

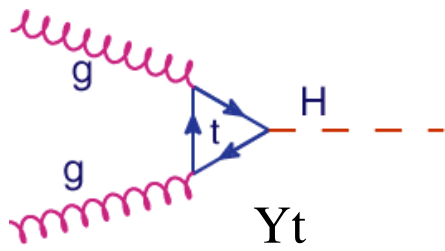
LHCでのHiggs研究 「まとめと課題」

1. 標準モデル・ヒッグス研究の概要
2. 何が重要で、どのチャンネルが鍵か
3. 各チャンネルの課題
(時間の関係で、我々と関係が強い物だけ)
4. MSSMヒッグスモデルの包括的な話と課題
5. まとめ

(1,2)と(3)の配分？これから研究を始める人向けの会議
(3)の細かい話があります。

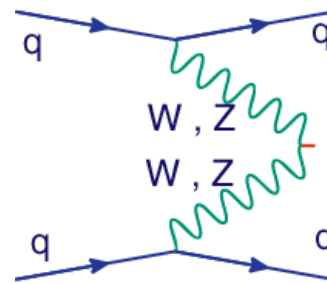
1. 標準モデルヒッグス研究の概要

Gluon Fusion



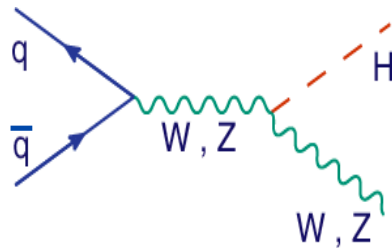
1. gluonは、massless higgsと直接接合しない。top のloopで (Y_t)
2. gluon多いので σ 大 (次のページ)
3. Higgs だけ BGが厳しい (lepton, γ 終状態)

Vector Boson Fusion



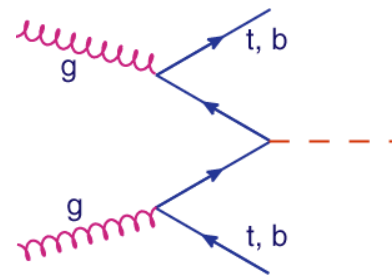
1. Valenc quarkで large Xのquarkが多い(次のページ)
2. Higt Pt jetをtagすることでBGを押さえることができる。

W・Zとの随伴生成



1. LEP, Tevatronの主チャンネル。LHCでは、副。
2. $W \rightarrow \lnu$ でtrigger
 $WH \rightarrow WWW$
3. $H \rightarrow WW$ 100%Br
at $M_h = 170 \text{ GeV}$

Top/bottomとの随伴生成



1. Topは特徴的なので発見しやすい。
2. Topの湯川結合測定チャンネル
3. MSSM Higgsでは $(\tan \beta)^2 bbH/A$

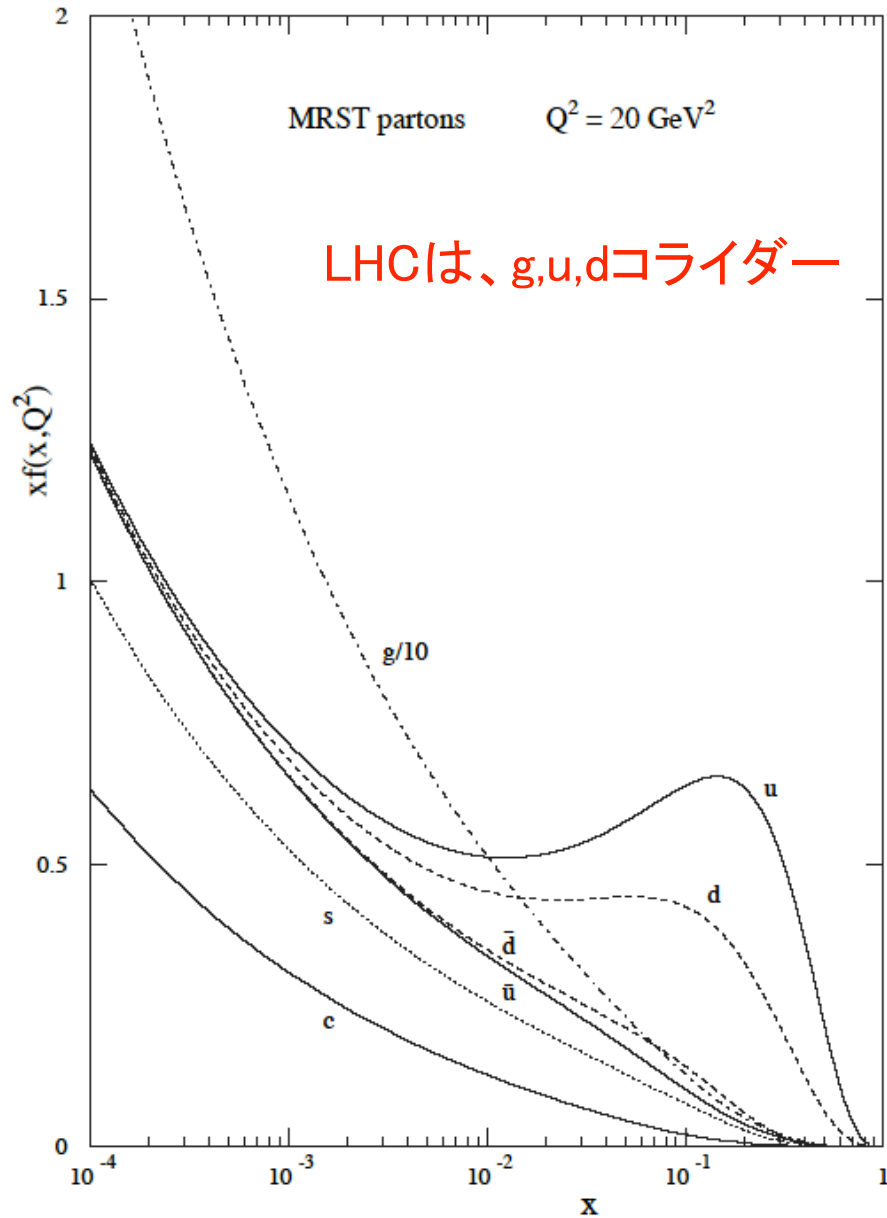
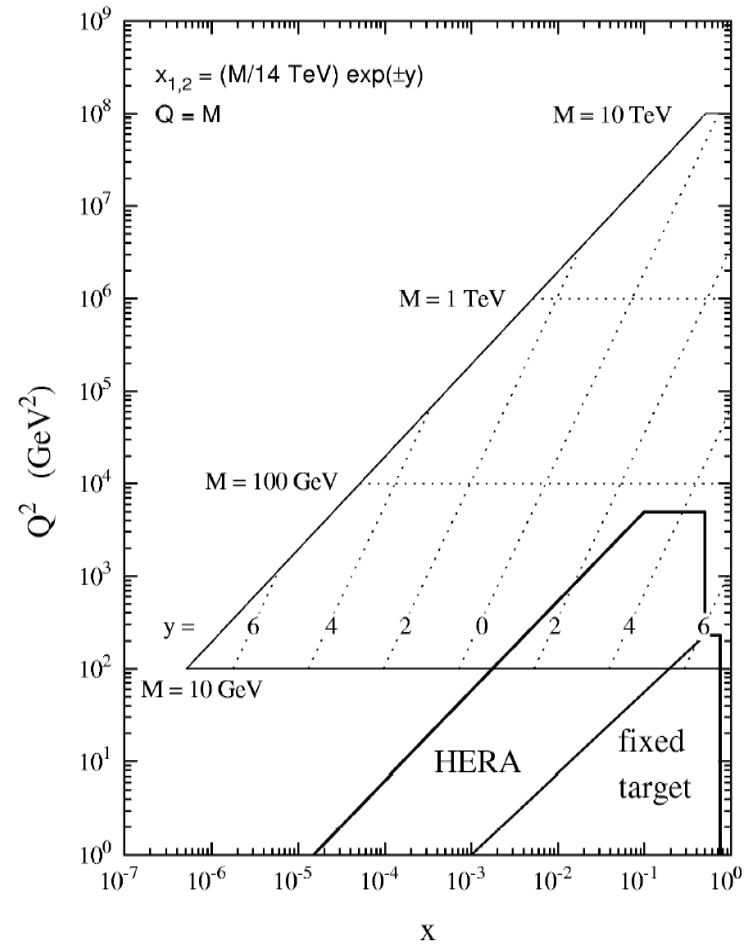
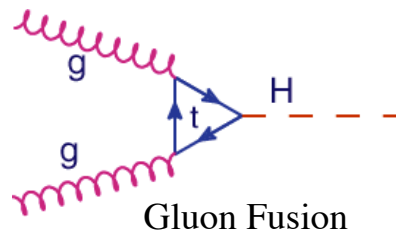


Fig. 3. MRST partons at $Q^2 = 20 \text{ GeV}^2$

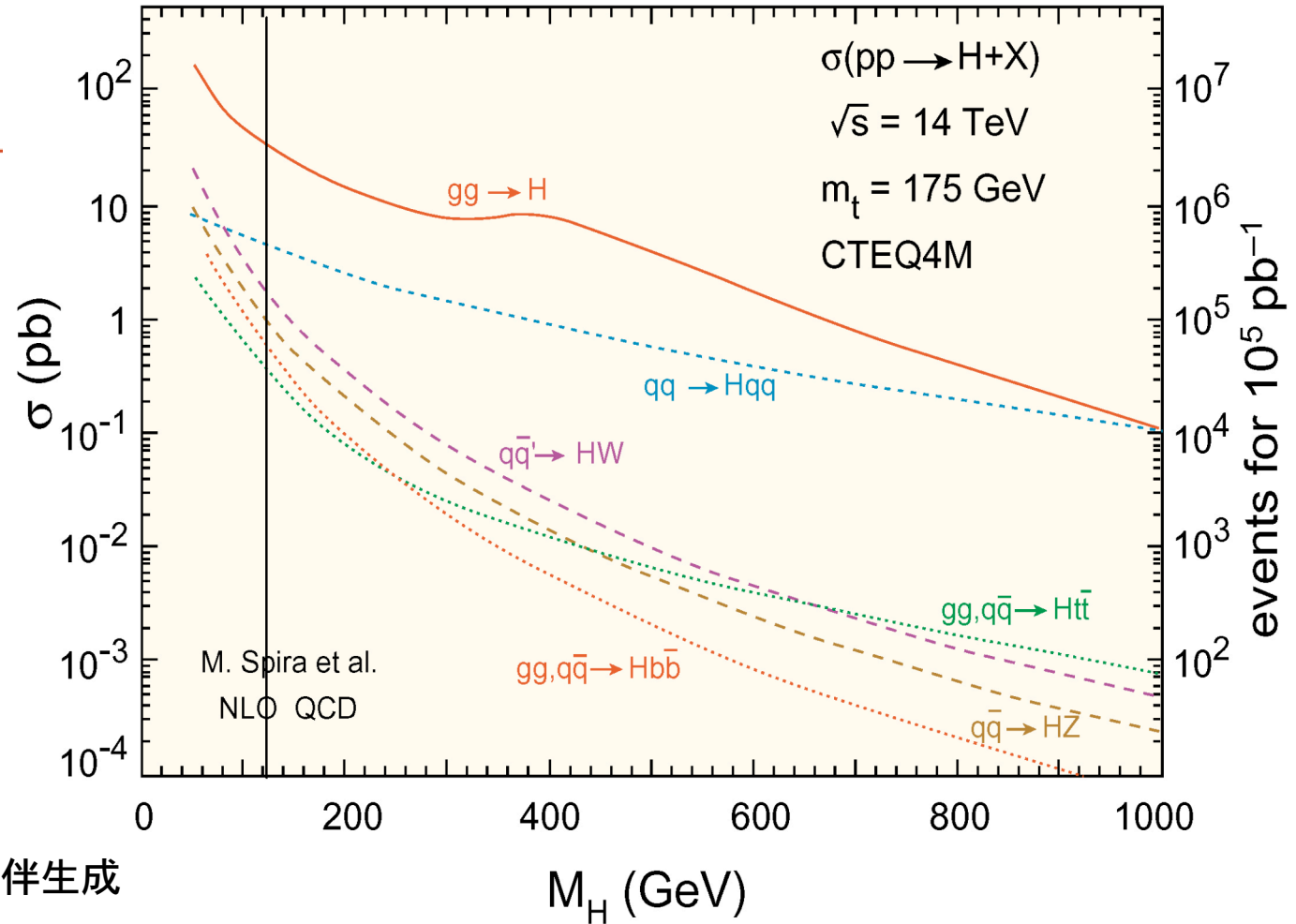
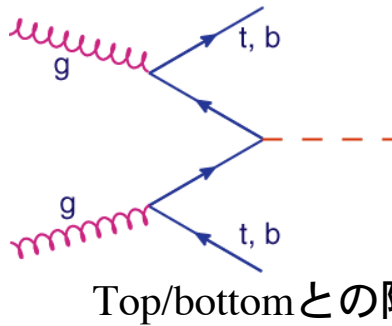
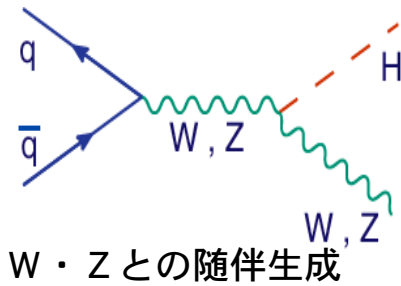
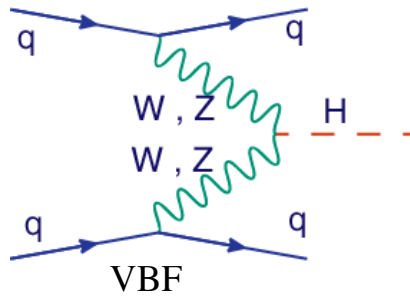
pp衝突→ パートン同士の
衝突:
x1P とx2Pの正面衝突
実効ECM= $\sqrt{x_1x_2}$ 14TeV



LHCでのヒッグス生成断面積

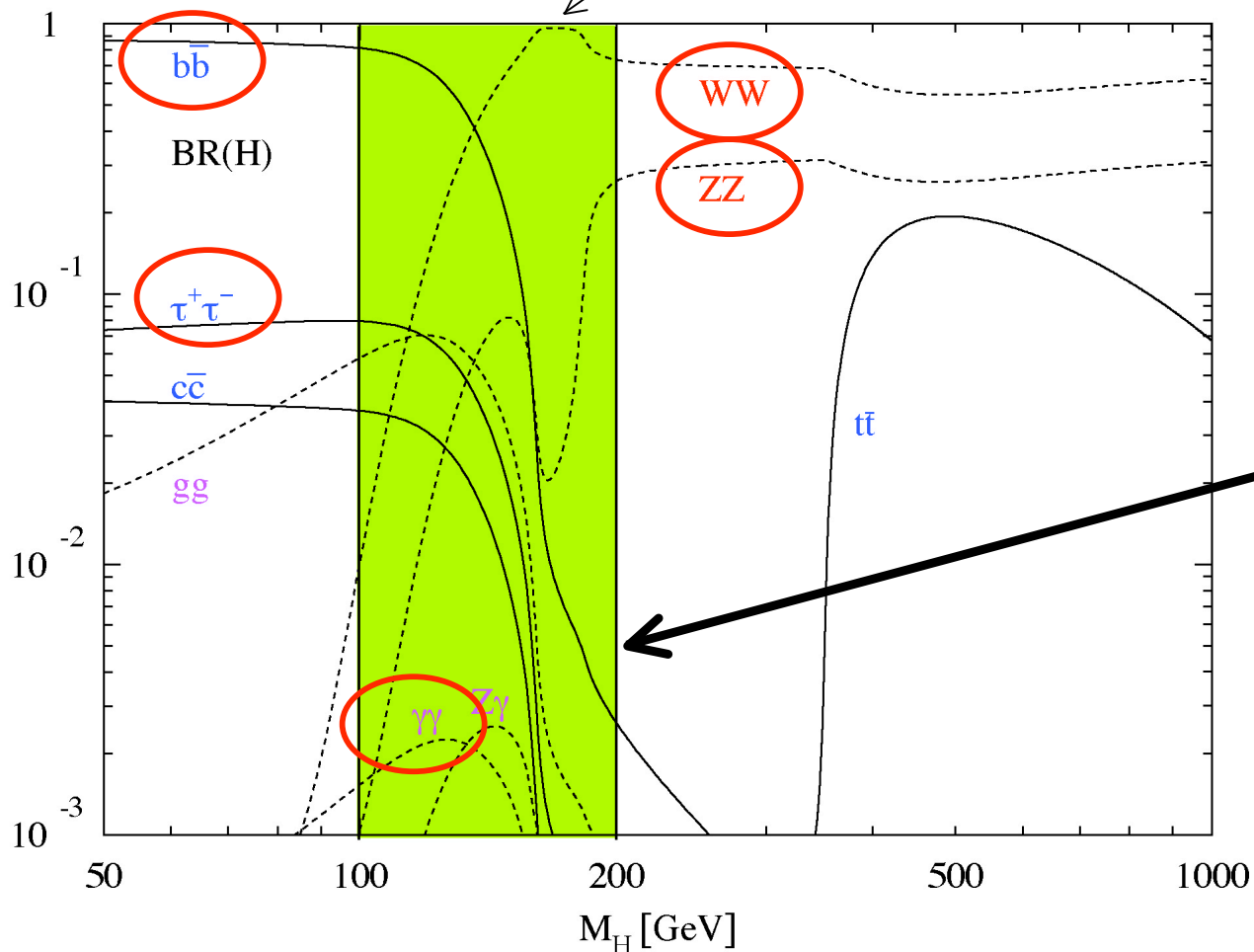


LEPで
棄却



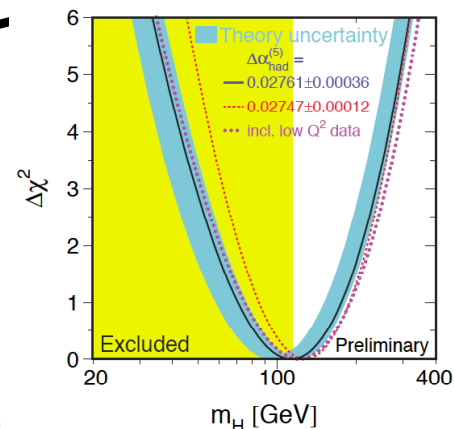
Higgsの崩壊過程

170GeVの時H→WW
がほとんど



Higgsは
重い物に
よく結合する
-> 湯川結合

LEPが示唆する質量
領域では、bb, $\tau\tau$,
 $\gamma\gamma$, WW, ZZの
5つの崩壊モードが
大切になる。
115-260GeV



SUSY Higgs
<130-140GeV
(軽い Higgs)

SM Higgs boson ($H < 150 \text{ GeV}$)

Decay modes

Production modes

	bb	$\tau\tau$	$\gamma\gamma$	WW	ZZ
$gg \rightarrow H$	×	×	Discovery Mass 間接的 Y_t	×	140GeV以上 なら発見mass
VBF	? (Y_b)	Discovery $Y_\tau G_W$? (Discovery)	130GeV以上 なら発見 G_W^2	140GeV以上 なら発見mass
ttH	$Y_t Y_b$	$Y_t Y_\tau$ (L=600)	-----	-----	-----
WH	×	×	-----	-----	-----

× : BG too high -----: σ * Br too small

青色 we can measure couplings and mass

VBFが優等生、軽い場合いろいろ測定出来る。

Promising channels for SM Higgs boson ($H > 150\text{GeV}$)

Decay modes

Production modes	bb	$\tau\tau$	$\gamma\gamma$	WW	ZZ	
	gg \rightarrow H	x	-----	-----	Discovery	Discovery Mass, spin, etc
	VBF	x	-----	-----	Discovery Gw ²	GwGz
	ttH	-----	-----	-----	GwY _t ($< 180\text{GeV}$)	-----
	WH	-----	-----	-----	Discovery	-----

x : BG too high -----: σ or Br too small

Blue: we can measure couplings and mass

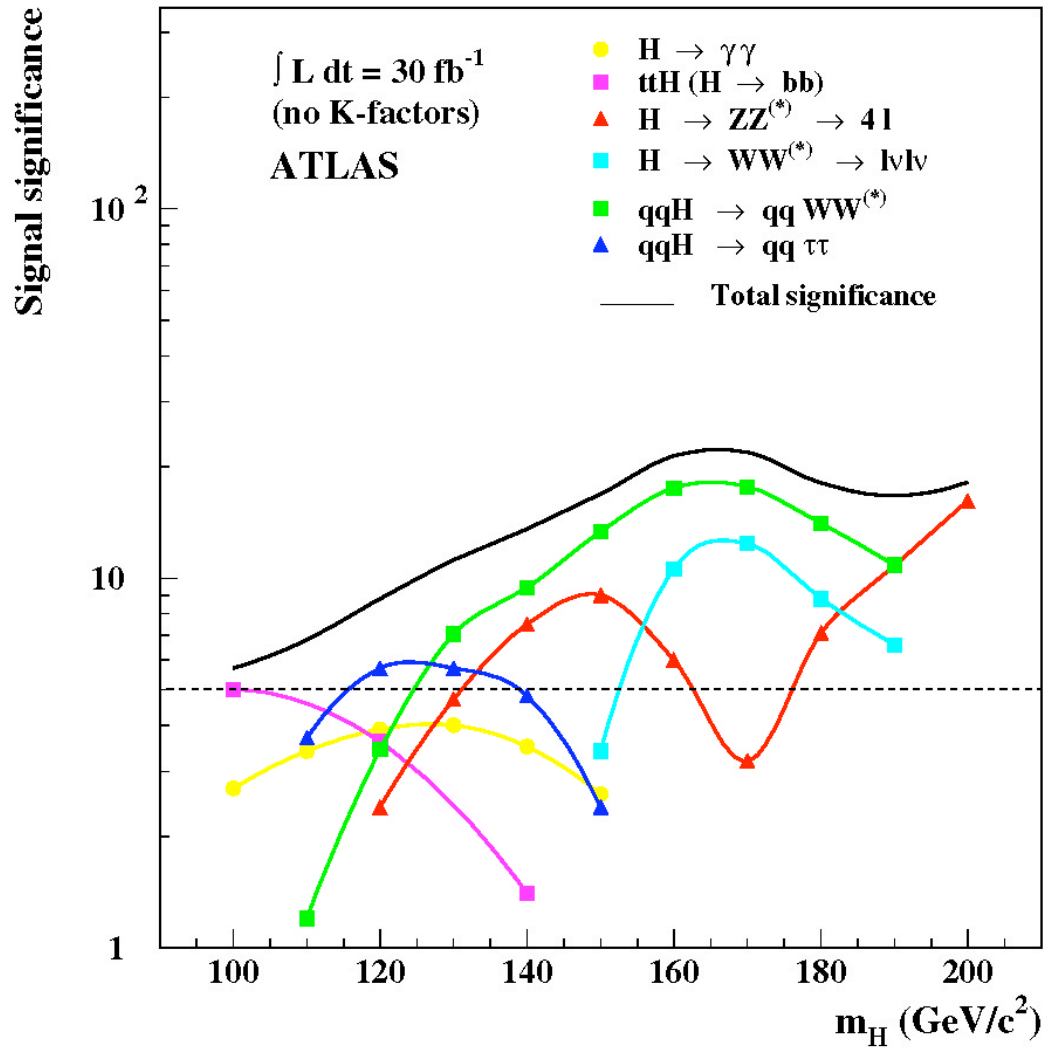
ZZが優等生、でも全体に湯川関係の研究がしにくい(Yt loop)

SM Higgsの研究で有効なチャンネルの纏め

生成過程	崩壊過程	有効な領域とその効能	
Gluon Fusion	$H \rightarrow \gamma \gamma$	110–140GeV	Mass 測定 spin=0の傍証
	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$	140–1000	発見・Mass, spin, coupling測定
	$H \rightarrow WW$	130–170 GeV	発見
Vector Boson Fusion	$H \rightarrow \tau \tau$	110–140GeV	発見・Mass, coupling測定
	$H \rightarrow WW$	130–200GeV	発見・W coupling測定
	$H \rightarrow \gamma \gamma$	110–140GeV	発見? (fakeの研究中)・Mass測定
	($H \rightarrow bb$??)	110–140GeV	Ybの測定に不可欠でもTriggerが難しい
ttH	$H \rightarrow bb$	110–130GeV	Ytの測定
	$H \rightarrow \tau \tau$	110–130GeV	
	$H \rightarrow WW$	130–180GeV	
WH	$H \rightarrow WW$	140–170GeV	発見・W coupling測定

SM Higgsの発見能力

$L=30\text{fb}^{-1}$ で 8σ 以上の発見が可能 ($M_H > 114\text{GeV}$: LEP limit)



- 軽い場合 VBF $\cdot \tau\tau$
- 重い場合 VBF $\cdot WW$
- 200GeV以下の時は複数のモードで観測可能
- 200GeVより重いと
 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\text{lepton}$ で
 20σ 以上

$L=10\text{fb}^{-1}$ で約 5σ

→ 実験開始約1年で発見可能

2. ヒッグス研究で何が大切か

- (1) 文句のない発見を素早くやる
文句がないー> 有為である。(S/N改善する研究)

- (2) 質量の起源であるー>結合定数を測定して
質量に比例しているか？
ゲージ粒子とフェルミオンに共通
の質量起源か？

- (3) ヒッグス質量の測定 (綺麗なPeakとBGの理解)

- (4) スピン、CP、崩壊幅、崩壊率の精密測定

2. ヒッグス研究で何が大切か

- (1) 文句のない**発見**を素早くやる
文句がない→ 有為である。(S/N改善する研究)

高速(Smear) MCを
使ってこれらの研究
大きな成果！！

- (2) 質量の起源である→結合定数を測定して
質量に比例しているか？
ゲージ粒子とフェルミオンに共通
の質量起源か？
- (3) ヒッグス質量の測定 (綺麗なPeakとBGの理解)
- (4) スピン、CP、崩壊幅、崩壊率の精密測定

実験的には不十分： より現実的な準備を始める段階

これらが整い始めている

(1) 文句のない**発見**を素早くやる
文句がない→ 有為である。(S/N改善する研究)

* 検出器を理解して綺麗なPeak

* BGをきちんと理解する

検出器の効果 (tail, noise, miss ID など) とQCD効果

* データを使ってこれらの理解が正しいことを万人に示す。

「素早く」→ Limited な統計の
コントロールサンプルでする工夫

◎ Full simulation

◎ 詳細なGenerator

詳細な研究、
Lに即したデータ量

で研究する手法の確立

(発見のロードマップ作り)

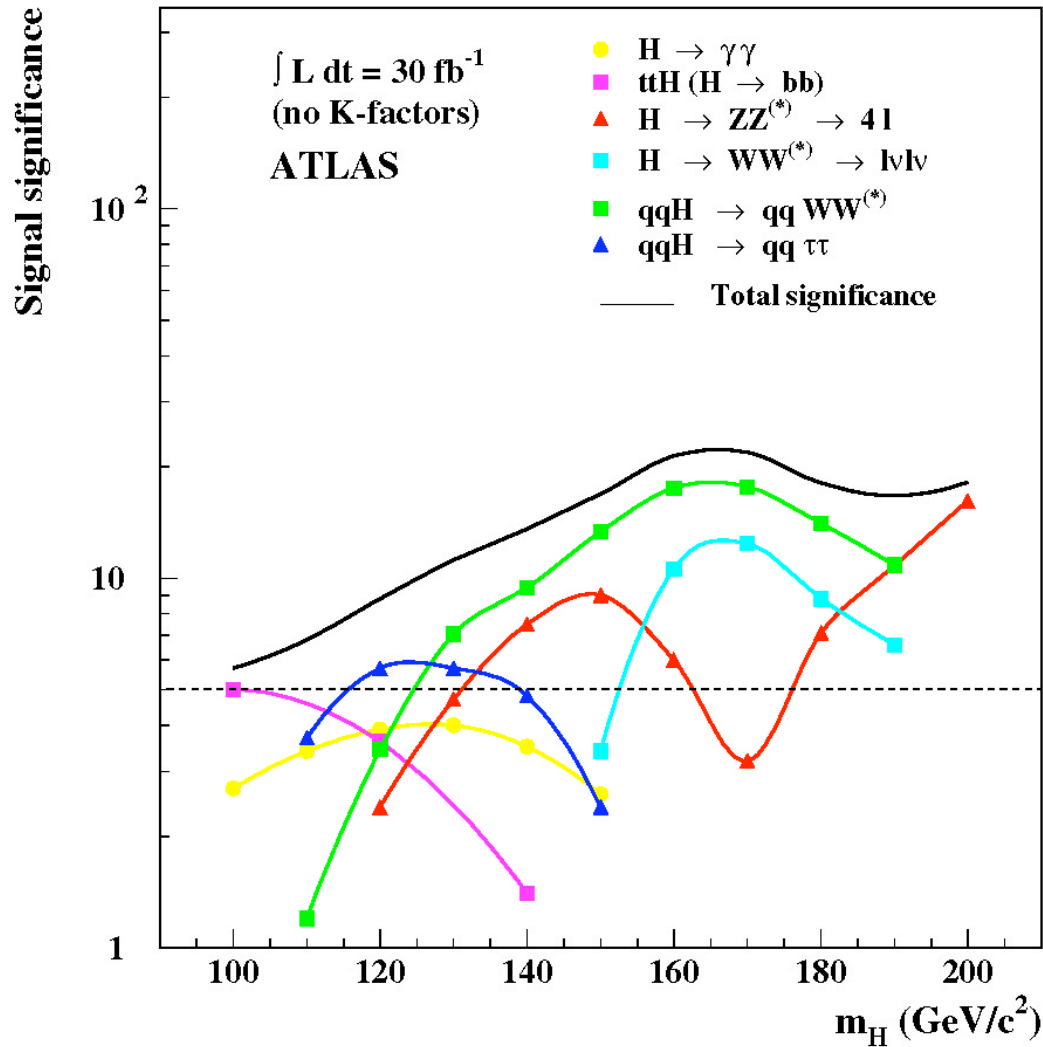
(2) 質量の起源である→ 結合定数を測定して

質量に比例しているか？

ゲージ粒子とフェルミオンに共通

の質量起源か？ (誤差、精度)

3. これからの課題（我々の取り組みを中心）を整理



我々が拘ってきたこと

1. 誰が何と言っても
First Discovery

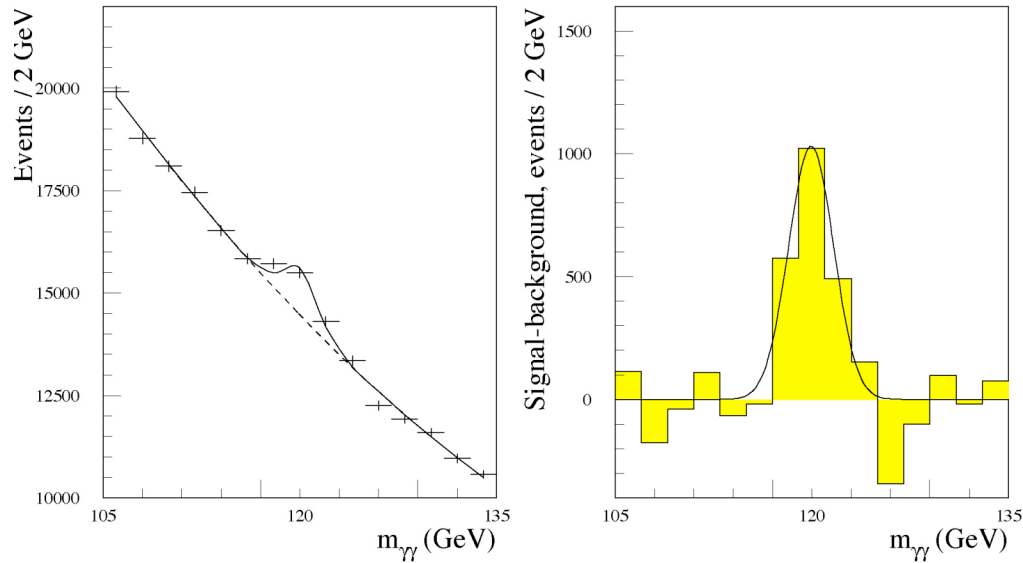
2. Peakを作るモード
(確実な発見と表裏一体)
(青、赤、黄色)

3. SUSYを信じて
軽い $< 140 \text{ GeV}$
Higgsをターゲット
(青、黄色)

4. Yukawa結合の測定
(紫色など)

3-1 GF とVBF Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$

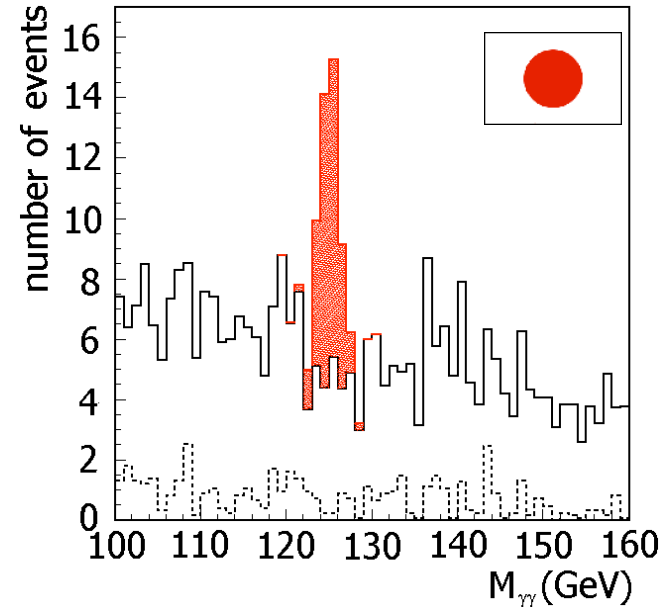
Glueon fusion, VBF Higgsが出来て、



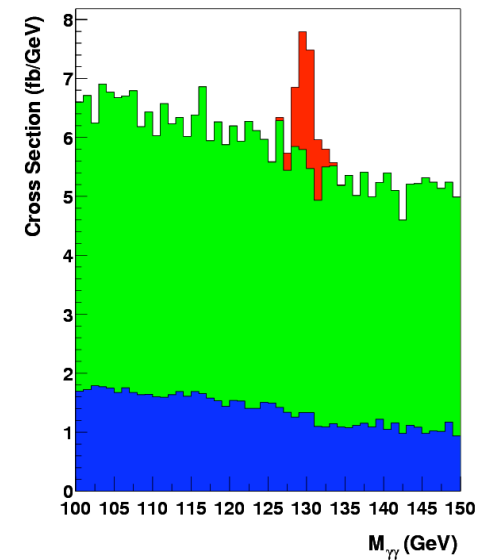
Jet は問わない (主にgg)

H $\rightarrow \gamma\gamma$ 綺麗でシャープなpeak ($\sigma = 1.4\text{GeV}$)
発見、質量測定

非常に強力なチャンネル
(上だけsignificance計算に入っている。
右を入れるともっと良くなる

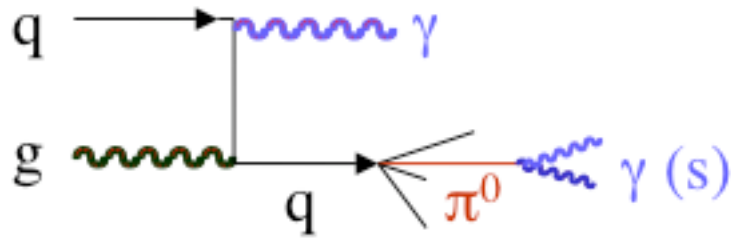


VBF(high Pt jet 2本)

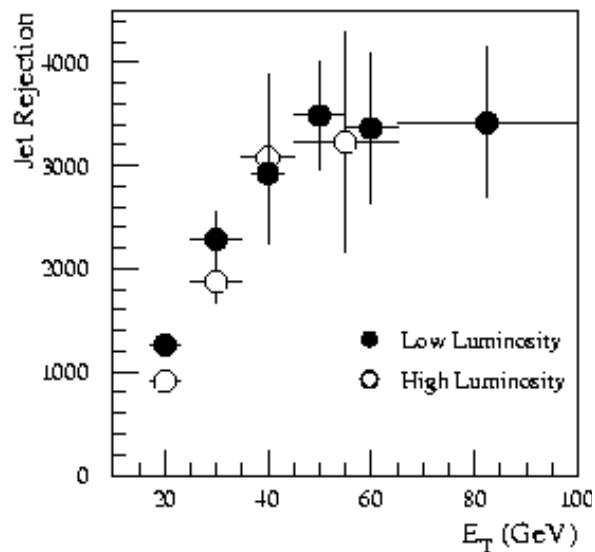


あわせ技 high Pt jet 1本

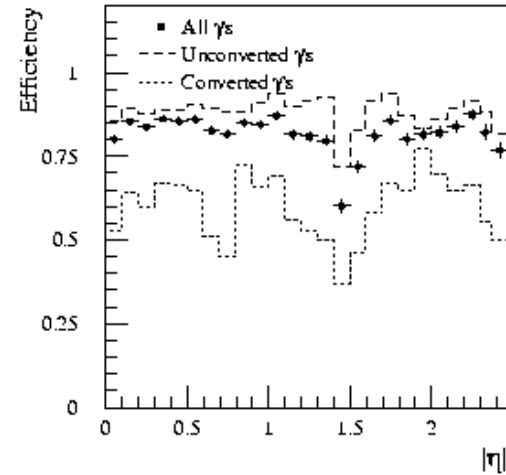
$$\frac{\sigma(jj)}{\sigma(\gamma\gamma)} = 10^8$$



(1) Fakejet ($\pi^0 / \text{gamma}=3$)
Isolation



(2) γ の再構成と分解能



40%程度の γ はeeにconvert
この再構成
このチャンネルの鍵は
分解能(E,角度) と再構成能力

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

E と角度 η (eeになるとZがよく決まる)

(3) BG はデータで評価しやすい

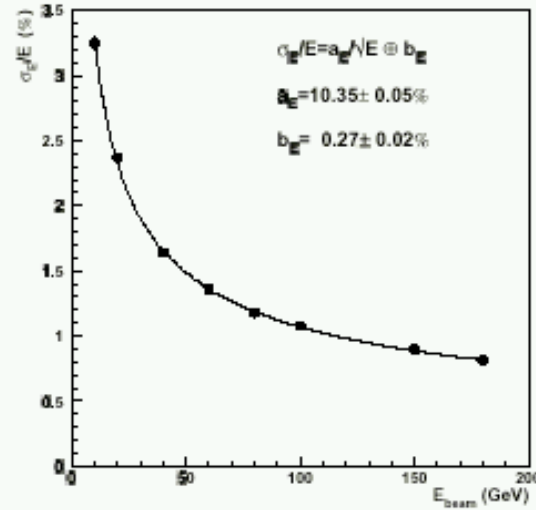
$$\sigma / E = \frac{10\%}{\sqrt{E}} + 0.7\%$$

$\eta=1.9$

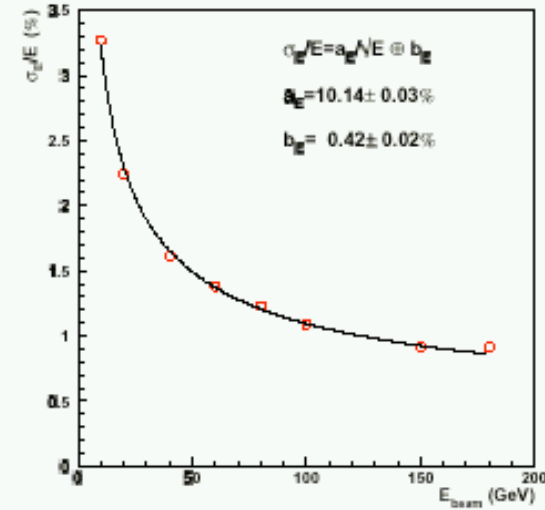
CMS

$$\sigma / E = \frac{2.7\%}{\sqrt{E}} + 0.5\%$$

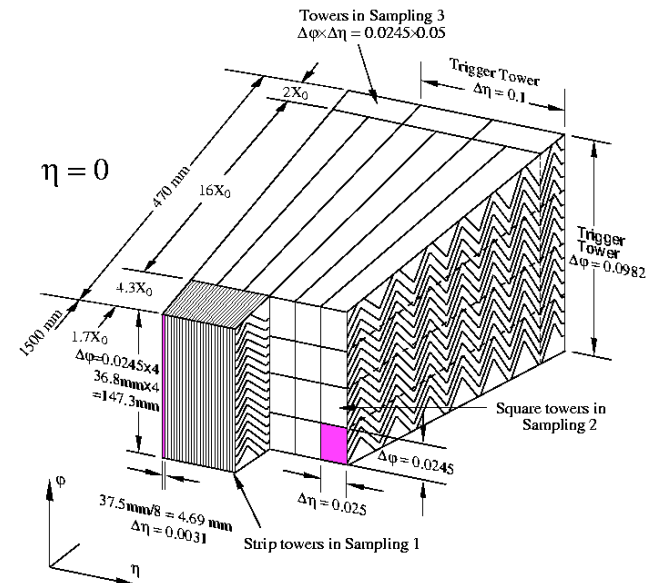
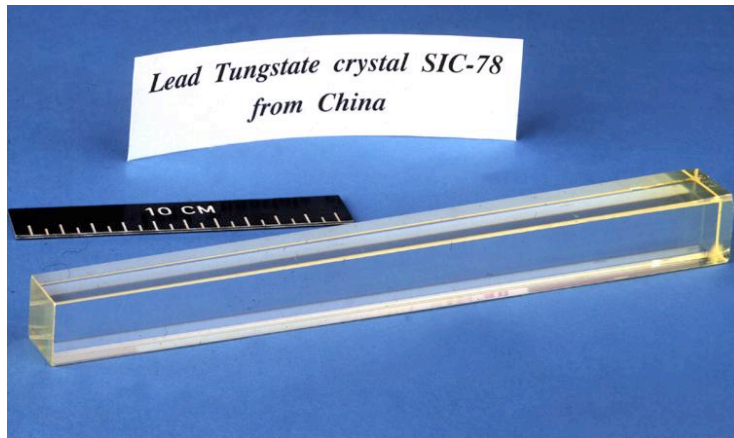
Test beam Data



Simulation



Pileup+noise RMS 0.4GeV(3*7 cell)

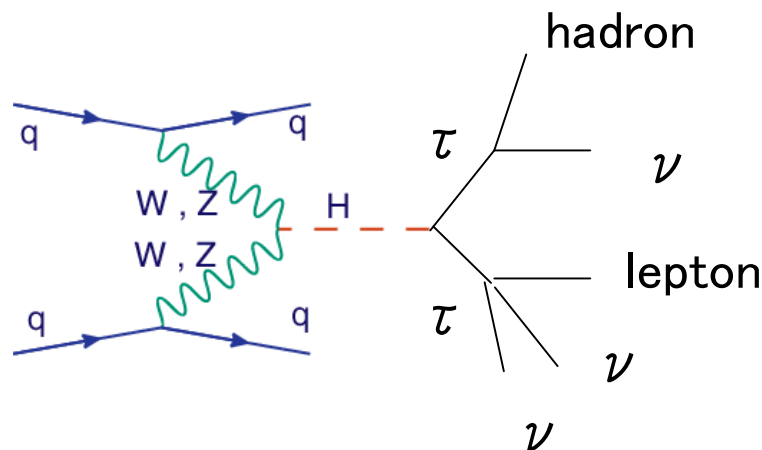


3-2 VBF H $\rightarrow \tau \tau$

再構成可能 peakが見える
 τ が軽いので ν はvisibleと同じ方向に出ている。

$$x1P1+x2P2=Et_miss$$

τ が再構成 \rightarrow Higgsが再構成



$M_H=120\text{GeV}$

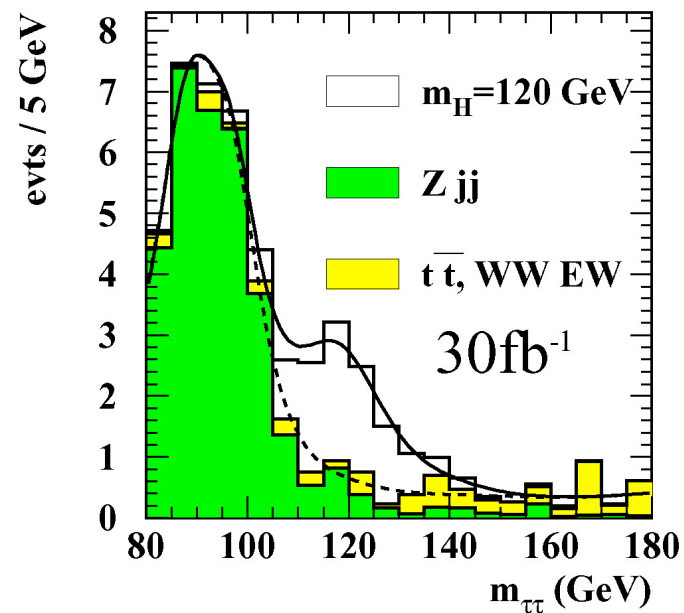
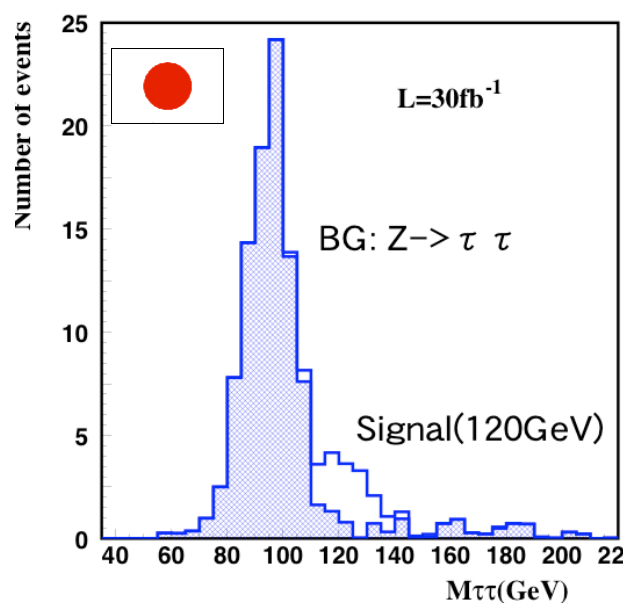
どっちかの τ が
 Leptonic decay

(35%)

\rightarrow Trigger

$$\tau^+ \tau^- \rightarrow h \nu_\tau \ell \nu_\tau \nu_\ell$$

$$\tau^+ \tau^- \rightarrow \ell \ell 4 \nu$$



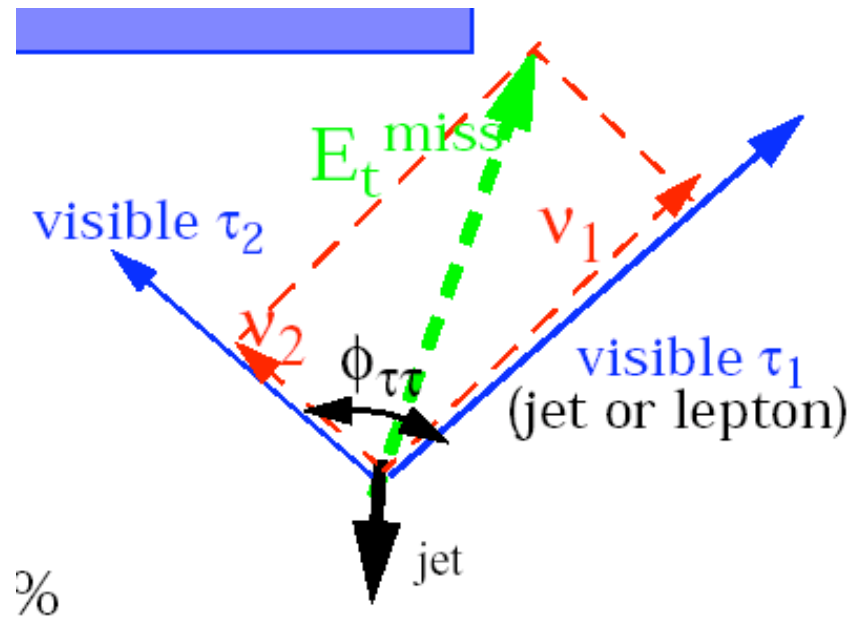
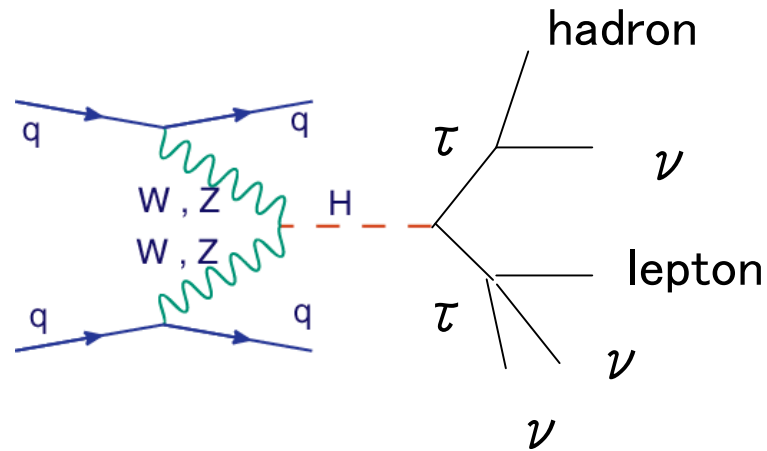
再構成可能 peakが見える
 τ が軽いので ν は visible と同じ方向に出ている。

$$x_1 P_1 + x_2 P_2 = E_{t, \text{miss}}$$

$E_{t, \text{miss}}$ が測定出来れば、
 τ が再構成 \rightarrow Higgs が再構成

$E_{t, \text{miss}}$

=見えている粒子を全部
 Vector的に足したものの
 反対方向 (横成分)



DY(ドレルヤン)BGのZ(91GeV)のpeakの横にHiggs massの所にPeak:
Massの分解能力 $\sim 9\text{GeV}$ で綺麗に(?) 区別がつく。
分離を綺麗にする為に

(1) τ の再構成にmissing情報

Missing EtをCalib.する 分解能をあげる。→ つぎのページ
(Noise, Pile up THS Softな成分を救う方法)

missing \leftrightarrow ν に正しく対応

→ Tailの形に深刻な影響、SUSYにも極めて大切

この形の実験的な評価方法の確立

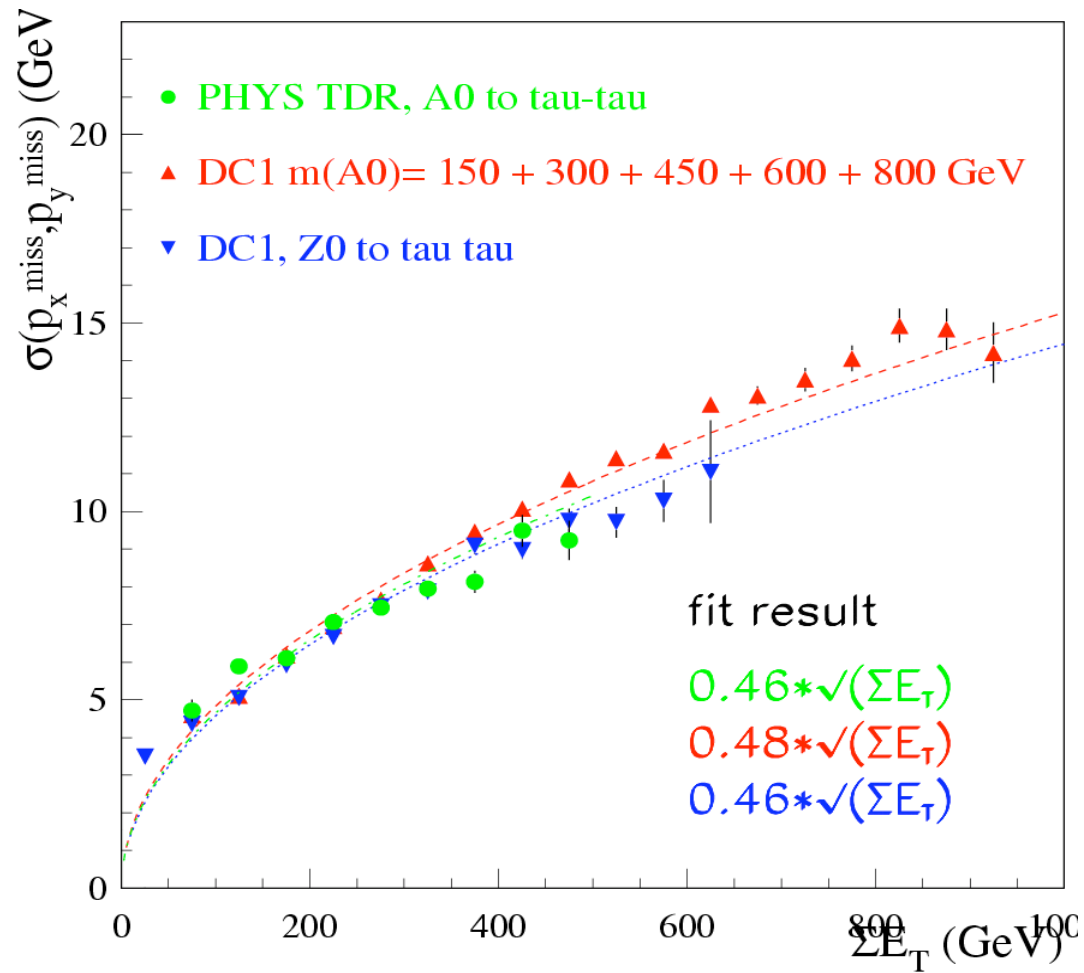
(2) DY BGの評価 ($ee, \mu\mu$) を使ってNormalizationを決める。問題は
Total Hadronic activityの評価(→ これがMiss Etの分解能 $1/\text{SQRT}(E_{\text{sum}})$)
実験的に(おそらくMCの手伝いをうけながら)
Total hadronic activity → missing Et の精度 → DY BGのtail の評価
→ 3rd Jetの有無 (rapidity GAP)

(3) Forward jet2本の正しいTag VBF の特徴
tag efficiency の向上 → Nsignal の増強
CPを測定できる。(ISR再構成?)

Missing Etの評価

基本的に全てのカロリメータがwell calibratedでないといけない。

Resolutionの確認は ...



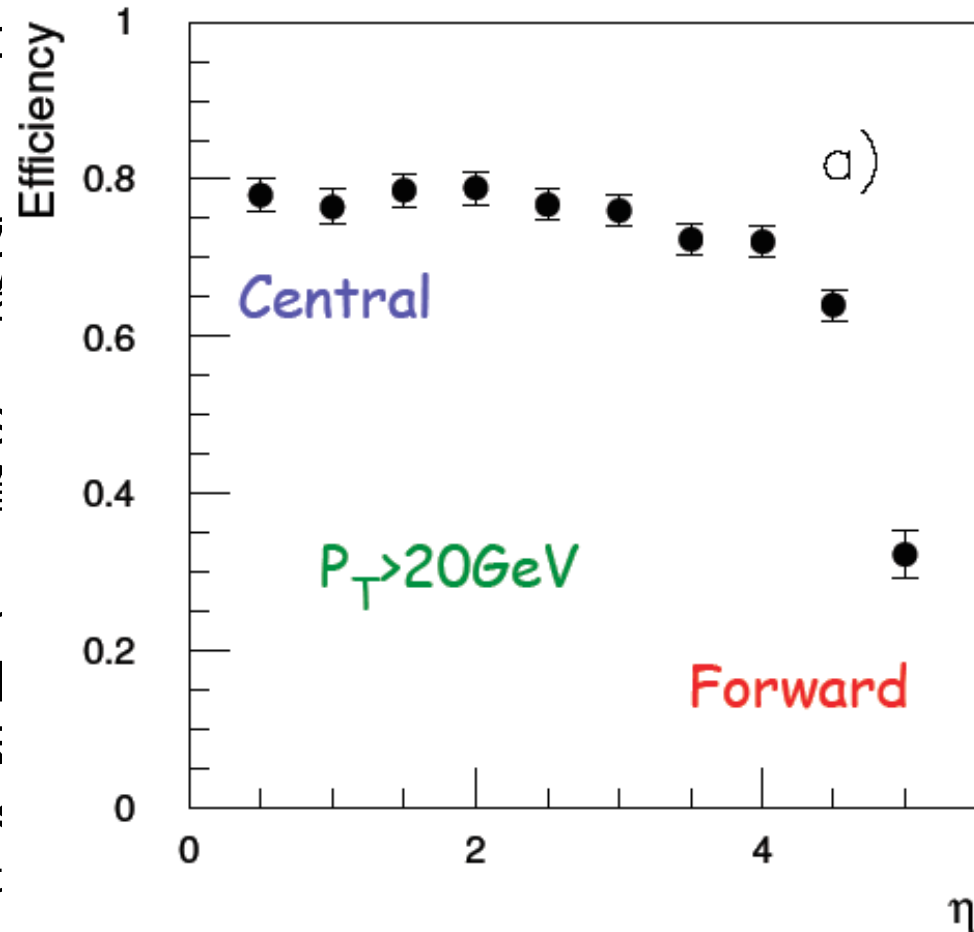
・Backgroundとsignalの形が違う。
 DY(ドレルヤン)BGのZ(91GeV)のpeakの横
 Massの分解能力 $\sim 9\text{GeV}$ で綺麗に

(1) τ の再構成にmissing情報

Missing EtをCalib.する 分解能を
 (Noise, Pile up THS Softな成分を
 missing $\leftrightarrow \nu$ に正しく対応
 \rightarrow Tailの形に深刻な影響、S
 この形の実験的な評価方法の確

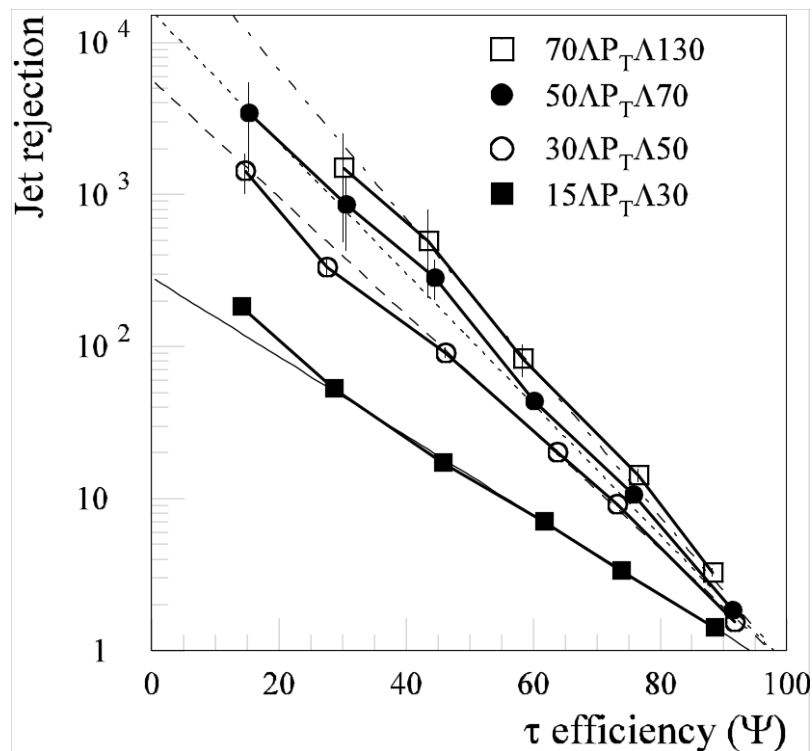
(2) DY BGの評価 ($ee, \mu\mu$) を使
 Total Hadronic activityの評価
 実験的に(おそらくMCの手伝
 Total hadronic activity \rightarrow mis
 \rightarrow 3rd Jetの有無 (rapidity

(3) Forward jet2本の正しいTag VBF の特徴
 tag efficiency の向上 \rightarrow Nsignal の増強
 CPを測定できる。(ISR再構成?)



(4) Hadronへ行った τ のID ($Pt > 30\text{GeV}$)

1. τ は、シャープ $R < 0.1$ のほとんどのE
2. $E_T^{12} < 0.1 E_T$ (EM/hadronic calorimeters)のうち $0.1 < DR < 0.2$ の領域ないにいる割合 (Isolation)
3. N_{tr} Track数が 1 か 3 $Pt > 2\text{GeV}$

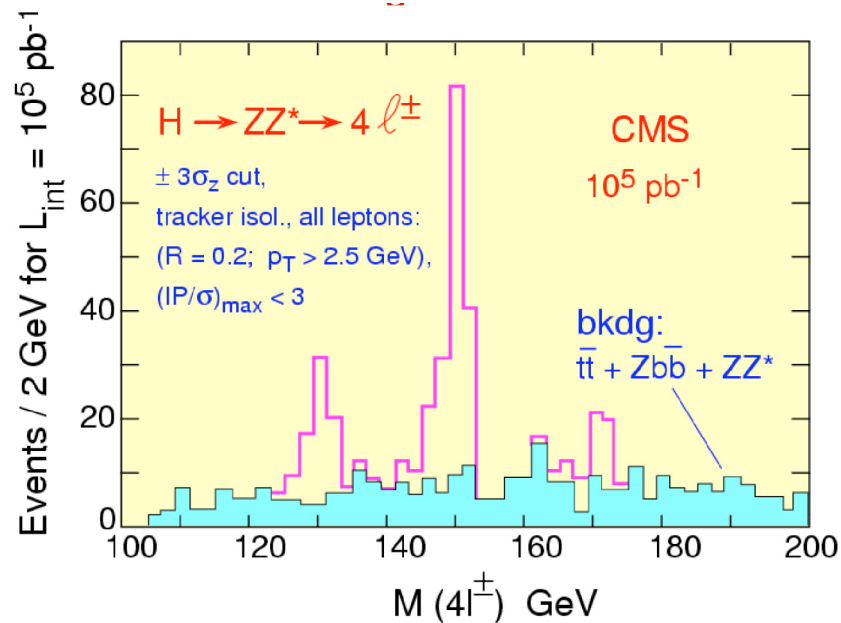


$\varepsilon = 50\%$ でRejection factor
100以上になる。
Soft τ に対しては ($Pt < 30\text{GeV}$)
約20 rejection

- (1) Low Pt の τ の向上が
Key
- (2) 普通のjetでない
EM+Trackerだけ

筑波の中村君挑戦

3-3 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$



$M_H = 130, 150, 170 \text{ GeV}$

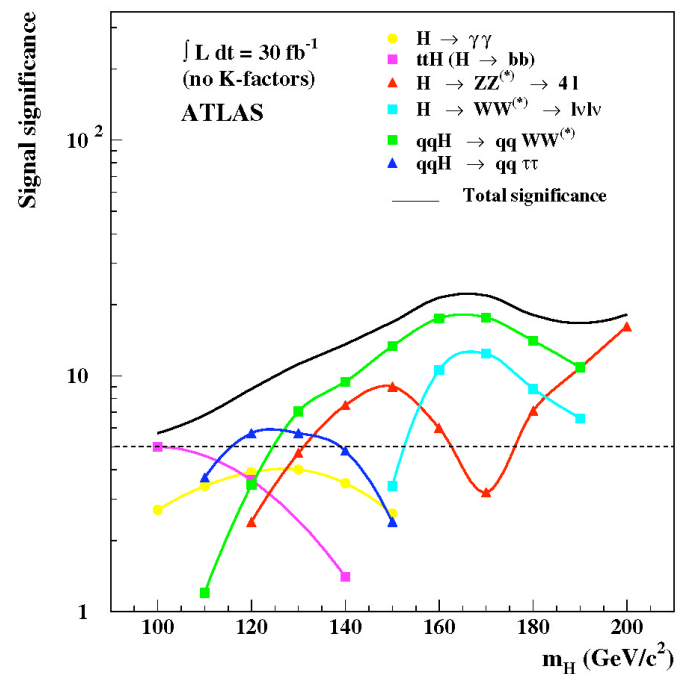
170 GeVの付近は

$H \rightarrow WW$ がほぼ100%綺麗な信号が観測

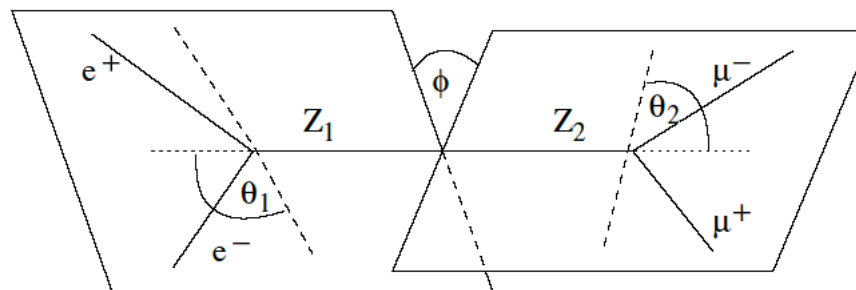
140 GeVより重い場合の

First Discovery channel

Lepton再構成グループが
しのぎあい:



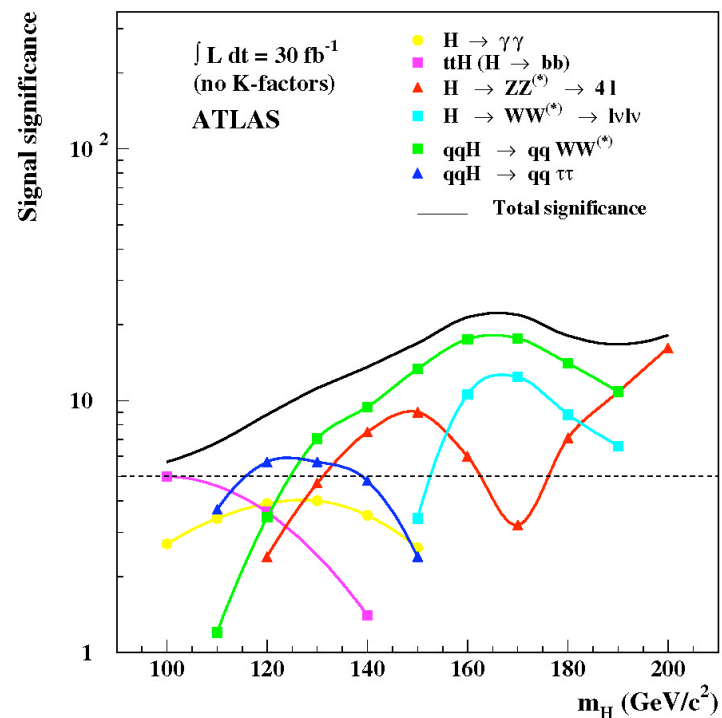
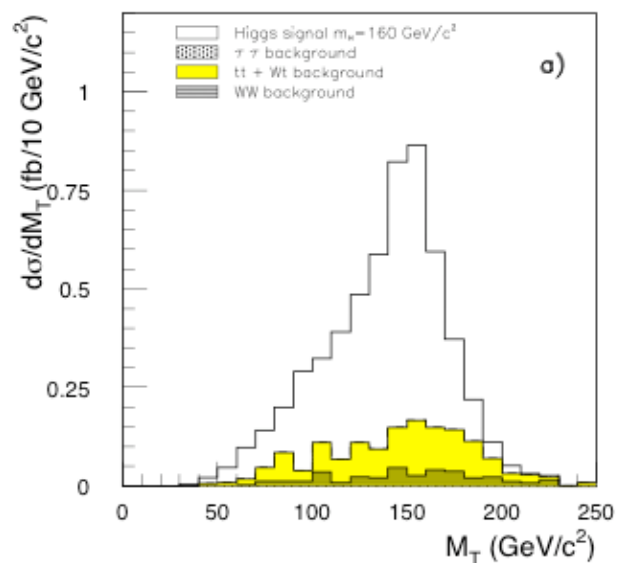
$M > 200 \text{ GeV}$ だとspin,
CPの直接測定が可能



3-4 VBF H→WWのM_T分布 $M_T^2 = 2P_T P_{..LL} (1 - \cos \phi)$

$$W^+W^- \rightarrow l\nu l\nu$$

M_H=160GeV



WWは、peak を作らない。やこびあん
 (形は似ているが、数はfactor 5以上)
 Spin相関でBGと区別できる。

3-5 結合定数の測定

Discovery channel以外も出来る限り測定

Gz:Gw:Yt:Yb:Ytauが本当にSMと一致するか？

質量の起源か？ EconomicalにGauge とFermionが共通か？

Decay modes

敗色濃厚なチャンネルもありますが、落下傘は落としてあります

Production modes

	bb	$\tau\tau$	$\gamma\gamma$	WW	ZZ
gg → H	×	×	Discovery Mass 間接的Yt	×	140GeV以上 なら発見mass
VBF	● ? (Y _b)	● Discovery Y _τ Gw	? (Discovery)	130GeV以上 なら発見 Gw ²	140GeV以上 なら発見mass
ttH	● Y _t Y _b	● Y _t Y _τ (L=600)	-----	● -----	-----
WH	×	×	-----	-----	-----

3-5 結合定数の測定の課題

Decay modes

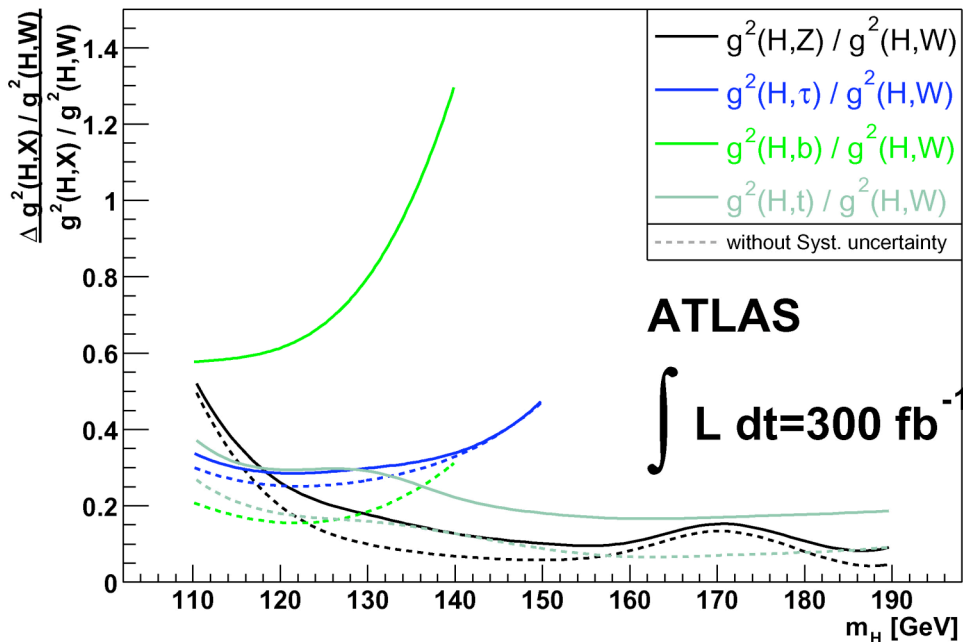
	bb	$\tau\tau$	$\gamma\gamma$	WW	ZZ
gg \rightarrow H	×	×	Discovery Mass 間接的 Y_t	×	140GeV以上 なら発見mass
VBF	? (Y_b)	Discovery $Y_\tau Gw$? (Discovery)	130GeV以上 なら発見 Gw^2	140GeV以上 なら発見mass
ttH	$Y_t Y_b$	$Y_t Y_\tau$ (L=600)	-----	-----	-----
WH	×	×	-----	-----	-----

Production modes

Fake Leptonの評価

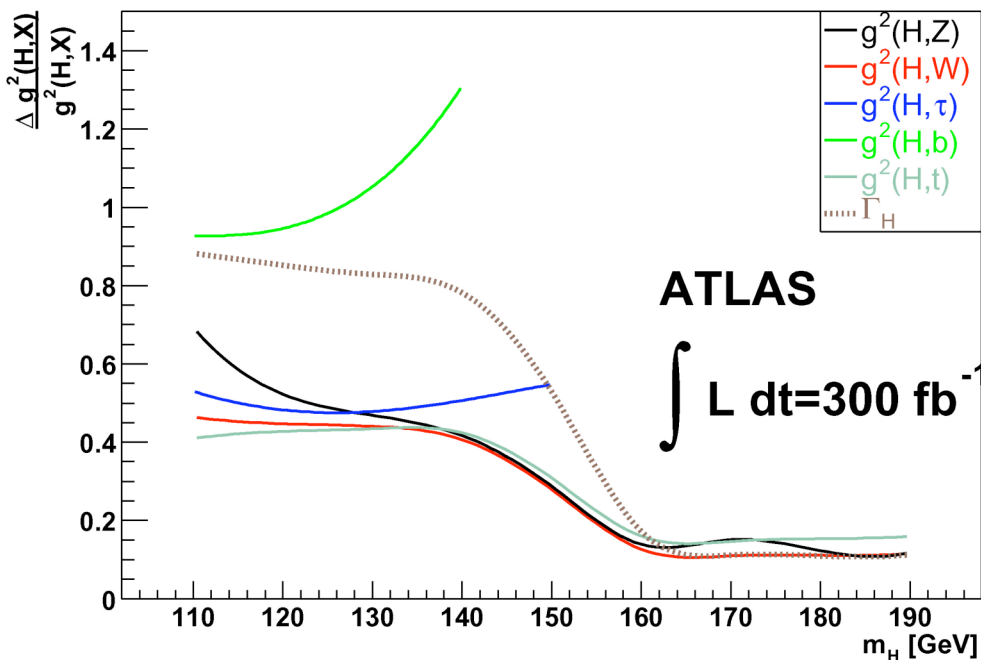
4b: btag の向上とloose B-tagの利用

4つのBのうち、HiggsからのBを見つける方法



結合定数の比の測定精度 (HWW規格化)

- ・ Y_t, Y_τ は10-15%程度
- ・ Y_b は30-40%程度
(VBF bb必要)
- ・ G_z は、5-10%程度で測定可能

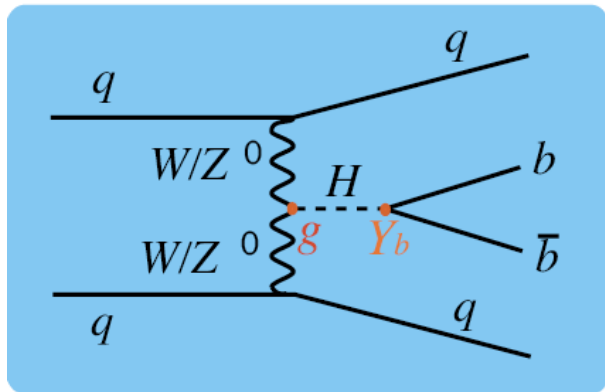


結合定数の絶対測定の精度

$Y_t, Y_\tau, g_{ZZH}, g_{WWH}$
は、20%程度の精度で
決まる。

y_b は50%近い
($m_H=115-140\text{GeV}$)

Y_b が決まらない！！



4jet終状態 QCD BG大きい Trigger!

Triggerへの挑戦 (次のページ)
 特に soft muonを使ったB-jet trigger?
 (Muon triggerを作ったので
 アドバンテージ)

新しい試み：

WHjj (上の図にWを加えて)

Trigger pass、BGもsuppress出来る。

一> 現在 fast 解析を始めたところ

signal $\sigma * Br = 10\text{fb}$

BG Wjjbb ($g^* \rightarrow bb$) (ME 4jetも、現実的に生成可能な社会になった。終状態6つも生成している)

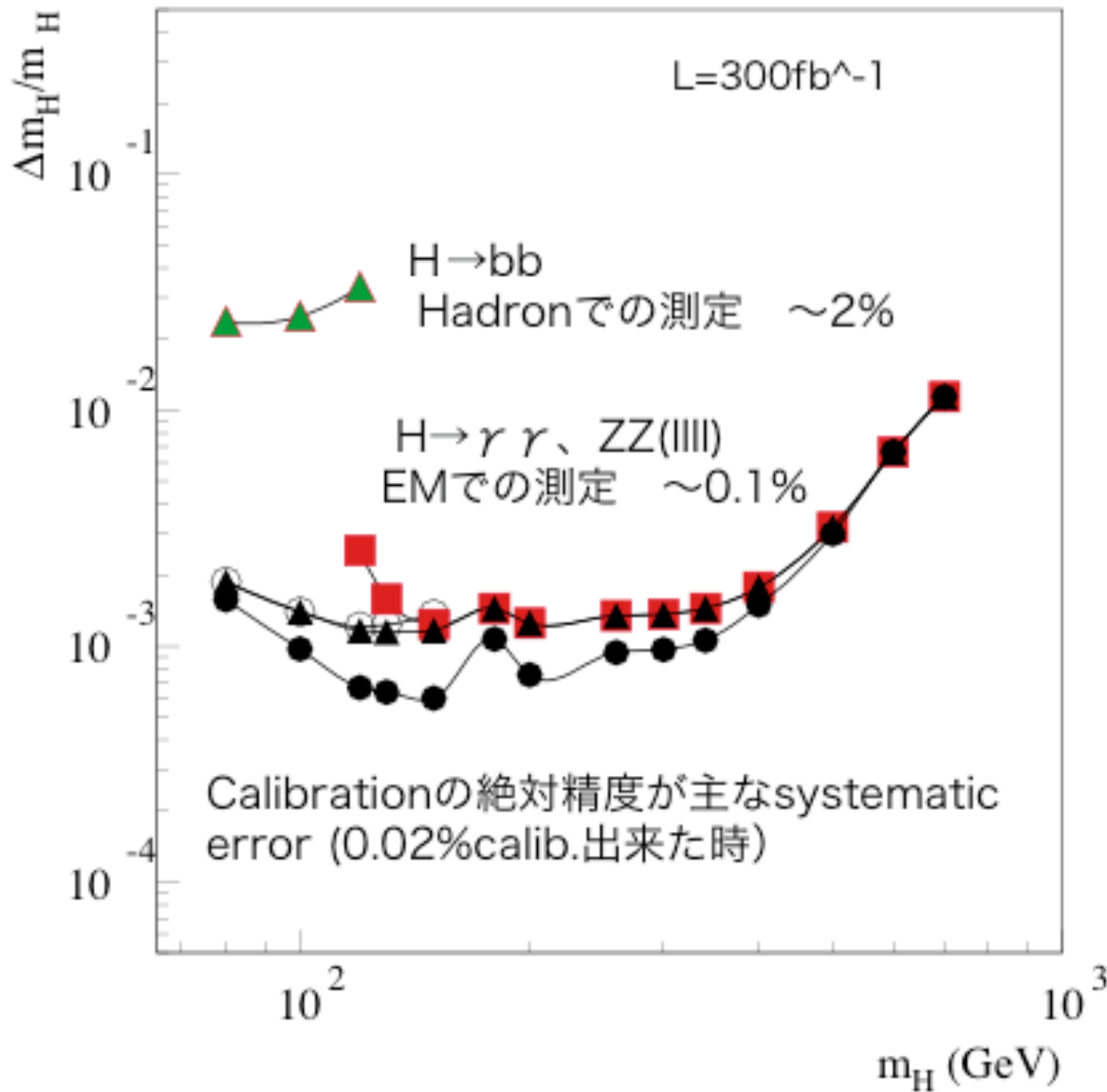
ATLAS Level-1 Trigger (KHz)

Selection	High-p_T Thresholds	$2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
MU20	(20)	0.8	4.0
2MU6		0.2	1.0
EM25I	(30)	12.0	22.0
2EM15I	(20)	4.0	5.0
J200	(290)	0.2	0.2
3J90	(130)	0.2	0.2
4J65	(90)	0.2	0.2
J60 + xE60	(100+100)	0.4	0.5
TAU25 + xE30	(60+60)	2.0	1.0
MU10 + EM15I		0.1	0.4
Others (pre-scales, calibration, ?)		5.0	5.0
Total		~ 25	~ 40

ATLAS High Level Trigger (Hz)

Selection	$2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	Rates (Hz)
Electron	e25i, 2e15i	~40
Photon	γ 60i, 2 γ 20i	~40
Muon	μ 20i, 2 μ 10	~40
Jets	j400, 3j165, 4j110	~25
Jet & E_T^{miss}	j70 + xE70	~20
tau & E_T^{miss}	τ 35 + xE45	~5
b-physics	2 μ 6 with $m_B/m_{J/\psi}$	~10
Others	pre-scales, calibration,	~20
Total		~200

質量の測定精度



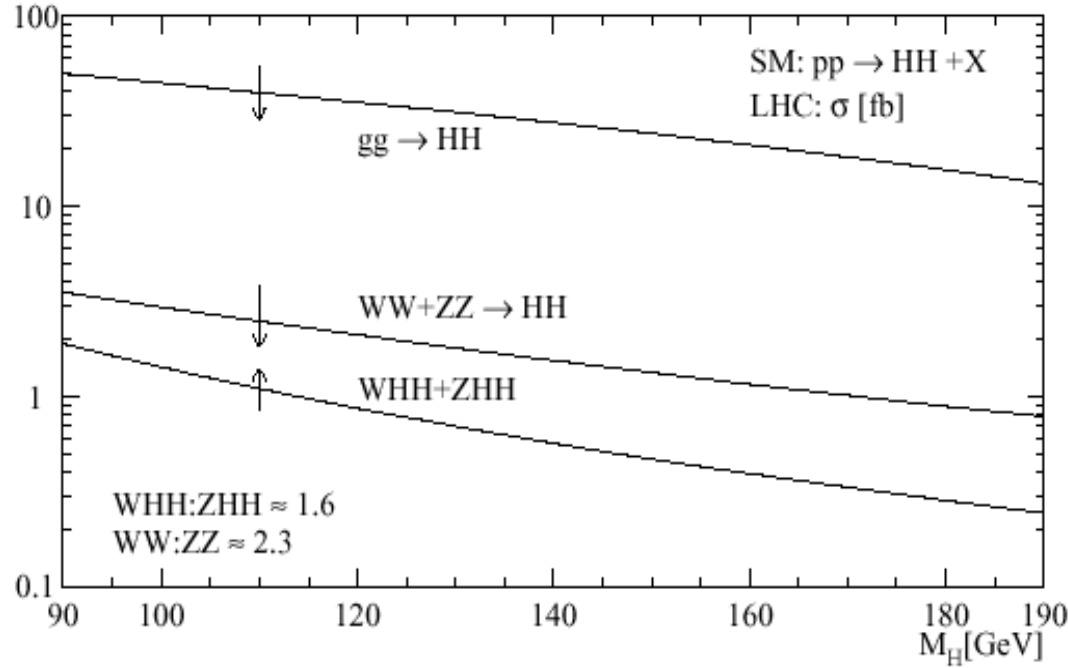
- 測定精度0.1%
Calib 絶対精度 が主な誤差.

Higgsのmass $\sqrt{2\lambda v}$

4次の係数で
外側の壁の傾き

Higgs Self-couplings

$$\lambda_{HHH}^{SM} = 3 \frac{m_H^2}{v}, \quad \lambda_{HHHH}^{SM} = 3 \frac{m_H^2}{v^2}$$



$\sigma \times \text{Br}$ が小さい
High Luminosityが
必要
—>SLHC

For 6000 fb^{-1} (SLHC)

$\Delta\lambda \sim 19\%$ for $170 \text{ GeV } M_H$

$$gg \rightarrow HH \rightarrow W^+W^- W^+W^- \rightarrow \ell^\pm \nu jj \ell^\pm \nu jj$$

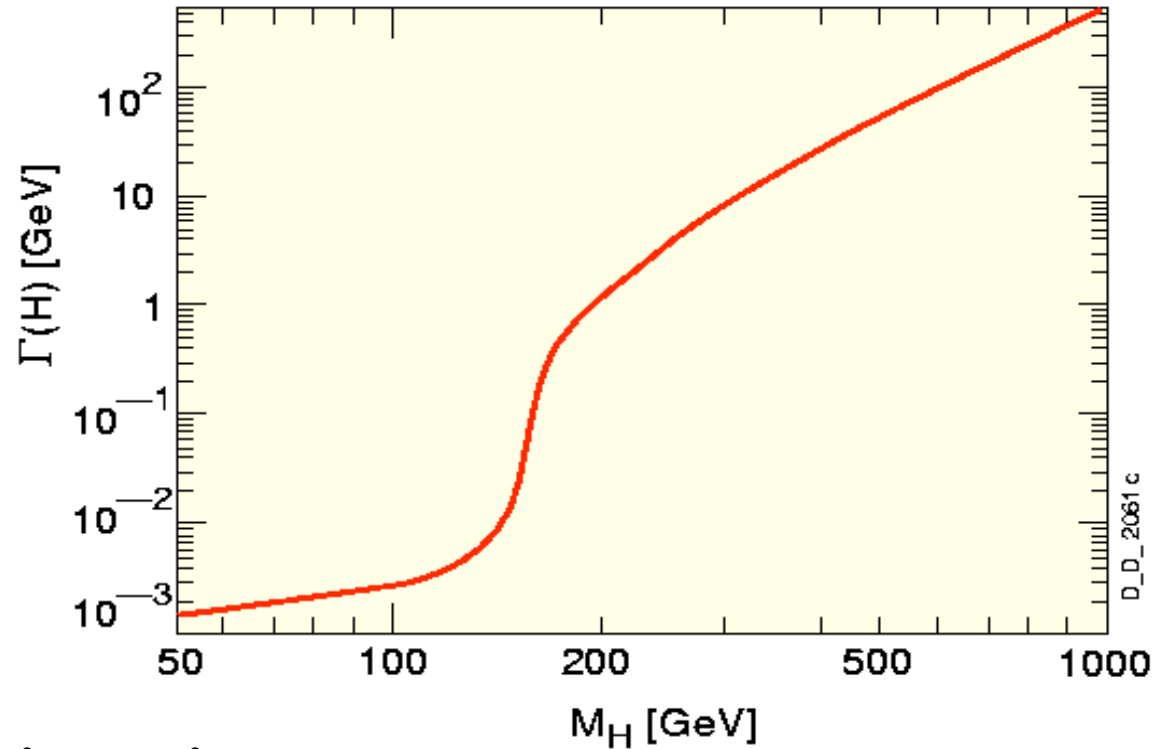
Table 8: Expected numbers of signal and background events after all cuts for the $gg \rightarrow HH \rightarrow 4W \rightarrow \ell^+ \ell'^+ 4j$ final state, for $\int \mathcal{L} = 6000 \text{ fb}^{-1}$.

m_H	Signal	$t\bar{t}$	$W^\pm Z$	$W^\pm W^+ W^-$	$t\bar{t} W^\pm$	$t\bar{t} t\bar{t}$	S/\sqrt{B}
170 GeV	350	90	60	2400	1600	30	5.4
200 GeV	220	90	60	1500	1600	30	3.8

$$WWH = \frac{e}{\sin\theta} m_W$$

$$ZZH = \frac{e}{\sin\theta \cos\vartheta} m_Z$$

$$f\bar{f}H = \frac{\sqrt{2}m_f}{v}$$



$$\Gamma(H \rightarrow f\bar{f}) = N_f \frac{G_F m_H m_f^2}{4\sqrt{2}\pi} \left(1 - \frac{4m_f^2}{m_H^2}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\Gamma(H \rightarrow WW) = \frac{G_F m_H^3}{8\sqrt{2}\pi} \left(1 - \frac{4m_W^2}{m_H^2}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\Gamma(H \rightarrow ZZ) \approx \frac{1}{2} \Gamma(H \rightarrow WW)$$

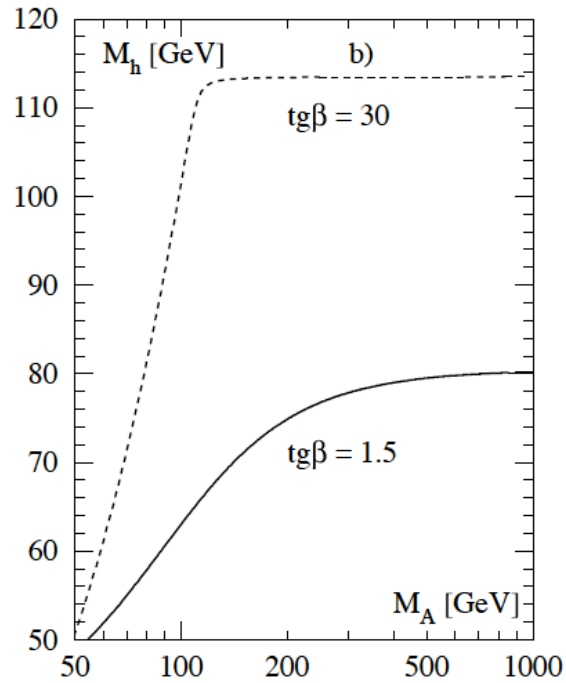
2body phase space

$$\int \frac{1}{2m_H} \sum_{spin,color} |M|^2 dLIPS$$

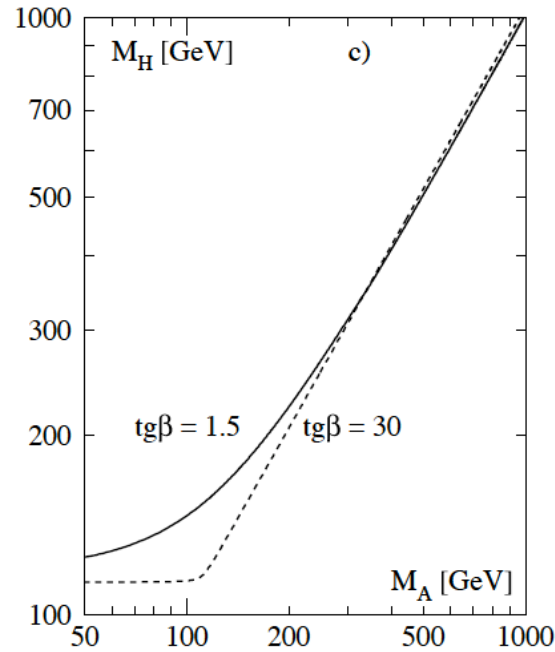
$$dLIPS = (2\pi)^4 \delta^4(q - p_1 - p_2) \frac{d^3 p_1}{(2\pi)^3 2E_1} \frac{d^3 p_2}{(2\pi)^3 2E_2}$$

4 : MSSM Higgs

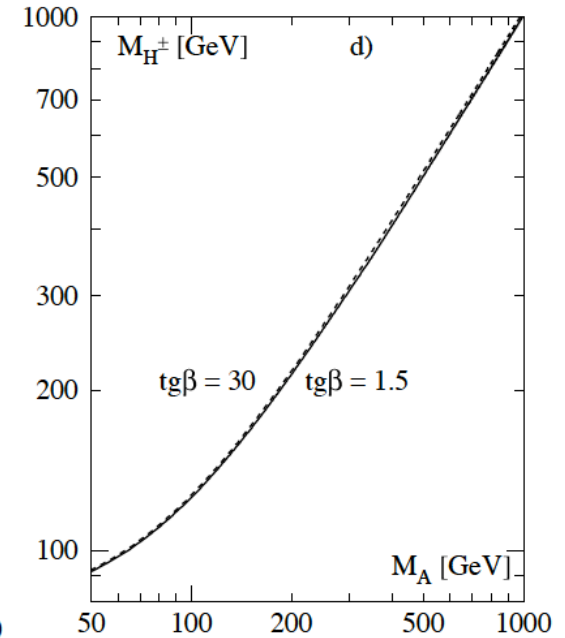
- ・ h, H^0, A^0, H^{\pm} の4種類
- ・Tree levelで $\tan \beta$ と M_A の2 parameterで記述



軽い、SMに似ている性質

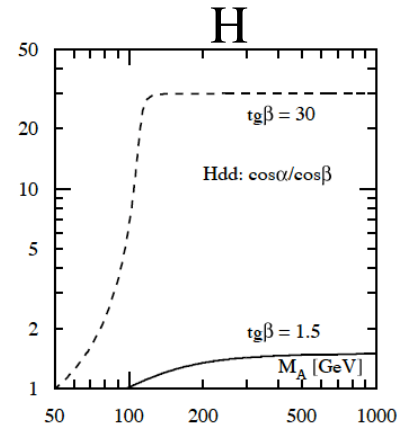
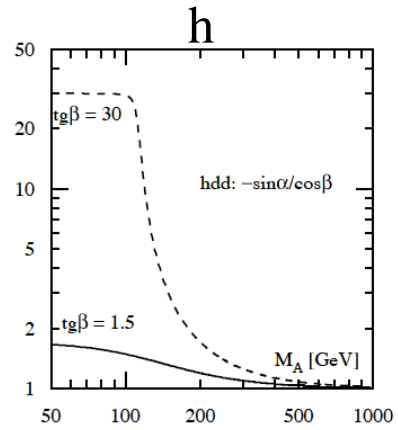


H, A は縮退

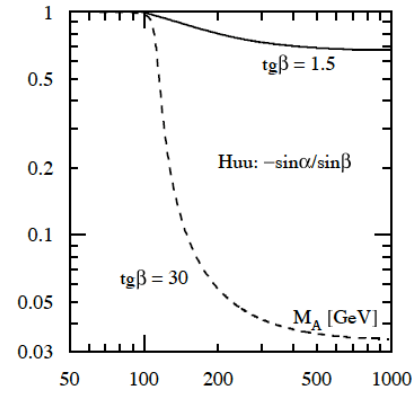
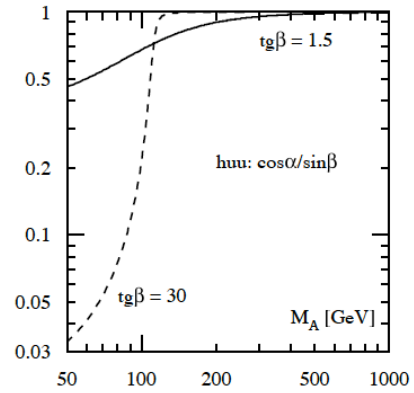


$$H^{\pm} = \text{SQRT}(H^2 + M_W^2)$$

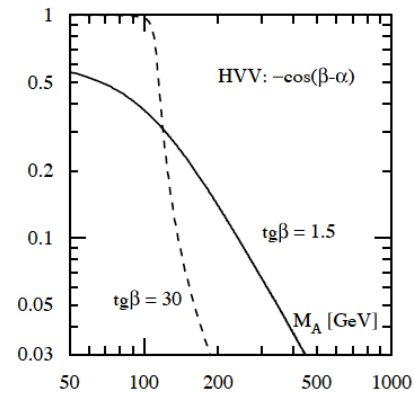
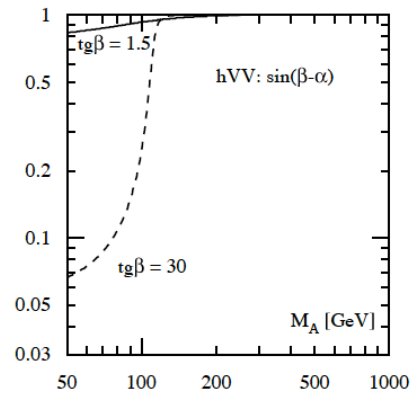
d



u

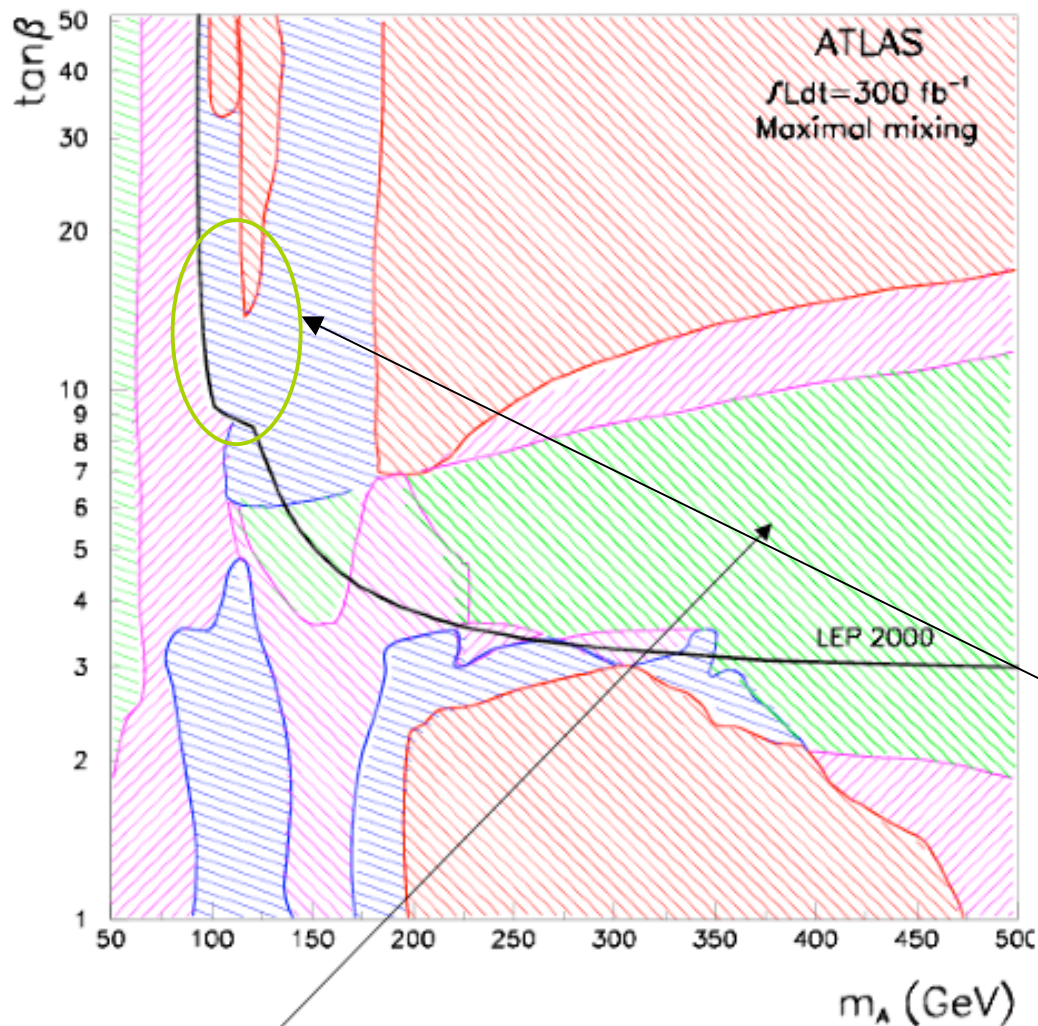


V



Aが大きい
hはSMと同じ

MSSM Higgsの発見能力



軽いhはSM解析、
ほぼそのまま

・ $\tan \beta$ が大きいと bbH/A の結合が大きくなる。
 $H/A \rightarrow \tau \tau \cdot \mu \mu \cdot bb$
 ・ $\tan \beta > 10$ で $gb \rightarrow tH^-$ で charged Higgs が観測可能

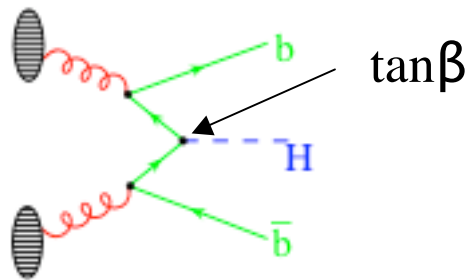
→ MSSM Higgsも必ず
 $L=30fb^{-1}$ のrunで発見可能

ここら辺以外は1年でOK
 ($t \rightarrow H^+ b$ がcover)

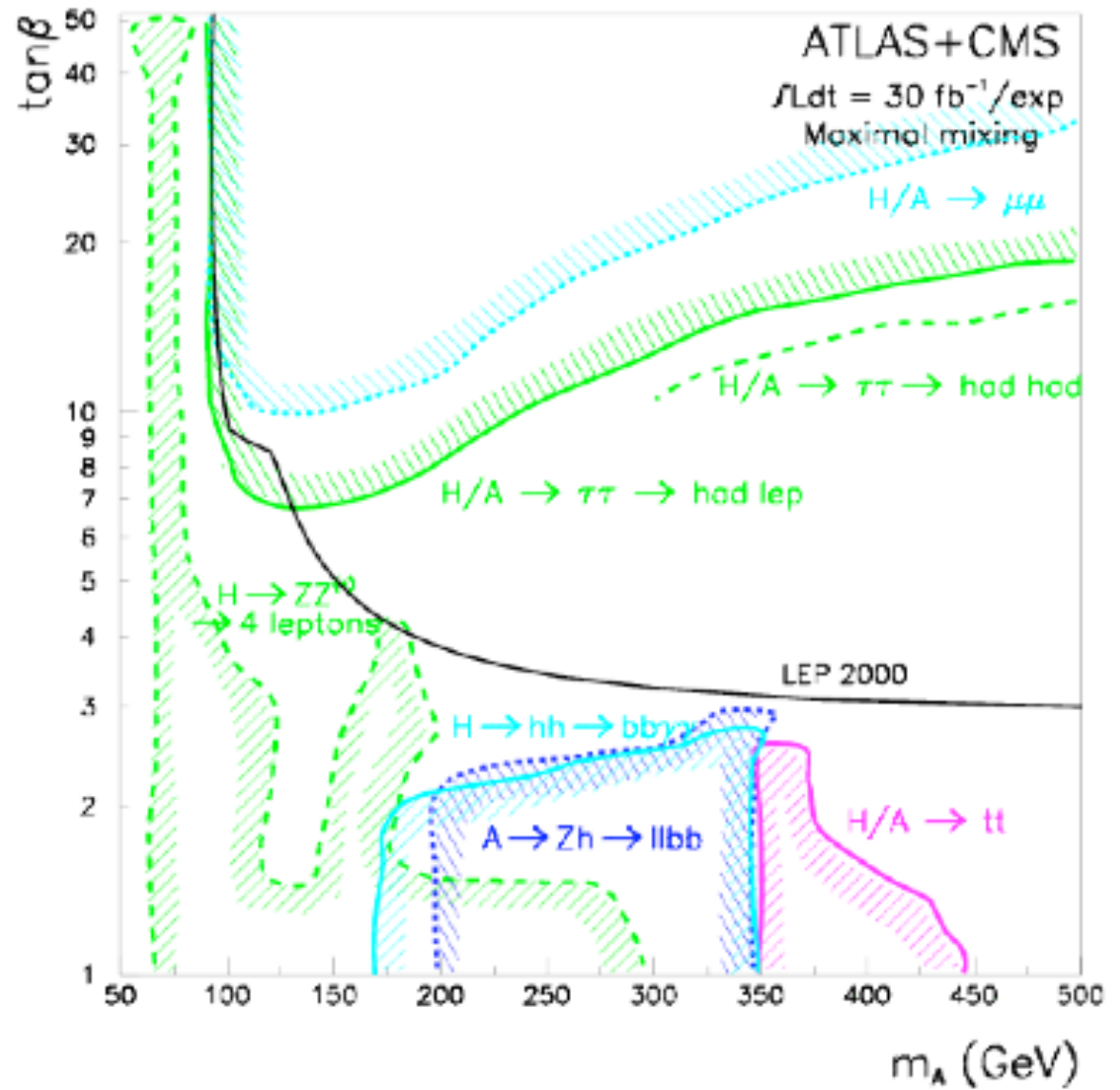
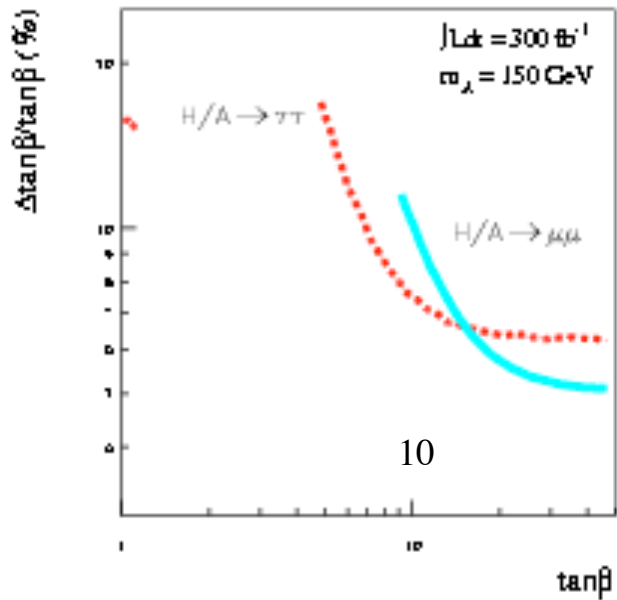
- 4 Higgs observable
- 3 Higgs observable
- 2 Higgs observable
- 1 Higgs observable

この緑の部分は、 H_{SM} に似た性質のhが観測されるだけ。

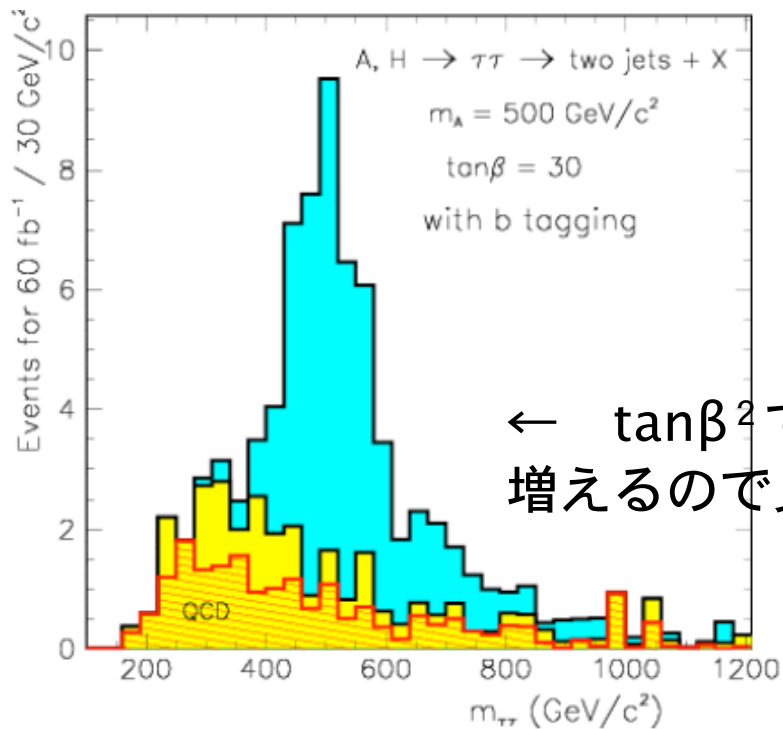
H/A生成



$gg \rightarrow bbH/A \rightarrow \tau\tau, \mu\mu, bb$



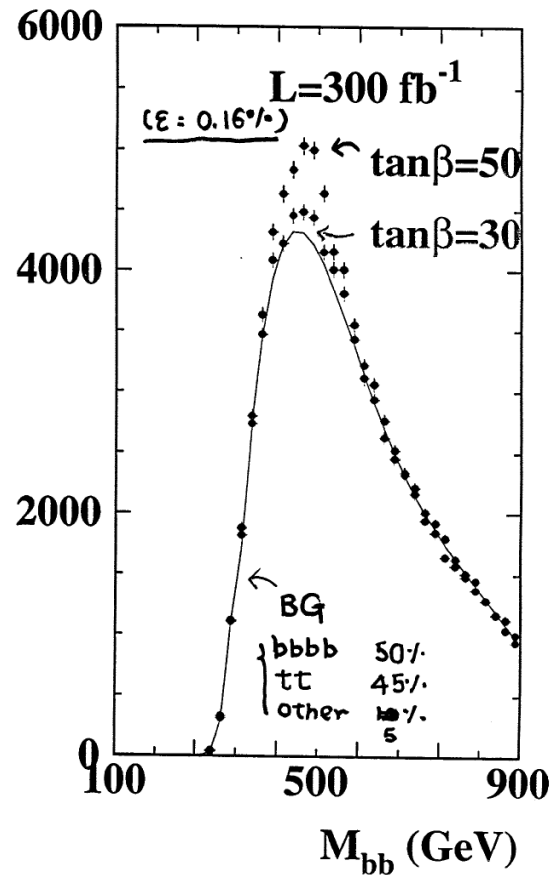
tan betaを測定する重要なチャネル
軽いhがLEP見えない->大きなtan beta



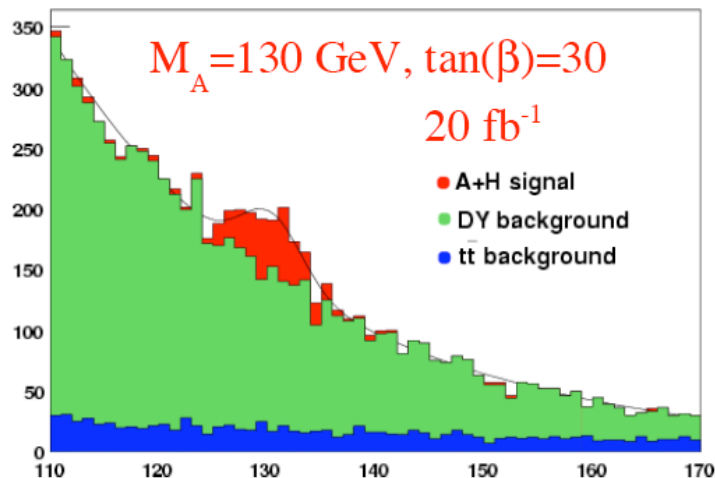
← $\tan\beta^2$ で数が増えるので見える

B-tag
Tau-tag
の改良

bb(H/A) mH=500GeV



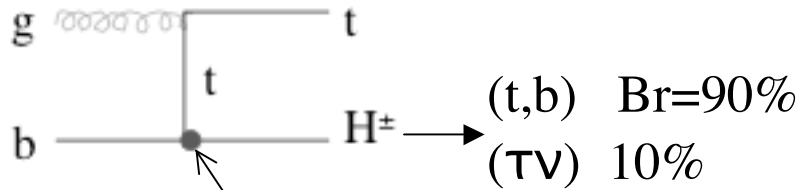
4 bも可能?
L2がまだ



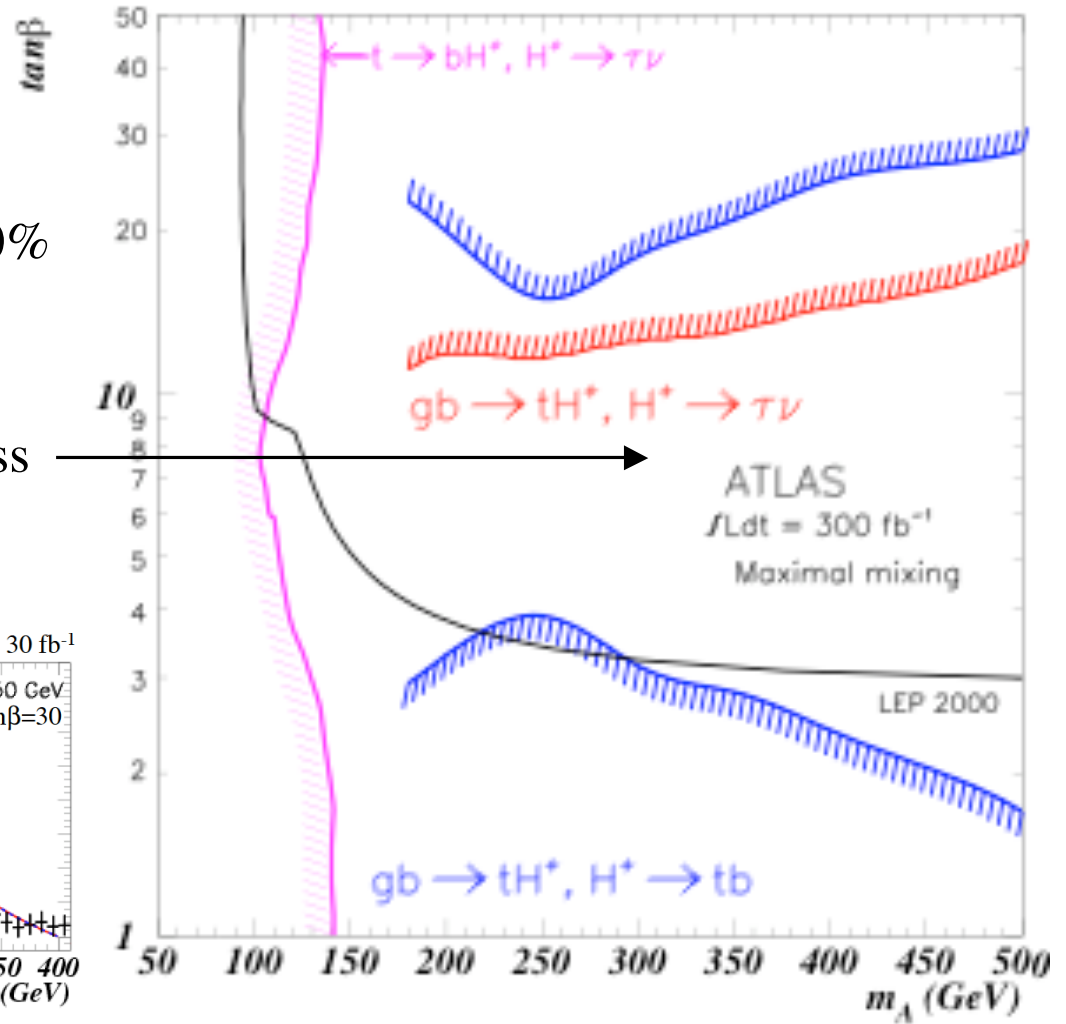
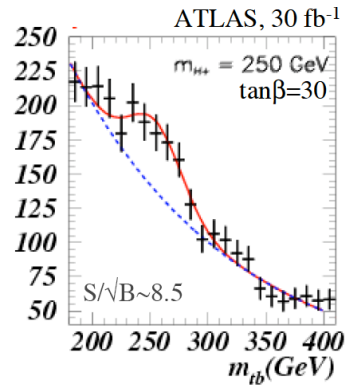
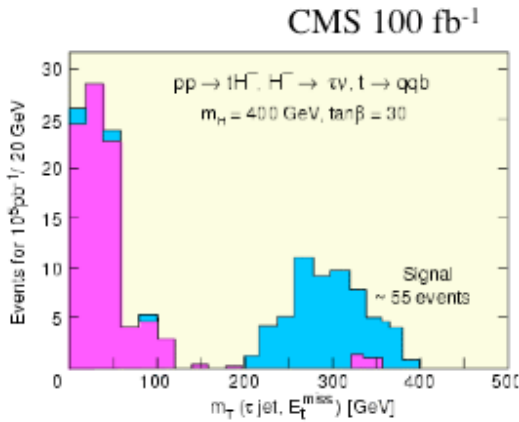
← μ のyukawa* $\tan\beta$
分解能が高いので。
第2世代のYukawaを見るチャンス



H^{+-}



$\tan\beta \approx \sqrt{m_t / m_b}$ の時 suppress



$H/A/H^{\pm} \rightarrow$ SUSY粒子への崩壊

(ATLAS) 解析していない

(CMS) SUSY何点かについての研究

系統たってSUSYとHIGGSを合わせて
研究していない。

6. まとめ

急ぎ足で、簡単な現状のまとめと今からの研究課題の提案をしました。

- (1) V B F $\tau\tau$ の研究 (Full tau, Metは S U S Y にも応用)
- (2) V B F $\gamma\gamma$ の研究 gammaの研究 Fake, conv. (Full)
- (3) 湯川の研究 (一部 Fast 一部はTrigger
一部Full で fake lepton, b-tag (SUSY))
- (4) M S S M Higgsと S U S Y (Fast)
b-jetのenergy flow (Full)

研究したい課題がありましたら、ご相談ください。

Jetのcalibrationについて

- Beam testの結果で約5-10%の精度
- $\tau \rightarrow h \nu$ $E/p=1$ (bias < 0.8% π^0 の混入)
E=20-250GeVの領域
320kevent/10fb⁻¹
- $tt \rightarrow bbWW$ の $W \rightarrow jj$ を使う。一年で45k
E<200GeVまで。高いと1本に見える。
- Zj Zとjetのバランスでhigh Ptの領域

=> 1%の精度が可能 (H1 style)

