

Higgs

@ LHC

2001. 4. 14

ROR 神前 弘一

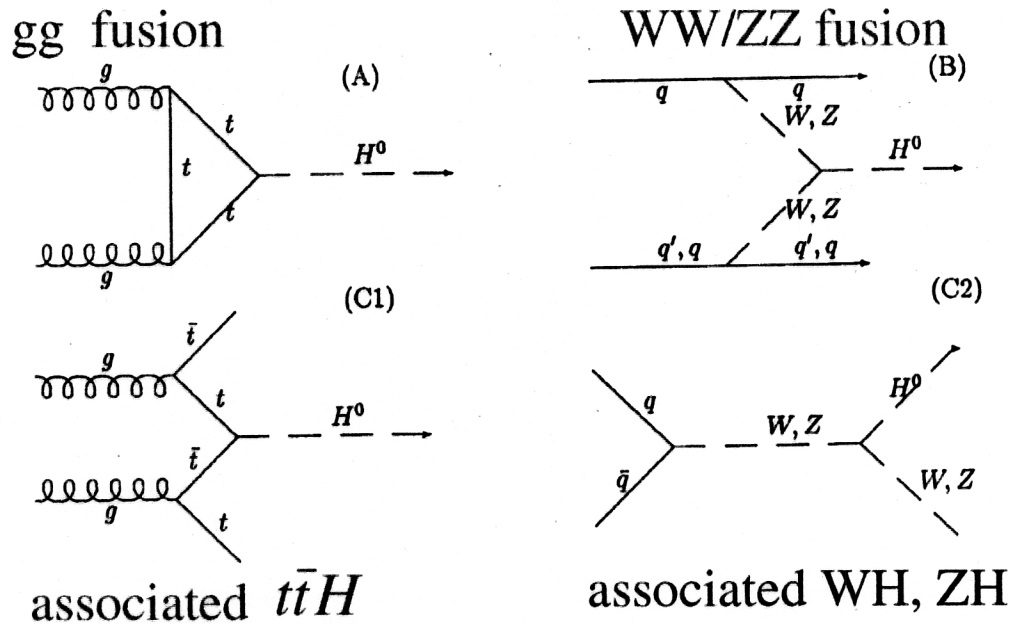
目次

- LHC と ATLAS
- LHC での Higgs の生成と崩壊
- Higgs の発見
- 各プロセスについて
- Vector boson fusion のプロセスについて
- 質量の測定
- スピンとパリティ
- 生成断面積
- 結合定数と branching ratio について
- まとめ

LHC と ATLAS 実験

- CERN に建設中の $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ の pp collider
- 2006 年からの実験開始を目指している (10fb^{-1})
- Tevatron-II での実験に続いて Higgs 粒子の発見が期待されている
- ATLAS は二つの general purpose 測定器のうちの一つ
- Low luminosity operation (10^{33})
 $10\text{fb}^{-1}/\text{year} \rightarrow 30\text{fb}^{-1}$ for 3 years
- High luminosity operation (10^{34})
 $100\text{fb}^{-1}/\text{year}$
event 数は多くなるが同時に多くの soft な background events も生成され、観測したい event に重なる
 \rightarrow 測定量の resolution が悪化する
- ハドロンコライダーの実験の特徴
レプトンコライダーに比べ
 - ビーム軸方向の保存則が使えない
 - 多くの background events のために、目的の event を効率よく trigger することが難しい
 - 初期状態が確定できない
 \rightarrow 粒子の種類、およびそのエネルギー・運動量

それぞれのプロセスの特徴



- gg fusion

断面積は大きいですが H 以外に tag できるものがないために S/N を良くするには特徴的な decay mode を使わざるを得ない ($\gamma\gamma$)

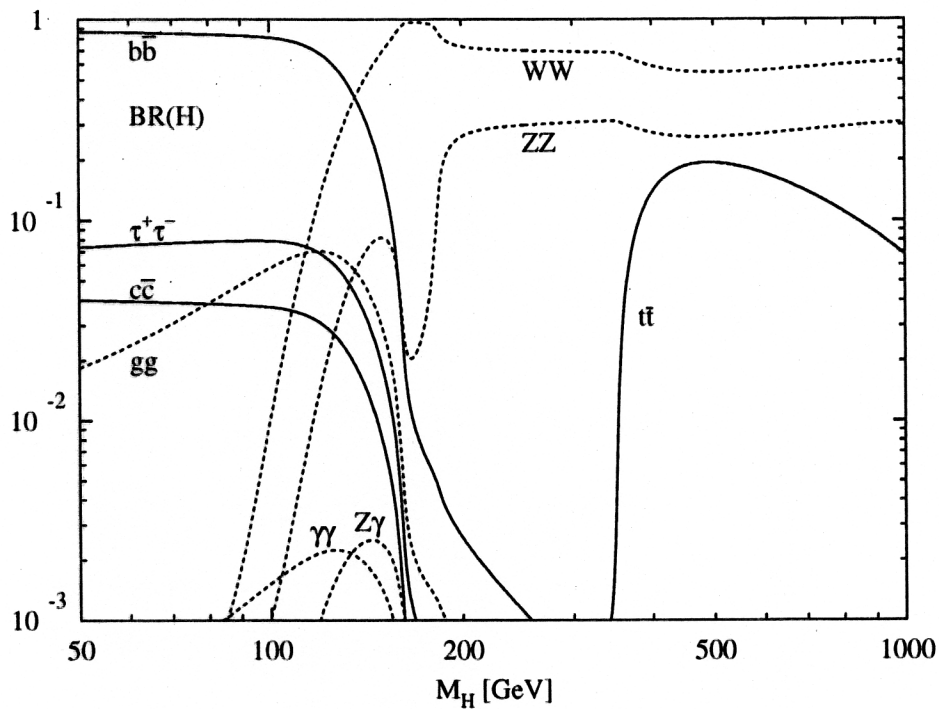
- Vector boson fusion

gg fusion について断面積が大きい。Forward \rightarrow jet を tag することができれば S/N を稼ぐことができる。

- associated productions with W/Z or tt

断面積は小さいが同時に生成される粒子を tag することで S/N を上げることが可能。

ヒッグスの崩壊

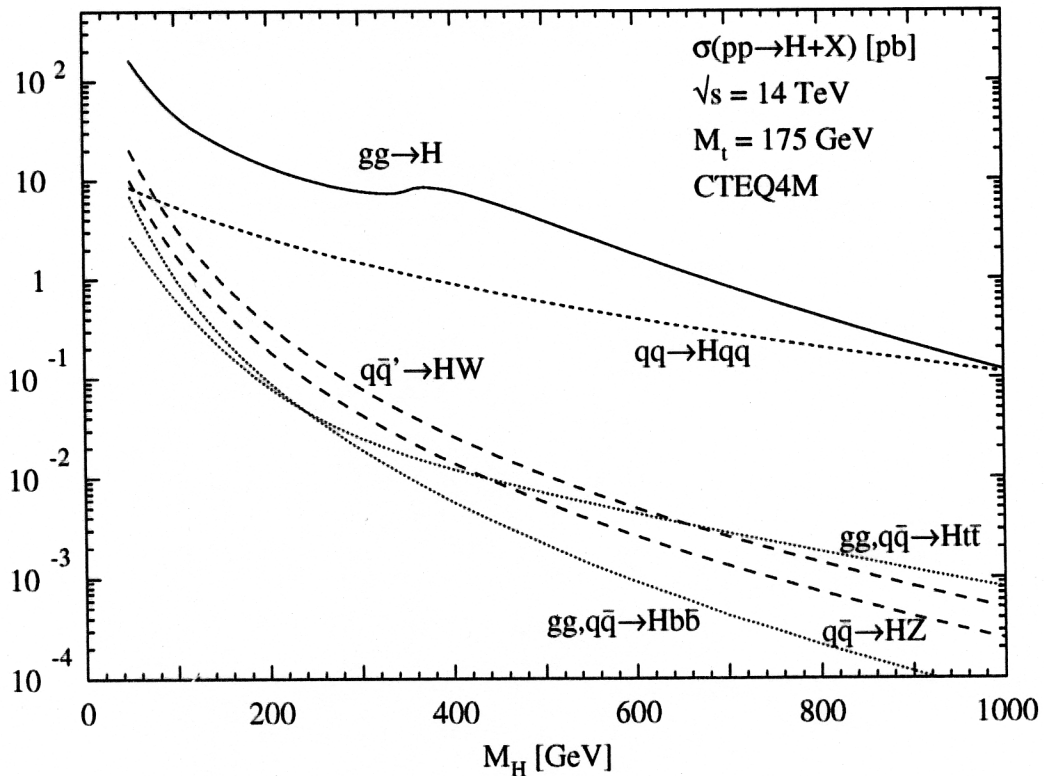


- $\gamma\gamma$
 小さい ($\sim 10^{-3}$)
 $M_H \sim 150$ GeV 程度まで
 EM calorimeter により精度の良い測定が可能
- $b\bar{b}$
 実質的に 120 GeV くらいまで
- $WW^{(*)}$
 かなり軽い方から使える (> 120 GeV)
 ~ 160 GeV 付近ではほぼ独占
- $ZZ^{(*)}$
 WW モードより小さいが $Z \rightarrow ll$ が使える

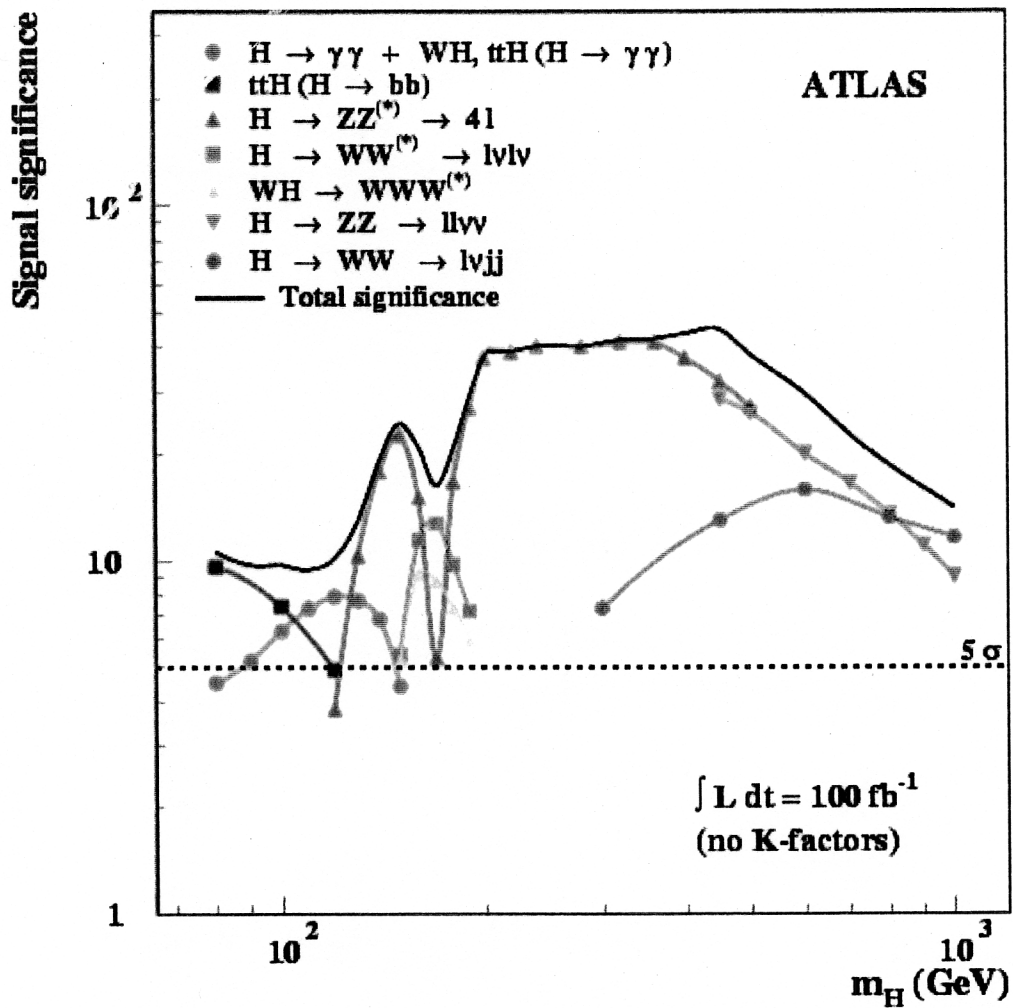
LHC でのヒッグスの生成

四つの主要な生成プロセス

- Direct production by gluon fusion
断面積大
- Vector boson fusion
- Vector boson associated production
- Heavy quark associated production
断面積小



発見モード



~ 120 GeV

$ttH (H \rightarrow bb)$

~ 140 GeV

$H \rightarrow \gamma\gamma$

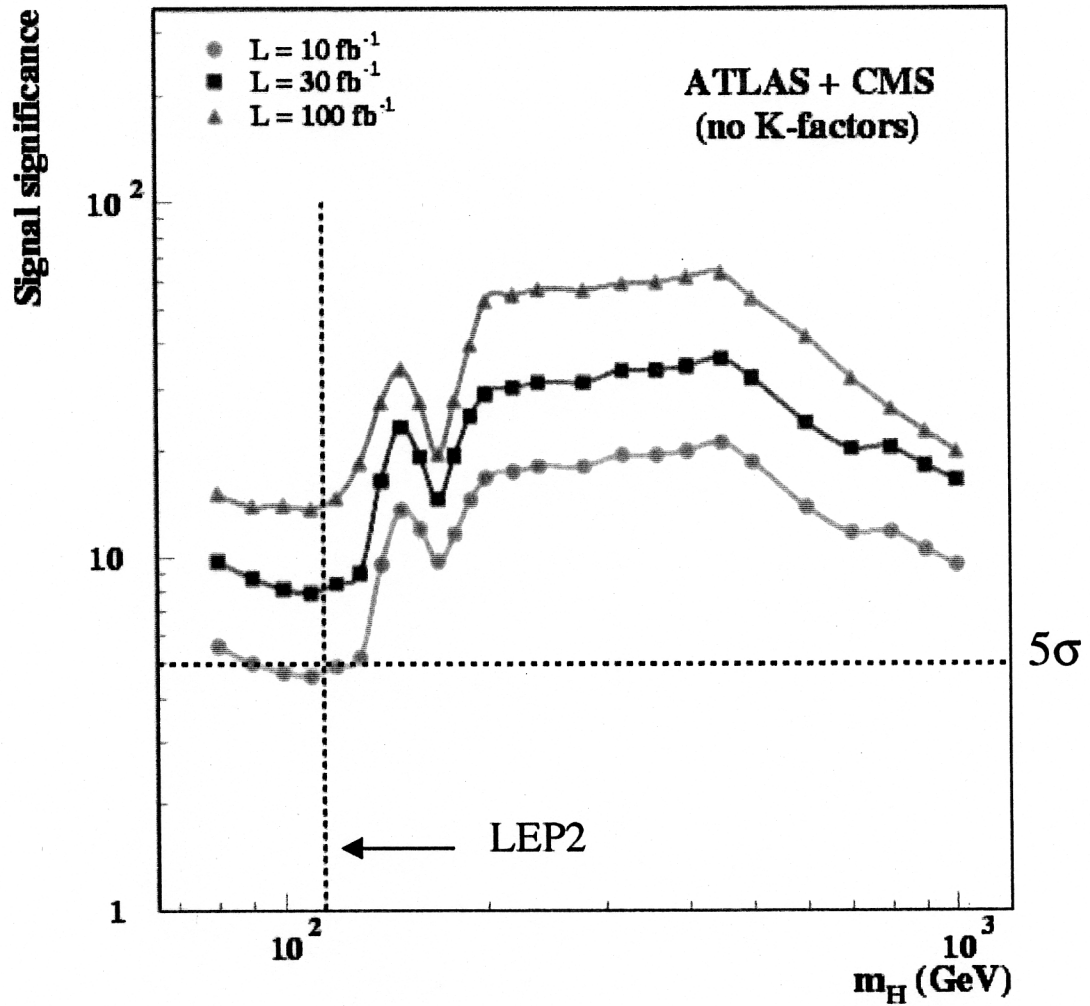
130 ~ 150, 170 ~ GeV

$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$

160 GeV 近辺

$H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$

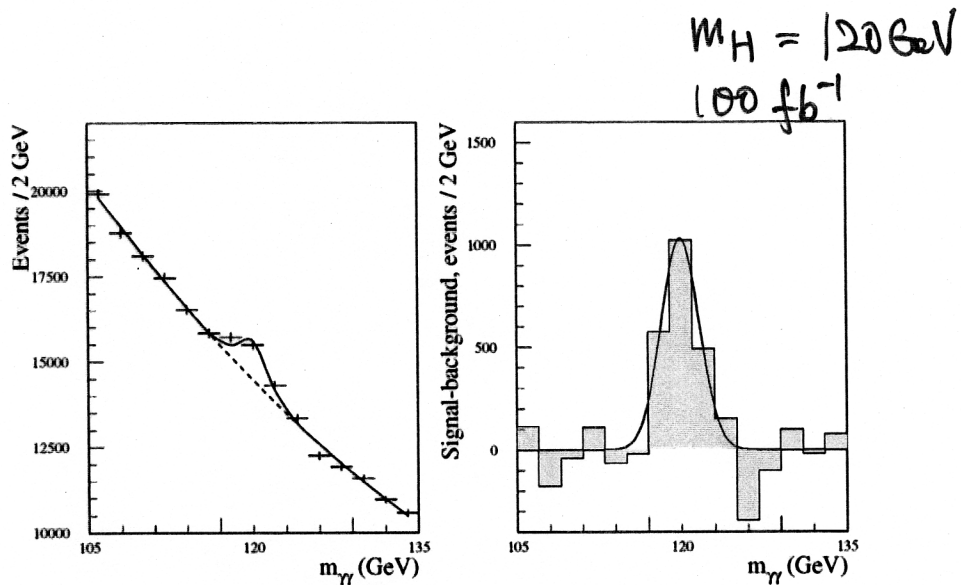
発見についてのまとめ



Low luminosity でも一年間 (10 fb^{-1}) の実験で発見可能

$$H \rightarrow \gamma \gamma$$

- $M_H \leq 150 \text{ GeV}$
- $\sigma \times \text{Br} \sim 50 \text{ fb} (\text{Br} \sim 10^{-3})$
- Backgrounds
 - $\gamma \gamma$ continuum - irreducible
 - $\gamma j + jj$ - reducible
- Good EM calorimeter performance

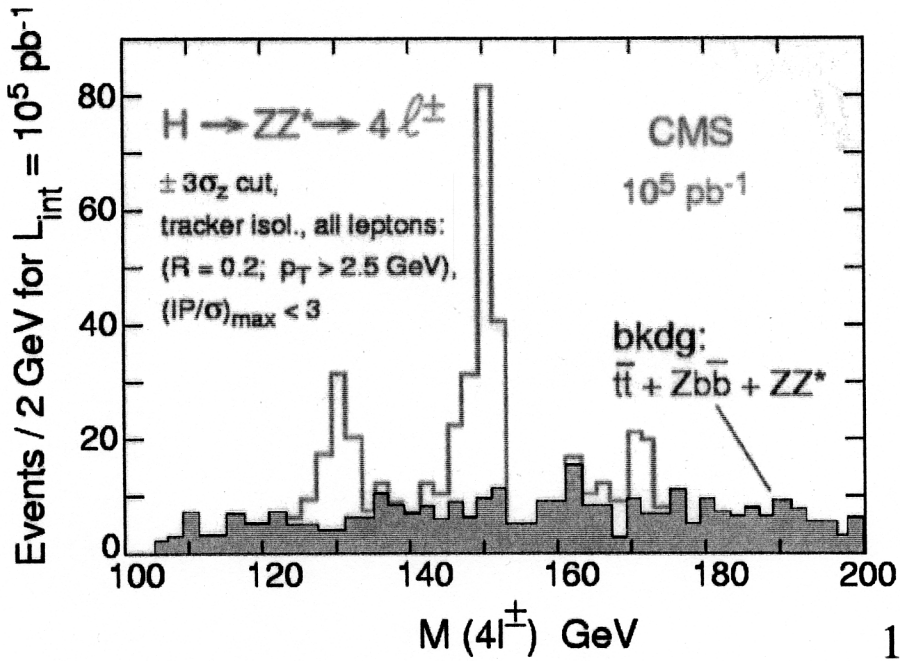


Higgs mass (GeV)	80	90	100	110	120	130	140	150
Signal events (direct production)	502	655	947	1110	1190	1110	915	617
Signal events (WH, ZH, t̄tH production)	85	76	98	97	93	76	58	35
γγ background	41 700	41 000	41 400	35 000	29 000	24 700	20 600	16 900
Jet-jet background	5400	5600	5950	5300	4600	4100	3550	3050
γ-jet background	12500	10600	9100	7000	5800	4900	4100	3400
Z → ee background	-	< 70	-	-	-	-	-	-
Stat. significance for 100 fb ⁻¹	2.4	3.1	4.4	5.6	6.5	6.5	5.8	4.3
Stat. significance for 30 fb ⁻¹	1.5	1.9	2.7	3.4	3.9	4.0	3.5	2.6

$$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$$

- $M_H > 120 \text{ GeV}$
- $\sigma \times \text{Br} \sim 3 \text{ fb}$
- Backgrounds

$ZZ^*, Z\gamma^*$ continuum - irreducible
 $Zbb \rightarrow 4l+X, tt \rightarrow 4l+X$



Higgs mass (GeV)	Luminosity	120	130	150	170	180
$\sigma(4e)$ (GeV)	Low	1.50	1.54	1.71	1.97	2.21
$\sigma(4e)$ (GeV)	High	1.81	1.81	1.98	2.17	2.37
$\sigma(4\mu)$ (GeV)	Low/High	1.32	1.42	1.62	2.00	2.20
$\sigma(2e2\mu)$ (GeV)	Low	1.43	1.51	1.64	1.99	2.20
$\sigma(2e2\mu)$ (GeV)	High	1.64	1.68	1.84	2.10	2.28

statistical
 $\approx 0.06 \text{ GeV}$

Table 19-14 Signal and background rates after all cuts and signal significances as a function of m_H , for $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ events and for an integrated luminosity of 30 fb^{-1} (low luminosity performance).

Higgs mass (GeV)	120	130	150	170	180
Signal	4.1	11.4	26.8	7.6	19.7
$t\bar{t}$	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02
$Zb\bar{b}$	0.08	0.12	0.19	0.17	0.19
ZZ^*	1.23	2.27	2.51	2.83	2.87
$ZZ \rightarrow \tau\tau ll$	0.13	0.20	0.25	0.08	0.02
Significance (S/\sqrt{B})	3.4	7.0	15.5	4.3	11.2
Significance (Poisson)	2.4	4.8	15.5	3.2	11.2

Table 19-15 Same as Table 19-14, but for an integrated luminosity of 100 fb^{-1} (high luminosity performance).

Higgs mass (GeV)	120	130	150	170	180
Signal	10.3	28.7	67.6	19.1	49.7
$t\bar{t}$	0.05	0.10	0.13	0.12	0.12
$Zb\bar{b}$	0.53	0.79	1.14	1.01	1.02
ZZ^*	3.53	6.36	7.03	7.54	7.61
$ZZ \rightarrow \tau\tau ll$	0.33	0.51	0.62	0.20	0.06
Significance (S/\sqrt{B})	4.9	10.3	22.6	6.4	16.7
Significance (Poisson)	3.8	10.3	22.6	5.3	16.7

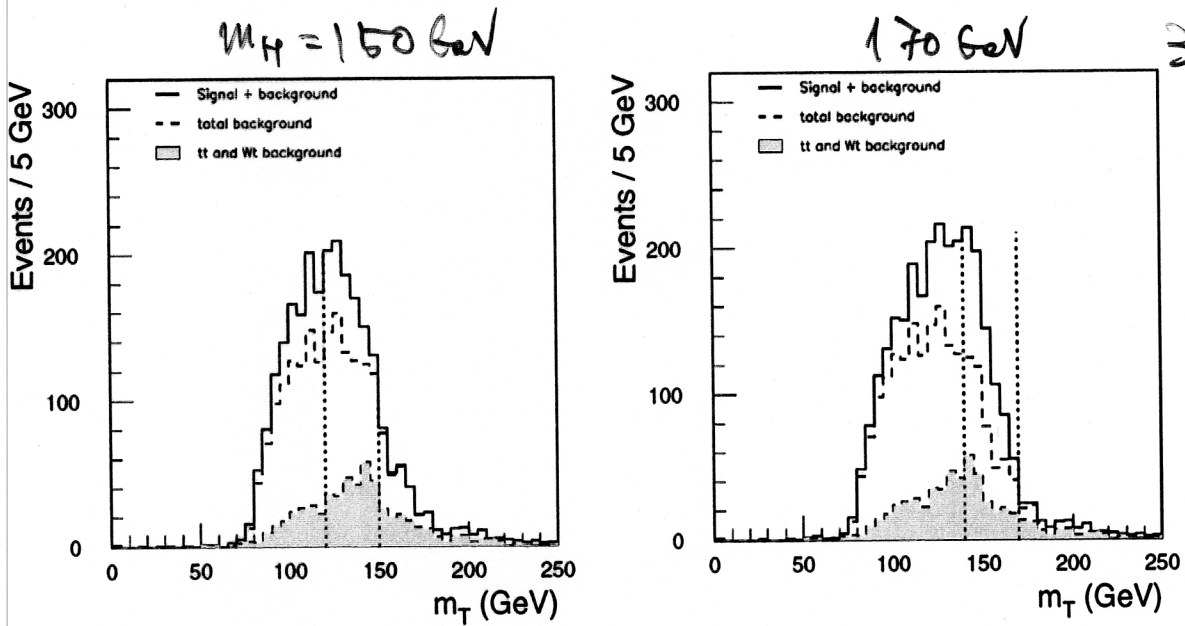
$$H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$$

- $150 < M_H < 190 \text{ GeV}$
- $\sigma \times \text{Br} \sim 700 \text{ fb}$, $\text{Br}(H \rightarrow WW) > 70\%$
- Backgrounds

$WW^{(*)}$ (irreducible) $\sigma \sim 5 \text{ pb}$

$WZ \rightarrow l\nu ll$, $ZZ \rightarrow \nu\nu ll$ $\sigma \sim 1 \text{ pb}$

tt , Wt , $Wbb \rightarrow 2l+X$ $\sigma \sim 120 \text{ pb}$



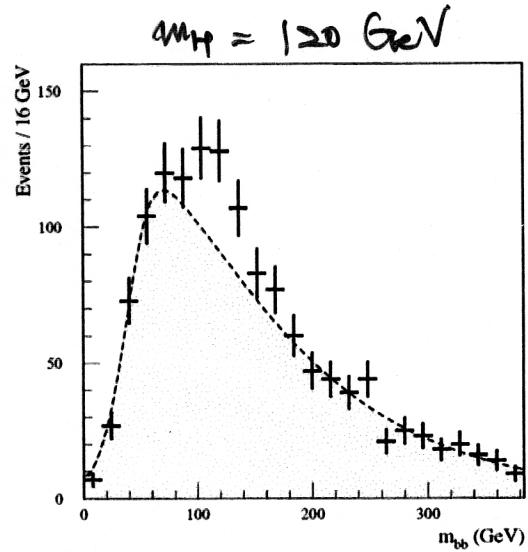
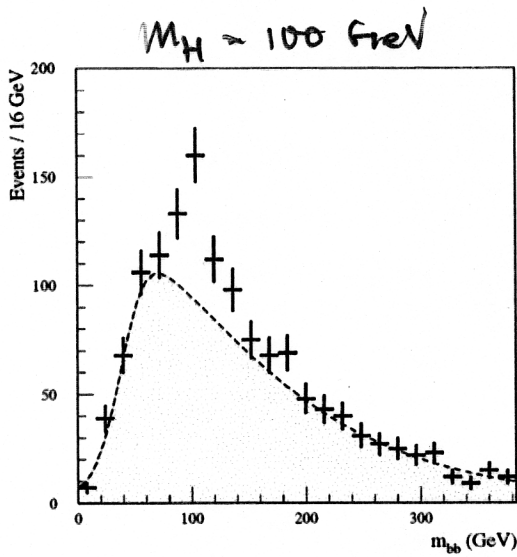
Higgs mass (GeV)	150	160	170	180	190
$\sigma \times \text{BR}$ (fb)	610	790	800	705	550
Acceptance	0.016	0.021	0.017	0.016	0.009
Signal	240	400	337	276	124
WW^* background	548	392	277	297	167
$t\bar{t}$ background	46	42	39	49	33
Wt background	215	195	149	163	85
WZ/ZZ background	25	17	9	10	6
$W+jet$ background	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Total background	844	656	484	529	301
Significance (including 5% systematic uncertainty)	4.7	9.6	10.3	7.8	5.4

30 fb⁻¹

ttH(H → bb)

- $M_H < 130 \text{ GeV}$
- $\sigma \times \text{Br} \sim 300 \text{ fb}$
- Background
 - Combinatorial from signal
 - $Wjjjjj$, $WWbbjj$, etc.
 - ttj continuum
- b-tagging is crucial

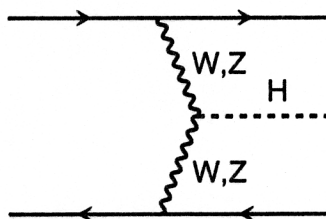
100 fb^{-1} (30 low
70 high)



Higgs mass (GeV)	80	100	120
Signal S	81	61	40
$t\bar{t}Z$	7	8	2
$Wjjjjj$	17	12	5
$t\bar{t}jj$	121	130	120
Total background B	145	150	127
S/B	0.56	0.41	0.32
S/\sqrt{B}	6.7	5.0	3.6
$S_{H \rightarrow b\bar{b}}/S_{\text{total}}$	0.67	0.64	0.59

30 fb^{-1}

Vector Boson Fusion の特徴



- 生成断面積は $gg \rightarrow H$ より一桁弱小さい
- 前方への二つの jets は $p_T \sim m_V$ を持ち、ある程度の効率で tag する事が可能
- Vector boson の hard scattering の部分が color singlet であるため jet activity が QCD background よりも少ない
- 比較的重い領域 ($> 150\text{GeV}$) では $gg \rightarrow H$ よりも早く discovery できる可能性
- 同じ生成プロセスに対しいくつかの崩壊モードを観測可能 \rightarrow 結合定数の測定に有利
 $H \rightarrow \gamma\gamma, \tau\tau, WW^{(*)} (\rightarrow e\mu + \text{missing})$
- この3年ほどで急速にその有効性が認知されて来た
D. Rainwater and D. Zeppenfeld, JHEP 9712 (1997) 005 [hep-ph/9712271]
- まだ実験側の simulation での検証が不十分
 \rightarrow signal process の測定器 simulation
 \rightarrow background event generation についても仕事有り

$$VV \rightarrow H \rightarrow \gamma \gamma$$

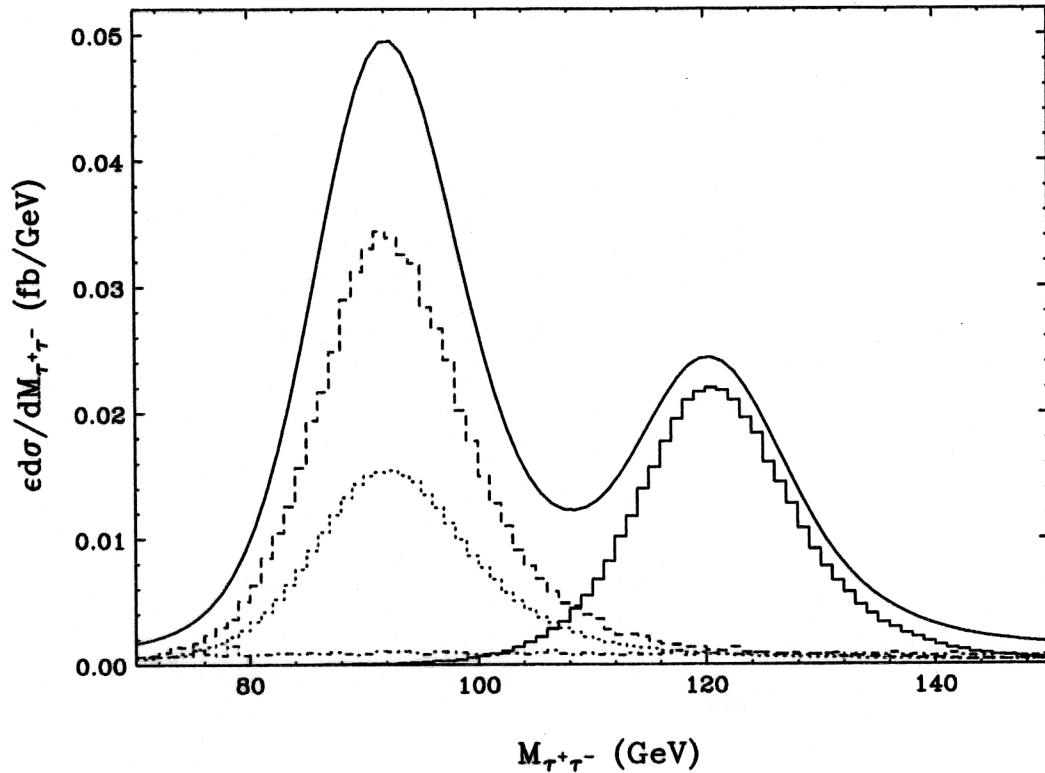
- $M_H < 140\text{GeV}$
- $\sigma \times \text{Br} \sim 1.2\text{fb}$
- Backgrounds
 - QCD and EW $\gamma \gamma jj$
 - jet mis-identification as γ

Higgs mass (GeV)	100	110	120	130	140	150
$\epsilon \cdot \sigma_{Hjj} \cdot B(H \rightarrow \gamma\gamma)$ (fb)	0.37	0.48	0.56	0.56	0.48	0.33
$\epsilon \cdot \sigma_{QCD}$ (fb)	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.08
$\epsilon \cdot \sigma_{EW}$ (fb)	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.09
$\epsilon \cdot \sigma_{DPS}$ (fb)	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02
$\epsilon \cdot \sigma_{bkg,tot}$ (fb)	0.33	0.31	0.28	0.25	0.22	0.19
S/B	1.1	1.6	2.0	2.3	2.2	1.8
σ_{Gaus}	3.8	5.0	6.0	6.2	5.7	4.3

50 fb⁻¹

$$VV \rightarrow H \rightarrow \tau\tau$$

- $M_H < 140\text{GeV}$
- discovery mode ではないが、Higgs の fermion への結合を直接見ることができる
- H の質量を reconstruct することができる

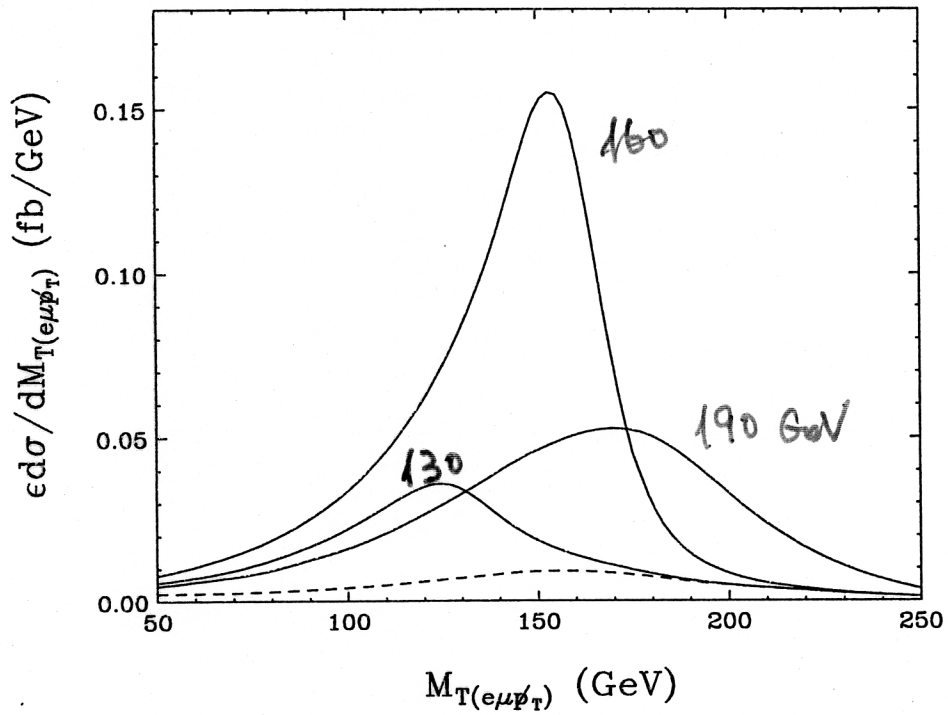


60 fb⁻¹

$m_H(\text{GeV})$	Hjj	QCD Zjj	EW Zjj	$Wj + jj$	$b\bar{b}jj$	σ_{Gauss}
110	24.2	6.3	3.4	0.3	0.8	5.7
120	20.6	1.8	1.2	0.3	0.7	7.4
130	16.0	0.9	0.7	0.3	0.6	6.3
140	10.0	0.6	0.5	0.4	0.5	4.7
150	4.8	0.4	0.4	0.3	0.4	2.6

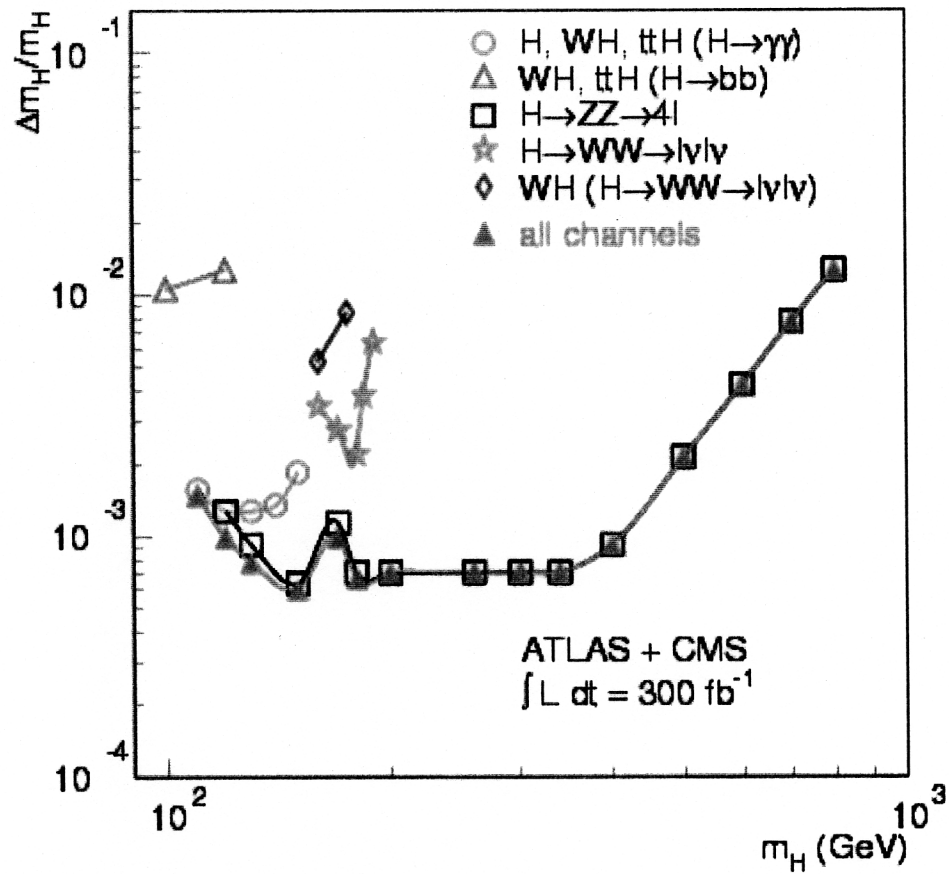
$$VV \rightarrow H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\mu + \text{missing}$$

- $M_H > 140\text{GeV}$
- $M_H \sim 120\text{GeV}$ くらいまでかなり有効
- discovery mode としても非常に有望



M_H	115	120	130	140	150	160	170	180	190	200
N_S	2.8	4.7	10.5	17.0	22.7	36.5	35.9	29.3	20.8	16.3
N_B	2.5	2.7	3.3	3.9	5.4	6.0	7.2	7.5	8.1	8.1
S/B	1.1	1.7	3.2	4.4	4.2	6.1	5.0	3.9	2.6	2.0
σ_{Gaus}	1.3	2.1	4.1	5.9	6.8	9.6	9.0	7.6	5.5	4.5
5σ [fb^{-1}]	35	15	8	2	1	1	1	1	1	1

質量の測定



$M_H < 500 \text{ GeV}$ の範囲では

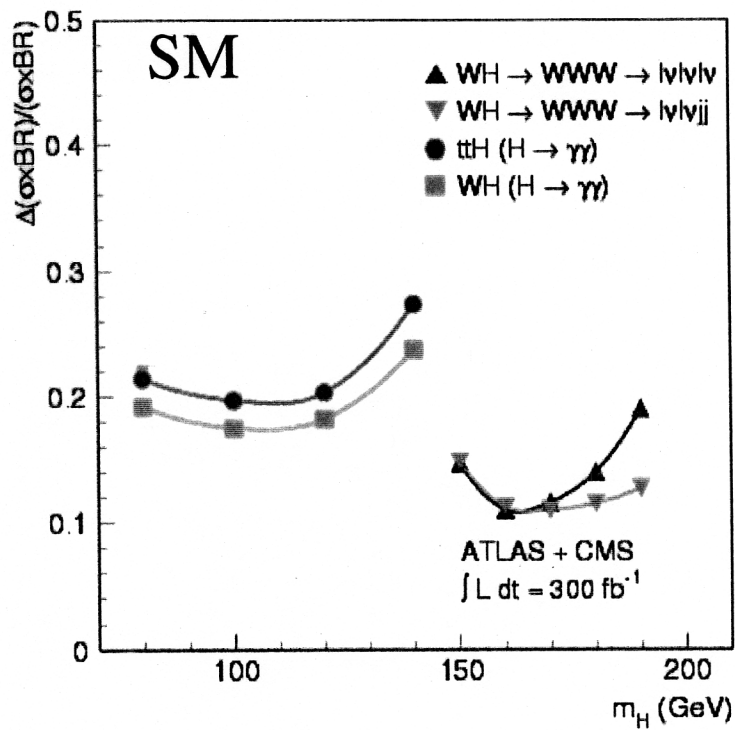
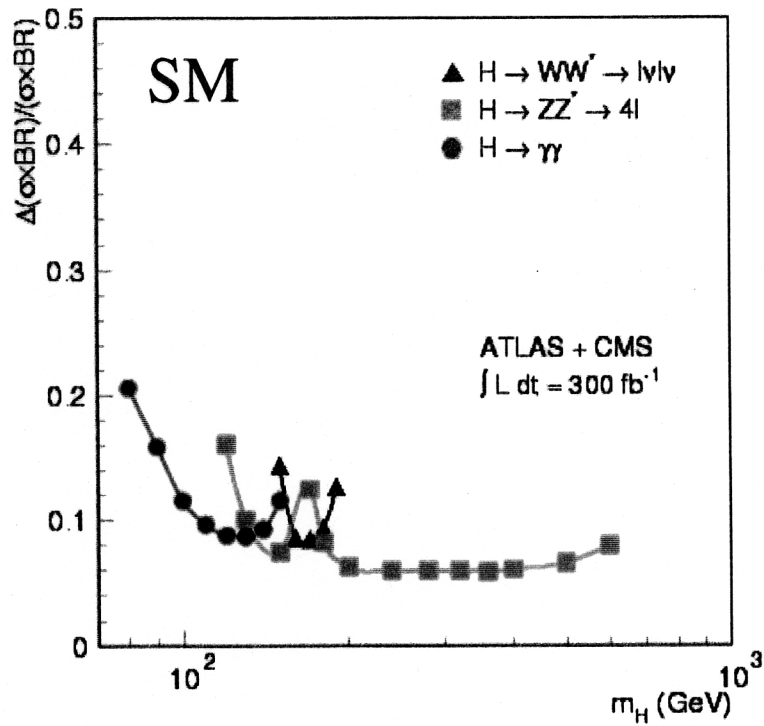
～ 0.2% の精度で質量を決定できる

$M_H > 500 \text{ GeV}$ では

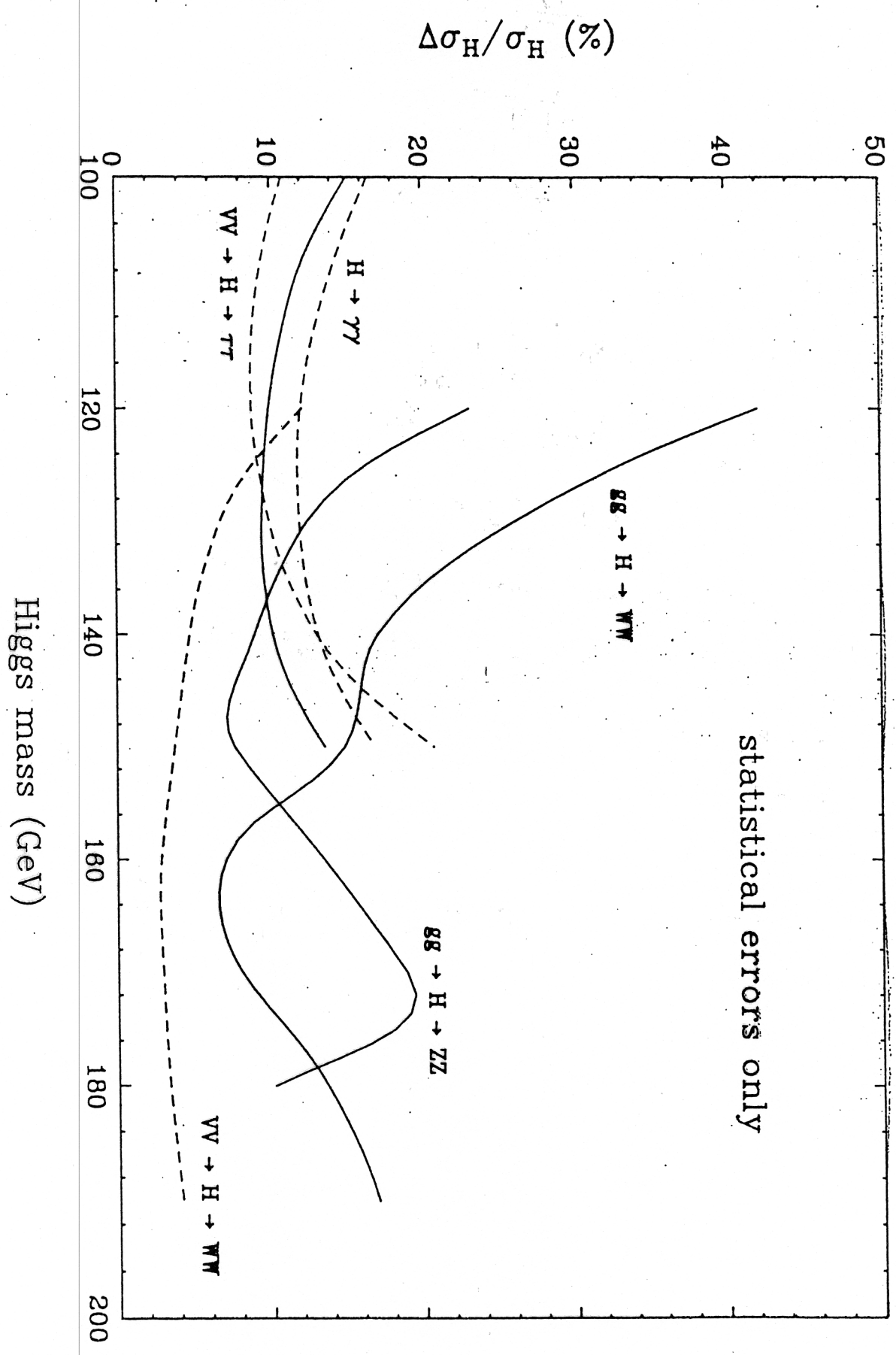
Γ_H が大きくなりすぎるため systematic な
 効果が効いてくる

生成断面積 ($\sigma \times \text{Br}$)

dominant errors: statistics, lumin., background systematics



Relative errors in σ_H measurements at the LHC
(Zeppenfeld, Kinnunen, Nikitenko, Richter-Was)



スピンとパリティは？

○一般的な考察から

- $H \rightarrow \gamma \gamma \Rightarrow H \neq \text{vector}$
H has a CP-even component
- H couples to WW/ZZ
 \Rightarrow H has a large CP-even component

○測定からスピンについてどこまで言えるか？

- $H \rightarrow \gamma \gamma$
S/N が問題 (a few percent)
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
統計的には有利
- $ttH(H \rightarrow bb)$
S/N がよい
 \rightarrow 要 study

Couplings and branching ratios

- 断面積 (σ) を知ることができれば $\sigma \times \text{Br}$ から Br を求めることができる
- 同じ生成プロセスについて比をとると coupling の比について情報を得ることができる
- 例えば、..

$\frac{(\bar{t}tH + WH) \rightarrow \gamma\gamma + X}{(\bar{t}tH + WH) \rightarrow b\bar{b} + X}$	$\frac{\text{BR}(H \rightarrow \gamma\gamma)}{\text{BR}(H \rightarrow b\bar{b})}$	$\approx 15\% (*)$ 80-120 GeV
$\frac{H \rightarrow \gamma\gamma}{H \rightarrow 4l}$	$\frac{\text{BR}(H \rightarrow \gamma\gamma)}{\text{BR}(H \rightarrow ZZ^*)}$	$\approx 7\%$ 120-150 GeV
$\frac{\bar{t}tH \rightarrow \gamma\gamma, b\bar{b}}{WH \rightarrow \gamma\gamma, b\bar{b}}$	$\left(\frac{\bar{t}tH}{WWH} \right)^2$	$\approx 15\% (*)$ 80-120 GeV
$\frac{H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4l}{H \rightarrow WW(*) \rightarrow l\nu l\nu}$	$\left(\frac{ZZH}{WWH} \right)^2$	$\approx 10\%$ 130-190 GeV

(*) also in MSSM for $m_A > 200$ GeV

- Vector boson fusion の結果も使って、より systematic に
- D.Zeppenfeld, R.Kinnunen, A.Nikitenko and E.Richter-Was, Phys.Rev. D62 (2000) 013009 [hep-ph/0002036]

- $qq \rightarrow qqH$ から

$$\begin{aligned}
 X_\gamma &= \frac{\Gamma_W \Gamma_\gamma}{\Gamma} && \text{from } qq \rightarrow qqH, H \rightarrow \gamma\gamma, \\
 X_\tau &= \frac{\Gamma_W \Gamma_\tau}{\Gamma} && \text{from } qq \rightarrow qqH, H \rightarrow \tau\tau, \\
 X_W &= \frac{\Gamma_W^2}{\Gamma} && \text{from } qq \rightarrow qqH, H \rightarrow WW^{(*)},
 \end{aligned}$$

- $gg \rightarrow H$ から

$$\begin{aligned}
 Y_\gamma &= \frac{\Gamma_g \Gamma_\gamma}{\Gamma} && \text{from } gg \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma, \\
 Y_Z &= \frac{\Gamma_g \Gamma_Z}{\Gamma} && \text{from } gg \rightarrow H \rightarrow ZZ^{(*)}, \\
 Y_W &= \frac{\Gamma_g \Gamma_W}{\Gamma} && \text{from } gg \rightarrow H \rightarrow WW^{(*)},
 \end{aligned}$$

- 同じ生成プロセス同士の比をとるといろいろな systematic な効果を cancel することができる

- どのプロセスも使うことができる M_H の範囲は 120-150GeV 程度

- またこれらの測定といくつかの仮定により $M_H < 200\text{GeV}$ 以下の領域についても total width を測定できる

m_H	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$z = \Gamma_z / \Gamma_w$	YZ / YW		48%	29%	19%	17%	15%	20%	17%
	$\frac{YZ}{Y_\gamma} \oplus \frac{X_\gamma}{X_W}$	$\frac{YZ}{Y_\gamma} \oplus \frac{X_\gamma}{X_W}$	30%	21%	19%	23%			
Γ_γ / Γ_w	$\frac{Y_\gamma}{Y_w} \oplus \frac{X_\gamma}{X_w}$		16%	12%	11%	13%			
	$\frac{X_\gamma}{X_w}$	$\frac{X_\gamma}{X_w}$	15%	12%	14%	21%			
$\Gamma_\tau / \Gamma_\gamma$	$\frac{X_\tau}{X_\gamma}$		20%	16%	15%	16%	18%	27%	
Γ_g / Γ_w	$\frac{Y_g}{Y_\gamma} \oplus \frac{Y_w}{X_w}$		22%	18%	15%	13%	12%	13%	8%
	$\frac{Y_g}{Y_\gamma} \oplus \frac{Y_w}{X_w} \oplus 21\%$	$\frac{Y_g}{Y_\gamma} \oplus \frac{Y_w}{X_w} \oplus 21\%$	30%	27%	25%	24%	24%	24%	22%
								22%	22%
									25%

200 fb⁻¹

まとめ

- LHC で軽い ($M_H < 200\text{GeV}$) Higgs 粒子を発見することは比較的容易である。
Higgs の質量がかなり軽い場合でも (しかもそれでも Tevatron-II で見つからない場合) 10fb^{-1} (low luminosity operation で一年) で 5σ レベルの signal を見ることができる。
- 発見されればその質量は 0.2% の精度で決定できる
主に $ZZ \rightarrow 4l$ モードによる
- スピン/パリティについて何がわかるかについてはさらにより多くの study が必要
- 生成断面積 ($\times \text{Br}$) については多くのプロセスについて 10% 以下の精度で測定できる。特に vector boson fusion による生成の場合は、S/N が良いため良い精度で測定できる。
- 結合定数、branching ratio 関連については少しずついろいろな結果が報告されている。より systematic な検討が必要。Fermion への結合はより多くの情報が必要と思われる。
→どのようなプロセスの study が必要か？