



Nagoya University

タウ・レプトン物理研究センター  
Tau Lepton Physics Research Center

# 未知なる素粒子世界への挑戦 ～CERN LHC実験の現状～

名古屋大学大学院理学研究科

戸本 誠



Nagoya University  
High Energy Physics

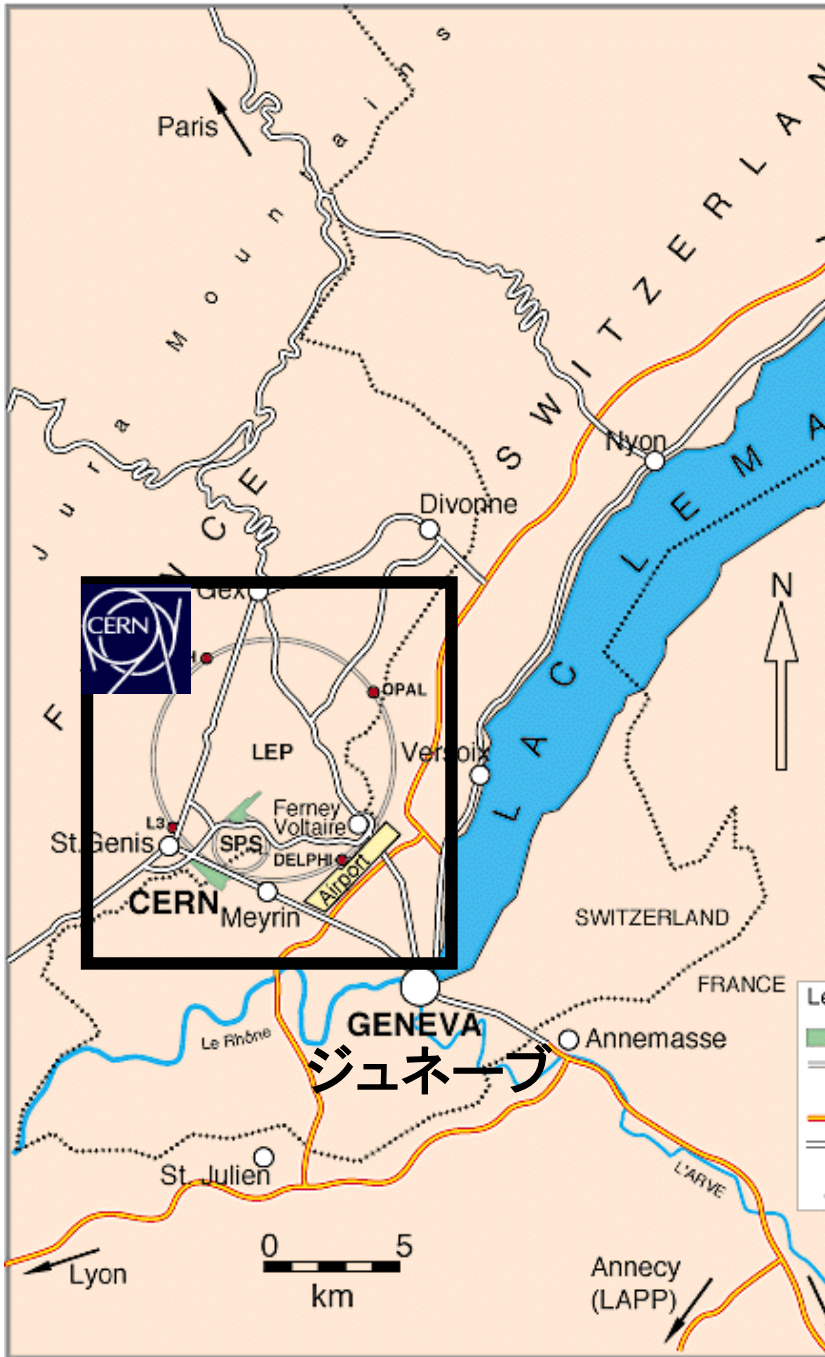
名古屋大学大学院理学研究科 高エネルギー素粒子物理学研究室 - N研



破れは、約 140 億年前のビッグ・バンで起ったとされる、まさに宇宙の起源の背後にある。初めに同量の物質と反物質が生じたとすると、それらは互いに対消滅してしまうはずである。実際には、反物質を構成する粒子 100 億個について、物質を構成する粒子の方が反物質を構成する粒子よりも一個多い程度の微小なずれがあり、そのような対消滅は起きない。この対称性の破れのために、現在の我々の宇宙が存続していると考えられている。この現象が正確にはどのように起きたのかは、いまだに未解明である。おそらく CERN (ジュネーブ) の新しい加速器 LHC が、いまだ我々を悩ます  
このような謎の一部明らかにするであろう。



# CERN研究所





【第三種郵便物認可】

## 世界最大の加速器稼働

### 欧州の研究機関 質量の謎 解明期待

【ジュネーブ＝藤田剛】欧州合同原子核研究機関（CERN）は十日、スイス・ジュネーブにある世界最大の素粒子加速器の運転を始めた。加速した陽子同士を衝突させた。宇宙が誕生した直後の極めて高いエネルギーの状態を再現。物質に質量がある理由や宇宙誕生のナゾを解明する。東京大学や高エネルギー加速器研究機構などが、一体どんなものなのか。

【ジュネーブ＝藤田剛】衝突させ、宇宙が誕生した直後の極めて高いエネルギーの状態を再現。物質に質量がある理由や宇宙誕生のナゾを解明する。東京大学や高エネルギー加速器研究機構などが、一体どんなものなのか。

施設で、地下約百メートルに埋められている。陽子を光速近くまで加速して衝突させ、宇宙誕生直後のような極めて高いエネルギーを作り出した粒子をとらえることが、物質の起源などを知ることができるとされている。

期待されている最大の成果は、物質に質量を与える「ヒッグス粒子」と呼ばれる素粒子の発見。物質になぜ重さがあるのかは当たり前のように科学的に説明できていない。

## 南部理論裏付け？「LHC」運転開始

ノーベル賞授賞理由となった「自発的対称性の破れ」とよばれる南部さんの理論は、質量の起源にも深くかかわっている。現在の定説によると、ビッグバン

（大爆発）直後の超高温の宇宙で質量ゼロで飛び回っていた素粒子が、やがて質量（重さ）をもつにいたった。そのメカニズムの裏付けが「ヒッグス粒子」とよばれる粒子だ。素粒子

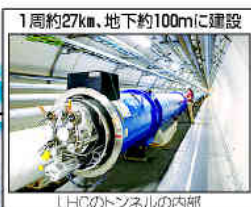
を動きにくくする、空間に満ちた水あめのようなものだと考えられる。つまり重さを与えるわけだ。ヒッグス粒子は、初期宇宙に南部さんの理論を適用すると生まれるはず

のものと位置づけられていて、現代素粒子物理学となつていく「標準モデル」する素粒子のうちただ一つだけ見つかれていない。見つければ標準完成につながる。

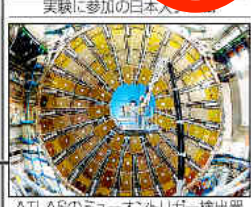
10月13日朝日新聞

## 「最後の」粒子解明に期待

欧州の大型加速器LHCでの「粒子探し」



ATLAS粒子検出器（日本も参加）



ヒッグス粒子の発生が起きる確率は100億分の1くらい

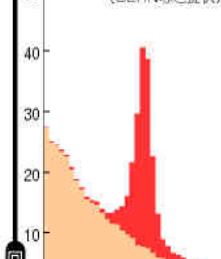
そこで「粒子の狩人」たちは壮大な取り組みを行う

① まず、トリガーシステムによる絞り込みで10万分の1に

② さらに、データ解析による絞り込みで10万分の1に



(CERNなど提供)



## Mammoth atom begins testing

Scientists plan to create Big

By Alexander G. Higgins

GENEVA: It has been called an Alice in Wonderland investigation into the makeup of the universe — or dangerous tampering with nature that could spell doomsday.

Whatever the case, the most powerful atom-smasher ever built comes online Wednesday, eagerly anticipated by scientists worldwide who have awaited this moment for two decades.

The multibillion-dollar Large Hadron Collider will explore the tiniest particles and come ever closer to re-enacting the Big Bang, the theoretical colossal explosion that created the universe.

The machine at CERN, the European Organization for Nuclear Research, promises scientists a closer look at the makeup of matter, filling in gaps in knowledge or possibly reshaping theories.

The first beams of protons will be fired from the 27-kilometer, or 17-mile, tunnel to test the controlling strength of the world's largest superconducting magnets. It will still be about a month before beams traveling in opposite directions are brought together in collisions that some skeptics fear could create micro "black holes" and endanger the planet.

The project has attracted researchers of 80 nationalities, some 1,200 of them from the United States, which contributed \$51 million of the project's price

2008年(平成20年)9月11日

本格的な運転を開始した。初めて、地下約100mにある1周27kmのトンネルで陽子のビームを一周させることに成功した。

LHCは陽子を光速近くまで加速して正面衝突させ、物質の質量の起源などを探る装置。今後、陽子同士を實際に

ブルーエが1957年にカシオペア座方向に見つけた超新星を、X線衛星「すざく」で観測。クロムやマンガンに特有の波長を持ったX線が出ていることを確認した。

ティコの超新星は核融合暴走型と呼ばれ、爆発時の内部の温度は50億度を超える高温

すでに、これだけの脚光を浴びている！！



LHC実験が切り拓く素粒子物理

LHC加速器とATLAS実験

LHC実験の現状とこれから

# 素粒子物理研究とは？



自然界全ての物質の究極構成粒子(素粒子)を探る研究

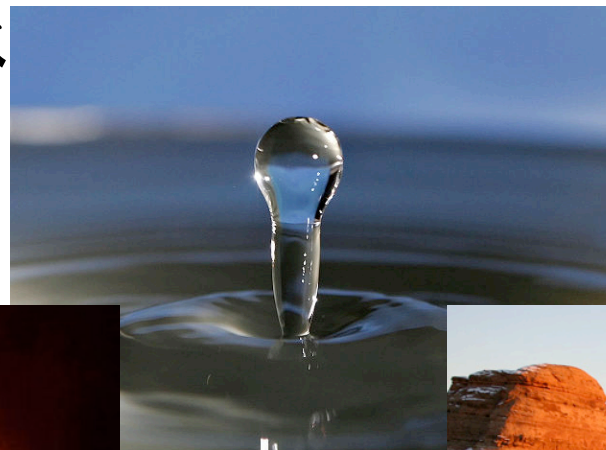
素粒子間に働く力学(相互作用)を追求する研究

古代ギリシアの究極構成要素: 四大元素

空気



水



火

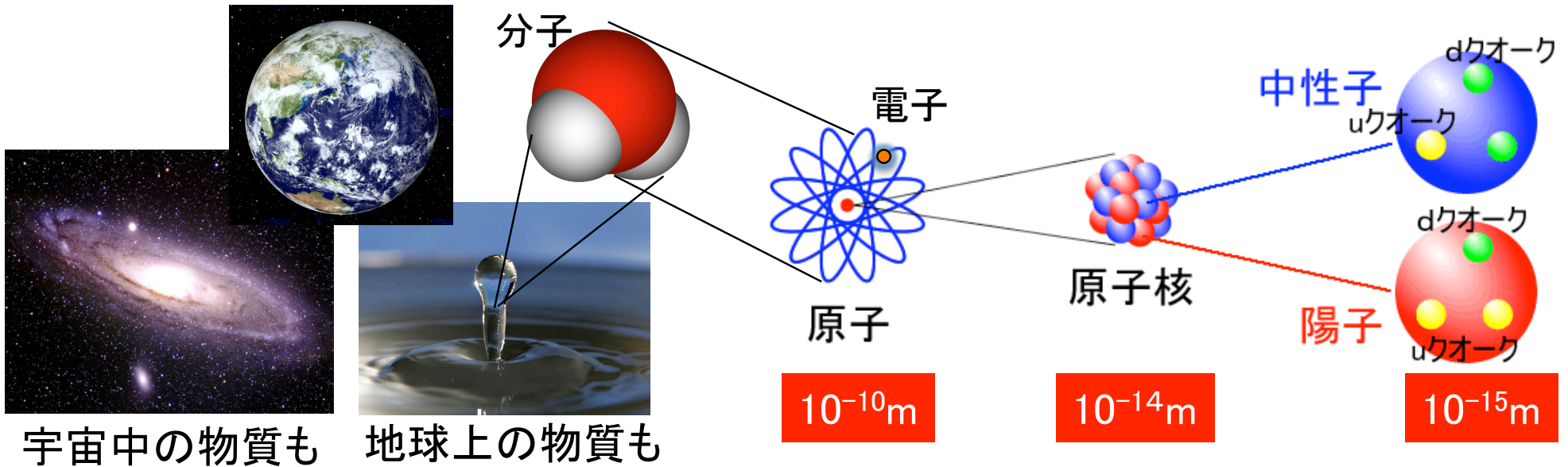


土



素粒子に対する理解は、歴史とともに進化し続けていく

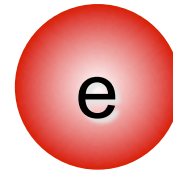
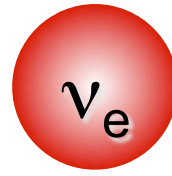
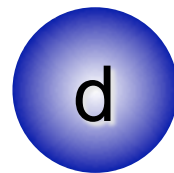
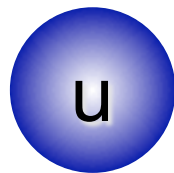
# 素粒子理解の進化



現時点で、物質構成粒子(素粒子)は、

クォーク

レプトン



アップ

ダウン

電子  
ニュートリノ

電子

大きさはない(質点) →  $10^{-18}$ メートル まで実験的検証

**0.00000000000000000001メートル**

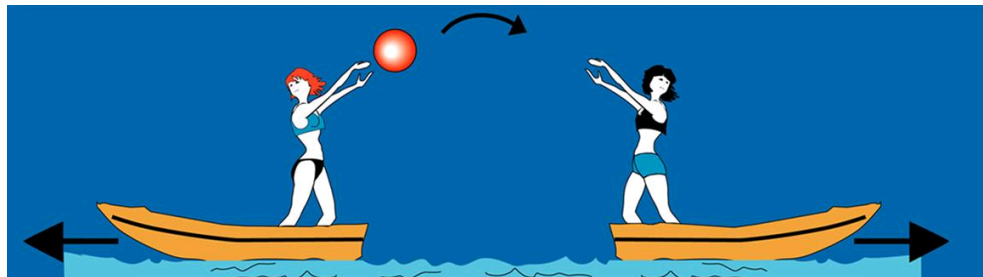


# 素粒子に働く力

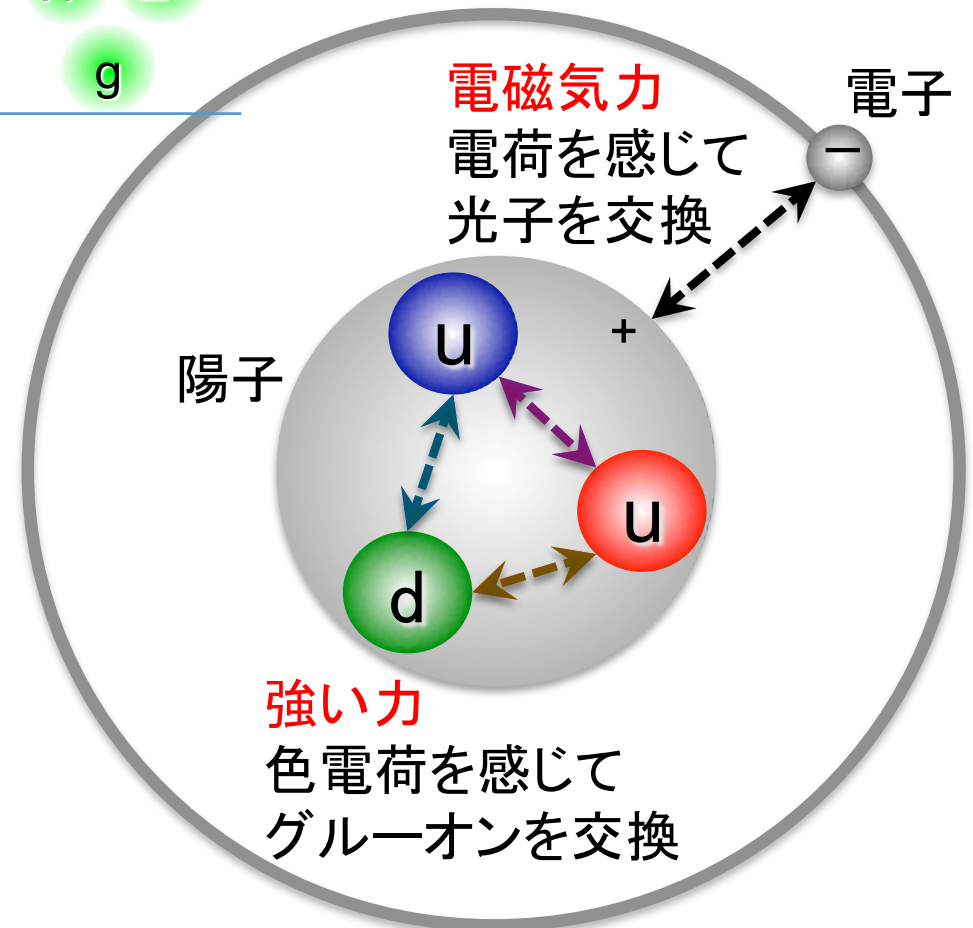
## 4つの力を媒介する粒子が伝達する

| 種類   | 強さ        | 到達距離         | 電荷      | 媒介粒子            |
|------|-----------|--------------|---------|-----------------|
| 重力   | 1         | 無限           | 質量      | 重力子             |
| 電磁気力 | $10^{38}$ | 無限           | 電荷(+/-) | $\gamma$        |
| 弱い力  | $10^{15}$ | $10^{-18}$ m | 弱電荷     | $W^{\pm}$ $Z^0$ |
| 強い力  | $10^{40}$ | $10^{-15}$ m | 色電荷(3種) | $g$             |

力 = 媒介粒子の交換



素粒子世界で特に重要な力  
クォーク: 電磁気力、弱い力、強い力  
レプトン: 電磁気力、強い力  
(ニュートリノは弱い力のみ)





# 現在の素粒子(わかっていること)



## 物質構成粒子

## 力を伝える粒子

### クォーク

### レプトン

### ゲージボゾン

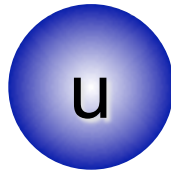
電荷+2/3

電荷-1/3

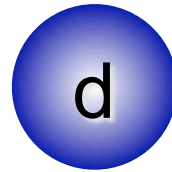
電荷 0

電荷 -1

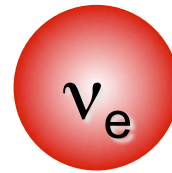
第1世代



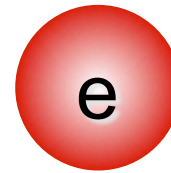
アップ



ダウン

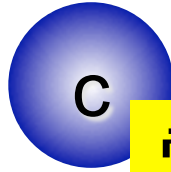


電子  
ニュートリノ

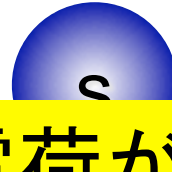


電子

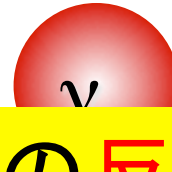
第2世代



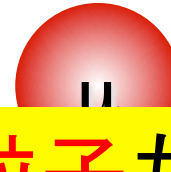
チャーム



ストレンジ

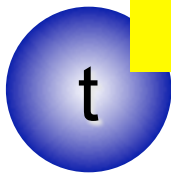


ミュー

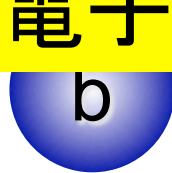


ミュー

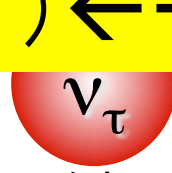
第3世代



トップ



ボトム



タウ  
ニュートリノ



タウ

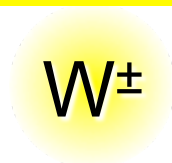
電磁気力: 光子



強い力: グルーオン



弱い力: W/Z ボゾン



電荷が逆の反粒子も存在する  
電子(e<sup>-</sup>) ↔ 陽電子(e<sup>+</sup>)

未発見!

H  
ヒッグス粒子

素粒子に質量を与える

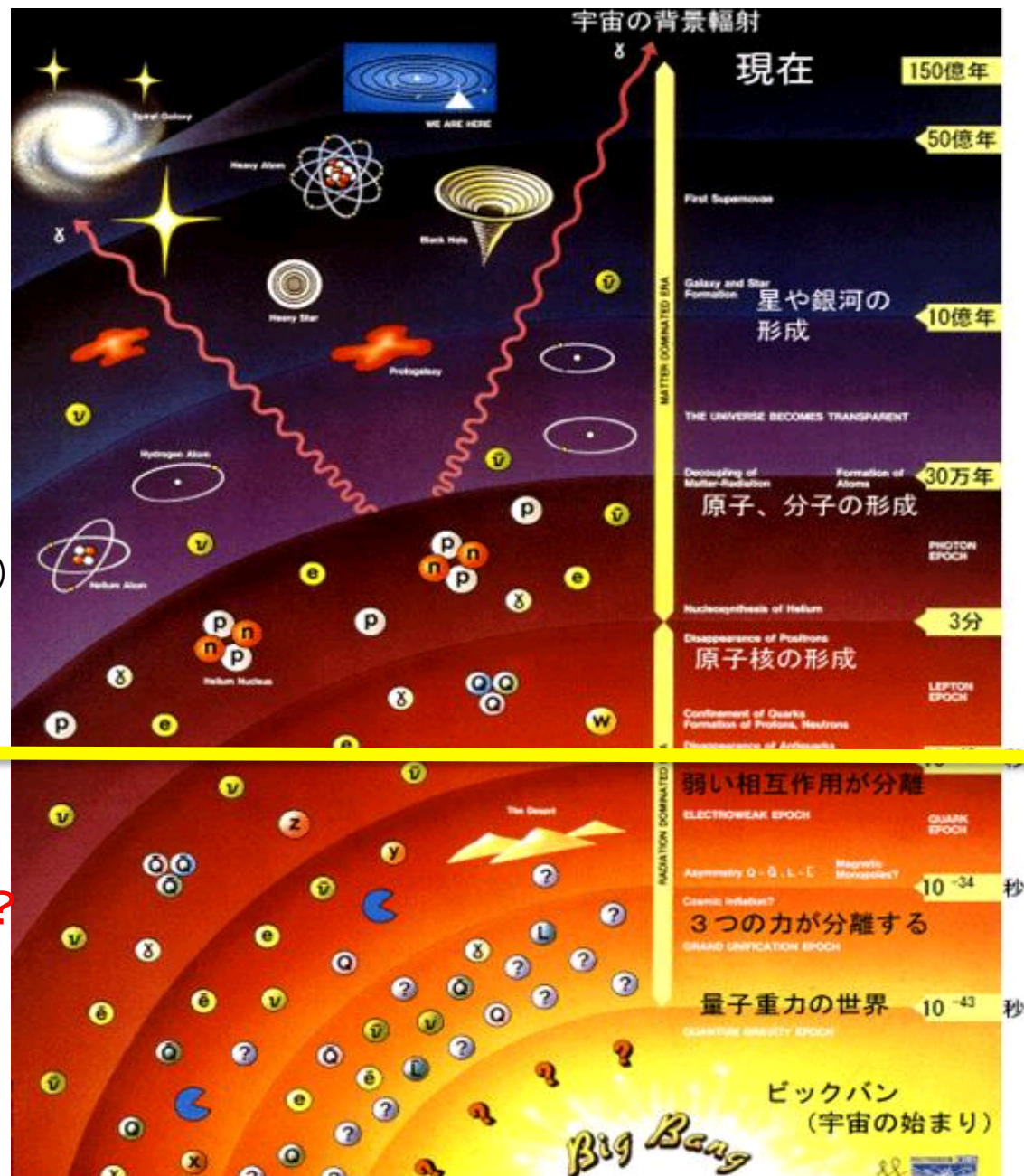
# 宇宙創成直後は素粒子世界



- ビッグバンの後 $10^{-11}$ 秒後  
100GeV (=陽子質量の100倍)  
- クォーク、レプトンが3世代  
- 4種のカ

ヒッグス粒子が未発見

- 新しい現象が見られるか？  
- 力の大統一  
- 超対称性？  
- 余剰次元？  
- サプライズ？？？



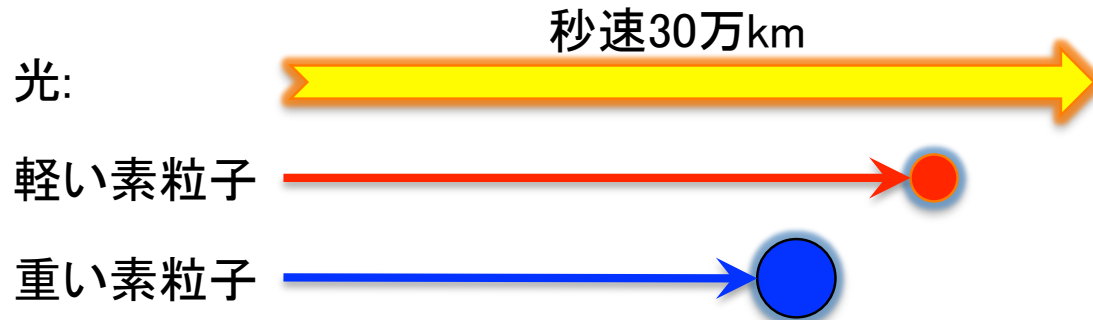
理解

挑戦

# 質量の起源の謎

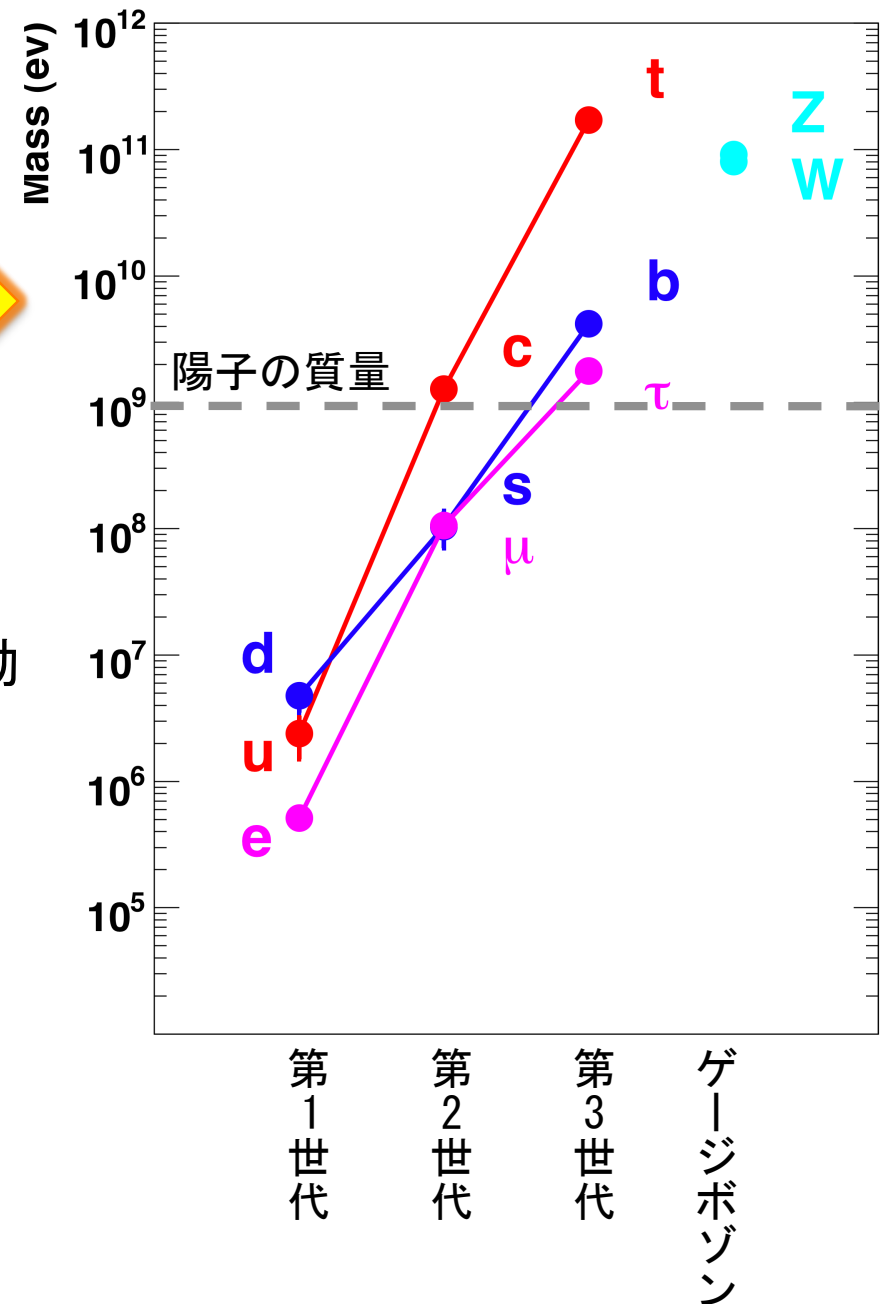


質量とは、光速からどれほど遅くなるか？



宇宙創成直後は、全ての素粒子は光速で運動  
全ての素粒子は質量=0であった！

現在の冷えた宇宙では、  
素粒子のほとんどは、独自の質量を持つ。  
いつ、どうやって質量を得たのか？



→ 質量起源の謎

→ 世代構造の謎

# ヒッグス粒子



もともと無の真空が、宇宙が冷えるにつれ、水のようなヒッグス場に埋め尽くされた

高温な宇宙(宇宙創成時)



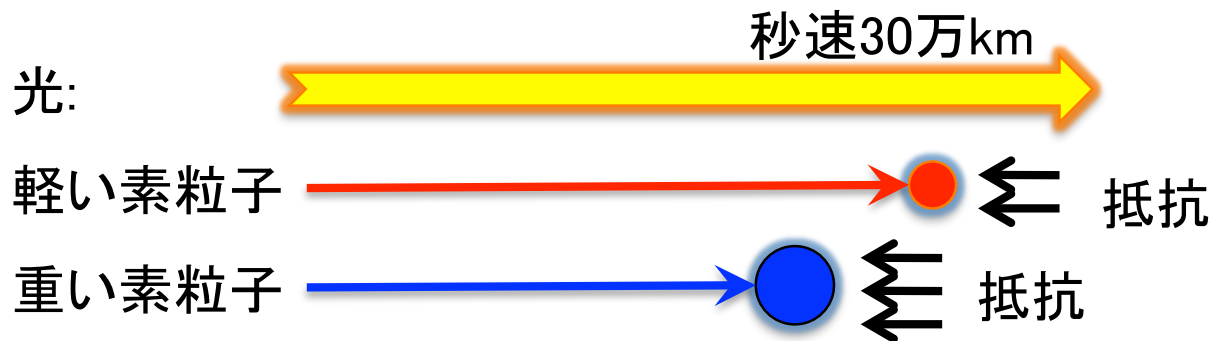
無の真空

冷えた宇宙



ヒッグス場の海

相転移(水蒸気 → 水 → 氷のようなもの)

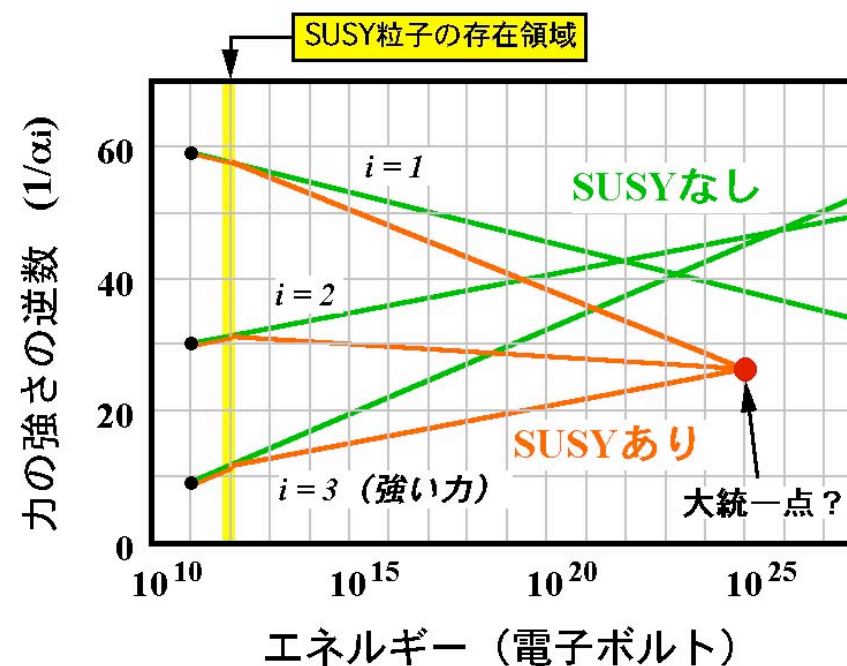
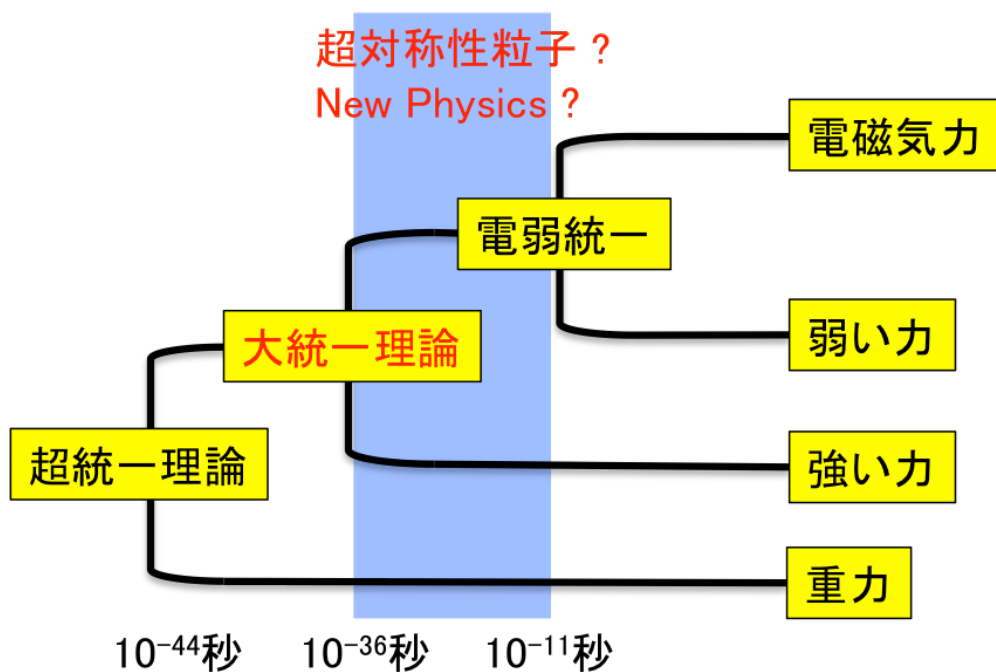


ヒッグス場の海にエネルギーをつぎ込む → ヒッグス粒子が姿を表す  
その質量は、100GeV程 → 発見は近い

# 力の大統一

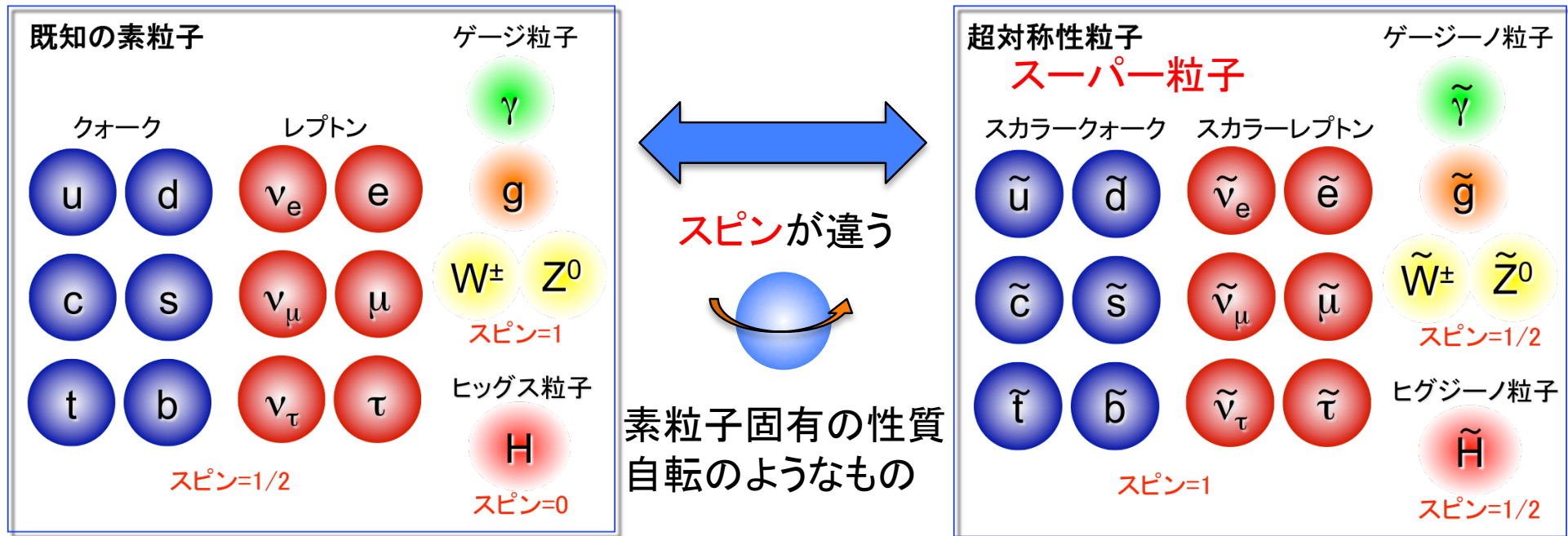


宇宙の膨張とともに、力が分岐し4つとなったと考える  
高いエネルギーで、電磁気力、弱い力、強い力の大きさが同じになるか？  
→ 電磁気力と弱い力は統一的に扱えることがわかっている

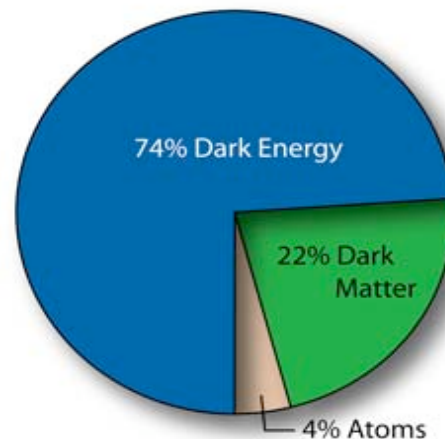


~1000GeV(=1TeV)に超対称性粒子(スーパー粒子)があると力が統一される

# 超対称性(スーパー)粒子



スーパー粒子が、**暗黒物質**の最有力候補



その他、**余剰次元**(棚橋さん講演)など、1TeVエネルギー付近で見られても面白い



現在よくわかっている素粒子像の中で

**ヒッグス粒子**だけは未発見

そして、その質量は、陽子の質量の100倍(**100GeV**)程度らしい

現代素粒子を超える新しい物理として

**超対称性粒子**に代表される新しい粒子が**1000GeV**くらいにあると  
**力の大統一**への道が拓かれるようだ

**100GeVから1TeVエネルギー**までの素粒子探索実験が急務

# 極微の素粒子をどう見るか？

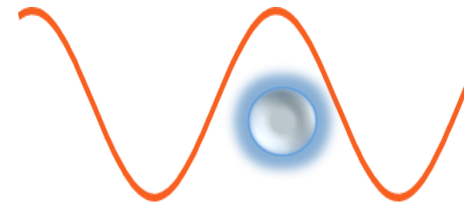


顕微鏡と同じ

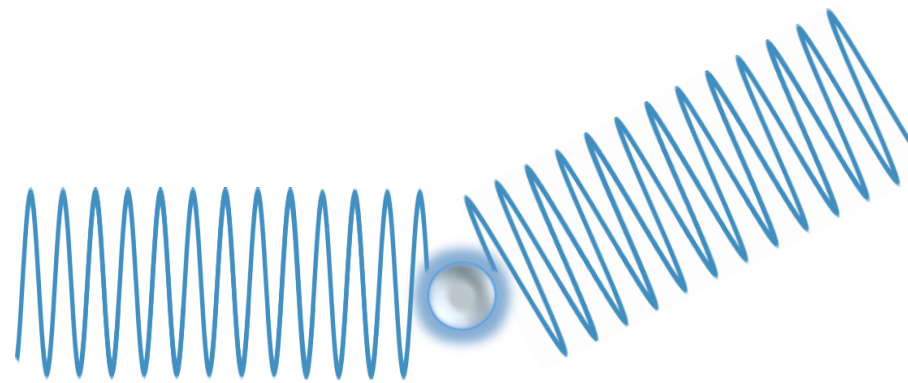


光学顕微鏡: 光の透過、反射  
可視光(~100ナノメートル)  
の物を見るのが限界

電子顕微鏡: 電子の散乱  
0.1ナノメートル( $10^{-10}$  m)  
の物まで見える。



長い波長の光は、細かい物質をすり抜ける



短い波長の光は、物質により屈折・反射される

エネルギーは波長に反比例する。

$$E = h(\text{プランク定数}) \div \lambda(\text{波長})$$

→ 高エネルギーの粒子衝突



# 新しい素粒子の作り方

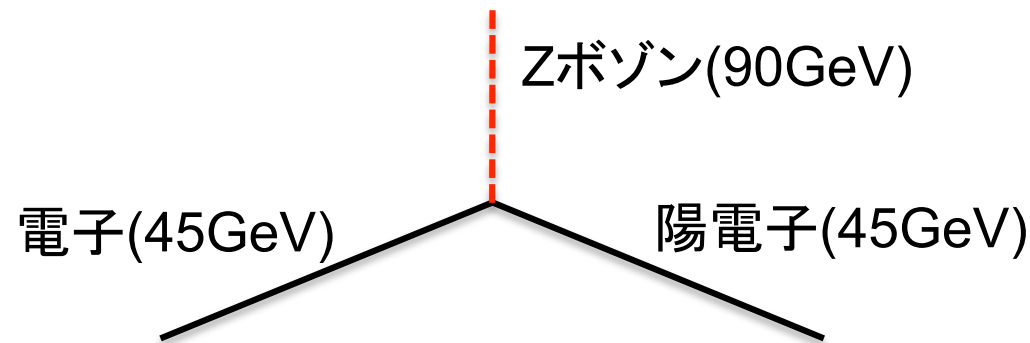


未発見＝既知のエネルギーでは生成が不可能

粒子・反粒子対消滅： $e^+e^- \rightarrow$  エネルギー



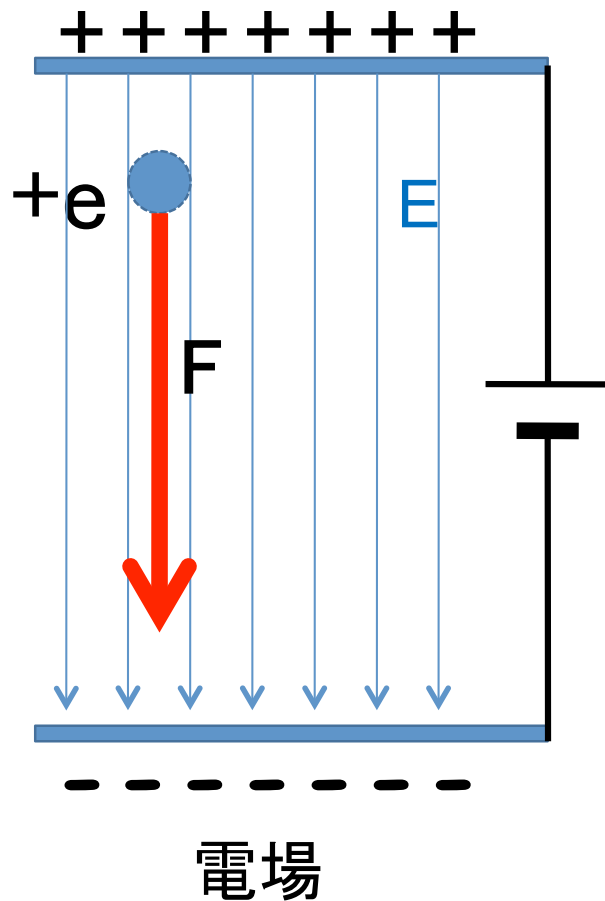
$E=Mc^2 \rightarrow$  質量Mの未知素粒子を生成する能力



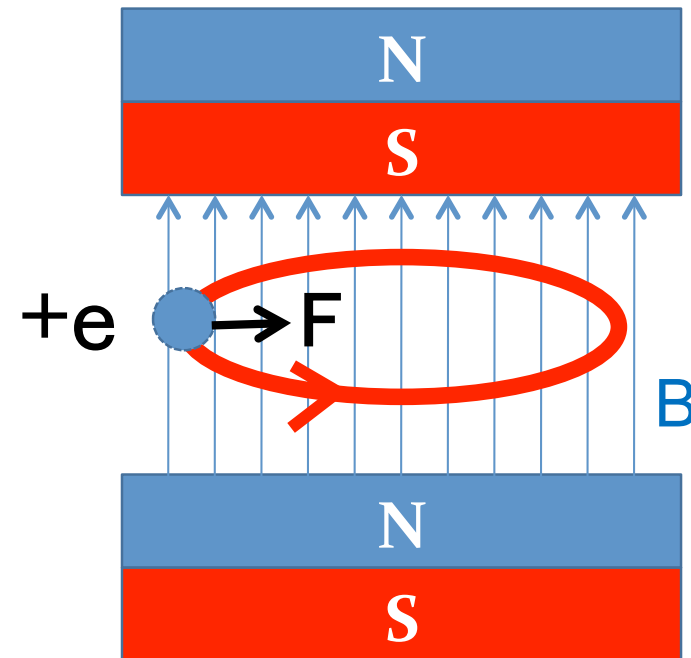
→ 高エネルギーの粒子衝突



## ローレンツ力 $F = eE + ev \times B$



電場が大きいと加速大



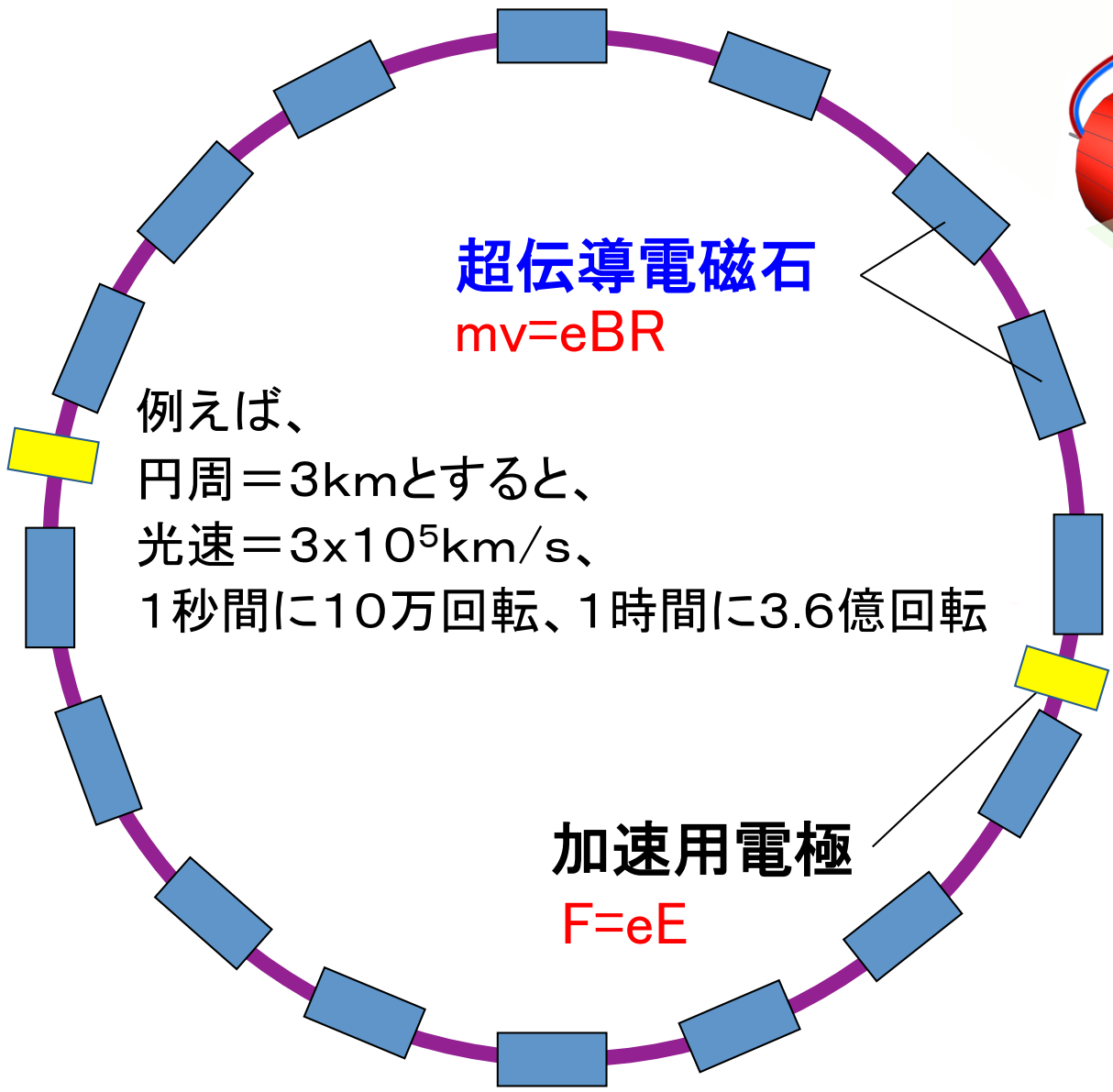
磁場

$$evB = mv^2/R$$

$$mv = eBR$$

磁場と回転半径が大きいと加速大

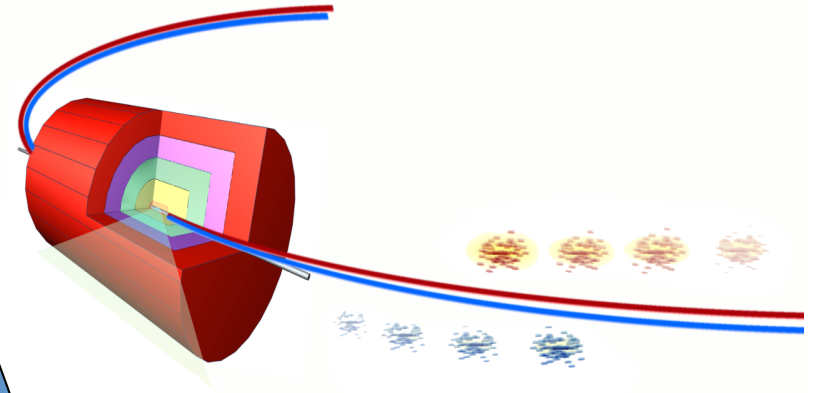
# 円形加速器



超伝導電磁石  
 $mv=eBR$

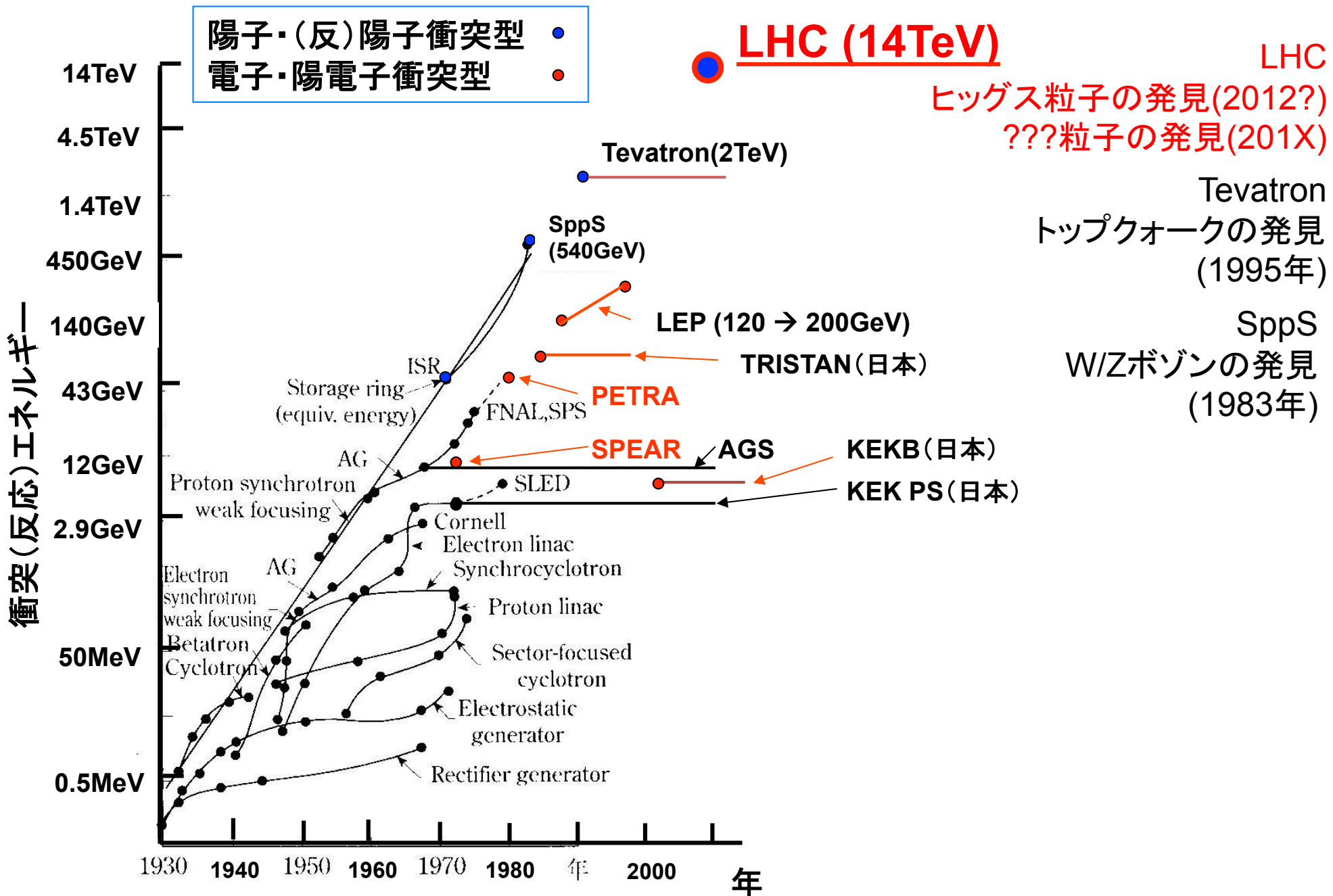
例えば、  
円周=3kmとすると、  
光速= $3 \times 10^5$ km/s、  
1秒間に10万回転、1時間に3.6億回転

加速用電極  
 $F=eE$



例えば、LHC加速器の場合：  
陽子ビーム塊の数：2835  
ビーム塊あたりの陽子数： $10^{11}$ 個

# 衝突エネルギーの歴史



# Large Hadron Collider

周長27 Km

フランス

ジュネーブ空港

スイス

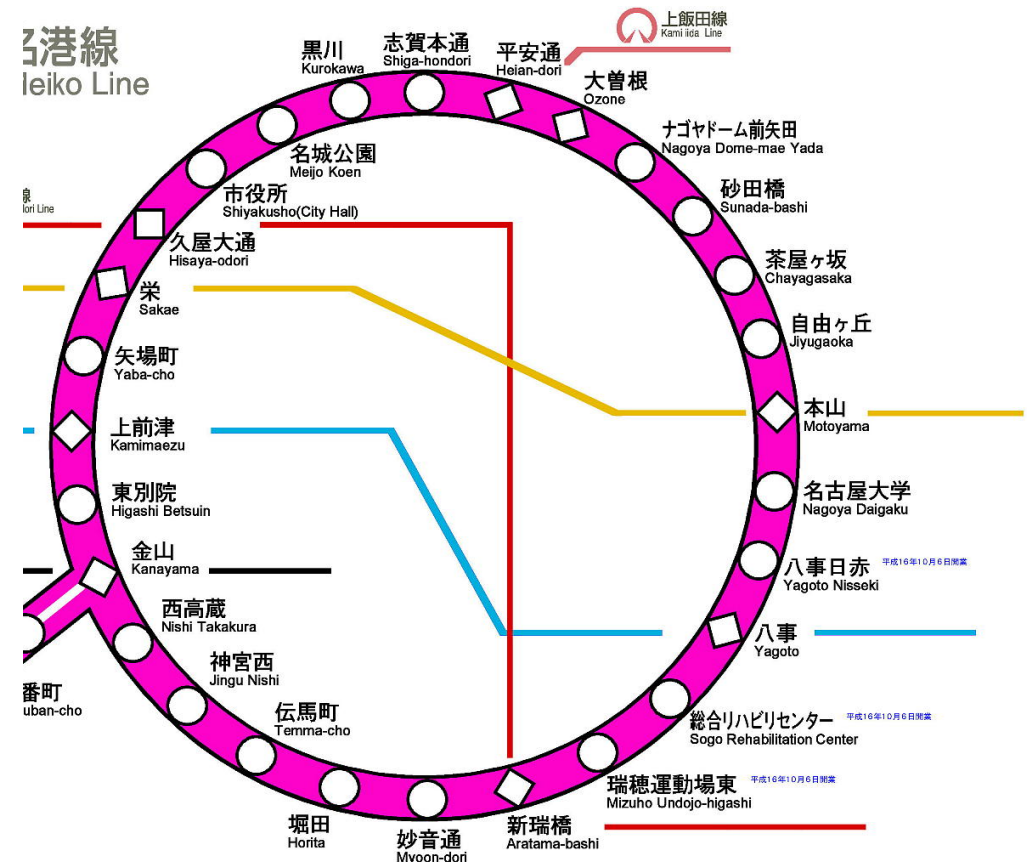
7TeVの陽子と7TeVの陽子を衝突  
世界最高エネルギー14TeVの世界



# LHC加速器



## 名城線 leiko Line



名古屋地下鉄名城線とほぼ同じ

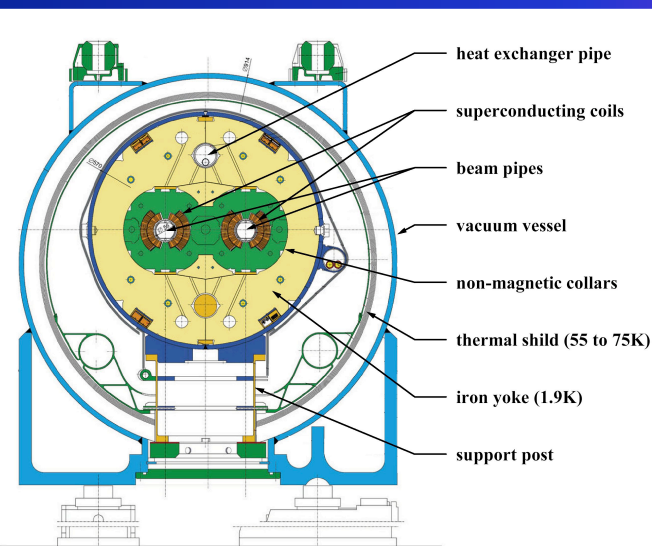
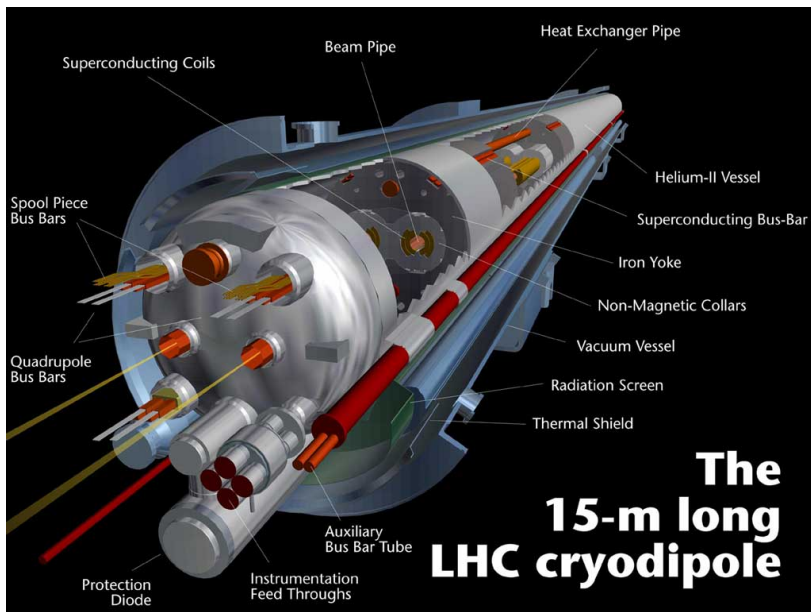
ATLAS ... 妙音通り

CMS ... 志賀本通り

ALICE ... 西高蔵

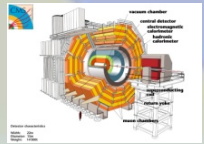
LHCb ... 八事

# LHC加速器

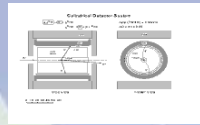


8.3テスラの超電導磁石  
液体Heで1.9K (-271.25°C)に冷却  
15m x 1232台 = 18km (27km中)

# Overall view of the LHC experiments.



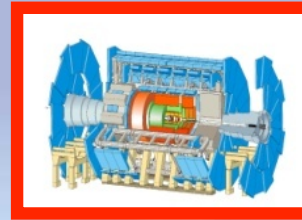
**CMS**  
汎用実験



**TOTEM**  
Total cross section測定



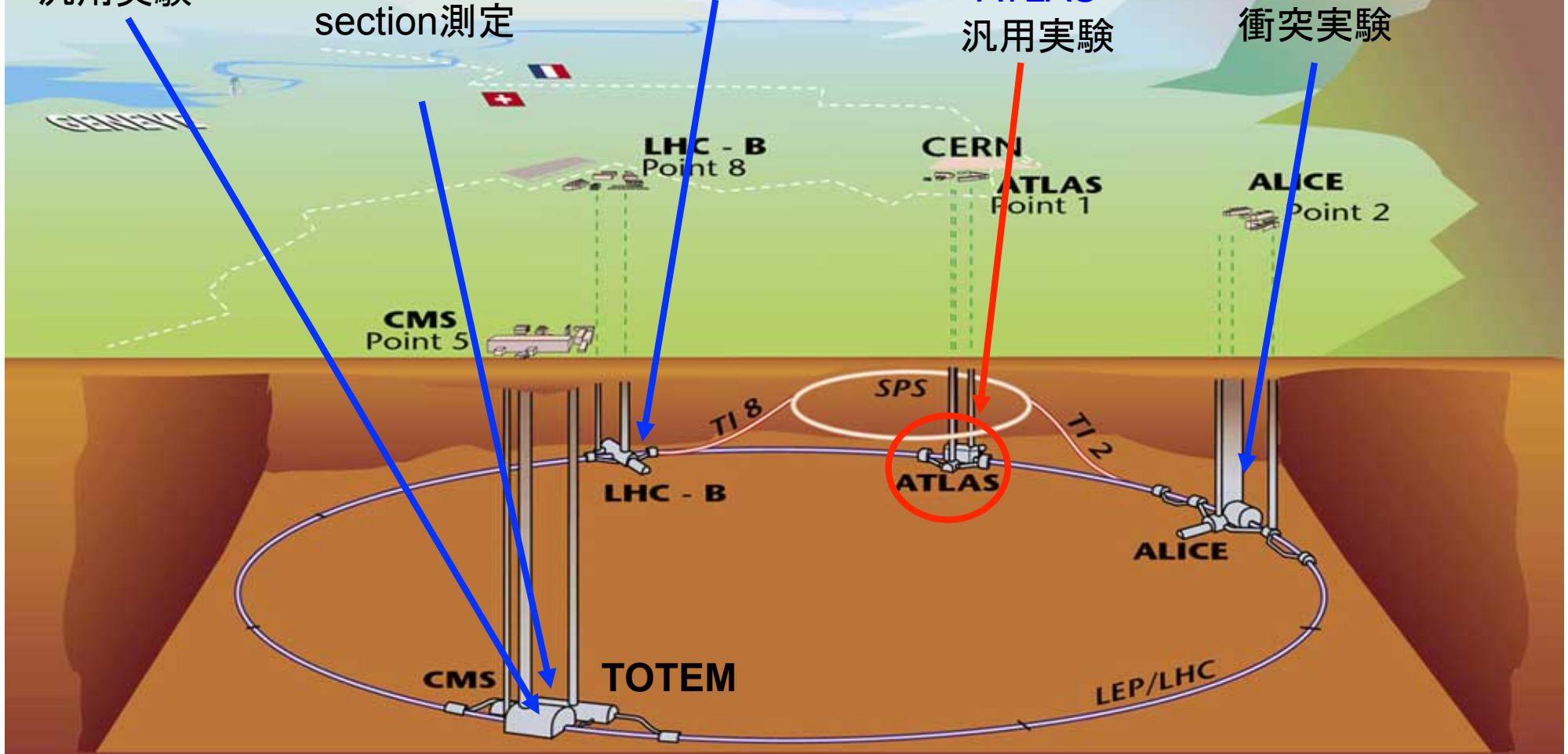
**LHCb**  
Bの物理



**ATLAS**  
汎用実験



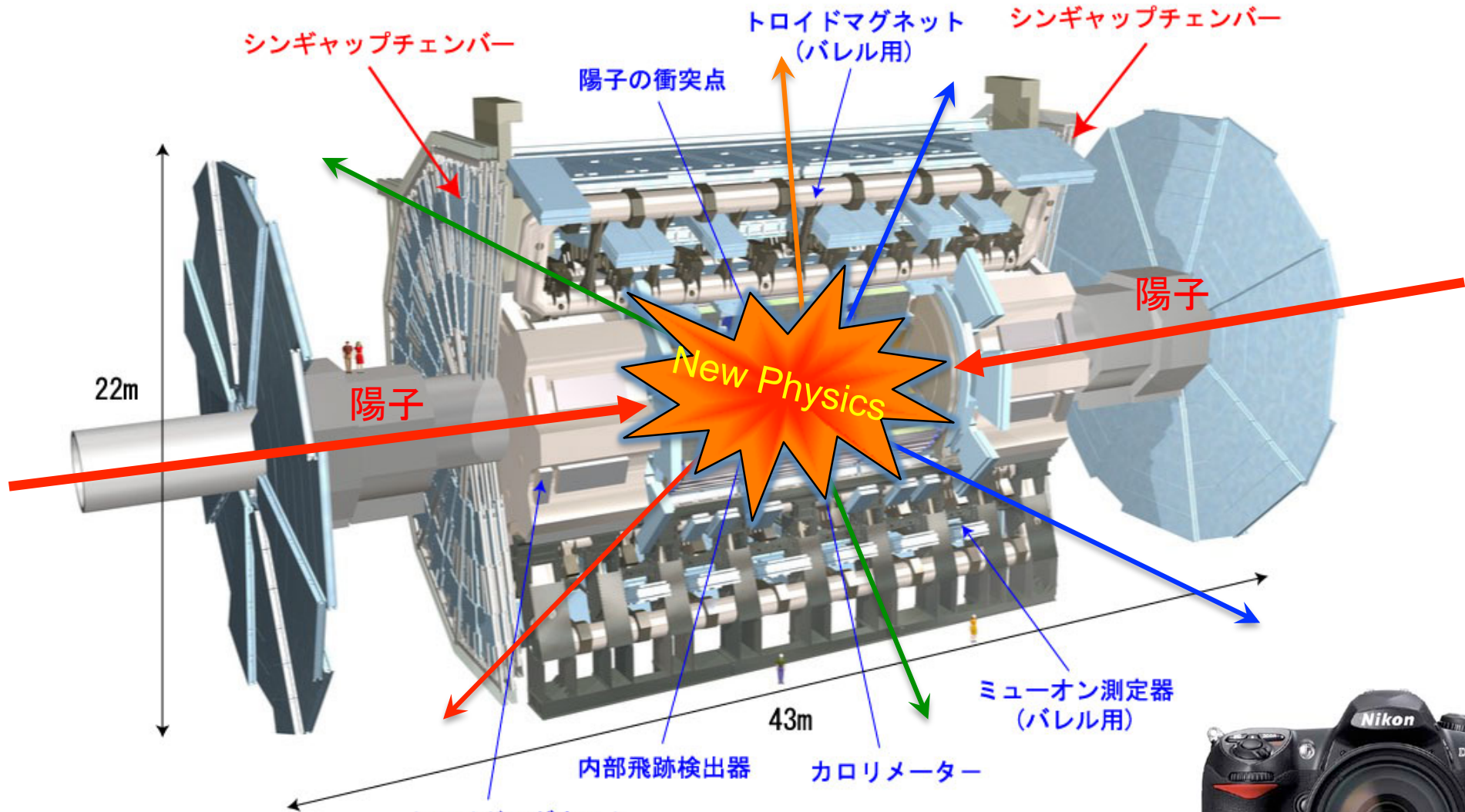
**ALICE**  
重イオン  
衝突実験



Jura山脈の下70m~150m



# ATLAS検出器(A Toroidal LHC ApparatuS)



総重量 : 7000 トン  
直径 : 22.0 メートル  
長さ: 43.0 メートル  
読み出し : 1億6千万チャンネル

新しい素粒子から出てくる  
光、電子、陽子、中性子、K粒子、 $\pi$ 粒子などを捉える  
高性能大型デジタルカメラ(1億6千万画素)

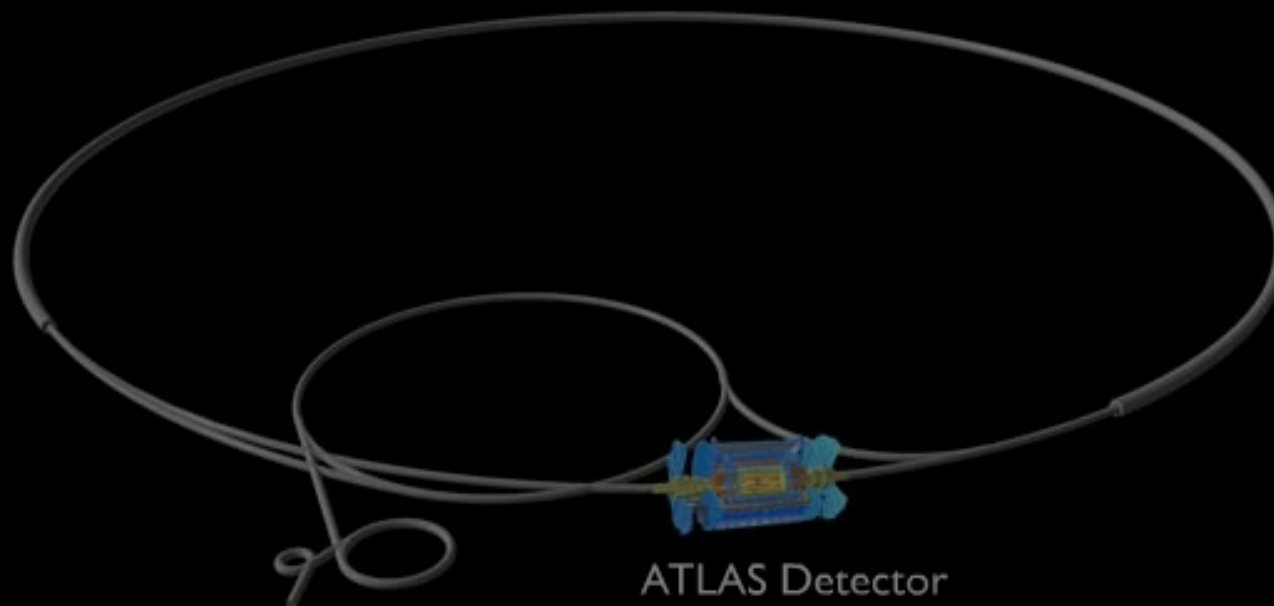


# 陽子の加速器周回



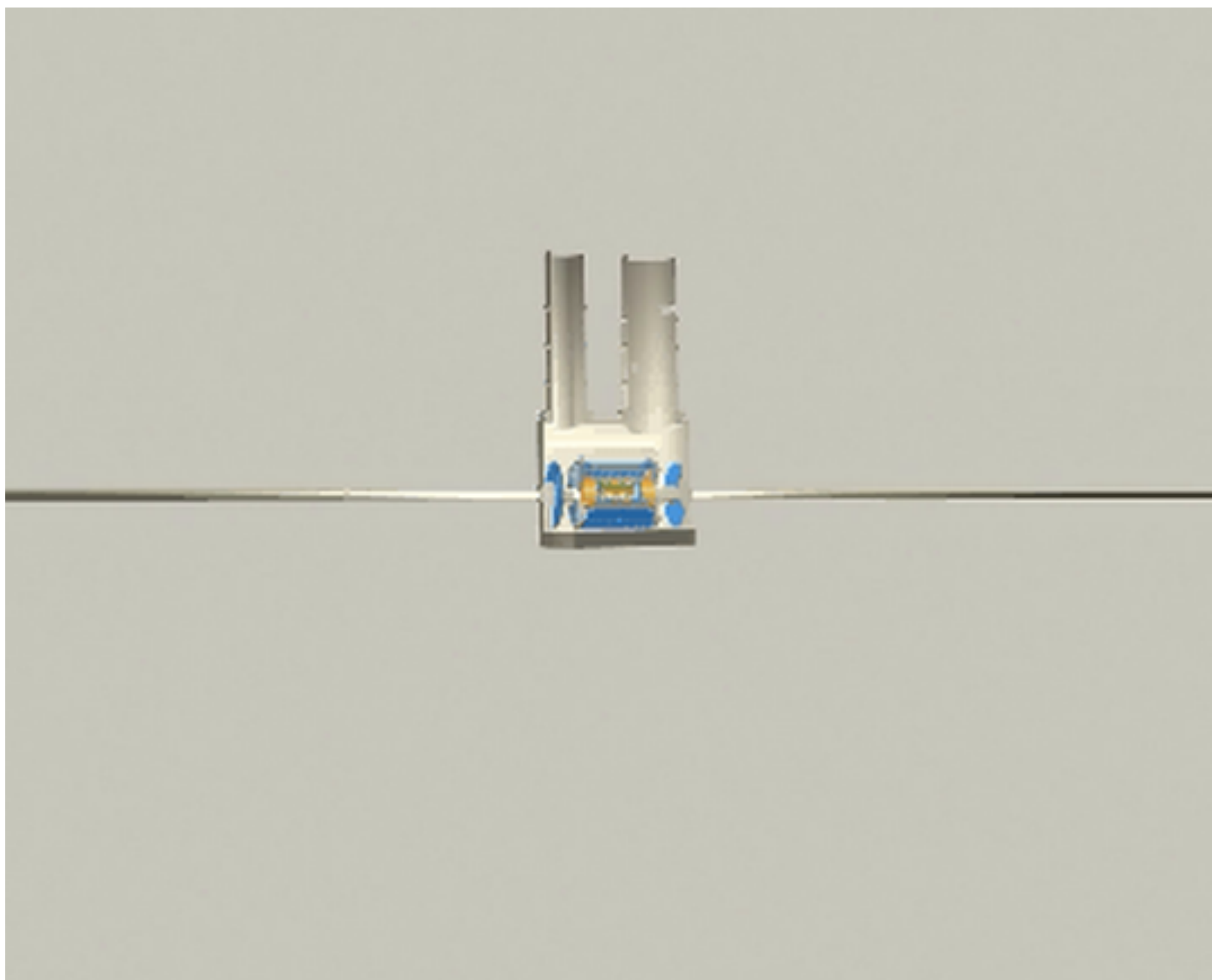
PLAY▶

Large Hadron Collider



ATLAS Detector

# 陽子衝突の様子





地下実験ホールと地上を結ぶ穴  
ここから検出器をインストールする

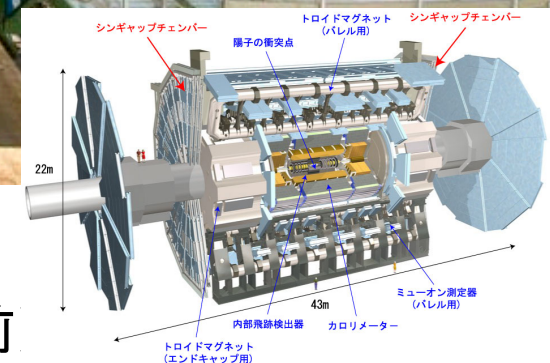
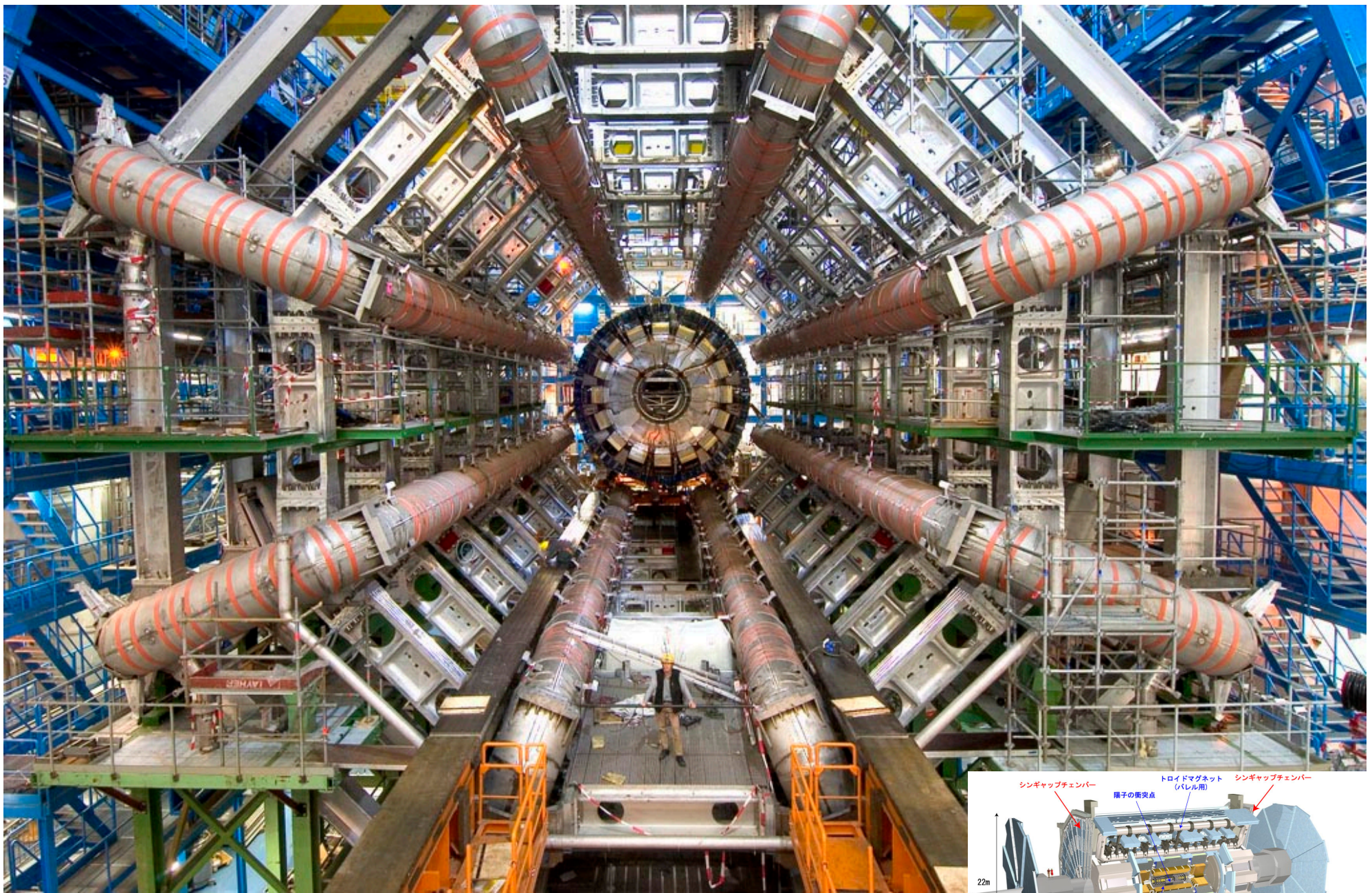


Point 1 - USA15 Cavern vault excavation - October 22, 1999 - CERN ST-CE



地下実験ホール



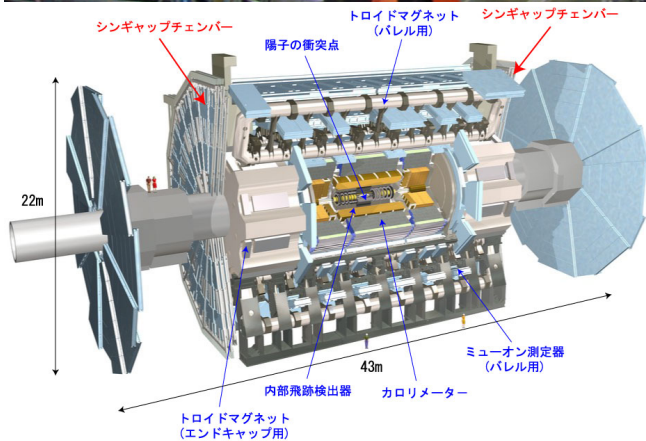
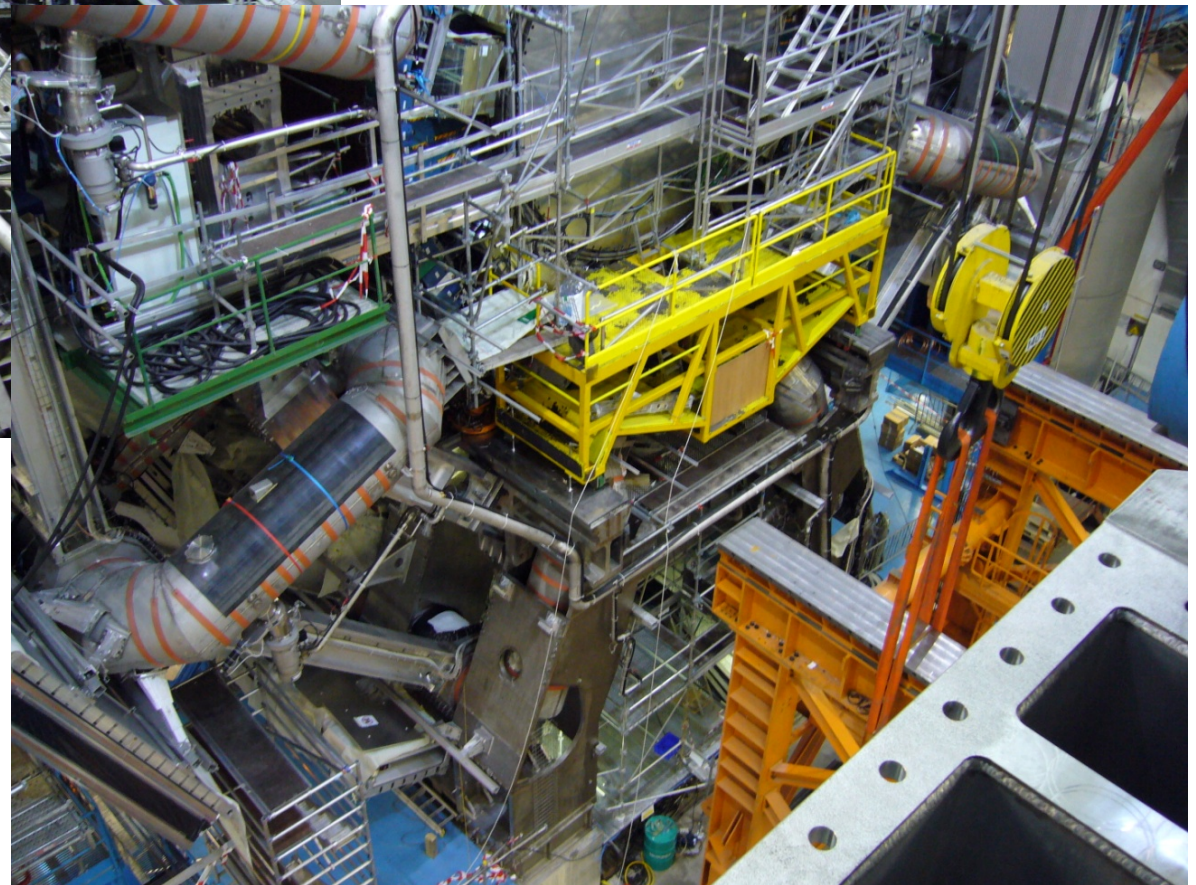
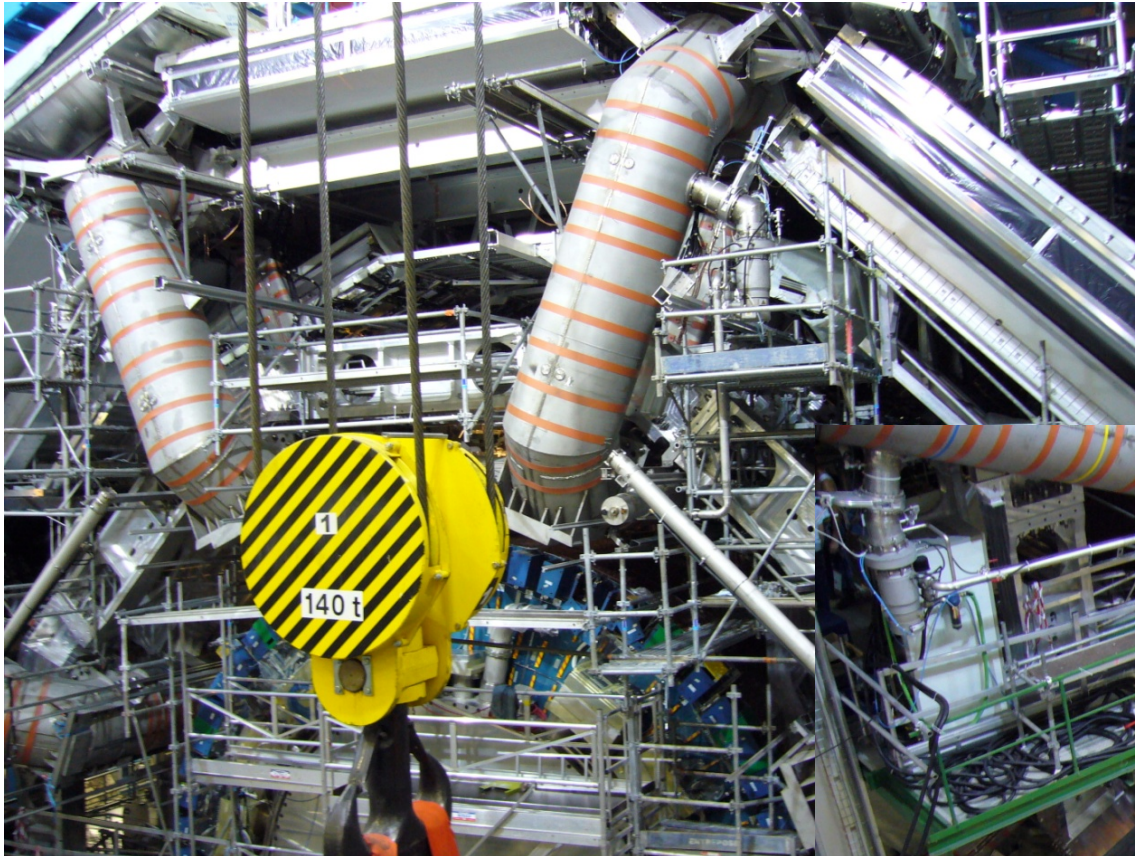


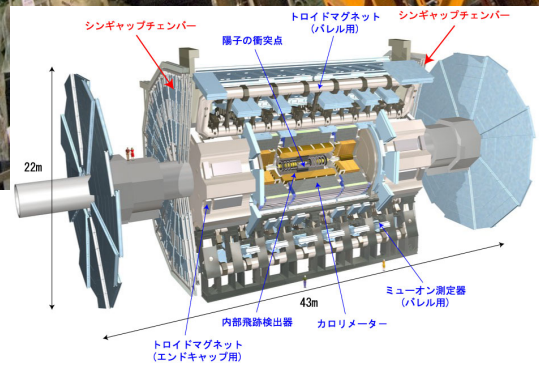
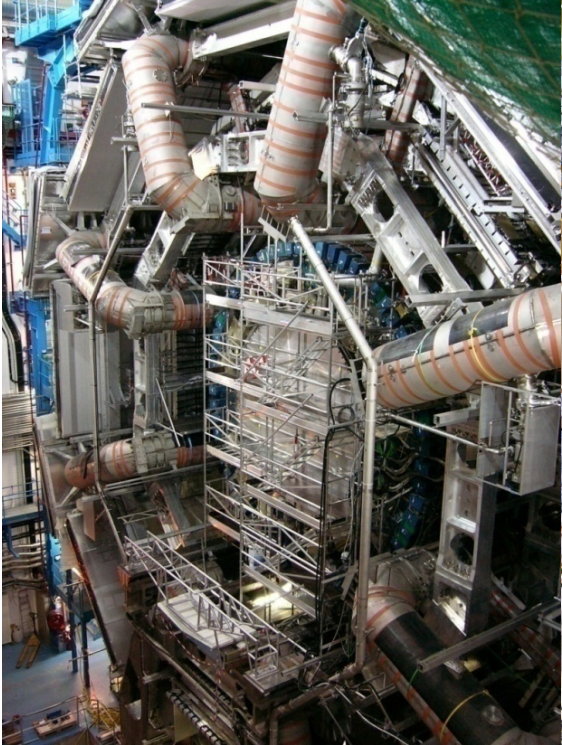
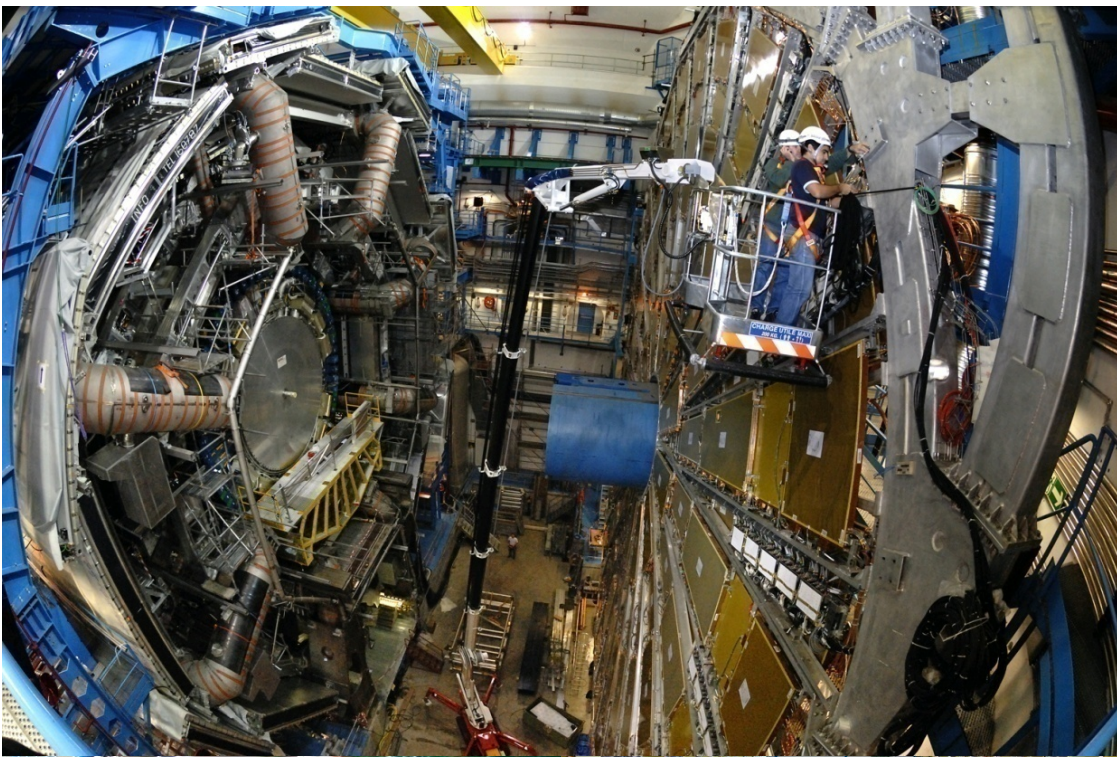
地下実験室で建設中のアトラス実験装置 2005年11月  
 (超伝導ソレノイド+中央カロリメターを中心に移動する直前)

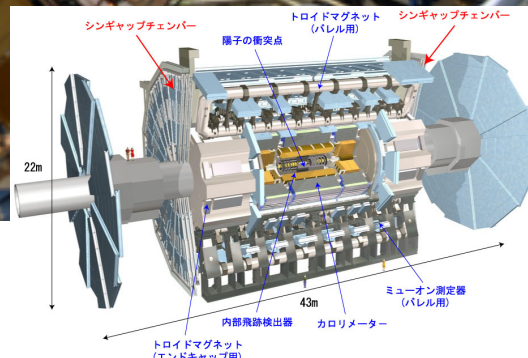
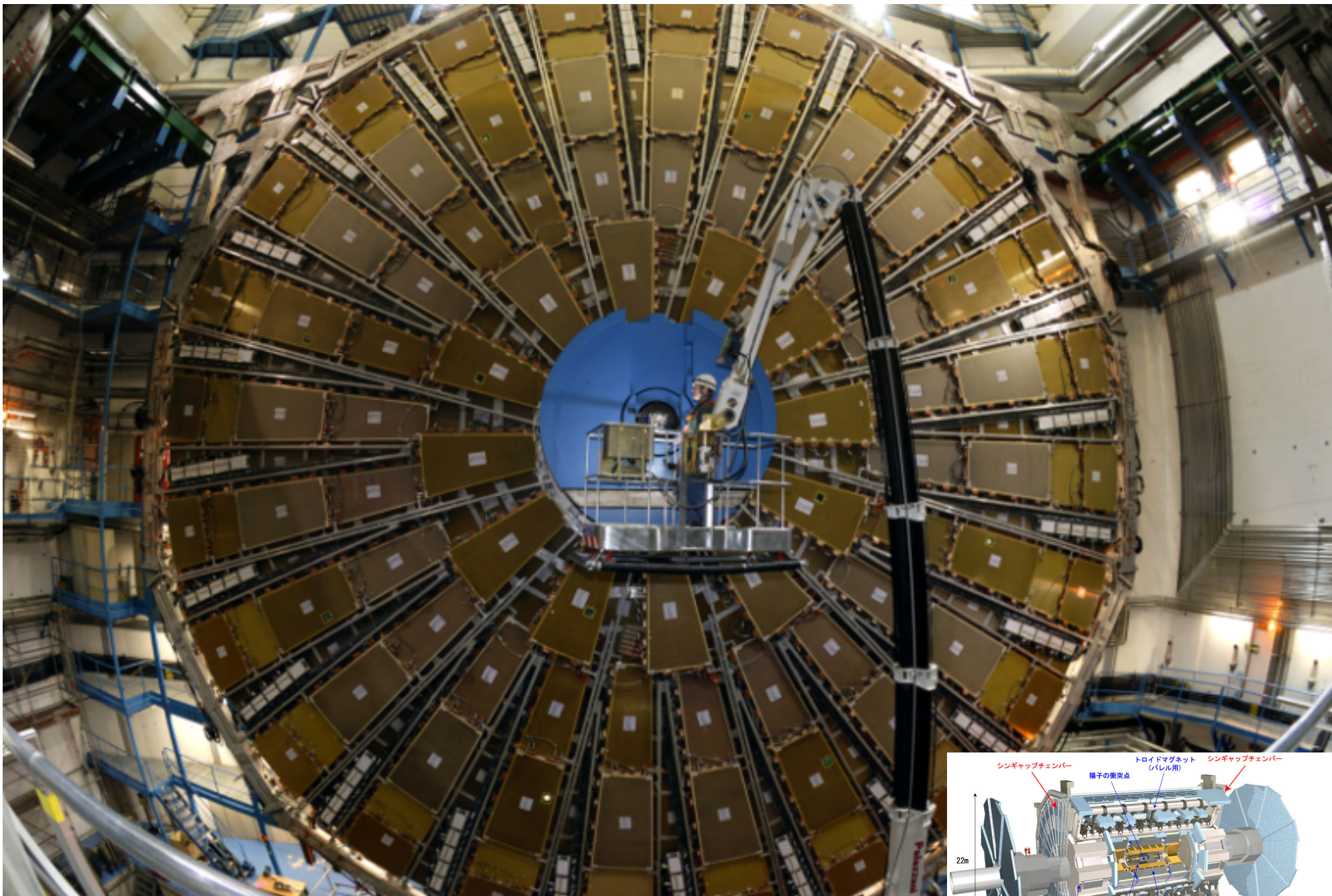
# ATLAS建設現場



検出器のパーツを地上から地下に備え  
つける大掛かりな建設工事



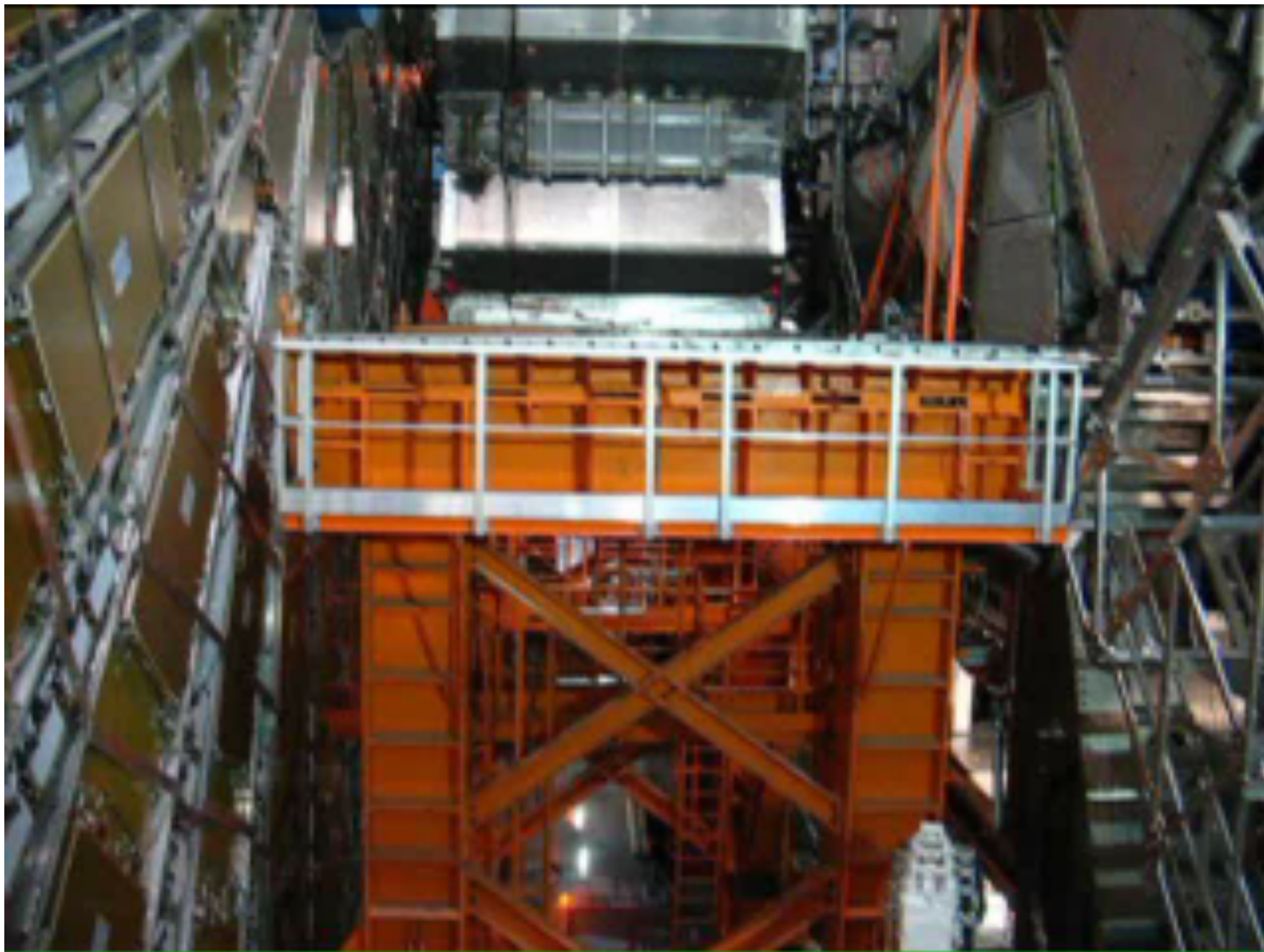






やる気とガッツを持つ若い研究者達が研究の主役





# ATLAS国際共同実験



## 最大規模の国際協力実験

**35** ヶ国  
**161** 大学・研究期間  
**1830** 研究者

**名古屋大学は2006年から参加**

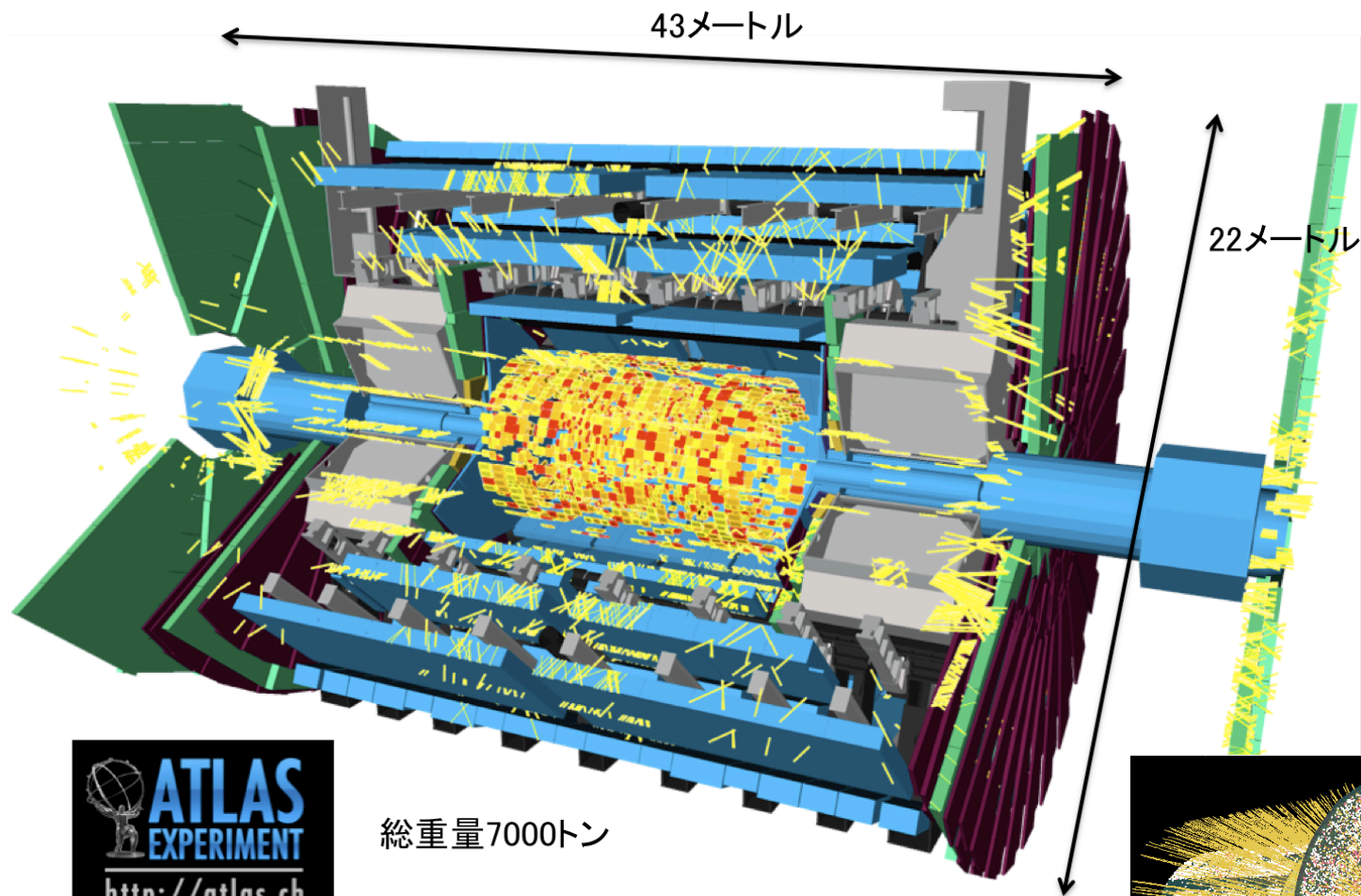


Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Ancey, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, HU Berlin, Bern, Birmingham, Bologna, Bonn, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Buenos Aires, Bucharest, Cambridge, Carleton, Casablanca/Rabat, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Clermont-Ferrand, Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, AGH UST Cracow, IFJ PAN Cracow, DESY, Dortmund, TU Dresden, JINR Dubna, Duke, Frascati, Freiburg, Geneva, Genoa, Giessen, Glasgow, LPSC Grenoble, Technion Haifa, Hampton, Harvard, Heidelberg, Hiroshima, Hiroshima IT, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Irvine UC, Istanbul Bogazici, **KEK, Kobe, Kyoto, Kyoto UE**, Lancaster, UN La Plata, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana, QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, Mainz, Manchester, Mannheim, CPPM Marseille, Massachusetts, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, Minsk NAS, Minsk NCPHEP, Montreal, McGill Montreal, FIAN Moscow, ITEP Moscow, MPhI Moscow, MSU Moscow, Munich LMU, MPI Munich, **Nagasaki IAS, Nagoya**, Naples, New Mexico, New York, Nijmegen, BINP Novosibirsk, Ohio SU, Okayama, Oklahoma, Oklahoma SU, Oregon, LAL Orsay, **Osaka**, Oslo, Oxford, Paris VI and VII, Pavia, Pennsylvania, Pisa, Pittsburgh, CAS Prague, CU Prague, TU Prague, IHEP Protvino, Ritsumeikan, UFRJ Rio de Janeiro, Rochester, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, DAPNIA Saclay, Santa Cruz UC, Sheffield, Shinshu, Siegen, Simon Fraser Burnaby, SLAC, Southern Methodist Dallas, NPI Petersburg, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney, AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, **Tokyo ICEPP, Tokyo MU**, Toronto, TRIUMF, **Tsukuba**, Tufts, Udine, Uppsala, Urbana UI, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Washington, Weizmann Rehovot, Wisconsin, Wuppertal, Yale, Yerevan

素粒子実験は、国際共同プロジェクトへ、  
同じ興味を持った世界中の研究者が競争・協力し基礎科学を探求  
最先端の素粒子実験を愉しみながら、国際社会交流にも貢献！  
→ 基礎科学のパイオニア

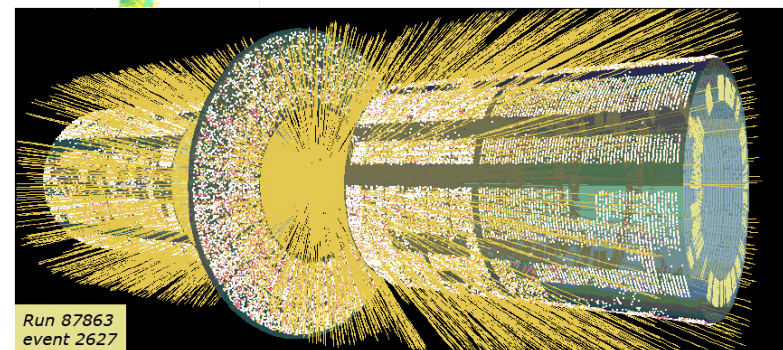


# 陽子の周回を捉えた！



総重量7000トン

first beam event seen in ATLAS



陽子の通過をATLAS検出器でデータとして捉えた！！

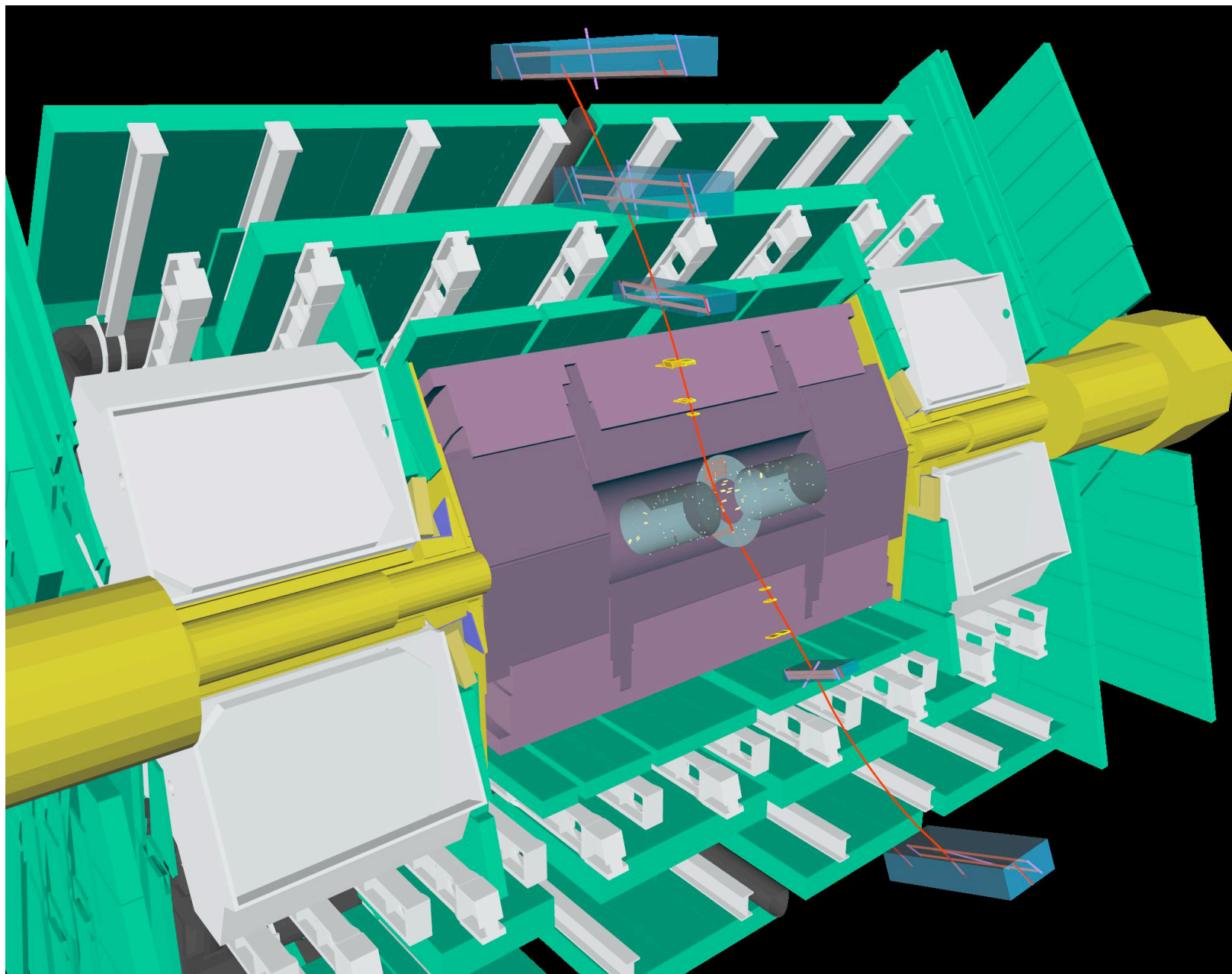
# 2008年9月19日：加速器事故



超伝導ケーブル接続部で電気抵抗が増加、発熱し放電。  
液体ヘリウムが真空容器に漏れだして気化し、圧力が急上昇した。  
53台のマグネットを地上に取り出し修理

**2009年10月に実験再開予定**

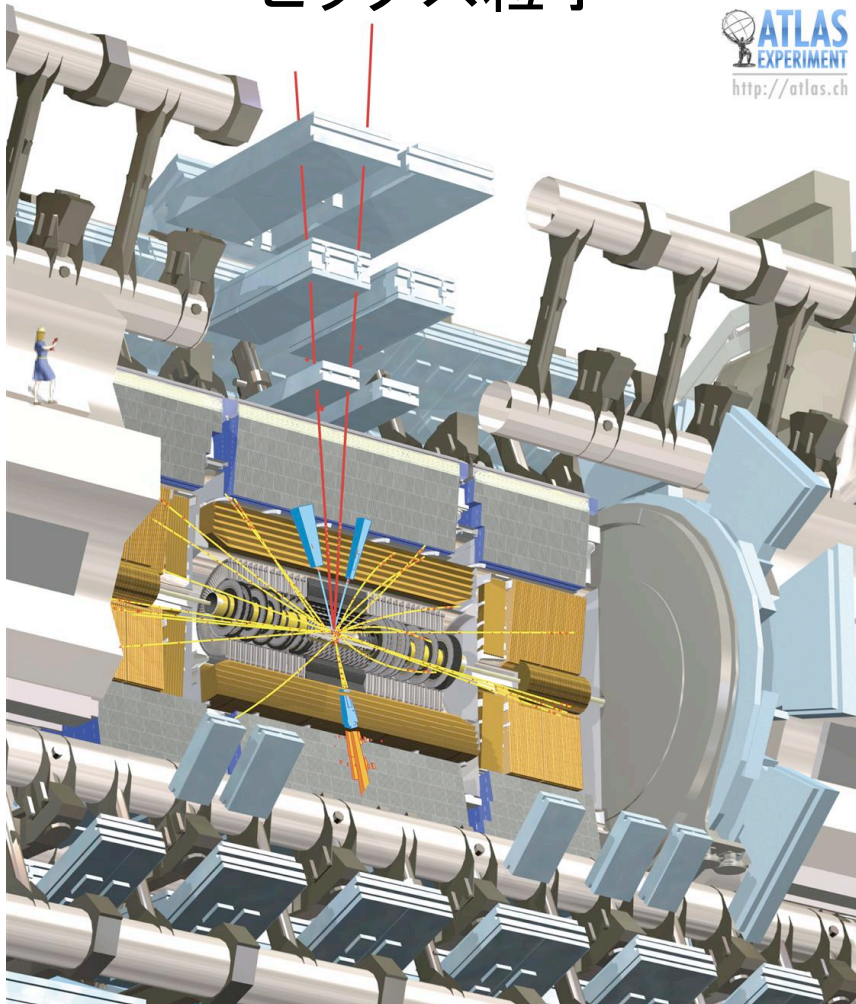
# 宇宙線を捉える



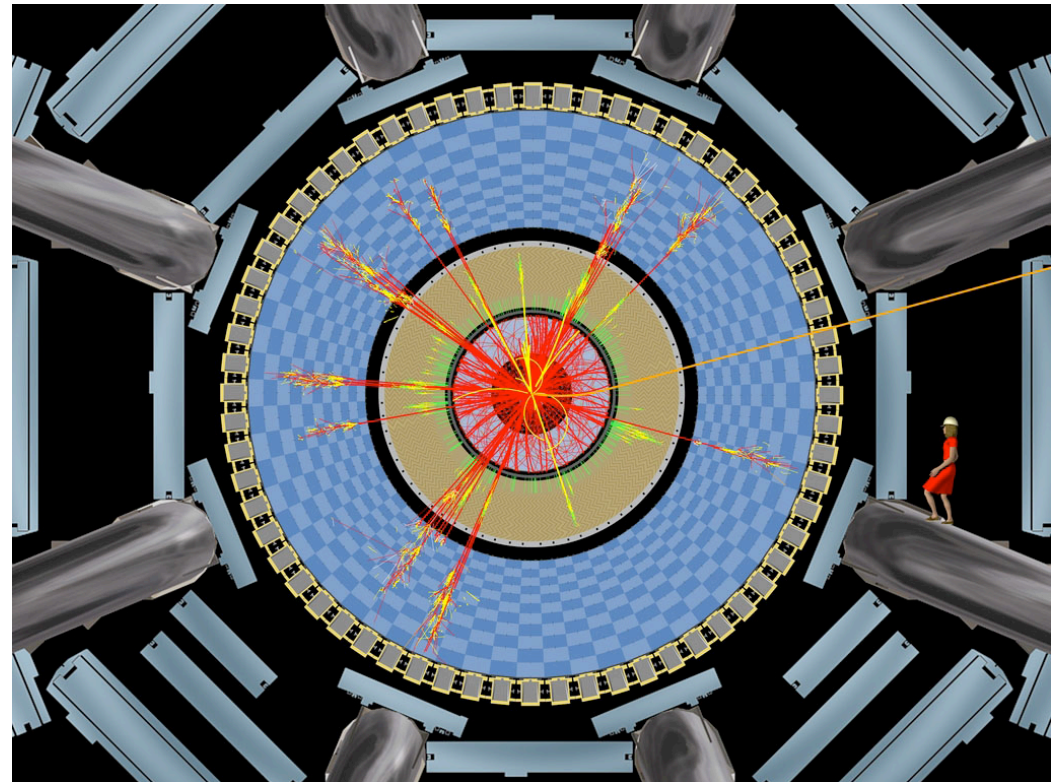
# 未来のイベントを先取り



## ヒッグス粒子



## 余剰次元による ブラックホール



間もなく、自然がこのようなイベントを生成する！！

**素粒子物理学の革命前夜**





小林・益川理論を超えて、、、

LHC実験が始動した。

LHC実験は、

ヒッグス粒子を発見し、さらに、  
超対称性や余剰次元など、新しい素粒子を開拓

する、究極の素粒子実験装置であることは間違いない

今まさに、

**素粒子物理学の革命前夜**

である！