



東京大学  
素粒子物理国際研究センター  
International Center for Elementary Particle Physics  
The University of Tokyo

# 学部生向け特別セミナー

## 最先端「加速器素粒子実験」を知ろう！

**CERN** における国際協力加速器実験 **LHC-ATLAS** 実験の  
スペシャリストである教員による連続特別セミナー&座談会

素粒子物理、物理実験の面白さ・難しさ、加速器実験、ビッグサイエンス、計測技術、  
高速データ処理回路、データ解析、計算機科学、機械学習、量子コンピューティング等  
の**ホットピック**を最前線で活躍する研究者から直接聞けるチャンスです。

学部生・大学院生・学内外問わず大歓迎

事前登録が必要です。素粒子物理国際センターのウェブページより詳細をご確認ください。

<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/>

日時： **6月8日 (月), 6月12日 (金) 5限目** (16:50-18:35)

場所：オンラインでの開催となります。事前登録により接続方法の情報をお知らせします。

内容：

6月8日	「ヒッグス粒子の物理」 「超対称性粒子と暗黒物質」	田中純一 (素粒子物理国際研究センター・教授) 澤田龍 (素粒子物理国際研究センター・准教授)
6月12日	「加速器・検出器の最先端技術」 「LHC で探る余剰次元」	石野雅也 (素粒子物理国際研究センター・教授) 奥村恭幸 (素粒子物理国際研究センター・准教授)



石野 雅也 東大・素粒子センター

( 2020.06.12 )



3部構成：

- 16:50-17:30 石野：加速器・検出器の最先端技術
- 17:30-18:10 奥村： LHCで探る余剰次元
- 18:10-18:40 石野・奥村・澤田・田中 ざっくばらんにお話しましょう  
(大学院生の生活や研究など何でも聞いてください)

# 自己紹介

1970 : 文京区生まれ → 所沢育ち



1987 : 高校2年生、「ご冗談でしょう、**ファインマンさん**」(岩波)をよんで「物理」、特に実験をやってみたいと思った



1993 : **KEK** (つくば) で 原子核の実験  
→ ドクター (京大)



2000 : **CERN**(ジュネーブ)で **LHCの実験** → 現在

2002 ~ 2011 : フランスの住人



2011 - 2015 : 京大

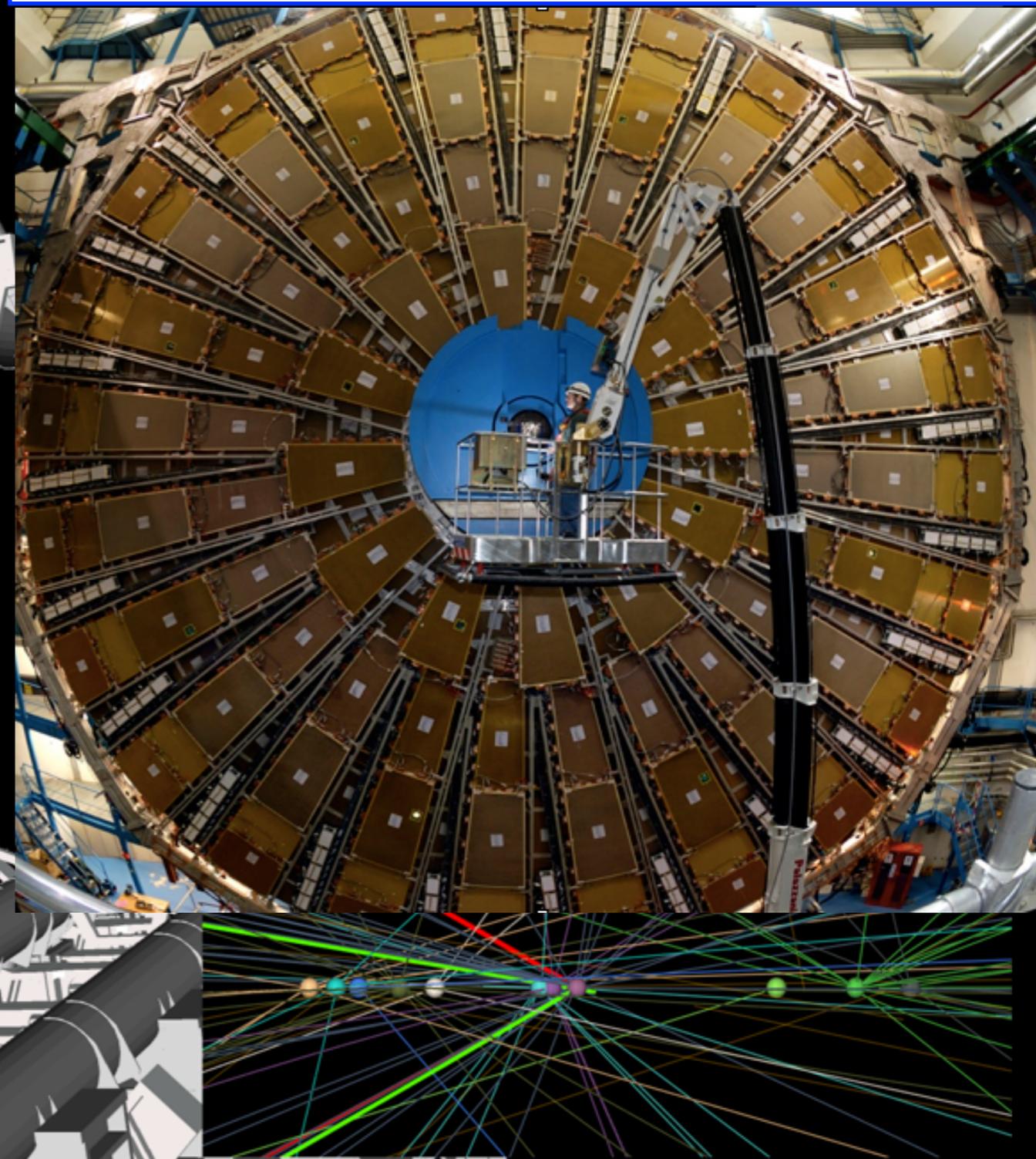
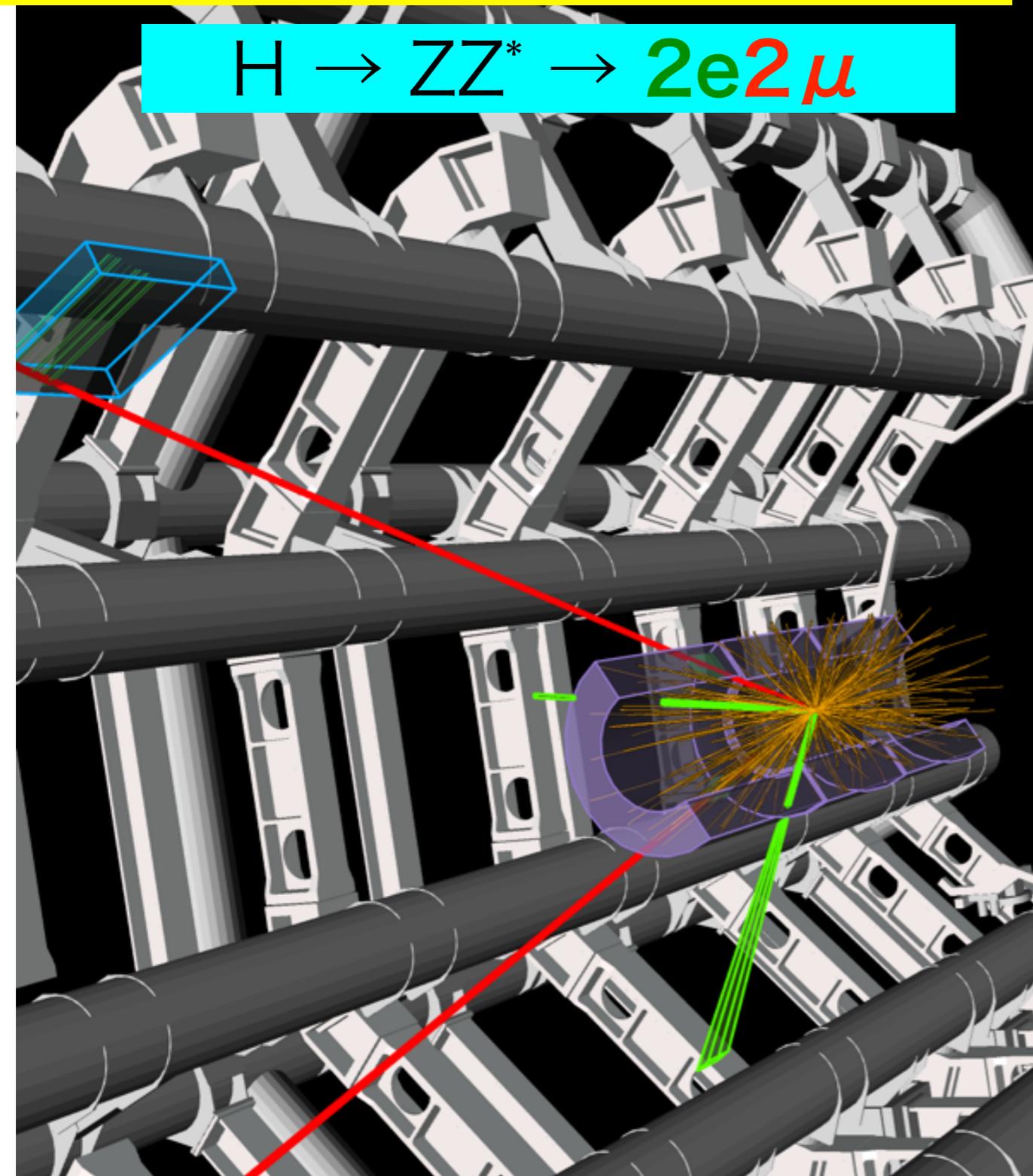
2016 - : 素粒子センター



$$m_{2e2\mu} = 123.9 \text{ GeV}$$

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2e2\mu$$

$$p_T(e, e, \mu, \mu) = 18.7, 76 \text{ GeV}, 19.6, 7.9 \text{ GeV}$$
$$m(e^+e^-) = 87.9 \text{ GeV}, m(\mu^+\mu^-) = 19.6 \text{ GeV}$$



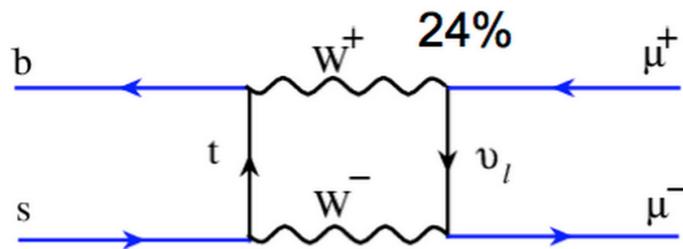
測定器を建設した時の仲間たち：～50人



# ① Energy Frontier

LHC : **14TeV** ( →33TeV →100TeV )

人工的に作って、直接見る (+ ②)



## ② Intensity Frontier

LHC, J-Parc, B-Factory, FNAL

- $\Delta E \cdot \Delta t \sim h$  : ループの利用
- ニュートリノの物理・陽子崩壊

稀におこる崩壊 (=量子力学のズルの法則) を測定  $\Rightarrow$  大きな  $\Delta E$  の効果を捉える



## ③ Cosmic Frontier

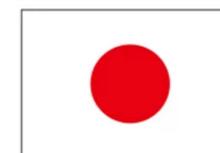
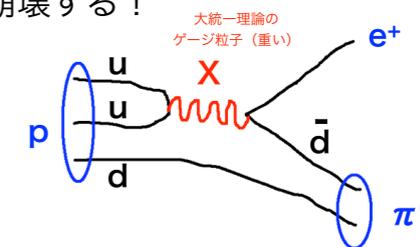
CMB, Dark Energy, ...

遠く (=初期宇宙) を直接見る

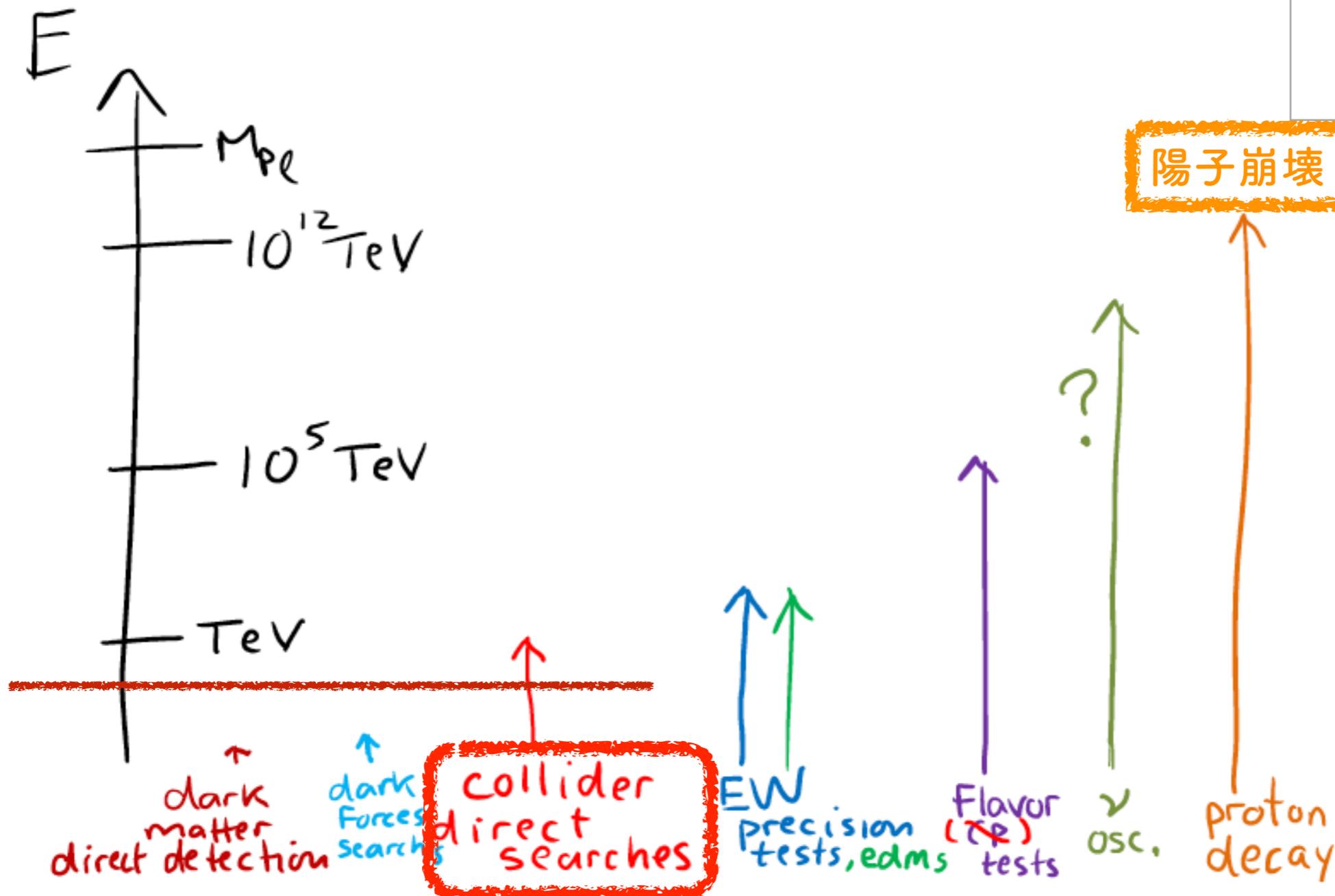
「いけるところまでしかいけない」が、  
人工的に作って・見る **Energy Frontier** は王道だ

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim h$$

陽子が崩壊する！

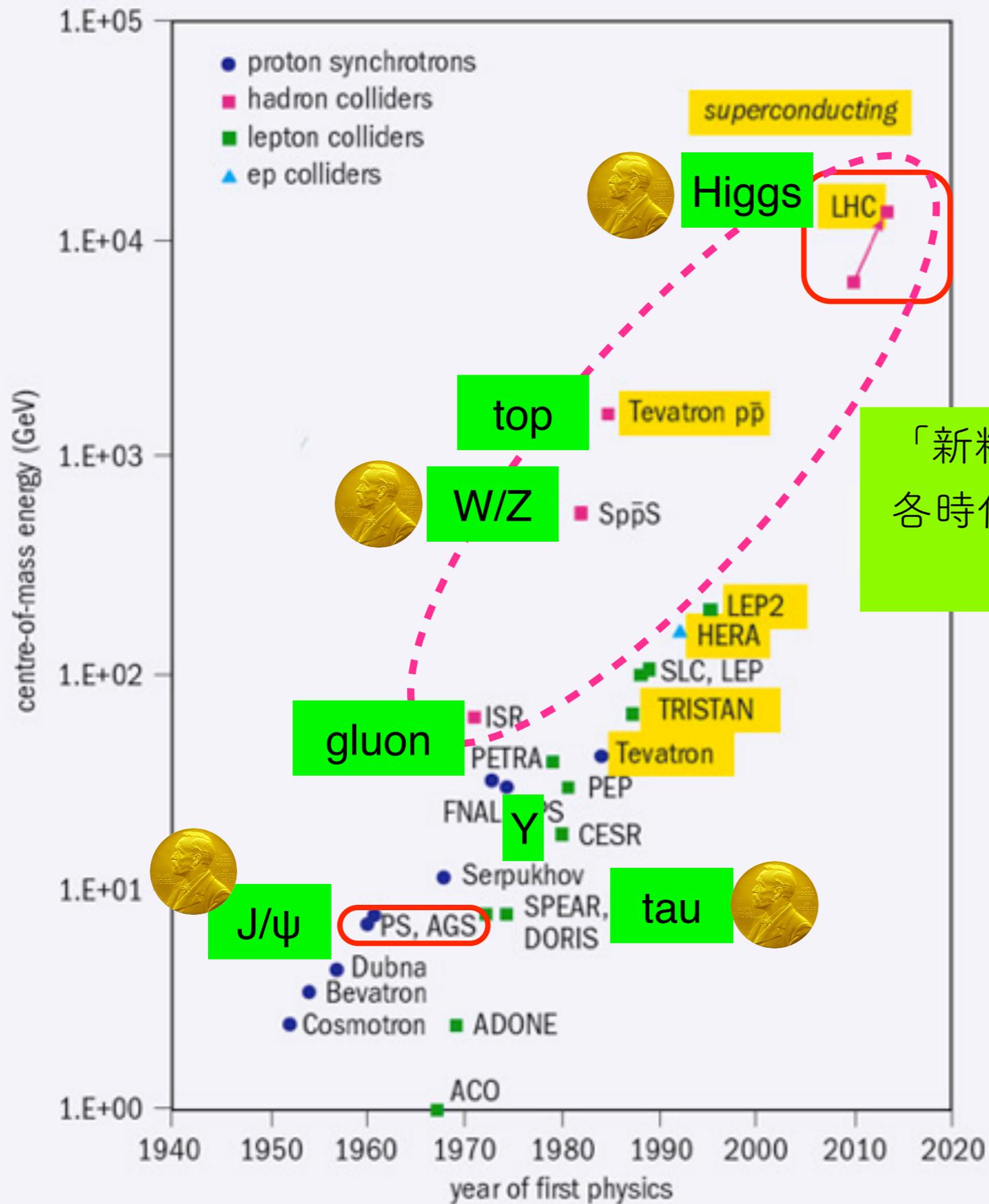


アプローチでできる現象のエネルギースケール



LHCでの直接探索

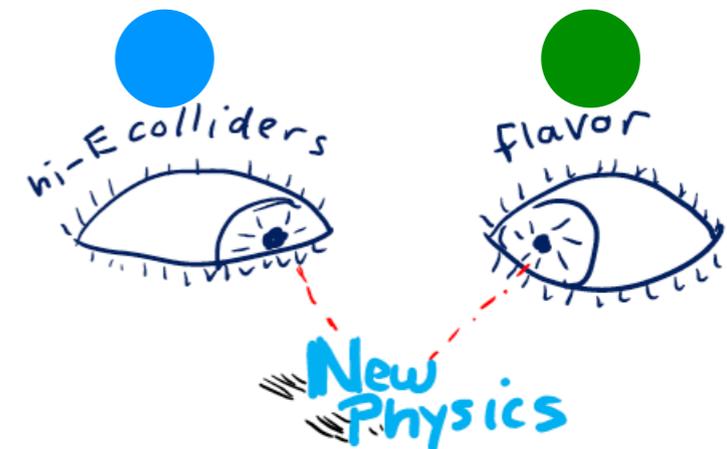
Energy Frontier



# LHC

7 → 8 → **13** → 14 TeV

「新粒子」の直接発見をリードしてきたのが各時代の高エネルギーフロンティアマシンであるという事実

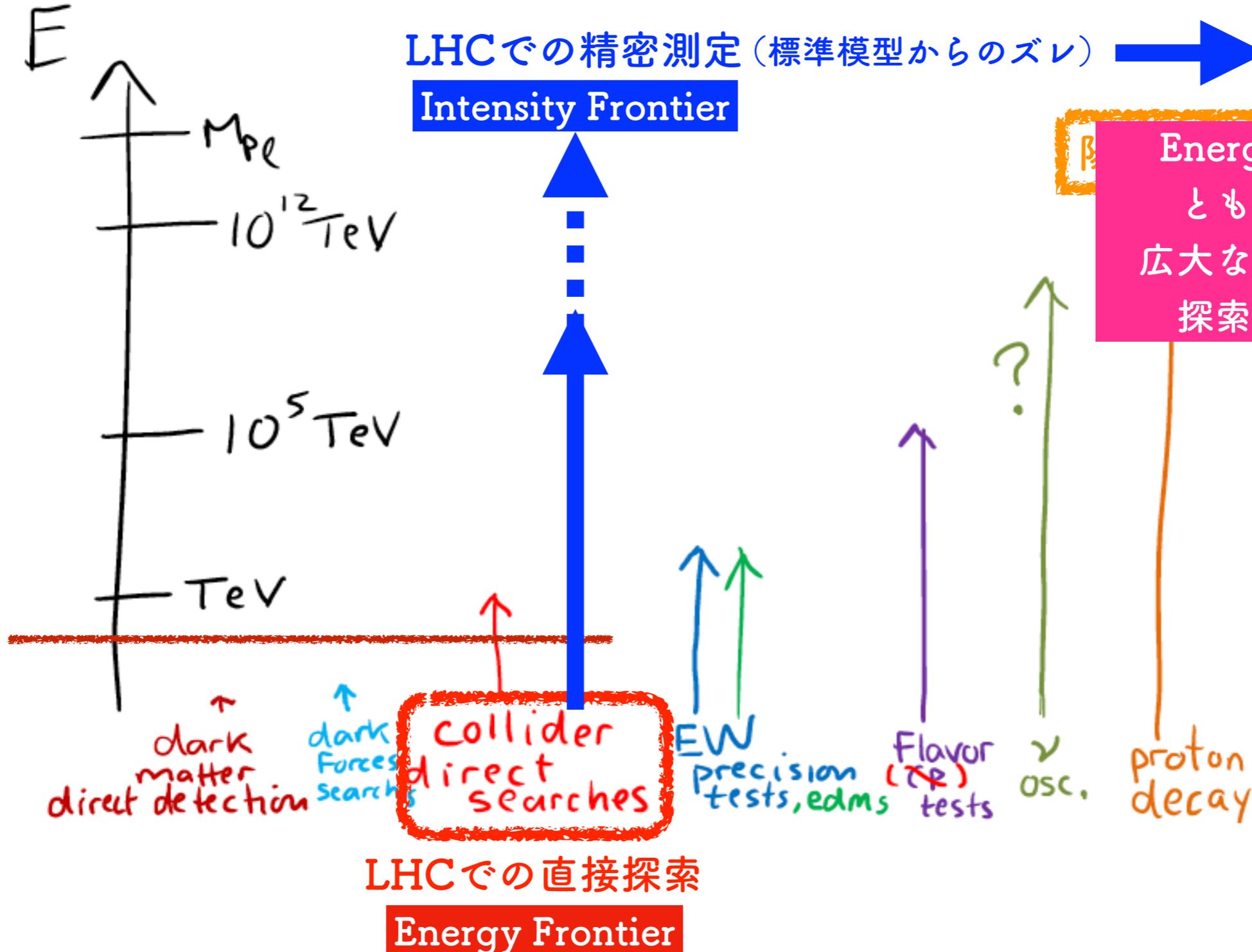


R.Sandrum

Flavor expt. is tool for discovery & understanding of New Physics.

「いけるところまでしかいけない」が、  
人工的に作って・見る **Energy Frontier** は王道だ

アプローチできる現象のエネルギースケール



6月12日 「加速器・検出器の最先端技術」 石野雅也 (素粒子物理国際研究センター・教授)

## LHC加速器・ATLAS測定器

どちらも最先端技術の集合体であるものの  
原理的には なんら理解困難なものではない

ちょっとわかるとオモロイことがいっぱい

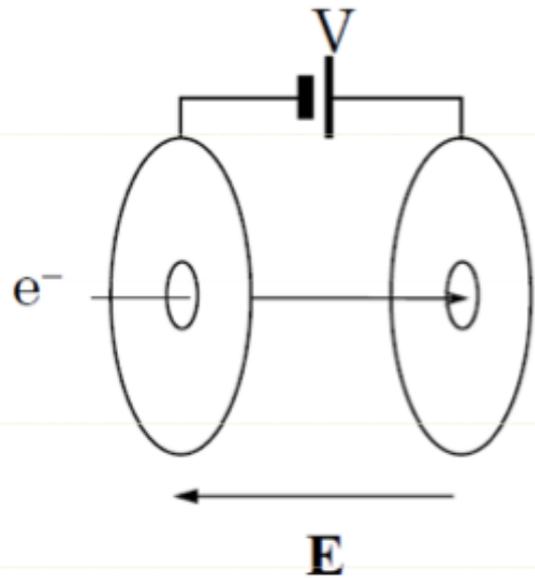
... というのを共有できると良いなと思います

# 加速器・LHC

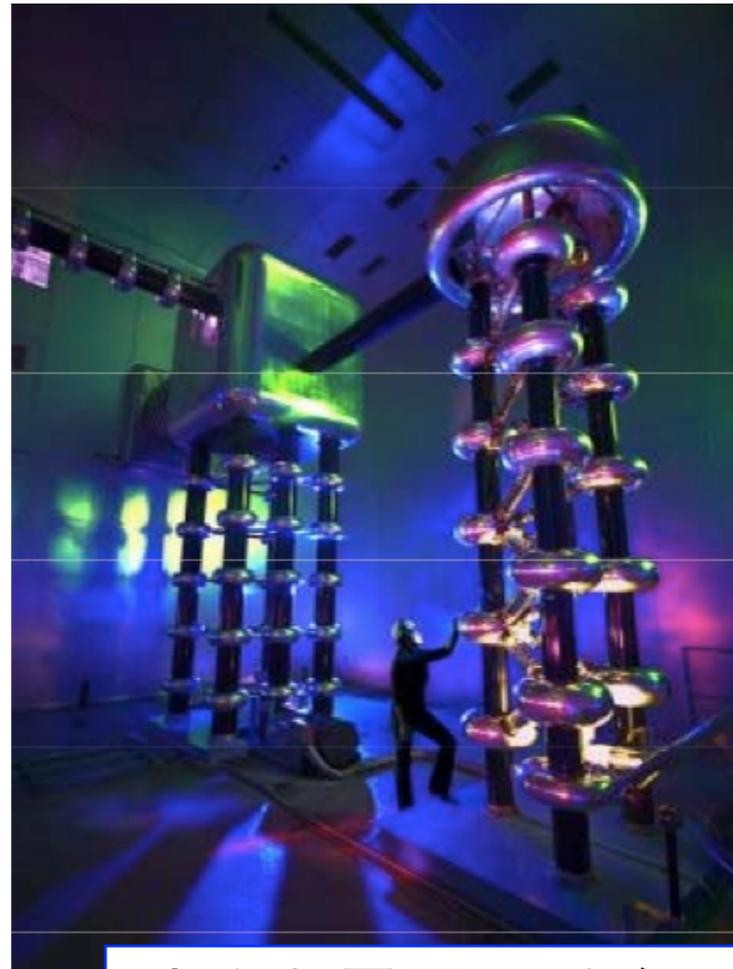
---

## 基本原理

荷電粒子に電場をかける

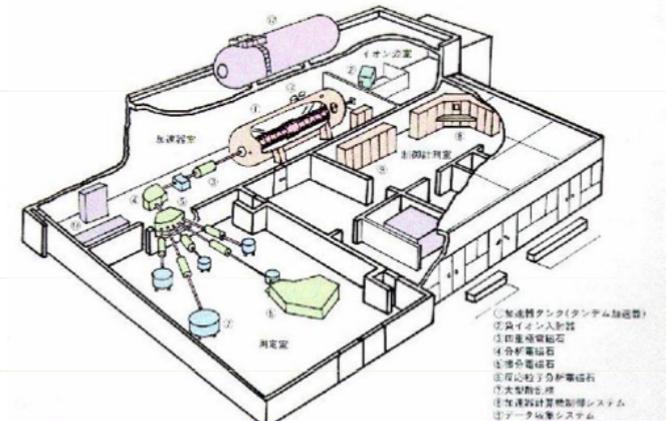


電位差 :  $n$  [V] で  
 電荷  $e$  の粒子を加速  
 →  $n$  [eV]



大きな電圧[V] を得る  
 → Cockroft-Walton

## 京都大学タンデム加速器



**8MV = 8,000,000[V]**

別の原理で 大きな電圧[V]  
 Van De Graaf タンデム型

1 発で MV → MeV 程度が限度  
 → 複数回の加速 : まわせ !!

betatron (1923)

cyclotron (1929)

synchrotron (1952)  
 強収束タイプ AGS (1960)

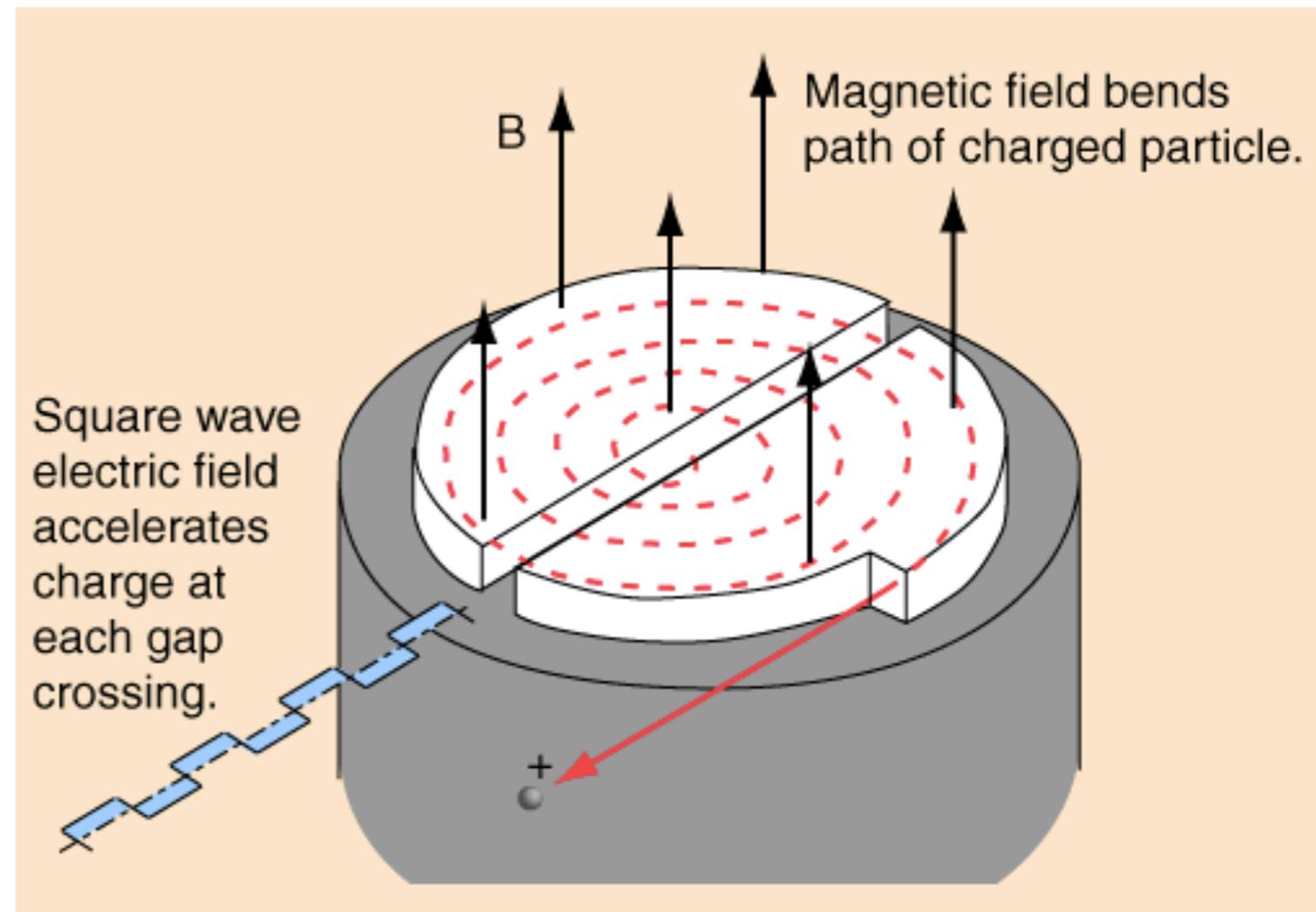
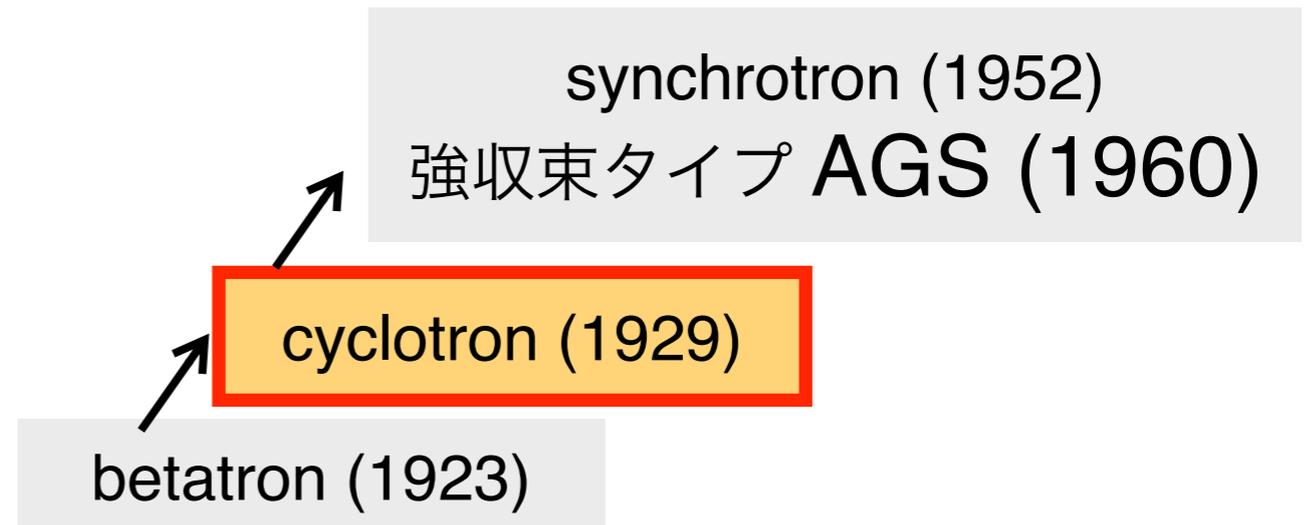
→ 複数回の加速：  
まわして、つみあげる !!

$$\tau = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \quad : \text{全部定数}$$

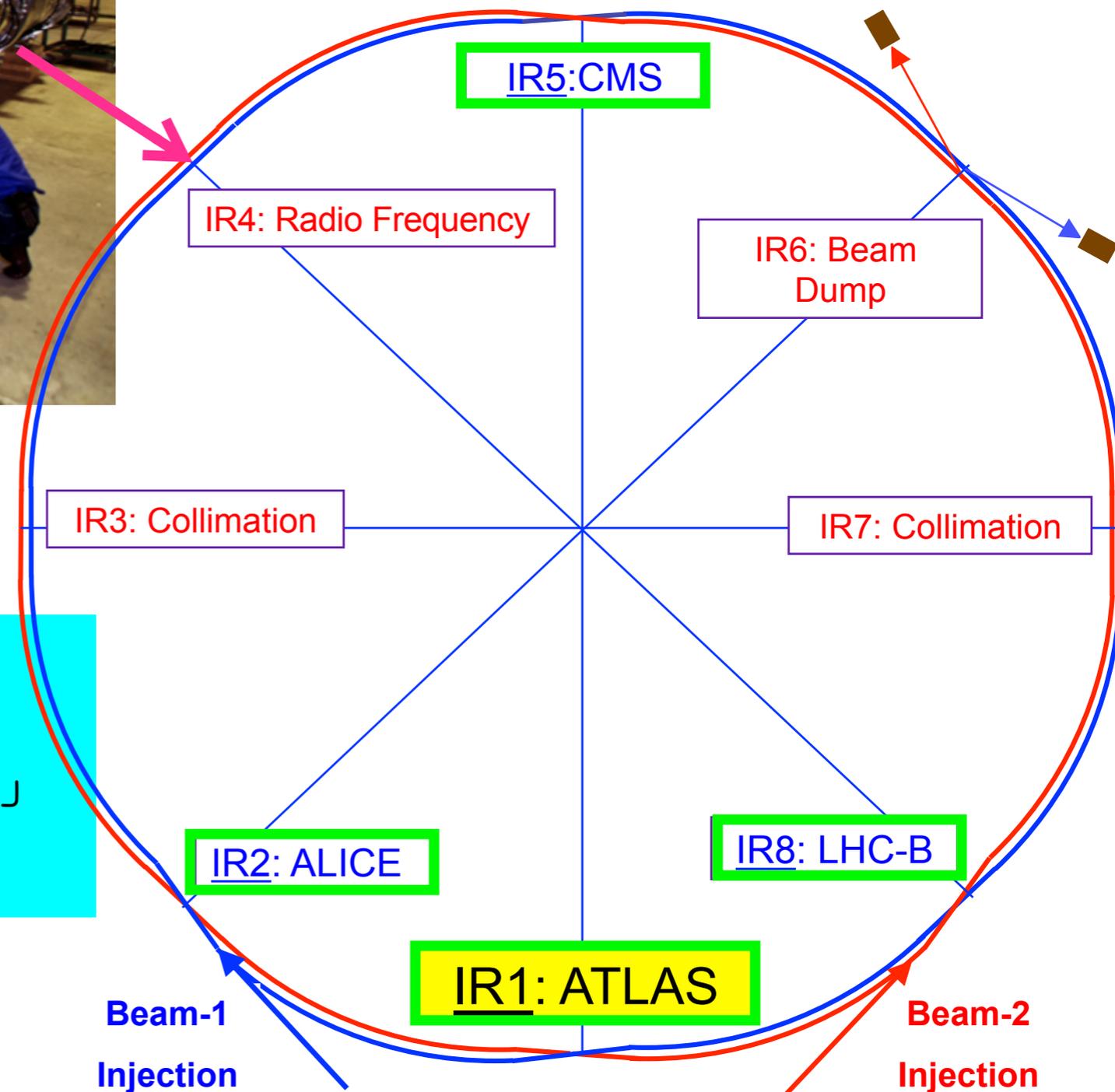
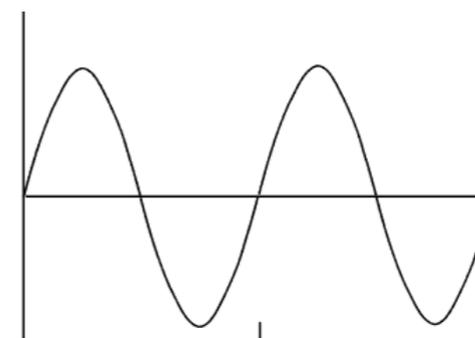
$$m \frac{v^2}{r} = qvB \rightarrow \frac{r}{v} = \frac{m}{qB}$$

磁場一定・電場を周期 $\tau$ で反転  
古典力学の範囲で  $\tau = \text{constant}$

磁石のサイズによる限界に  
ぶちあたる

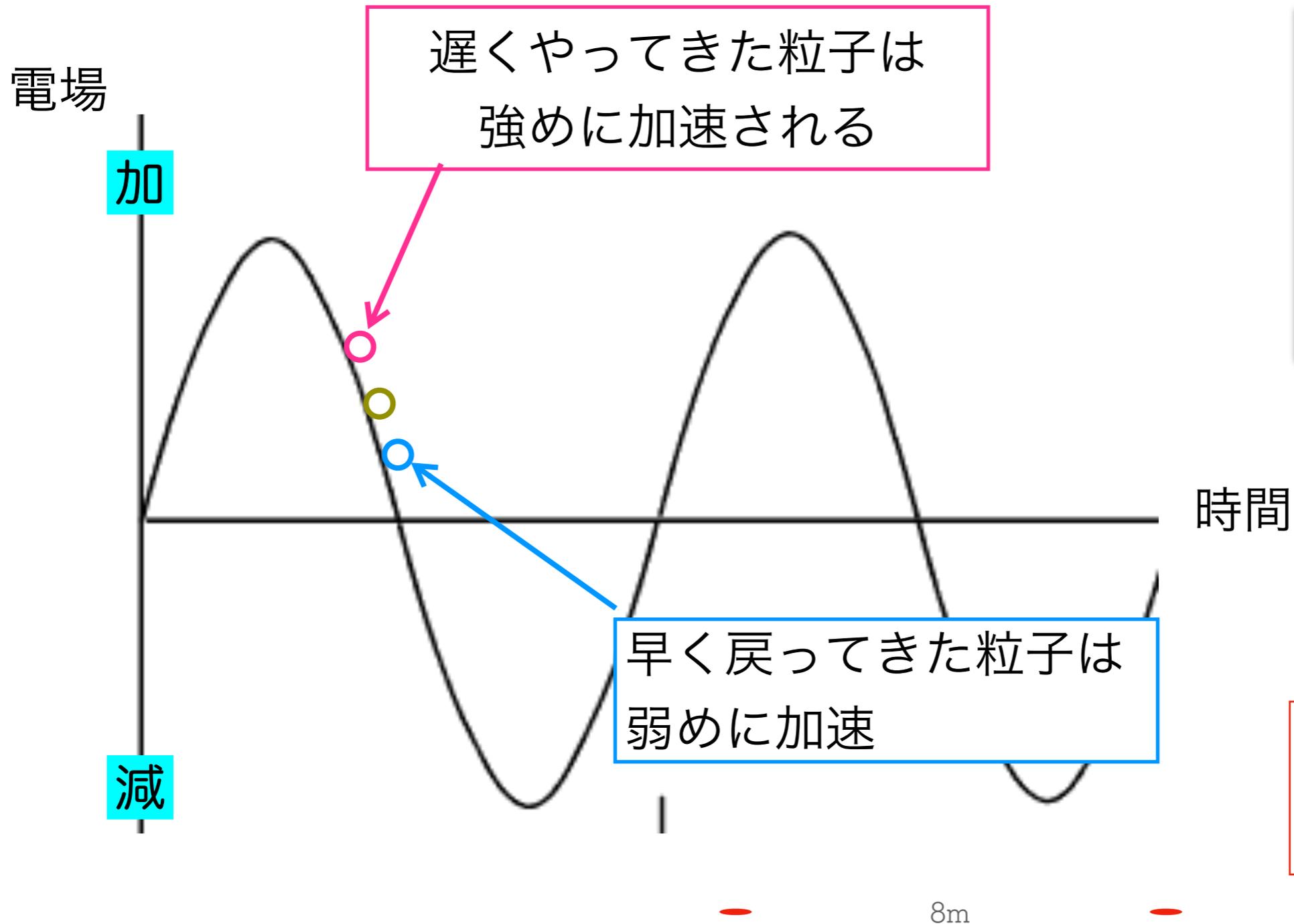


## シンクロトロン (Synchrotron)



- 軌道 (= R) は不変
- Beam Energy の増加に「シンクロ」  
⇒ Beam軌道を曲げる磁場を強く

## 時間変動する電場で、タイミングよくビームを加速する

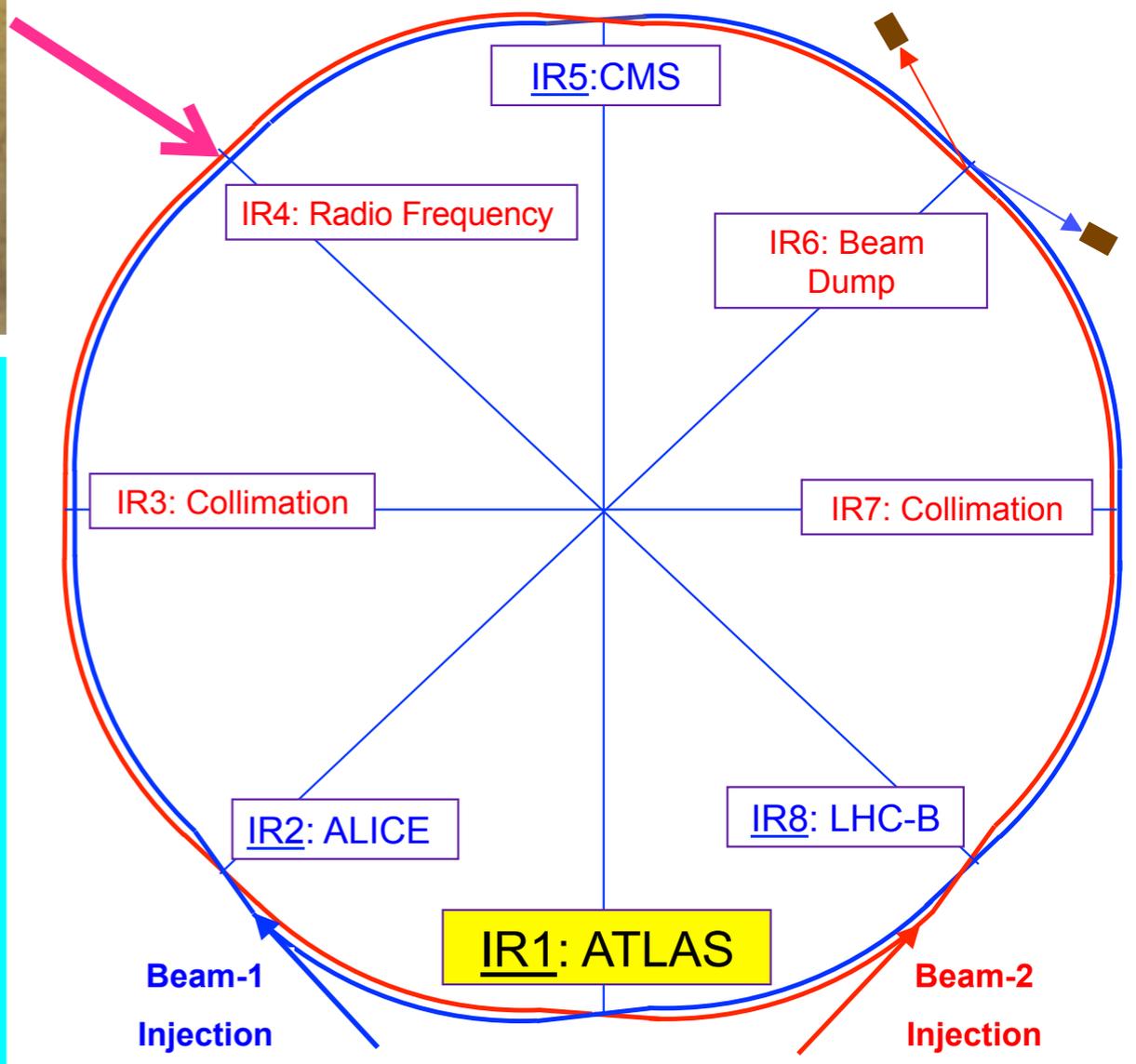


Beamは連続ではなく、  
「かたまり」構造をもつ  
バンチと呼ぶ

位相安定性

8mごとに、長さ10cmの針が飛んでいる感じ。  
針が10<sup>11</sup>個 (= 1000億) 陽子でできている

# Top Energyに昇りつめるまでにかかる時間?



## RF : パラメーター

400MHz ( p-p : 8~16MV )

1 秒間に 11245回加速

平均 : 485keV エネルギーをえる

Q : 何分で 0.45TeV から 6.5TeV に到達 ?

1秒間に11245回加速

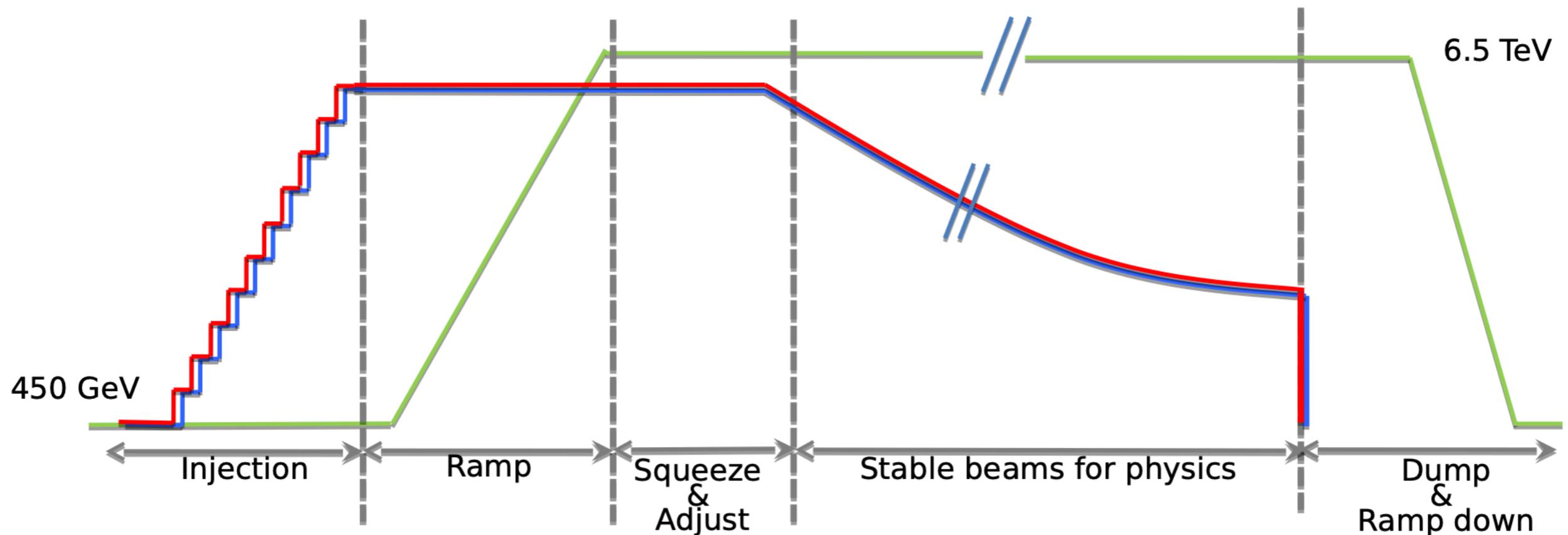
平均：485keV エネルギーをえる

Q：何分で0.45TeV から6.5TeVに到達？

$$(6.5 - 0.45) \times 10^{12} \div (485 \times 10^3 \times 11245) \div 60$$

⇒ ~18.5分：

たしかに、20分くらいかけてゆっくりとエネルギーを6.5TeVまで増加



Typical times for a good cycle in 2018:

~1 hour

**20min**

1/2 hour

~12 hours

~1 hour

大規模な超伝導技術の導入



高エネルギー・高輝度へ

曲率半径  $\rho$  は？

$$P[\text{GeV}/c] = 0.3 \times B[\text{T}] \times \rho[\text{m}]$$

$P=7\text{TeV}/c$  に到達したい → 必要な磁場？

$$F = q \cdot (v \times B)$$

トンネルは再利用  
**18km(曲部) + 9km(直線)**

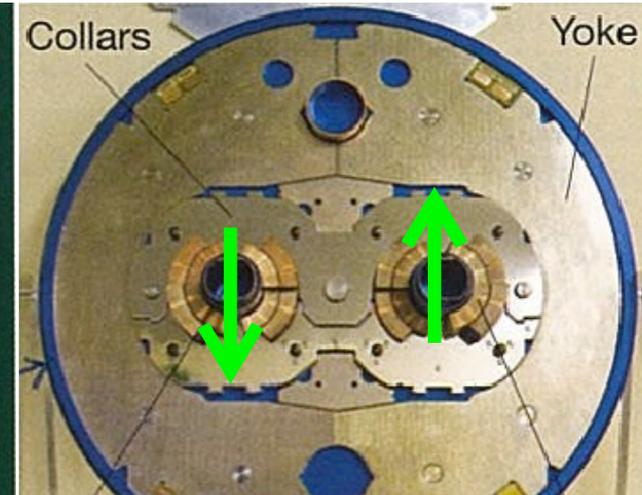
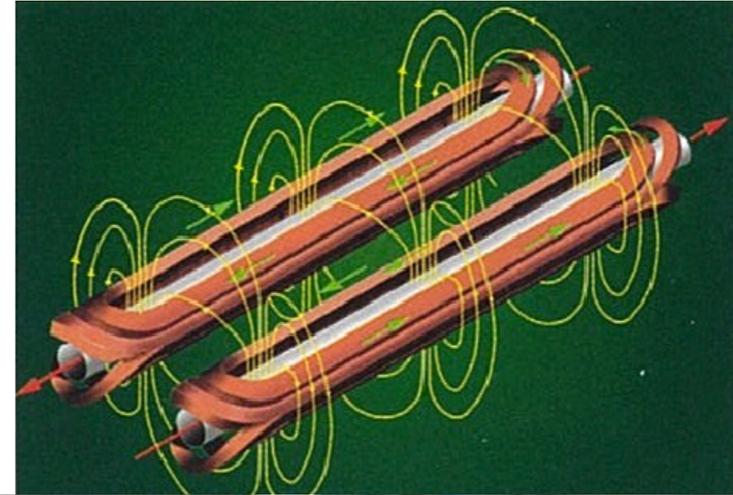
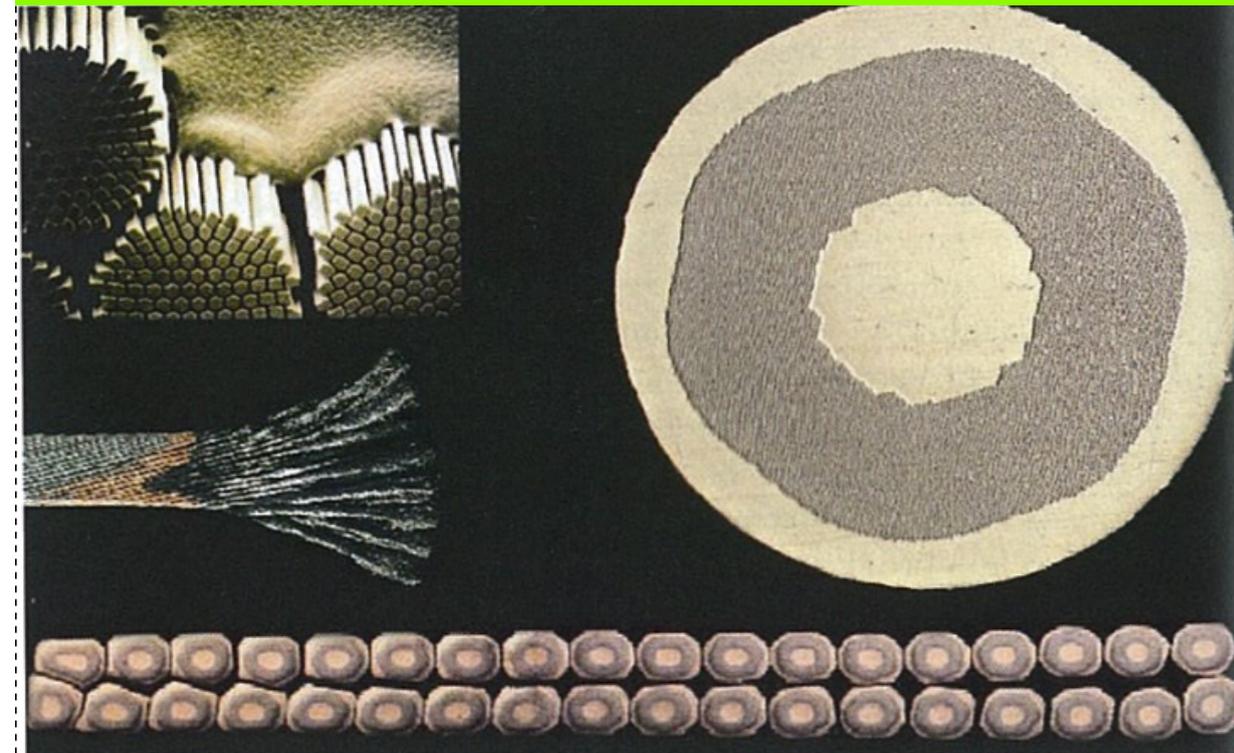
$$\rho = 2,860\text{m}$$

$$B \sim 8.2[\text{T}] \quad (8.3[\text{T}])$$

**超伝導磁石が唯一の解**

LHC : 加速より、曲げる方が到達エネルギー限界を決める

Nb-Ti 超伝導線断面図

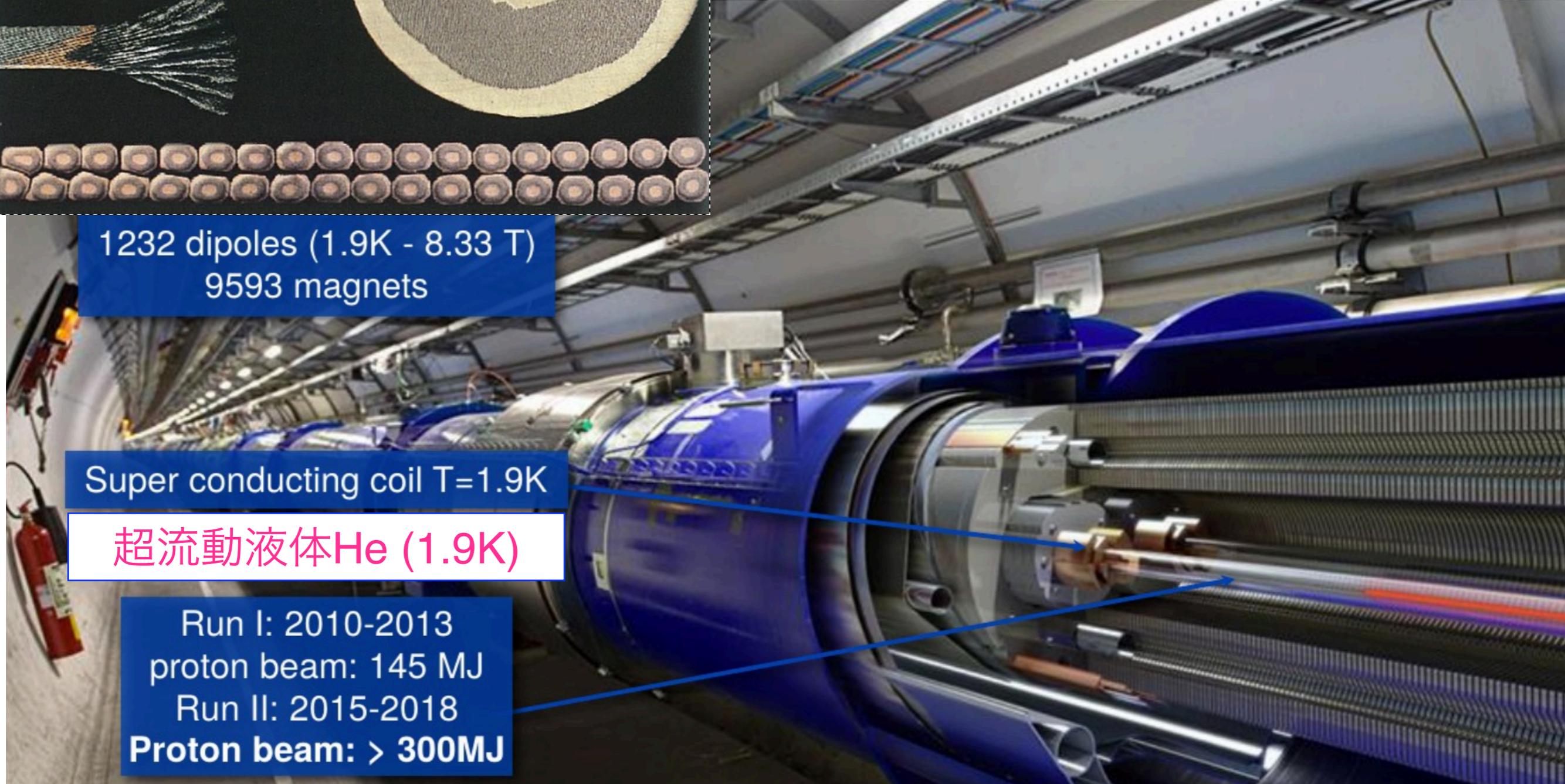


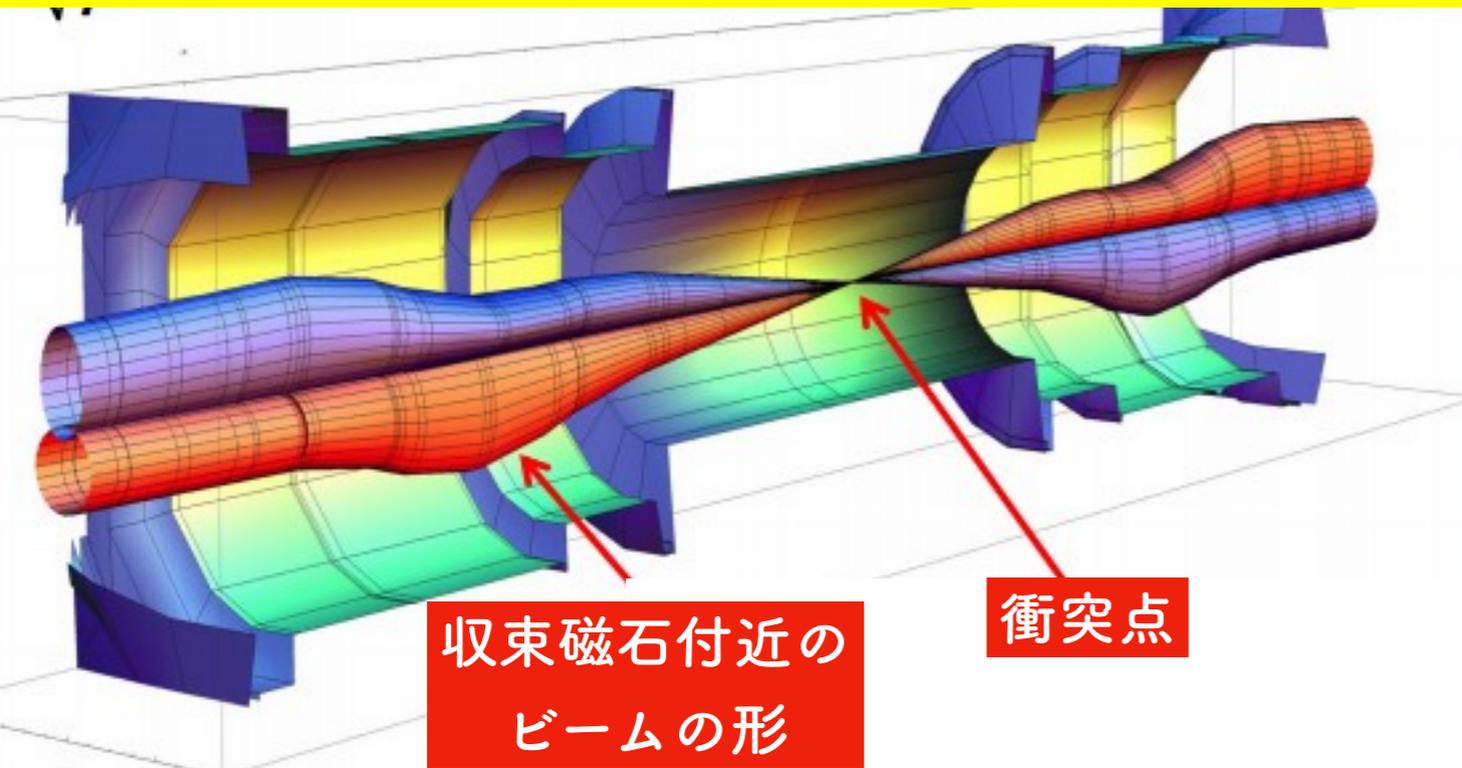
1232 dipoles (1.9K - 8.33 T)  
9593 magnets

Super conducting coil T=1.9K

超流動液体He (1.9K)

Run I: 2010-2013  
proton beam: 145 MJ  
Run II: 2015-2018  
Proton beam: > 300MJ





- Beamの収束は "Triplet Magnet" (4重極) x 3でおこなう
- 実サイズは  $\sigma_{xy} \sim 15 \mu\text{m}$  (長さ:  $\sim 10\text{cm}$ )
- Beamの絞り具合:  $1/\beta^* \propto$  瞬間輝度 (ルミノシティ)
  - 元来のデザイン:  $\beta^* = 55 \text{ cm}$
  - 2017年:  $\beta^* = 40 \text{ cm}$
  - 2018年:  $\beta^* = 30 \text{ cm} \Rightarrow 25 \text{ cm}$
  - Run-3 (2021 - 2024):  $\sim 100\text{cm} \Rightarrow 28\text{cm}$

1周に  
何バンチ?

1バンチに陽子が  
いくつ含まれる?

1秒間に11253周

$$L = \frac{f_{rev} \cdot n_b \cdot N_b^2 \cdot \gamma_r}{4\pi \cdot \epsilon_n \cdot \beta^*} \cdot F$$

並行性が高く細いビーム

絞り具合

$$L = \frac{11253 \cdot 2544 \cdot (1.15 \times 10^{11})^2 \cdot (6500/0.938)}{4\pi \cdot 3\mu m \cdot 0.3m} \cdot 0.941$$

L=瞬間輝度

$$= 2.2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

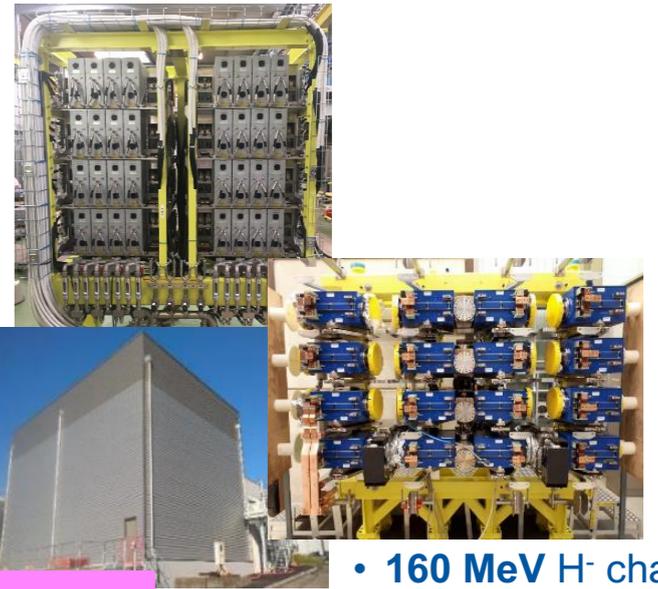
1秒間にどれだけの断面積の物理過程を叩き出せるか?

• Higgs  $\sigma$  :  $\sim 50 \text{ pb} (= 50 \times 10^{-36} \text{ cm}^2)$

▶  $L \cdot \sigma \sim 100 \times 10^{-2} / \text{sec} = \mathbf{1 \text{ Hz}}$

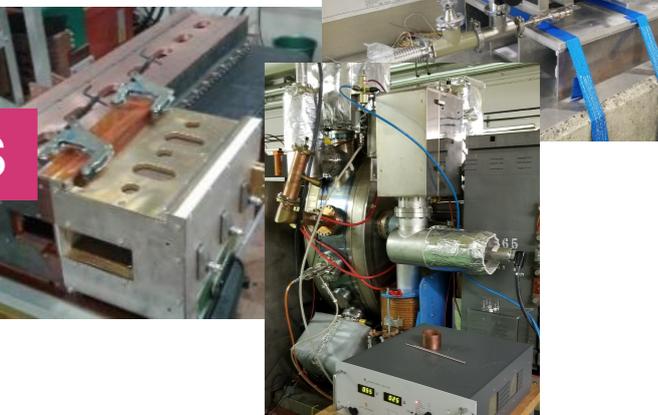
もっと「ルミ」を（もっと光を）

# Long-Shutdown 2 (2019-2020-(2021))



- 160 MeV H<sup>-</sup> charge exchange injection
- Acceleration to **2 GeV** with new main power

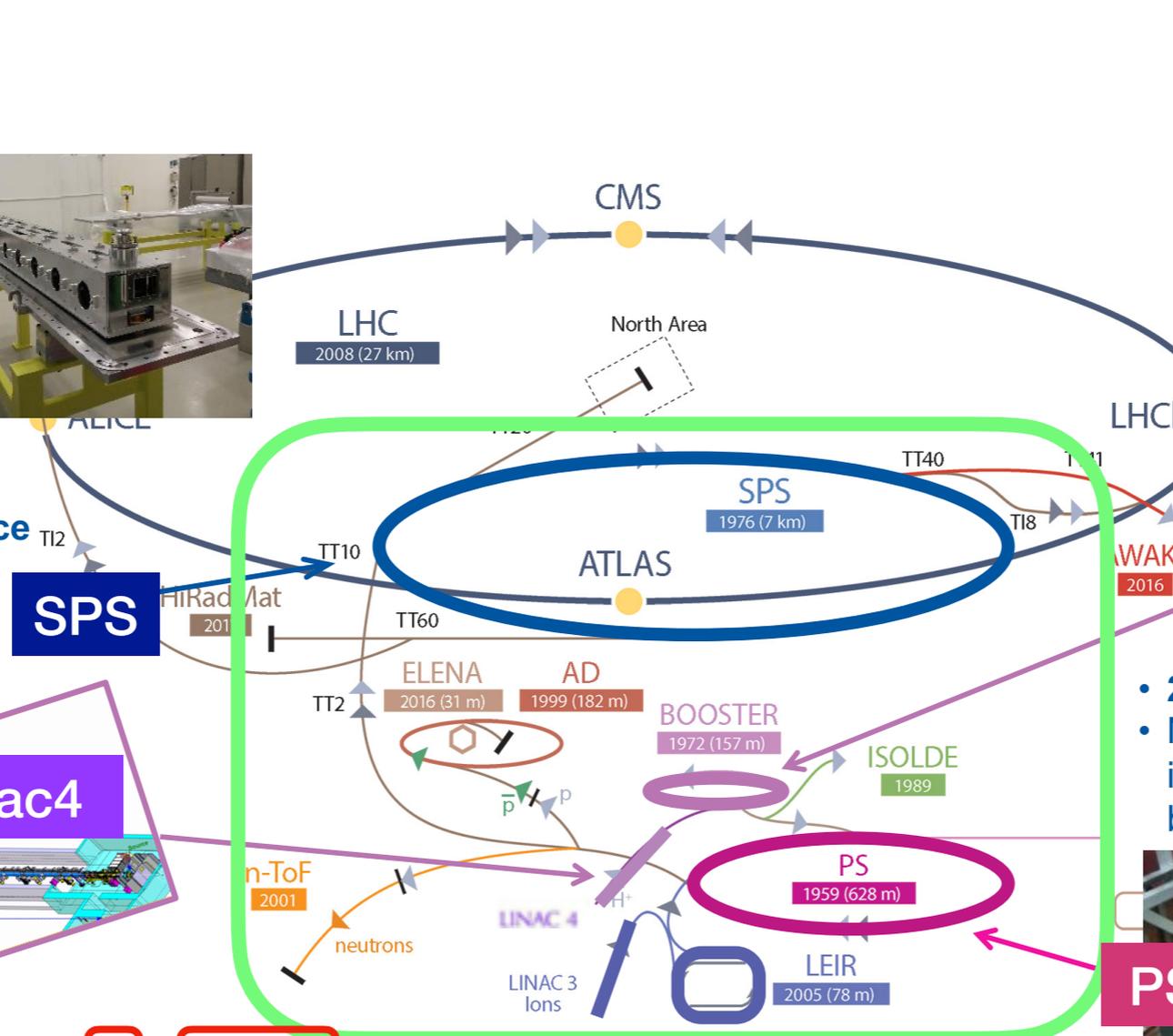
- 2 GeV injection
- New **RF** equipment including broadband feedback



- Main **RF** system (200 MHz) upgrade
- Longitudinal impedance reduction & partial a-C coating
- New **beam dump** and protection devices

**Linac4**

- Acceleration of **H<sup>-</sup>** to **160 MeV**
- Nominal 40 mA within 0.4 μm, Run 3 target 25 mA within 0.3 μm



	$N_b$ ( $\times 10^{11}$ p/b)	$\epsilon_{x,y}$ ( $\mu\text{m}$ )	Bunch/batch spacing	Brightness = $1/\epsilon$
HL-LHC target	<b>2.3</b>	2.1	25 ns / 200 ns	<b>x 2.3</b>
Present	1.3	2.7	25 ns / 200 ns	

$$L = \frac{11253 \cdot 2544 \cdot (1.15 \times 10^{11})^2 \cdot (6500/0.938) \cdot 0.941}{4\pi \cdot 3\mu m \cdot 0.3m} \cdot 0.941$$

微増      → 2.3x10<sup>11</sup>  
→ 2μm    より小さく    = 2.2 × 10<sup>34</sup> cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>

x 1.5 x 2<sup>2</sup> x 1.05 x ...

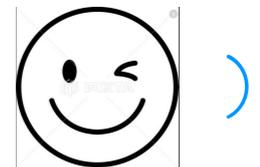
一応 target は 7.5 x 10<sup>34</sup> cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>

- Higgs  $\sigma$  : ~ 50pb (= 50 x 10<sup>-36</sup>cm<sup>2</sup>)
- ▶ L ·  $\sigma$  ~ 100 x 10<sup>-2</sup> /sec = **~4 Hz**

- targetの上に行くポテンシャルを持っている
- すべてがうまくいかななくても、**targetに至るための様々のハンドルがある**

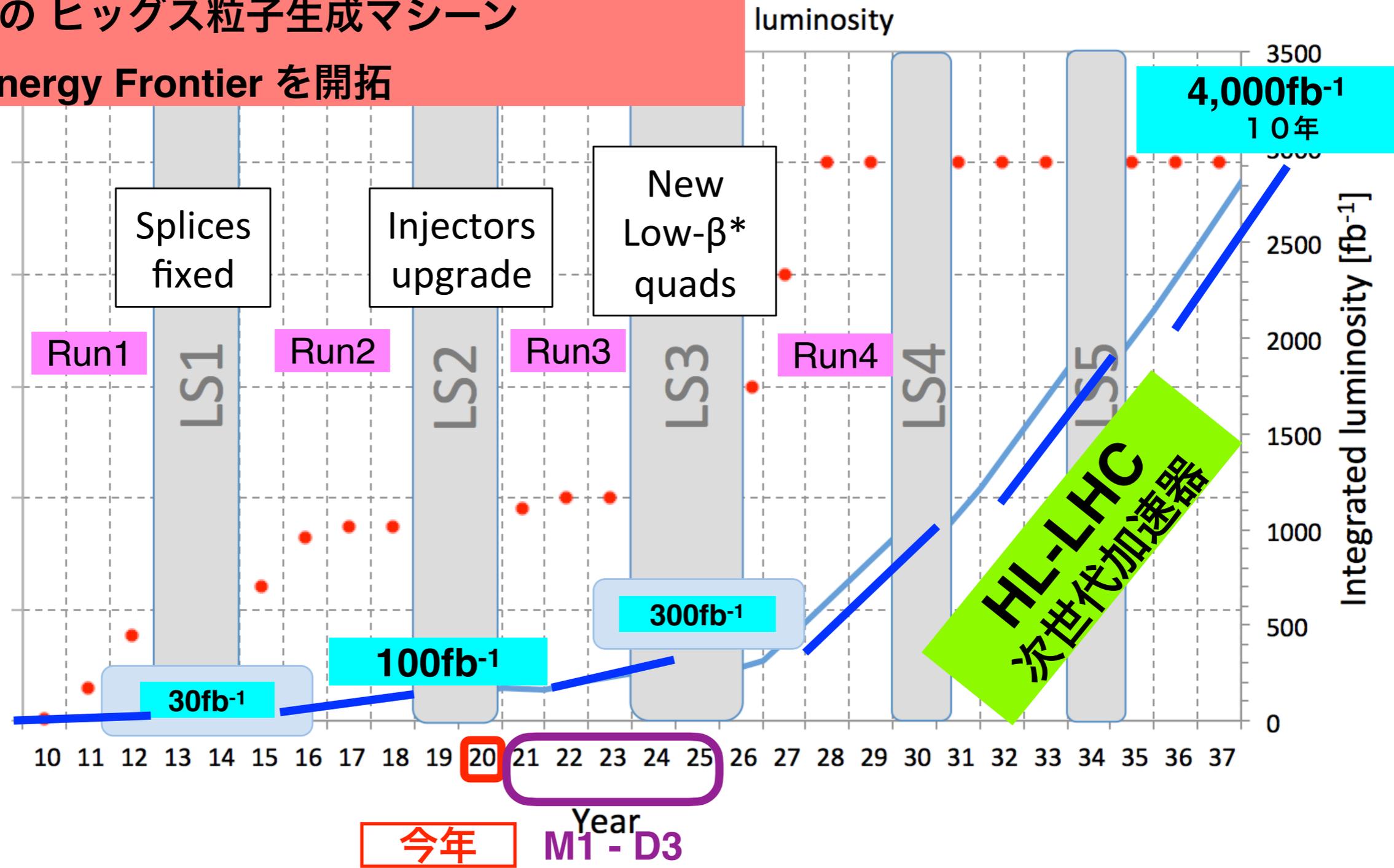
→ **だから、LHCはうまく動いている**

(by アトラス実験 Run-2のデータ収集責任者の お言葉



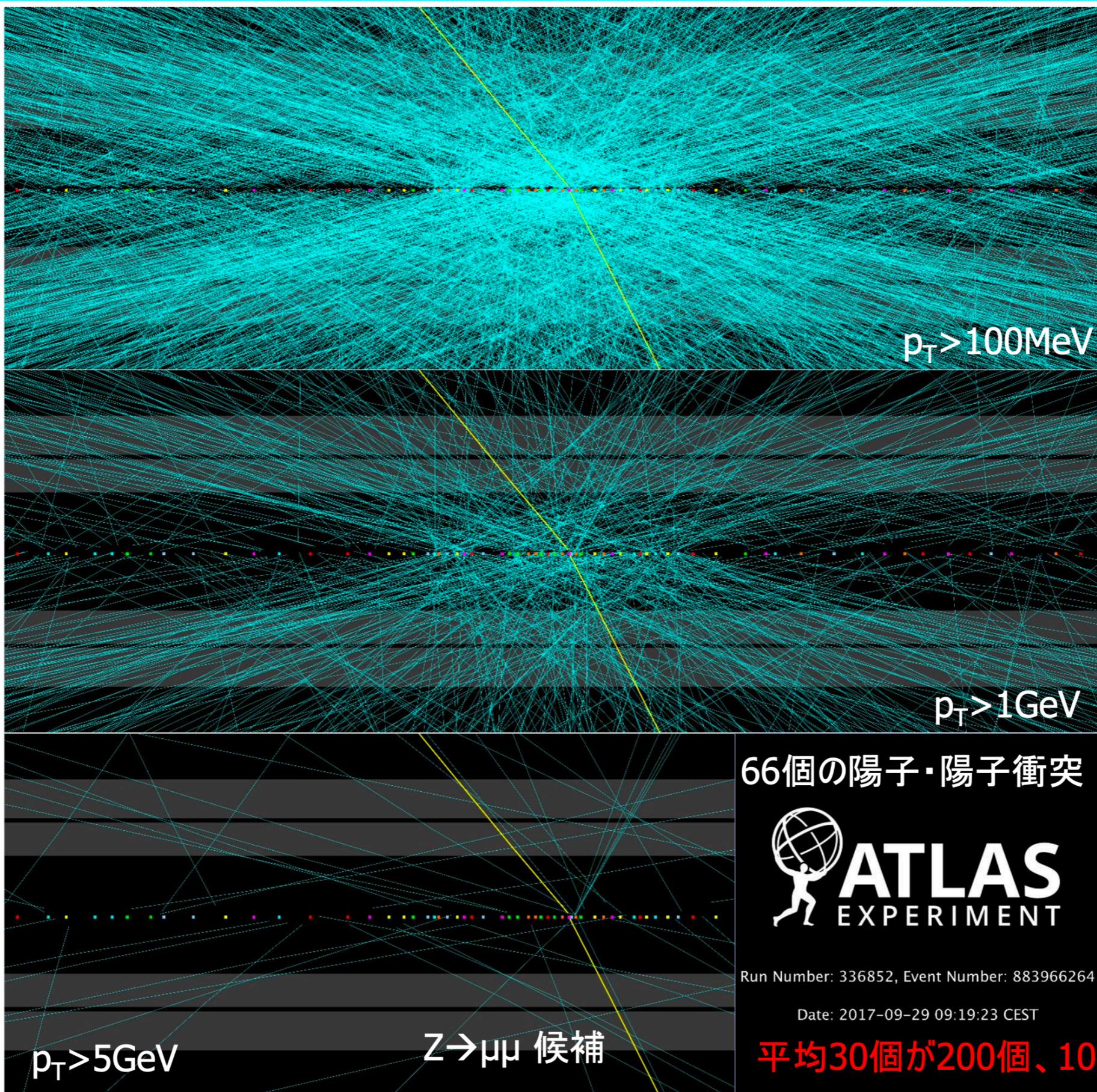
- 世界で唯一の ヒッグス粒子生成マシン
- 文字通り Energy Frontier を開拓

データの蓄積 (積分)  
=より重い新粒子の探索



Energy Frontier の実験が、新しい物理の知見をもたらす  
 予算の裏付けのある、向こう20年間の計画

もっと「ルミ」を (もっと光を)  
 → まぶしすぎやしないか??



## トリガー

毎衝突、何かおこる → 40MHz  
記録可能 → 400Hz

99,999すてる 1えらぶ

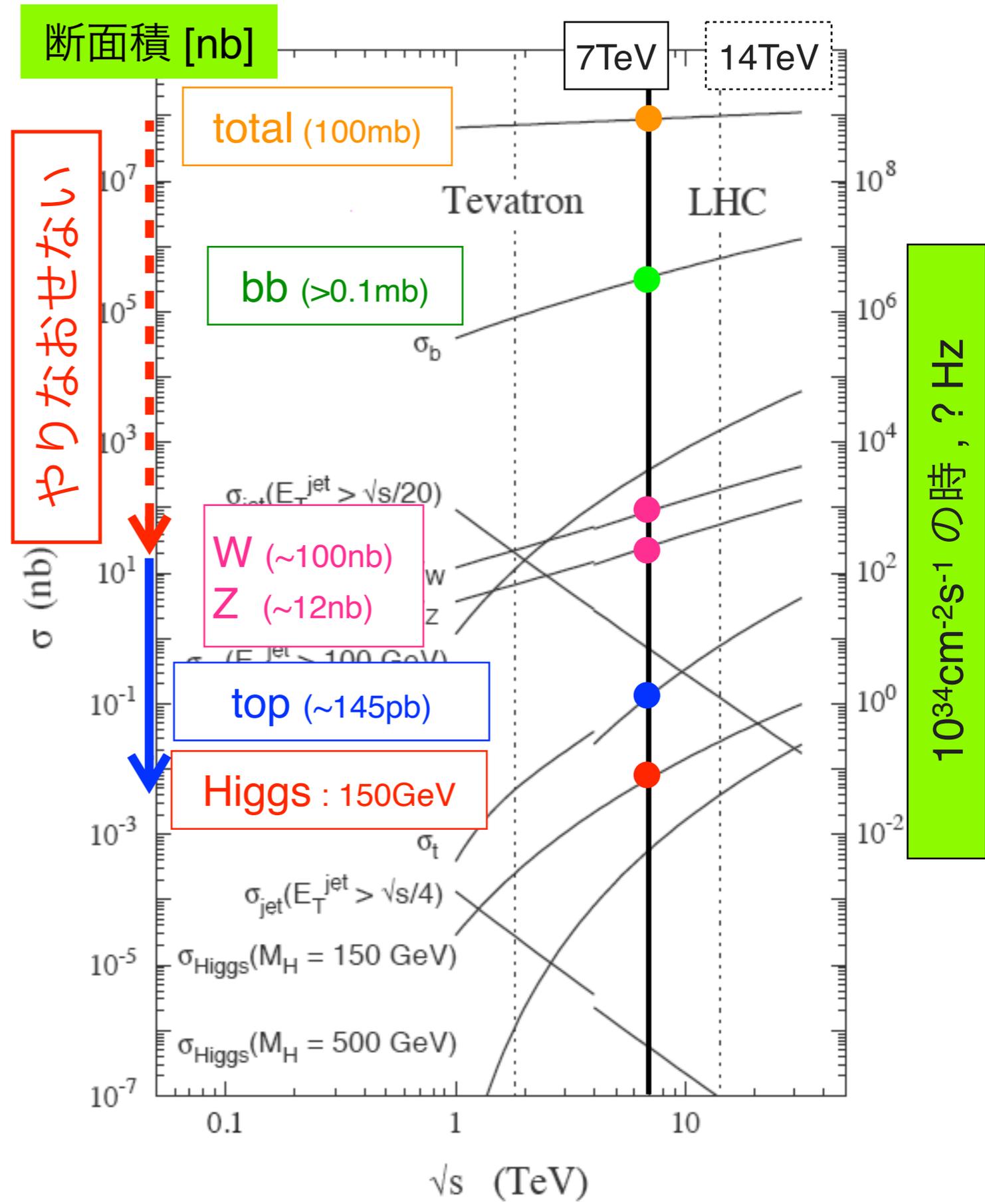
その後の 解析

999すてる 1えらぶ

新粒子 1 は

その他 100,000,000  
(or more) のゴミの中に含まれる

実験成功の重要な key point !!

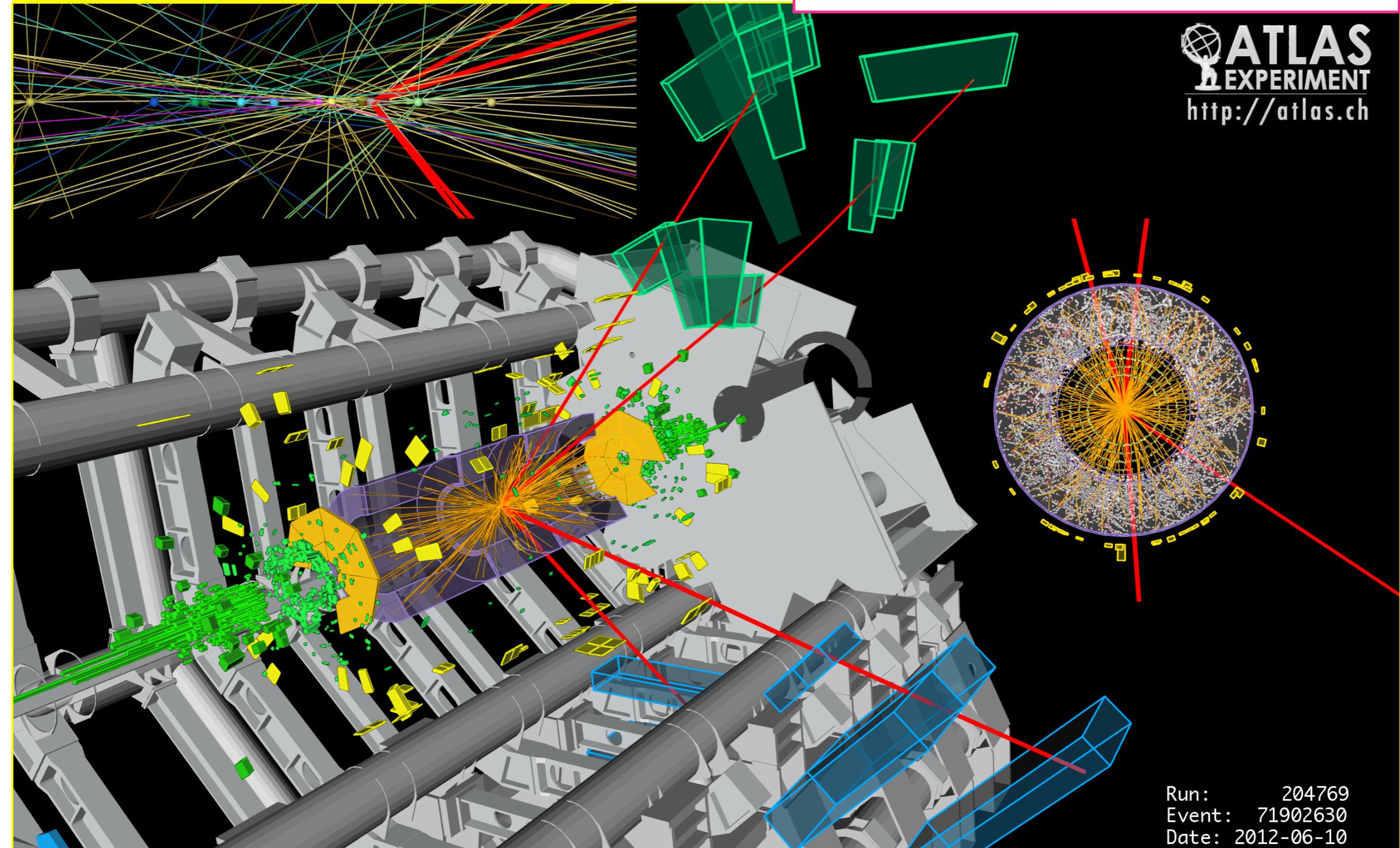


$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$$

$$m_{4\mu} = 125.1 \text{ GeV}$$

$$p_T(4\mu) = 36.1, 47.5, 26.4, 71.7 \text{ GeV}$$

$$m_{12} = 86.3 \text{ GeV}, \quad m_{34} = 31.6 \text{ GeV}$$


  
 ATLAS  
 EXPERIMENT  
<http://atlas.ch>


Run: 204769  
 Event: 71902630  
 Date: 2012-06-10

# 29 ATLAS測定器がやっていることは本質的に2種類

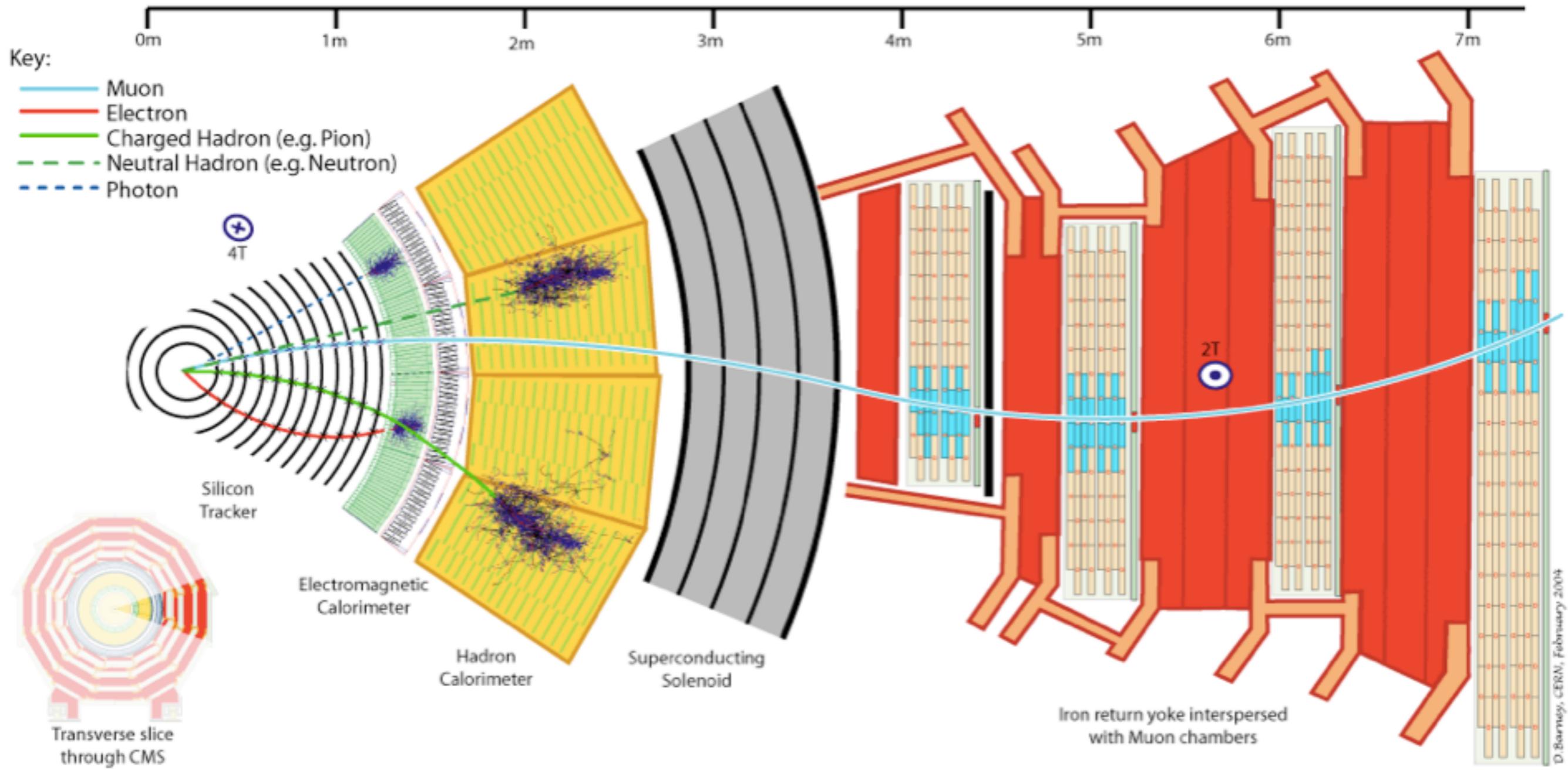
巨大で (ex. ATLAS : 25m x 50m : 7000トン)

複雑 (100Mチャンネル)ではあるけれど、

本質的に2つの事しかしていない

(1) 運動量の測定・(2) エネルギーの測定

組み合わせで  
粒子の種類同定など



# 1つ目：運動量の測定

(加速器で磁場で粒子の軌道を曲げるのと同じ原理)

$$P[\text{GeV}/c] = 0.3 \times B[\text{T}] \times \rho[\text{m}]$$

$\rho$ の測定精度 (Bの測定精度)に  
応じた正確さで P がわかる  
→ 元の粒子の質量がわかる

あらかじめ  
知っている

根性を入れて  
精密に測定する

Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Proton

B=4T

Silicon Tracker

全荷電粒子が通過

Magnetic meter

Hadron Calorimeter

超伝導磁石

B~2T

$\mu$ だけが通過

3m

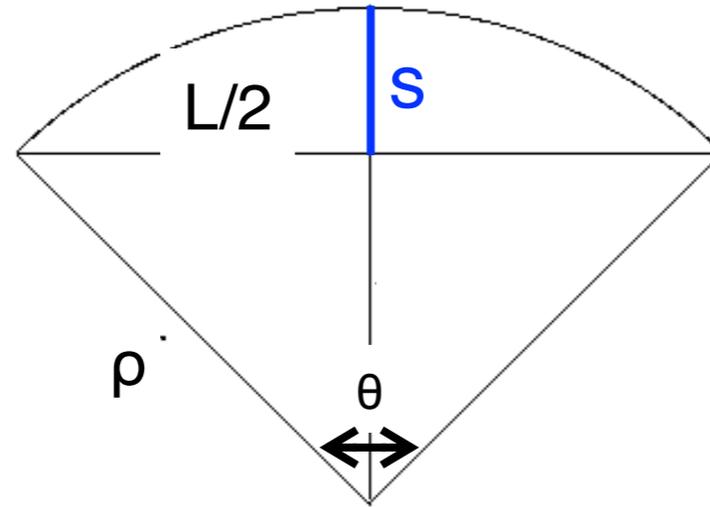
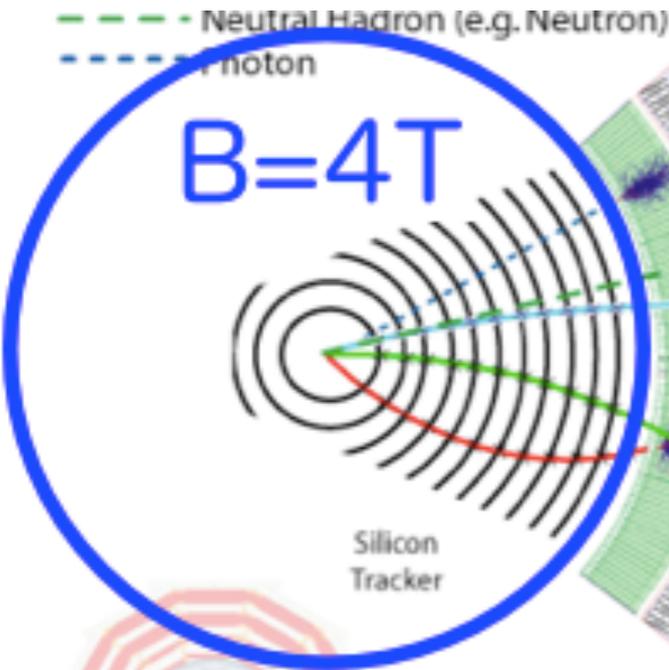
4m

5m

6m

7m

Transverse slice through CMS



$$\frac{L/2}{\rho} = \sin \frac{\theta}{2} \sim \frac{\theta}{2}, \quad P_T = 0.3B \cdot \rho$$

$$\longrightarrow \theta = \frac{L}{\rho} \sim \frac{0.3BL}{P_T}$$

$$s = \rho \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right) \sim \rho \frac{\theta^2}{8} = \frac{\rho}{8} \cdot \frac{0.3BL}{P_T} \cdot \frac{L}{\rho} \sim \frac{0.3}{8} \frac{BL^2}{P_T}$$

$P_T=100\text{GeV}$ ,  $B=2\text{T}$ ,  $L=1\text{m}$   $\rightarrow$   $s=750\mu\text{m}$   
 位置を  $30\mu\text{m}$ の精度で測定できれば  $\sim 4\%$

$P_T$ 大  $\rightarrow$   $s$ は小  $\rightarrow$  測定シンドイ

$s$  が大きくデザインされていれば  
 高精度で momentumが決まる

(本当は ちよつとちがって、  
 N層の検出器ならば  
 NIM, 24, p381, 1963)

$$\frac{\Delta P_T}{P_T} = \frac{\Delta x \cdot P_T}{0.3 \cdot BL^2} \cdot \sqrt{\frac{720}{N+4}}$$

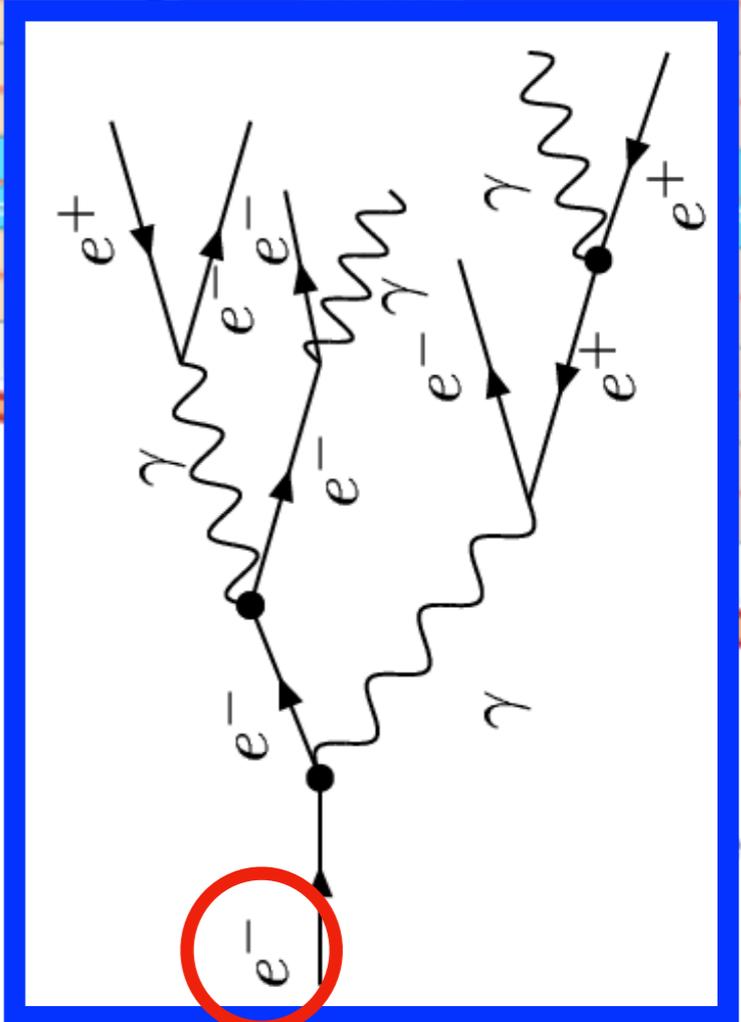
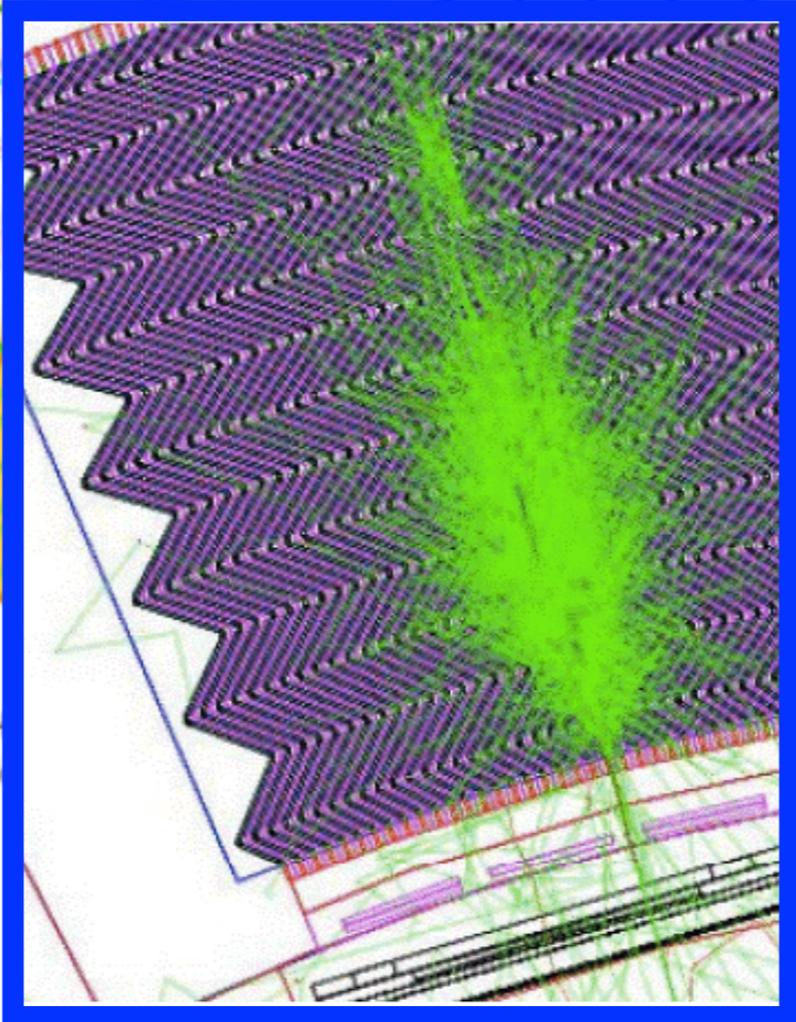
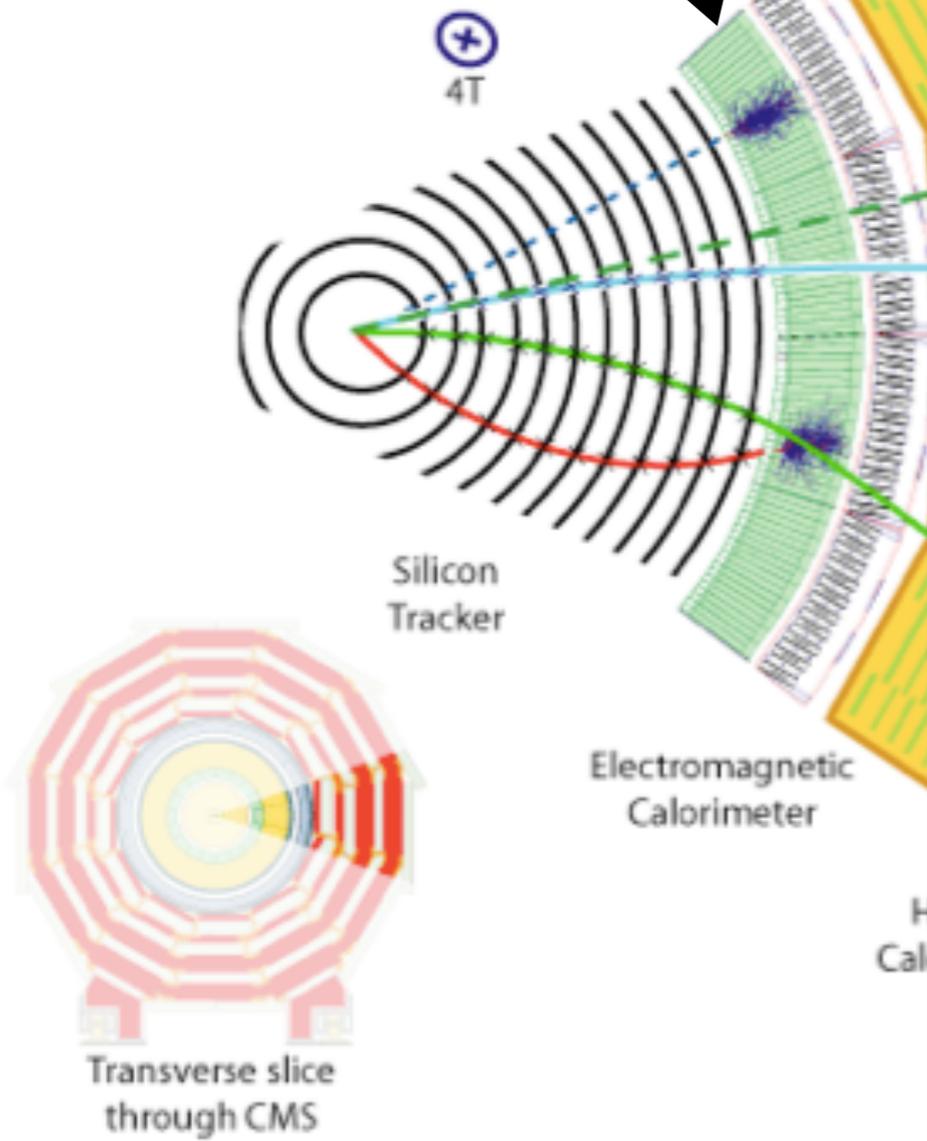
Bを大きく, Lを大きく, Nを大きく,  $\Delta x$ 頑張る  
 2T, 4T                       $\sim 1\text{m}$                        $\sim 10$                        $\sim 30\mu\text{m}$

電子 (e),  $\gamma$  は  
ここですべてエネルギーを  
使い果たしてとまる

使い果たしたエネルギーを  
(光)  $\rightarrow$  電気信号 に変換して測定

- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon

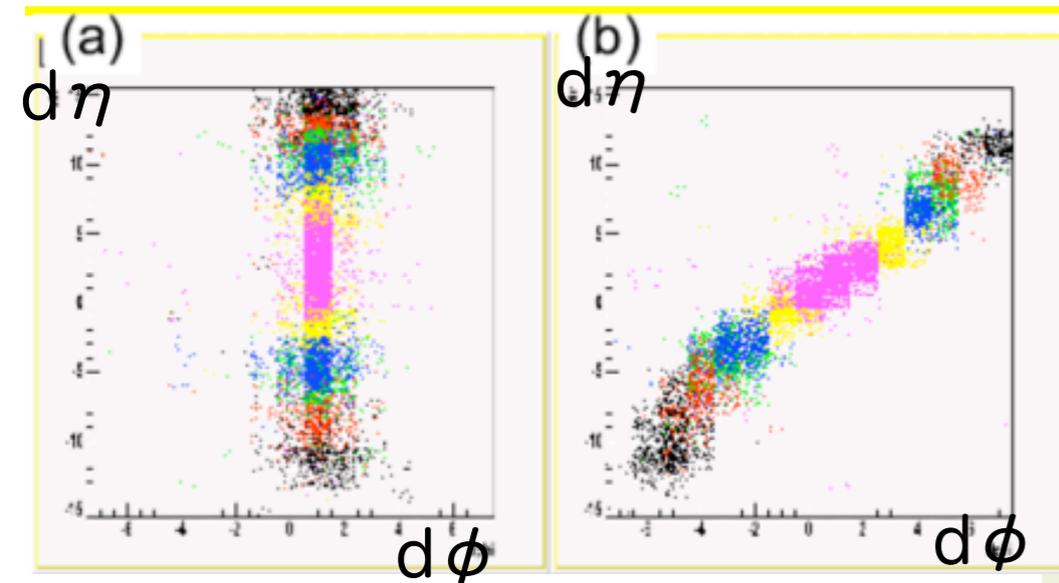
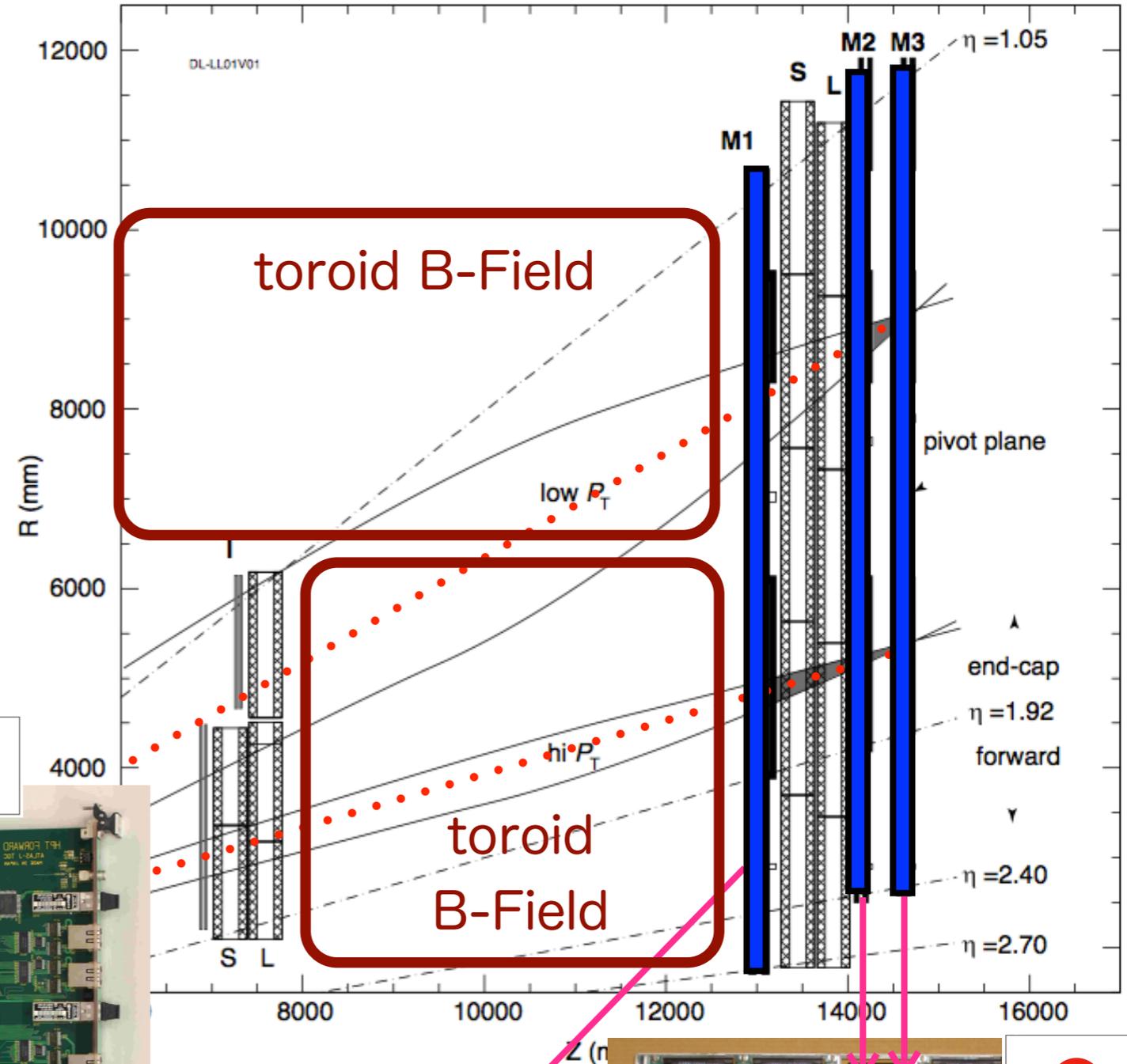
カロリメータトリガー  
e.g. 電子をとらえる  
  
(田中研の先輩たち)



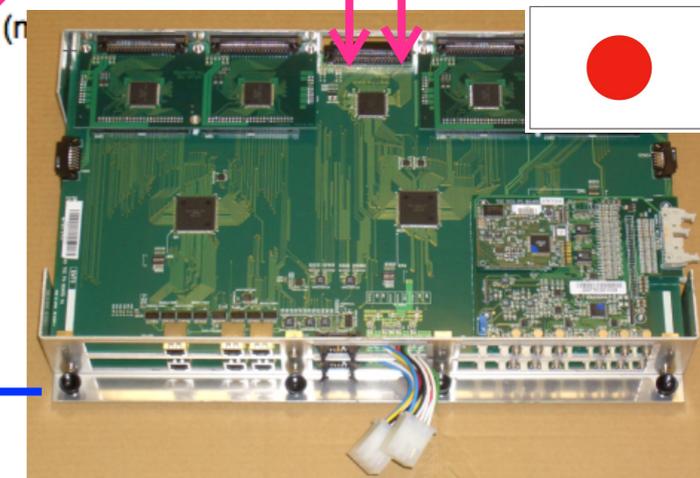
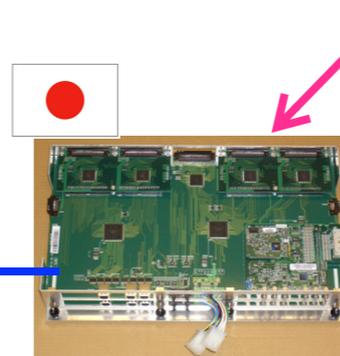
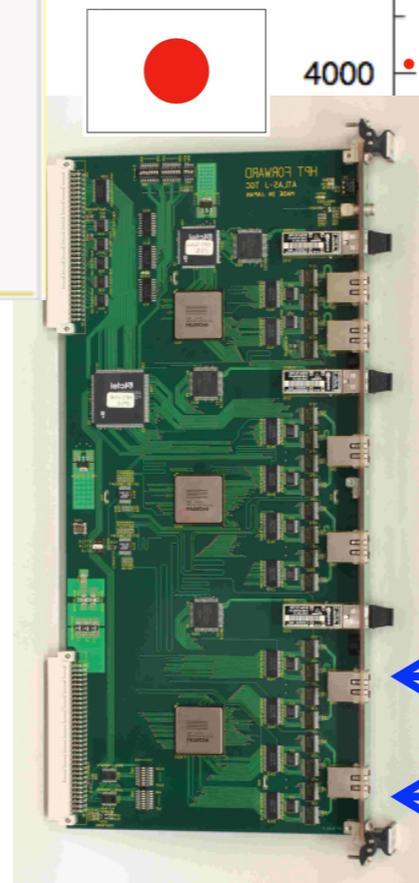
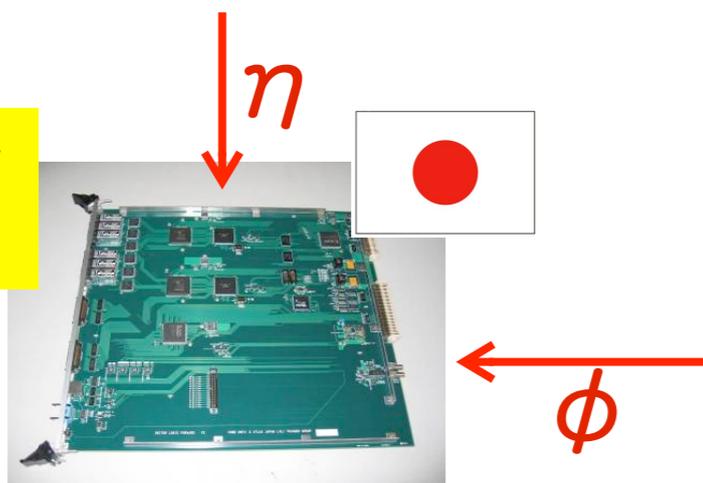
6m

1. 衝突点からMuonが飛んでくる
2. 7層でコインシデンスをとる
3.  $d\eta$  v.s.  $d\phi$  map  $\rightarrow$  運動量に換算

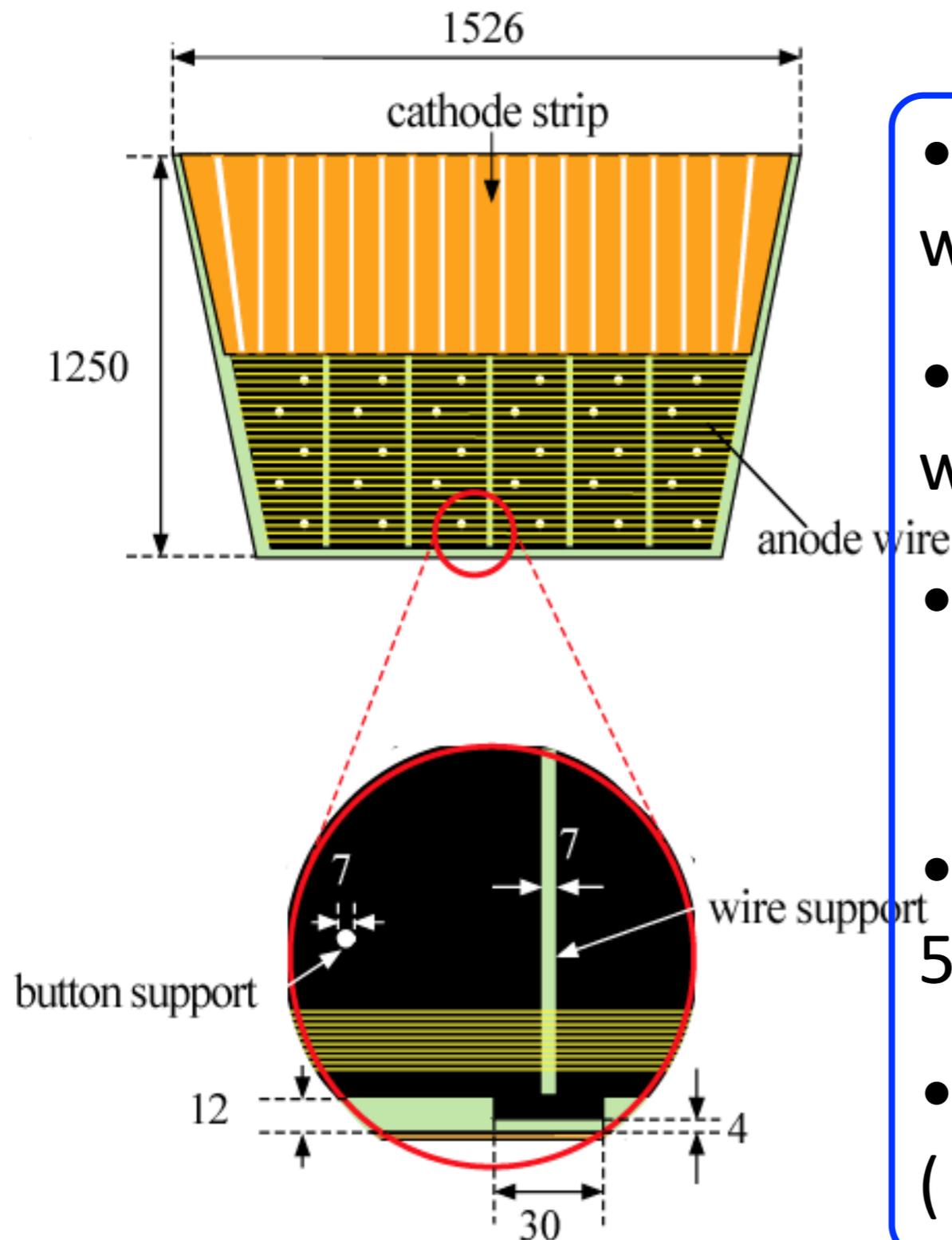
2  $\mu$ 秒で曲がり具合、  
つまり運動量を判断する !!



セクター  
ロジック



全部で ~4,000枚の検出器



- the basic structure is like **MWPC** with graphite cathode
- the signal is read from both **anode** wire ( $\eta$ ) and **cathode** strip ( $\phi$ )
- the wire spacing is 1.8 mm  
the gap between a / c is 1.4 mm
- The diameter of tungsten wire is 50 micron
- the gas is CO<sub>2</sub> and **n-Pentane** ( 55 : 45 )

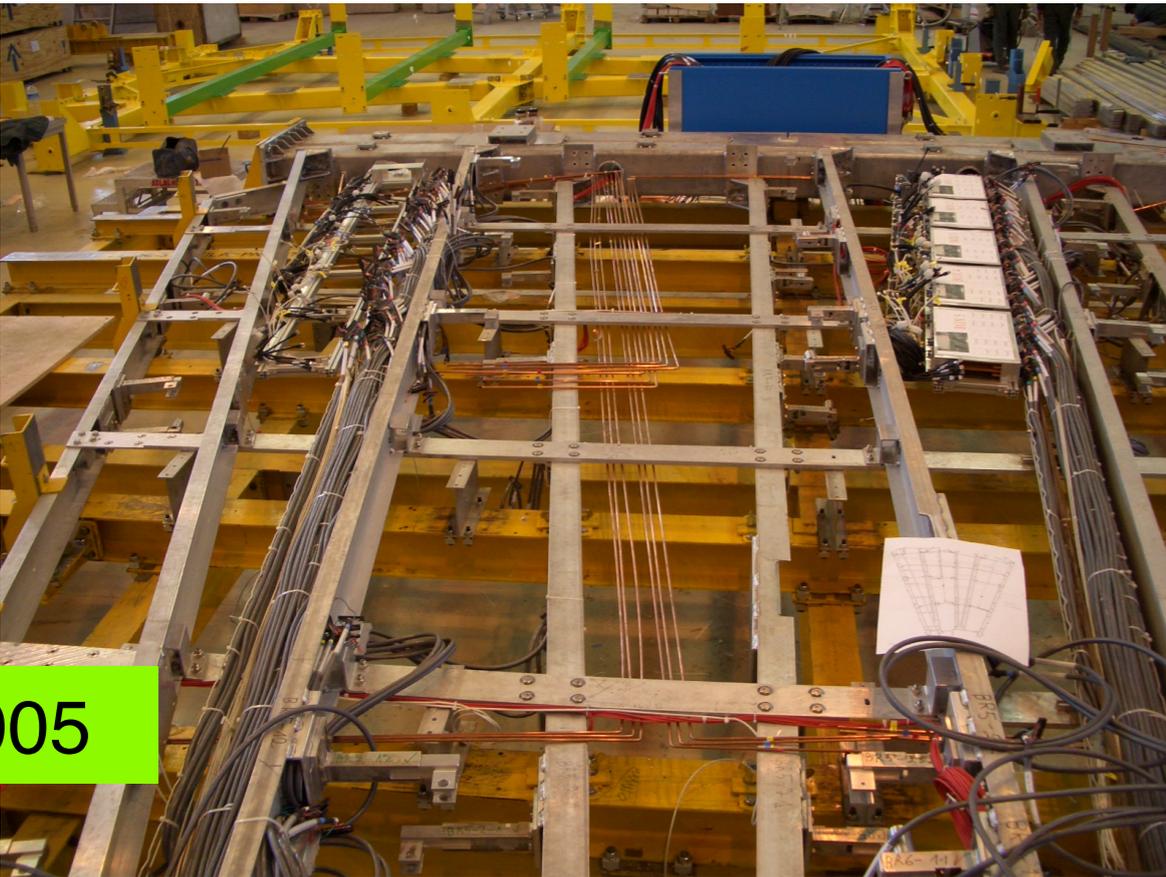
2002



2003



2005



2007





開発



製作



くみため

・試験



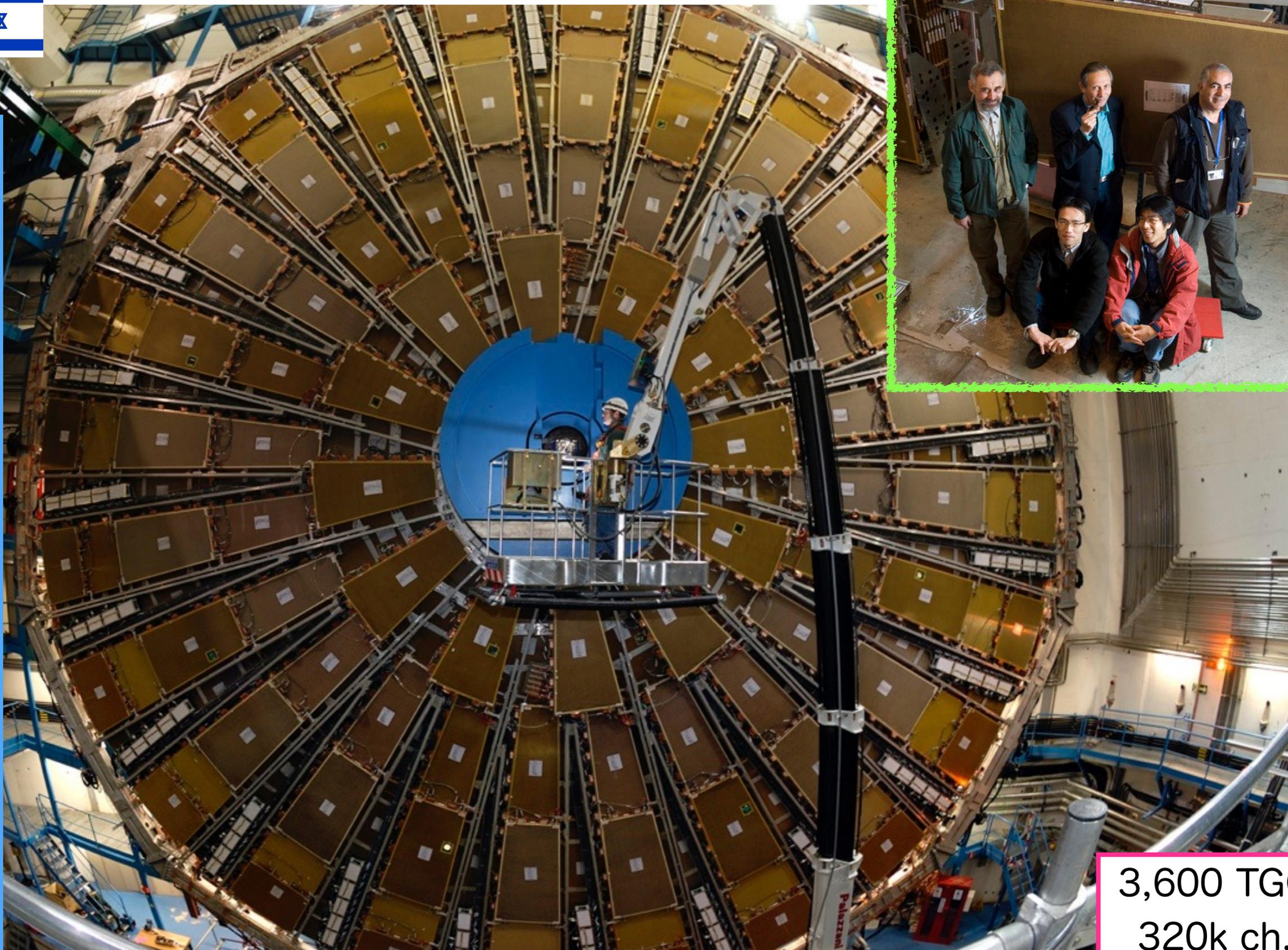
運転



評価

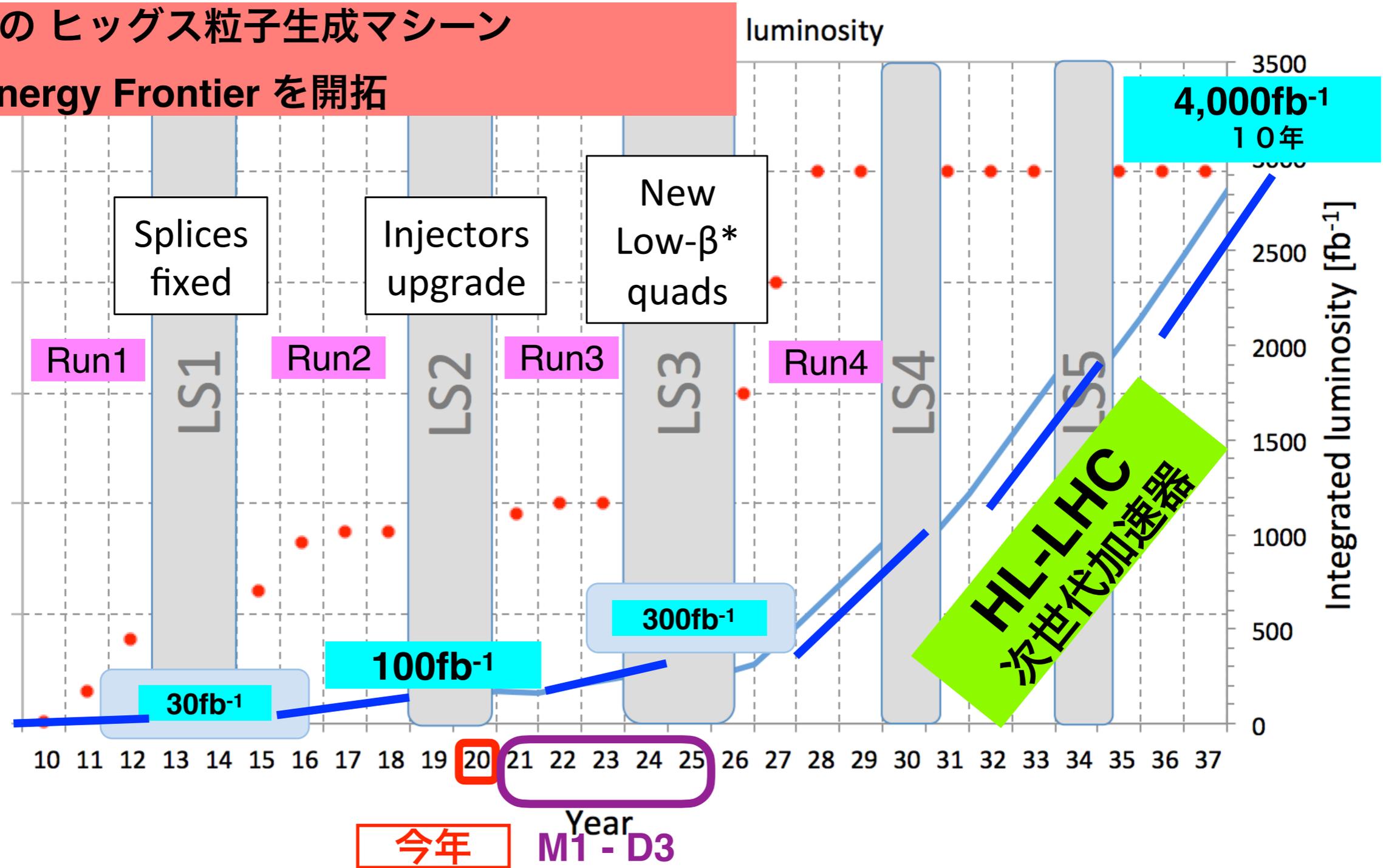


改良

3,600 TGC  
320k ch.

- 世界で唯一の ヒッグス粒子生成マシン
- 文字通り Energy Frontier を開拓

データの蓄積 (積分)  
=より重い新粒子の探索



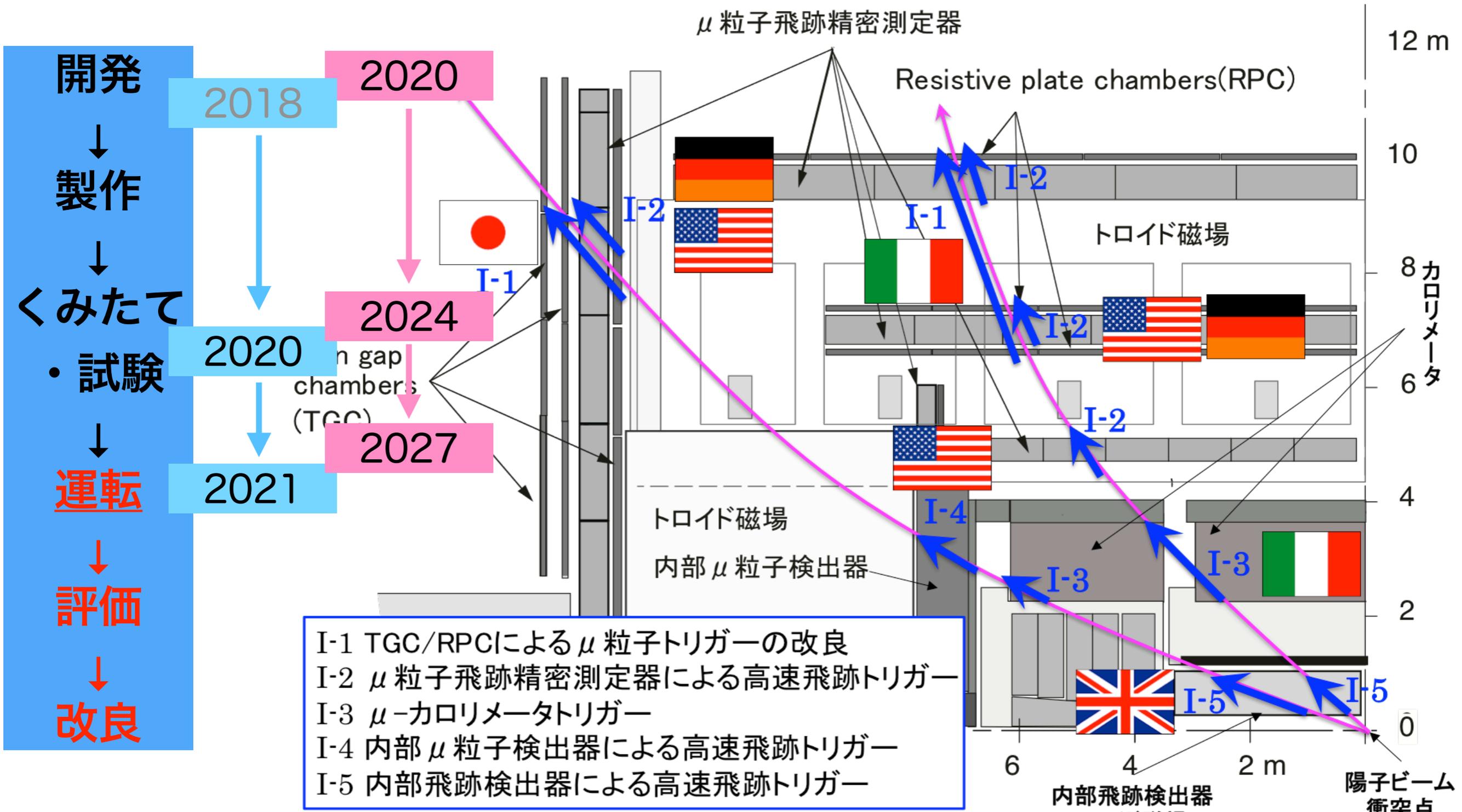
(1) 2021年からのRunで、良いデータが取れるようにするための研究

(2) 2027年からのRunで、今あるハードウェアを刷新して、高輝度LHCのデータをとるための研究

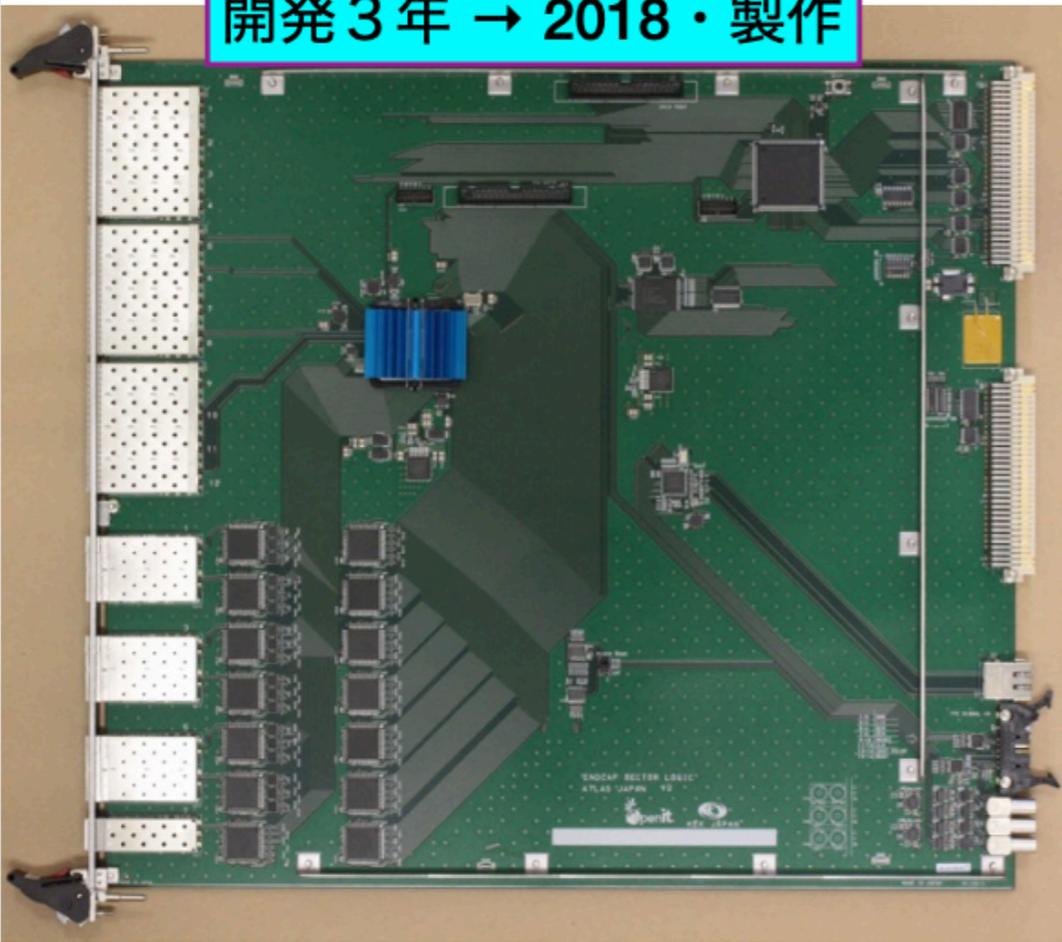
どちらも本当に重要

～あらゆる検出器の情報をつかって 本当に欲しい Muon 「だけ」 をみつける

テクノロジーの進歩（光通信、大規模IC）を利用して、ソフトウェアでやっていたことを、全部、ハードウェアでやってしまおう



開発3年 → 2018・製作

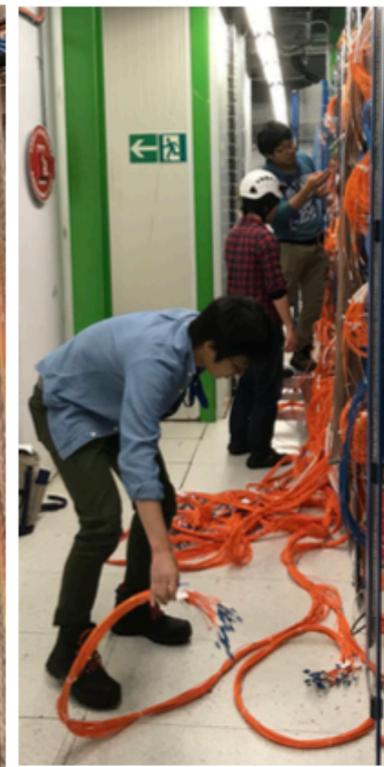
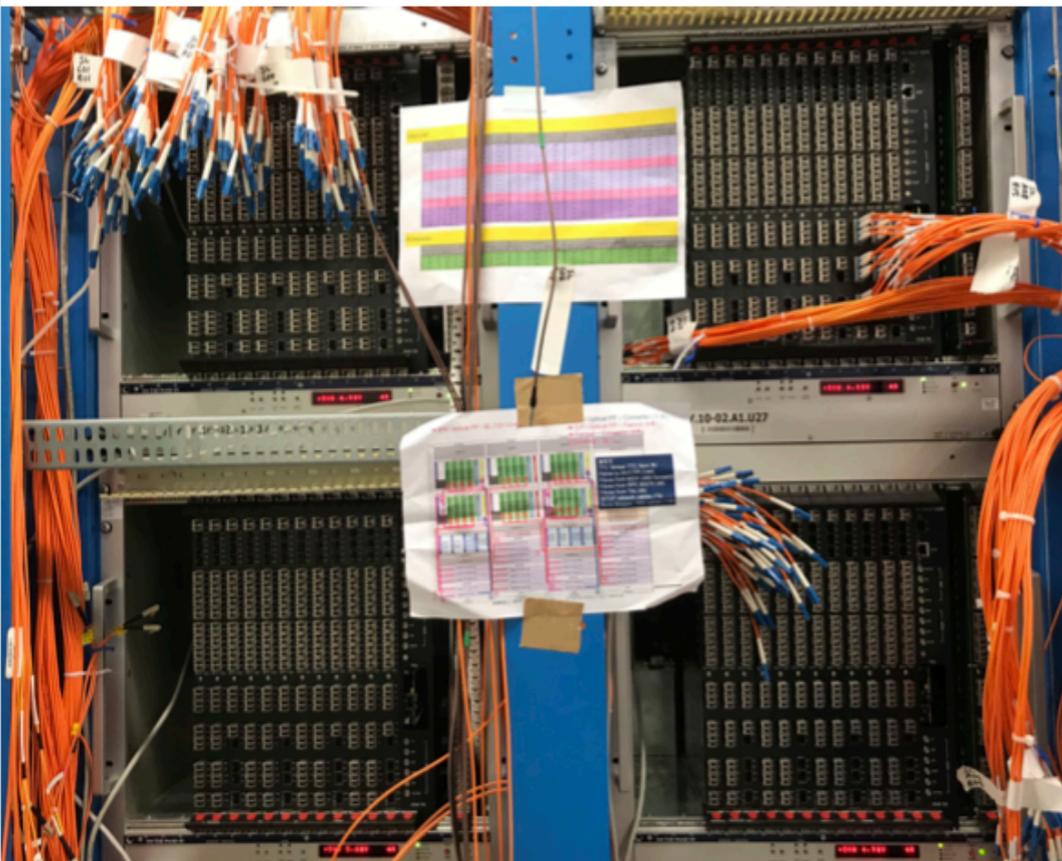


東大・テストベンチ

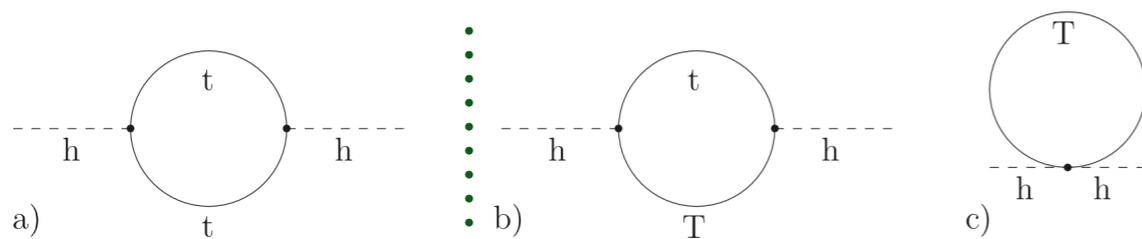
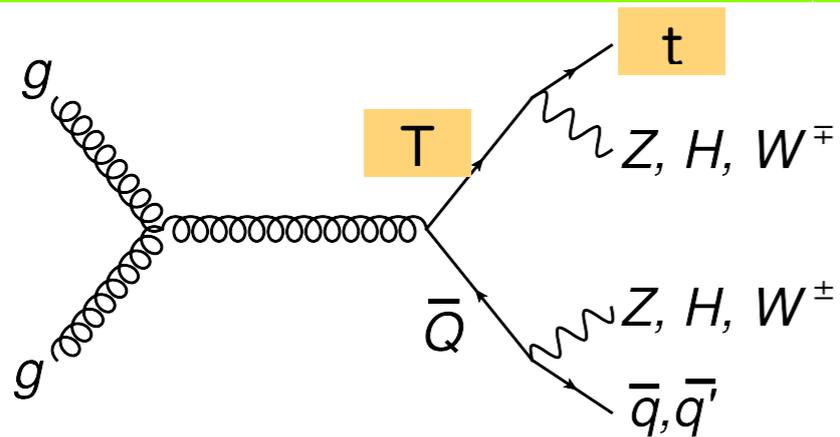


CERNのシステムに  
組み込んで運用開始

5大学いっしょに、システムの開発運転

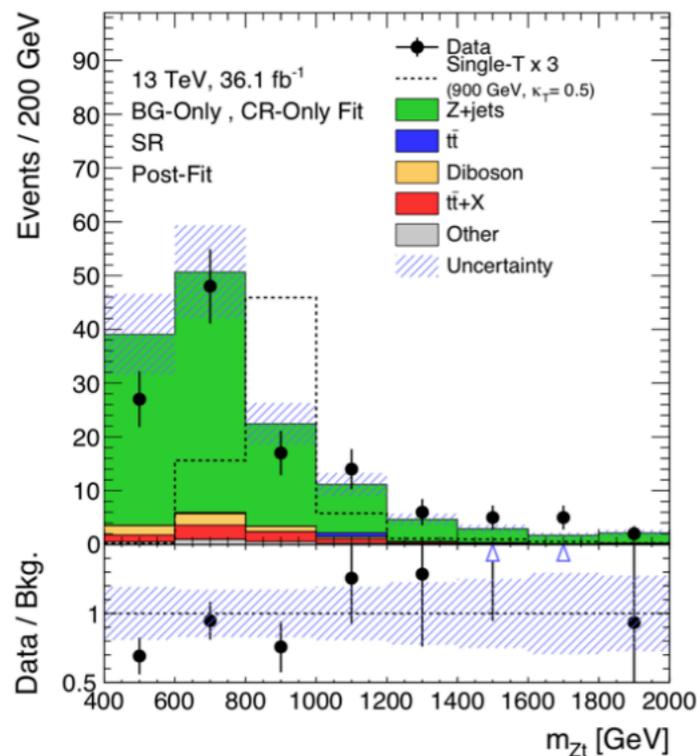


## Vector-Like-Quark



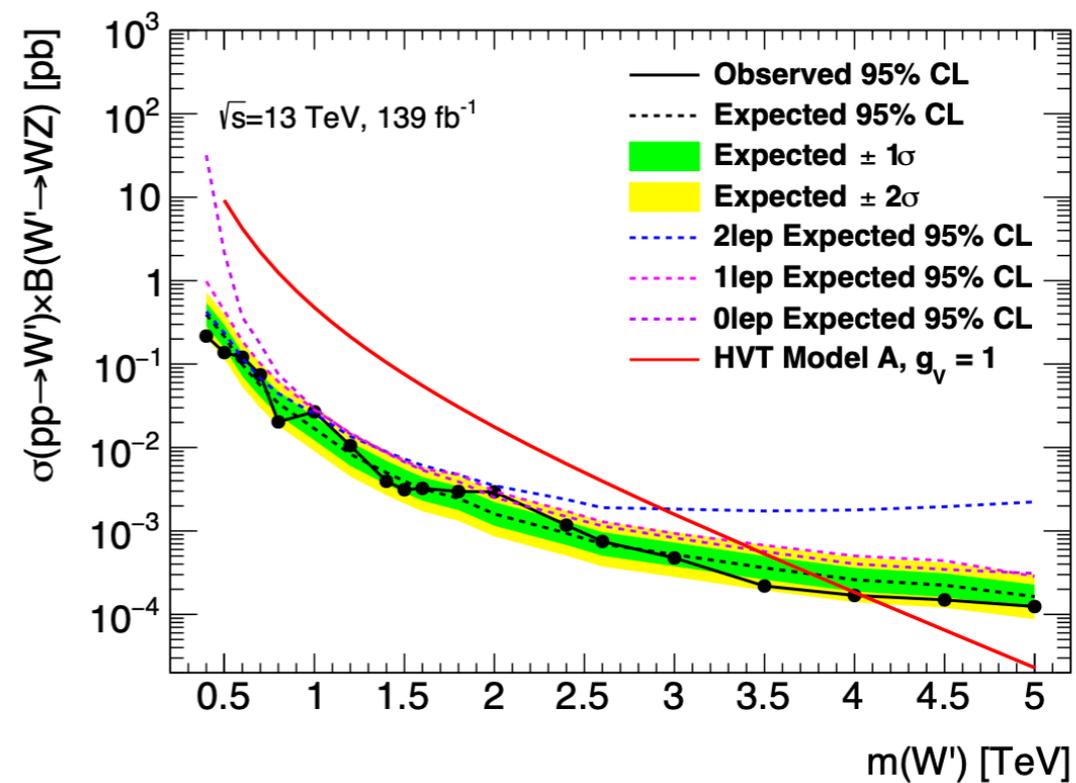
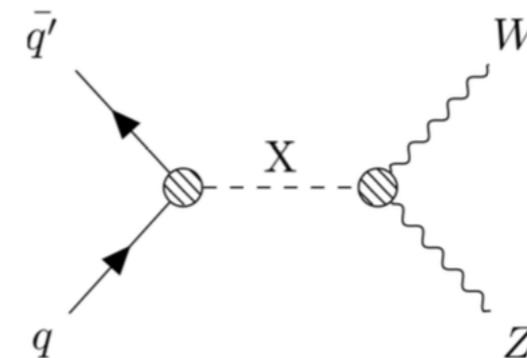
発散

それをキャンセル



Run-2初期  
田代 (京大)

## Weak-Boson対に崩壊する新重粒子



Run-2 真ん中までのデータ・全データ  
救仁郷 (京大)・山谷 (東大)

- どんな実験のどんな検出器も、高い性能を引き出すためには **継続的な改善**が必要になる：
- **自分で課題をみつけて**、解決できるプロになる → **実験が面白くなる**
- **ひとつの事に精通すると、他のことも**(ある程度)わかるようになる
  - そうやって実験になじんだら、**良い物理解析も**できるようになる：**芋づるの法則**
  - するとまた逆向きに、検出器、計算機、他 **「道具」の開発・改良もやりたくなる(良い循環)**
  - こういう「**感じ**」を修士のあいだに実感できたら勝ち!
  - そのためには、本当に興味深いと感じる研究を最初にするのは重要かも

- 自分の専門は深く掘りつつ、物理、科学全般、技術 他 **興味の範囲を広く持つと良い**

今この瞬間は、ちょっとやりにくい状況にはありますが...

- 大学にでてきて、**同期 (大切に!!)**、先輩、教員、他と いっぱい **議論・はなしをすると良い**  
→ 色々の発想の源、物事の理解が深まる