

# CERN素粒子実験最前線

## 素粒子はどうやって検出するか

長崎総合科学大学

工学部・工学科・電気電子工学コース

大山 健

2014年12月21日

- ▶ 原子核・素粒子実験物理学では、どうやって粒子を発生させ、それを測定しているのか
- ▶ CERN（欧州合同原子核研究機構）での最先端高エネルギー実験を例に、その原理と、実験風景を紹介

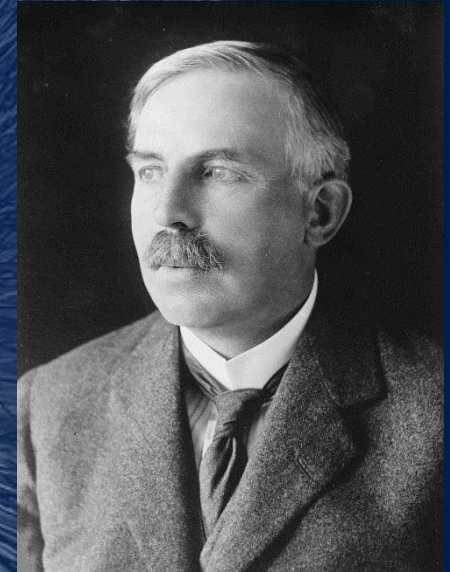
## 目的

- ▶ できるだけ多くの方に私達がやっていることを身近なものとして理解してもらおう
- ▶ 「自分たちにも参加できるのでは？」と思ってもらえたら成功

## 測る対象、つまり粒子が必要

### 方法1: 自然にあるものを探す

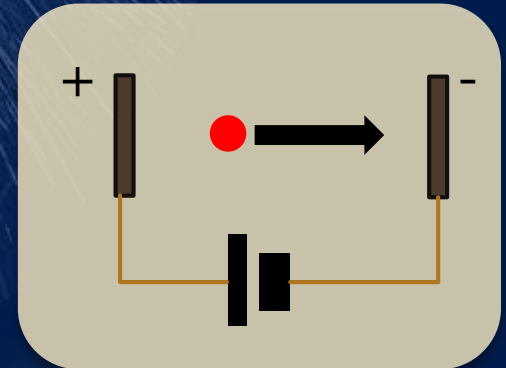
例: 1898年 ラザフォードは  
ウランが出す2種類の  
放射線を発見

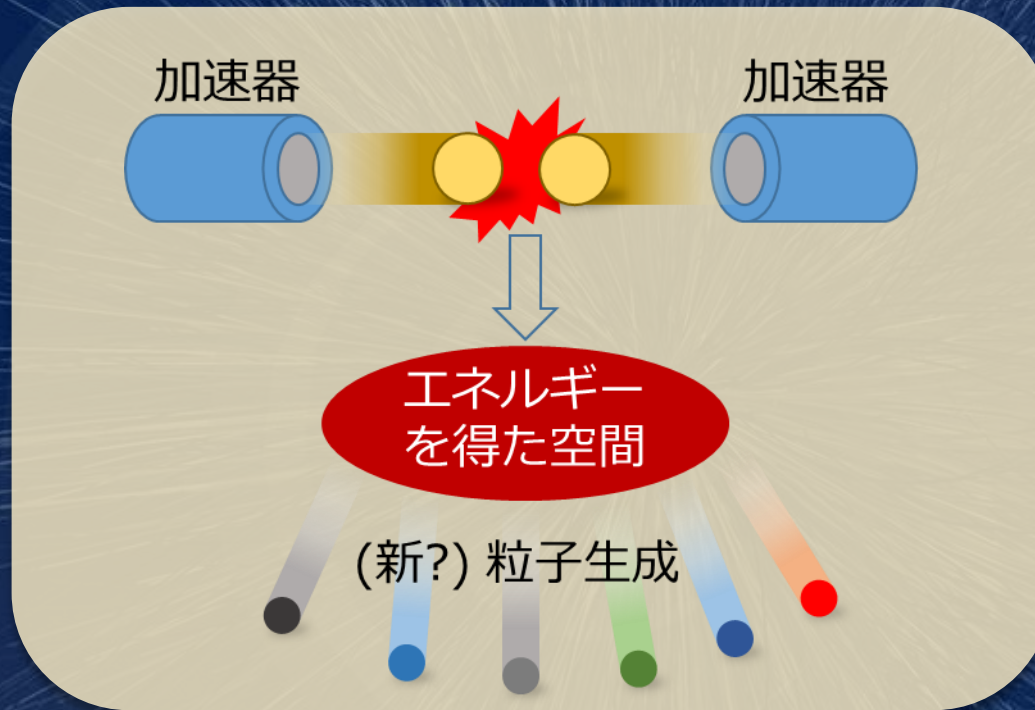


ラザフォード  
出典: wikipedia

### 方法2: 「加速器」で原子核や素粒子を衝突させて作る

- ▶ 最初の加速器(1928年頃): 強い電場を用いて電荷を加速(コッククロフト・ウォルトン)
- ▶ 現在(2014年)世界最大の加速器: CERN にある **LHC (ラージ・ハドロン・コライダー)**

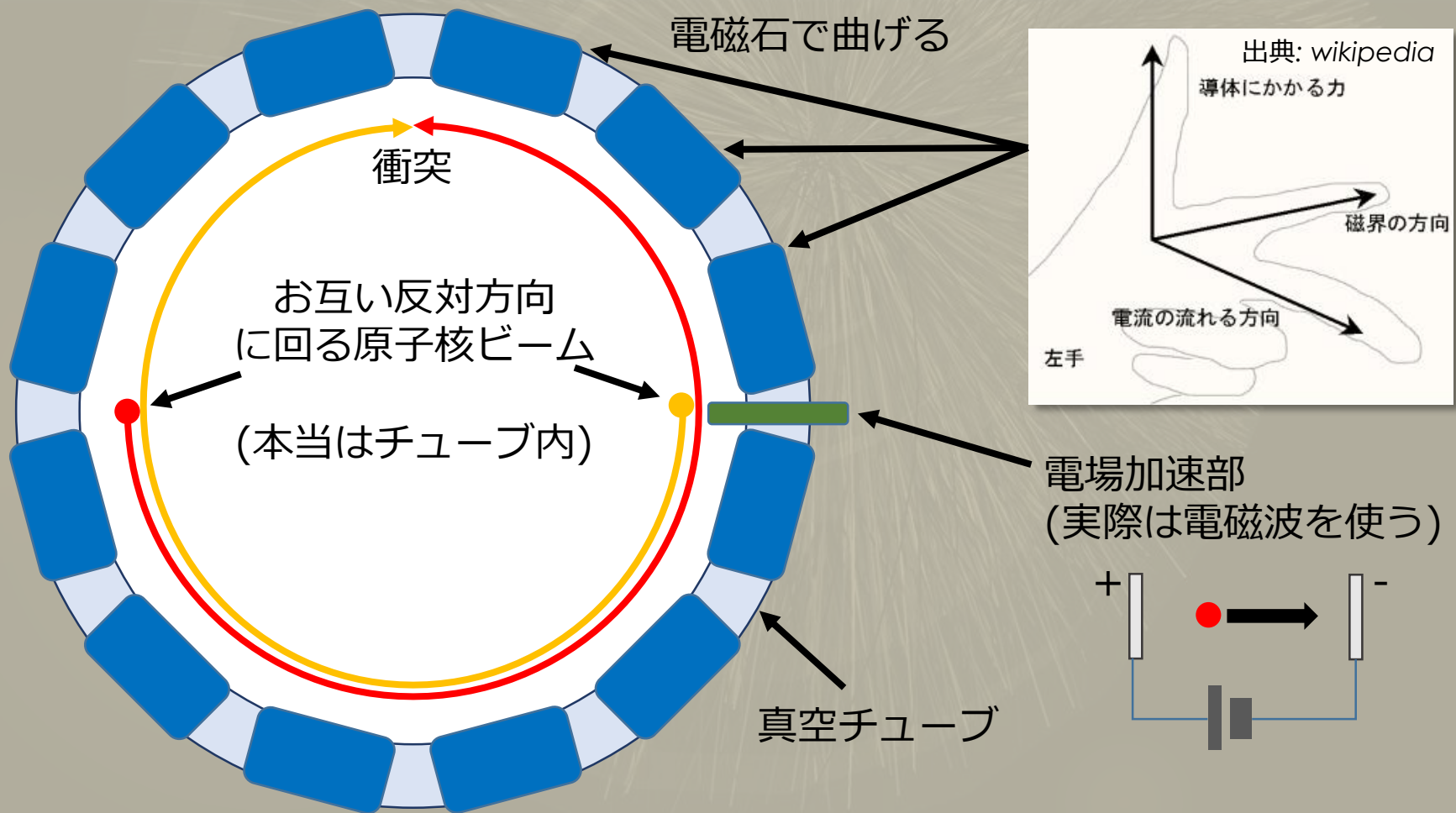




- ▶ 空間にエネルギーと投入すると粒子が「生成」される
- ▶ 粒子の性質(質量・電荷等の特徴)を「検出器」で調べる
- ▶ でも生成粒子の殆どは「よく知られた粒子」
- ▶ 特徴が既知のものでなかったら ... 新発見?

# 円形衝突型加速器(コライダー)

- ▶ **磁場**で粒子を曲げて「円運動」させ、**電場**で「何度も加速」
- ▶ 二本のビームを衝突(collide)



## CERN

発足: 1954年

加盟国: 20カ国(ヨーロッパ)

年間予算: 約1000億円

職員: 約2500人

ユーザー: 約10000人

(加速器以外にWWWの発明でも有名)

## LHC

円周: 27 km

実験ポイント数: 4 (ATLAS, ALICE, CMS, LHCb)


深度: 50 ~ 170 m (平均100 m)

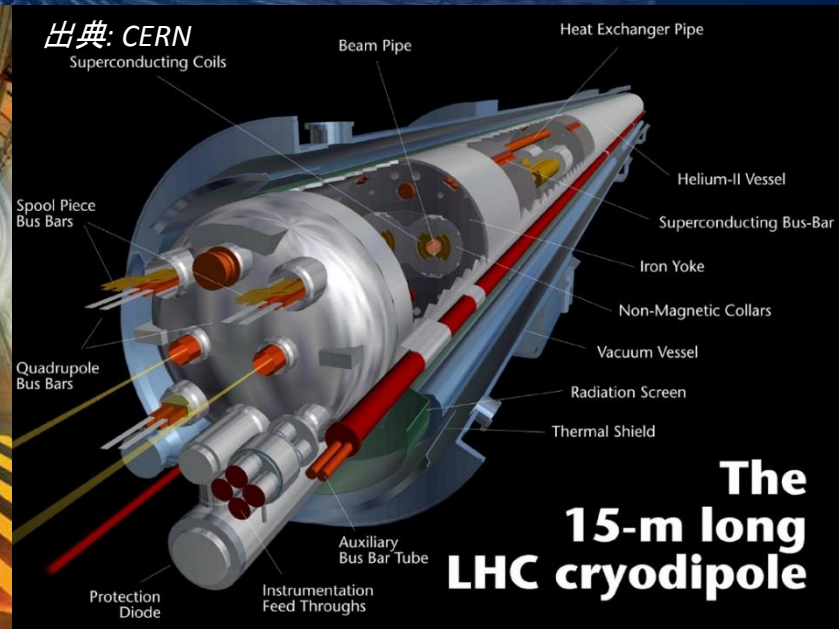
総額: 1兆円 (日本も140億円拠出)

建設期間: 15年 (承認: 1994, 完成: 2008)



# 7 LHCの能力(1)

- ▶ 陽子を 7 TeV (7兆電子ボルト) まで加速
  - ▶ 1 eV = 素電荷を 1ボルトの電位差で加速 ... 7 TeV = 1.1 μJ
  - ▶ 2 mg の蚊が秒速 1 m で飛んだときのエネルギー 
  - ▶ スピード: 光速の 99.999999% = 光速 - 3 m/s



1232個の超伝導磁石を液体ヘリウムでマイナス271.3度(1.9K)に冷却  
(超伝導: 金属を冷やすと抵抗が突然ゼロになる現象: **大電流→強い磁場**)

## 300兆個の陽子を蓄積

- ▶ 全エネルギー: 330 MJ

200 トンの列車が 時速200キロで  
走行する運動エネルギーに匹敵

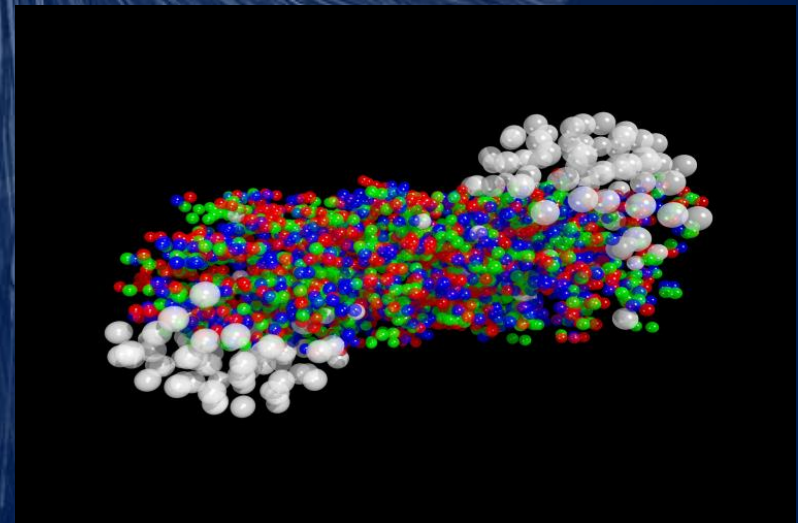
このビームを太さ 0.1 mm まで収束し  
て正面衝突

鉛原子核(陽子の200倍の重さ)の場合

- ▶ ひとつの衝突で180  $\mu\text{J}$  のエネルギーを1兆分の1センチ立方に集中
- 5兆度の QGP 生成もできる



出典: wikipedia



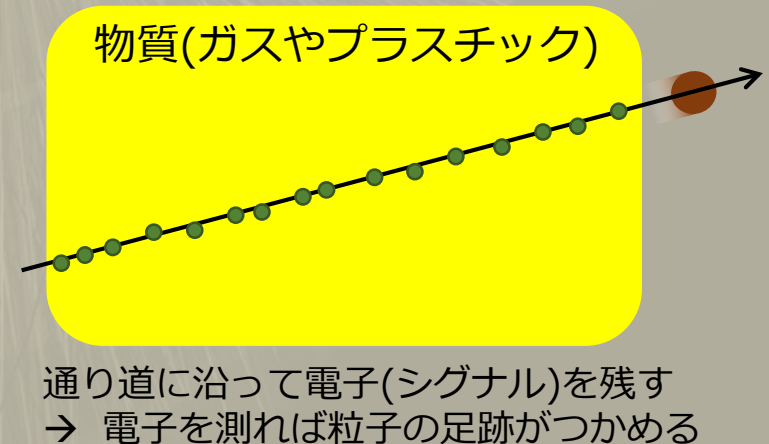
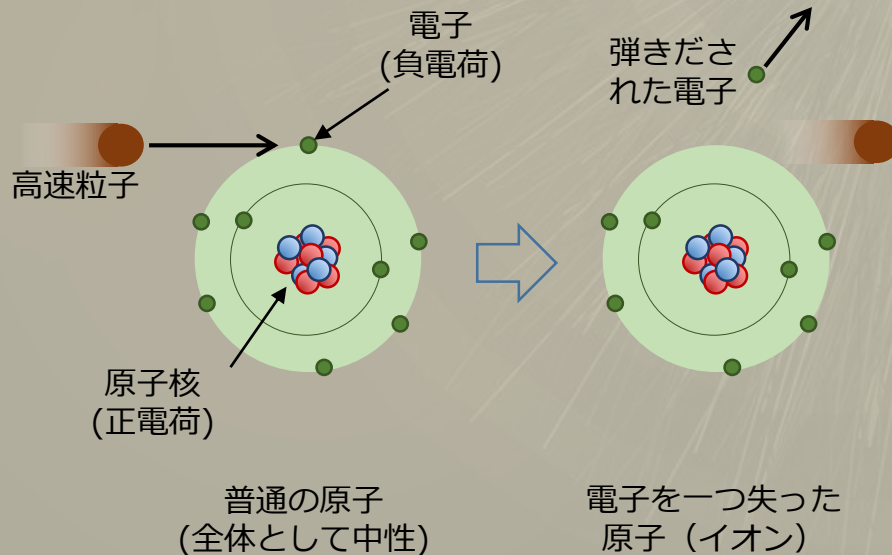
出典: CERN <http://newstate-matter.web.cern.ch/newstate-matter>



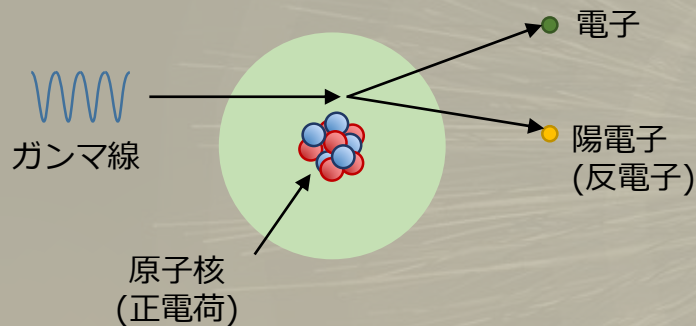
「見る」 ... 目で「光」を感じて、対象をとらえる

- ▶ なんとかして人間がわかる画像・映像にする必要がある
- ▶ 粒子は「物質」と様々な「相互作用」をする
- ▶ 検出器で「データ」をとって「解析」し「可視化」する

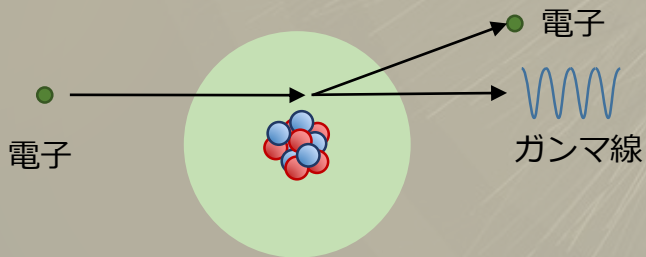
例1: 電荷を持った高速な粒子は原子の中の電子を弾き出す



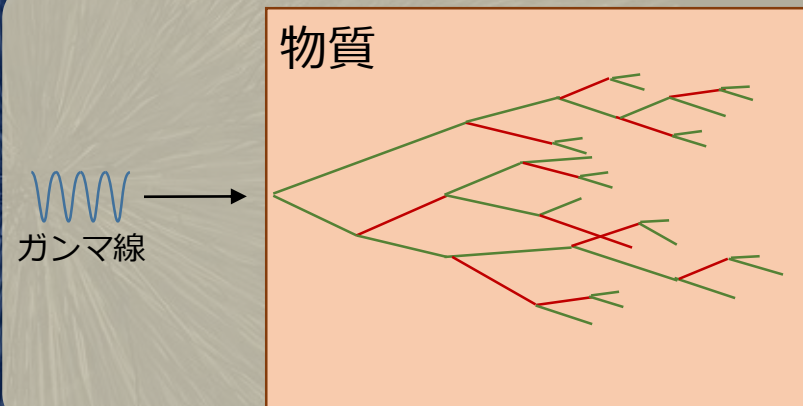
例2: 光 (ガンマ線) などは、物質内と相互作用して、電子などになる  
また、電子は物質と相互作用して、光を放出する



(a) 原子核にガンマ線が近づくと電子と陽電子をつくる



(b) 原子核に電子や陽電子が近づくとガンマ線を放射する



**物質内では (a) (b) が立て続けに  
おきて多量の電子が出来る  
(電磁シャワー)**

出来た電子の個数  
→ 粒子のエネルギー

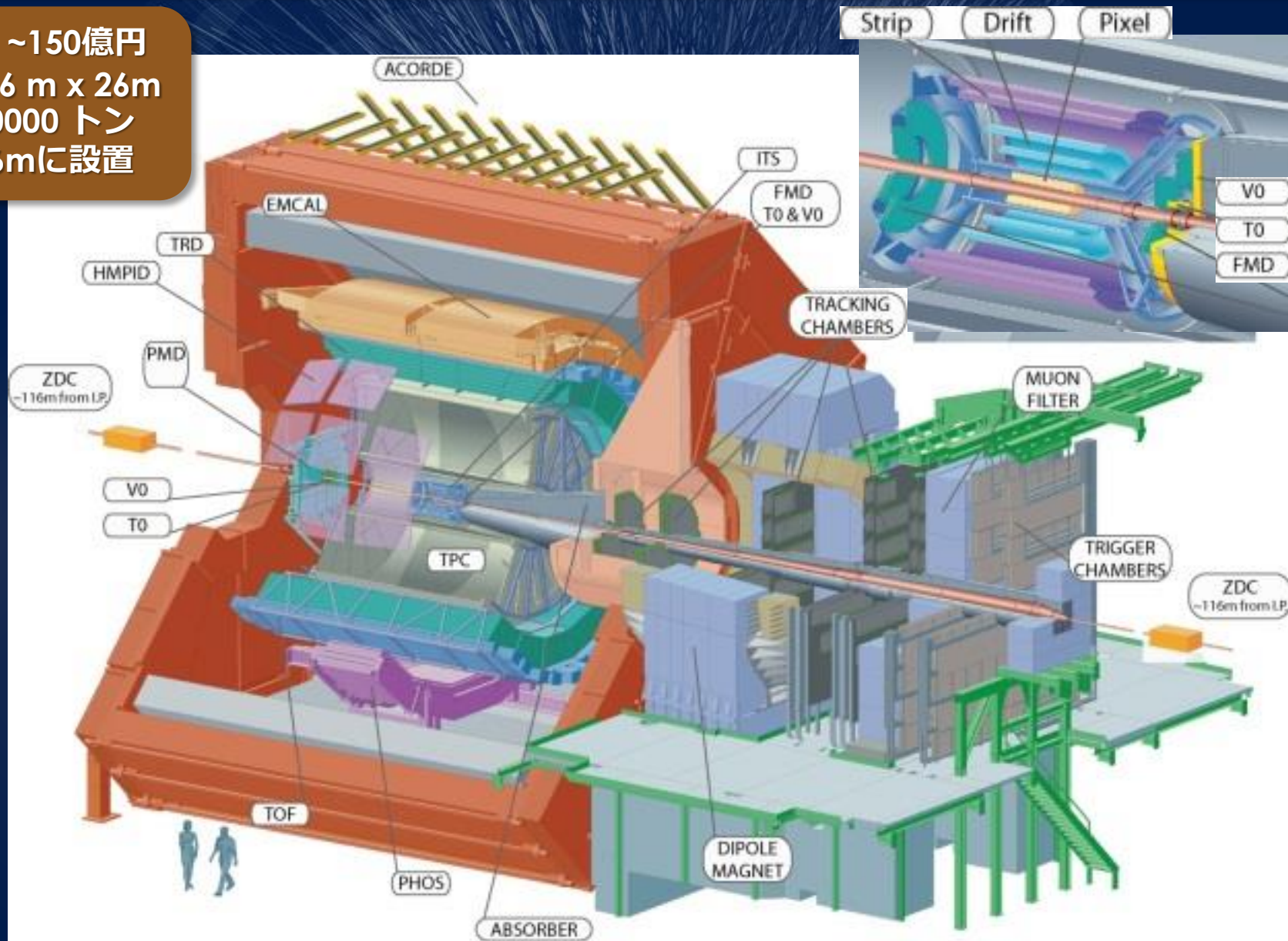
# 実際の実験設備の例1 (ALICE)

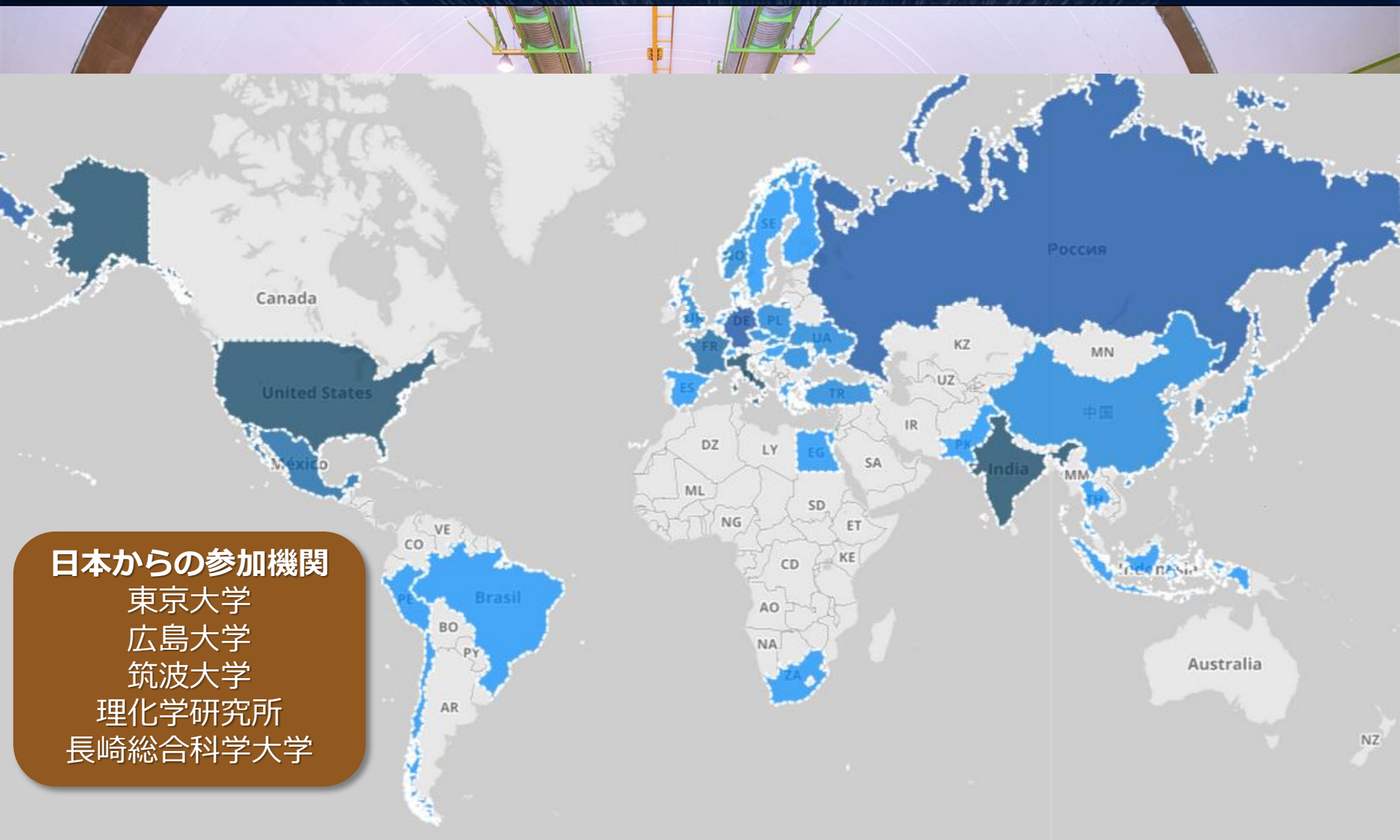
建設費: ~150億円

16m x 16m x 26m

重量10000 トン

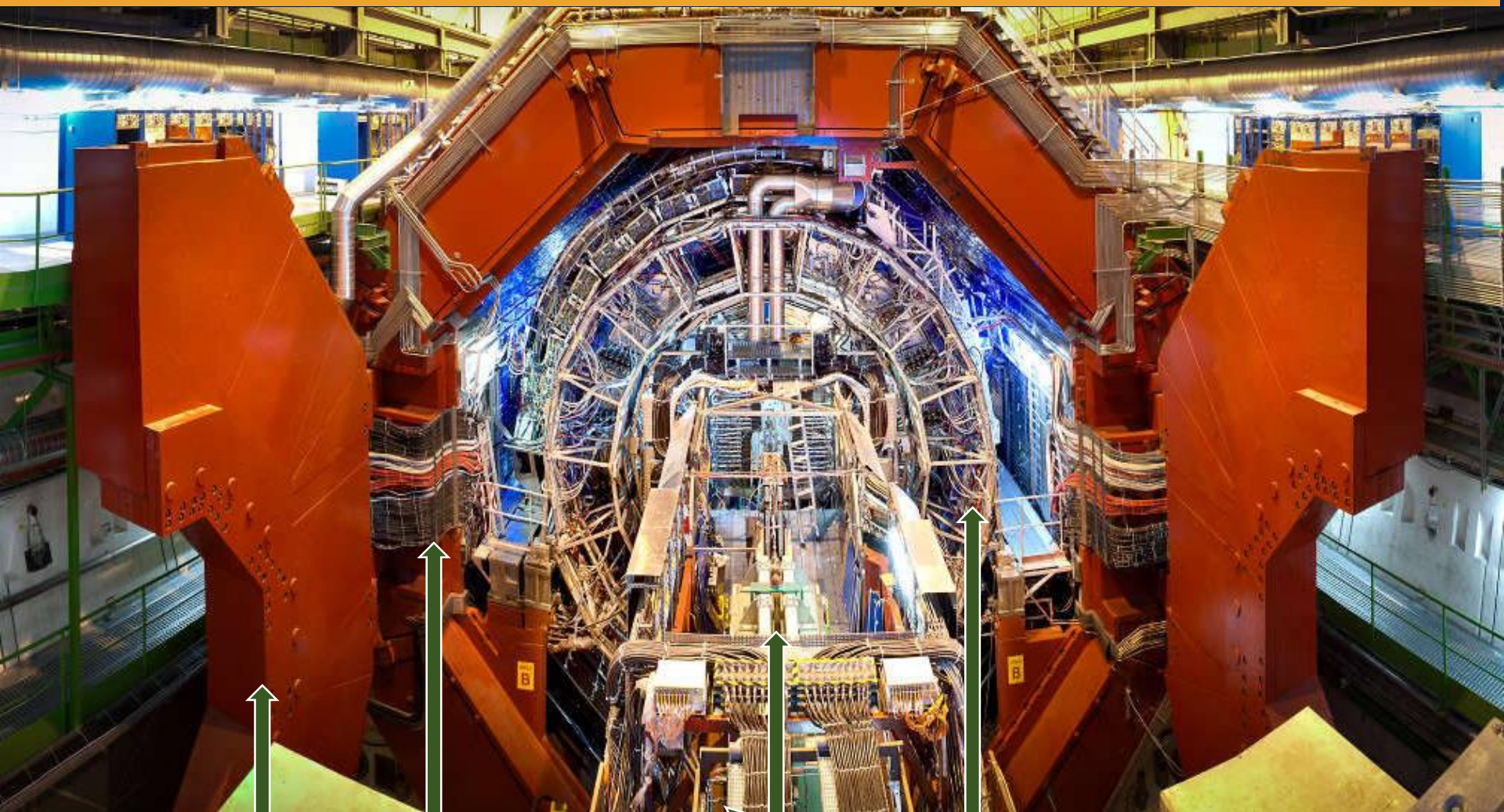
地下56mに設置





### 日本からの参加機関

東京大学  
広島大学  
筑波大学  
理化学研究所  
長崎総合科学大学



電磁石ドア

電源ケーブルなど

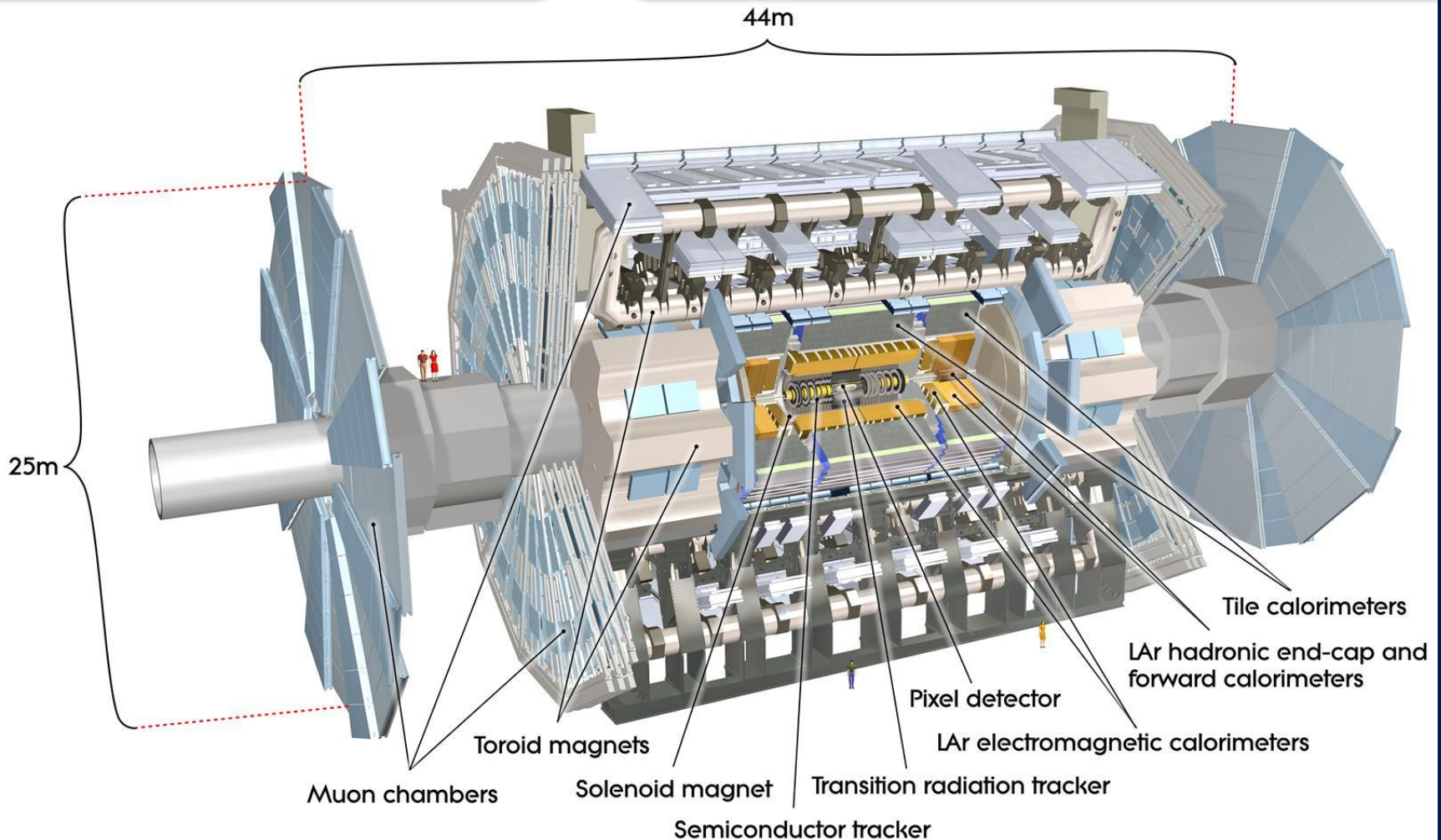
LHC真空ビームパイプ

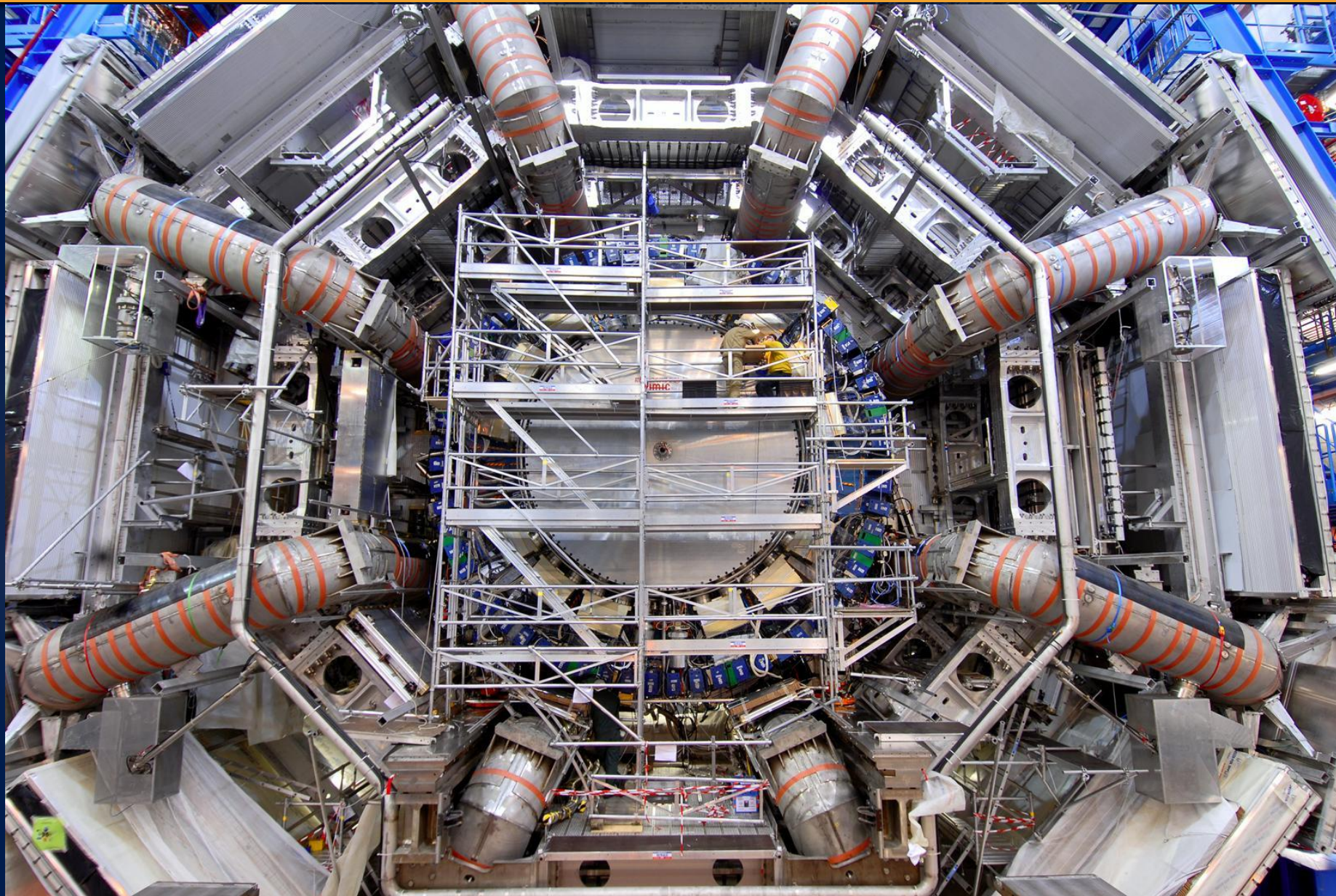
検出器群

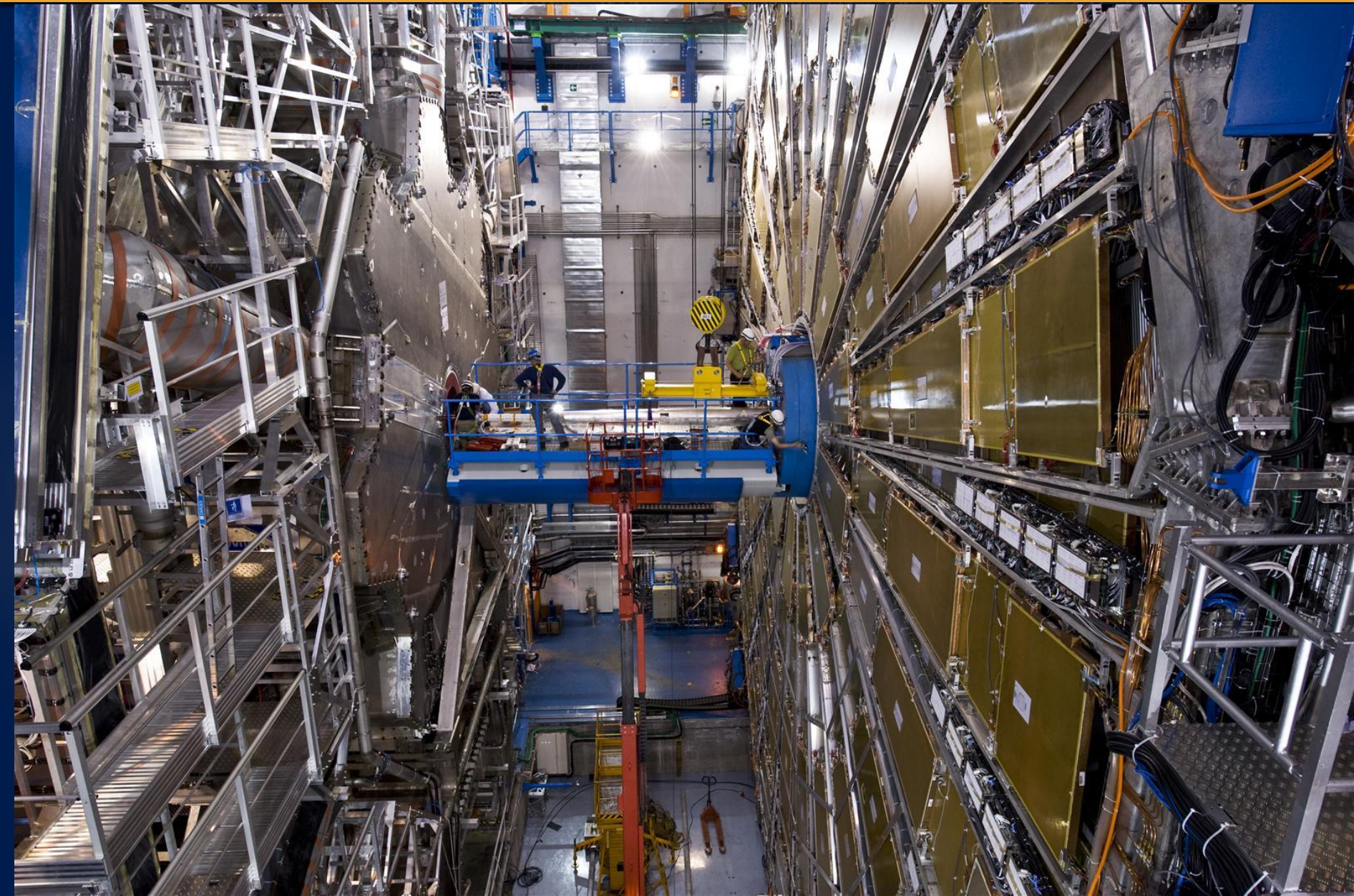
# 実際の実験設備の例2 (ATLAS)

総重量: 7000トン  
 参加国・人数: 38カ国3000人  
 日本からは 17機関 (長崎総合科学大学も)  
 建設費: ~540億円世界

日本企業も多く建設に携わった  
 例: 超伝導ソレノイド(東芝)、光検出器(浜松フォトニクス)、カロリメータ容器(川崎重工)、電子回路(東芝・ソニー・ジーエヌディー)、光ファイバー(フジクラ・クラレ).. などなど

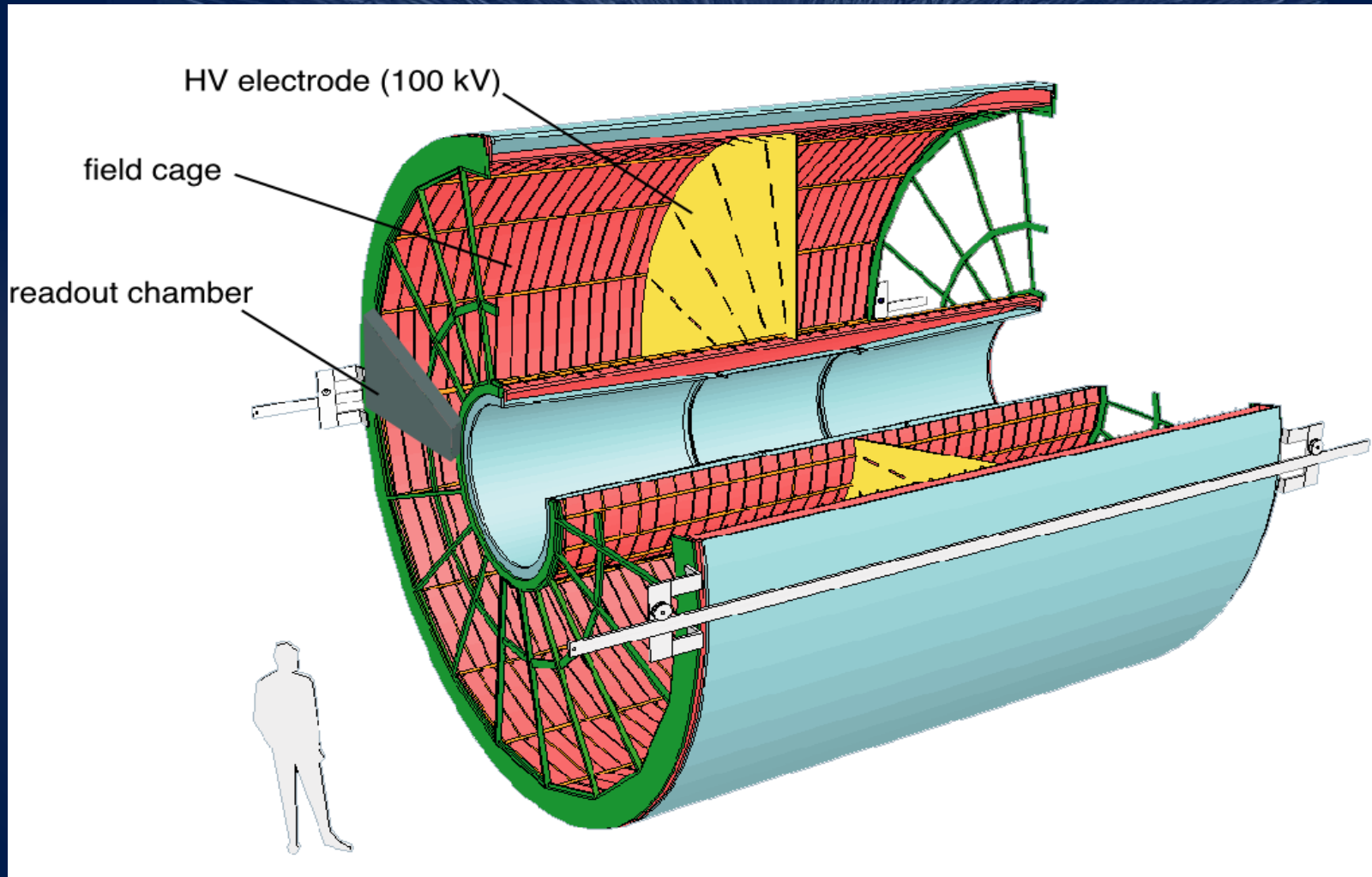


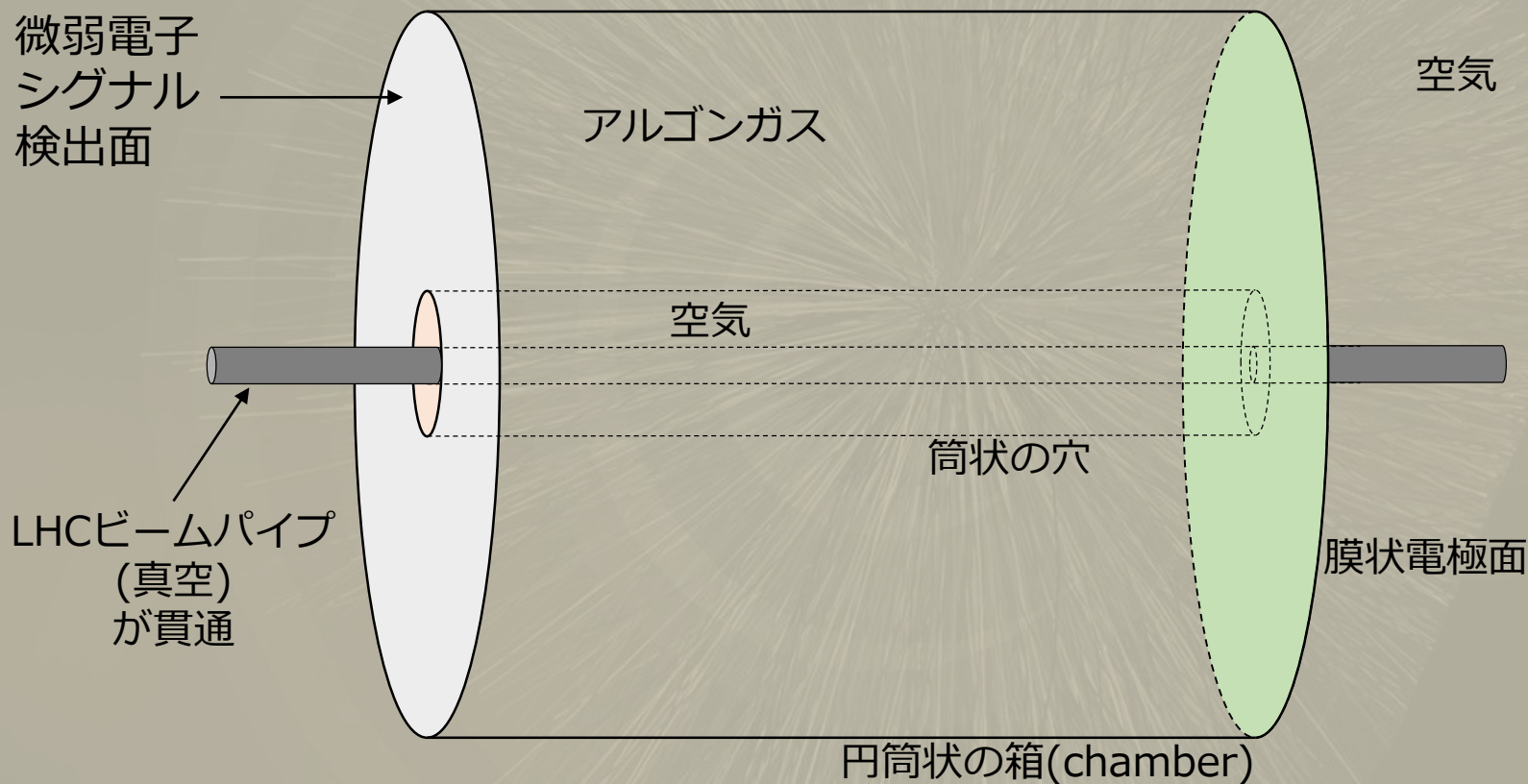




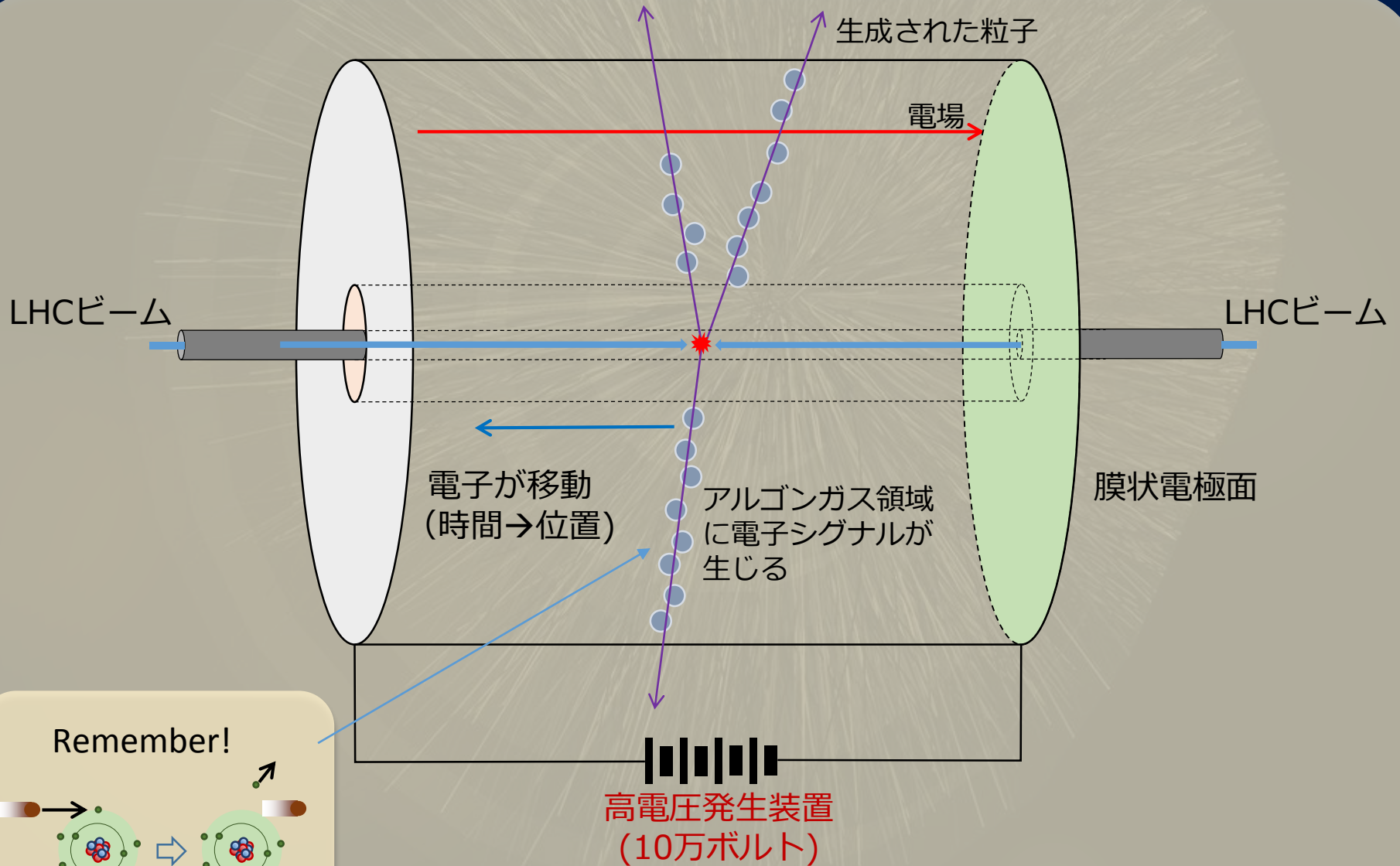


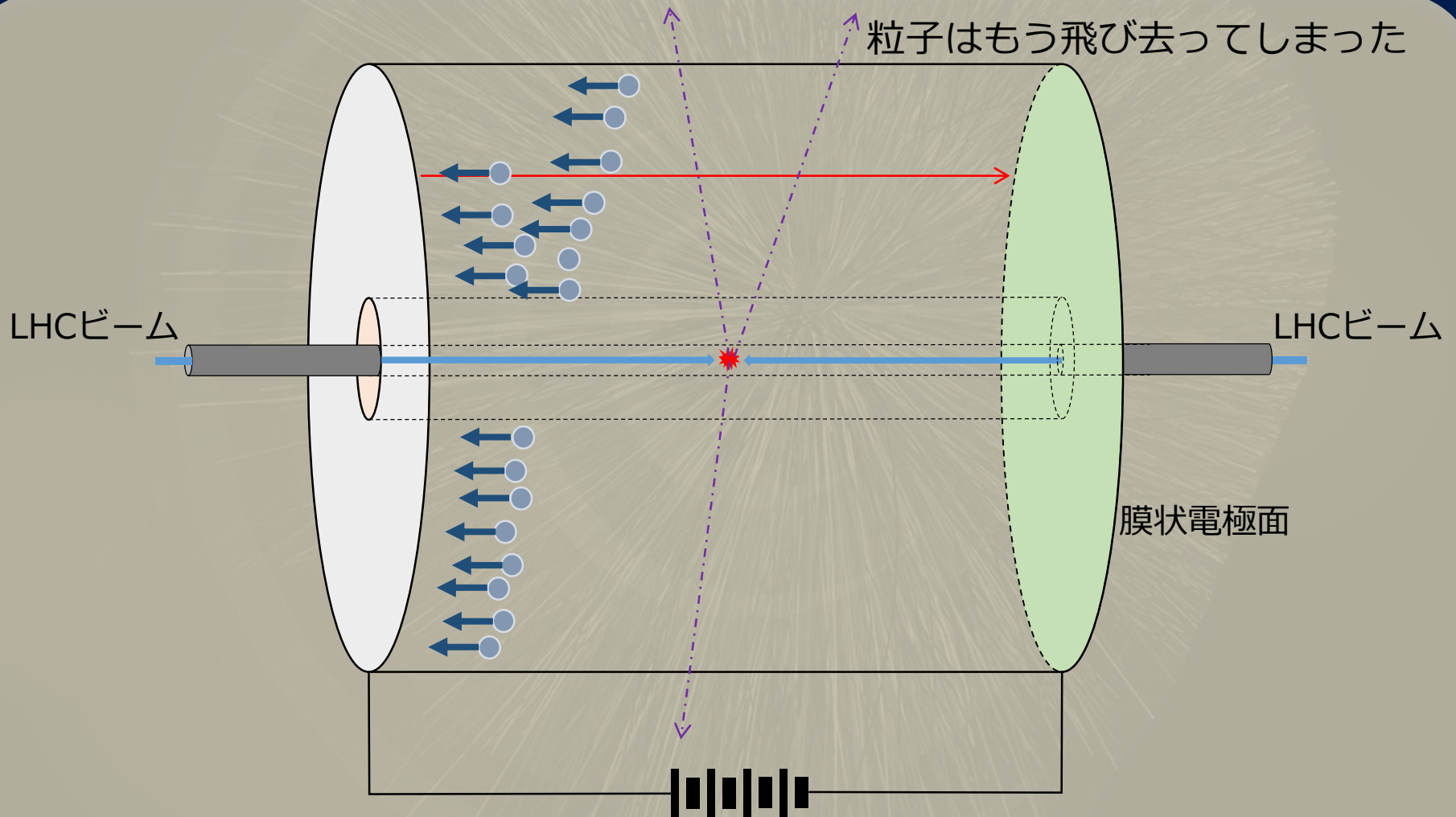
▶ TPC: Time Projection Chamber (時間投影箱?)

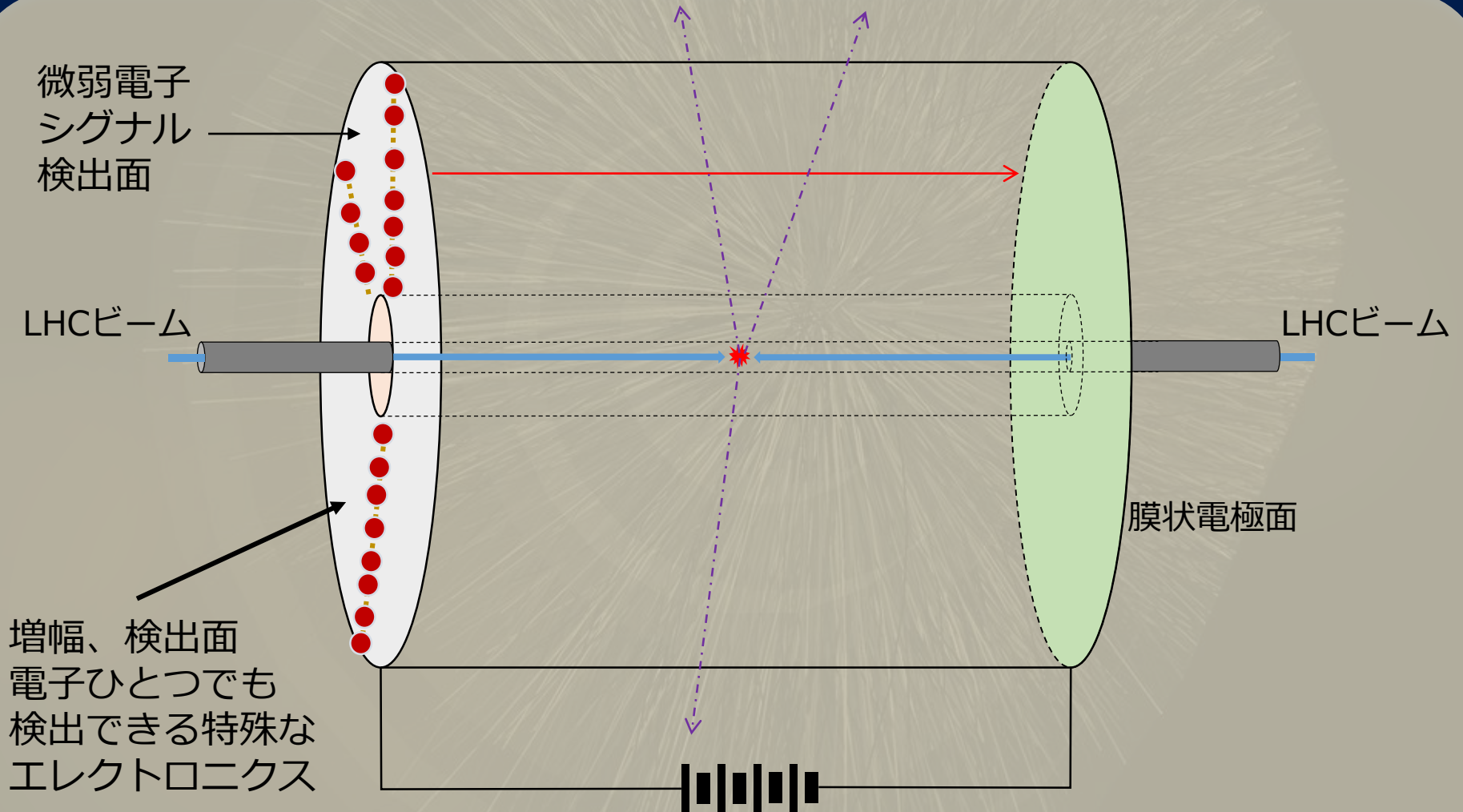




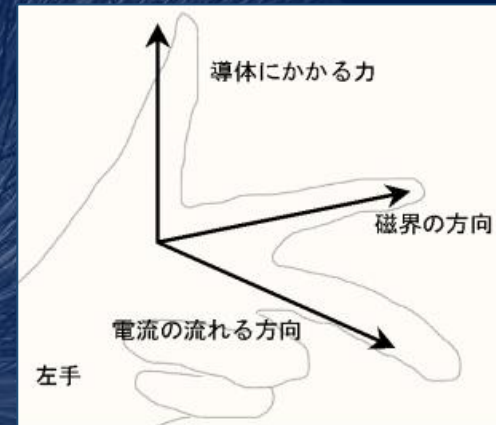
1. 円柱状の箱にガスを入れる
2. その中にビームパイプを通せるような二重構造にする
3. 片側には微弱シグナル検出装置、反対側は膜状の電極にしておく







- ▶ フレミングの左手の法則  
(円形加速器の場合とそっくり)
- ▶ 遠心力と磁場による力の釣り合い

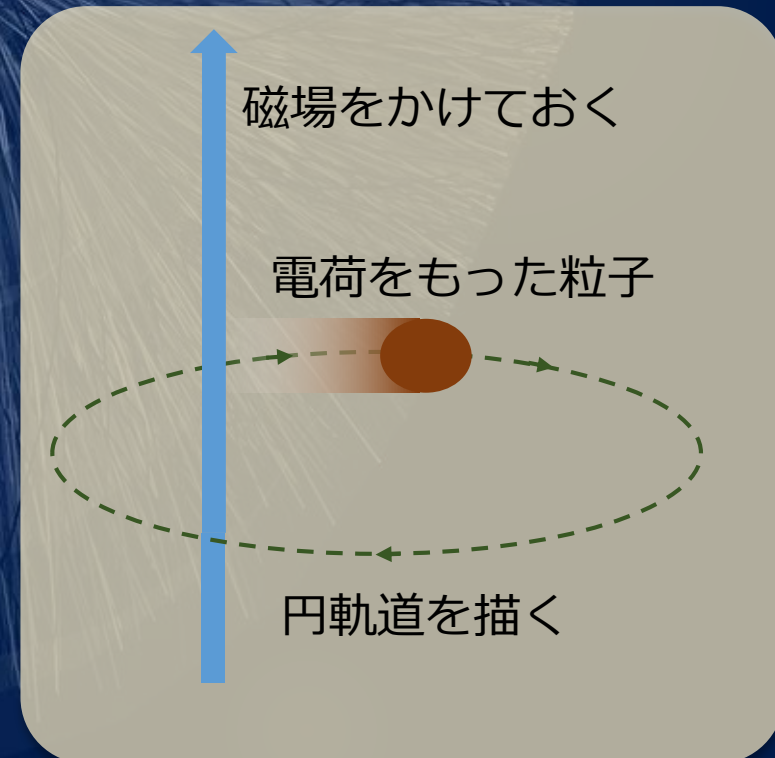


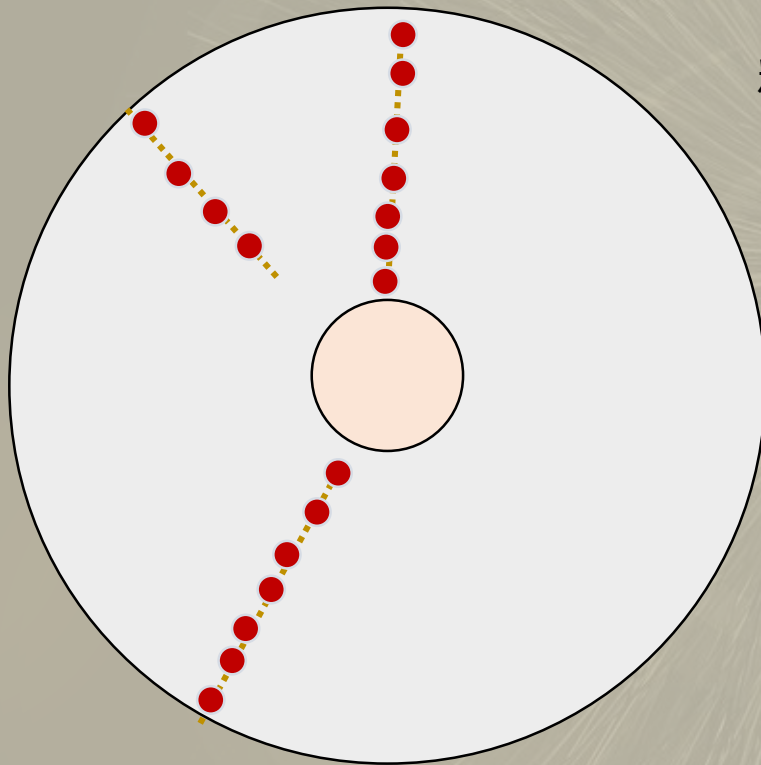
$$q(v \times B) = m \frac{v^2}{r}$$

→

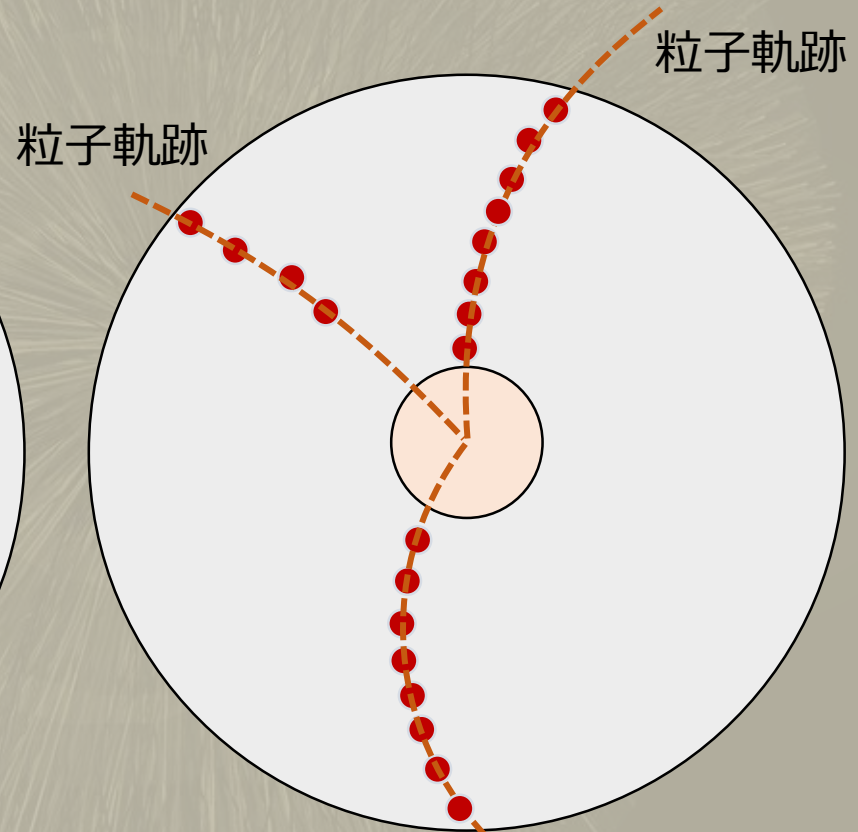
$$p = mv = qBr$$

- ▶ 回転半径  $r$  がわかれば運動量がわかる



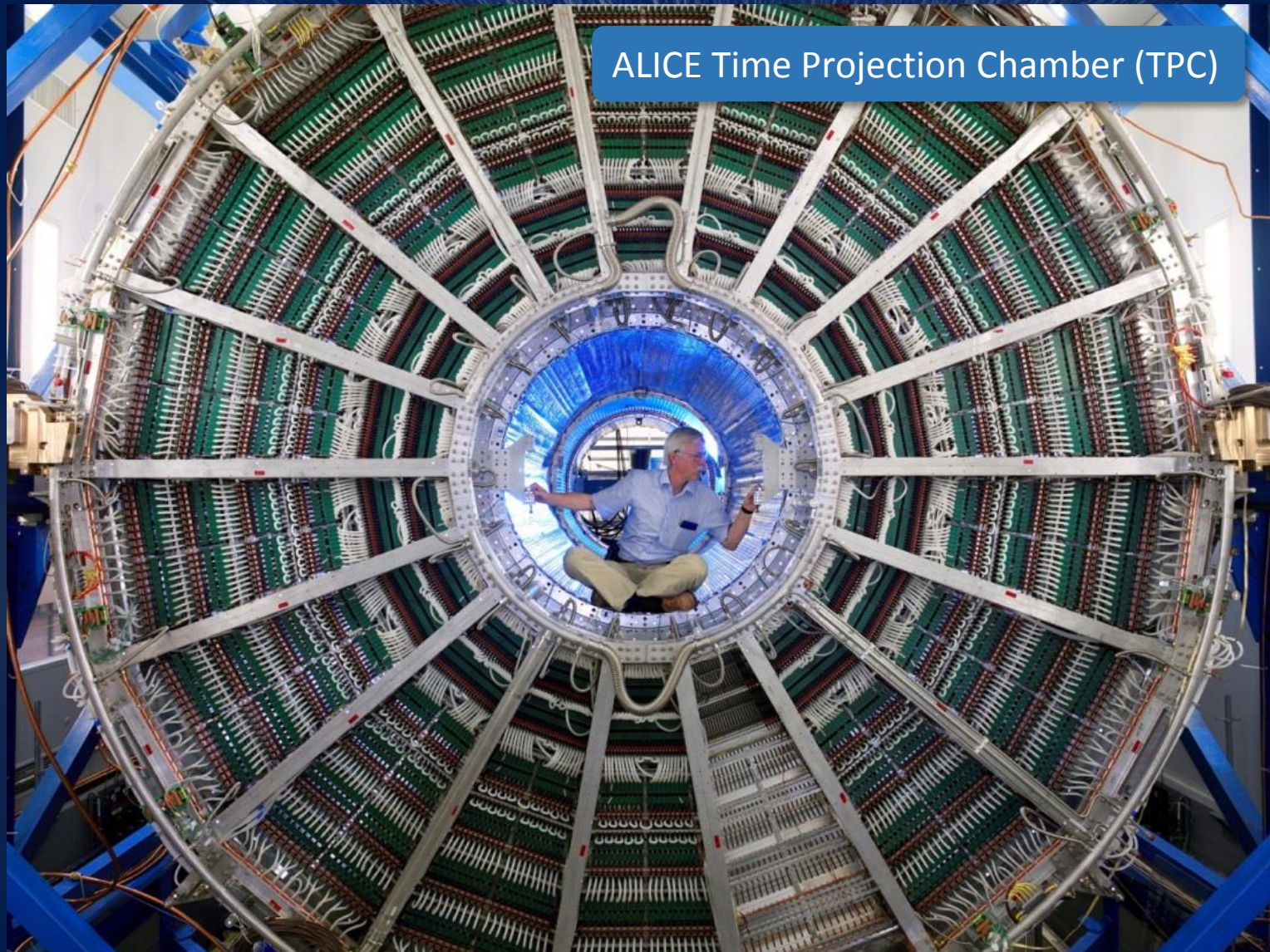


磁場がない場合



磁場を与えた場合

粒子軌跡の曲がり具合で、運動量が求まる  
(重くて速い粒子は磁場に曲げられにくい)

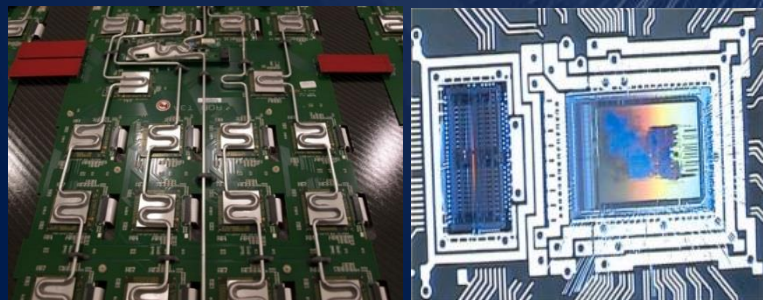


緑色に見えるが微小電子シグナル検出エレクトロニクス

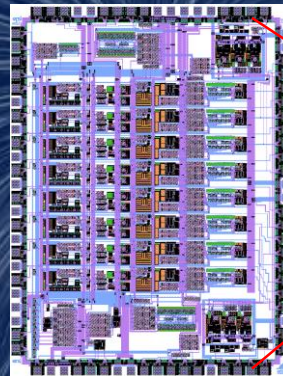


長崎総合科学大学はじめ、日本の研究機関はこれまでに多くの物理学実験のシグナル検出装置を開発

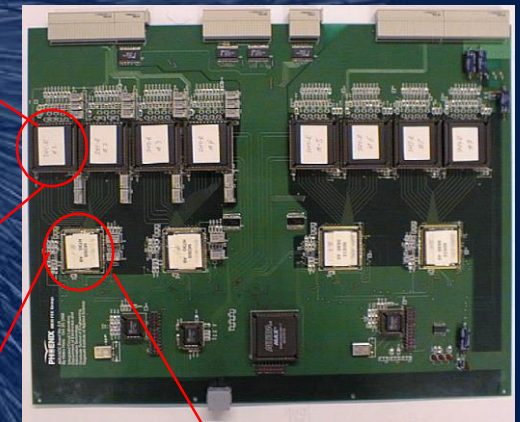
↓ ALICEの検出器を作る学生たち  
(日本の大学生・大学院生も参加)



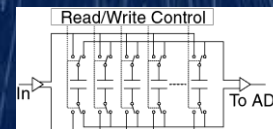
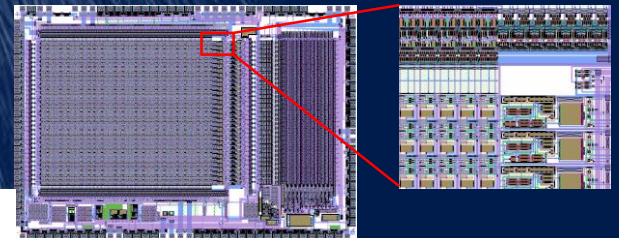
アメリカの実験で使われた回路  
(長崎総合科学大学・東大・早稲田)



- Orbit 1.2u CMOS  
3.5mm x 4.5mm  
84pin PLCC
- MOSIS SCMOS
- TAC 8ch
- Integrator 3ch
- Trigger sum 2ch



9U Custom-made Module



AMU	ADC
MAX writing rate 12MHz	ADC type Wilkinson型
MIN writing time 40ns(12bit)	Range 9~12 bits
Dynamic range 0.5~4.5V	MAX clock 230MHz
Droop time 100mV/s	(Double edge)



スロバキア イタリアx2

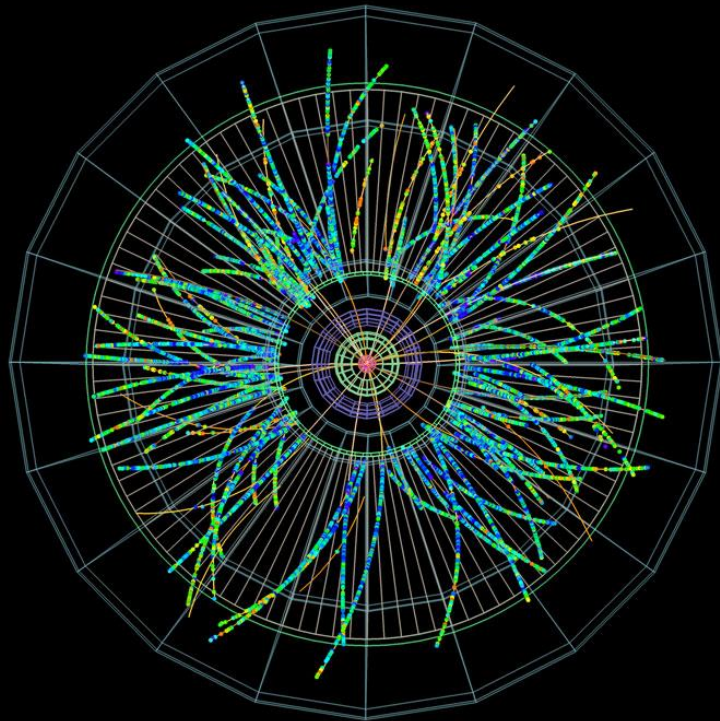


ドイツ 日本 ロシア ドイツ イタリア 日本人

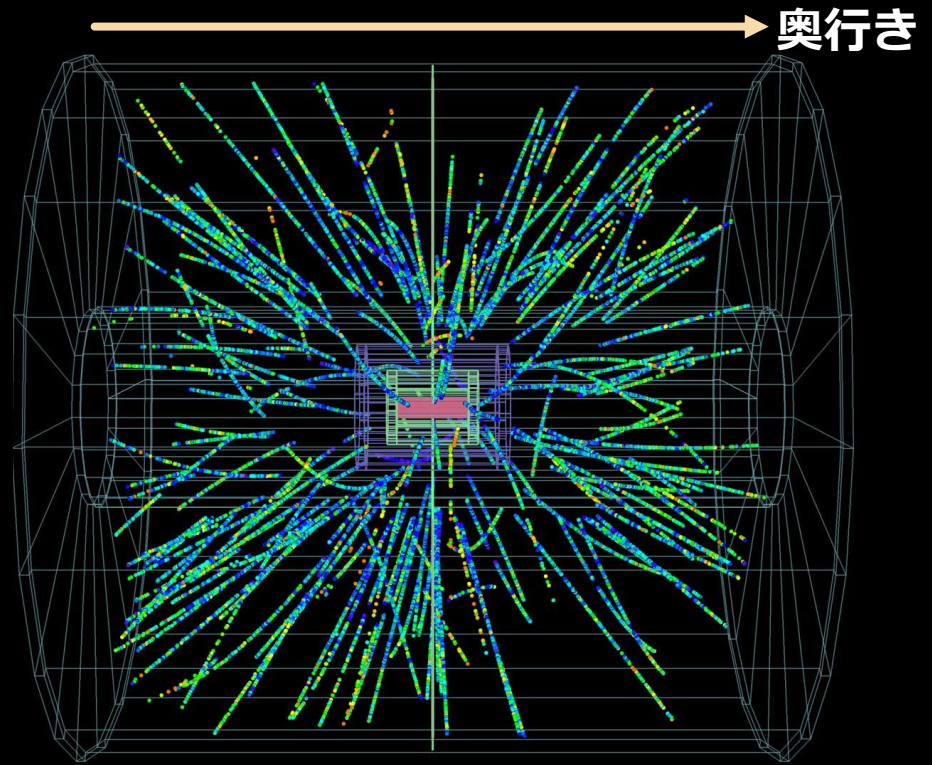


上: 実験コントロールルームで  
チームを待つ人々

下: LHCコントロールルーム



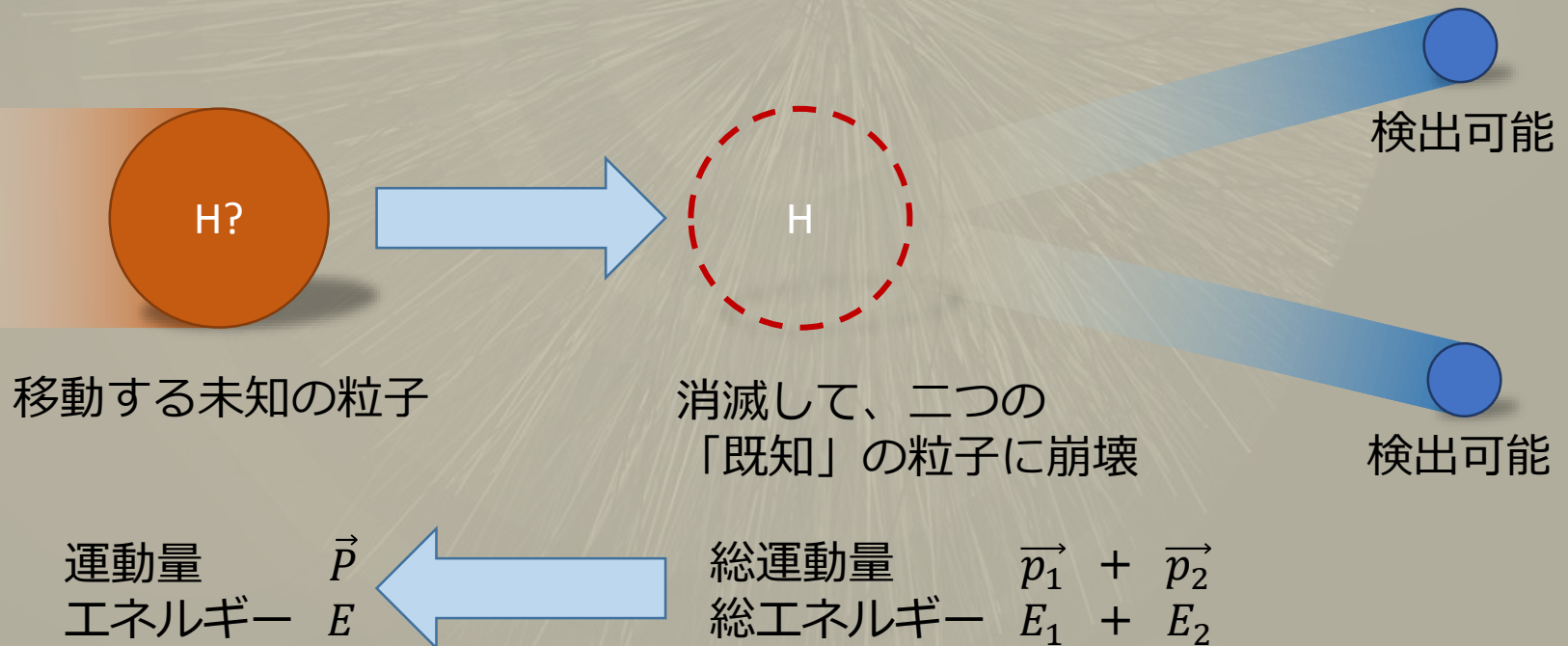
検出面から見た図



シグナル到着時刻をもとに奥行きを再現

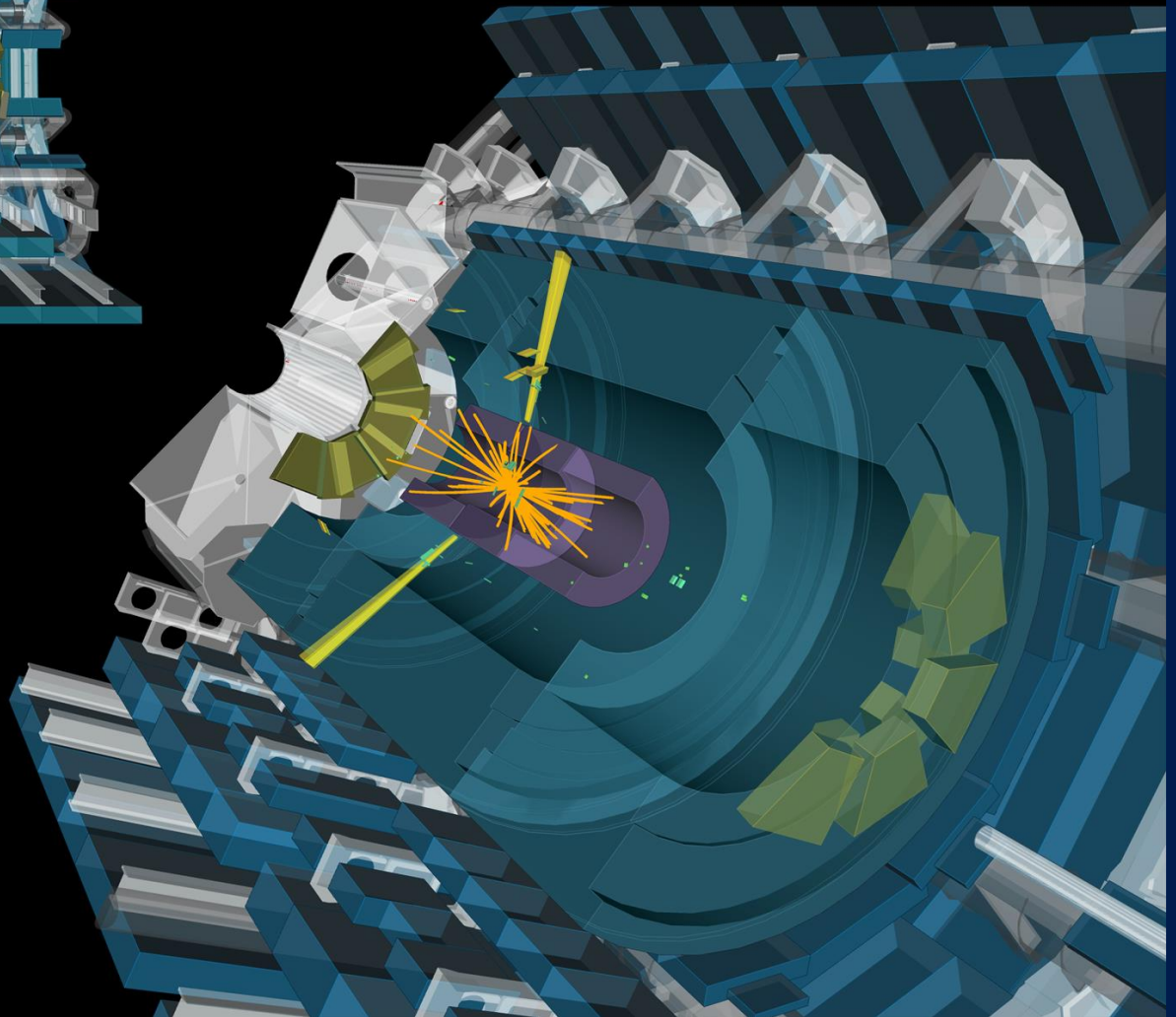
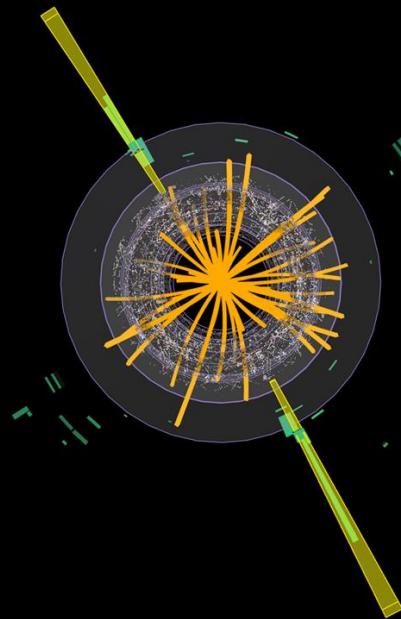
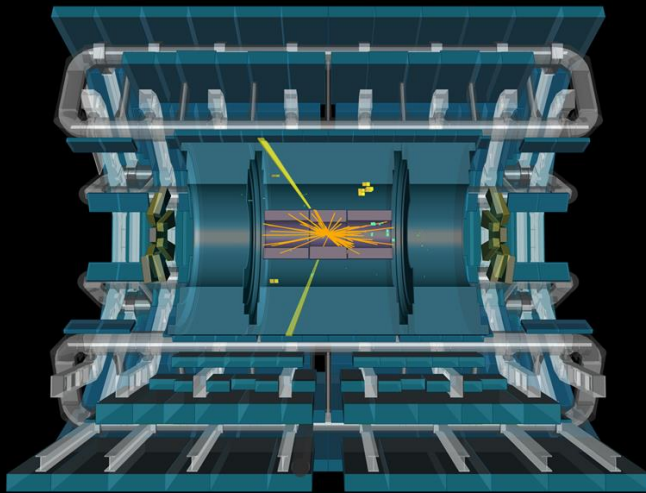
- ▶ 粒子によって曲がり具合が違ふことがよくわかる
- ▶ 奥行き情報を使えば、6億ピクセル、秒間最大1000枚の3Dカメラとして動作

- ▶ ヒッグスはさまざまな「モード」に瞬時にして崩壊する
- ▶ ヒント：粒子が崩壊しても  $\left\{ \begin{array}{l} \text{エネルギー} \\ \text{運動量} \end{array} \right\}$  はどちらも保存される(保存則) → 崩壊粒子を測って、元の粒子の状態がわかる



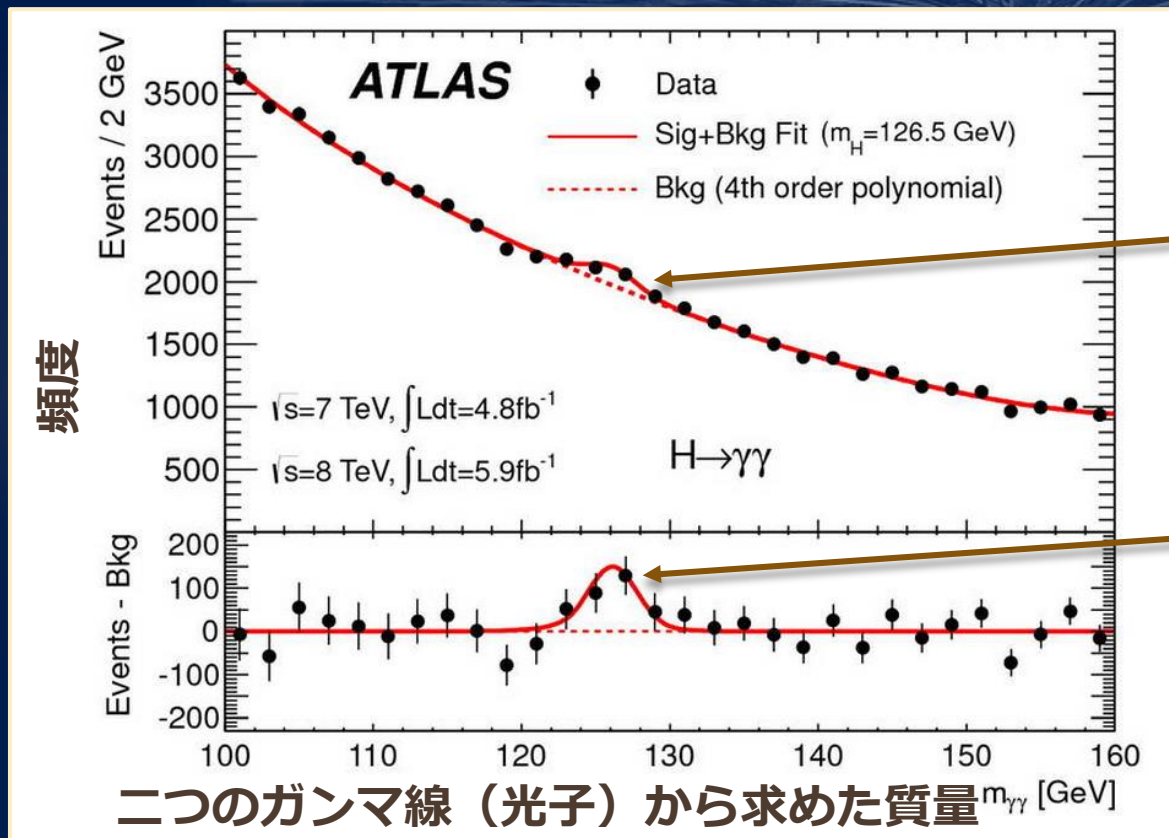
 **ATLAS**  
EXPERIMENT  
<http://atlas.ch>

Run: 191426  
Event: 86694500  
2011-10-22 17:30:29 CEST



**事実:** LHCは陽子衝突を確実に実行し、その都度確実に新粒子を作れるわけではない

- ▶ ヒッグス粒子検出のために3年間かけてLHCが検出器内に「起こした」トータルの陽子+陽子衝突回数: **およそ 1000兆回**



膨大なデータ解析の末、ようやく約500個のヒッグスと思われる新粒子が見えた

間違った組み合わせからくる偽のシグナルをひいたもの

# それは本当に新しい素粒子だった

2012年7月、ヒッグス粒子発見のニュースが世界を沸かせた

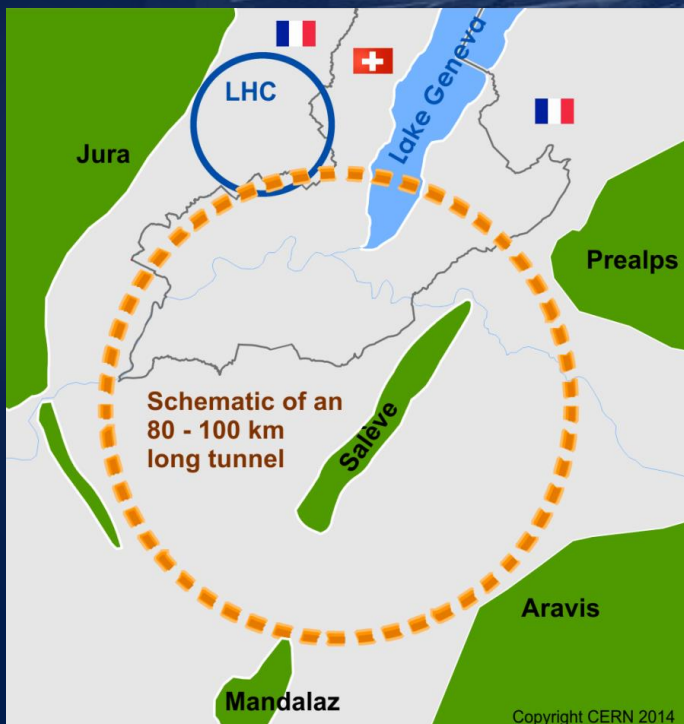


LHC のプログラム: 2028年頃まで  
... その先はまだ未開拓

- ヒッグスの詳細な研究?
- SUSY (超対称性粒子)とダークマター?
- 余剰次元? (ミクروسケール重力)?
- QGPの完全な理解?

LHCの次世代加速器 FCC (Future Circular Collider) ... 2018年までに基本デザインが決まるか

日本で実現するかもしれない国際リニアコライダー(ILC) ... 長さ30 kmの直線状加速器 (2020年頃?)



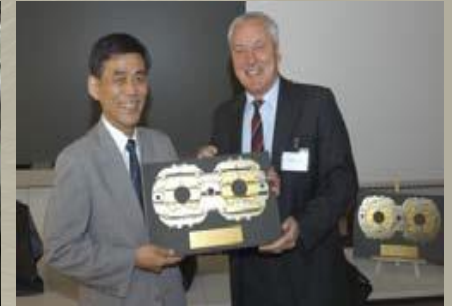


ご清聴ありがとうございました

大山 健

世界の加速器と実験施設・検出器の建造にはさまざまな技術が不可欠

- ▶ 加速器の技術  
(物質材料科学、電磁気技術、加工・工作技術など)
- ▶ 検出器の技術  
(電磁気技術、工作技術、など)
- ▶ エレクトロニクス技術  
(電子回路、集積回路技術)
- ▶ 計算機(コンピュータ)技術



LHCの超伝導磁石の開発は東芝や古河電気をはじめ、日本企業が活躍  
(ATLASグループより)

スーパーカミオカンデでも活躍した浜松フォトニクスの光電子倍增管（光一つでもとらえることができる）

(東京大学より  
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/>)






ここまでで「よくある粒子」(陽子・電子・光など)が測れたが、  
新粒子を測るにはもう1ステップ必要

**理由1:** 安定に存在できない

→ できてもすぐ他のよくある粒子に崩壊してしまう

**理由2:** 粒子が重過ぎて簡単に作れない

大きなエネルギーを一点に集中させる必要がある (LHC)

粒子	正体	寿命	直接測れる？
陽子 	u,u,d クォークから成る 複合粒子 (軽い)	無限大?	YES
パイオン 	uやdクォークから成る 複合粒子 (とても軽い)	0.03 マイクロ秒	YES
ヒッグス 	新素粒子 (重い: 陽子の125倍の 質量)	$10^{-22}$ 秒	NO! (すぐに崩壊する)

# 新粒子の質量を求める

- ▶ アインシュタインの一般相対性理論  
→ 質量とエネルギーは等価

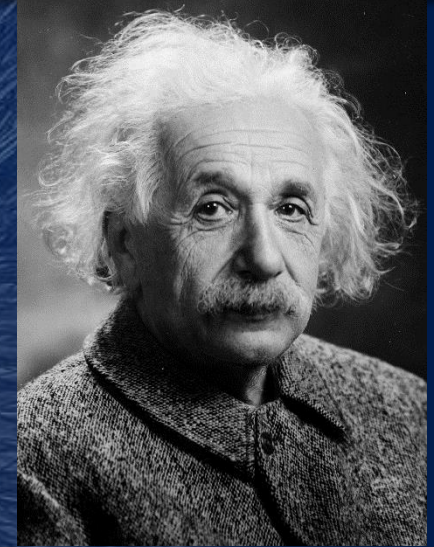
- ▶ 静止している物質:

$$E = mc^2$$

- ▶ 運動している物質:

$$E = \sqrt{m^2c^4 + P^2c^2}$$

- 前頁の測定でエネルギー  $E$  と運動量  $P$  がわかったの  
で質量  $m$  がわかる



from Wikipedia

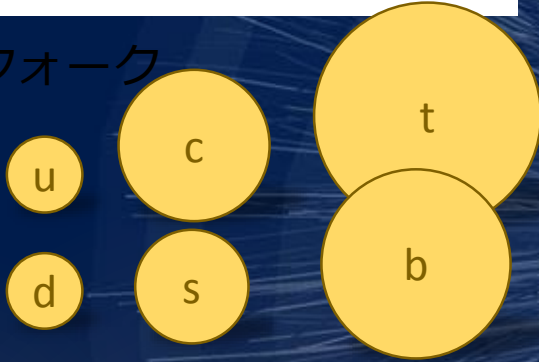
未知の粒子の質量が測れた！

# 粒子は何種類？

## ▶ 現在知られている素粒子(標準模型)

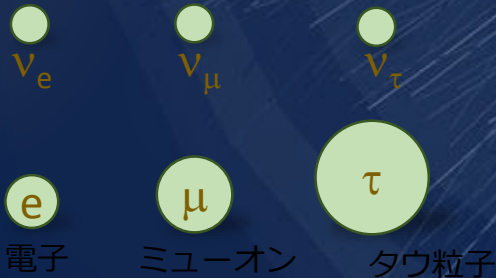
### 物質のもとになる粒子

#### クォーク

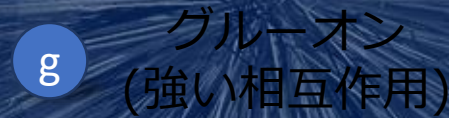


#### レプトン

##### ニュートリノ(中性)



### 力を伝える粒子



### ヒッグス粒子



## LHCの全実験から出力されるデータ(推定値)

ALICE 実験: 年間データ: 1.5 PB (ペタバイト = GB の100万倍)

ATLAS実験はさらにこの倍

LHC全体の推定値: 年間 5 PB (DVD 120万枚ぶん ... 積んだら 200km)



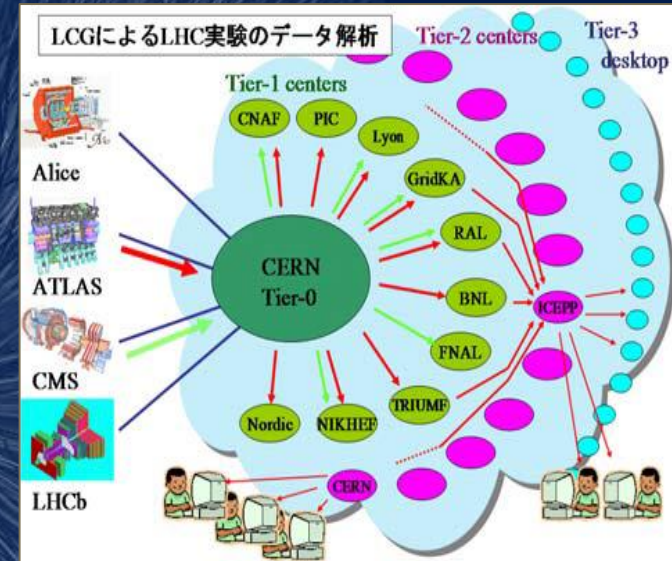
このビッグ・データの解析に必要な  
計算機資源

- ▶ CPU およそ 10万個
- ▶ ディスクおよそ 200 PB
- ▶ テープ およそ 50 PB

データはインターネットを通じて**世界規模**  
に分散されて蓄えられ、**解析される**

→ 世界分散型スーパーコンピュータ  
(**グリッド・コンピューティング**)

長崎総合科学大学も ATLAS実験に参加して  
計算技術の発展に貢献している



世界に分散され、階層化されたコンピュータ群  
(ATLAS日本グループより)

