

CMS の Bファクトリー化 プロジェクトとその成果

基研研究会 素粒子物理学の進展 2021

高橋 悠太 (Zurich)

参考文献：

<http://cds.cern.ch/record/2704495?ln=en>

<http://cds.cern.ch/record/002725233?ln=en>

CMS の Bファクトリー化 プロジェクトと~~その成果~~

今年度の Moriond くらいにはお見せできると思います ...

基研研究会 素粒子物理学の進展 2021

高橋 悠太 (Zurich)

参考文献：

<http://cds.cern.ch/record/2704495?ln=en>

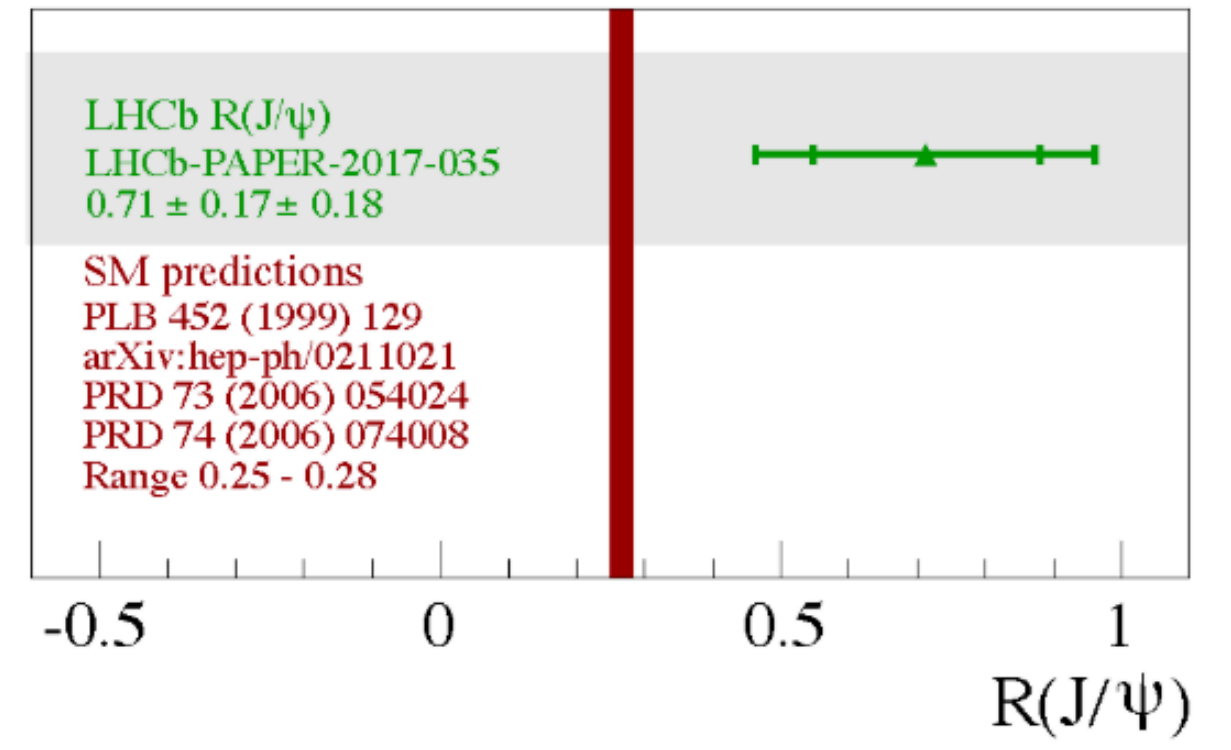
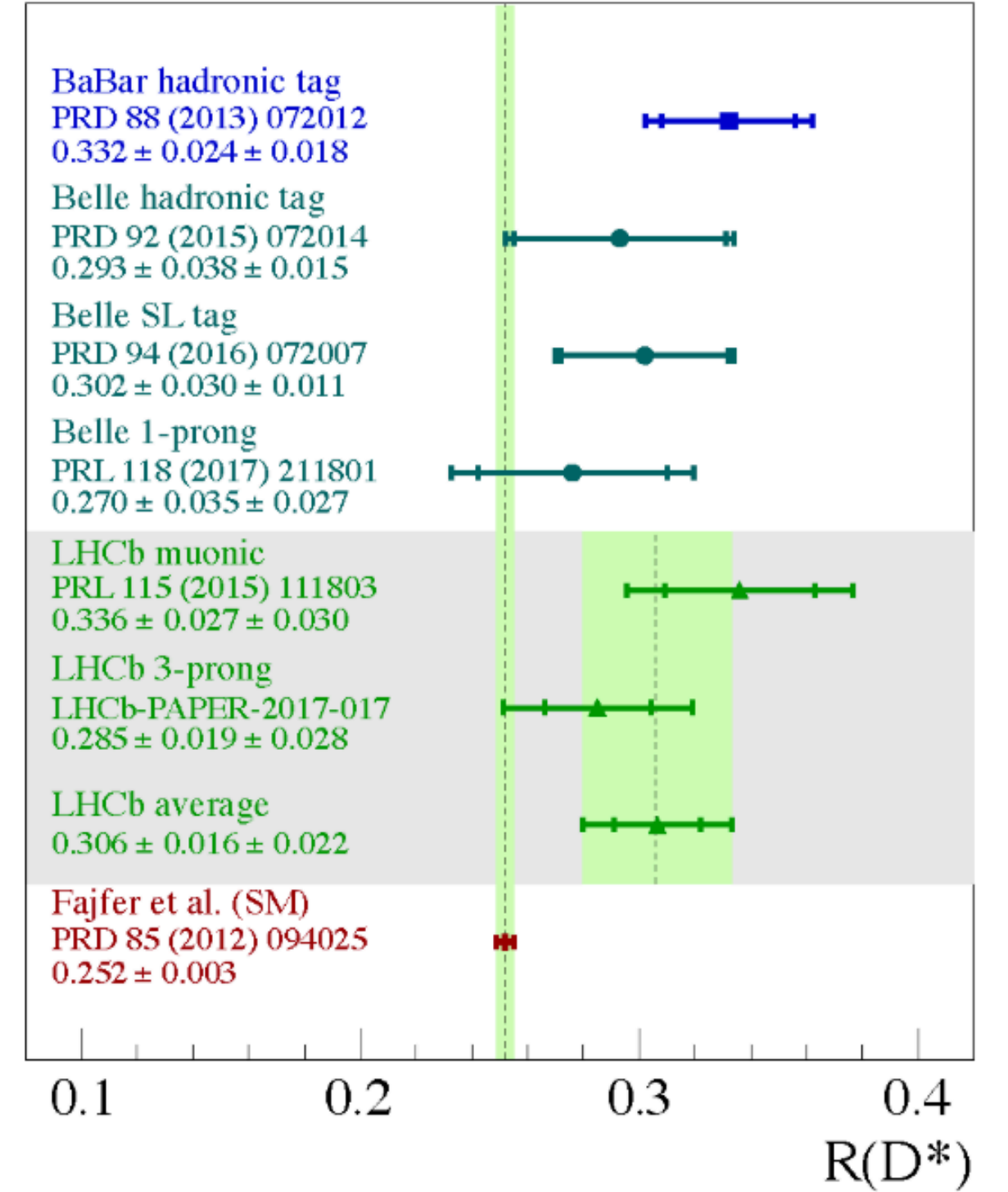
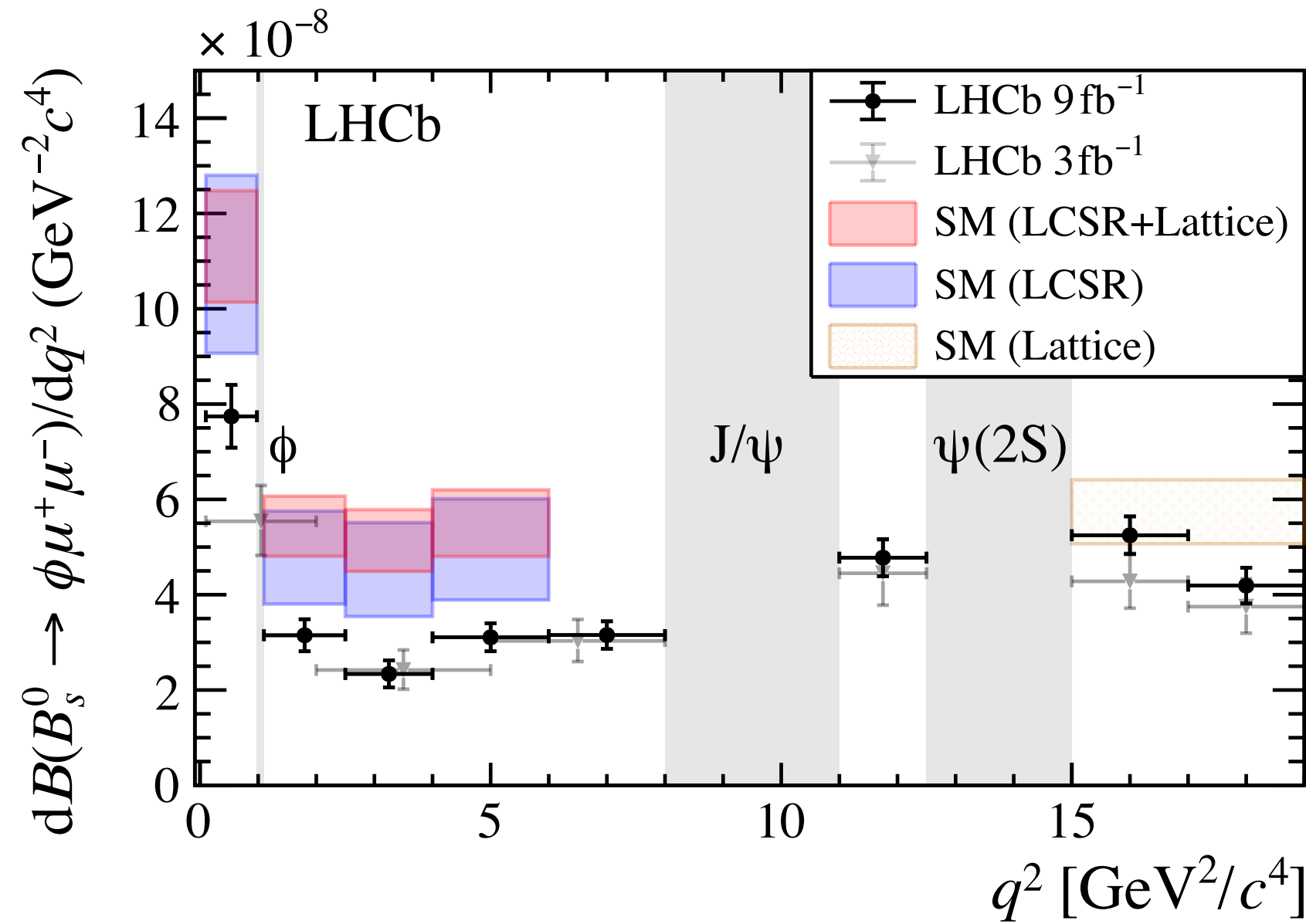
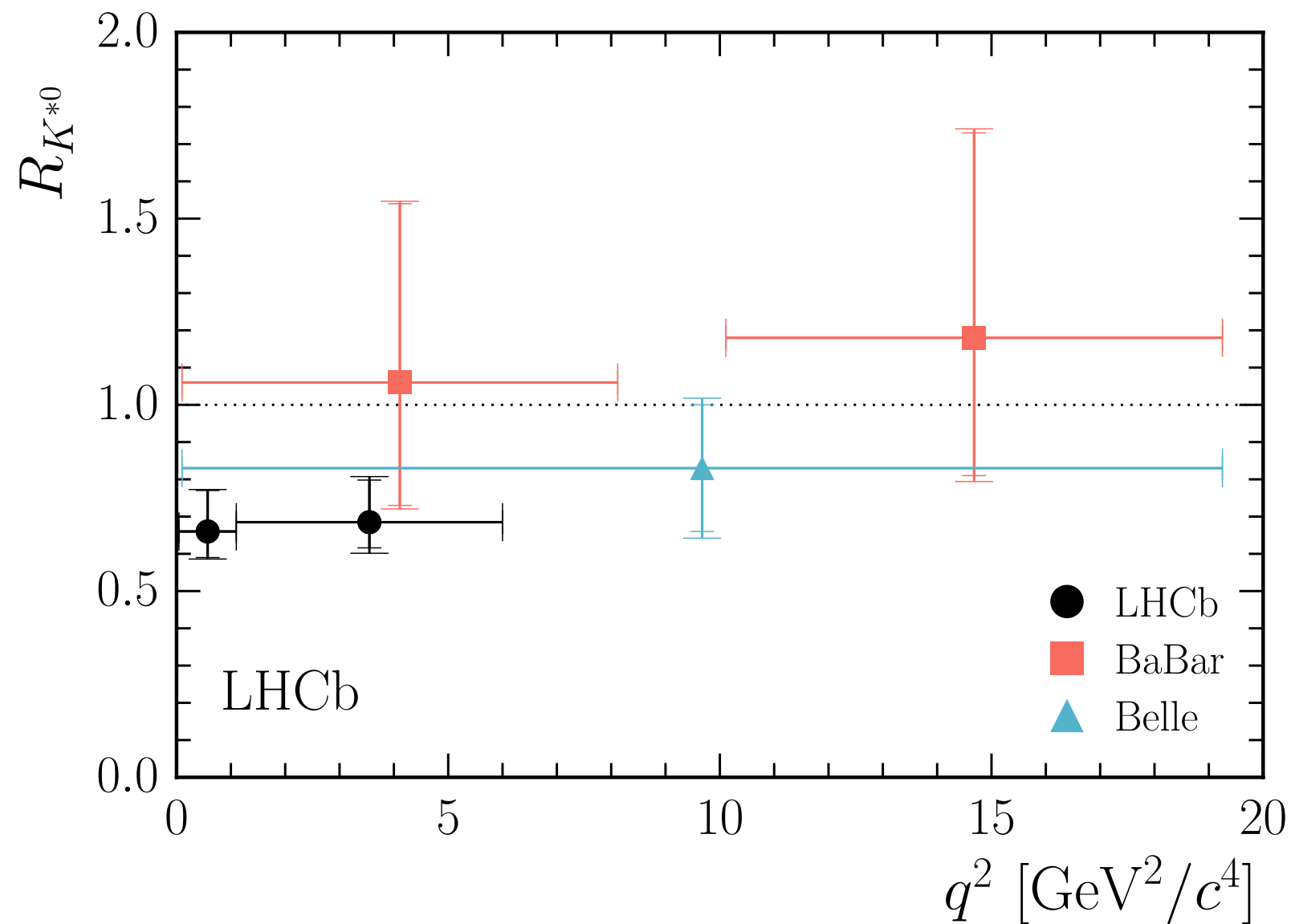
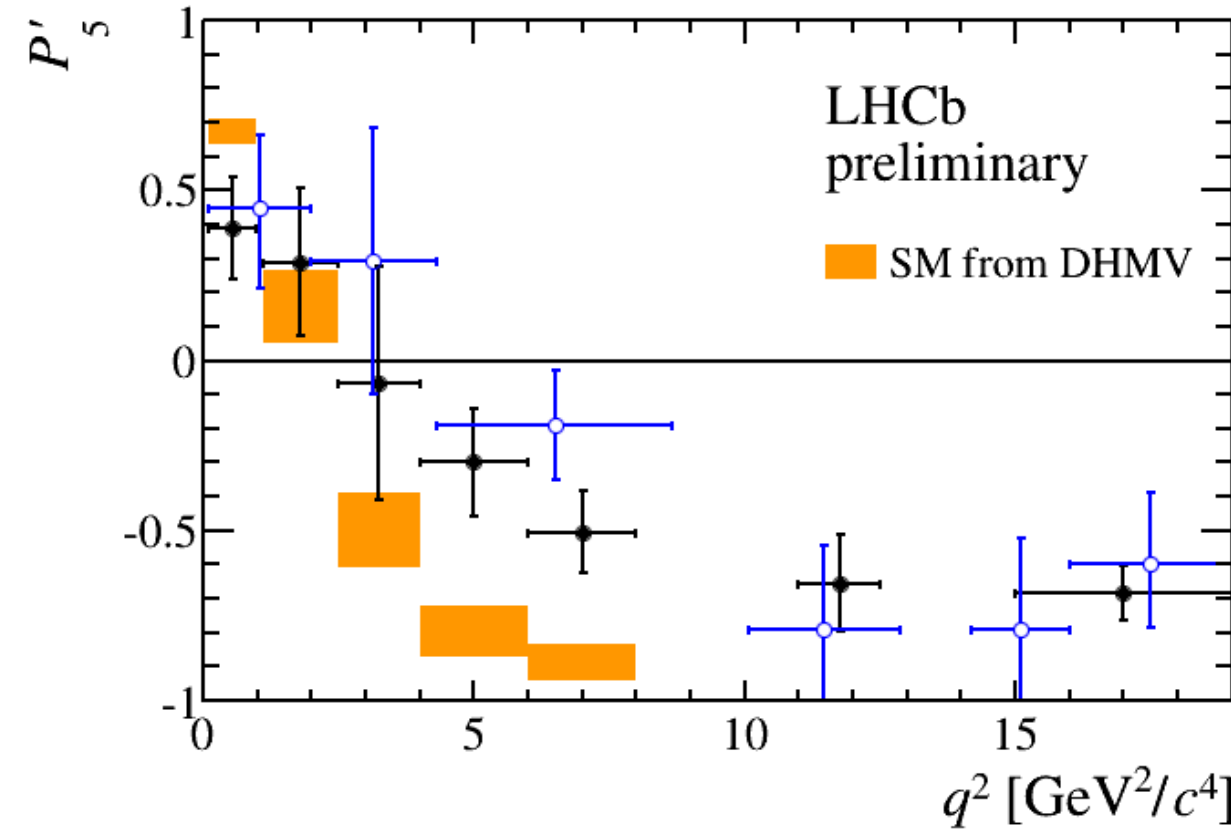
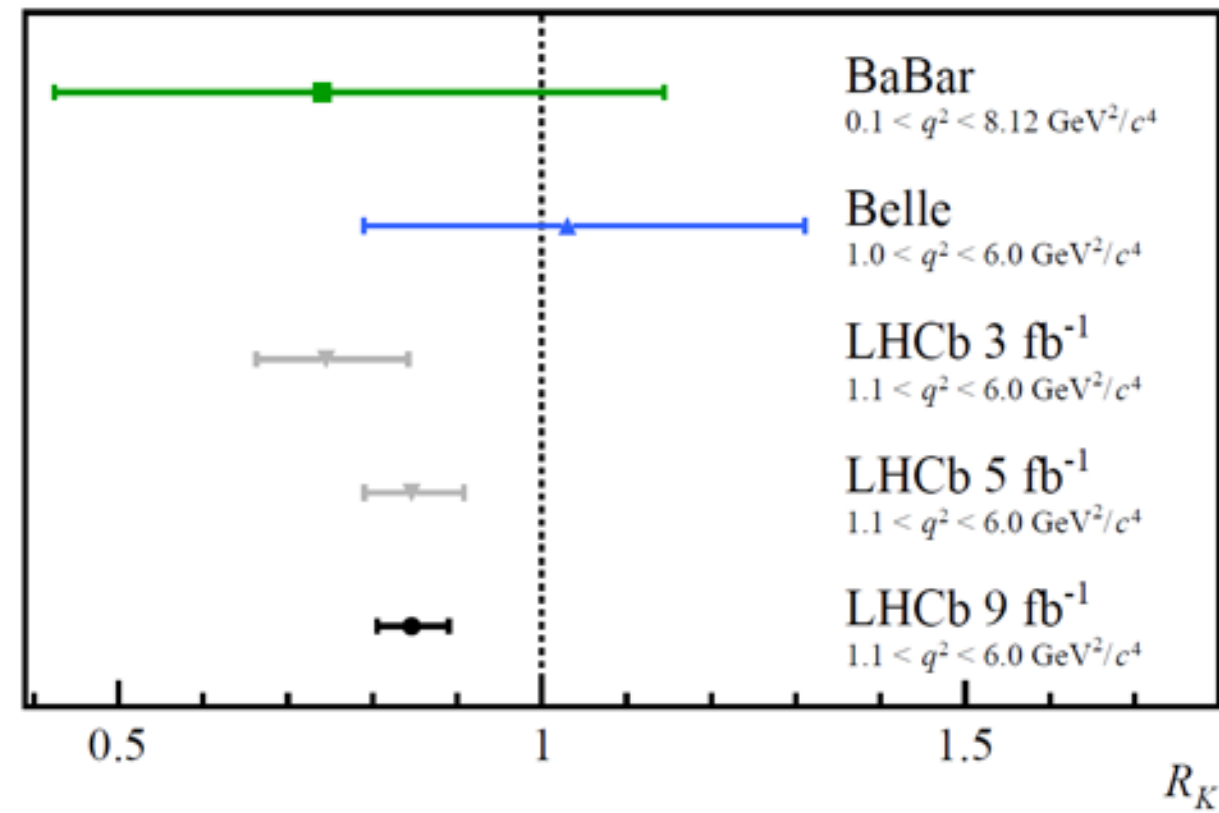
<http://cds.cern.ch/record/002725233?ln=en>

なぜ CMS で B ファクトリー化プロジェクト？

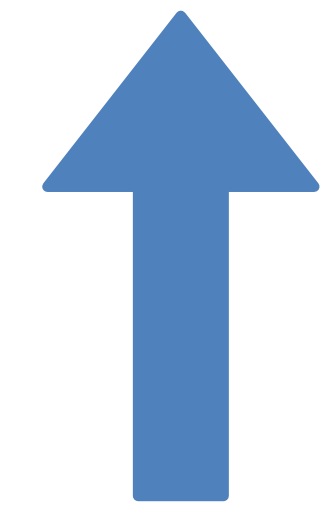
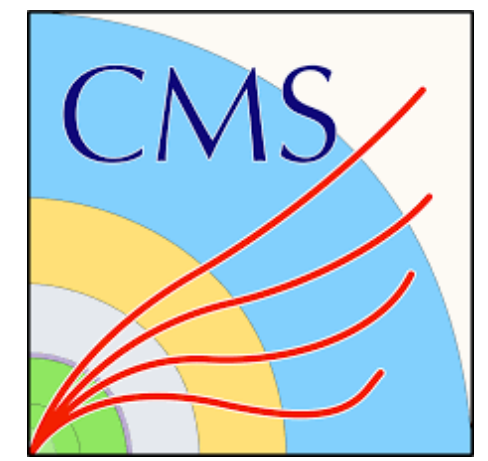
$b \rightarrow c\tau\nu$

背景にあるのは、B 中間子アノマリー

$b \rightarrow s\mu\mu$



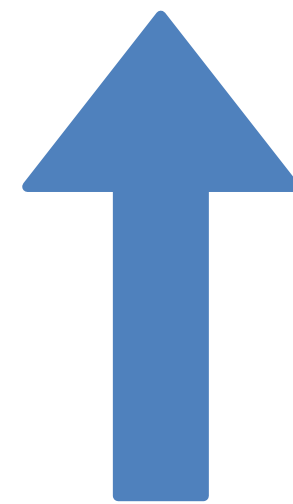
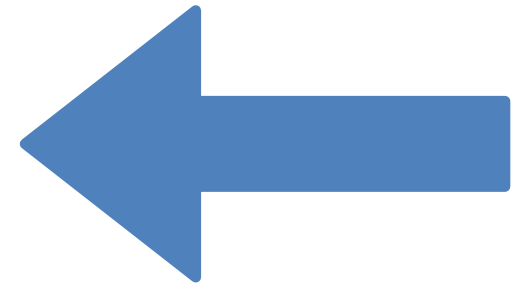
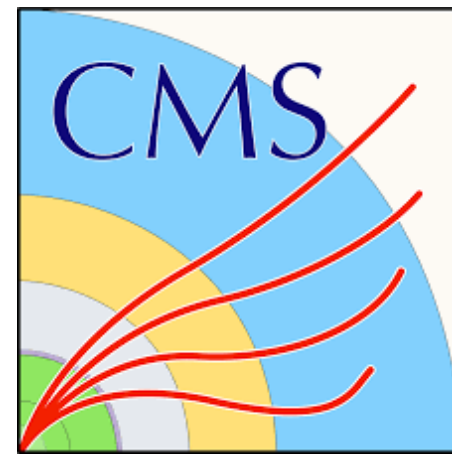
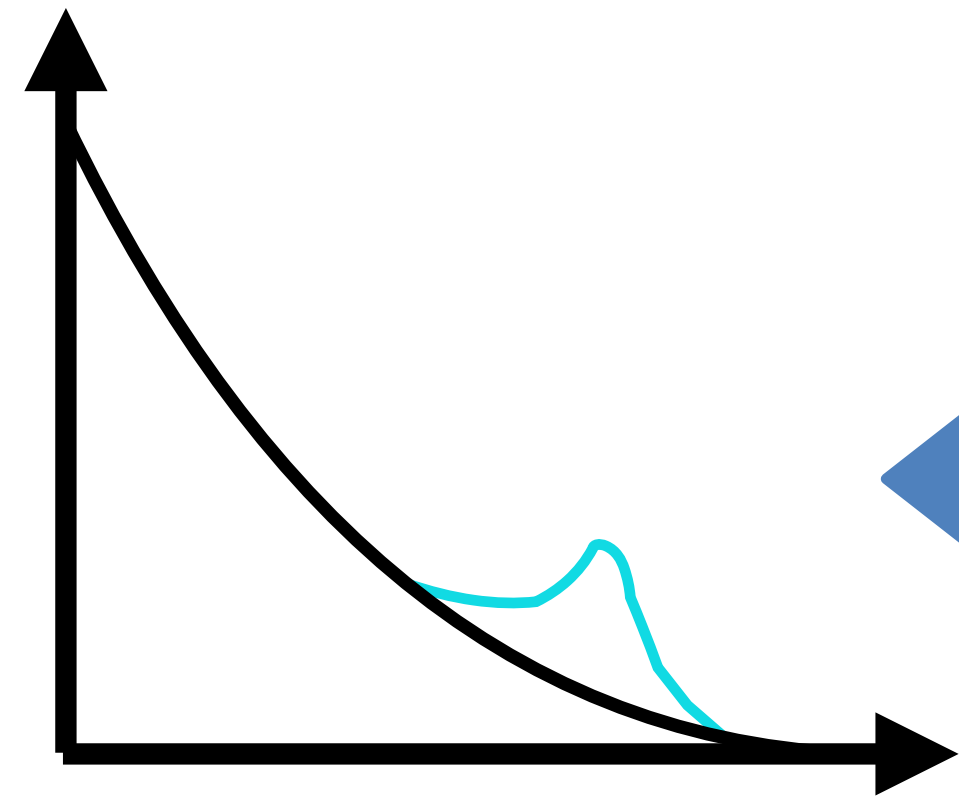
コヒーレント。特に $b \rightarrow c\tau\nu$ アノマリーは“数TeV”の比較的軽い新粒子を示唆 → ATLAS, CMS にとっては直接探索の格好の標的



B 中間子アノマリー

(十八番) 直接生成による探索

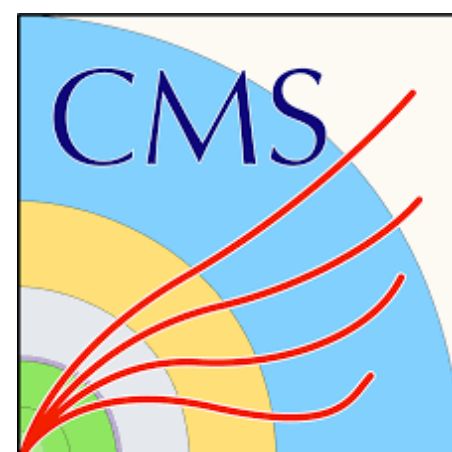
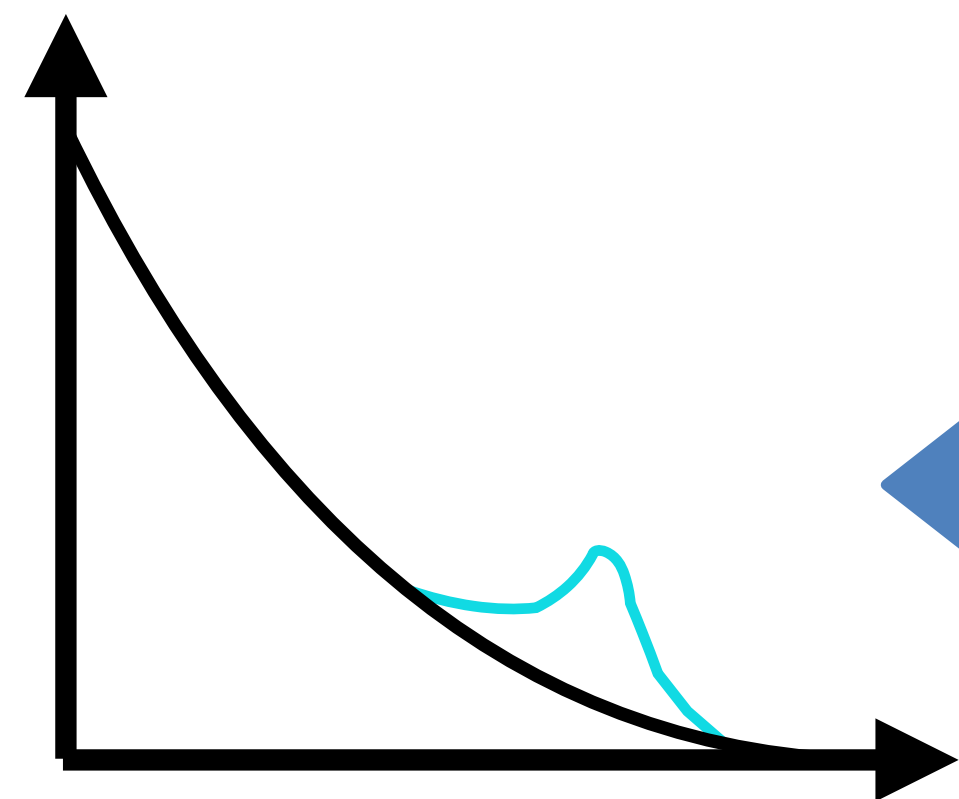
$$q^2 > m_{NP}^2$$



B 中間子アノマリー

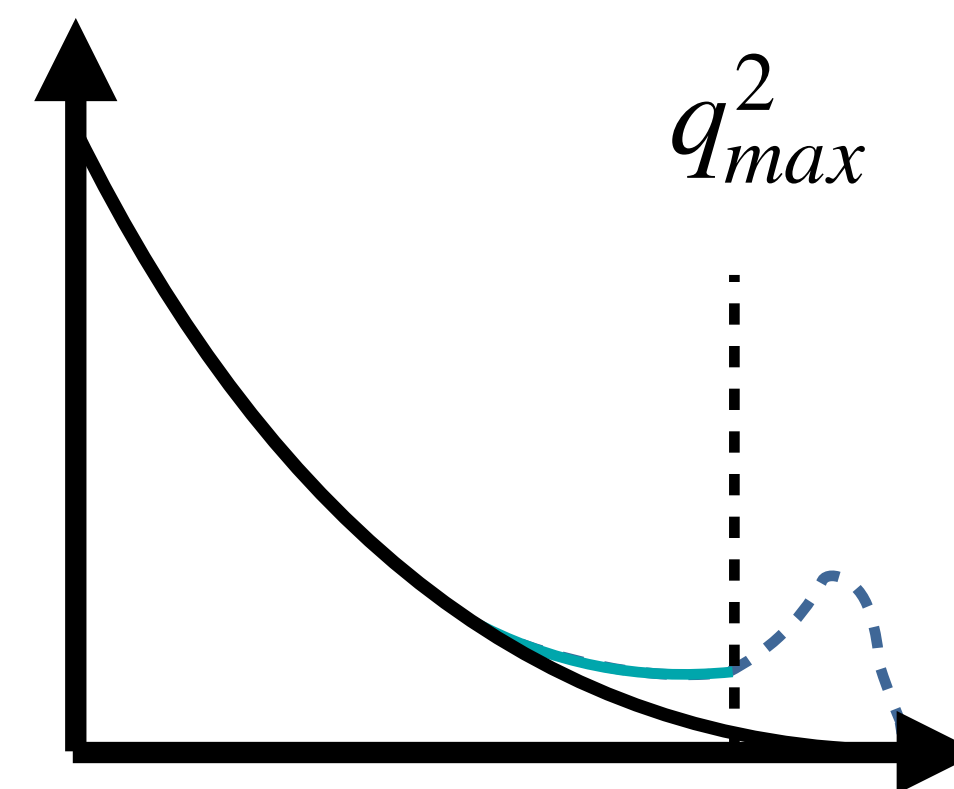
(十八番) 直接生成による探索

$$q^2 > m_{NP}^2$$



$$q^2 < m_{NP}^2$$

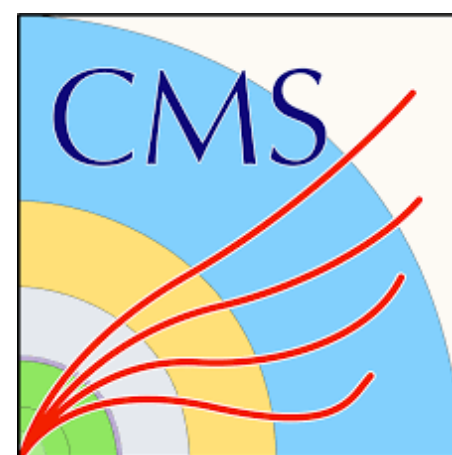
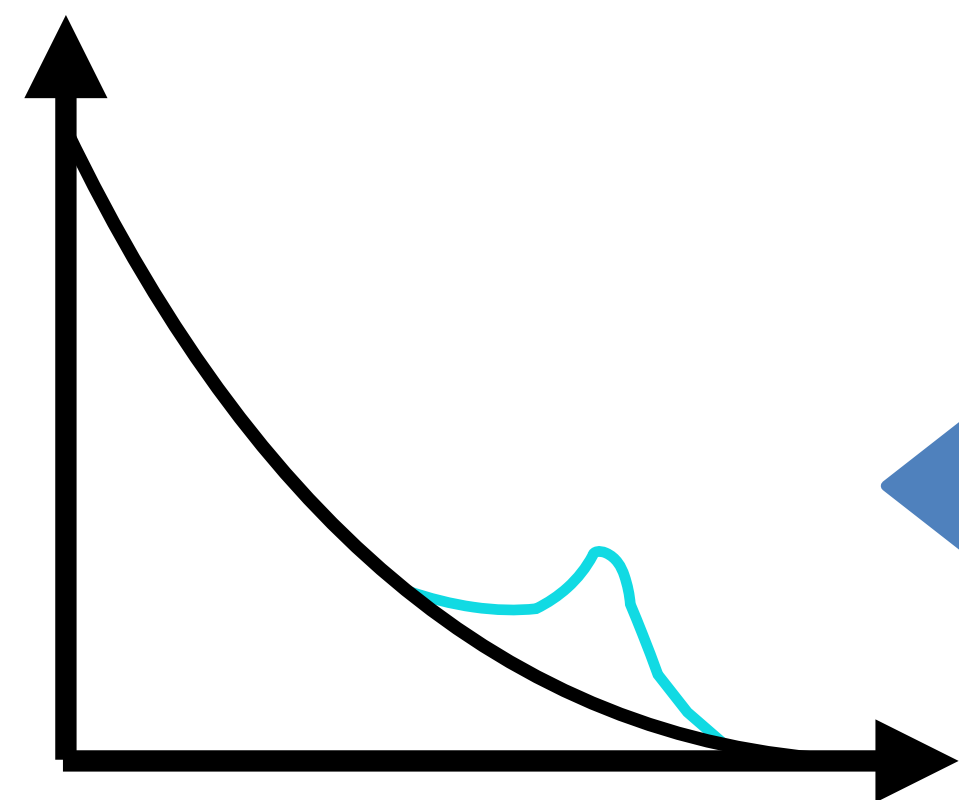
オフシエル生成による探索



B 中間子アノマリー

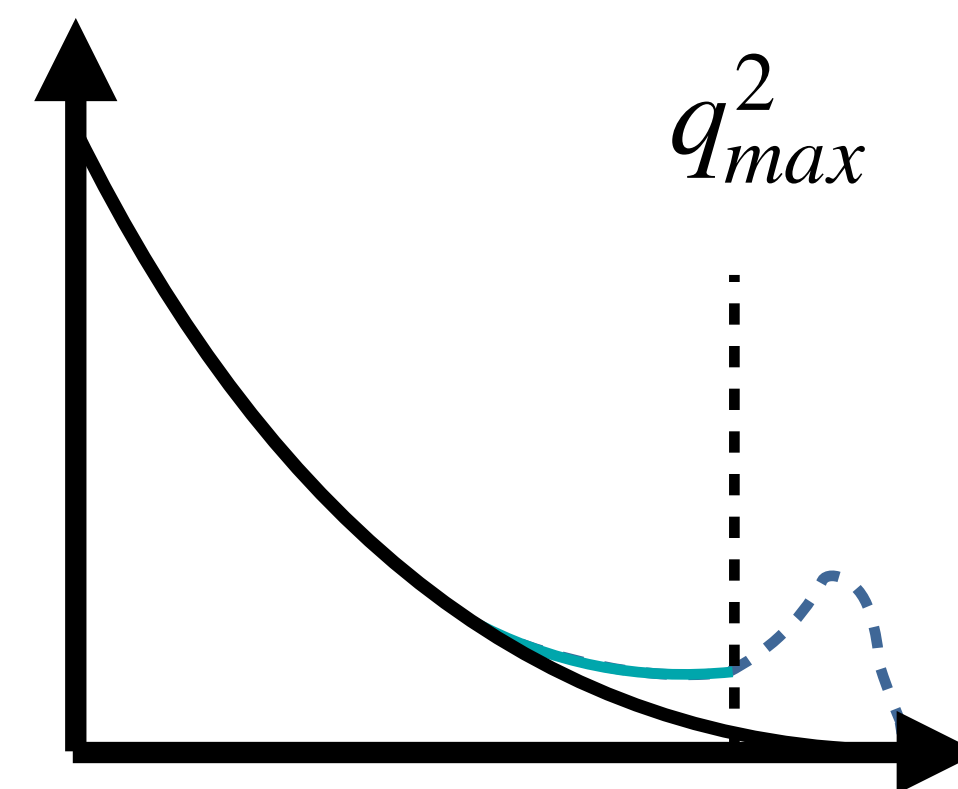
(十八番) 直接生成による探索

$$q^2 > m_{NP}^2$$



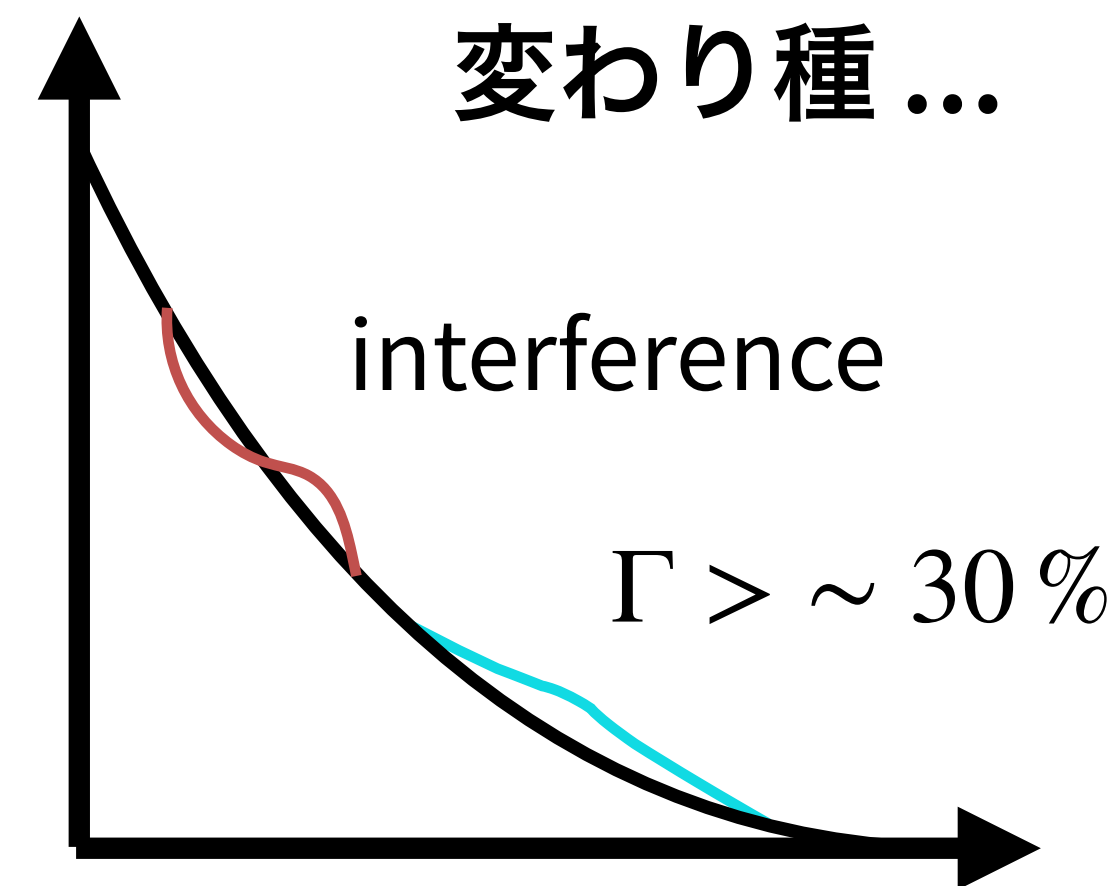
$$q^2 < m_{NP}^2$$

オフシエル生成による探索



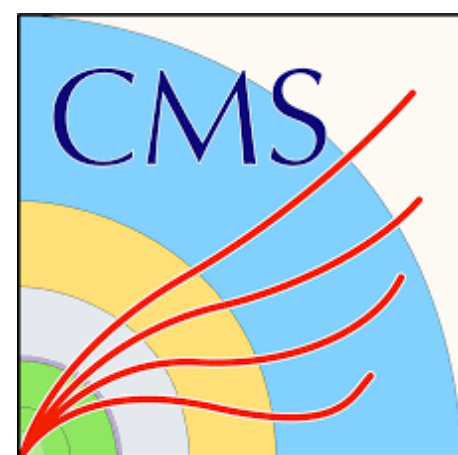
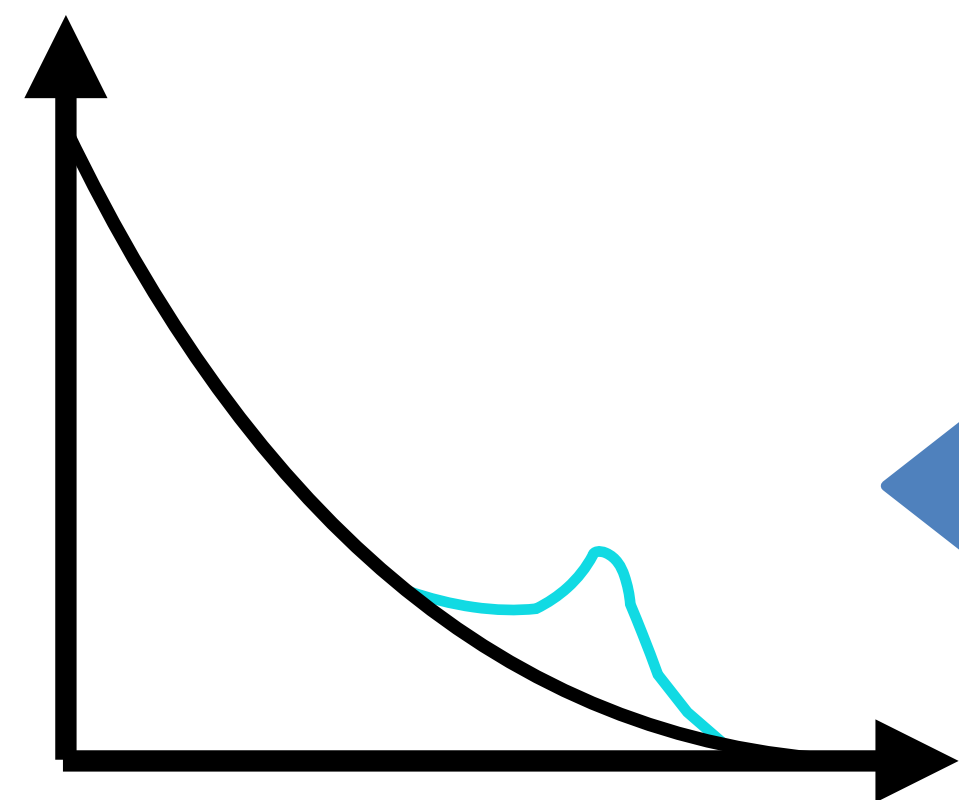
B 中間子アノマリー

変わり種...



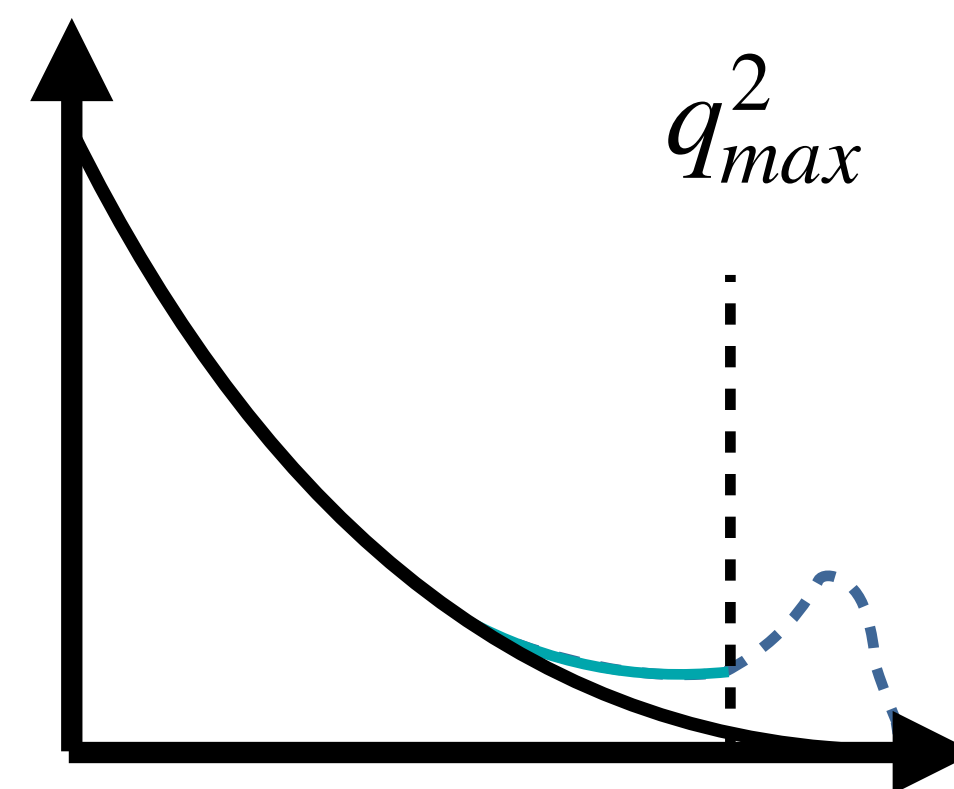
(十八番) 直接生成による探索

$$q^2 > m_{NP}^2$$



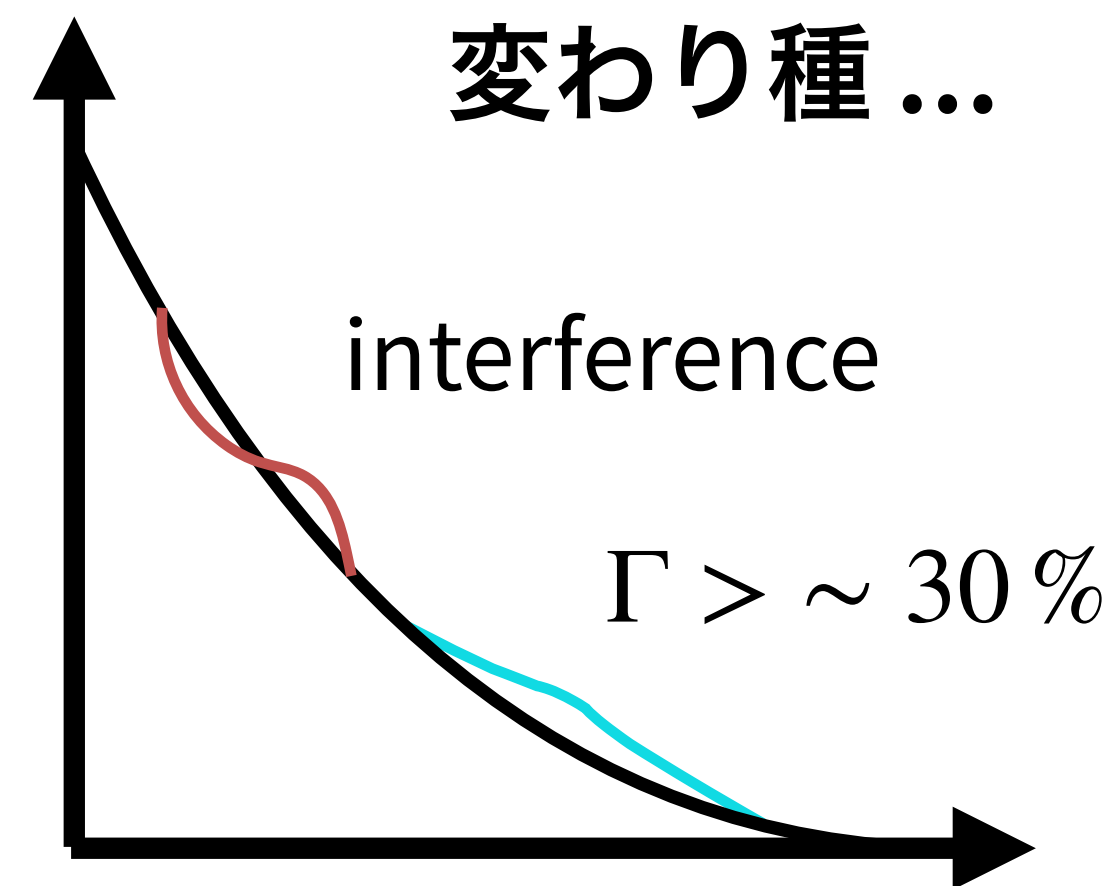
$$q^2 < m_{NP}^2$$

オフシエル生成による探索



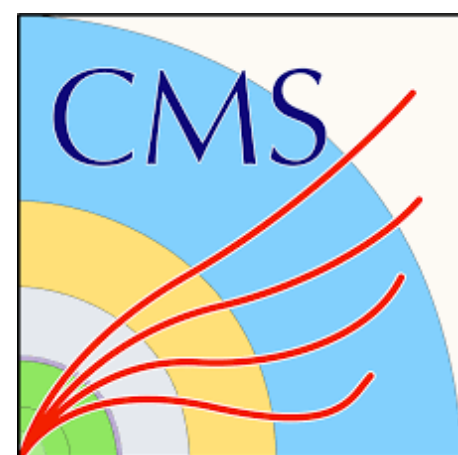
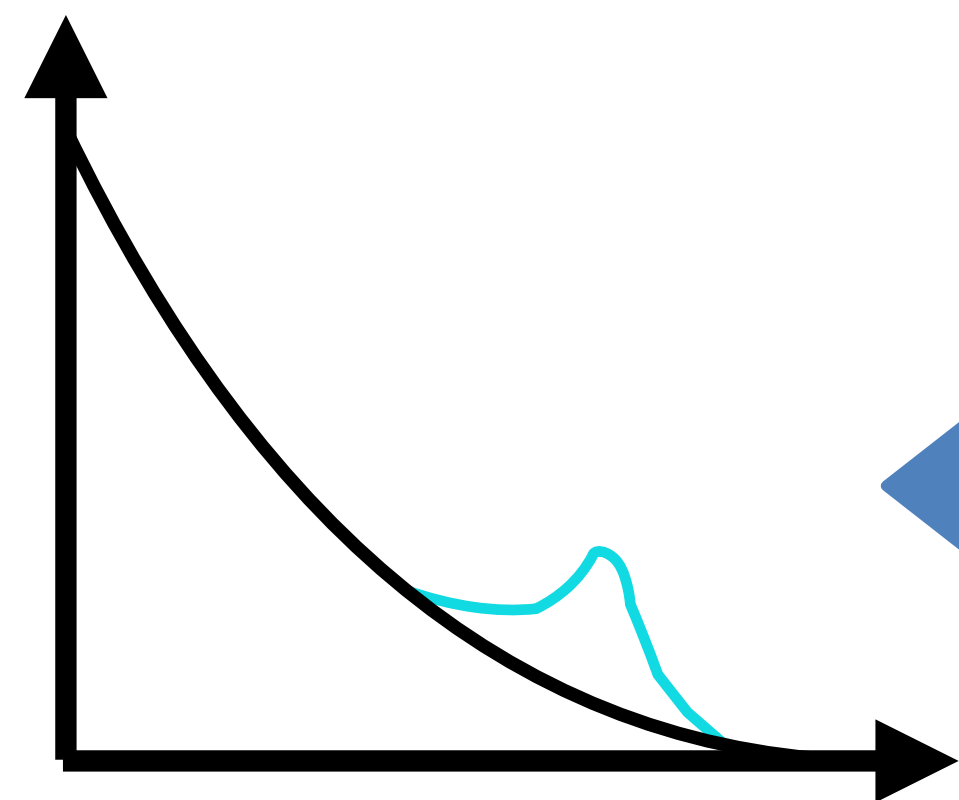
B 中間子アノマリー

変わり種 ...



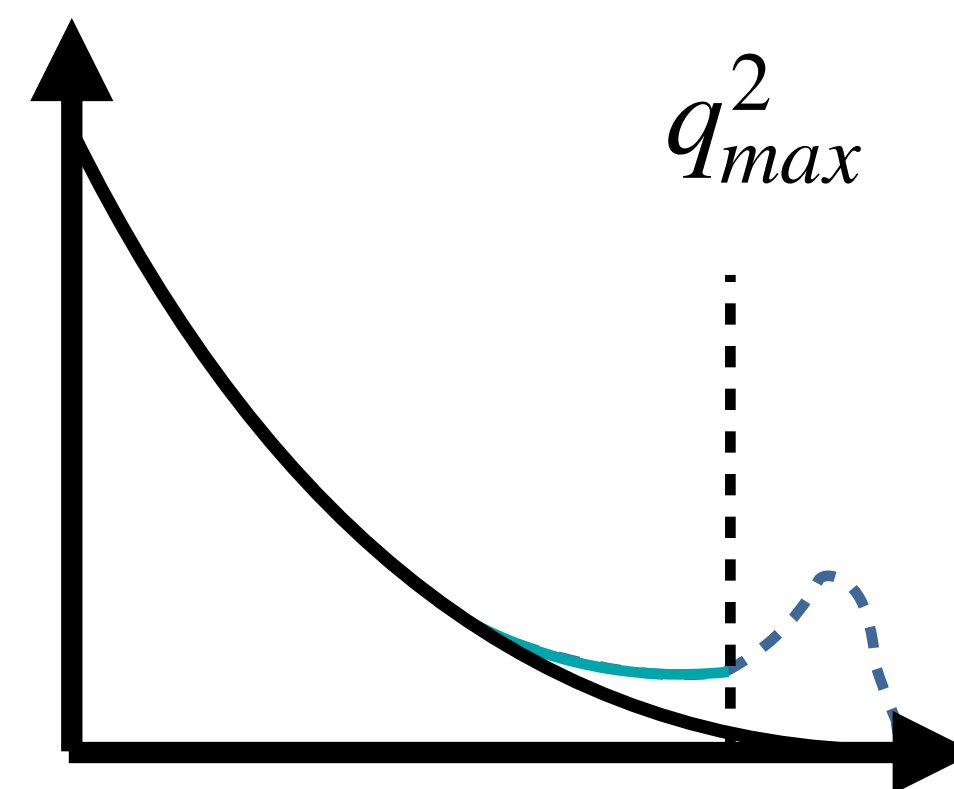
(十八番) 直接生成による探索

$$q^2 > m_{NP}^2$$



$$q^2 < m_{NP}^2$$

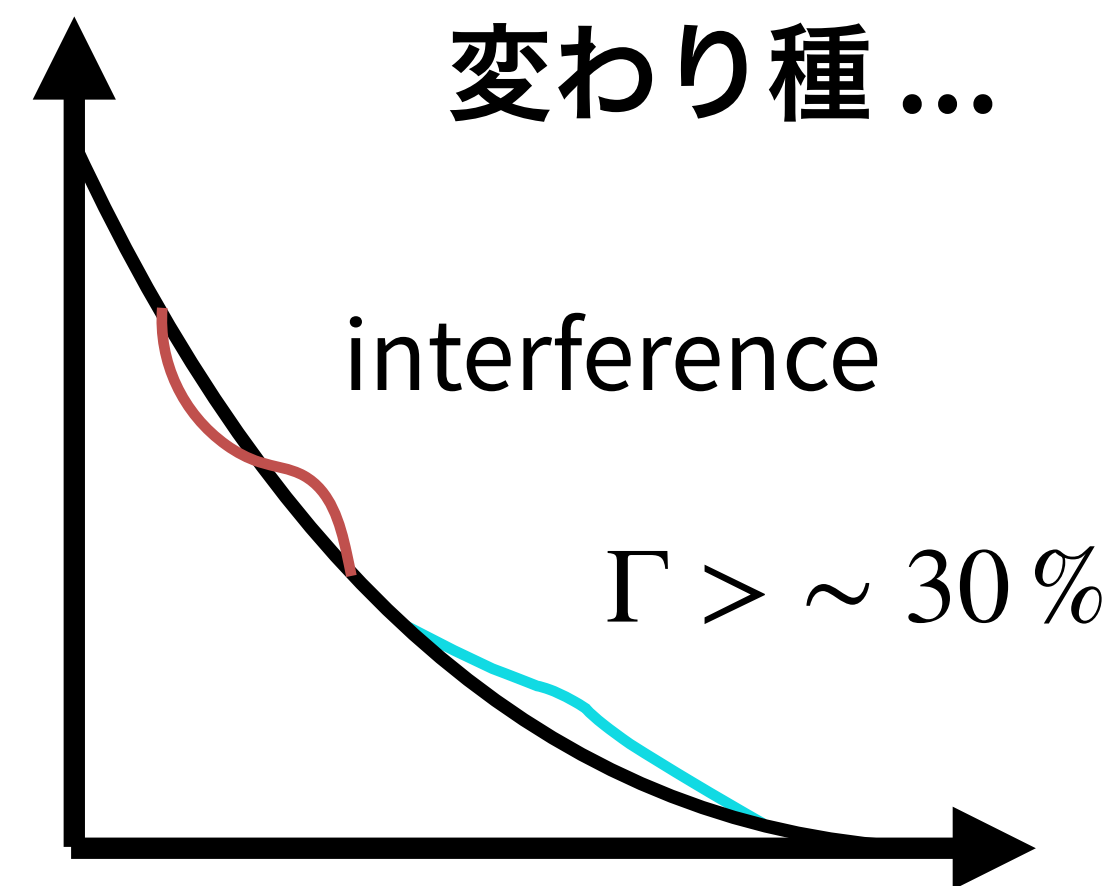
オフシエル生成による探索



B 中間子アノマリー

$$q^2 \sim m_B^2$$

変わり種 ...



CMS で大量の B 中間子イベントを取得したい

Q: いくつの B 中間子生成事象 (主に $b\bar{b}$ 対生成による) が必要？

CMS で大量の B 中間子イベントを取得したい

Q: いくつの B 中間子生成事象 (主に $b\bar{b}$ 対生成による) が必要?

- **$B \rightarrow Kee$ を 50 イベント蓄えたい (統計誤差 $\sqrt{50} / 50 \sim 15\%$)**
- **事象選別効率を 5% とすると、 $B \rightarrow Kee$ 事象を 1000 イベント捕まえる必要あり**

CMS で大量の B 中間子イベントを取得したい

Q: いくつの B 中間子生成事象 (主に $b\bar{b}$ 対生成による) が必要?

- **B \rightarrow Kee を 50 イベント蓄えたい (統計誤差 $\sqrt{50} / 50 \sim 15\%$)**
- **事象選別効率を 5% とすると、B \rightarrow Kee 事象を 1000 イベント捕まえる必要あり**
- **B \rightarrow Kee の $Br = 4.5 \times 10^{-7}$ なので、オーダーにして 10^{10} の $b\bar{b}$ 事象が必要**

CMS で大量の B 中間子イベントを取得したい

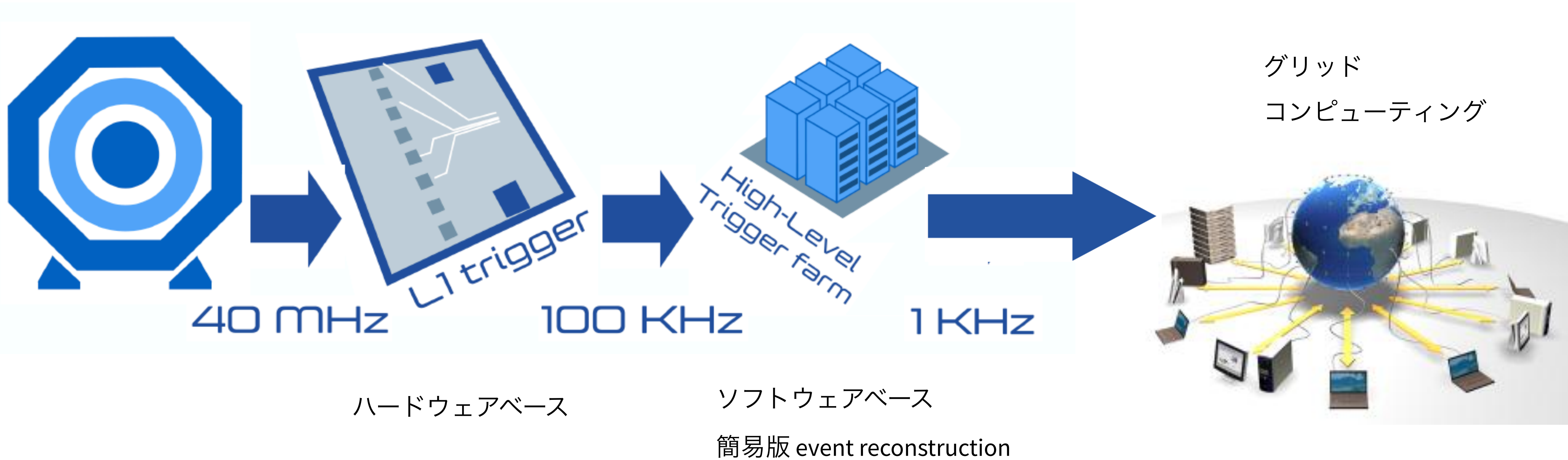
Q: いくつの B 中間子生成事象 (主に $b\bar{b}$ 対生成による) が必要?

- $B \rightarrow Kee$ を 50 イベント蓄えたい (統計誤差 $\sqrt{50} / 50 \sim 15\%$)
- 事象選別効率を 5% とすると、 $B \rightarrow Kee$ 事象を 1000 イベント捕まえる必要あり
- $B \rightarrow Kee$ の $Br = 4.5 \times 10^{-7}$ なので、オーダーにして 10^{10} の $b\bar{b}$ 事象が必要

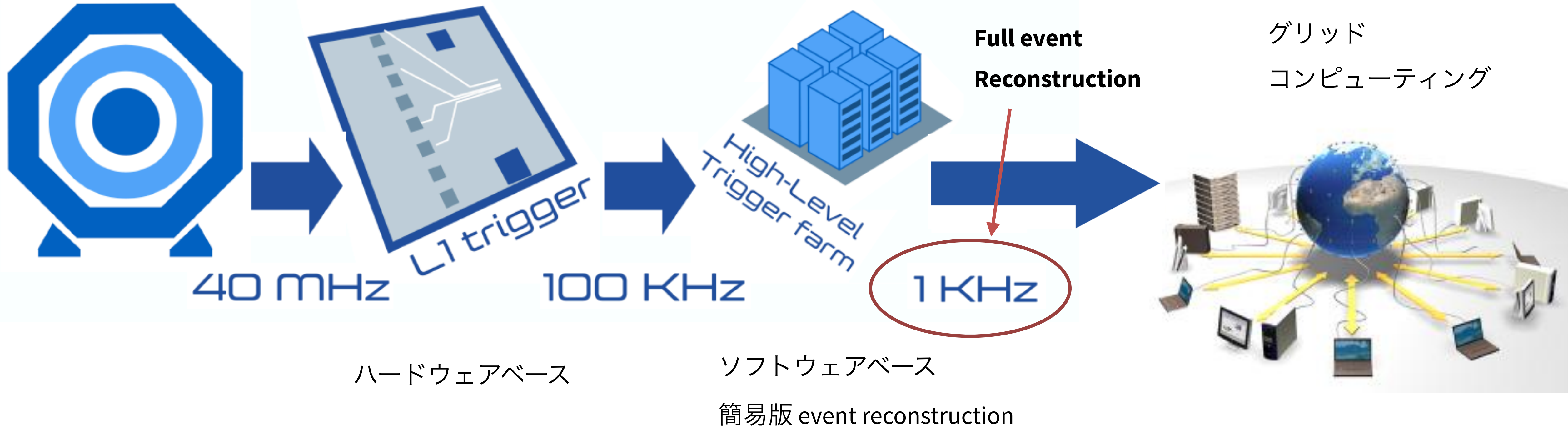
これを 1 年間のデータテイクで実現する場合を考えます (実際、2018 年に B ファクトリー化プロジェクトが発足したのですが、2018 年はラン 2 最後の一年だったので、1 年間で実現する必要があった)

LHC の stable beam は年間 10^7 秒程度なので $O(1\text{kHz})$ のペースで $b\bar{b}$ のデータをとる必要がある → “無茶な要求”

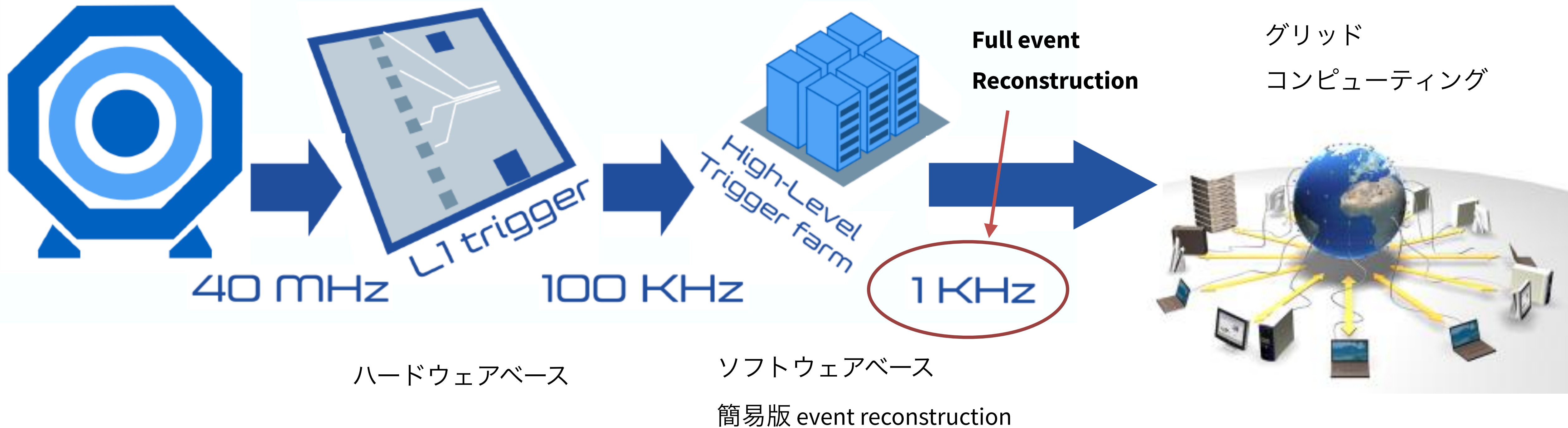
CMS のトリガーシステム



CMS のトリガーシステム

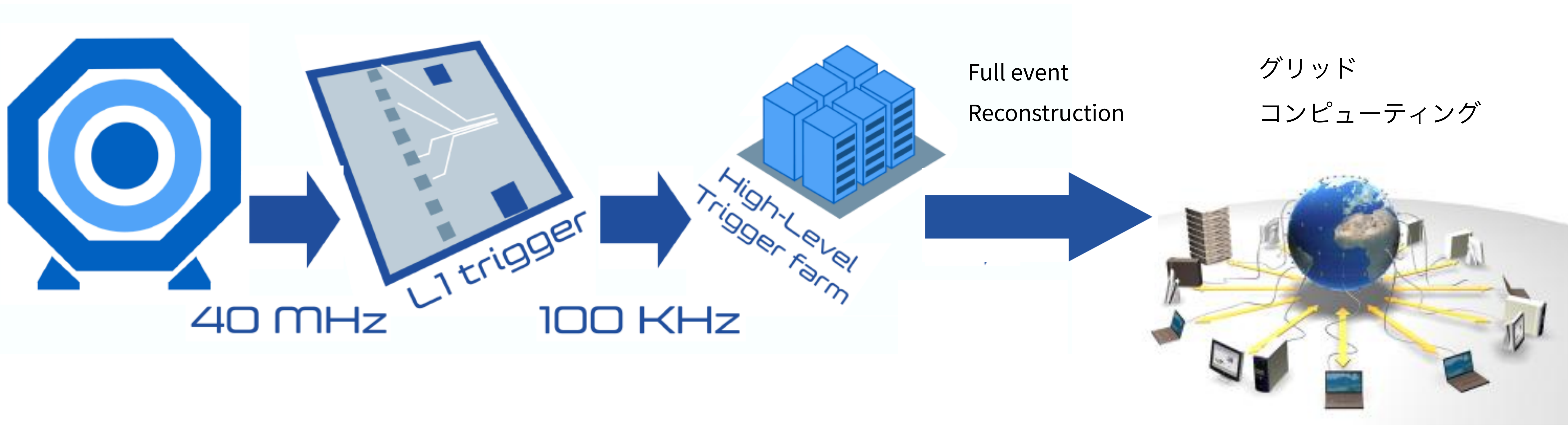


CMS のトリガーシステム



$b\bar{b}$ 事象を 10^{10} イベント蓄積するには、1 kHz でのデータ取得が必要
→ 1 kHz の全バンド幅を“独占”する必要がある → 到底容認できない
(他の物理プログラムを圧迫したくない)

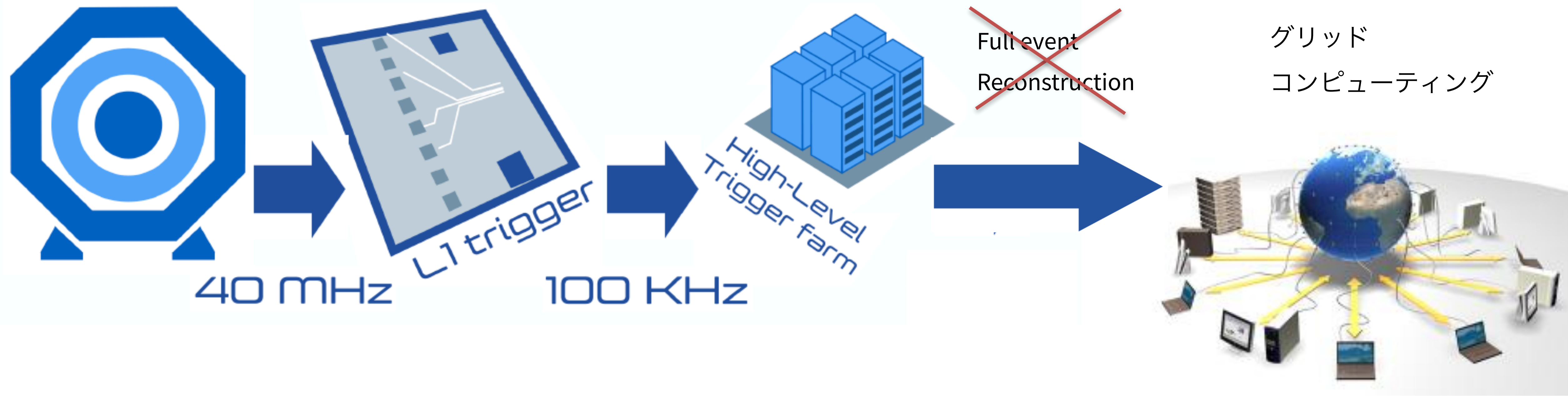
2つのブレイクスルー



2つのブレイクスルー

①

生データのみ保存する
(翌年のシャットダウン中まで full event reco. を延期)



40 MHz

L1 trigger

100 KHz

High-Level Trigger farm

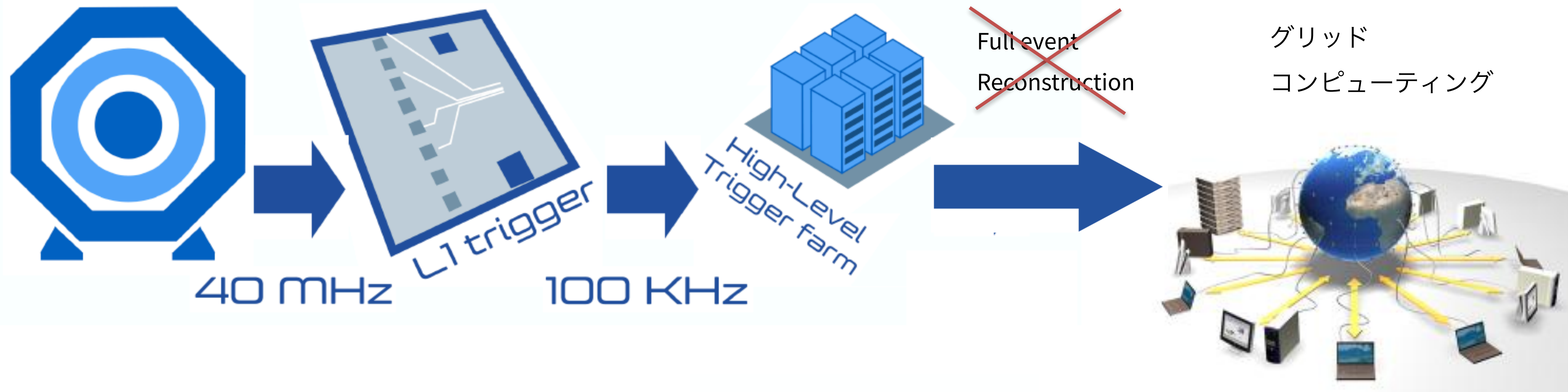
~~Full event Reconstruction~~

グリッド
コンピューティング

2つのブレイクスルー

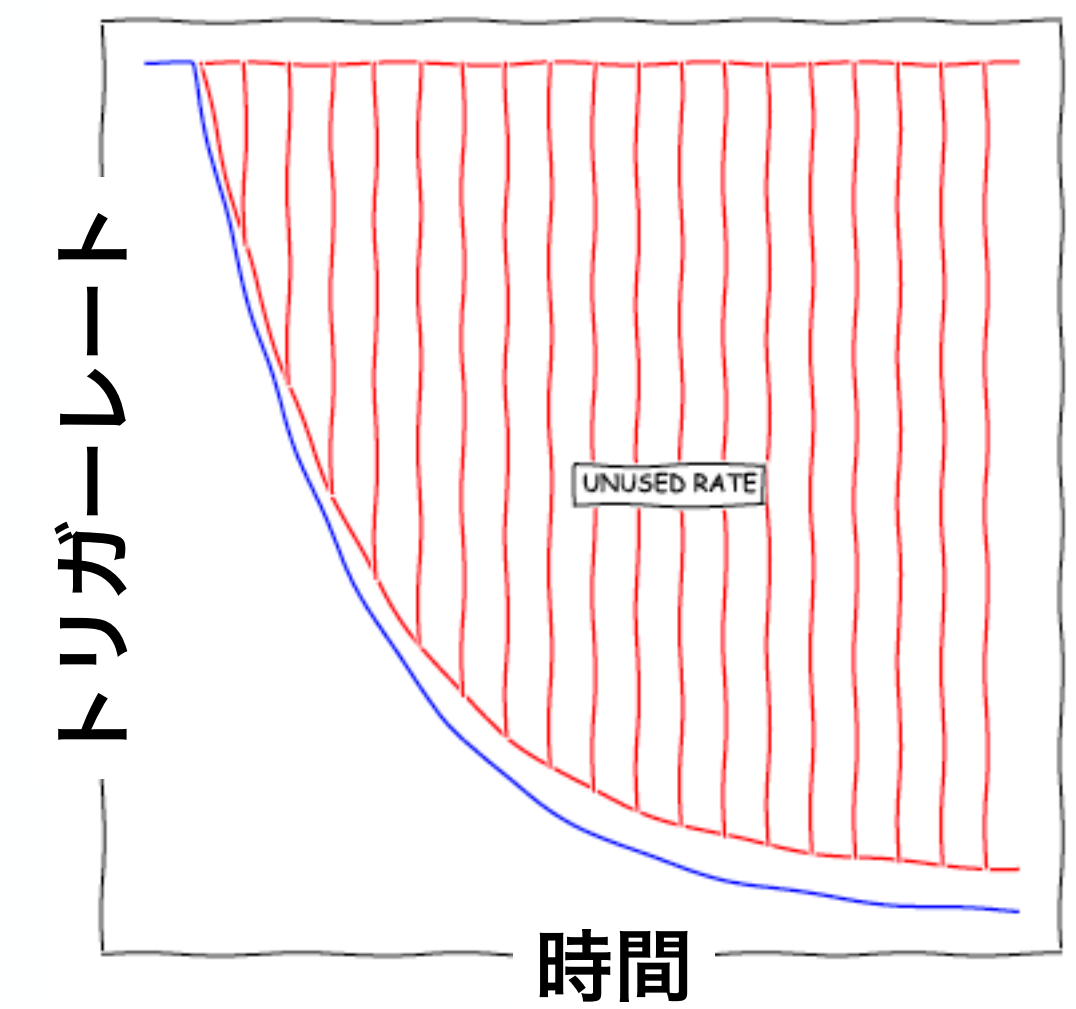
①

生データのみ保存する
(翌年のシャットダウン中まで full event reco. を延期)



②

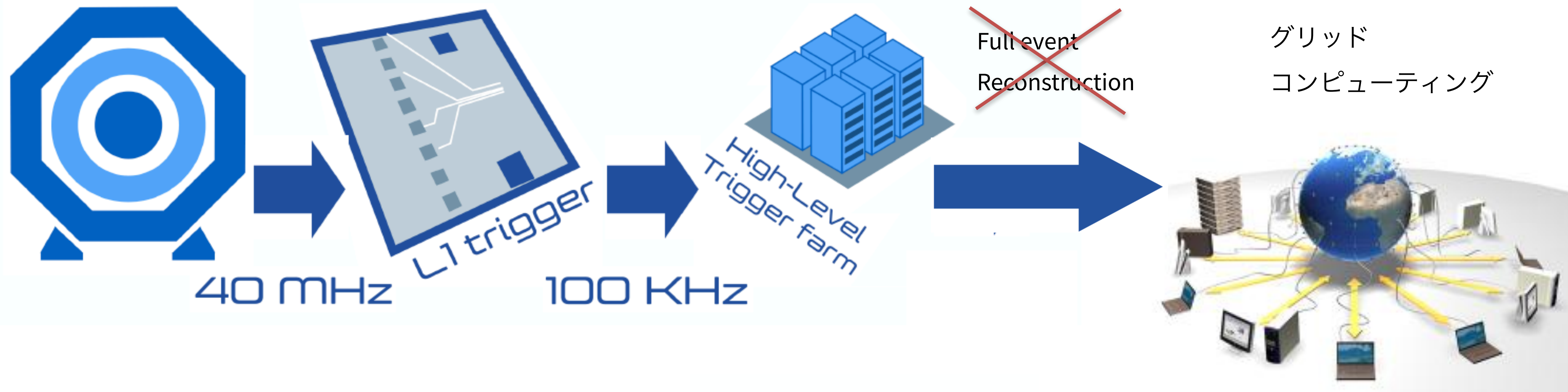
一般に、ビームフィルの後半は
 ルミノシティが低下し、それに伴って
 通常の物理トリガーのレートが下がる。
 この“空いた分”を使って
 bb 事象を捕まえる。



2つのブレイクスルー

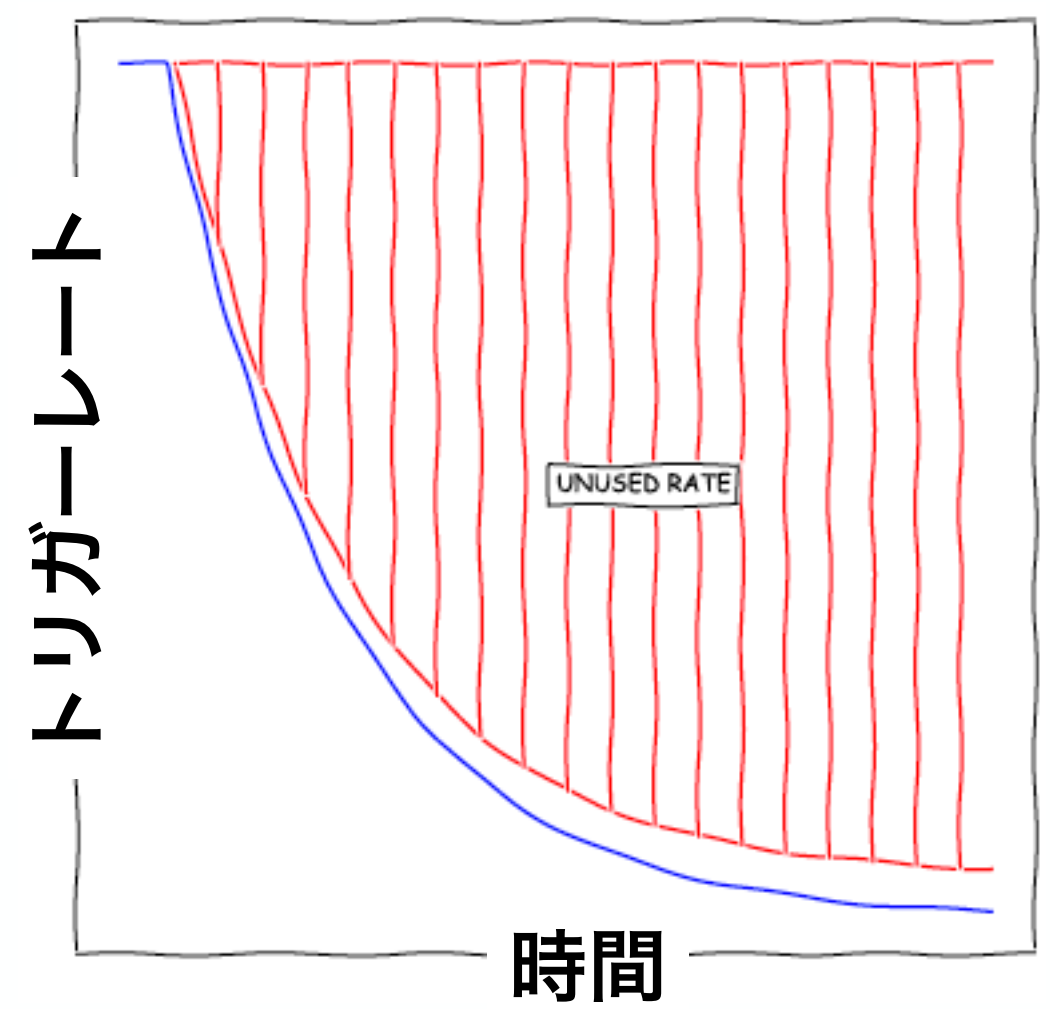
①

生データのみ保存する
(翌年のシャットダウン中まで full event reco. を延期)



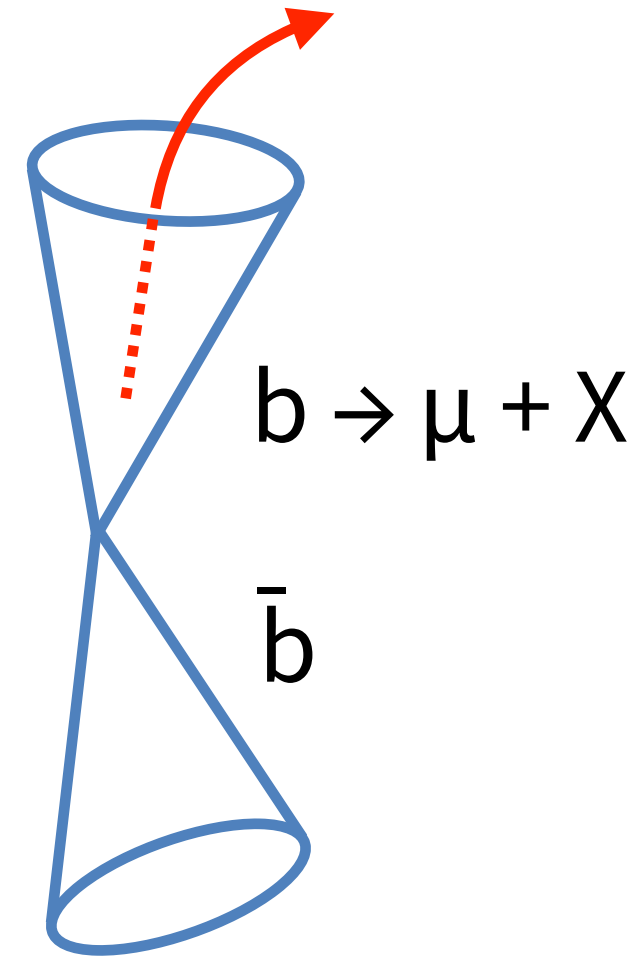
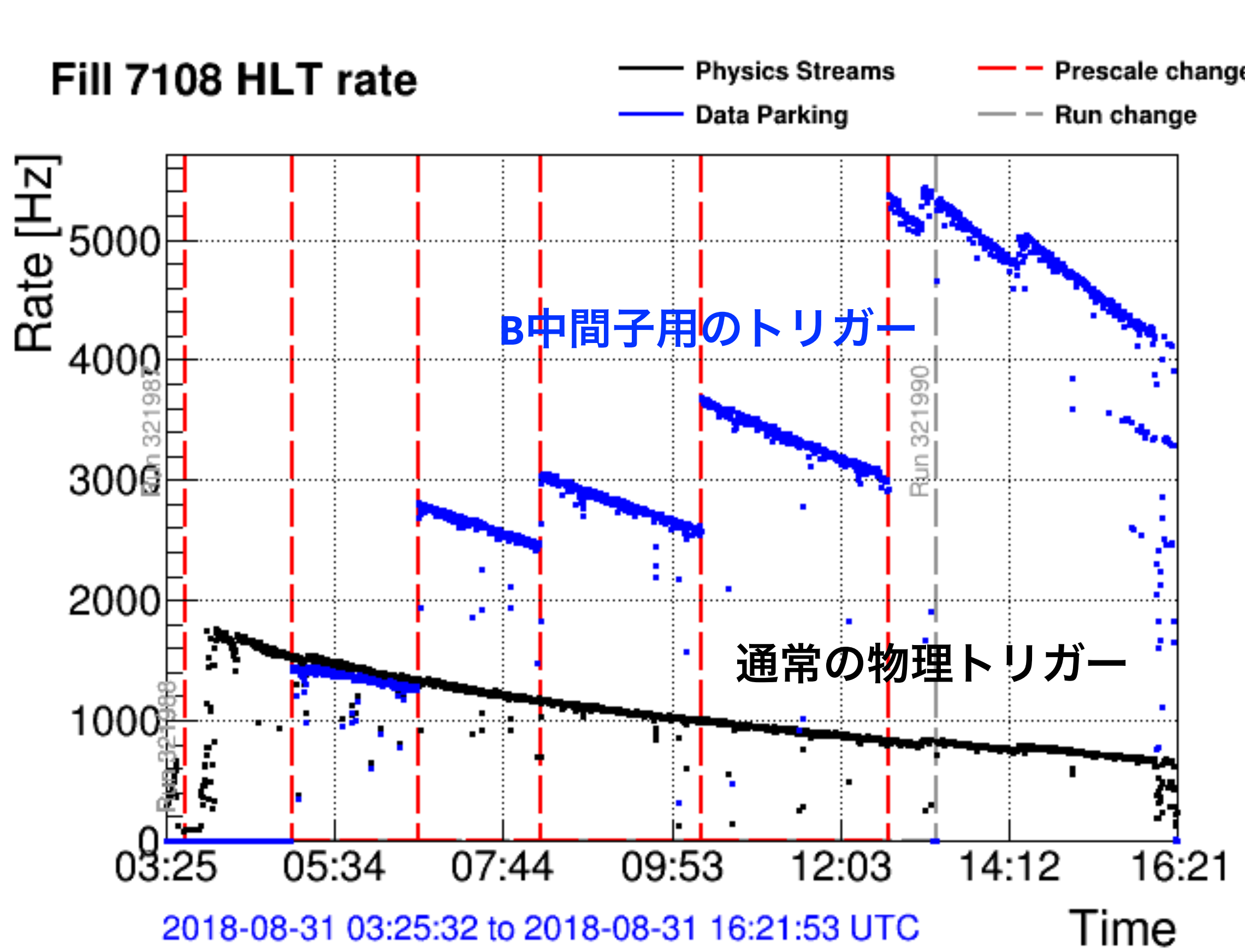
②

一般に、ビームフィルの後半は
 ルミノシティが低下し、それに伴って
 通常の物理トリガーのレートが下がる。
 この“**空いた分**”を使って
 bb 事象を捕まえる。



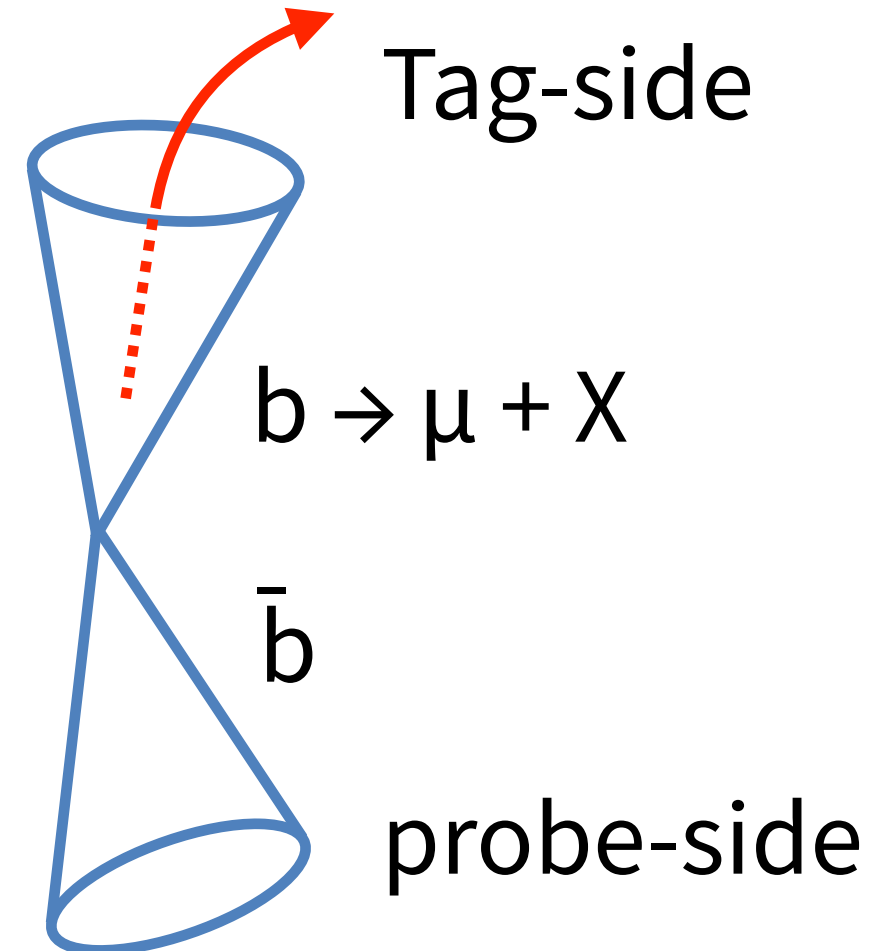
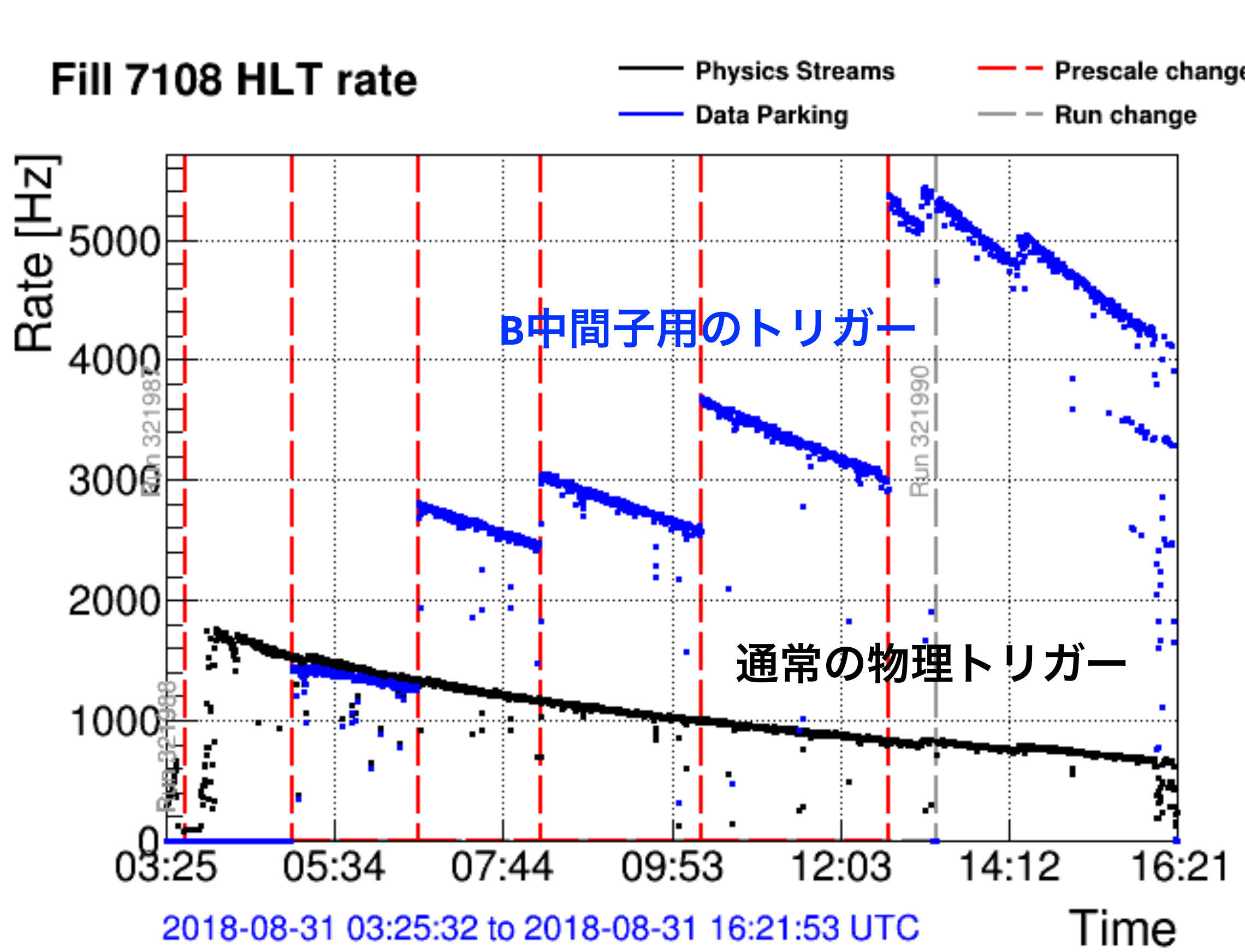
- その他の物理を圧迫しない
- フィルの最後はパイルアップ
 (一回のバンチ交差における衝突数) が
 少ない → データサイズが小さい
 → より高いレートでトリガーできる

2018年、最大 5kHz でのデータ取得に成功



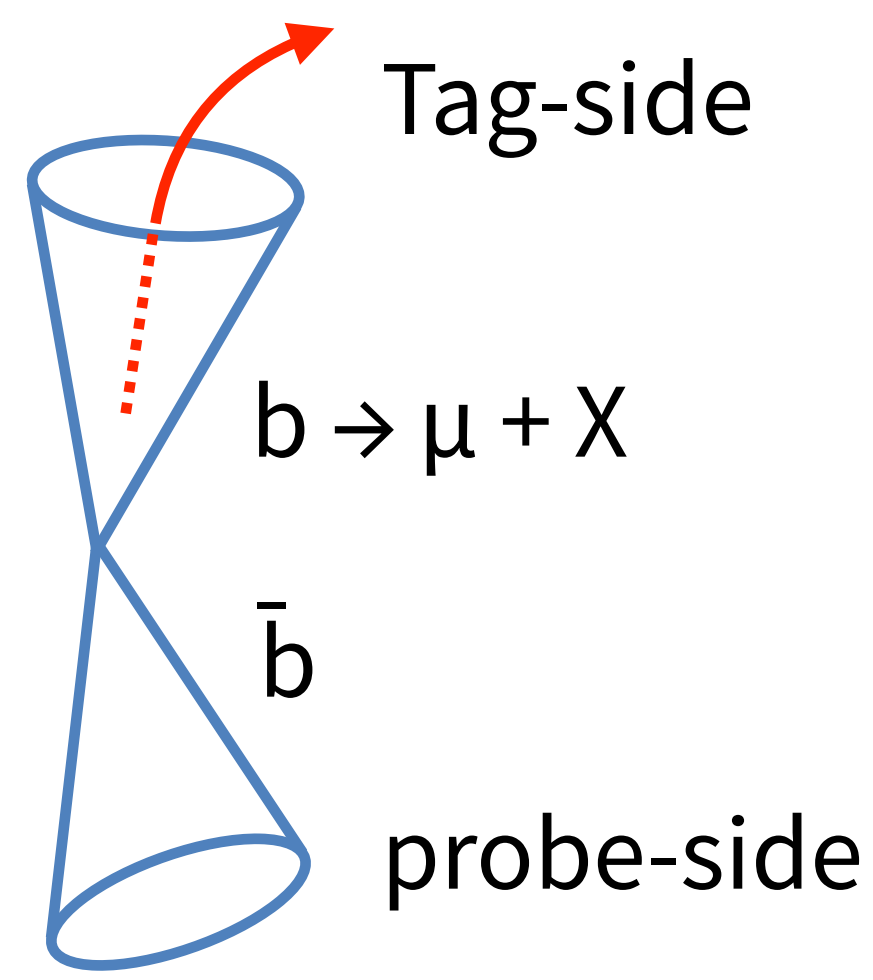
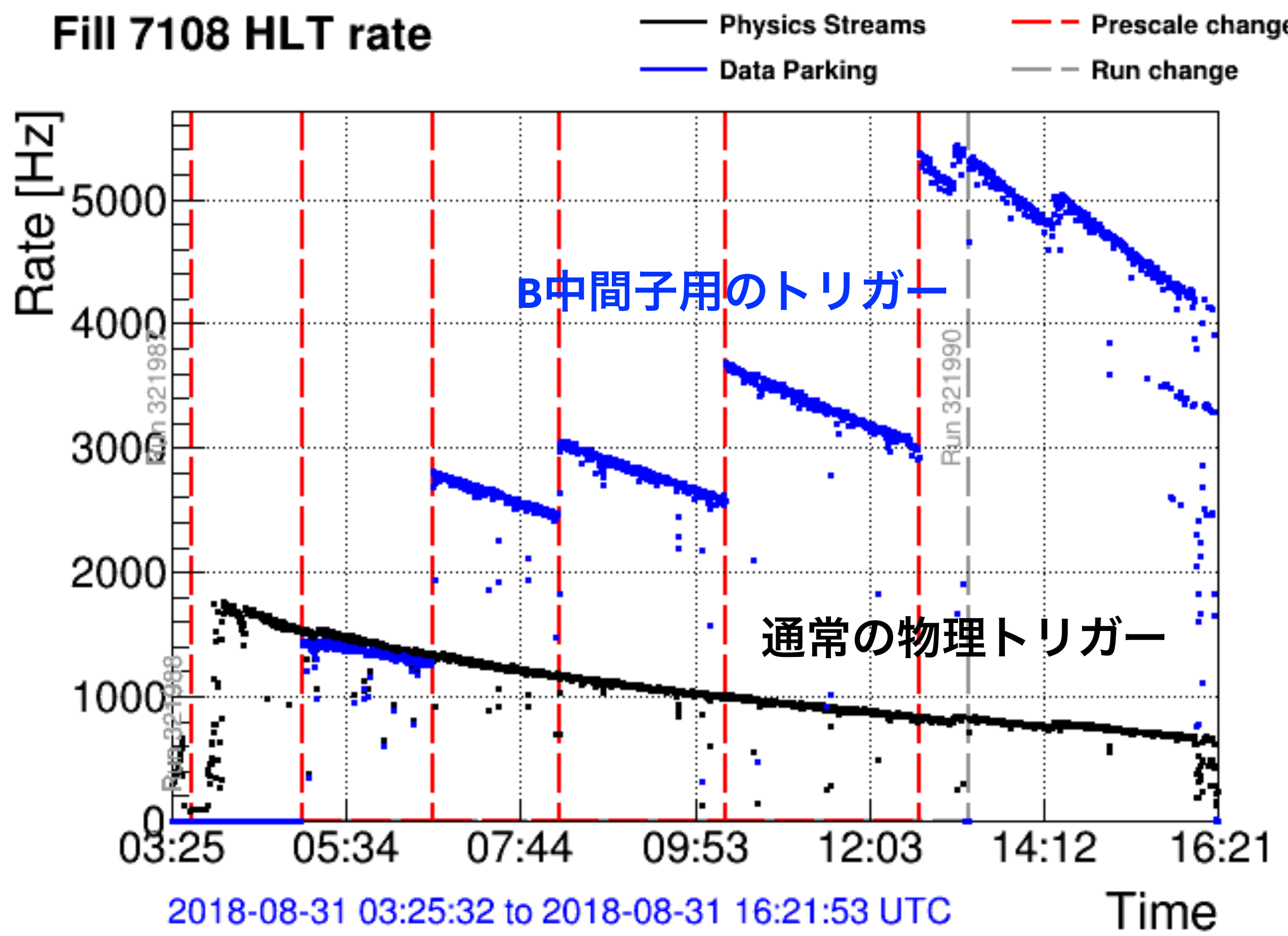
変位ミューオンを
含む終状態を
トリガーすることで
 $b\bar{b}$ 事象を効率的に集める
(純度 75% 程度)

2018年、最大 5kHz でのデータ取得に成功



変位ミューオンを
含む終状態を
トリガーすることで
 $b\bar{b}$ 事象を効率的に集める
(純度 75% 程度)

2018年、最大 5kHz でのデータ取得に成功

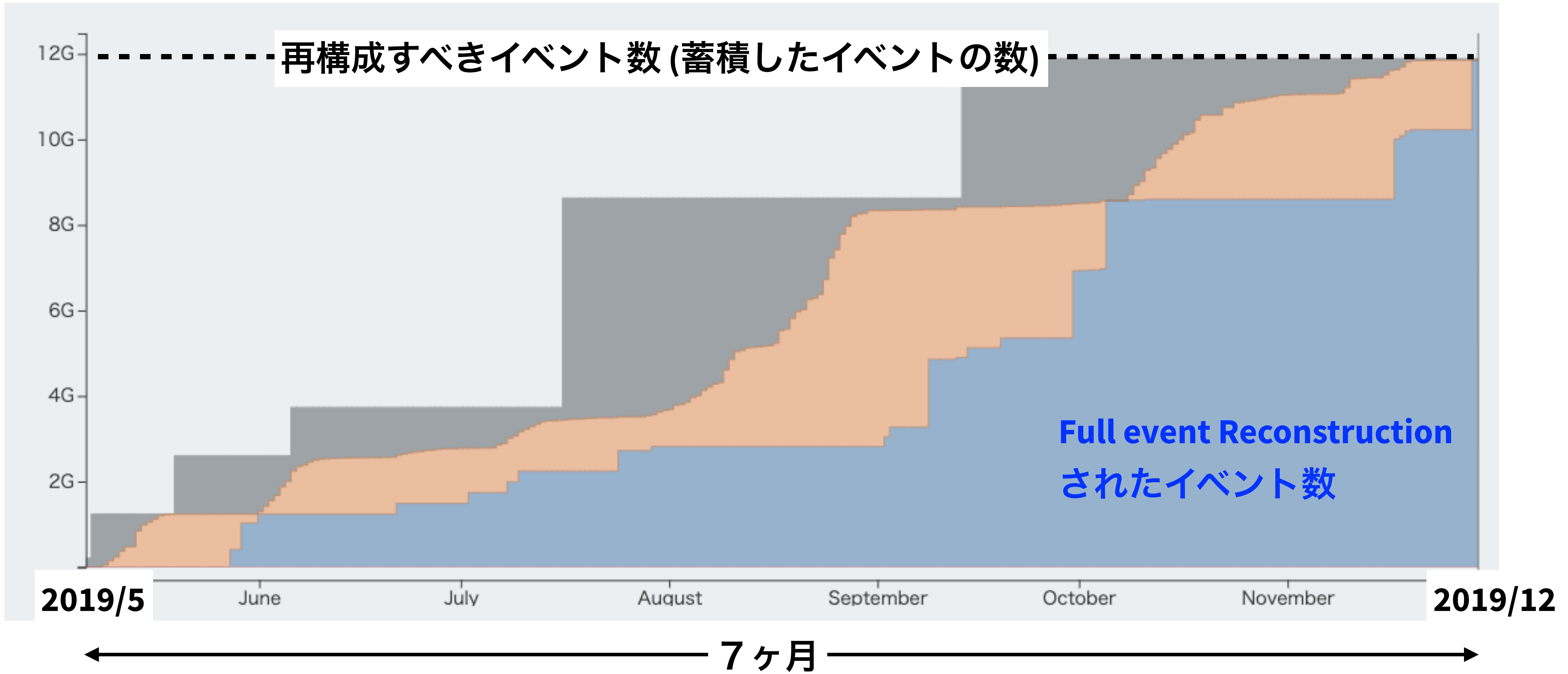


変位ミューオンを含む終状態をトリガーすることで $b\bar{b}$ 事象を効率的に集める (純度 75% 程度)

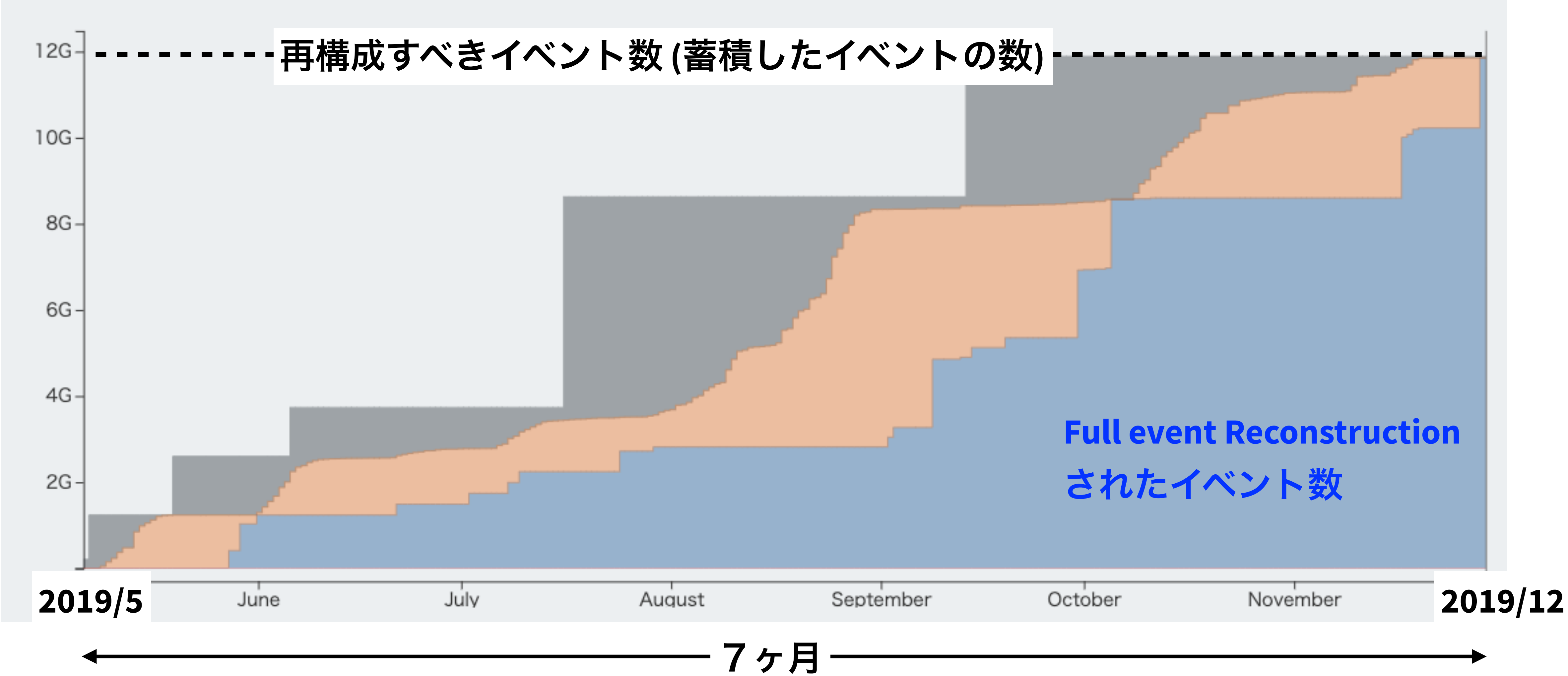
他の物理を圧迫することなく、
 10^{10} の B 中間子イベントを蓄積

Mode	N_{2018}	f_B	\mathcal{B}
Generic b hadrons			
B_d^0	4.0×10^9	0.4	1.0
B^\pm	4.0×10^9	0.4	1.0
B_s	1.2×10^9	0.1	1.0
b baryons	1.2×10^9	0.1	1.0
B_c	1.0×10^7	0.001	1.0
Total	1.0×10^{10}	1.0	1.0

Full event reconstruction を後回しにしたので ...



Full event reconstruction を後回しにしたので...

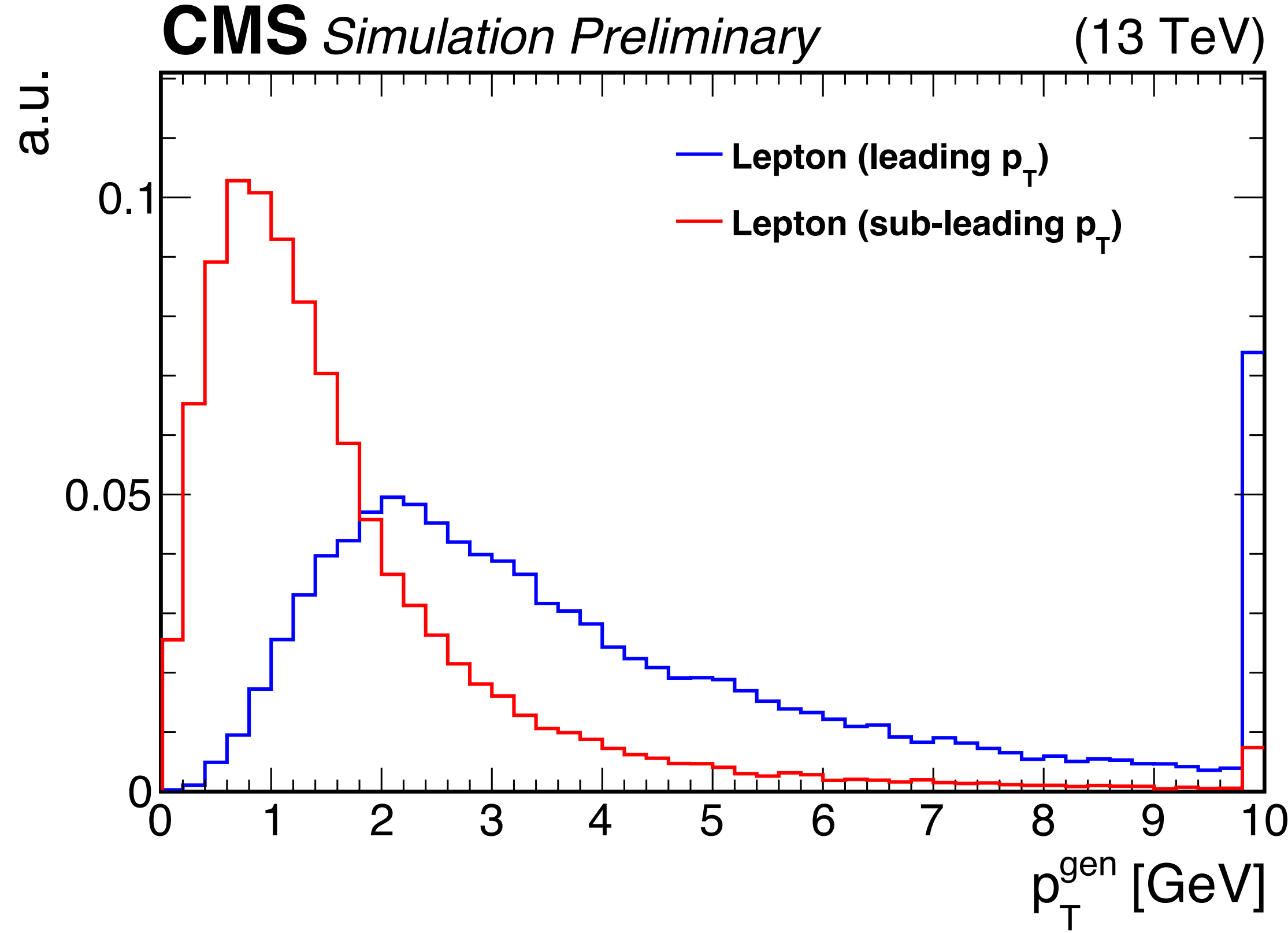


2018年にデータテイキング → 2019年春から事象再構成 → 2020年から本格的な解析開始

2020年からデータ解析が始まったかという、そうではないです。

CMS は high- p_T physics に特化した実験なので、B 中間子から出てくるの low- p_T の粒子を識別するのが苦手 → 低運動量粒子識別の開発が必要

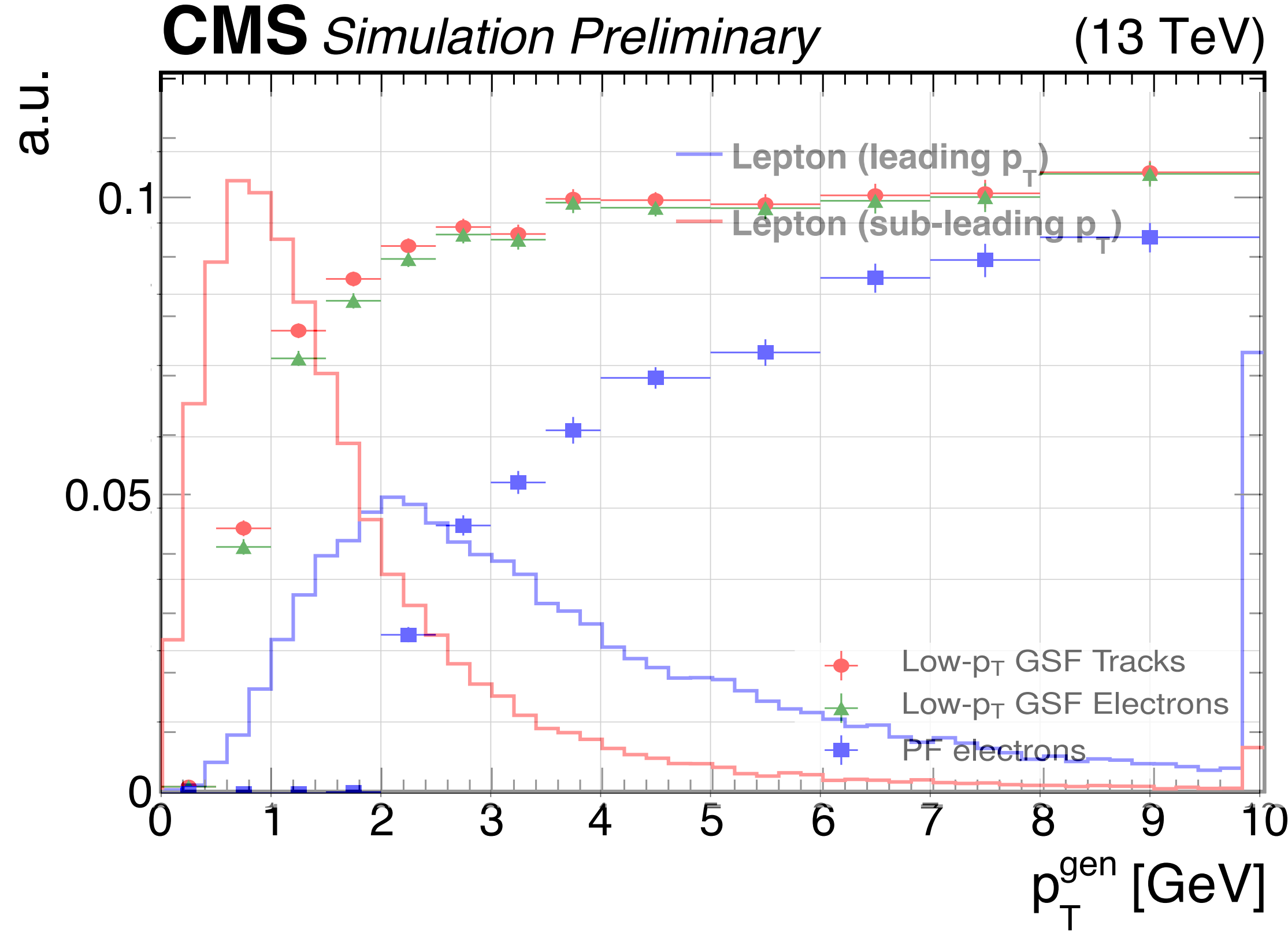
低運動量 electron の識別



2020年からデータ解析が始まったかという、そうではないです。

CMS は high- p_T physics に特化した実験なので、B 中間子から出てくるの low- p_T の粒子を識別するのが苦手 → 低運動量粒子識別の開発が必要

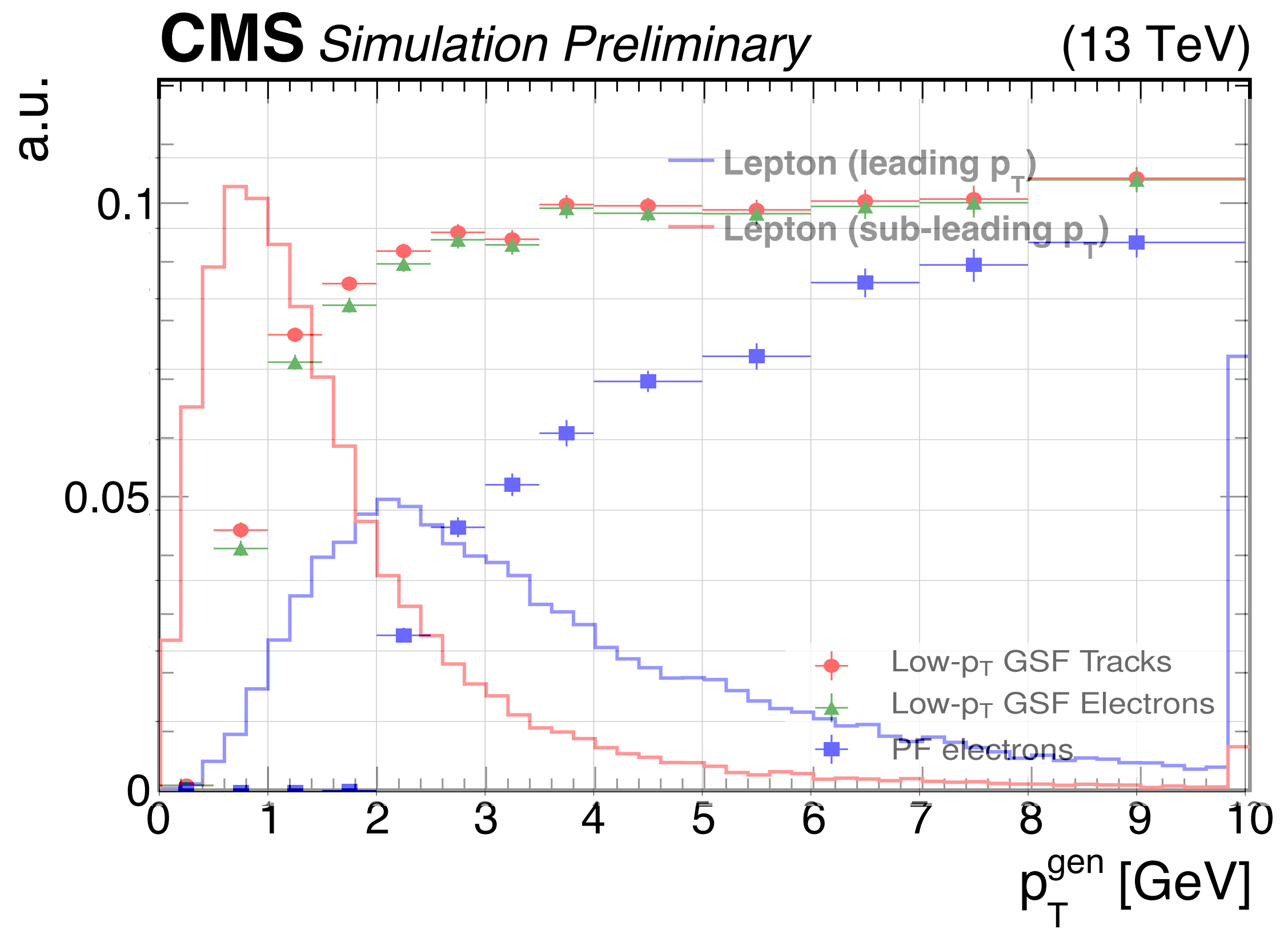
低運動量 electron の識別



2020年からデータ解析が始まったかという、そうではないです。

CMS は high- p_T physics に特化した実験なので、B 中間子から出てくるの low- p_T の粒子を識別するのが苦手 → 低運動量粒子識別の開発が必要

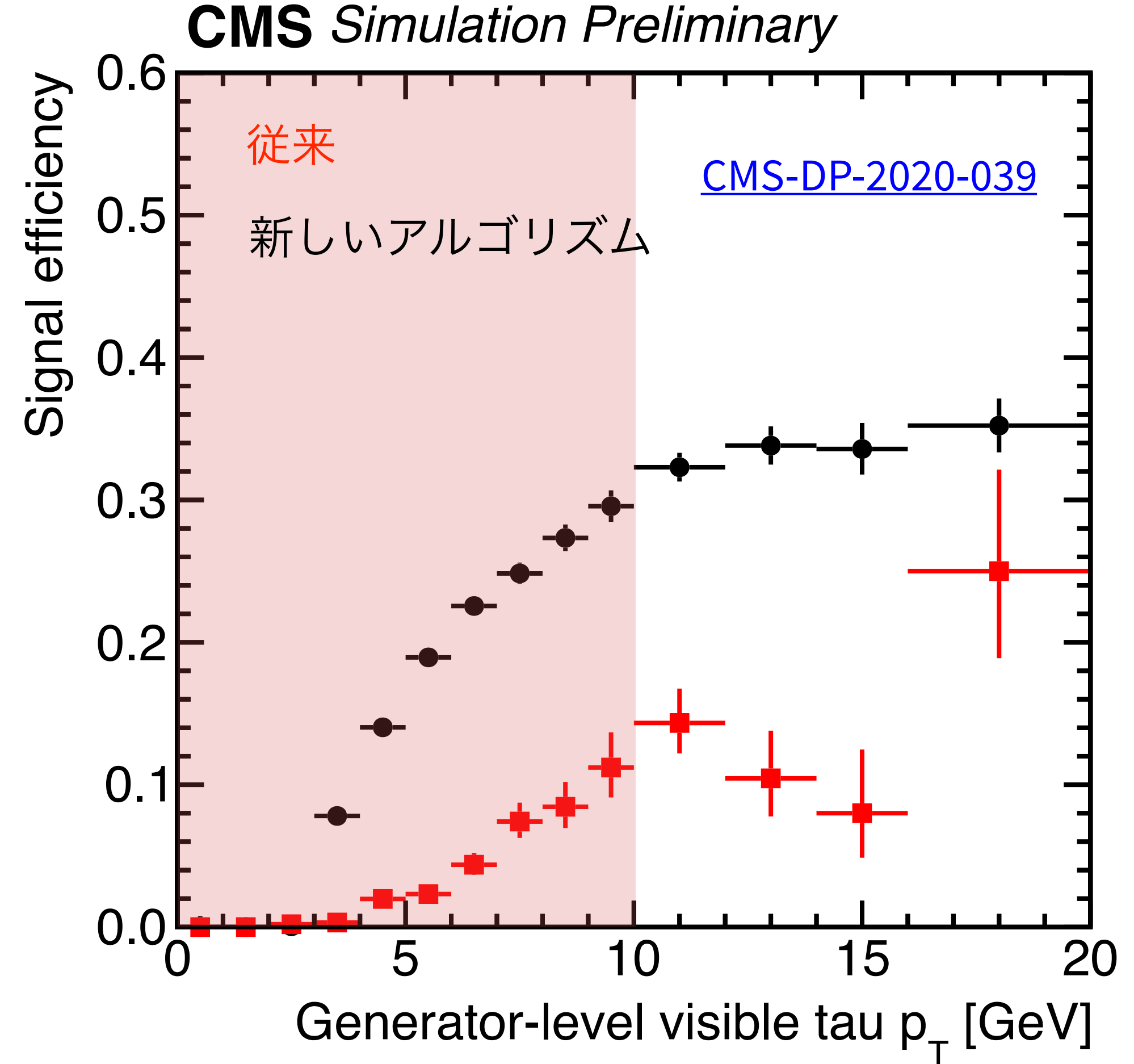
低運動量 electron の識別



[CMS-DP-2019-043](#)

低運動量 τ の識別

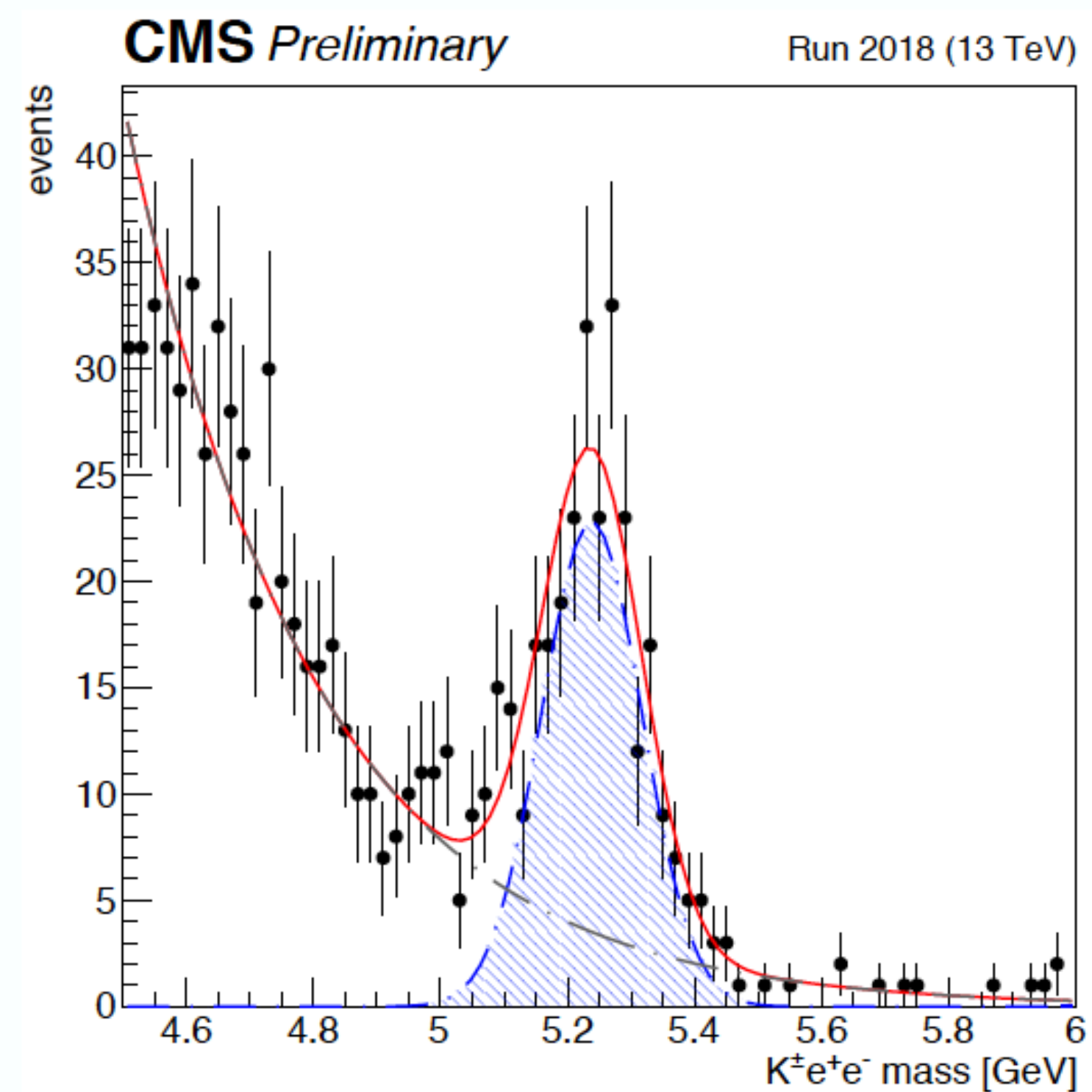
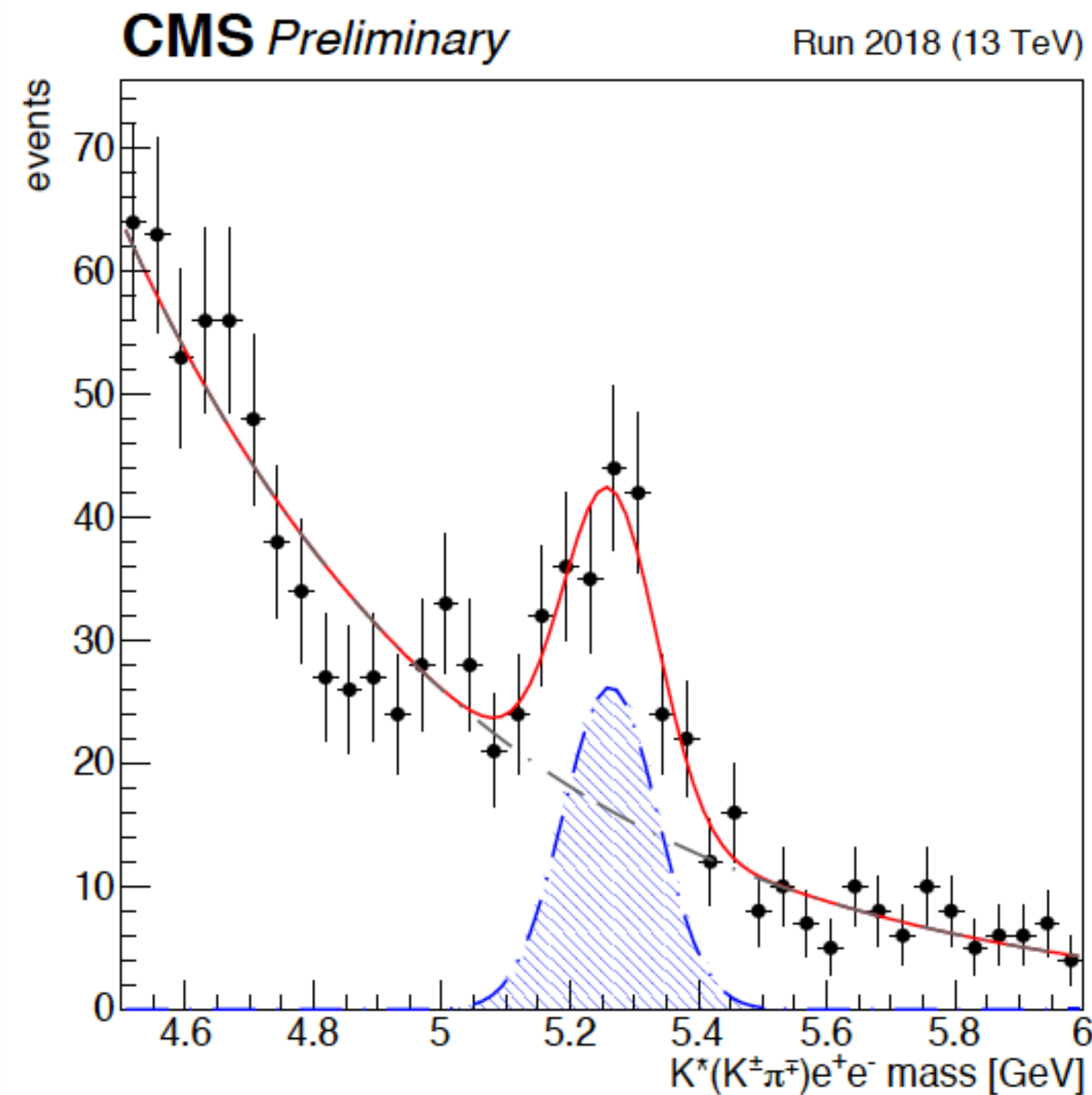
$\tau \rightarrow \pi\pi\pi\nu$ に特化した
 手法を開発 (通常は jet をシードとして
 再構成するが、low p_T になると娘粒子が広がり
 すぎて1つのジェットに収まらない)



Standard Candle

$B \rightarrow J/\psi (\rightarrow ee) K^* (\rightarrow K\pi)$

$B \rightarrow J/\psi (\rightarrow ee) K$



$R(K^*)$ の normalisation channel

$R(K)$ の normalisation channel

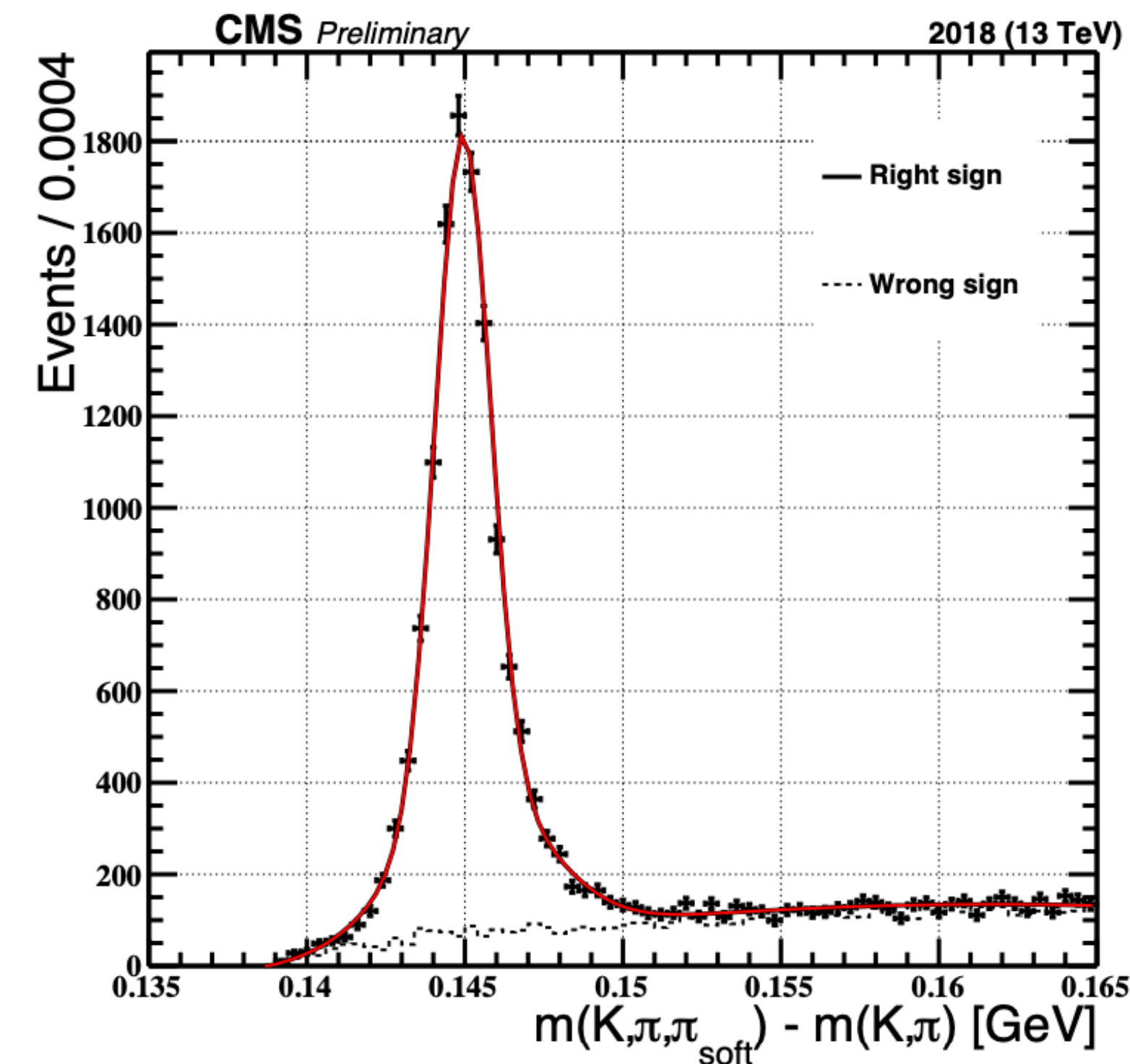
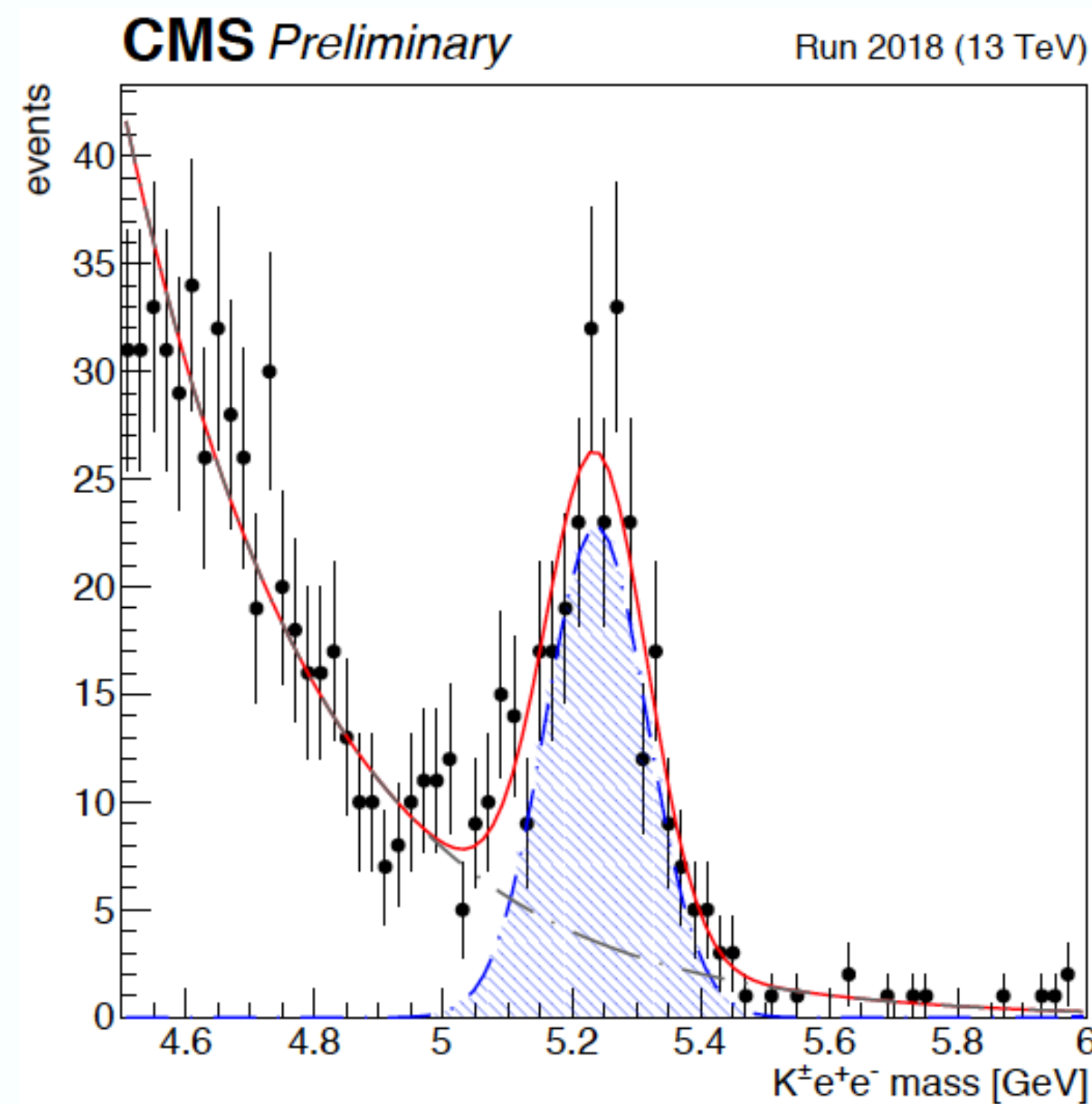
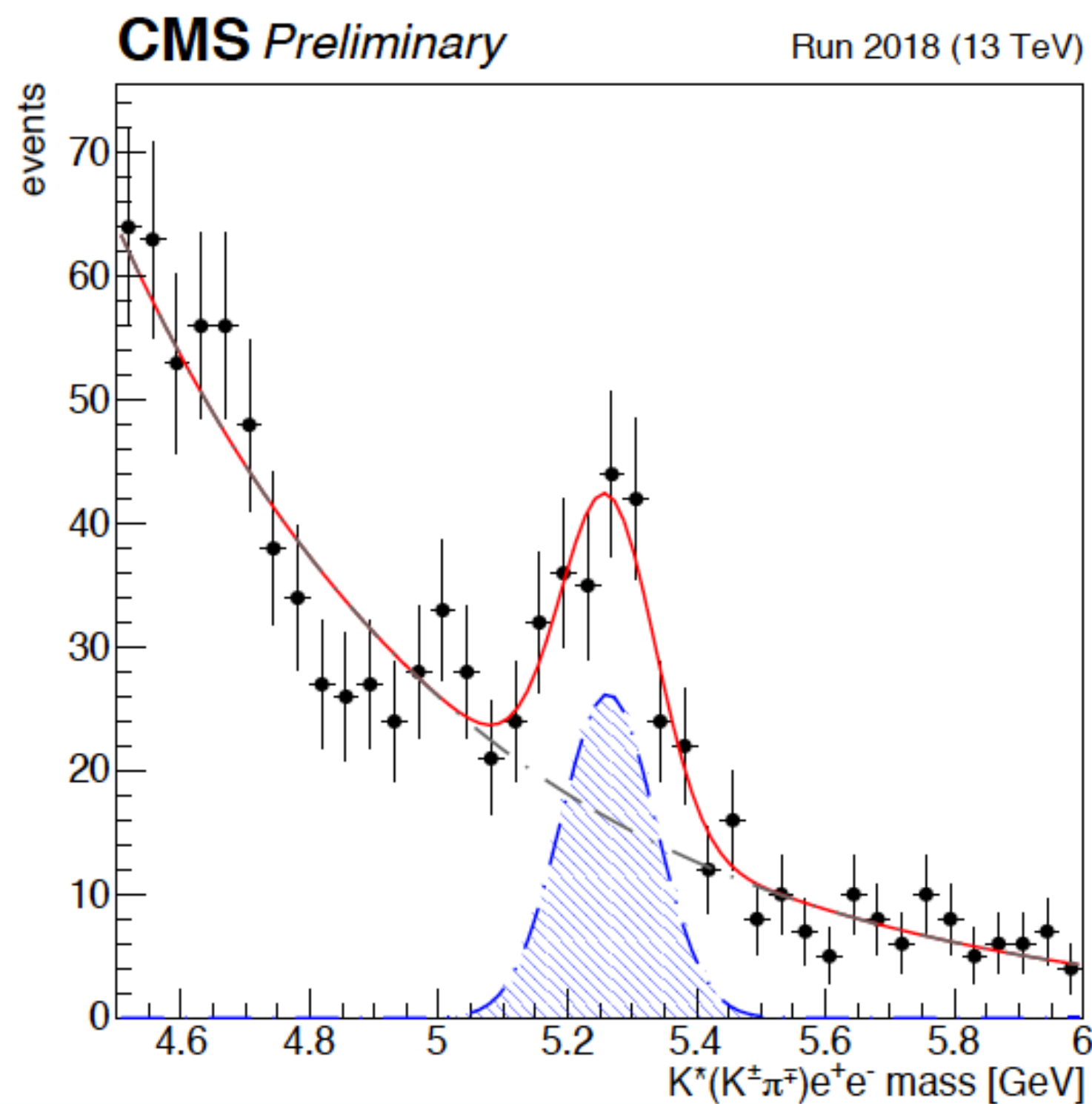
CMS で初めての観測。電子は極めて低運動量なので、従来のデータテイキング手法では観測できなかった過程

Standard Candle

$B \rightarrow J/\psi (\rightarrow ee) K^* (\rightarrow K\pi)$

$B \rightarrow J/\psi (\rightarrow ee) K$

$B \rightarrow D^* (\rightarrow D^0 (\rightarrow K\pi) \pi) \mu \nu$



$R(K^*)$ の normalisation channel

$R(K)$ の normalisation channel

$R(D^*)$ の分母

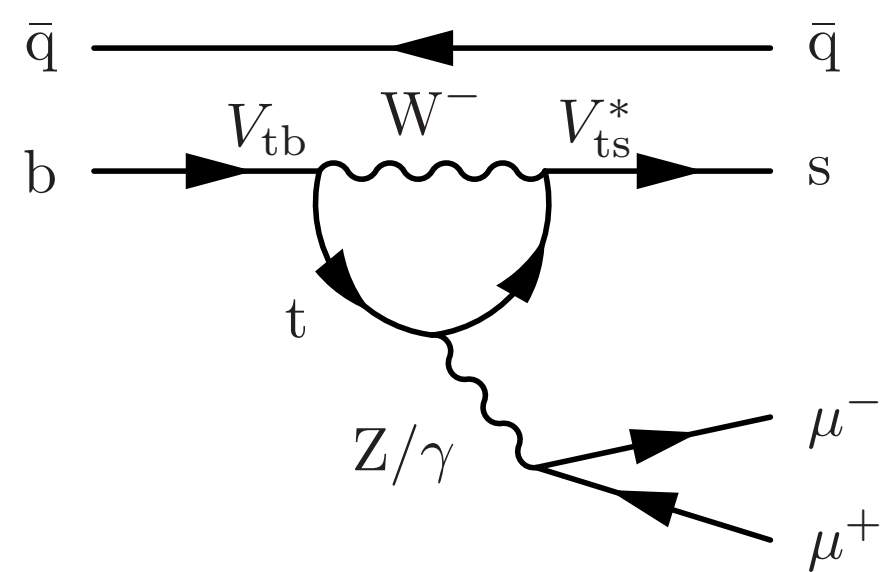
CMS で初めての観測。電子は極めて低運動量なので、従来のデータテイキング手法では観測できなかった過程

蓄積した 10^{10} イベントの $b\bar{b}$ purity を評価するのにも使われた

様々な解析が進行中

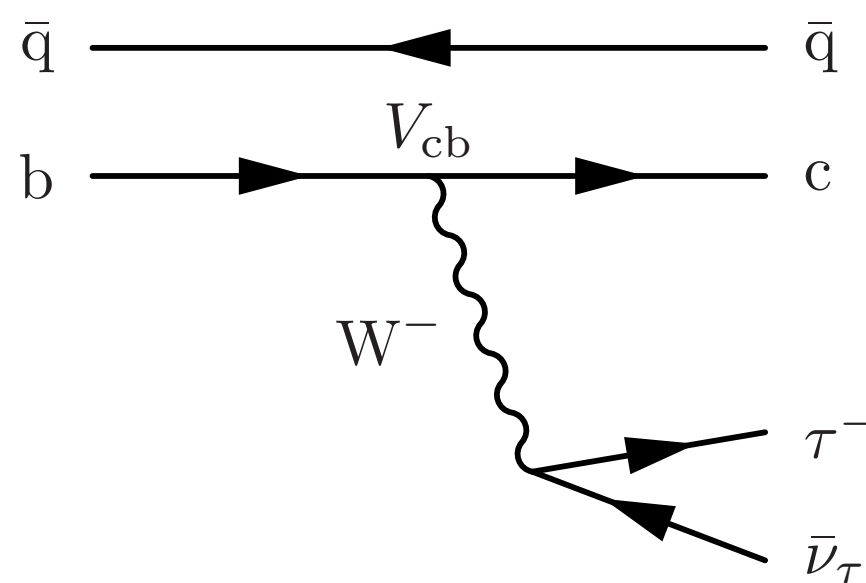
LFU の検証

FCNC $R = \frac{\mathcal{B}(b \rightarrow s\mu^+\mu^-)}{\mathcal{B}(b \rightarrow se^+e^-)}$



- $R(K)$
- $R(K^*)$
- $R(\phi)$
- $R(\Lambda_b)$

FCCC $R = \frac{\mathcal{B}(b \rightarrow c\tau\nu_\tau)}{\mathcal{B}(b \rightarrow c\mu\nu_\mu)}$



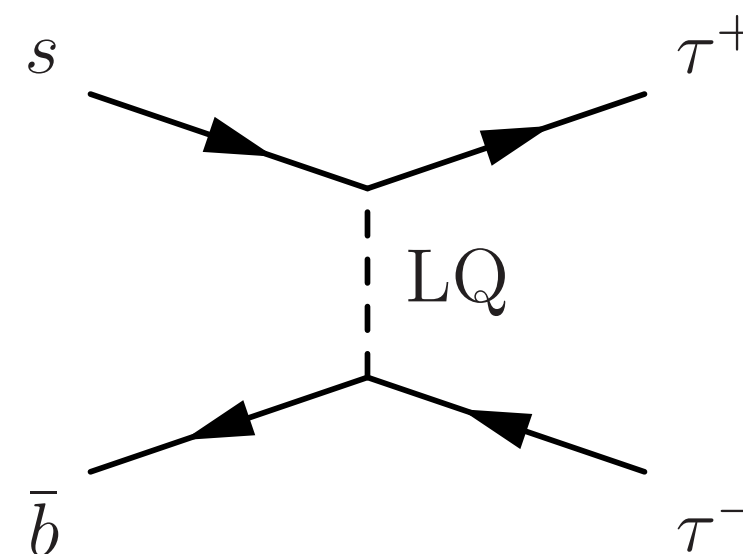
- $R(D^*)$
- $R(D)$

Direct LFV の探索

- $B \rightarrow \mu\tau, \mu e;$
- $B \rightarrow \phi\tau\mu$
- $B \rightarrow K\tau\mu$
- ...

Br の測定

- $B_s \rightarrow \tau\tau$
- $B_s \rightarrow \phi\tau\tau$
- $B_s \rightarrow K\tau\tau$
- ...

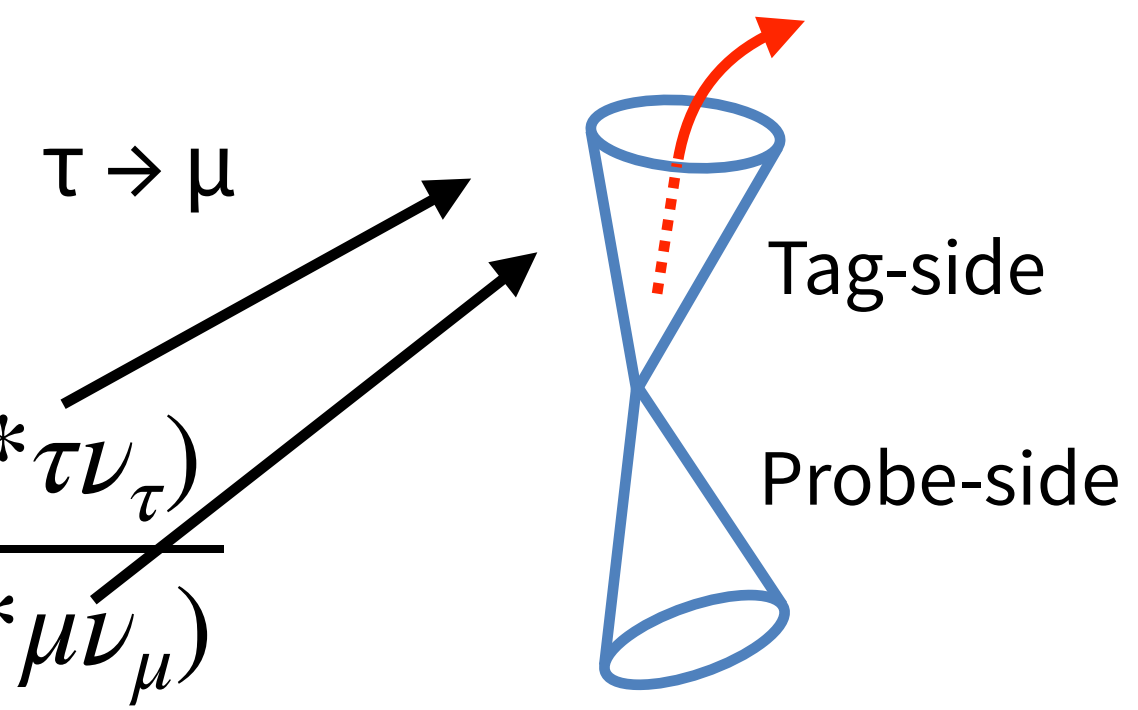


Other topics

- Fragmentation function ratio measurements ($f_s/f_u, f_s/f_d, f_d/f_u$)
- CPV measurement using D-mesons
- Exotic searches (e.g. QCD inflatons, Heavy neutrino searches using Ds mesons)
- $\tau \rightarrow \phi K$
- LLP searches

結局、CMS で取得した 10^{10} の B 中間子サンプルはどれくらい強力なのか？ 12 / 14

A: 観測したい過程 (あるいは測定量) による

$$R_{D^*} = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D^* \tau \nu_\tau)}{\mathcal{B}(B \rightarrow D^* \mu \nu_\mu)}$$


$\tau \rightarrow \mu$

Tag-side

Probe-side

→つまり、
 10^{10} イベント
全てを解析に使える。

結局、CMS で取得した 10^{10} の B 中間子サンプルはどれくらい強力なのか？

A: 観測したい過程 (あるいは測定量) による

$$R_{D^*} = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D^* \tau \nu_\tau)}{\mathcal{B}(B \rightarrow D^* \mu \nu_\mu)}$$

The diagram shows a blue hourglass-shaped detector. The top part is labeled 'Tag-side' and the bottom part is labeled 'Probe-side'. A red dashed line with an arrow at the top indicates a particle path. Two black arrows originate from the left: one points to the top of the detector labeled $\tau \rightarrow \mu$, and the other points to the bottom of the detector.

→つまり、
 10^{10} イベント
全てを解析に使える。

- LHCb はこれまでに 10^{11} のデータを蓄積しているが、ミュオンを終状態にもつ事象はそのうちの 10% (トリガーのため) = CMS の数とコンパラ
- CMS detector は 4π coverage をもつため LHCb に比べて粒子識別性能がいい

結局、CMS で取得した 10^{10} の B 中間子サンプルはどれくらい強力なのか？

A: 観測したい過程 (あるいは測定量) による

$\tau \rightarrow \mu$

$$R_{D^*} = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D^* \tau \nu_\tau)}{\mathcal{B}(B \rightarrow D^* \mu \nu_\mu)}$$

→つまり、
 10^{10} イベント
 全てを解析に使える。

- LHCb はこれまでに 10^{11} のデータを蓄積しているが、ミュオンを終状態にもつ事象はそのうちの 10% (トリガーのため) = CMS の数とコンパラ
- CMS detector は 4π coverage をもつため LHCb に比べて粒子識別性能がいい

$$R_K = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow K e^+ e^-)}{\mathcal{B}(B \rightarrow K \mu^+ \mu^-)}$$

Probe side には
 電子が常に存在している
 訳ではないので、
 $\text{Br}(B \rightarrow Kee) \sim 4.5 \times 10^{-7}$
 による影響をもろに受ける

結局、CMS で取得した 10^{10} の B 中間子サンプルはどれくらい強力なのか？

A: 観測したい過程 (あるいは測定量) による

$\tau \rightarrow \mu$

$$R_{D^*} = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D^* \tau \nu_\tau)}{\mathcal{B}(B \rightarrow D^* \mu \nu_\mu)}$$

→つまり、
 10^{10} イベント
 全てを解析に使える。

- LHCb はこれまでに 10^{11} のデータを蓄積しているが、ミュオンを終状態にもつ事象はそのうちの 10% (トリガーのため) = CMS の数とコンパラ
- CMS detector は 4π coverage をもつため LHCb に比べて粒子識別性能がいい

$$R_K = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow Ke^+e^-)}{\mathcal{B}(B \rightarrow K\mu^+\mu^-)}$$

Probe side には
 電子が常に存在している
 訳ではないので、
 $Br(B \rightarrow Kee) \sim 4.5 \times 10^{-7}$
 による影響をもろに受ける

- 5% の事象選別効率を仮定しても 50 イベント程度
- LHCb は電子の終状態でもトリガーをかけているので $B \rightarrow Kee$ の潤沢な統計がある (Run-1 で 200, Run2 で 1600 イベント程度)

ラン3 (2023-2025) に向けて

- 2018年に蓄積したノウハウを生かし、さらなるB中間子データ取得を予定
- 統計的に脆弱な $B \rightarrow Xee$ (e.g. Kee) 過程を劇的に増やし $R(X)$ 測定の感度を向上させるため、電子の終状態を積極的に捕まえるためのトリガーを開発中
 - 低運動量電子をトリガーするには、技術的に多くの困難を克服する必要があるが、見通しは立っている

まとめ

- CMS 実験では B 中間子アノマリーを受けて、2018年、野心的な「Bファクトリー化プロジェクト」を敢行した
- 他の物理プログラムを圧迫することなく、ミュー粒子を終状態に含む 10^{10} 個の $b\bar{b}$ 事象を蓄積することに成功
 - これらのデータを十分堪能するため、低運動量粒子に対する識別手法を開発
 - 様々な物理解析 ([スライド12](#)) にチャレンジしています
 - ミュー粒子を含む B 中間子の統計数では、LHCb とコンパラ。 $\tau \rightarrow \mu$ を使った $R(D^*)$ の解析では十分な精度が出せそう
- Run-3 ではさらに多くの B 中間子イベントを蓄積する予定

これと並行して、アノマリーに触発された直接探索の方も抜かりなく行っています

L1 μ trigger

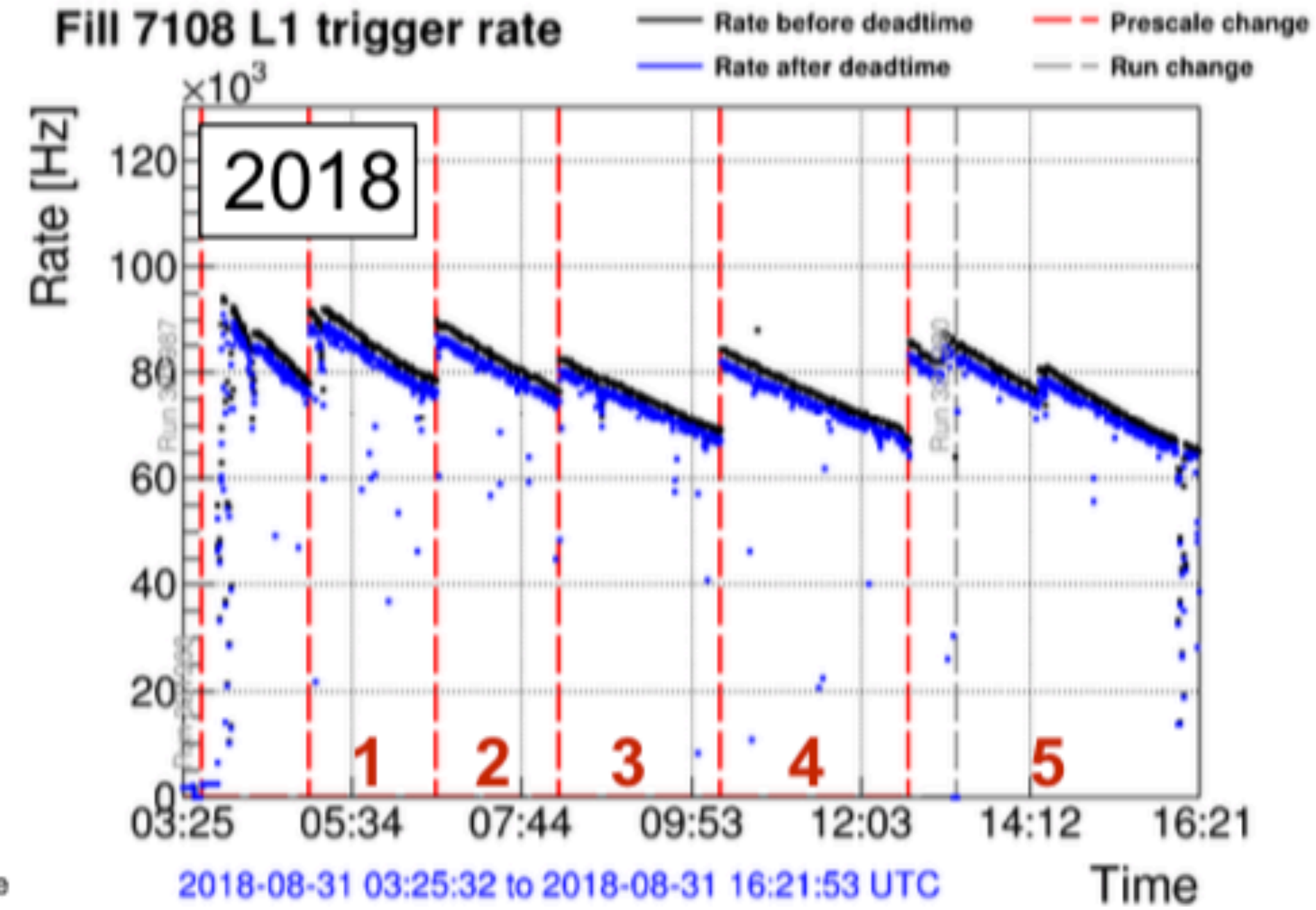
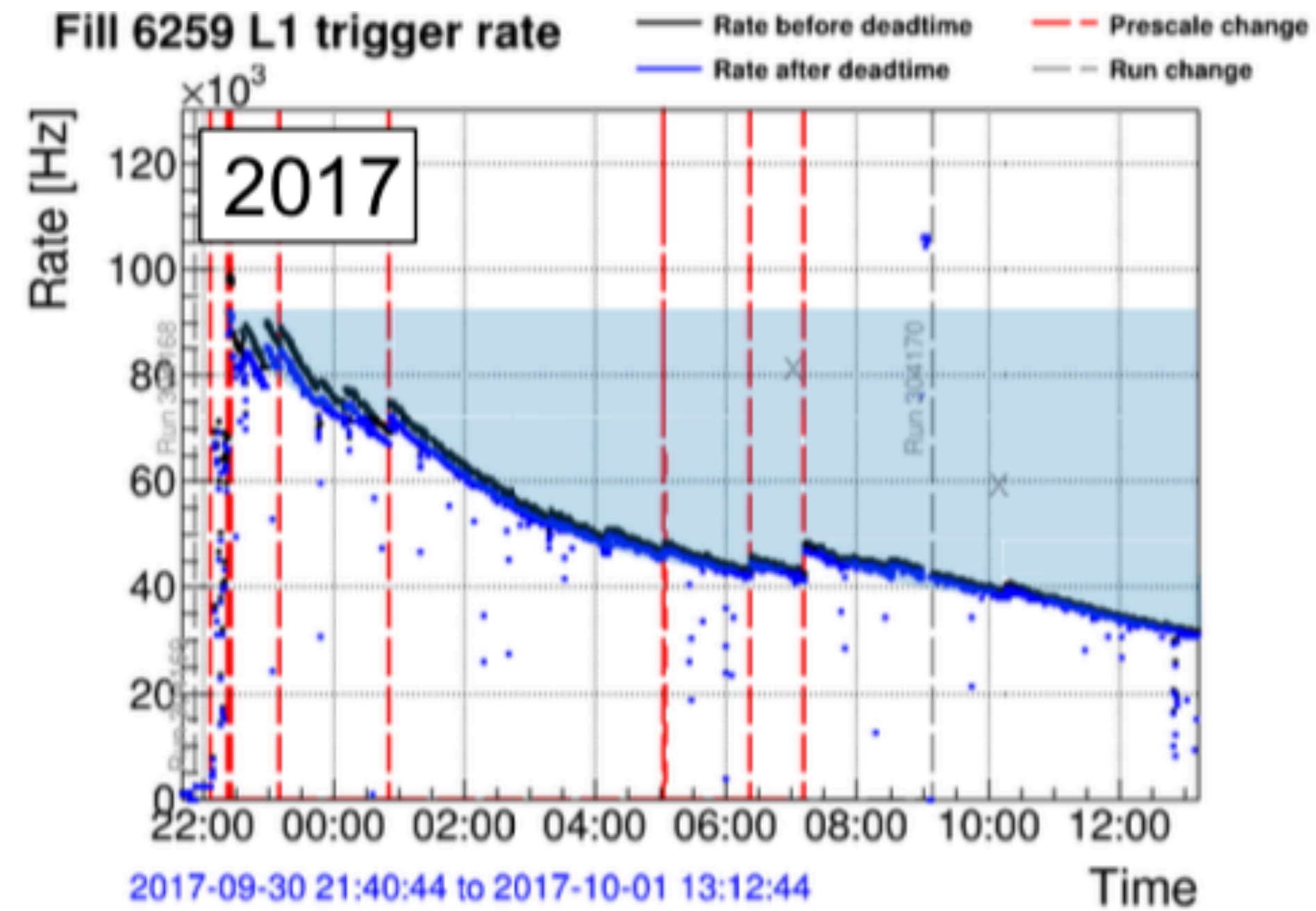
More aggressive evolution of p_T thresholds in 2018

η -restricted trigger:

- Controls rate
- Improves signal-side acceptance

L1 single μ trigger peaks at ~ 50 kHz (~ 90 kHz total)

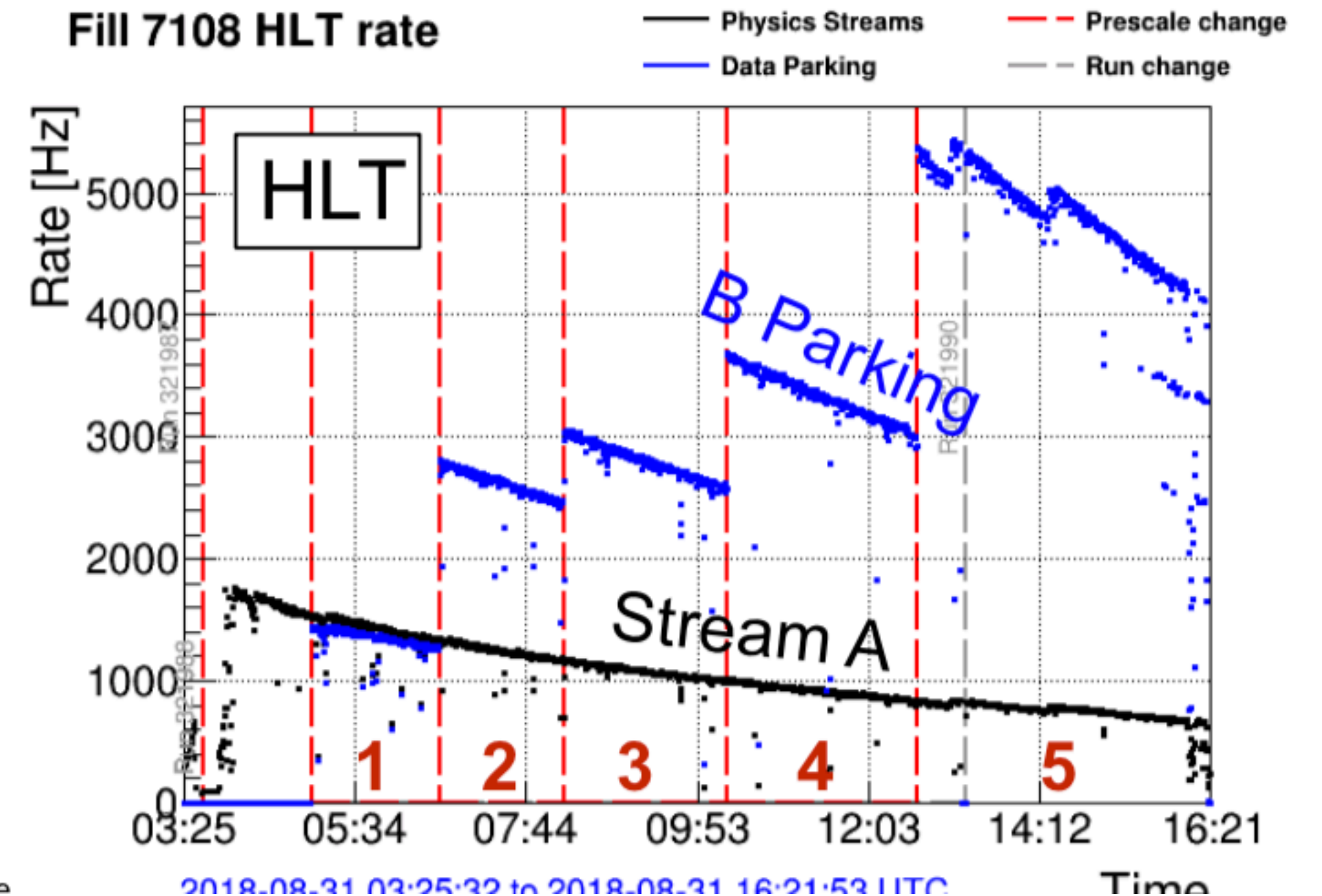
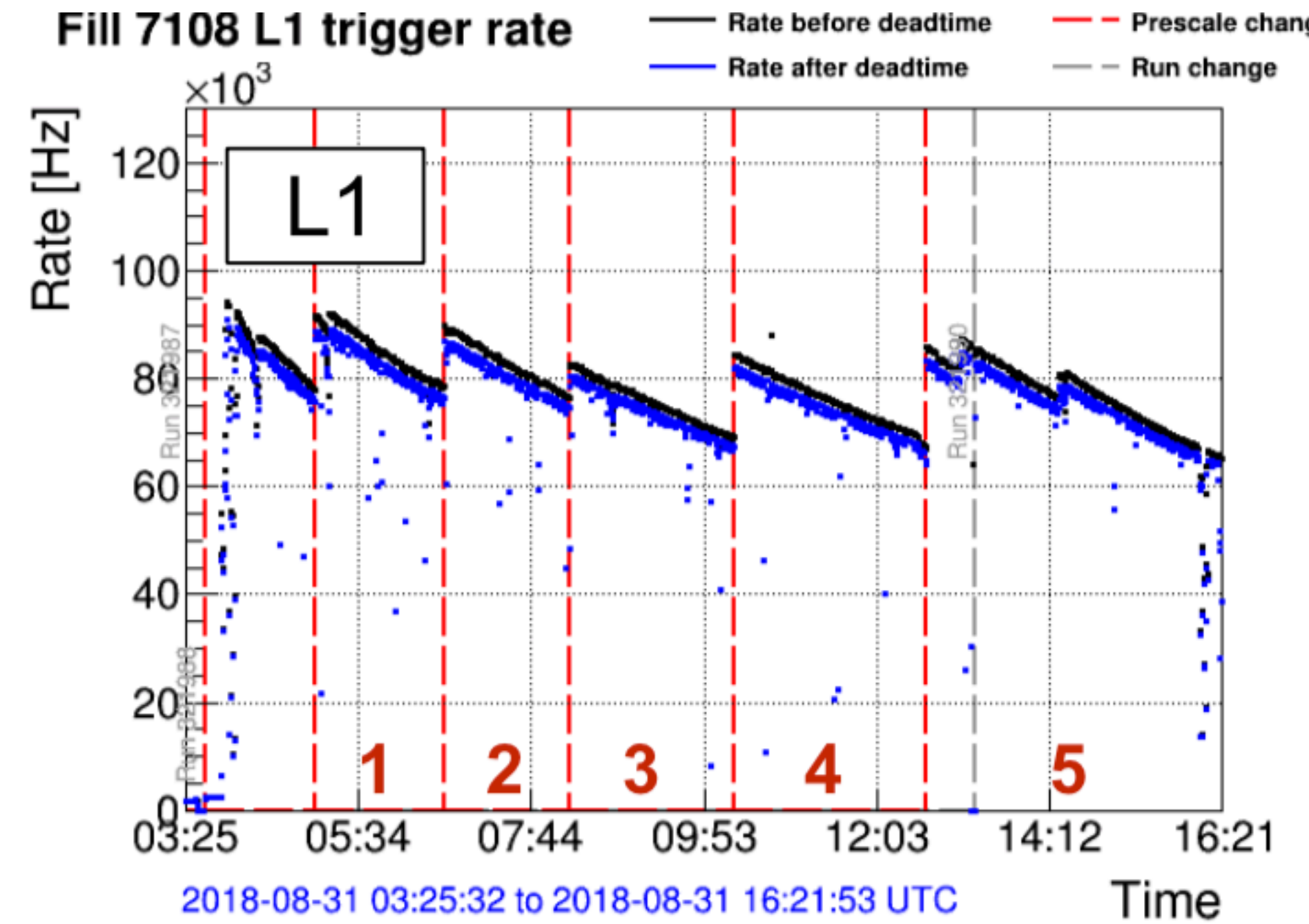
Settings	Peak \mathcal{L}_{inst} [$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	L1 seed
1	1.7	Mu12er1p5
2	1.5	Mu10er1p5
3	1.3	Mu9er1p5
4	1.1	Mu8er1p5
5	0.9	Mu7er1p5

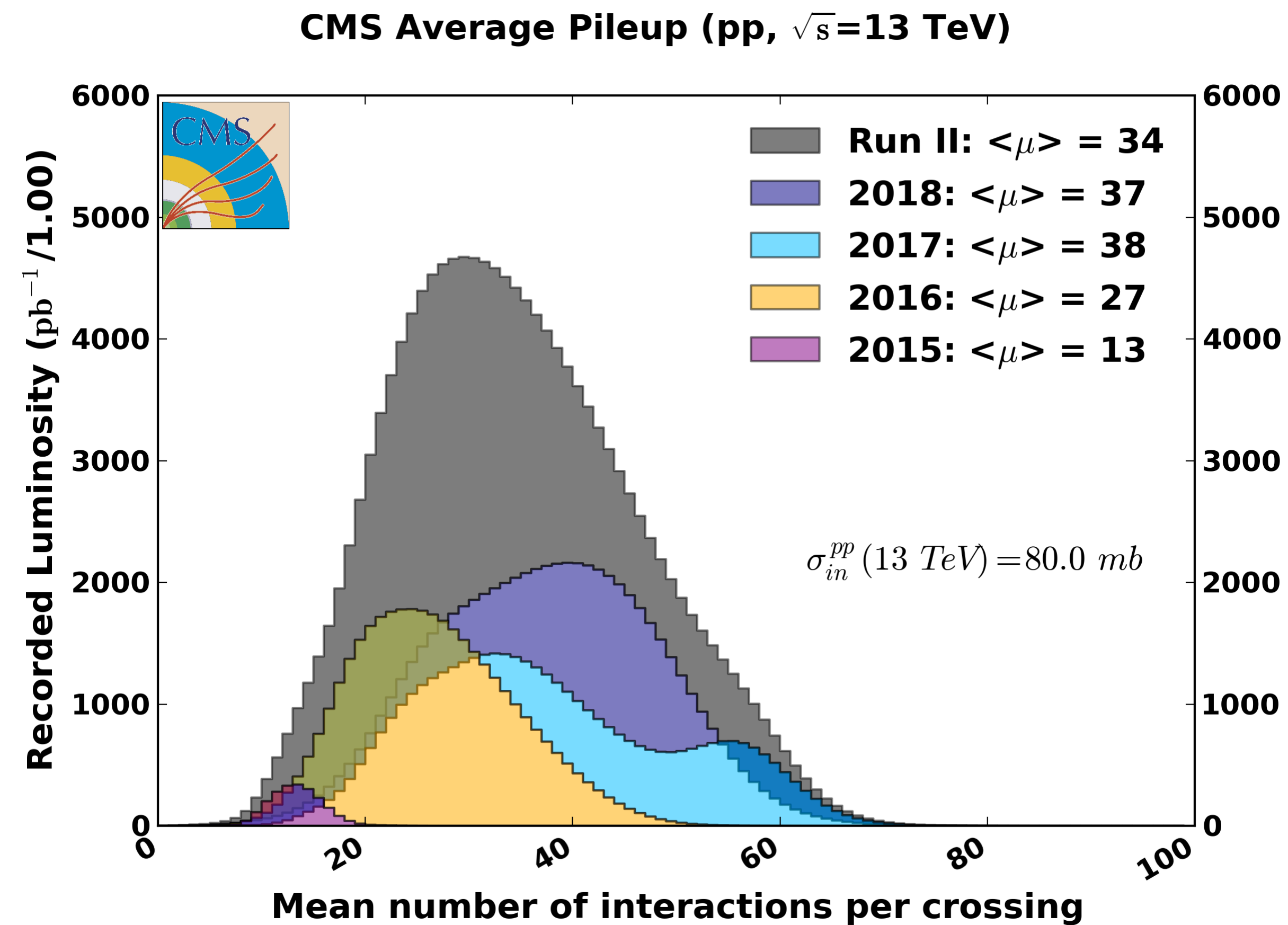
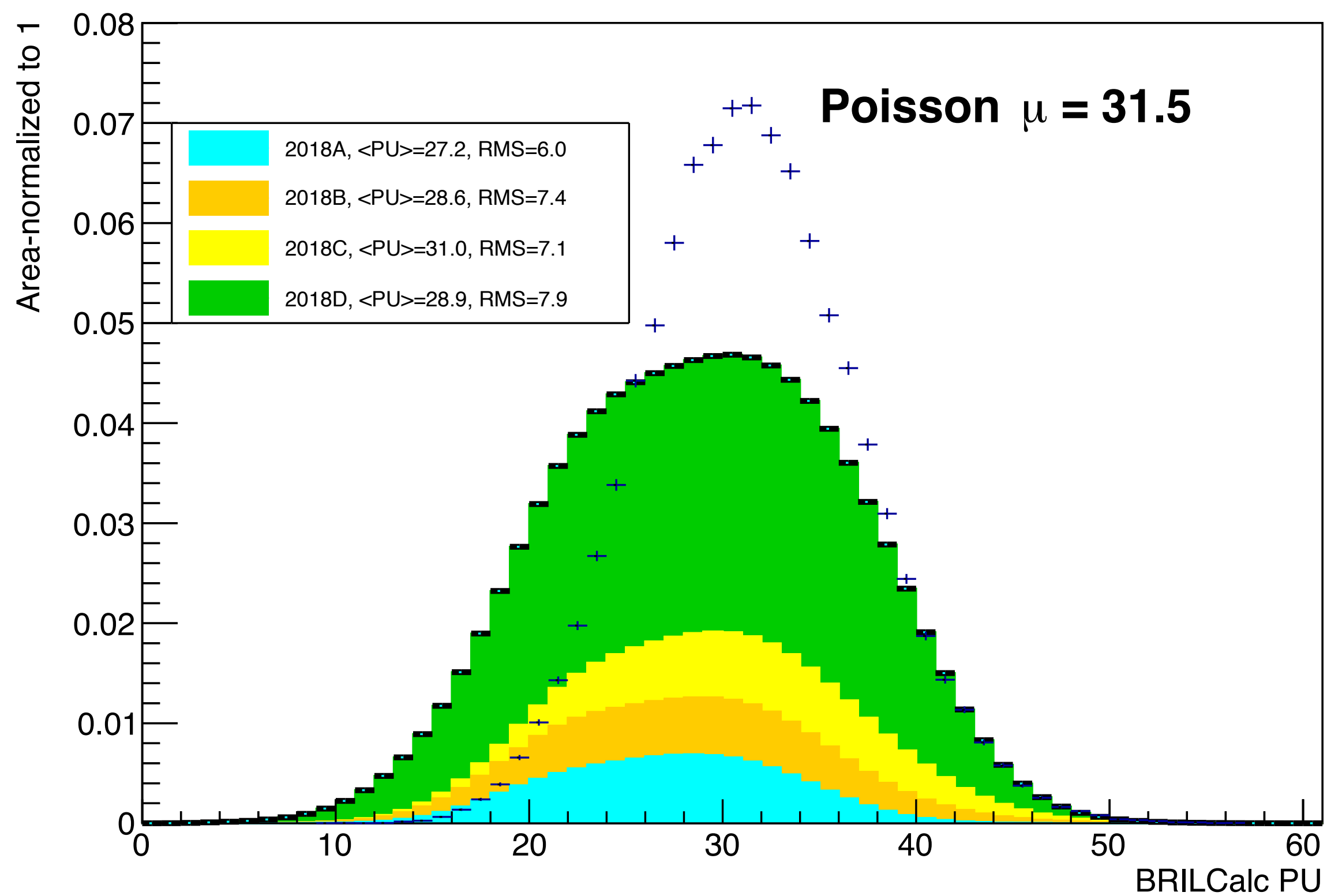


High Level Trigger

- Aggressive reduction in muon p_T threshold
- Requirement on muon impact parameter significance
- Purities of 60–90% depending on thresholds
- Peak rate as high as ~5 kHz

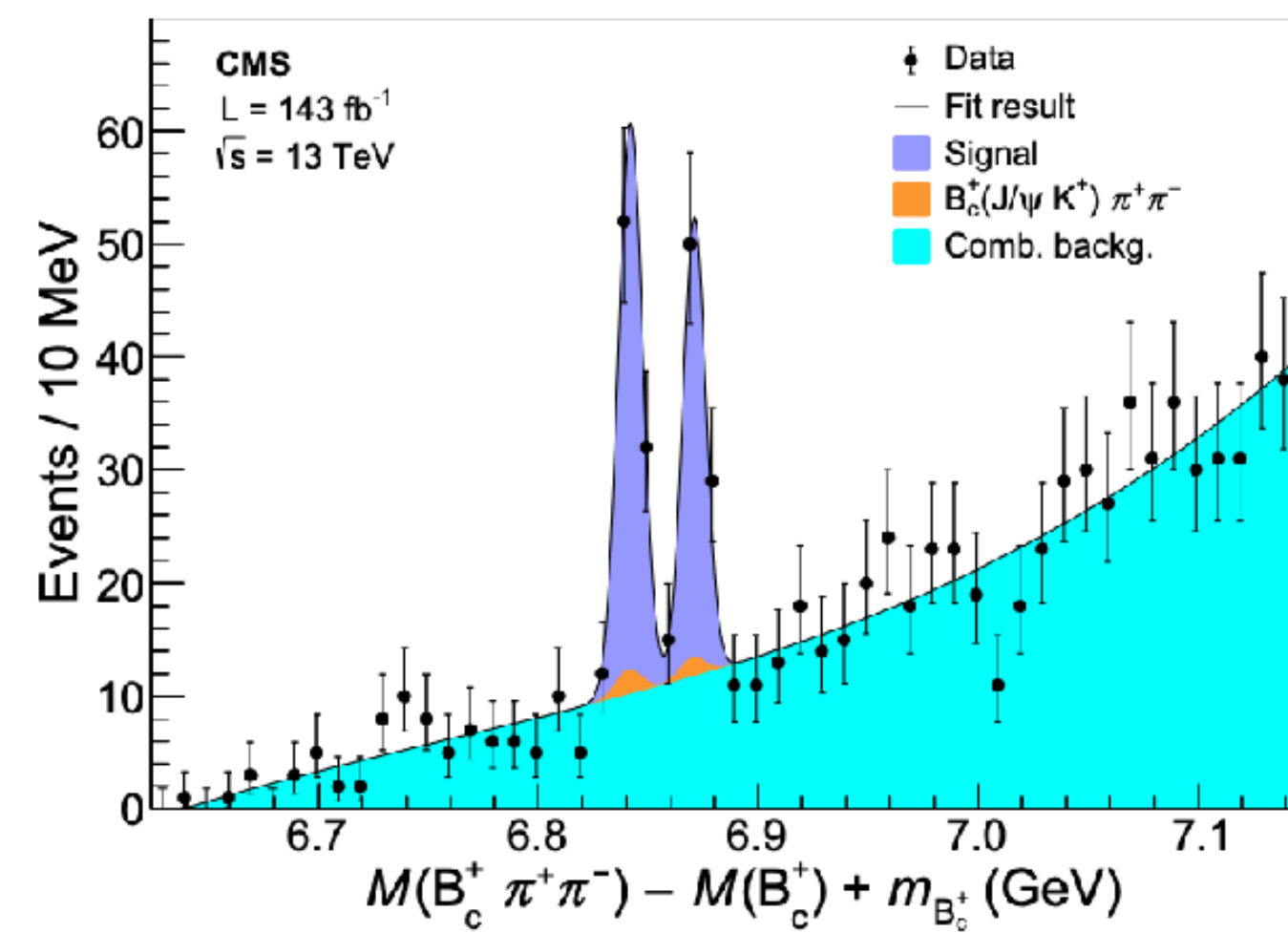
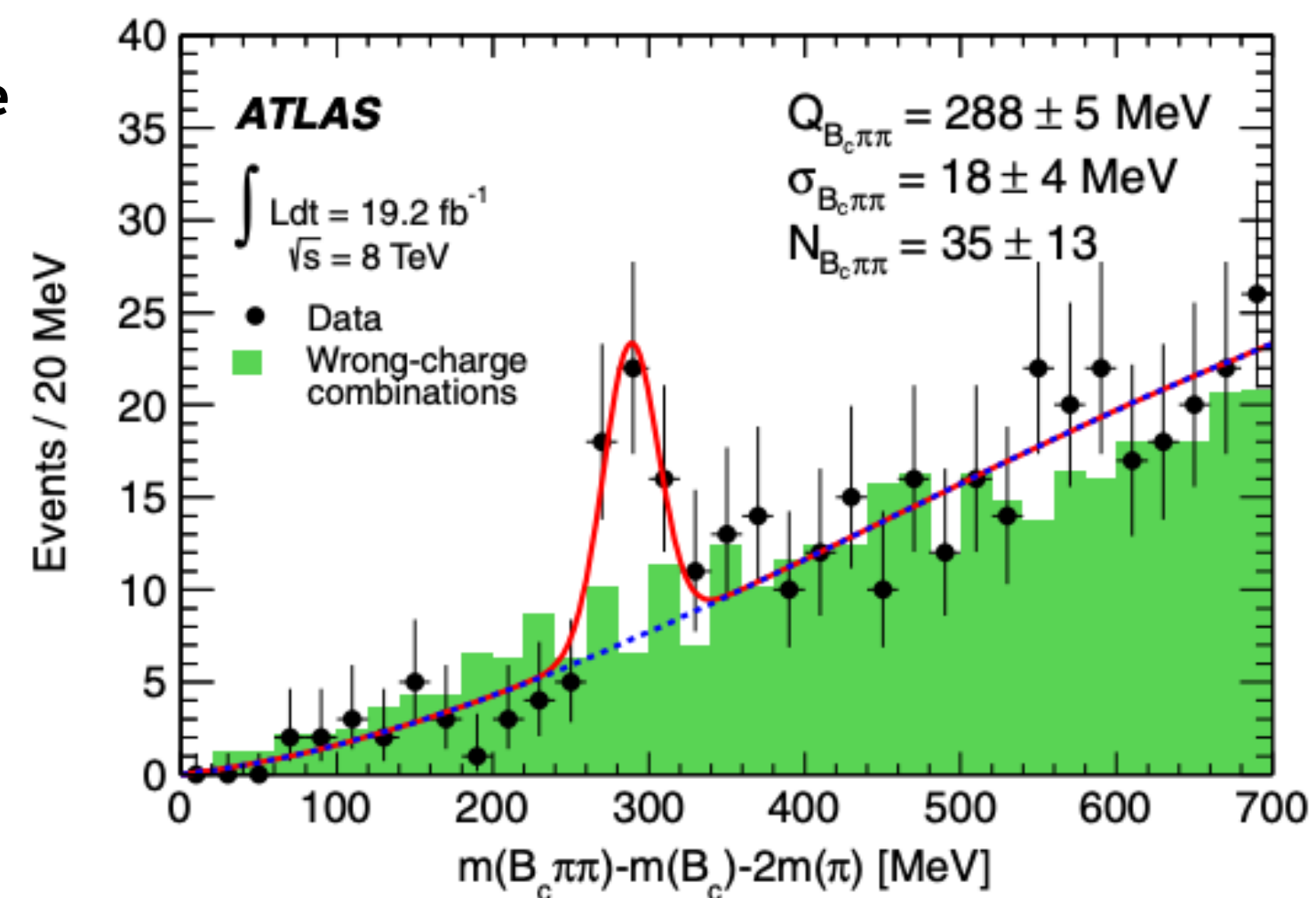
Settings	Peak \mathcal{L}_{inst} [$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	L1 seed	HLT path	Peak rate [kHz]
1	1.7	Mu12er1p5	Mu12_IP6	1.5
2	1.5	Mu10er1p5	Mu9_IP6	2.8
3	1.3	Mu9er1p5	Mu9_IP6	3.0
4	1.1	Mu8er1p5	Mu9_IP5	3.7
5	0.9	Mu7er1p5	Mu7_IP4	5.4





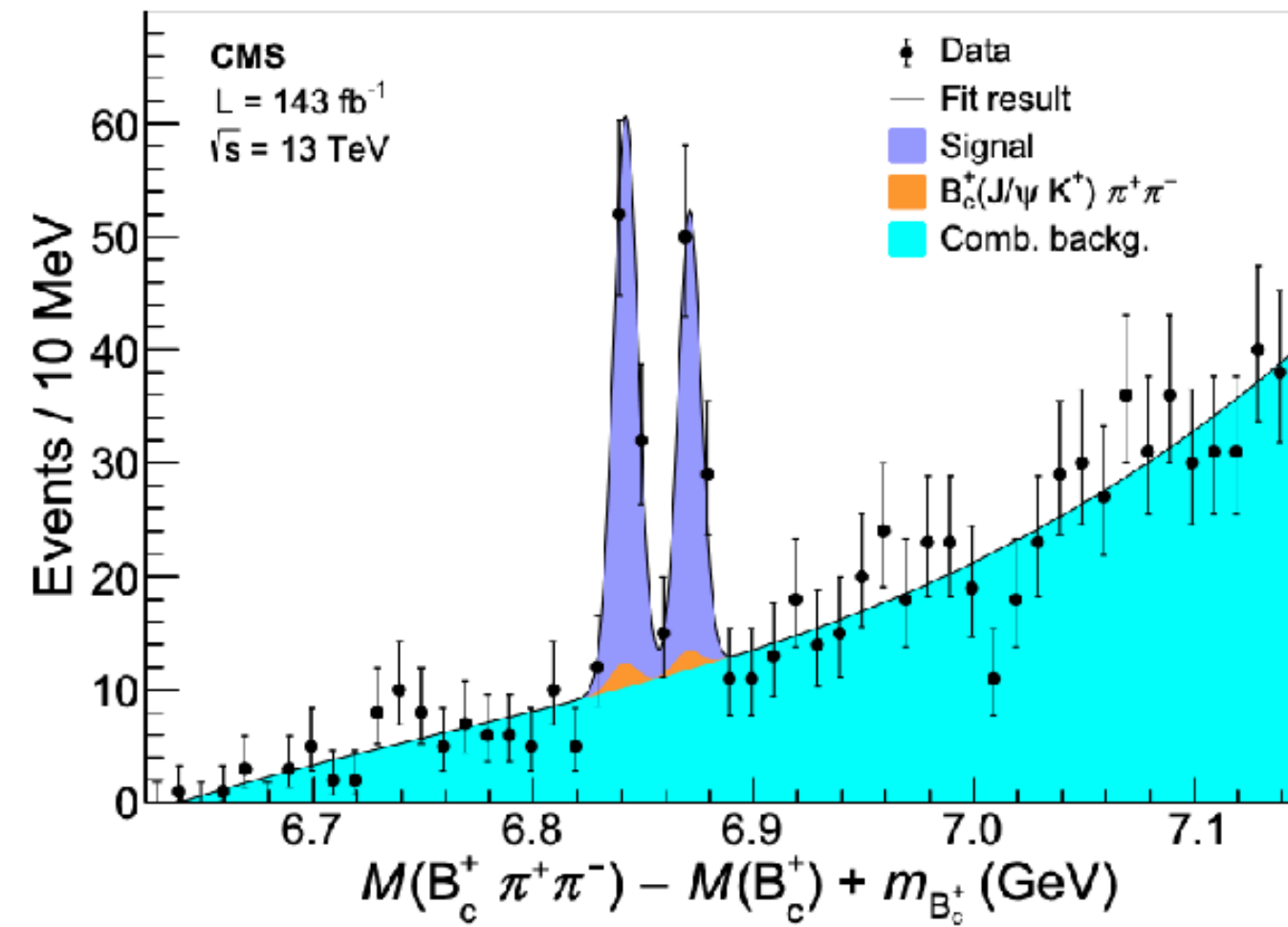
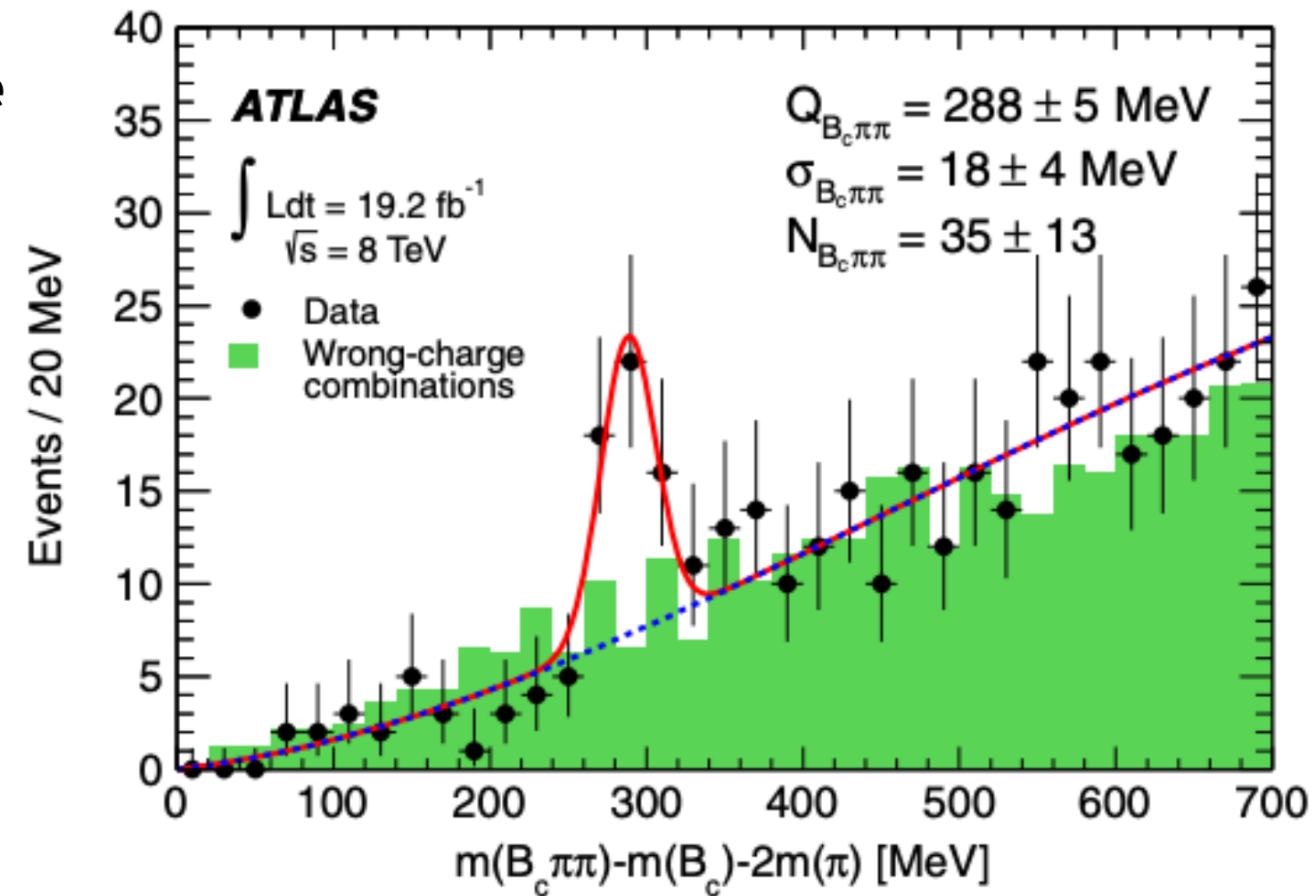
低い運動量領域における p_T resolution ($\sigma(p_T)/p_T \sim 0.5\%$ @ CMS, LHCb, 1% @ ATLAS)

Excited B_c^+ state search

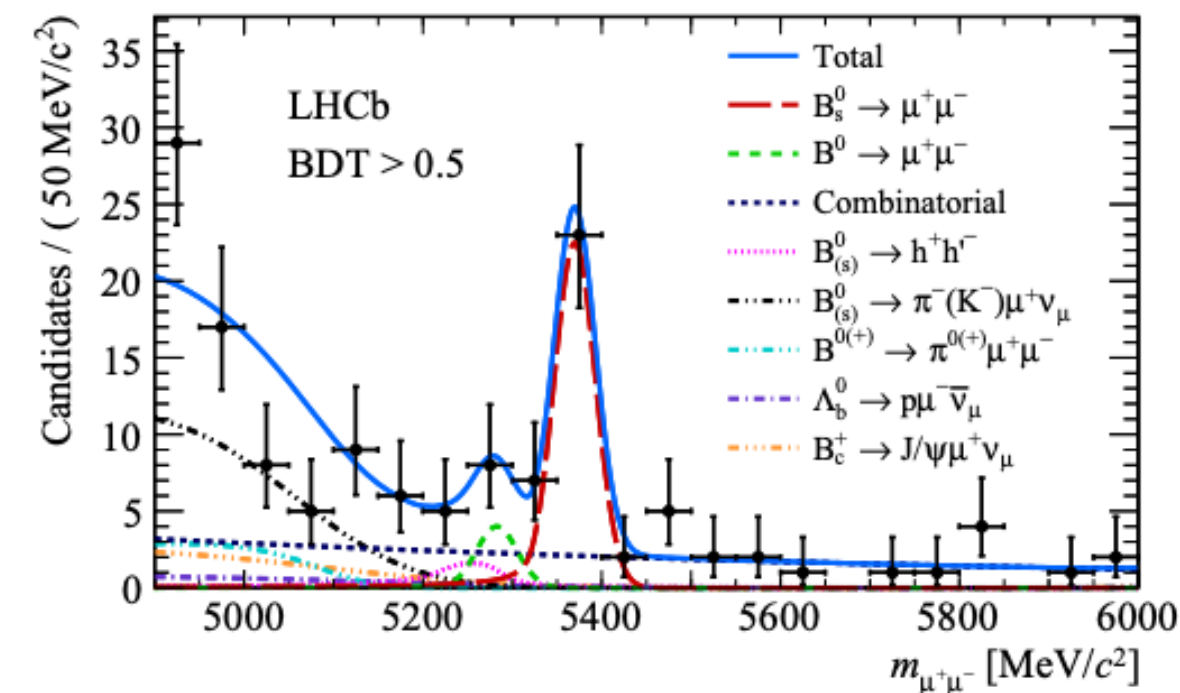
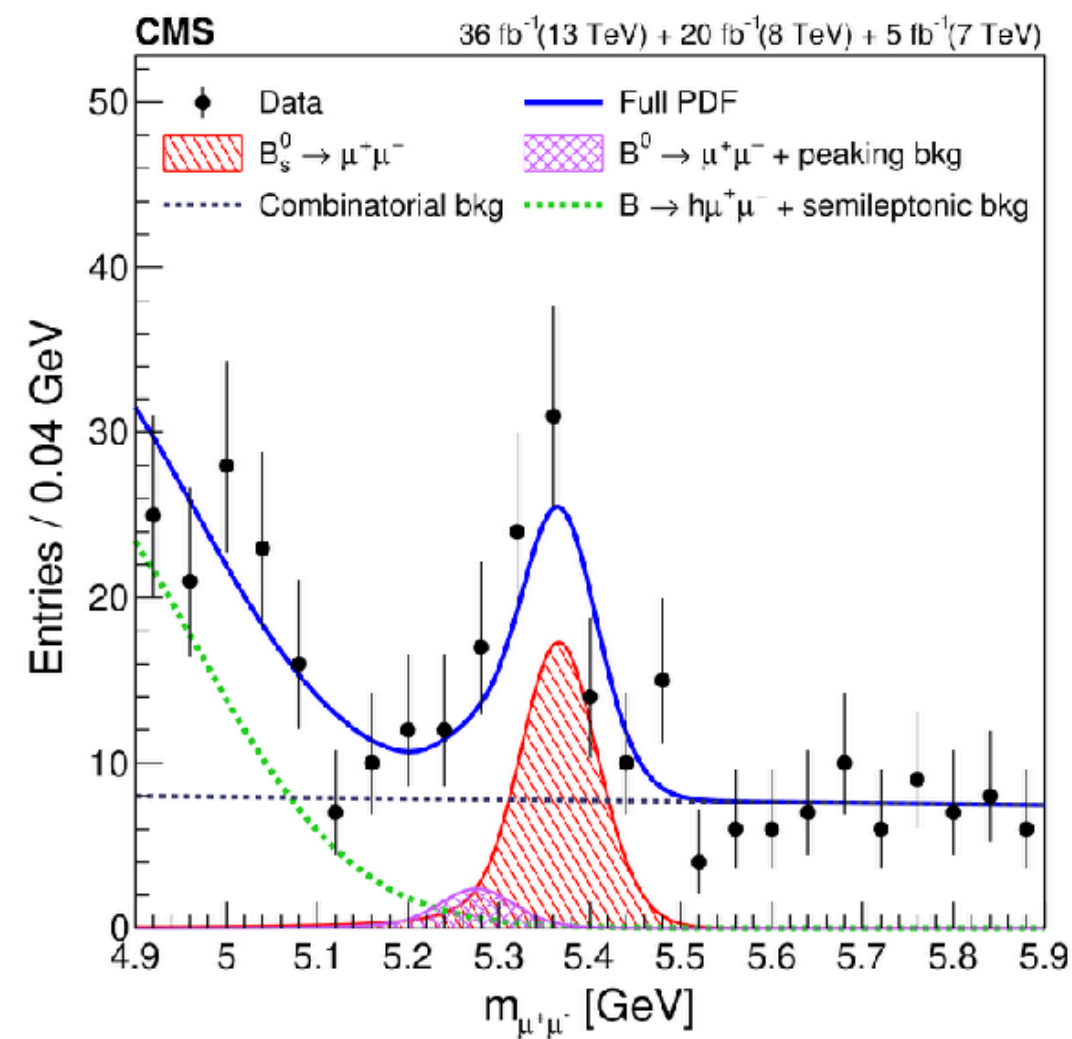
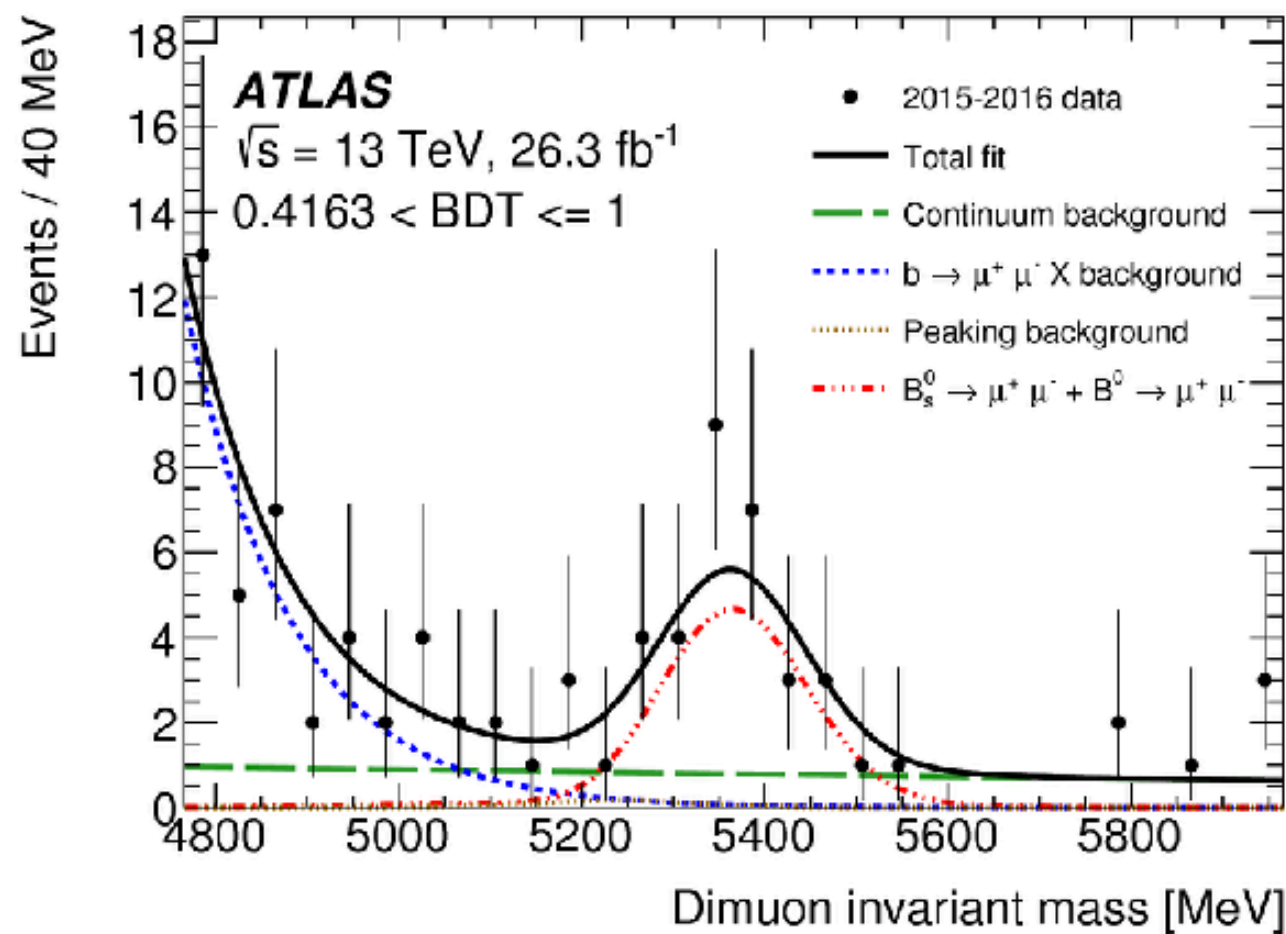


低い運動量領域における p_T resolution ($\sigma(p_T)/p_T \sim 0.5\%$ @ CMS, LHCb, 1% @ ATLAS)

Excited B_c^+ state search

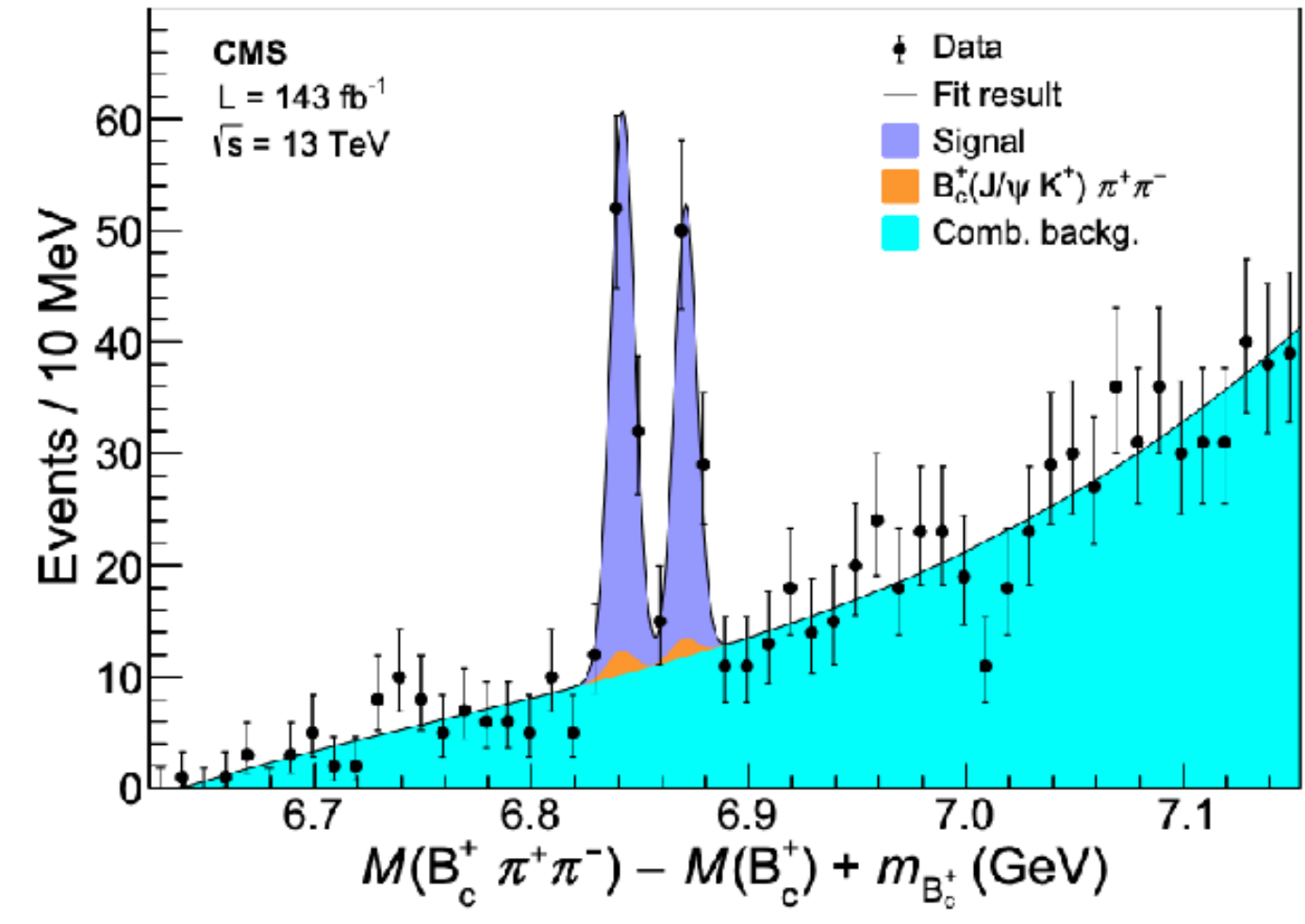
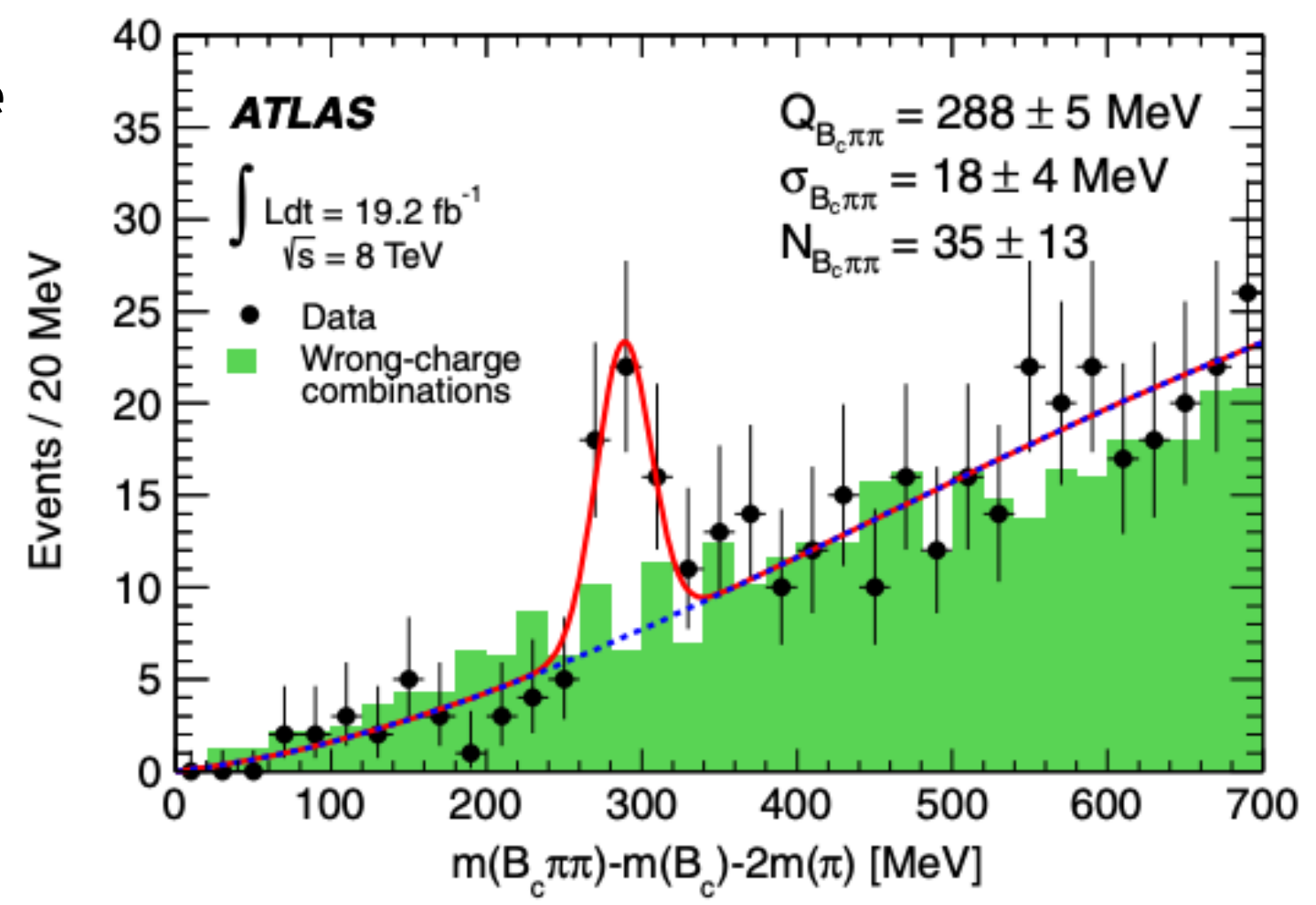


$B_s \rightarrow \mu\mu$

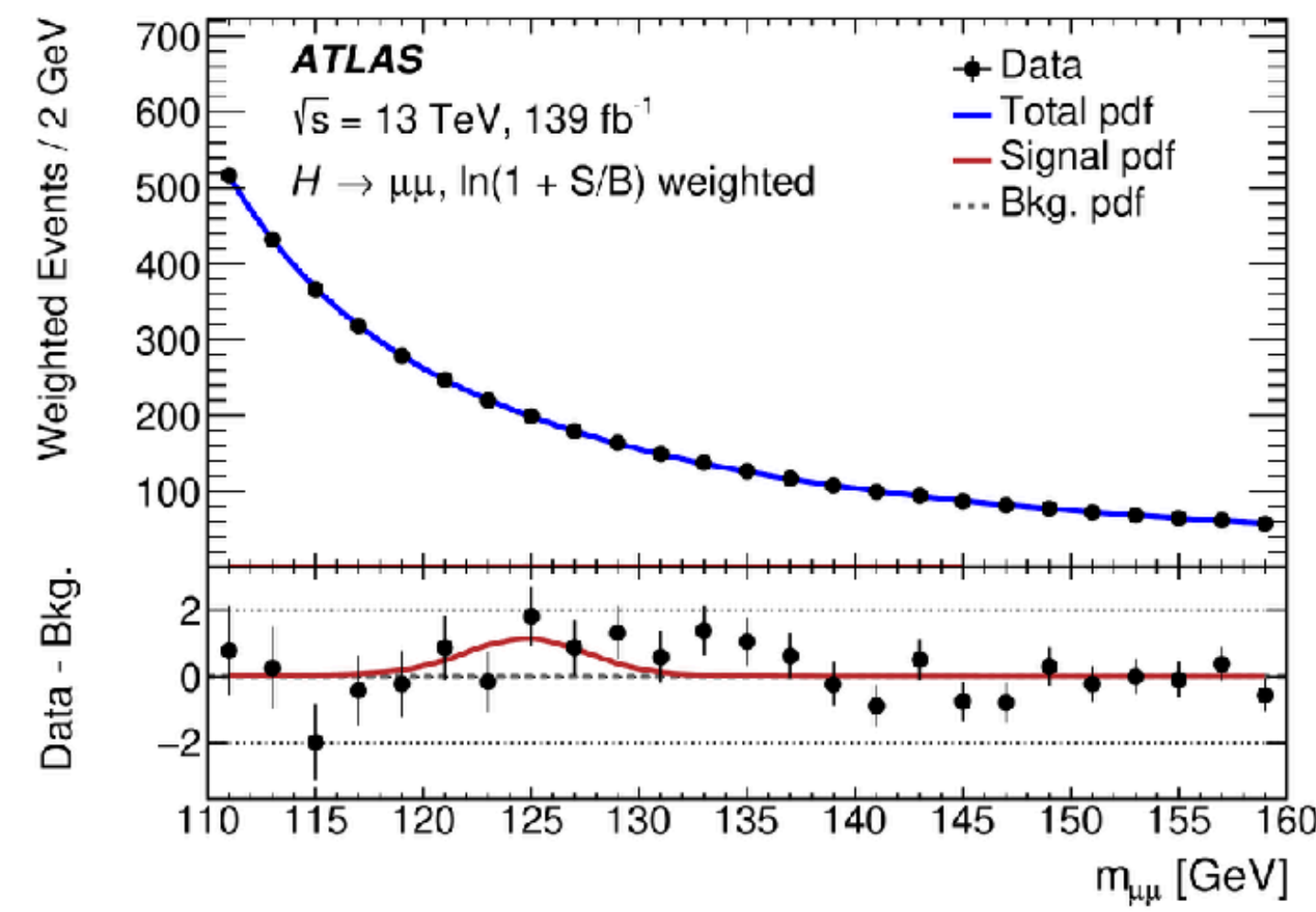


低い運動量領域における p_T resolution ($\sigma(p_T)/p_T \sim 0.5\%$ @ CMS, LHCb, 1% @ ATLAS)

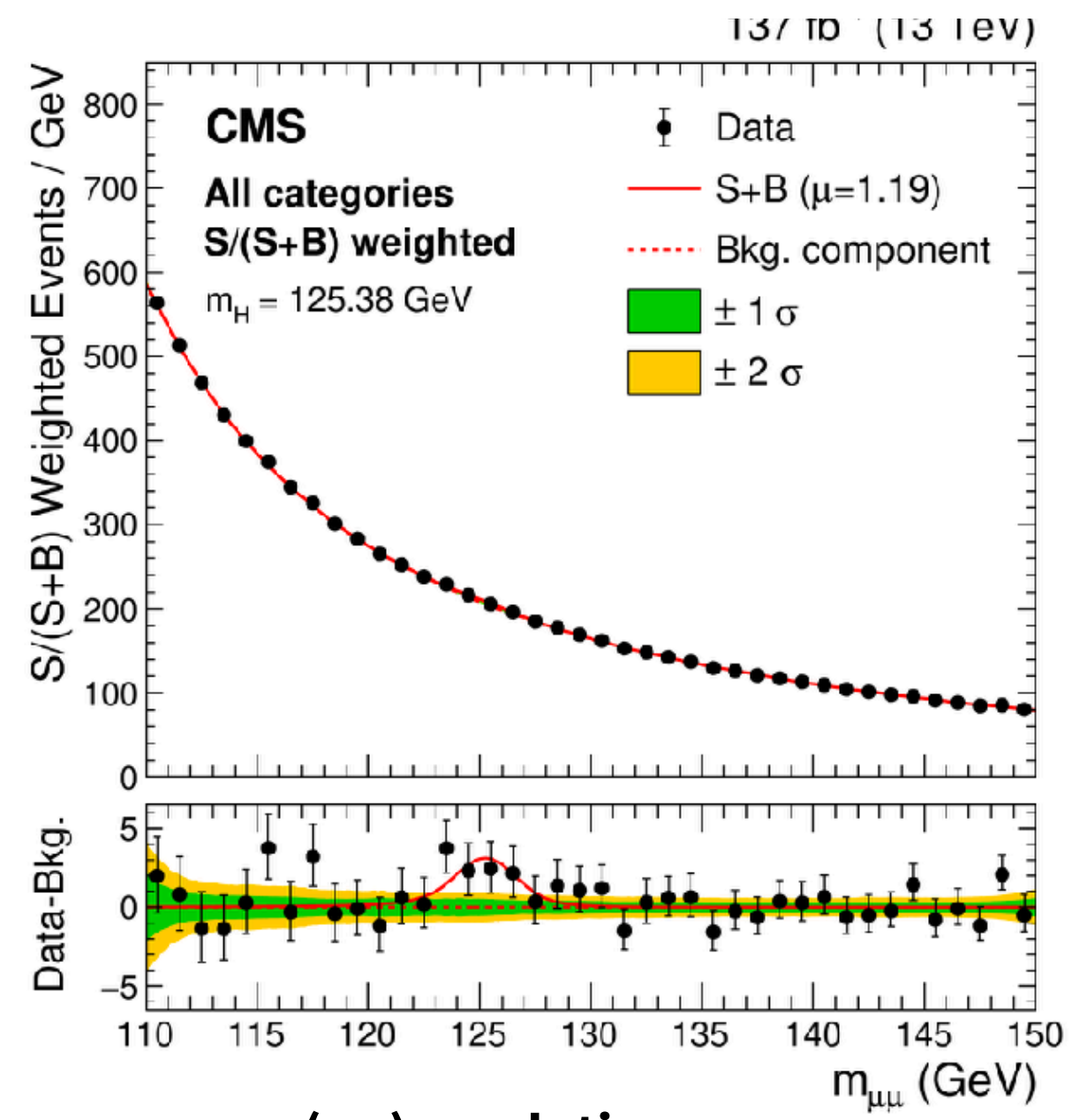
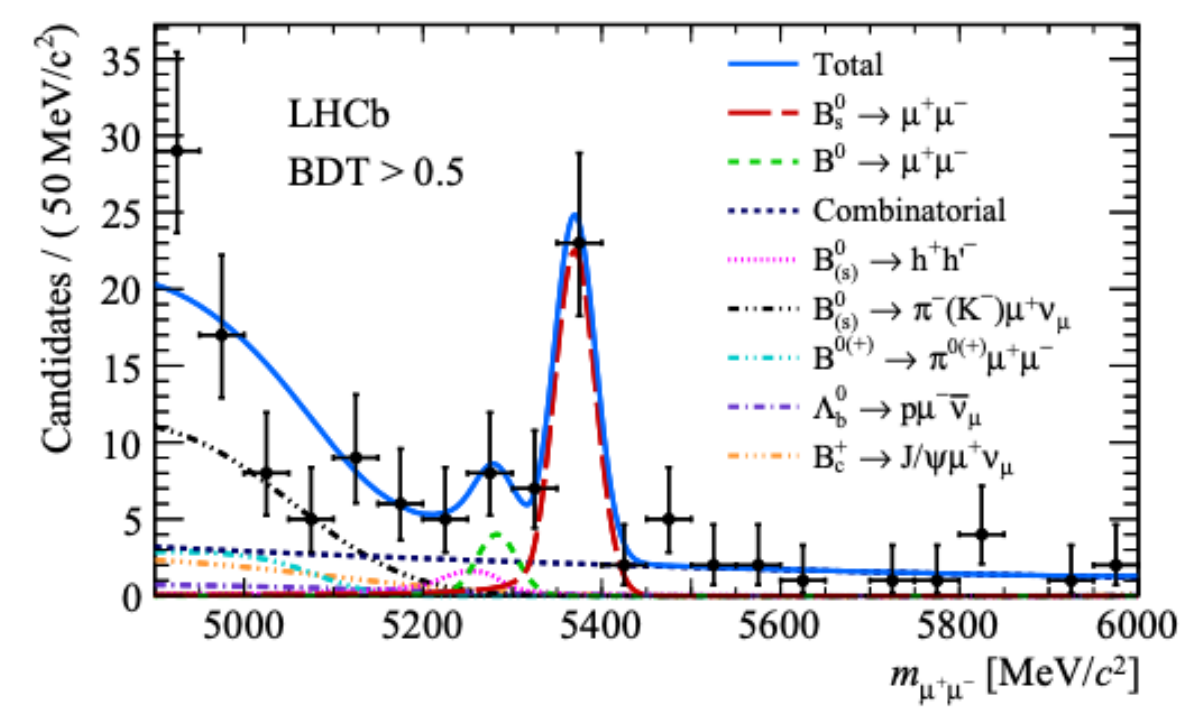
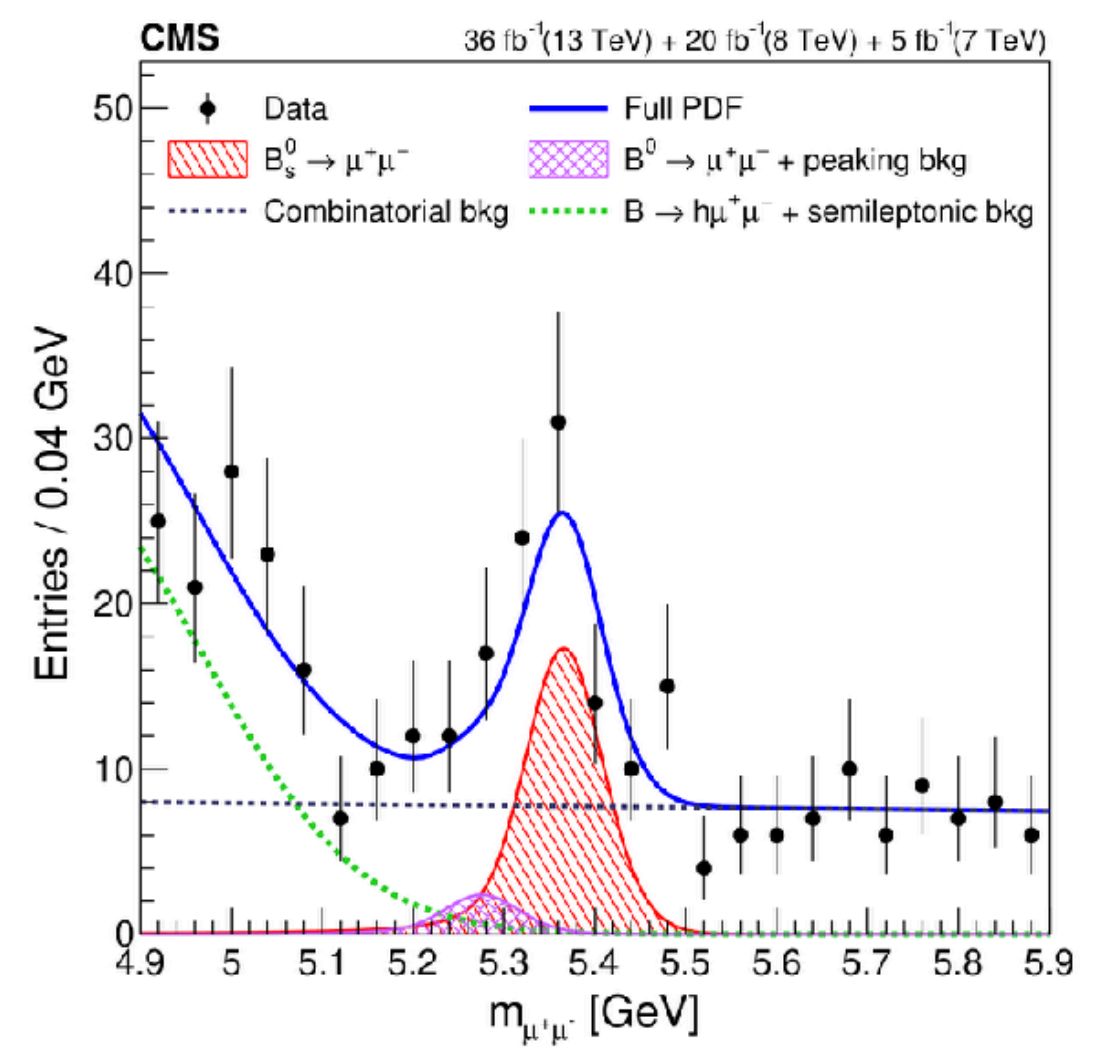
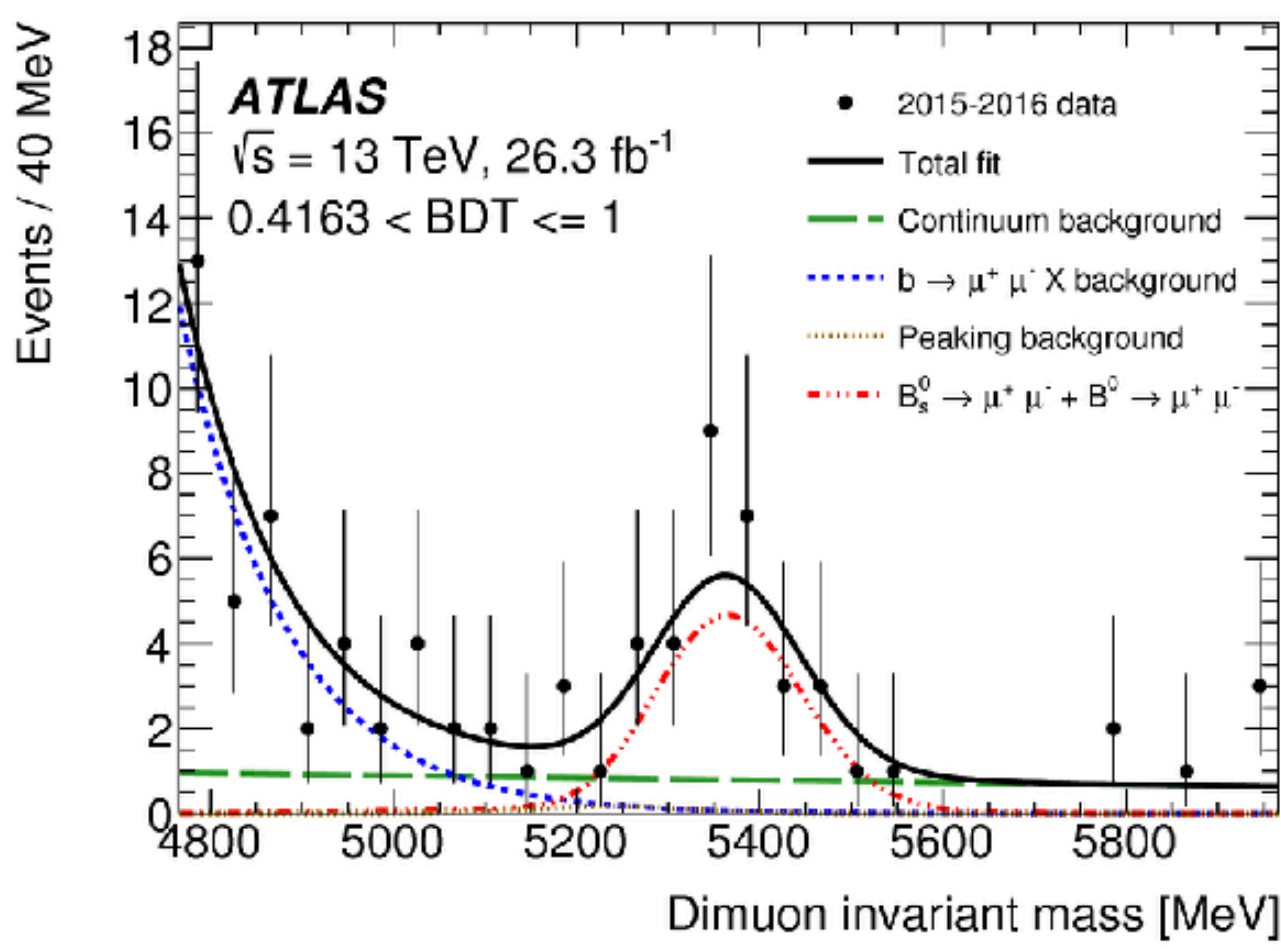
Excited B_c^+ state search



$H \rightarrow \mu\mu$



$B_s \rightarrow \mu\mu$



$m(\mu\mu)$ resolution:
ATLAS: 3-4GeV, CMS: 2GeV