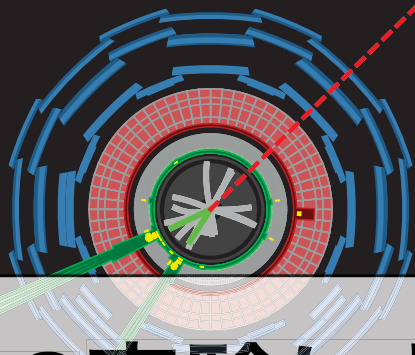




Run Number: 300800, Event Number: 2115672502

Date: 2016-06-28 09:16:15 CEST

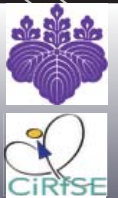
ATLAS実験におけるヒッグス・

電弱セクターでの新物理探索

第3回CiRfSEワークショップ, 2017年1月24日

大川英希

筑波大学 数理物質系・数理物質融合科学センター

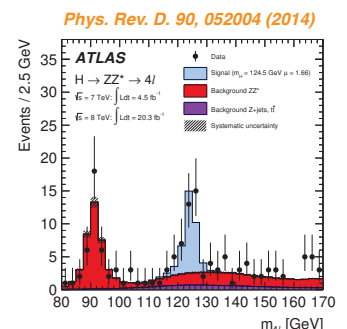
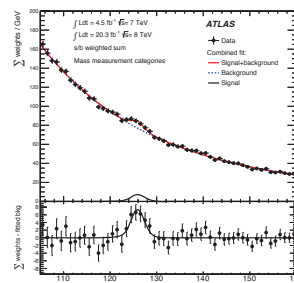
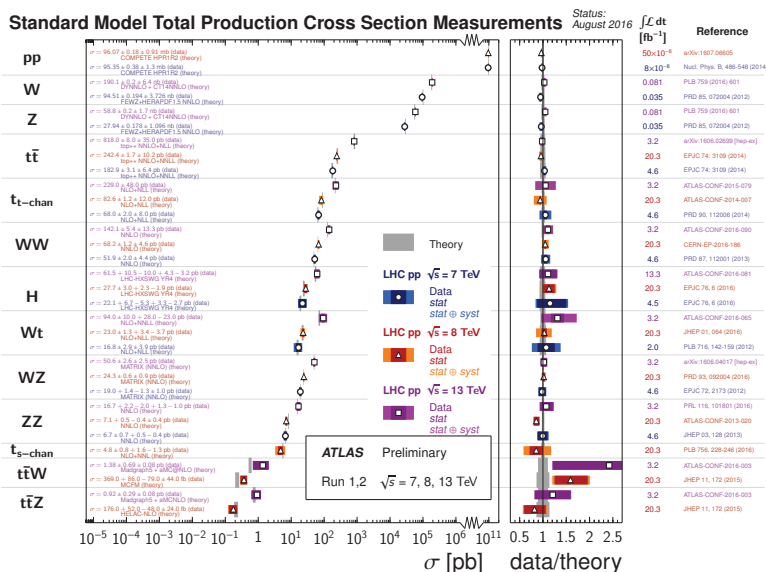


ヒッグス粒子「発見」を超えて



標準理論の圧倒的精度

ヒッグス粒子は見つかったが、ヒッグスセクターの真の構造は未だ不明

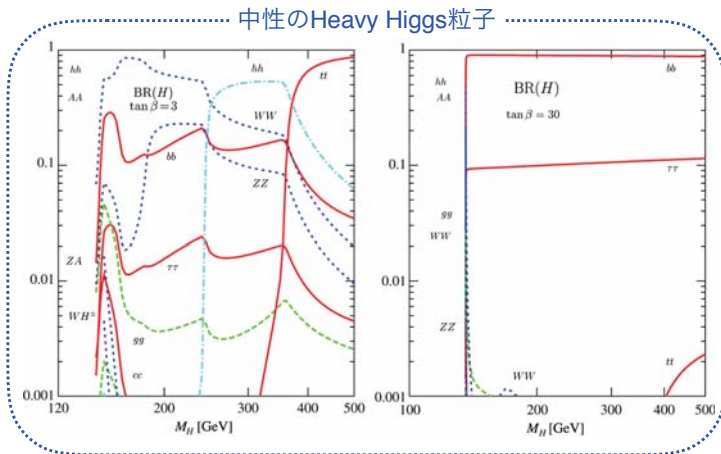


- ヒッグス粒子の個数は？又、その詳細な性質は？
- ヒッグスセクターで、標準理論を超えた物理の兆候が捉えられるか？
- 未発見の暗黒物質との関連は？

標準理論は、 $\sim \mathcal{O}(10^{12})$ の範囲で生成断面積

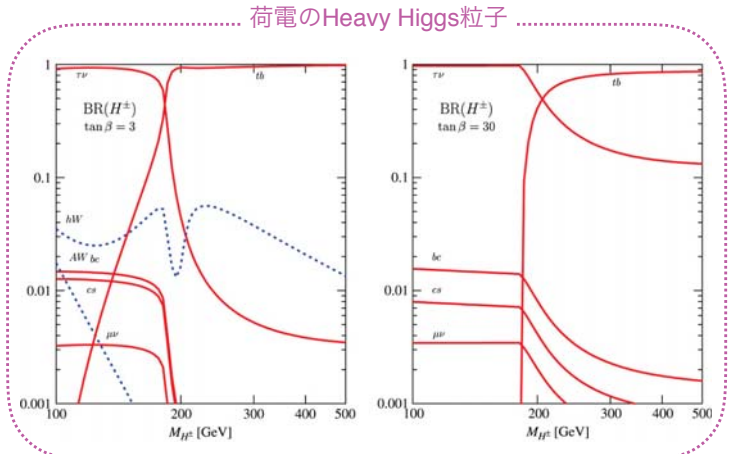
などの実験結果と一致

- Doubletが2つあれば、5つのヒッグス粒子 (中性: 3つ、荷電: 2つ)。
- 125 GeVヒッグス粒子以外に、electroweak singletが一つあるというモデルも。
- 複数のヒッグス粒子があったとして、どの質量域にいるかは、不明。
- 又、崩壊モードは、モデルやパラメータに大きく依存するため、広範なシナリオを網羅する探索が必要。筑波大学は、 $H \rightarrow ZZ$ (大川、笠原)や $H^\pm \rightarrow tb$ (佐藤、永田、萩原)で大きく貢献。



大川英希

第3回CiRfSEワークショップ・素粒子構造部門



A.Djouadi

- ヒッグス粒子の崩壊は、標準理論の予測通りなのか？
- 標準理論が予測するヒッグス粒子の崩壊幅は、4.1 MeV。直接的な測定では、検出器の分解能によって測定できない。干渉を用いた、崩壊幅の間接測定でも、崩壊幅の上限は標準理論の予測の5倍程度。
- 未発見のBSM崩壊モード (暗黒物質, etc.)が、依然として存在する。 ATLAS Higgs BSM groupでは、Run-1以来、以下のカテゴリー (Domain)に分けて、探索を遂行。

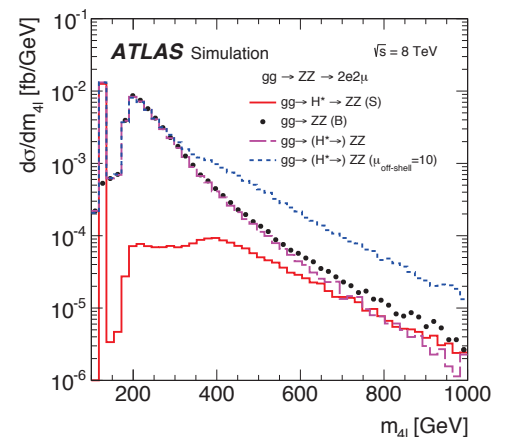
大川とOleg Brandt (Heidelberg)が責任者

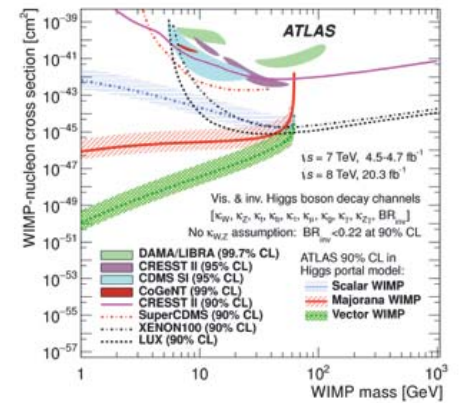
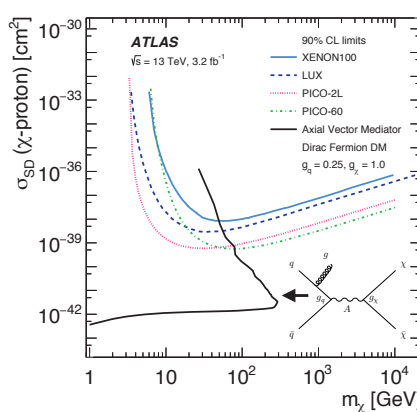
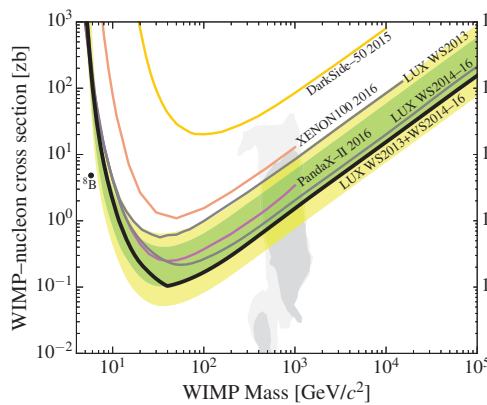
Exotics decays with MET, Dark-sector Inspired	mono $H \rightarrow \gamma\gamma + \text{MET}$
	mono $H \rightarrow bb + \text{MET}$
	mono $H \rightarrow 4l + \text{MET}$
	$ZH \rightarrow (ll) \text{INV}$
	$VBF H \rightarrow \text{INV}$
	$H \rightarrow \gamma\gamma \text{dark}$
	$ggF H \rightarrow \text{INV (monojet)}$
	$VH \rightarrow (jj) \text{INV}$
	$ttH \rightarrow \text{INV (various channels)}$

Exotics decays with no MET, Dark-sector / NMSSM Inspired	$h \rightarrow 2a \rightarrow bb\mu\mu$
	$h \rightarrow 2a \rightarrow 4b$
	$h \rightarrow 2a \rightarrow \mu\mu\tau\tau$
	$h \rightarrow x1x2 \rightarrow bb + \text{MET}$
	$H \rightarrow Z \text{dark} Z(\text{dark}) \rightarrow 4l$
	$h \rightarrow 2a \rightarrow bb\tau\tau$
	$h \rightarrow 2a \rightarrow 4\tau/4\mu$
	$h \rightarrow 2a \rightarrow 4\gamma(\text{multiphoton})$
	$(bb)a$
	$h \rightarrow Za \rightarrow ll\mu\mu$
	$H \rightarrow a1W$

LFV, FCNC, rare decays	$H \rightarrow \phi\gamma, J/\psi\gamma, Y\gamma$
	$H \rightarrow \tau\mu, \tau e, e\mu$
	$t \rightarrow cH$ (various channels)
	$H \rightarrow ZJ/\psi, Z\gamma$

From the ATLAS HBSM Group

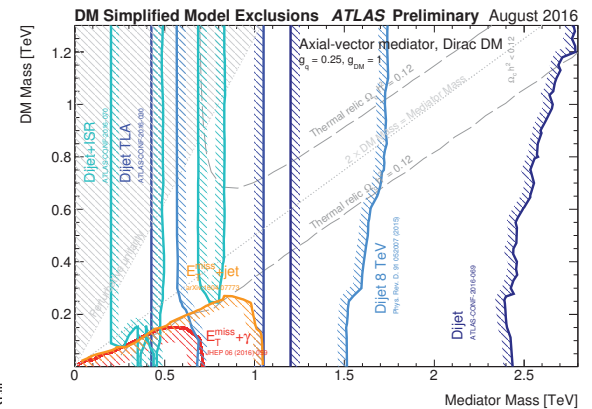




- 暗黒物質の直接探索の感度向上は、近年目覚ましい (LUX, Panda-II実験)
- LHCで感度が勝るのは、限られたシナリオ (低質量域のHiggs-portalや、axial-vector暗黒物質)
- これらのシナリオに重点を置き、広範な探索を遂行中。

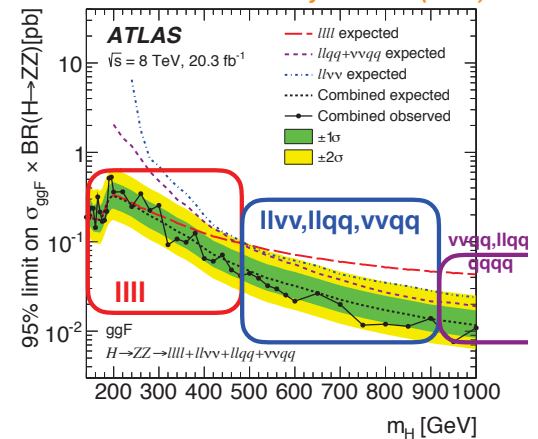
大川英希

第3回CiRfSEワークショップ・Ⅱ



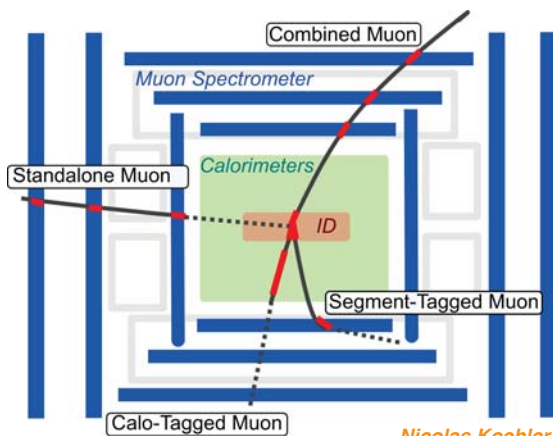
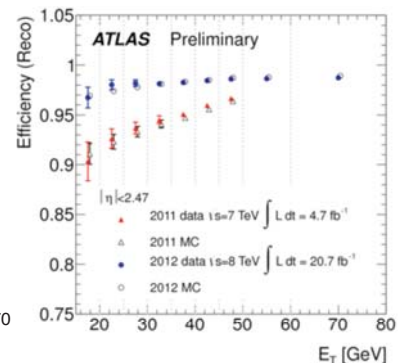
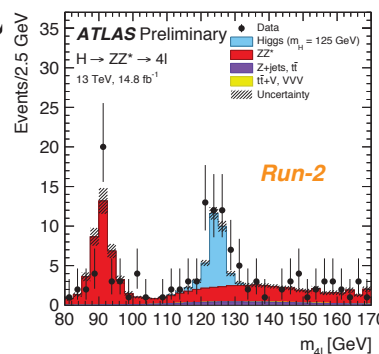
ZZ共鳴事象探索

- $Z \rightarrow ll, vv, qq$
- $X \rightarrow Z \rightarrow ll, vv, qq$
- ZZ共鳴事象には以下の崩壊モードが存在する。
 - それぞれ質量分解能、シグナル感度を持つ質量域等に違いがあり、相補的な探索を提供。

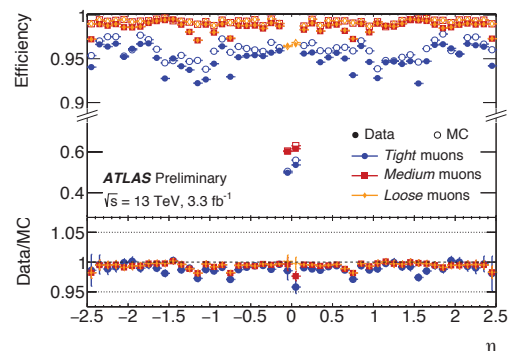


	BR(ZZ→X)	質量分解能	背景事象の量	シグナル感度
llll (l=e,μ)	0.4%	高い	極めて少ない	低質量域
llvv	2.6%	低い (& 横方向情報のみ)	少ない	Sub-TeV
llqq	9.2%	高い	比較的多い	Sub-TeV & TeV
vvqq	28%	低い (& 横方向情報のみ)	比較的多い	Sub-TeV & TeV
qqqq	49%	低い	多い	TeVオーダー

- 2012年にヒッグス粒子を発見した「ゴールデンチャンネル」。Run-2でのヒッグス粒子の測定も進行中。
- 電子とミュオンの再構成性能が、探索におけるシグナル感度の鍵。



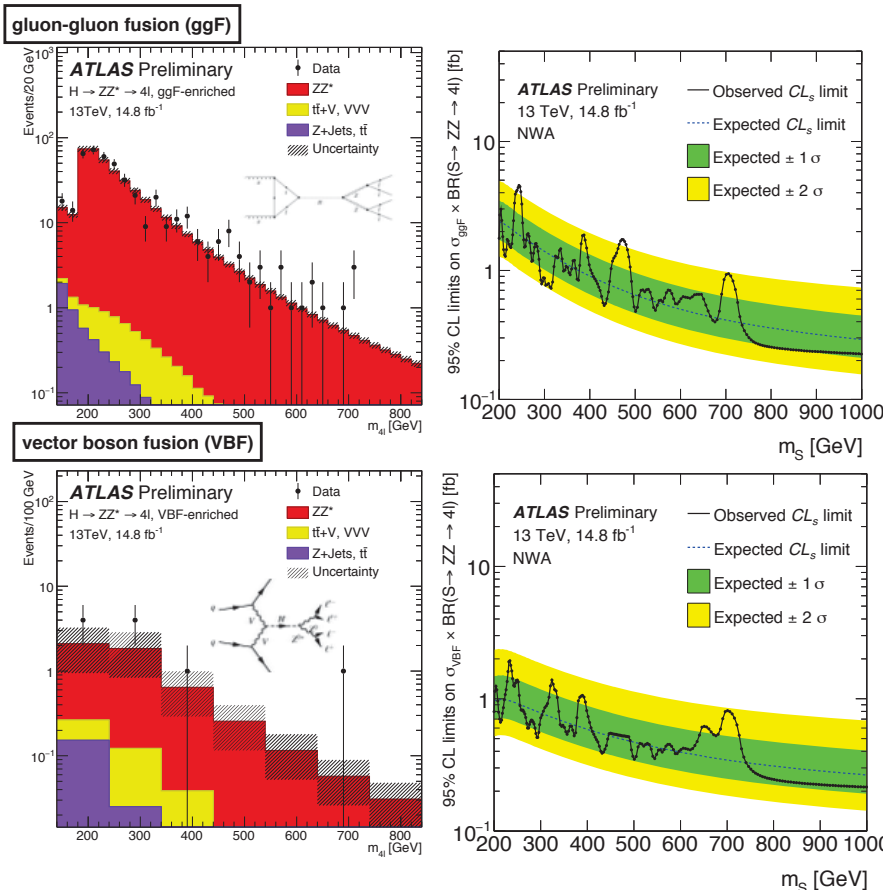
Nicolas Koehler



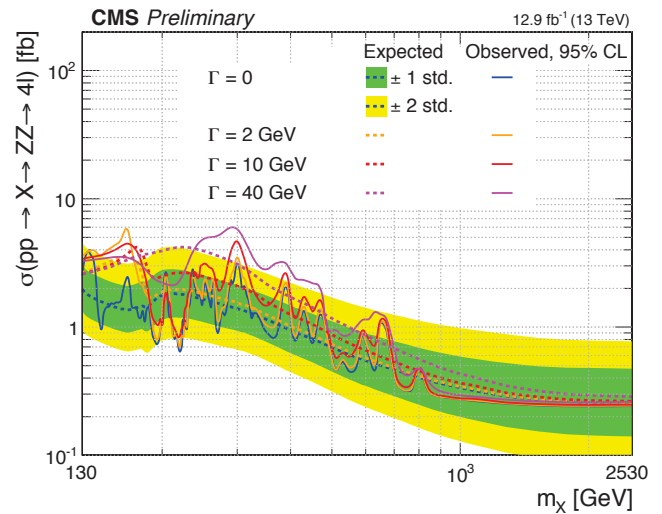
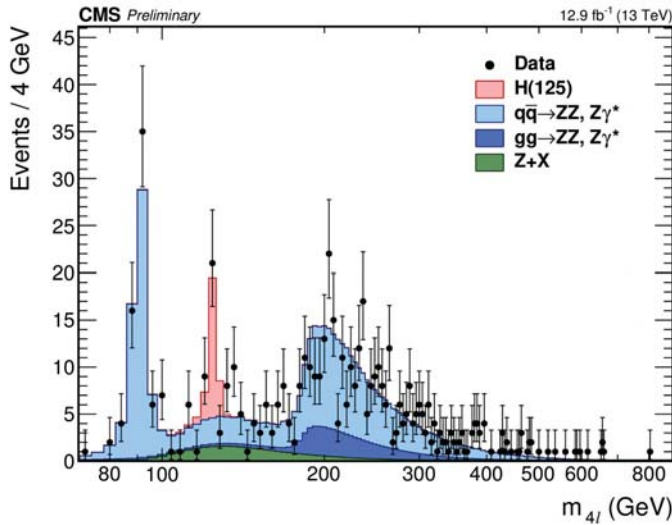
Leptons and Jets requirements	
ELECTRONS	
Loose Likelihood quality electrons with hit in innermost layer, $E_T > 7\text{GeV}$ and $ \eta < 2.47$	
MUONS	
Loose identification $ \eta < 2.7$	
Calo-tagged muons with $p_T > 15\text{GeV}$ and $ \eta < 0.1$	
Combined, stand-alone (with ID hits if available) and segment tagged muons with $p_T > 5\text{GeV}$	
JETS	
anti- k_T jets with $p_T > 30\text{GeV}$, $ \eta < 4.5$ and passing pile-up jet rejection requirements	
Event Selection	
QUADRUPLET SELECTION	Require at least one quadruplet of leptons consisting of two pairs of same flavour opposite-charge leptons fulfilling the following requirements: p_T thresholds for three leading leptons in the quadruplet - 20, 15 and 10 GeV Maximum of one calo-tagged or standalone muon per quadruplet Select best quadruplet to be the one with the (sub)leading dilepton mass (second) closest the Z mass Leading dilepton mass requirement: $50\text{GeV} < m_{12} < 106\text{GeV}$ Sub-leading dilepton mass requirement: $12 < m_{34} < 115\text{GeV}$ Remove quadruplet if alternative same-flavour opposite-charge dilepton gives $m_{\ell\ell} < 5\text{GeV}$ $\Delta R(\ell, \ell') > 0.10$ (0.20) for all same(different)-flavour leptons in the quadruplet
ISOLATION	Contribution from the other leptons of the quadruplet is subtracted Muon track isolation ($\Delta R \leq 0.30$): $\Sigma p_T/p_T < 0.15$ Muon calorimeter isolation ($\Delta R = 0.20$): $\Sigma E_T/p_T < 0.30$ Electron track isolation ($\Delta R \leq 0.20$): $\Sigma E_T/E_T < 0.15$ Electron calorimeter isolation ($\Delta R = 0.20$): $\Sigma E_T/E_T < 0.20$
IMPACT PARAMETER	Apply impact parameter significance cut to all leptons of the quadruplet.
SIGNIFICANCE	For electrons: $ d_0/\sigma_{d_0} < 5$ For muons: $ d_0/\sigma_{d_0} < 3$
VERTEX SELECTION	Require a common vertex for the leptons $\chi^2/\text{ndof} < 6$ for 4μ and < 9 for others.

$m_{jj} > 400\text{ GeV}$ & $d_{nj} > 3.3$ の場合、VBFカテゴリーとして考慮
それ以外は、gluon-fusionカテゴリー

- パイルアップ（多重陽子陽子衝突事象）の増大に対して、シグナルアクセプトランスは安定。
- 主な背景事象
 - 標準理論からの $qq \rightarrow ZZ$, $gg \rightarrow ZZ$, VBS ZZ事象: MCで評価。
 - VVV, $t\bar{t}+V$: MCで評価。
 - Z+jets, $t\bar{t}$: コントロール領域からデータで評価。



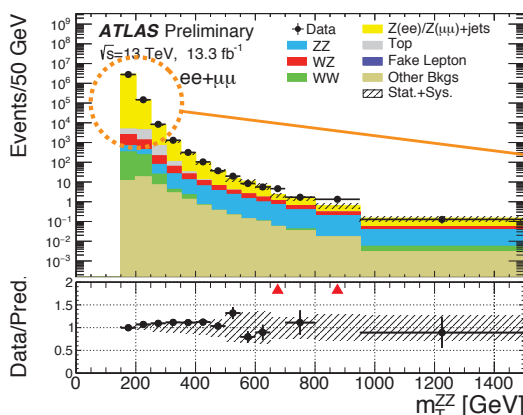
- 質量域200-1000 GeVで、探索。標準理論からの有意な逸脱は見られなかった。
- 2σレベルの逸脱は、所々観測された。
- より高統計のデータでの探索と、他のチャンネルでの確認が重要。



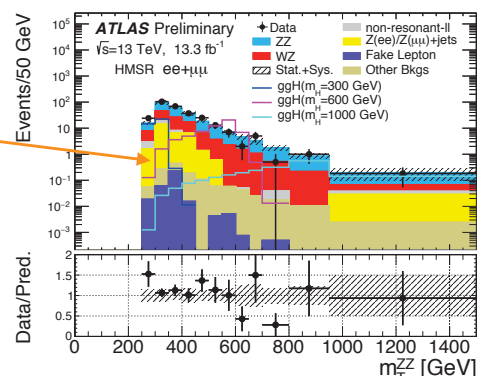
- CMSでは、質量域130-2530 GeVで、探索。有意な逸脱は見られなかった。
- ICHEPデータ以降での、他のZZ探索チャンネルの結果は、まだ発表されていない。

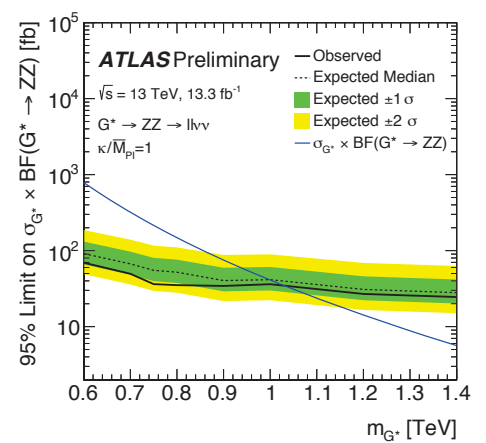
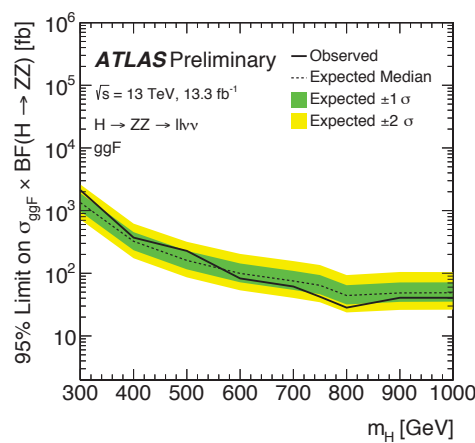
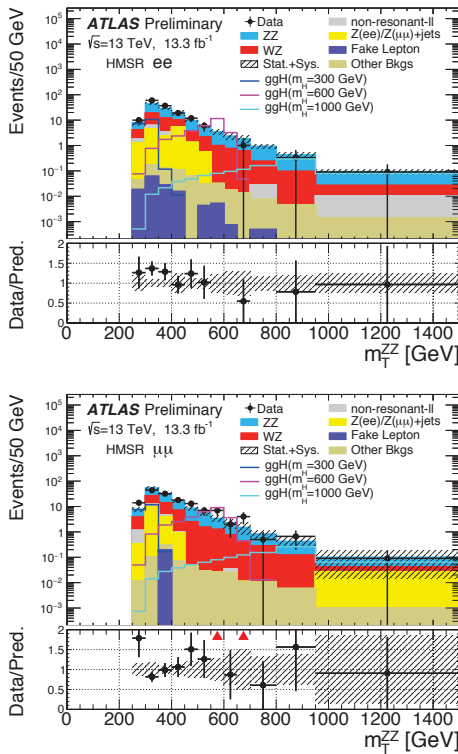
- 最もクリーンなチャンネルの一つで、1 TeV以下の領域で、極めて高い感度を持つ。
(大川、笠原が貢献。大川は、2012年以来解析グループの責任者。)
- 最も重要な事は、生成断面積の大きいZ+jets背景事象を、シグナルアクセプタンスを落とさずに抑制すること。

Variables	Cut Values
lepton p_T for (leading, subleading)	$>(30 \text{ GeV}, 20 \text{ GeV})$
$m_{\ell\ell}$	76–106 GeV
E_T^{miss}	$>120 \text{ GeV}$
$\Delta R_{\ell\ell}$	<1.8
$\Delta\phi(\vec{p}_T^{\ell\ell}, \vec{E}_T^{\text{miss}})$	>2.7
Fractional p_T difference	<0.2
$N_{b\text{-jet}}$	0
$\Delta\phi(\vec{E}_T^{\text{miss}}, \text{jets})$	>0.4
$p_T^{\ell\ell}/m_{\ell\ell}^{\text{Z}}$	<0.7



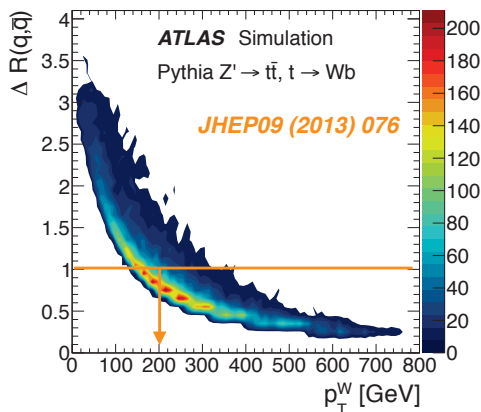
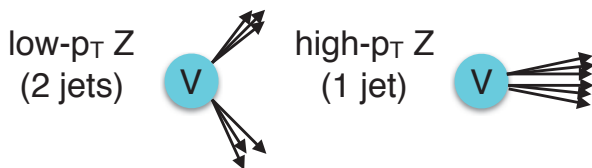
$$(m_T^{ZZ})^2 \equiv \left(\sqrt{m_Z^2 + |\vec{p}_T^{\ell\ell}|^2} + \sqrt{m_Z^2 + |\vec{E}_T^{\text{miss}}|^2} \right)^2 - |\vec{p}_T^{\ell\ell} + \vec{E}_T^{\text{miss}}|^2$$



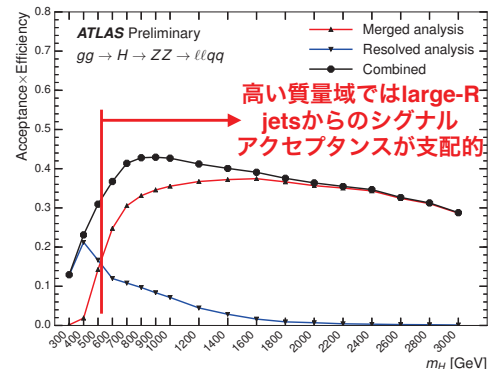


- 標準理論からの有意な逸脱は、観測されなかった。
- ICHEPでの解析結果の詳細は、本日の笠原君の講演を参照。

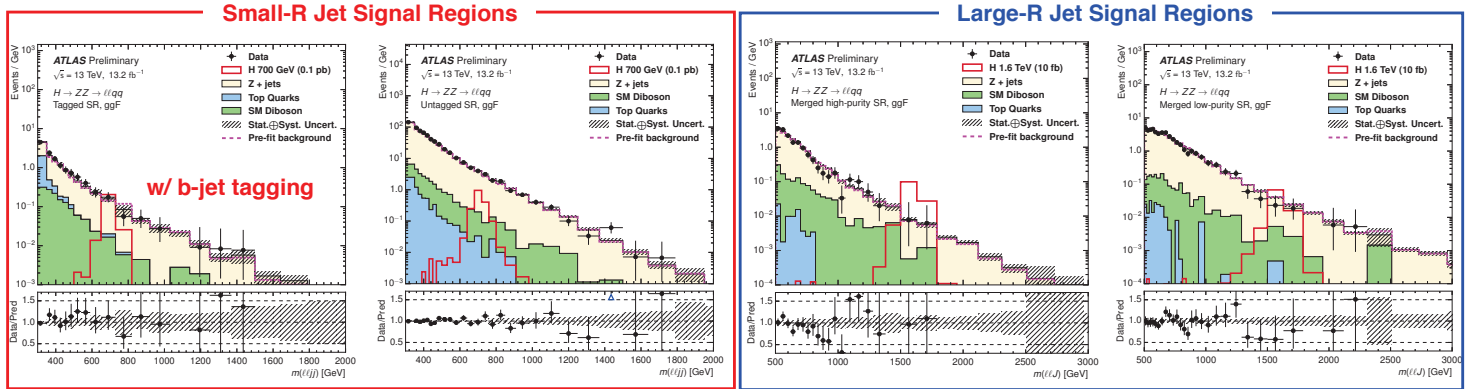
Zボソンのハドロン崩壊を伴うチャンネル



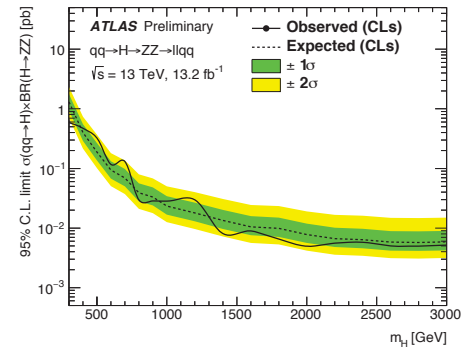
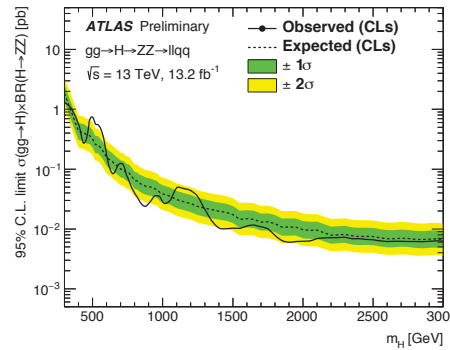
- High- p_T ($p_T^Z > \sim 200$ GeV)のZボソンのハドロン崩壊は、**large-R jet (boosted-boson tagging)**と呼ばれる手法で、再構成することができる。
- $\ell\ell qq$ チャンネルでは、それに加えて、small-R ($R=0.4$) jetsを用いたカテゴリーも用いる。



- 大川は、ICHEPの結果(ATLAS-CONF-2016-082)及び、2015+2016の全データを用いた、現在進行中の論文のATLAS実験内部審査員 (Editorial Board)を務めている。



- Z+jetsが、最も大きな背景事象。
 m_{jj} , m_J のサイドバンドのコントロール領域でフィット。
- 標準理論からの有意な逸脱は見られなかった。



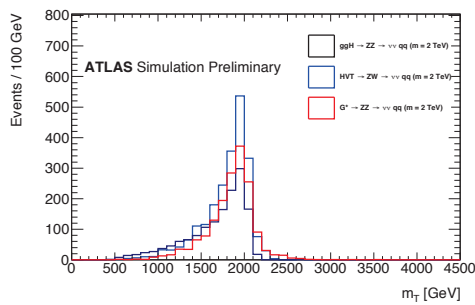
大川英希

第3回CiRfSEワークショップ・素粒子構造部門

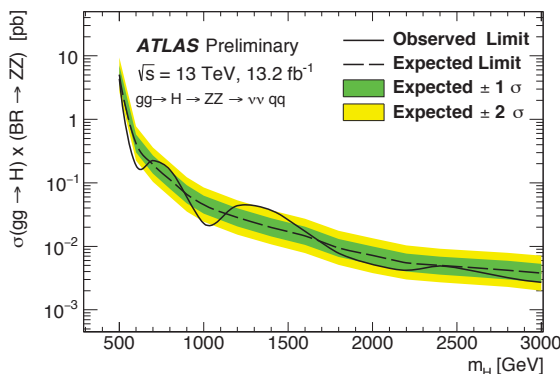
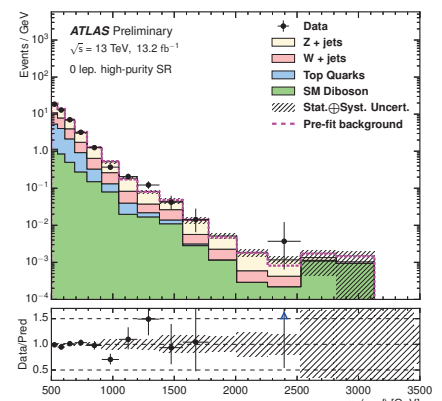
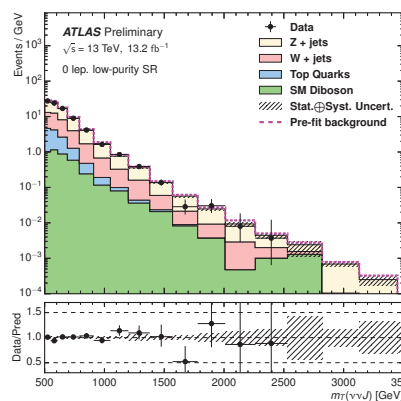
ATLAS-CONF-2016-082

15

ATLAS-CONF-2016-082



$$m_T = \sqrt{(E_{T,J} + E_T^{\text{miss}})^2 - (\vec{p}_{T,J} + \vec{E}_T^{\text{miss}})^2}$$



- $ll\nu\nu$ チャンネル同様、横質量のみ再構成可能。
- $\nu\nu qq$ では、large-R jetのみを考慮。
- 13.3 fb⁻¹の時点で、3 TeVまでの質量域で、有意なずれは観測されなかった。

大川英希

第3回CiRfSEワークショップ・素粒子構造部門

16

暗黒物質探索

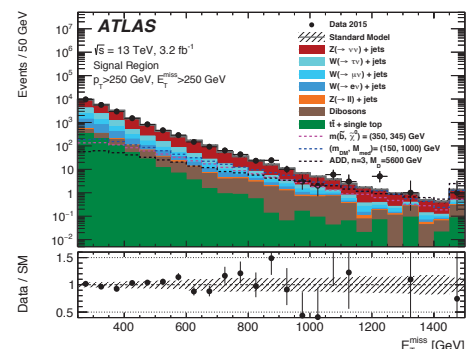


モノジェット探索



Phys. Rev. D 94 (2016) 032005

- METトリガー (HLT_xe70)使用
- データのクオリティカット(検出器・非衝突事象の除去)
- Leading jet $p_T > 250$ GeV
- MET > 250 GeV
- 最大4本のジェット ($p_T > 20$ GeV, $|\eta| < 2.8$)
- METとジェットの方向: $d\phi(\text{MET}, \text{jet}) > 0.4$

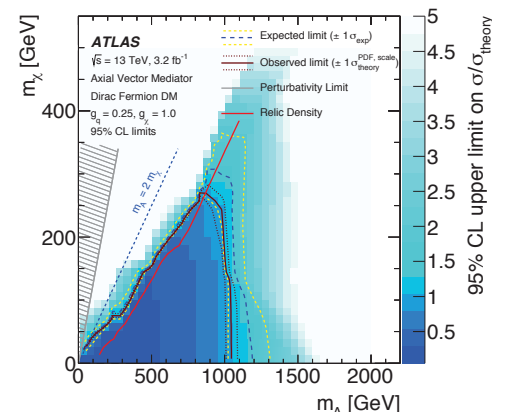


- 現在、解析を2015+2016年でアップデート中。

- ただし、シグナル感度が、W/Z+jetsの評価の系統誤差によって、頭打ちになり始めている。

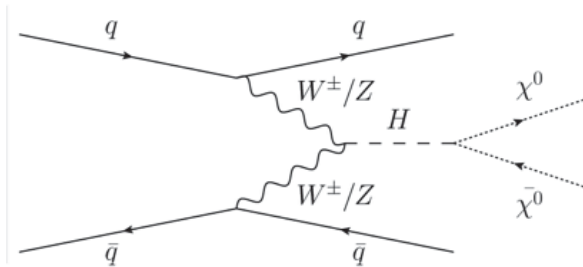
- quarkとgluon由来のジェットを分離する、q/g-taggingという手法を、東工大の陣内・佐藤両氏と開発中。

IM1	SR	W(->e nu)	W(->mu nu)	Z(->mu mu)
Observed events (3.2 fb ⁻¹)	21447	3559	10481	1488
SM prediction (post-fit)	21730 ± 940	3559 ± 60	10480 ± 100	1488 ± 39
Fitted W(->e nu)	1710 ± 170	2410 ± 140	0.4 ± 0.1	—
Fitted W(->mu nu)	1950 ± 170	2.4 ± 0.3	8550 ± 330	1.8 ± 0.3
Fitted W(->tau nu)	3080 ± 310	462 ± 27	435 ± 28	0.14 ± 0.02
Fitted Z(->e e)	0.01 ± 0.01	0.5 ± 0.1	—	—
Fitted Z(->mu mu)	70 ± 30	0.02 ± 0.02	143 ± 10	1395 ± 41
Fitted Z(->tau tau)	48 ± 7	30 ± 2	22 ± 4	0.5 ± 0.1
Fitted tt(->nu nu)	12520 ± 700	1.8 ± 0.1	2.3 ± 0.2	—
Expected tt, single top	780 ± 240	500 ± 150	1060 ± 330	42 ± 13
Expected dibosons	500 ± 48	150 ± 13	260 ± 25	48 ± 5
Multijets	51 ± 50	—	—	—
NCB	110 ± 110	—	—	—
MC exp. SM events	22500 ± 1400	3990 ± 320	10500 ± 710	1520 ± 98
Fit input W(->e nu)	1900 ± 160	2770 ± 210	0.4 ± 0.1	—
Fit input W(->mu nu)	1930 ± 170	2.4 ± 0.3	8500 ± 320	1.8 ± 0.2
Fit input W(->tau nu)	4570 ± 300	531 ± 39	500 ± 34	0.16 ± 0.03
Fit input Z(->e e)	0.01 ± 0.01	0.5 ± 0.1	—	—
Fit input Z(->mu mu)	78 ± 29	0.02 ± 0.02	146 ± 13	1427 ± 92
Fit input Z(->tau tau)	55 ± 6	34 ± 3	25 ± 4	0.6 ± 0.1
Fit input tt(->nu nu)	12410 ± 850	1.8 ± 0.1	2.2 ± 0.1	—
Fit input tt, single top	780 ± 240	500 ± 160	1060 ± 340	42 ± 13
Fit input dibosons	500 ± 48	150 ± 13	260 ± 25	48 ± 5
data-driven exp. QCD events	51 ± 50	—	—	—
NCB	110 ± 110	—	—	—

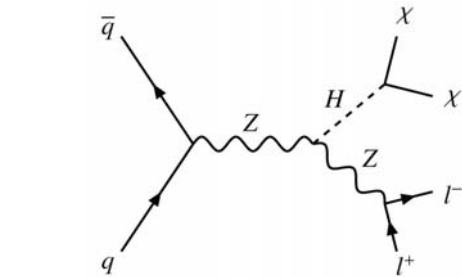
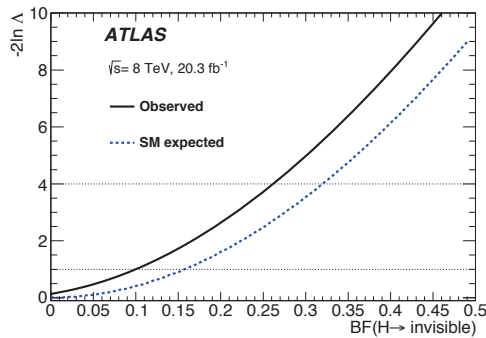


ヒッグス粒子の非可視崩壊探索の2大チャンネル

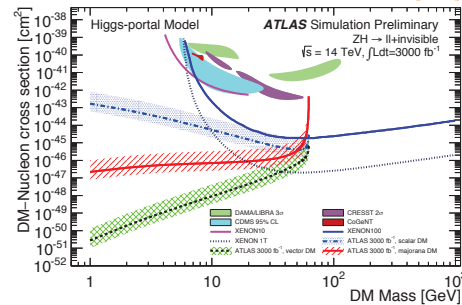
ただし、VBFは系統誤差により感度が頭打ち。ZHは、統計とともに感度が上昇し続ける。



JHEP 01 (2016) 172



ATL-PHYS-PUB-2013-014



BR($H \rightarrow \text{inv.}$) limits at 95% (90%) CL	300 fb ⁻¹	3000 fb ⁻¹
Realistic scenario	23% (19%)	8.0% (6.7%)
Conservative scenario	32% (27%)	16% (13%)

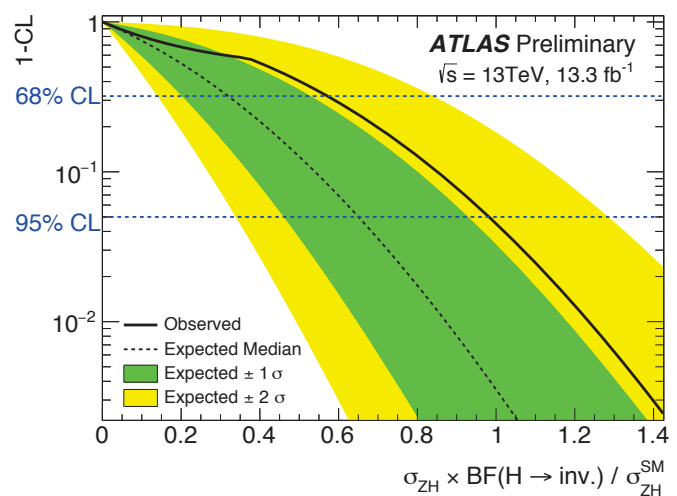
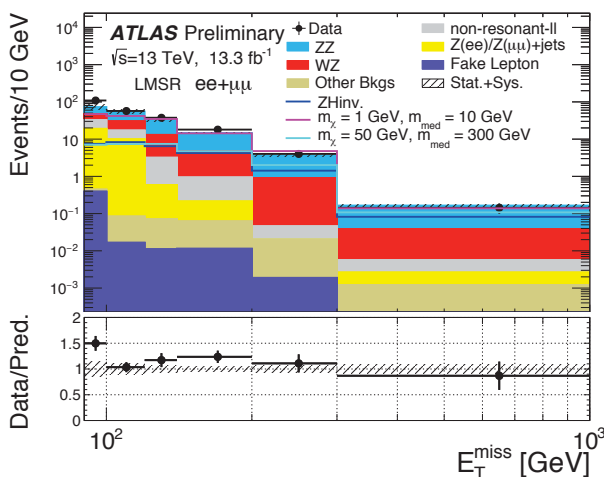
大川英希

第3回CiRfSEワークショップ・素粒子構造部門

19

Z(H)H(inv)探索

ATLAS-CONF-2016-056



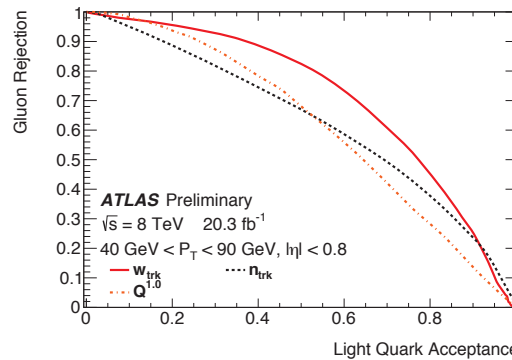
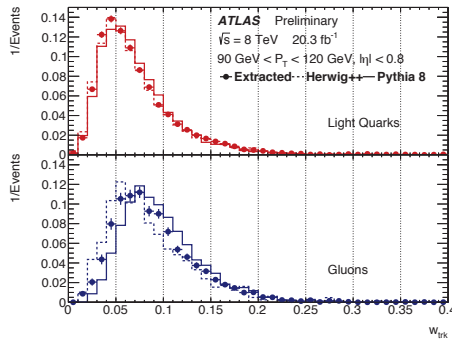
- E_T^{miss} の第1ビンと~200 GeVで、予測から若干の逸脱。
- $\text{BR}(H \rightarrow \text{inv}) < 0.98$ obs, 0.65 exp [Run-1では0.75 obs, 0.62 exp] @ 95% CL.
- 解析の詳細は、本日の笠原君の講演を参照。

大川英希

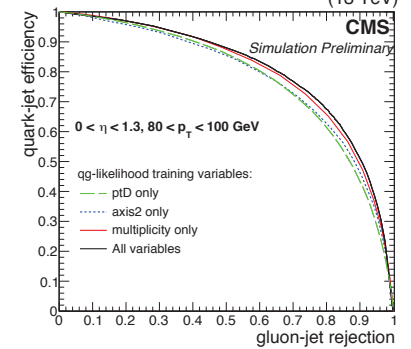
第3回CiRfSEワークショップ・素粒子構造部門

20

ATLAS-CONF-2016-034

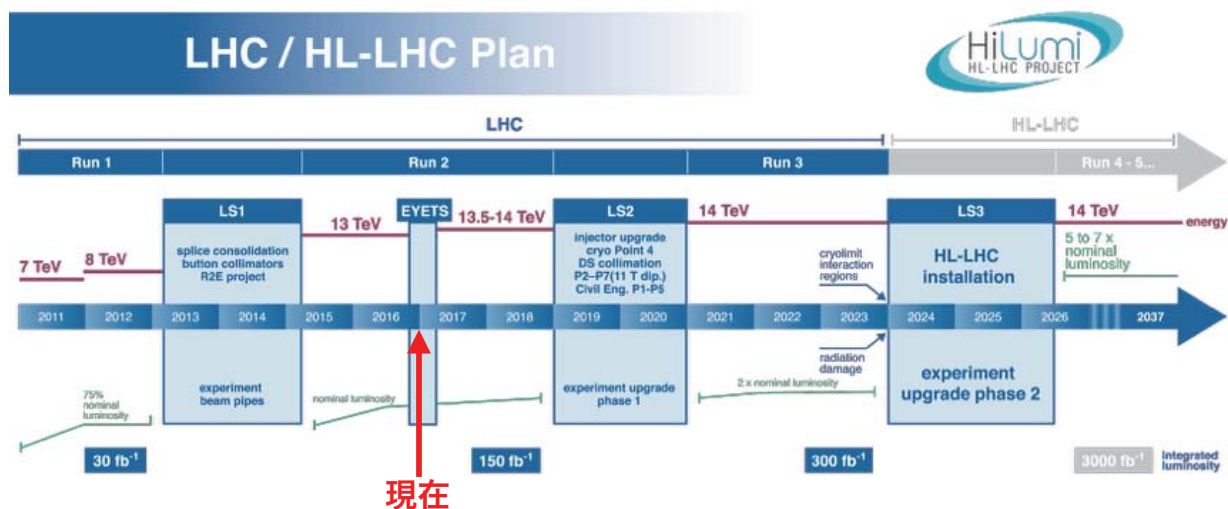


CMS DP -2016/070



- Quarkとgluon由来のジェットの内部構造の違いを利用した分離の試み。LEP・Tevatronで多くの先行研究。
- ATLASでは、1変数のみを用いたtaggerを開発。一方、CMSは、多変数解析を使用。現時点、ATLASの性能を上回る(同じworking pointで、背景事象の除去が10-20%増)。
- 現在、多変数解析への移行と、particle flowの導入による性能の向上を目指している。
- 又、VBF解析への適用も目指している。

<http://hilumilhc.web.cern.ch/about/hl-lhc-project>



- 2016データの統計は、昨年夏の結果から約2倍増大した。本年3月のMoriondで、数々の解析結果がアップデートされる予定。
- 2018年末には、データが150 fb⁻¹取得される予定。その間に、物理解析の新手法の開発も進める。2017年は、測定器・パフォーマンスの研究が最優先。

- ヒッグス・電弱セクターにおける新物理探索の結果について発表した。
- ZZ共鳴事象探索は、クリーンなチャンネルが多く、シグナルへの感度が高い。複数の崩壊モードで、探索を続けることが重要。
- 又、暗黒物質探索について、いくつかの結果を紹介。今後の高統計データで、シグナル感度を向上させていくことが要請されている。(新手法の開発が必要か?)
- ヒッグス・電弱セクターにおける新物理探索のため、多方面からのアプローチを用いて、発見を目指す。