

Higgs入門@LHC

Junichi Kanzaki
KEK
ATLAS Group

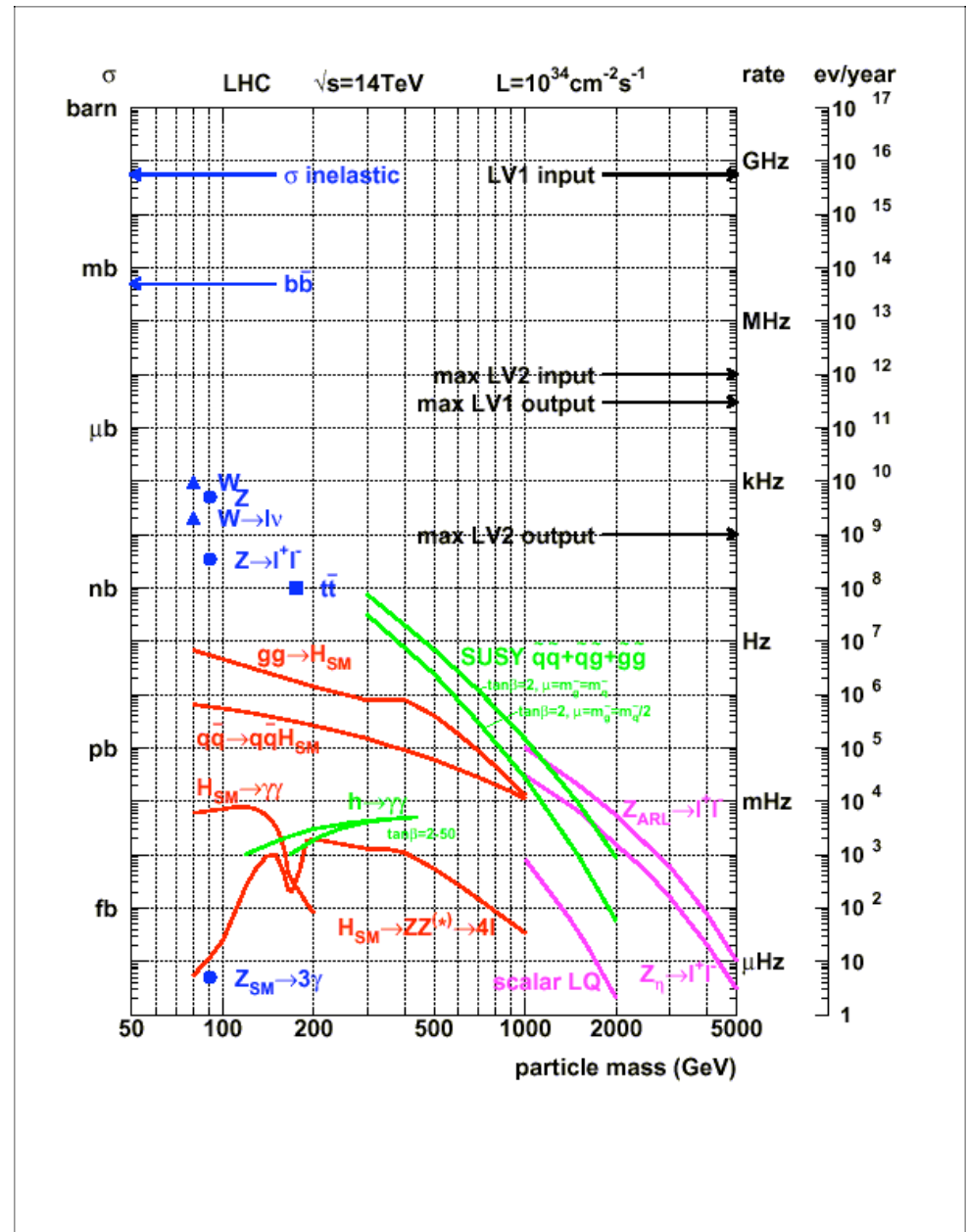
ATLAS検出器と物理入門
2005年7月16日 東京大学

目次

- 物理現象のsimulation
- Higgsの性質
- 解析の実際について

どれくらい難しいか...

- 高い background level
 - 非弾性散乱の全断面積 $\sim 70\text{mb}$
 - W、Z生成 $\approx \text{nb}$
 - top関連 $\approx 100\text{pb}$
 - Higgs 10-100fb
- 探したい現象が trigger されているか
- Selection で background が落とせるか？
 - どのような物理量を使えば効率的に Higgs シグナルを残すことができるか？
 - 物理現象の正しい理解
 - selection に使う物理量が正しく simulation されているか？
 - 測定器の効果の理解も重要
 - 他のハドロンコライダーの実験の理解
CDF、ZEUS



実験前に考えなければならないこと

1. 本当に Higgs 粒子が見つけれられるか？

- どのような Higgs 粒子が？

どれくらい作られて、どのように崩壊するか？

- どのような解析方法によって？

大きな QCD background をどうやったら落とせるか？

- どれくらいのデータ量を持ちいてどのくらい確かに発見できるか？

simulation によって得られた結果がどれくらい確かなのか？

→ これからは実際に解析に用いる物理量が実験的にどのように、
どれくらい正確に測定されるか理解することが重要

2. 見つかったピーク、あるいは excess が Higgs であるか？

- 粒子の性質の測定 → 質量、幅、スピン、パリティ、CP、
種々の結合定数

3. 標準模型の Higgs は多くの可能性の一つである

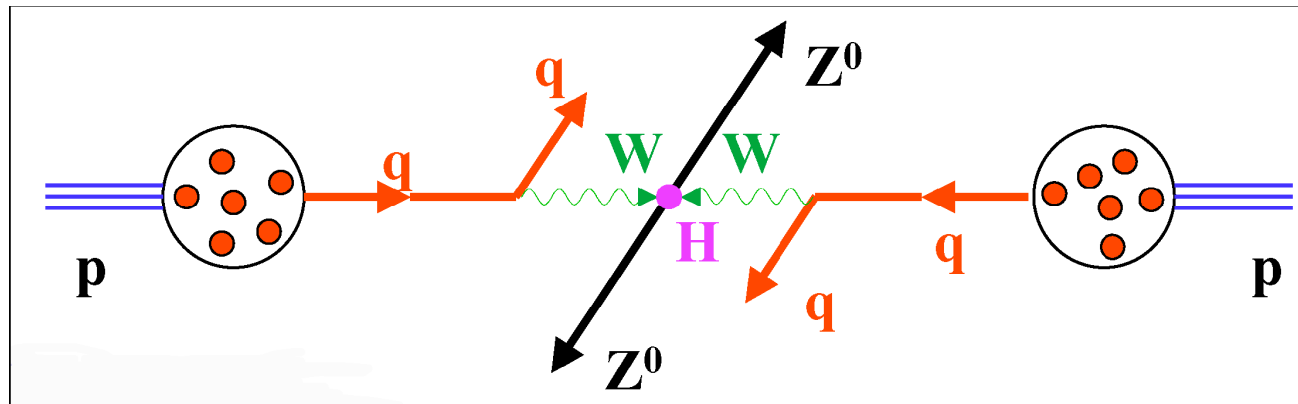
- まず SUSY がどうなっているか？

→ 崩壊比の変化、SUSY 粒子への崩壊の可能性

Simulation の実際

- 物理現象の simulation
 - Event generator を用いる
 - どのような event generator が使われていて、
どのような違いがあるか？
 - Higgs の signal と background の simulation を行う
 - どのようなプロセスが background となるか？
- 測定器の反応の simulation
 - Full simulation (Geant4)
 - 物理現象のシミュレーションで生成した粒子が測定器の中で
起こす現象を 1 ステップ毎に調べる → 膨大な CPU 時間が必要
 - Fast simulation (ATLFAST)
 - Event generator によって生成された粒子情報から smearing
などを行って測定される物理量に変換する
 - どれくらい正確に simulation されているか full simulation の
結果と比較して精度を上げていく必要

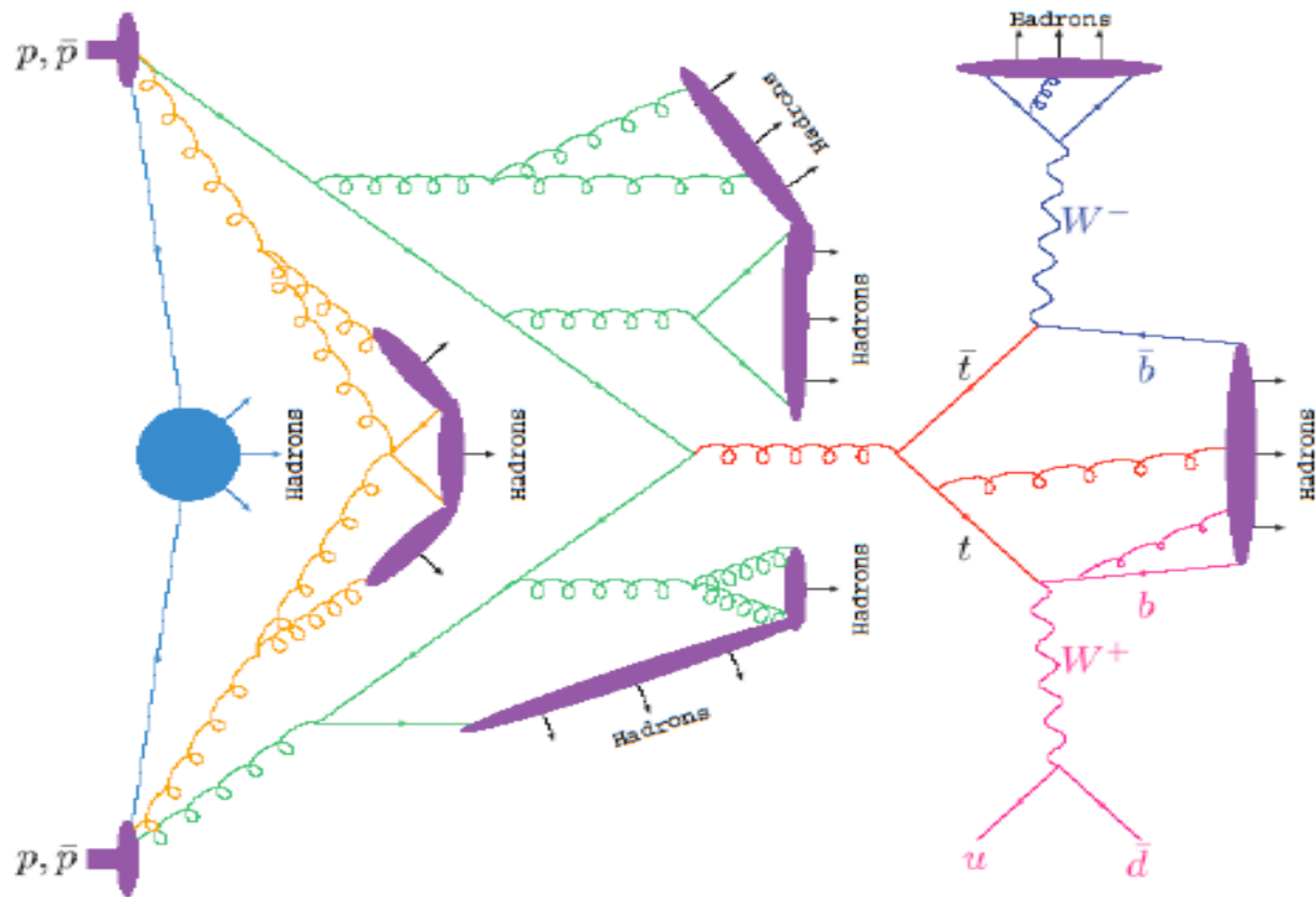
LHCで起こる物理現象



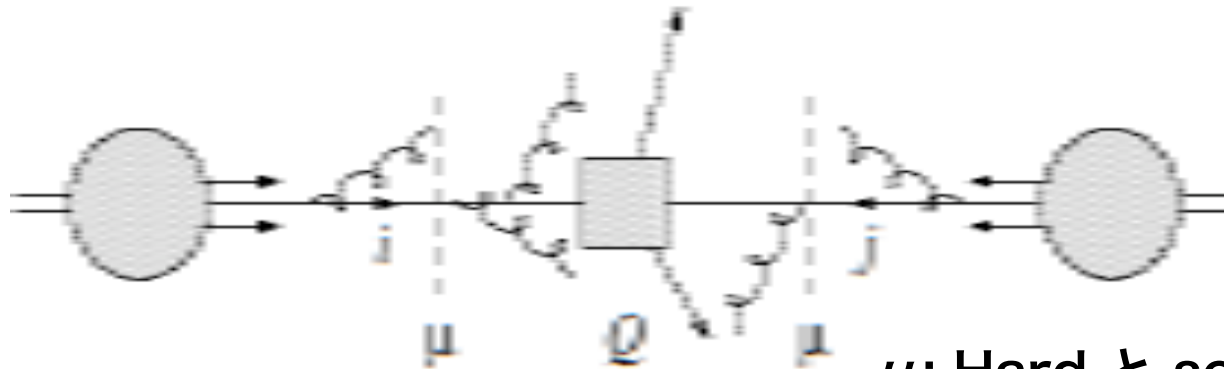
実際にはもっと複雑…

- hard process が起こる前後にいろいろの現象が起こる
 - initial、final での QCD parton shower
 - multiple-interaction
 - 一つの陽子陽子衝突の中で他の反応が起こる
- 他の反応との重なり
 - high-lumi で 20 events/bunch crossing

実際にはこんな感じ？



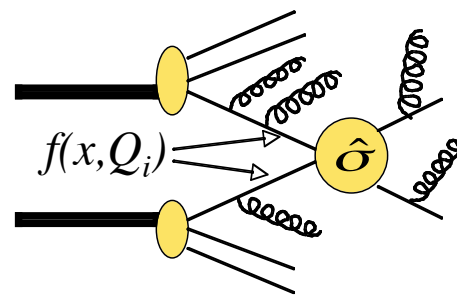
分解(factorize)



μ : Hard と soft を分ける scale

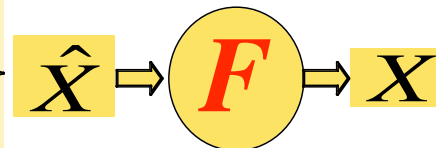
$$\frac{d\sigma}{dX} = \sum_{j,k} \int_{\hat{X}} f_j(x_1, Q_i) f_k(x_2, Q_i) \frac{d\hat{\sigma}_{jk}(Q_i, Q_f)}{d\hat{X}} F(\hat{X} \rightarrow X; Q_i, Q_f)$$

Hard Process



パートン分布関数

$$f_j(x, Q)$$



Parton shower, fragmentation, decay

$$F(\hat{X} \rightarrow X; Q_i, Q_f)$$

パートン分布関数

- 重い粒子を作るには large x が必要
→ u quark が dominate
- small x の部分はほとんど gluon
- その他の sea quark は gluon splitting
により生成される
→ 同じような分布の形
- HERA の実験による測定
分布関数の精度に注意を払う必要

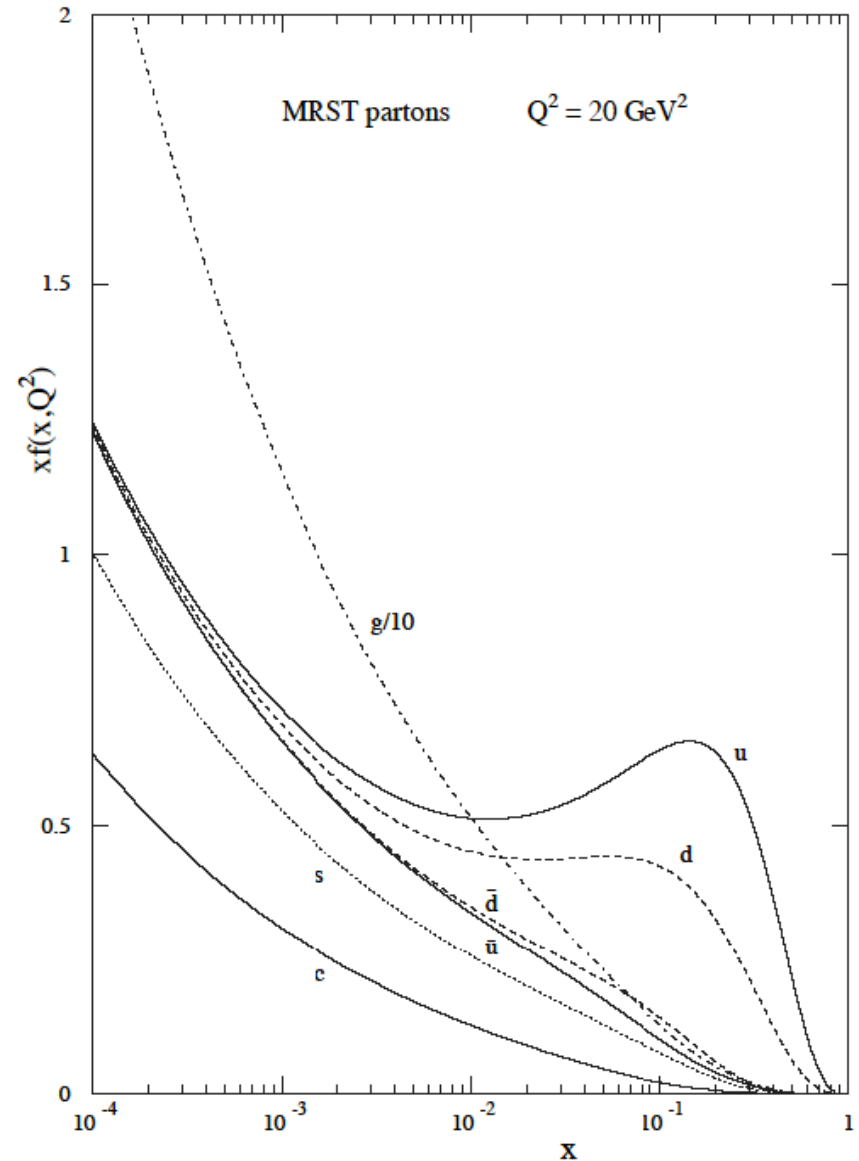
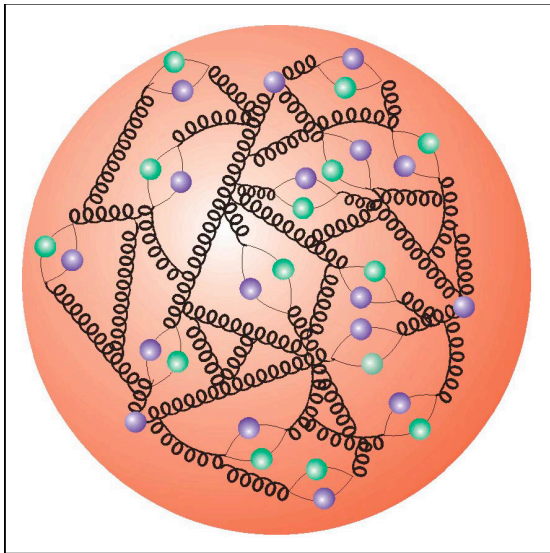


Fig. 3. MRST partons at $Q^2 = 20 \text{ GeV}^2$

Event Generators

- 汎用タイプ
 - 多くの物理現象の simulation ができる
 - 自身の中に initial/final state の shower evolution、multiple interaction の simulation を含む
 - 他の matrix element を用いた event generator の simulation の結果を読み込んで shower evolution/fragmentation/decayなどを付加することができる
- その他
 - 物理現象の matrix element の情報を元に生成する
 - 前もっていくつかの物理プロセスについてプログラム自身に組み込まれているもの
 - ALPGEN(Herwig or Pythia)、MC@NLO(Herwig)、Sherpa、GR@PPA、、、
 - ユーザが希望するプロセスについて matrix element を生成するもの
 - CompHep、MadGraph、GRACE

Pythia

- <http://www.thep.lu.se/staff/torbjorn/Pythia.html>
- Current version 6.322 (Jul.12th, 2005)
- Author: T. Sjöstrand
- Documents: hep-ph/0308153;
Tutorial Lecture: http://www-cdf.fnal.gov/physics/lectures/pythia_Dec2004.html

Herwig

- Current version: 6.507 (Mar. 8th, 2005)
- <http://hepwww.rl.ac.uk/theory/seymour/herwig/>
- Authors: B.Webber、M.Seymour、P.Richardson、S.Moretti etc.
- Documents: hep-ph/0011363, hep-ph/0210213
http://hepwww.rl.ac.uk/theory/seymour/herwig/hw65_manual.htm
(online manual);
SUSY implementation: hep-ph/0204123

ALPGEN

- <http://mlm.home.cern.ch/mlm/alpgen/>
- Current version: 2.03
- Authors: Michelangelo L. Mangano, Mauro Moretti, Fulvio Piccinini, Roberto Pittau and Antonello Polosa
- References: hep-ph/0206293、 hep-ph/0108069、 hep-ph/9807570
- 新しい独自の algorithm により multi-parton process (jet がたくさん
でる)を効率よく生成できる
- 新しい version では matrix element (parton) - parton shower
(jet) の matching algorithm を含む

MC@NLO

- <http://www.hep.phy.cam.ac.uk/theory/webber/MCatNLO/>
- Current version: 3.10 (17 June 2005)
- Authors: Stefano Frixione, Bryan Webber
- Next-to-leading order の QCD calculation に基づく
- Herwig 6.5 と interface
- References: JHEP 0206 (2002) 029 [hep-ph/0204244], JHEP 0308 (2003) 007 [hep-ph/0305252]

Sherpa

- <http://www.physik.tu-dresden.de/~krauss/hep/index.html>
- Current version: 1.0.6 (15 April 2005)
- Authors: Frank Krauss etc.
- Matrix element での generation と CKKW 法による parton-jet matching
- References: JHEP 0402 (2004) 056, JHEP 0202 (2002) 044, hep-ph/0503087, Comput. Phys. Commun.134 (2001) 223

CompHEP

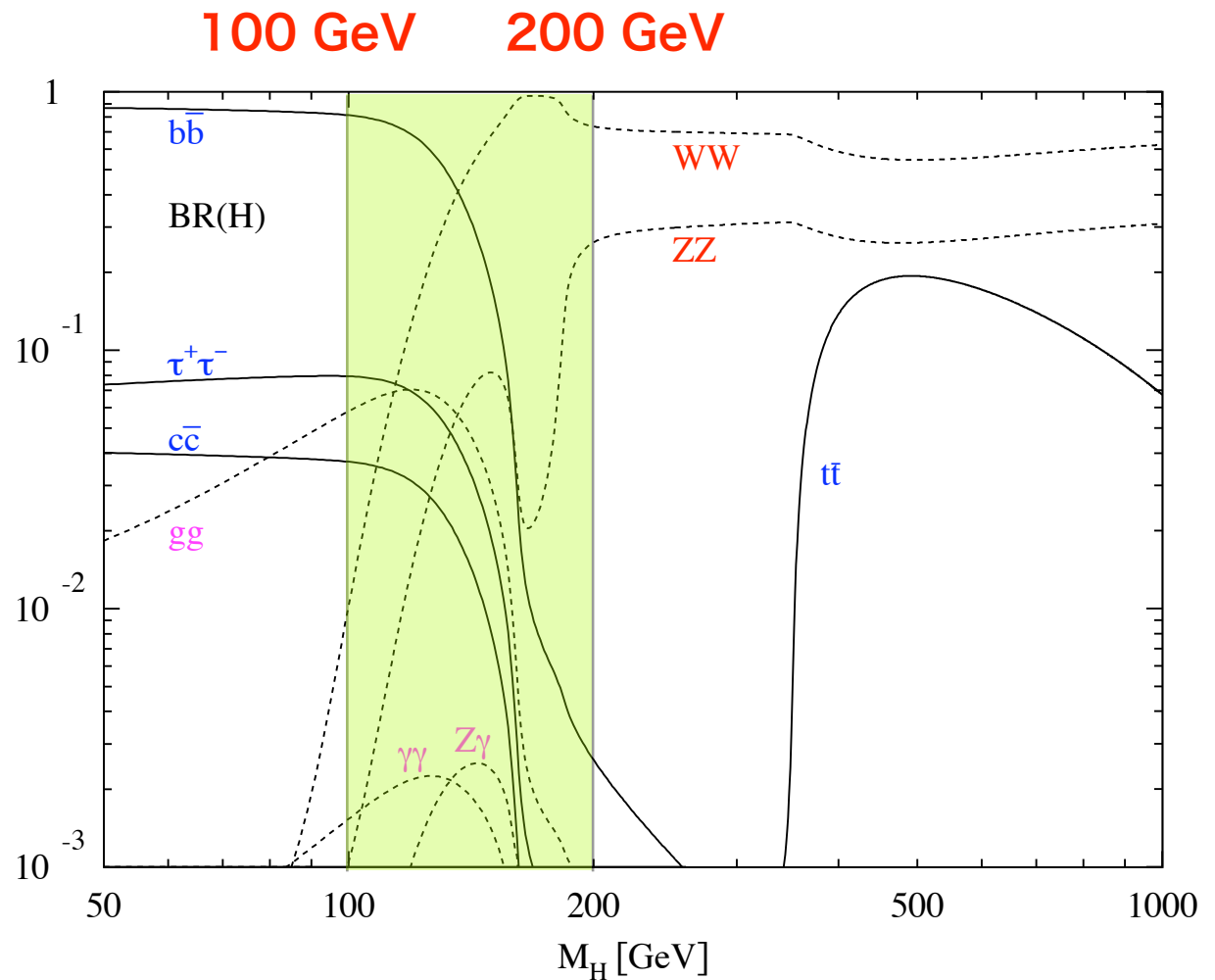
- <http://theory.sinp.msu.ru/comphep> →
<http://theory.sinp.msu.ru/dokuwiki/doku.php?id=chep:comphep>
(Wiki!)
- Current version: 4.4.3 (25 May 2004)
- ユーザーが自分の生成したいプロセスを指定できる
→ 出来合いの generator がない場合には他に解がない

MadGraph

- <http://madgraph.hep.uiuc.edu/>
- Current version: 1.0.6 (15 April 2005)
- Authors: Fabio Maltoni and Tim Stelzer
- CompHEP と同様に matrix element と generator の code を生成できる
- References: hep-ph/0208156
- 萩原さんの helicity amplitude 計算 package: HELAS に基づいている
- 近々 SuperMadGraph (SUSY version) が release される

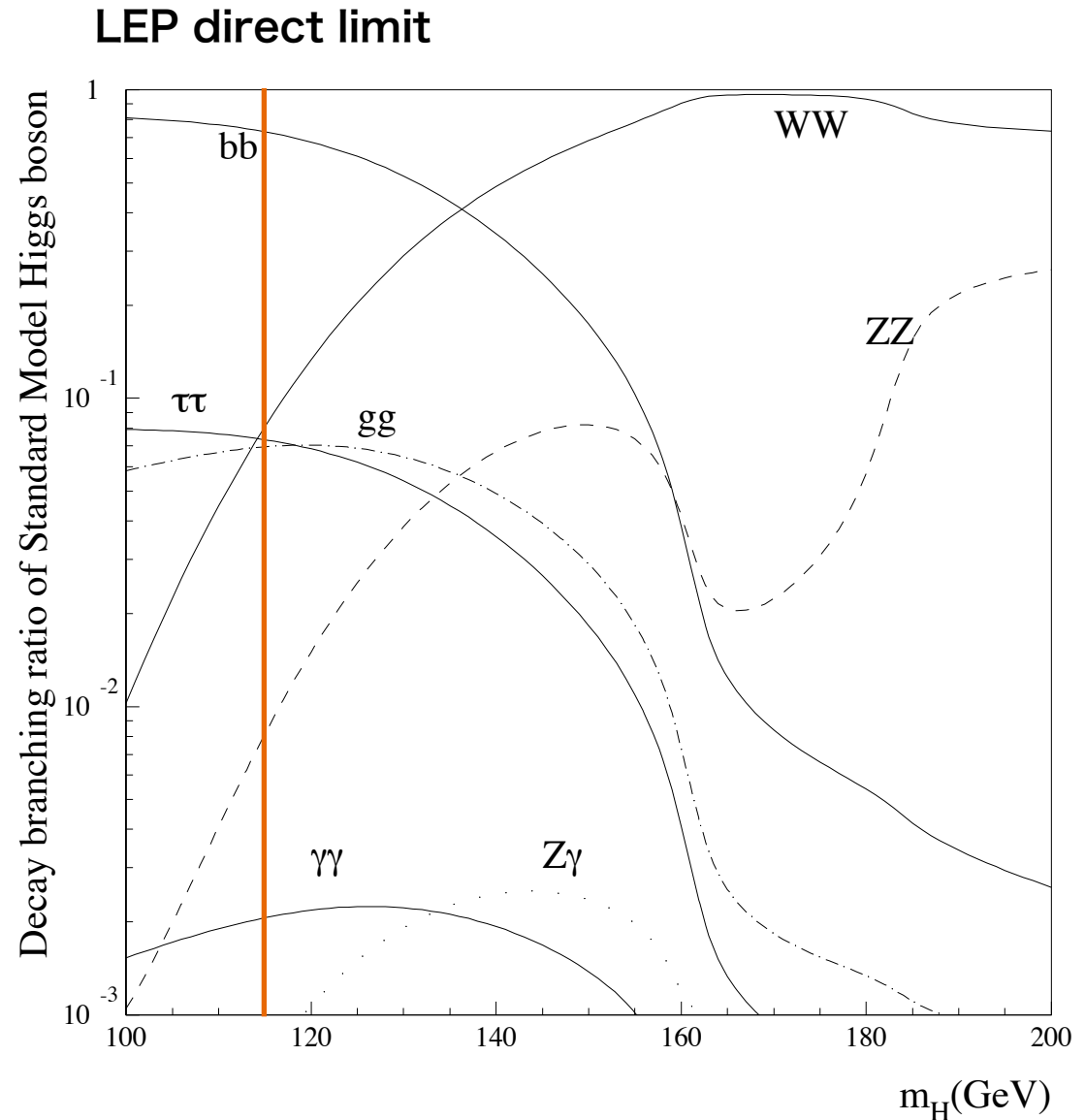
Higgs Decay Branching Ratios

- $m_H > 200 \text{ GeV}$ では WW と ZZ (2:1) のみを考えれば良い
- 重い ($m_H > 2m_t$) Higgs の t への湯川結合の測定の可能性？



Higgs Decay Branching Ratios

- 軽い($m_H < 140 \text{ GeV}$)場合には bb が dominate だが解析は難しい
- その場合でも WW が次に大きな branching ratio を持つ
- $\tau\tau$ の branching ratio はかなり大きい
- $\gamma\gamma$ は 2-3%
- $m_H = 170 \text{ GeV}$ 付近ではほぼ 100% WW へ崩壊
- それより重い場合には WW か ZZ

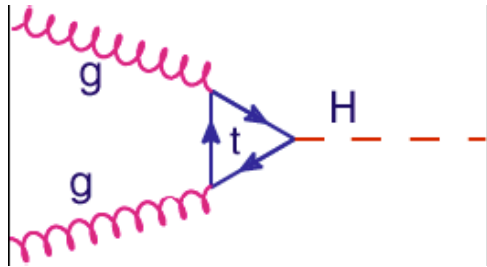


Higgsの主な崩壊モード

モード	ピーク？	特徴
bb	△	b-jetのエネルギーの測定が悪いため幅が広い
$\tau\tau$	○	他にmissingがない場合 ($\sigma \sim 9\text{GeV}$)
$\gamma\gamma$	◎	細いピーク ($\sigma \sim 1.4\text{GeV}$) Branching ratioは小さい($\sim 10^{-3}$)
WW(*)	×	ピークにならない 他にmissingがなければtransverse massに jacobian peak(WW→lvlv) Branching ratioが広い範囲で大きい
ZZ(*)	◎	ZZ→4l で細いピーク ($\sigma \sim 1.5\text{GeV}$) Branching ratioが広い範囲で大きい

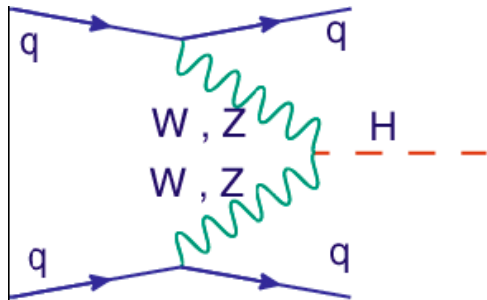
Higgs の4つの生成過程

gluon fusion



- 生成断面積は大きい但最终 state に Higgs のみ
が作られるため background と区別して selection
する手だてが少ない
- $\gamma\gamma$ 崩壊のように細いピークが観測される場合には
観測可能性が高くなる

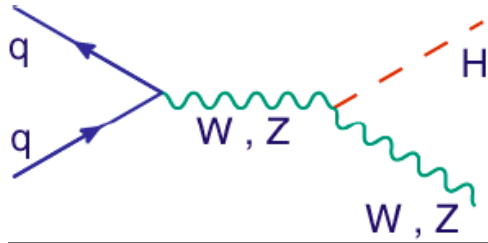
vector boson fusion



- 生成断面積はgluon fusion に次いで大きい
Light Higgs で1桁落ち、質量が大きいと差が縮む
- High p_T の2本の jet で background を抑える
ことができる
- 中央領域での QCD の activity (shower による
mini-jet の生成)が少ない
- 最近、研究が進み light Higgs の発見の可能性が大
きく進歩した

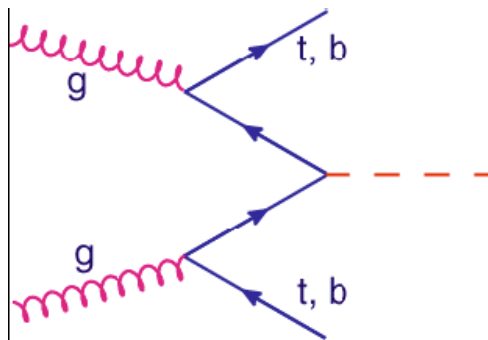
Higgs の4つの生成過程

W, Zとの随伴生成



- Tevatron での main channel
- Higgsの質量が大きくなると断面積が小さくなってしまふ

t/bとの随伴生成

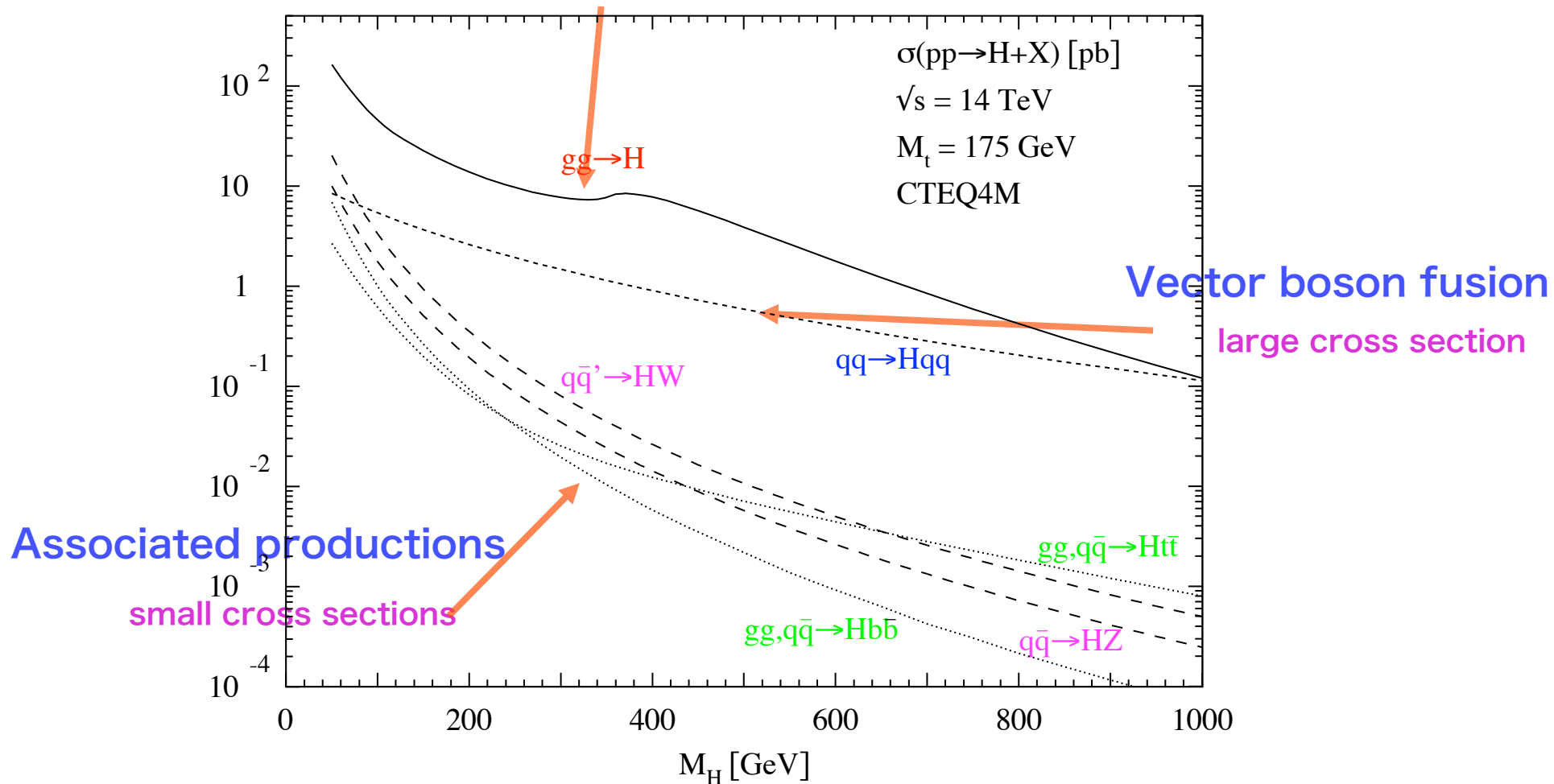


- Higgsの質量が大きくなると断面積が小さくなってしまふ
- t との湯川結合の測定
- MSSMの場合 $(\tan\beta)^2$ でenhance されるので b との随伴生成 (bbH/A) が重要になる
 - この場合、重要な崩壊モードも変わる可能性($\mu\mu$ 、 $\tau\tau$)

Higgs 生成断面積

Glun fusion

largest cross section



$m_H < 2m_W$ の場合

	bb	$\tau\tau$	$\gamma\gamma$	WW	ZZ
gg→H	X	X	発見 質量 Y_t (ループ)	X	-----
VBF	?? (Y_b)	発見 Y_τ, G_W	発見	発見 G_W^2	-----
ttH	$Y_t Y_b$	$Y_t Y_\tau$	-----	-----	-----
WH	X	X	-----	-----	-----

$m_H > 2m_W$ の場合

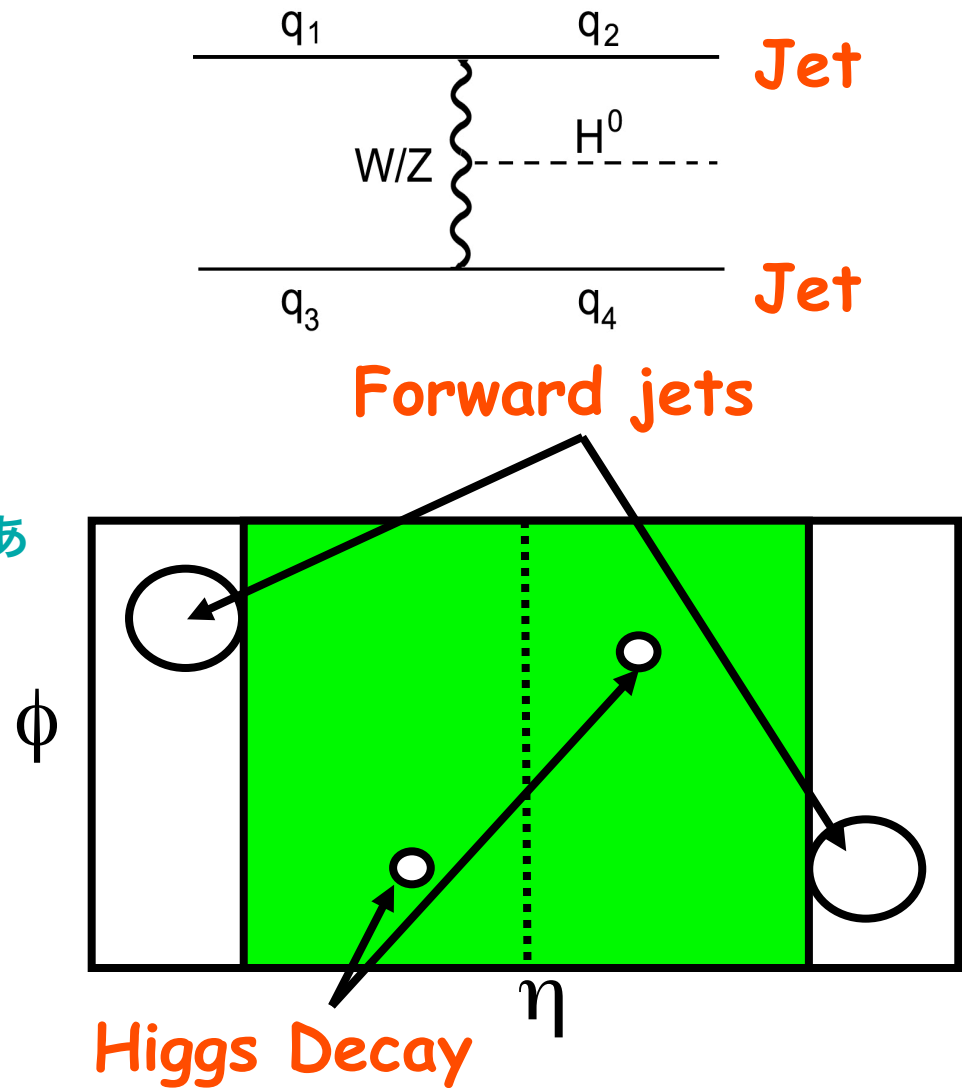
	WW	ZZ
gg→H	発見	発見 質量、スピン、他
VBF	発見 G_W^2	$G_W G_Z$
ttH	$G_W Y_t$ ($< 180 \text{ GeV}$)	-----
WH	(発見)	-----

Higgsの質量と崩壊モードのまとめ

- $m_H < 2m_W$ の場合
 - bb - ttH(->bb) が軽い場合にtへの湯川結合の測定で重要
 - $\tau\tau$ - VBFでの生成が発見モード
 - $\gamma\gamma$ - gluon fusion + VBF + (+1j) で有望な発見モード
 - WW* - VBFでの生成で広い質量範囲をカバーできる
- $m_H \approx 2m_W$
 - WW - 主に VBF
- $m_H > 2m_W$
 - WW - VBFでの生成が発見モード
 - ZZ - $m_H > 200\text{GeV}$ では ZZ->4l が発見モード
非常に重い($m_H > 600$)場合には ZZ-> $\nu\nu$ も重要
(branching ratio が大きいため)

Vector Boson Fusion の特徴

- 二本の high p_T jet が大きな $\Delta\eta$ で存在
- 中央領域で QCD activities が小さい
- Higgs の崩壊に依らないである程度 background を抑えられるので、異なる崩壊モードを観測できる可能性がある
→ 結合定数の比の測定に重要
- Invisible decay の観測？
trigger など問題はまだまだあるが、、、



Jet Pair with Large Rapidity Gap

VBF Higgs と tt での比較

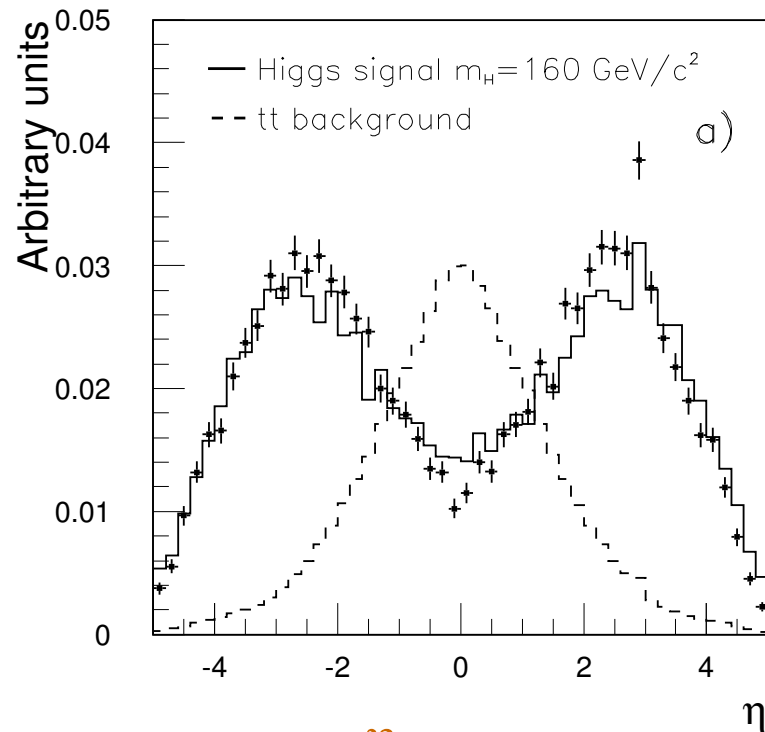
Higgs Signal

reconstructed - dots

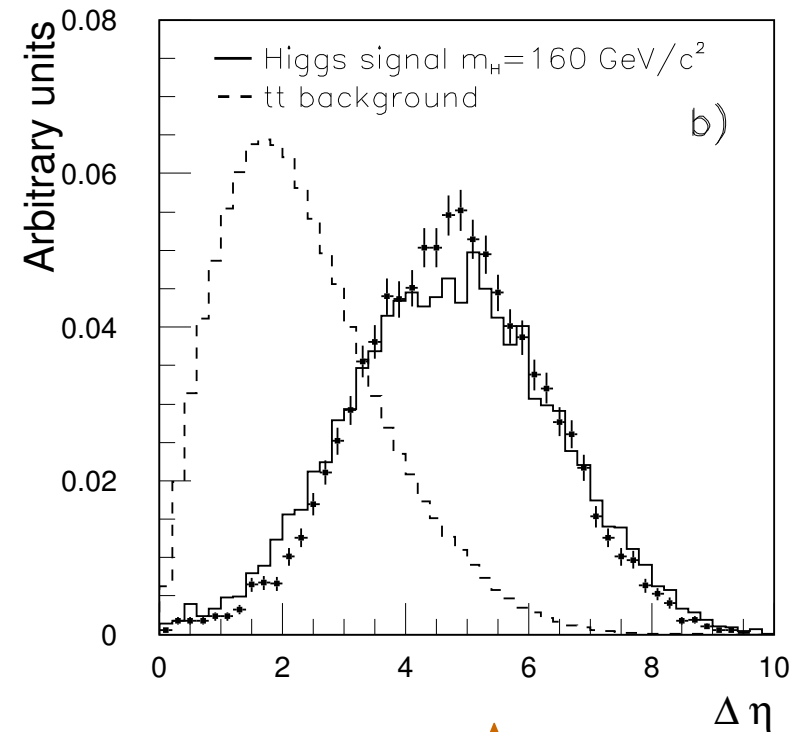
parton level - solid hist

tt background

- dashed hist



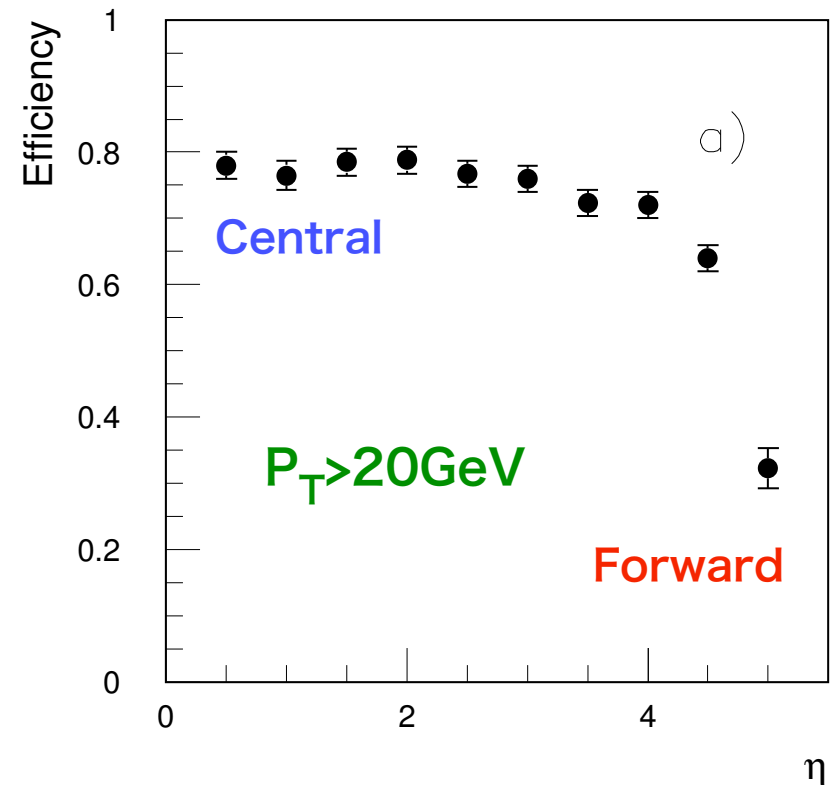
$\eta_{tag\ jet}$



$\Delta\eta$

Tagging Forward Jets

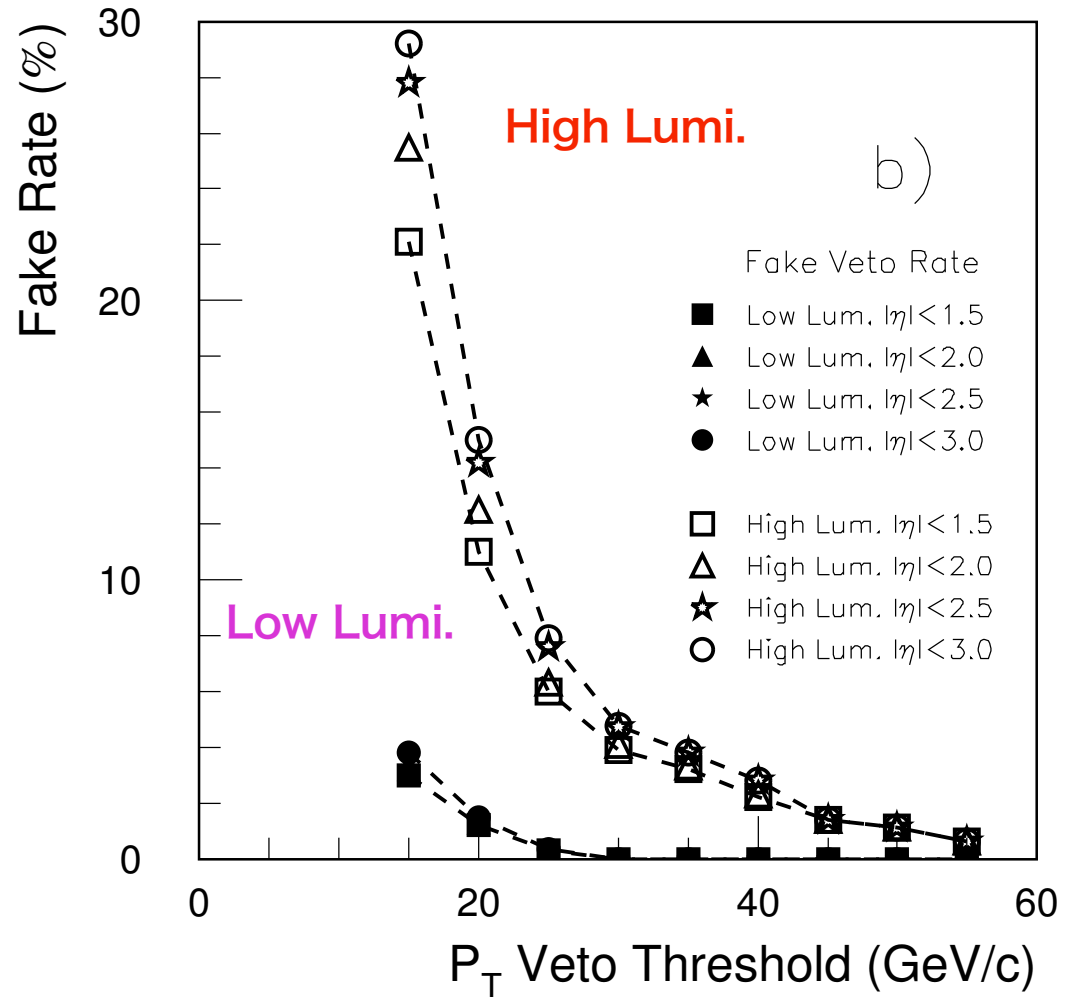
- $2 < \eta < 4$ の前方での jet efficiency が重要
- Full simulation の結果を用いて fast simulation を tuning する
→ より simulation の精度を上げる必要
- Double tag efficiency ~50%
← 0.7×0.7



Efficiency for reconstructing a tag jet

Central Jet Veto

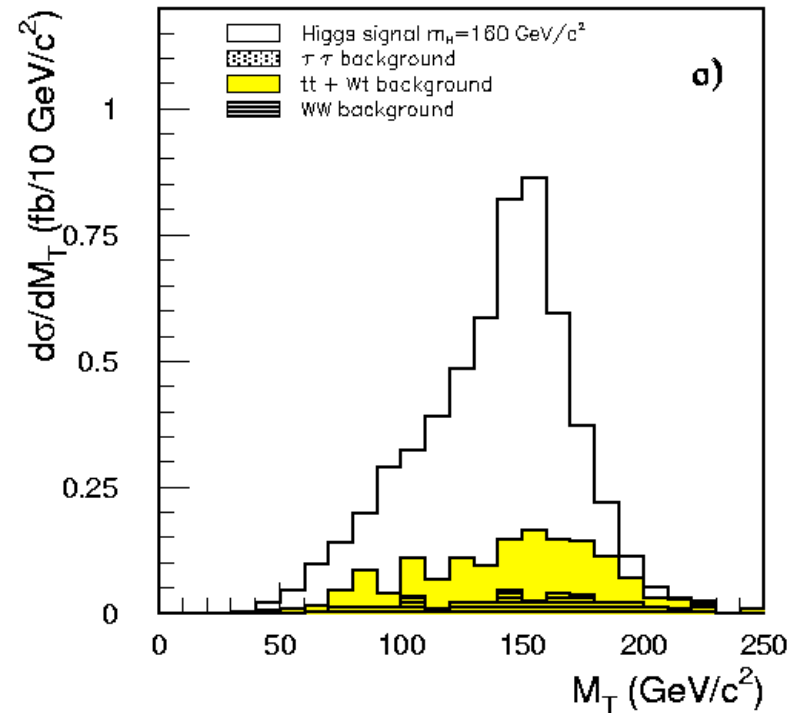
- Vector boson を放出する quark 間には color の交換がないため中央領域での jet activity が低い
 - 多くの background process では t-channel に color の交換がある
- Minimum bias event の overlap などで fake の central jet が生成される
 - Small at low luminosity
 - > $P_T > 20$ GeV
 - Serious at high luminosity
 - > $P_T > 30$ GeV or higher



VBF H \rightarrow WW*

- Di-lepton mode: H \rightarrow WW* \rightarrow $l\nu l\nu$
 - clean signal
- Lepton + two jets mode:
H \rightarrow WW* \rightarrow $l\nu jj$
 - larger branching ratio
 - large background
- Background: tt, WWjj(EW)
- Lepton angular correlation is effective to suppress background for H \rightarrow WW \rightarrow ll mode.

Transverse Mass Distribution $m_H=160$ GeV (only e μ)



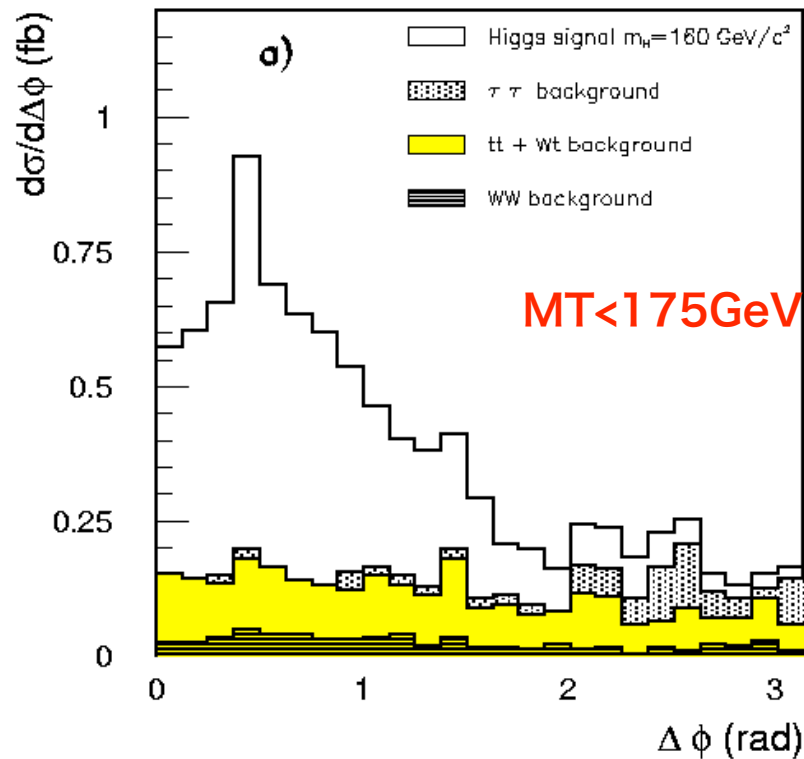
Spin correlation in $H \rightarrow WW^*$ decay

- Lepton angular correlation shows evidence of Spin-0 resonance in $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\ell$ modes

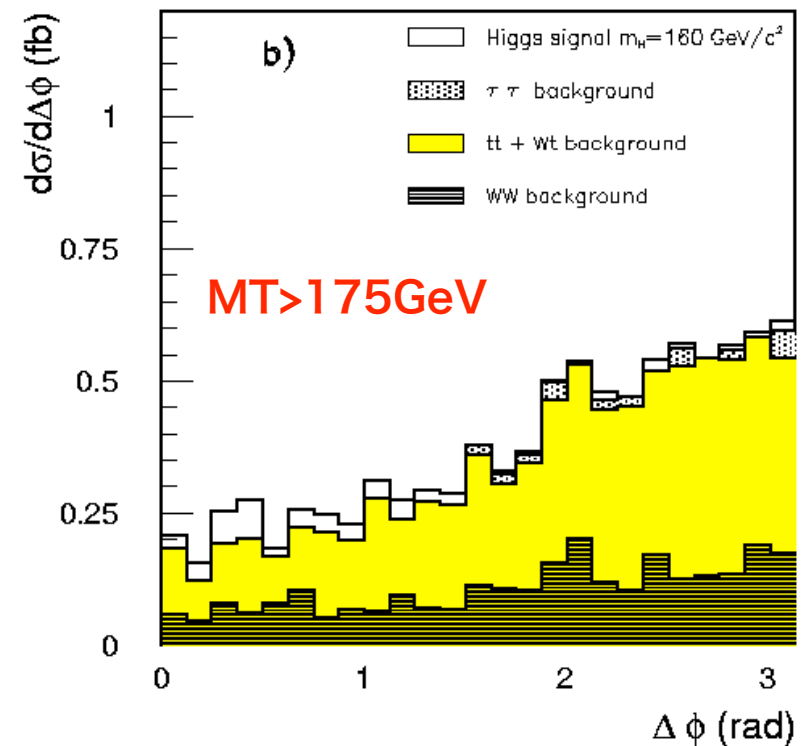
$m_H = 160 \text{ GeV}$, $e\mu$ mode

without lepton correlation cut

Signal region



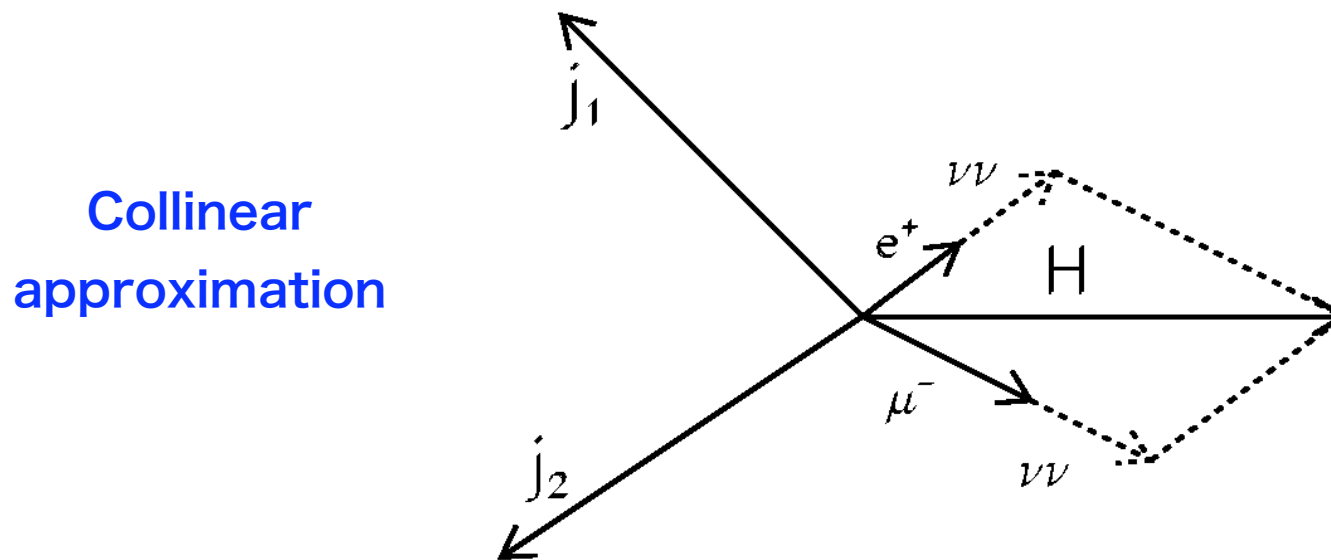
Outside Signal region



$M_{\tau\tau}$ の再構成(VBF $H \rightarrow \tau\tau$)

- τ 崩壊は ν をふくむため missing があるが event に他に missing がなければ観測された missing を ν から来るものと仮定して $M_{\tau\tau}$ を reconstruct 出来る

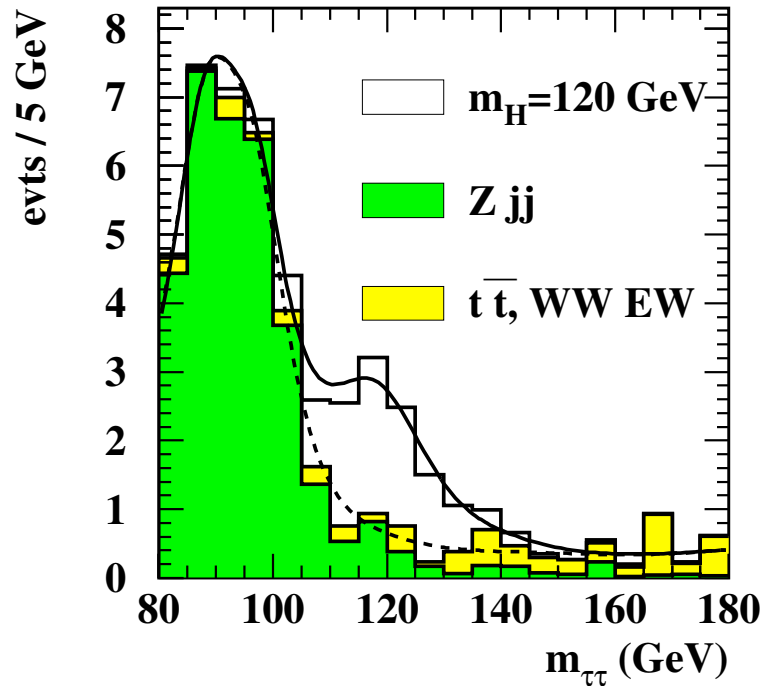
- Mass resolution $\approx 10\%$



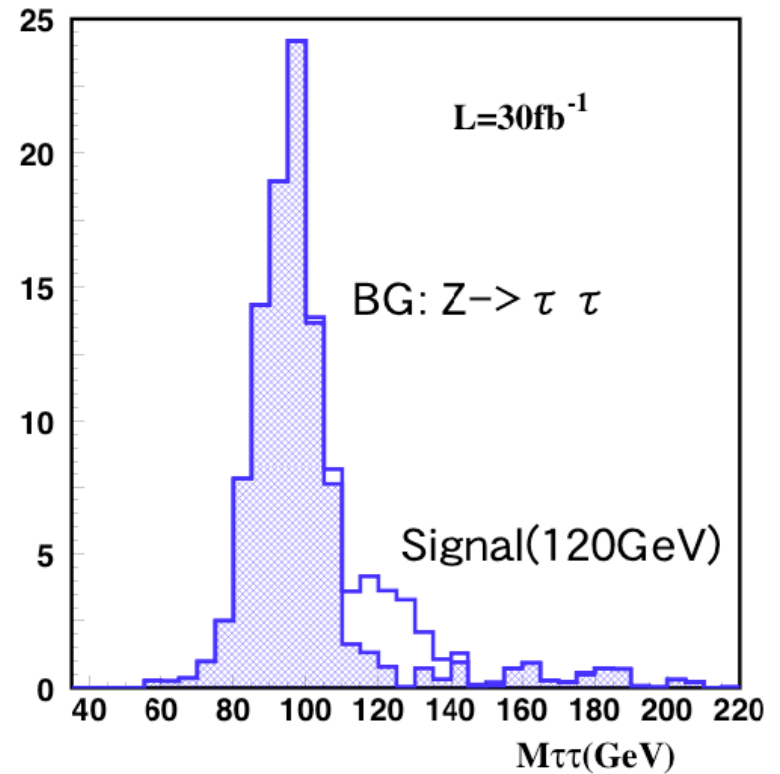
VBF $H \rightarrow \tau \tau$

$M_{\tau\tau}$ distributions

ll mode, $m_H=120$ GeV
for 30fb^{-1}



lh mode, $m_H=120$ GeV



W->lνの再構成

二つの粒子の invariant mass を η 、 ϕ 、 E_T により表すと

$$M^2 = 2E_{T1}E_{T2} (\cosh \Delta \eta - \cos \Delta \phi)$$

Event 中に W->lν 崩壊がありν以外に missing がなければ観測された missing E_T を用いて $M_W=80\text{GeV}$ を仮定すると親の W の 4-vector を再構成することができる(ただし解が二通り存在する)

Trigger の関係から W->lν崩壊を利用することが多いので役に立つ

ex) VBF H->WW->lνjj での m_H の再構成

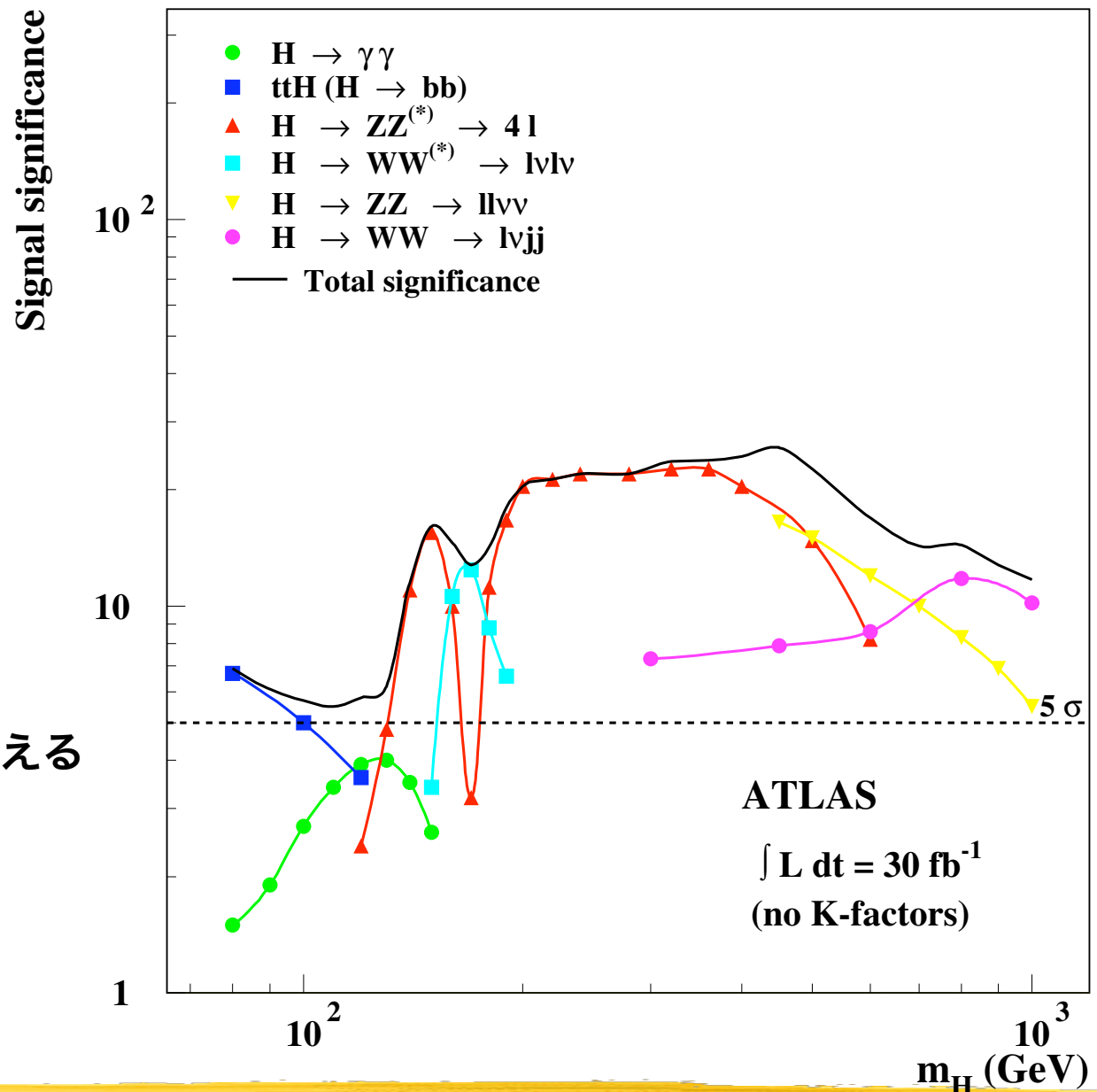
以前の結果(Physics TDR in 1999)

30 fb⁻¹:

- 重い場合($m_H > 200 \text{ GeV}$)
には問題はない

ZZ→4l で広い範囲をカバー

- 軽い場合($m_H < 140 \text{ GeV}$)に
一つの崩壊モードで5σを越える
ものはなかった



VBFを使った最近の結果

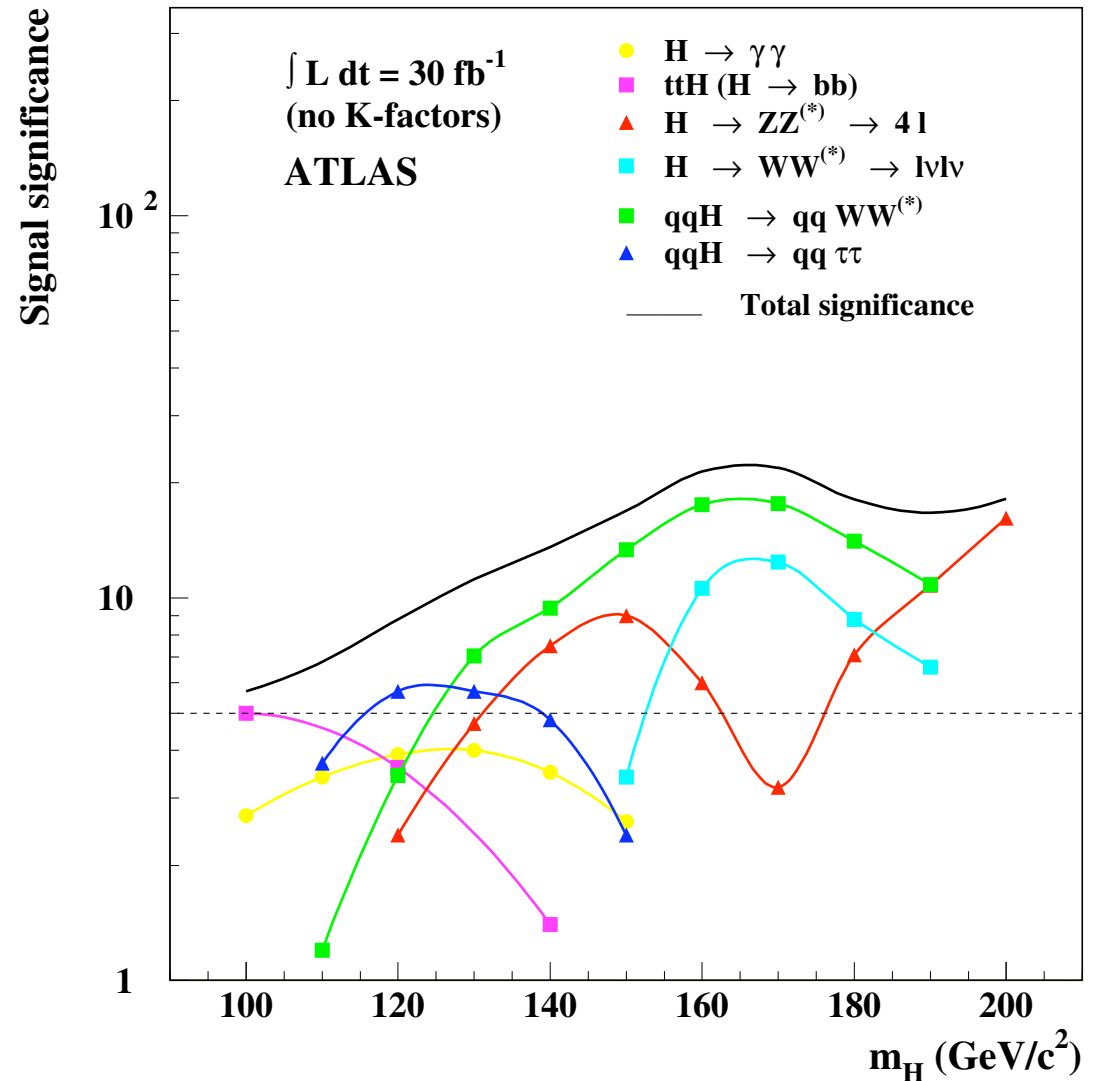
30 fb^{-1} :

- LEPでのEW精密測定に対する fitting から期待される質量領域は十分にカバーできる

- 同時に複数のモードで発見が可能

→ 発見を相補的にカバーする

- 異なる崩壊モード
- 異なる生成プロセス
- 異なる測定器パートの利用

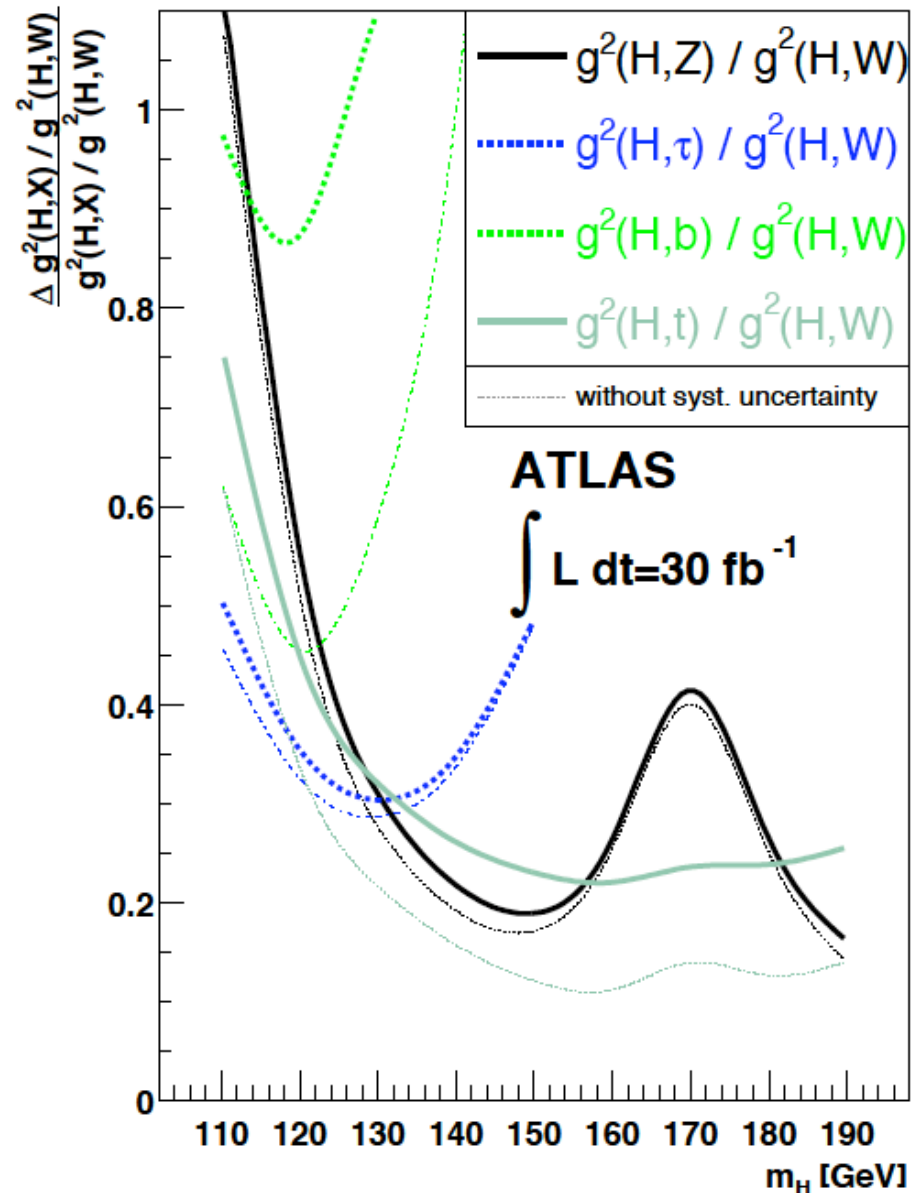


本当にHiggs?

観測されたピーク、excess が
Higgs かどうか知るためには、
その性質を知らなければならない

期待される結合定数の比の測定精度
(30fb^{-1}):

Htt, $H\tau\tau$ - 15-20%
Hbb - 45% (VBF bb)
HZZ - 10-20%



まとめ

- … まだまだ大事な話は続きます
 - Higgs のスピン、パリティ、CPの決定
 - SUSY Higgs について
 - $h, H/A, H^\pm$
 - Higgs の SUSY 粒子への崩壊について

でも”習う”より”慣れる”ですから、、、