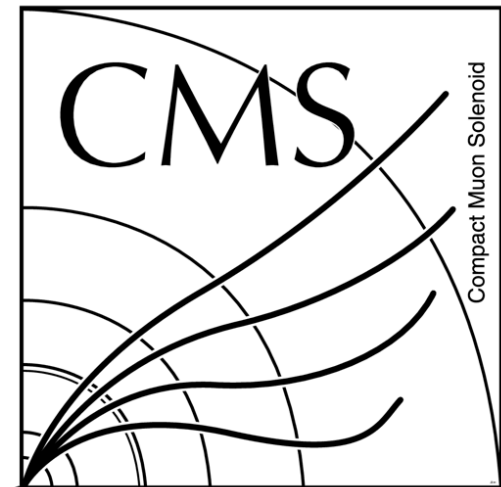


CMSの最新の結果 & H \rightarrow $\tau\tau$ を用いた ヒッグス粒子の CP 測定

Yuta Takahashi (CERN)

Seminar @ ICEPP

2 Oct. 2015



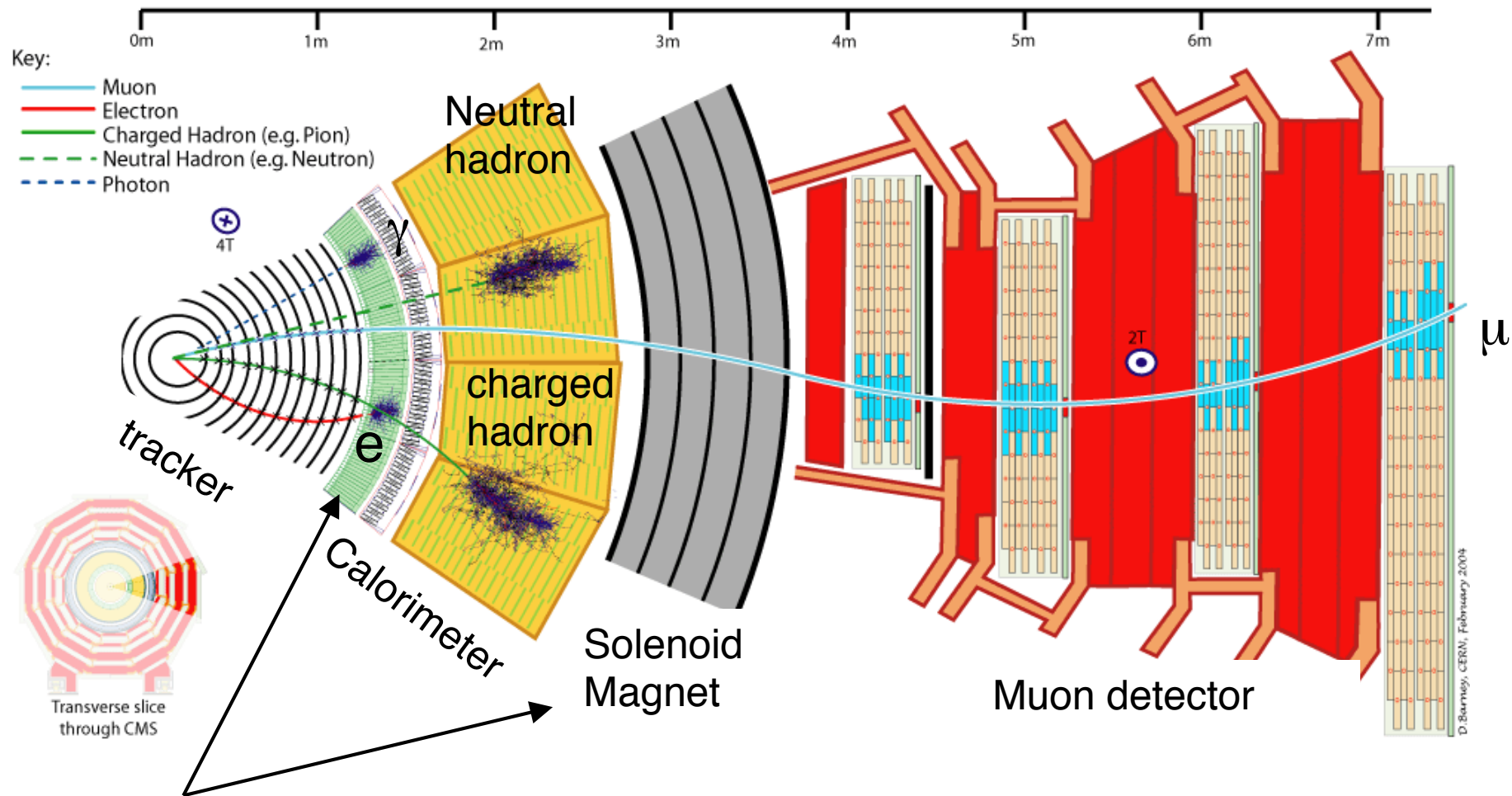
英語が時々混じってしまうと思います … いつでも止めてください (わからない時も)

Outlook

- CMS の status & 13 TeVにおける初期の結果
- Tau ID の性能向上
- $H \rightarrow \tau\tau$ を用いたヒッグス粒子の CP 測定について

CMS検出器

CMS : 直径15m x 長さ 22m
(ATLAS : 直径 25m x 長さ 44m)



強いソレノイド磁場 (3.8T) + 全吸収型電磁カロリメータ
→ e/γ に特化 : $\sigma_{m_{\gamma\gamma}}/m_{\gamma\gamma} \sim 0.8\%$ (cf. ATLAS $\sim 1.2\%$)

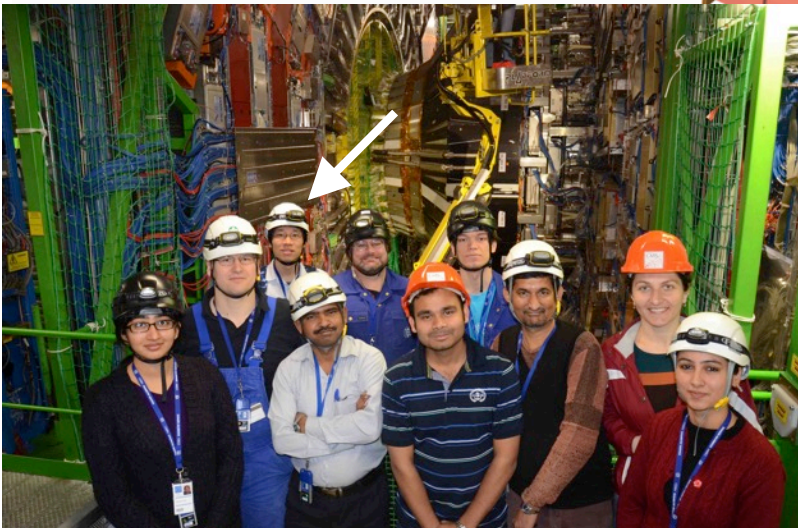
LS1 における upgrade

最外層のハドロンカロリメータ:
光検出器の取り替え

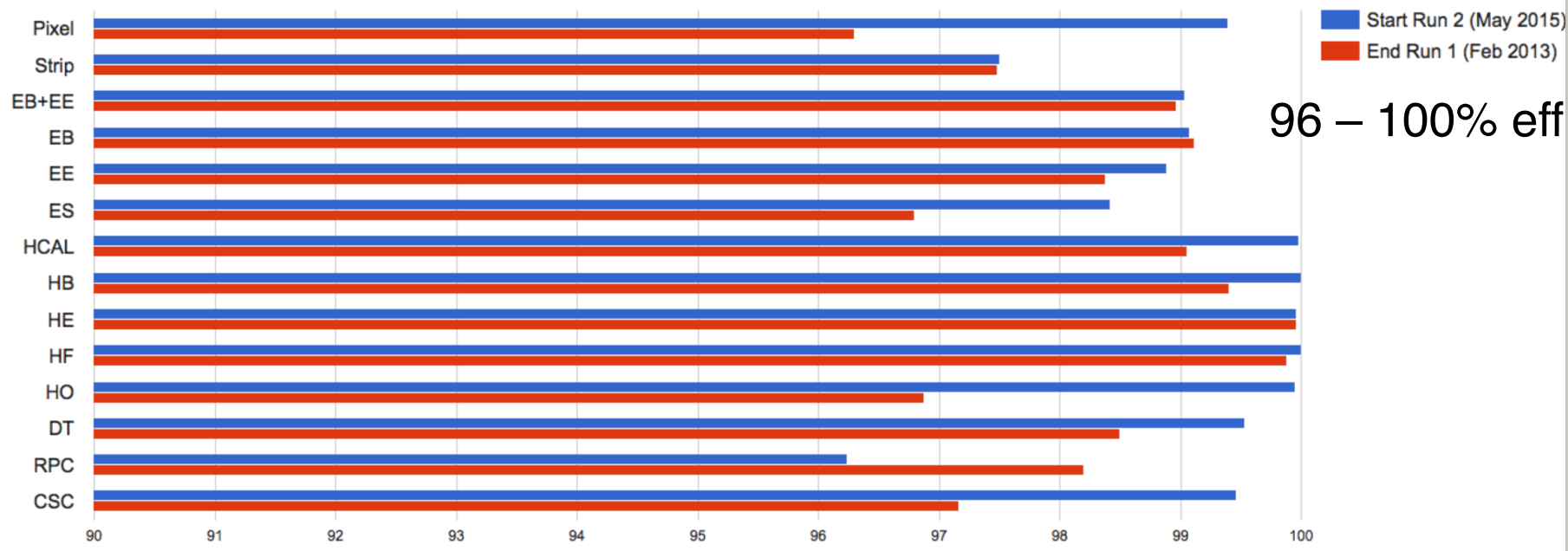
(pixel 4th layerのため)
新しいビームパイプ

4層目の
ミュオン検出器

DAQ
トリガー

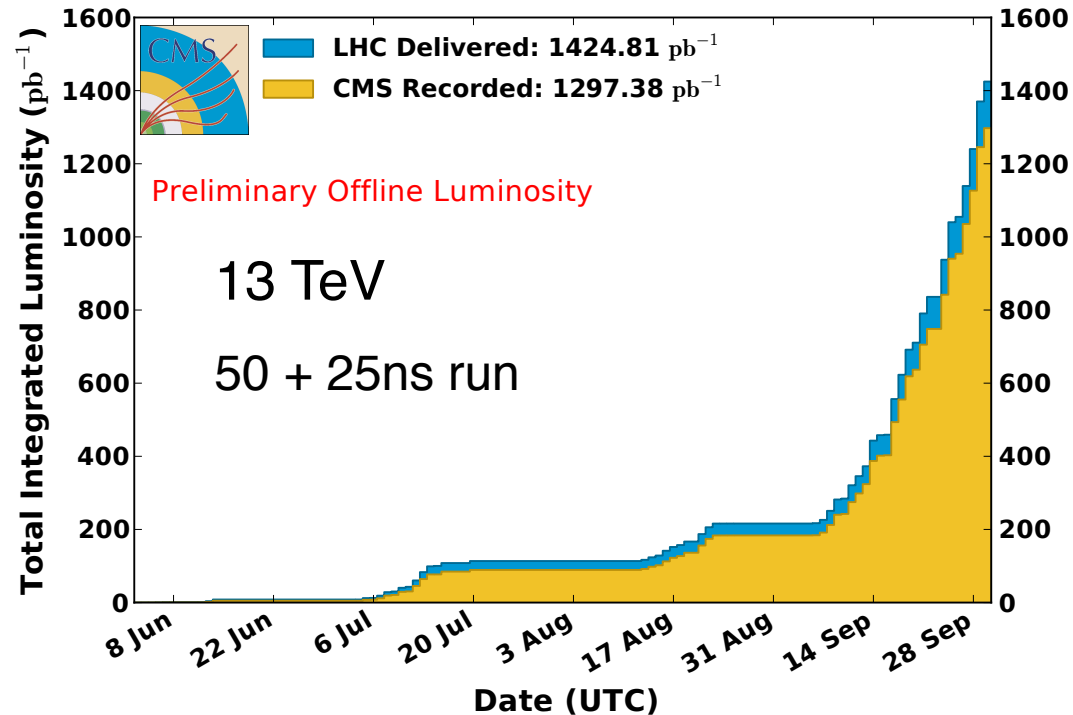


ハドロンカロリメータの
Commissioning crew



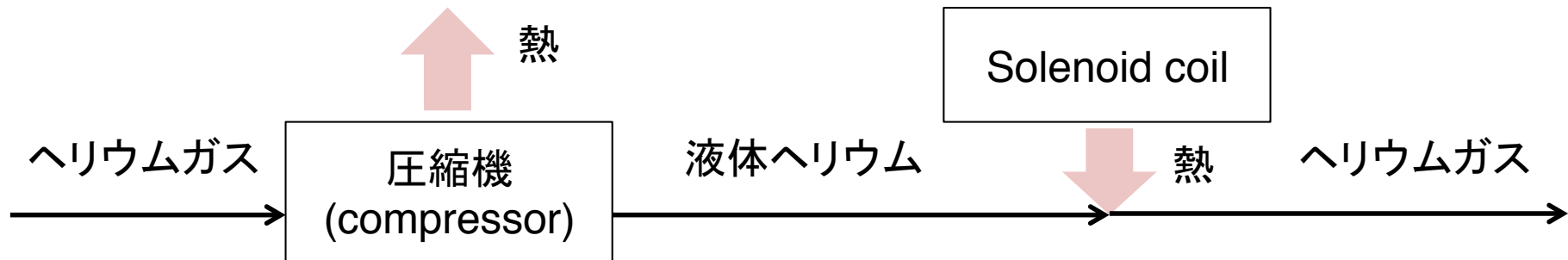
CMS Integrated Luminosity, pp, 2015, $\sqrt{s} = 13$ TeV

Data included from 2015-06-03 08:41 to 2015-09-30 06:44 UTC

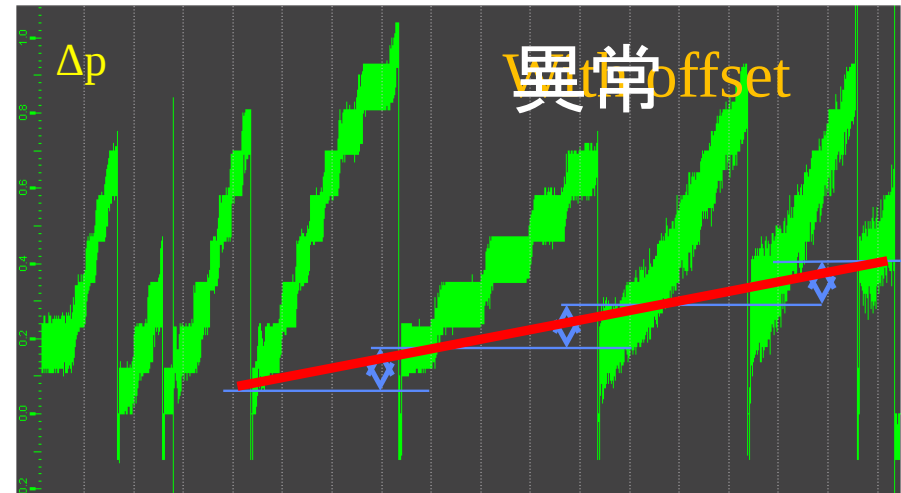
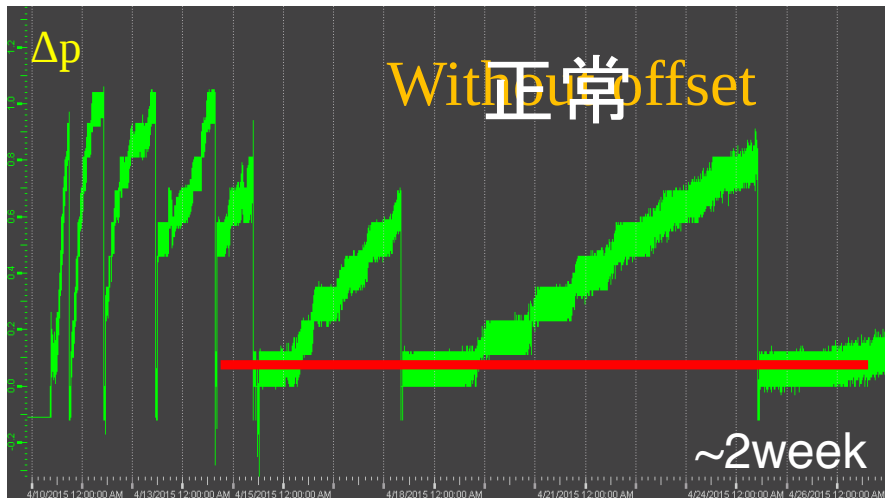


積分ルミノシティ 1297 pb⁻¹
 (~35% は磁場なし)

CMS magnet (cryogenics) issue



Compressor における圧力遷移



- 圧縮機に何かが混入したときにみられる現象 (おそらく機械油)
- TS 中にフィルターを交換したが目立った改善なし? (原因特定に至らず)
 - なるべく LHC と足並みを揃えて cleaning を実施
 - 大規模な cleaning, 部品交換を年末に予定

Selected physics results @ 13TeV⁷

<http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/preliminary-results/> (preliminary な結果)

<http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/> (publications)

- Charged hadron multiplicity v.s η (FSQ-15-001)
- Di-jet bump search (EXO-15-001)
- Ttbar cross-section
 - Di-lepton (TOP-15-003)
 - Semi-lepton (TOP-15-005)
 - Differential (TOP-15-010)
- Single-top (TOP-15-004)
- Ridge analysis (FSQ-15-002)
- W, Z inclusive cross-section (SMP-15-004)
- W', Z' search (DP-2015-037, DP-2015-039)

Soft-QCD

Hard-QCD

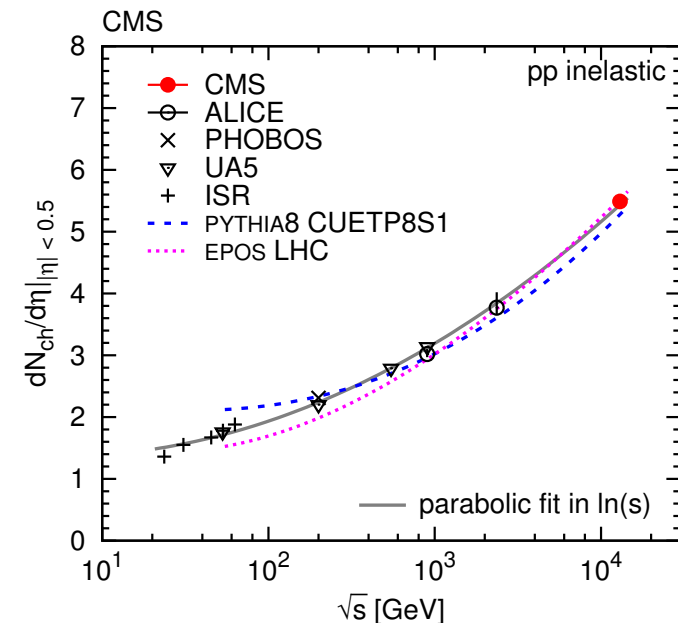
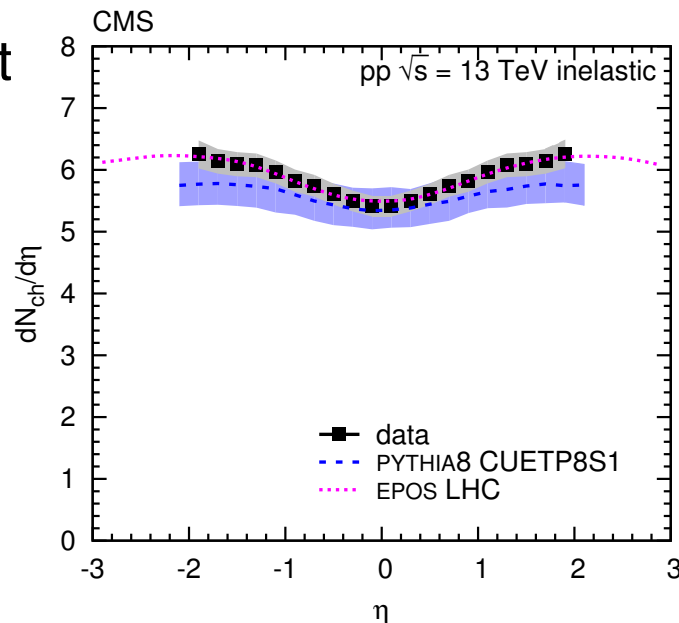
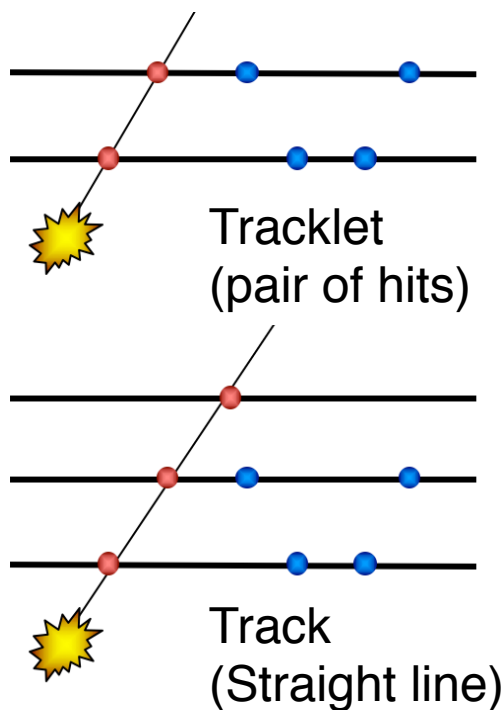
EWK

High mass
EWK

Charged Hadron multiplicity v.s η

- 13 TeV における初の論文 (データ取得時間 : 1.5時間)
- $\langle \mu \rangle \sim 5\%$, $B = 0T$ (low p_T の charged hadron に感度)

Counting experiment
@ pixel detector

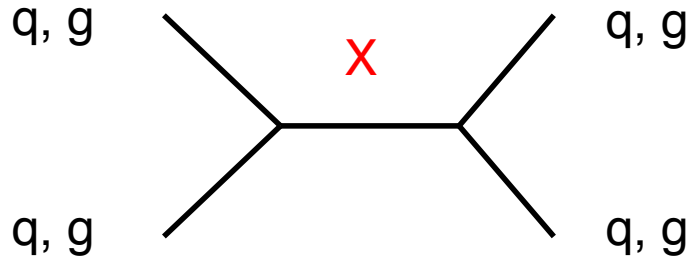


Soft / Hard scattering
の比率は \sqrt{s} に依存

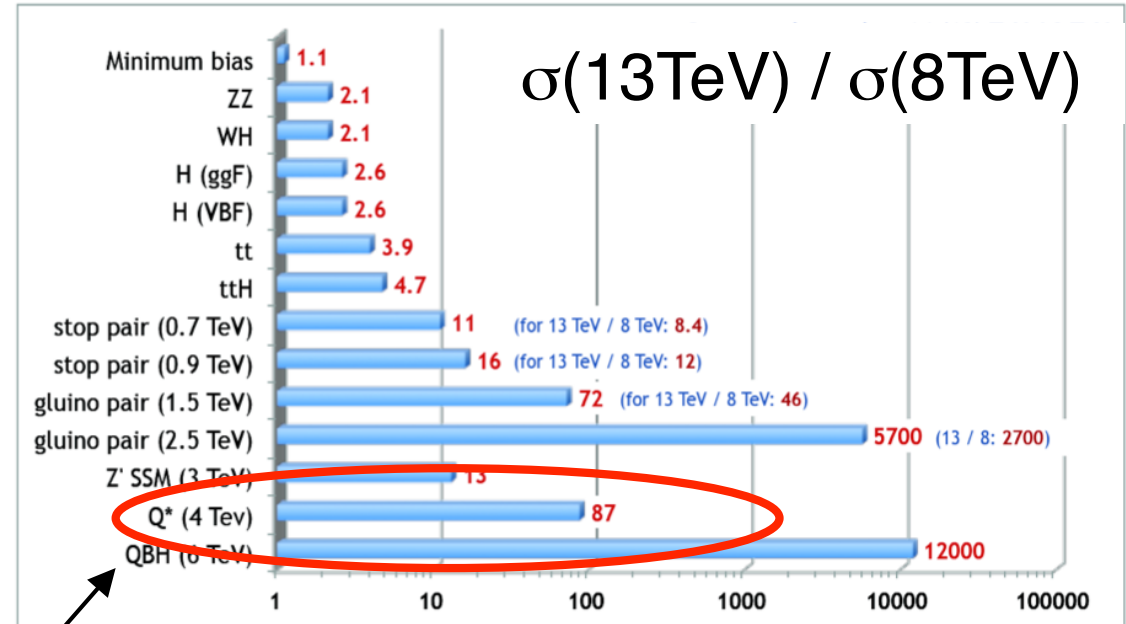
$$dN_{ch}/d\eta_{(|\eta| < 0.5)} = 5.49 \pm 0.01 \text{ (stat)} \pm 0.17 \text{ (sys)}$$

13 TeV における theory / MC の tuning

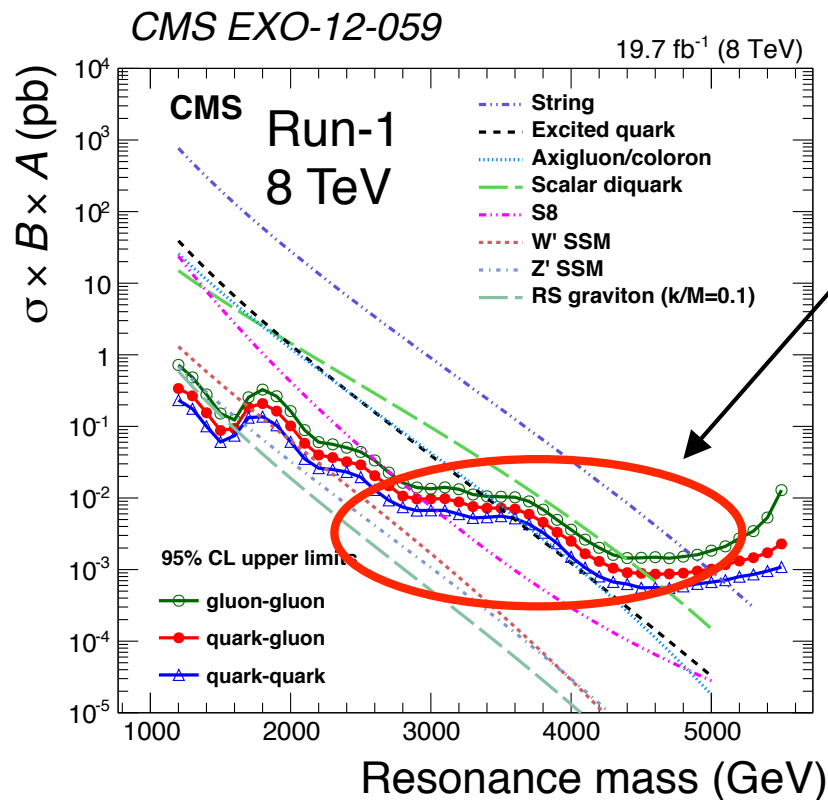
di-jet resonance search



“古典的”な Bump 探し



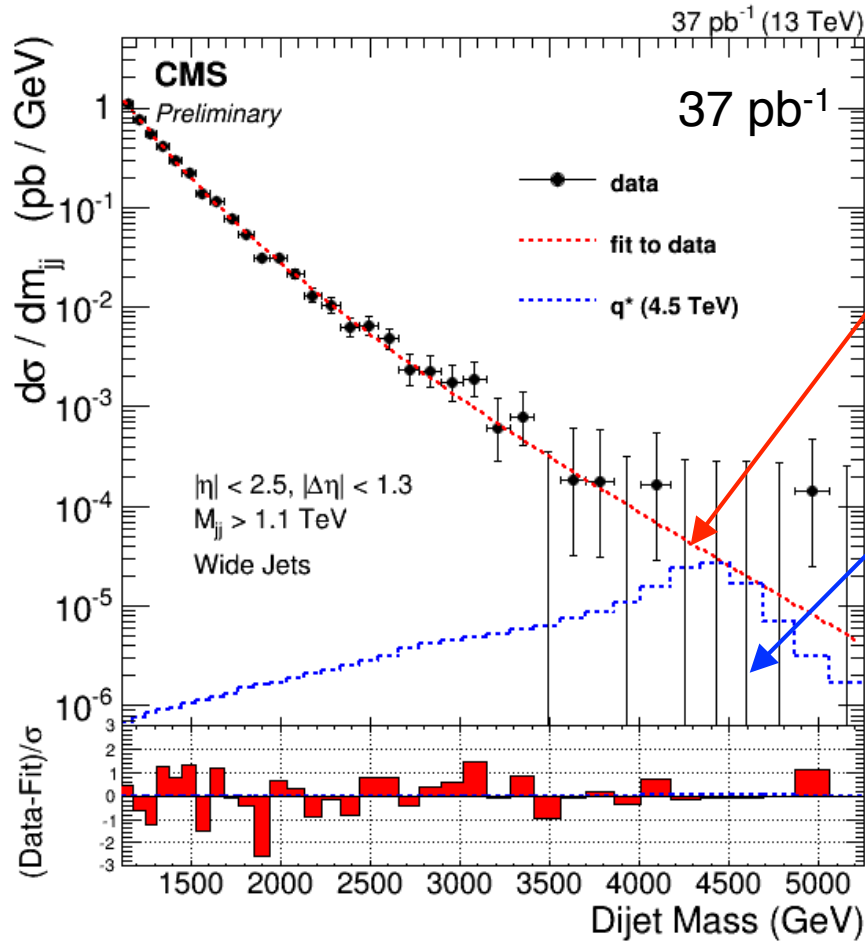
200 pb⁻¹ @ 13TeV ~ run-1 (20 fb⁻¹)



- \sqrt{s} が増加することによる恩恵をフルにうける解析
- シンプル、かつ検出器の理解がさほど必要でない
→ 初期の解析に適する

di-jet resonance search

2 jets ($p_T > 60$ and 30 GeV) & $|\Delta\eta_{jj}| < 1.3$ (t-channel を suppress)



Background fit

$$\frac{d\sigma}{dm_{jj}} = p_0 \frac{(1-x)^{p_1}}{x^{p_2}}, \quad x = \frac{m_{jj}}{\sqrt{s}}$$

q* (4.5 TeV) → qq

$M_{jj} > 3.5$ TeVで、
4 事象観測

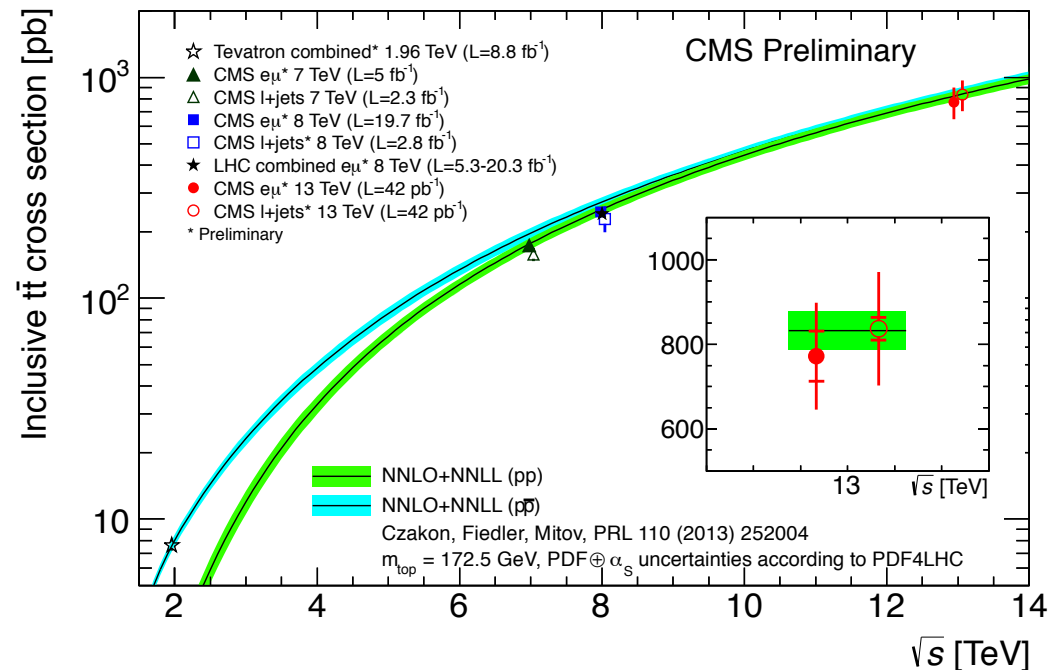
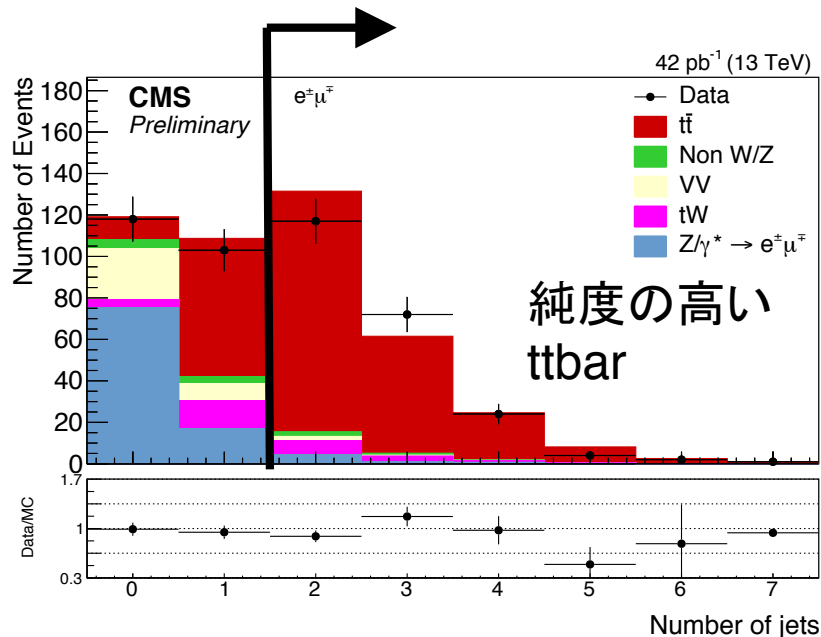
(4.6 Bkg exp., 0.8 sig. exp)

Model	Mass Limits (TeV)			
	Run 1 (20 fb ⁻¹)		Run 2 (42 pb ⁻¹)	
	Observed	Expected	Observed	Expected
String Resonance (S)	5.0	4.9	5.1	5.2
Excited Quark (q*)	3.5	3.7	2.7	2.9
Axigluon (A) / Coloron (C)	3.7	3.9	2.7	2.9
Scalar Diquark (D)	4.7	4.7	2.7	3.3
Color Octet Scalar (S8)	2.7	2.6	2.3	2.0

ttbar cross-section

- 精密測定 + ほとんどの物理解析において主な背景事象
 - $\sigma_{tt}(13\text{TeV}) \sim 800\text{pb} \rightarrow 1\text{Hz} @ L = 10^{34} (\text{/cm}^2\text{s}) \rightarrow \text{Top-factory}$
- Di-lepton, leptonic + jet を使用

- ↓
- Opposite-sign e + muon ($p_T > 20 \text{ GeV}$)
 - ≥ 2 jets ($p_T > 30 \text{ GeV}$)

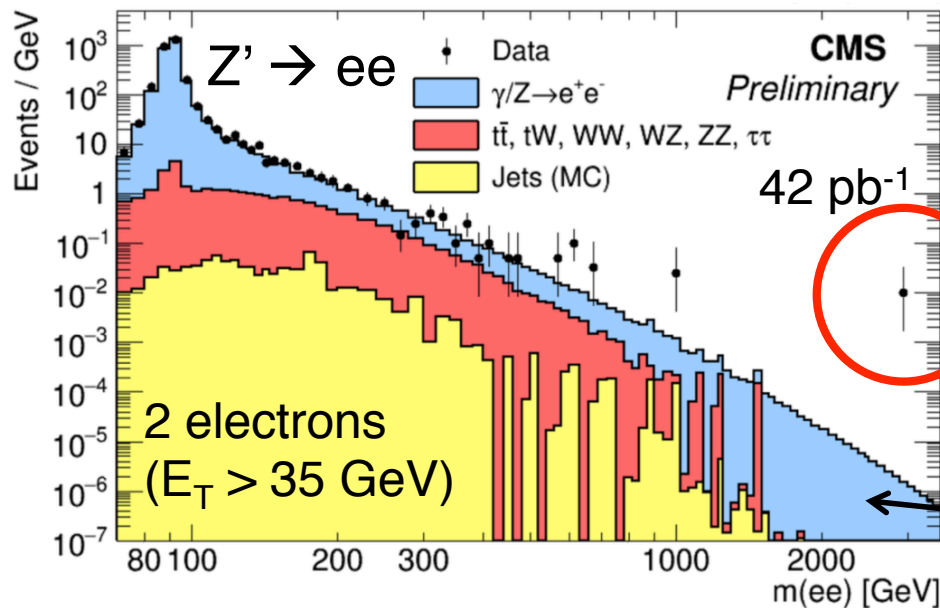
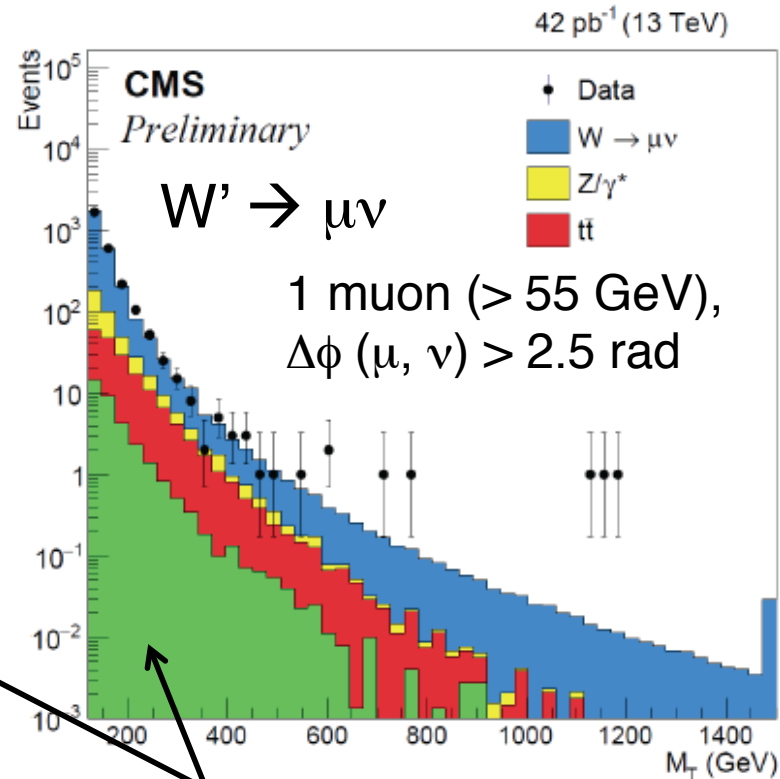
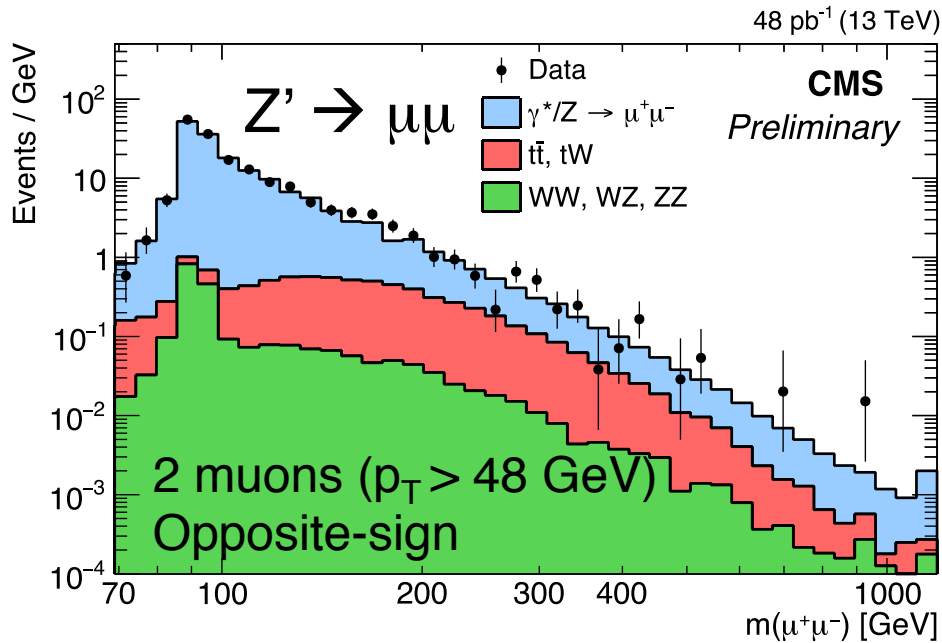


$$\sigma_{tt} (e\mu) = 722 \pm 60 (\text{stat}) \pm 62 (\text{sys}) \pm 93 (\text{lum}) \text{ pb}$$

$$\sigma_{tt} (l+j) = 836 \pm 27 (\text{stat}) \pm 84 (\text{sys}) \pm 100 (\text{lum}) \text{ pb}$$

$$\text{cf) } \sigma_{tt}^{\text{NNLO}} = 832^{+40}_{-46} \text{ pb}$$

W', Z' : early look at 13TeV



初期の alignment を使用

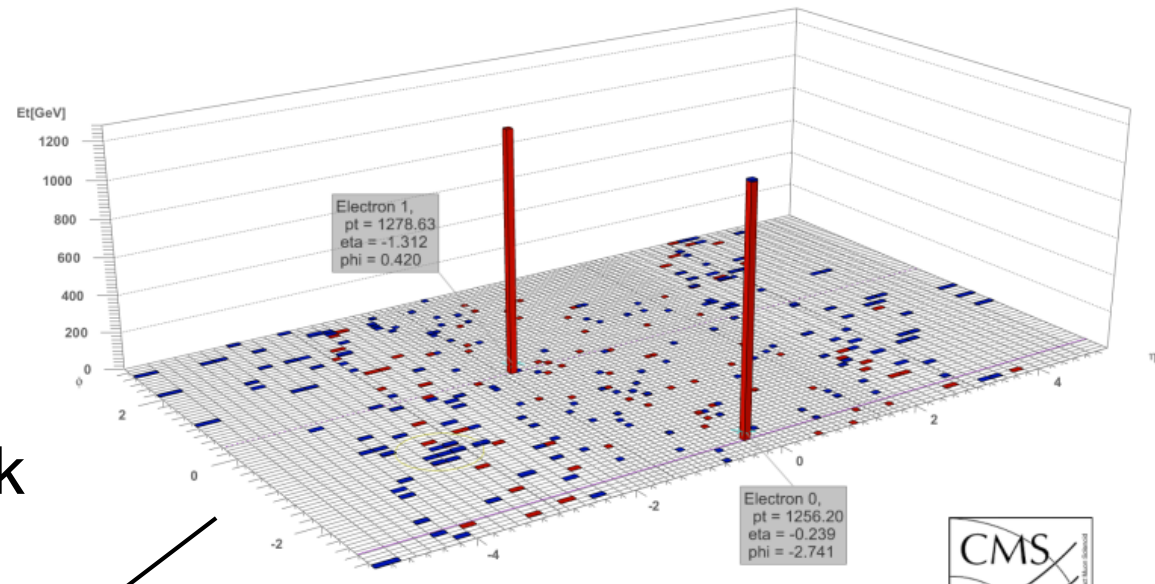
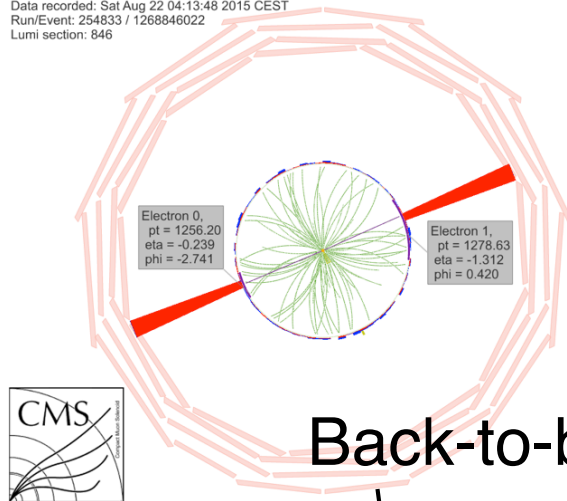
Electron は miss-alignment の影響を受けない

2.9 TeV

M > 2TeV での exp. Bkg. ~ 0.007

Spectacular ee event

CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sat Aug 22 04:13:48 2015 CEST
Run/Event: 254833 / 1268846022
Lumi section: 846



	electron 0	electron 1
E_T	1260 GeV	1280 GeV
η	-0.24	-1.31
ϕ	-2.74 rad	0.42 rad
charge	-1	+1
mass	2.91 TeV	
$\cos \theta_{CS}^*$	-0.49	

Energy balanced (resonance-like)

- Run-1 の upper limit : $\sigma = 4.4 \text{ fb} @ m_{ee} = 3\text{TeV}$
- (もし信号ならば) 42pb^{-1} で 1event $\rightarrow \sigma = 24 \text{ fb}$
additional な event は数 100 pb^{-1} まで出ないはず

Colins-Soper angle が negative (DY bkg. は通常 positive)

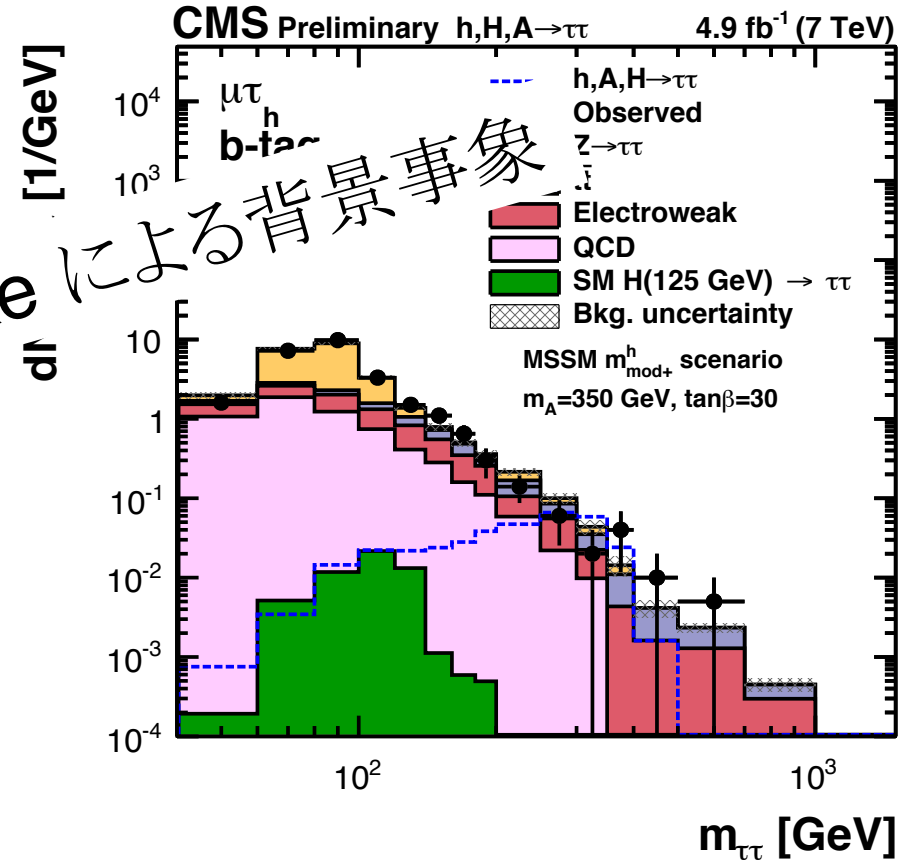
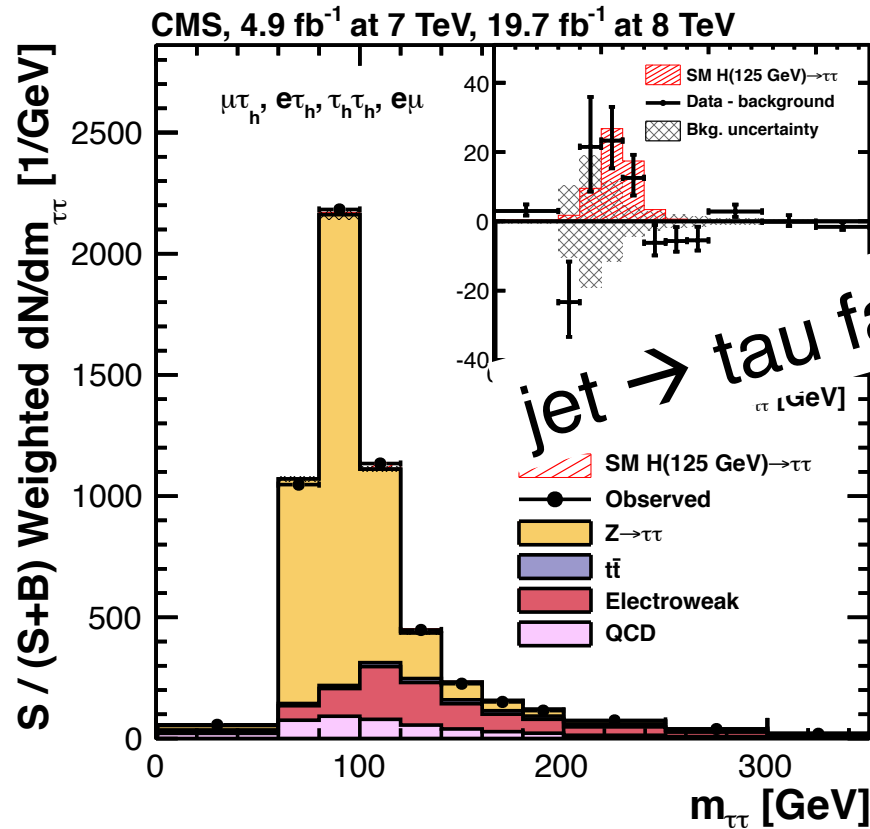
Outlook

- CMS の status & 13 TeVにおける初期の結果
- Tau ID の性能向上
- $H \rightarrow \tau\tau$ を用いたヒッグス粒子の CP 測定について

Tau ID plays an important role

JHEP 05 (2014) 104

CMS-PAS-HIG-14-029

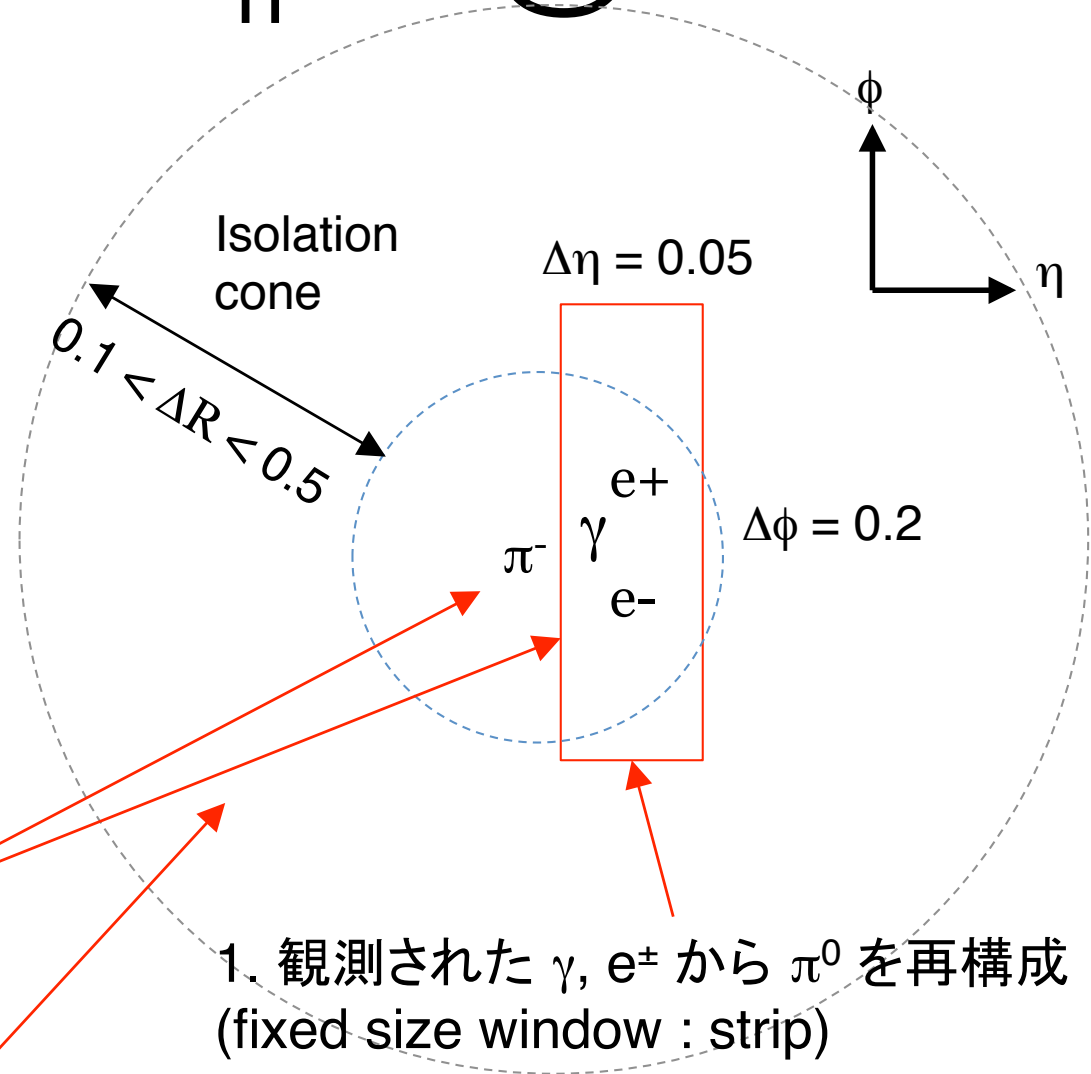
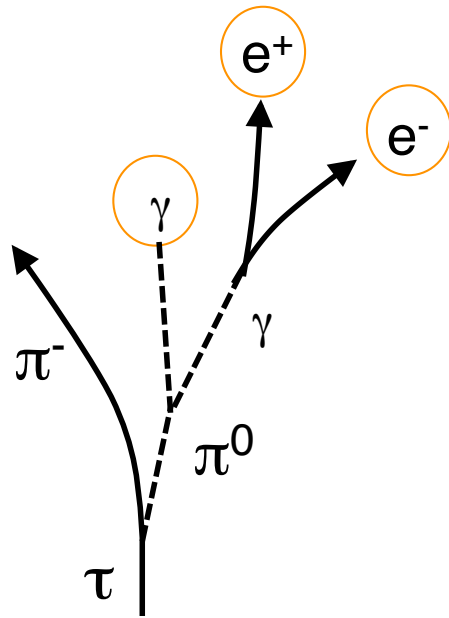


Run-1 : Tau ID efficiency : 50 – 60% @ 1% fake rate

- Run-2 {
- 高い ID efficiency @ できるだけ低い fake rate
 - 高い運動量領域まで ID efficiency を保持したい

Run-1における τ_h ID @ CMS

$$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \nu \quad (\text{Br} = 26\%)$$



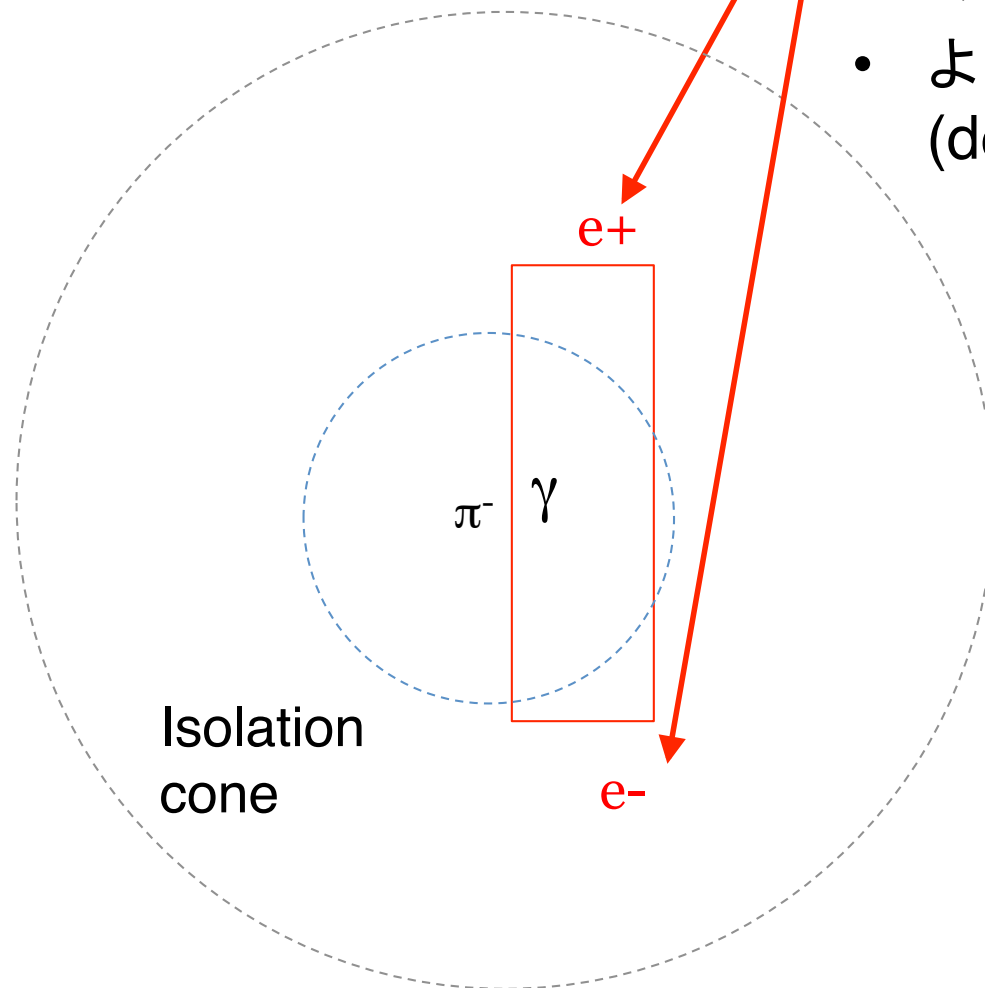
2. $m(\pi^- + \text{strip})$ を計算
タウの質量領域かをチェック

1. 観測された γ , e^\pm から π^0 を再構成
(fixed size window : strip)

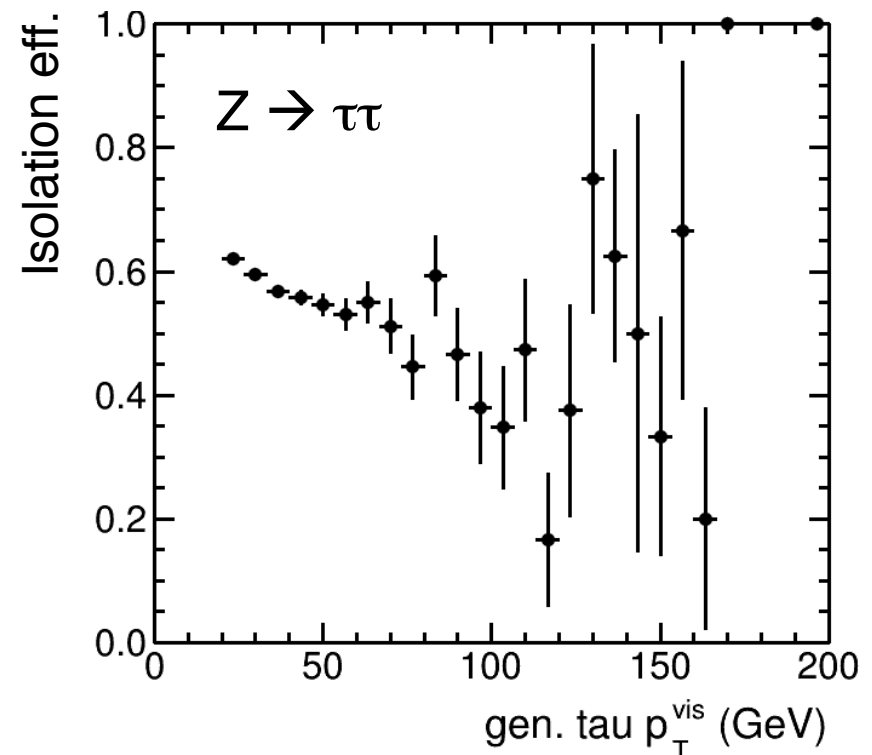
3. 本物の tau と QCD jet を分けるため、isolation cone における
エネルギー損失 < 2 GeV を要求

Run-1 τ_h ID の限界

$$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \nu$$



- 時々、 e^+/e^- が strip の外に出る
- Electron の total energy が 2GeV以上の
場合、信号なのに reject されてしまう
- より高い tau p_T で顕著
(decay product が high p_T になるため)

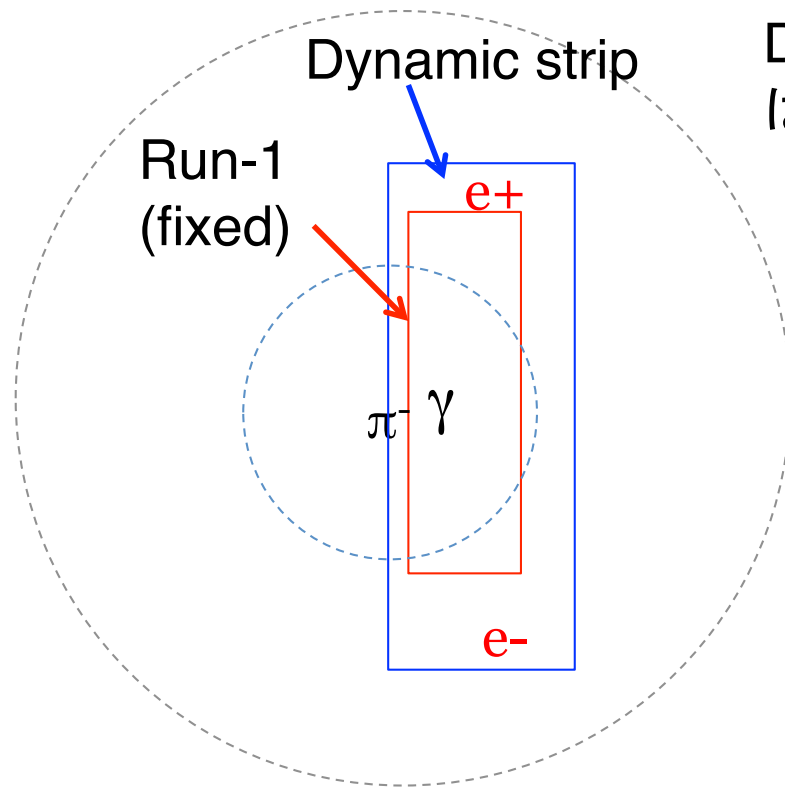


τ_h ID の性能向上へ

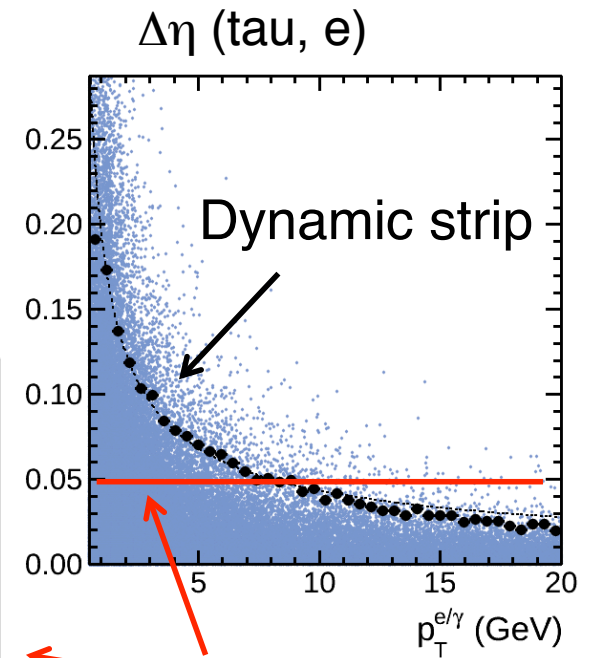
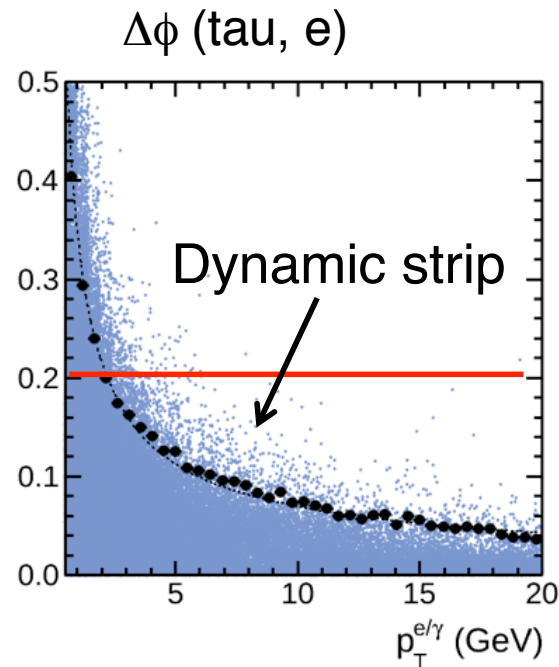
e^+/e^- が strip の外に出る確率は $p_T(e)$ に依存

→ Low p_T の electron ほど磁場に曲げられて外に出やすい

→ $p_T(e)$ に応じて strip size を動的に変化 (dynamic strip)

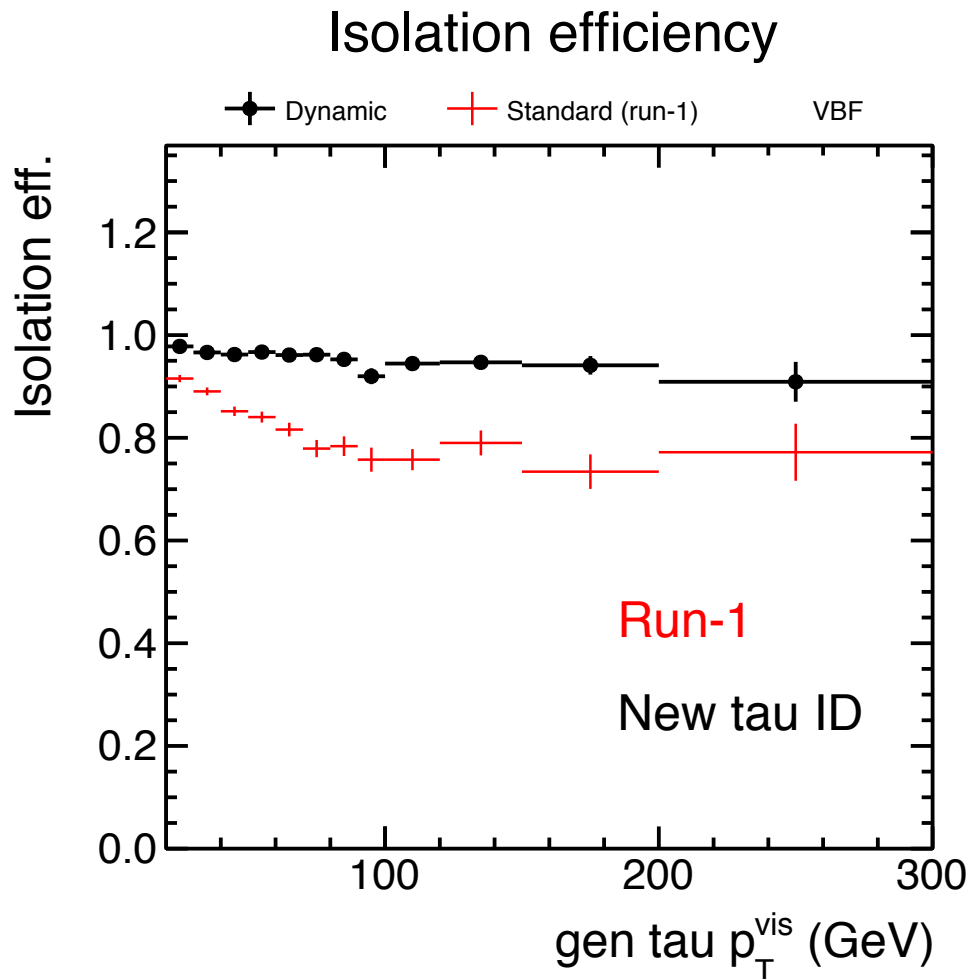


Dynamic strip のサイズ
はシミュレーションで決定

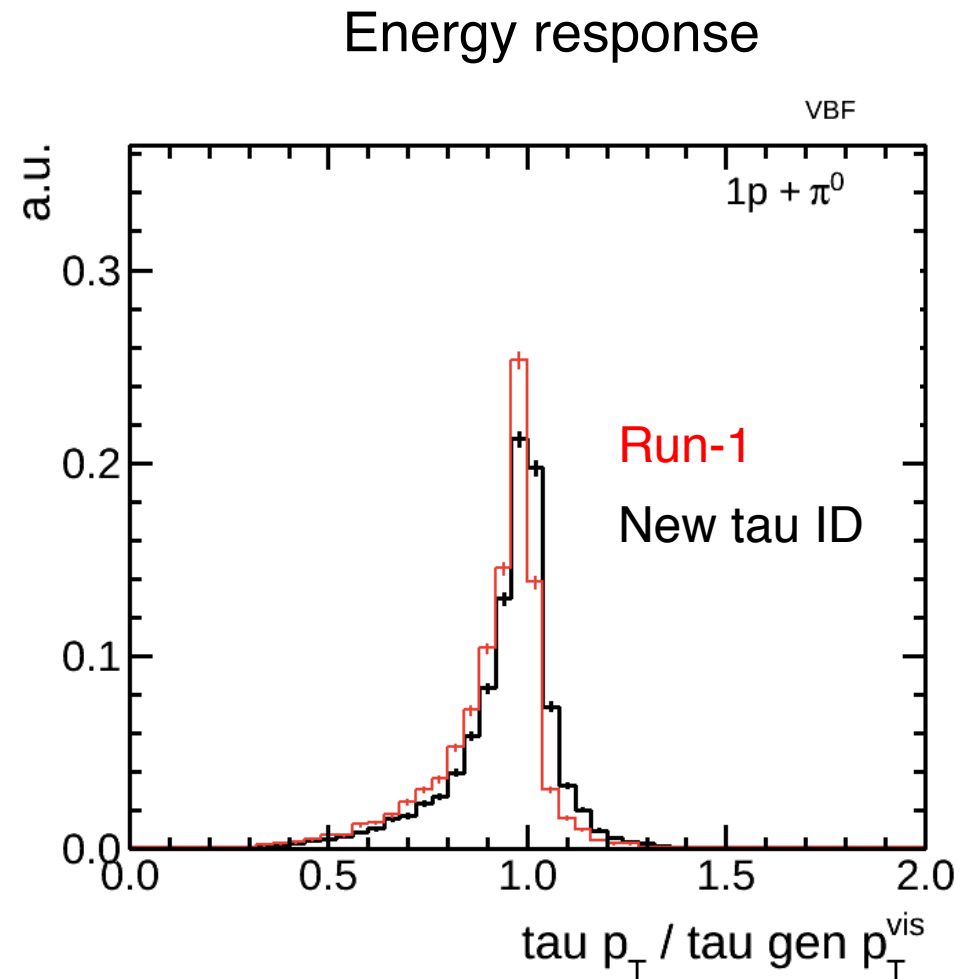


Run-1 のサイズ

Performance の改善

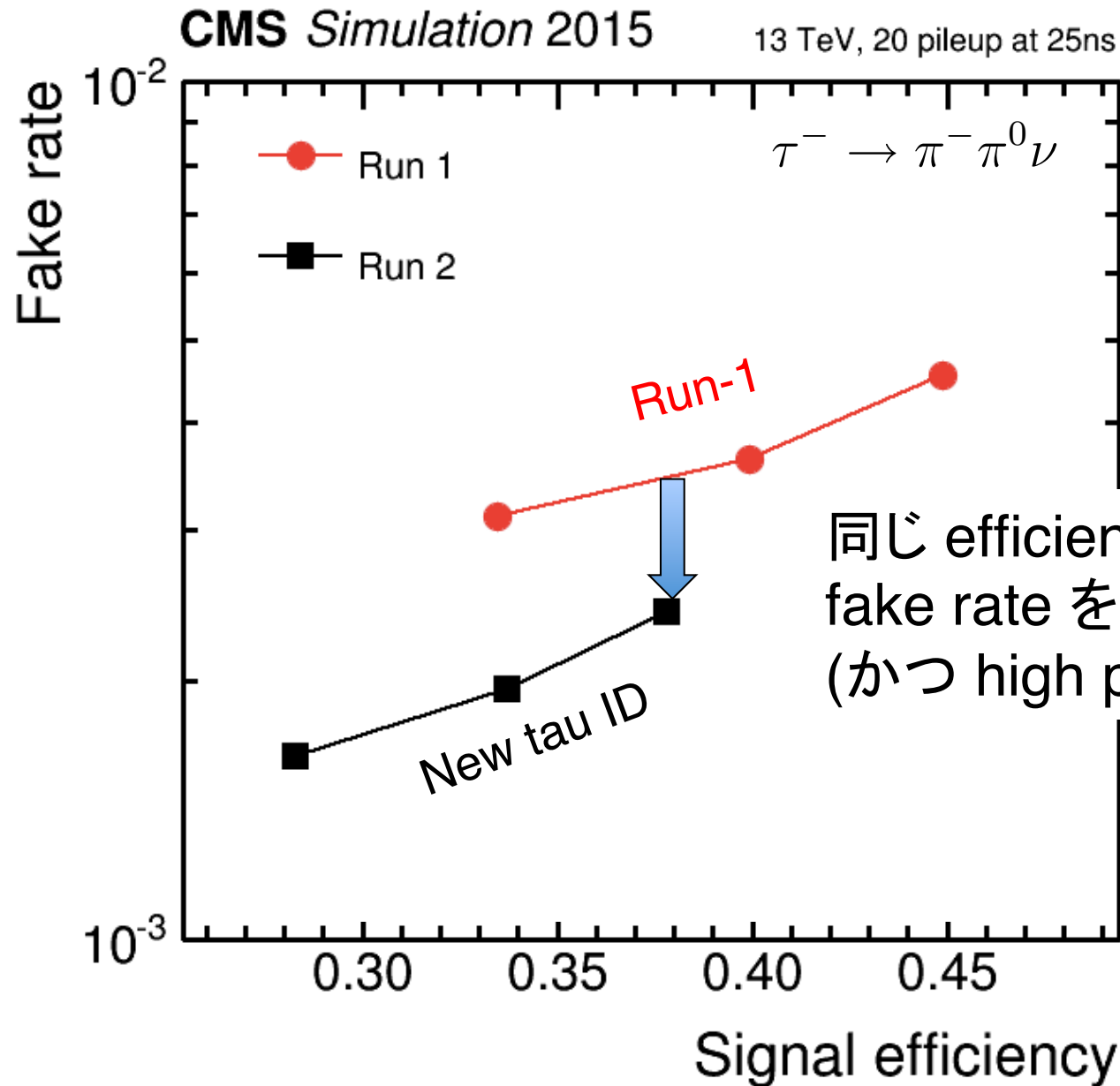


Efficiency を大幅に改善
Efficiency drop が改善



1 に近い energy response

最適化して ...



同じ efficiency point で、
fake rate を 30%程度削減
(かつ high p_T でも高い識別効率)

- 提案
- Development
- CMS run-2に正式採用

Outlook

- CMS の status & 13 TeVにおける初期の結果
- Tau ID の性能向上
- $H \rightarrow \tau\tau$ を用いたヒッグス粒子の CP 測定について

Why Higgs CP is interesting ?

- SM : 1つのヒッグス粒子, CP固有状態, CP even
- BSM model
 - MSSM : 3つのヒッグス粒子, CP固有状態, even (h^0, H^0), odd (A)
- 一般的に
 - 見つかったヒッグス粒子は必ずしも CP 固有状態である必要なし
→ CP even と odd が mix した状態として存在

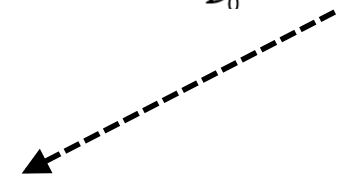
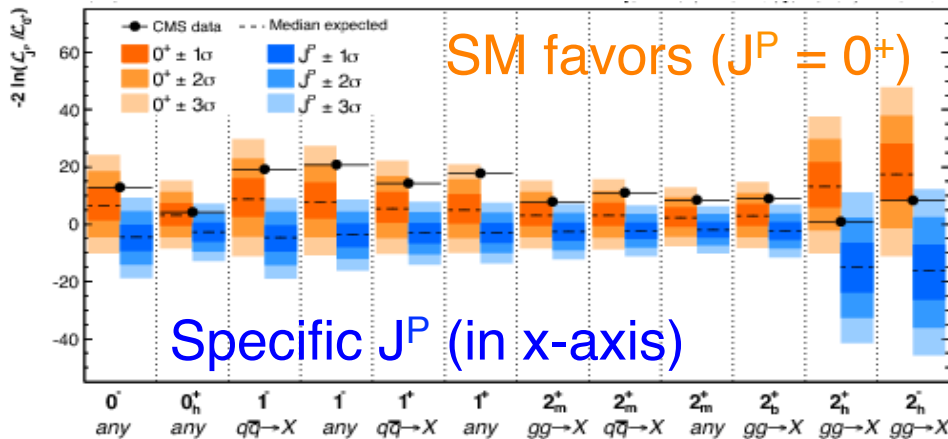
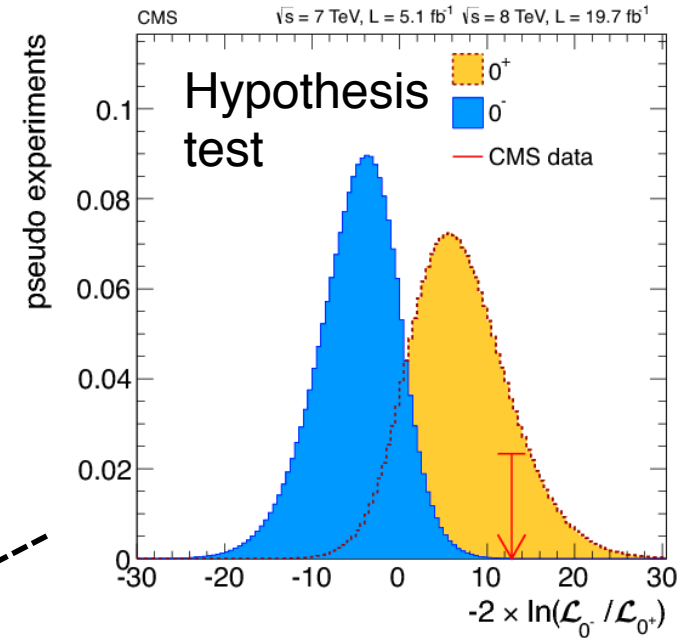
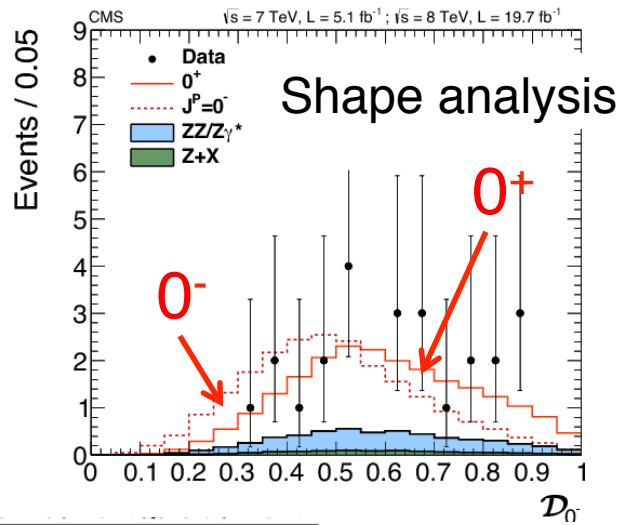
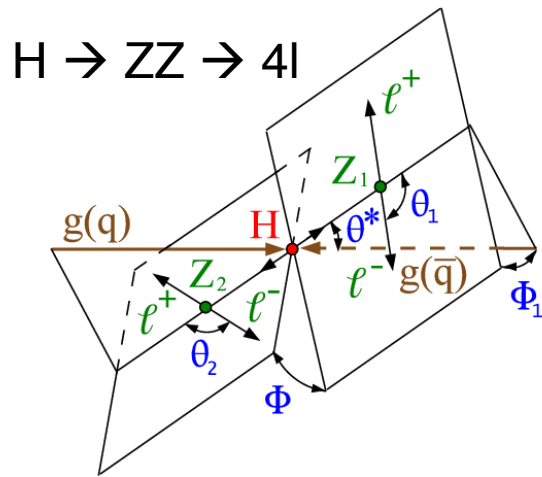
$$|H\rangle = \cos \alpha |even\rangle + \sin \alpha |odd\rangle$$

$$\alpha : \text{CP mixing angle} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{SM} : \alpha = 0 \\ \text{CP odd} : \alpha = \pi/2 \\ \text{Max. mixing} : \alpha = \pi/4 \end{array} \right.$$

CP の測定 (混合角の測定) = 新しい物理の間接的探索

What do we know about CP ?

- ヒッグス粒子の崩壊過程を使う
 - $H \rightarrow \gamma\gamma : C = +1$
 - ZZ, WW, $\gamma\gamma$ における運動学的分布から特定の J^P を仮説検定



$C = +1, P = +1$
 Higgs \rightarrow CP even (?)

This is not the end of the story

$$\mathcal{L} = \left\{ \cos(\alpha) \left[\text{CP even} \rightarrow \frac{m_V^2}{v} h V_\mu V^\mu \right] + \sin(\alpha) \left[\text{CP odd} \rightarrow \frac{1}{\Lambda} A V_{\mu\nu} \tilde{V}^{\mu\nu} \right] \right\}$$

Λ が大きい場合 (その可能性が高い)、
この項の寄与は α に寄らず ~ 0

最終的な Data の分布には “CP even” の寄与しか現れない

→ Hypothesis test は常に CP even を favor (shape analysis !)

Signal rate (μ -value) から α に対して制限をつけることも可能だが

Signal rate $\propto f(\alpha, \Lambda)$ なので Λ の仮定が必要 (model dependent)

On the other hand – fermionic coupling

$$\mathcal{L} = \cos(\alpha) \left\{ \begin{array}{c} \text{CP even} \\ \text{---} \end{array} \left[\begin{array}{c} f \\ \frac{m_f}{v} h f_i \bar{f}_i \\ \bar{f} \end{array} \right] \right\} + \sin(\alpha) \left\{ \begin{array}{c} \text{CP odd} \\ \text{---} \end{array} \left[\begin{array}{c} f \\ \frac{m_f}{v} i\gamma_5 A f_i \bar{f}_i \\ \bar{f} \end{array} \right] \right\}$$

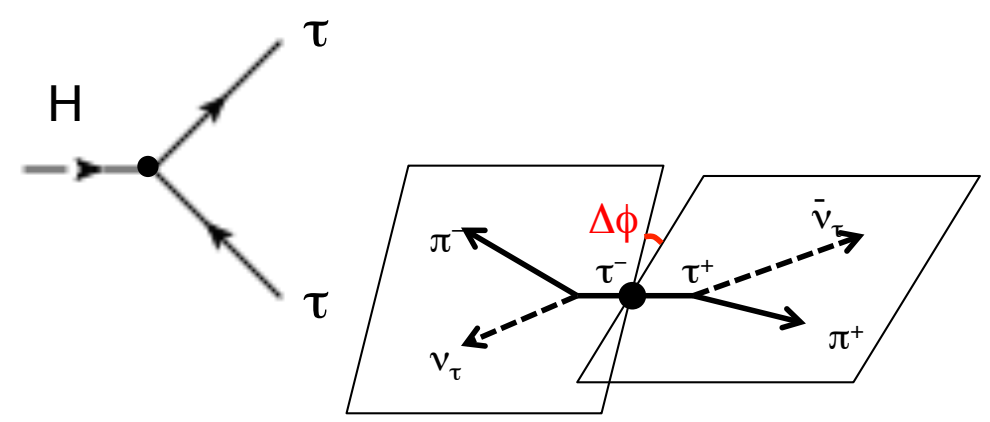
- CP even も odd も tree-level で $f\bar{f}$ に結合できる
 - CP even も odd も最終的な分布に同等に寄与
- Hypothesis test \rightarrow NP に対する assumption なしに CP を probe できる (model independent)

結論：ヒッグス粒子の CP は、fermionic coupling を使うべし

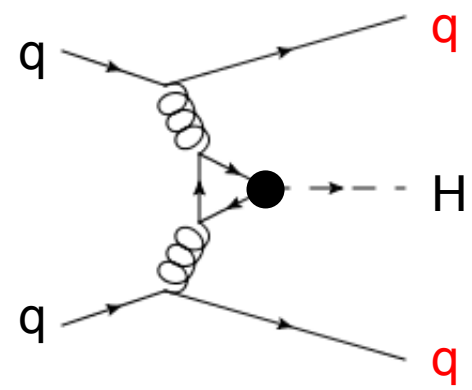
Fermionic coupling を用いた CP 測定手法

Tau polarization を用いる手法

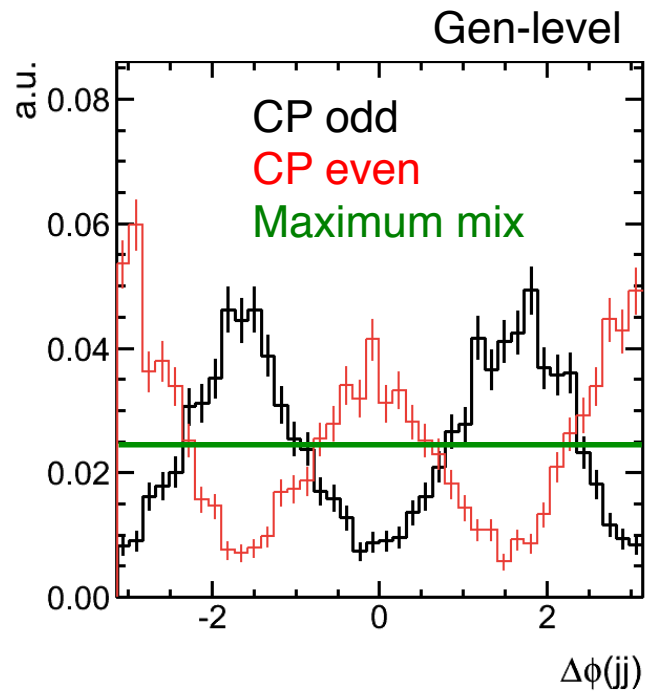
H → ττ において、tau 崩壊面の
角度差 Δφ を見る
(high pileup では特に困難)



Gluon fusion + 2 jets を用いる方法 (I want to do this)



2つのジェットの
角度差 Δφ に着目

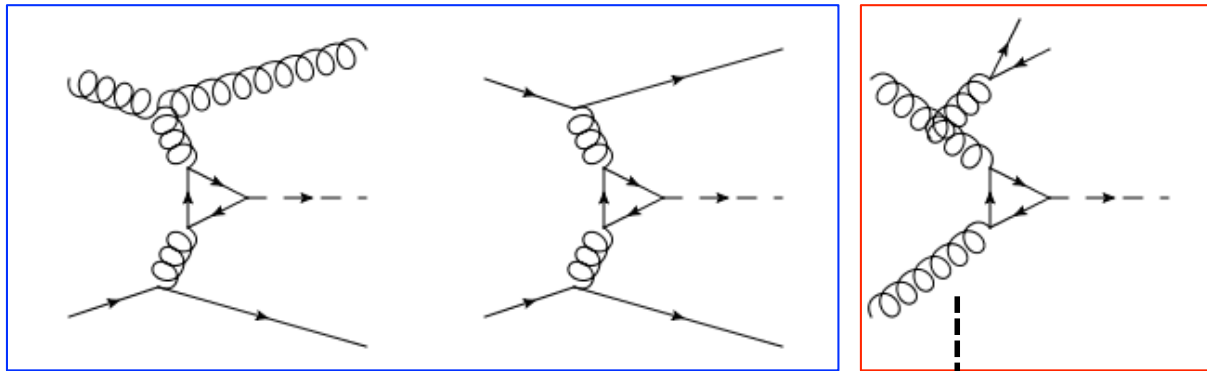


- Polarization を用いた手法よりも簡単
- ヒッグス粒子の崩壊に無関係 (combinable)
- あまり study されていない

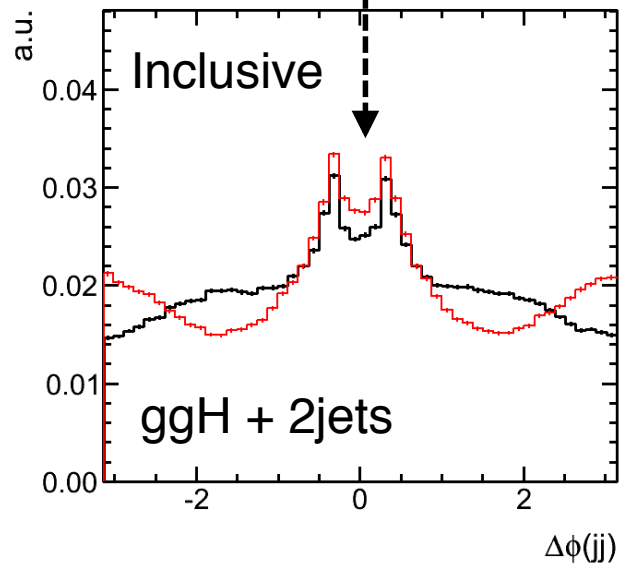
VBF は感度なし
(IMI² が α に依存しない)

Gluon fusion + 2 jets includes “not-interesting” events

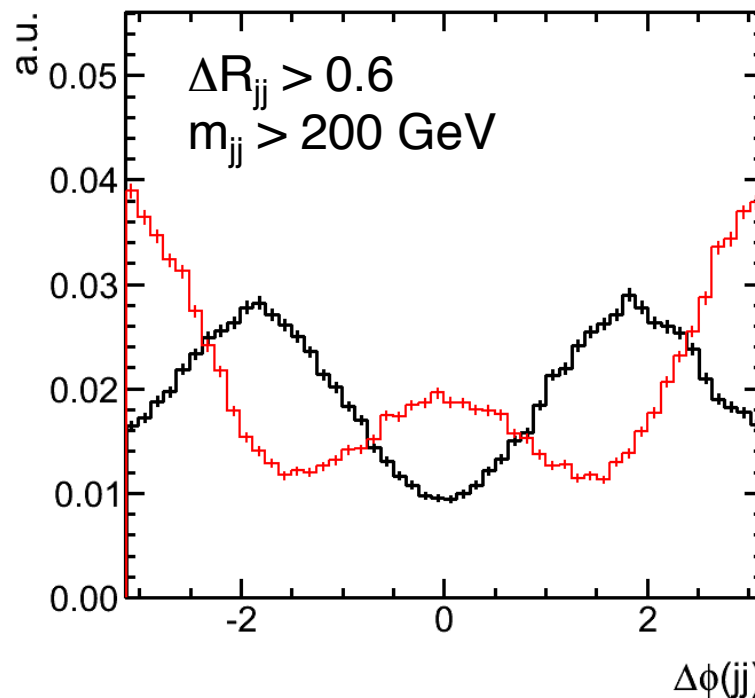
CPの情報を
持つ



CPの情報を
持たない
(単なる
gluon splitting)



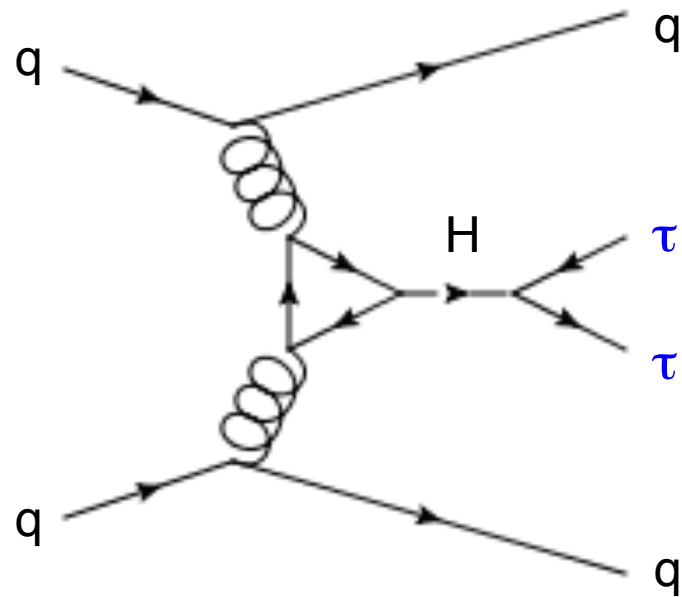
CP odd CP even



- VBF-like な selection が良い
- が、VBF-like になるほど gluon-fusion は減少

→ 最適化が必要

Feasibility study using $H \rightarrow \tau\tau$



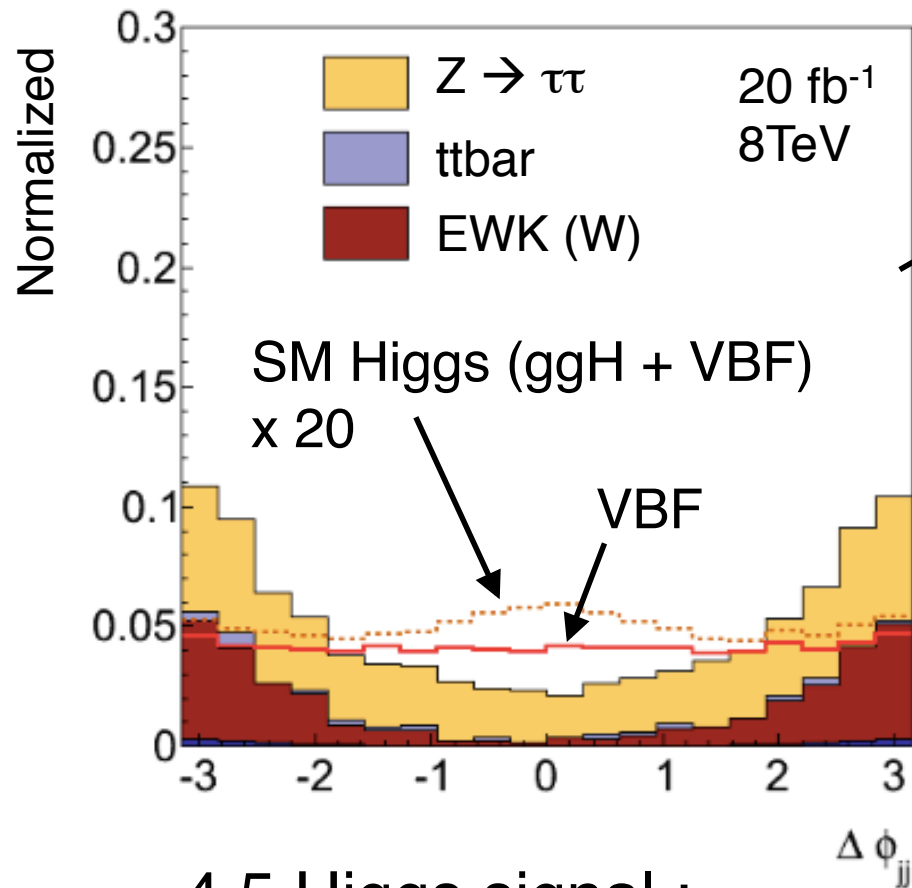
全て fermion coupling

$\tau\tau$: 2 jets phase space で
高い S/N でヒッグス粒子をタグできる

decay	Obs. μ -value (run-1) @ 2 jets
$H \rightarrow \gamma\gamma$	$1.514^{+0.551}_{-0.476}$
$H \rightarrow WW$	$0.623^{+0.593}_{-0.479}$
$H \rightarrow \tau\tau$	$0.948^{+0.431}_{-0.379}$
$H \rightarrow ZZ$	$1.549^{+0.953}_{-0.661}$

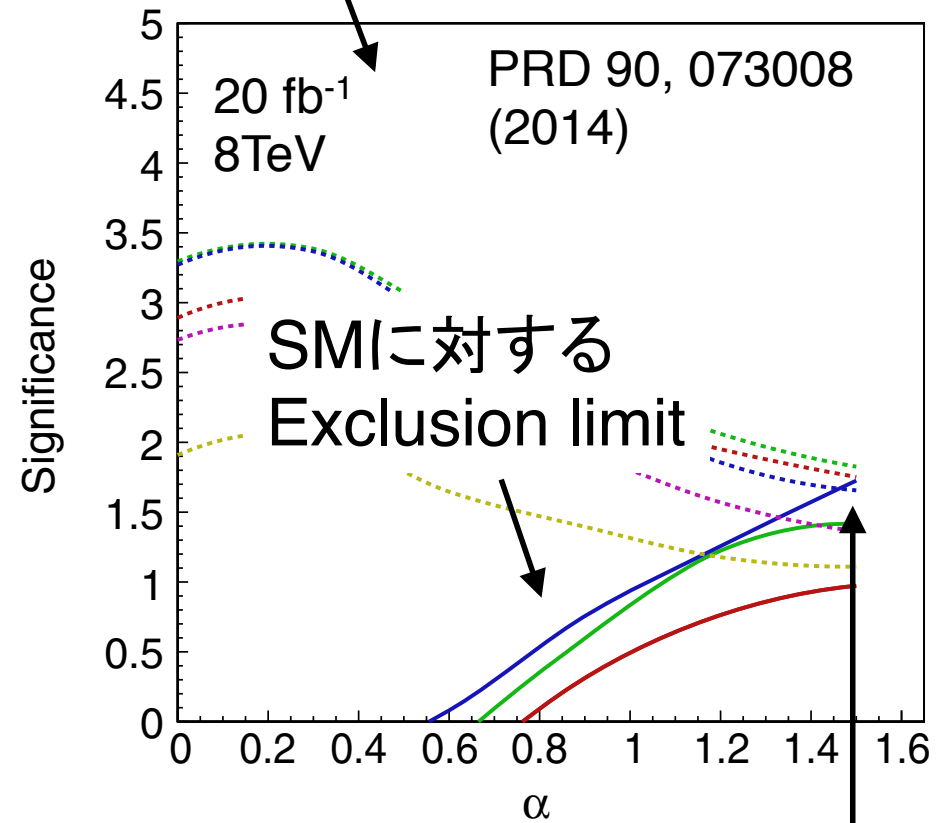
- Run-1 における $H \rightarrow \tau\tau$ と同じ event selection
- ≥ 2 jets \rightarrow leading, sub-leading を使って $\Delta\phi(jj)$ を計算
- VBF-like な selection をかけて gluon splitting の事象を除く
 - $\Delta R(jj) > 0.6, m_{jj} > 200$ GeV

Sensitivity check using run-1 data



4.5 Higgs signal :
(75% VBF, 25% ggH)
Data : blinded

SM (α=0) v.s. 様々な α で
データを fit → 仮説検定

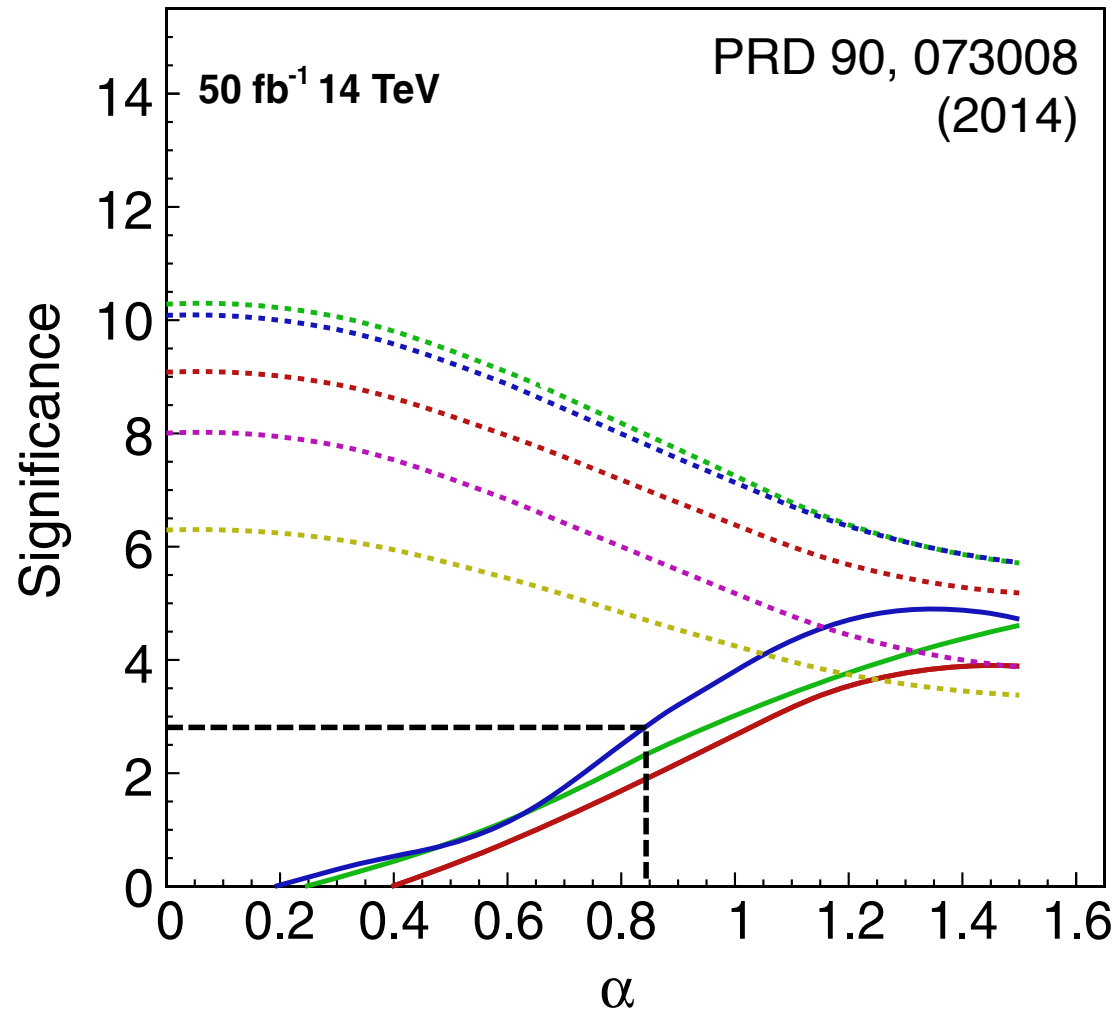


pure CP odd を 2σ で棄却

現実的な detector simulation で study

Future projection

50 fb⁻¹, 14TeV



$\alpha > 0.9$ rad を 3σ で棄却

まとめ

- CMS is in full swing (except for magnet)
 - Highly operative after upgrade (both h/w and s/w) during long shutdown period
 - Cryogenics issue is still there but believed to be solved soon
- New tau identification is developed and will improve physics performance with tau in run-2
- Higgs CP property can be a nice probe for NP
 - Fermionic coupling will allow model-independent measurement of the Higgs CP property
 - Feasibility study using run-1 data with $\tau\tau$ final state suggests that run-2 data will provide interesting results