

ICEPP学部向け特別セミナー2024

📅 10 Jun 2024, 17:00 → 17 Jun 2024, 18:30 Asia/Tokyo

📍 理学部4号館 1220講義室 (東京大学)

加速器・検出器の最先端技術



石野 雅也 東大・素粒子センター


(2023.06.17) 30min.



自己紹介

1970 : 文京区うまれ → 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 (准教授)

2016 - : **素粒子センター**



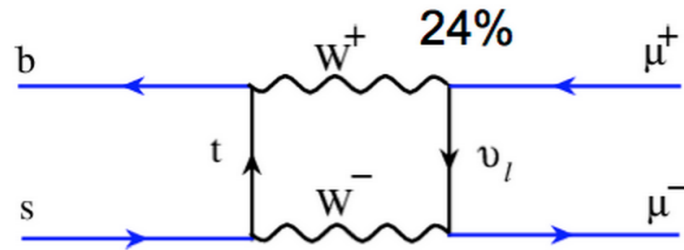
μ 粒子トリガー測定器を建設した時の仲間たち：～50人



4 Why LHC? -新物理を発見する3つのアプローチ-

① Energy Frontier LHC : **14TeV** (→100TeV)

人工的に作って、直接見る → 王道



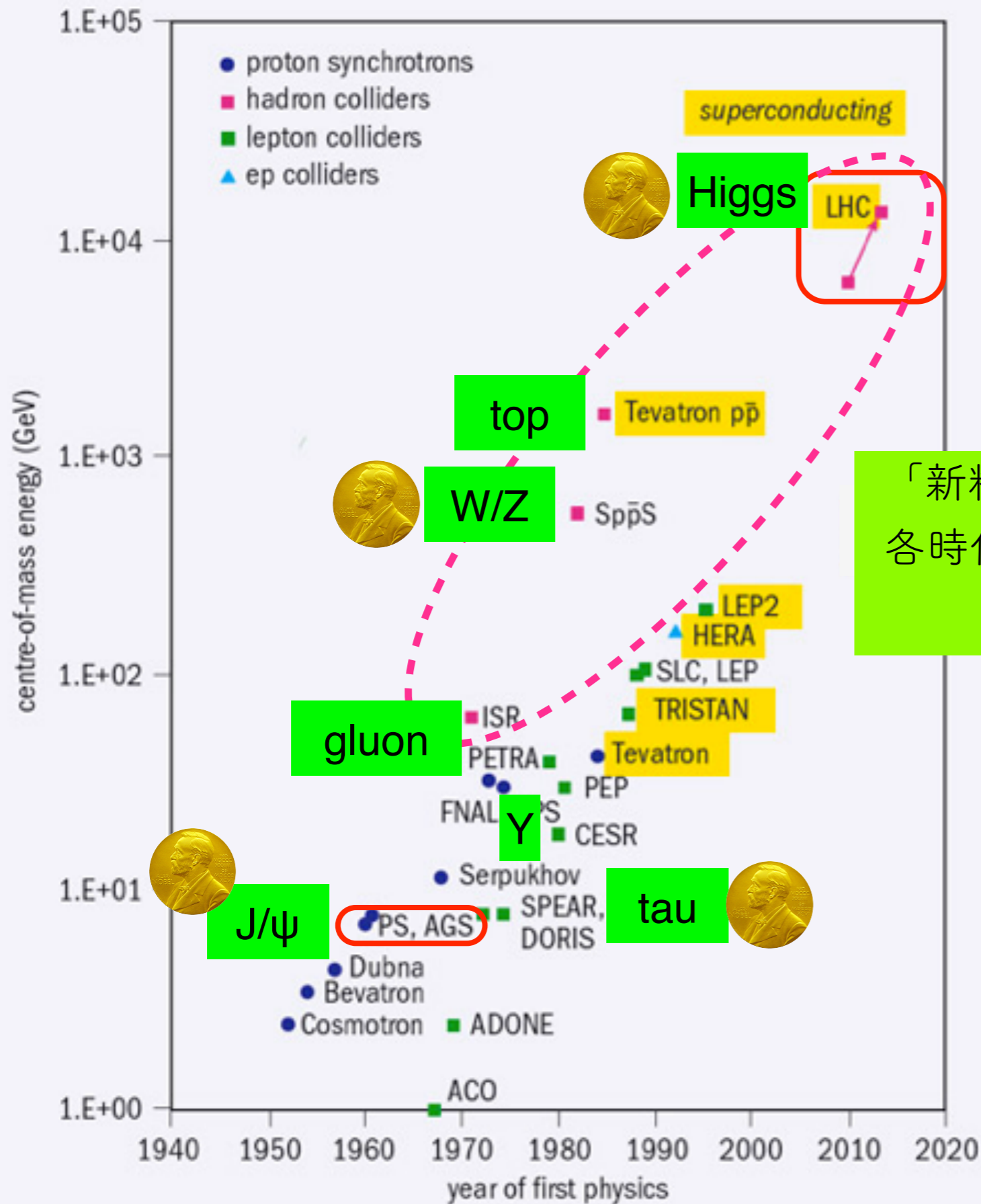
② Intensity Frontier J-Parc , B-Factory , (LHC)

- $\Delta E \cdot \Delta t \sim h$: ループの利用
- MEG ・ 陽子崩壊 ・ Belle II ・ etc.

③ Cosmic Frontier CMB , ...

遠く (= 初期宇宙) を直接見る

(量子力学のズルの法則による) 稀な現象の測定 ⇒ 大きな ΔE の効果を捉える



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ーン
であるという事実

もう1つ!
なんなら、あと3つくらい...

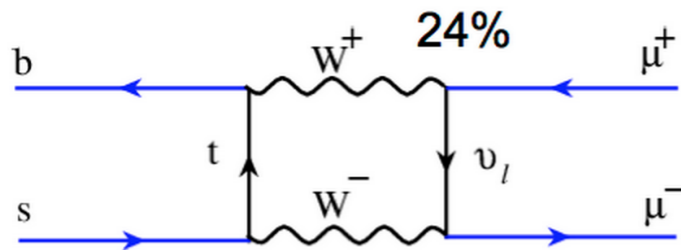


① Energy Frontier

LHC : **14TeV** (→ 100TeV)

人工的に作って、直接見る → 王道

ILC



② Intensity Frontier

J-Parc , B-Factory ,

LHC

- $\Delta E \cdot \Delta t \sim h$: ループの利用
- MEG ・ 陽子崩壊 ・ Belle II ・ etc.

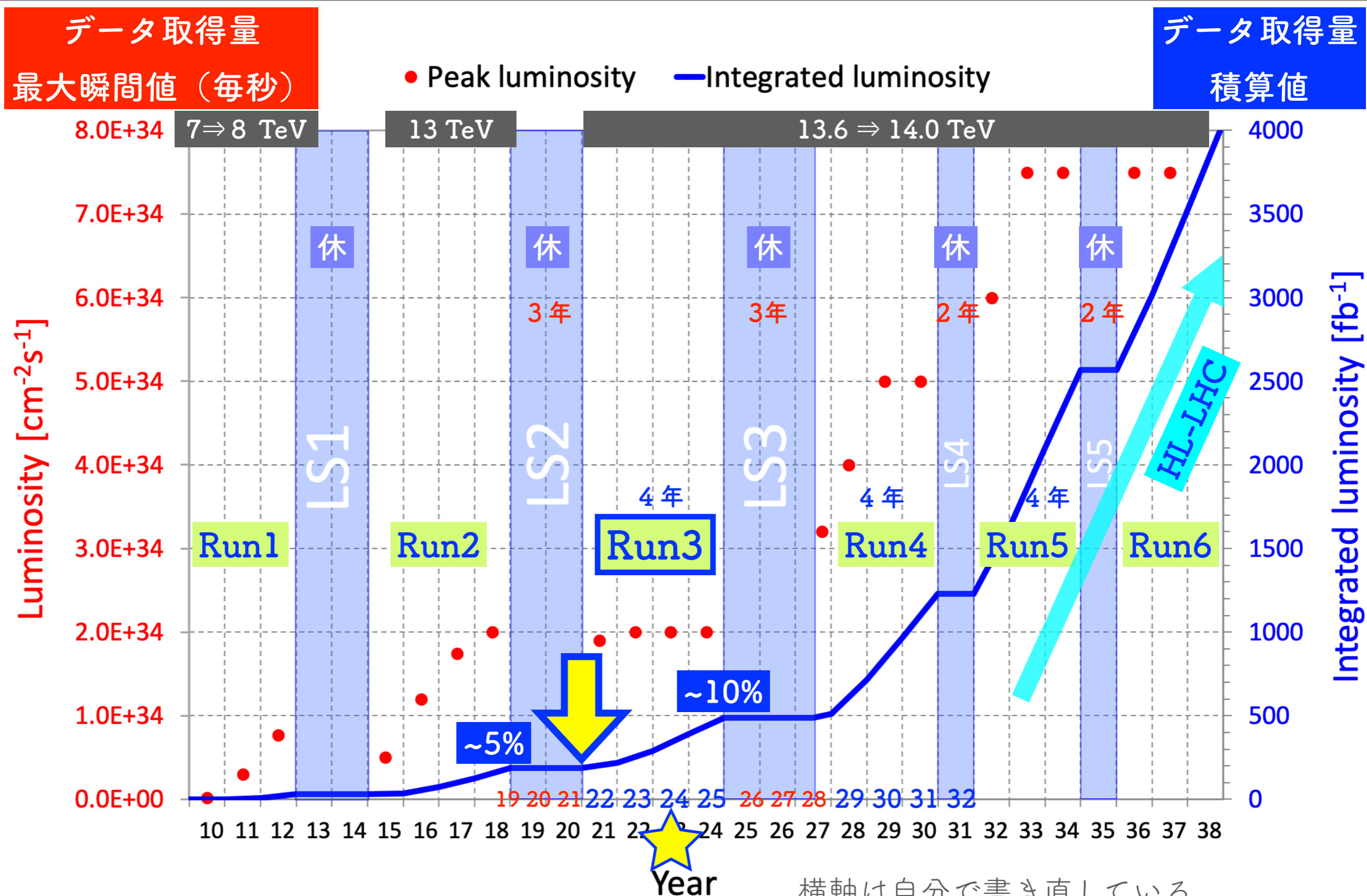
(量子力学のズルの法則による) 稀な現象の測定 \Rightarrow 大きな ΔE の効果を捉える

③ Cosmic Frontier

CMB , ...

遠く (= 初期宇宙) を直接見る

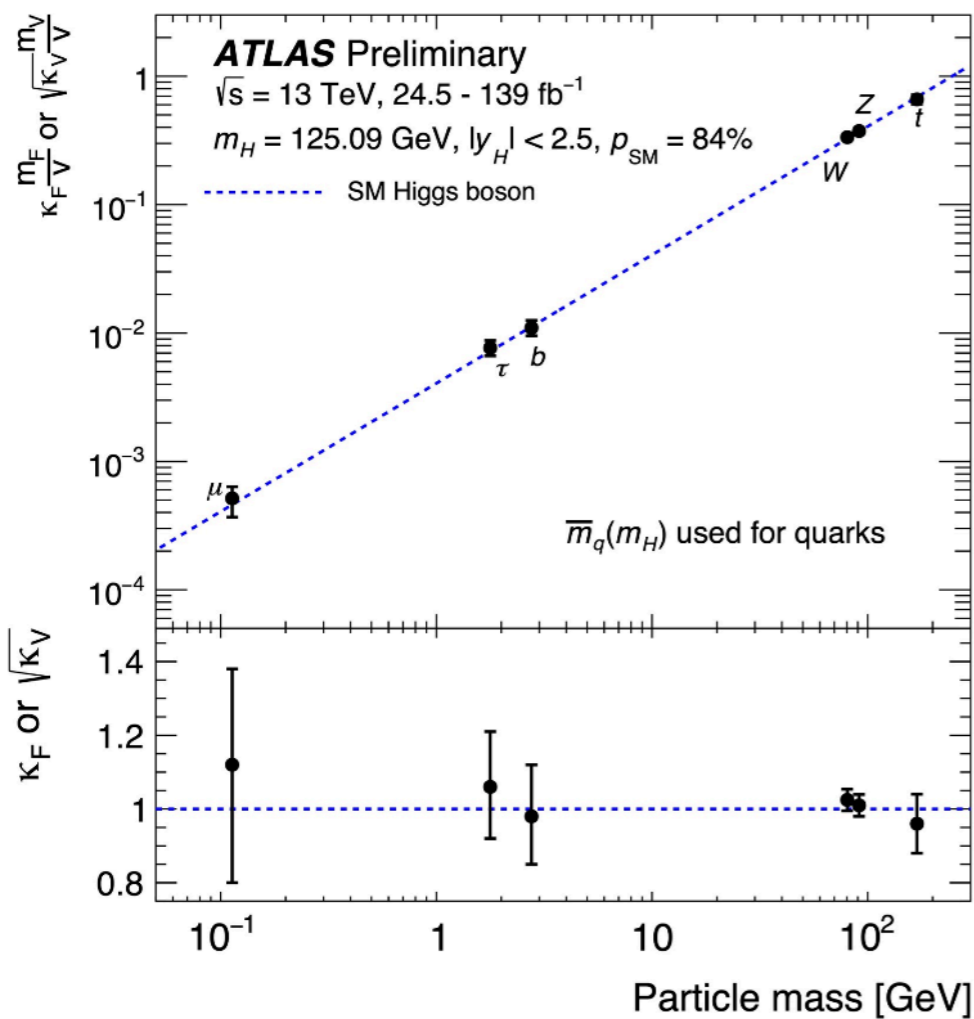
今はまだ8%程度！ - データ取得量の展望



2018年の湯川結合 (Hff)

測定精度

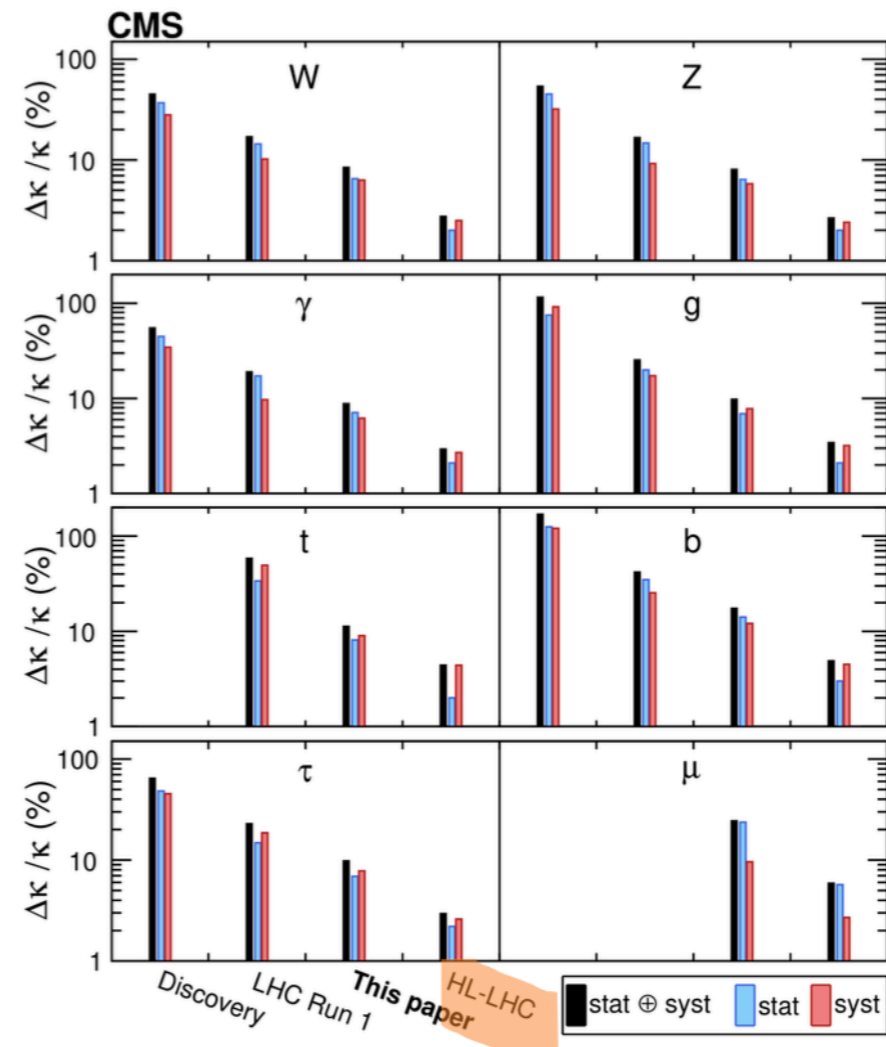
- W/Z @ 5-10%
- 第3世代 (b, t, τ) 10-20%
- 第2世代 (μ) : 見えたか?



20倍のデータで到達できる

測定精度

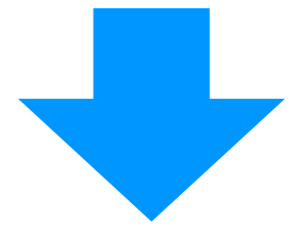
- 全般に 2-5%
- 新たにHiggs自己結合 : HHH



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!

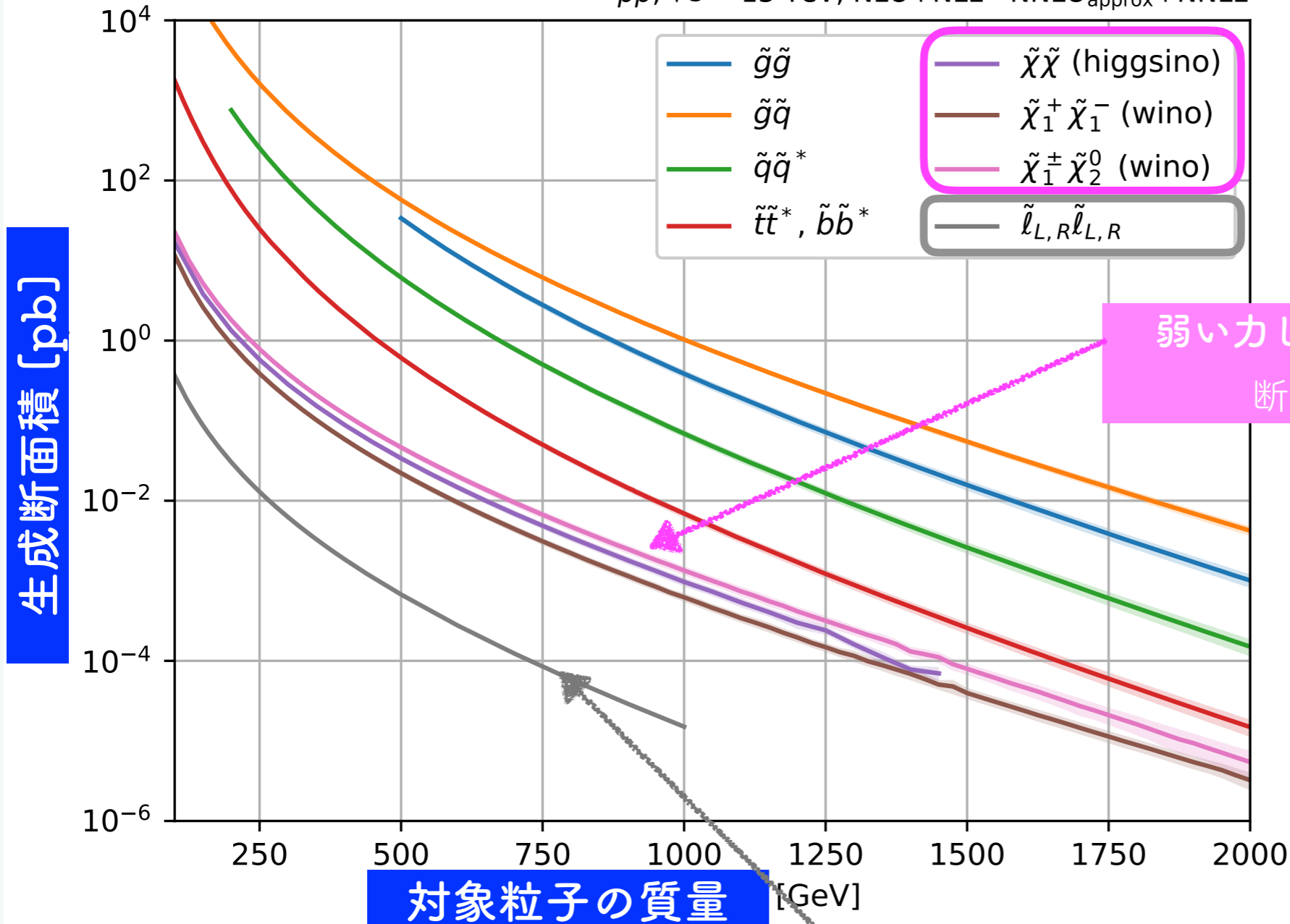
LHC as
Intensity Frontier

H, top, ...
LHCでしか探索
できないFrontier
⇒ 唯一無二の実験を
楽しめる

(量子力学のズルの法則による) 稀な現象の測定 ⇒ **大きな ΔE の効果**を捉える

超対称性粒子の生成断面積 (13TeV)

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

 $pp, \sqrt{s} = 13 \text{ TeV, NLO+NLL - NNLO}_{\text{approx}} + \text{NNLL}$


$g-2$ アノマリーにクラッと来て、ミューオンの超対称性
パートナー粒子を探索 (断面積極小：今から本番)

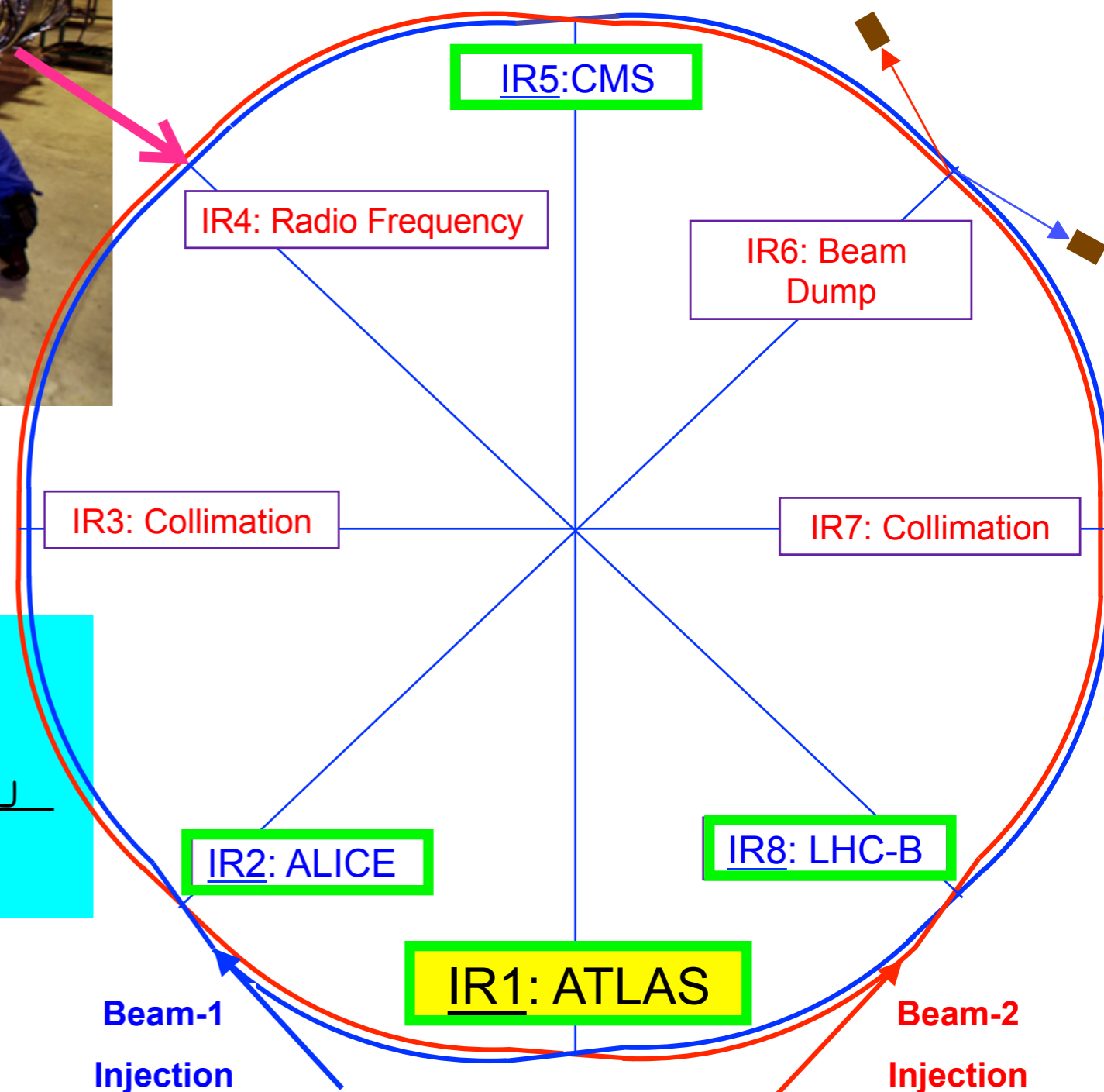
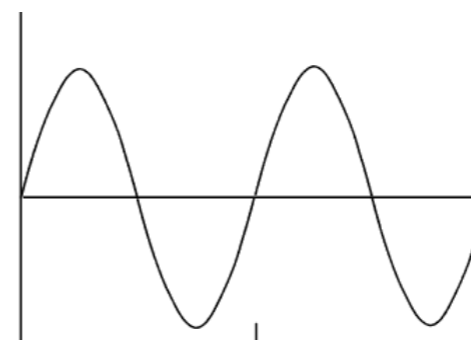
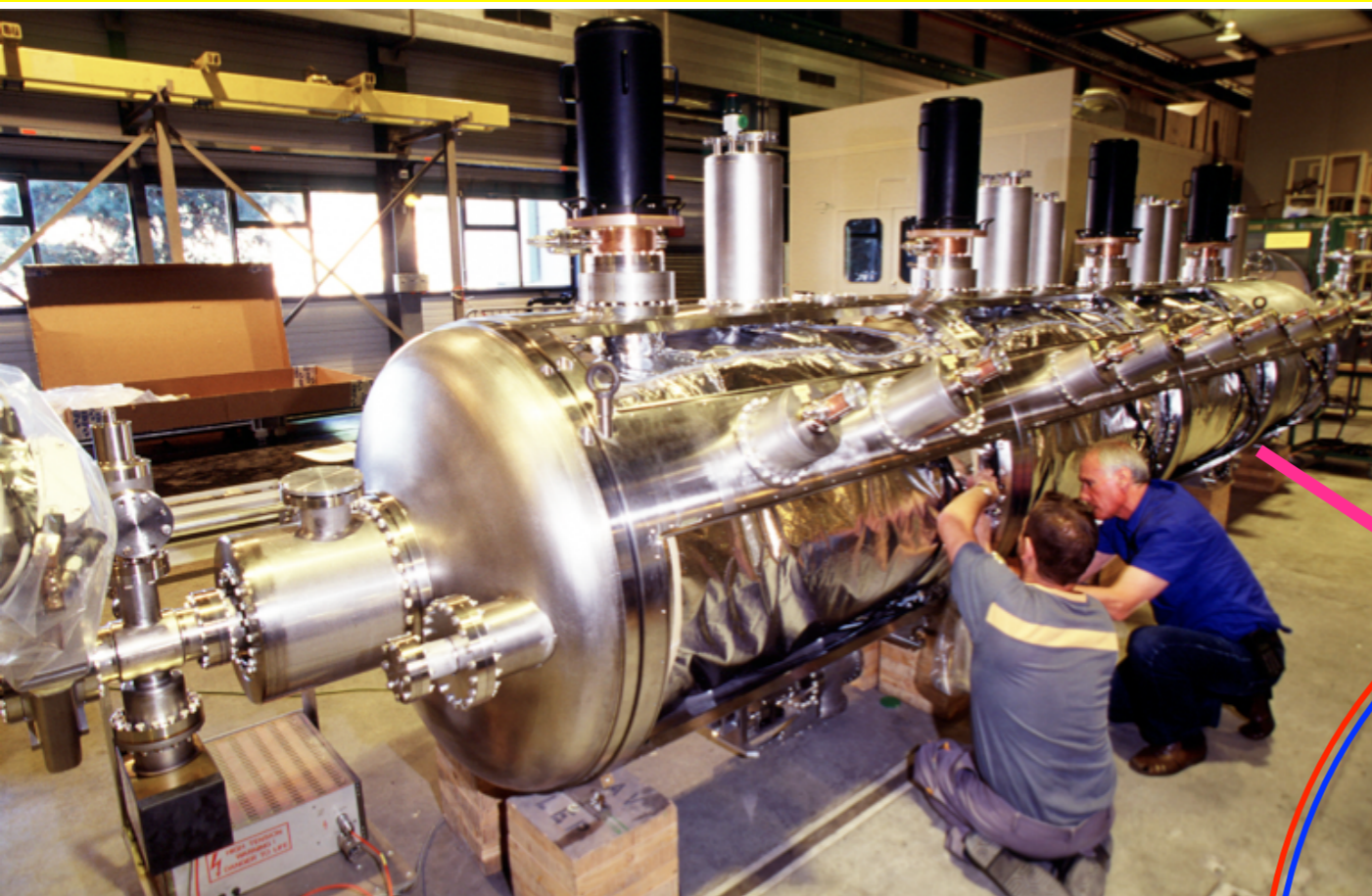
LHC加速器・ATLAS測定器

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

ちょっとわかるとオモシロイことがいっぱい

... というのを共有できると良いです

加速器・LHC



- 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

電場

加

減

遅くやってきた粒子は
強めに加速される

早く戻ってきた粒子は
弱めに加速



時間

Beamは連続ではなく、
「かたまり」構造をもつ
バンチと呼ぶ

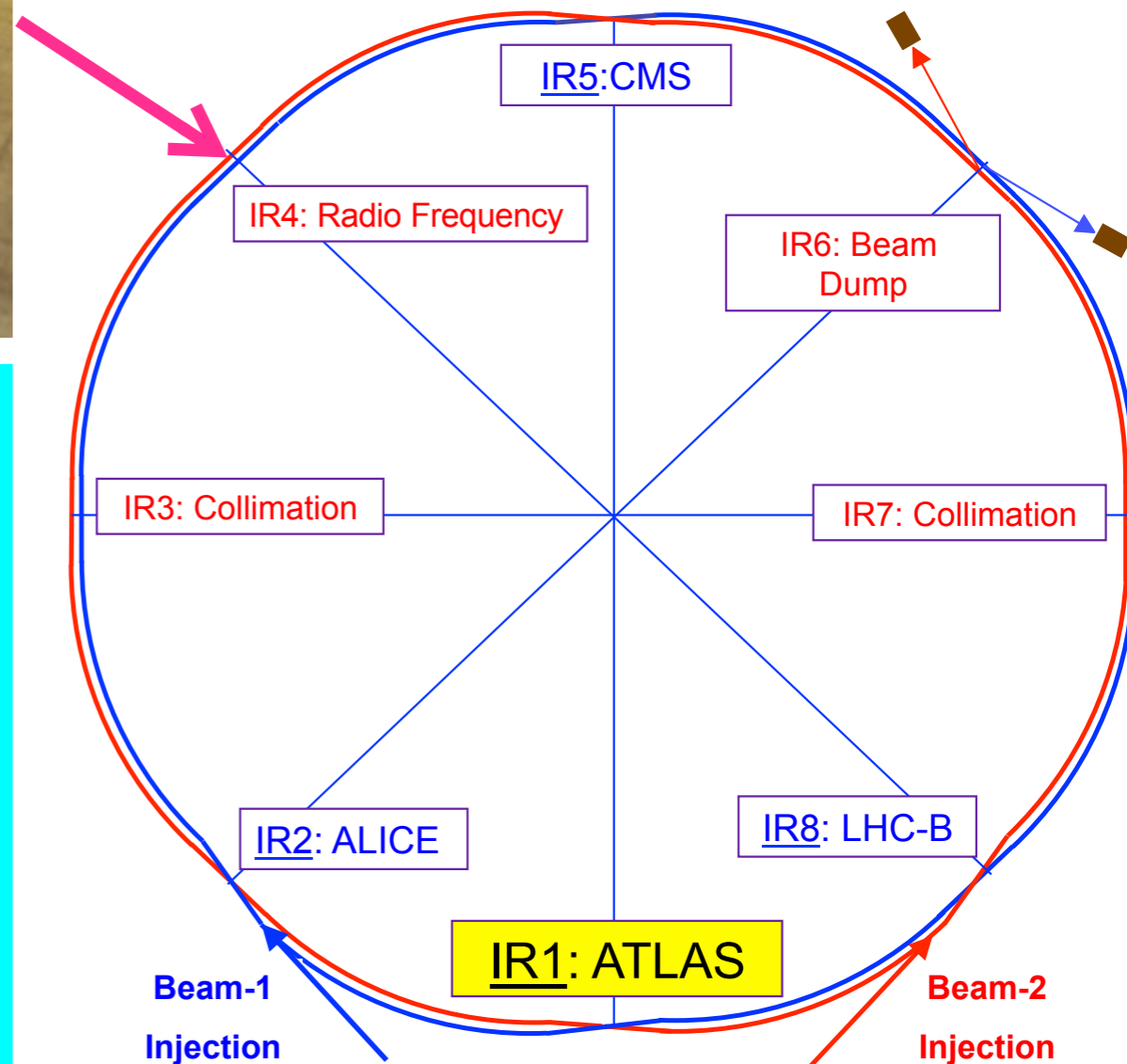
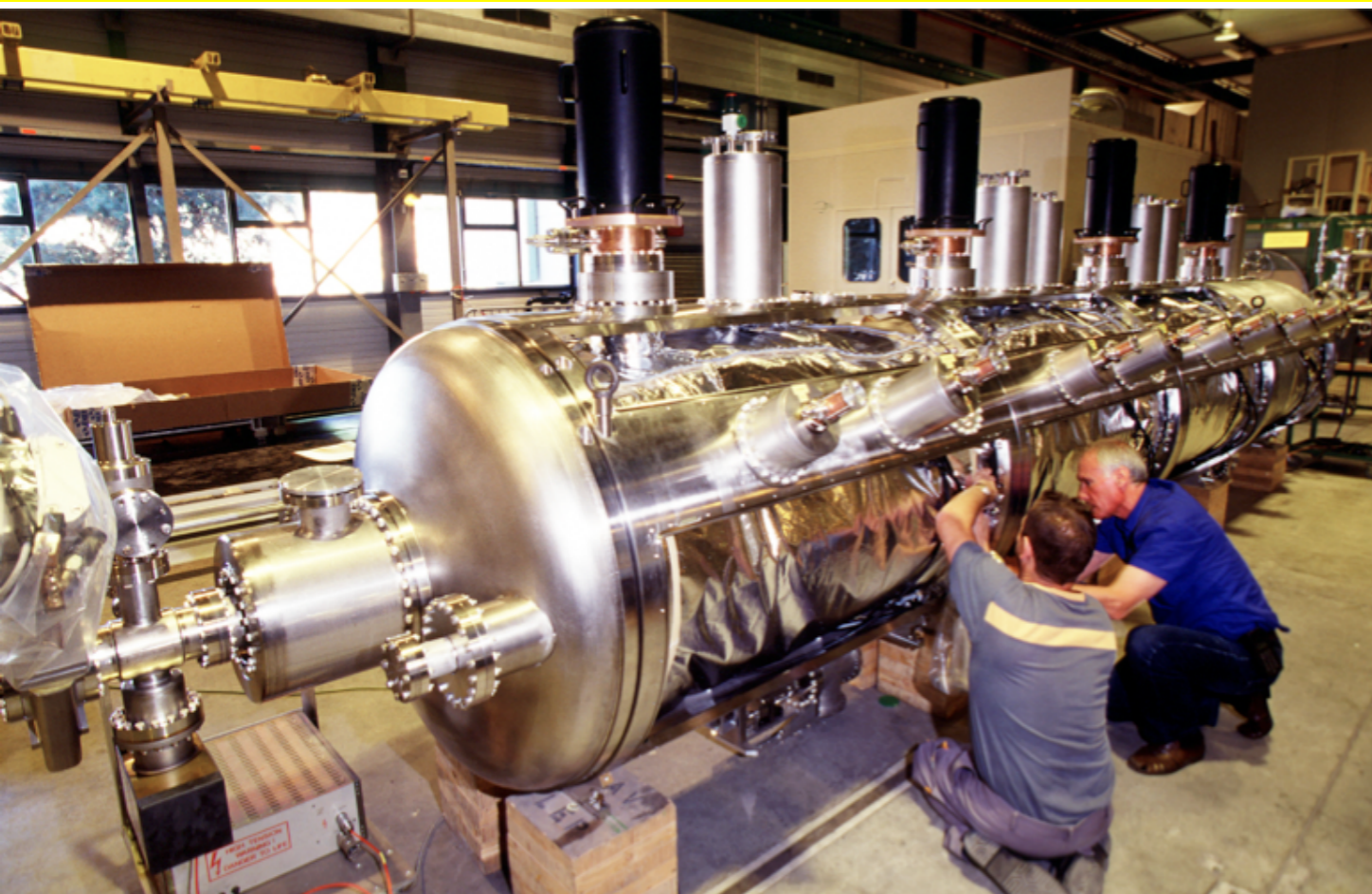
8m

8m

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

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 エネルギーを与える

Q : 何分で 0.45TeV から 6.5TeV に到達 ?

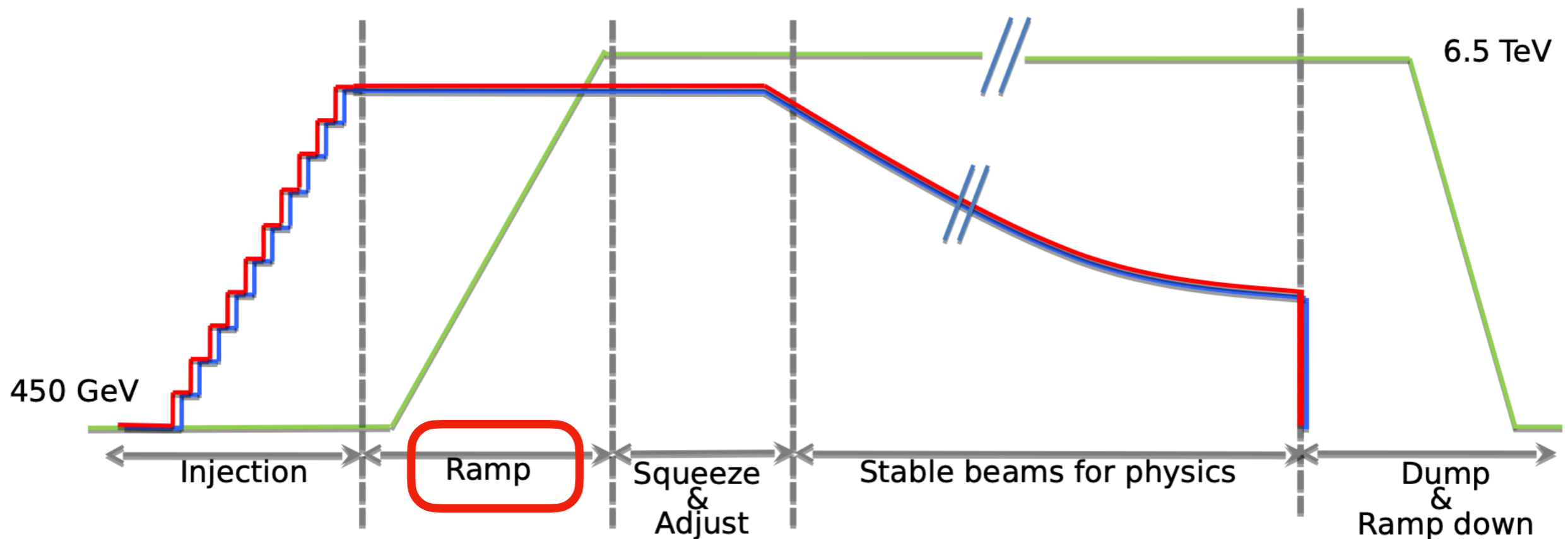
1秒間に11245回加速
 平均：485keV エネルギーを与える

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

⇒ ~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

Q: 何分で0.45TeVから6.5TeVに到達?



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 ρ 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？

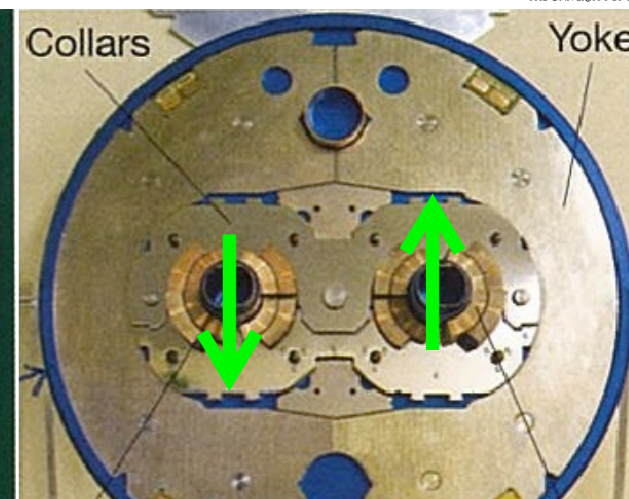
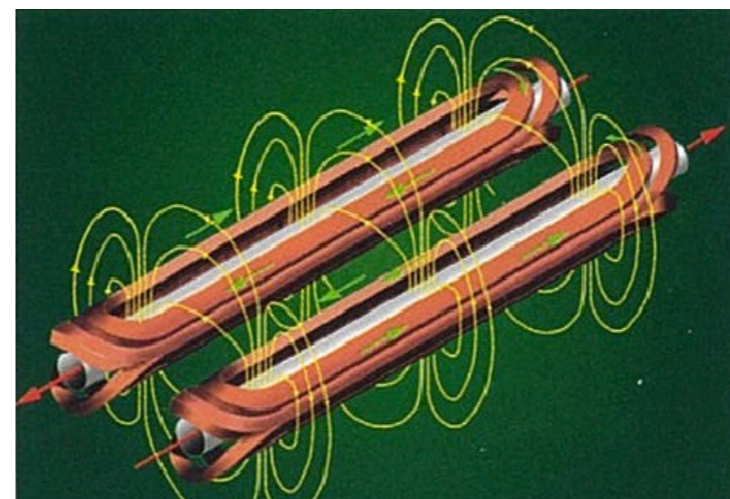
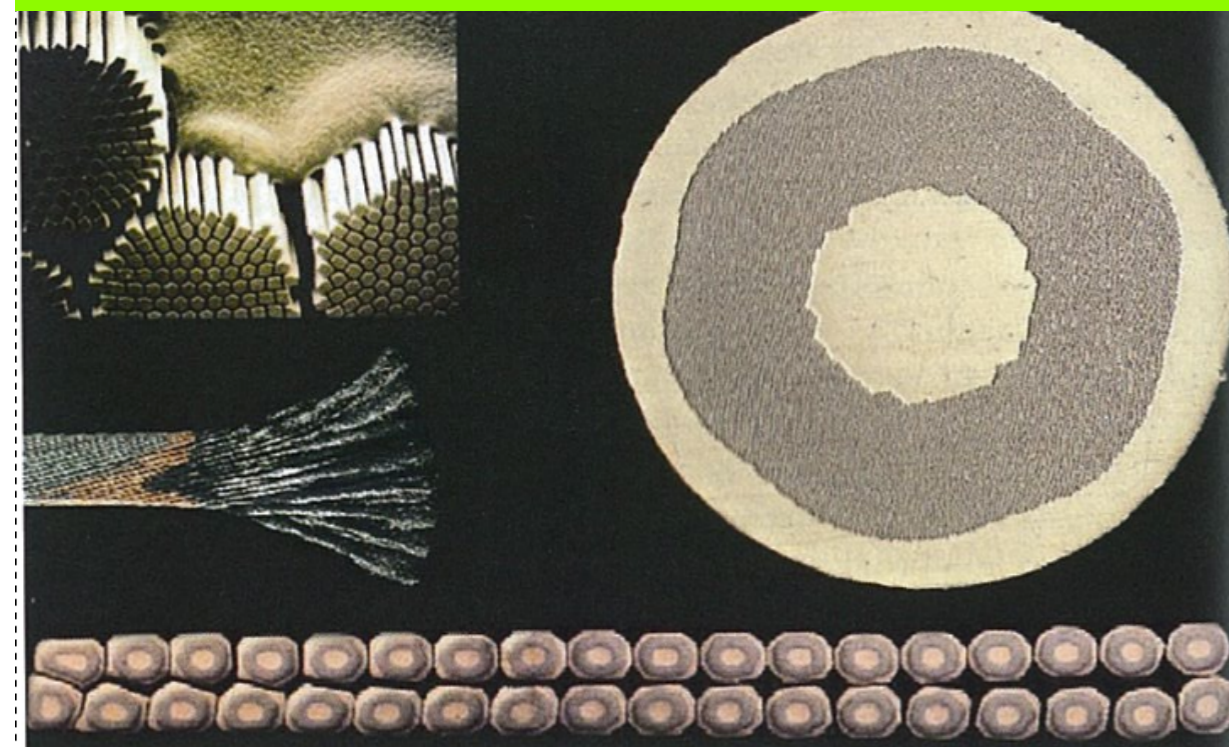
$$\rho = 2,860\text{m}$$

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

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

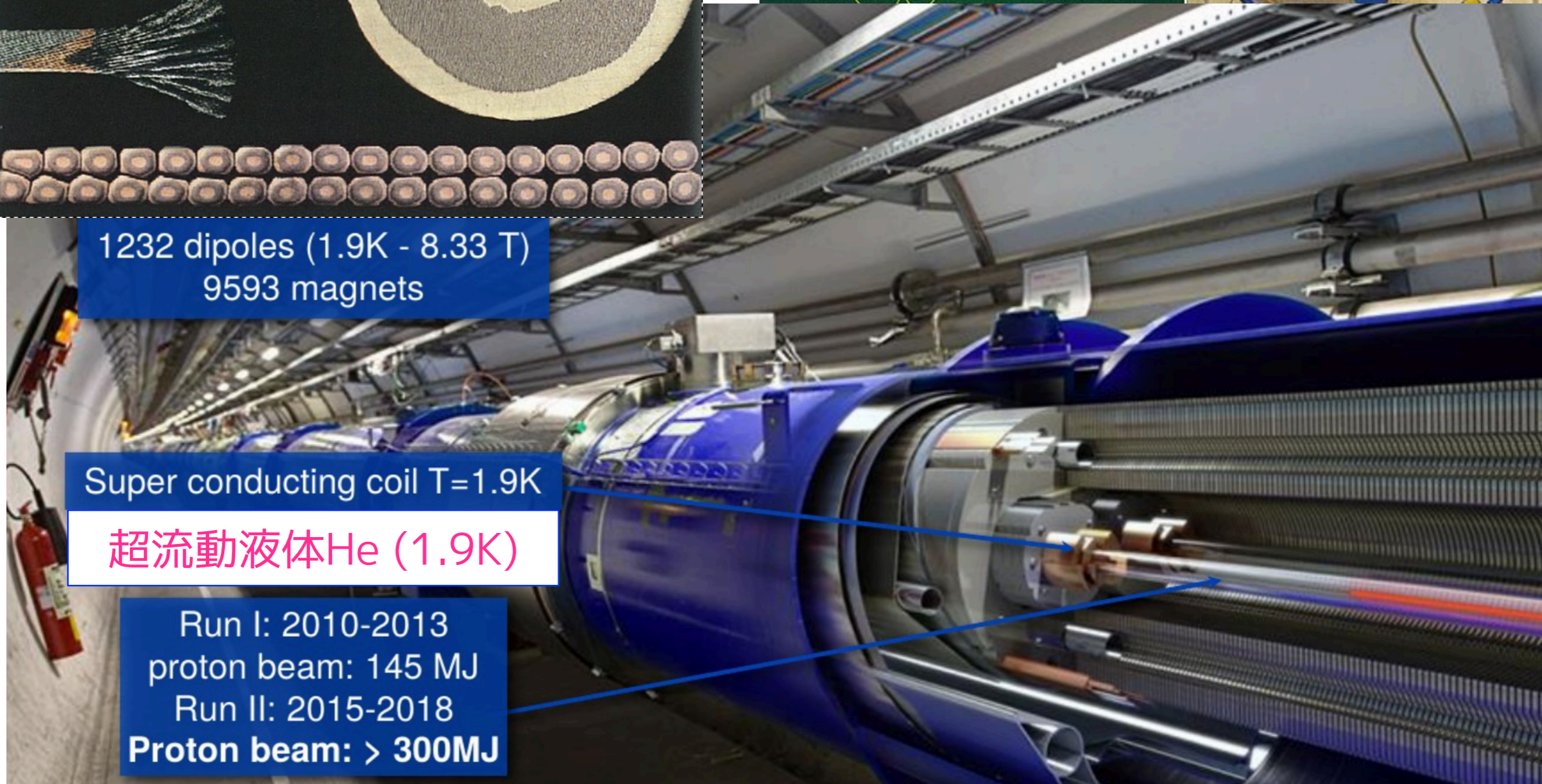


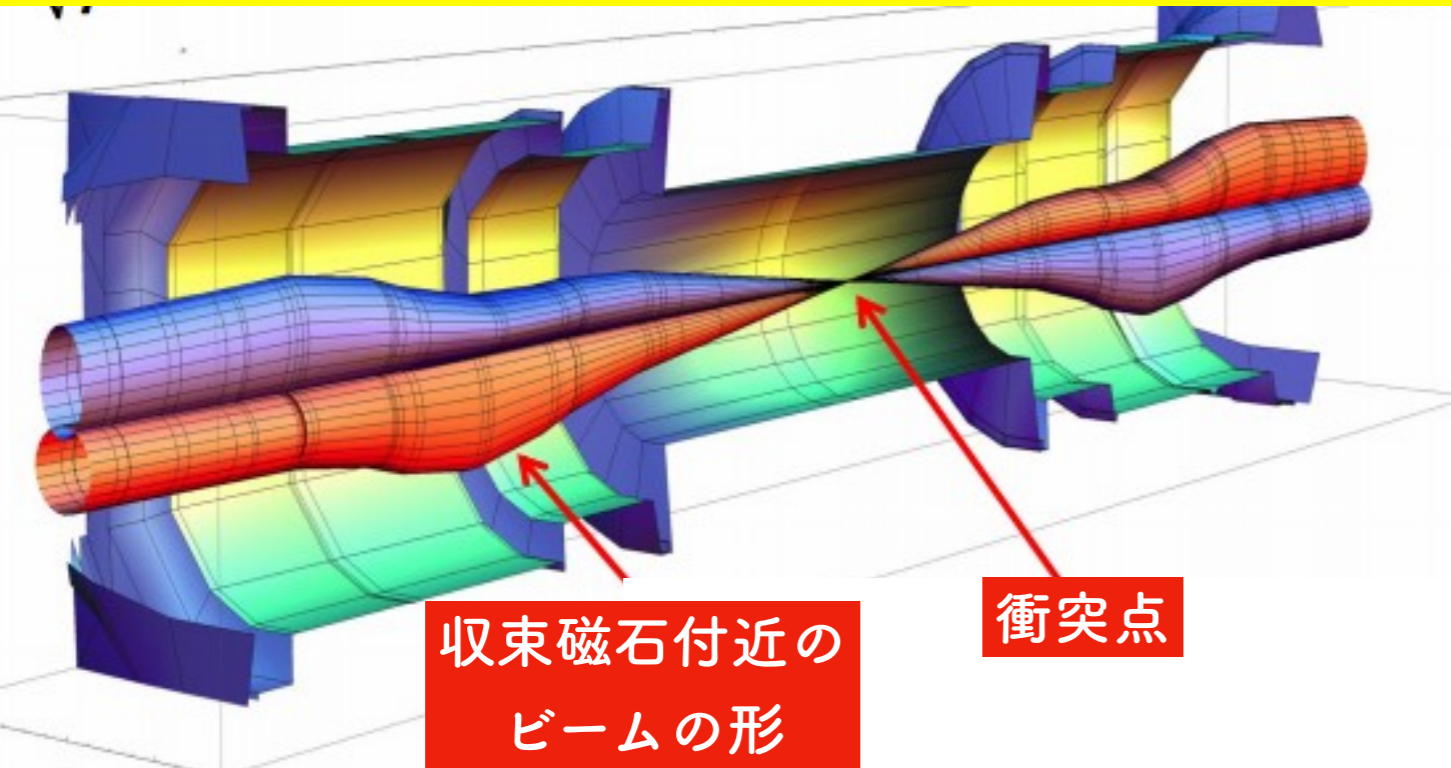
1232 dipoles (1.9K - 8.33 T)
9593 magnets

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

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

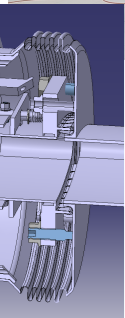
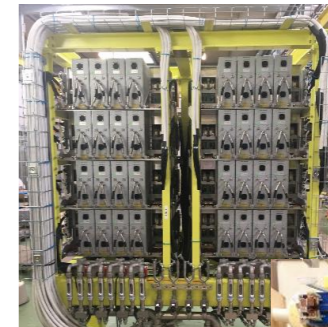
L=瞬間輝度

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

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

もっと「ルミ」を
 (もっと光を by ゲーテ)

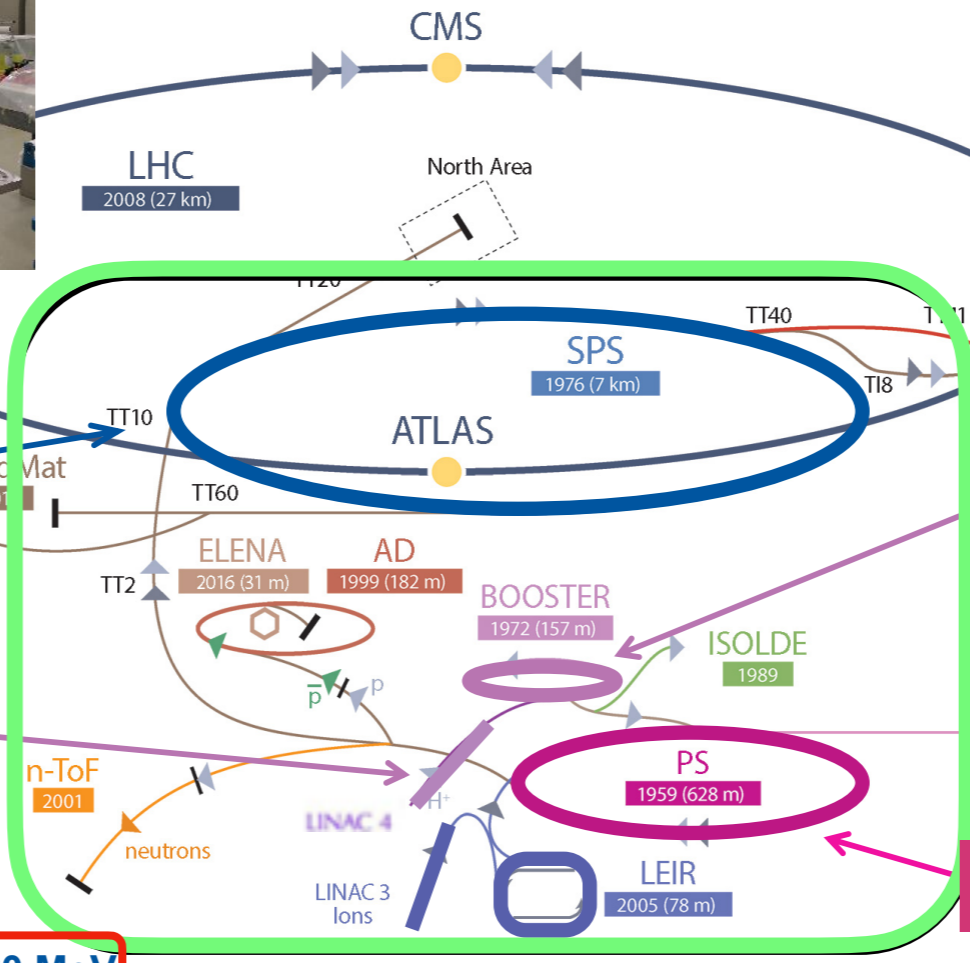


- Main **RF** system (200 MHz) upgrade
- Longitudinal **impedance** reduction & partial a-C coating
- New **beam dump** and protection devices

SPS



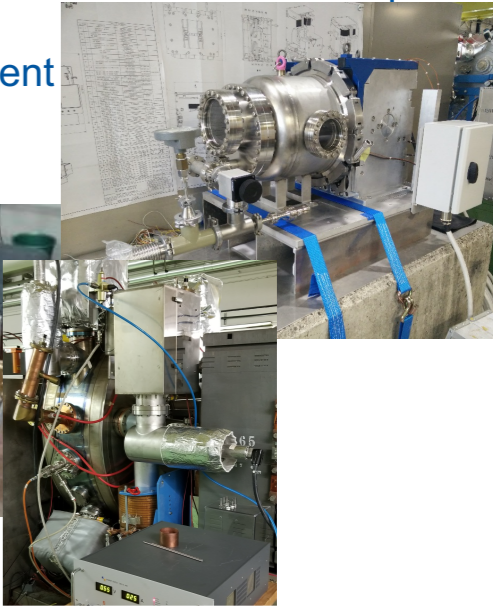
- Acceleration of **H⁺** to **160 MeV**
- Nominal 40 mA within 0.4 μm, Run 3 target 25 mA within 0.3 μm



PSB

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

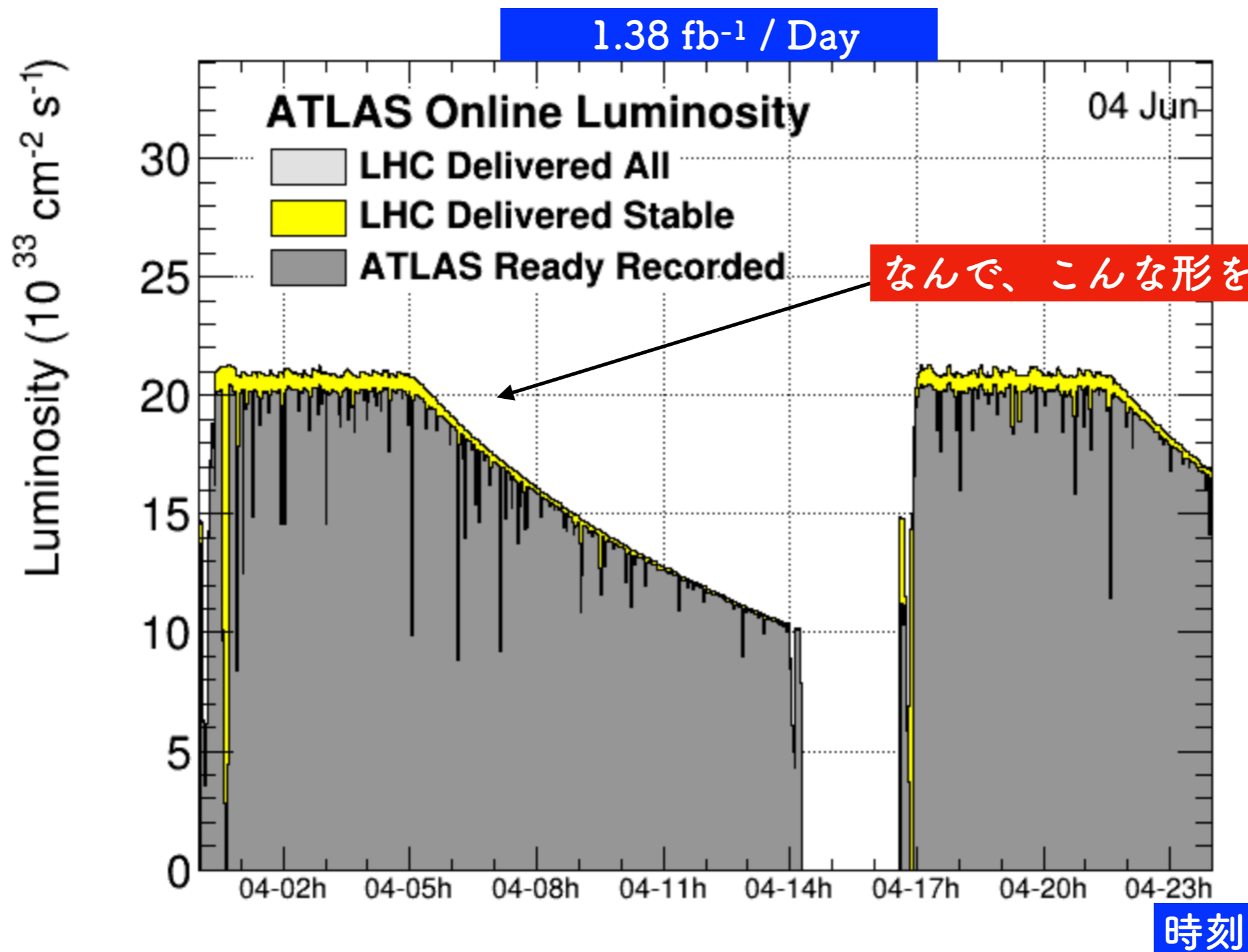
PS



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

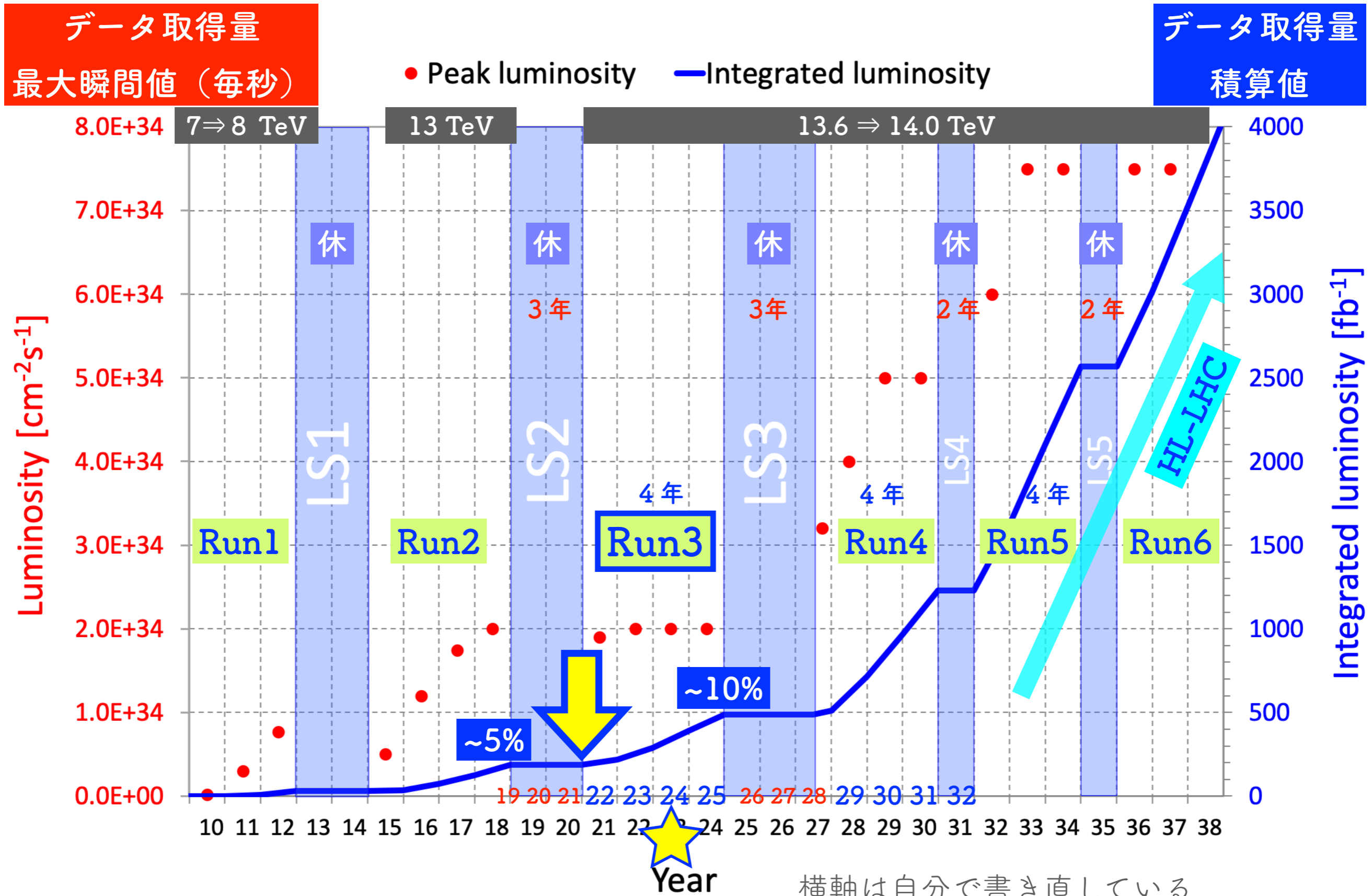
	N_b ($\times 10^{11}$ p/b)	$\epsilon_{x,y}$ (μm)	Bunch/batch spacing	Brightness = $1/\epsilon$
HL-LHC target	2.3	2.1	25 ns / 200 ns	x 2.3
Present	1.3	2.7	25 ns / 200 ns	

(瞬間) ルミノシティ



single-Higgs: $60\text{pb} \times 1.4\text{fb}^{-1} = 84,000$ 個

今はまだ8%程度！ - データ取得量の展望



<https://lhc-commissioning.web.cern.ch/schedule/images/LHC-ultimate-lumi-projection.png>

測定器・ATLAS

25 ATLAS測定器がやっていることは本質的に2種類

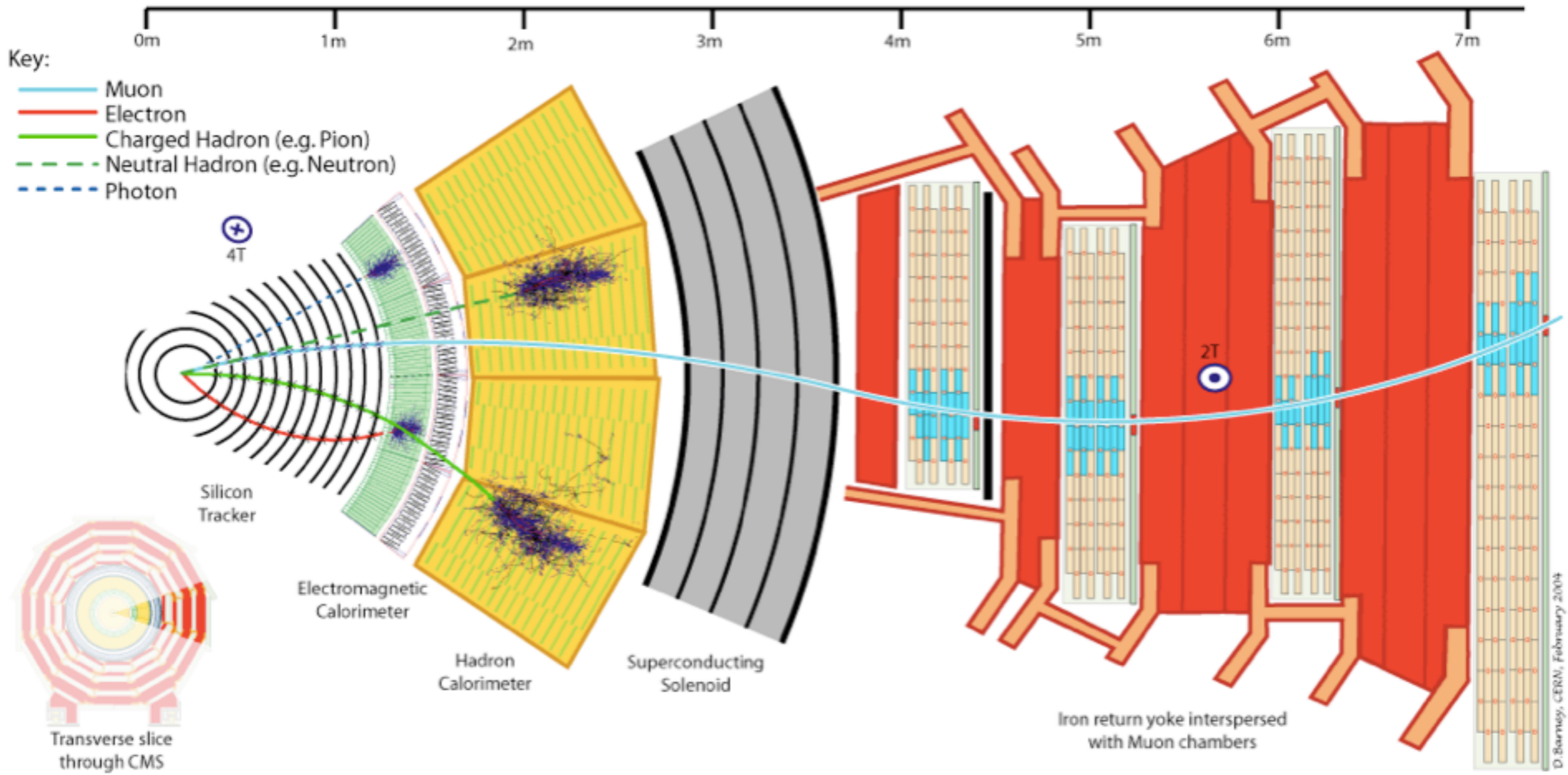
巨大で (ex. ATLAS : 25m x 50m : 7000トン)

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

組み合わせで
粒子の種類同定など

(1) 運動量の測定・(2) エネルギーの測定



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

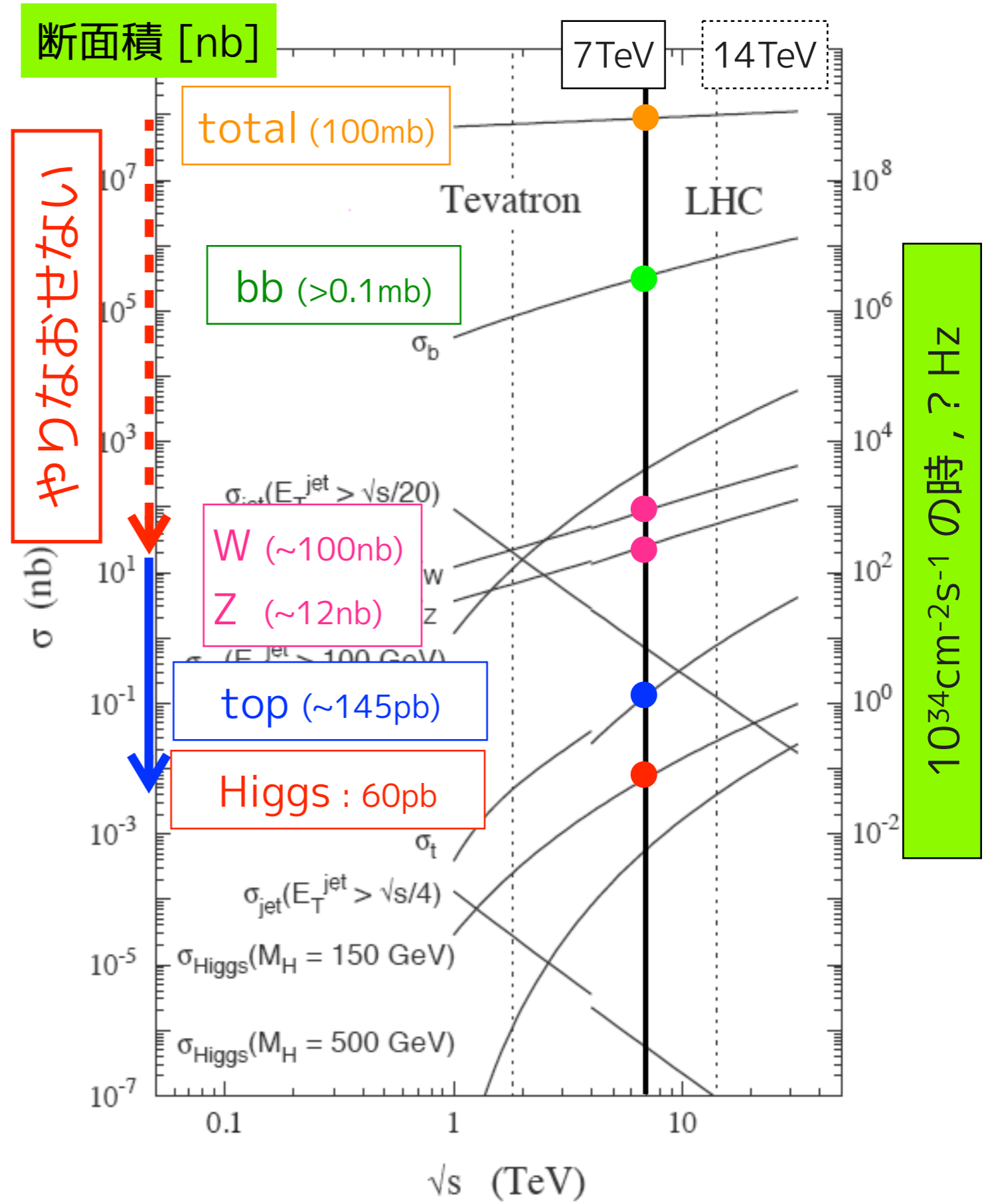
その後の 解析

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

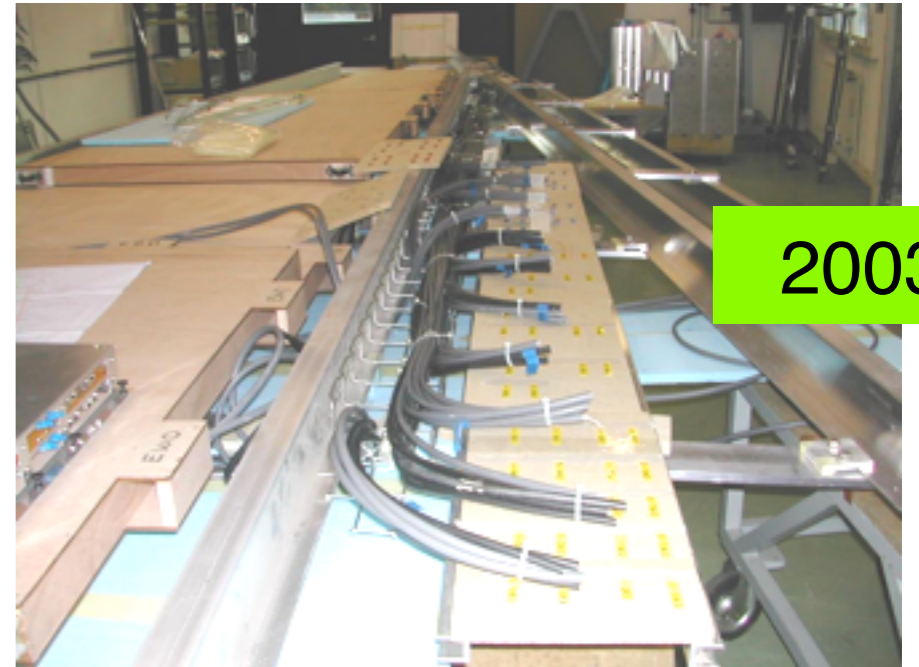
実験成功の重要な key point !!



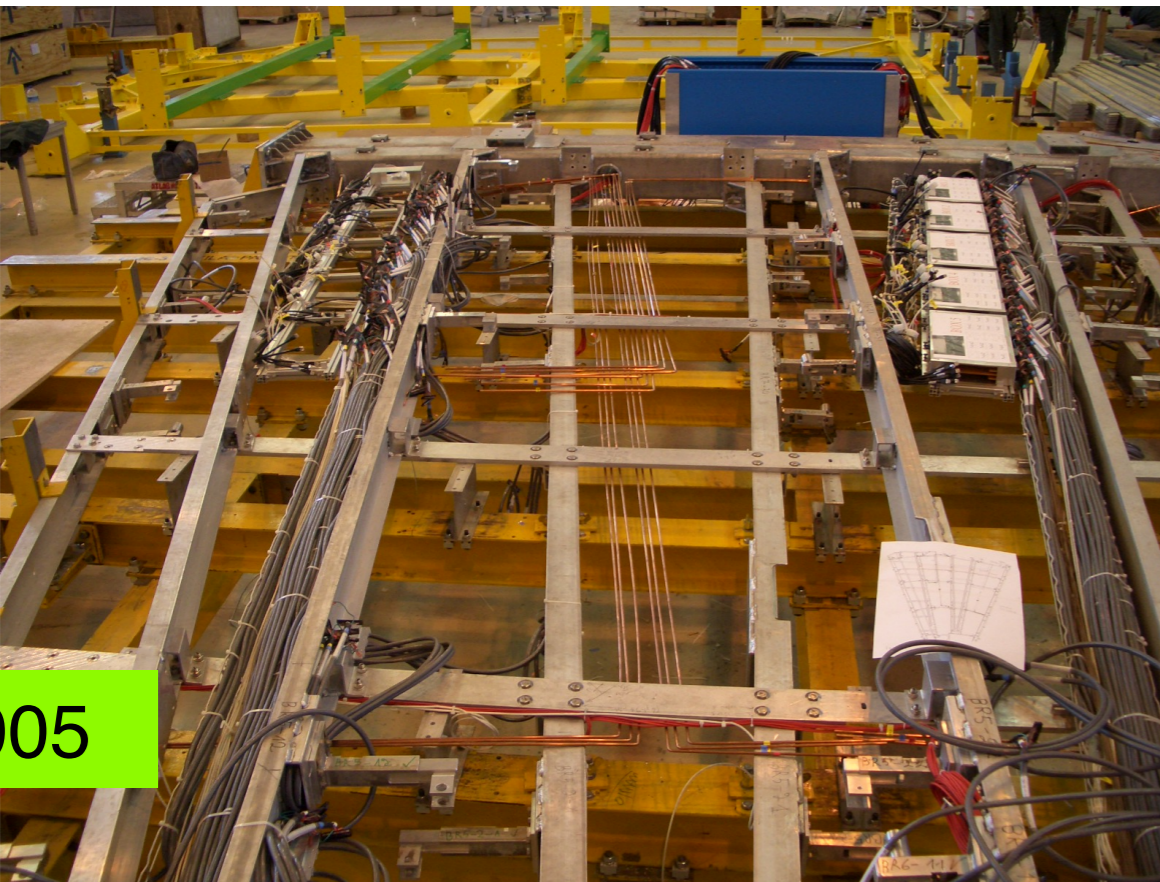
2002



2003



2005



2007





開発



製作



くみため

・試験



運転



評価



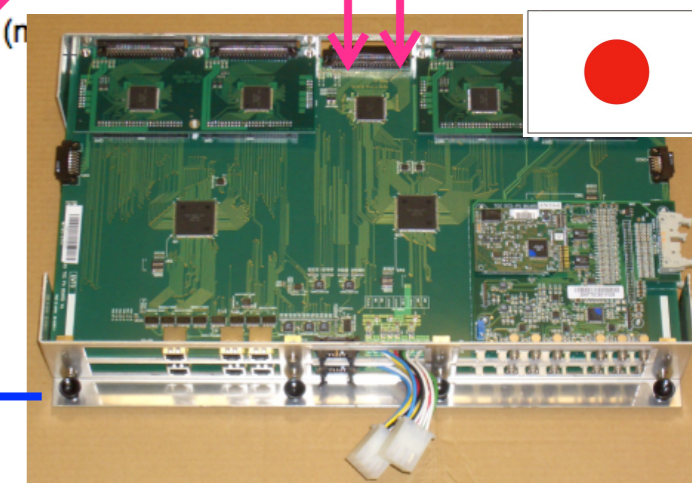
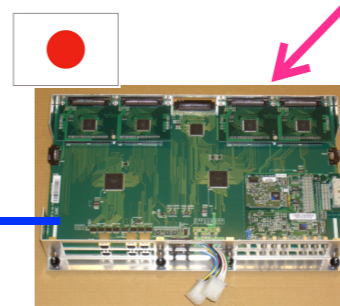
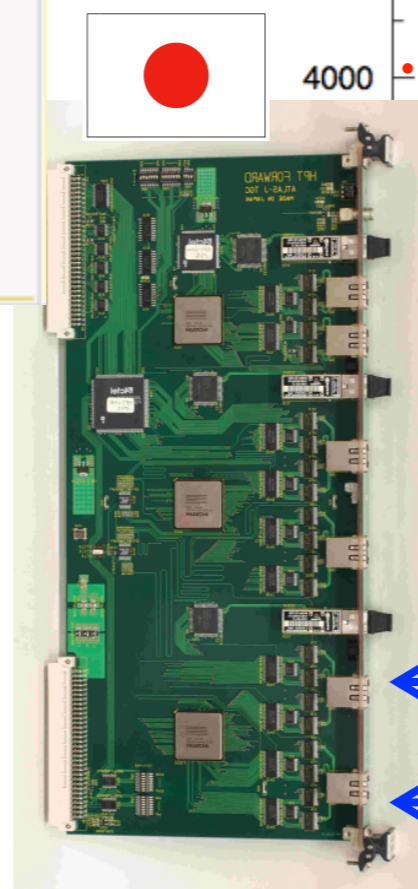
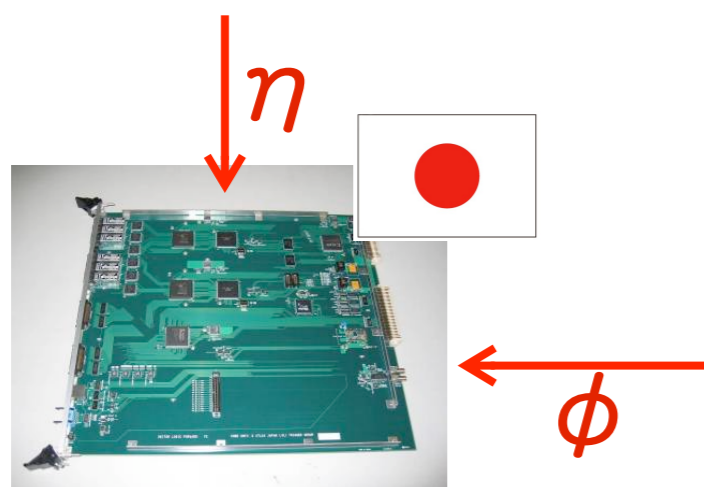
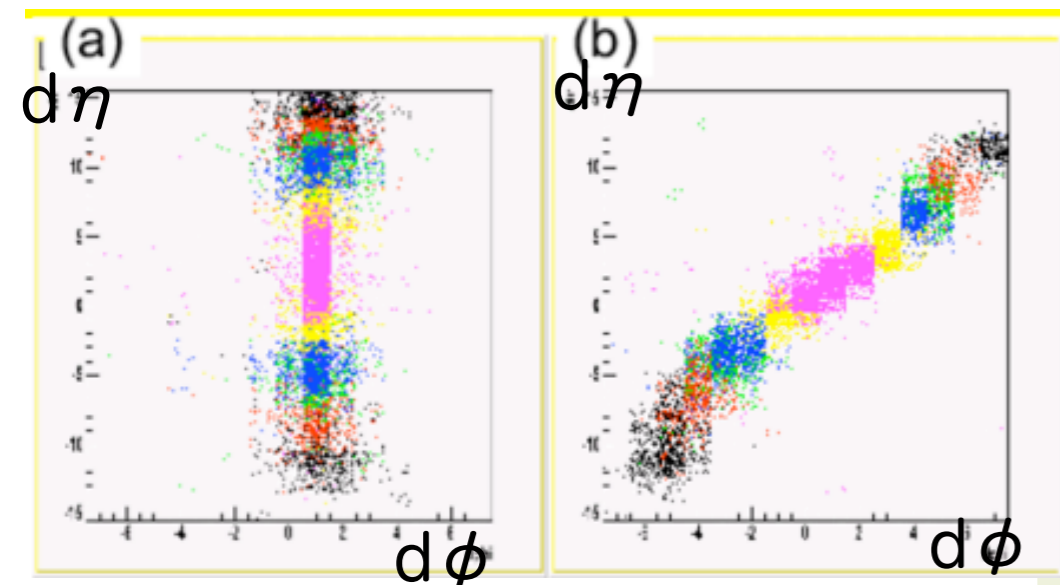
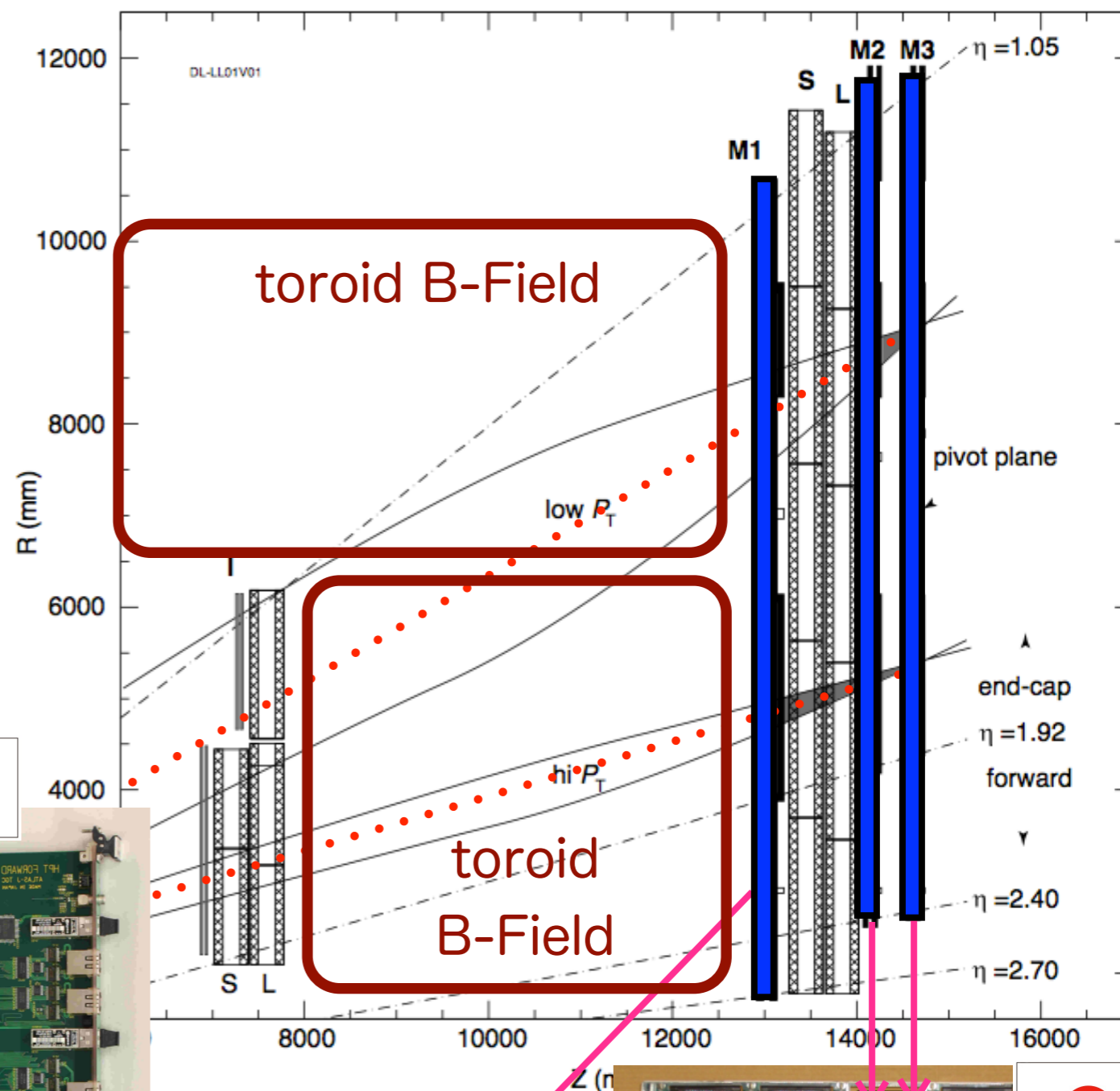
改良



3,600 TGC
320k ch.

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 μ 秒で曲がり具合、
つまり運動量を判断する !!



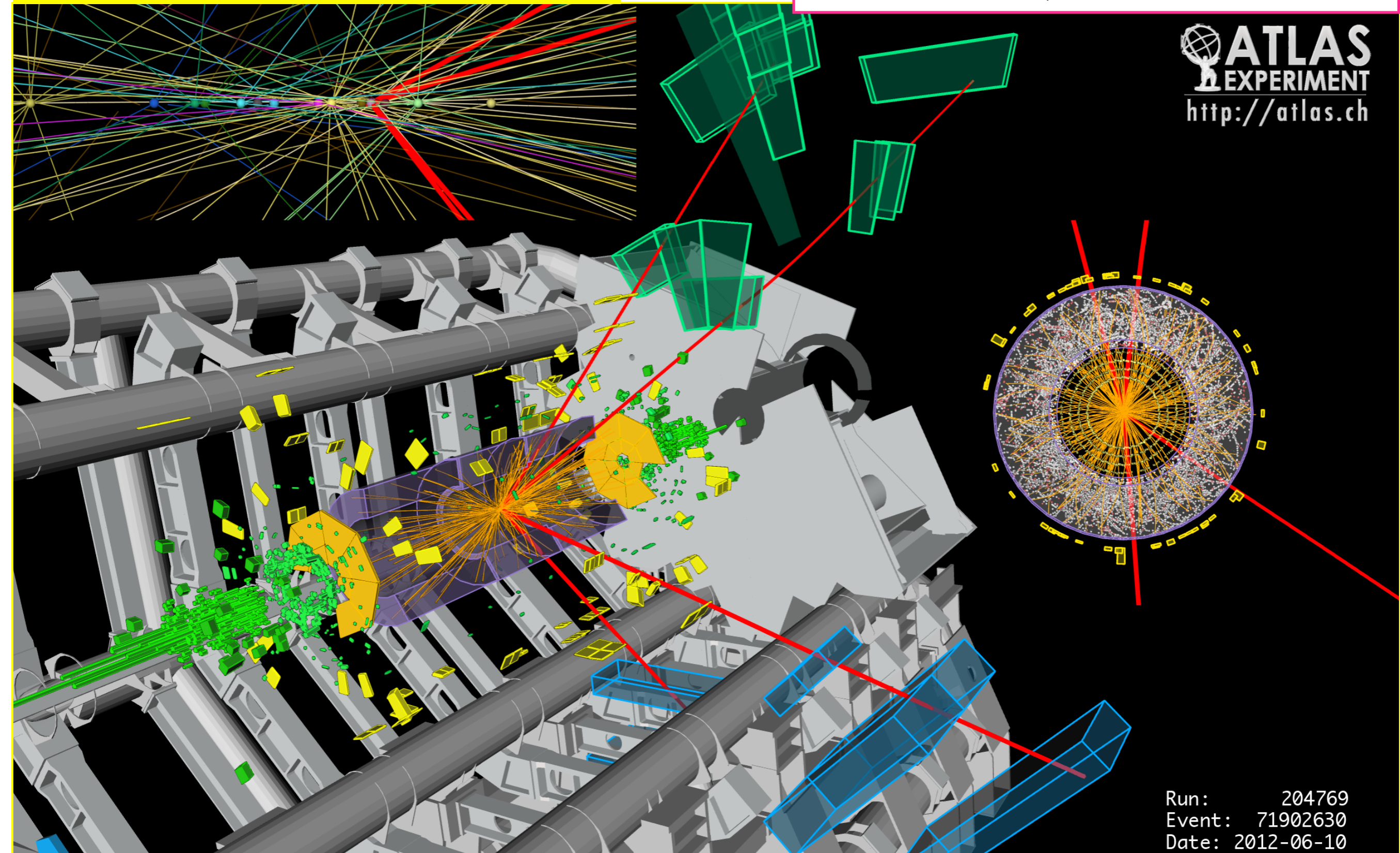
$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$$

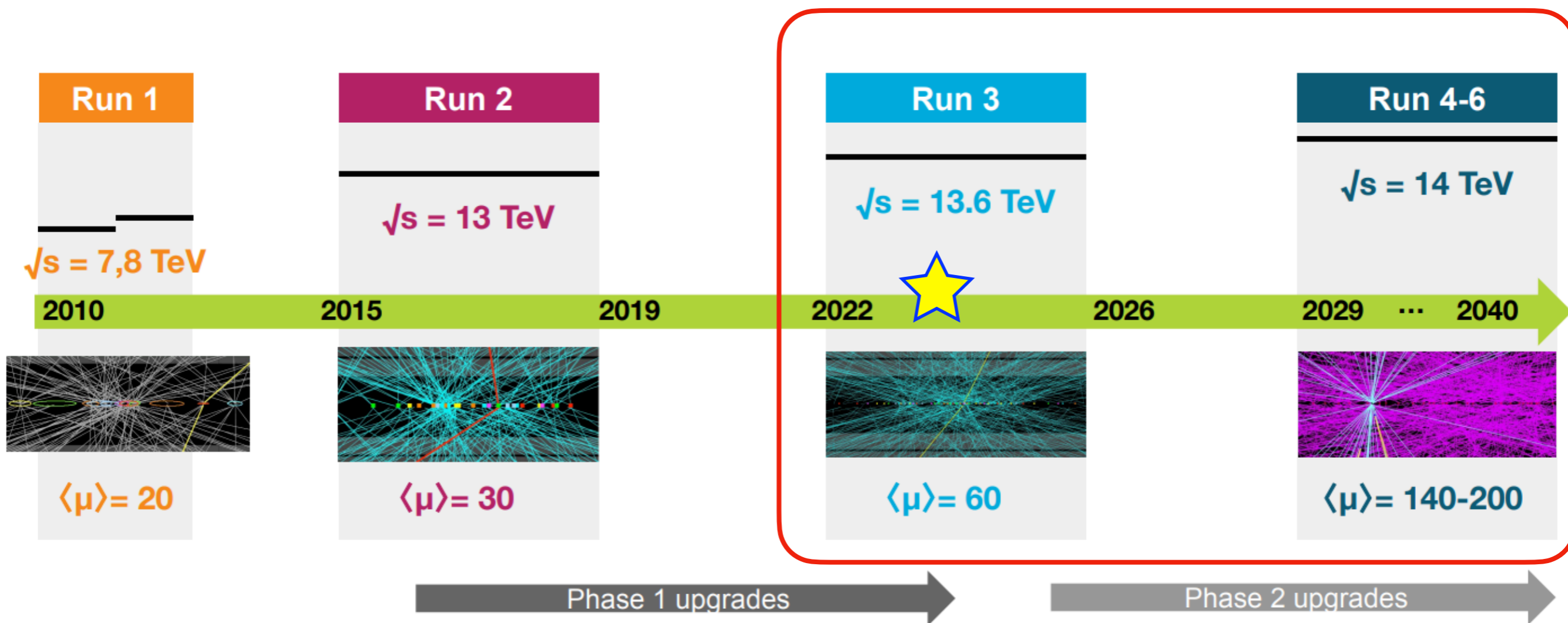
$$m_{4\mu} = 125.1 \text{ GeV}$$

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

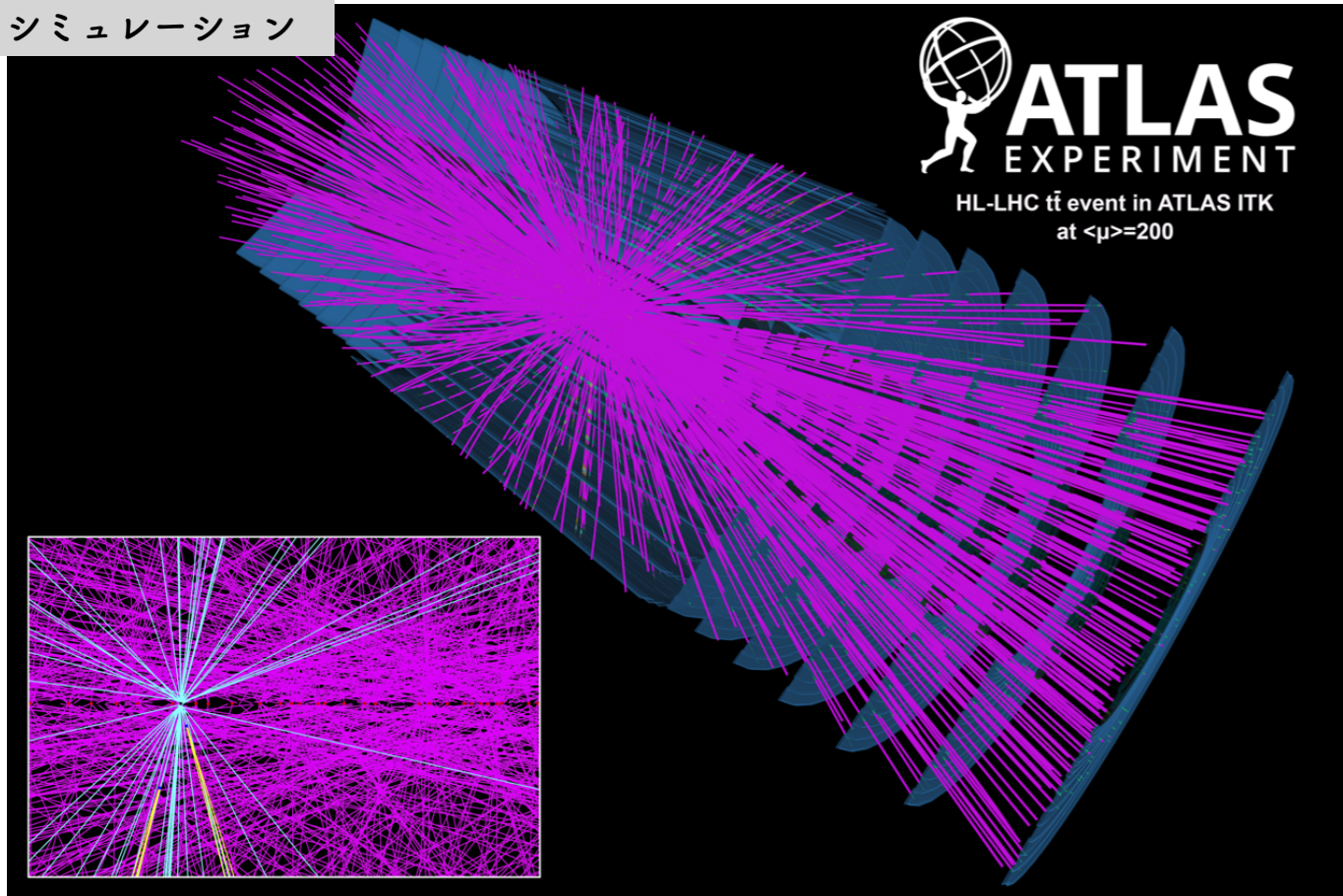
$$m_{12} = 86.3 \text{ GeV}, \quad m_{34} = 31.6 \text{ GeV}$$



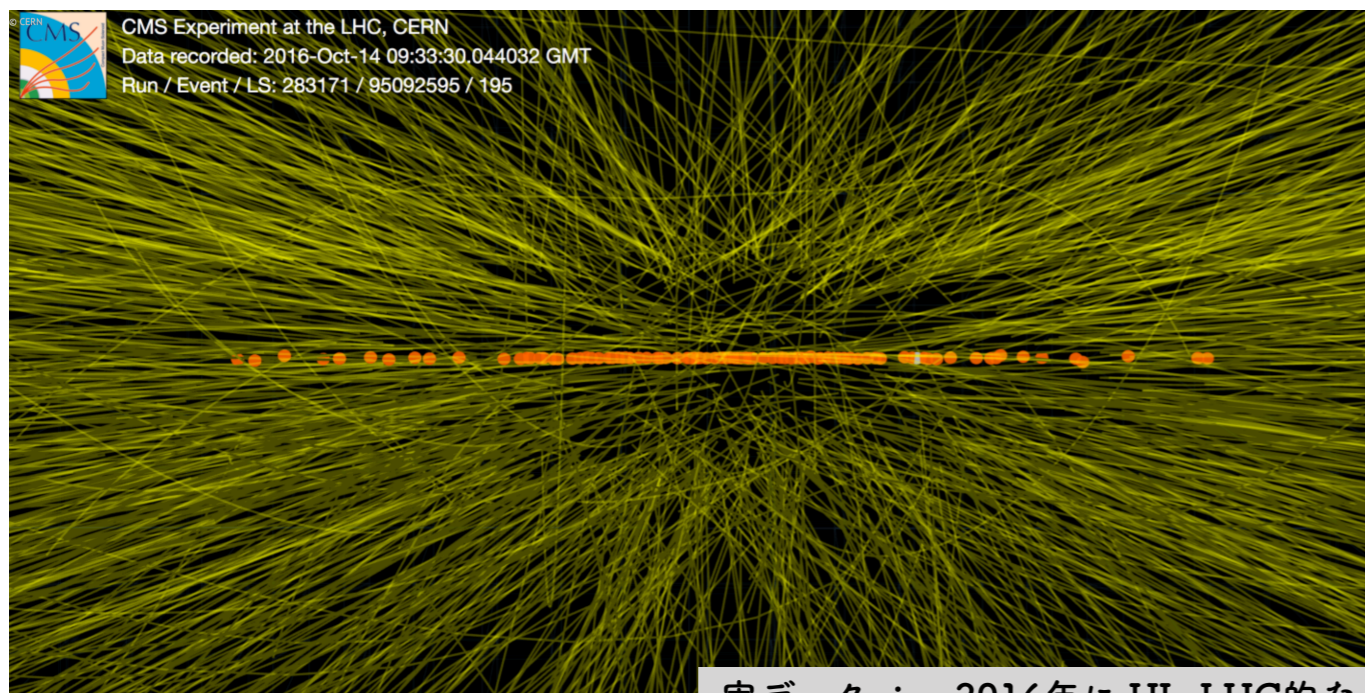
 ATLAS
 EXPERIMENT
<http://atlas.ch>

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



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）

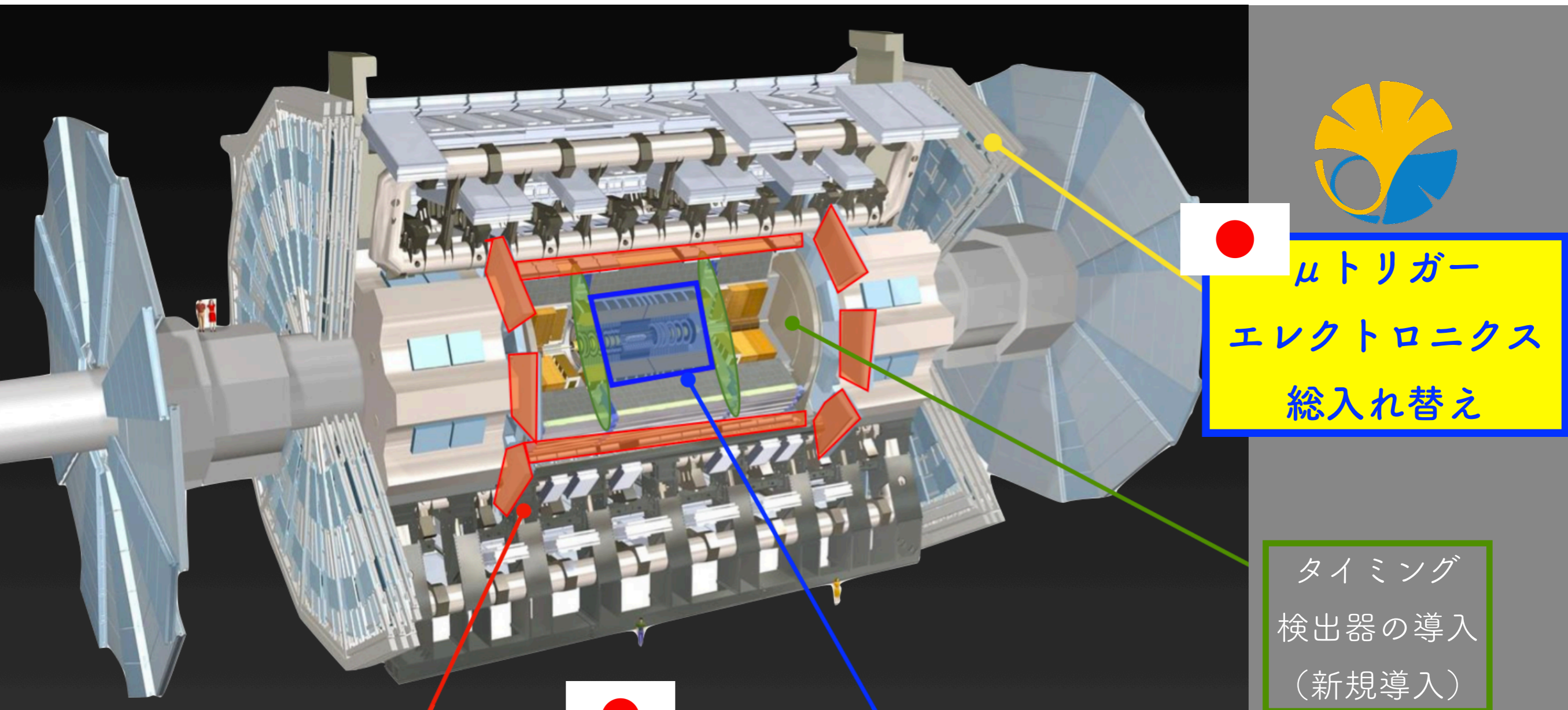
高統計は重要なのだが、タダではない。


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

<https://cds.cern.ch/record/2231915>



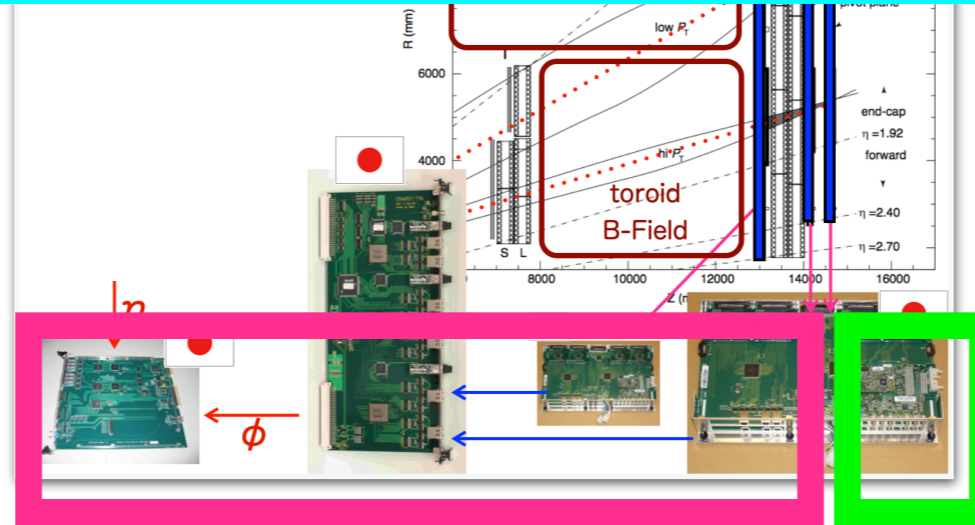

 ムトリガー
 エレクトロニクス
 総入れ替え

タイミング
 検出器の導入
 (新規導入)

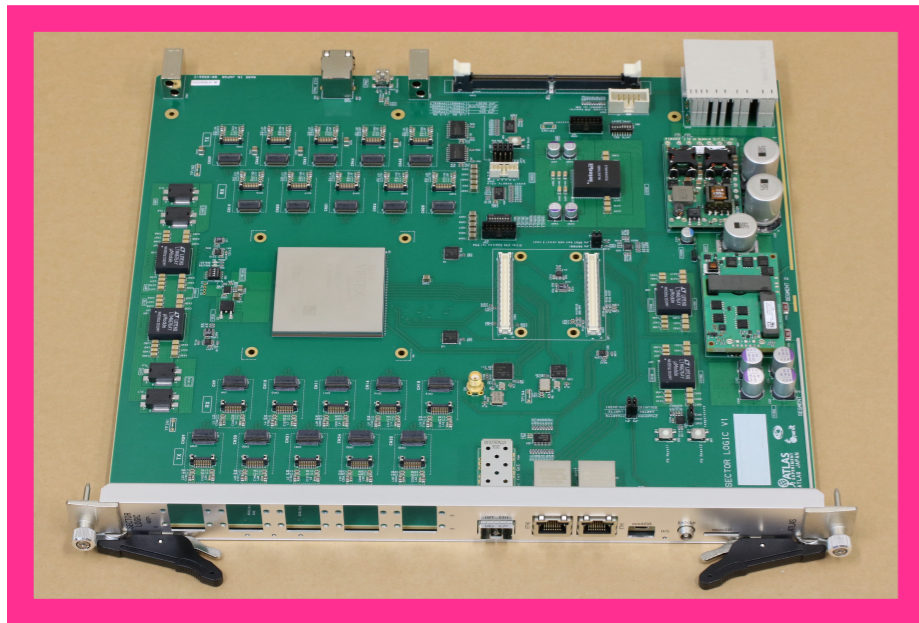

 新規ミュオン測定器の追加


 内部飛跡検出器 (ITk) の総入れ替え

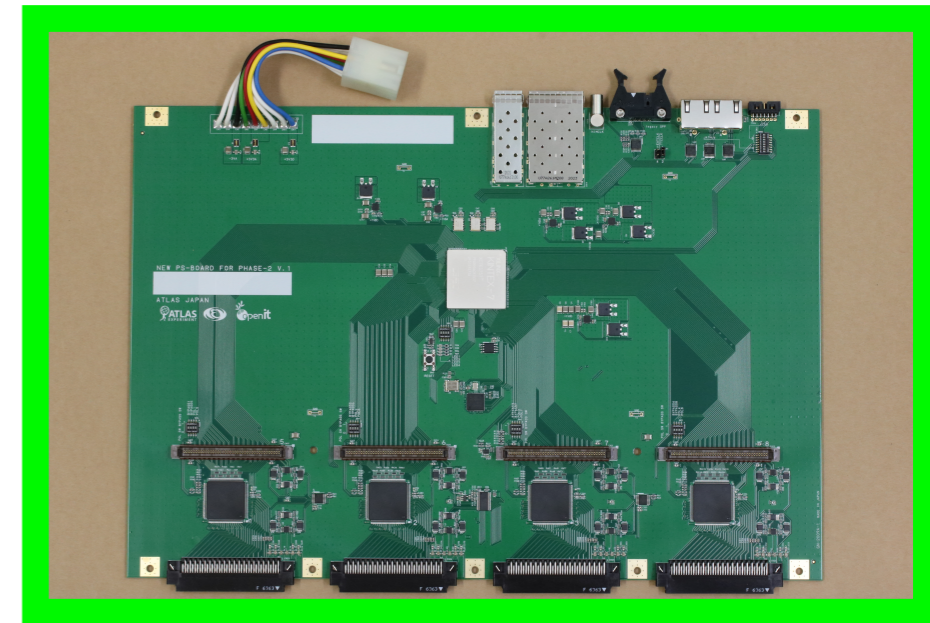
- ・ 対放射線性能増強
- ・ より精細なチャンネル (サイズ)
- ・ カバーする範囲の大幅な拡大



開発中 (写真は1号機)



x 48



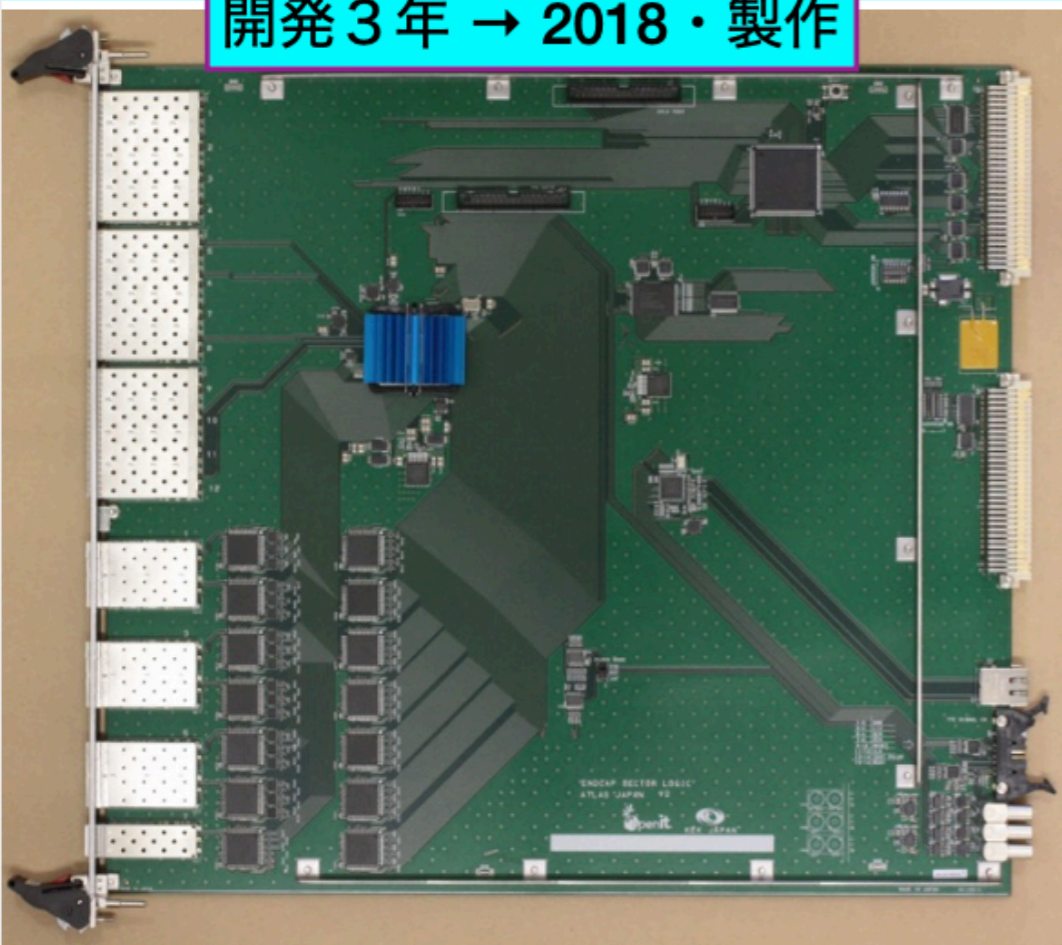
x 1600

~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

開発3年 → 2018・製作

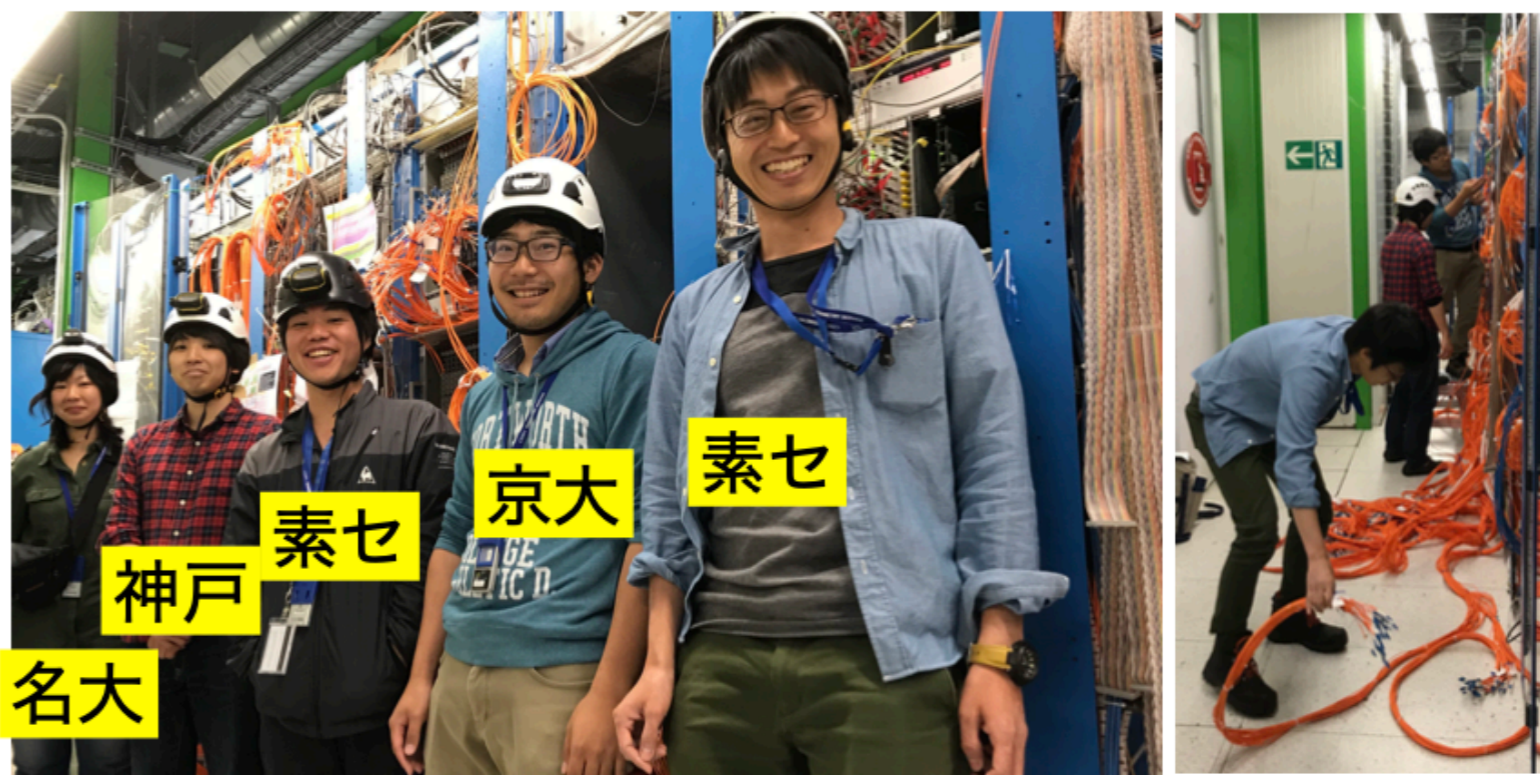
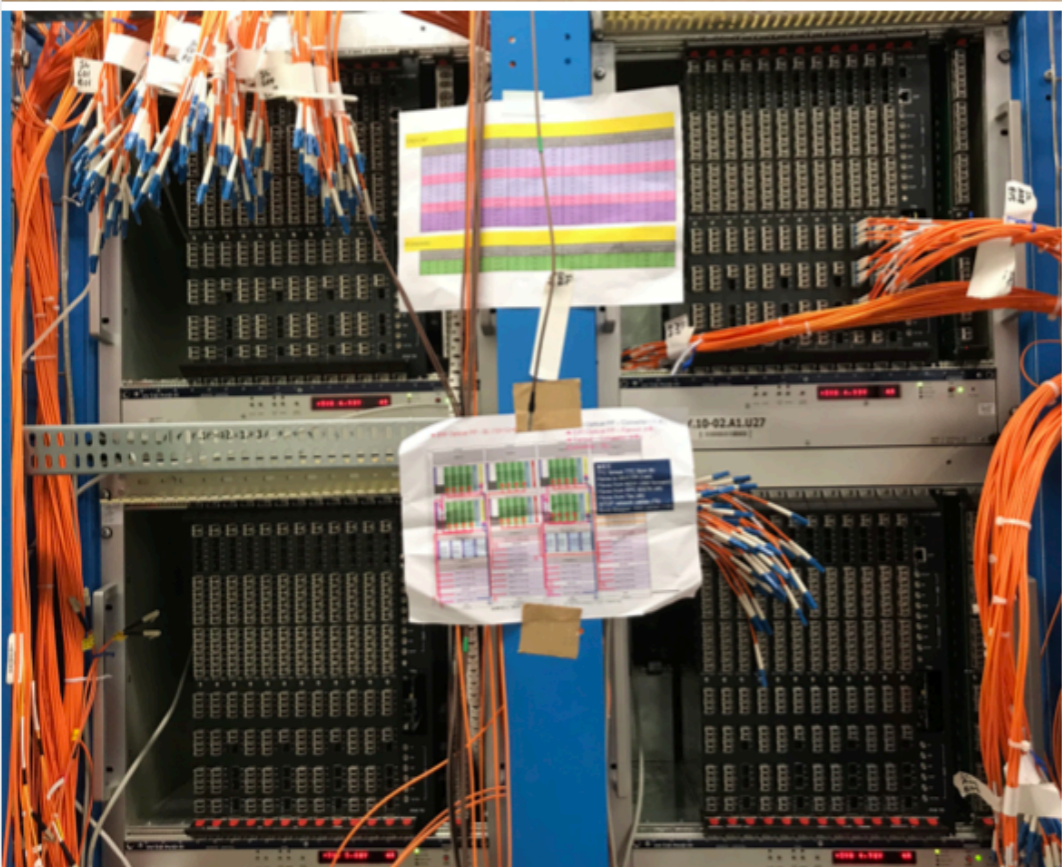


東大・テストベンチ

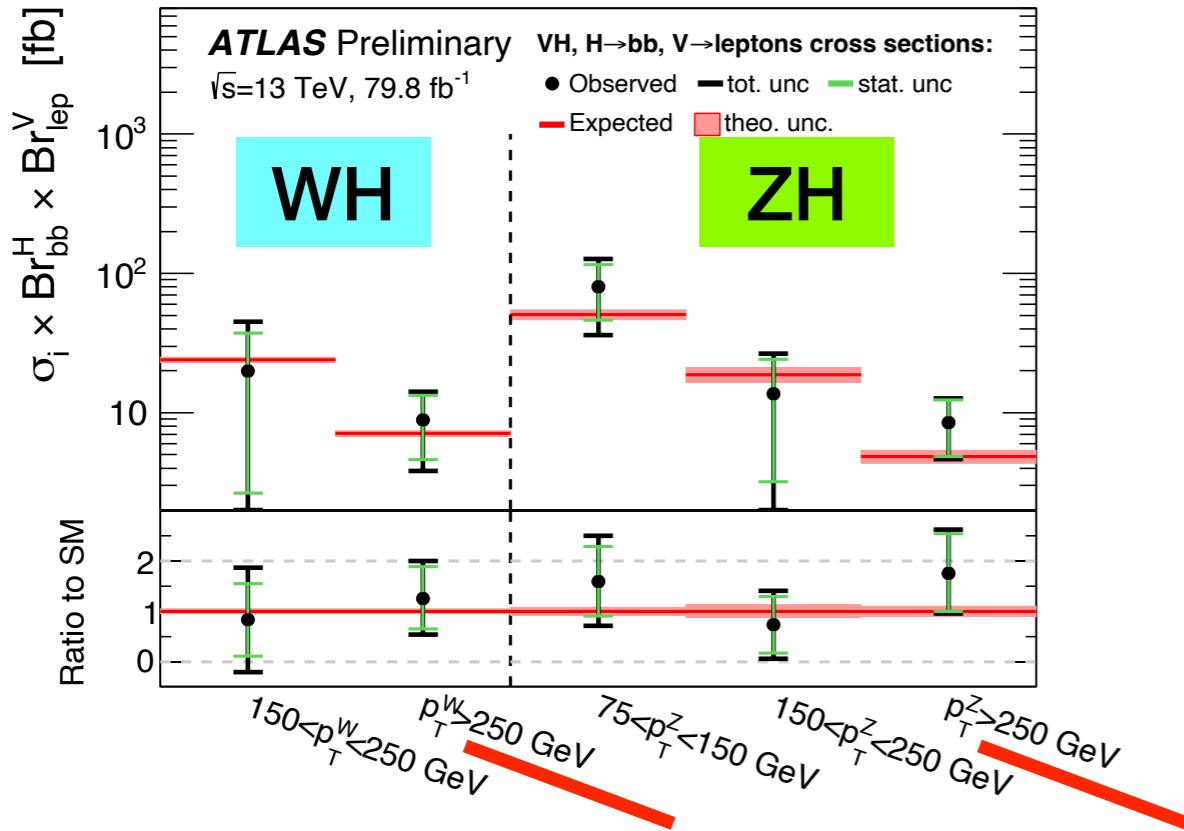


CERNのシステムに
組み込んで運用開始

5大学いっしょに、システムの開発運転



Higgsの精密測定 ⇒ 新物理



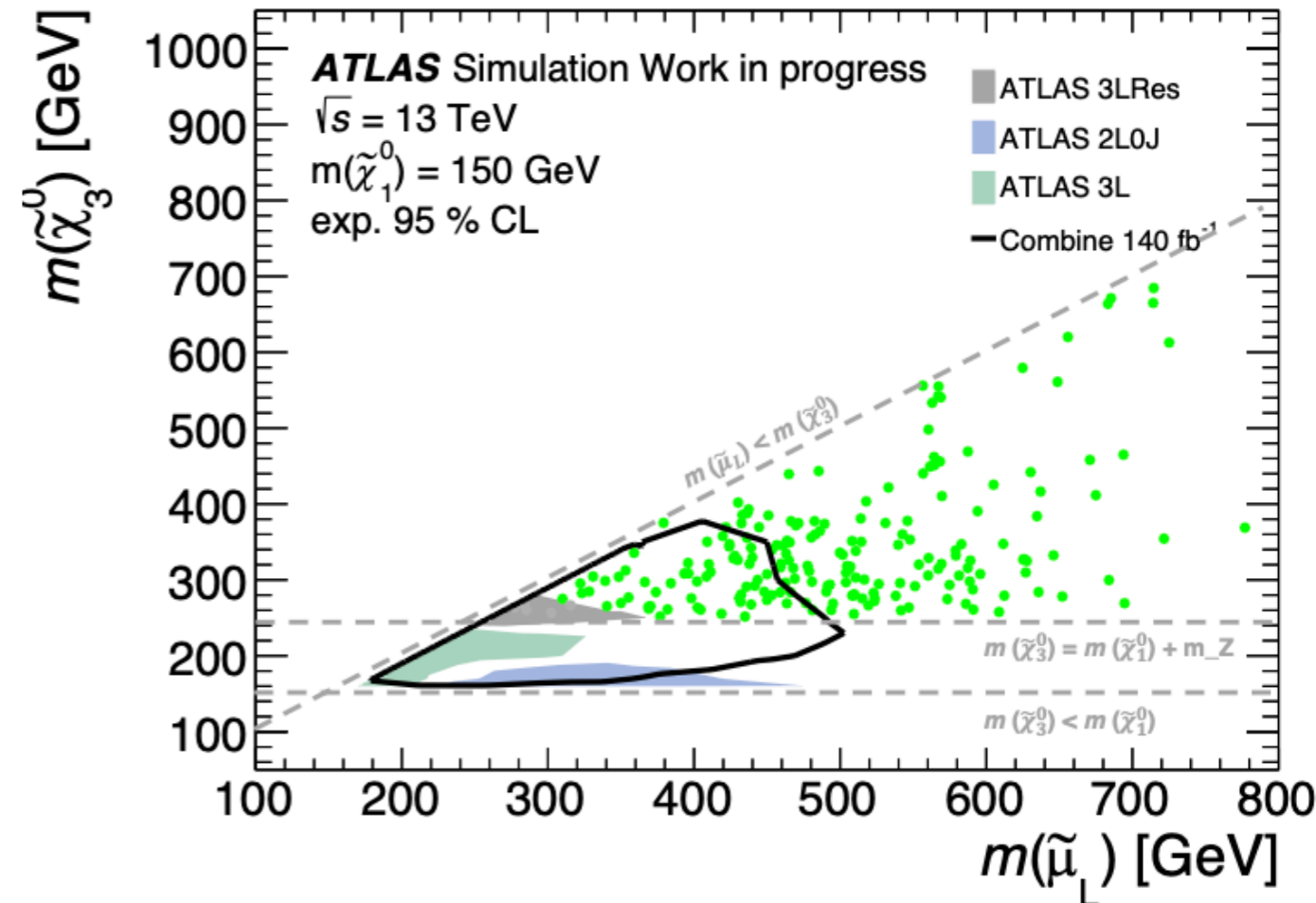
WH ($p_T > 250 \text{ GeV}$) $8.8 \pm 5.2 \text{ fb}$ (SM: $7.08 \pm 0.33 \text{ fb}$)

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

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 (D4)

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 μ の超対称性パートナー
 ⇒ 様々手法の改善を伴い、新たな探索挑戦

青木 (D3)

- 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