

世界の第一線で活躍する教員が「研究の最前線」を紹介

# ICEPP学部向け特別セミナー

5月29日 (金) 15:00~18:30

6月5日 (金) 15:00~18:00

5月29日 15:00~

実験技術（加速器、検出器）の最前線

（石野雅也 教授）

AI x 素粒子実験の最前線

（田中純一 教授）

LHCでのヒッグス粒子研究の最前線

（奥村恭幸 准教授）

ILCでできる先端素粒子物理研究

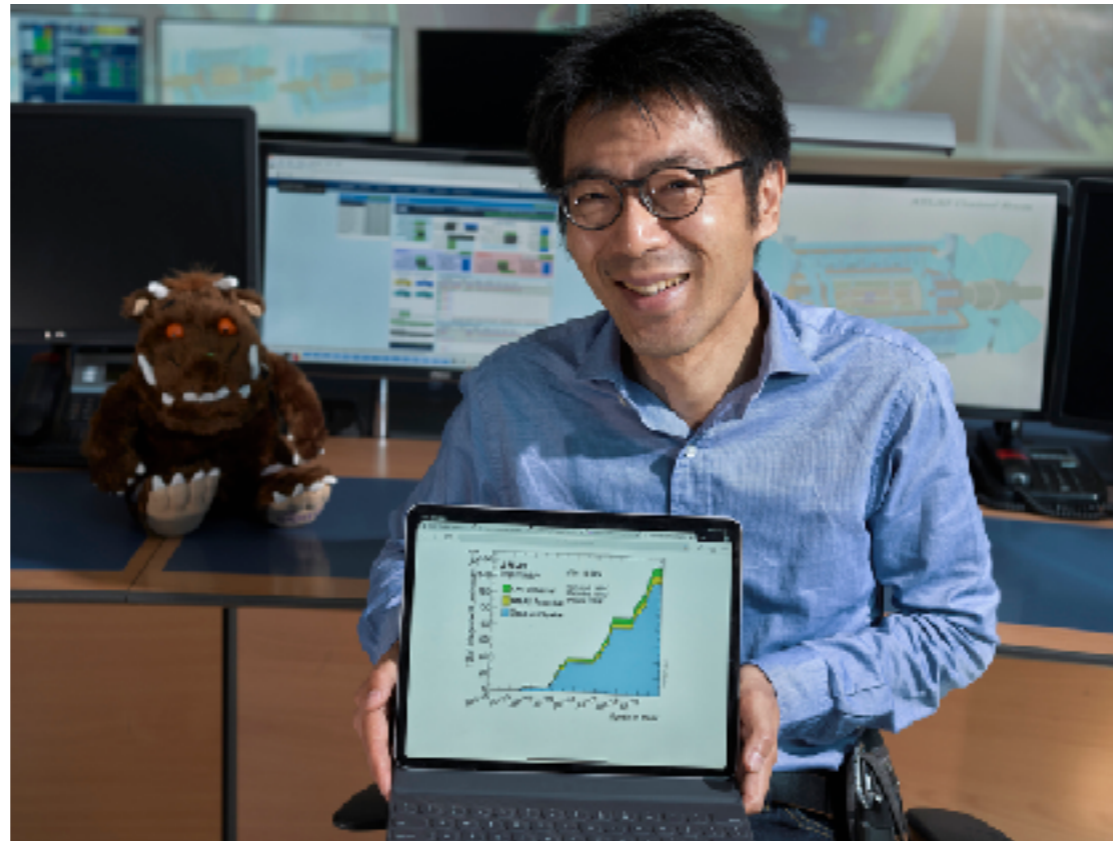
（末原大幹 准教授）

加速器実験と非加速器実験のアプローチで見る

暗黒物質探索の最前線

（寄田浩平 教授）

# 加速器・検出器の最前線



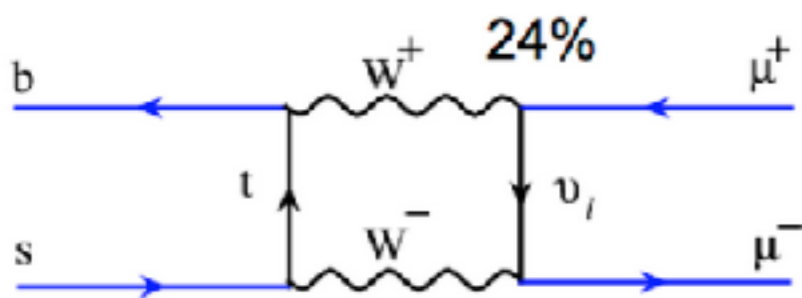
石野 雅也 東大・素粒子センター

( 2026.05.29 ) 40min.

# ① Energy Frontier

LHC : 14TeV ( → 100TeV )

人工的に作って、直接見る → 王道



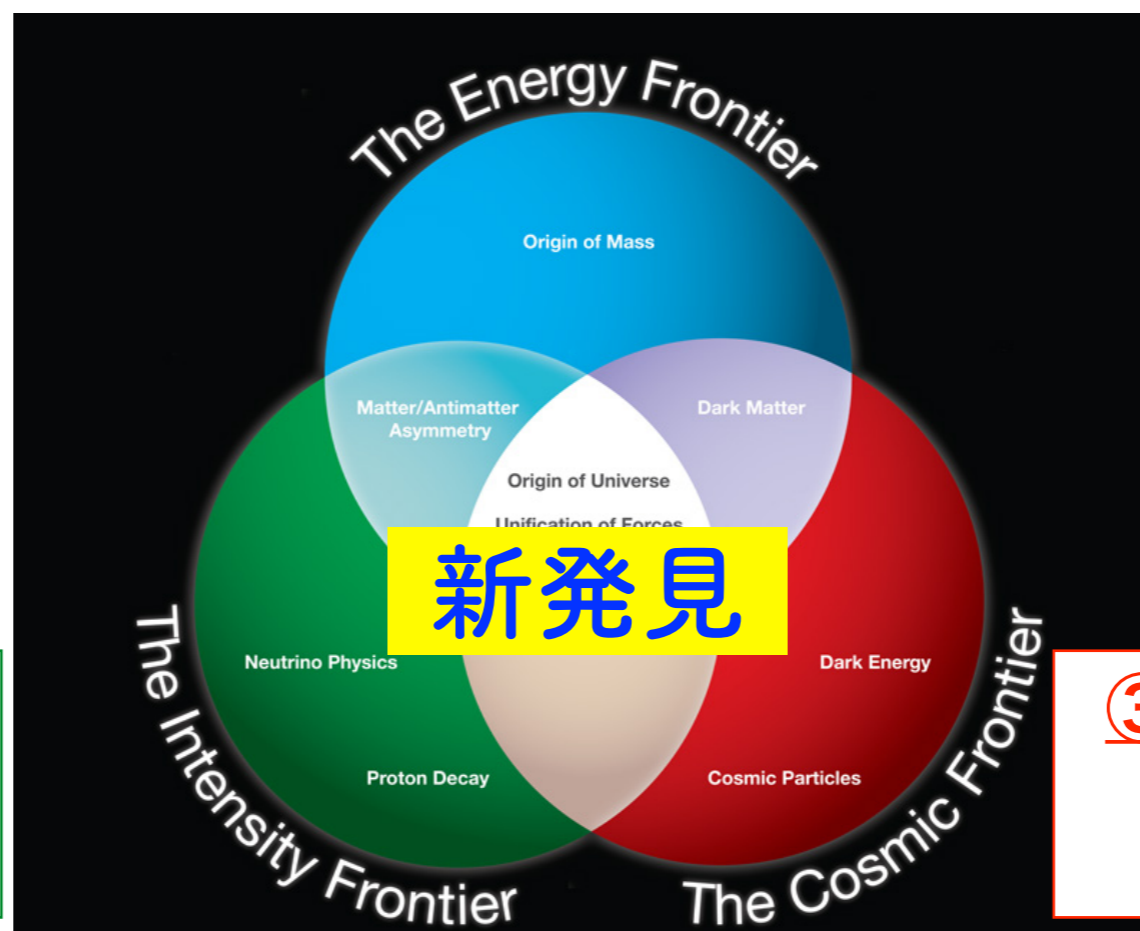
## ② Intensity Frontier

B-Factory / J-PARC

MEG・陽子崩壊・etc.

稀な現象の発見・精密測定

⇒ 「間接的に」 大きな  $\Delta E$  の効果を捉える (不確定性原理  $\Delta E \cdot \Delta t \sim h$ )



## ③ Cosmic Frontier

CMB, ...

遠く (= 初期宇宙) を直接見る

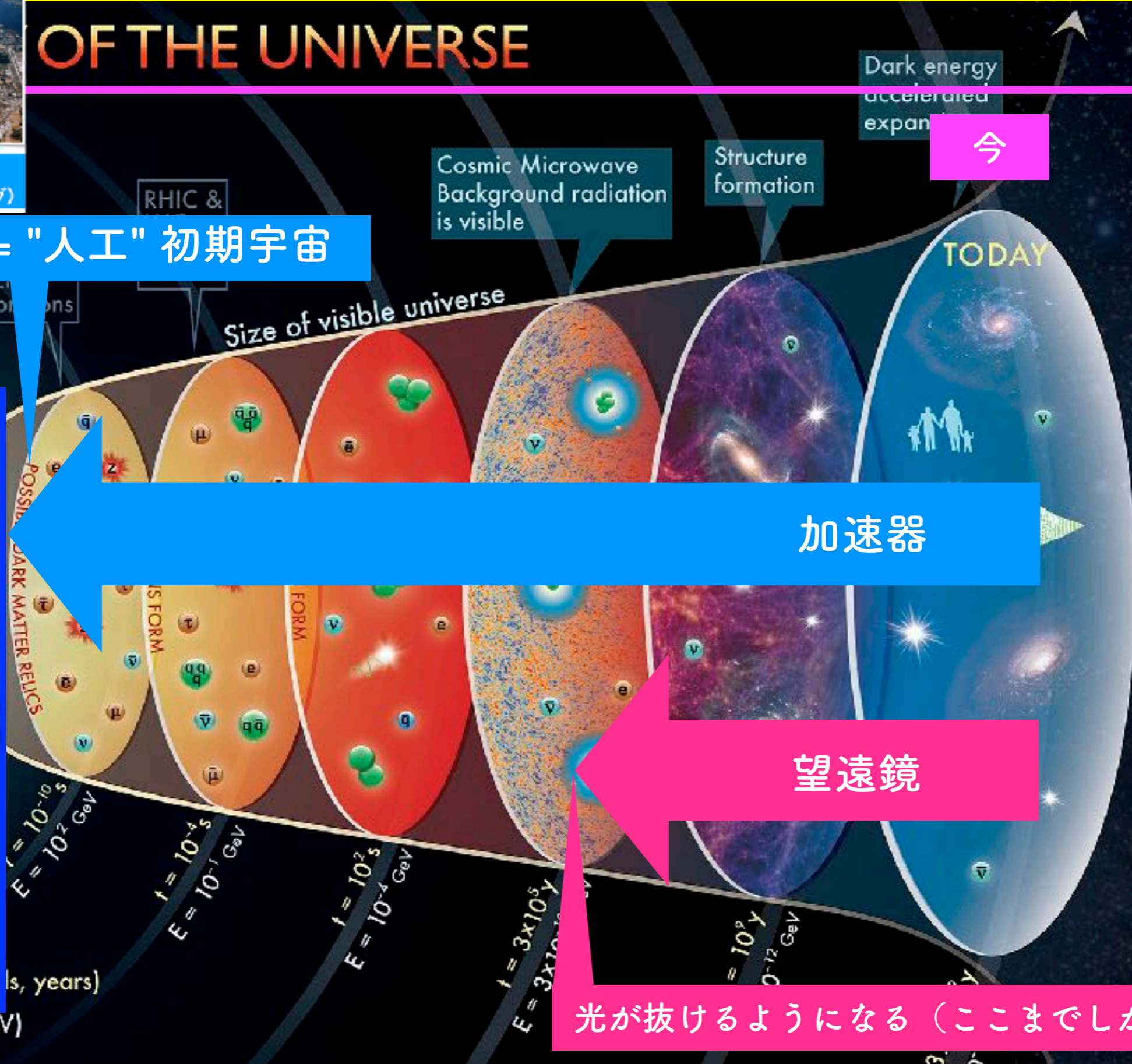
# 4 宇宙の歴史とそれを見通す Energy Frontier



素粒子衝突実験  
@ CERN (ジュネーブ)

加速器 = "人工" 初期宇宙

## OF THE UNIVERSE



Dark energy accelerated expansion

今

時間の流れ

Cosmic Microwave Background radiation is visible

Structure formation

TODAY

Size of visible universe

① Energy Frontier

加速器

望遠鏡

光が抜けるようになる (ここまでしか見えない)

High-energy cosmic rays

Inflation

t = Time (s, years)

E = Energy (GeV)

Key

$t = 10^{-36}$   
 $E = 10^{16}$

$t = 10^{-10}$   
 $E = 10^2$  GeV

$t = 10^{-4}$   
 $E = 10^{-1}$  GeV

$t = 10^2$   
 $E = 10^{-4}$  GeV

$t = 3 \times 10^5$   
 $E = 3 \times 10^5$

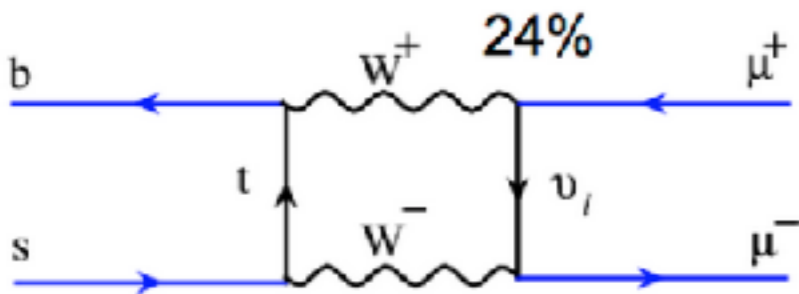
$t = 10^9$   
 $E = 10^{-12}$  GeV

3.0

# ① Energy Frontier

LHC : 14TeV ( → 100TeV )

人工的に作って、直接見る → 王道



## ② Intensity Frontier

LHC

MEG・陽子崩壊・etc.

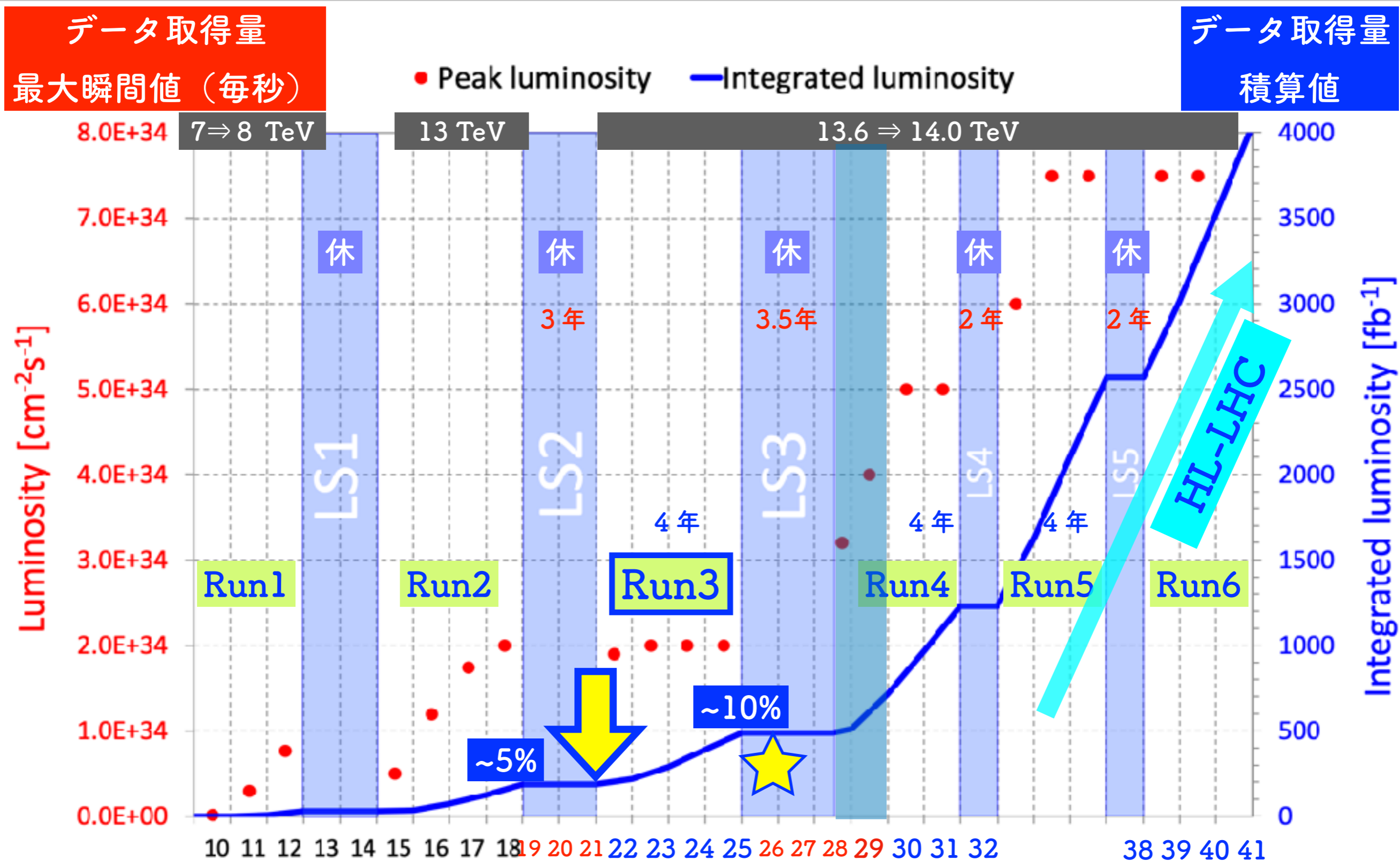
## ③ Cosmic Frontier

CMB, ...

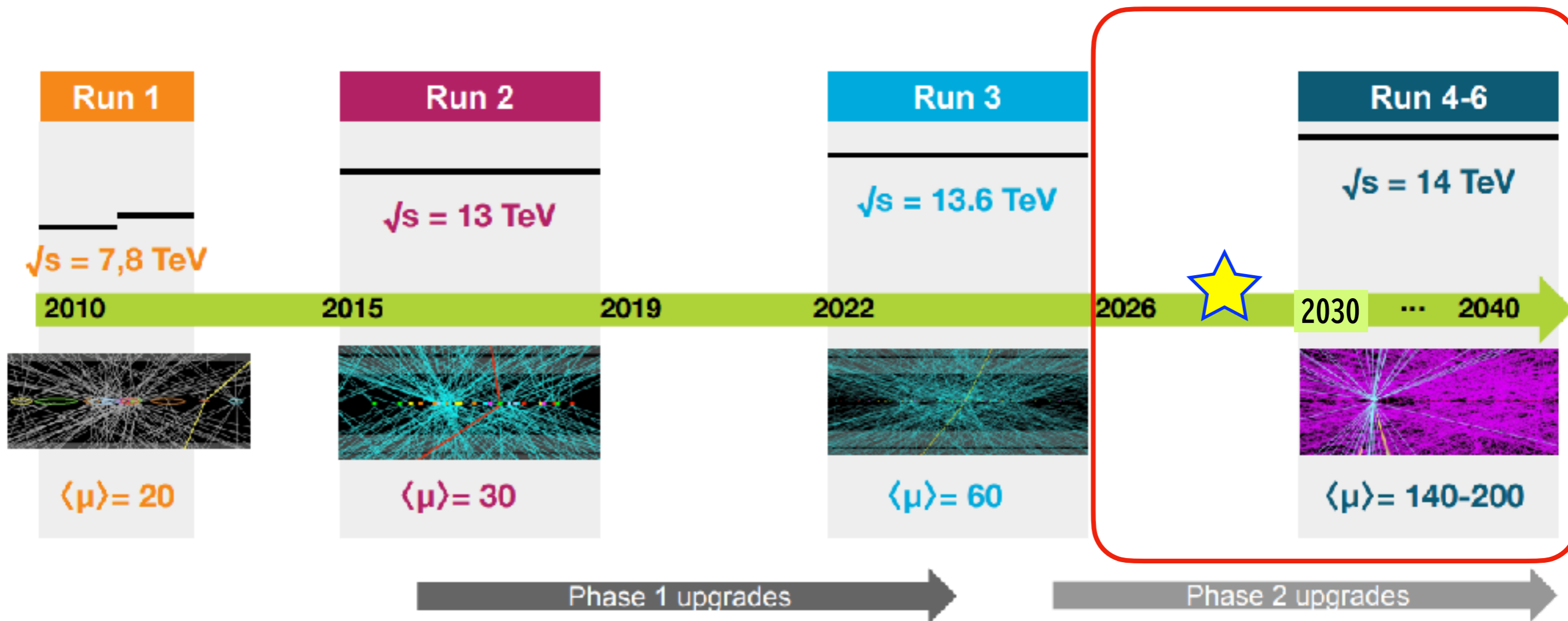
遠く (= 初期宇宙) を直接見る

稀な現象の発見・精密測定

⇒ 「間接的に」 大きな  $\Delta E$  の効果を捉える (不確定性原理  $\Delta E \cdot \Delta t \sim h$ )

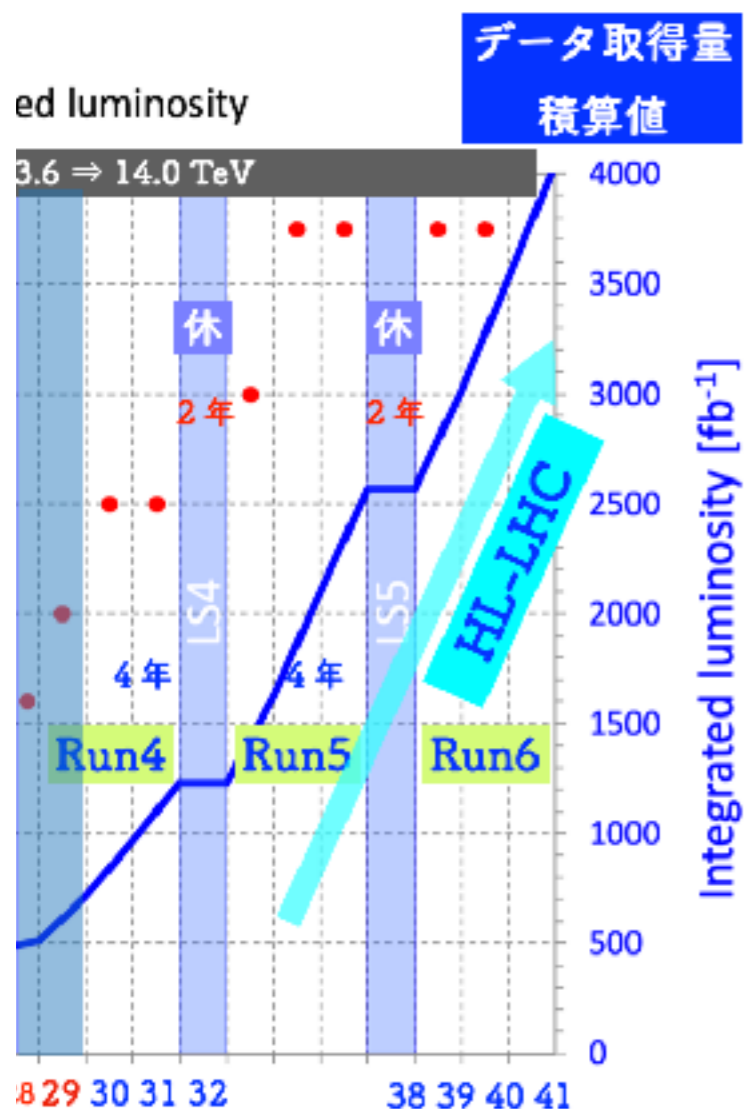


次の10年で、今まで（15年）やっていたことの~10倍をやっちゃう！



短い時間で、大量のデータを得る  
⇒ 物理研究が加速する！

既に15年（2010 - 2026）LHCはデータ取得をしてきたのに、  
なぜ？ 今更、加速器/測定器/計算機を Upgradeして  
物理実験を続けるの？



現在の立ち位置をふまえて、

LHCでしかできない（Energy Frontier）

かつ、

高輝度にすることのご利益が大きい  
（Intensity Fronteir）

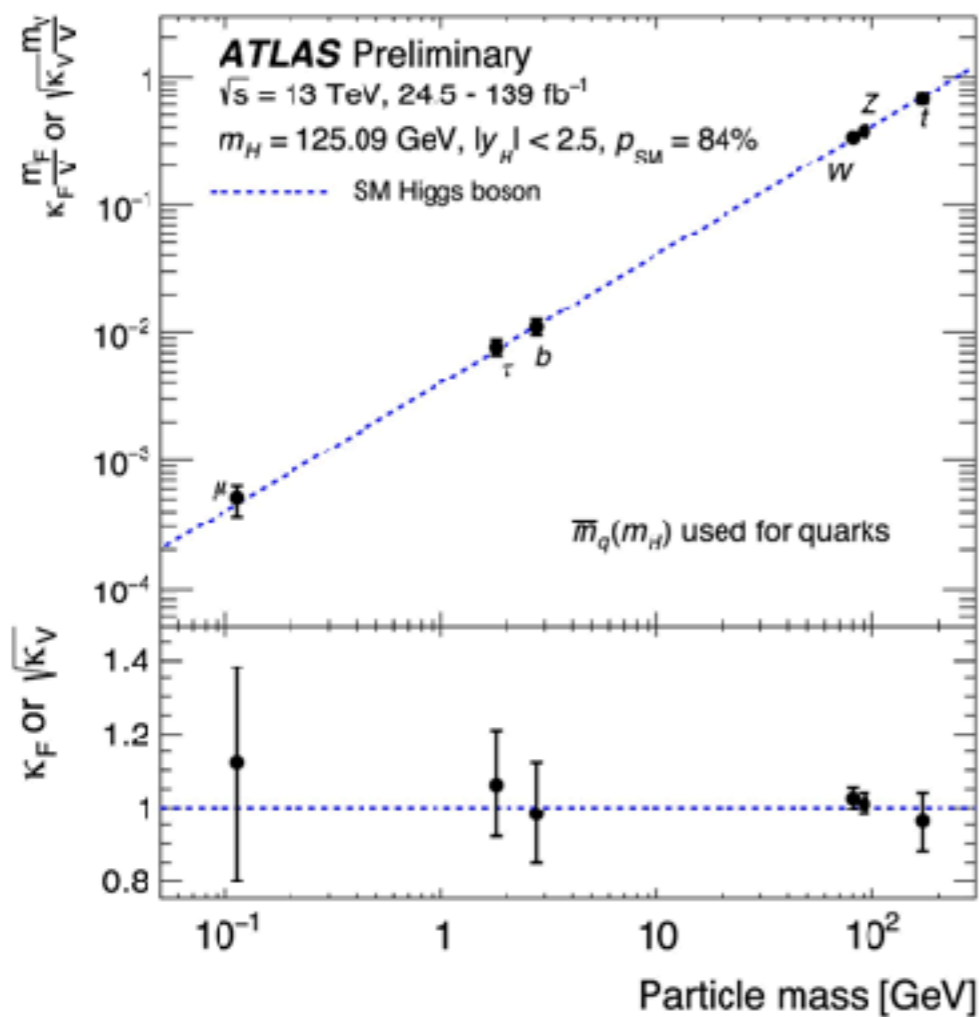
Hot Topic 3選

# ①高輝度が必要なヒッグス粒子の物理

2018年の湯川結合 (Hff)

測定精度

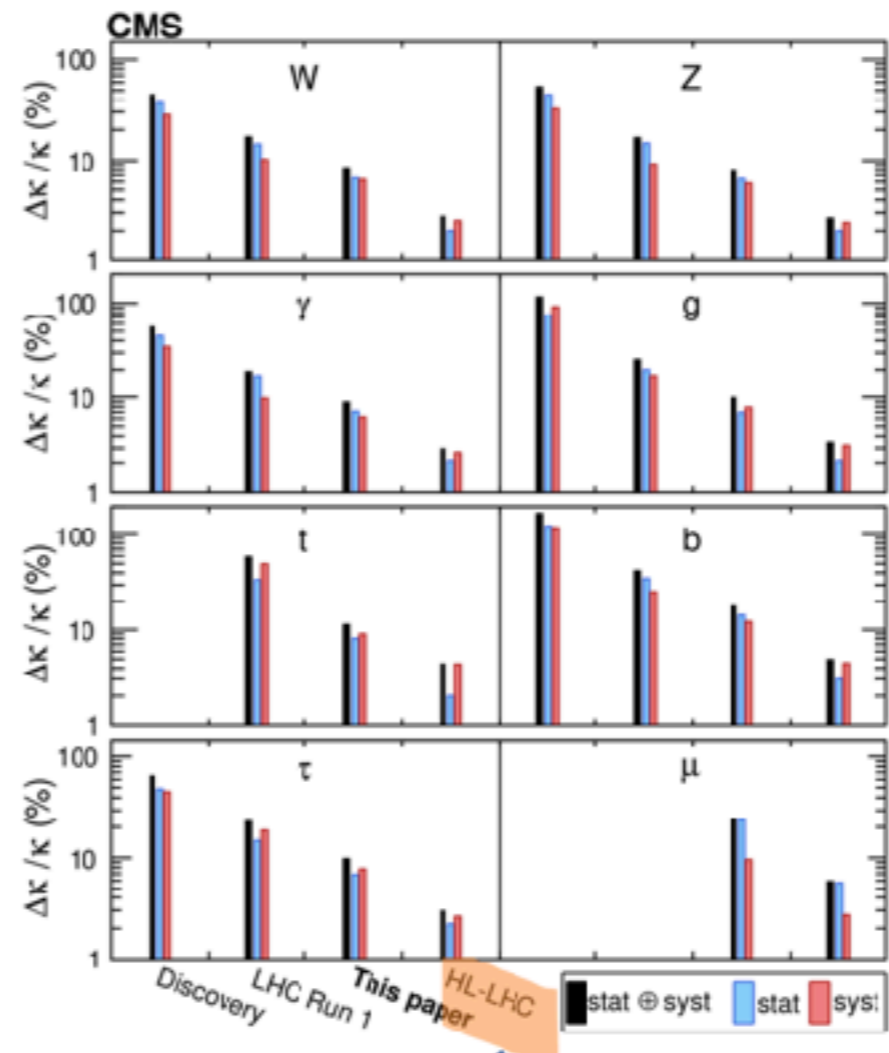
- W/Z @ 5-10%
- 第3世代 (b, t,  $\tau$ ) 10-20%
- 第2世代 ( $\mu$ ) : 見えたか?



10倍のデータで到達できる

測定精度

- 全般に 2-5%
- ② Higgs自己結合 : HHH



新物理のスケール

1 TeV

⇒ ズレ ~6%

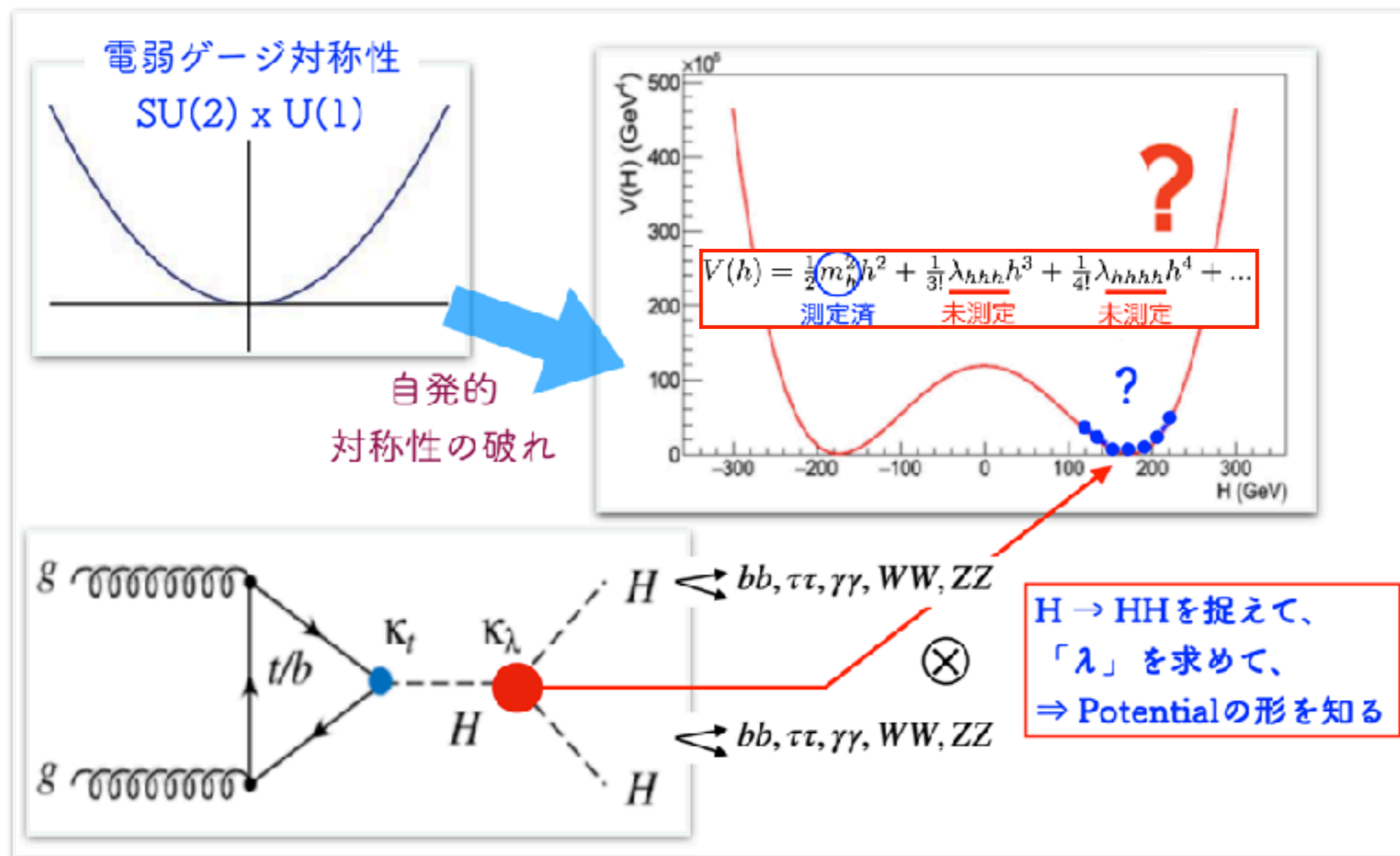


精密測定は  
超TeVの世界への  
ドアを拓く!

LHC as  
Intensity Frontier

H, top, ...  
LHCでしか探索  
できないFrontier  
⇒ 世界で1つ

⇒ 「間接的に」 **大きな $\Delta E$ の効果**を捉える (不確定性原理  $\Delta E \cdot \Delta t \sim h$ )



かなりレアなプロセス  
⇒ 大量のデータが必要

H v.s. HH ⇒ 1/1000

多分、2060-2070頃まで、  
LHCが唯一の実験施設

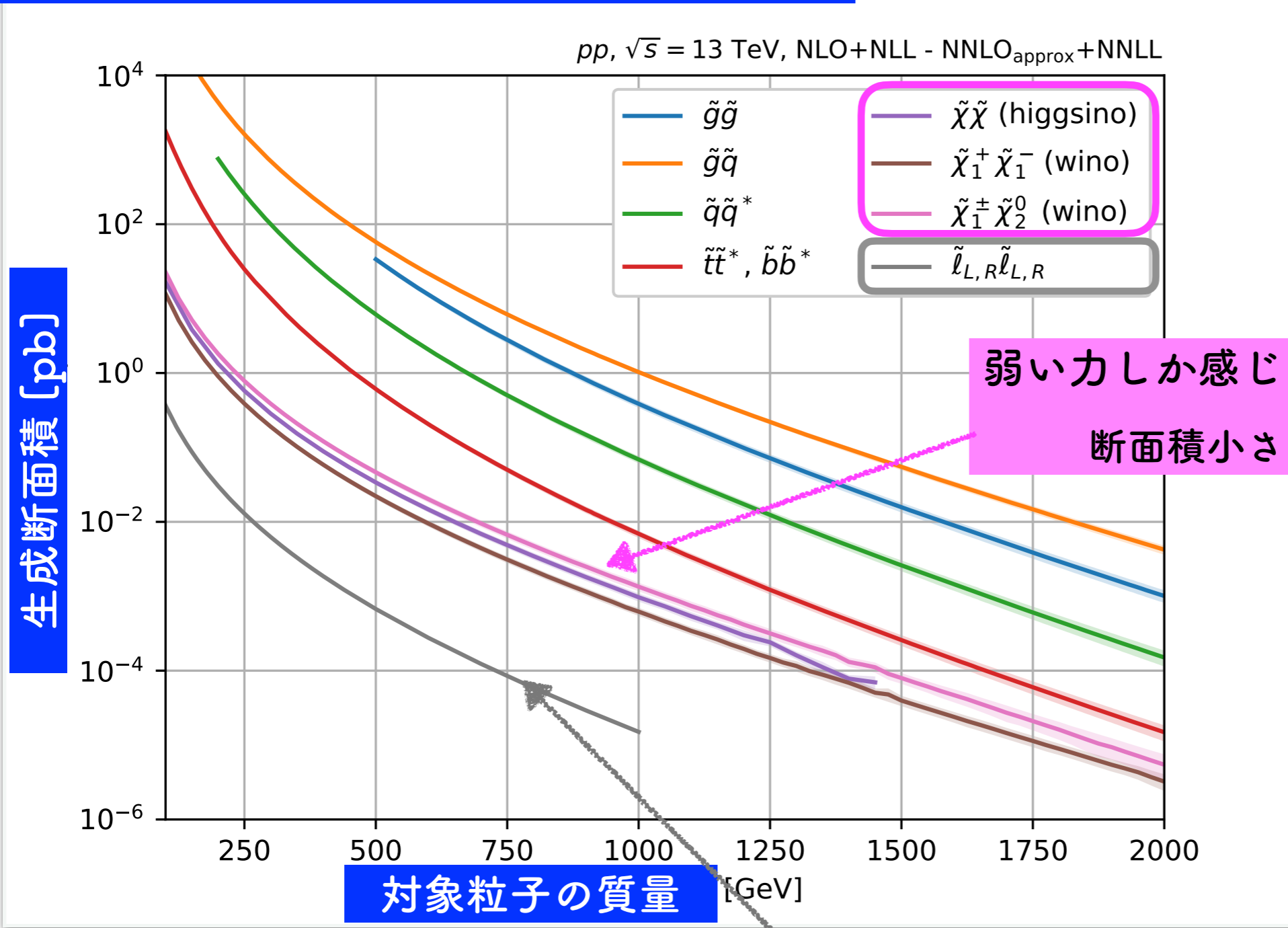
SMでは  $\lambda_{HHH} \sim 0.13$

仮にそのとおりだとすると、HL-LHCの終盤に入ってから、  
信号が見え始めそう? ← 日々、賢くなりもっと早く信号を捉えた

# ③ 高輝度が必要な、超対称性粒子探索

## 超対称性粒子の生成断面積 (13TeV)

$$N \text{ (生成数)} = \sigma \text{ (断面積)} \times L \text{ (輝度)}$$



弱い力しか感じない超対称性粒子の探索  
断面積小さめ：今から本番

レプトンの超対称性パートナー粒子の探索  
(断面積極小：今から本番)

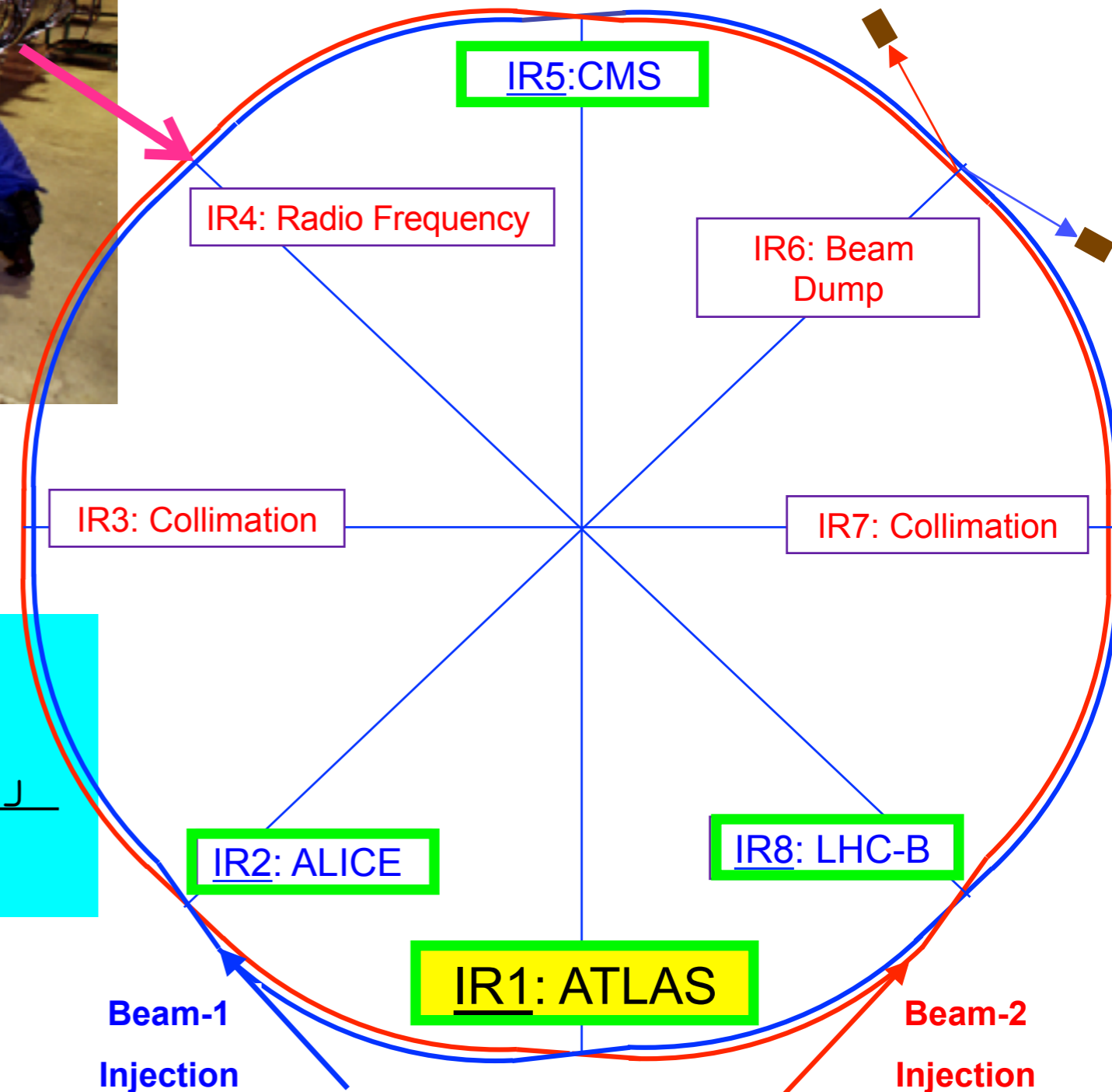
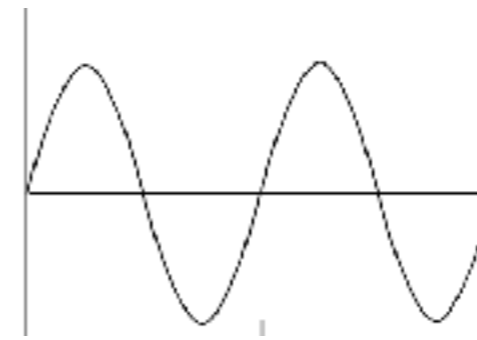
# 加速器・LHC

---

まずは、一般論から

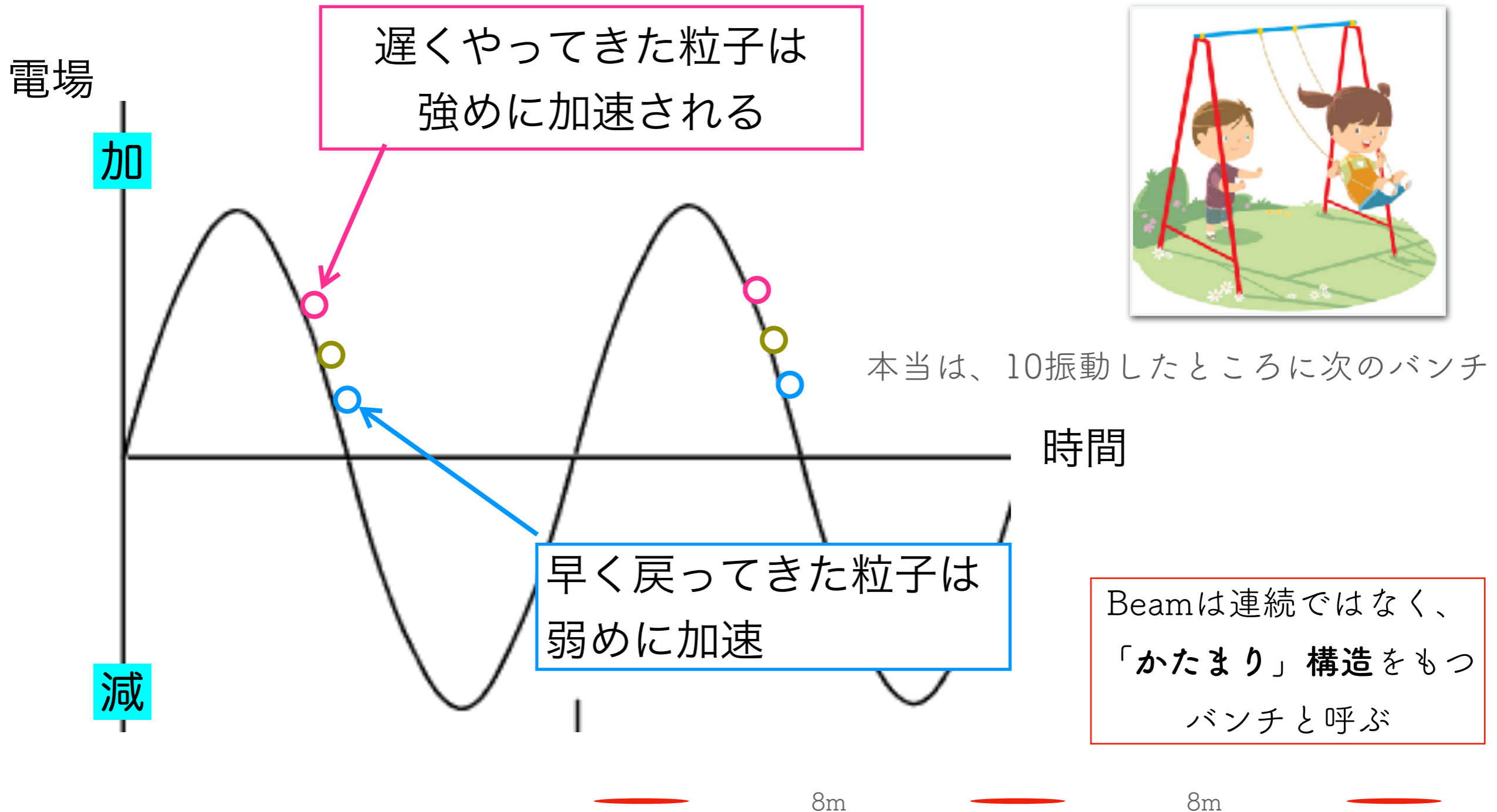


粒子加速をする空洞 (Cavity) 1カ所



- 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

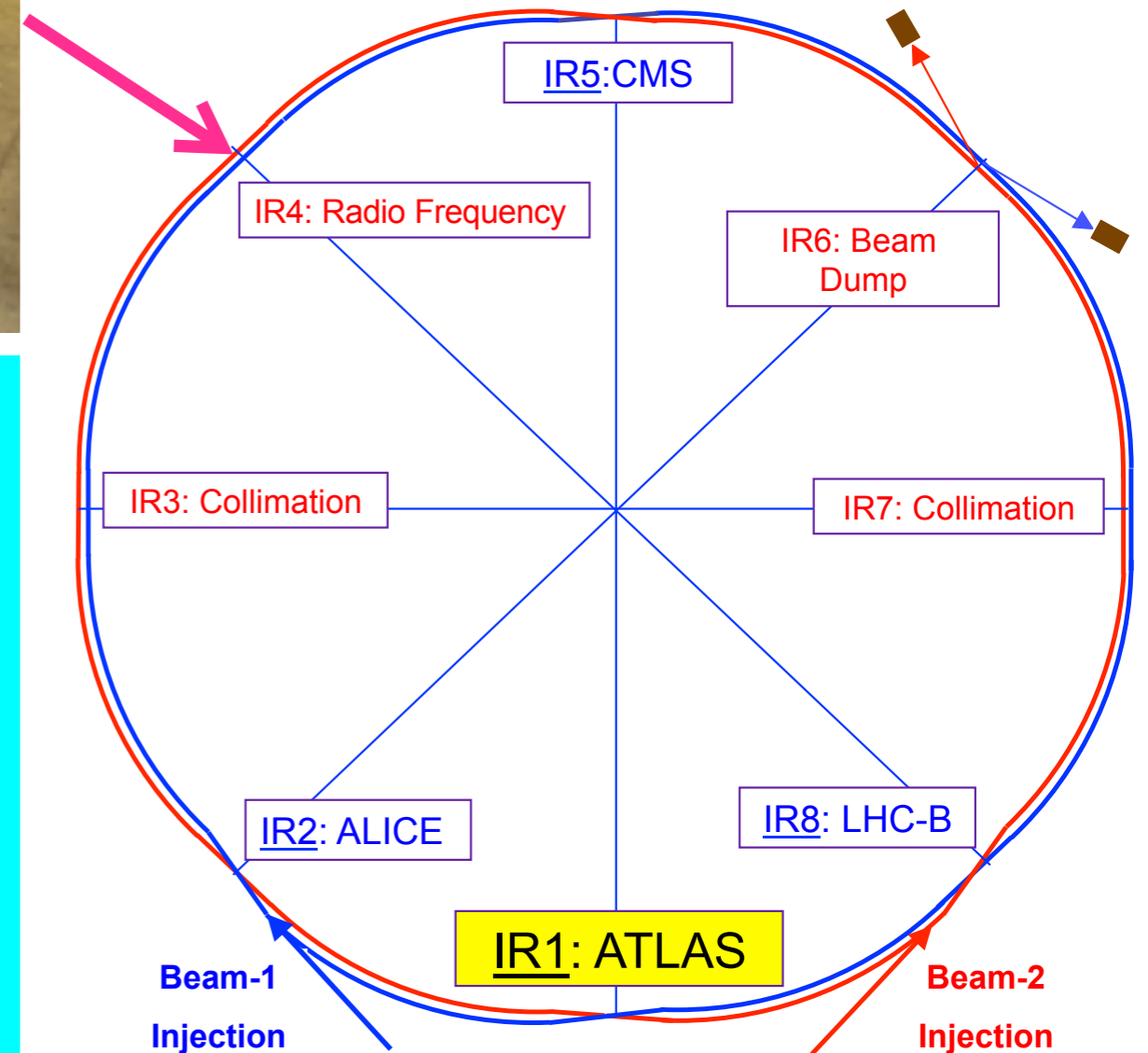
## 時間変動する電場で、タイミングよくビームを加速する



位相安定性

8mごとに、長さ10cmの針が飛んでいる感じ。

針が $10^{11}$ 個 (= 1000億) 陽子の塊でできている



## 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

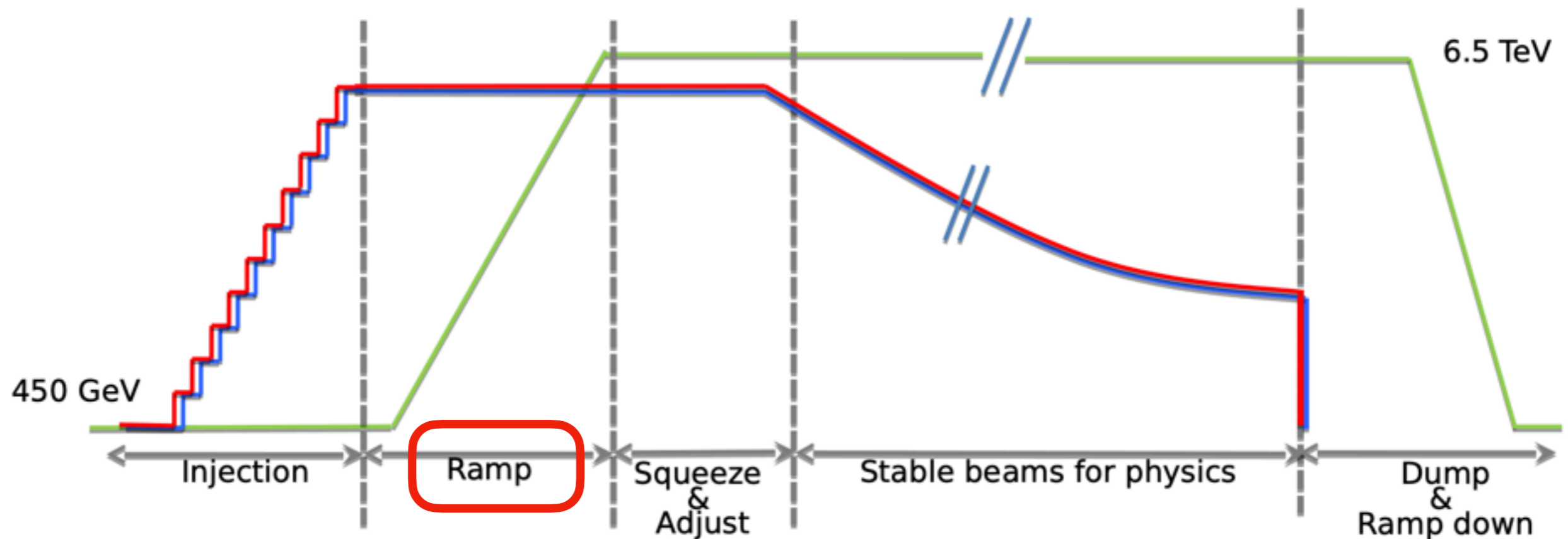
平均：485keV エネルギーをえる

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？

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

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

トンネルは再利用

18km(曲部) + 9km(直線)

$P=7\text{TeV}/c$  に到達したい → 必要な磁場？

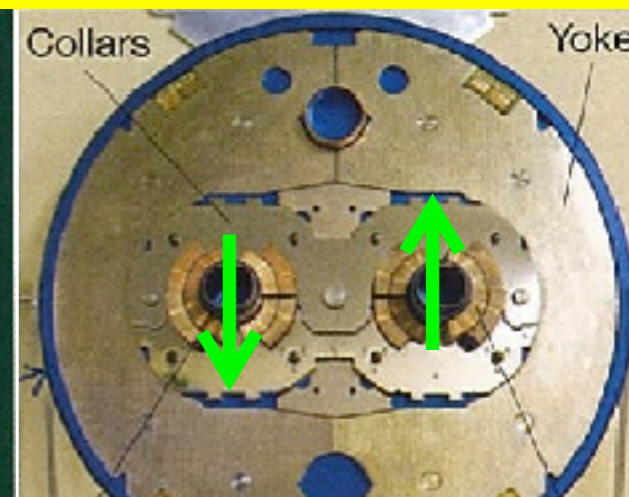
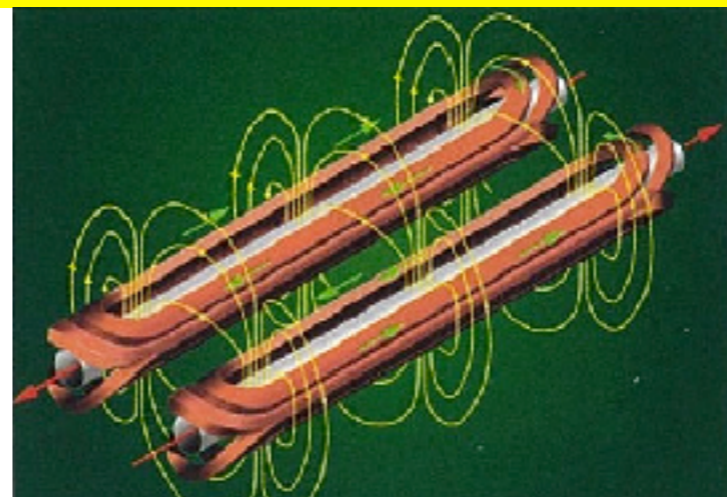
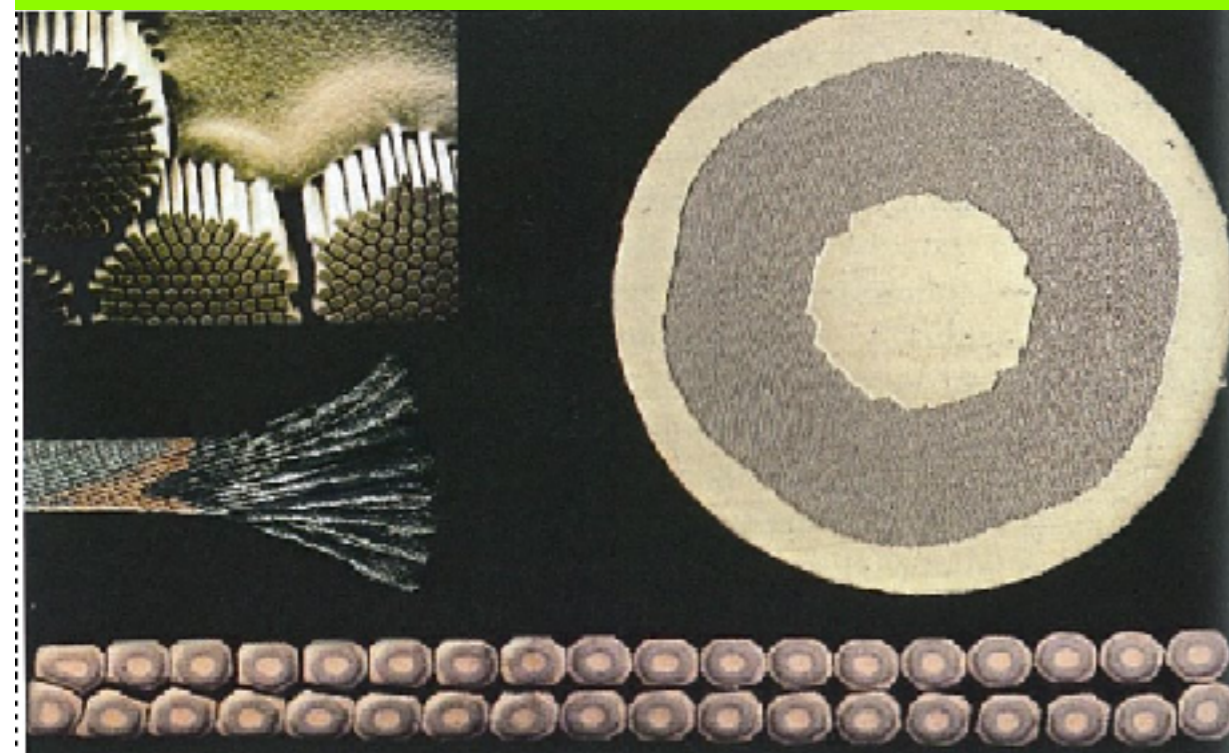
$$\rho=2,860\text{m}$$

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

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



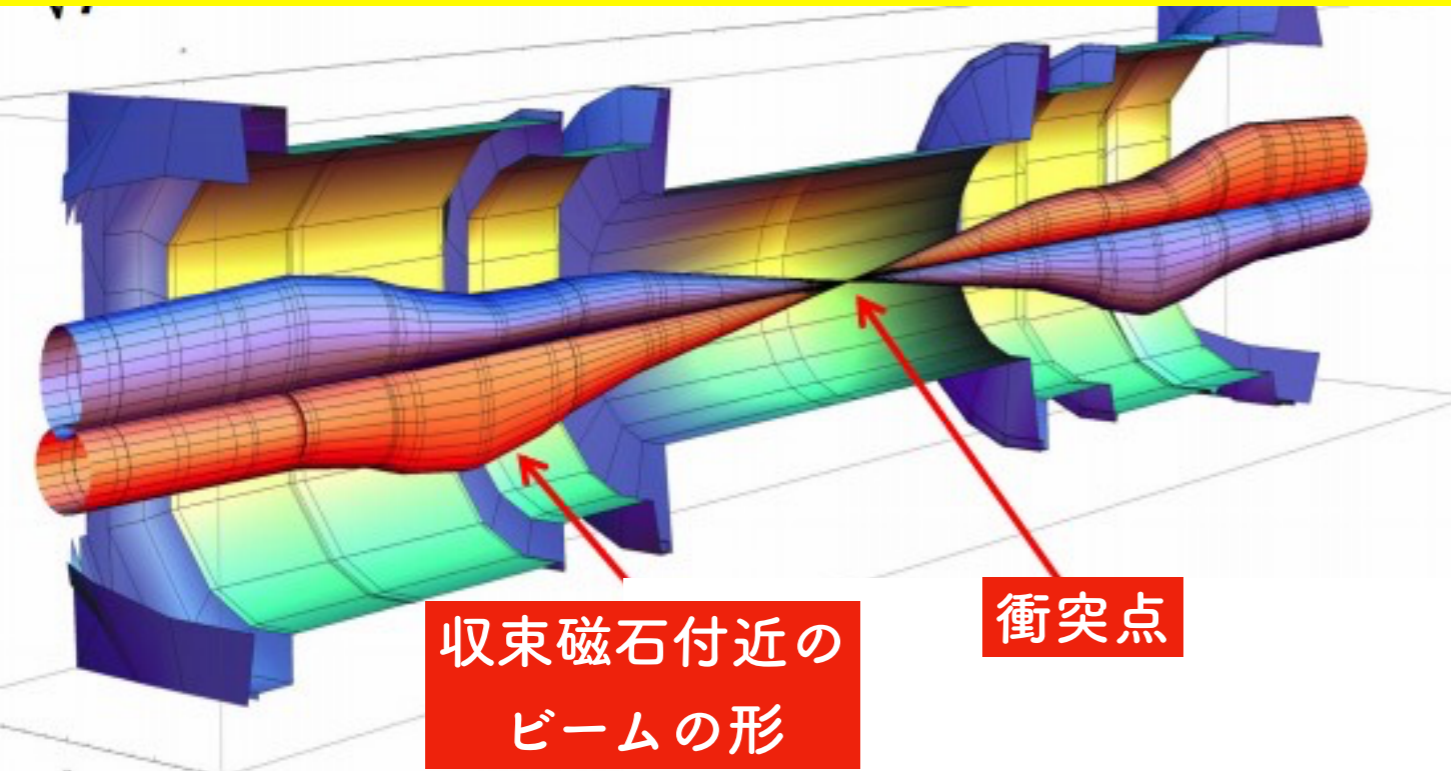
1232 dipoles (1.9K - 8.33 T)  
9593 magnets

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) :  $\sim 100\text{cm} \Rightarrow 30\text{cm}$

1秒間に11253周

1周に  
何バンチ?

1バンチに陽子が  
いくつ含まれる?

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

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

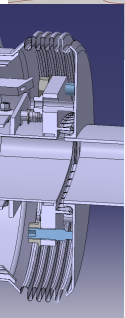
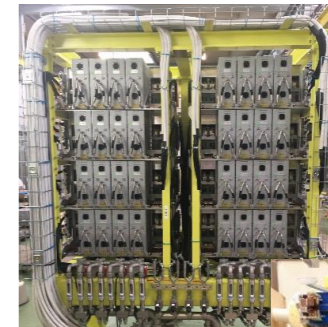
$$= 2.2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

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  $\sigma$  :  $\sim 50\text{pb}$  ( $= 50 \times 10^{-36}\text{cm}^2$ )
- ▶  $L \cdot \sigma \sim 100 \times 10^{-2} / \text{sec} = \mathbf{1 \text{ Hz}}$

これだけやっても、1 Hz

もっと、もっと...

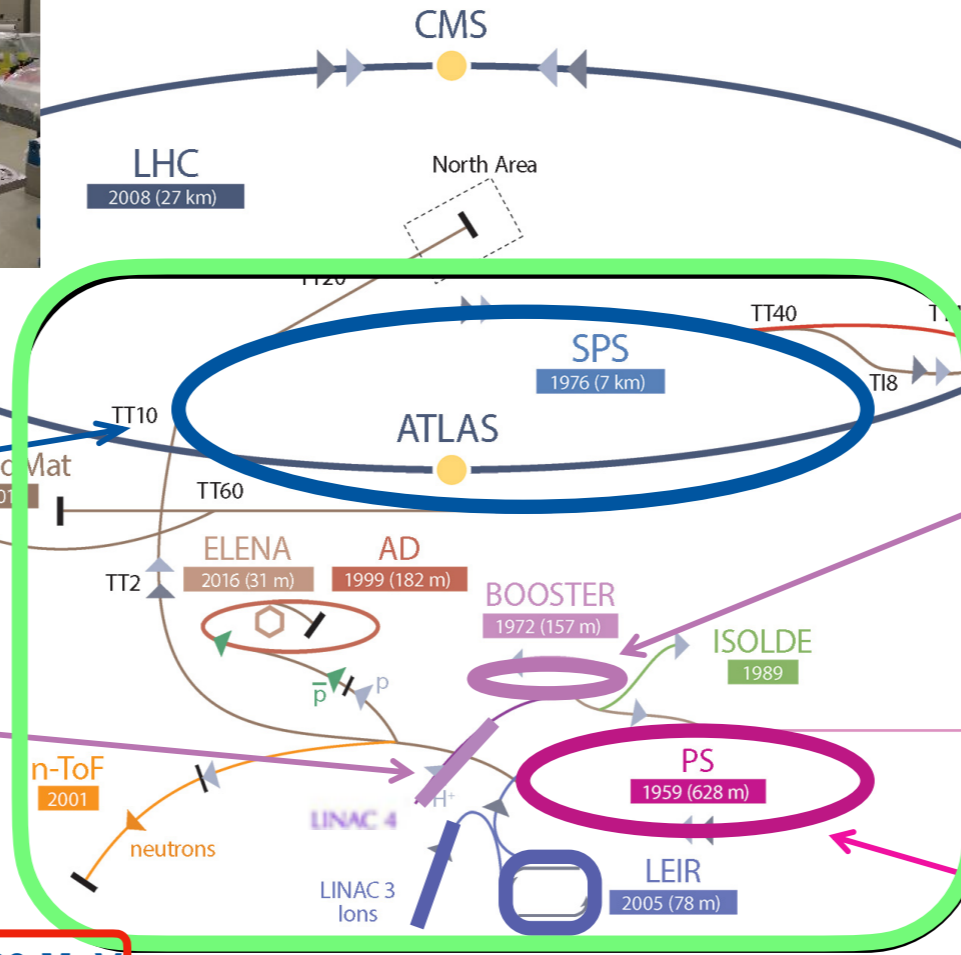


- Main **RF** system (200 MHz) upgrade
- Longitudinal **impedance** reduction & partial a-C coating
- New **beam dump** and protection devices

**SPS**



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



**PSB**

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

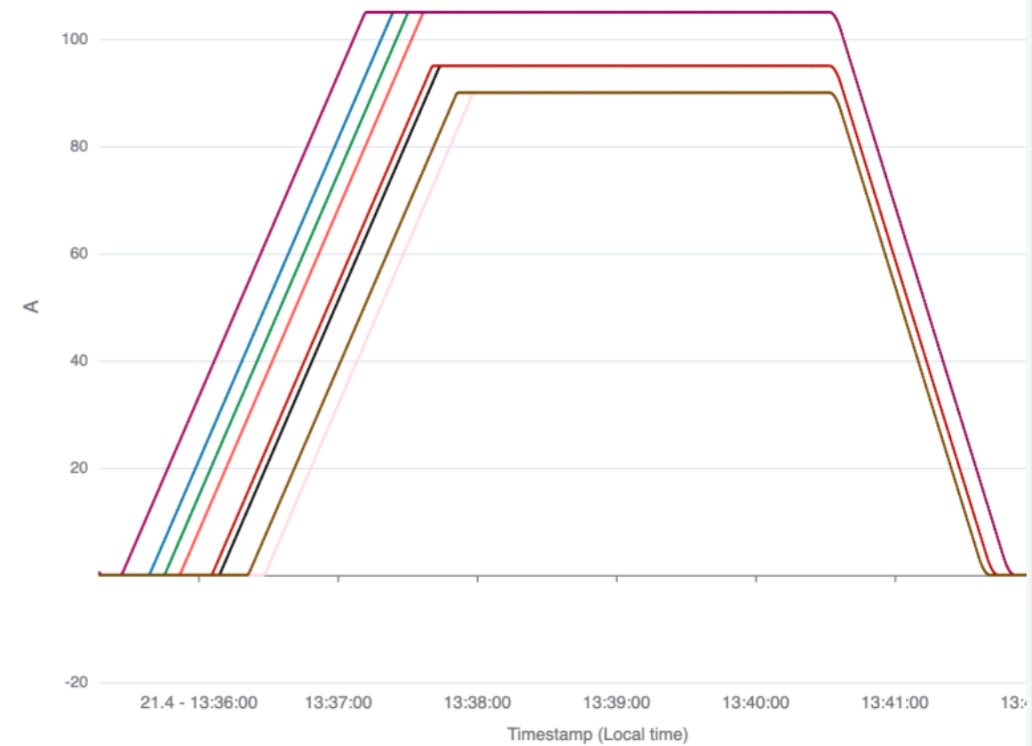
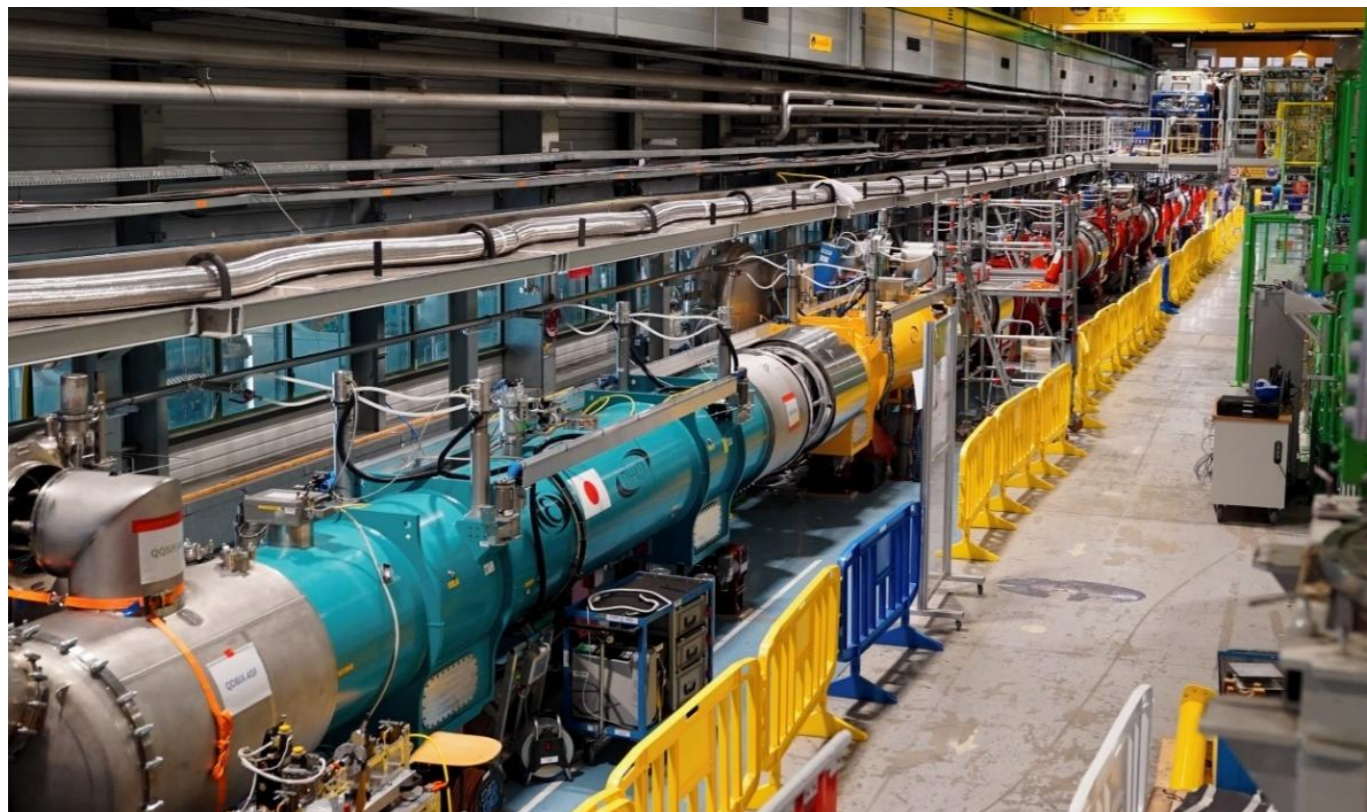
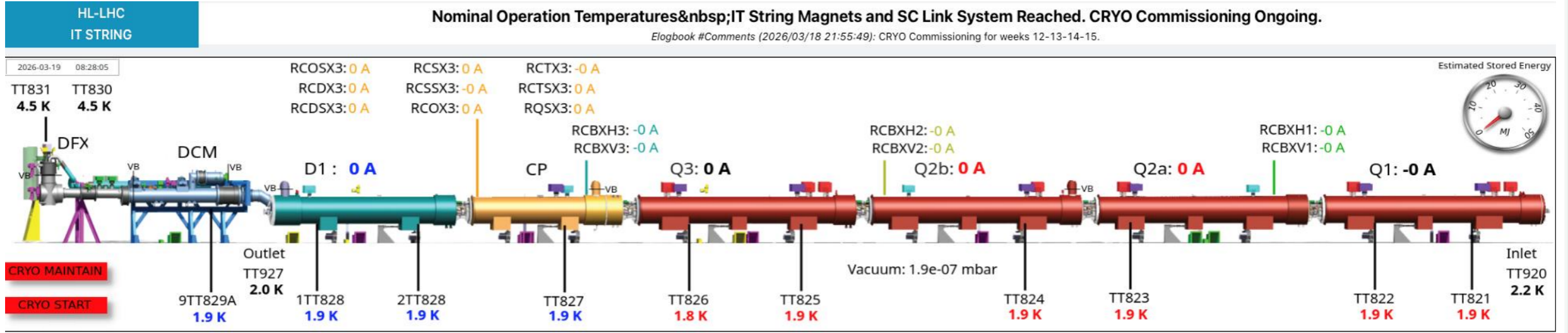
**PS**



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

	$N_b$ ( $\times 10^{11}$ 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	

## 地上で本物をくみ上げて、1.9 Kに冷やして、試運転中



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

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

L=瞬間輝度

1秒間にどれだけの断面積の物理過程を叩き出せるか?

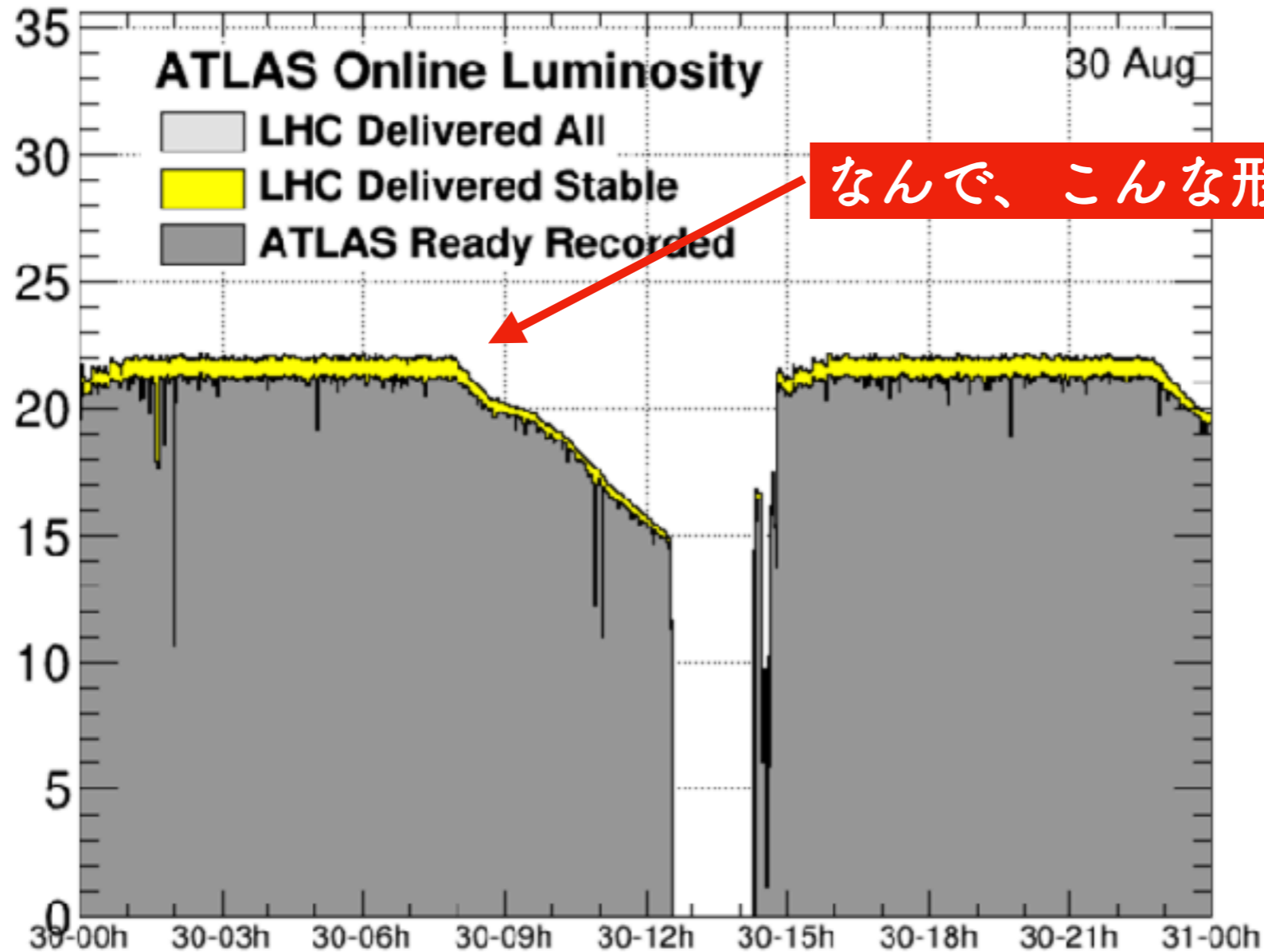
- Higgs  $\sigma$  :  $\sim 50\text{pb}$  ( $= 50 \times 10^{-36}\text{cm}^2$ )
- ▶  $L \cdot \sigma \sim 100 \times 10^{-2} / \text{sec} = \mathbf{1 \text{ Hz}}$

これだけやっても、1 Hz

もっと、もっと...

1.68 fb<sup>-1</sup> / Day

(瞬間) ルミノシティ



なんで、こんな形をしていると思う？

加速器側：

冷却・放射線耐性

実験側：

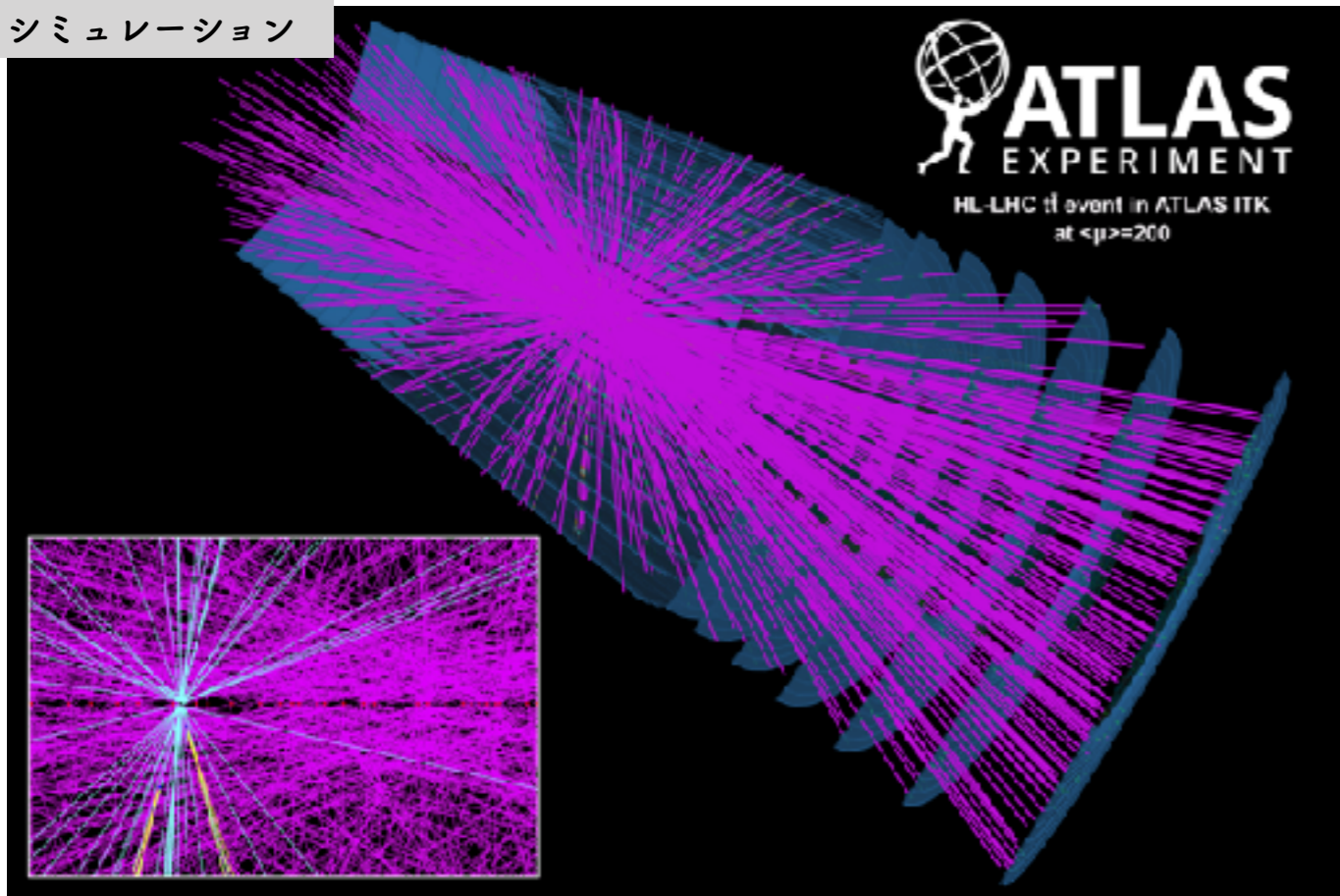
こまっちゃう...

single-Higgs: 60pb x 1.7 fb<sup>-1</sup> = 10万個 / 1日

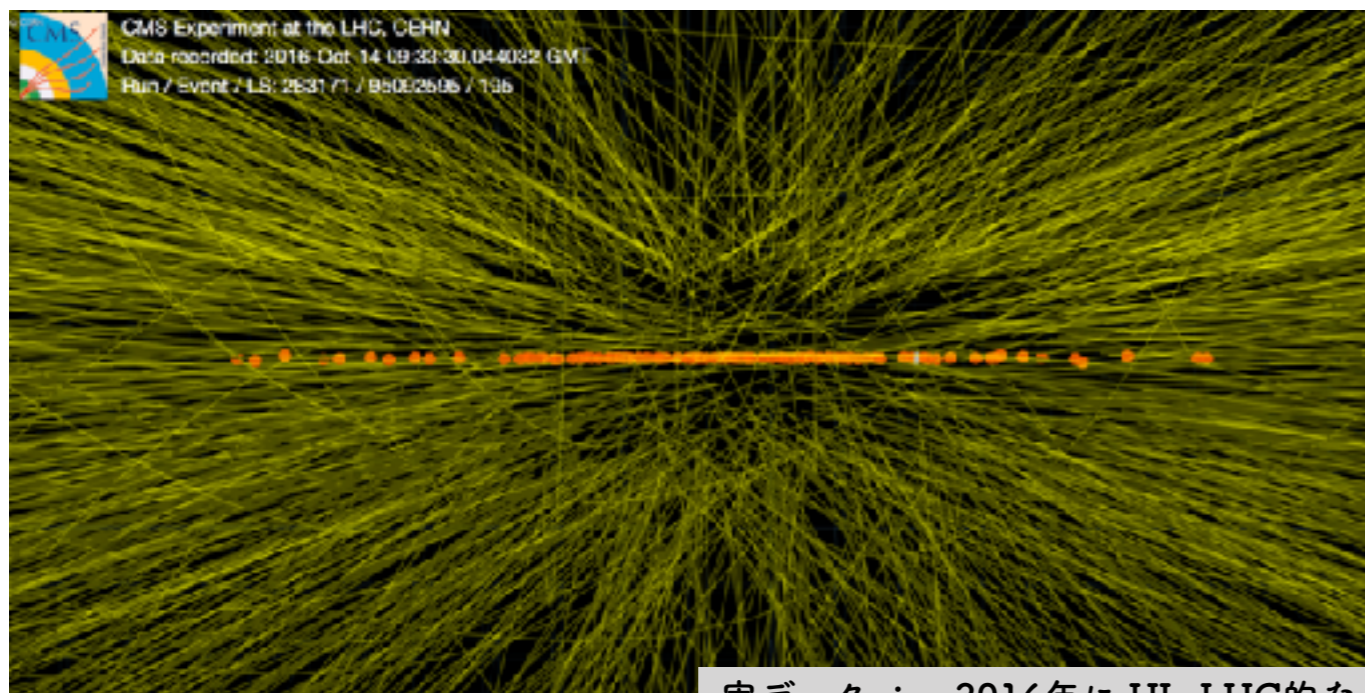
# 測定器・ATLAS

---

シミュレーション



<https://atlas.cern/updates/news/scientific-potential-high-luminosity-lhc>



実データ： 2016年に HL-LHC的なビームを  
衝突させてみた（同時反応数は 100程度）

高統計は重要なのだが、タダではない

200衝突が同時に発生する状況で、  
良い物理解析をするのは困難。  
測定器の放射線耐性も心配。

測定器・エレクトロニクス・計算機の  
アップグレード

- 検出器のセンサーを微細・放射線に強い構造
- 高速通信・強力プロセッサ
- 粒子認識、判別のアルゴリズム性能向上  
～人工知能の積極的な導入

# 28 ATLAS測定器がやっていることは本質的に2種類

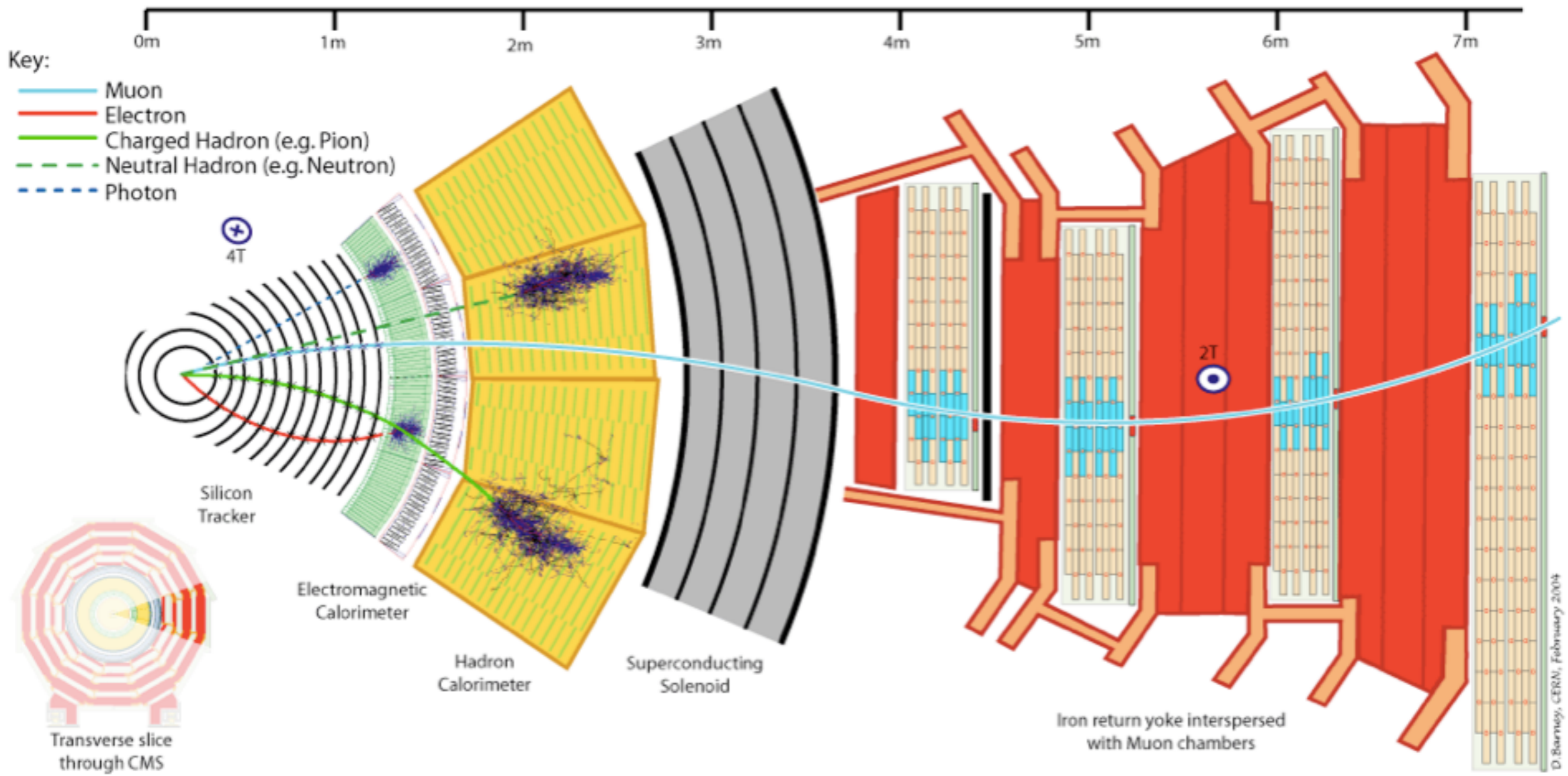
巨大で (ex. ATLAS : 25m x 50m : 7000トン)

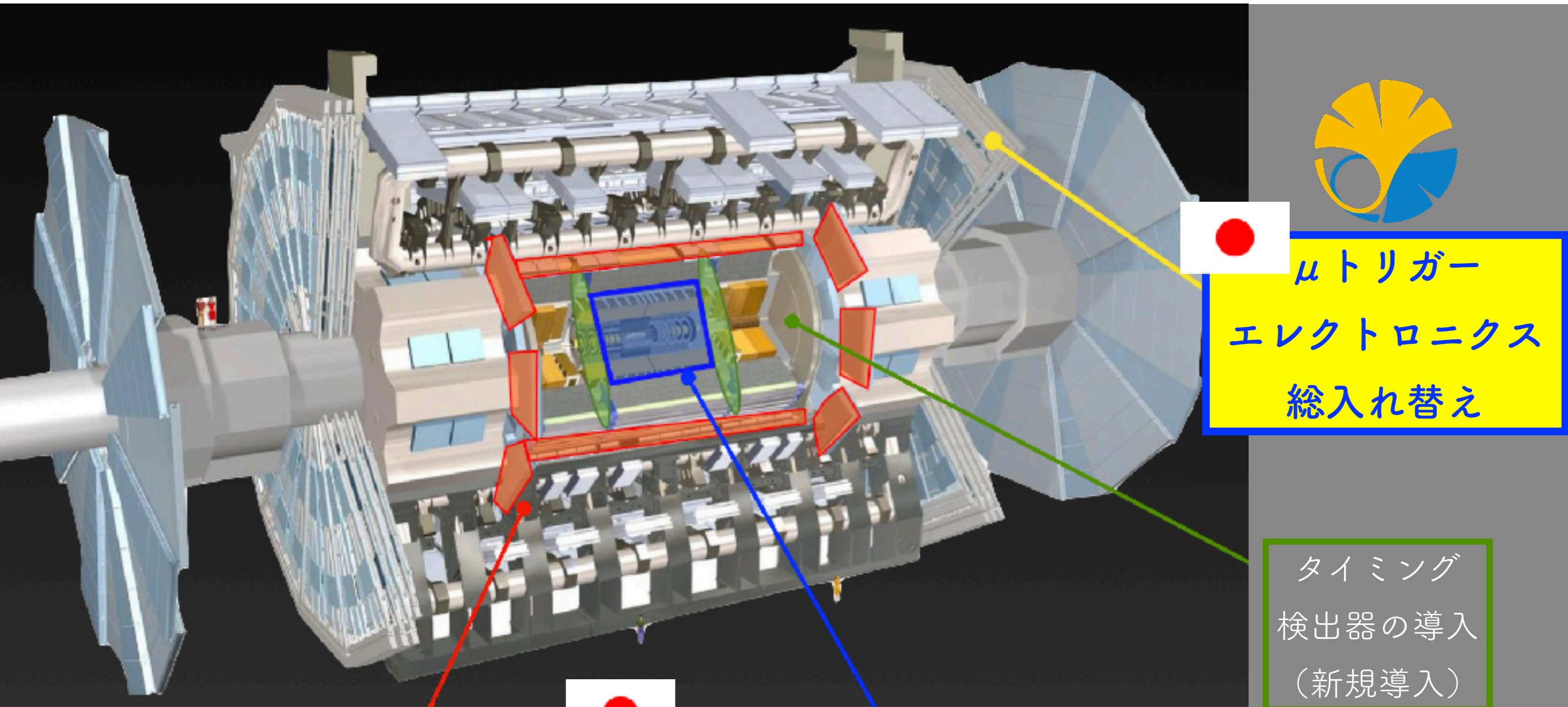
複雑 (100Mチャンネル)ではあるけれど、


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

これらの組み合わせで  
賢いことをやる






 μトリガー  
 エレクトロニクス  
 総入れ替え

タイミング  
 検出器の導入  
 (新規導入)


 新規ミューオン測定器の追加


 内部飛跡検出器 (ITk) の総入れ替え

- ・ 対放射線性能増強
- ・ より精細なチャンネル (サイズ)
- ・ カバーする範囲の大幅な拡大

## 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

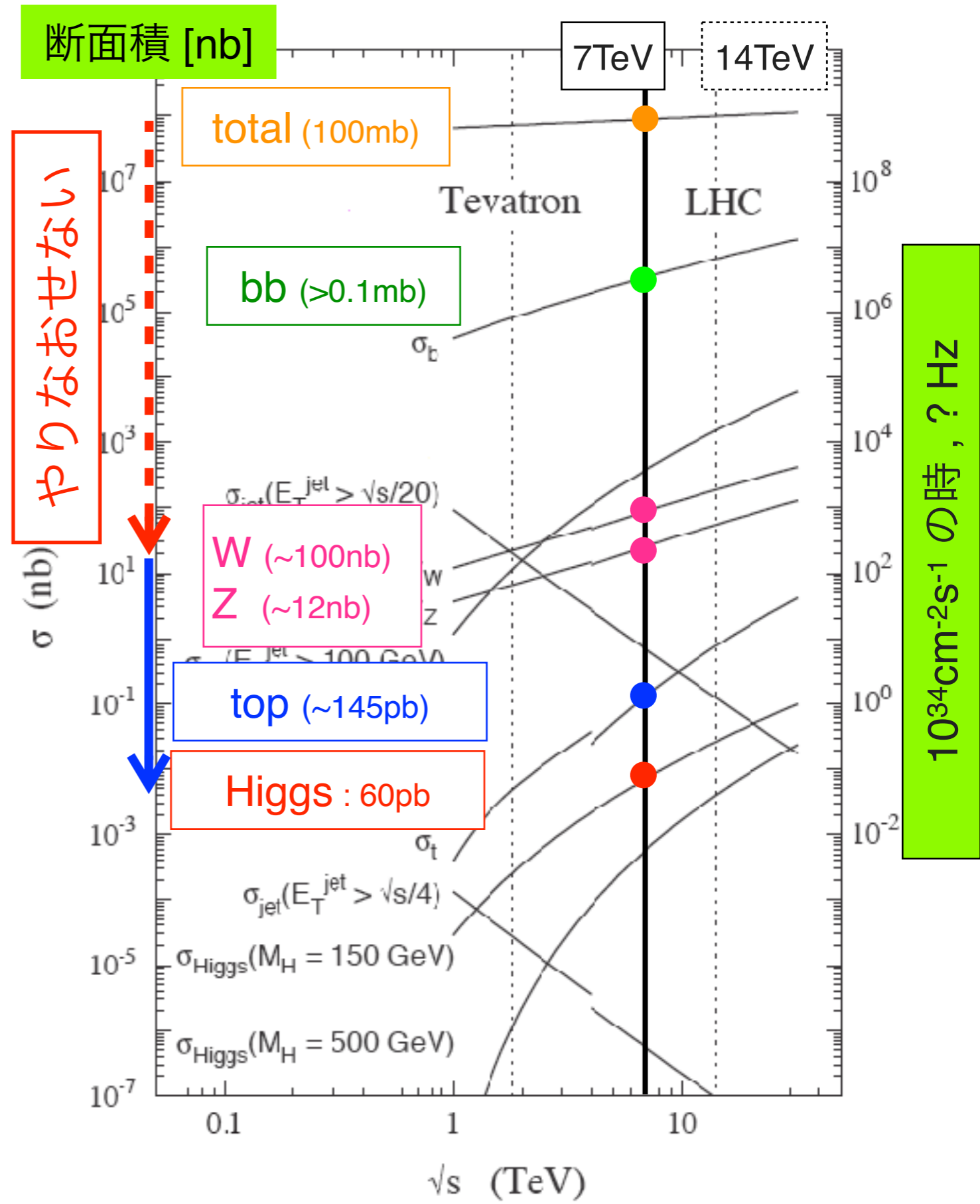
その後の 解析

999すてる 1えらぶ

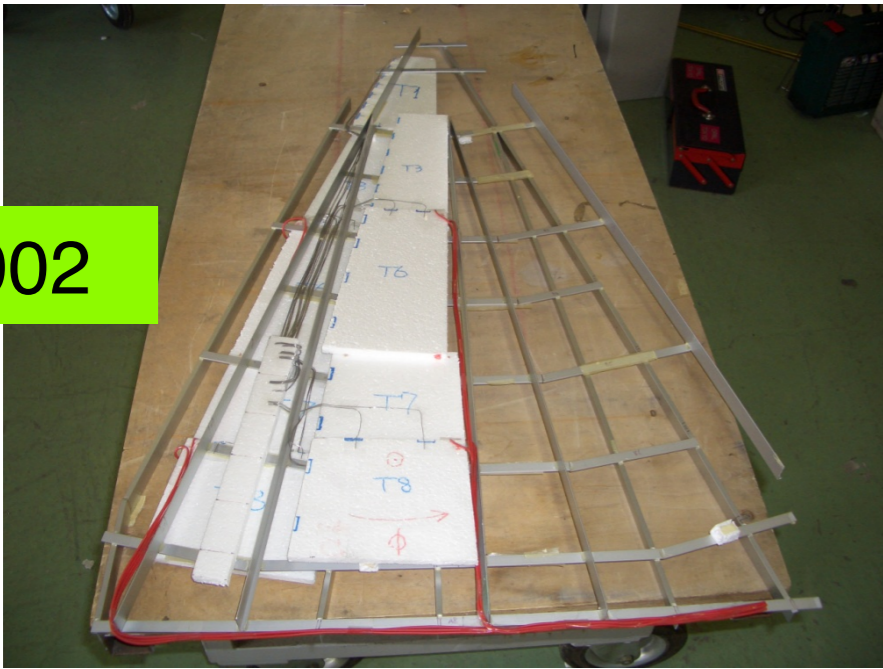
新粒子 1 は

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

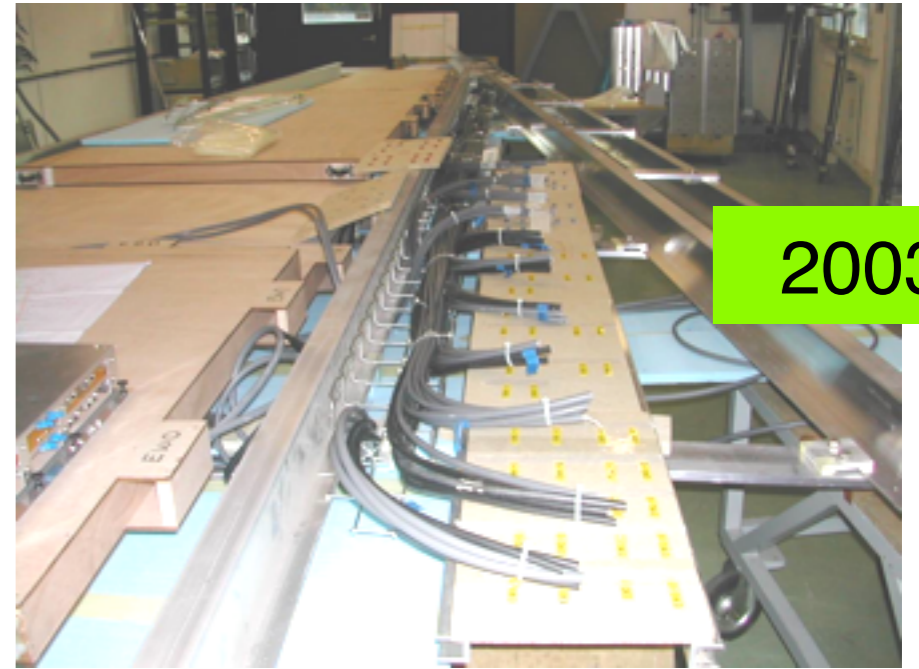
実験成功の重要な key point !!



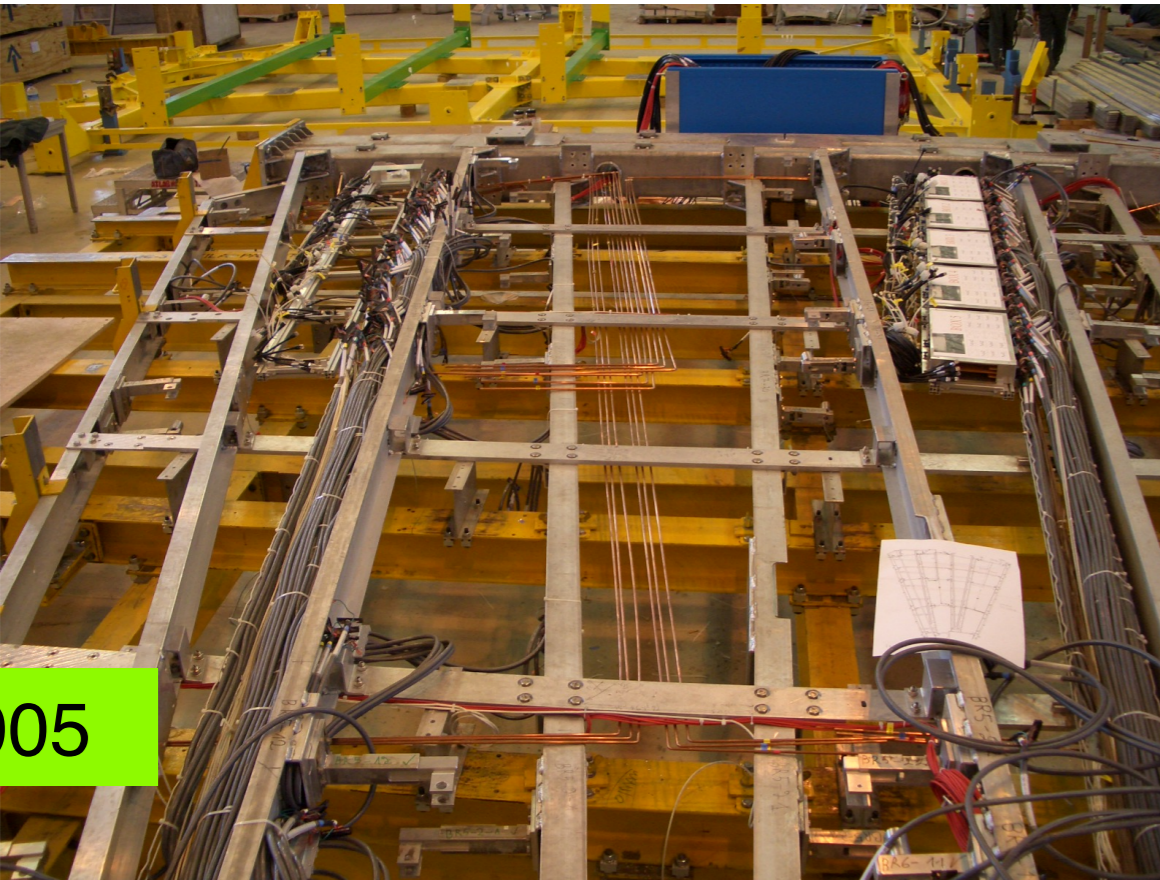
2002



2003

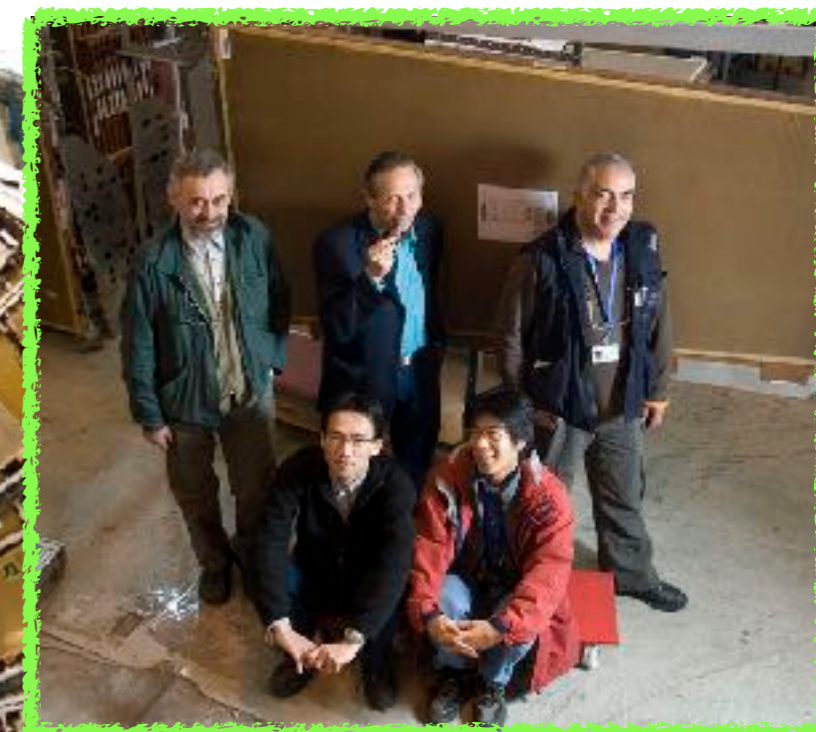
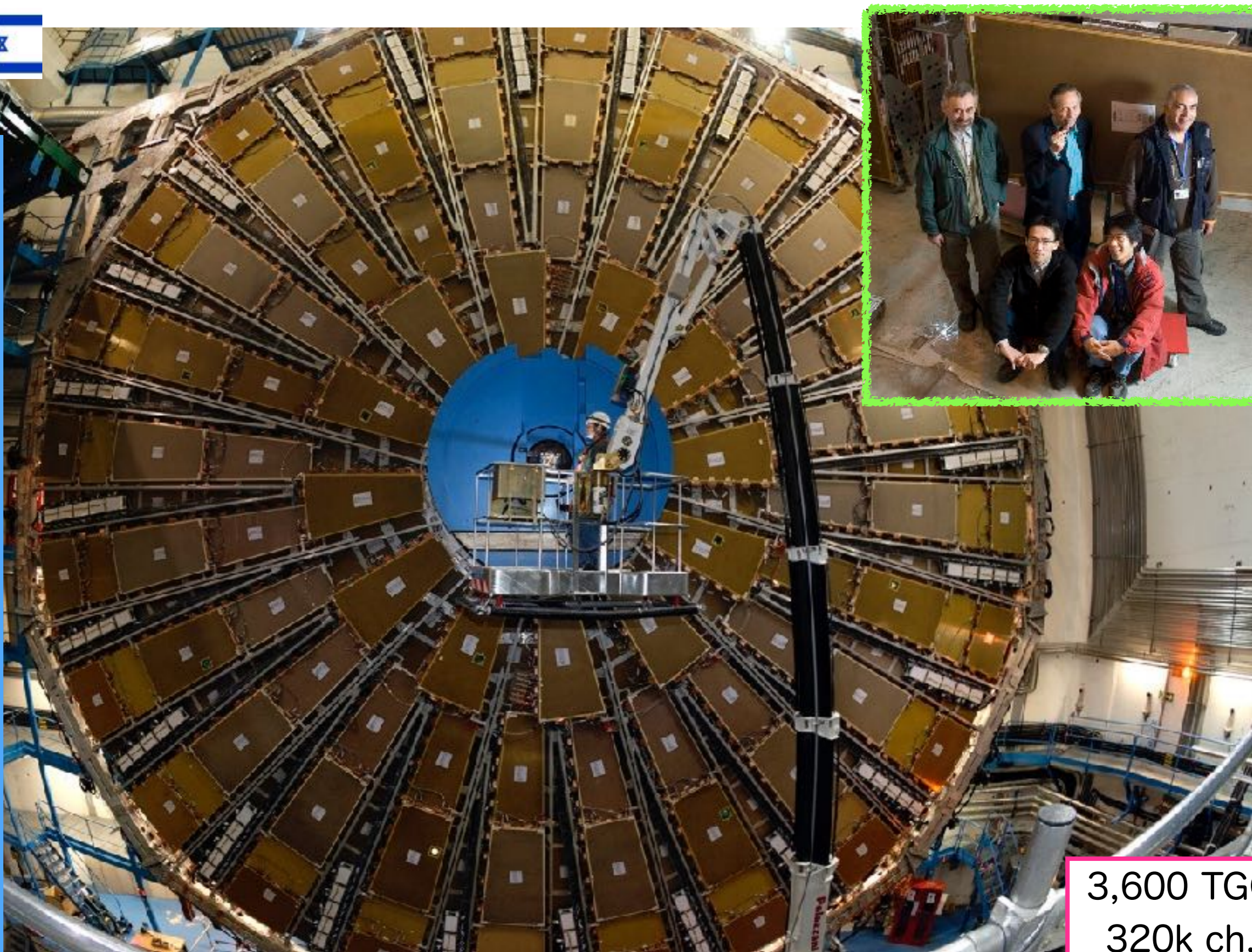


2005



2007



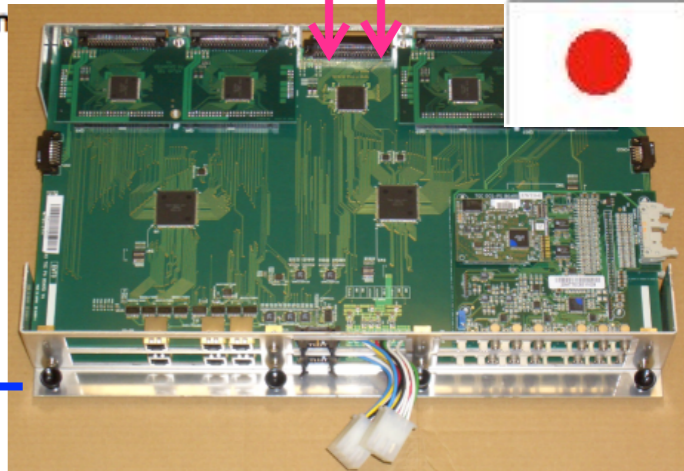
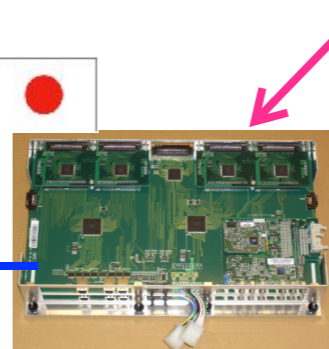
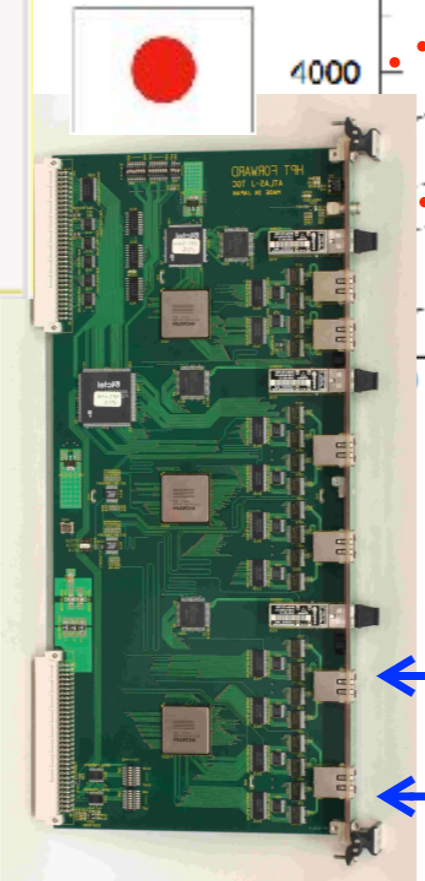
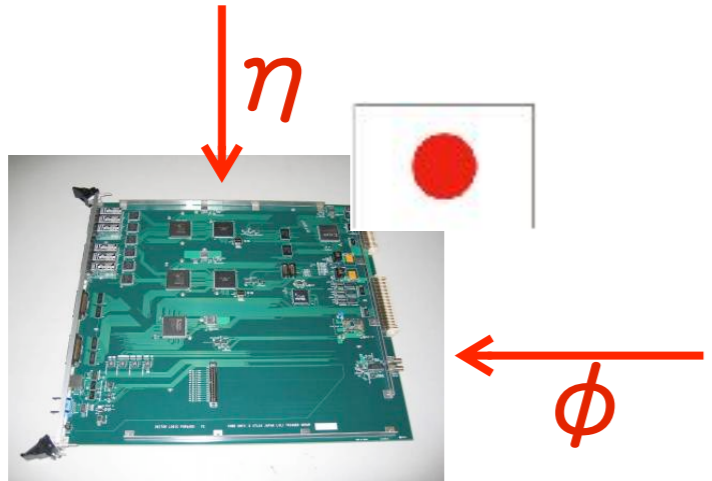
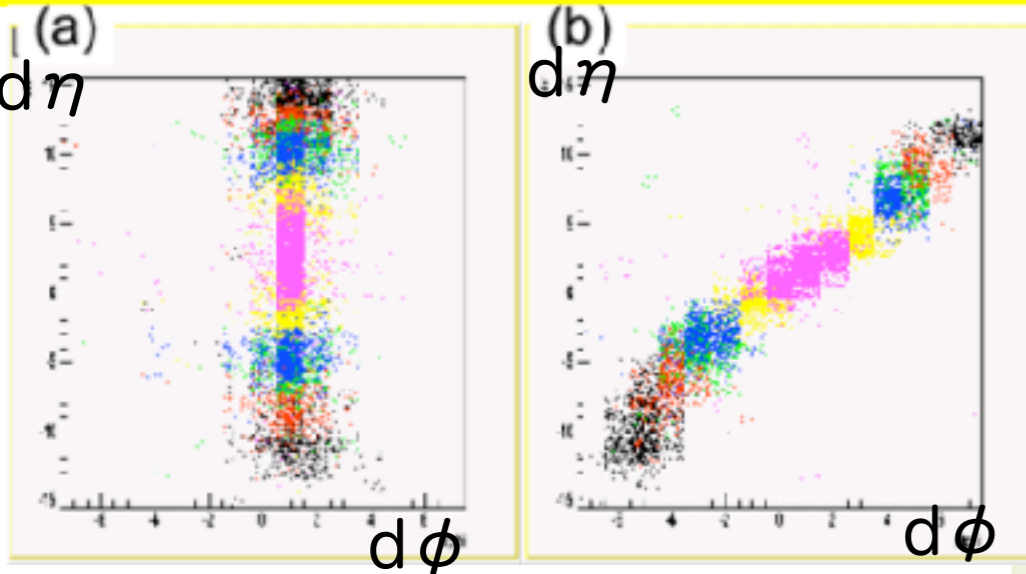
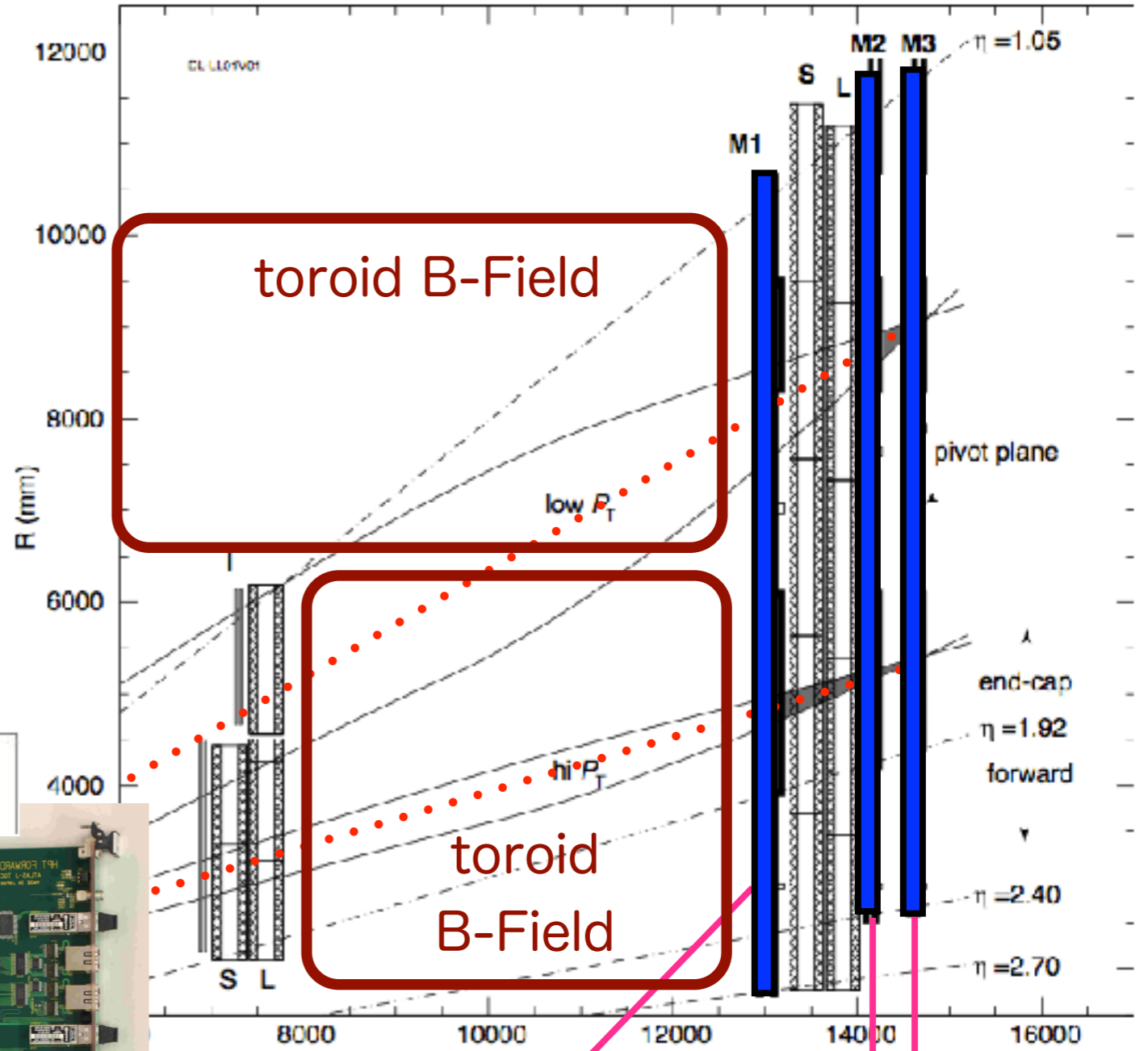


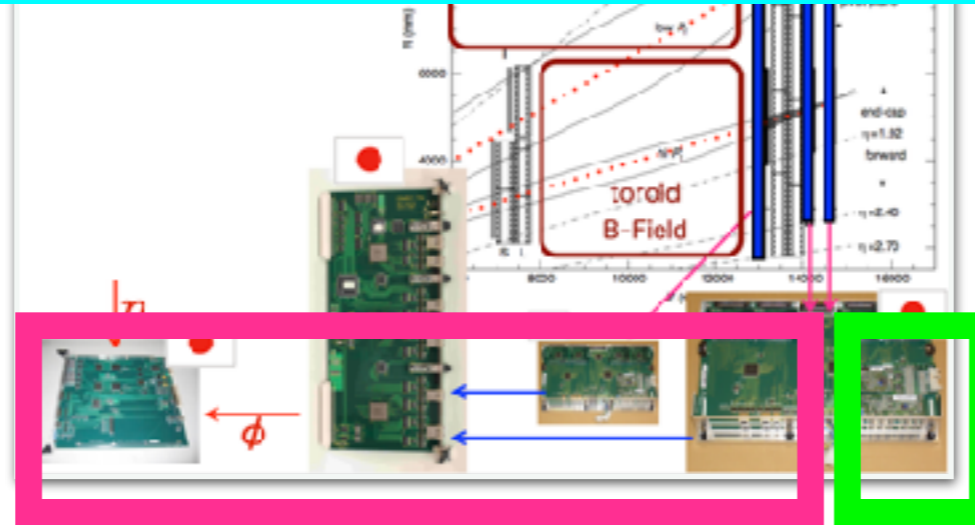
3,600 TGC  
320k ch.

# 33 Muon をトリガーするしかけ (2008年型)

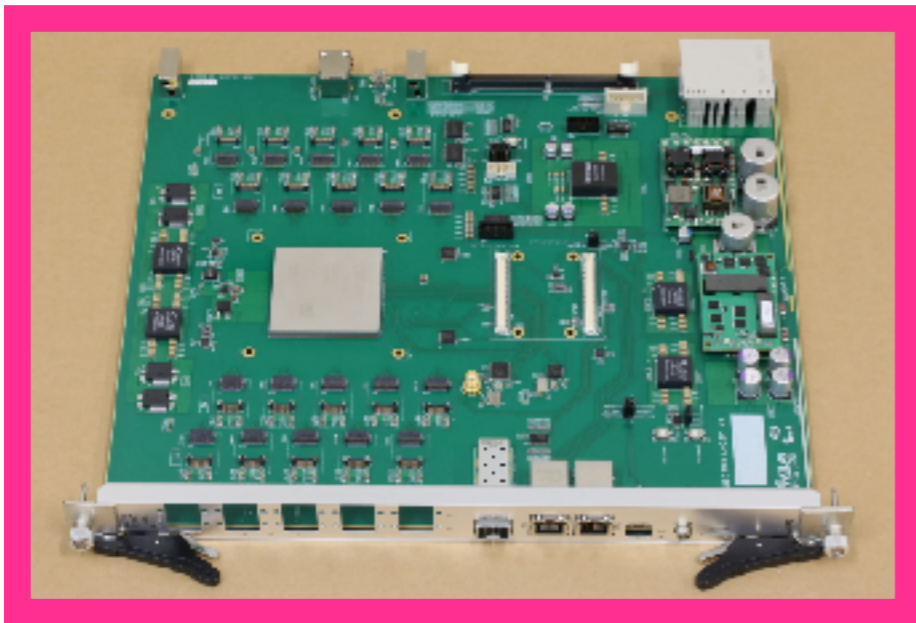
1. 衝突点からMuonが飛んでくる
2. 7層でコインシデンスをとる
3.  $d\eta$  v.s.  $d\phi$  map  $\rightarrow$  運動量に換算

2  $\mu$ 秒で曲がり具合、つまり運動量を判断する !!

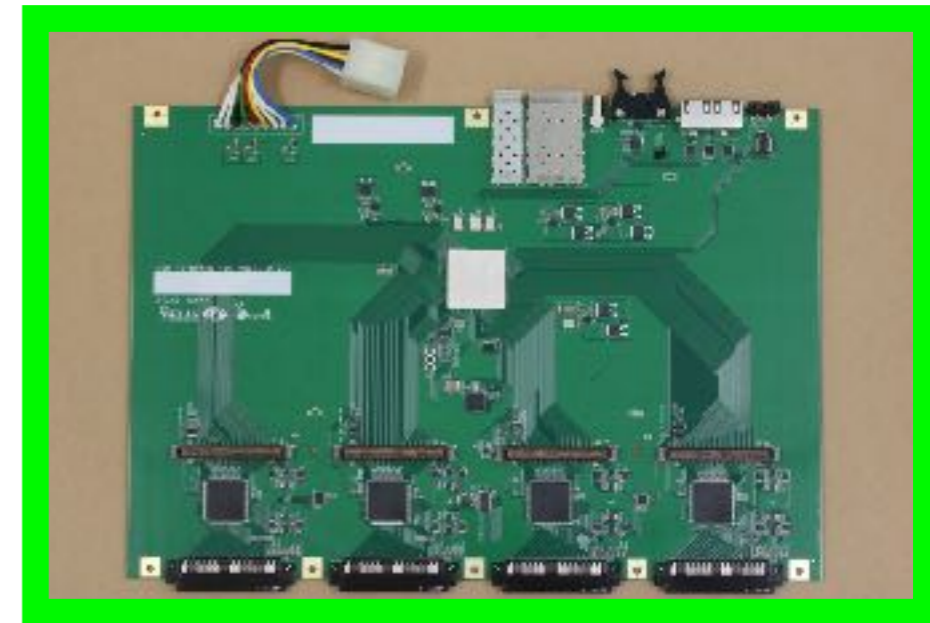




開発中 (写真は1号機)



x 48



x 1600

~10Gbps x 100 links x 50 boards ~ 50,000 Gbps ~ 50 Tbps

高速シリアル通信技術、大規模回路開発技術、リアルタイムデータ処理、大規模システム制御  
 @高エネルギー物理、@テクノロジー企業 どこでも欲しいスキルの獲得

グローバル人材・大規模プロジェクトマネジメント

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

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

$$p_T(4\mu) = 36.1, 47.5, 26.4, 71.7 \text{ GeV}$$
$$m_{12} = 86.3 \text{ GeV}, \quad m_{34} = 31.6 \text{ GeV}$$



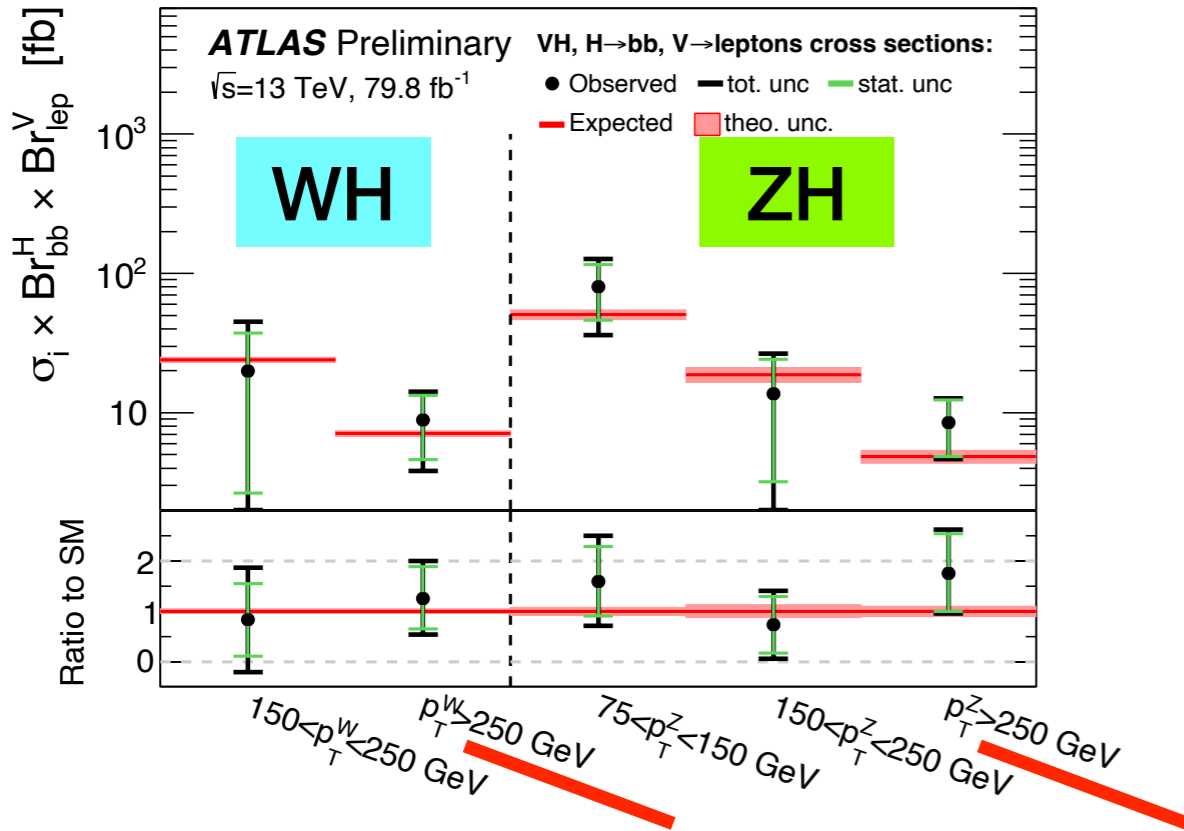
ATLAS  
EXPERIMENT  
<http://atlas.ch>

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

$\mu$ 粒子トリガー測定器を建設した時の仲間たち：～50人



## Higgsの精密測定 ⇒ 新物理



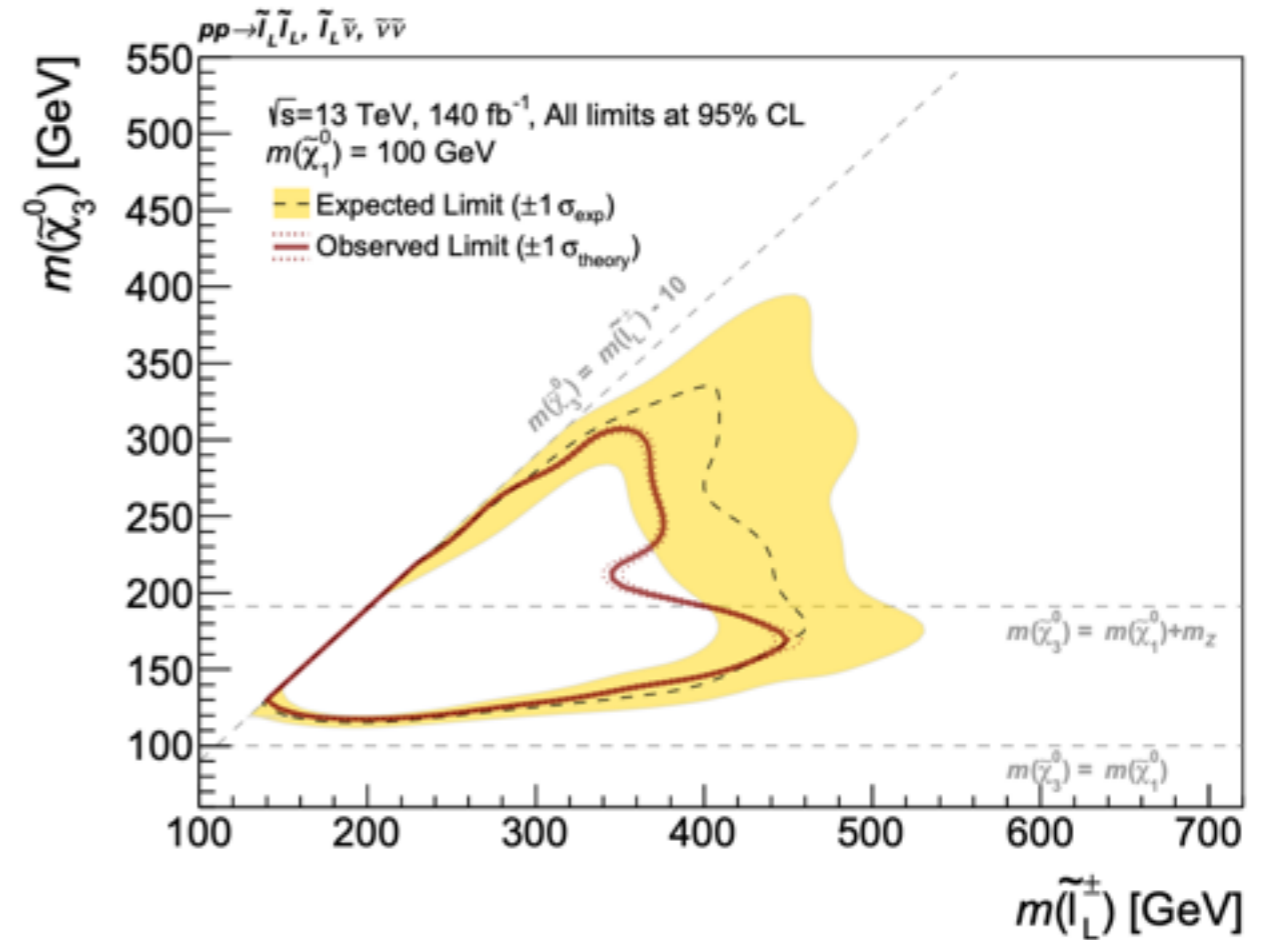
WH ( $p_T > 250$  GeV)  $8.8 \pm 5.2$  fb (SM:  $7.08 \pm 0.33$  fb)

ZH ( $p_T > 250$  GeV)  $8.5 \pm 4.0$  fb (SM:  $4.85 \pm 0.49$  fb)

統計の向上、新解析手法の導入  
⇒ Higgsも精密物理の世界へ

田中あおと (2025博士)

## 電弱生成 ⇒ 超対称性粒子



LHC以外の実験からも探索対象としての魅力が向上中の  $\mu$  の超対称性パートナー  
⇒ 新たな探索方法をもつて挑戦した

青木 (2024博士)

ATLAS博士論文賞 (3人目の日本人)

- 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

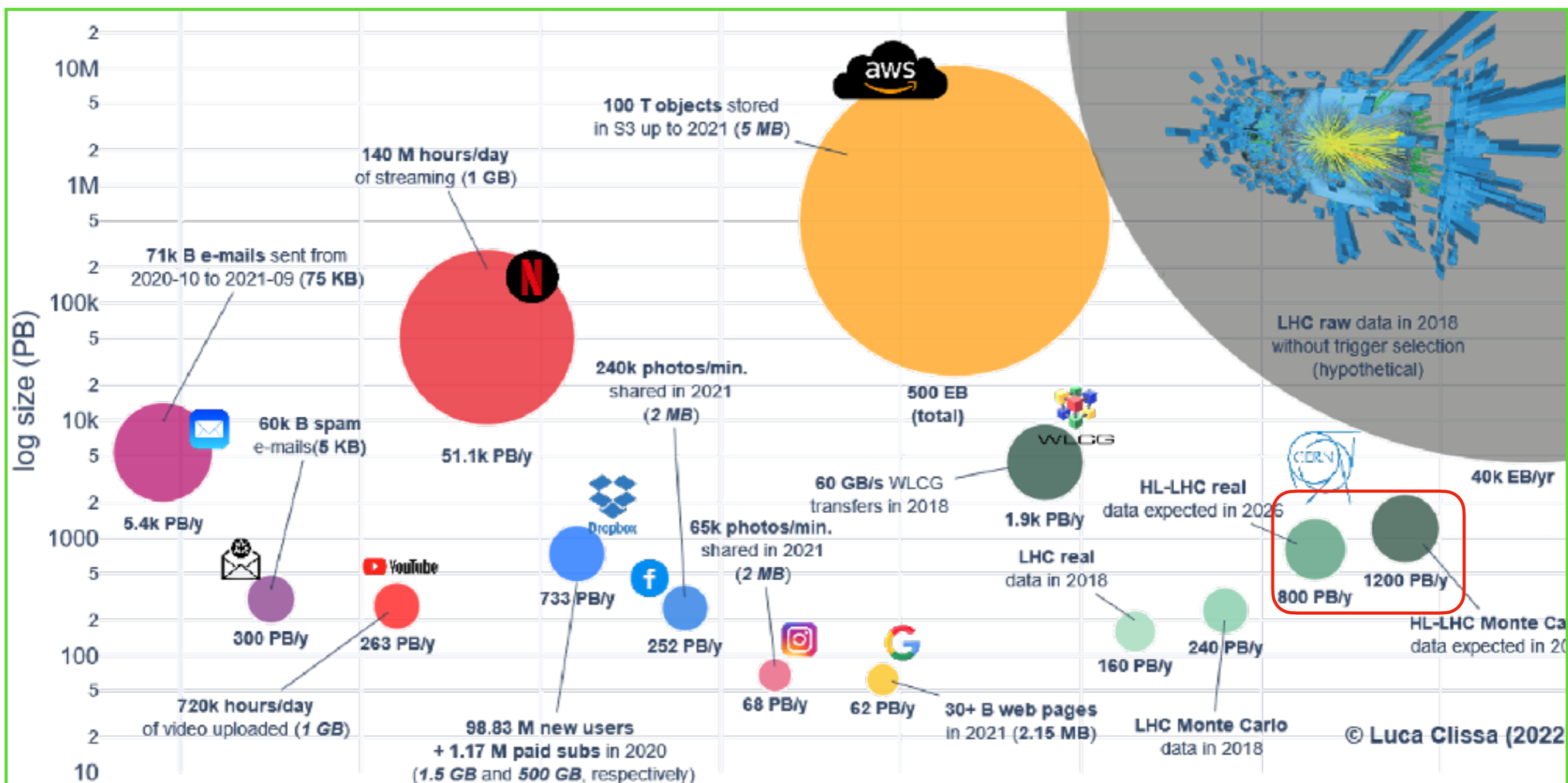
- 自分の専門は深く掘りつつ、物理、科学全般、技術 他 **興味の範囲を広く持つと良い**

- 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





トリガーで選ばずに記録したら... という仮想世界





2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	平均
92.1	90.4	90.8	92.3	93.2	97.6	97.5	98.3	98.4	98.4	94.9

信頼性高く、稼働率高く、運転してきた  
日本の計算機サイト