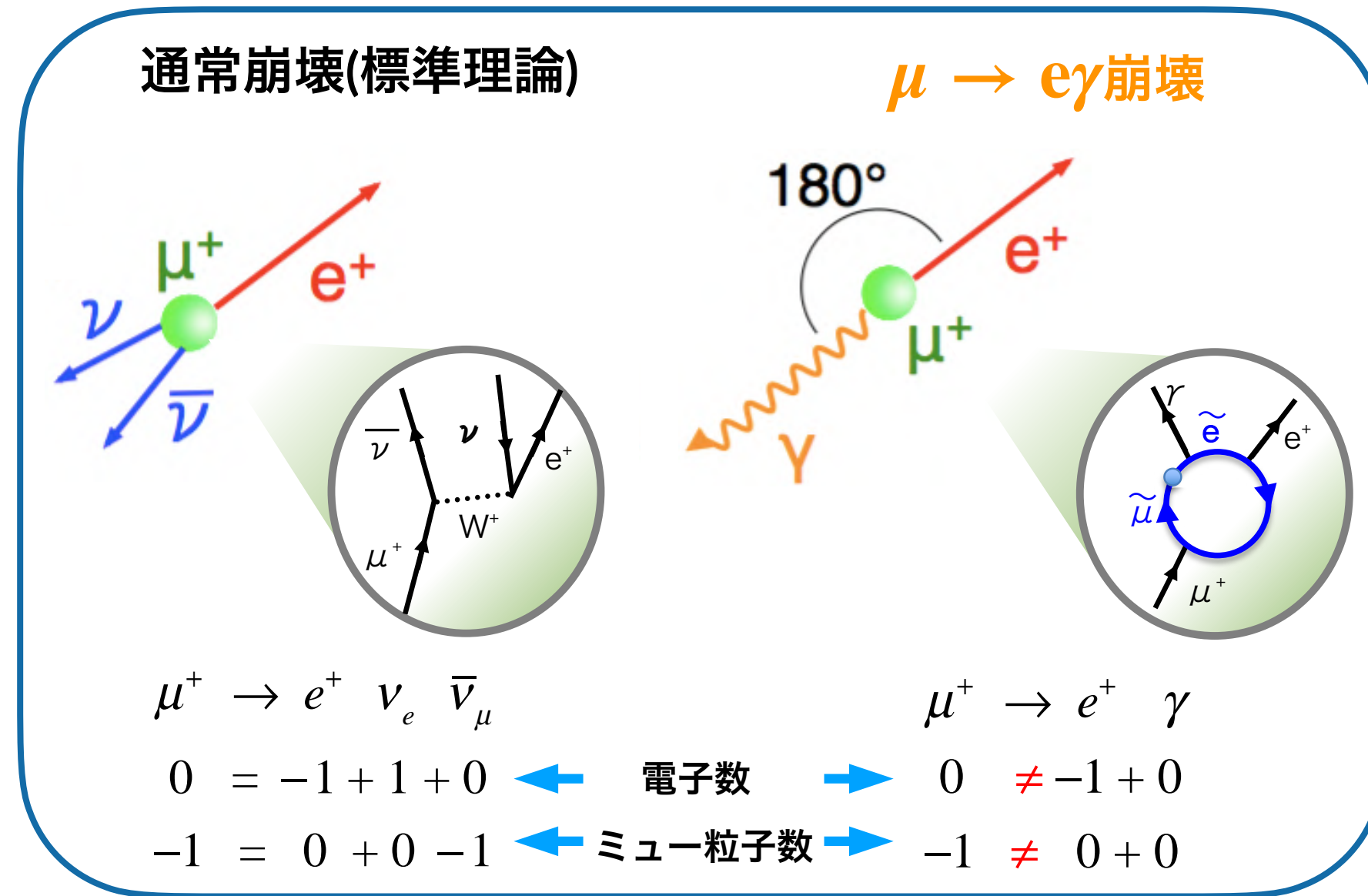


# ICEPP研究紹介

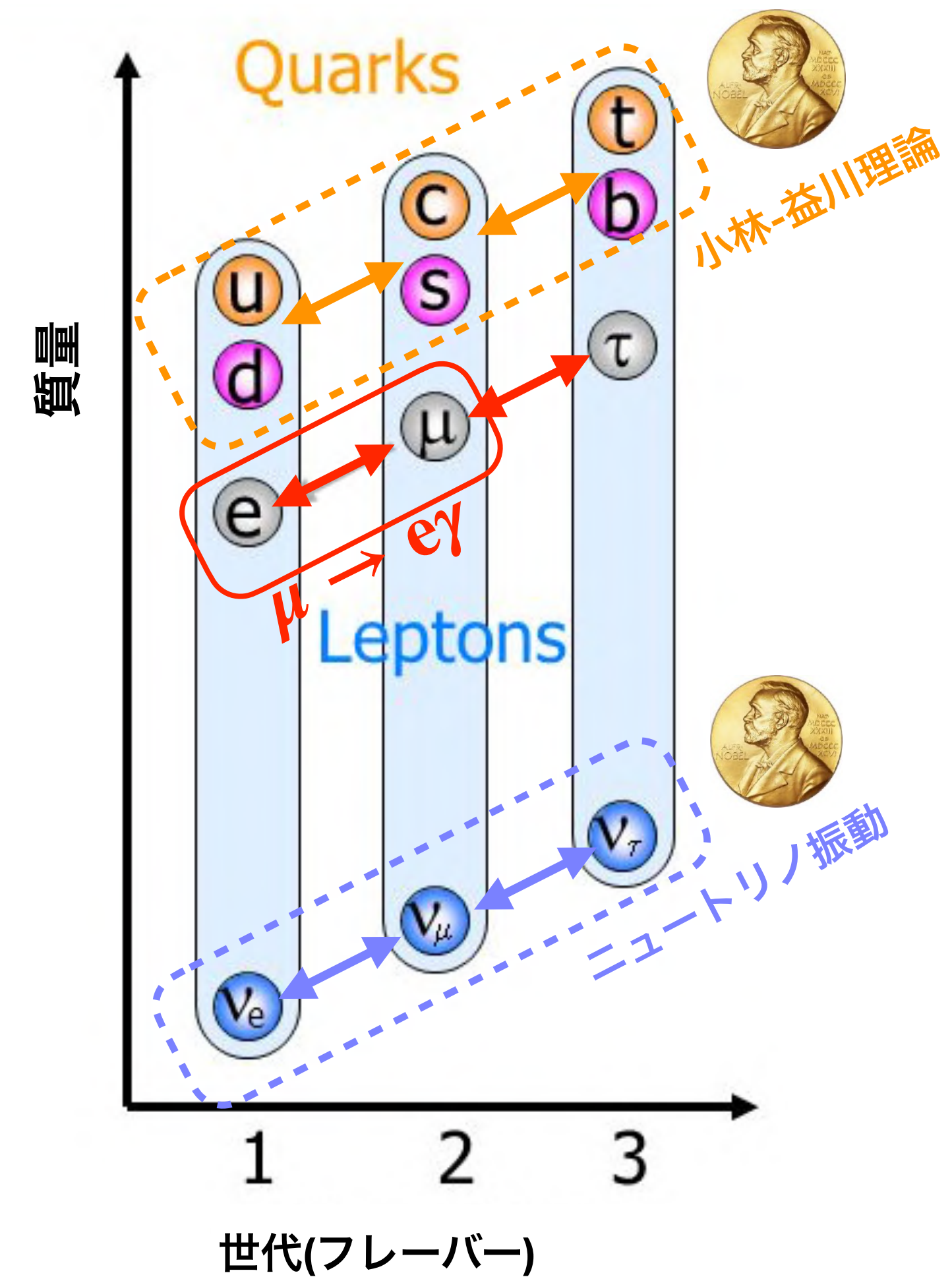
## MEG実験



# MEG実験



物質粒子(クォークとレプトン)の3世代構造

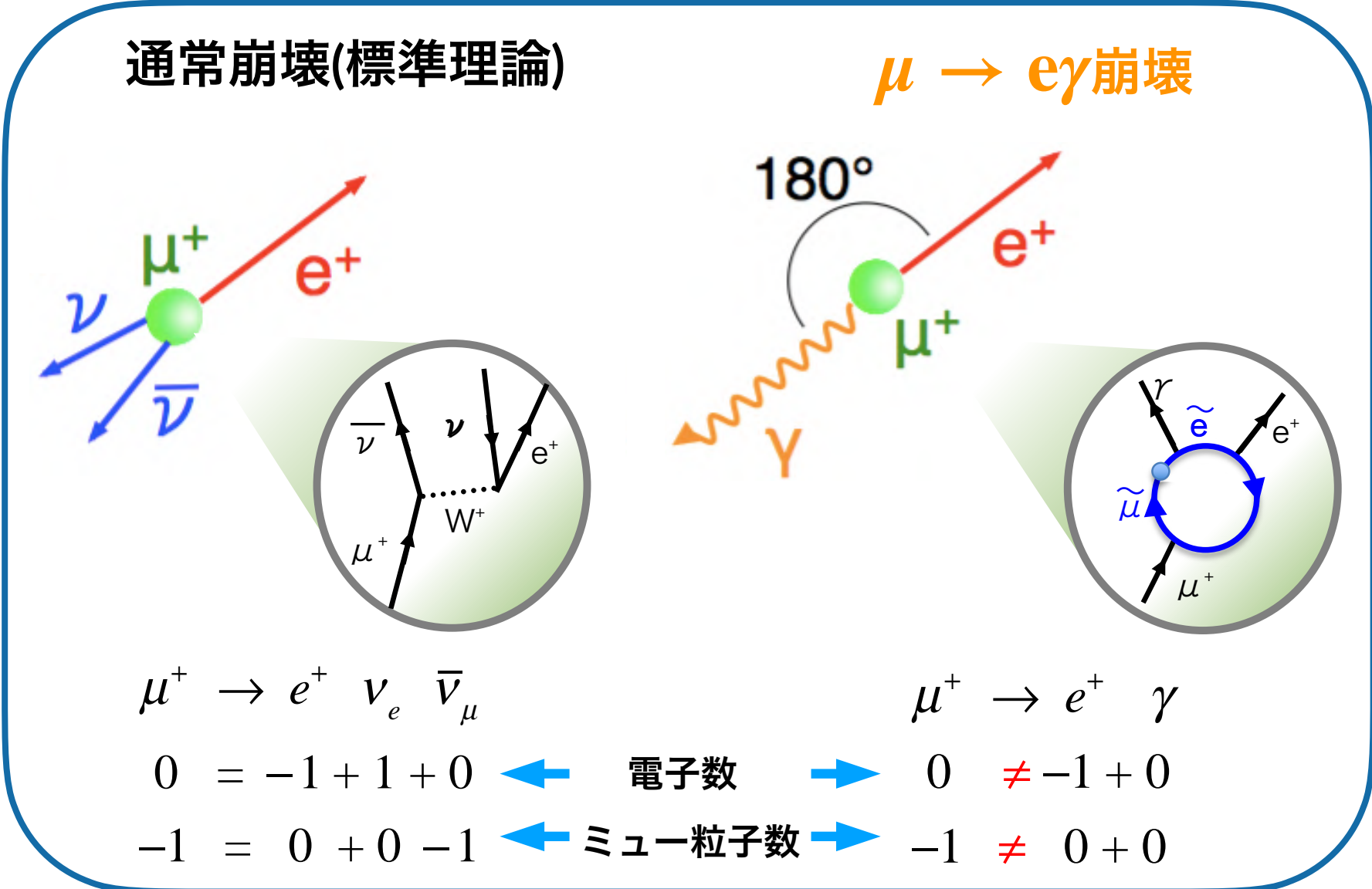


● ミュー粒子の稀な崩壊現象  $\mu \rightarrow e\gamma$  を世界最高感度で探索、その発見をめざす

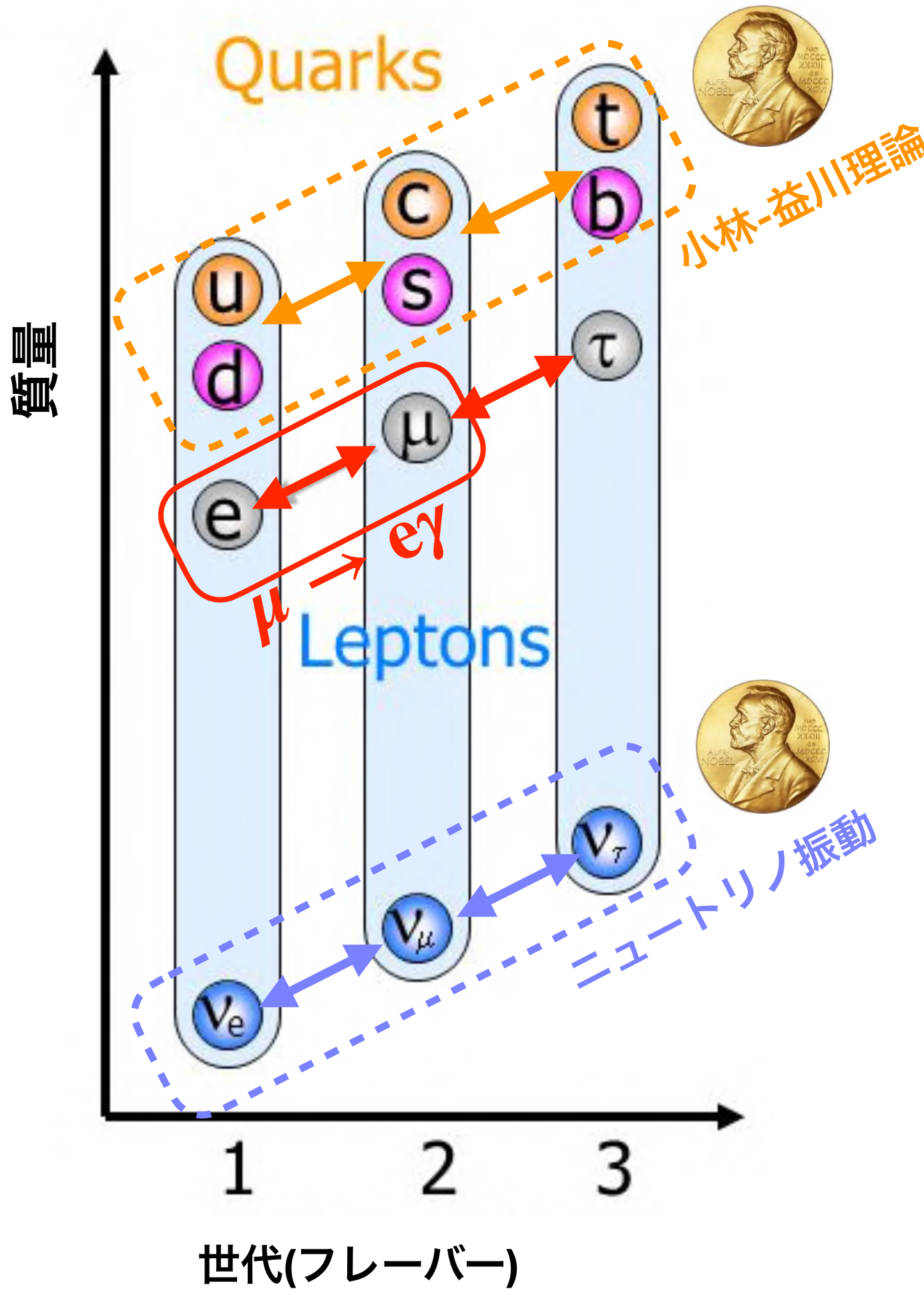
● なぜ  $\mu \rightarrow e\gamma$  ?

- 電荷を持つレプトン( $\mu, e, \tau$ )の世代間の遷移現象
- 素粒子の標準理論では禁止
- 超対称大統一理論など新物理を仮定すると観測可能な頻度で起こり得る

# MEG実験



## 物質粒子(クォークとレプトン)の3世代構造



● ミュー粒子の稀な崩壊現象  $\mu \rightarrow e\gamma$  を世界最高感度で探索、その発見をめざす

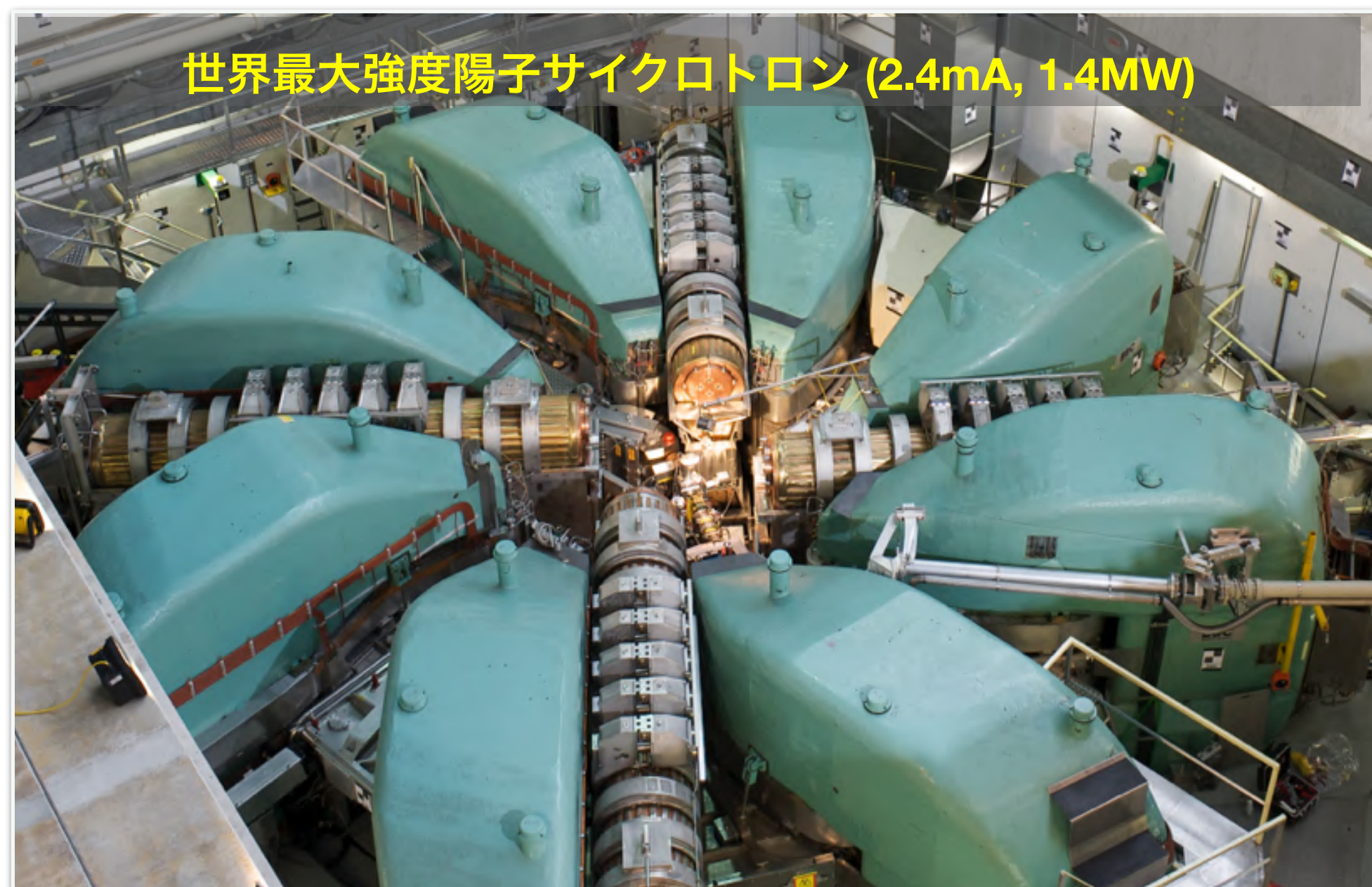
● なぜ  $\mu \rightarrow e\gamma$  ?

- 電荷を持つレプトン( $\mu, e, \tau$ )の世代間の遷移現象
- 素粒子の標準理論では禁止
- 超対称大統一理論など新物理を仮定すると観測可能な頻度で起こり得る

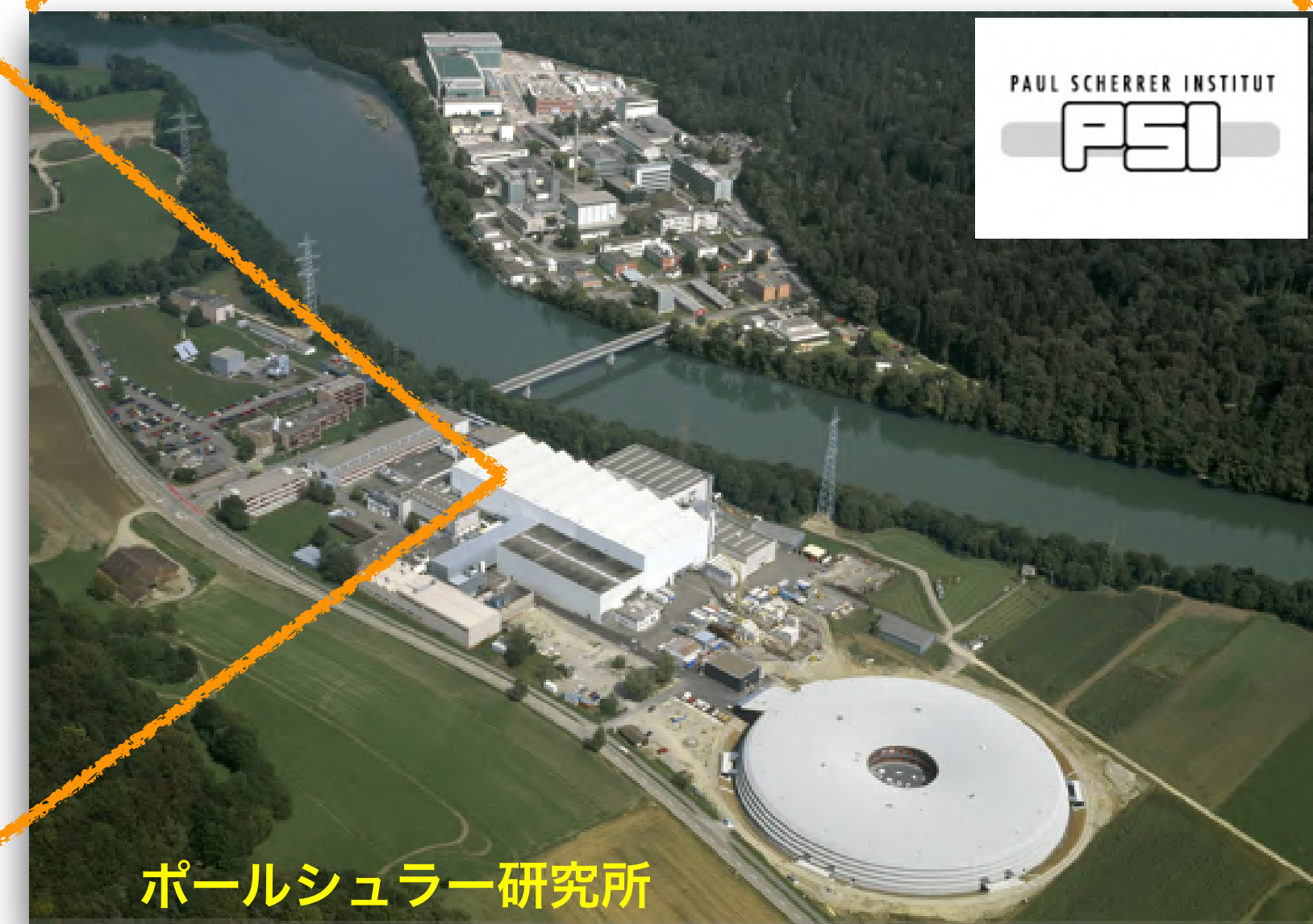
**$\mu \rightarrow e\gamma$  発見 = 新物理の決定的証拠**

# スイス・ポールシェラー研究所(PSI)

- 世界最大強度のミュオン粒子源(毎秒 $10^8$ 個以上！)
- 世界最高探索感度を実現できる唯一の場所



世界最大強度陽子サイクロトロン (2.4mA, 1.4MW)



ポールシェラー研究所

# MEGからMEG IIへ

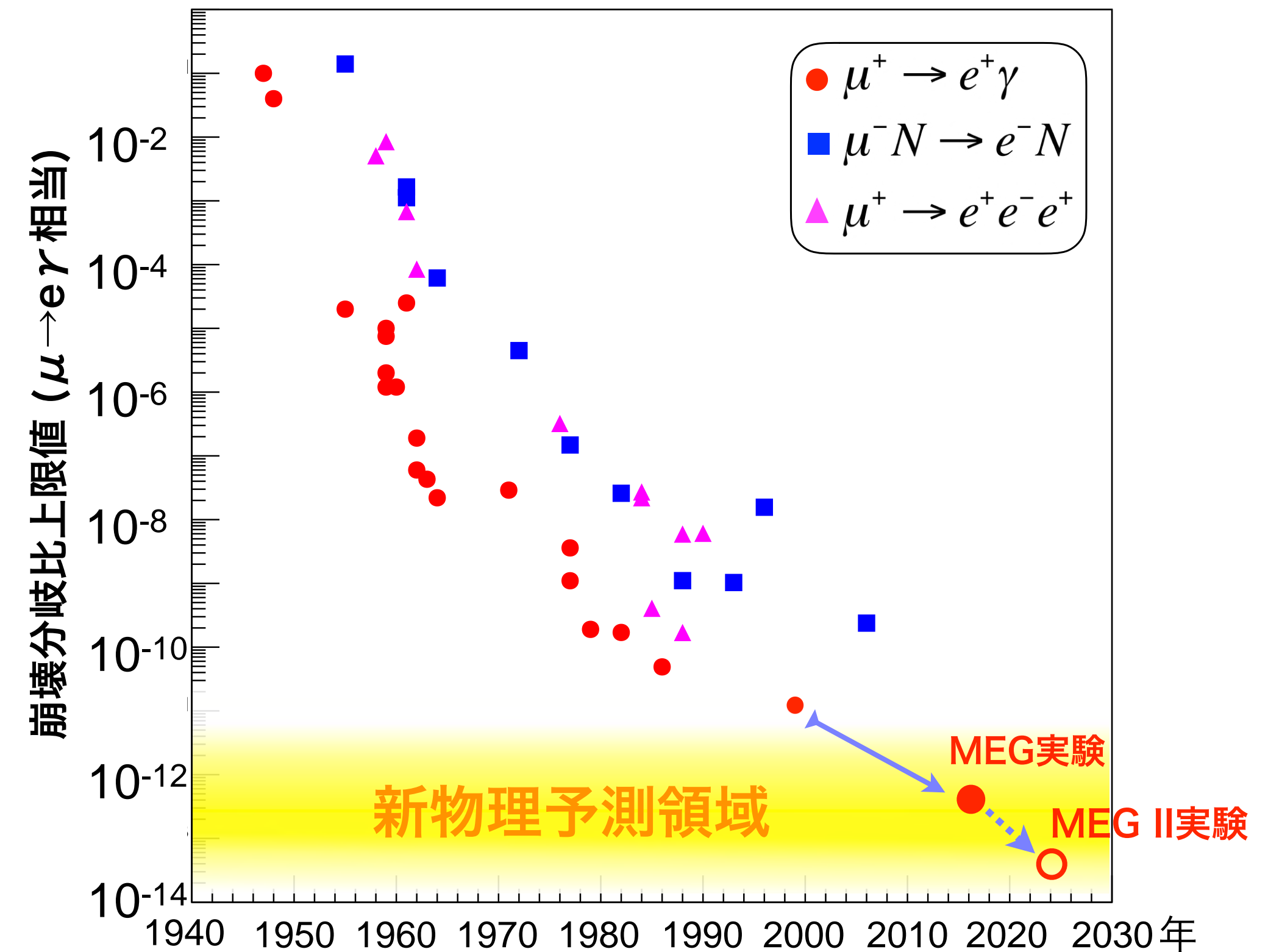
## ●MEG実験は前実験の30倍の実験感度で探索を行った(最終結果@2016)

- 既に新物理予測領域に突入している
- いつ見つかってもおかしくない

## ●アップグレード実験 MEG II が始まるうとしている！

- MEGの10倍の探索感度 ( $\sim 6 \times 10^{-14}$ )
- 2021年 総合試験完了
- 2022年 本格測定開始

### $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験の歴史



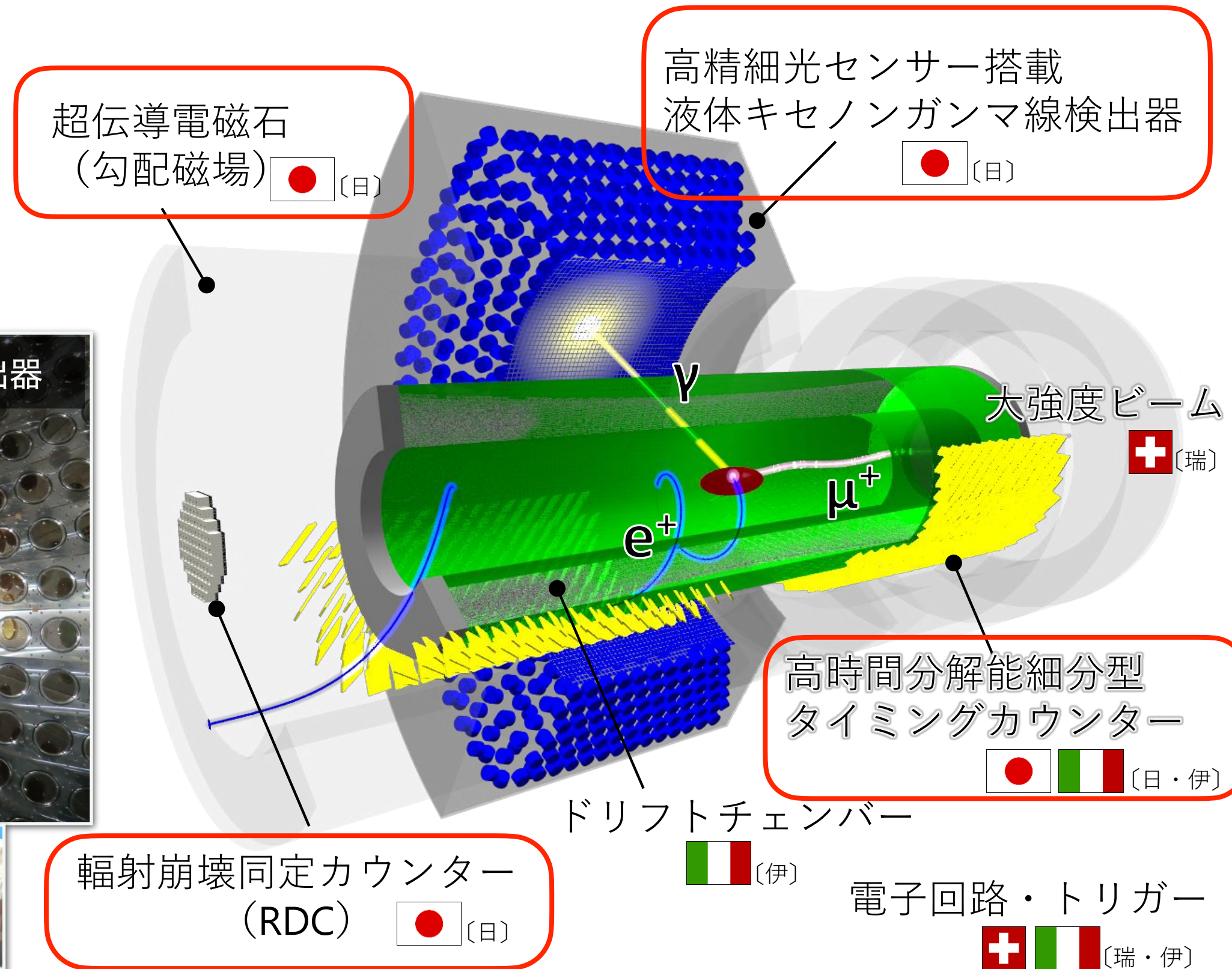
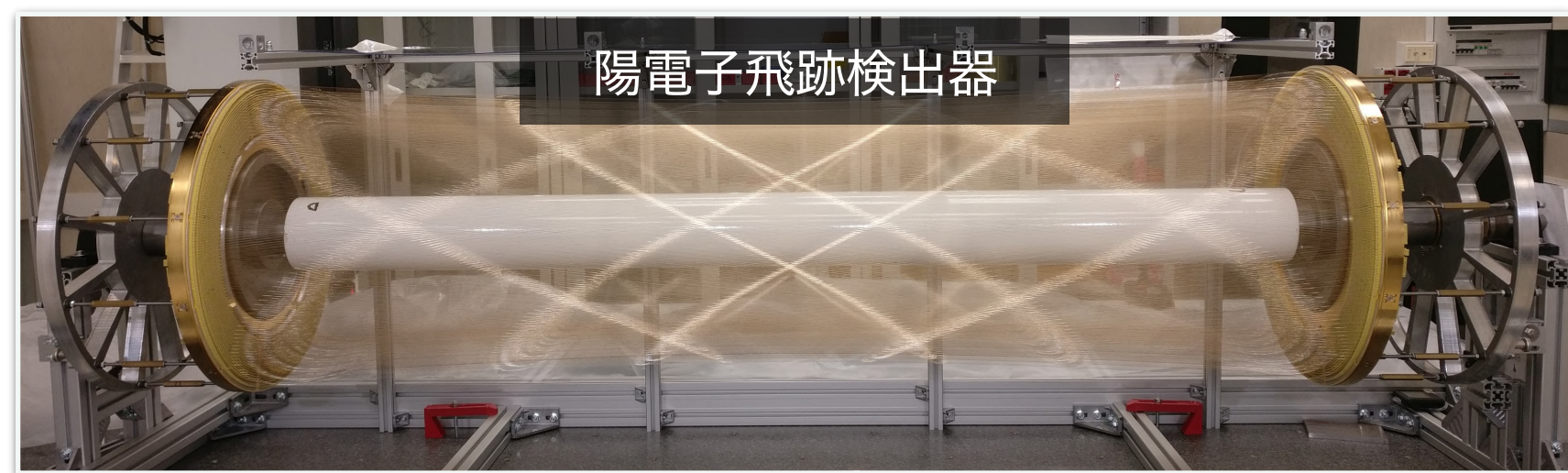
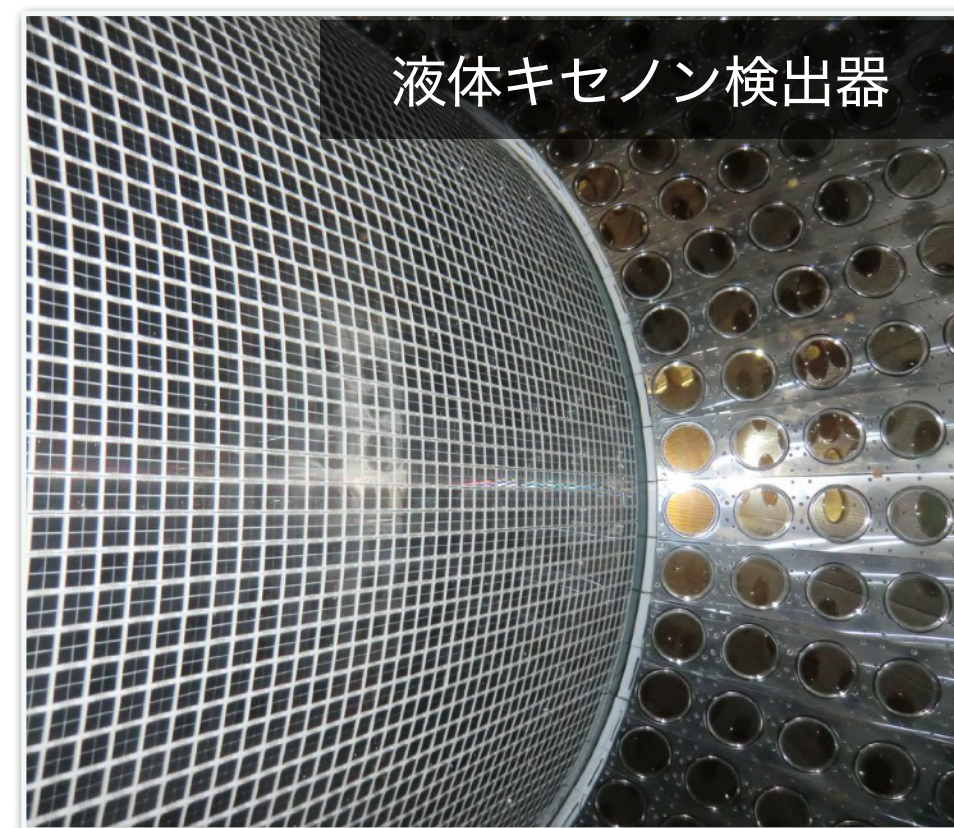
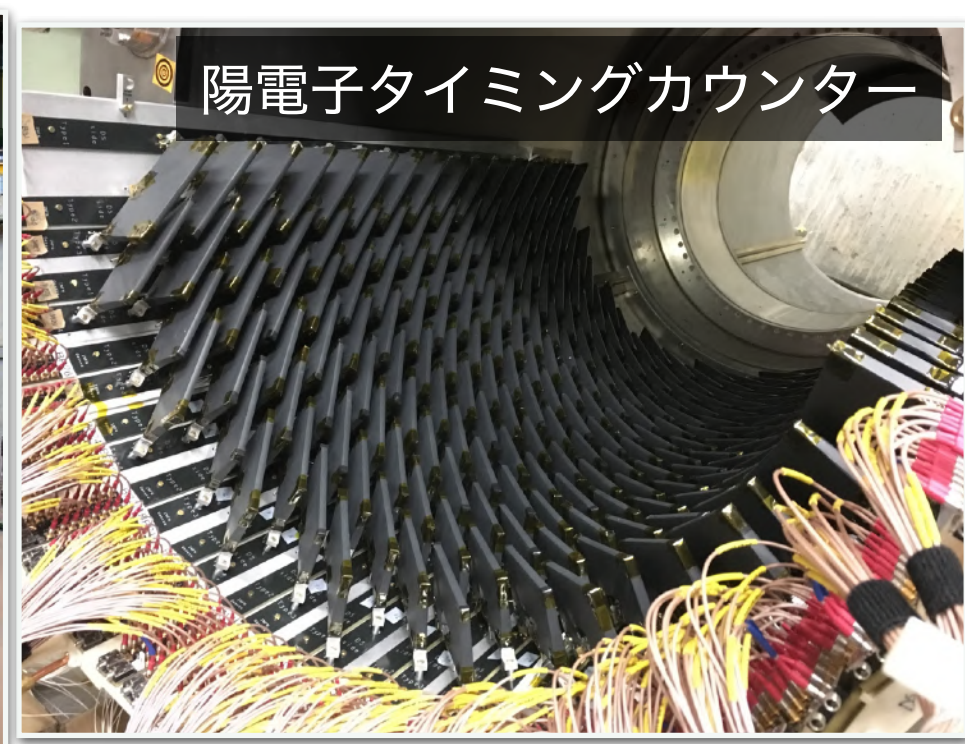
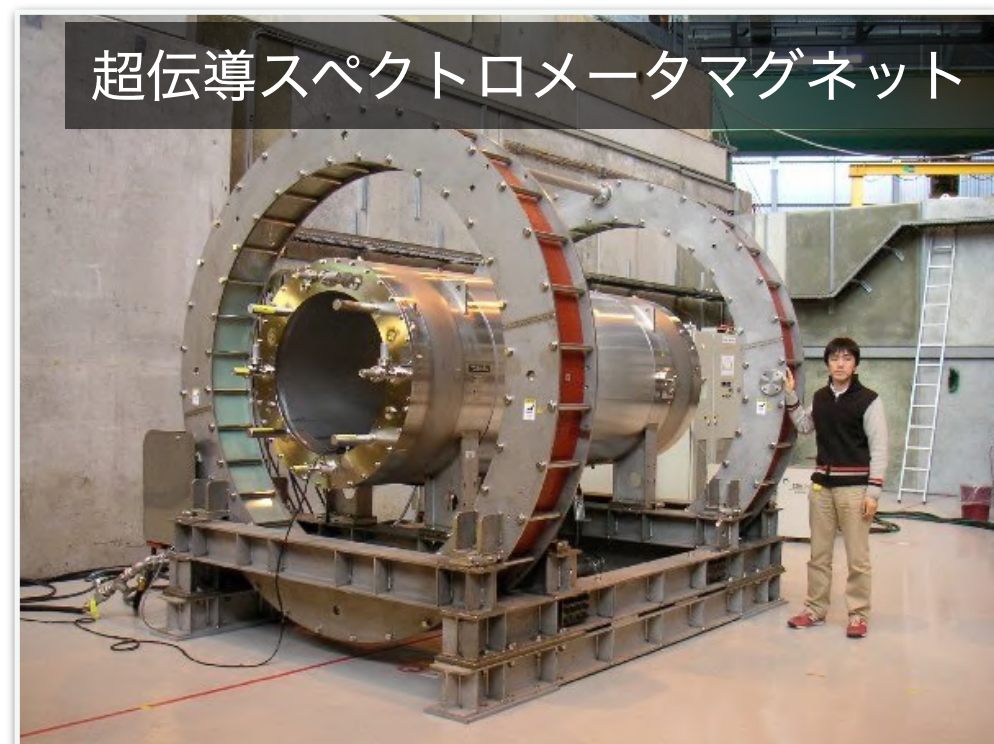


# MEG II実験測定器

●世界最高感度の実験には世界最高性能の測定器が必要！

●既存の測定器では不十分

- 独創的で巧みなアイデアに基づく高性能測定器を開発・建設
- ICEPPが中心となり考案、開発



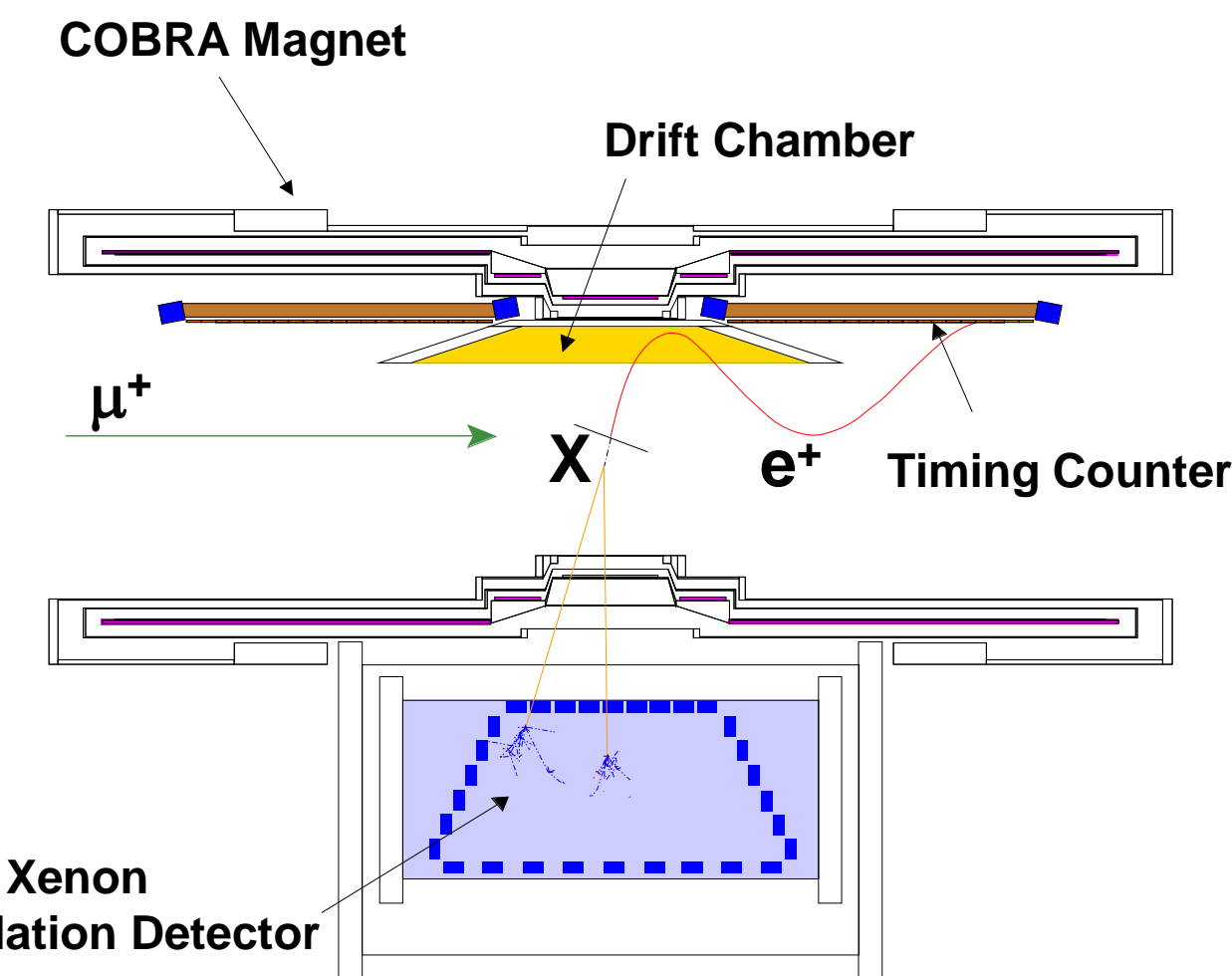
ICEPPが担当する測定器

# $\mu \rightarrow e\gamma$ 以外の物理

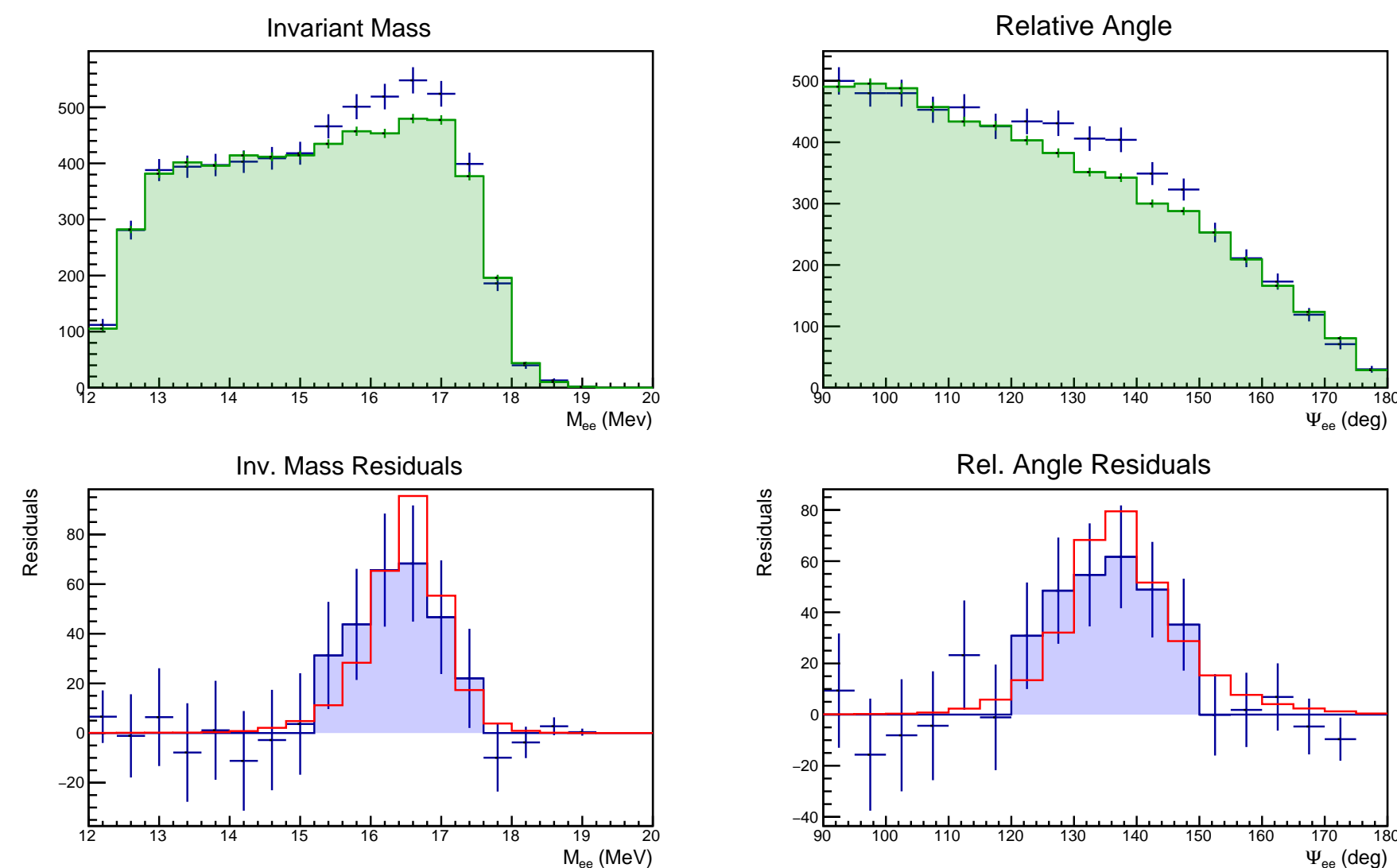
## $\mu \rightarrow eX, X \rightarrow \gamma\gamma$ 探索

### ● これまでにない性能を持ったMEG II測定器を用いて $\mu \rightarrow e\gamma$ 以外の稀な現象を探索

- 荷電レプトンフレーバーを破る軽い新粒子の探索 ( $\mu \rightarrow eX, X \rightarrow \gamma\gamma, \mu \rightarrow e + X, \mu \rightarrow e\gamma + X$ )
- Be原子核の脱励起反応における17MeVボソン (Atomkiアノマリ検証)
- パイ中間子を用いたレプトン普遍性の精密検証 (PIONEER実験)

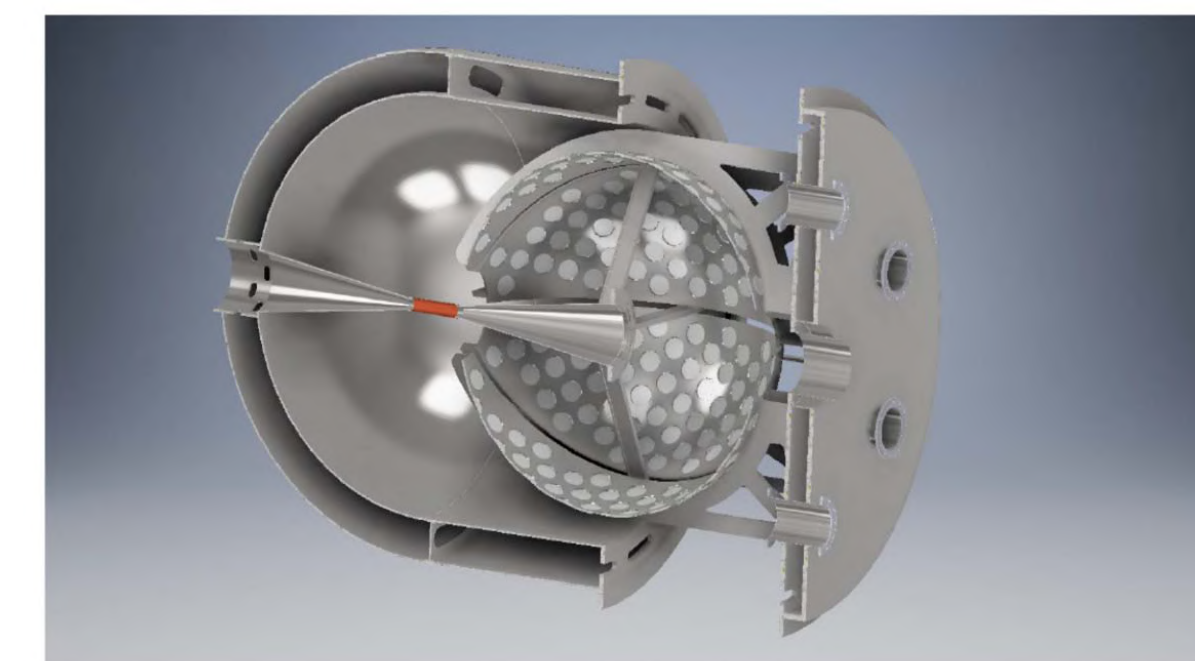
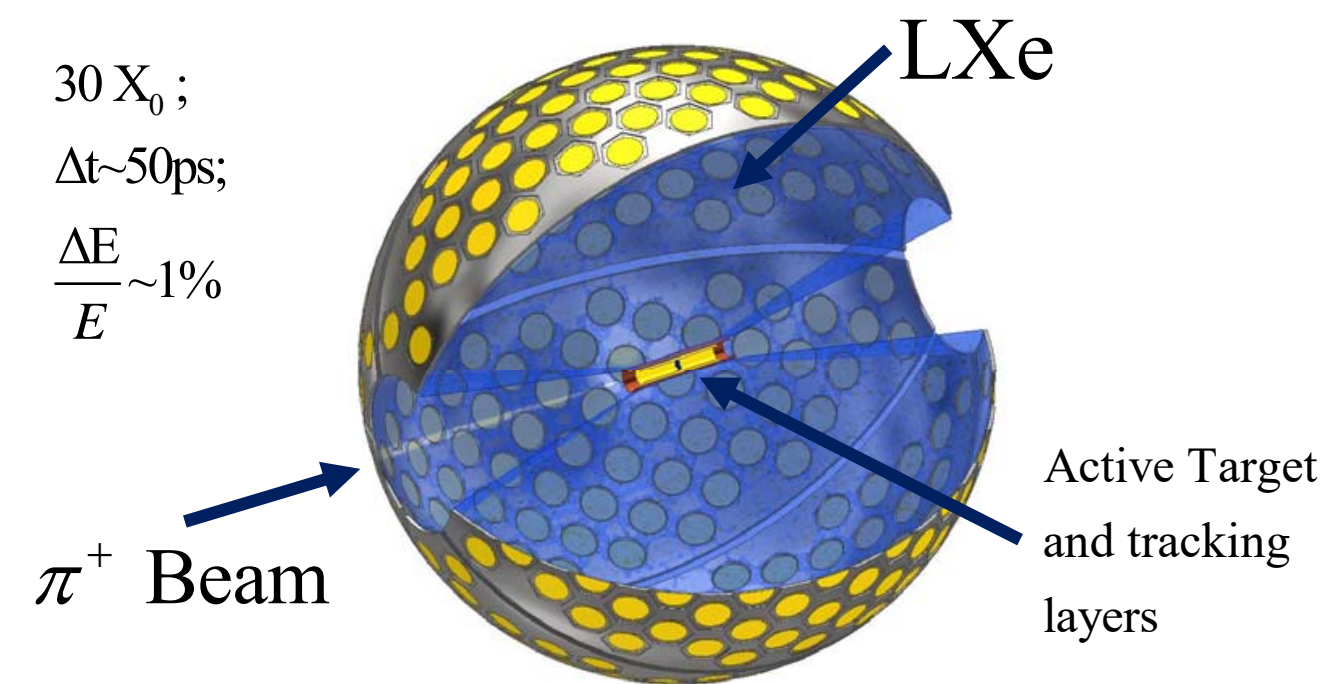


### Atomkiアノマリ検証@MEG II (simulation)



### PIONEER実験

液体キセノンカロリメータクライオスタットコンセプト



# 将来計画：究極感度の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験

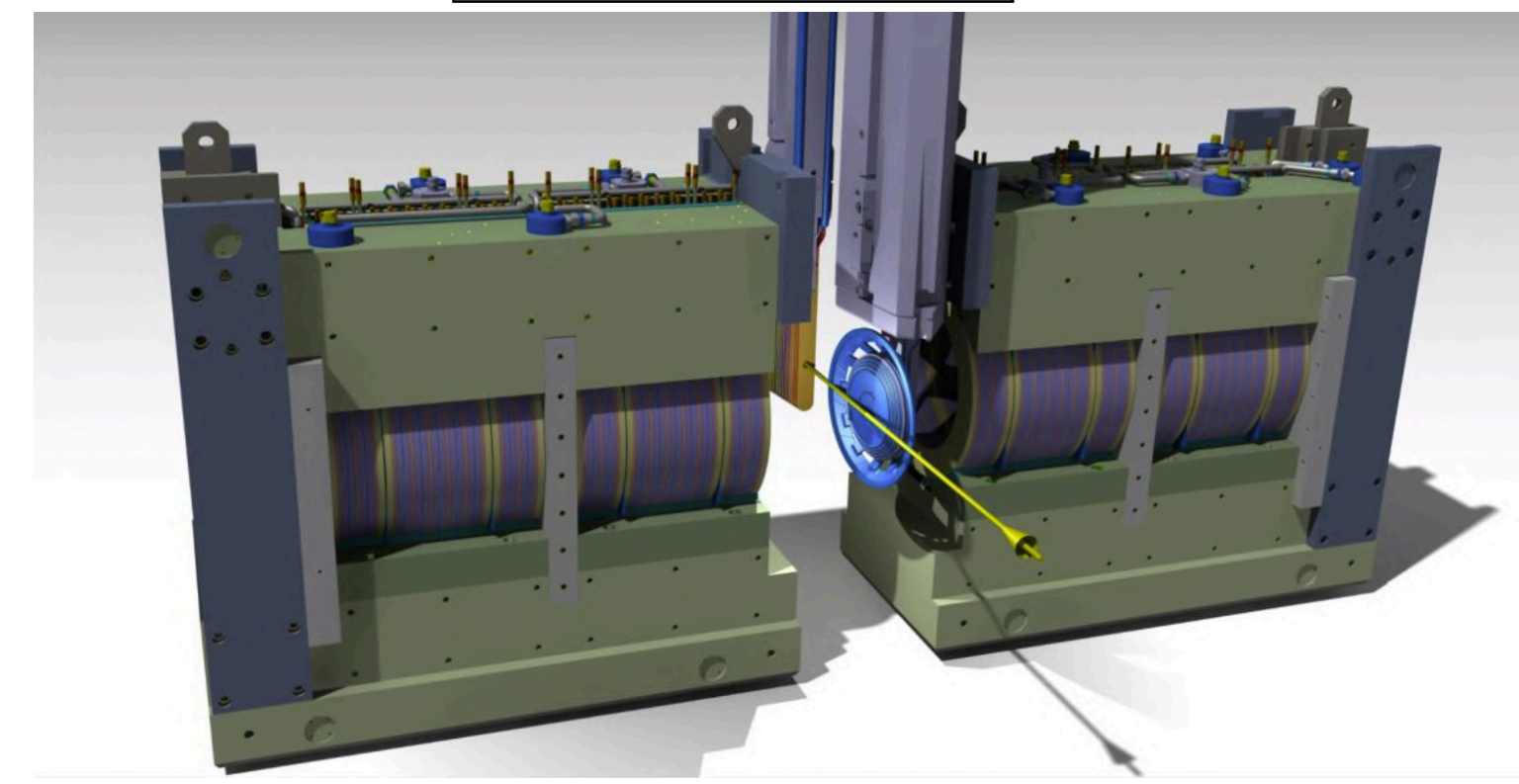
## ●PSIのビーム増強計画 (HiMB計画)

- ビーム強度が最大100倍！
- 2027-2028年頃に導入予定 →ちょうどMEG II実験が終わる頃

## ●増強ビームを使った新しい $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験を検討中

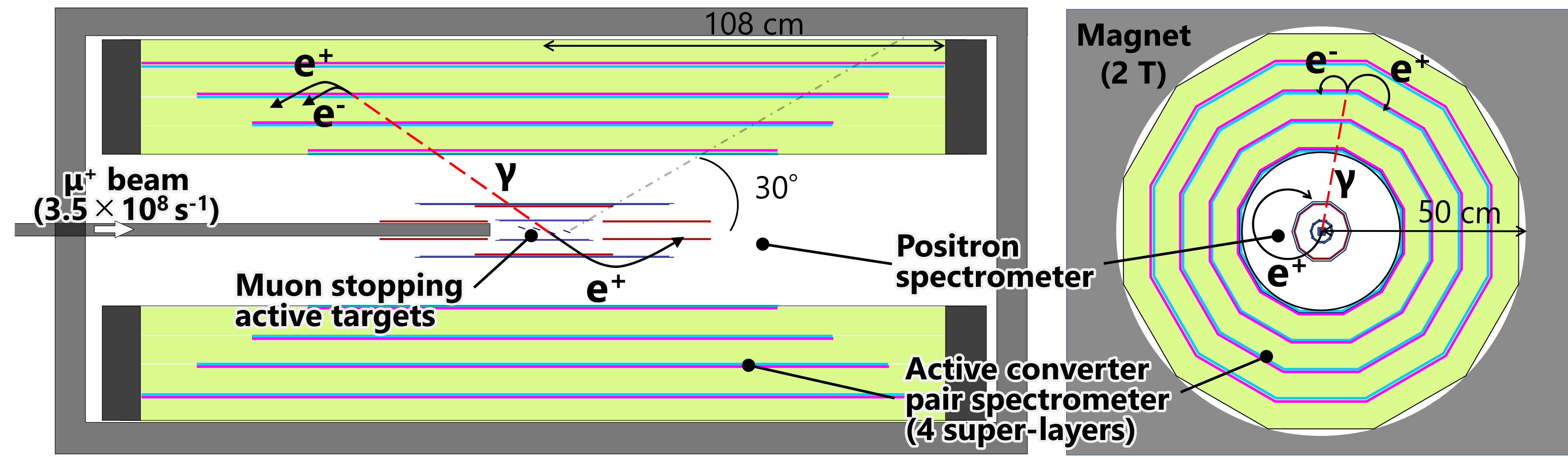
- MEG IIとはまったく異なる原理の新実験装置で探索感度を格段に向上
- MEG IIで発見した $\mu \rightarrow e\gamma$ を精密測定することが可能
- $\mu \rightarrow eee$ の同時測定

HiMB計画@PSI

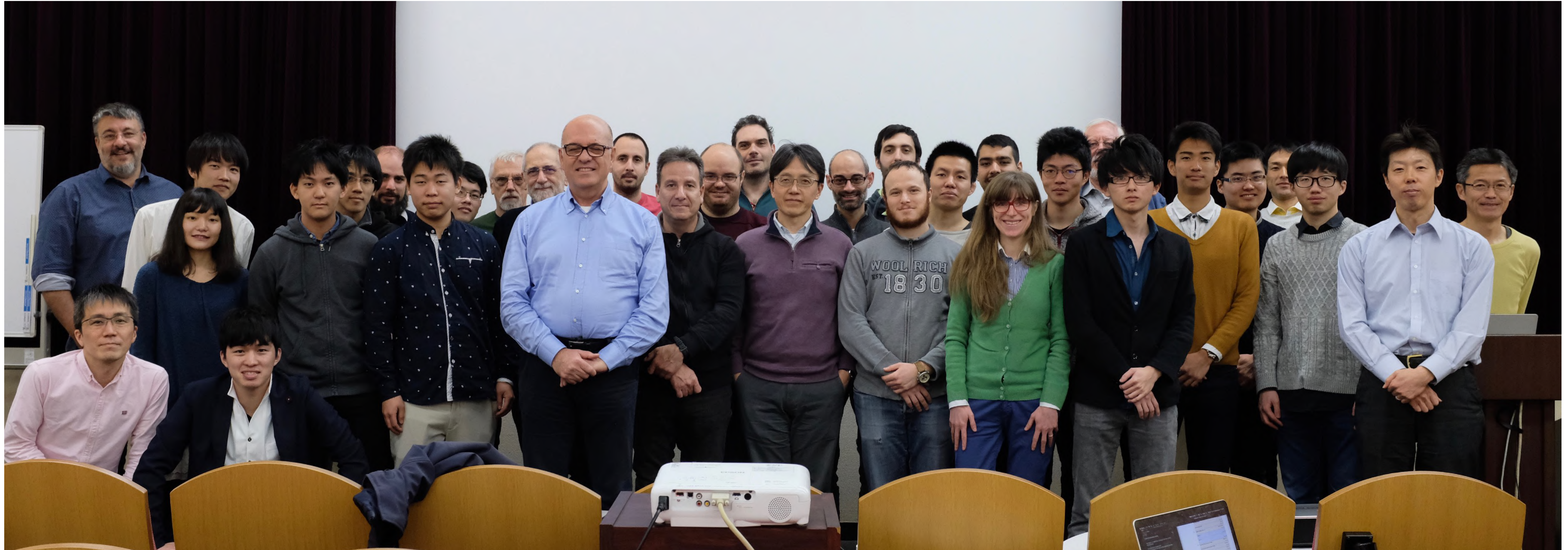


新 $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験測定器デザイン

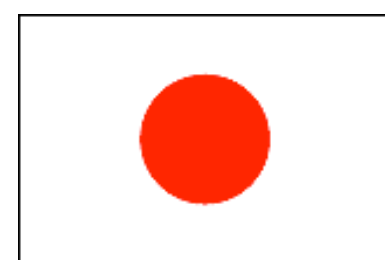
## ●革新的測定器開発の新たな挑戦！



# MEG実験 国際コラボレーション



5ヶ国14研究機関から総勢約70名の研究者

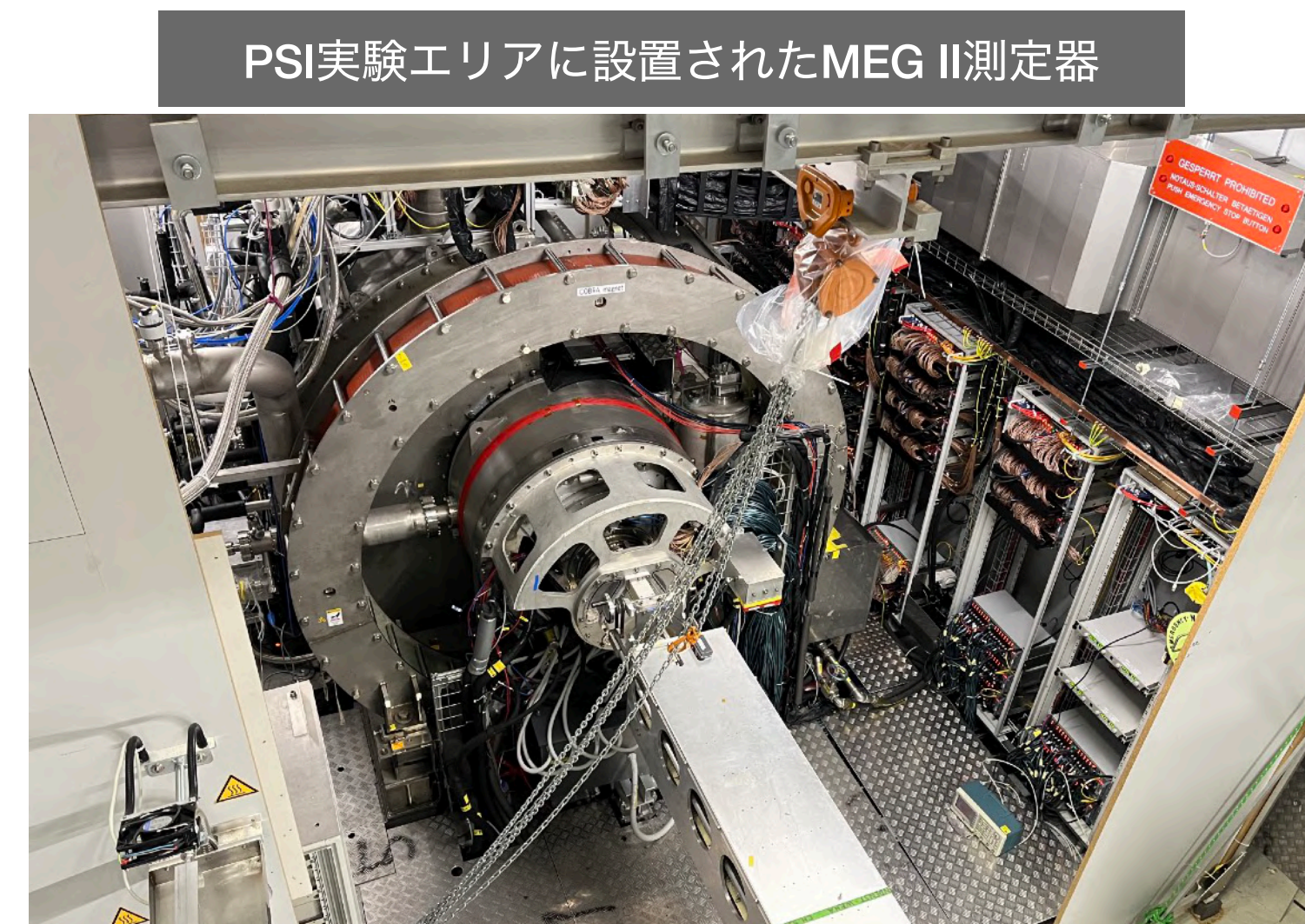


国内参加研究機関



# 大学院生@MEG実験

- 大学院生が測定器の建設・運用からデータ取得、物理解析まで実験の全ての段階に主体的に関わることが出来る
- 多くの学生が修士課程のうちからスイスPSIに長期滞在して研究を行う
- 大学院生の研究
  - 修士課程：MEG II測定器の運用、解析アルゴリズムの開発、将来実験のための測定器開発
  - 博士課程：究極感度で $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索。発見の偉業で博士論文？ $\mu \rightarrow e\gamma$ 以外の稀現象探索も



PSI実験エリアに設置されたMEG II測定器

## ●担当研究室・教員

- 森俊則研究室\*、大谷航研究室
- 岩本敏幸(助教)、内山雄祐(特任助教)、潘晟(博士研究員)

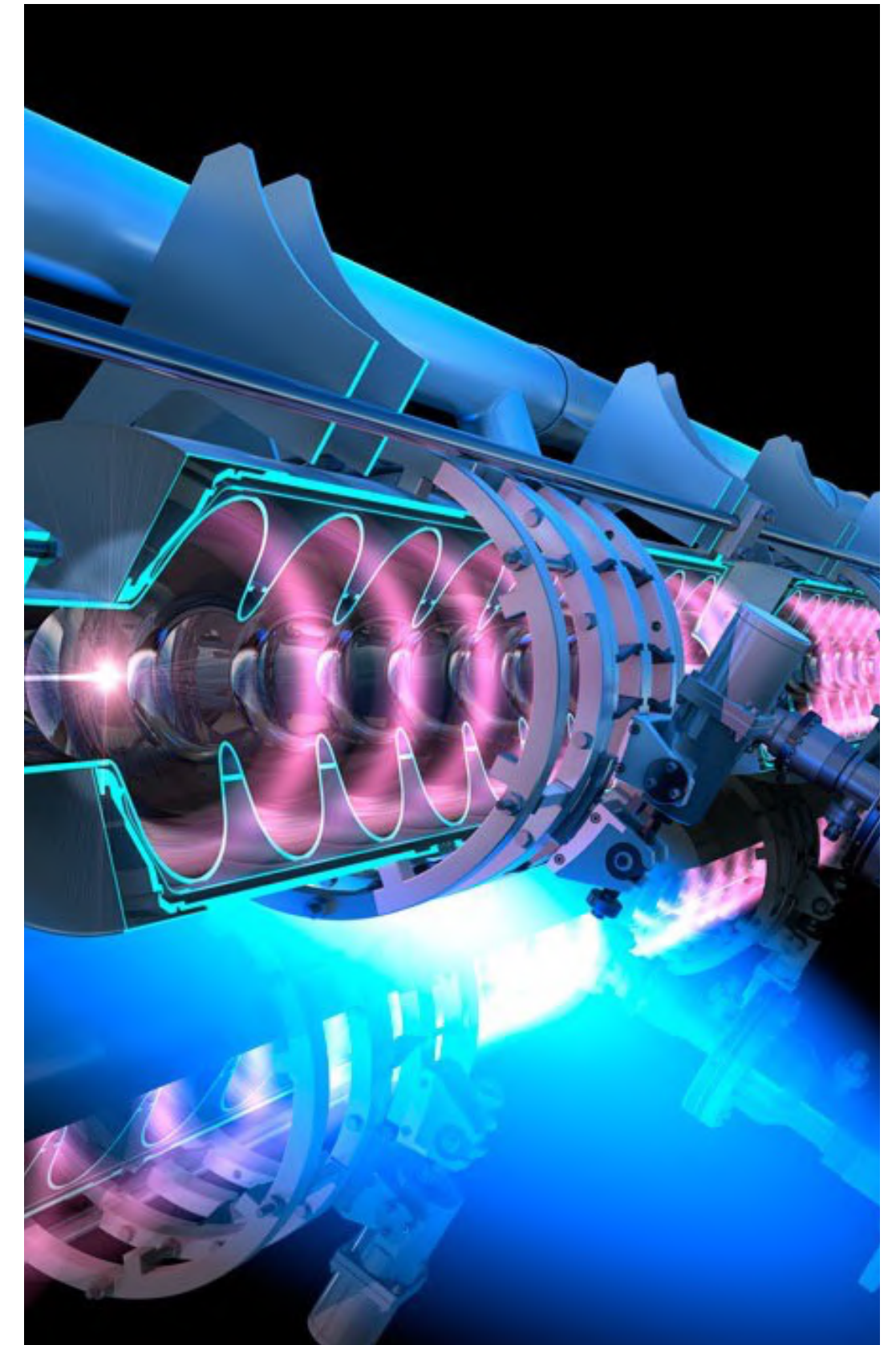
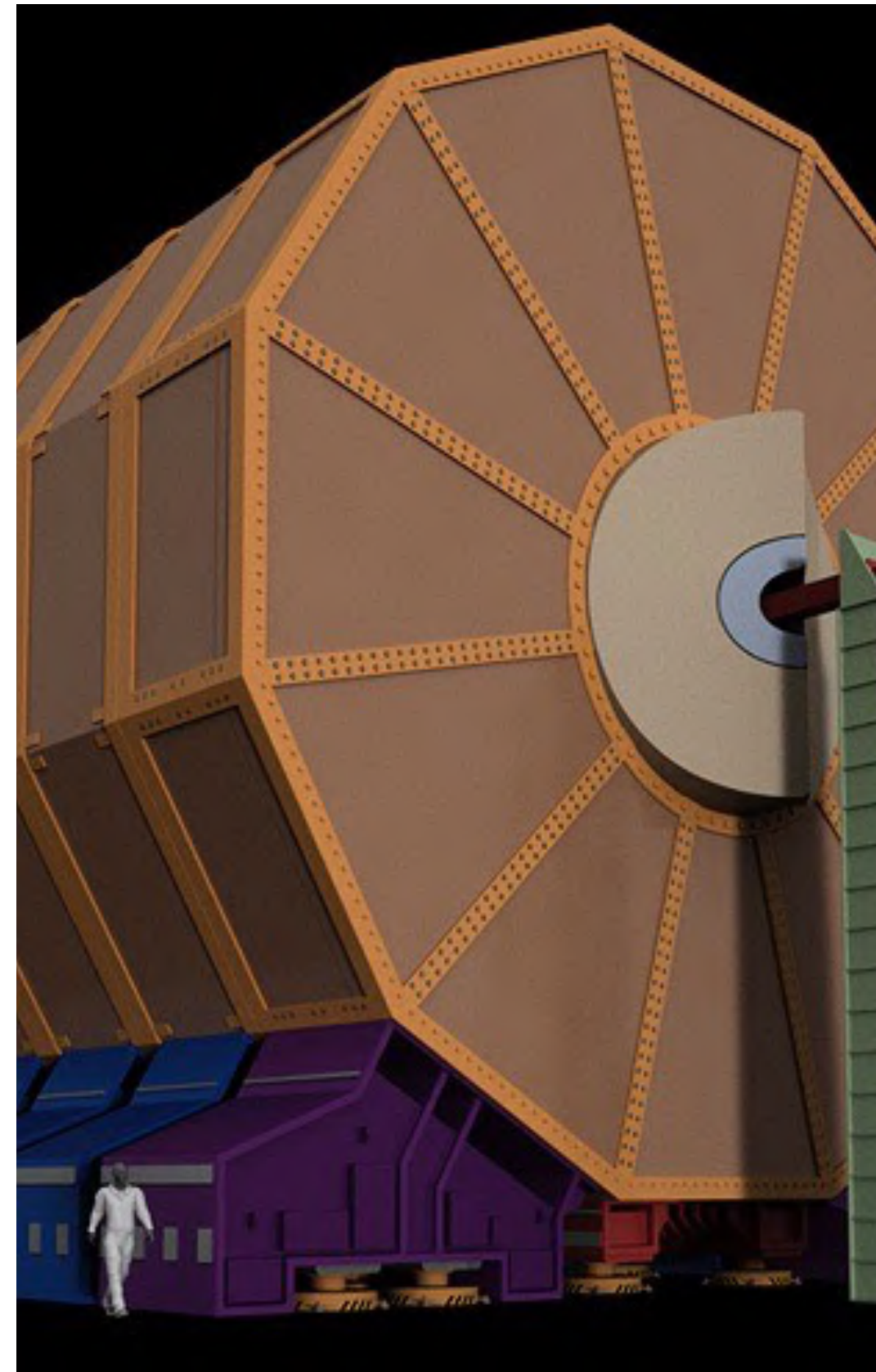
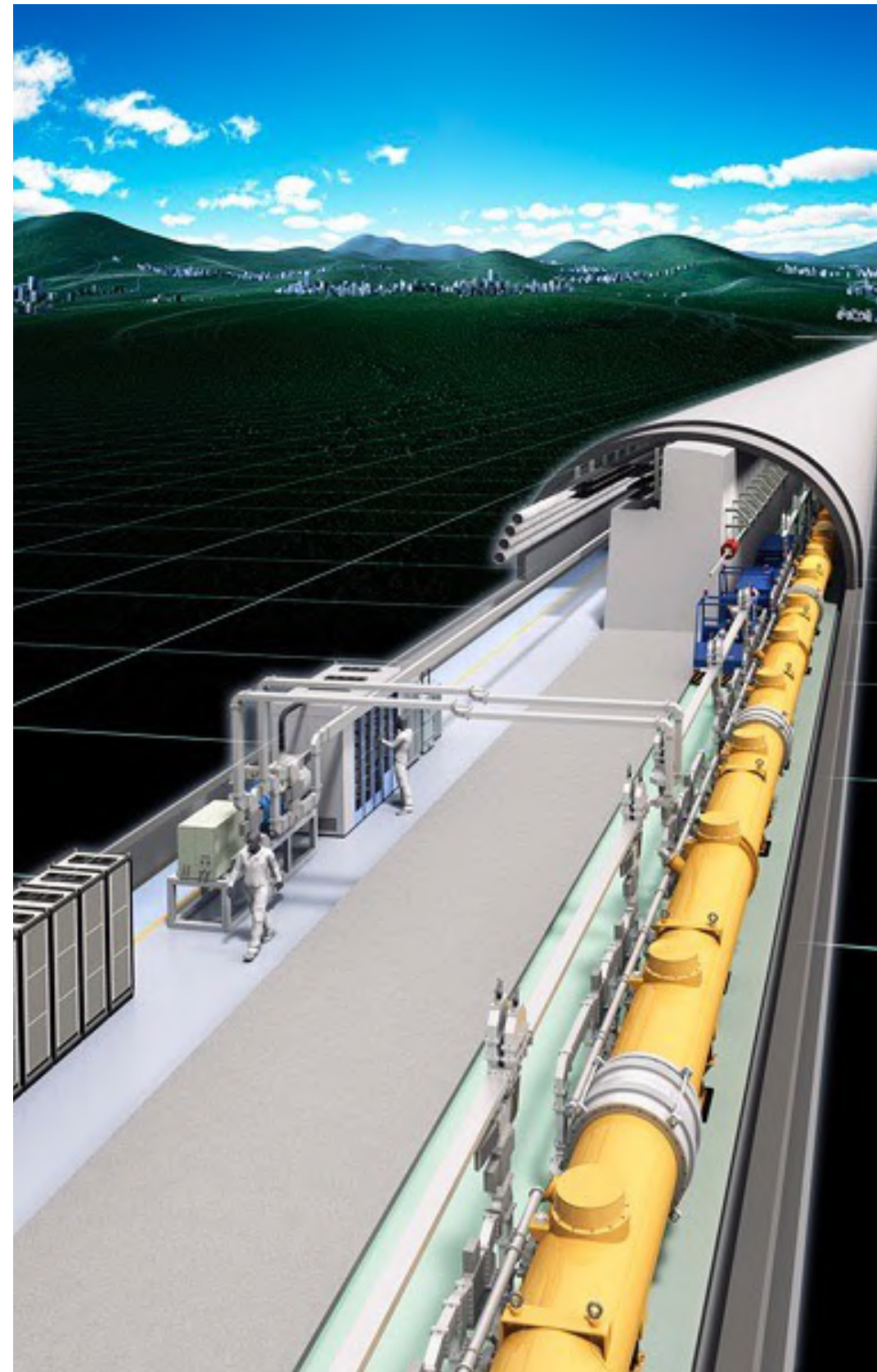
\*令和6年度まで指導可

海外共同研究者とMEG II測定器設置作業



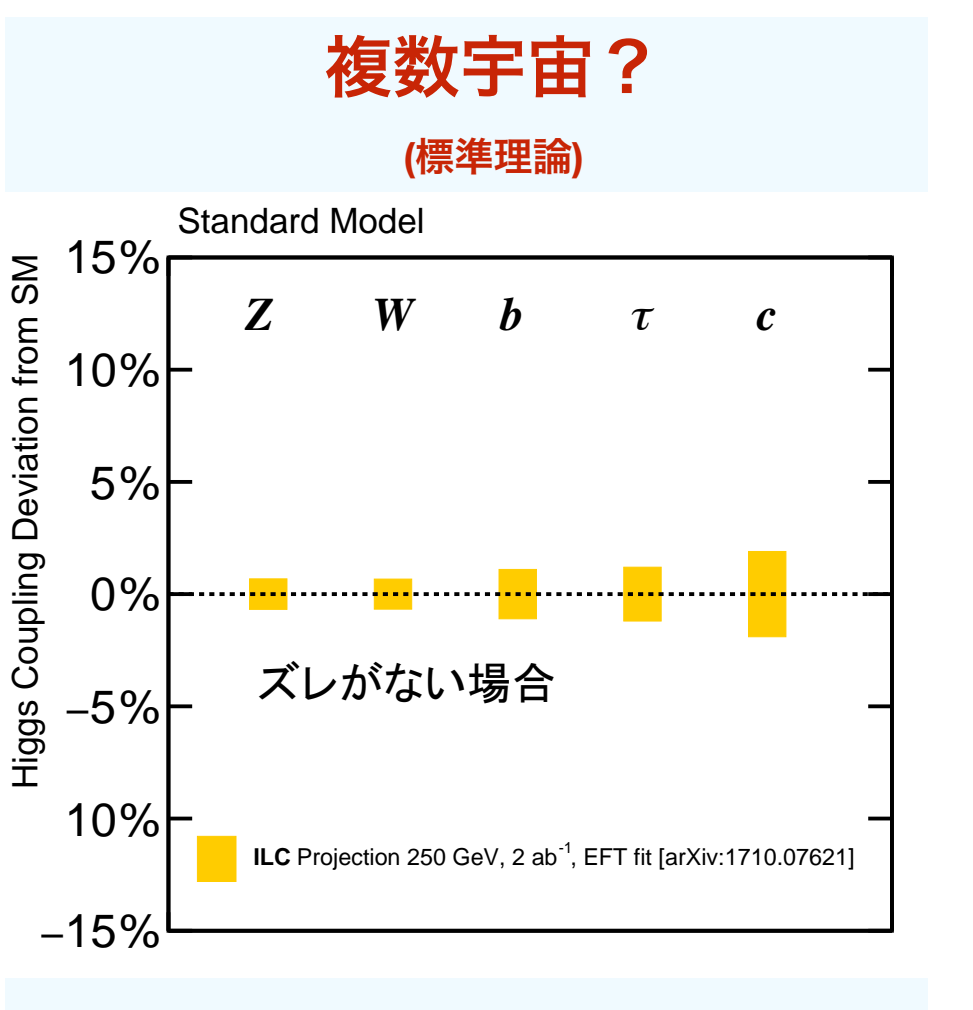
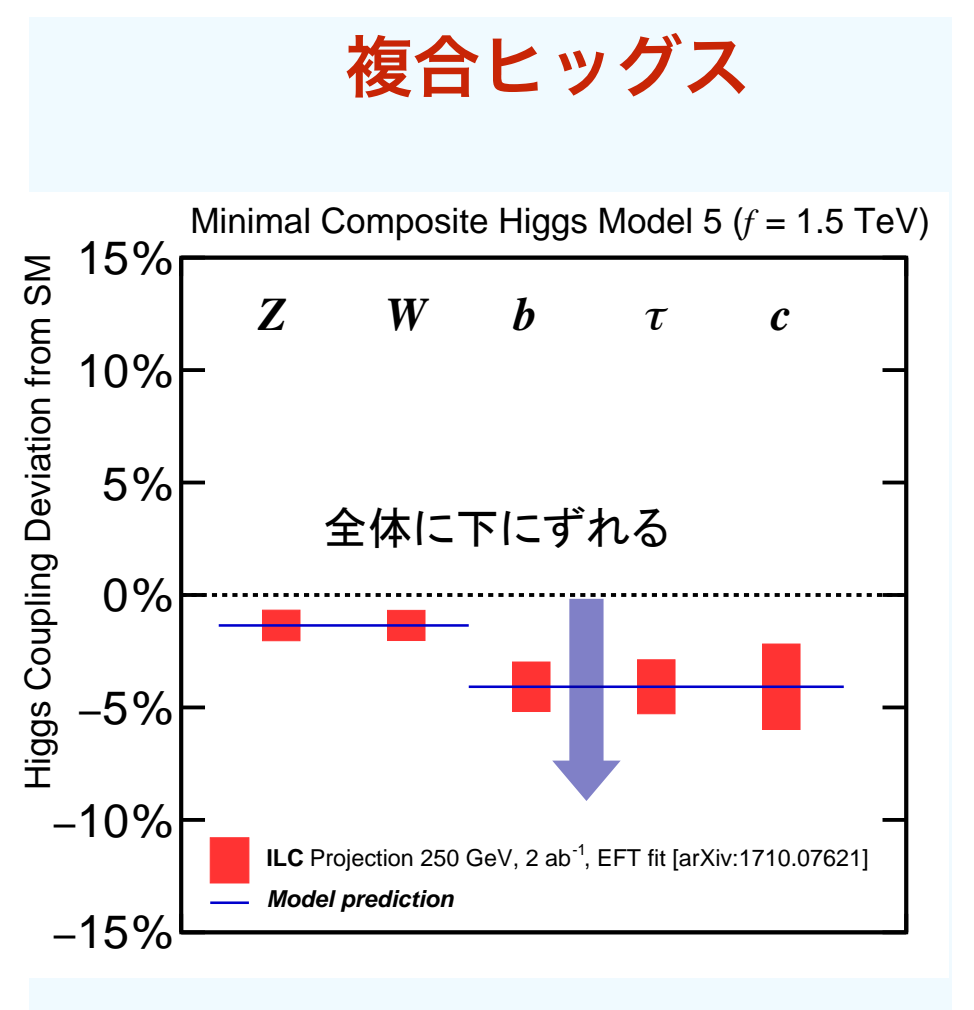
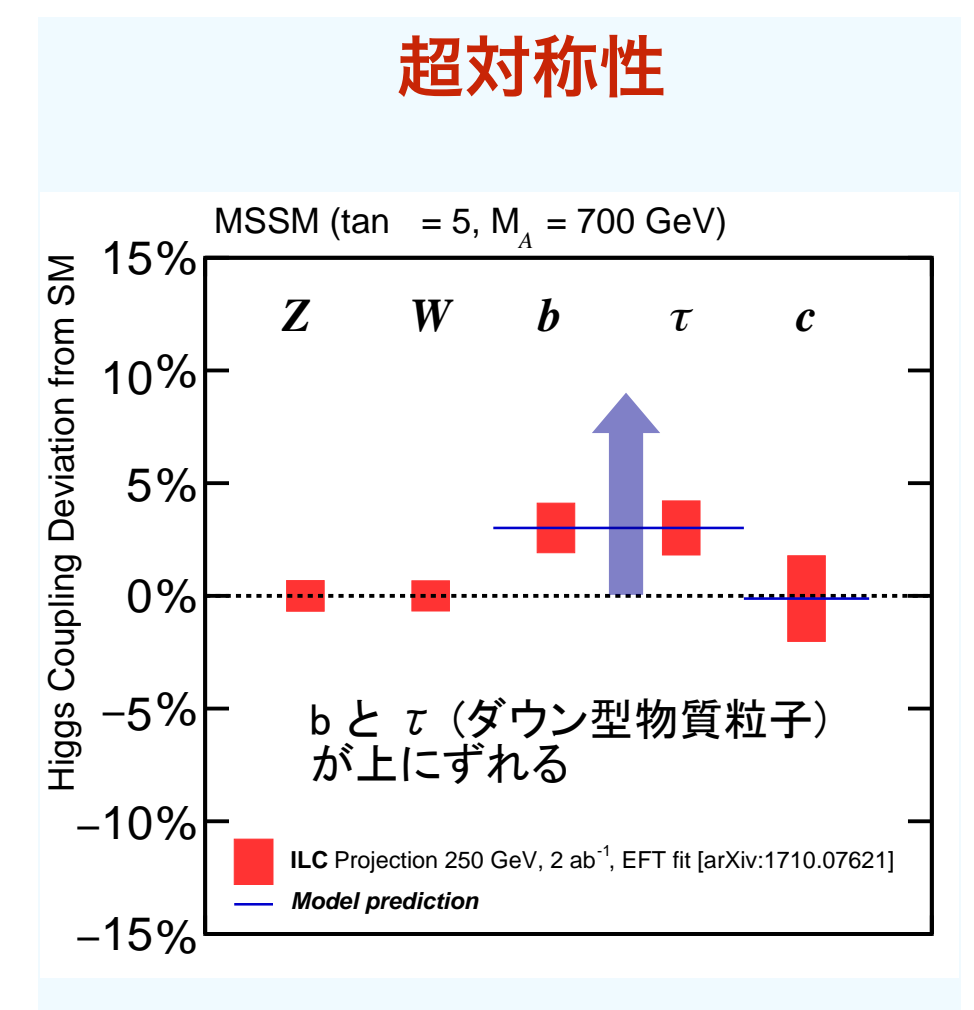
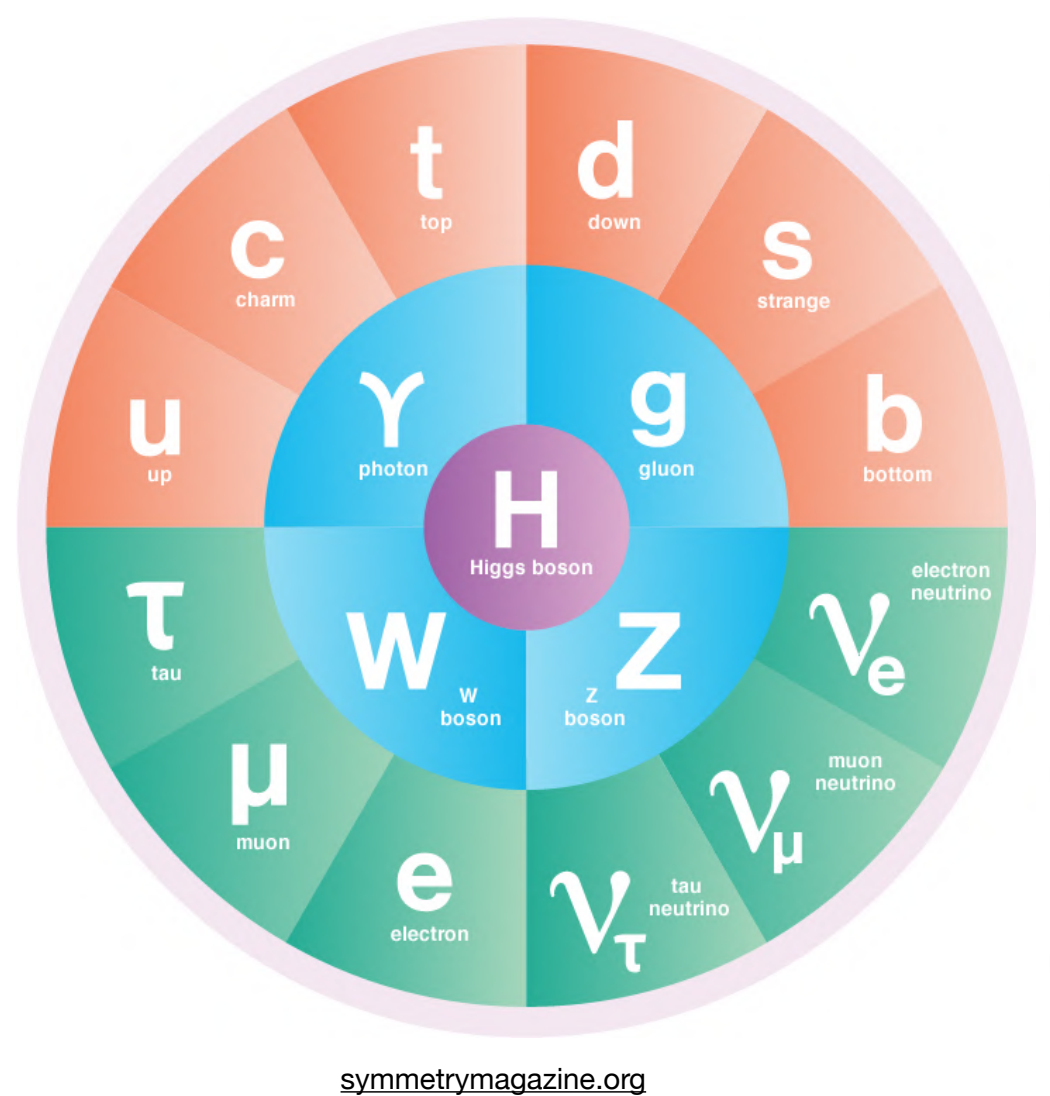
# ICEPP研究紹介

## ILC計画



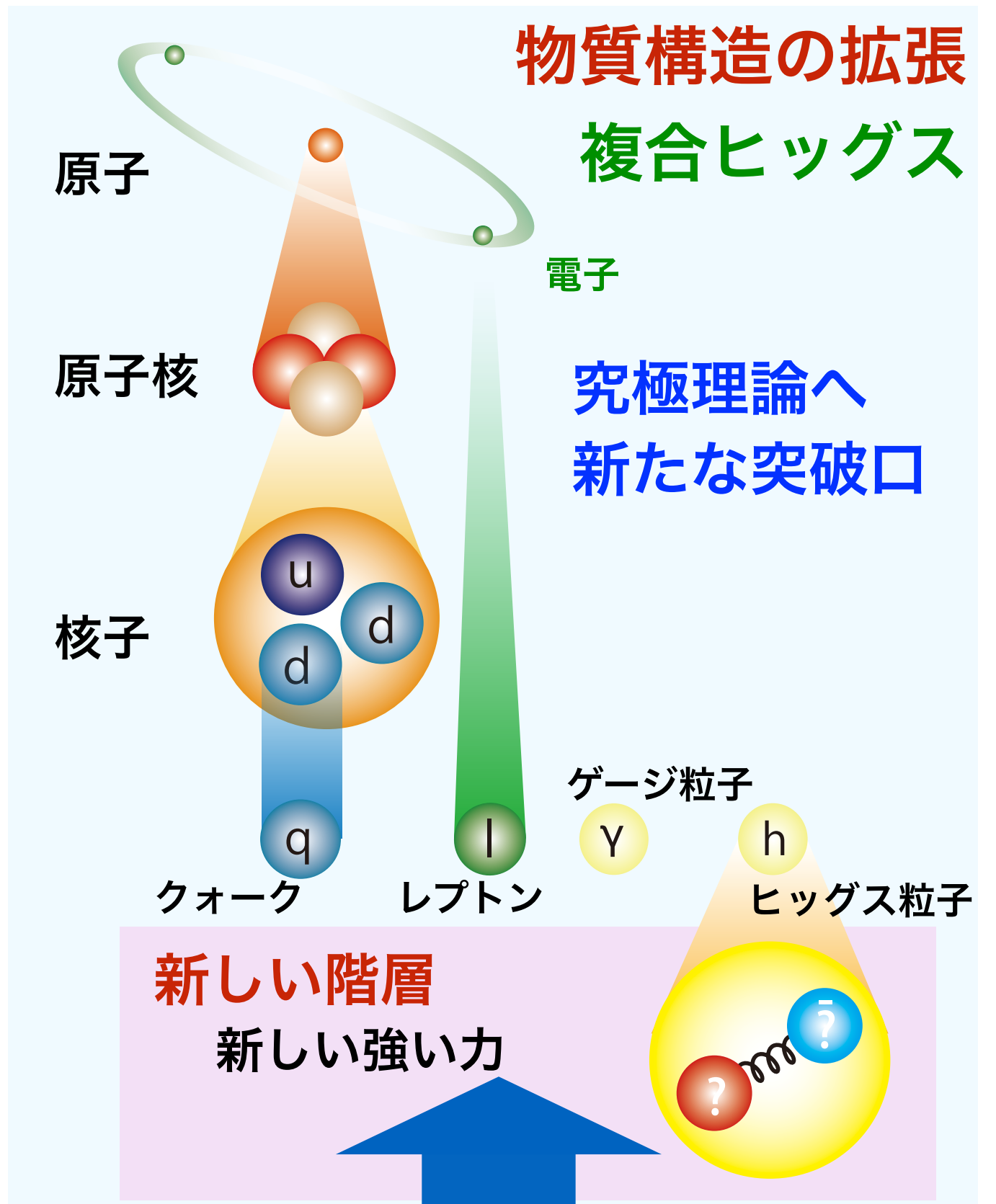
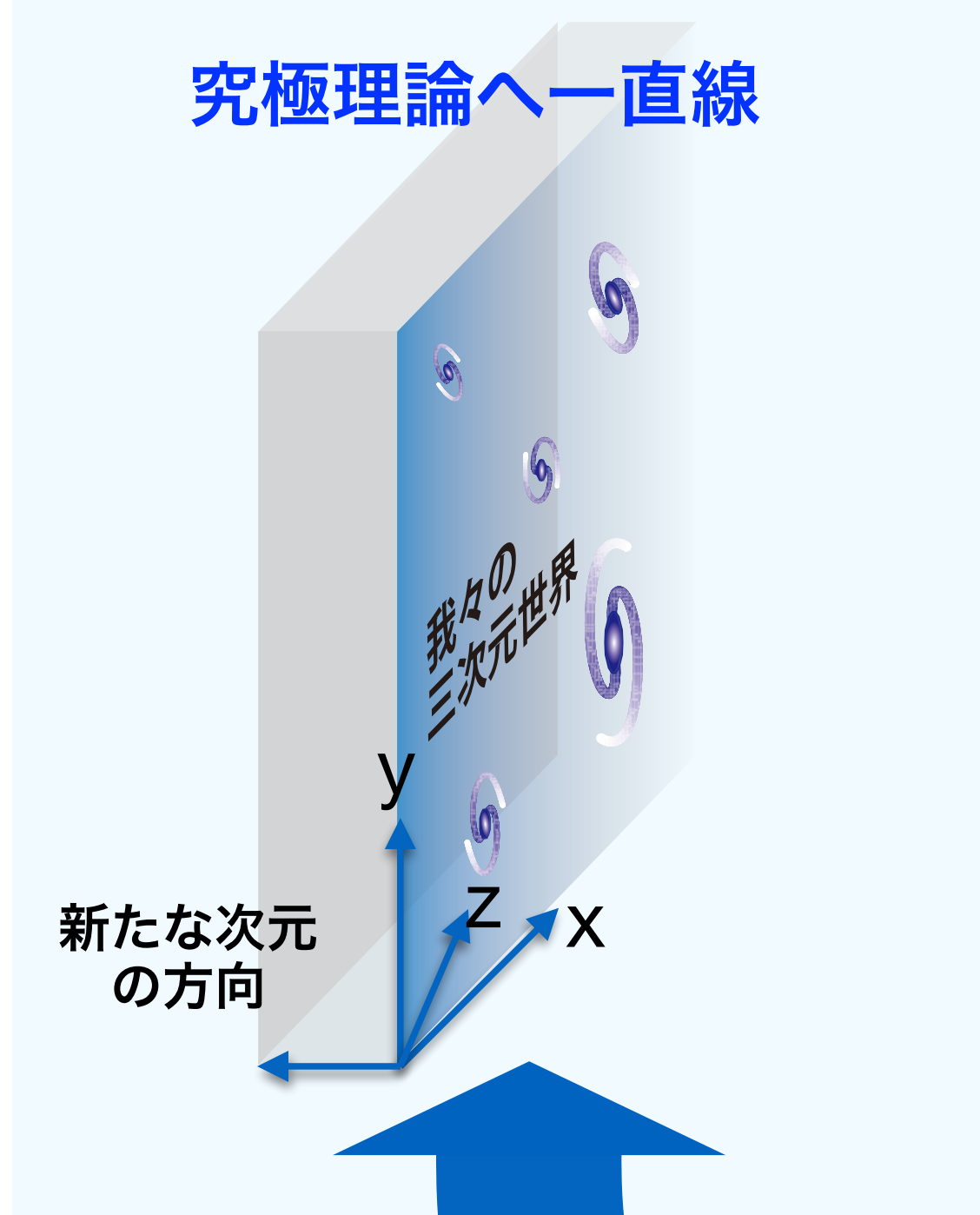
# 素粒子物理学のこれから

- ヒッグス粒子 = 新たに手に入れた究極理論解明のための強力なツール
  - 新物理の効果はヒッグス粒子の性質の標準理論からのズレとしてあらわれる
- ヒッグスの精密測定が素粒子物理学の今後の進むべき方向性を明らかにする
  - ヒッグス研究は今後取り組むべき最も重要な「物理」のひとつ！

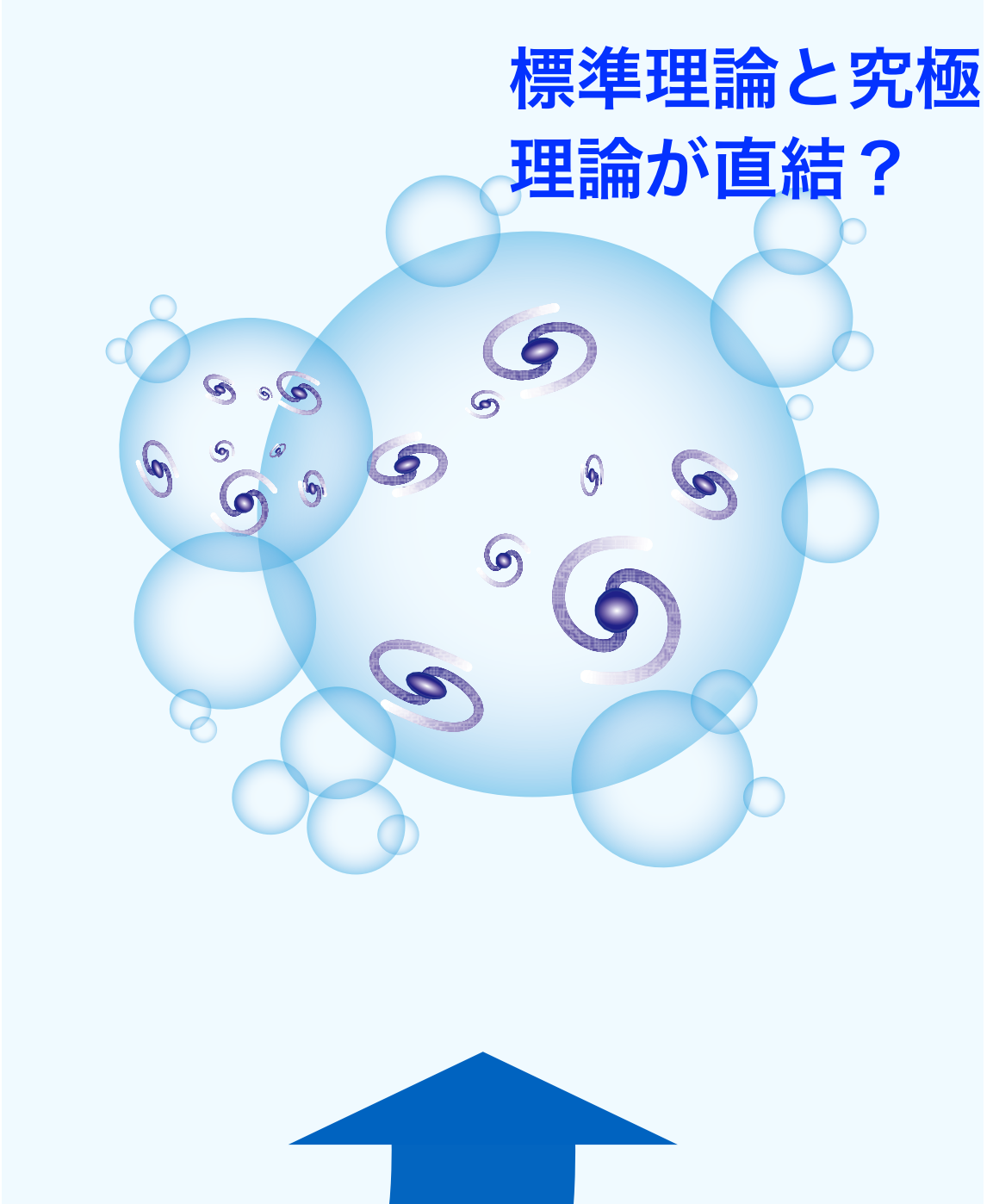


# 究極の統一理論解明への道筋

時空概念の拡張  
超対称性または余剰次元



全く新しい原理？  
複数宇宙+人間原理？



第二の道：「より深い階層」

標準理論からのズレが見られなかった場合

第一の道：「新たな次元」

ILC

第三の道：「複数宇宙？」



# 次世代最高エネルギー加速器

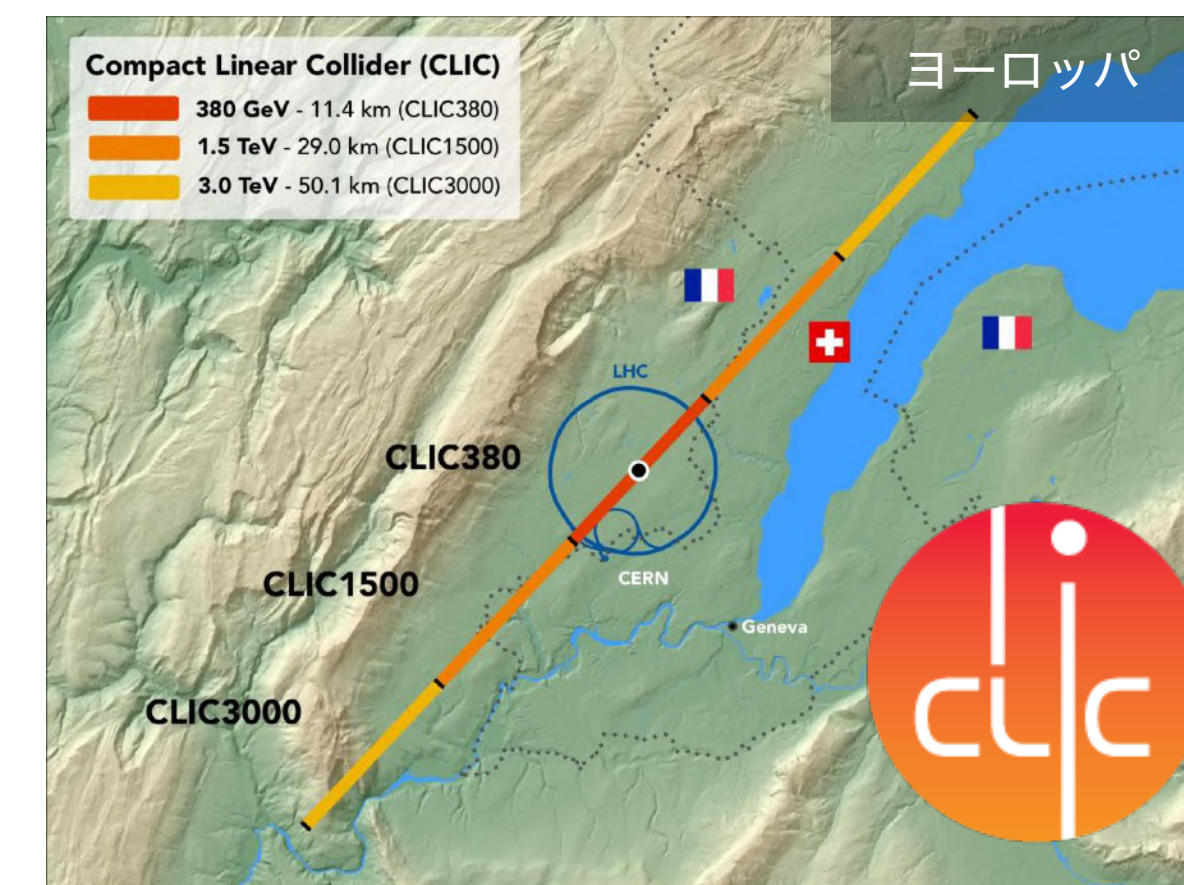
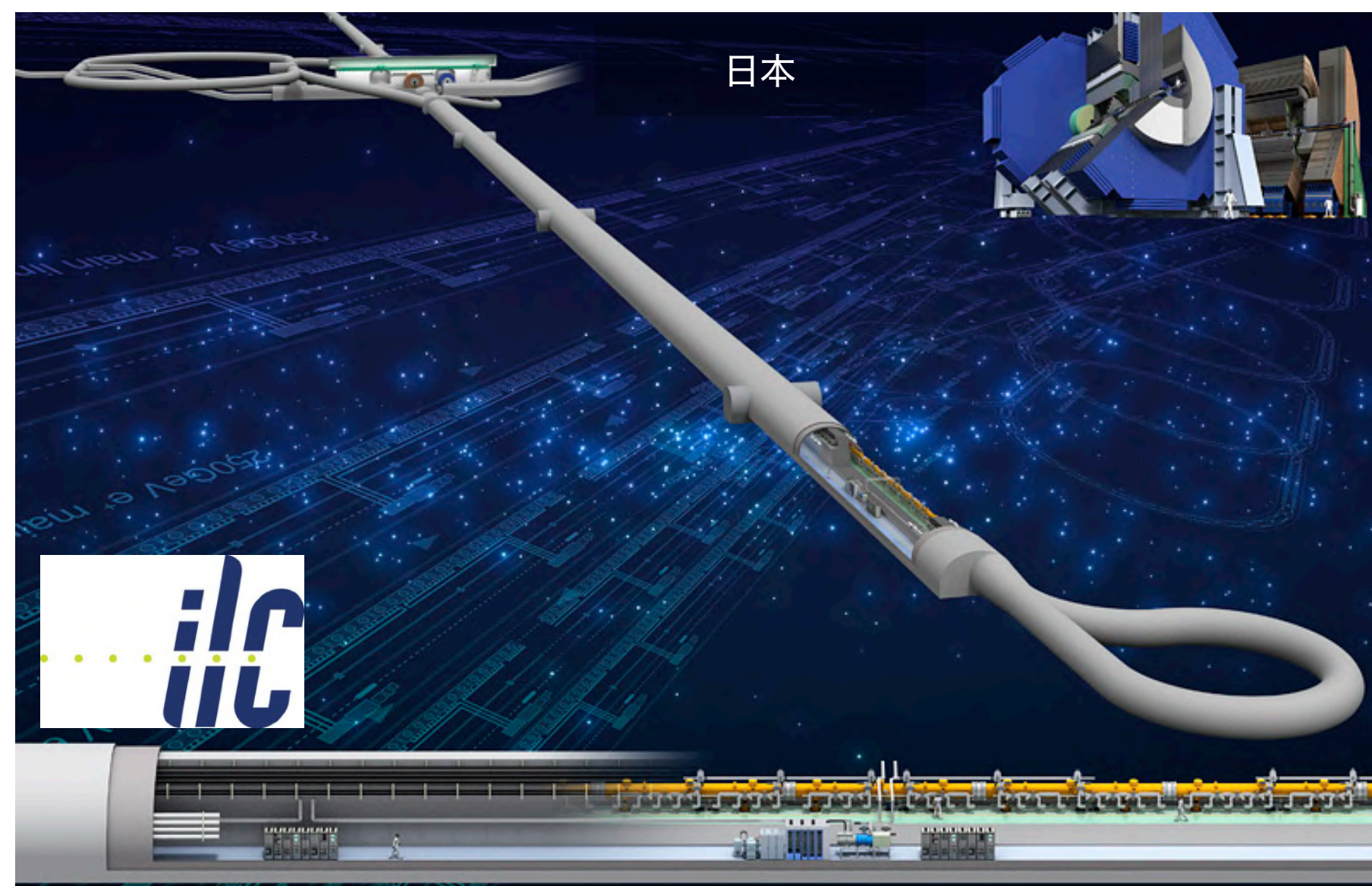
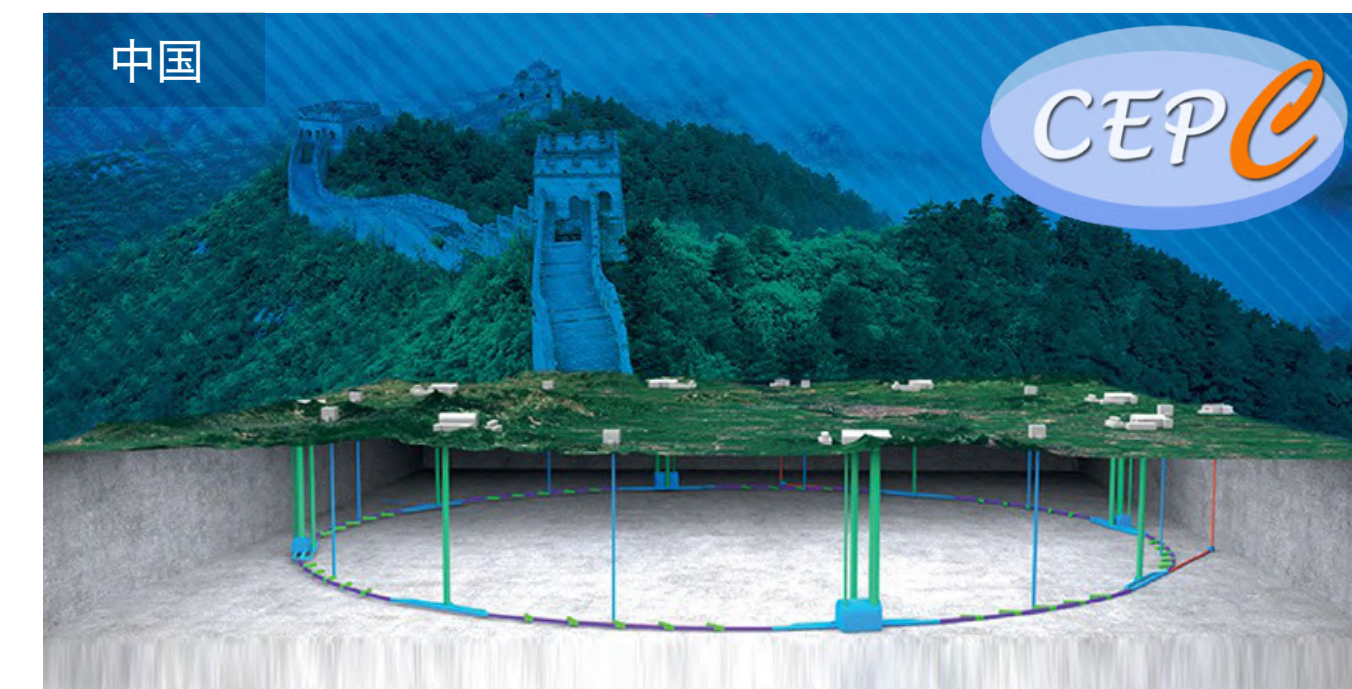
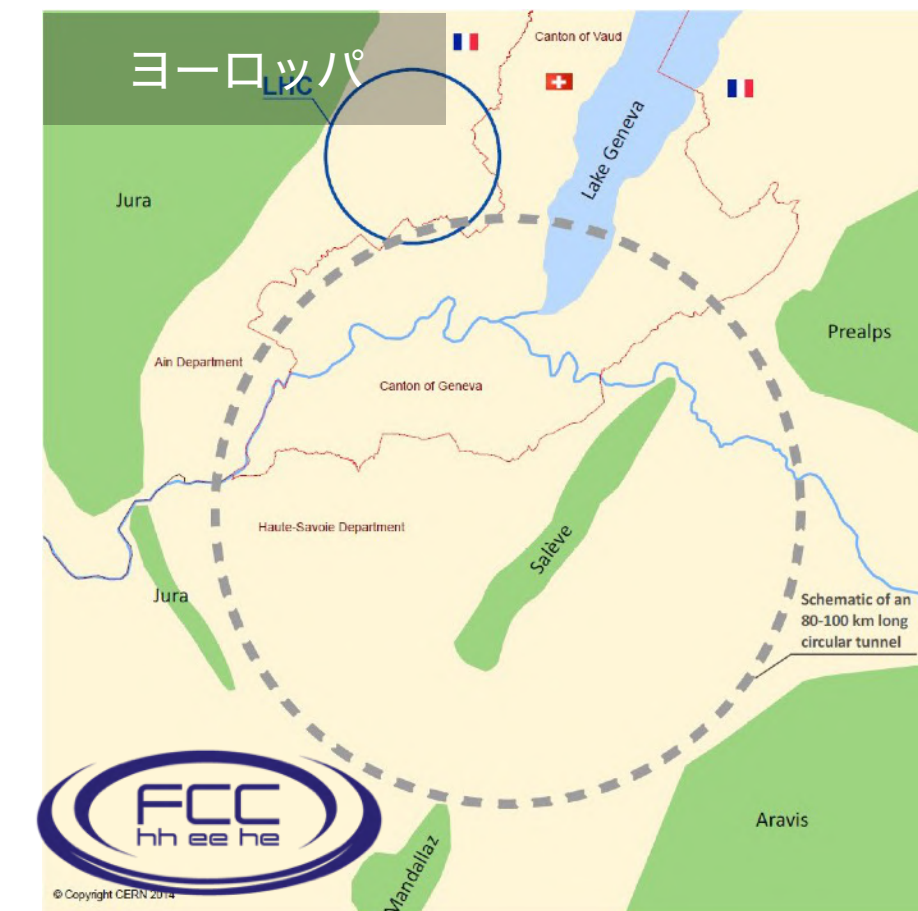
●ヒッグス粒子の精密研究で標準理論を超える新物理への扉を開く！

●国際的な合意

●次に建設すべきエネルギーフロンティア加速器は電子陽電子衝突型加速器(ヒッグス生成工場)

●世界中でいろいろな次世代電子陽電子加速器が提案されている

●ILC, CLIC, FCC-ee, CEPC



# 次世代最高エネルギー加速器

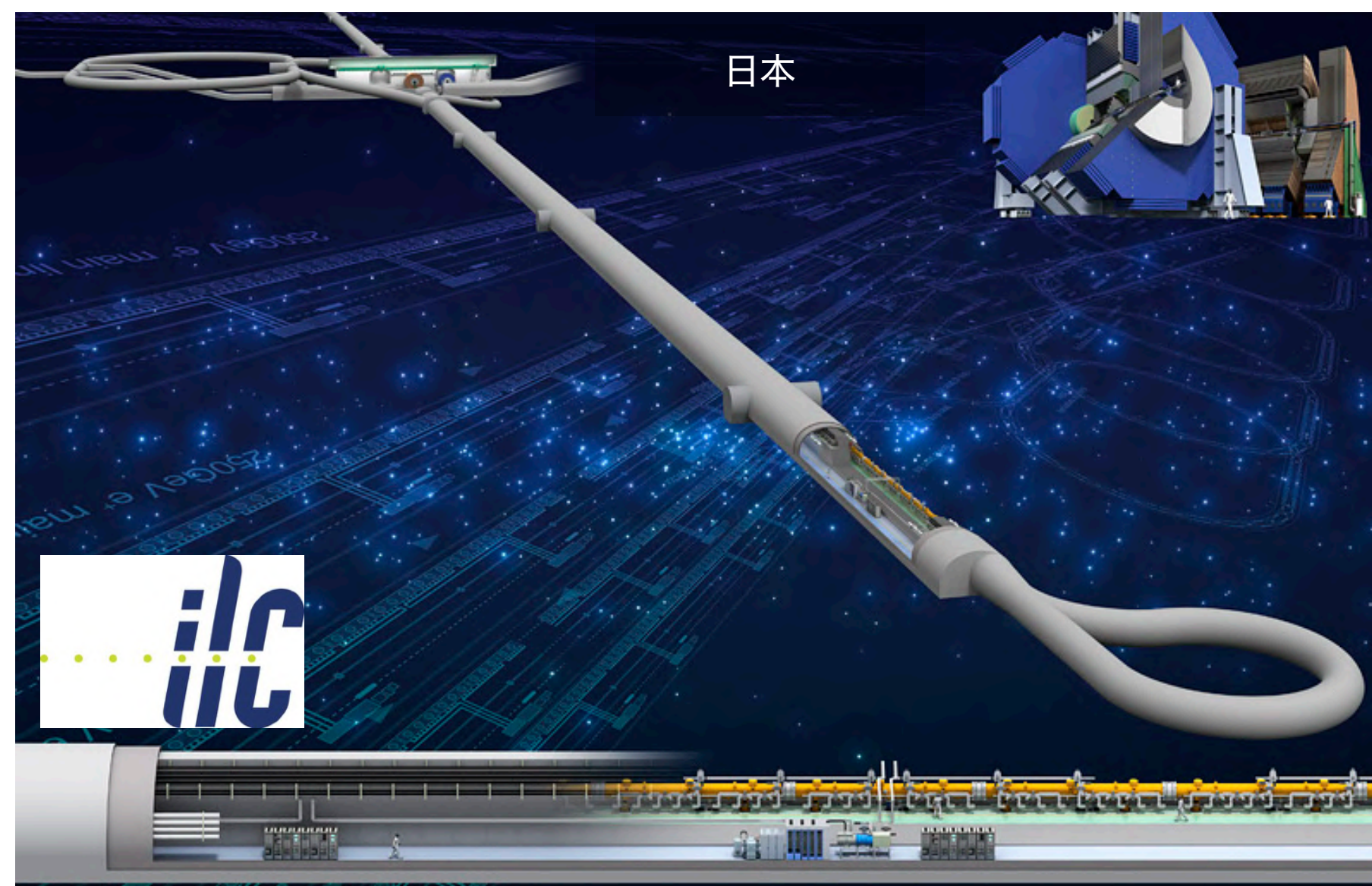
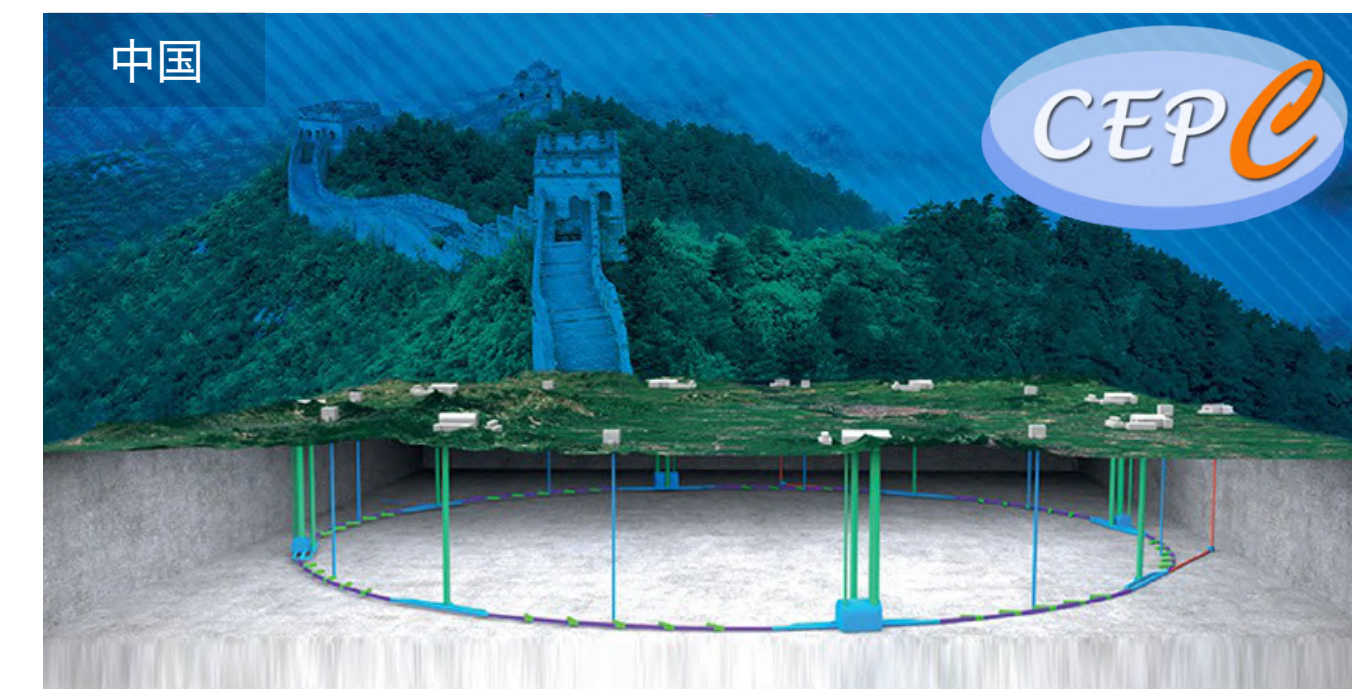
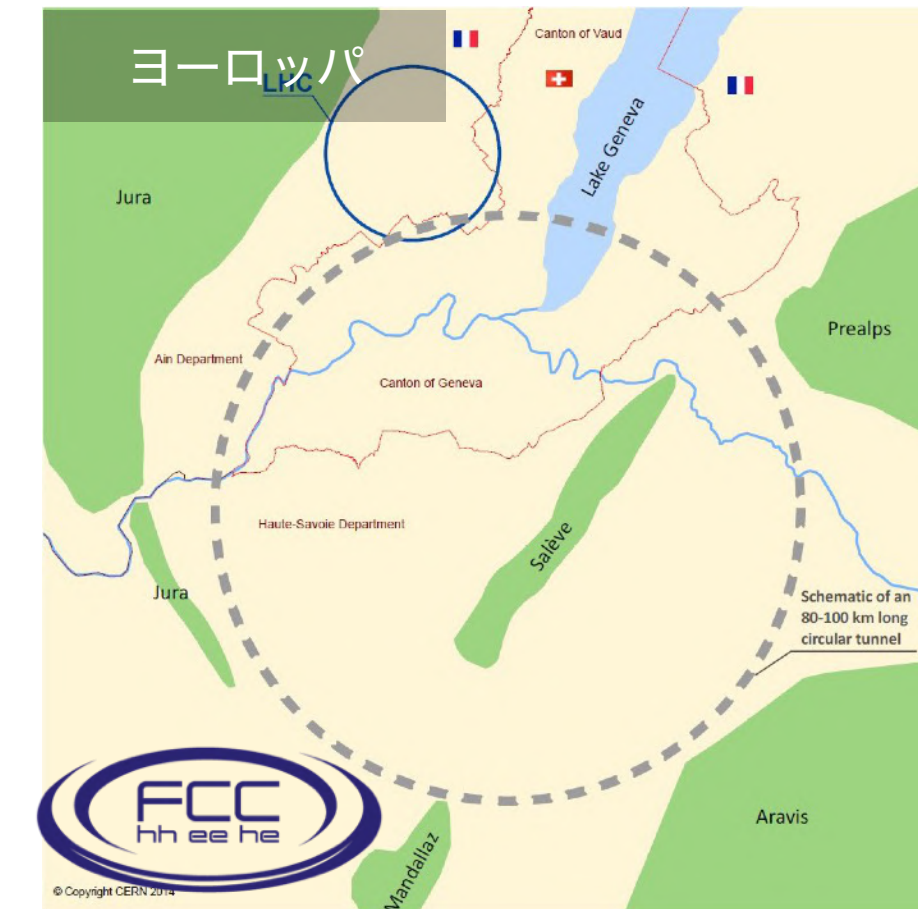
●ヒッグス粒子の精密研究で標準理論を超える新物理への扉を開く！

●国際的な合意

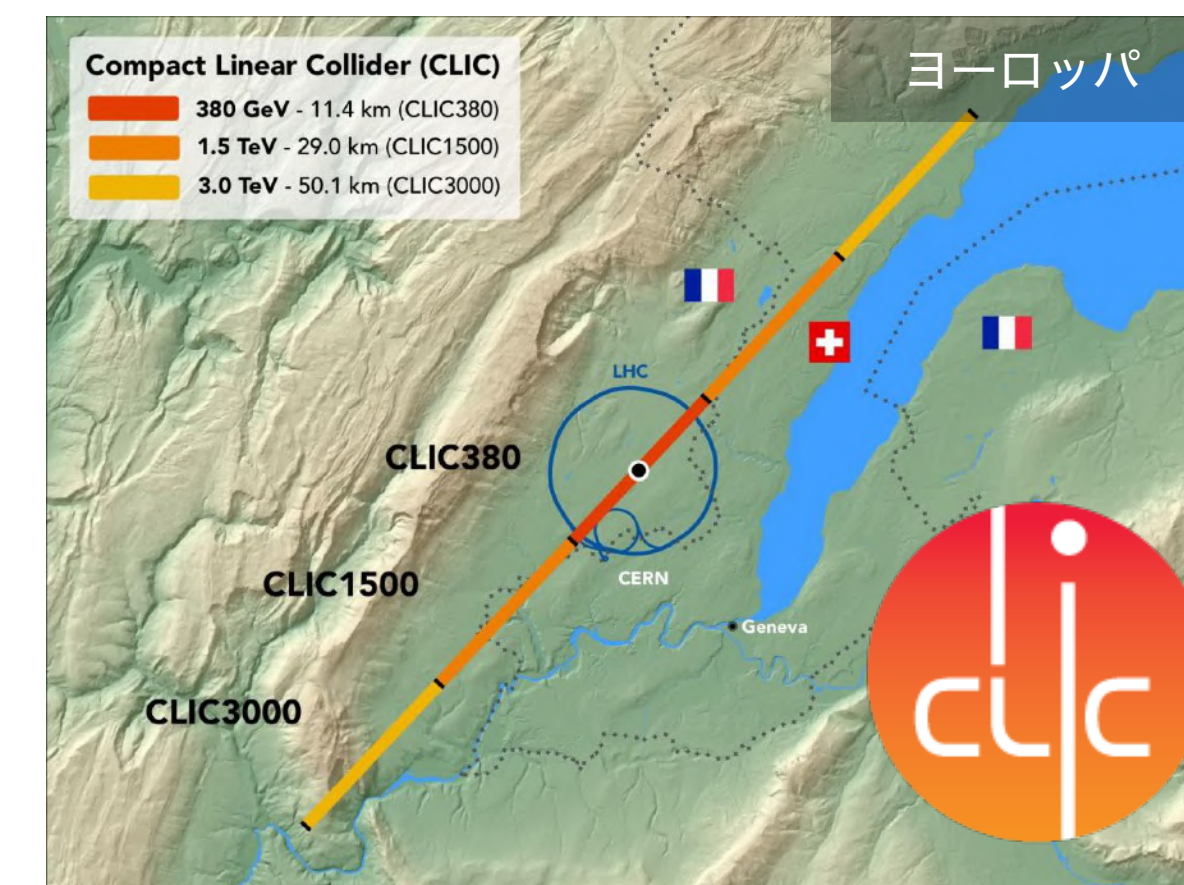
●次に建設すべきエネルギーフロンティア加速器は電子陽電子衝突型加速器(ヒッグス生成工場)

●世界中でいろいろな次世代電子陽電子加速器が提案されている

●ILC, CLIC, FCC-ee, CEPC



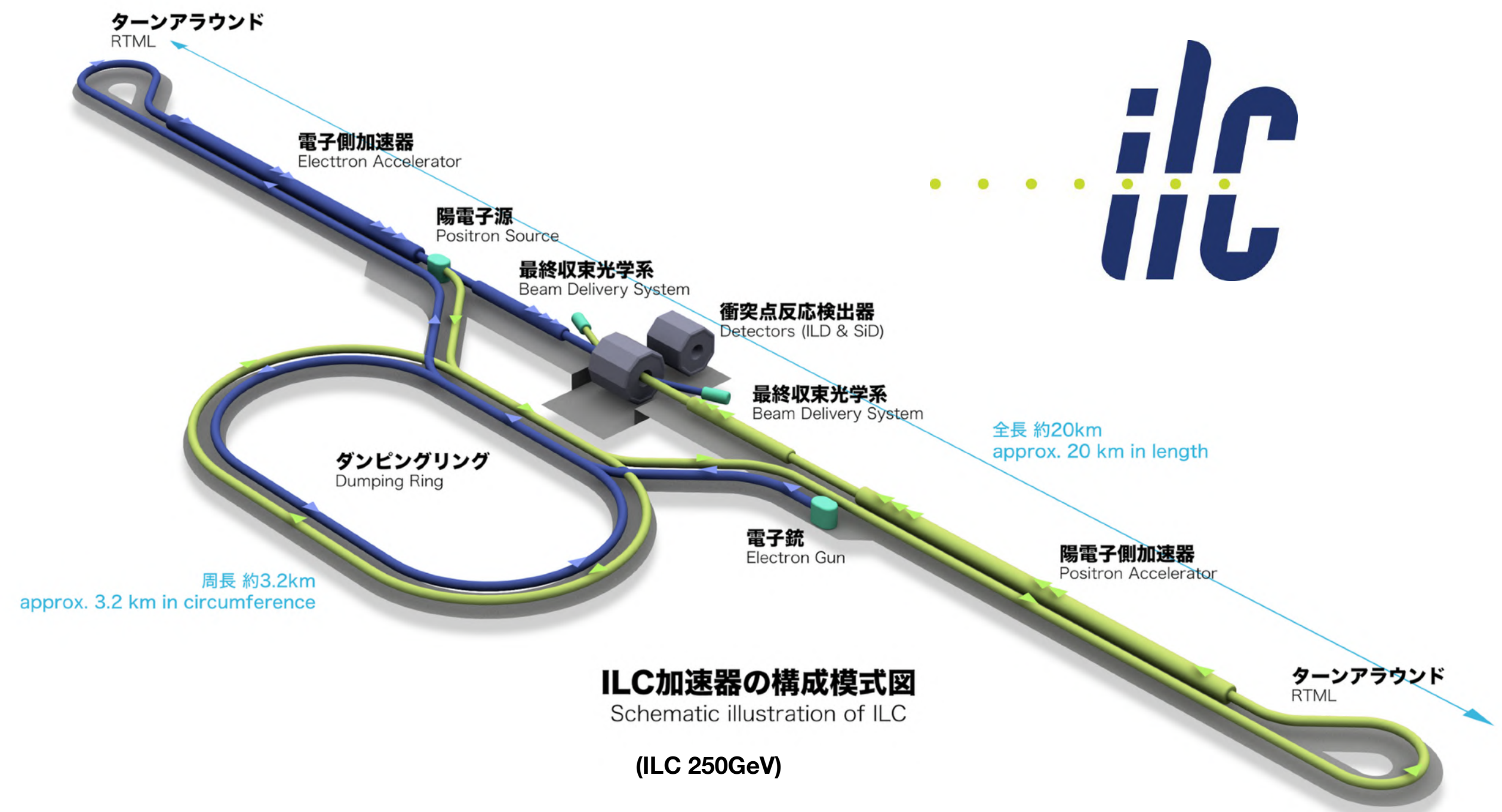
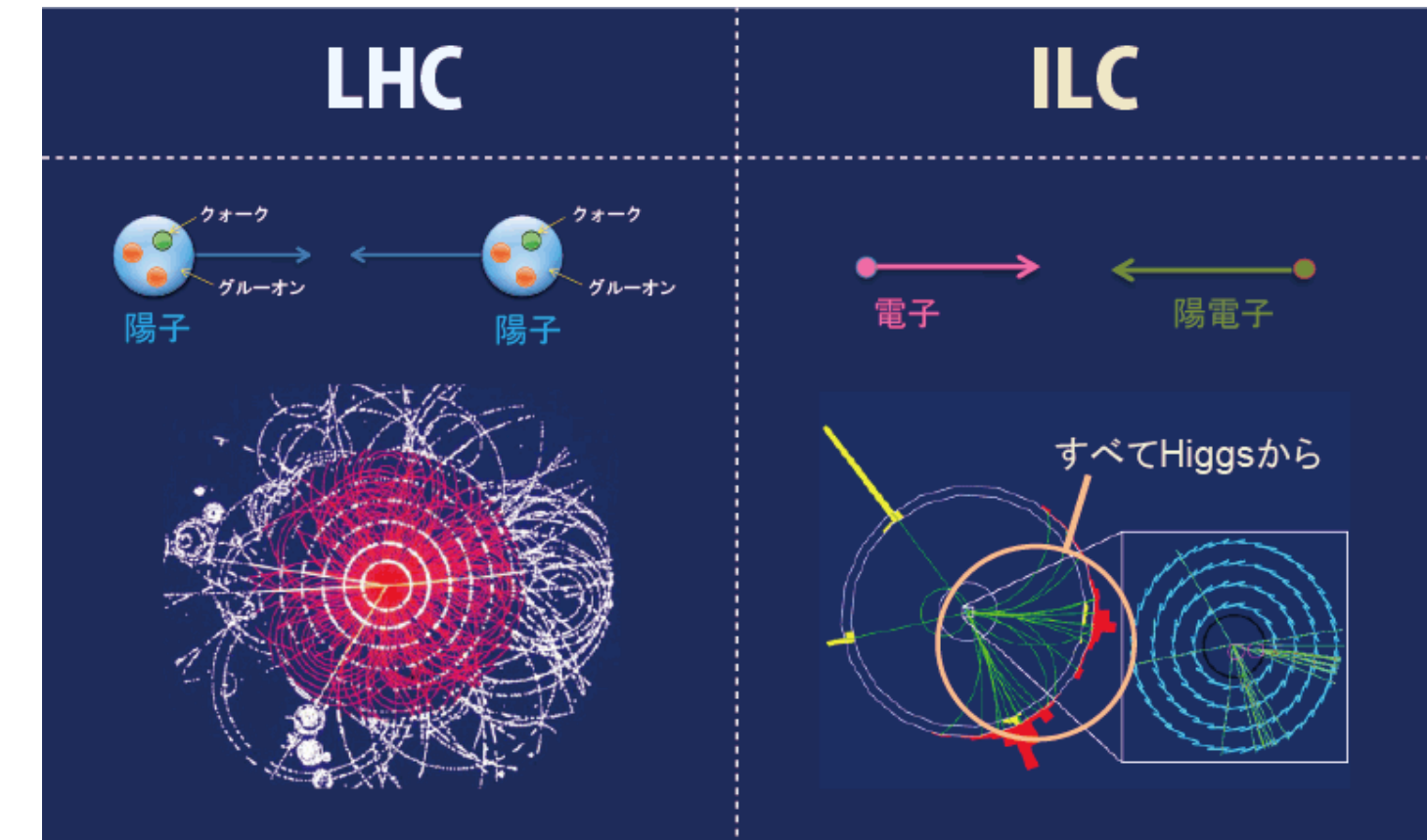
技術的成熟度が高く、実現に近いのがILC



# 国際リニアコライダー(ILC)計画

## ●ILC=次世代最高エネルギー電子陽電子線形衝突型加速器

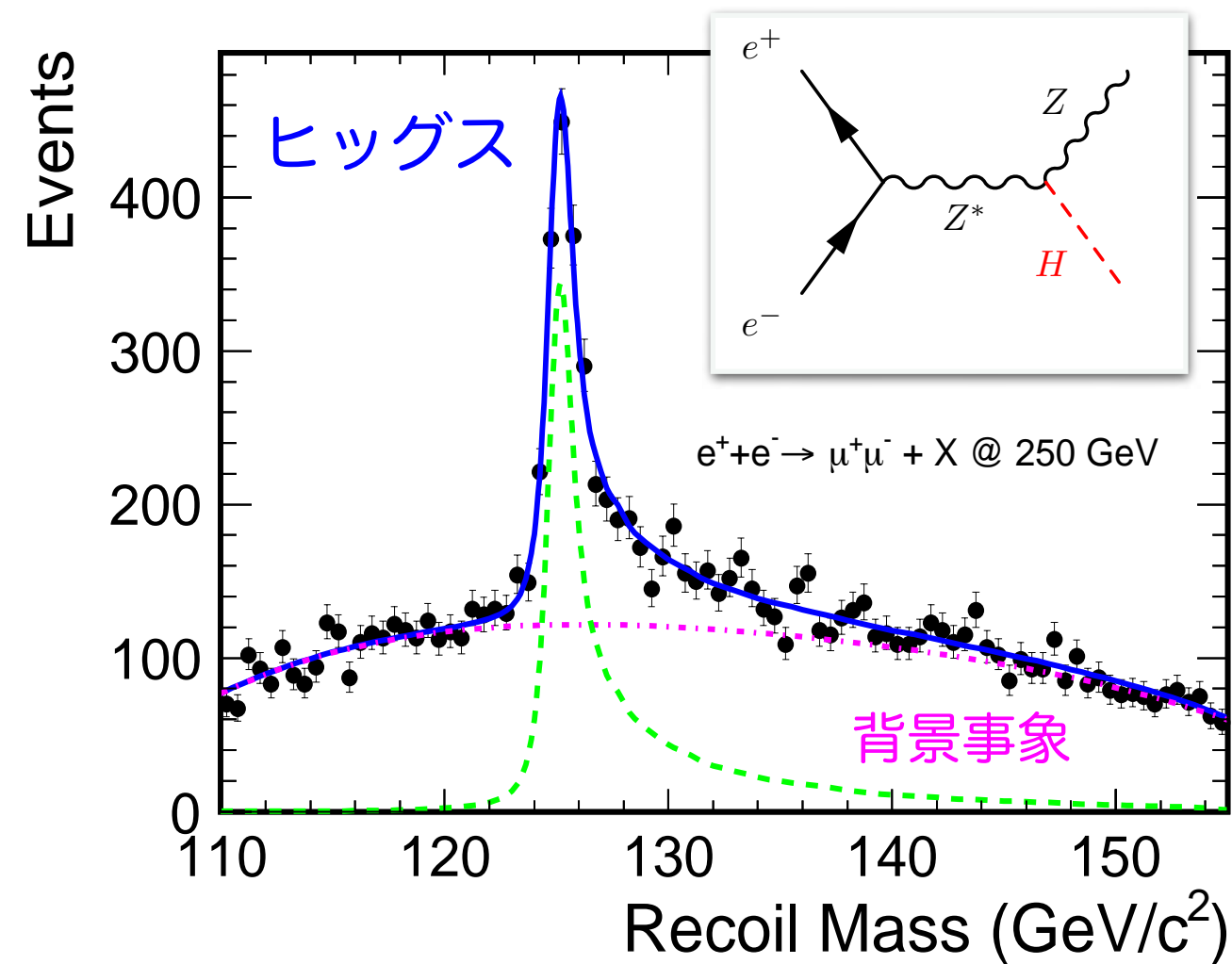
- 素粒子同士の衝突、全衝突エネルギーが反応に使われる
- クリーンな環境で圧倒的な精密測定
- エネルギー拡張性に優れる。250GeV→500GeV(1TeV以上の可能性も)
- 偏極ビームが利用可能
- 世界の建設候補地：北上山地@東北



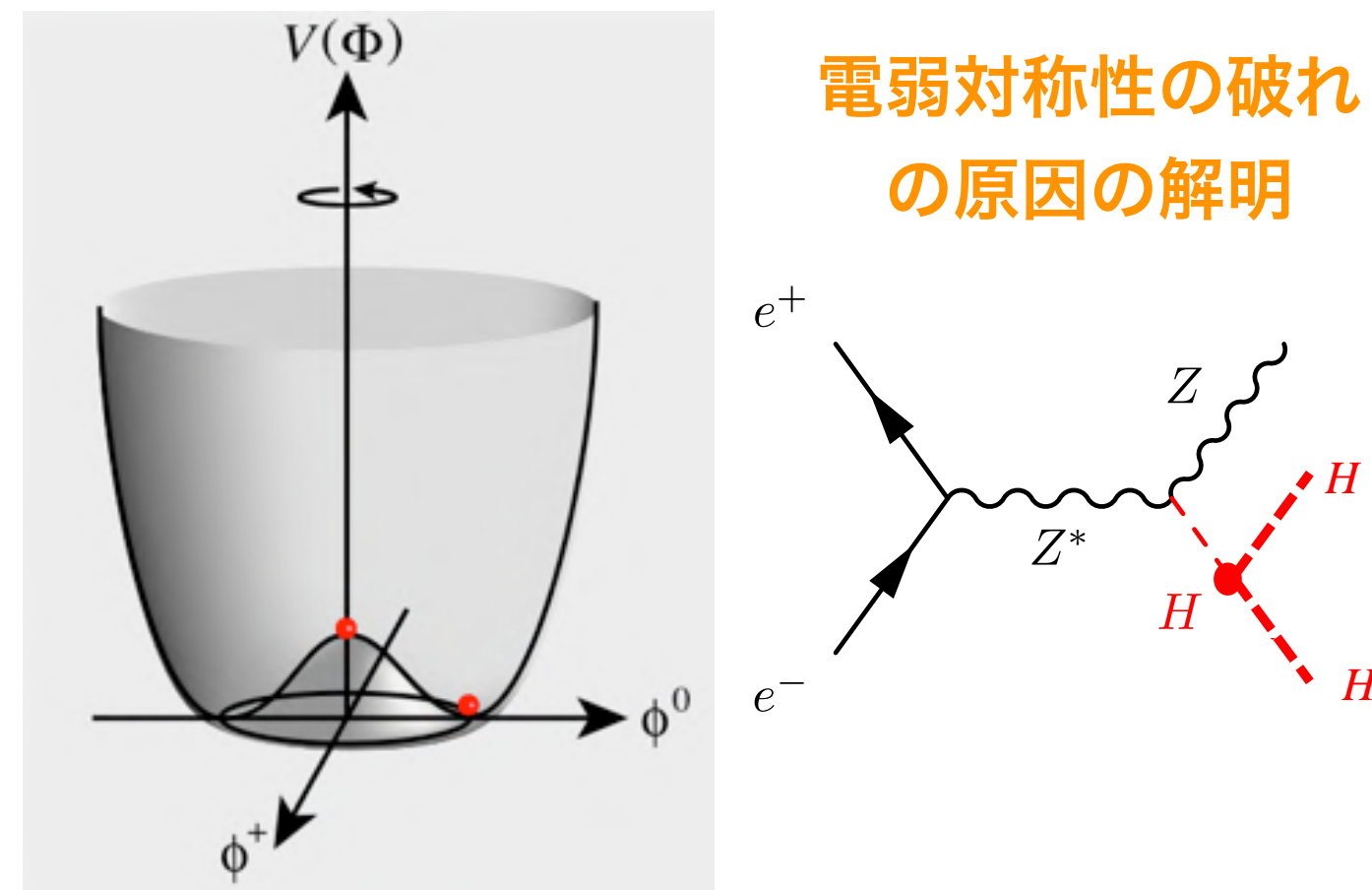
ILC加速器の構成模式図  
Schematic illustration of ILC  
(ILC 250GeV)

# ILCで目指す物理(ヒッグス物理だけではない)

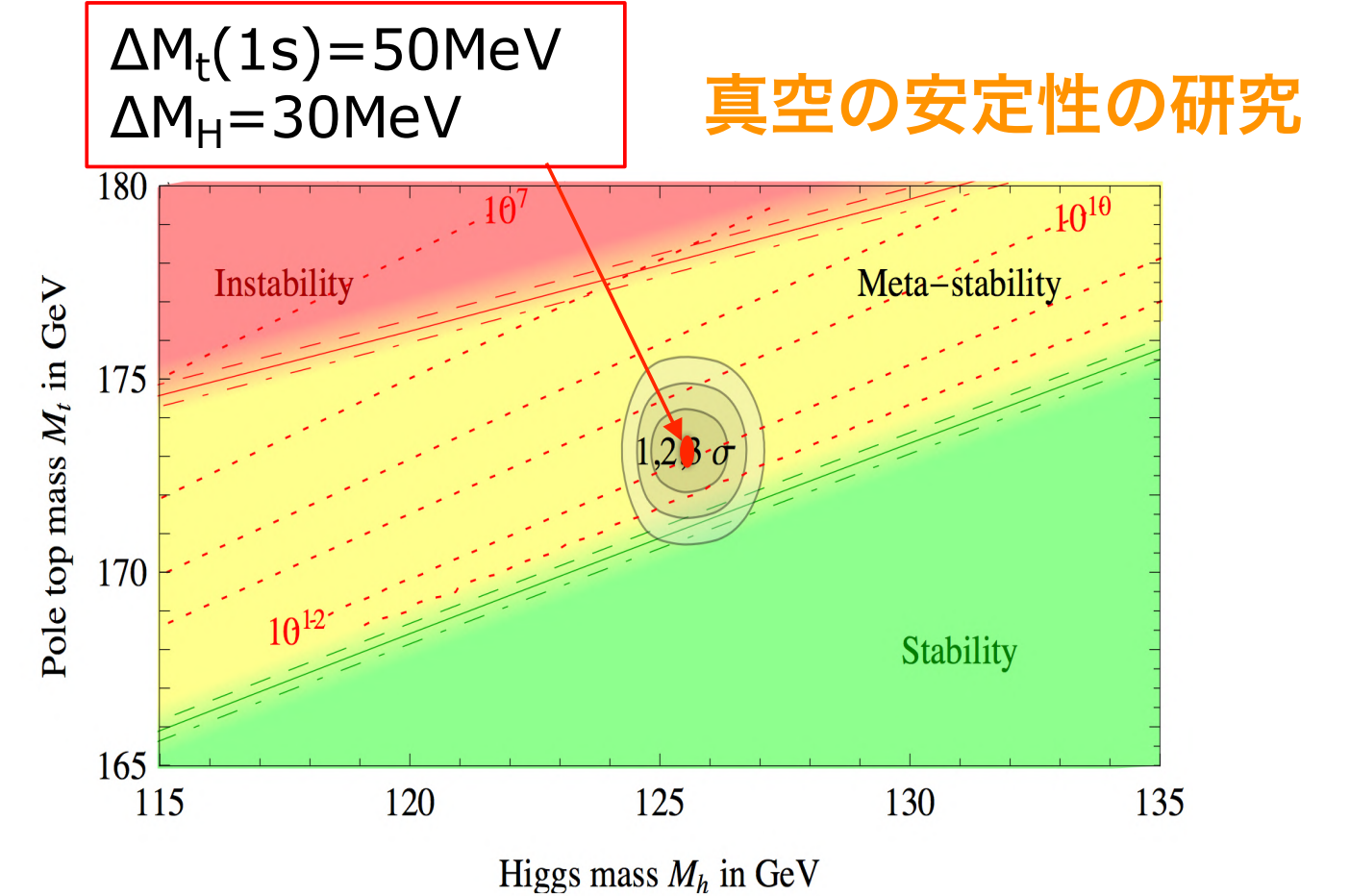
## ヒッグス粒子の詳細研究



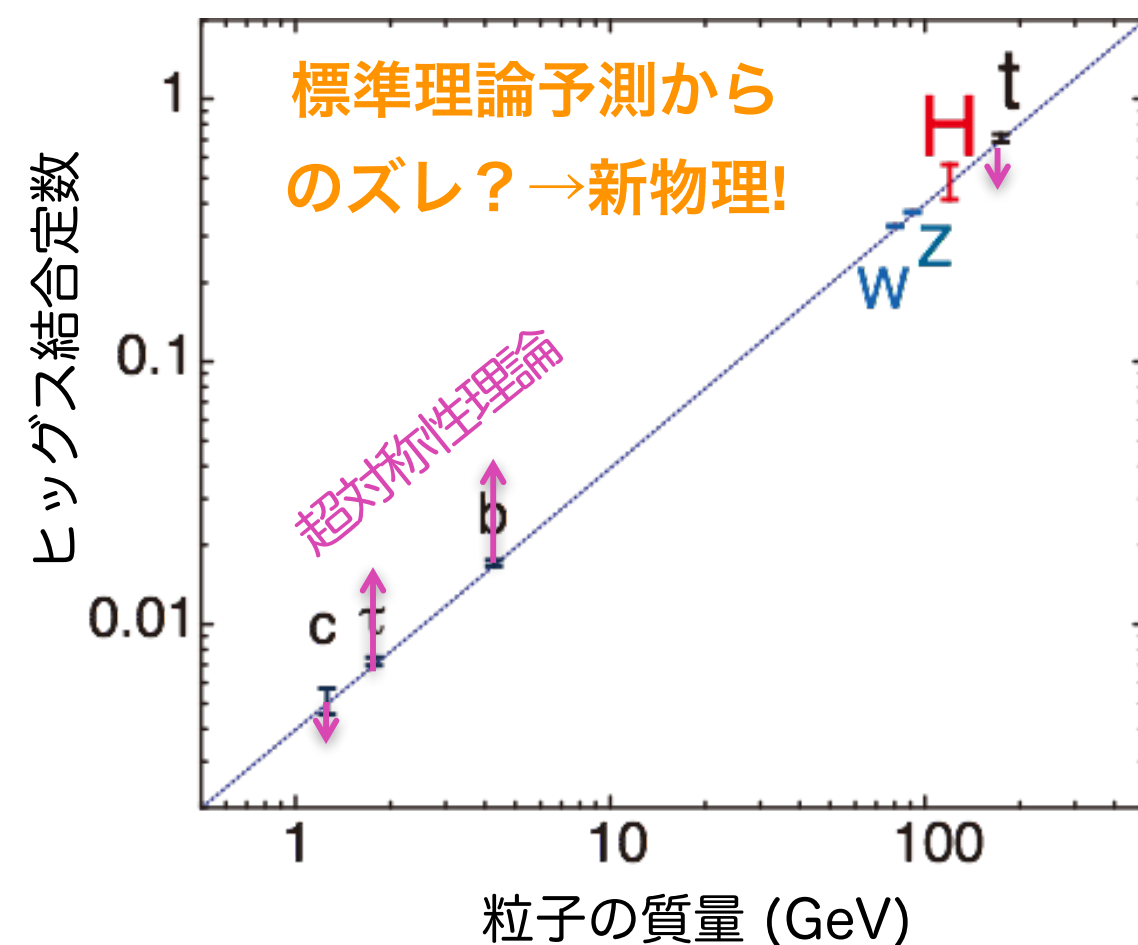
## ヒッグス自己結合



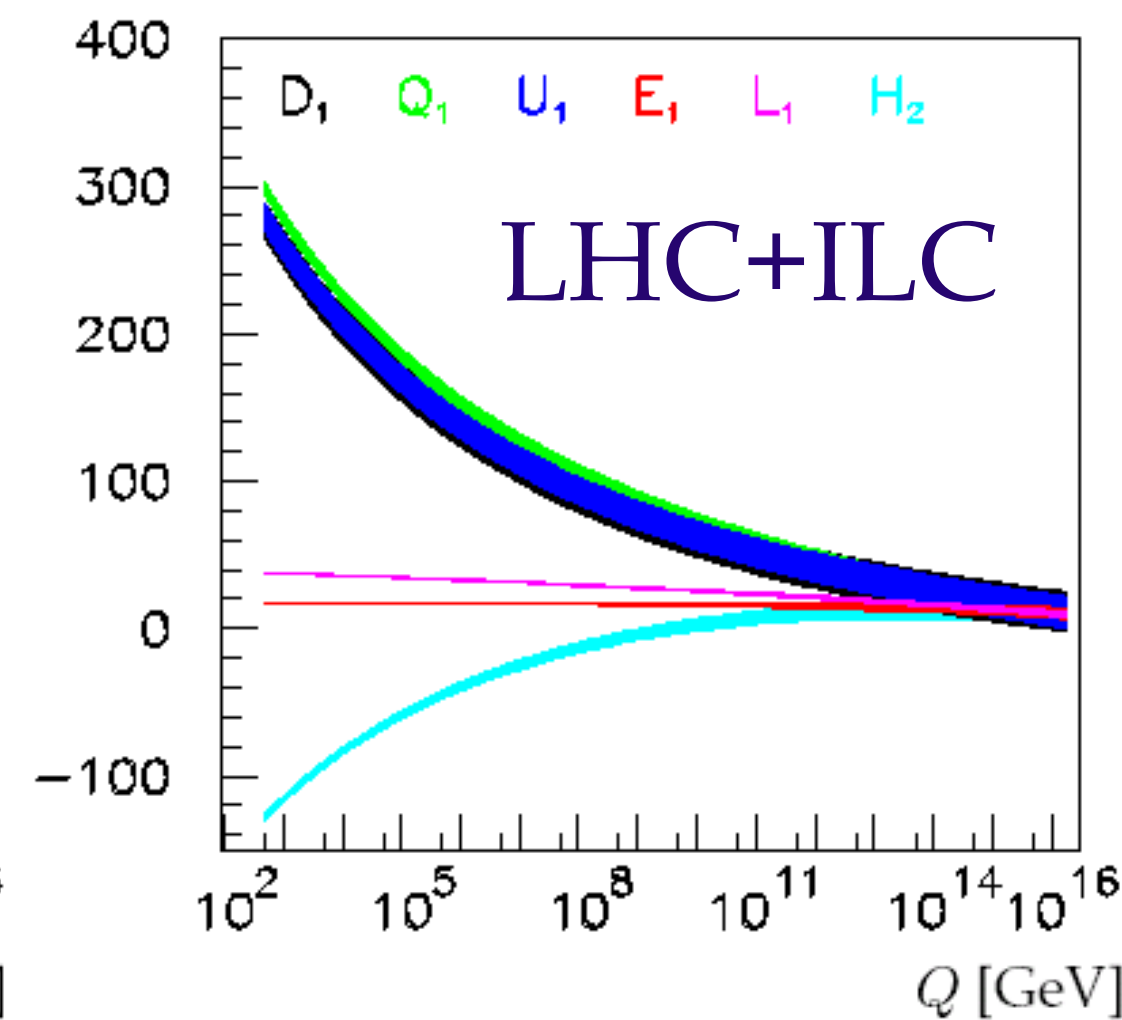
## トップクォークの詳細研究



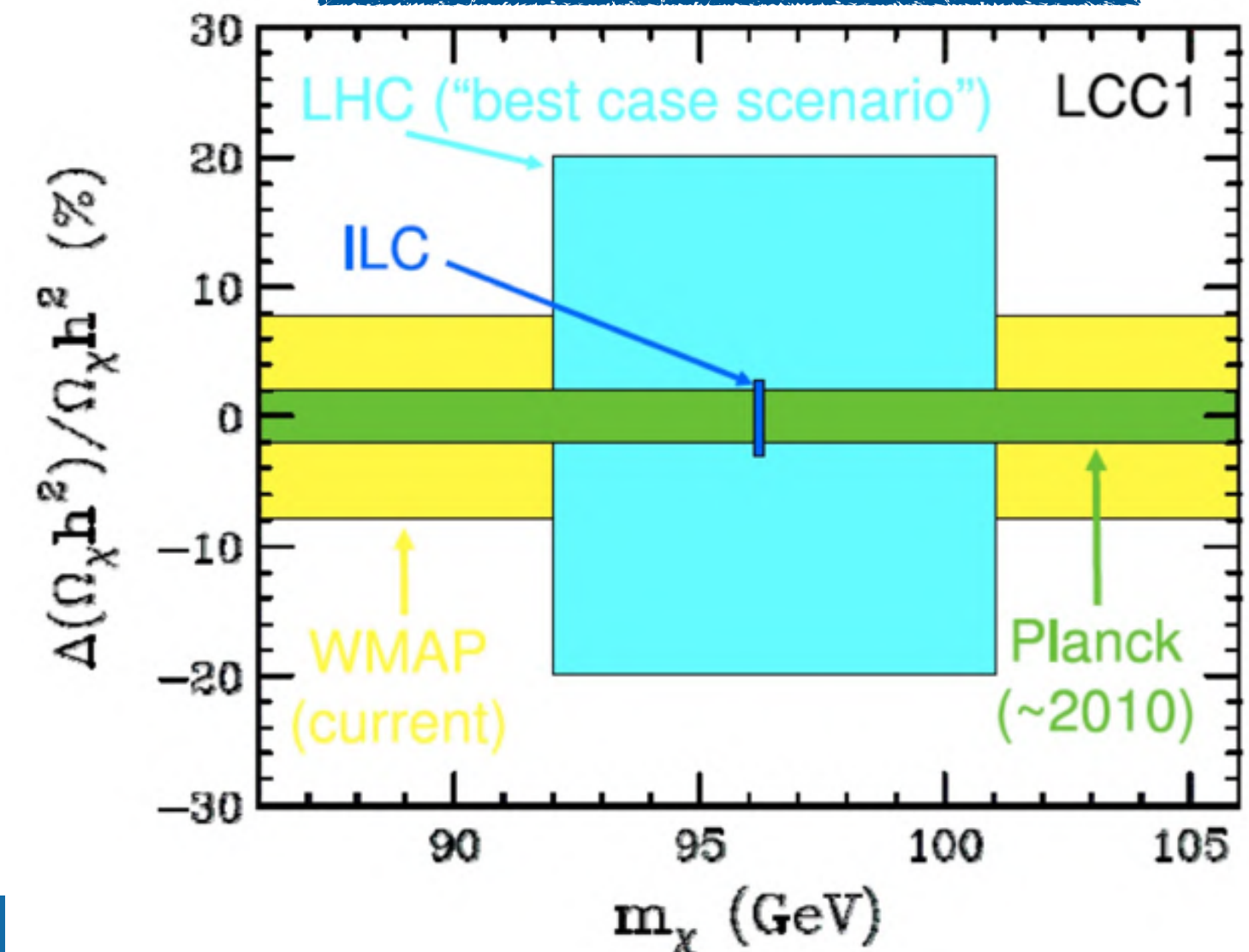
## ヒッグス結合定数の測定



## 力の大統一の検証

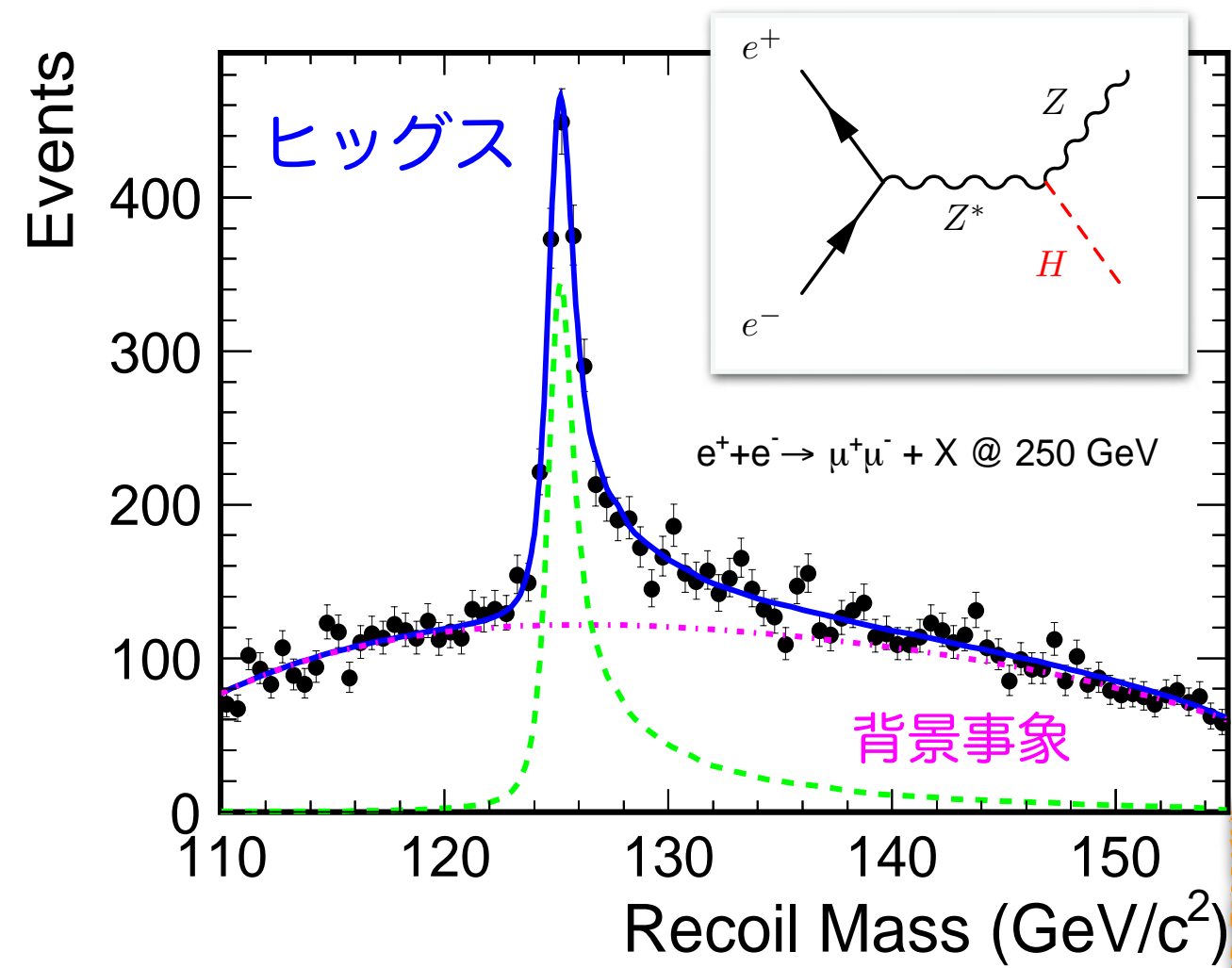


## 暗黒物質の正体解明

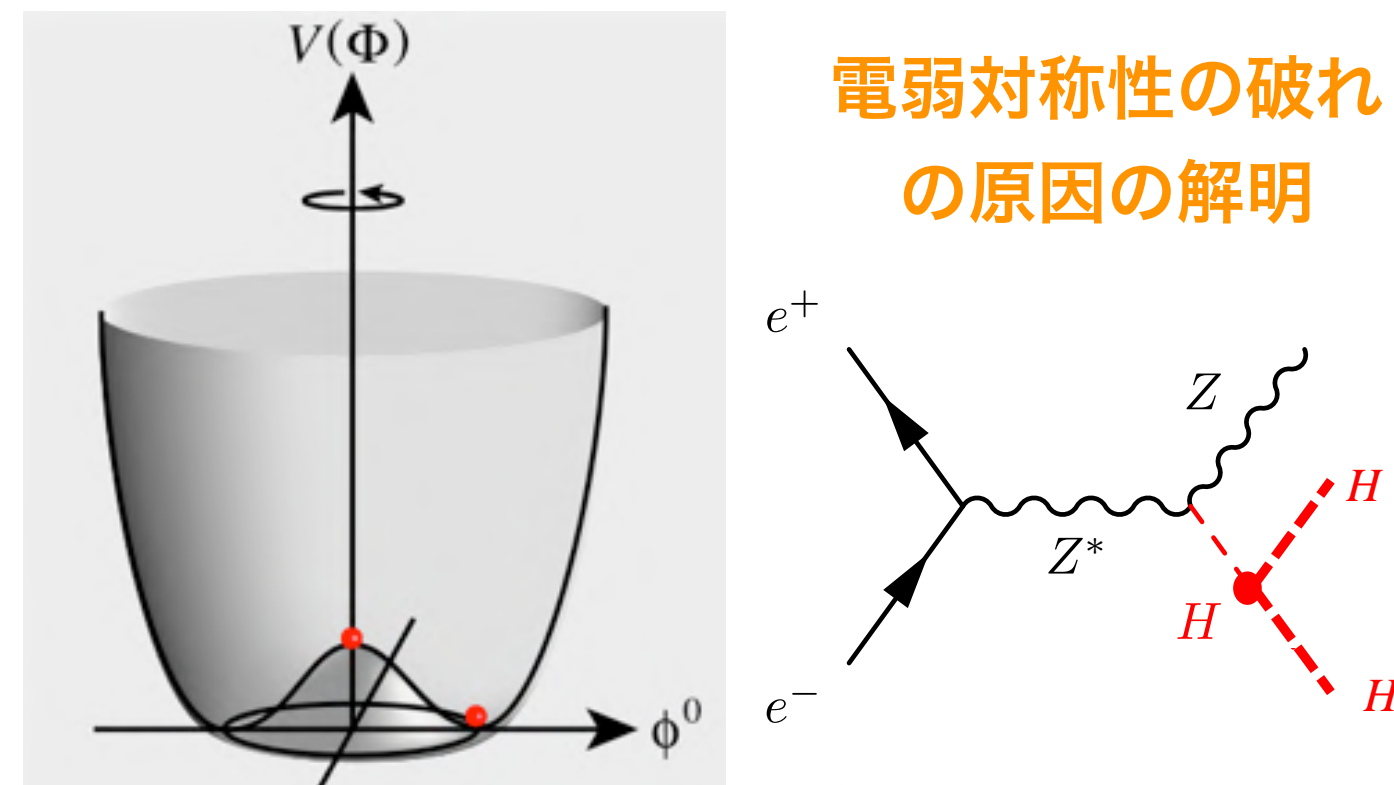


# ILCで目指す物理(ヒッグス物理だけではない)

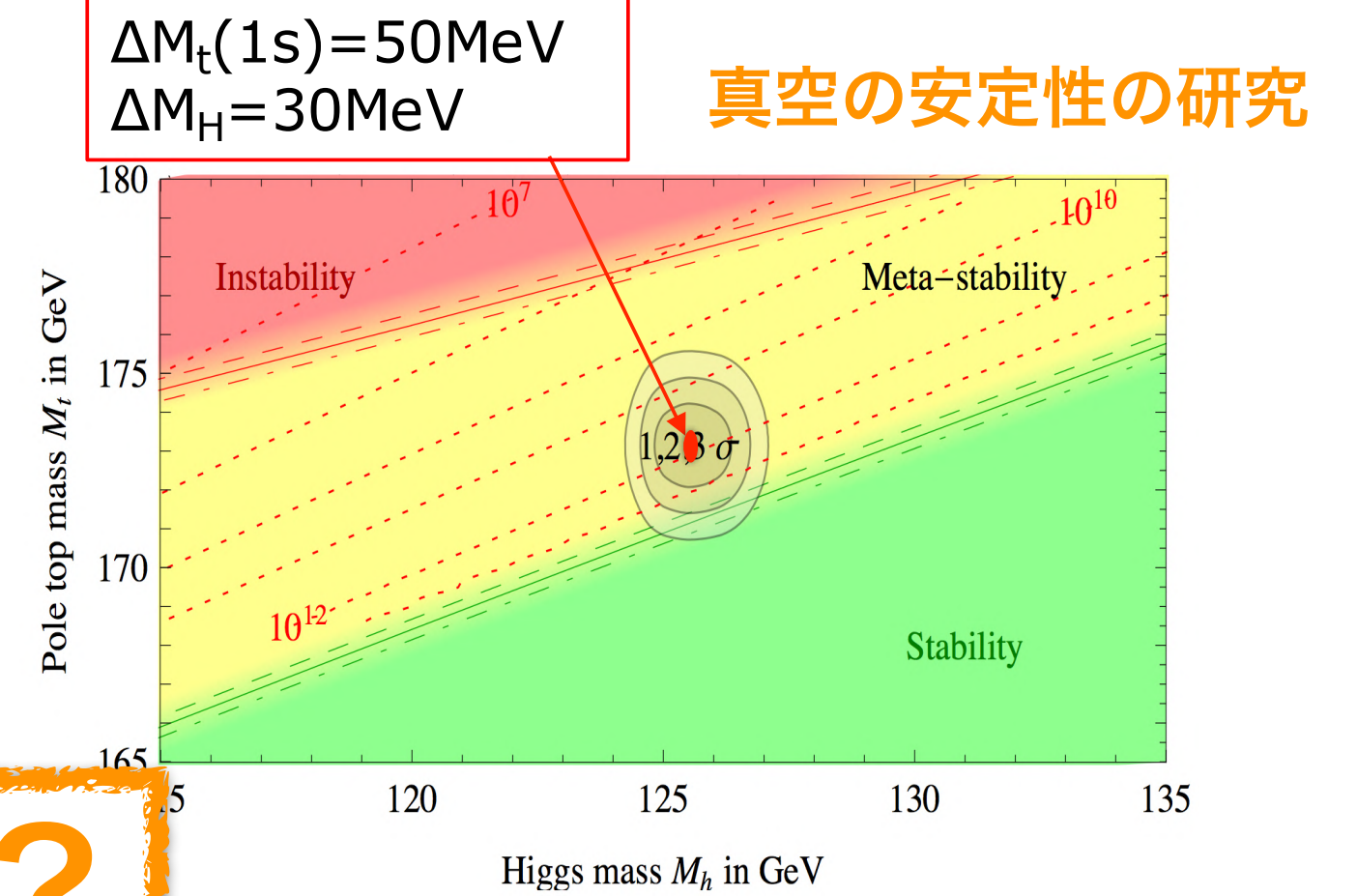
## ヒッグス粒子の詳細研究



## ヒッグス自己結合

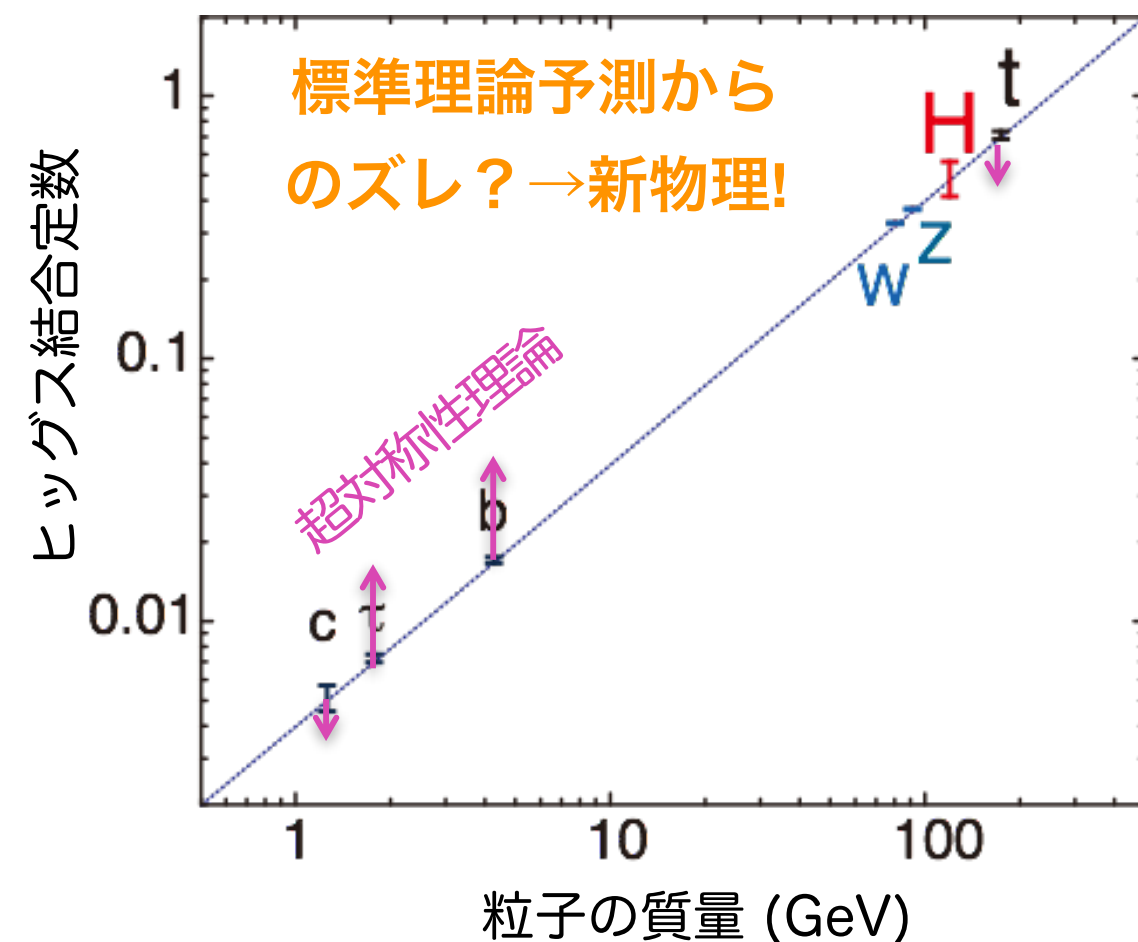


## トップクォークの詳細研究

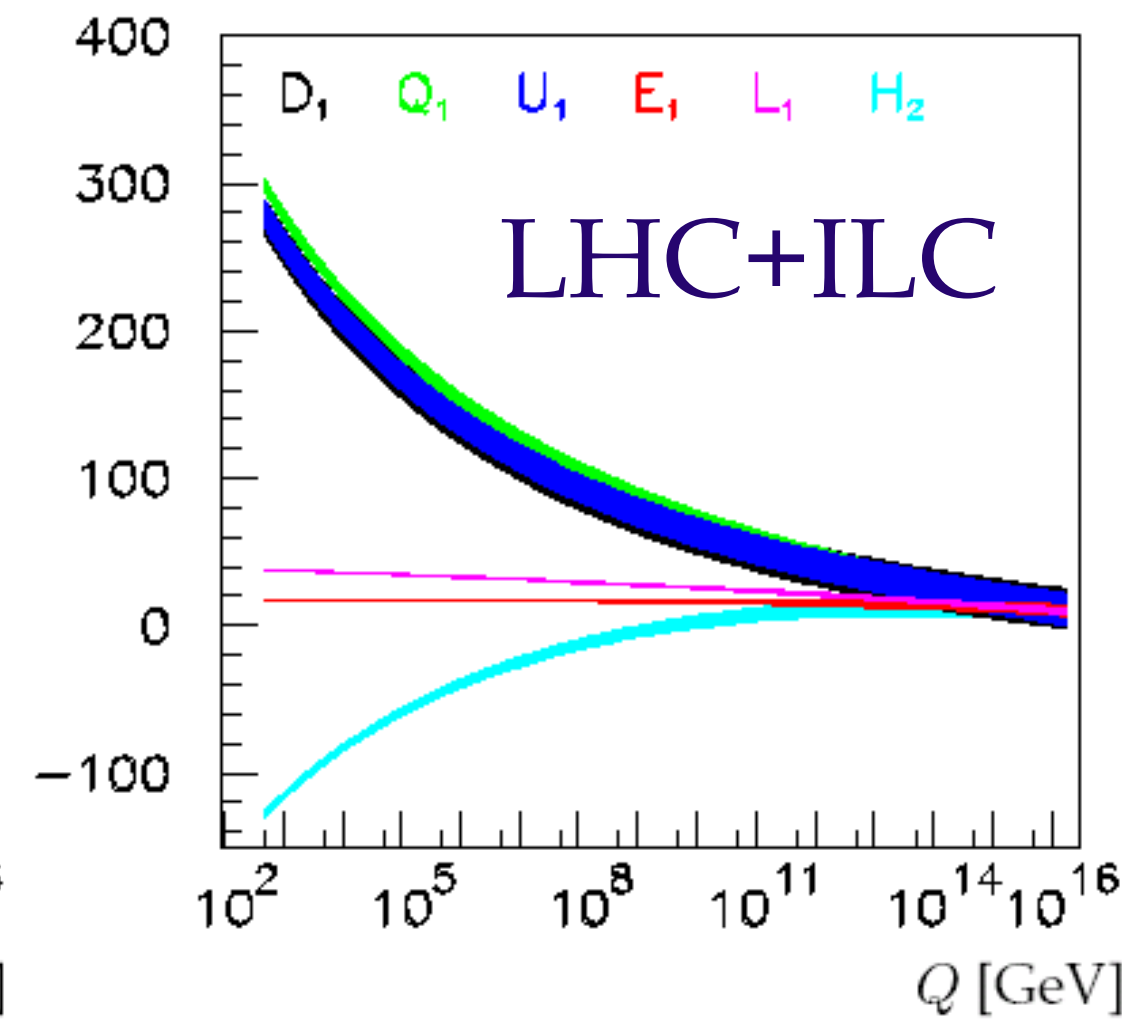


全く予期せぬ発見も! ?

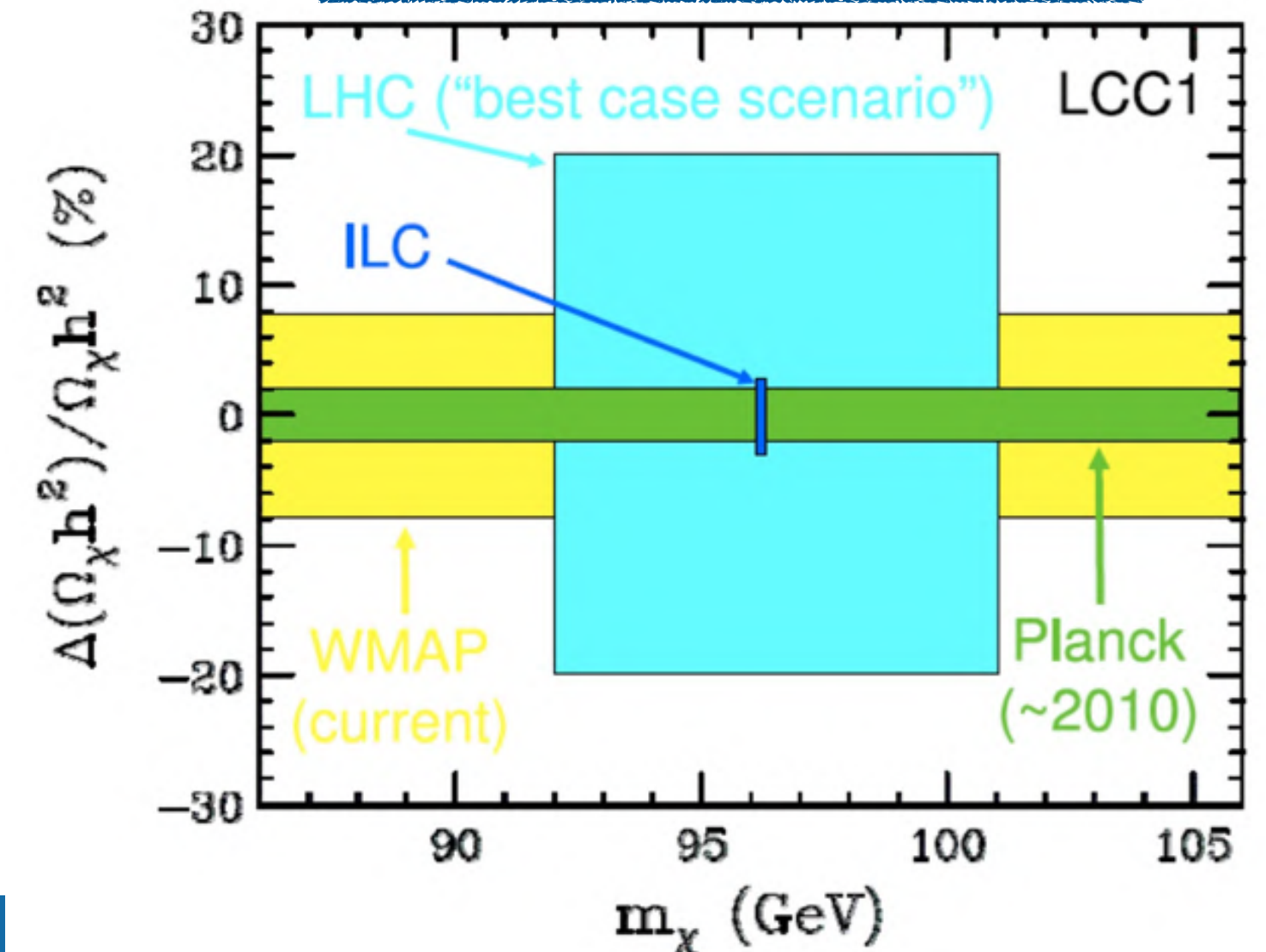
## ヒッグス結合定数の測定



## 力の大統一の検証



## 暗黒物質の正体解明

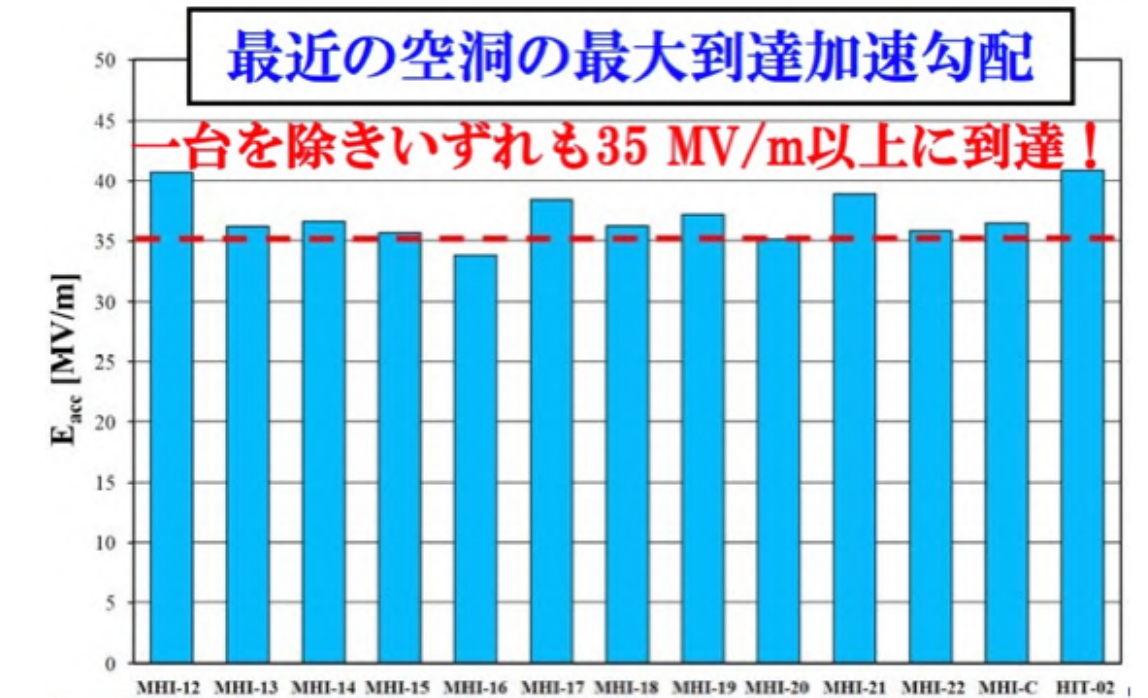
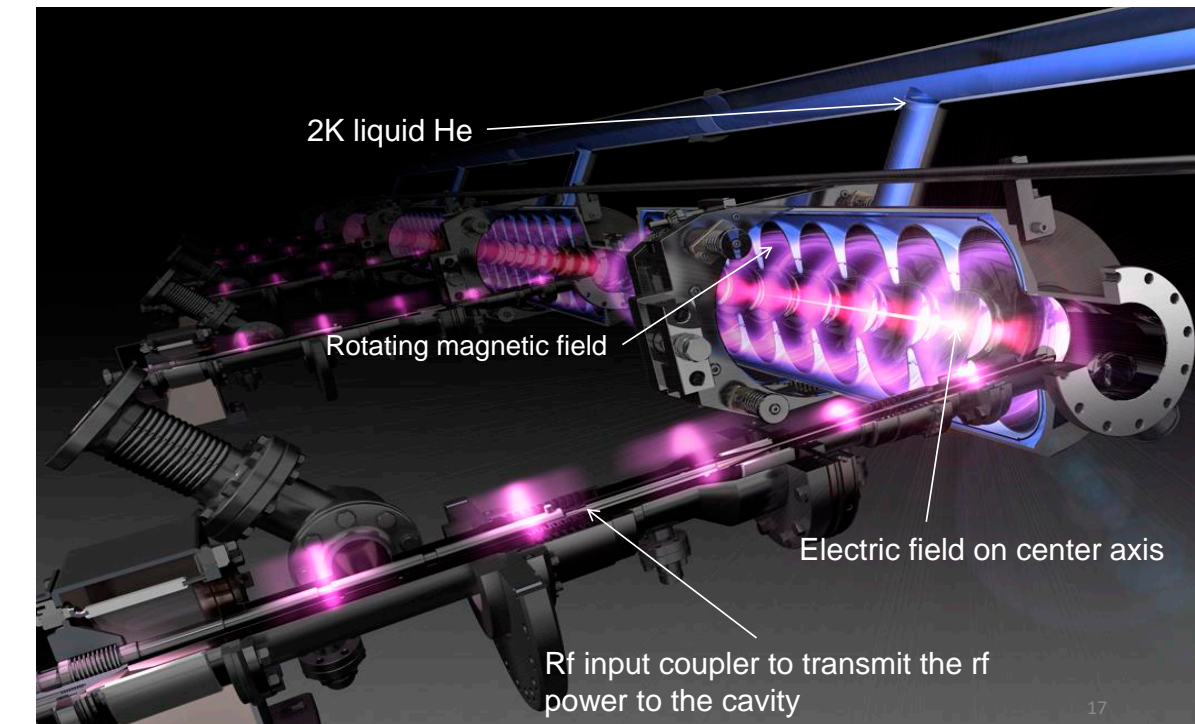


# ILC実現に向けた技術的挑戦

## ●加速器

- 超伝導加速空洞による高電界加速
  - 超低エミッタンス(ナノメートルビーム)の生成・制御
  - 偏極ビームの生成
- 長年にわたる国際共同研究でついに要求性能を達成！

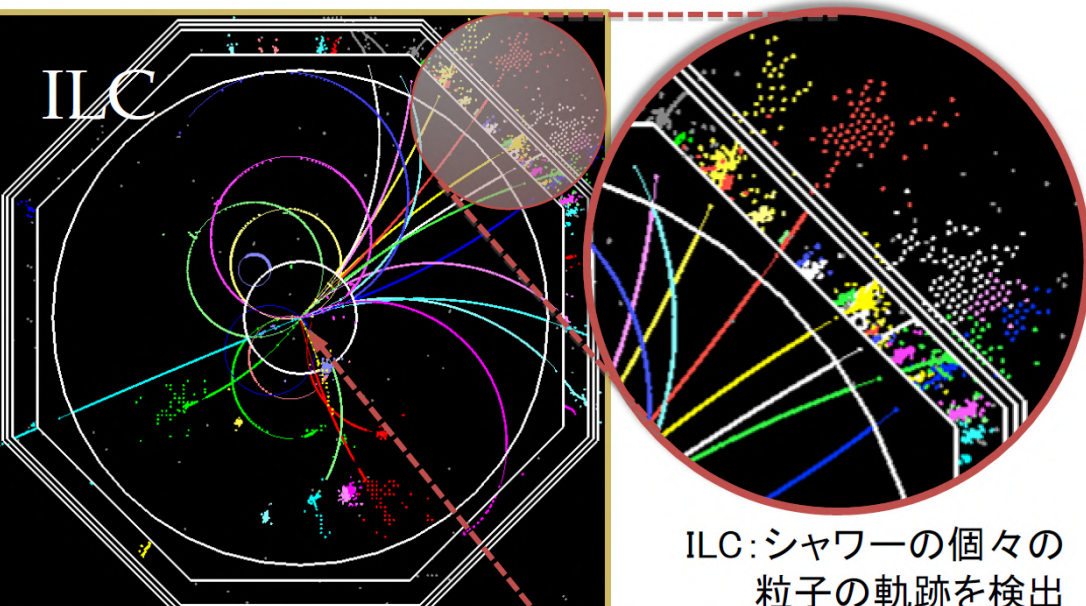
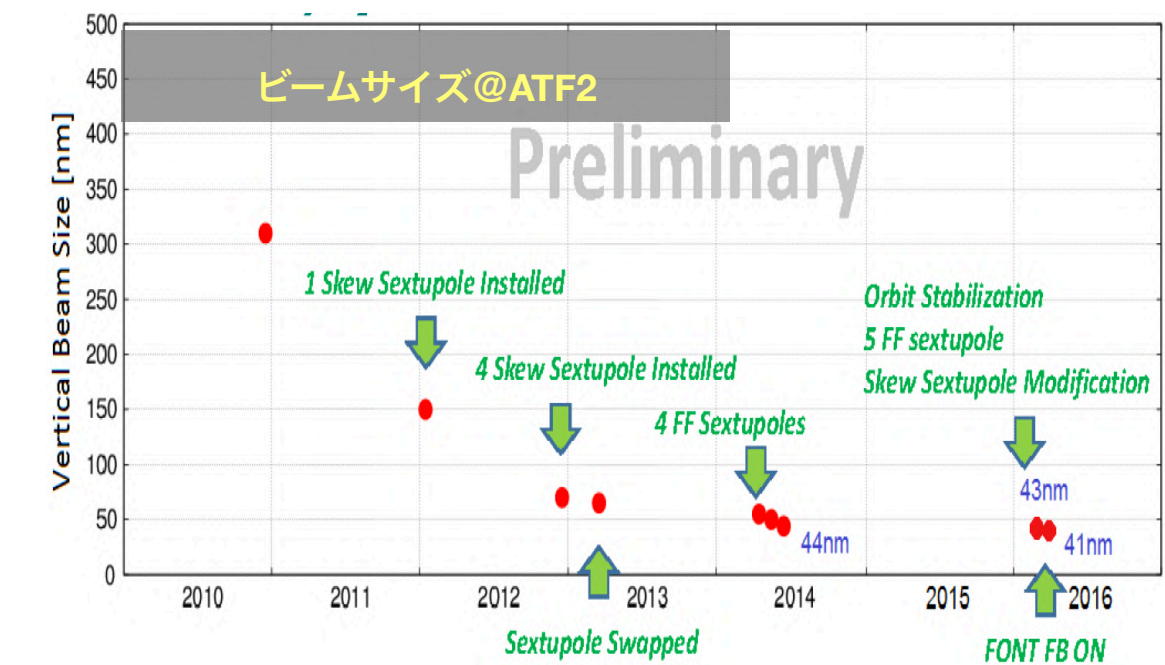
### 超伝導加速空洞の開発



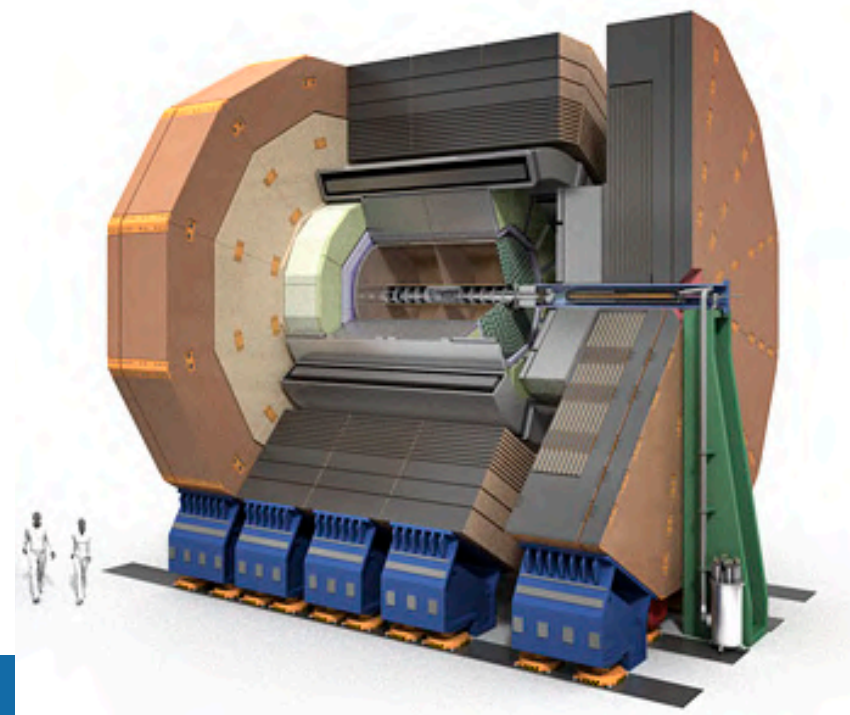
## ●測定器

- ILCでの精密研究を可能にするこれまでに無い高性能測定器
  - 新しいコンセプト：超高精細測定器 + Particle Flow Algorithm (PFA)
- 最先端測定器技術を駆使して、国際的な研究開発が精力的に進められている

### ナノビーム技術の開発



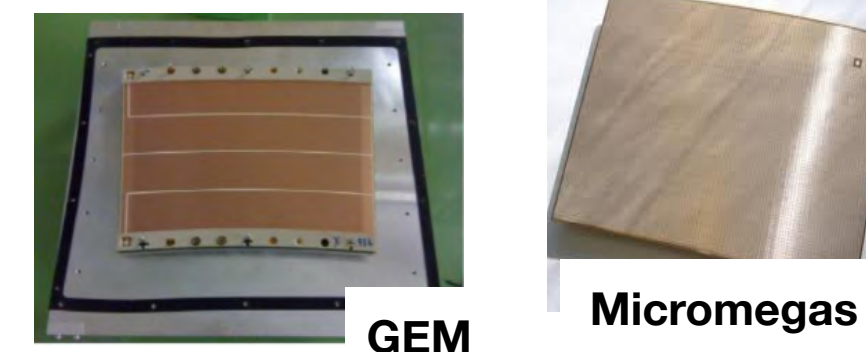
### ILC測定器(ILD)



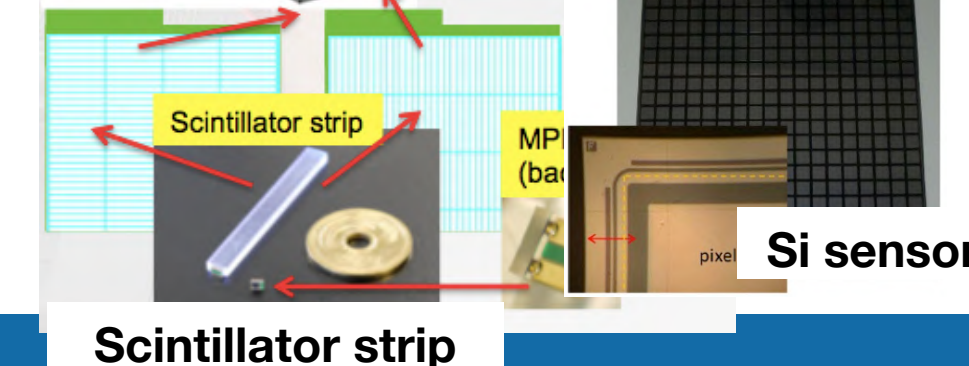
### バーテックス検出器



### 飛跡検出器 (TPC)



### 電磁カロリメータ



### ハドロンカロリメータ



# ILC@ICEPP

## ●ILC計画実現に向け、活発な研究および推進活動を展開

- 測定器開発, ILC物理研究, 建設推進活動

## ●測定器開発の例

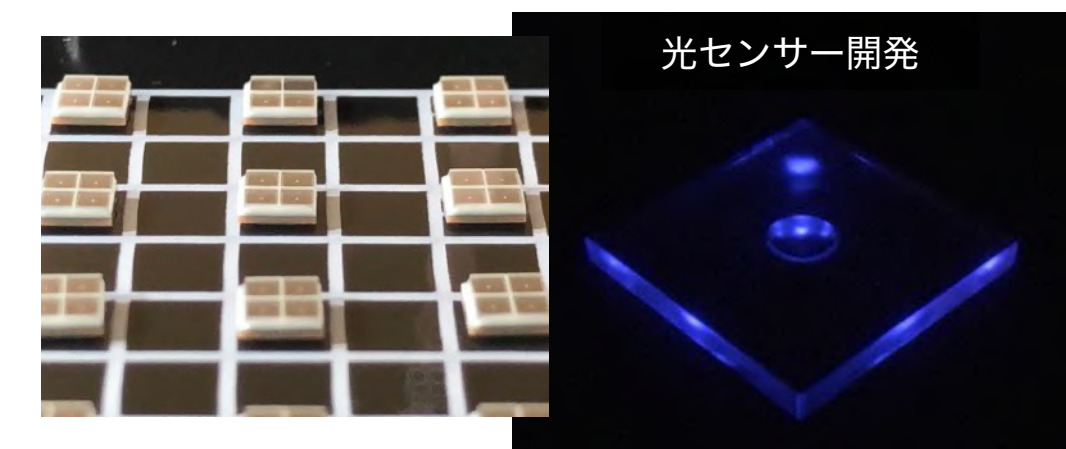
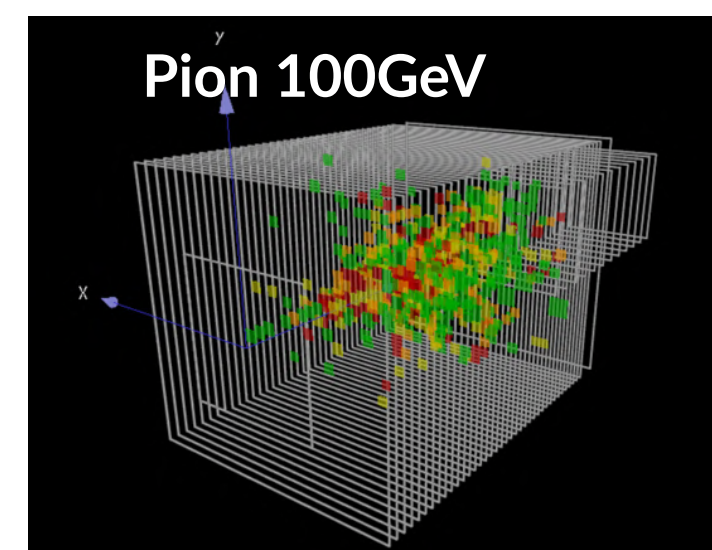
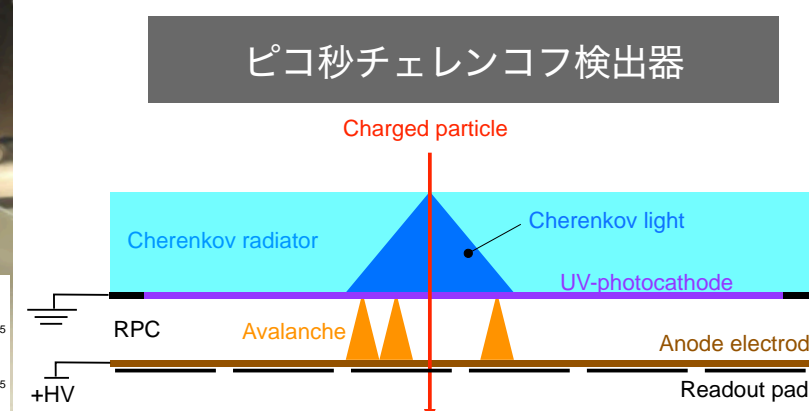
### ●ILC用高精細カロリメータ開発

- シンチレータ電磁カロリメータ (中国グループと共同)
- シンチレータハドロンカロリメータ (ドイツグループと共同)
- シリコン電磁カロリメータ (フランスグループと共同)

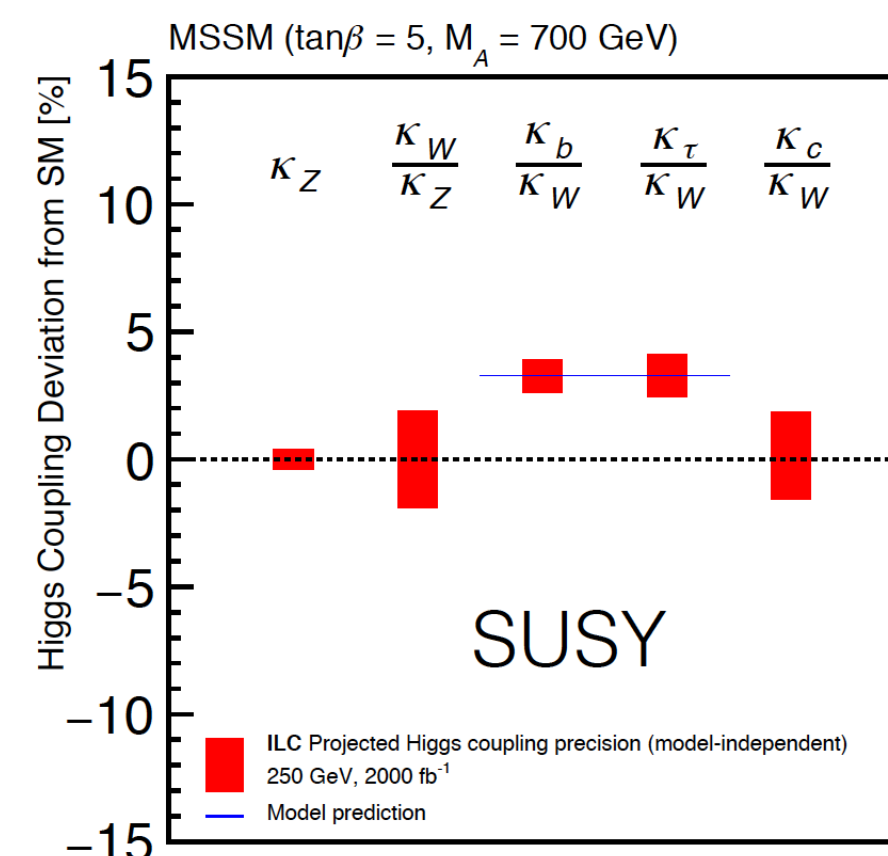
### ●カロリメータ用センサー開発

### ●次世代実験用測定器開発

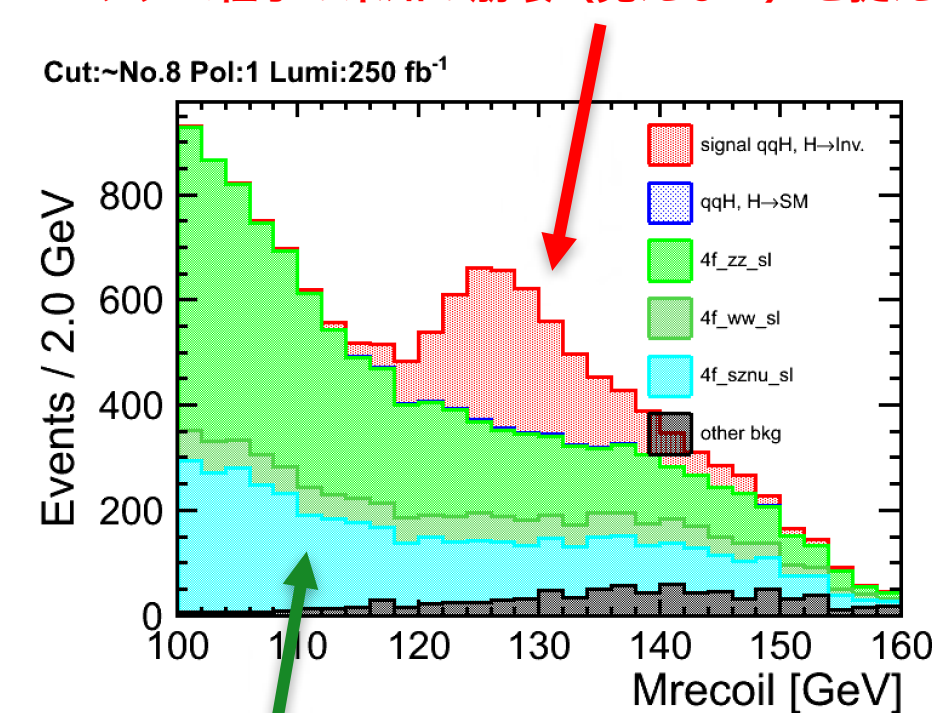
- 高精細・二重読み出しカロリメータ(アメリカグループと共同)
- ピコ秒時間分解能チェレンコフ検出器



## ILC物理研究



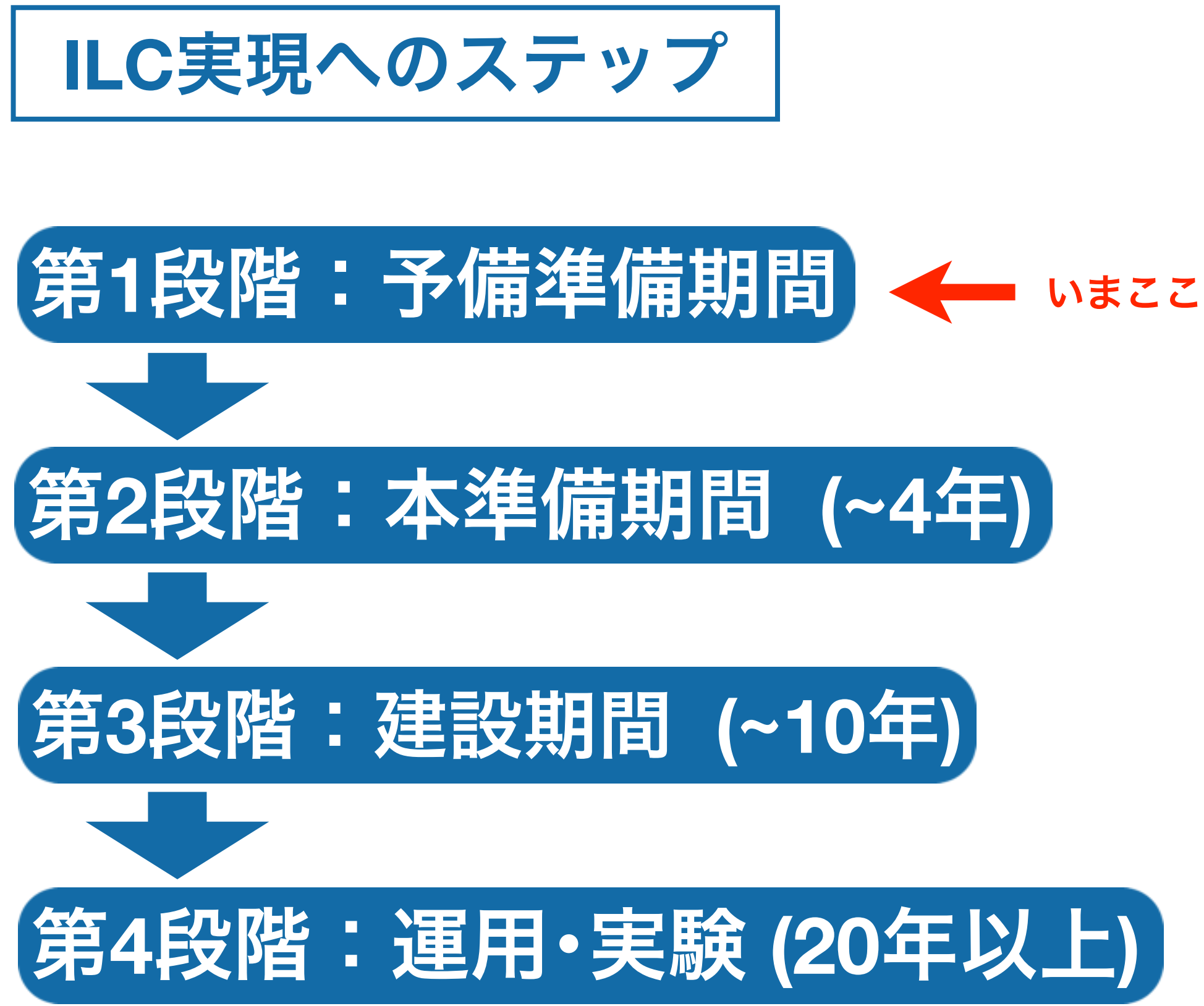
ヒッグス粒子の未知の崩壊 (見えない) を捉える



緑・青・黒：標準理論で予想される背景事象

# ILC実現に向けて

- 技術設計報告書公表(2013年) → 技術的には建設開始可能
- ILCの日本での実現に向け段階的な取り組みを着実に進める
  - ILCは国内次期基幹プロジェクト
  - 国際コミュニティからの力強い支持
  - 国際推進チーム(IDT)による本準備期間に向けた取り組み
  - 国内推進体制の強化 (ILC-Japan代表：浅井祥仁)
- 2030年代半ばの実験開始を目指す
  - 皆さんの世代がILCでの研究の中核になる





# 大学院生@ILC計画

- ICEPPはILC実現を目指す国際共同研究活動の中核
- 建設開始に向け研究開発を加速、物理実験コラボレーションの結成をめざす
- すべてが国際共同研究で進められている
  - 修士課程のうちから世界中いろんなところに行く
  - テストビーム実験、コラボレーションミーティング、国際会議での成果発表、...

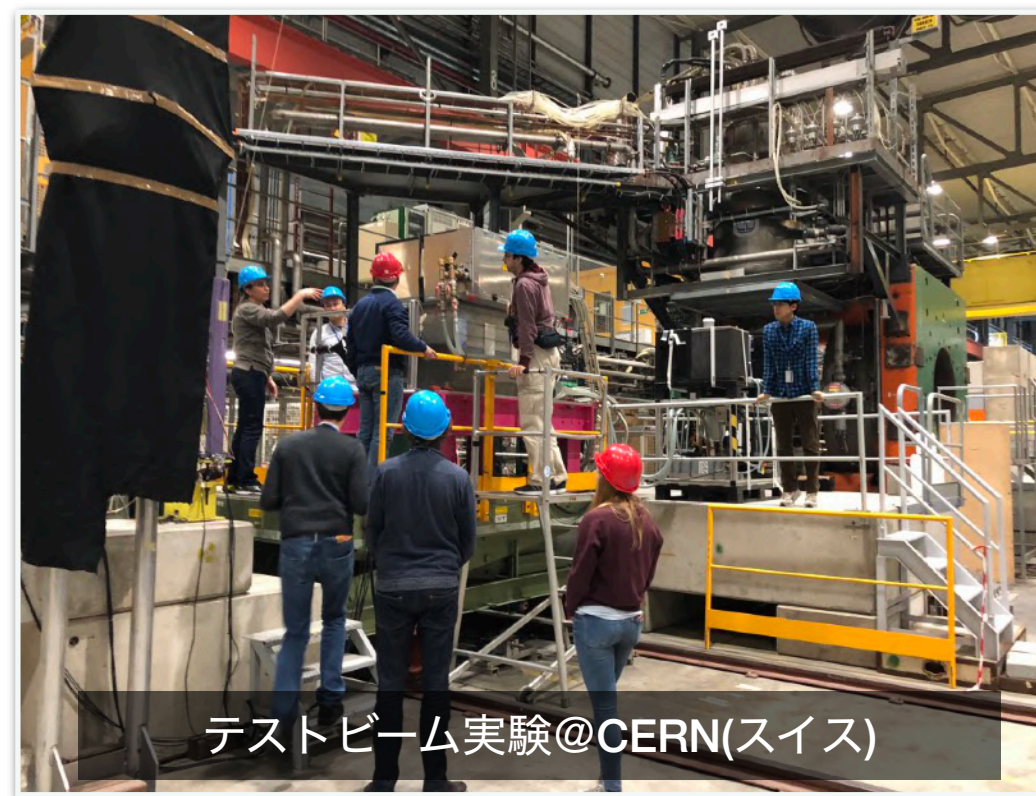
## ●大学院生の研究

- 修士課程：ILC測定器技術開発、センサー開発、物理研究
- 博士課程：ビーム試験による性能実証、測定器物理、工学設計、物理研究

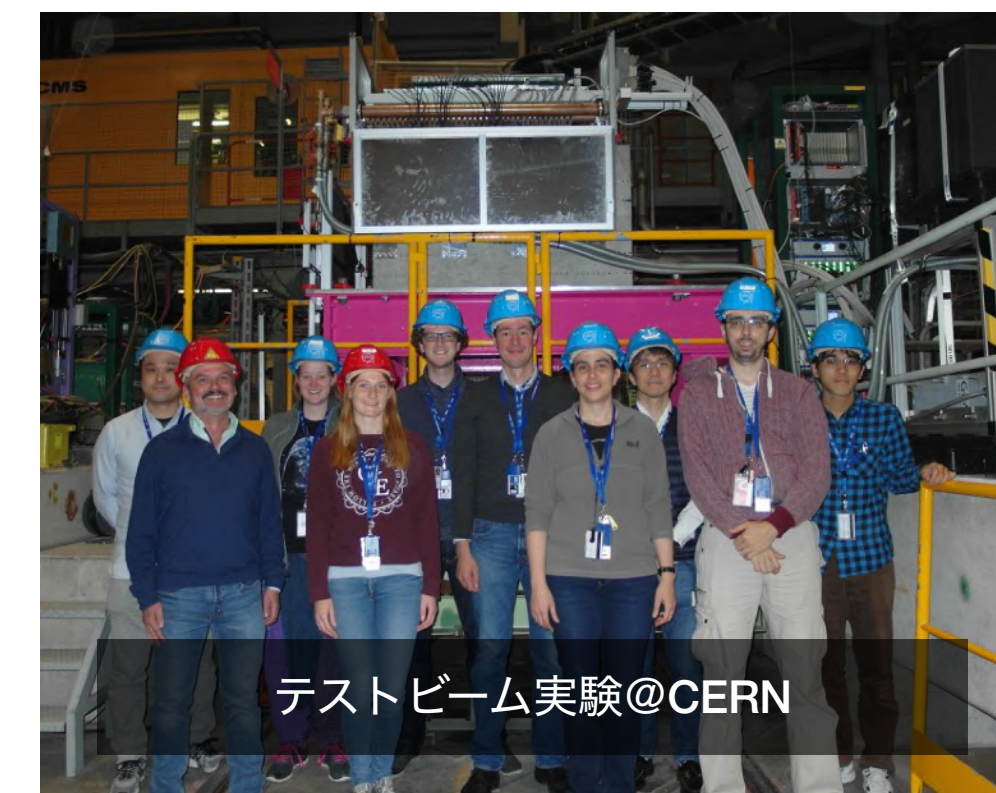
## ●担当研究室・教員

- 森俊則研究室\*、大谷航研究室
- Junping Tian (助教)

\*令和6年度まで指導可



テストビーム実験@CERN(スイス)



テストビーム実験@CERN



テストビームデータ解析合宿@東大



DESY(ドイツ)



CALICEコラボレーションミーティング@CERN(スイス)



国際会議発表