



加速器・検出器の現状と今後

名古屋大学 堀井泰之

2017年4月7日 新テラスケール研究会

- LHCの現状・今後
- ATLAS/CMS検出器の現状・今後
- LHC高輝度化, ATLAS/CMS検出器改良



LHCの現状・今後

Large Hadron Collider (LHC)

4

周長27 km

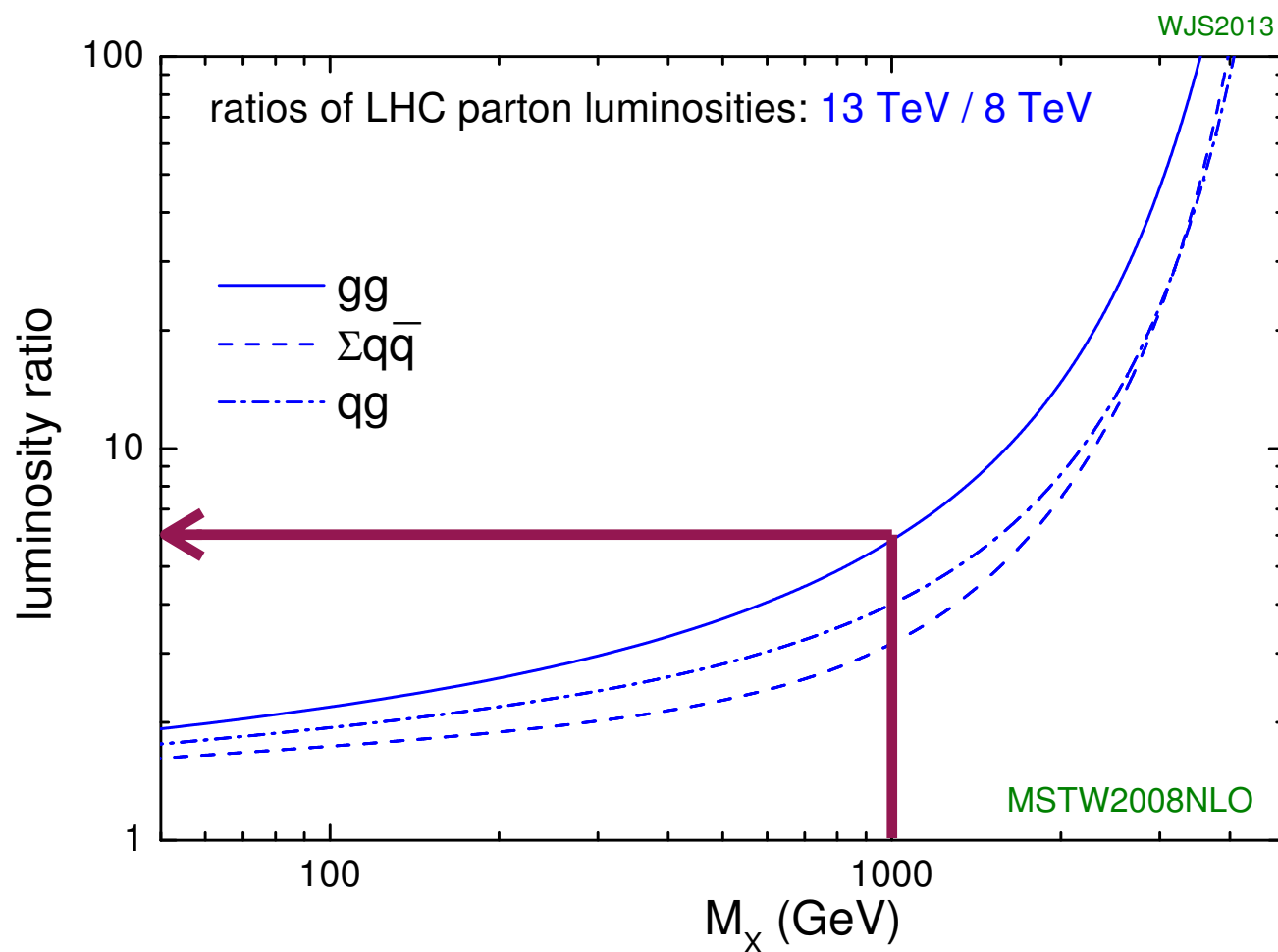
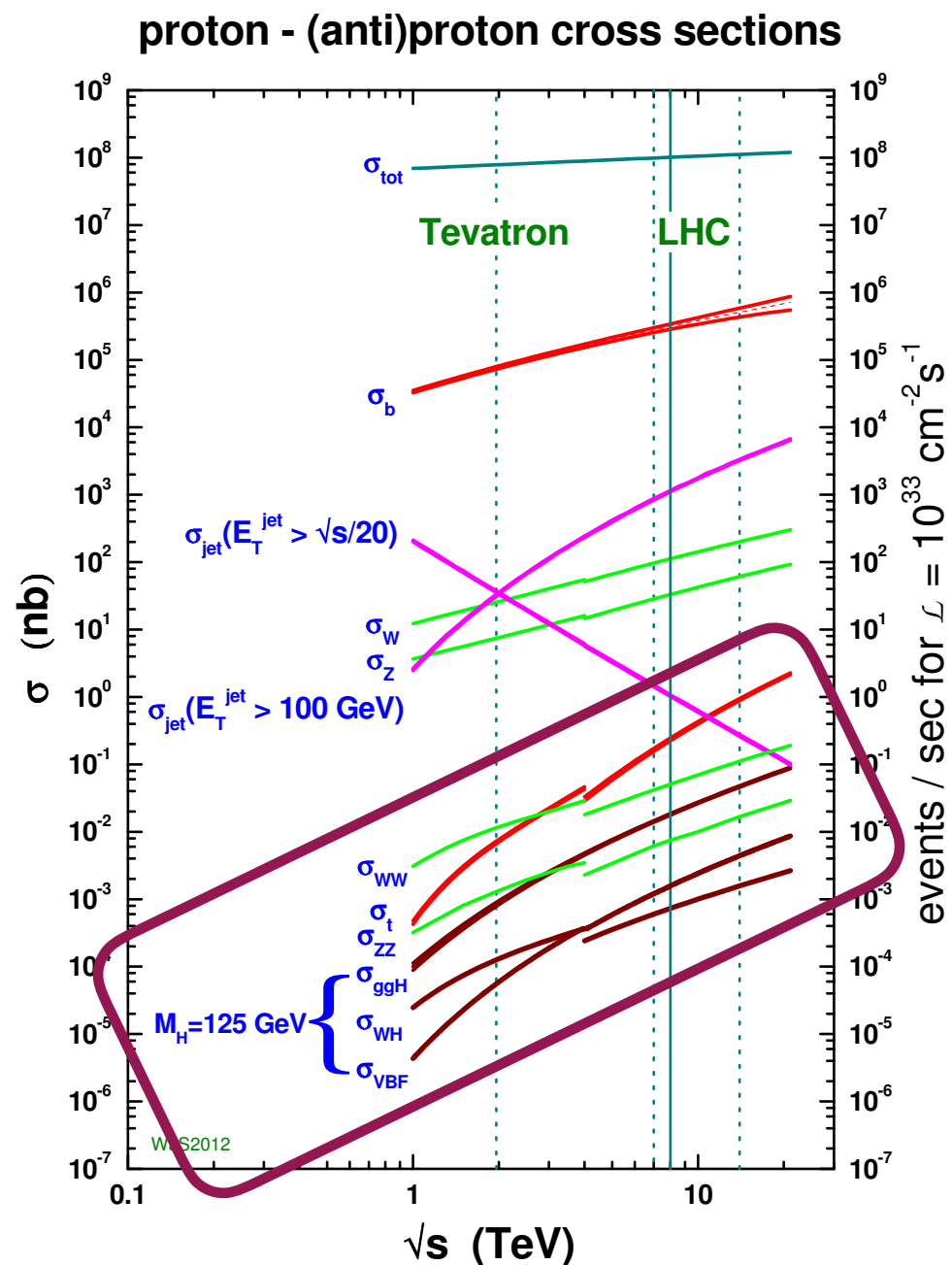


重心系エネルギー：14 TeV、ルミノシティ $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
(陽子・陽子衝突に対するデザイン値)

重心系エネルギーを上げる動機

高い重心系エネルギーを用いると、興味のある反応の断面積が大きくなる。

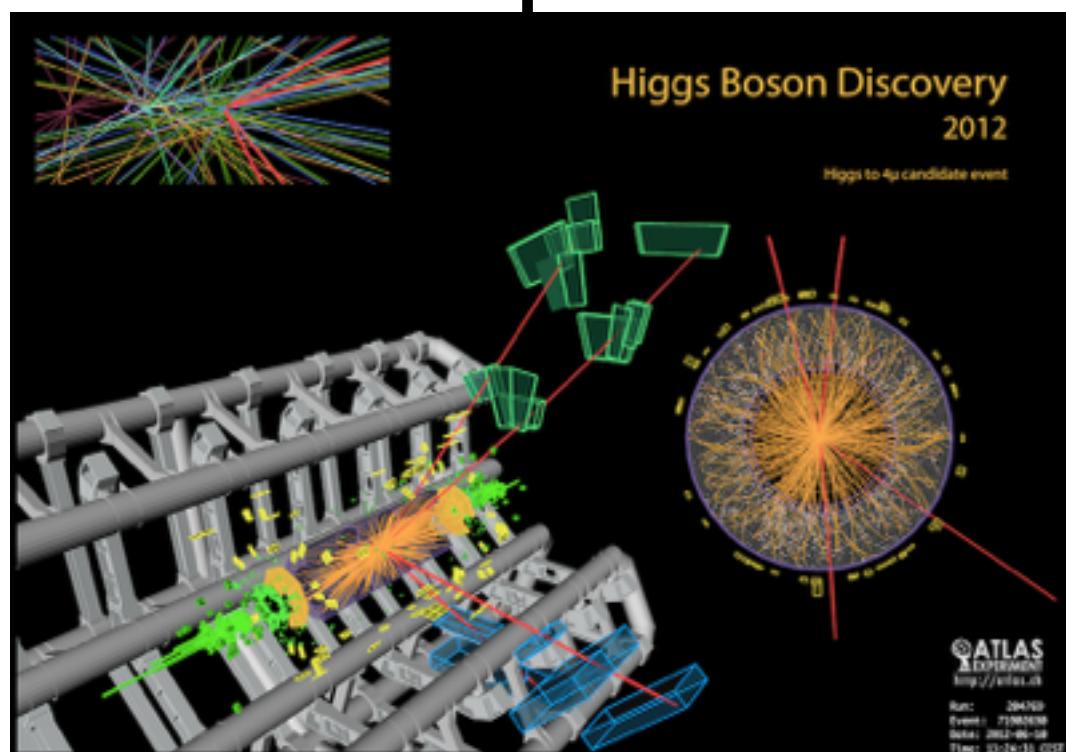
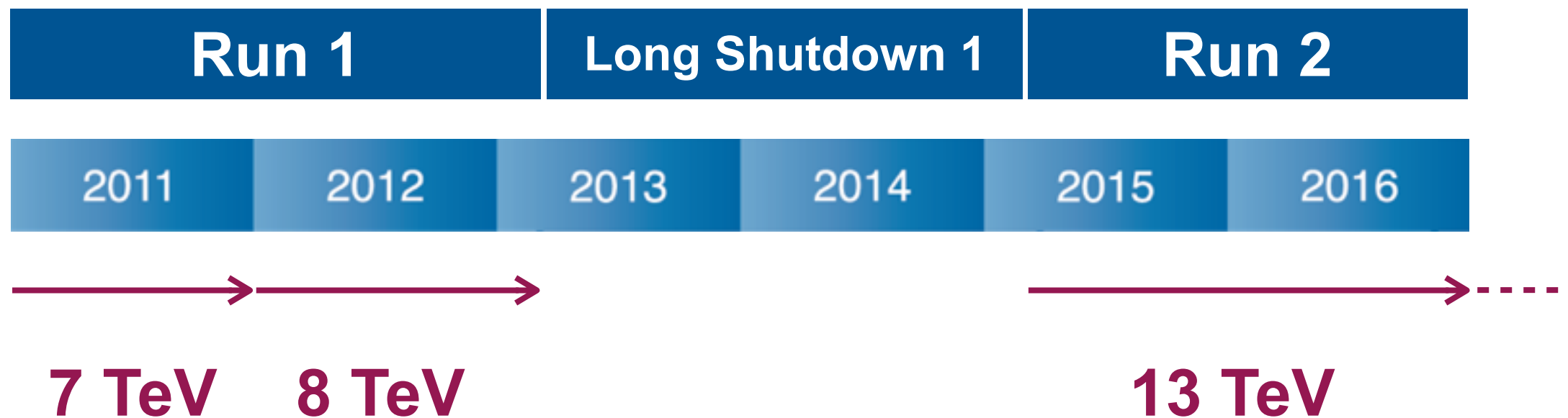
ヒッグス物理や新物理への感度向上！



ggルミノシティ比 (13/8 TeV) : ~ 6 @ 1 TeV

J. Stirling, Parton Luminosity and Cross Section Plots

重心系エネルギー推移



The Nobel Prize in Physics 2013

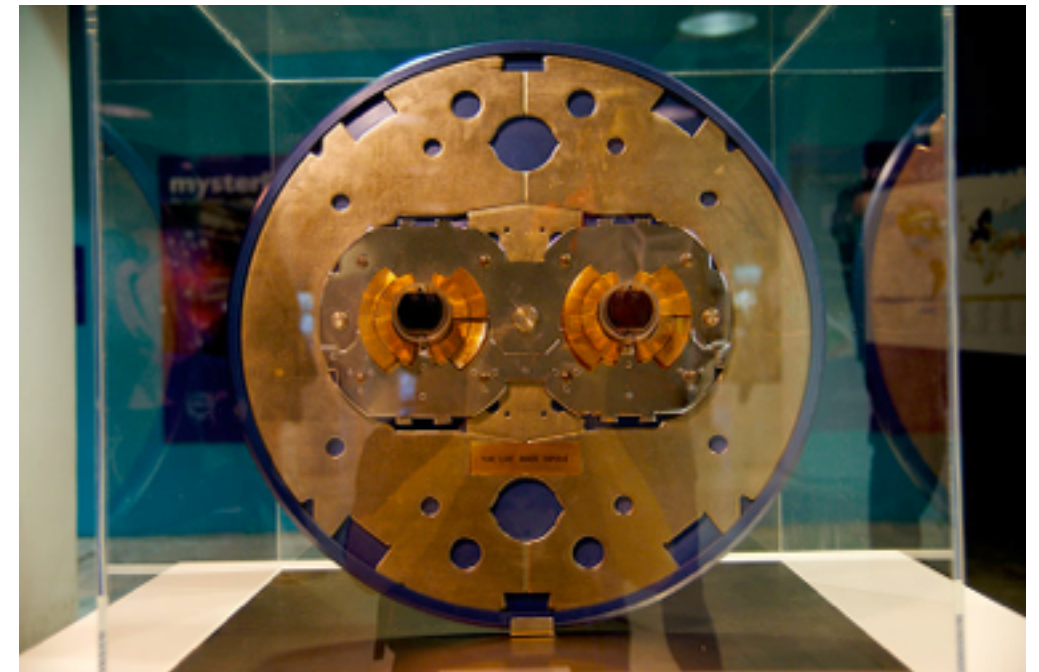
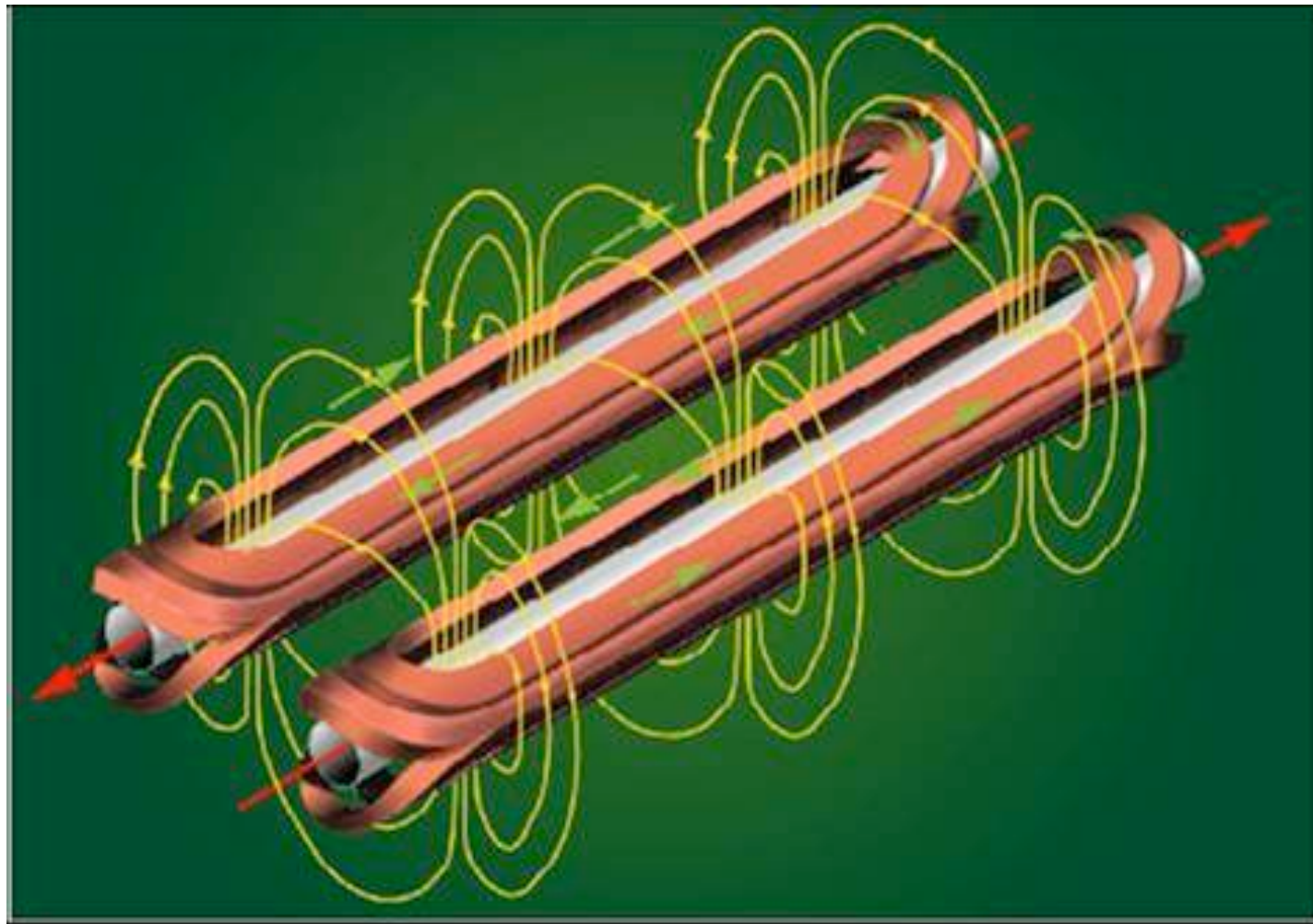


Photo: A. Mahmoud
François Englert
Prize share: 1/2



Photo: A. Mahmoud
Peter W. Higgs
Prize share: 1/2

陽子軌道を曲げるためのダイポール磁石の電流値



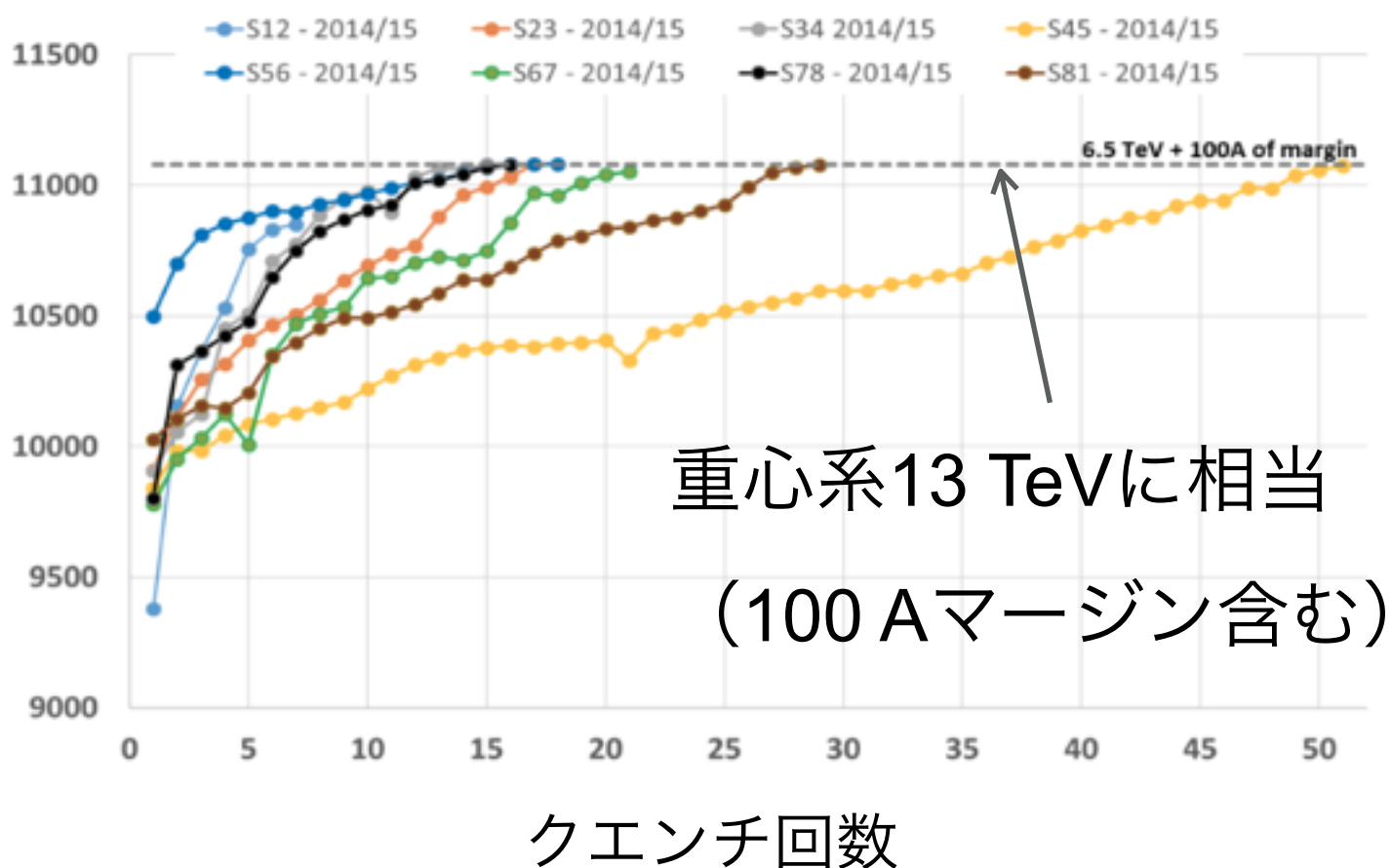
超電導 (1.9 K)

11800 Aの電流を160本のケーブルに流し8.33 Tの磁場を作る (14 TeV)

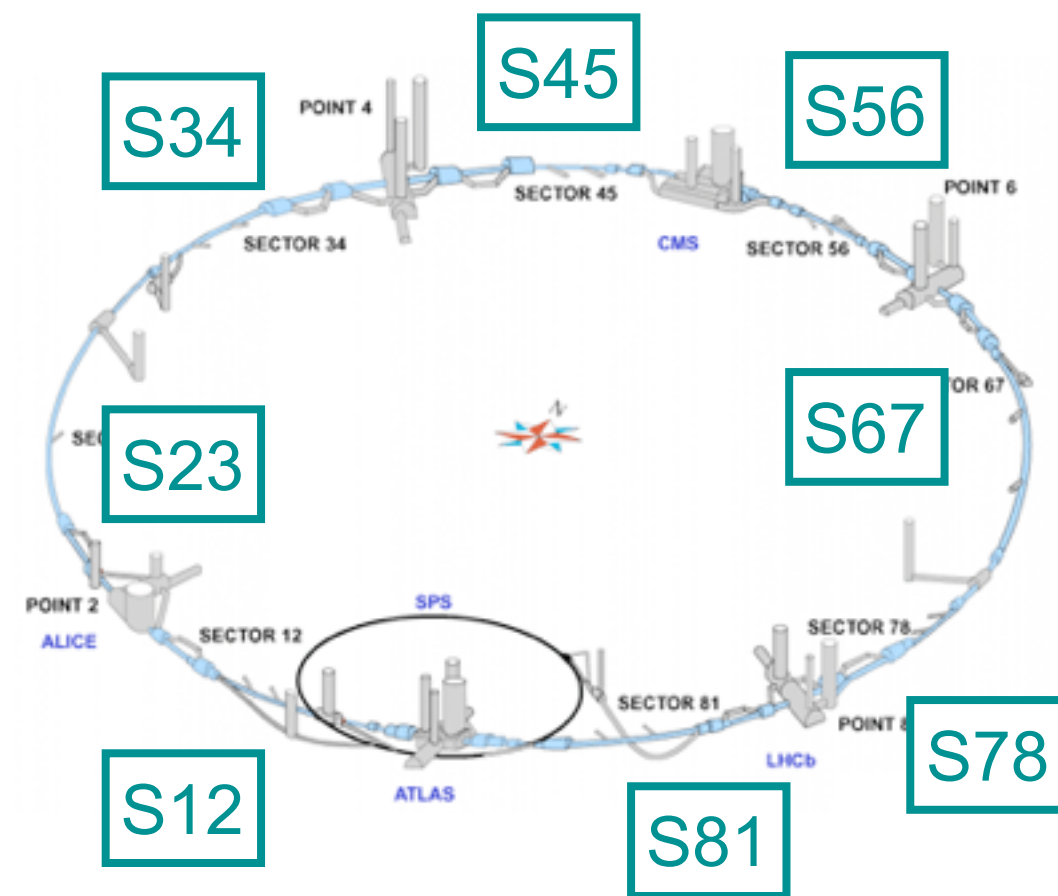
クエンチ、トレーニング

- 微小なエネルギー（ミリジュールレベル）が解放されるだけで、コイルの温度が上昇し常伝導状態になってしまう（クエンチ）。
- 電流を上げ、クエンチを起こす過程を繰り返すことで、許容電流値を上げることができる（トレーニング）。

Run 2前のトレーニング結果



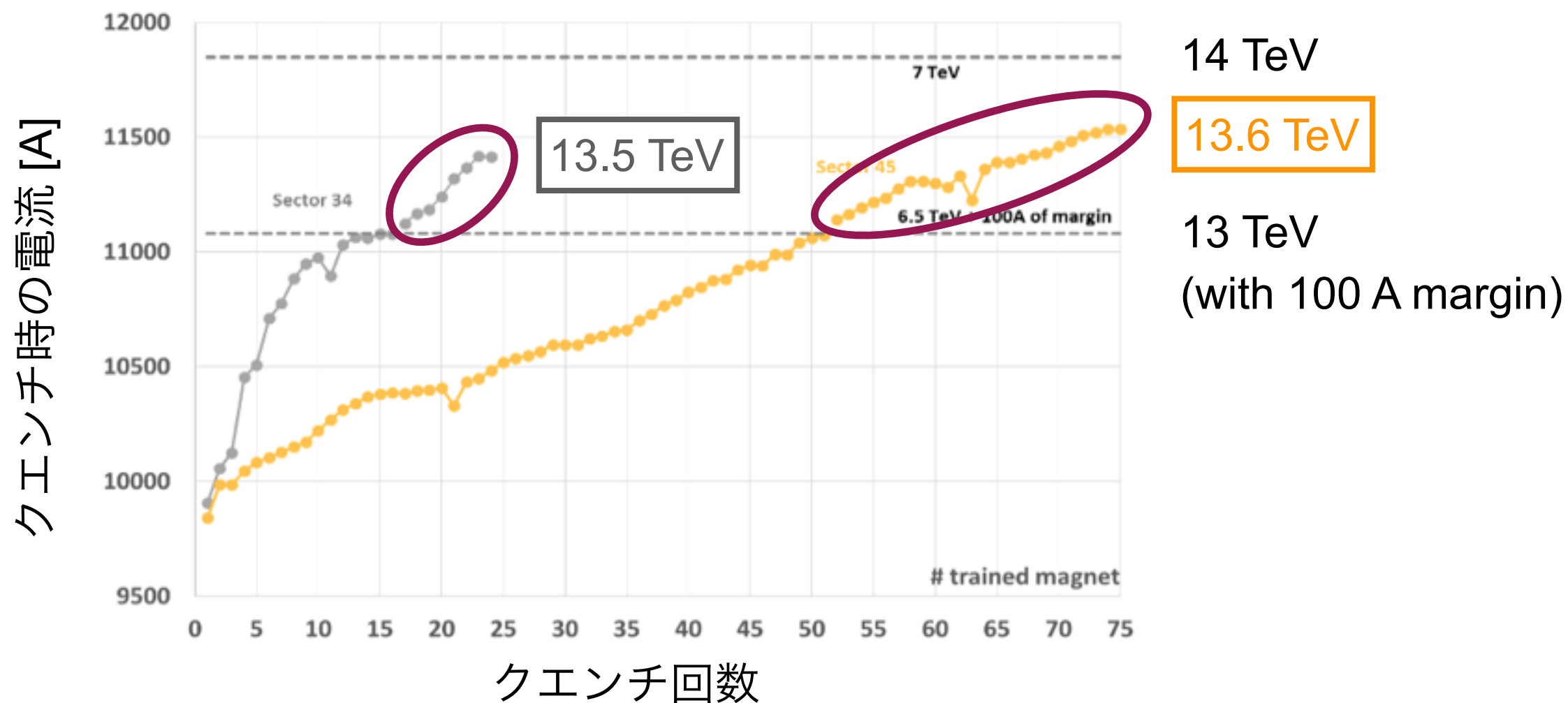
各セクター (“S”) の位置



2016年12月のトレーニング結果

2016年12月に、合計9日間、S34, S45のトレーニングを実施。

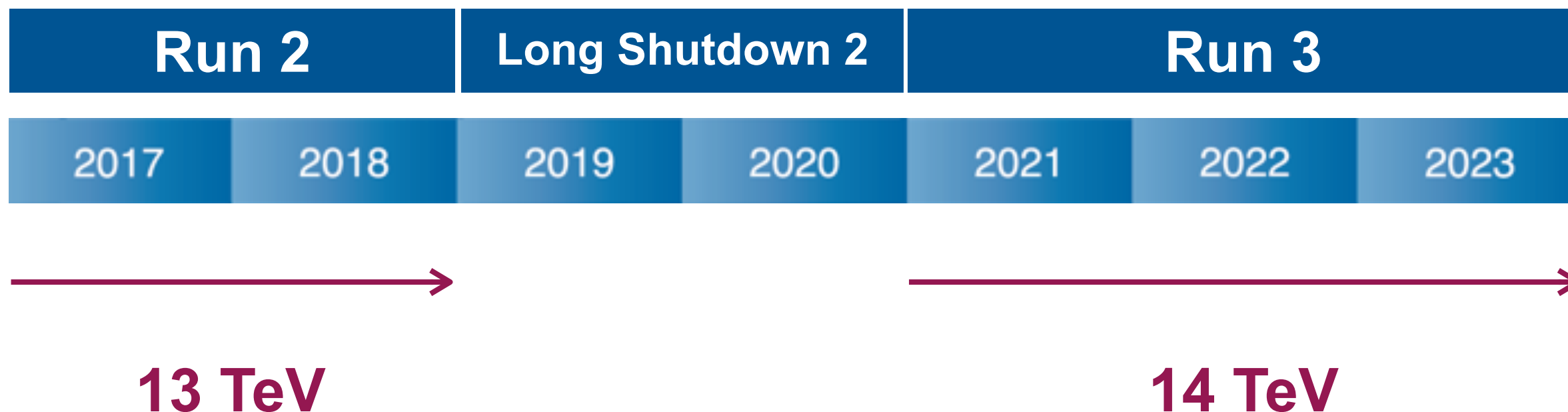
13.5 TeV程に相当する電流値を得た。



全てのセクターで14 TeV用トレーニングを行うのに、1ヶ月程かかる見込み。

今後の重心系エネルギー推移（予定）

10/40



Run 2の終わりまでは13 TeVで運転することに決定。

14 TeVを目指す場合、2017年の積分ルミノシティは21-37%失われる見積もり。

[G. Arduini, LHC Performance Workshop 2017](#)

Run 3で14 TeV運転を行う予定。

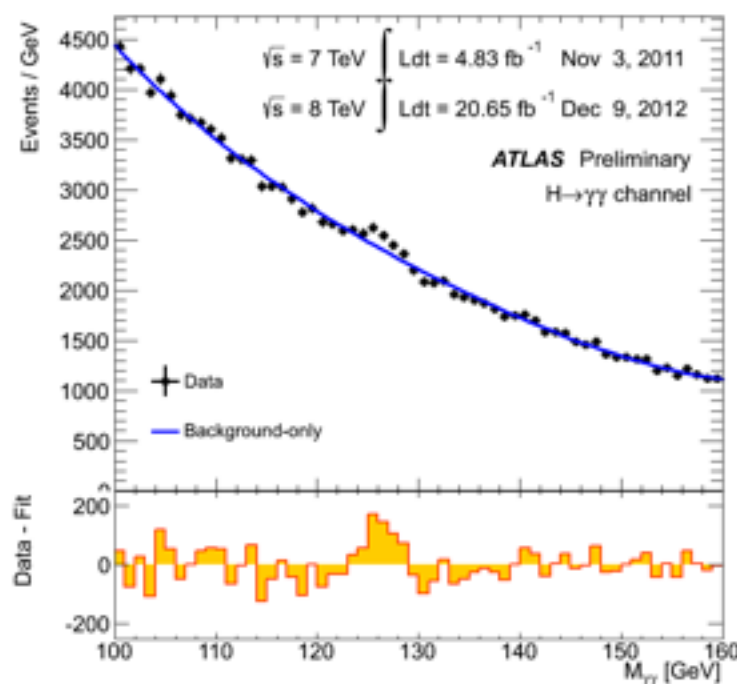
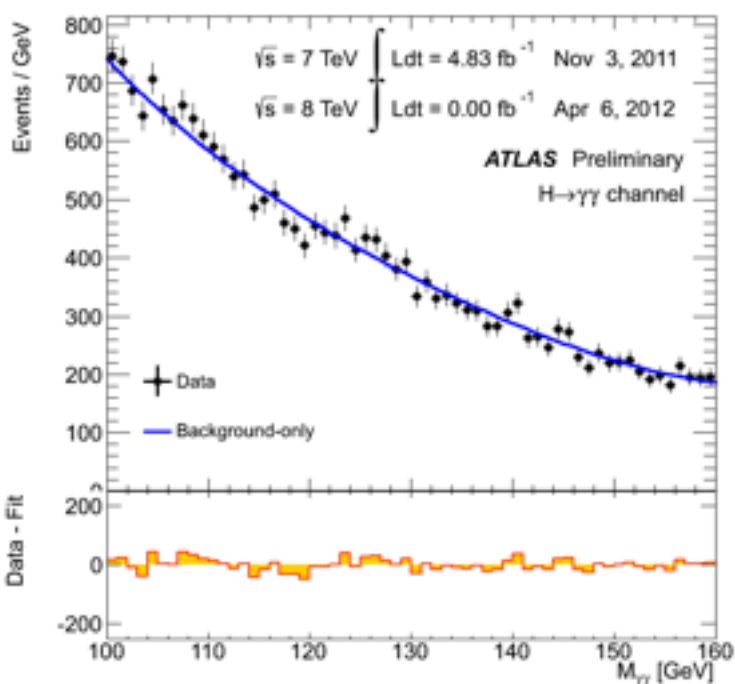
積分ルミノシティを上げる動機

積分ルミノシティを上げることで、様々な物理過程に対する感度を向上。

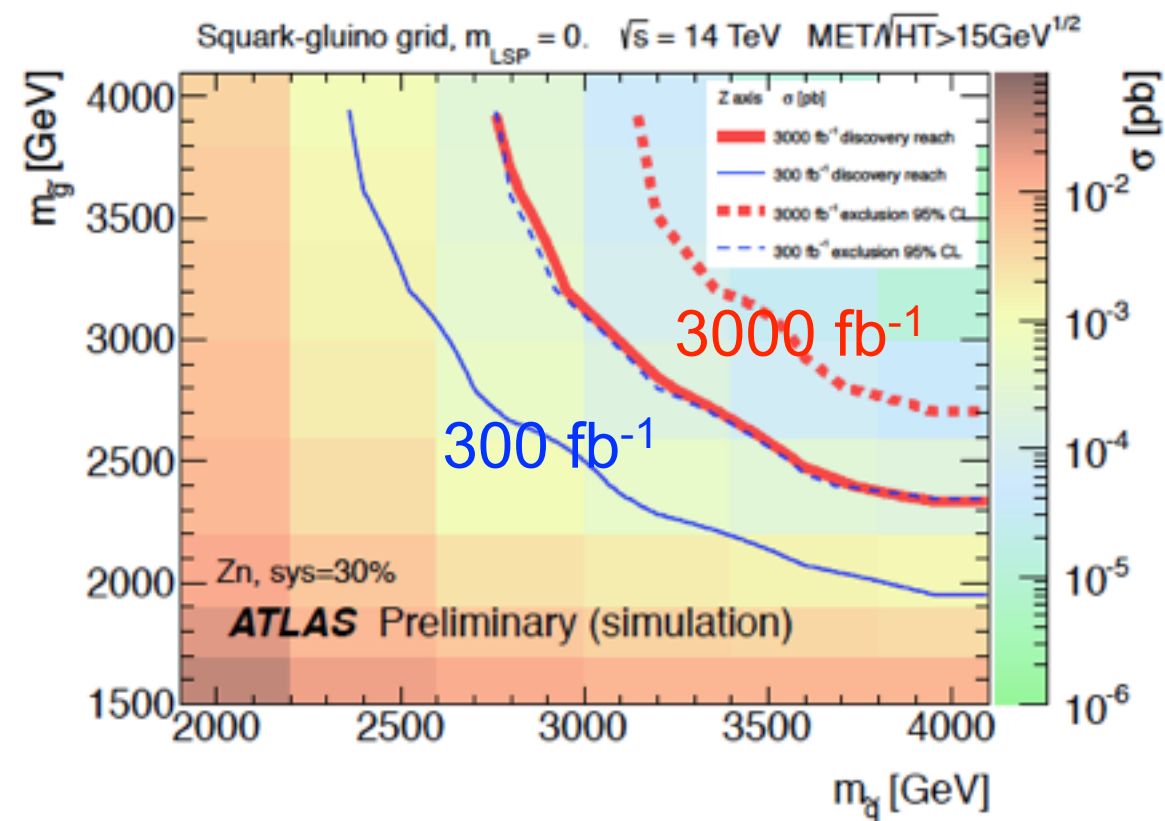
H→γγ (Run 1)

4.8 fb⁻¹

25.5 fb⁻¹



グルイーノ・スクォーク
シミュレーション



瞬間・積分ルミノシティ推移

瞬間ルミノシティ

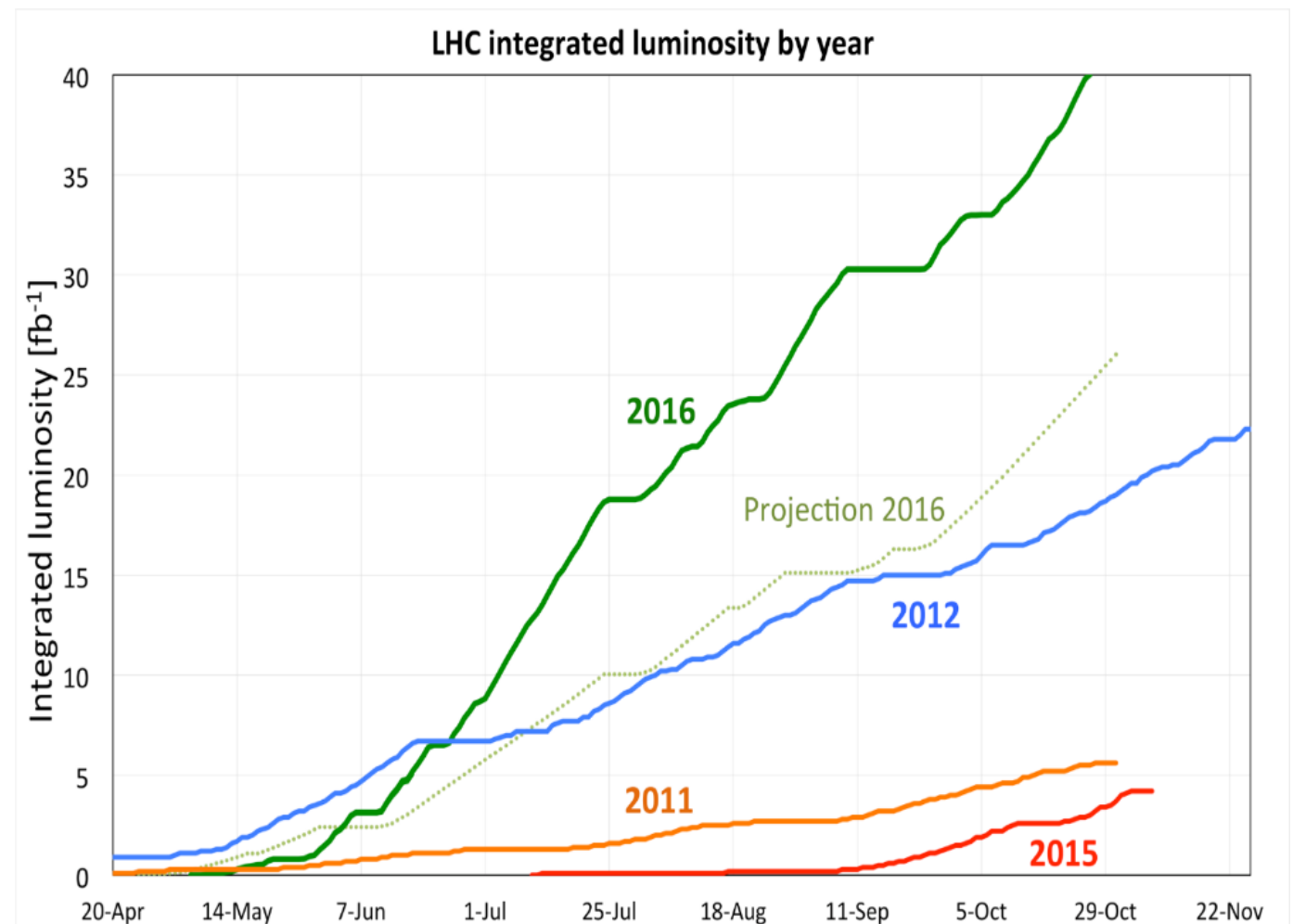
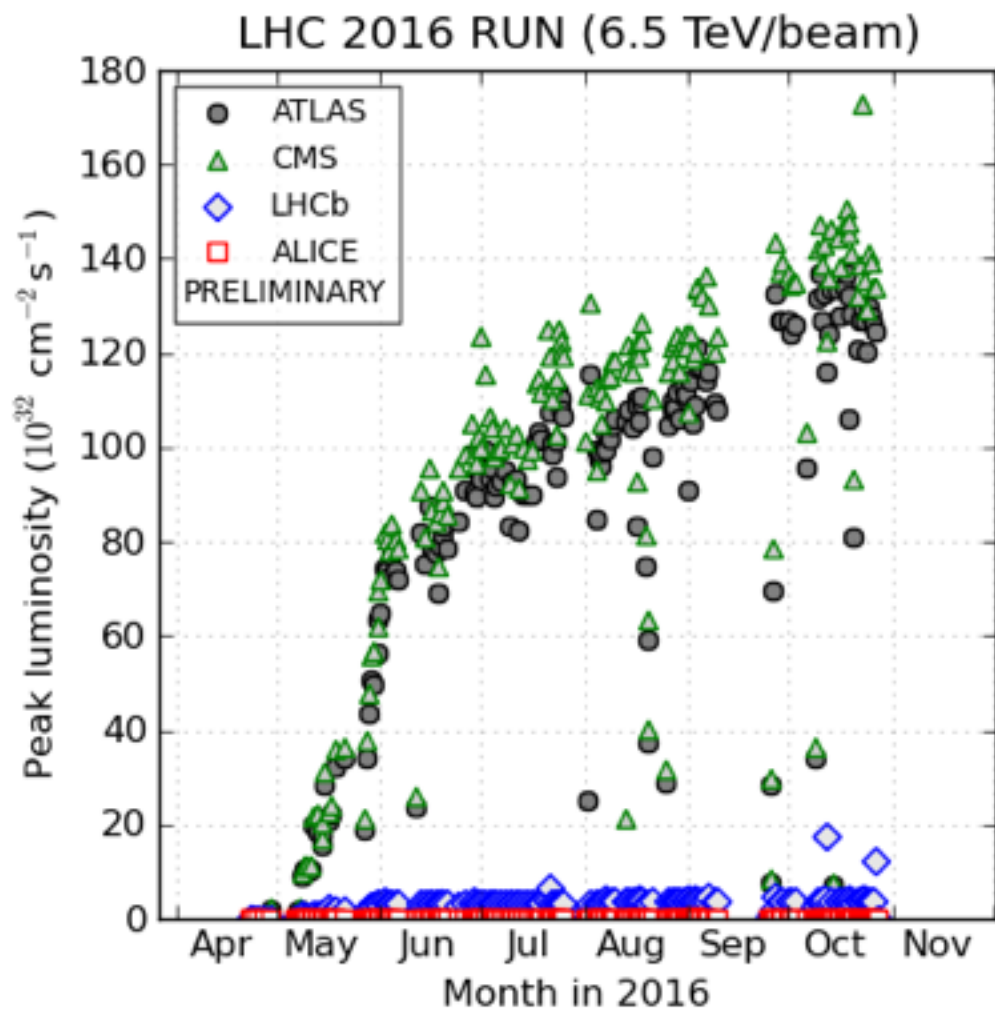
$> 1.4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

(デザイン値: $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

積分ルミノシティ

2016年に 40 fb^{-1} 程を提供

(ATLAS, CMSそれぞれ)



2017年の加速器パラメータ

Parameter	Standard 25 ns	BCMS 25 ns	BCMS 25 ns Pushed	Comments
Energy [TeV]	6.5	6.5	6.5	
β^* (1/2/5/8) [m]	0.4 / 10 / 0.4 / 3	0.4 / 10 / 0.4 / 3	0.33/ 10 / 0.33 / 3	β^* : 0.33–0.4 m per squeeze to
Long-range separation [sigma] - assumed emittance	10 sigma - 3.5 um	10 sigma - 2.5 um	10 sigma - 2.5 um	
Half X-angle (1/2/5/8) [μ rad]	-185 / 120 / 185 / -150	-155 / 120 / 155 / -150	-170 / 120 / 170 / -150	Went to 140 with lower intensities in 2016
Number of colliding bunches (1/5)	2736	2448	2448	バンチ数: 2448–2736
Bunch population	1.25e11	1.25e11	1.25e11	around 1.3e11 injected for both Standard and BCMS
Emittance into Stable Beams [μ m]	3.2	2.3	2.3	エミッタンス: 2.3–3.2 μ m
Bunch length [ns] - 4 sigma	1.05	1.05	1.05	As 2016
Peak Luminosity (L0)	1.4e34	1.7e34	1.9e34	ピークルミノシティ:
Peak mean pile-up (<i>inel xsection 80 mb</i>)	37	51	56	1.4–1.9 $\times 10^{34}$ cm ⁻² s ⁻¹
Average mean pile-up	27	33	36	AND have to assume average fill length and lumi lifetime. Assume average fill length of 平均パイルアップ: 27–36
Average luminosity lifetime (tau)	21 hours	15 hours	14 hours	Approx. - assuming burn only

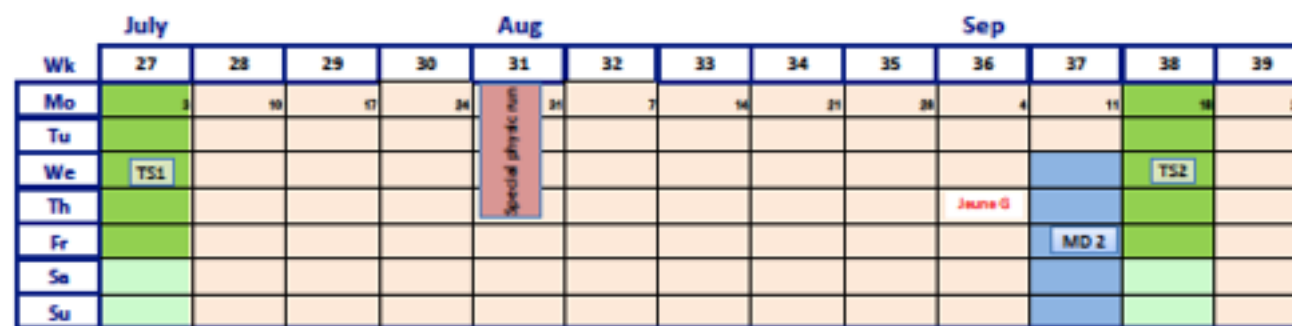
2017年のスケジュール

- 5月1日 試運転開始
- 6月12日 物理ラン開始
(開始が少し早まる可能性あり)
- 12月11日 物理ラン終了

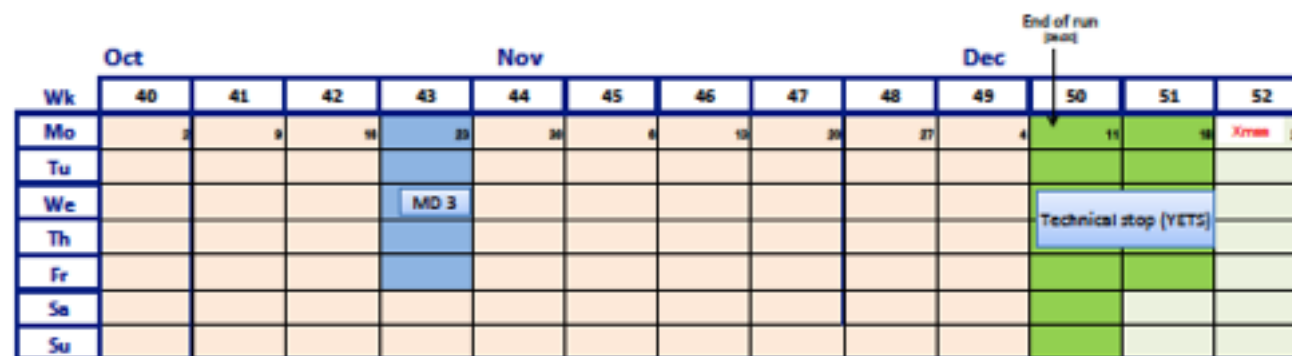


陽子衝突運転日数：145日

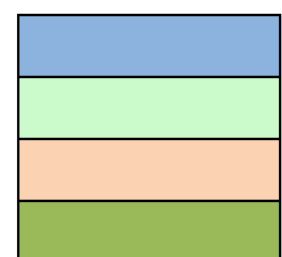
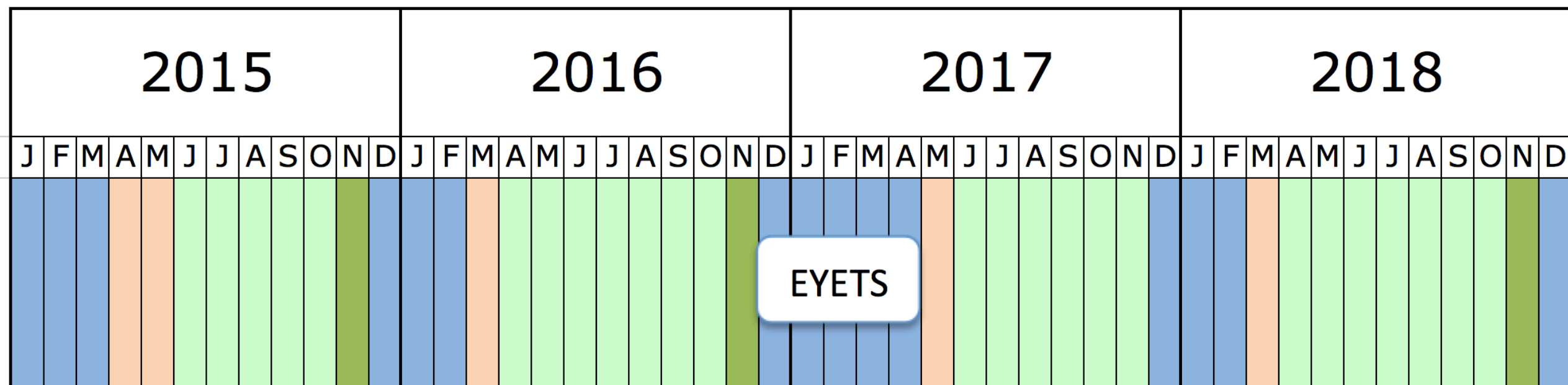
(2016年は164日)



2017年ターゲット：~45 fb⁻¹



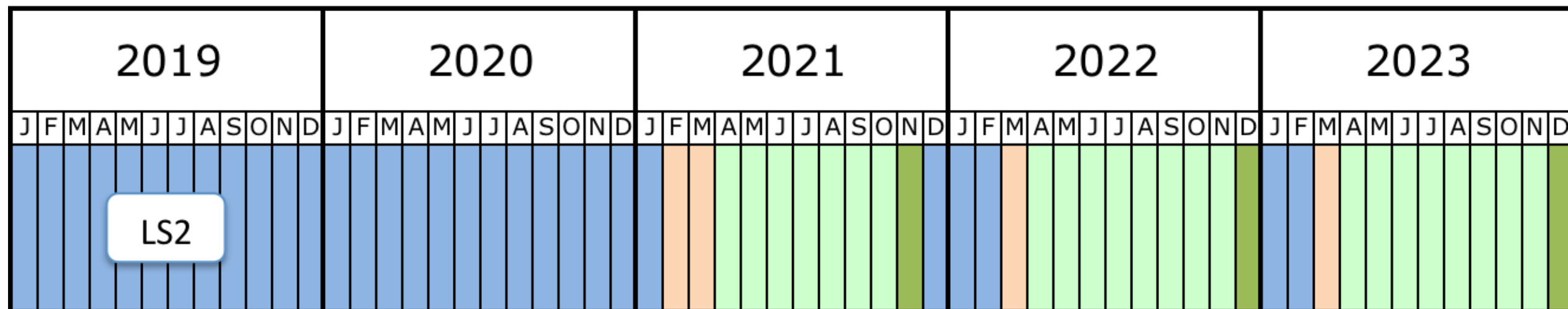
Run 2, Run 3のスケジュール




Shutdown/Technical stop
Protons physics
Commissioning
Ions

>120 fb⁻¹ (13 TeV)

Σ 300 fb⁻¹ (14 TeV ?)

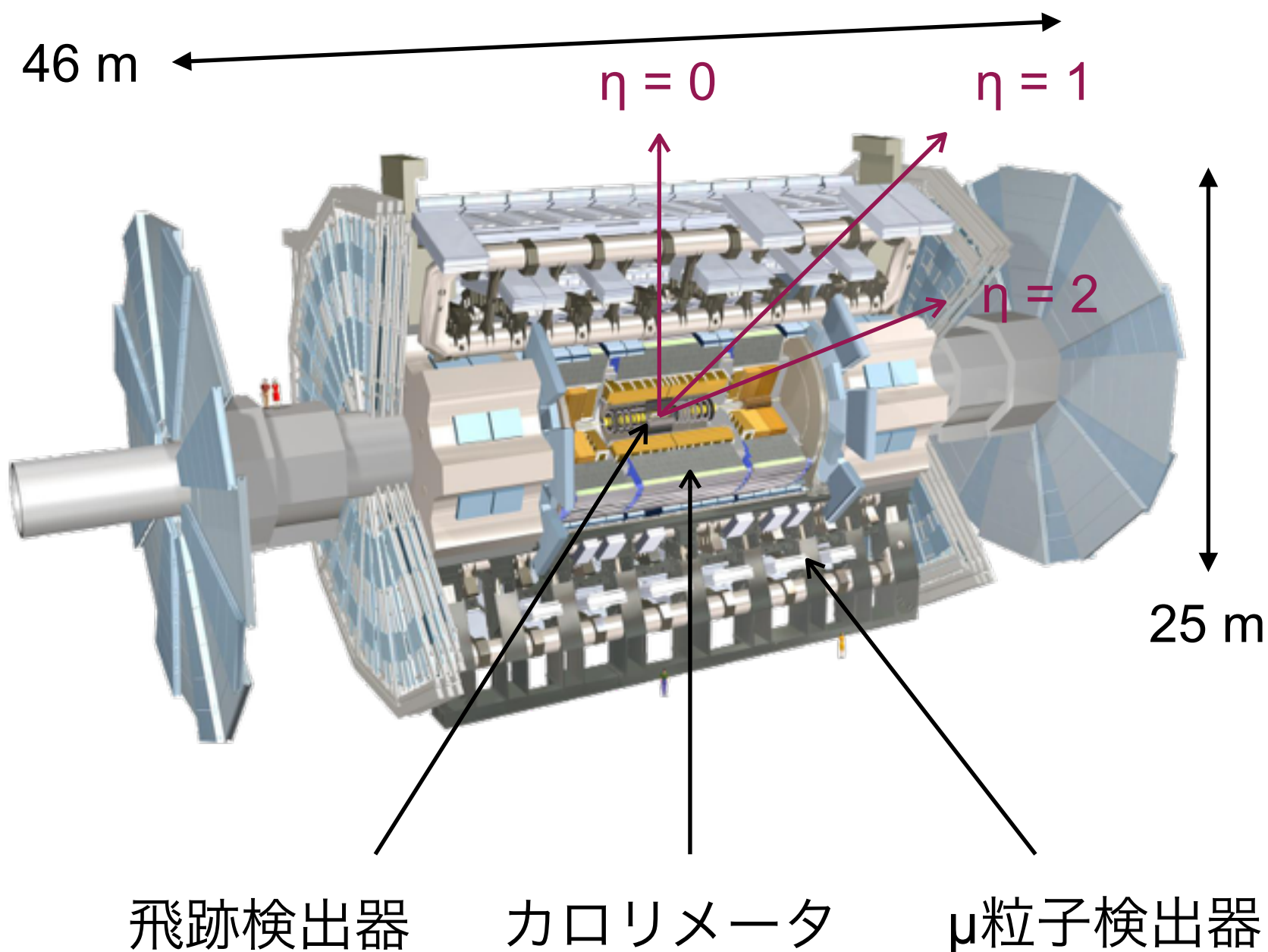


LS: Long Shutdown, EYETS: Extended Year End Technical Stop



ATLAS, CMS検出器の現状・今後

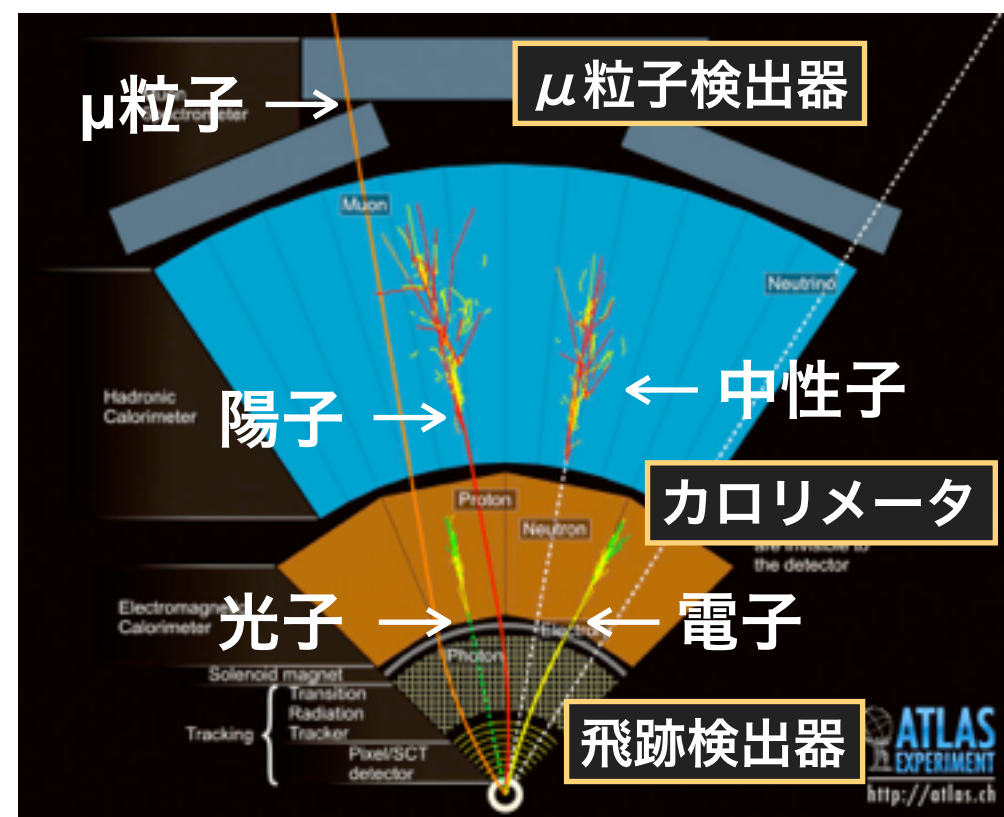
ATLAS検出器の概要



擬ラピディティ η

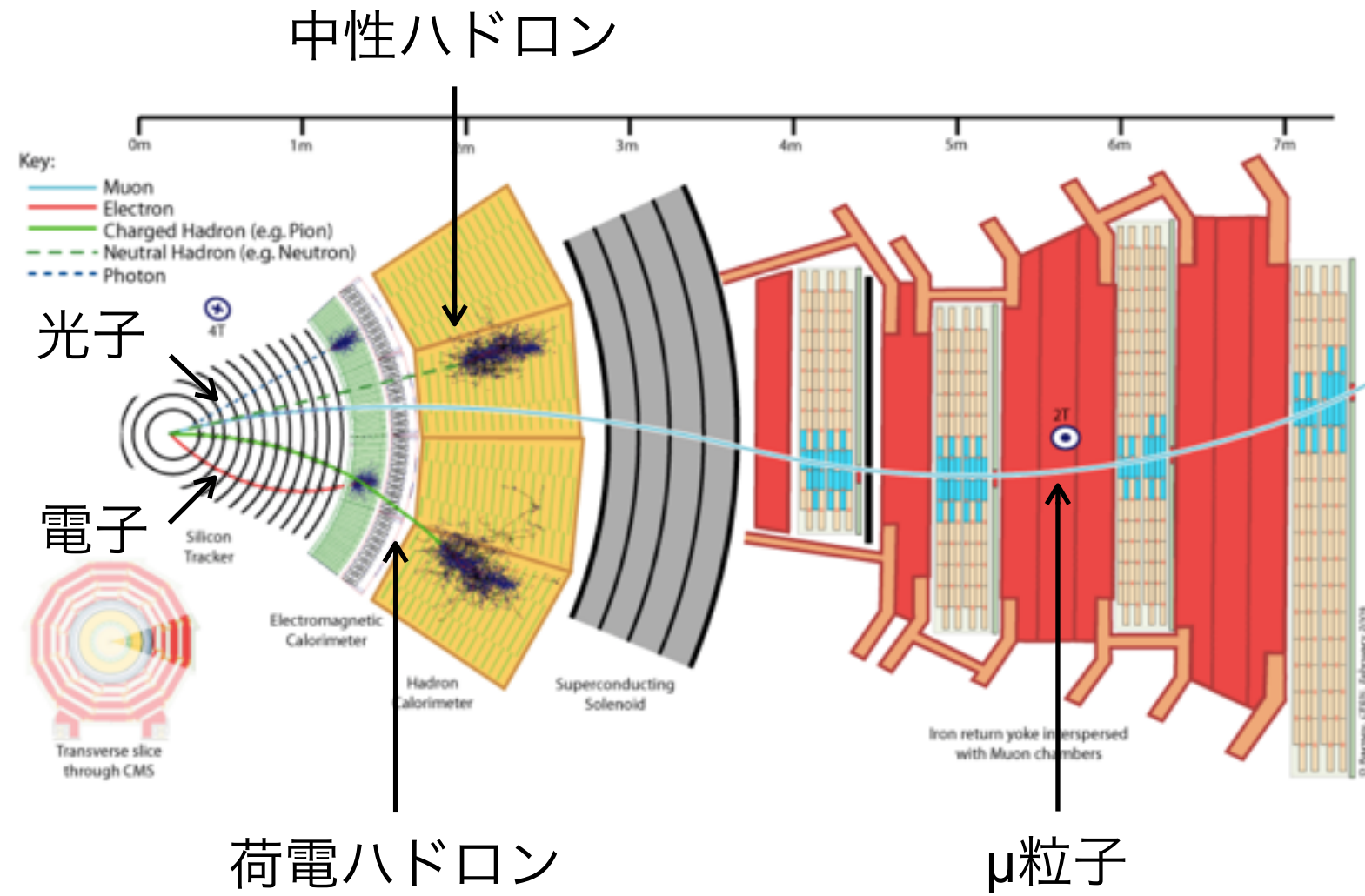
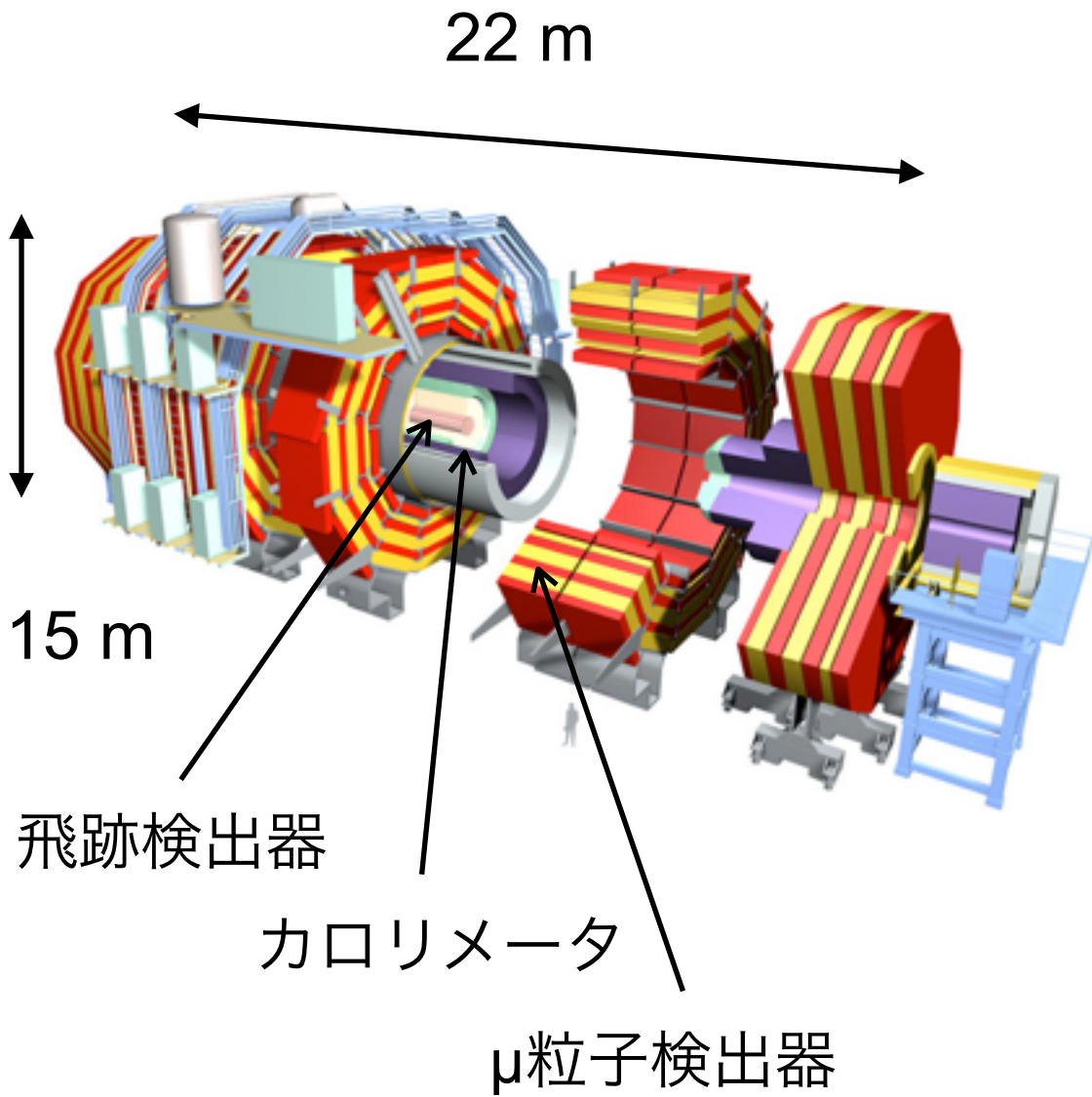
$|\eta| < 1$: バレル部

$|\eta| > 1$: エンドキャップ部



粒子識別、運動量・エネルギー測定が可能な多目的検出器。

CMS検出器の概要



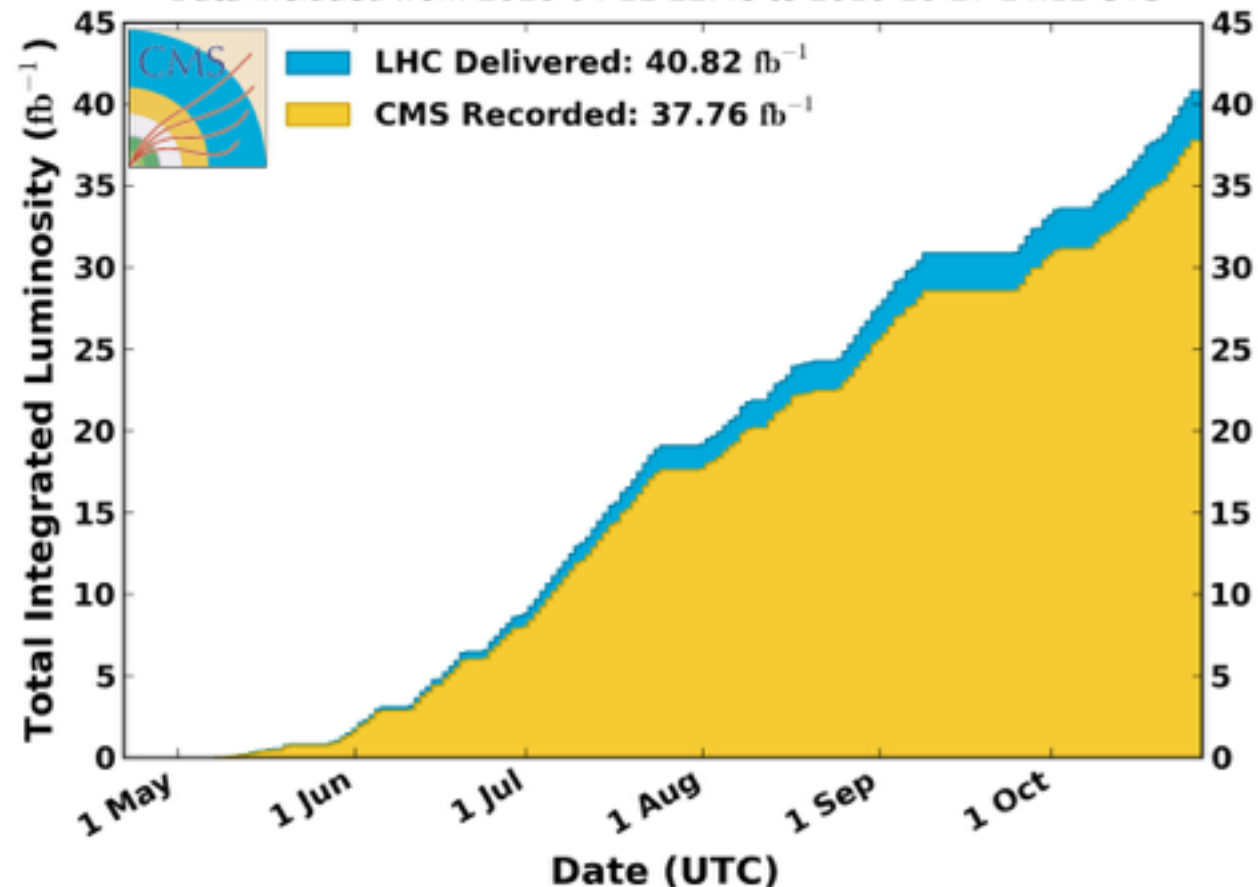
粒子識別、運動量・エネルギー測定が可能な多目的検出器。

ATLAS

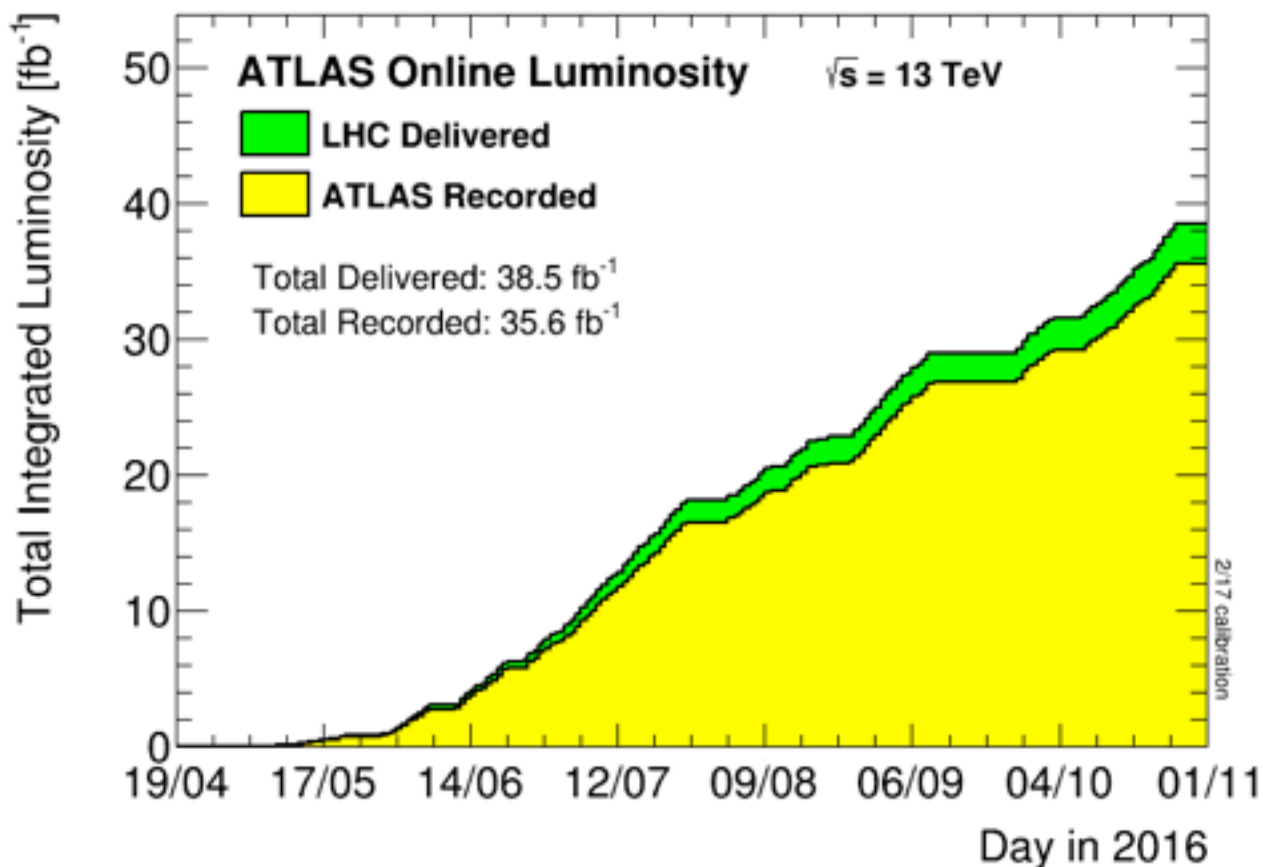
CMS

CMS Integrated Luminosity, pp, 2016, $\sqrt{s} = 13$ TeV

Data included from 2016-04-22 22:48 to 2016-10-27 14:12 UTC



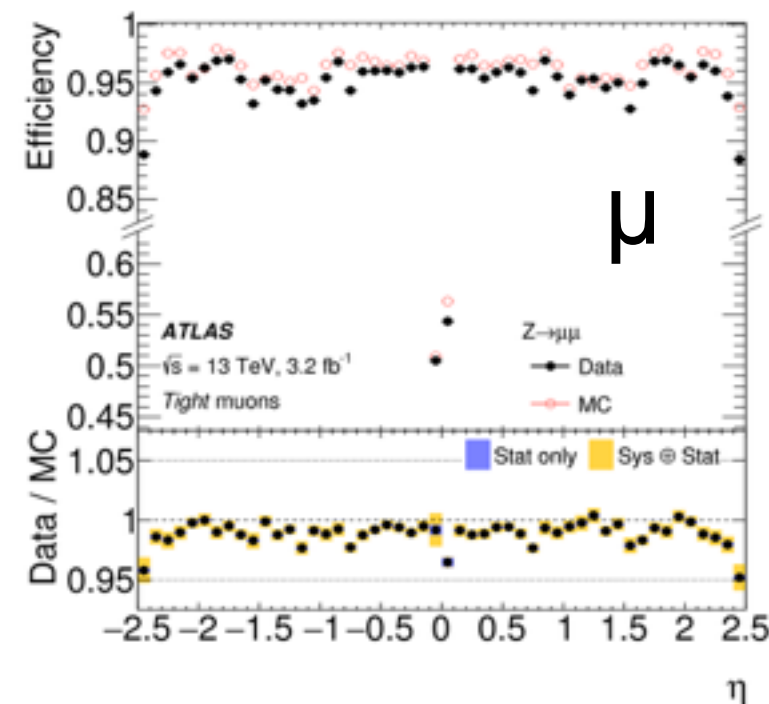
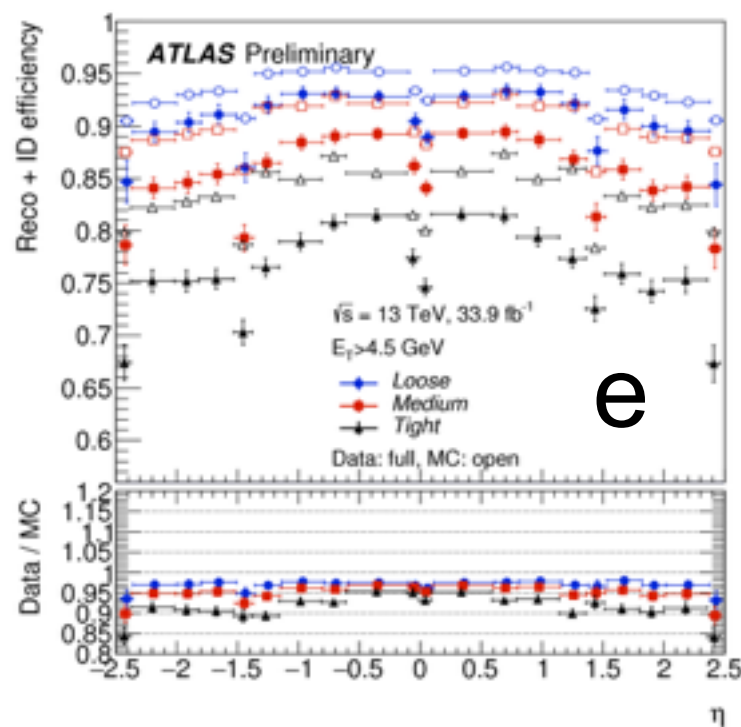
- Total Delivered: 40.82 fb⁻¹
- Total Recorded: 37.76 fb⁻¹ 92.5%



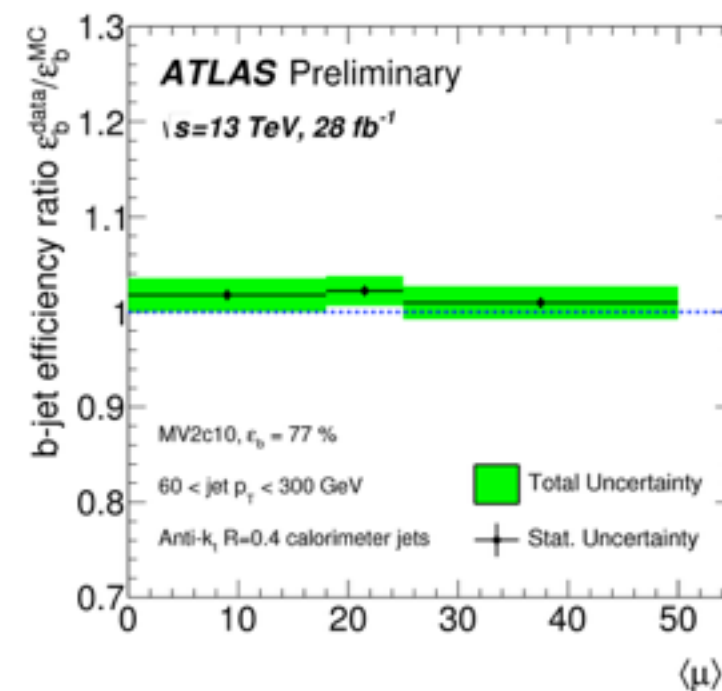
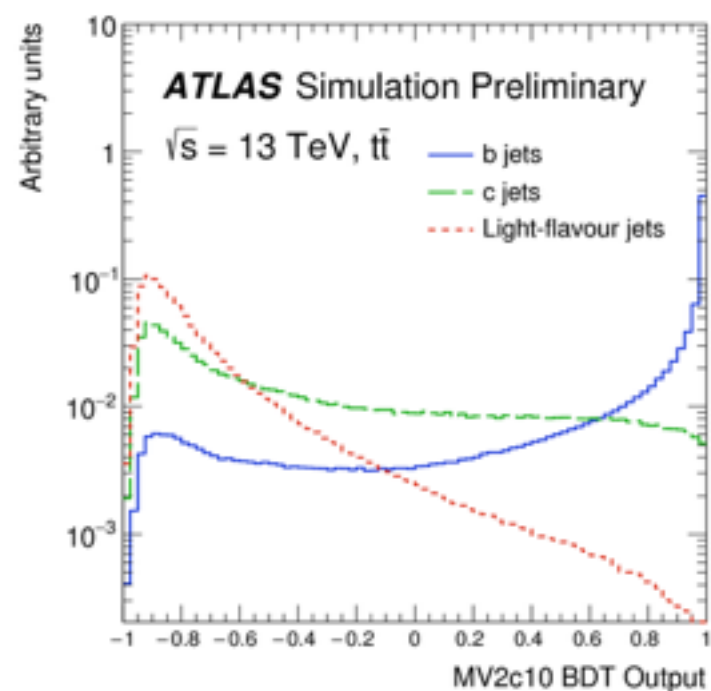
- Total Delivered: 38.5 fb⁻¹
- Total Recorded: 35.6 fb⁻¹ 92.5%

Run 2における検出器性能 (例)

レプトン



bジェット

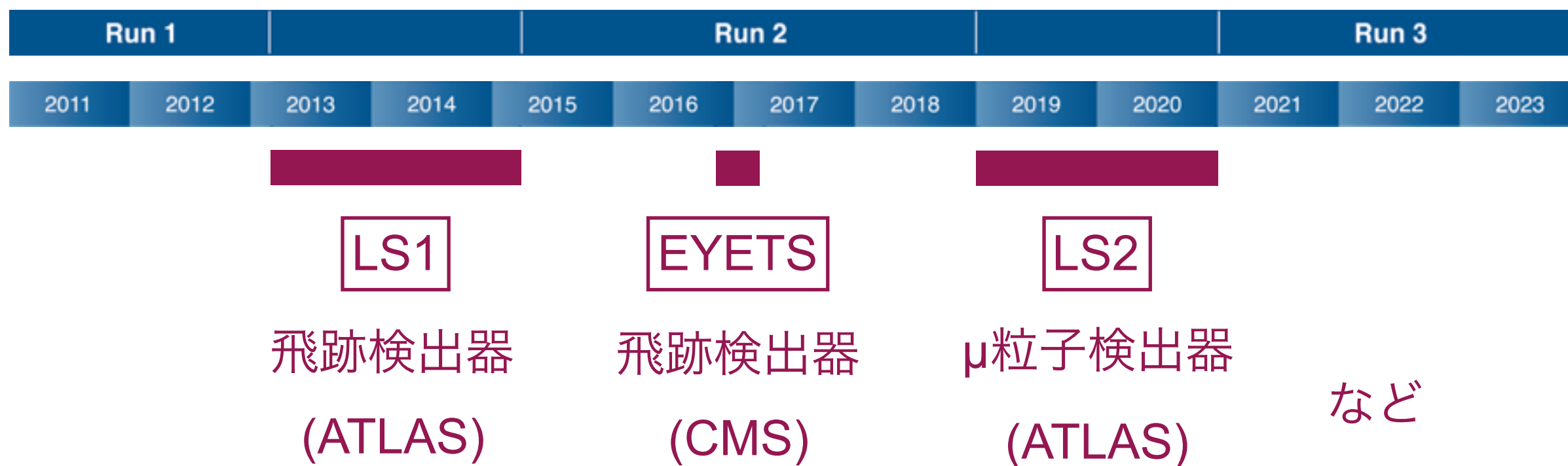


各オブジェクトに対し、高い性能を実現。

エネルギー・ルミノシティ増強により、実験環境がより過酷になる。

(放射線量の増加、検出器に到来する粒子レートの増加など。)

検出器をアップグレードし、エネルギー・ルミノシティ増強をフルに生かす。

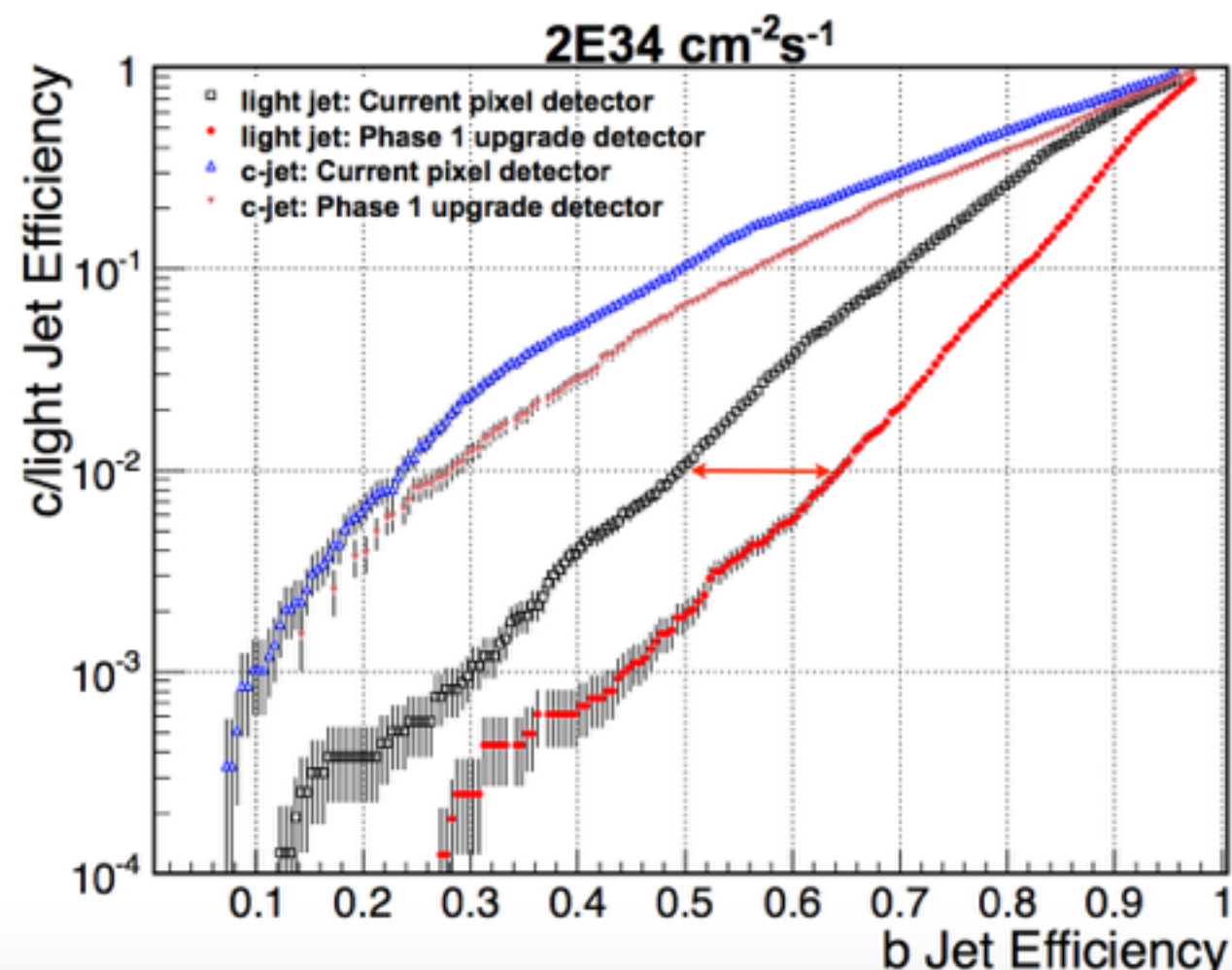
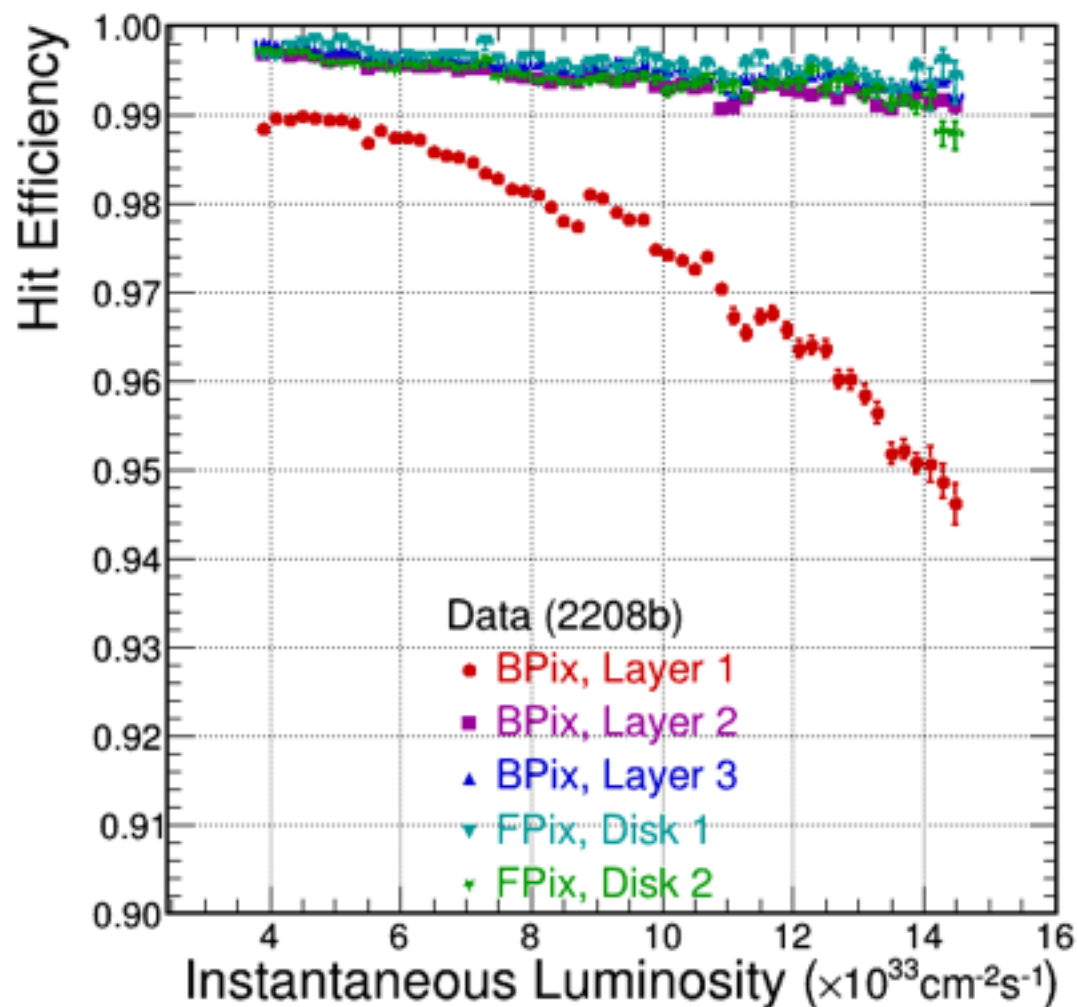


LS: Long Shutdown, EYETS: Extended Year End Technical Stop

EYETS (2016-2017), CMS 飛跡検出器改良, 動機 22/40

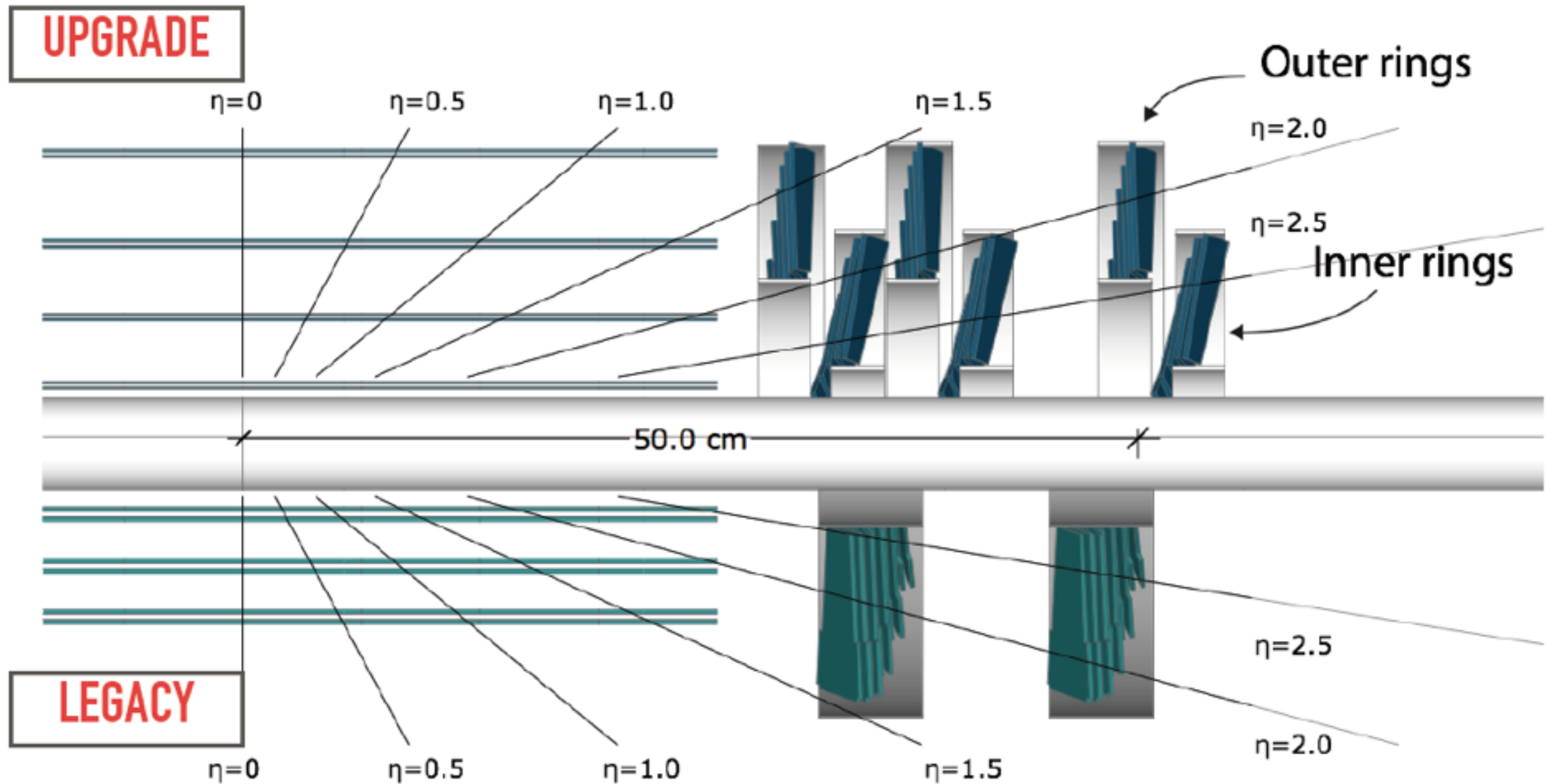
ルミノシティ増強により、
現行の読み出し集積回路では
検出効率のロスが生じる。

ピクセル検出器を交換し、
層の数を増やすことで、
bジェット選別を向上できる。



EYETS (2016-2017), CMS 飛跡検出器改良, 方針 23/40

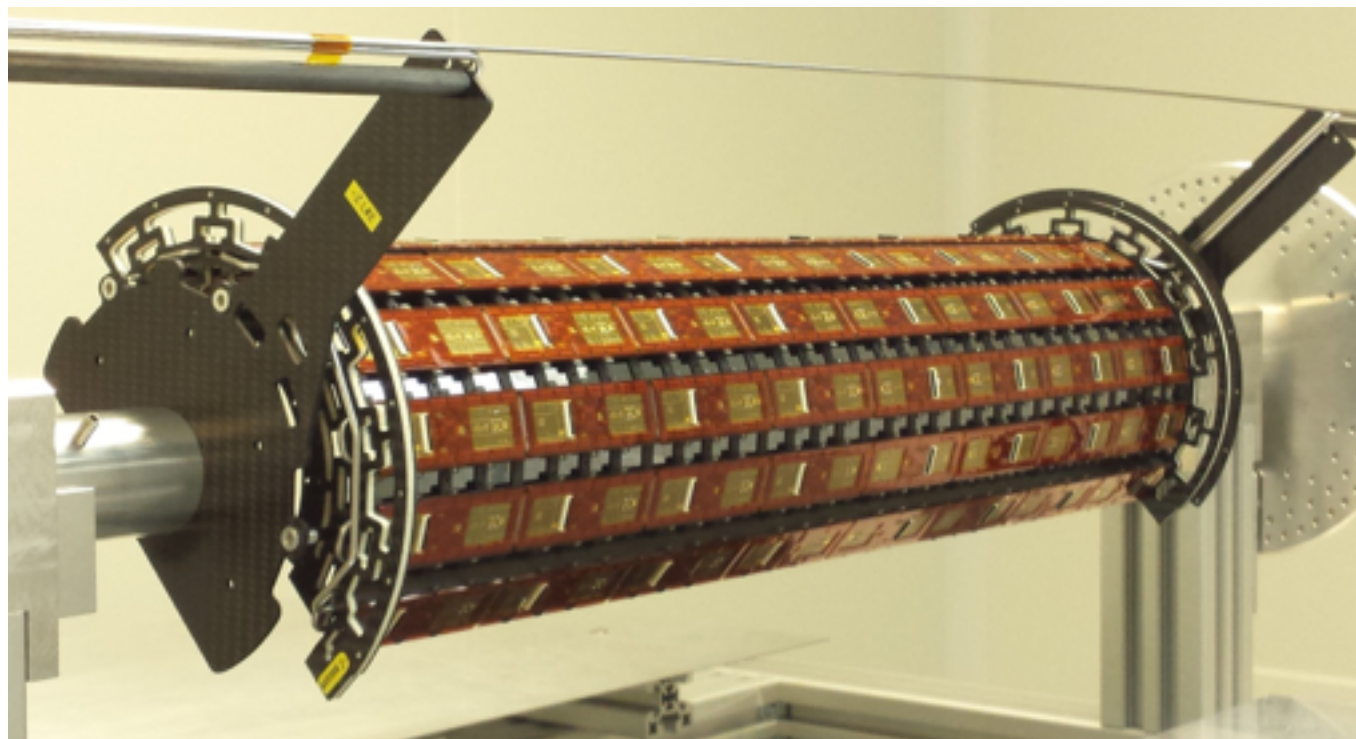
CMSでは、ピクセル検出器置き換えを行う。2-2.5 x 10³⁴ cm⁻²s⁻¹まで許容。



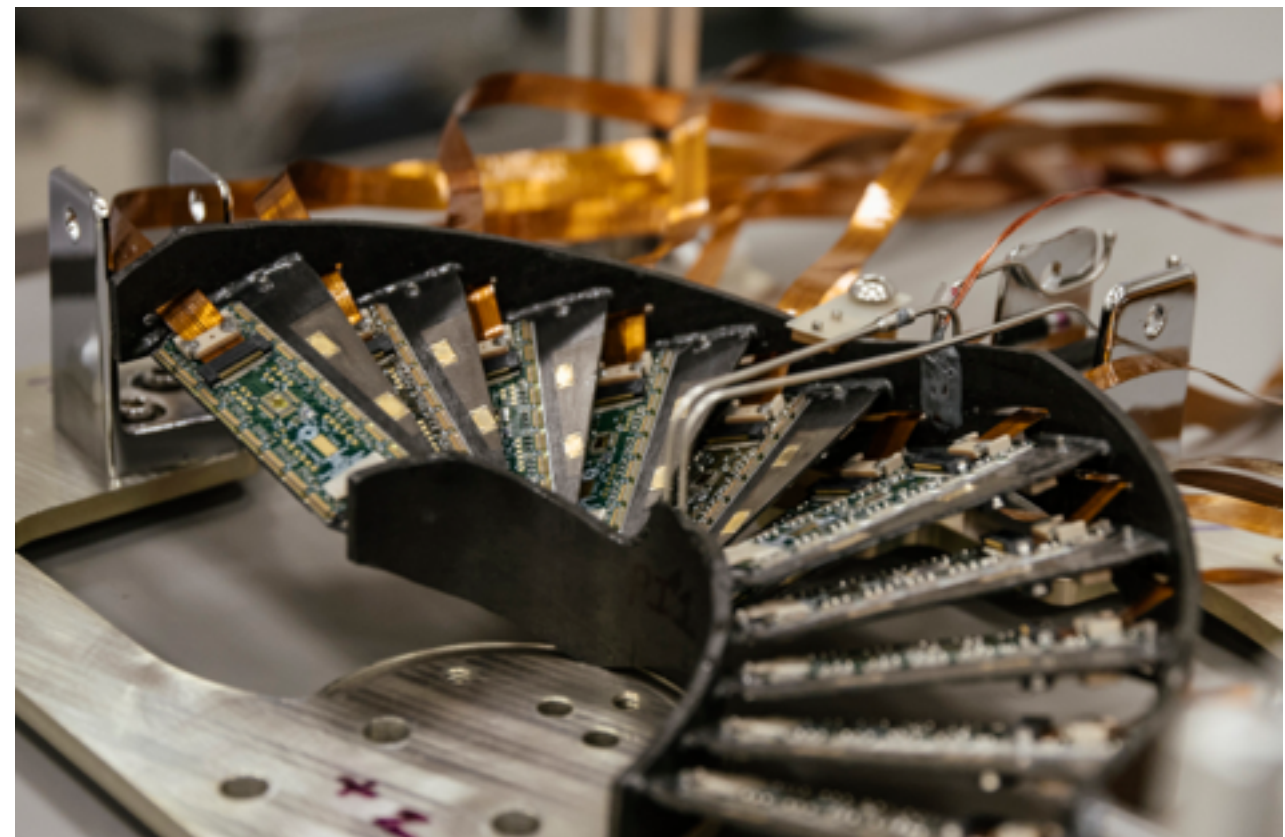
EYETS (2016-2017), CMS 飛跡検出器改良, 現状 24/40

合計1856モジュールが、構造体に設置された。 > 99 %が正常動作。

バレル部



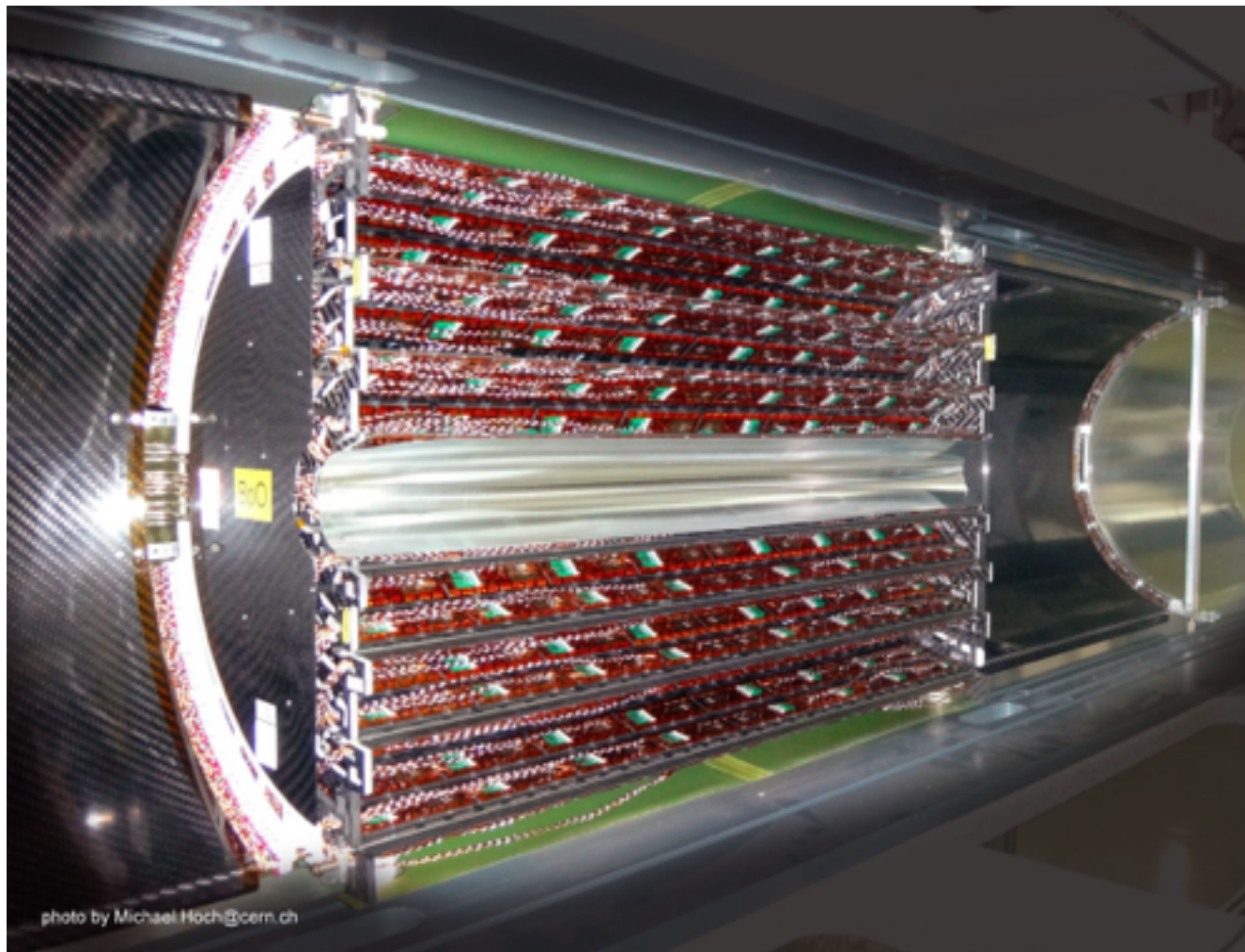
エンドキャップ部



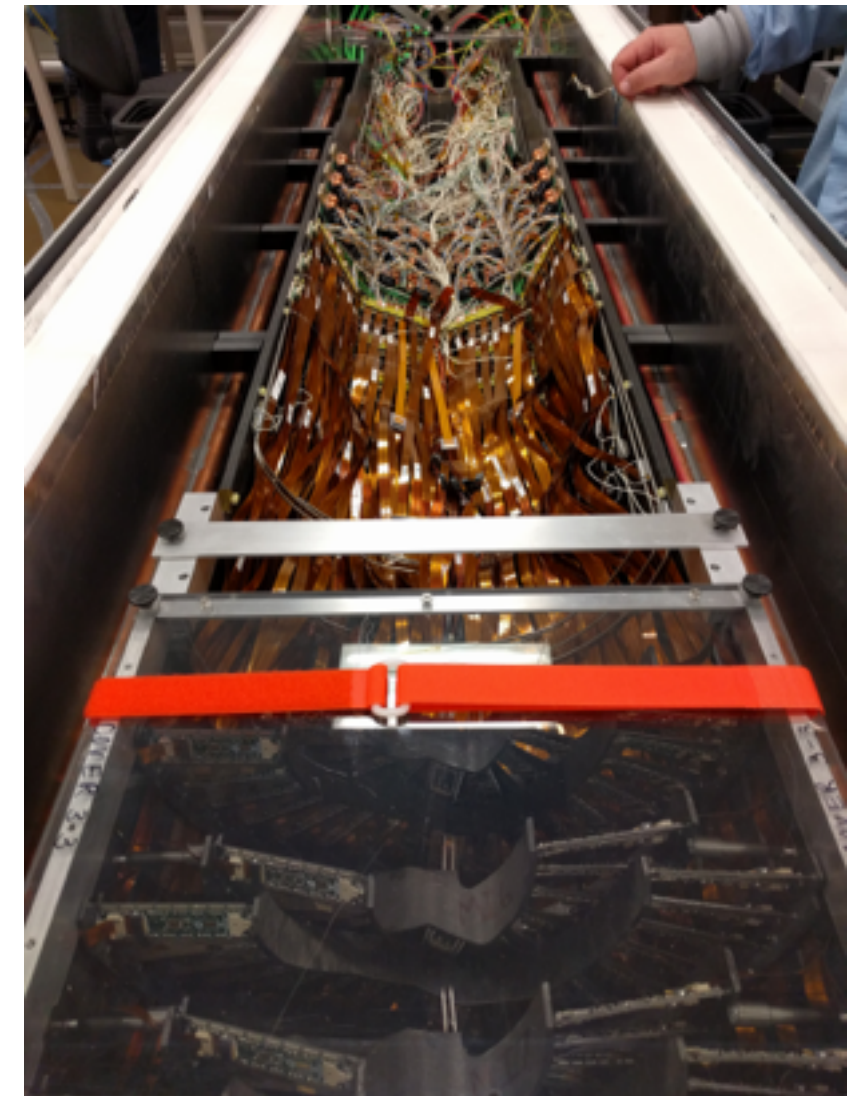
EYETS (2016-2017), CMS 飛跡検出器改良, 現状 25/40

読み出し回路や電源供給ケーブルなどを含め、組み立てが完了。

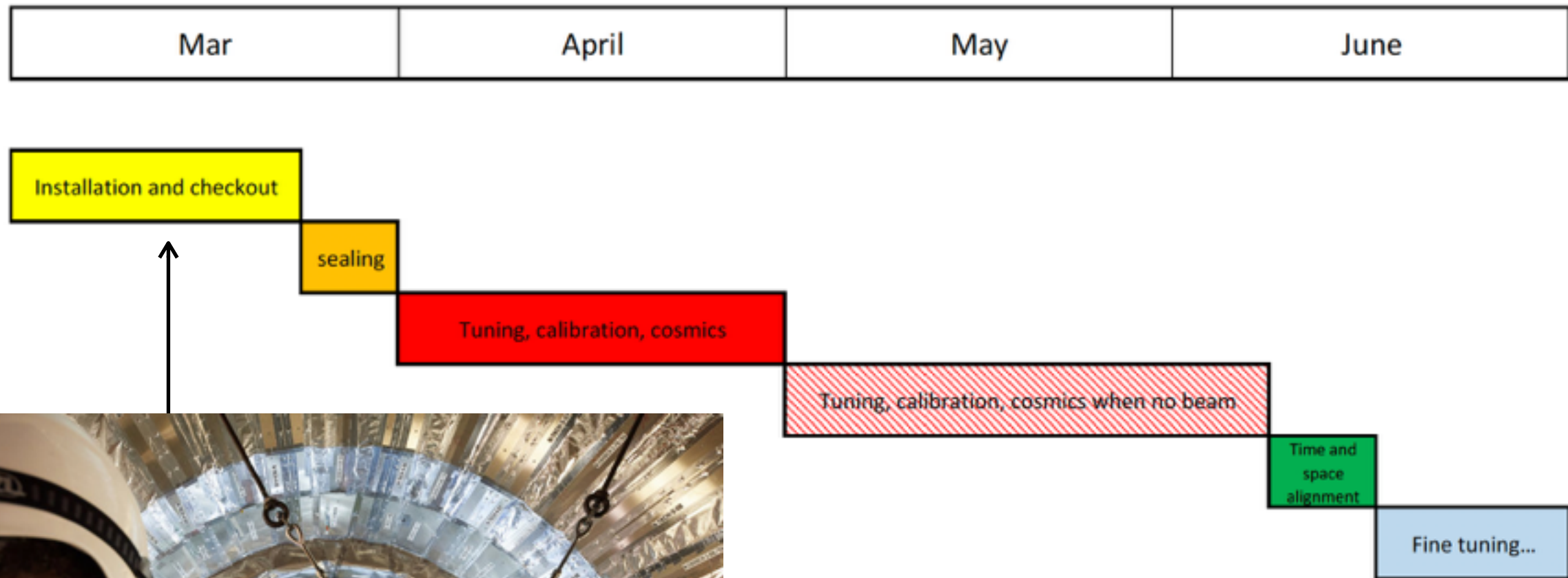
バレル部



エンドキャップ部



EYETS (2016-2017), CMS 飛跡検出器改良, 予定 26/40



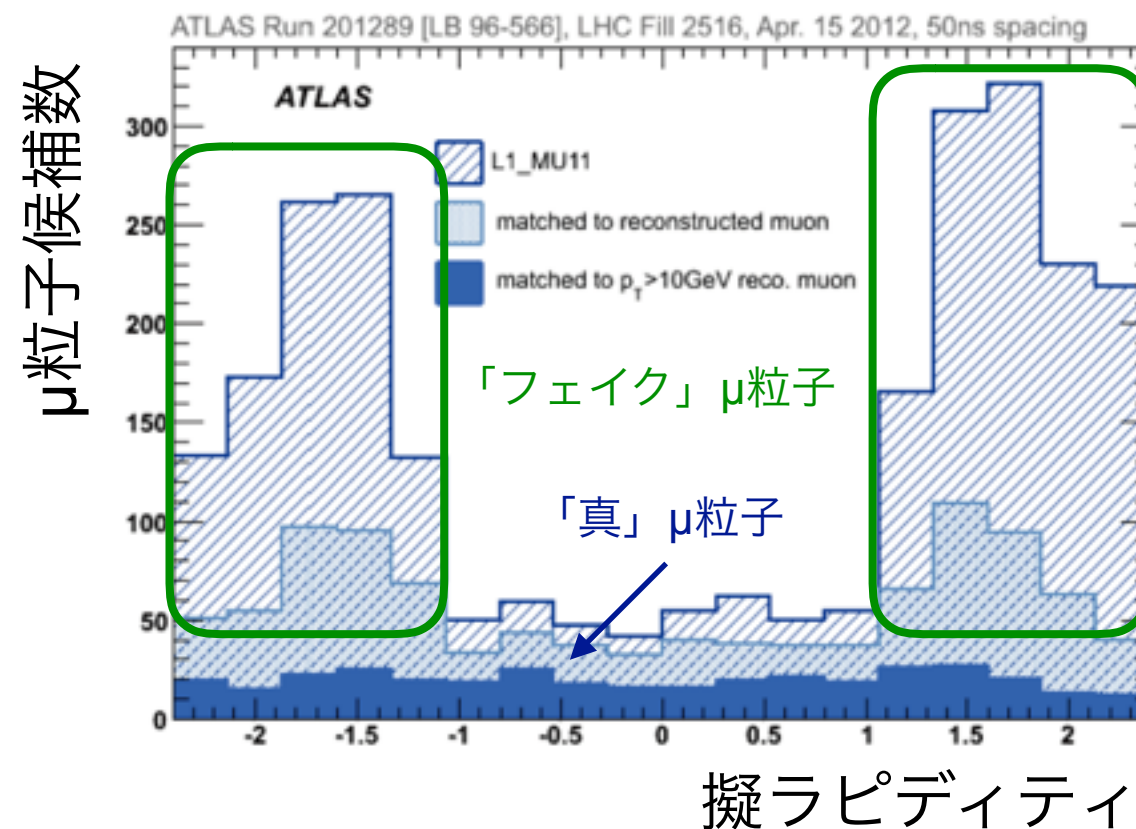
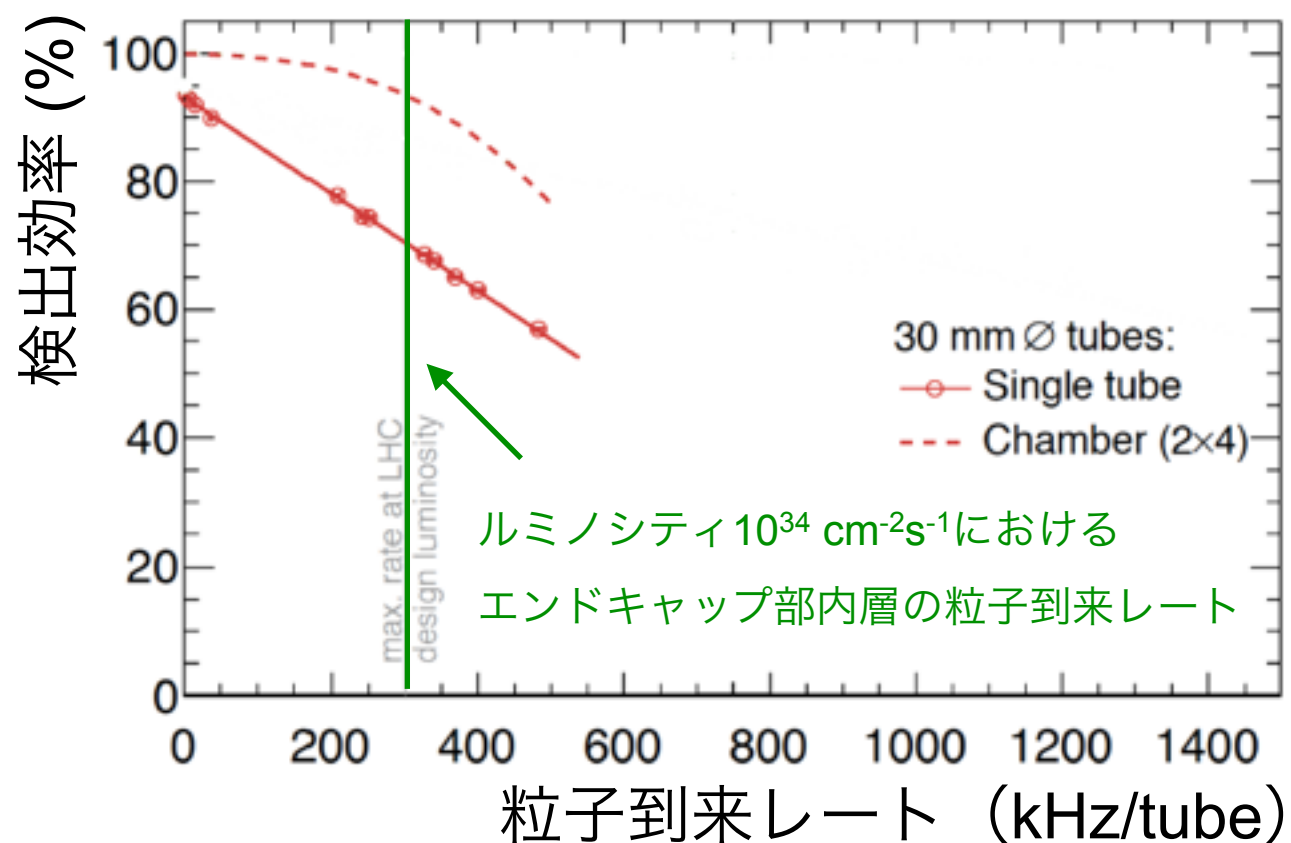
Delicate surgery: The new Pixel Tracker being installed at the heart of the CMS detector. (Photo: Max Brice/CERN)

2月後半から3月前半にかけて、
新ピクセル検出器のインストールが行われた。

今後、試運転などを行う予定。

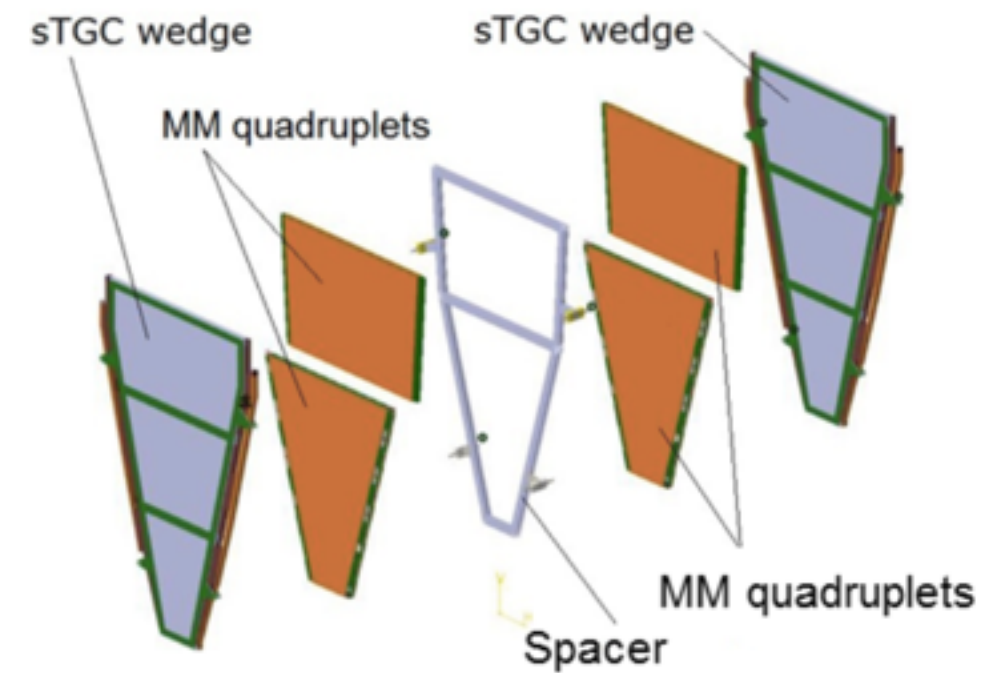
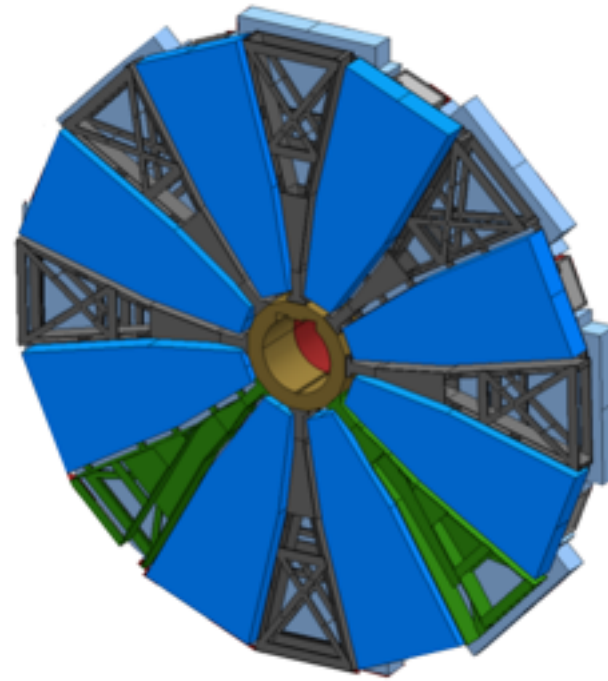
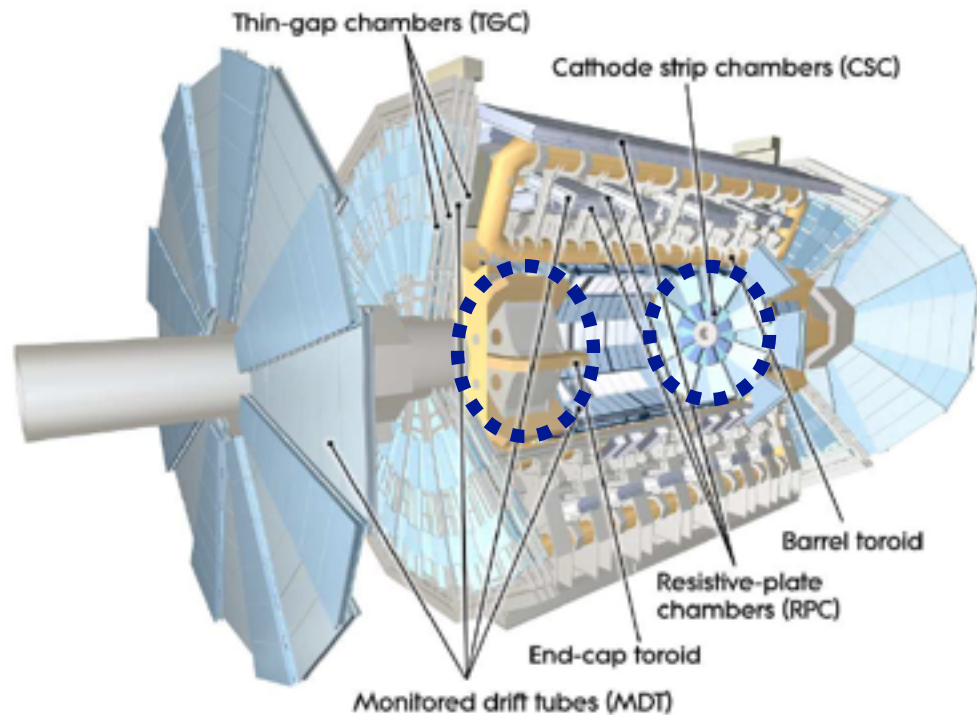
LS2 (2019-2020), ATLAS μ 粒子検出器改良, 動機 27/40

- 現行のドリフトチューブ型 μ 粒子検出器を用いる場合、粒子到来レートがチューブあたり ~ 300 kHzを超えると、**重大な検出効率ロス**が生じてしまう。
- また、陽子衝突点に由来しない粒子による「**フェイク**」トリガーが存在する。



LS2 (2019-2020), ATLAS μ 粒子検出器改良, 方針 28/40

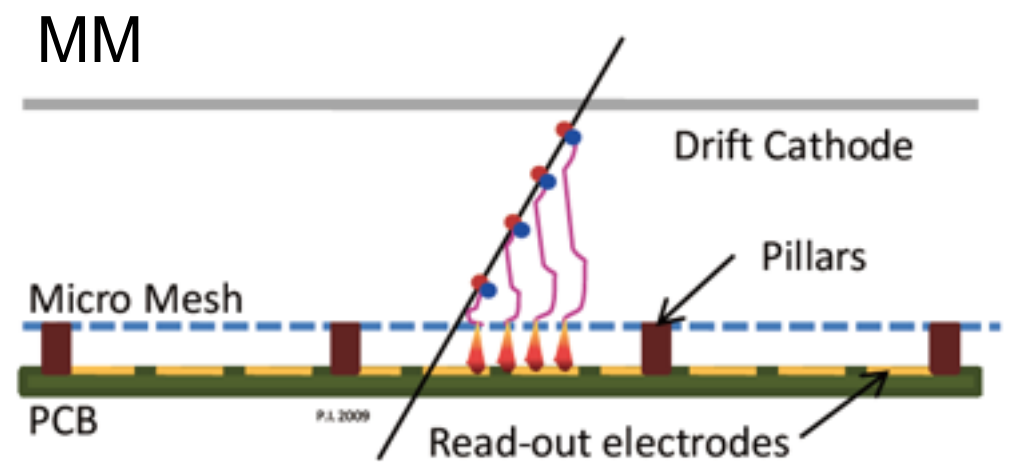
エンドキャップ部内層の μ 粒子検出器を、新しい検出器に交換。



Micro-mesh gaseous detector (MM)および
Small-strip thin gap chamber (sTGC)を利用。

ルミノシティ $7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に耐えられる **レート耐性**。

直線飛跡 ($\sim 1 \text{ mrad}$ 精度) で **「フェイク」トリガー半減**。





LHC高輝度化, ATLAS/CMS検出器改良

High-Luminosity LHC (HL-LHC)

30/40

開始年：2026年

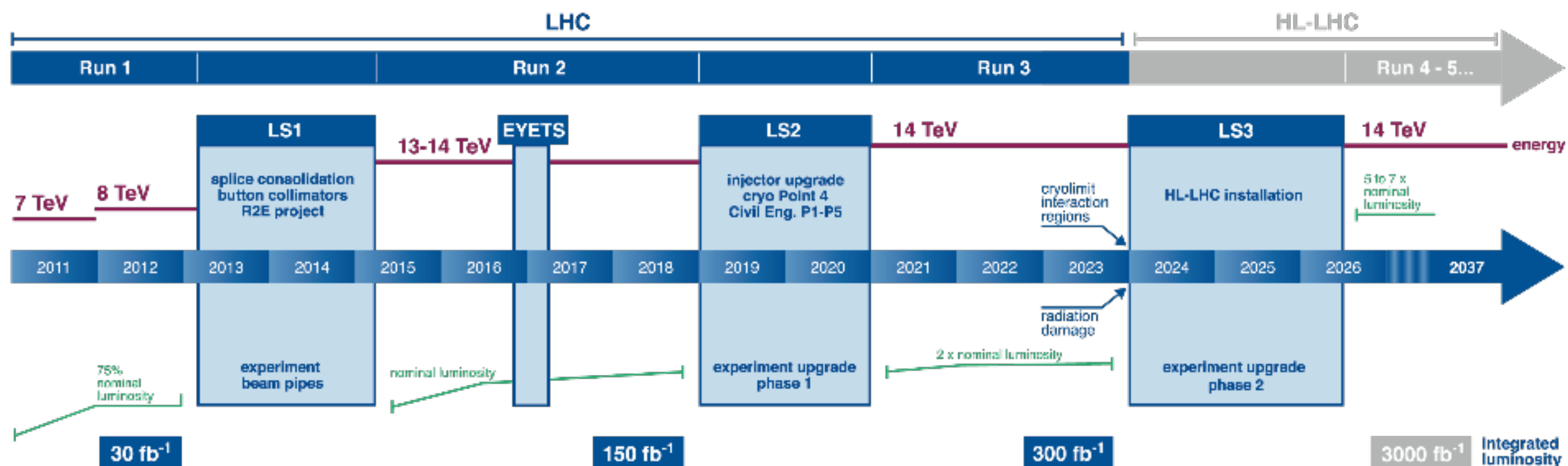
重心系エネルギー：14 TeV

瞬間ルミノシティ： $5-7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

積分ルミノシティ： 3000 fb^{-1} (10年運転)



2016年6月に
CERN Councilで公式承認



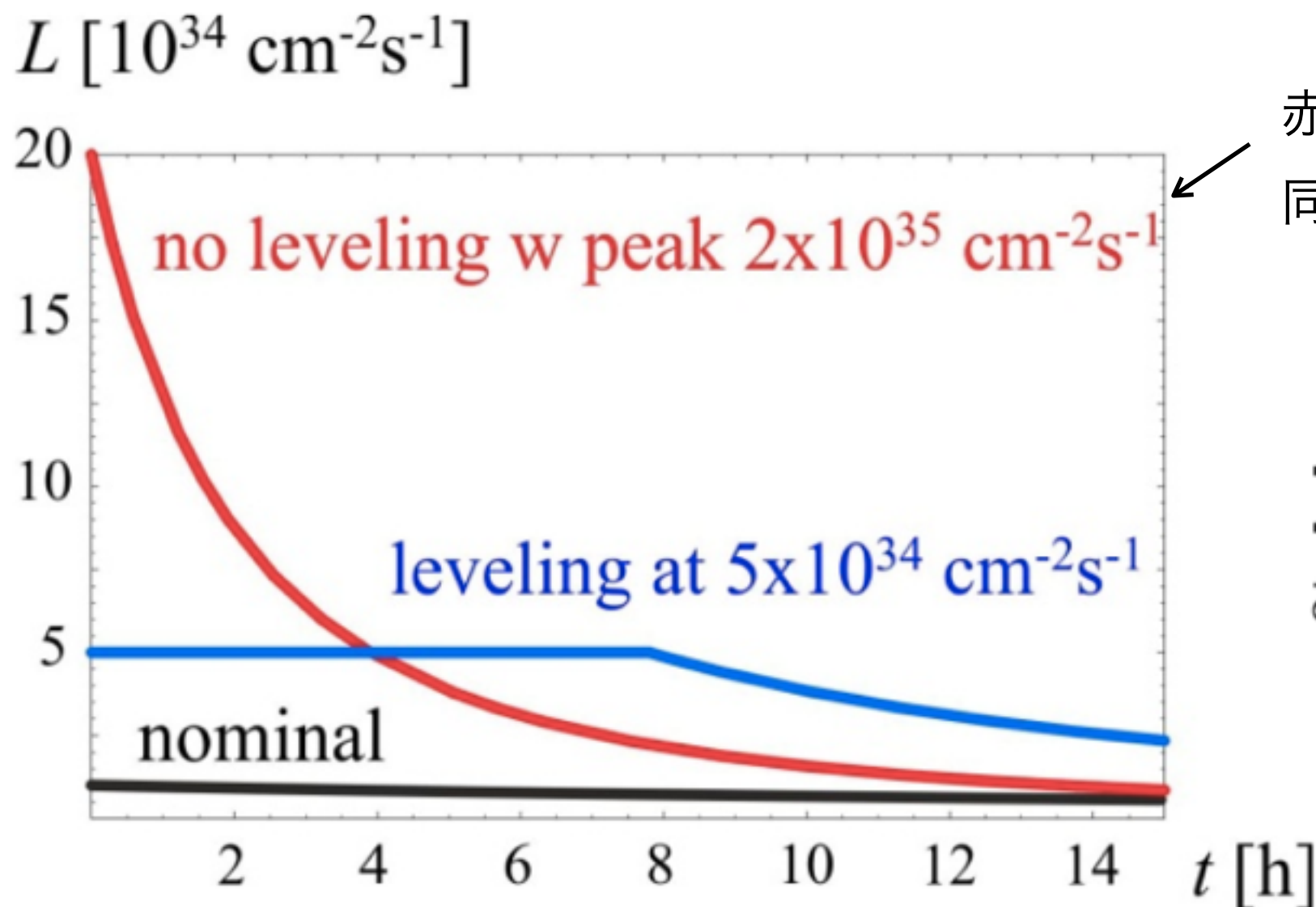
HL-LHCパラメータ

31/40

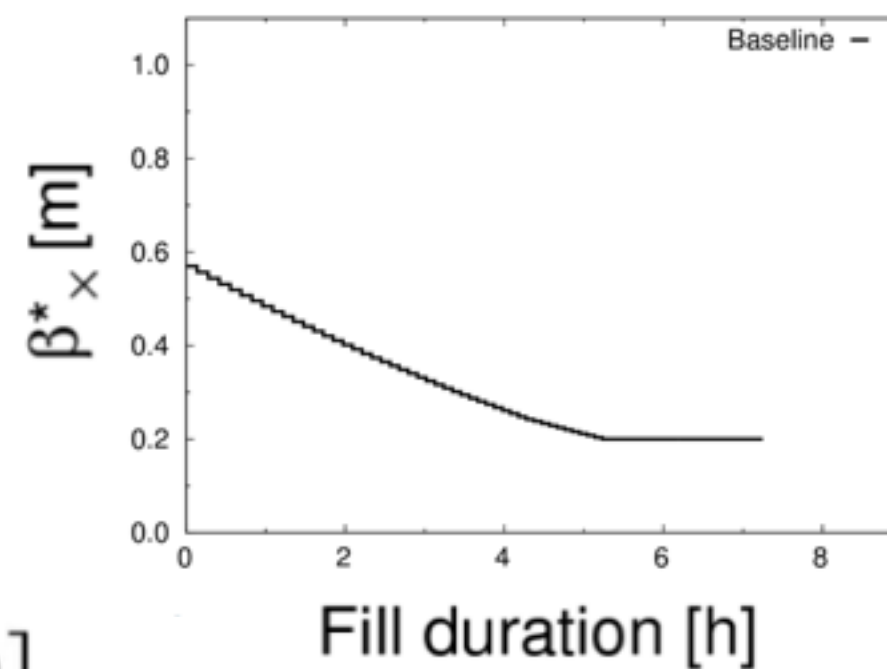
Parameter	Nominal	HL-LHC updated
Bunch population N_b [10^{11}]	1.15	2.2
Number of bunches	2808	2748
Beam current [A]	0.58	1.12
Stored Beam Energy [MJ]	362	677
Full crossing angle [μrad]	285	510
Beam separation [σ]	9.4	12.5
Min β^* [m]	0.55	0.2
Normalized emittance ε_n [μm]	3.75	2.5
r.m.s. bunch length [m]	0.075	0.081
Peak Luminosity (w/o CC) [$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	1.2 (1.2)	12.6 (6.5)
Max. Luminosity [$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	1	5.3
Levelled Pile-up Pile-up density [evt. evt./mm]	26/0.2	140/1.3

バンチあたりの陽子数 (x2)、 β^* (x3)、エミッタンス (x1.5) などの変更により高輝度化。
交差角度が大きくなるが、クラブ衝突 (“CC”) により影響を抑制。

Luminosity Leveling



赤と青のルミノシティ遷移が
同程度の積分ルミノシティを提供

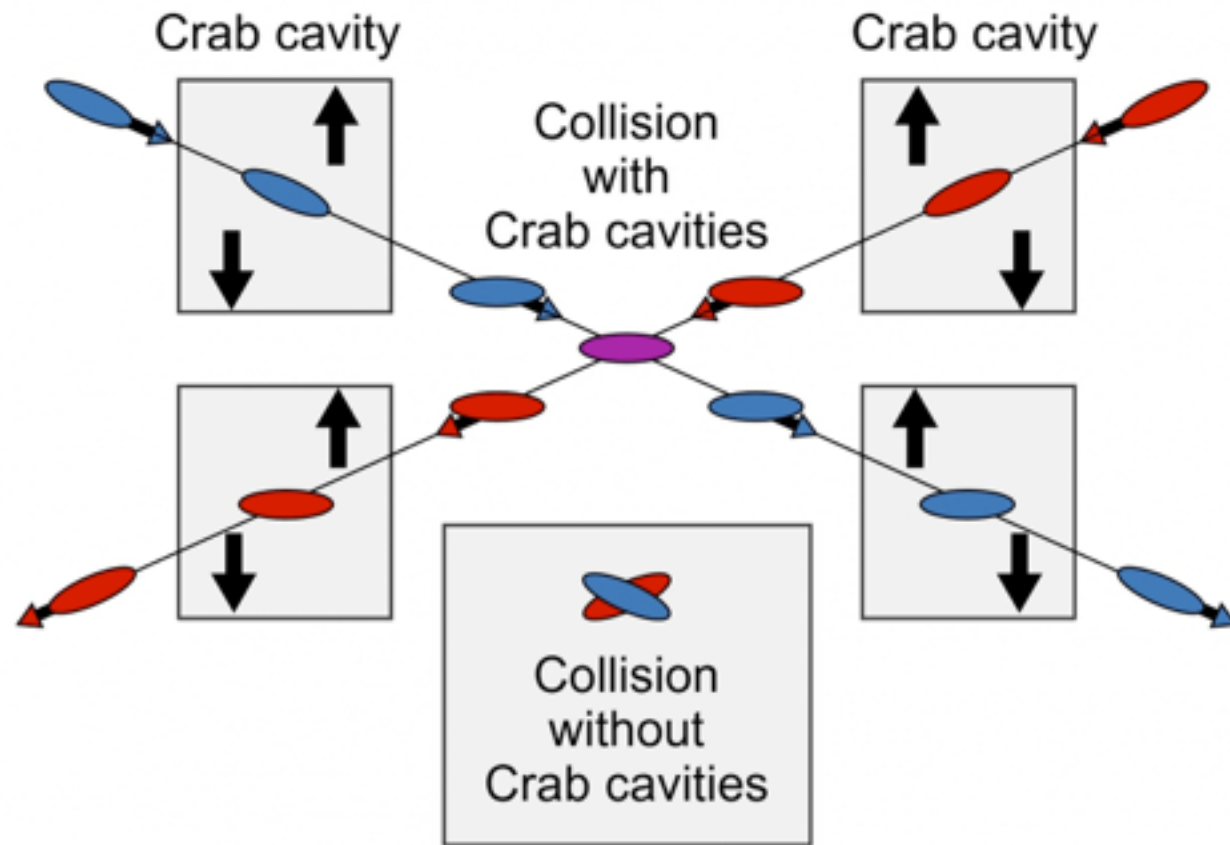


ATLAS, CMS衝突点において、HL-LHCではLuminosity Levelingを導入。

陽子交差 1 回あたりの相互作用数を抑えつつ、積分ルミノシティを稼ぐ。

クラブ衝突・クラブ空洞

33/40



CERN初のクラブ空洞完成 (2016年)

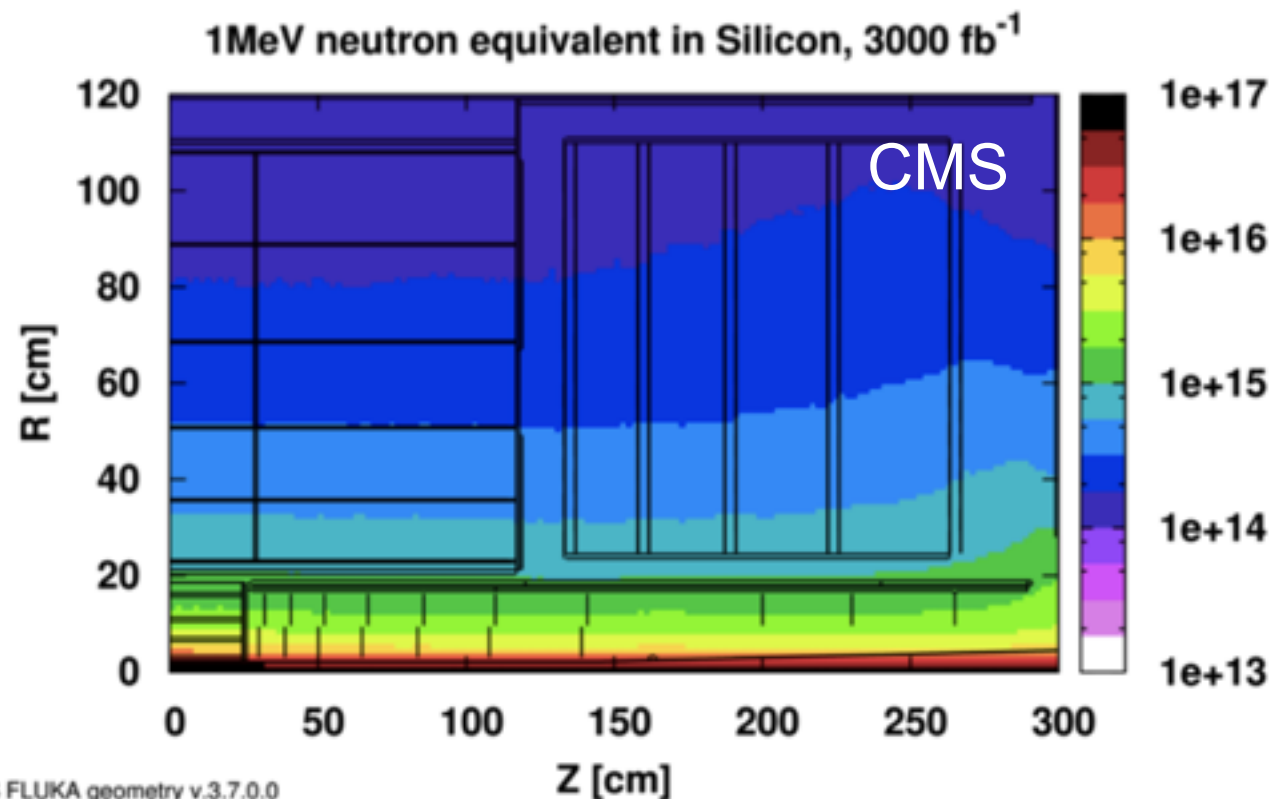
ビーム軸に垂直な方向の電位差5 MVを達成 (要求される電位差3.4 MV)。

2017年中にSPSに実装予定。その後、陽子ビームを用いた試験を行う。

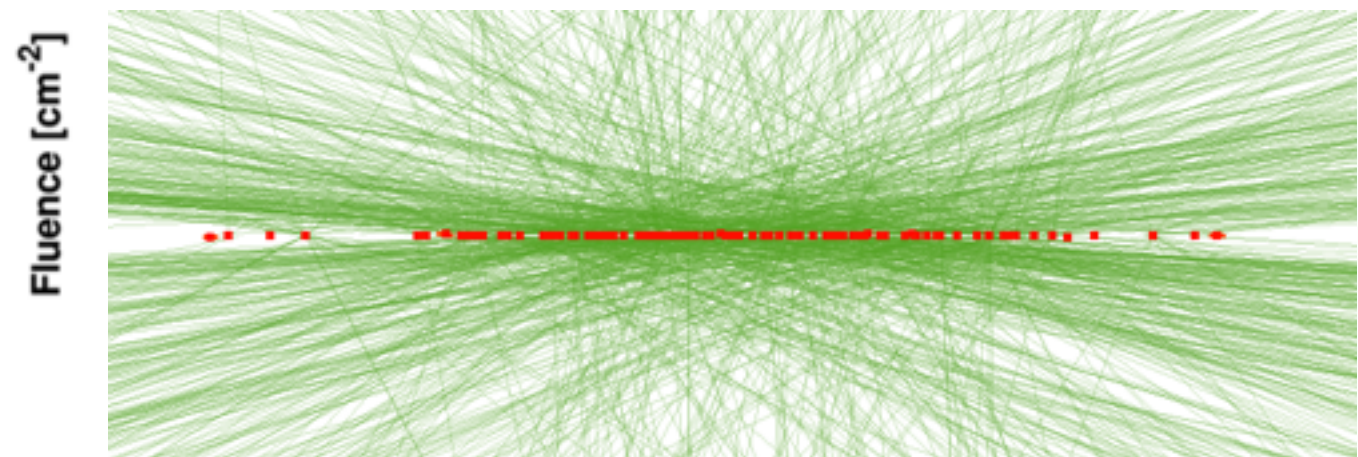
高輝度化の準備を、着々と進めている。

HL-LHCにおいて、飛跡検出器は非常に厳しい環境下に置かれる。

- 1 MeV中性子相当の粒子レート：最大 $2 \times 10^{16} / \text{cm}^2$ 程
- 吸収線量：最大 10 MGy 程
- 到来粒子レート：最大 2 GHz/cm² 程



$L = 5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ におけるパイルアップ: 140

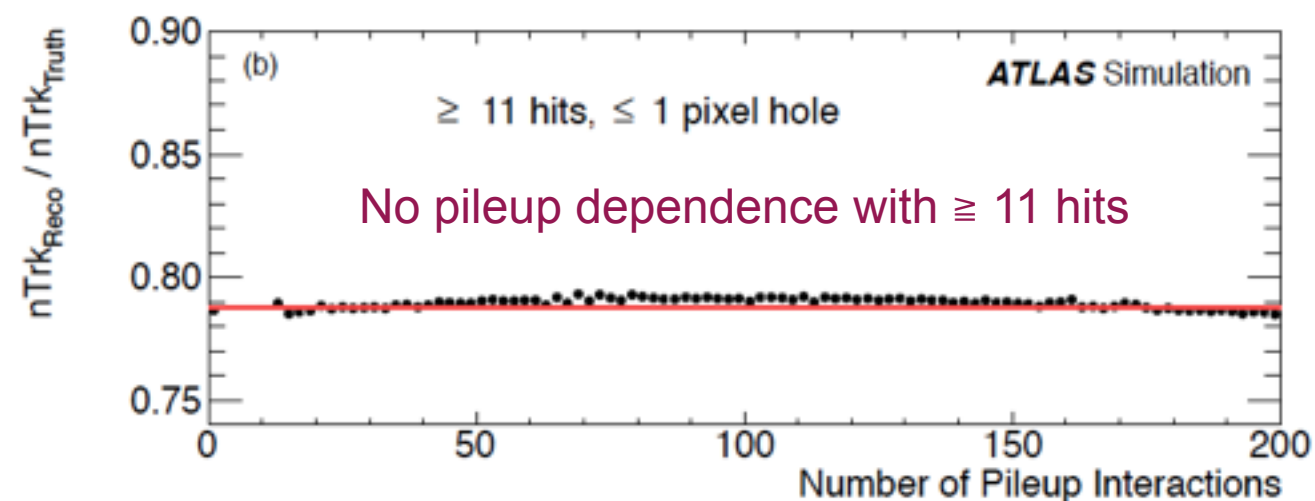
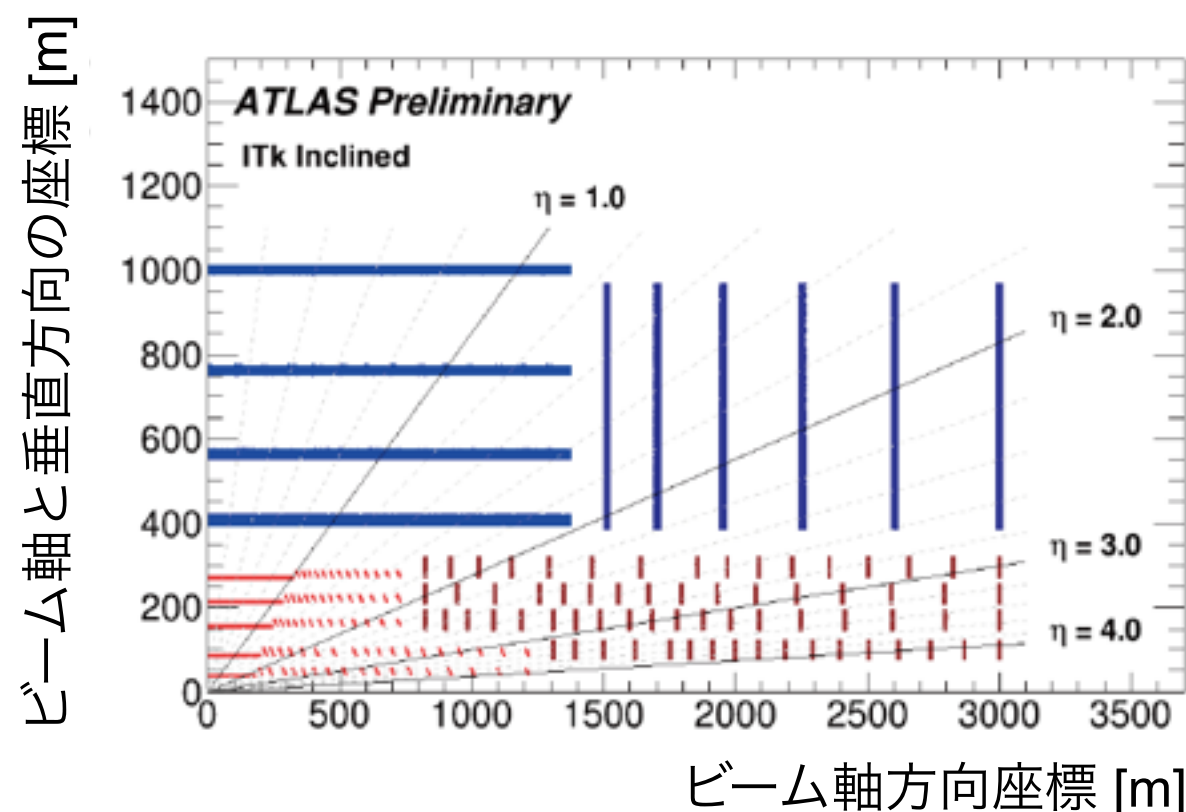


ATLAS/CMS 飛跡検出器改良 方針

35/40

ATLAS, CMS共に、すべての飛跡検出器を置き換える予定。

- すべてシリコン検出器で構成。
 - 外層：ストリップ型
 - 内層：ピクセル型
- 細分化（ピクセル $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ など）により、飛跡の分離性能を向上。
- 層数を十分に確保し、パイルアップ依存を抑制。



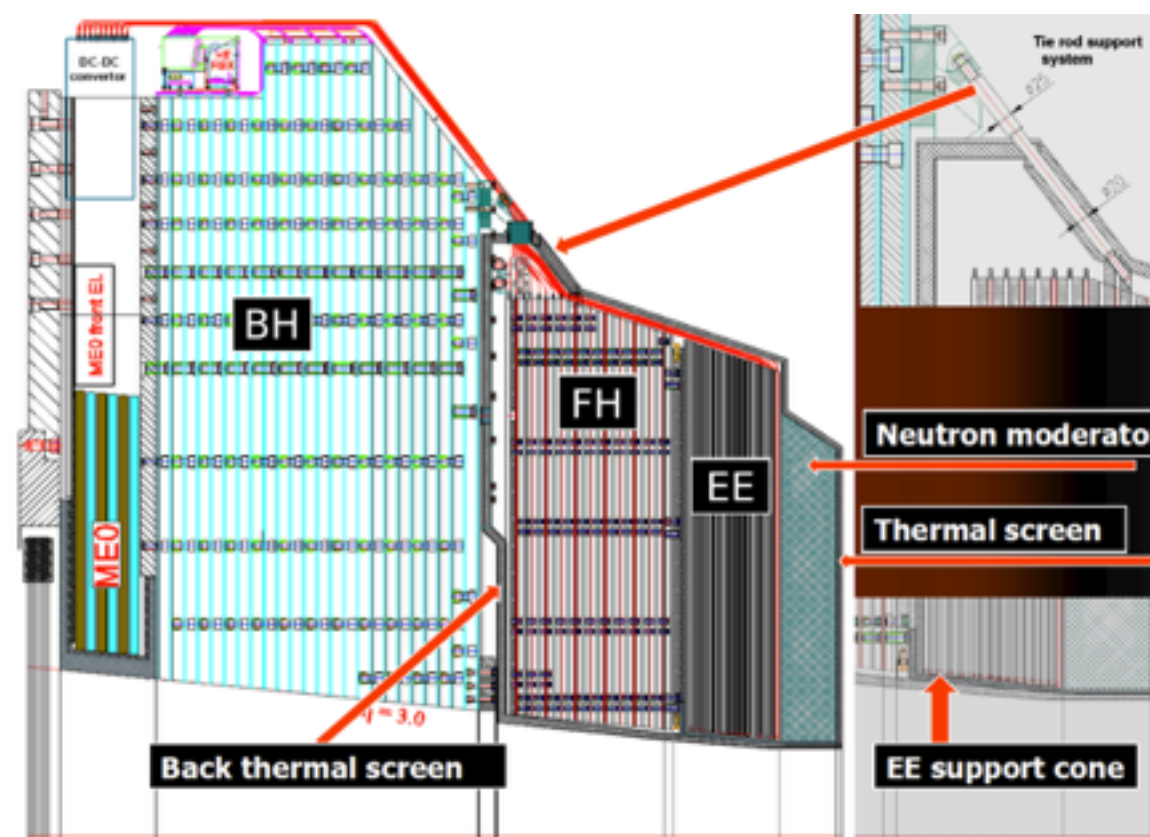
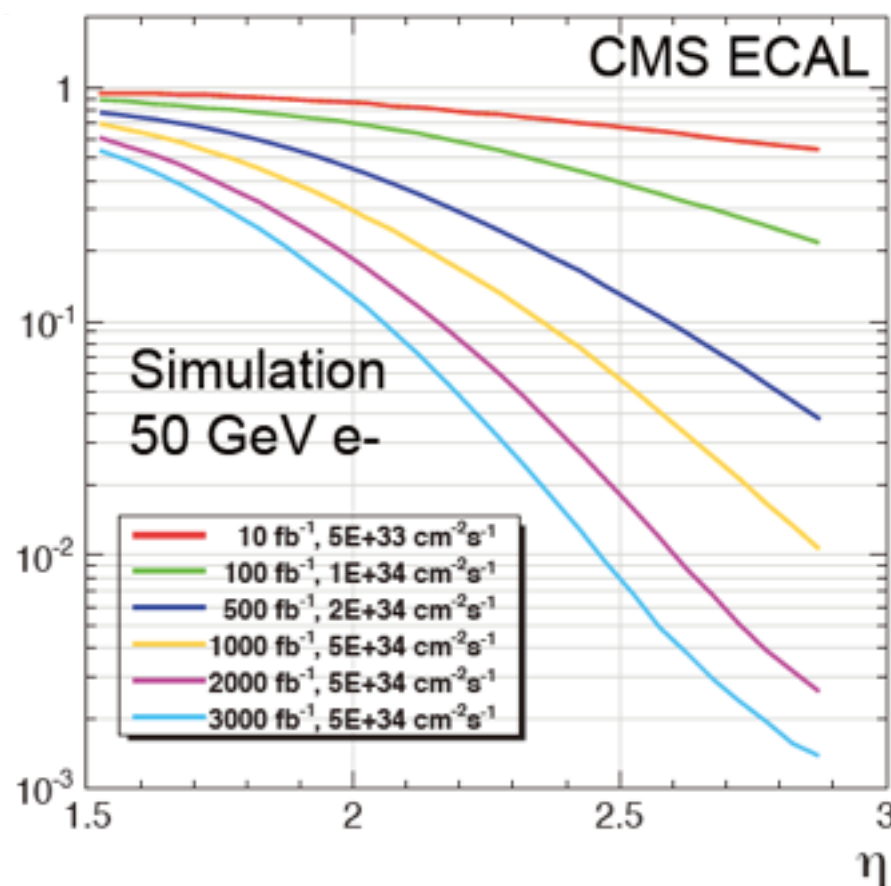
CMS カロリメータ改良

CMSでは、エンドキャップ部カロリメータを置き換える予定。

予想されるハドロン到来レートは、
例えば $|\eta| = 2.6$ において、 $2 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ 程。
電磁・ハドロンカロリメータ性能が劣化。

細分化されたタングステン・シリコン
の電磁カロリメータ、黄銅を用いた
ハドロンカロリメータに置き換える。

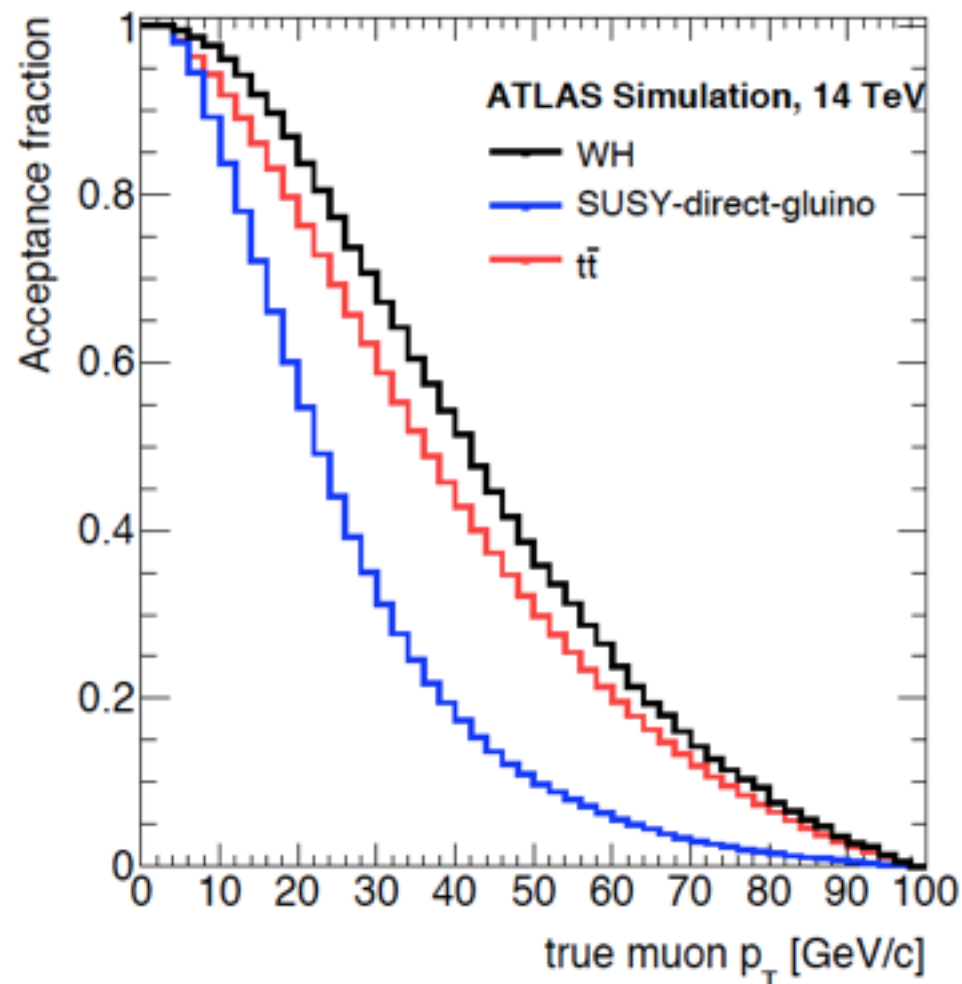
PbWO₄シンチレータの透過率の比



HL-LHCでは、興味のある事象だけでなく、興味のない事象の発生頻度も増加。

トリガー・読み出し系の交換なしに、有意義なデータ取得は行えない。

ATLAS, CMS共に、トリガー・読み出し系を刷新し、現行と同程度の横運動量閾値を実現。



トリガーレートを増強する。

- 初段: ~ 100 kHz \rightarrow 750–1000 kHz
- 最終段: ~ 1 kHz \rightarrow 5–10 kHz

トリガー判定にかける時間を長くし、
トリガー判定の質（分解能）を向上する。

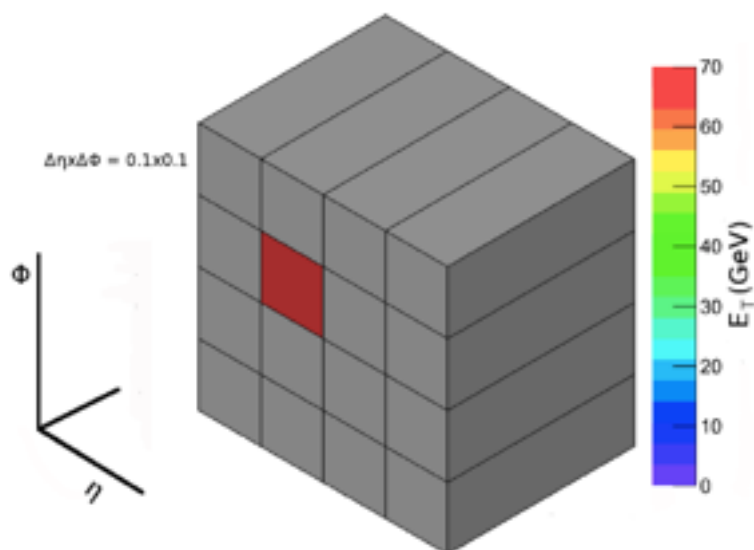
初段判定時間: ~ 3 μ s \rightarrow 6–12.5 μ s

ATLASトリガー改良

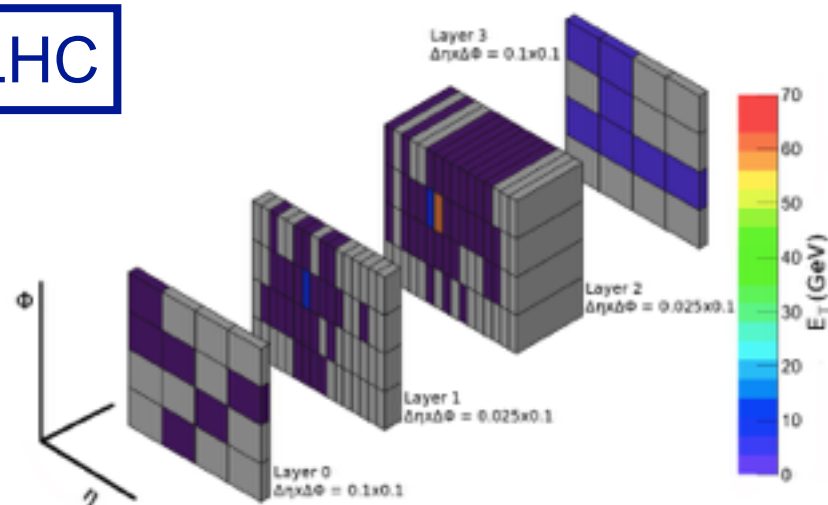
ATLASカロリメータトリガー改良

細分化した情報を初段トリガーで用いる。パイルアップ耐性向上。

LHC

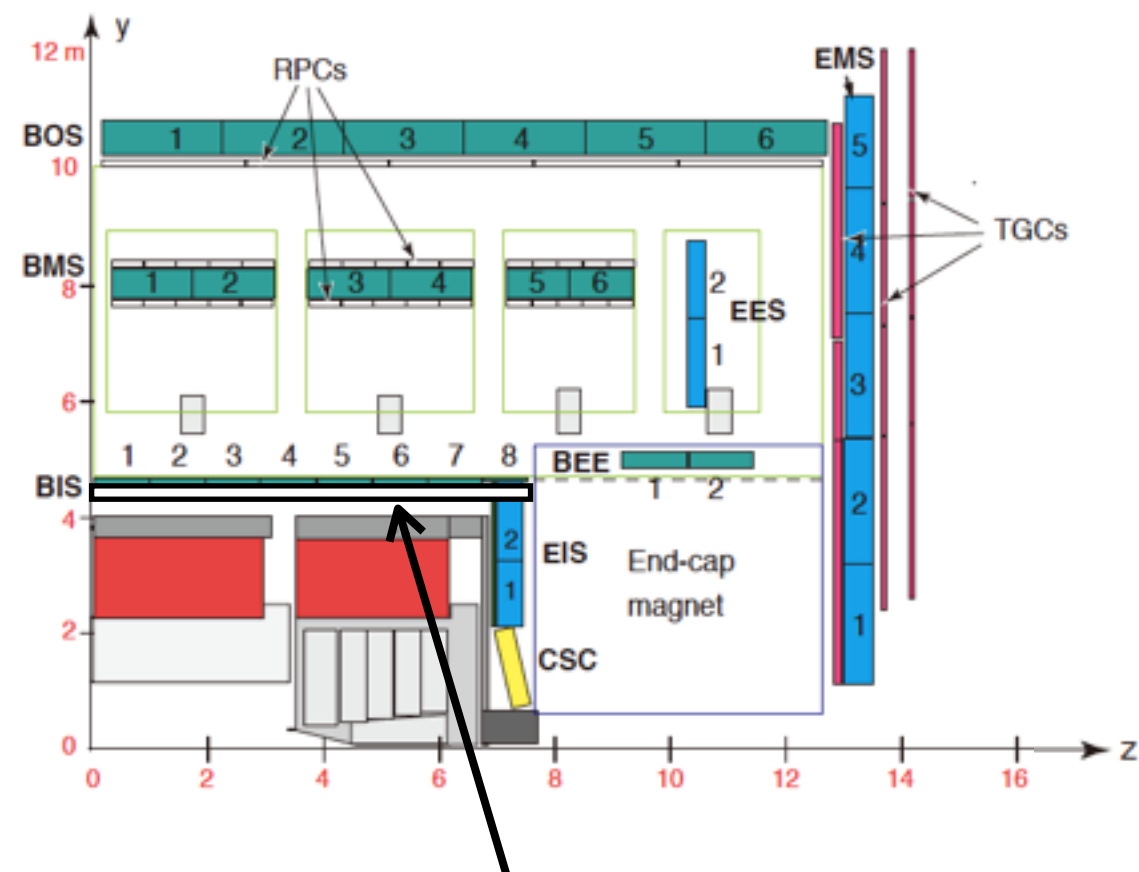


HL-LHC



ATLAS μ粒子トリガー改良

バレル部内層に検出器を追加し、
検出可能領域を拡張：**~70%→~90%**

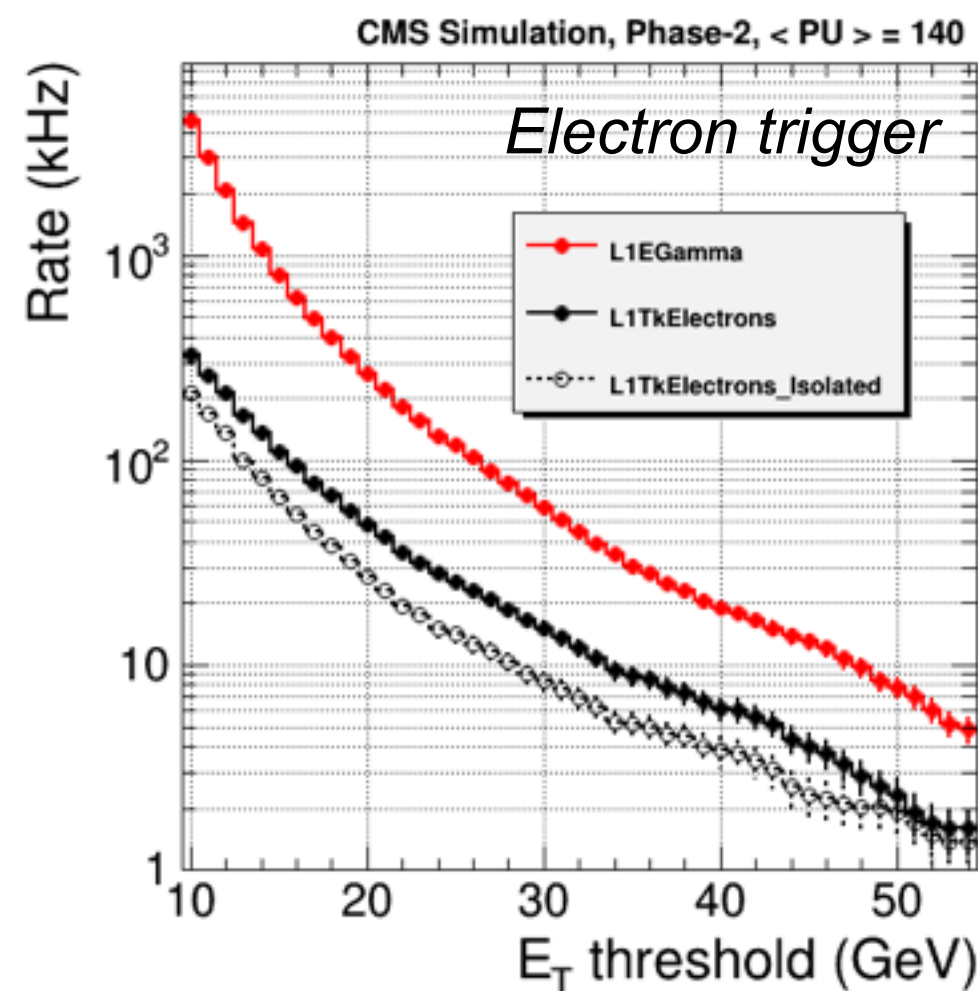
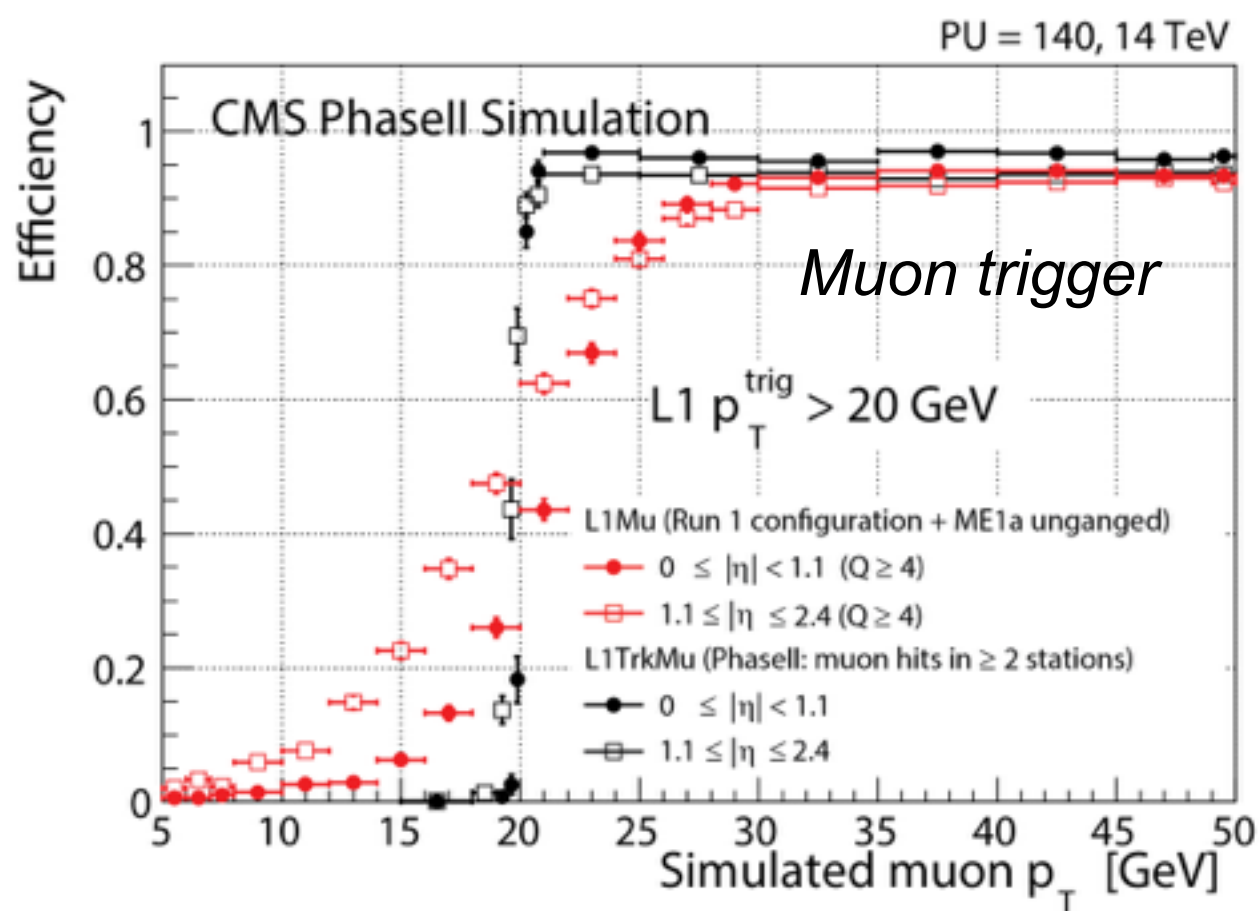


Resistive Plate Chamber (RPC)を追加。

CMS トリガー改良

CMSでは、初段トリガーに飛跡検出器の情報を導入する予定。

利点： μ 粒子の運動量分解能向上、電子と光子の分離、...

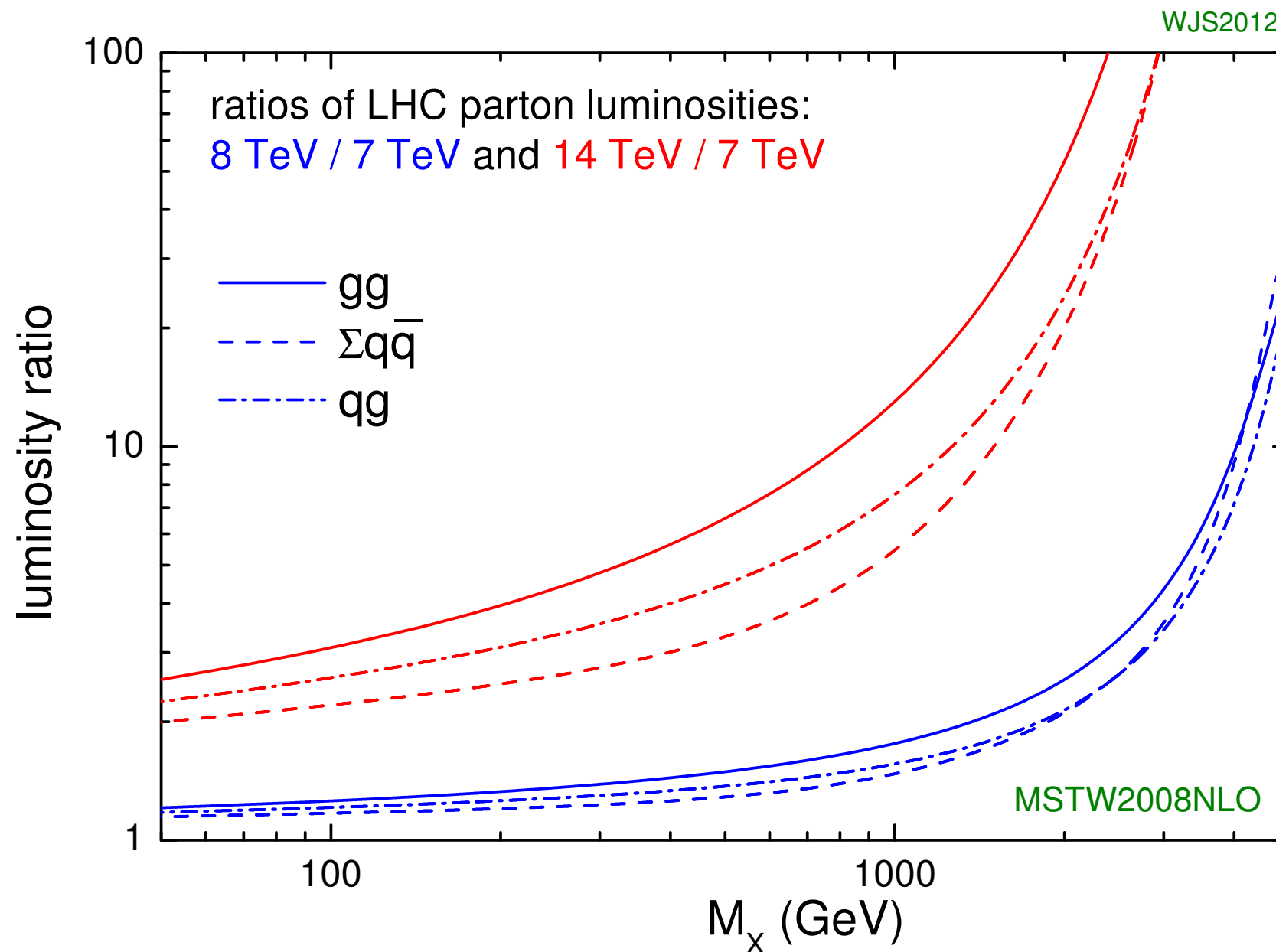


- より高い重心系エネルギー・積分ルミノシティを実現し、新物理やヒッグス物理への感度を向上させる。
 - Run 2 (2015–2018年) : 13 TeV, $> 120 \text{ fb}^{-1}$
 - Run 3 (2021–2023年) : 14 TeV(?), 300 fb^{-1} (13 TeVとの和)
- ATLAS, CMS検出器の運転・段階的アップグレードを進行中。
 - EYETS (2016–2017年) : CMS ピクセル検出器改良, ...
 - LS2 (2019–2020年) : ATLAS μ 粒子検出器改良, ...
- 2024–2026年に高輝度化のための大幅なアップグレードを行い、14 TeV, 3000 fb^{-1} で新粒子探索・ヒッグス精密検証にアプローチ。



予備のスライド

Ratios of LHC parton luminosities



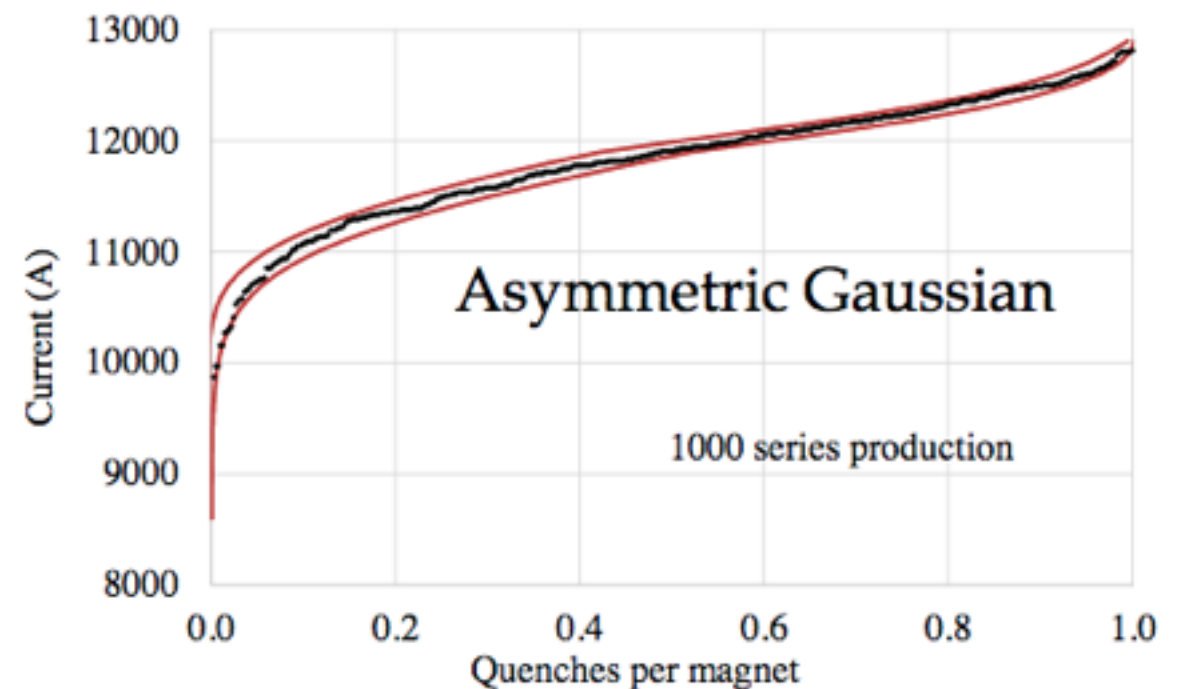
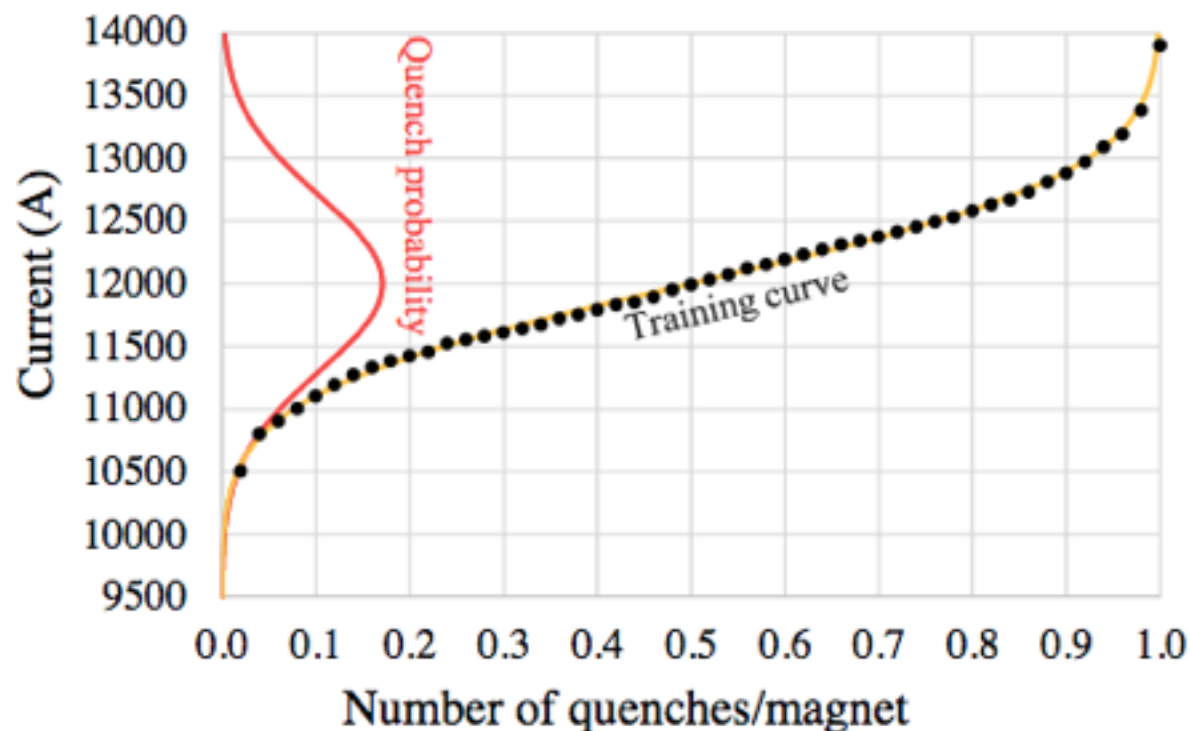
<http://www.hep.ph.ic.ac.uk/~wstirlin/plots/plots.html>

ダイポール磁石トレーニング

If quench is described by a probability distribution, training a sector has a intrinsic variability due to statistics

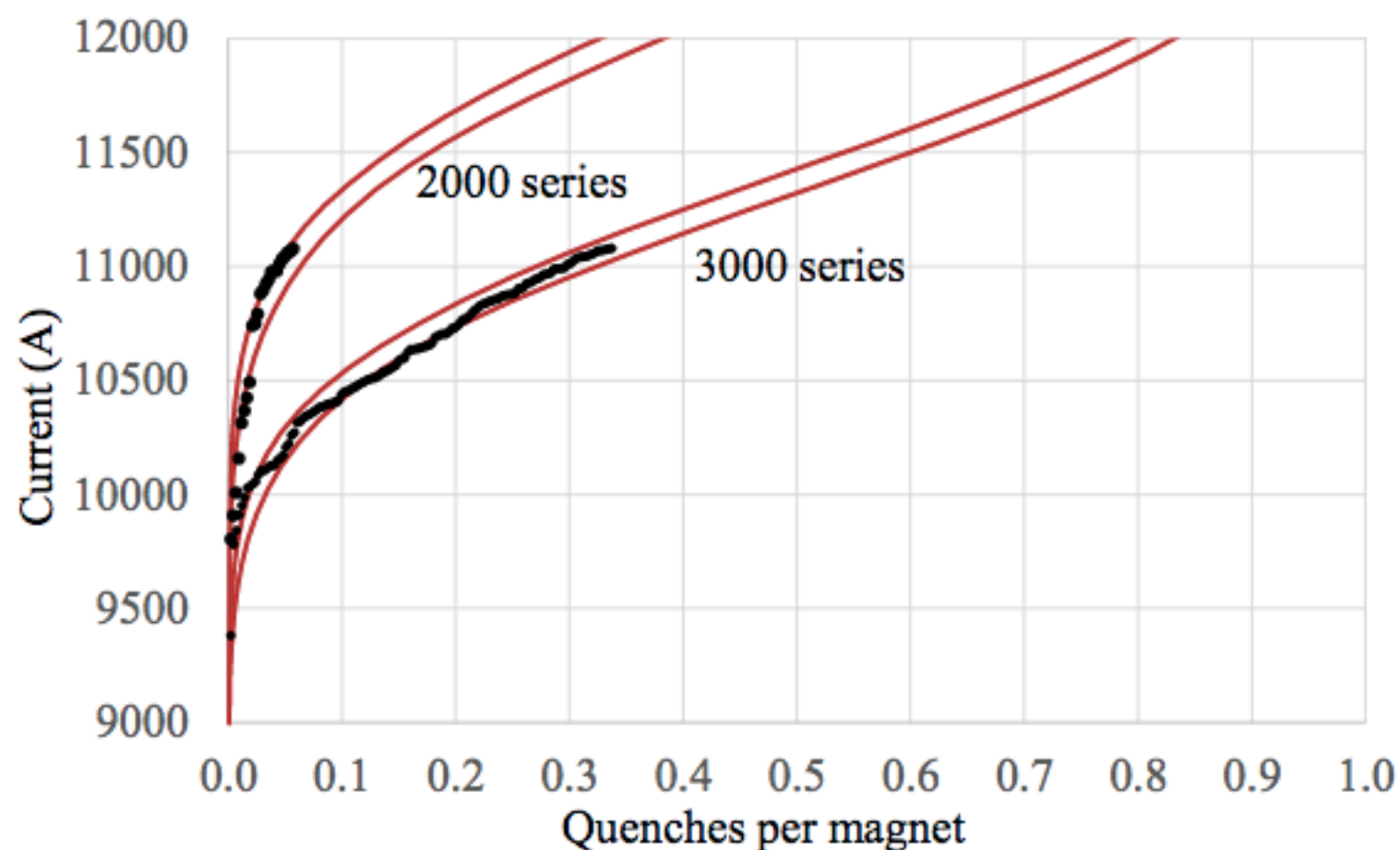
Sector 56 took 23 quenches in 2008, 16 quenches in 2015 to reach 6.6 TeV

- 62 magnet of 3000 series: 23 ± 8 compared to 16 ± 7



ダイポール磁石トレーニング

The main LHC dipoles were produced by three industries referred as 1000, 2000 and 3000 series, respectively.



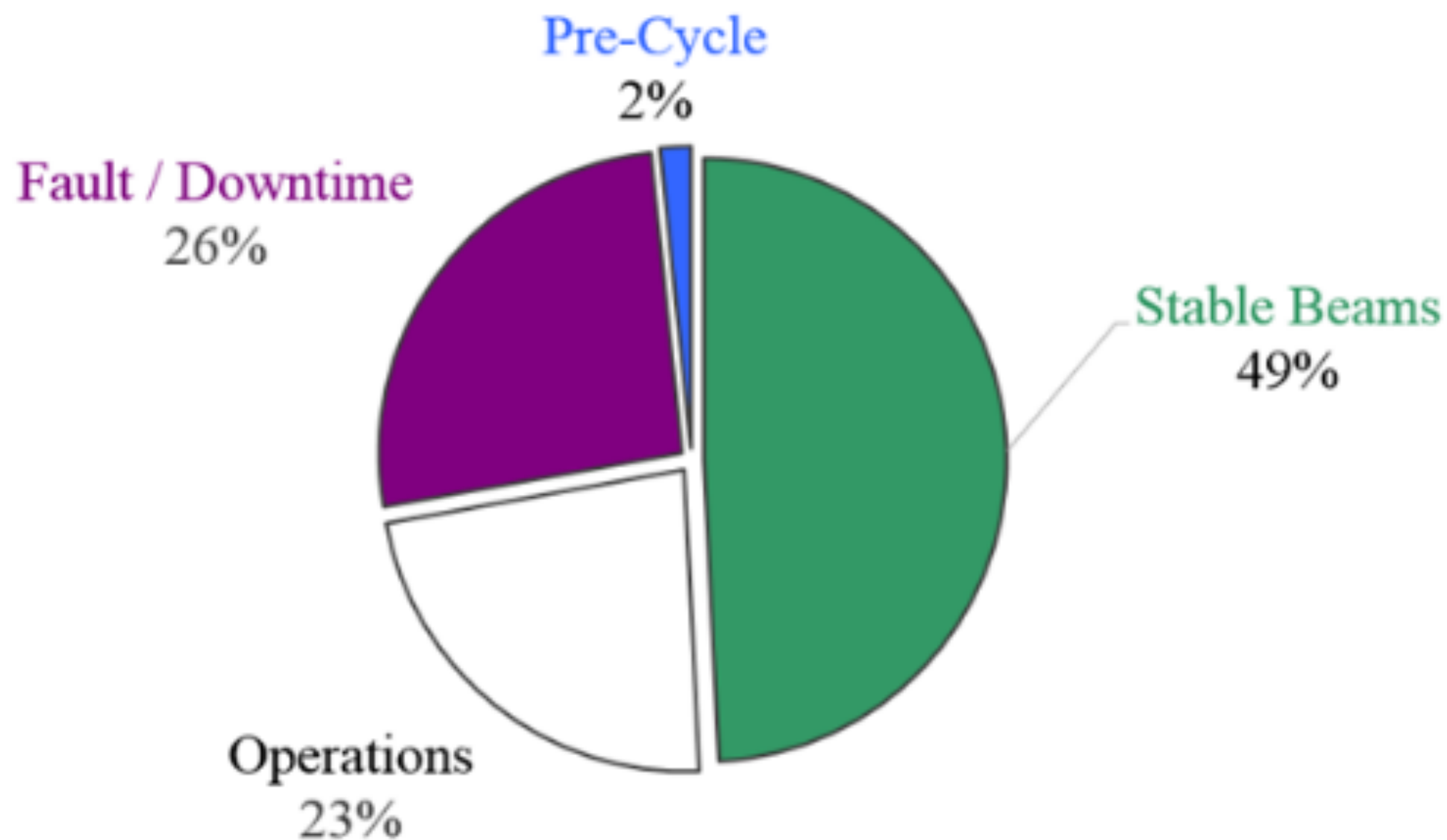
7 TeV vs. 6.5 TeV – Before LS2

- Comparison is made introducing reduction factors for the integrated luminosity
- Assumed that we will run only for 1 year at 7 TeV

	7 vs 6.5 TeV reduction factor	
Impact	Pessimistic	Optimistic
Integrated Luminosity / 160 days	0.86	0.97
Training + Short repair	0.81	0.81
Heat load	0.9	1
Total impact	0.63	0.79

2016年の加速器Availability

46/40

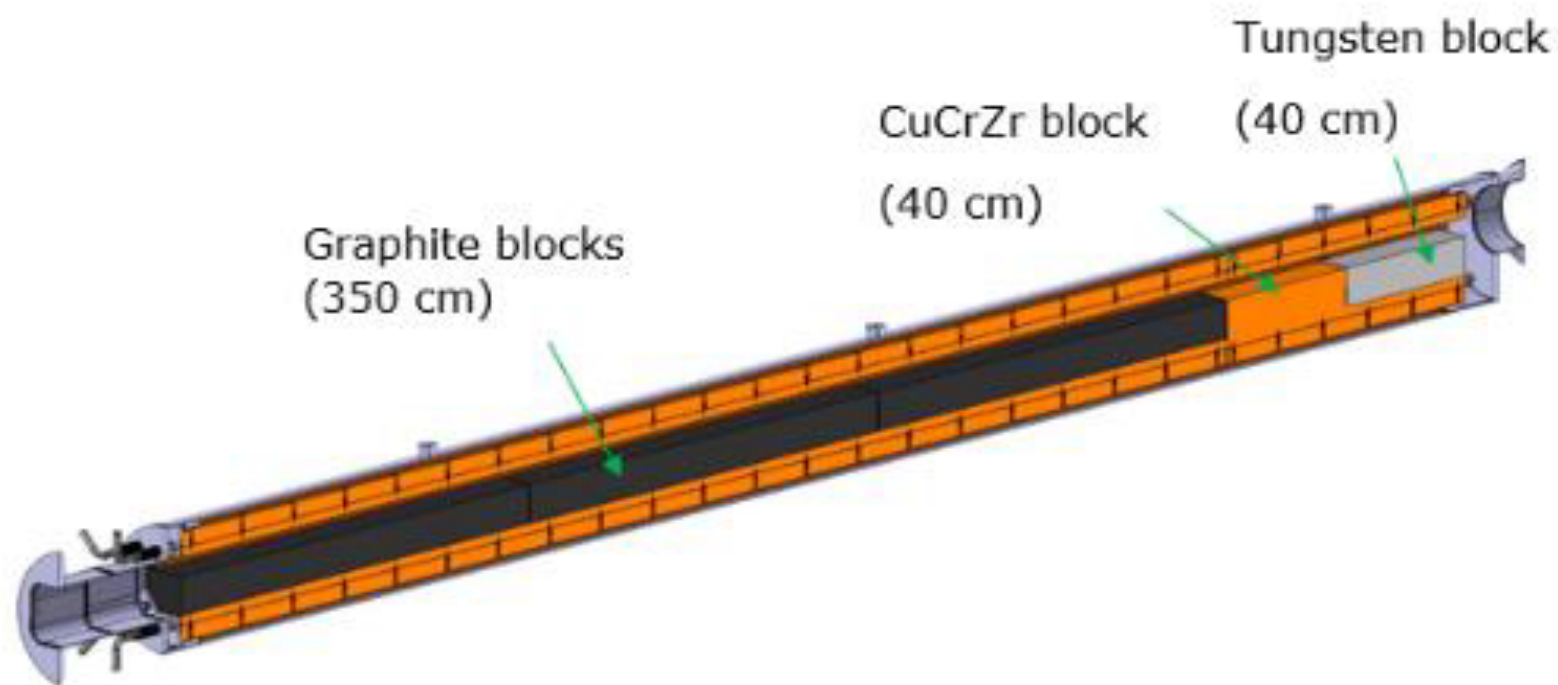


SPSビームダンプ

47/40

これまで、ビームダンプ付近の真空の悪化問題のため、LHCへの1入射あたりのバンチ数96で運転してきた。

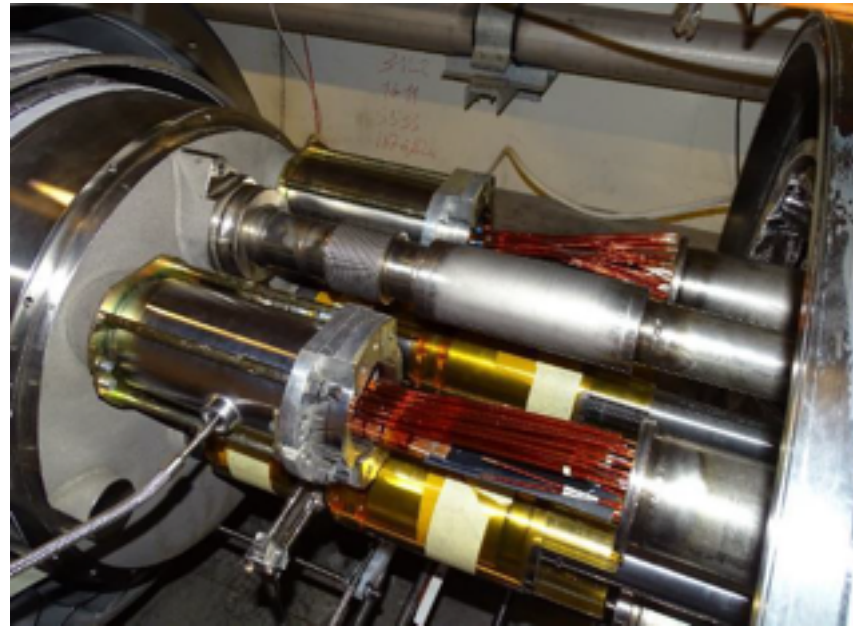
LHC全体の衝突バンチ数制限：2200。（デザイン値：2808。）



2017年運転開始までにビームダンプ入れ替えを行い、問題に対処。

ダイポール磁石交換 (S12)

48/40

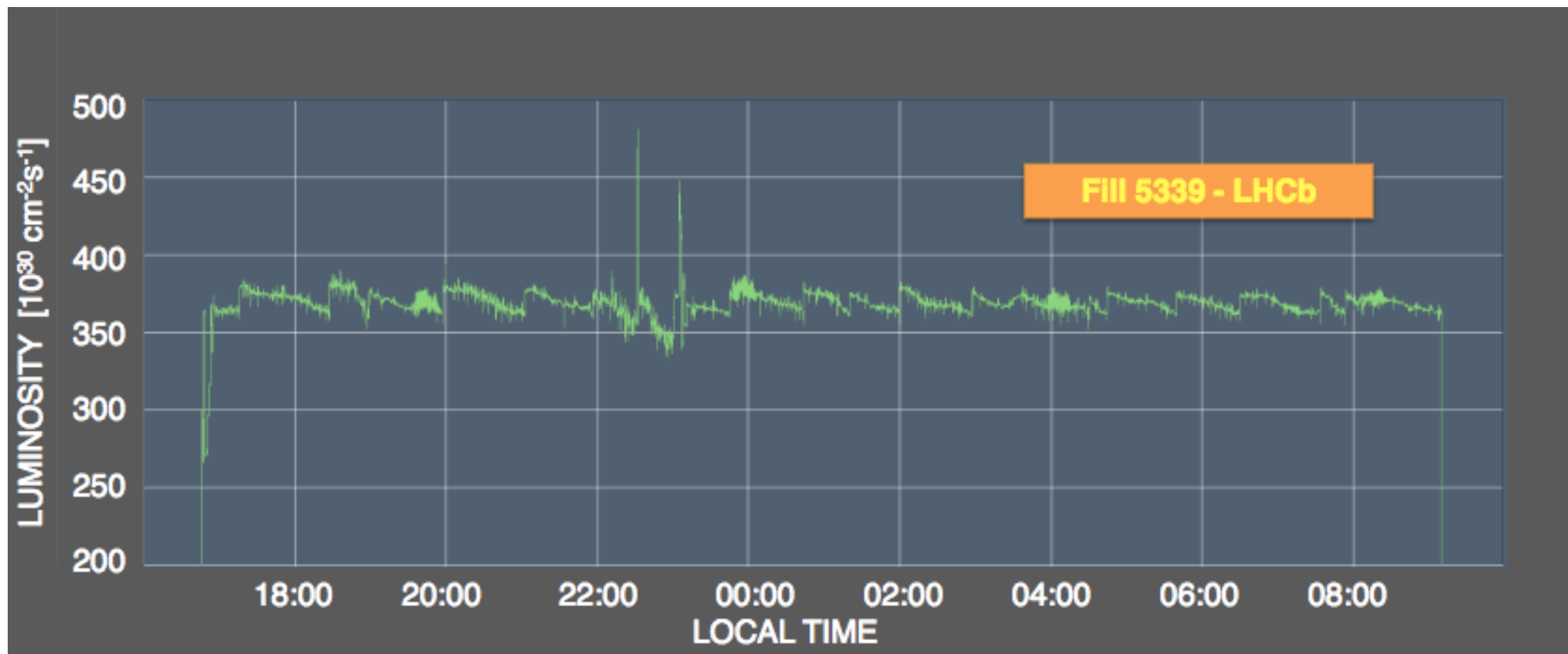


予定通りにインストール完了。

2月15日、冷却開始。その後、試運転。

Luminosity Leveling for LHCb

49/40



Levelling by separation within $\pm 2\%$

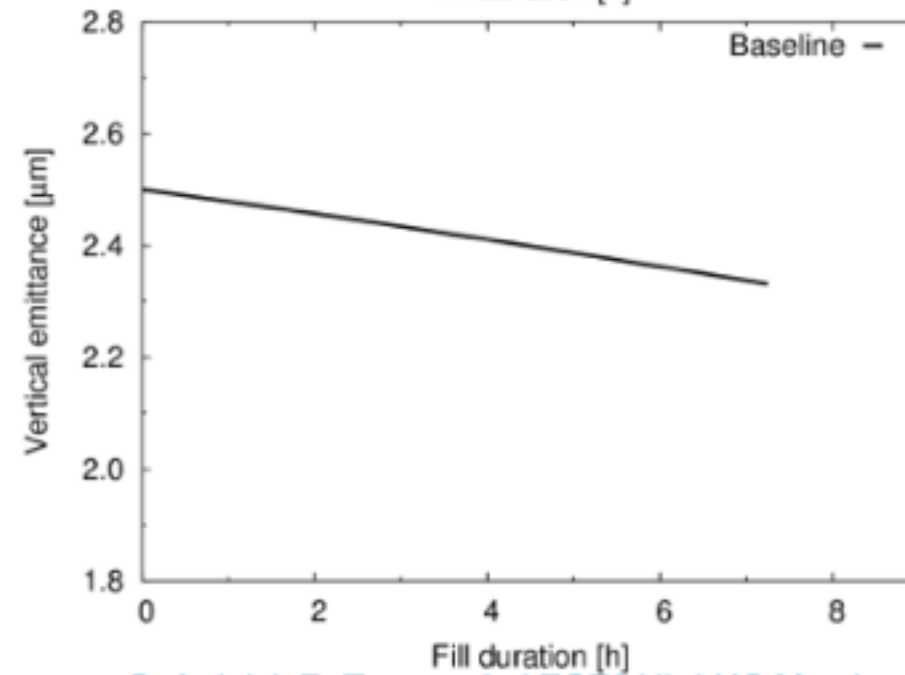
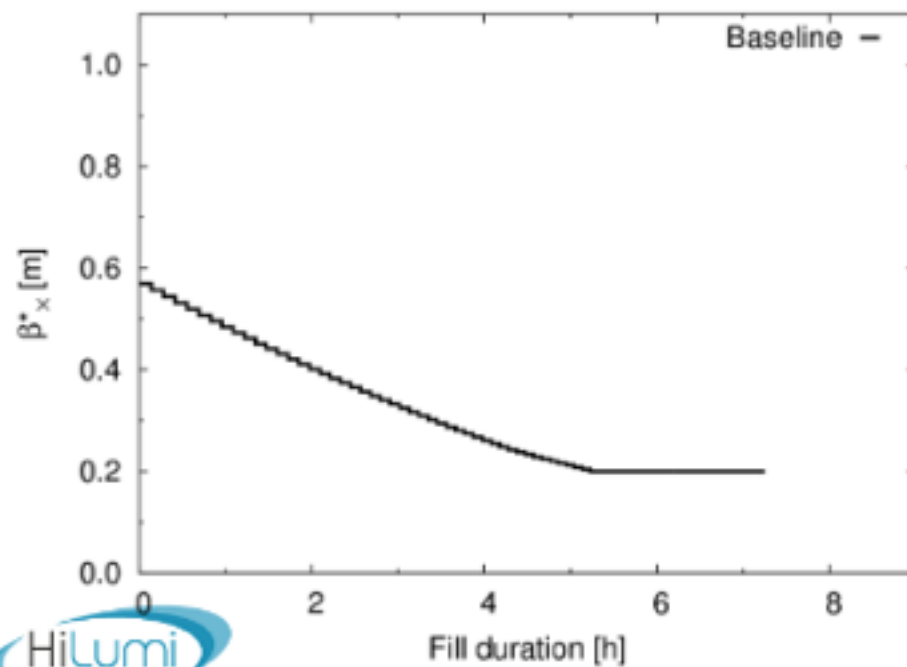
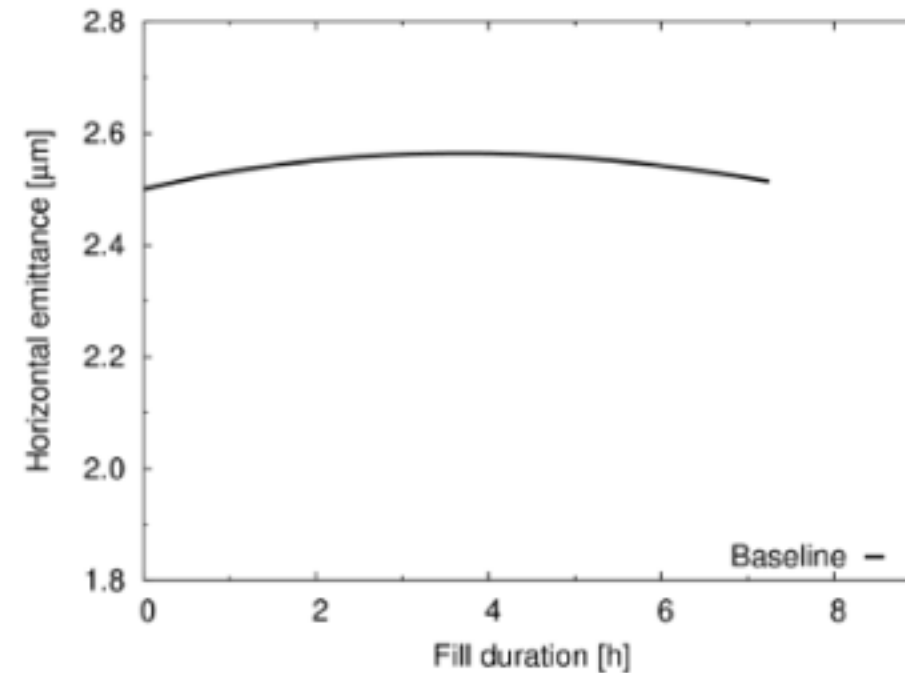
β^* levelling more complex but first MD results positive

→ **Need to gain operational experience**

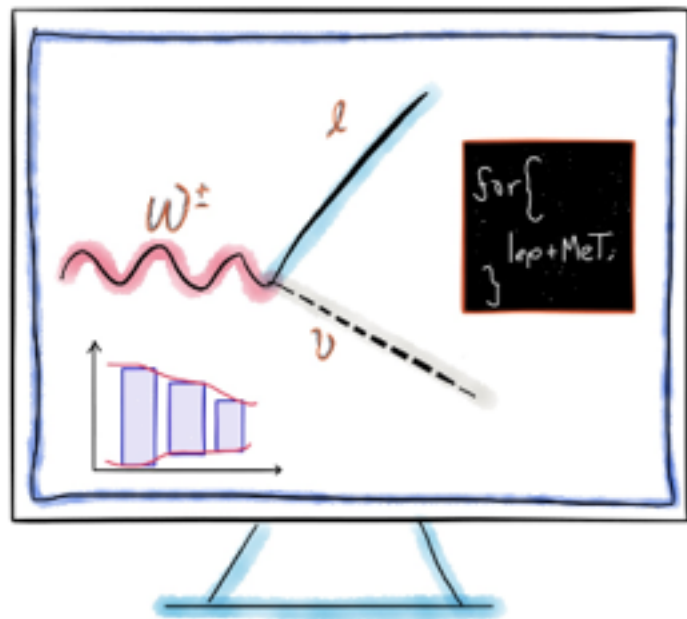
Luminosity Leveling for HL-LHC

Baseline

- Round optics:
 - Constant crossing angle 510 μrad
 - Min $\beta^* = 20\text{ cm}$
 - Partial ($\sim 75\%$) compensation of crossing angle with two CCs per IP side per beam ($2 \times 3.4\text{ MV}$)



The ATLAS OpenData Project



<https://indico.cern.ch/event/622398/contributions/2512159/attachments/1427019/2190496/mybook.pdf>

Access Open Data from the ATLAS Experiment at CERN

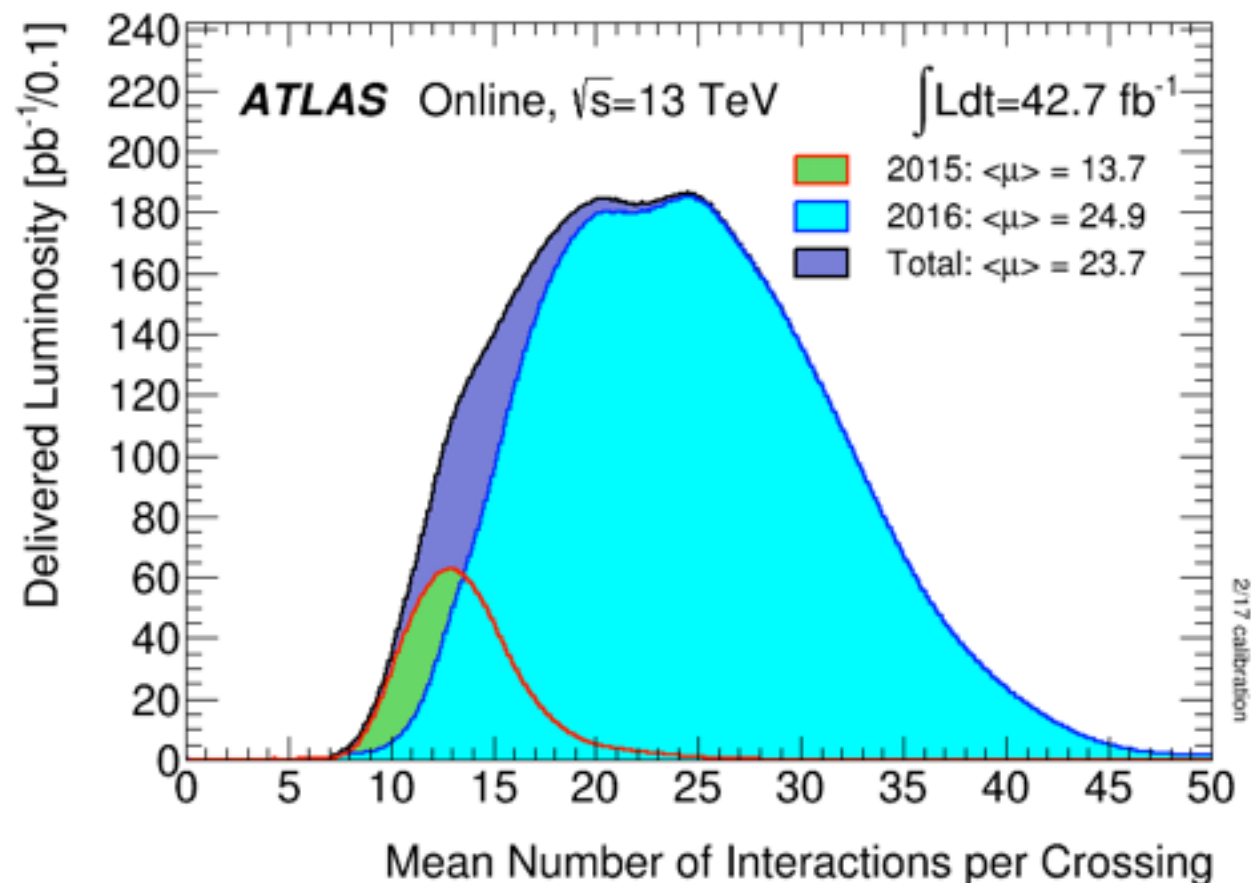
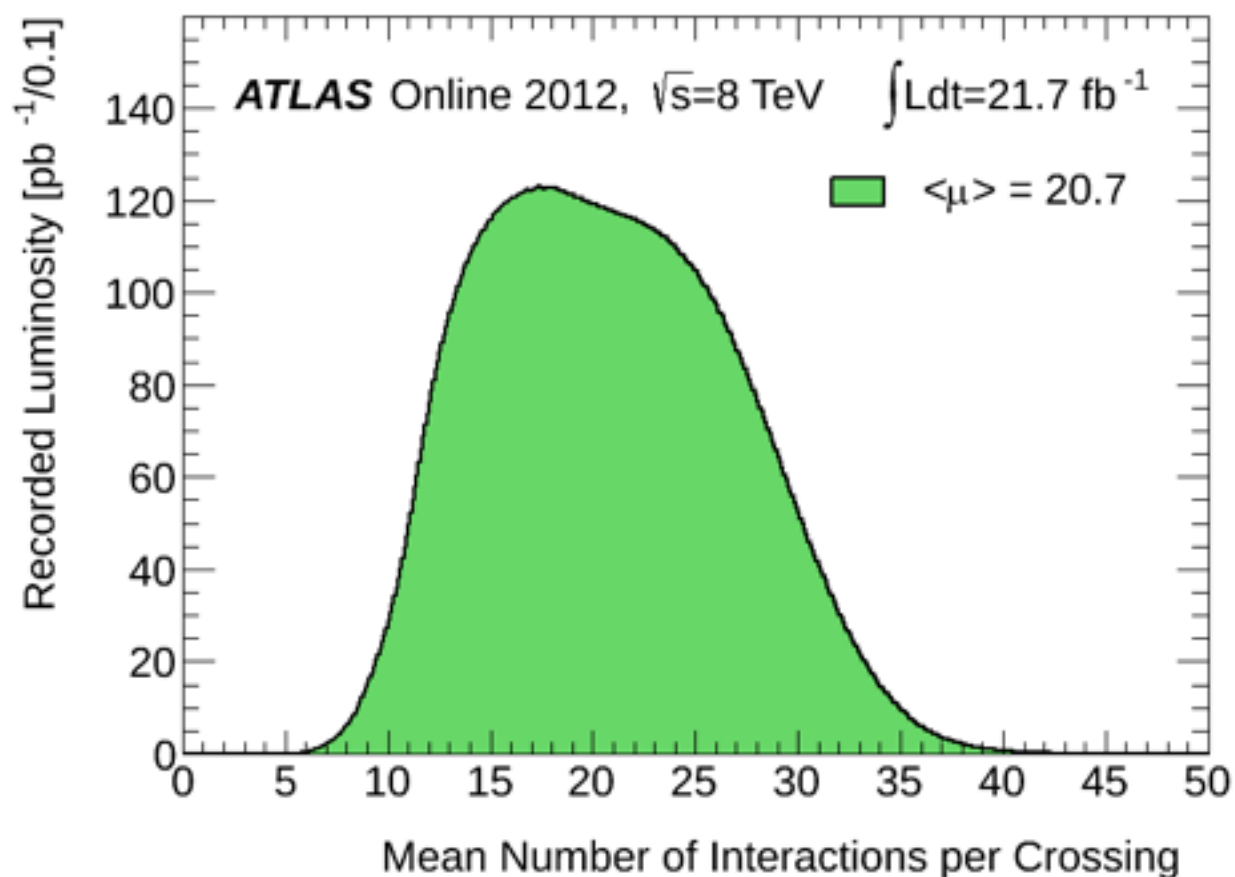
the world's first open release of 8 TeV data

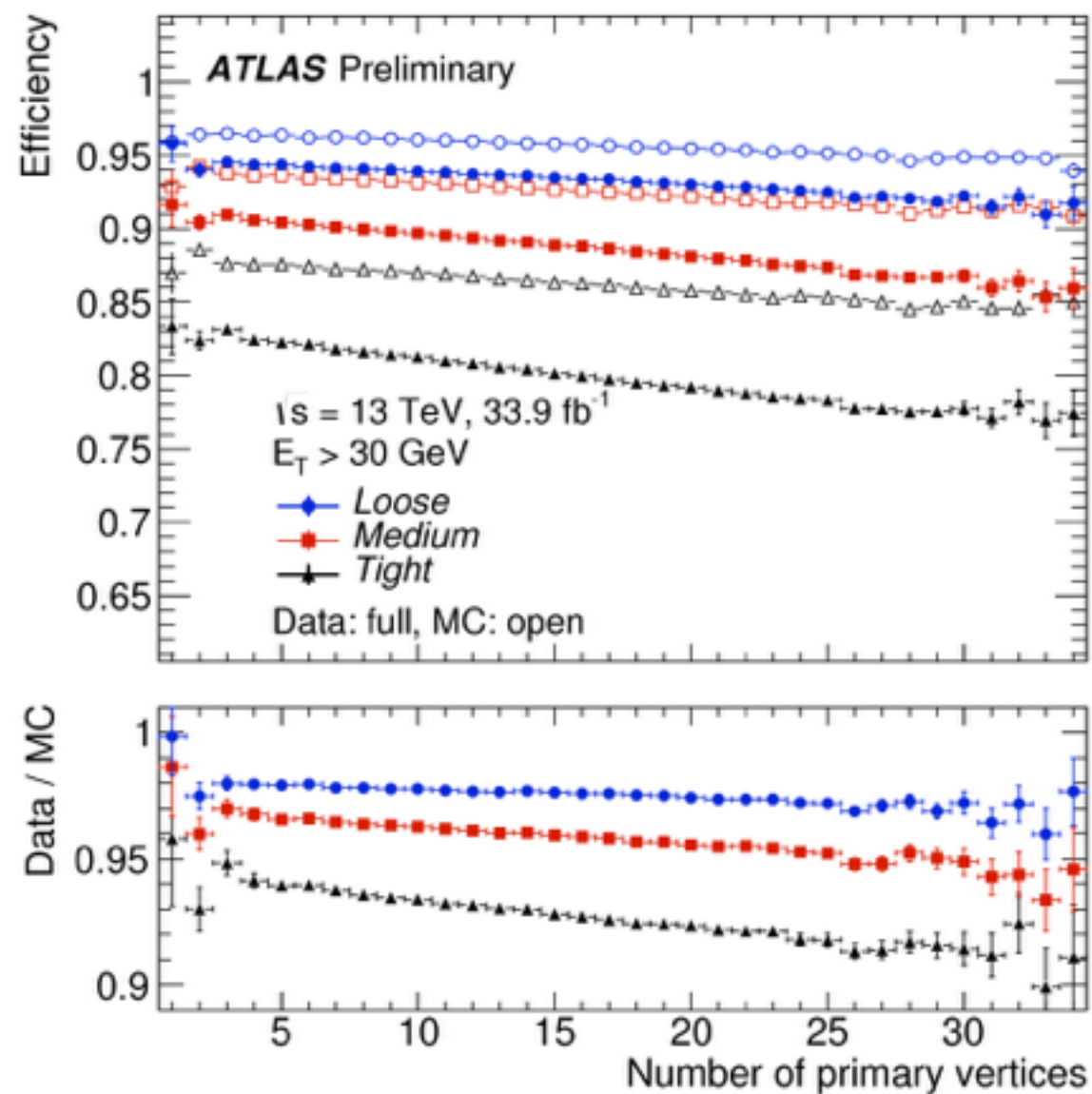
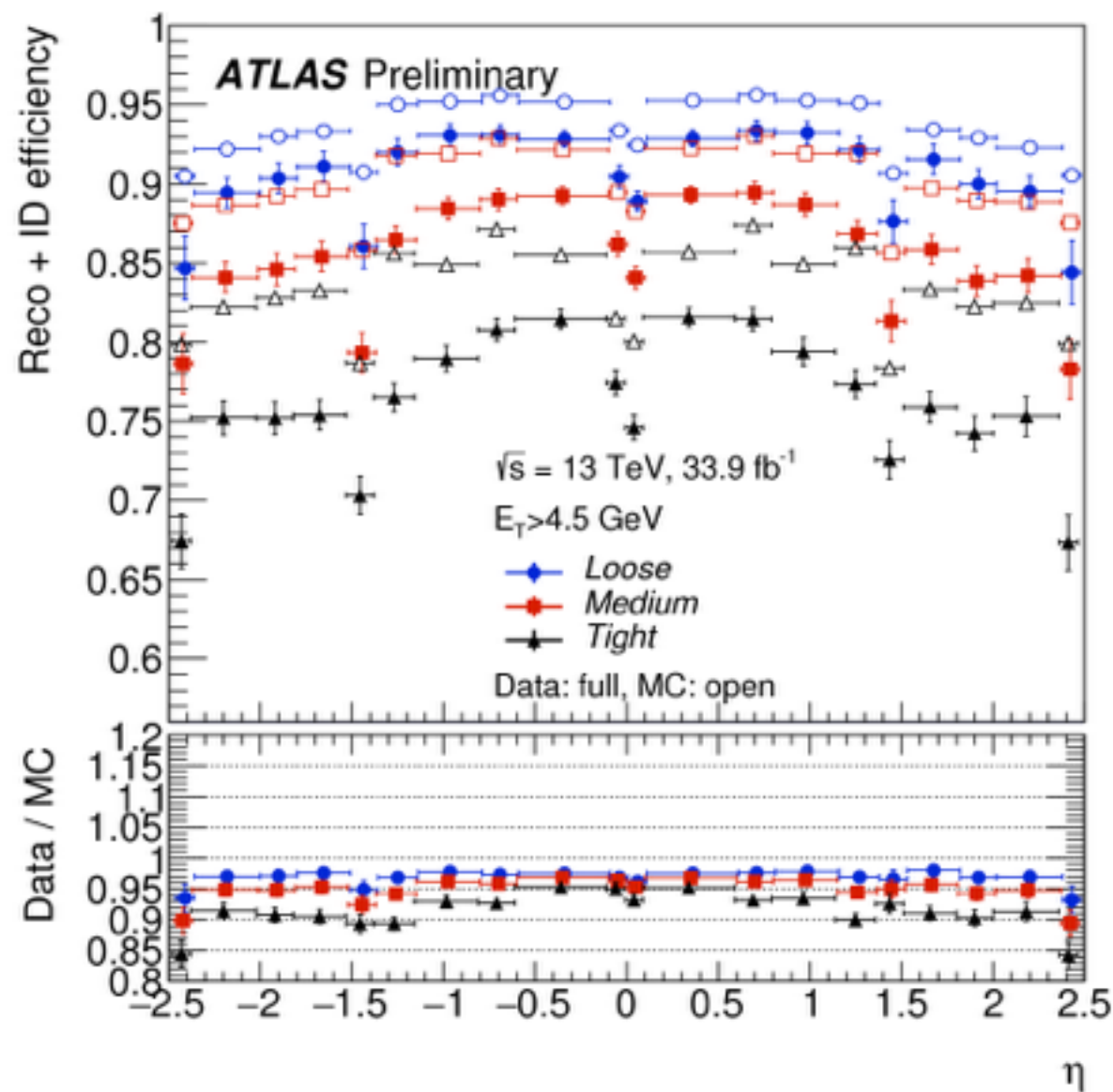
Target Audiences

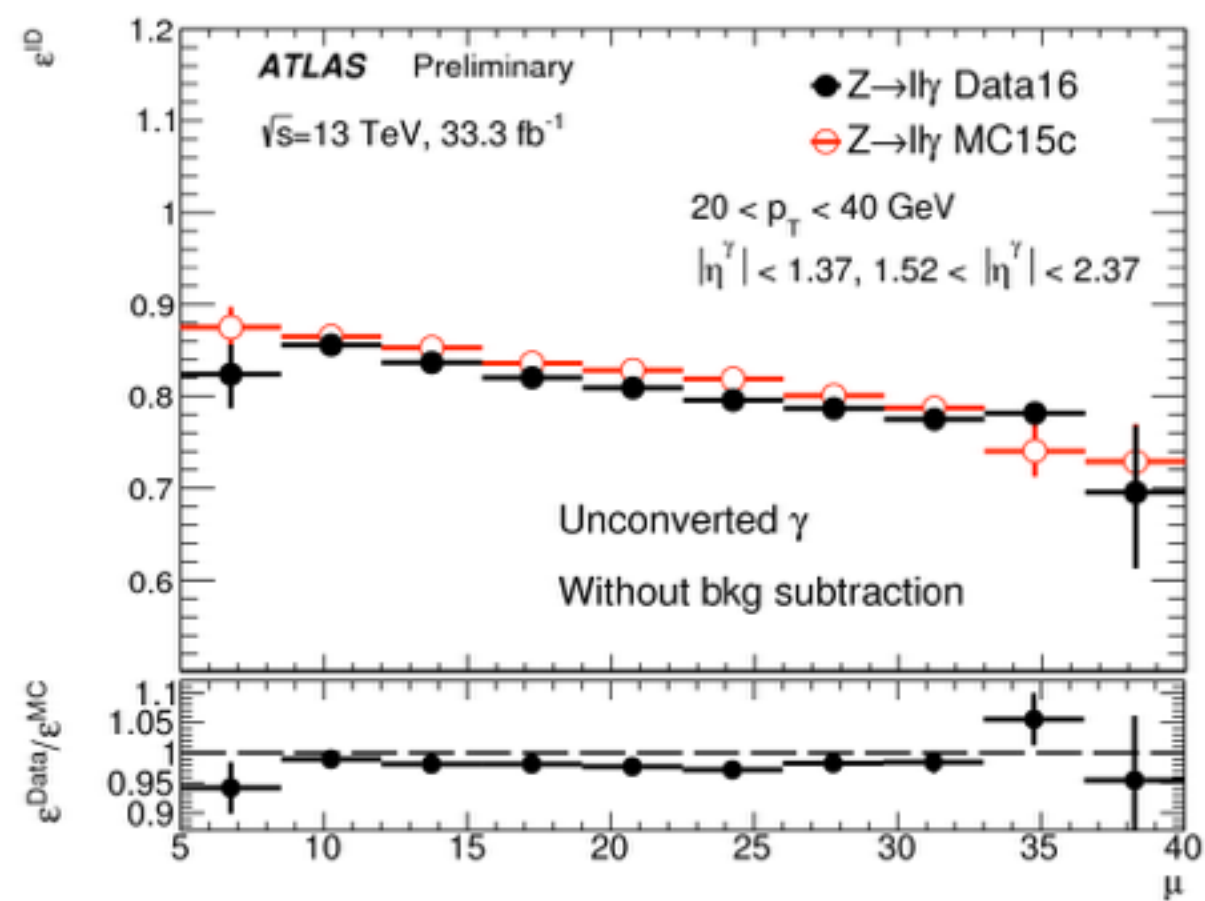
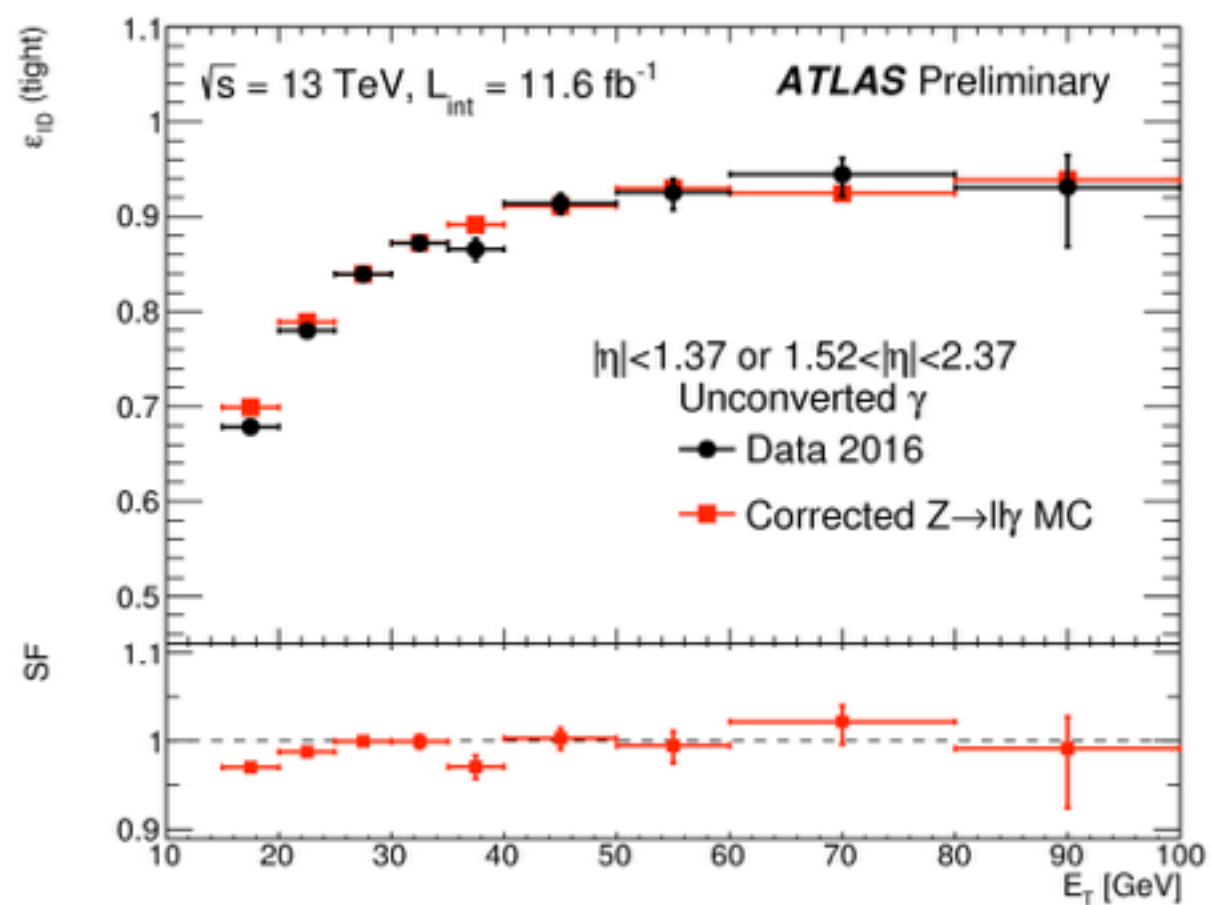
- Students
 - Advance High School and University
 - PhD Students
- Researches
 - Training for new analyzers
 - Outside ATLAS scientific community
- General Public
 - Outreach
 - Curious people!

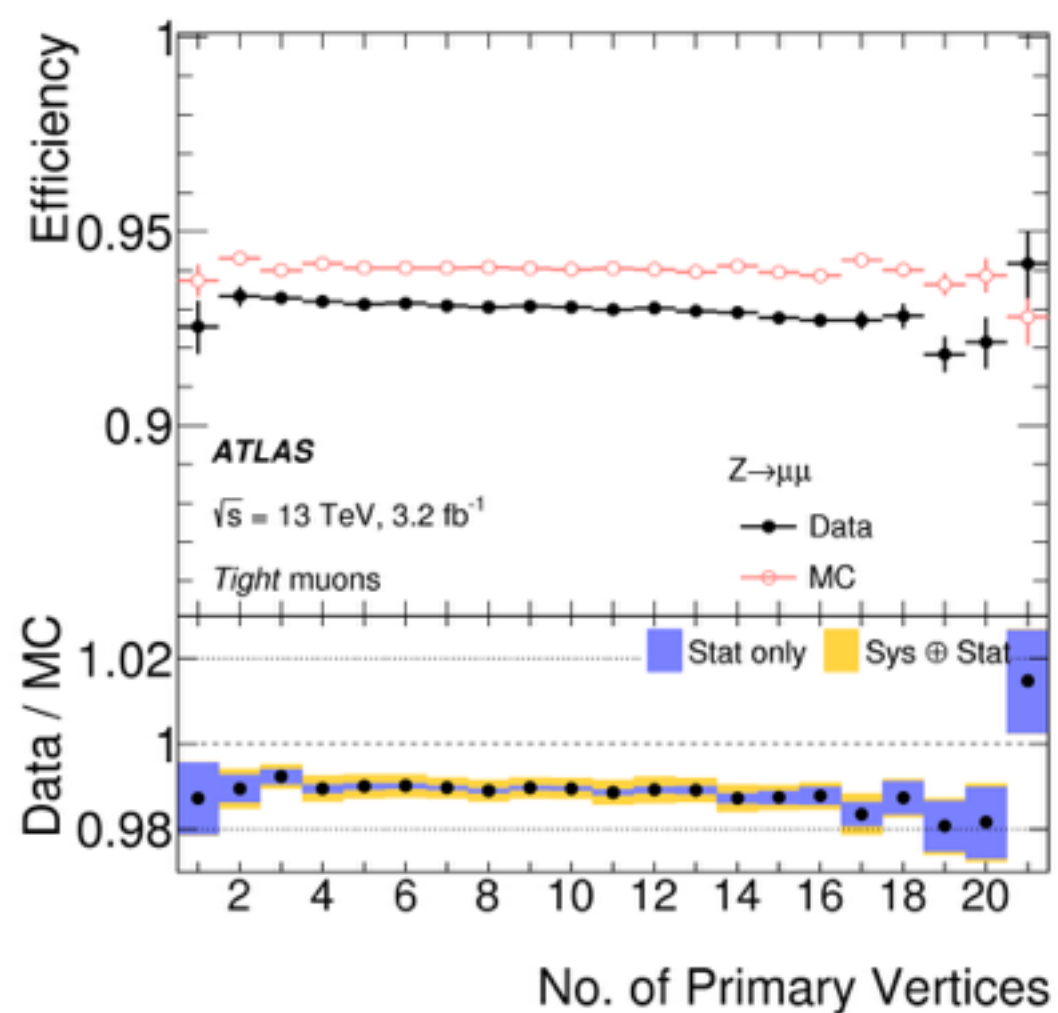
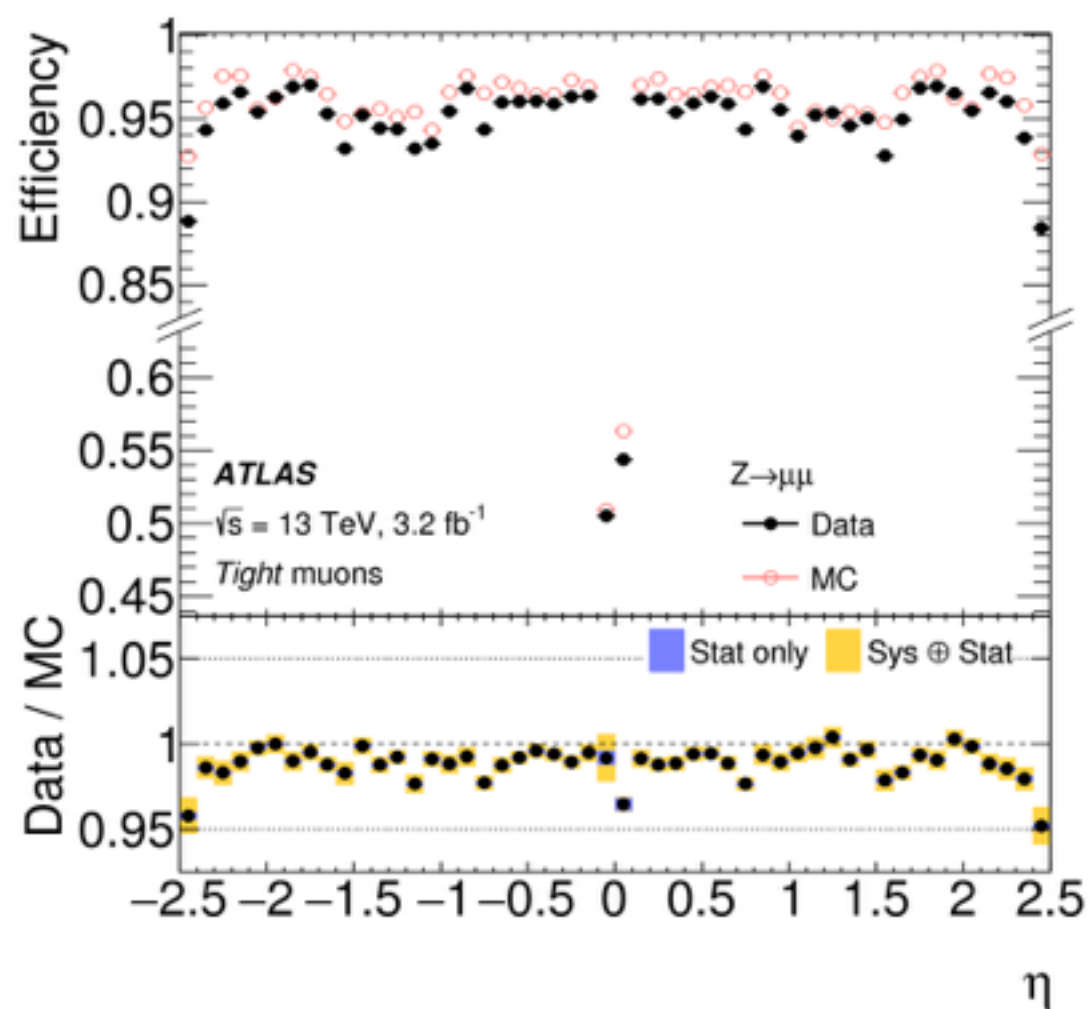
<http://opendata.atlas.cern/>

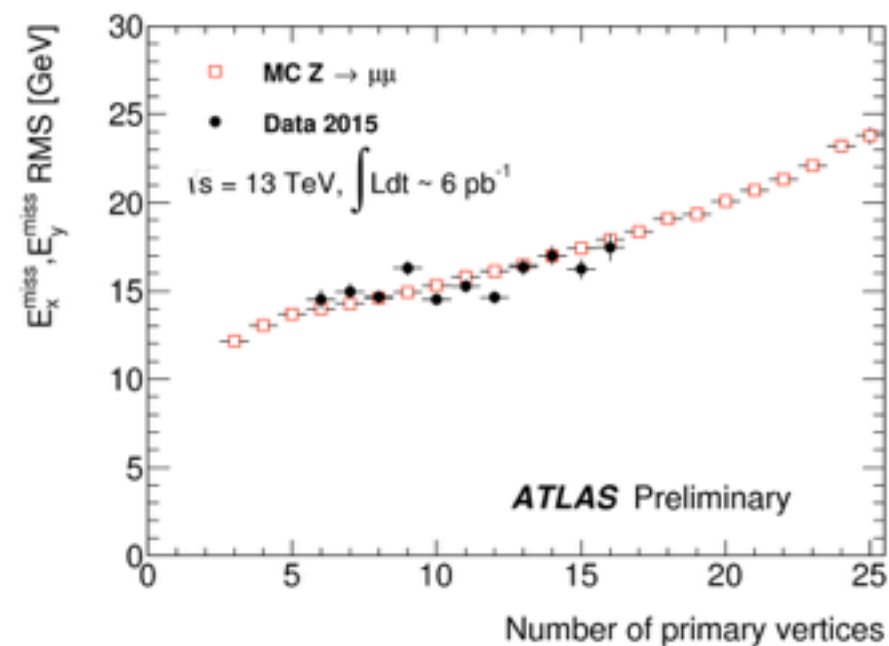
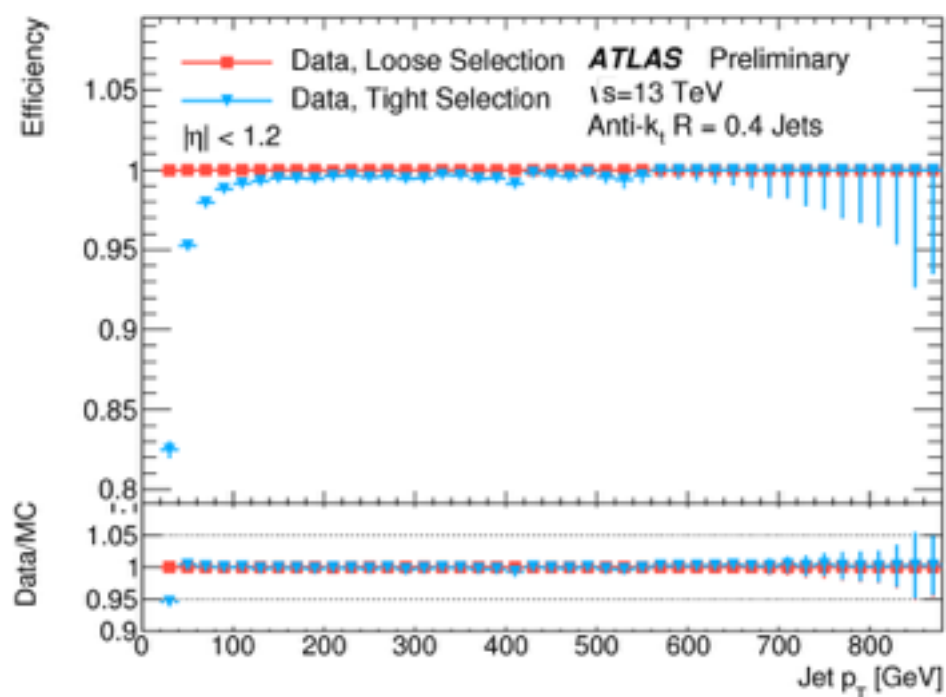
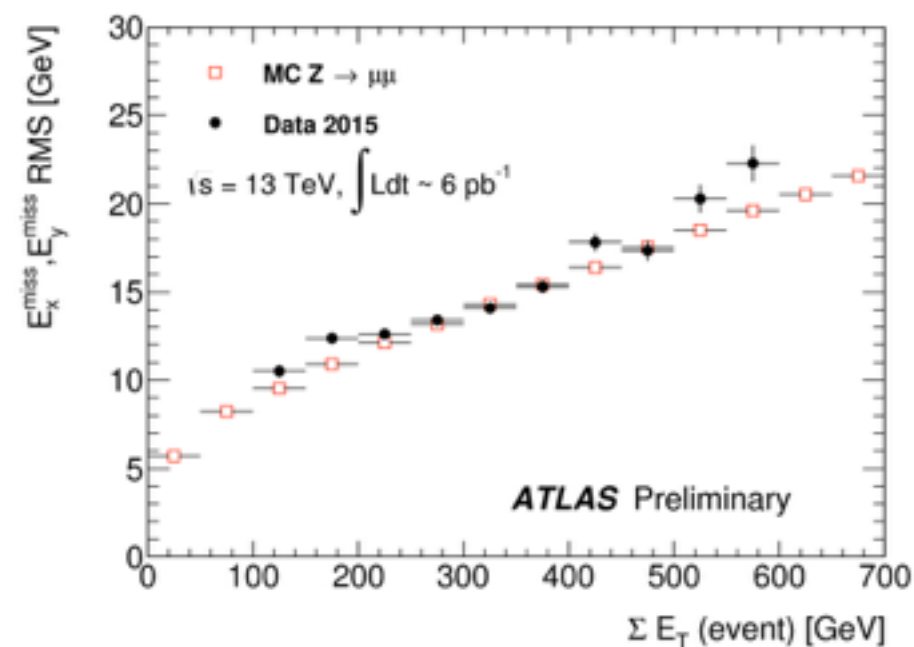
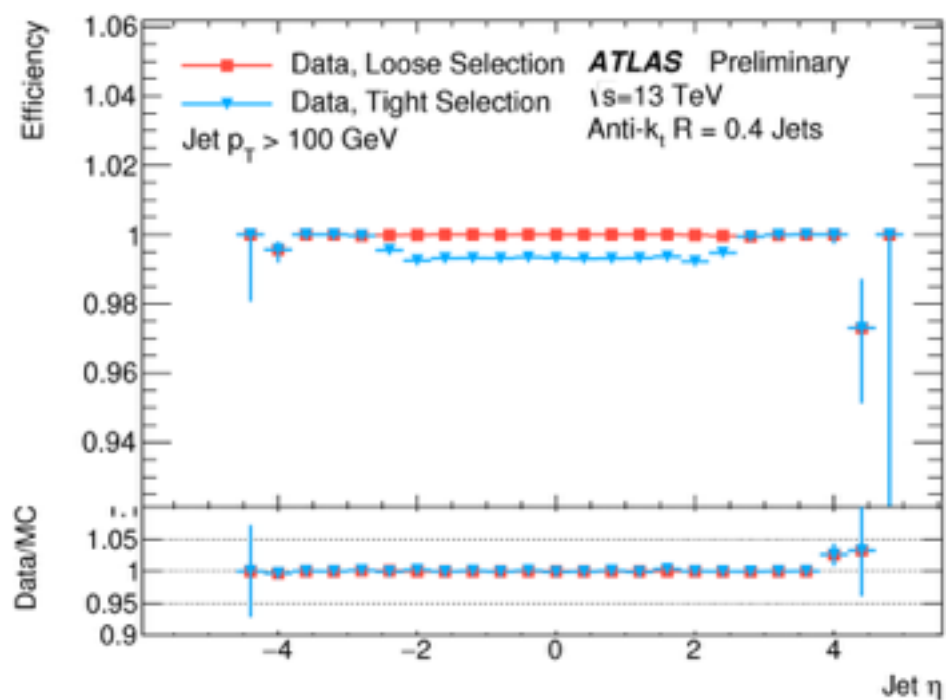
Number of Interactions per Crossing





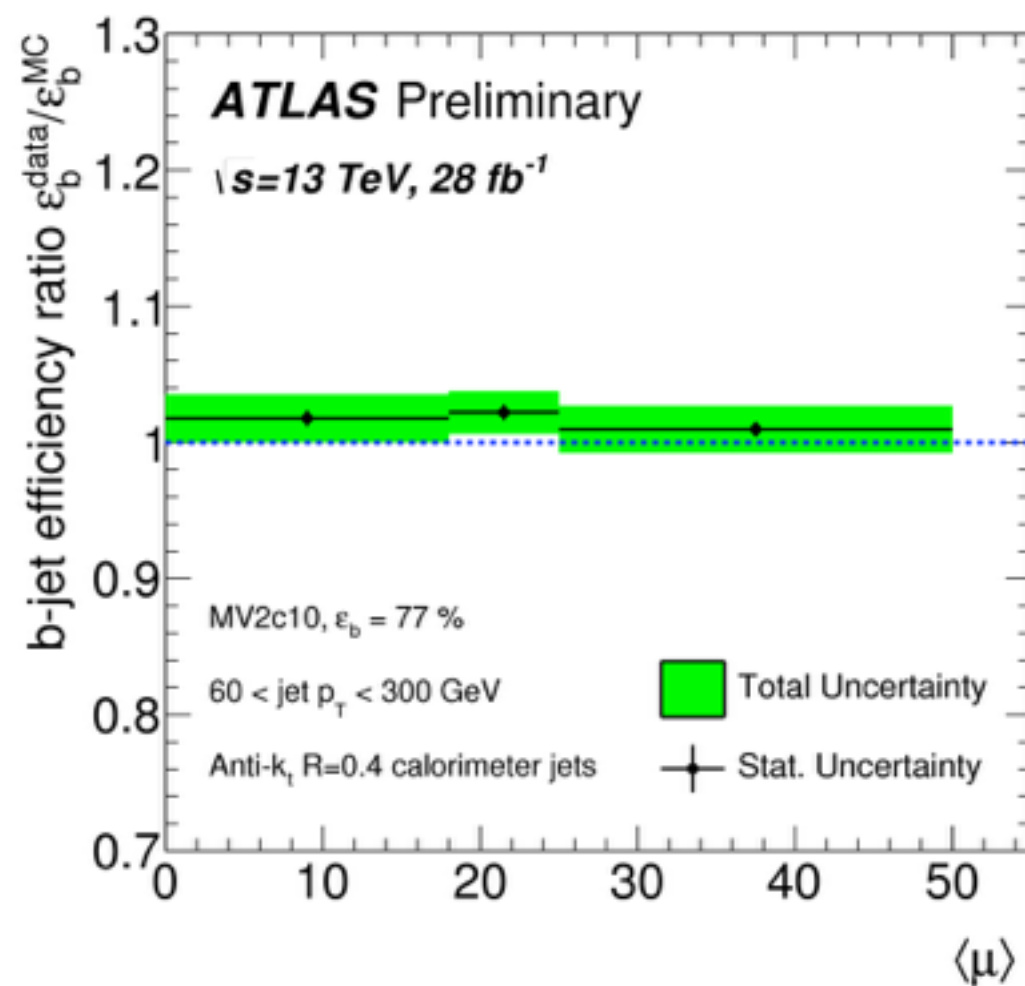
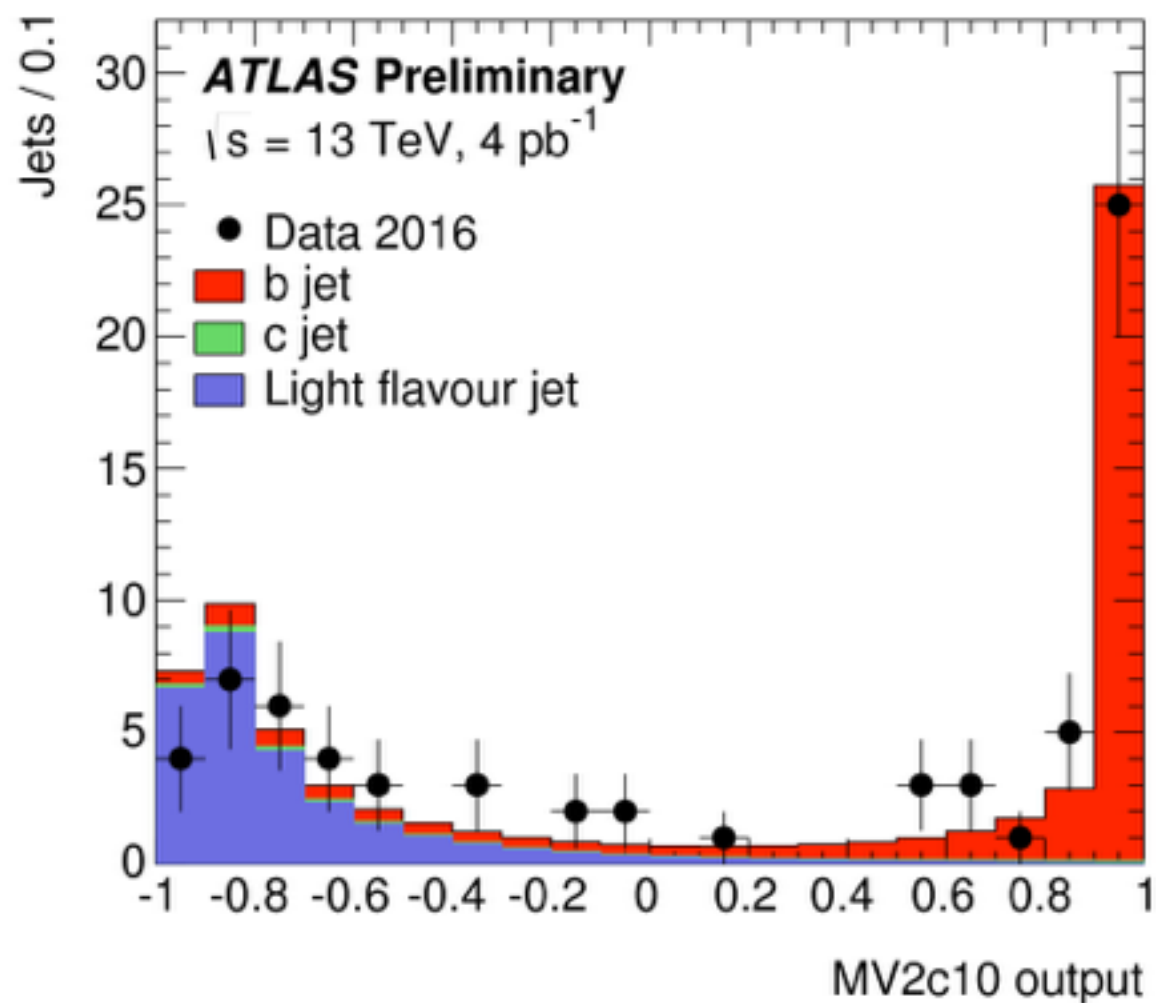




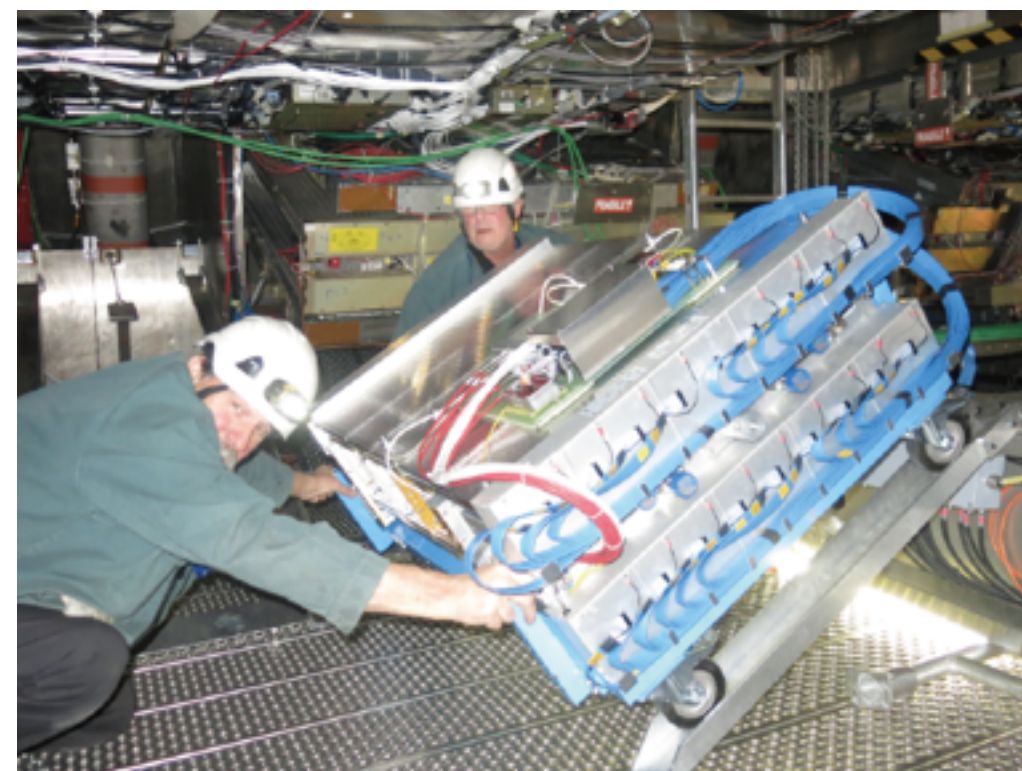
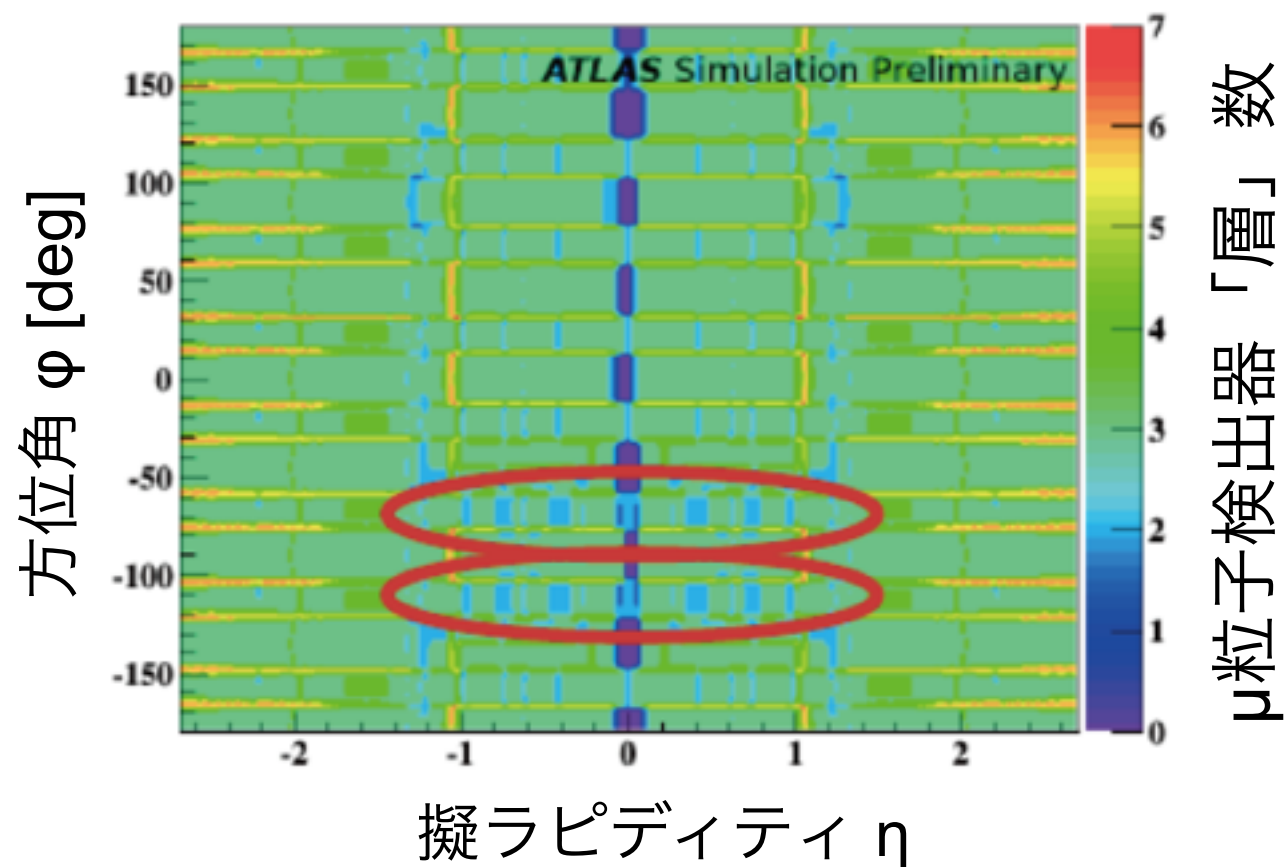
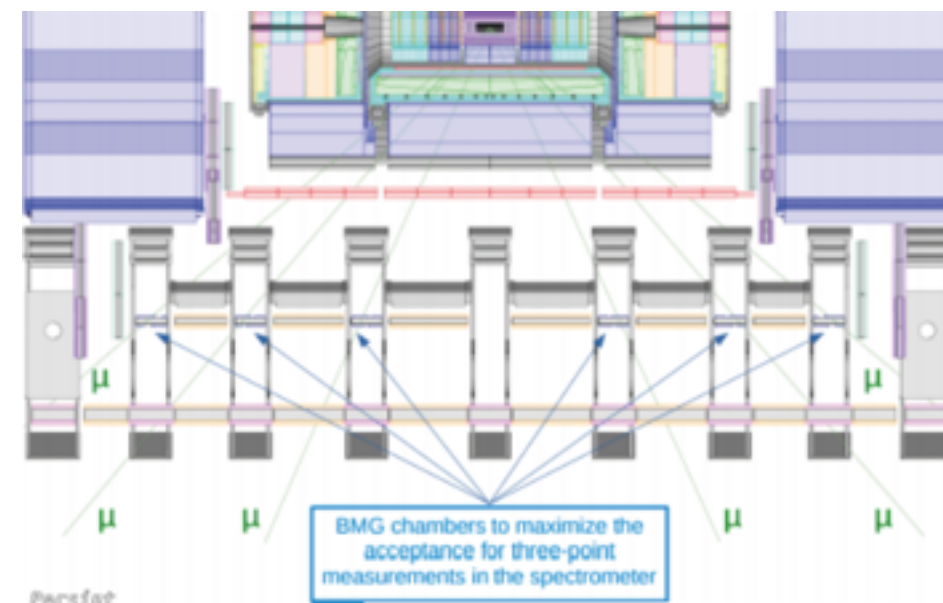


Run 2 ATLAS Performance for b Tag

57/40

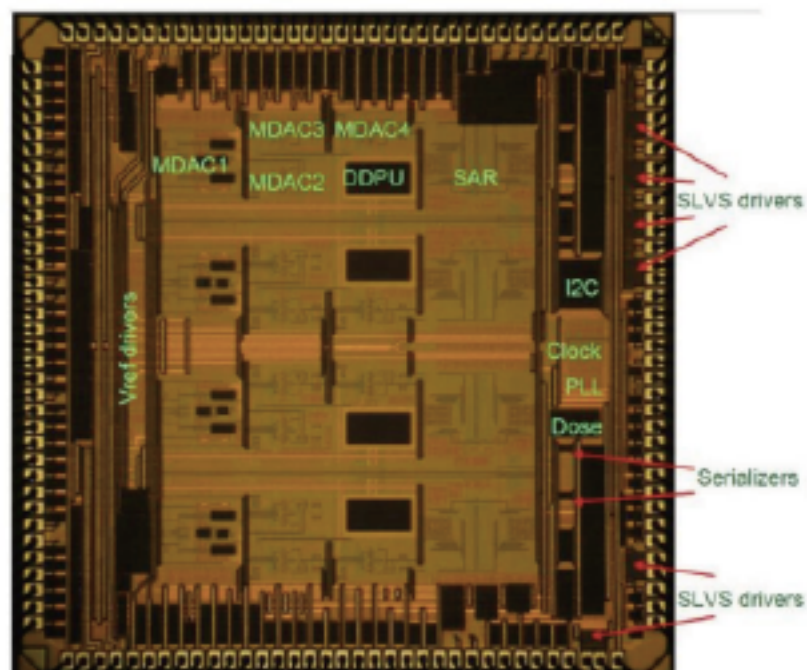


- μ 粒子検出器追加
- カロリメータ電源モジュール交換
- 前方検出器追加
- $L = 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に向けたトリガー準備
- ...



Updates on ATLAS Phase 1 Upgrade

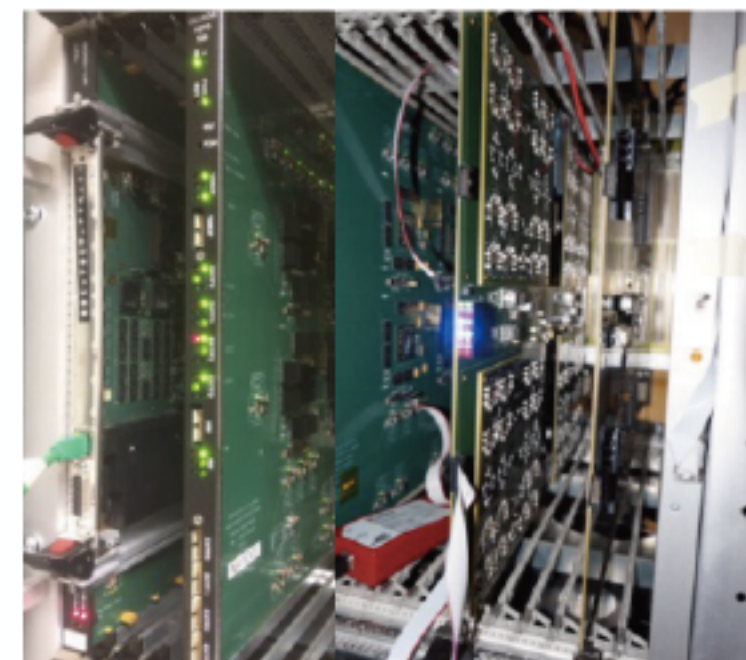
59/40



Nevis ASIC

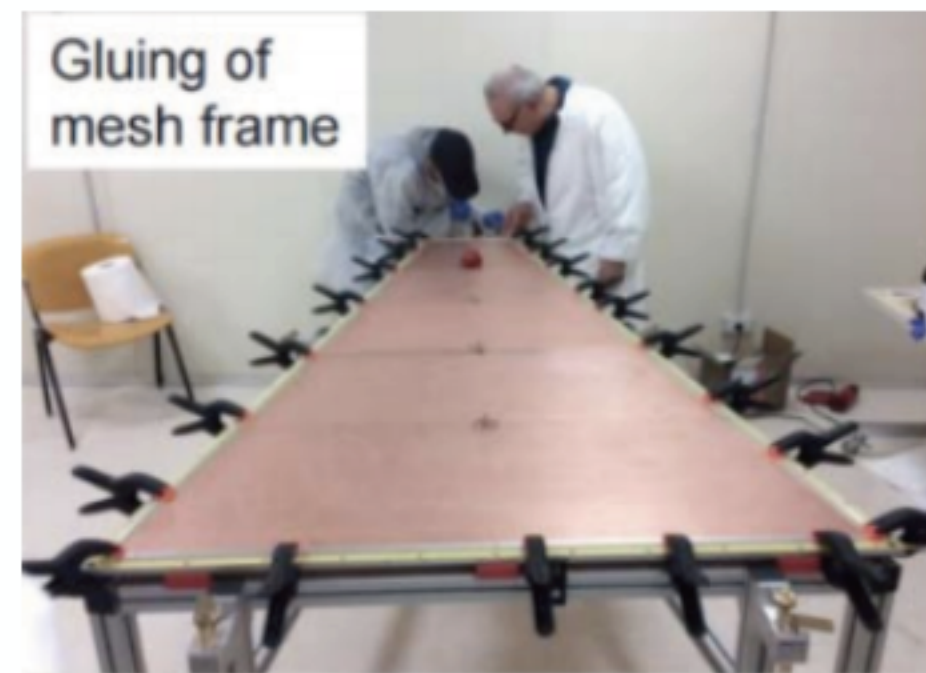


eFEX prototype



FTK: crate at PI

Project	Status
Fast Tracker	On track (commissioning in 2017)
TDAQ	On track
LAr calorimeter	On track
New Small Wheel	Progress but delays acquired



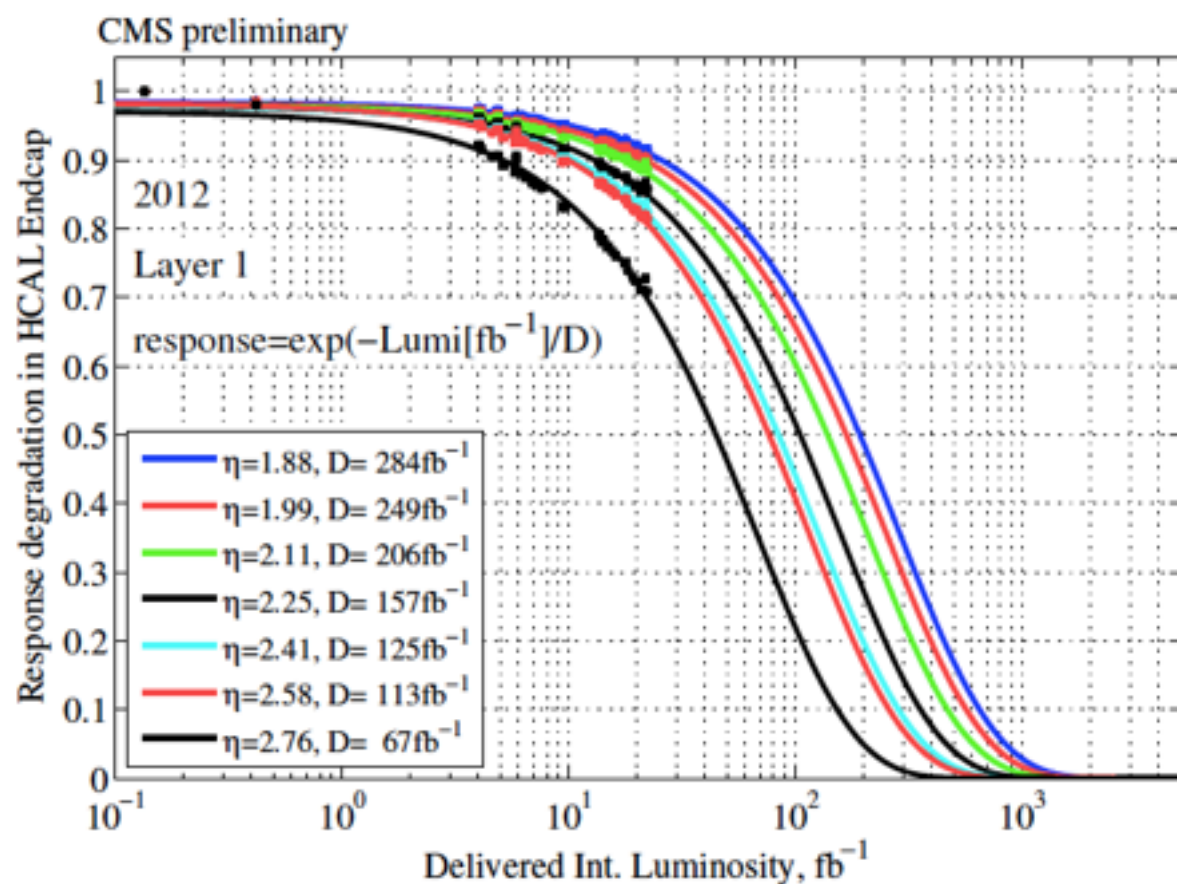
Micromegas for New Small Wheel

CMS Calorimeter Upgrade

Radiation dose at 3000 fb⁻¹
for the scintillating tiles
of the endcap hadron calorimeter
will reach up to 300 kGy
— response degradation expected.

For the new endcap calorimeter,
exploit **advances in silicon detectors**
in terms of cost per unit area
and radiation tolerance.

The silicon sensors to be used
will be simple, large area, and
single-sided.



Thickness	300 μm	200 μm	100 μm
Maximum dose (Mrad)	3	20	100
Maximum n fluence (cm ⁻²)	6 × 10 ¹⁴	2.5 × 10 ¹⁵	1 × 10 ¹⁶
EE region	R > 120 cm	120 > R > 75 cm	R < 75 cm
FH region	R > 100 cm	100 > R > 60 cm	R < 60 cm
Si wafer area (m ²)	290	203	96
Cell size (cm ²)	1.05	1.05	0.53
Cell capacitance (pF)	40	60	60
Initial S/N for MIP	13.7	7.0	3.5
S/N after 3000 fb ⁻¹	6.5	2.7	1.7