

講義ノート5,6

- ヒッグスの話
- 解析の基本的手法

Higgsの話

2012年7月4日



2016/06/21-23

阪大集中講義

2012年7月4日



In summary

We have observed a new boson with a mass of $125.3 \pm 0.6 \text{ GeV}$ at 4.9σ significance !

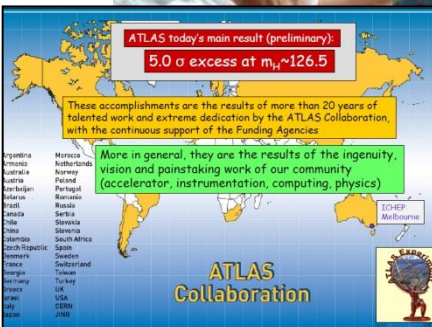
Global Effort → Global Success

Results today only possible due to extraordinary performance of accelerators – experiments – Grid computing

Observation of a new particle consistent with a Higgs Boson (but which one...?)

Historic Milestone but only the beginning

Global Implications for the future



R-D Heuer

さかのぼること約50年

- 標準理論→ゲージボソンはmassless
- 自発的対称性の破れ by 南部(1960) Goldstone(1961)
 - 超伝導理論をヒントに。
 - Massless Goldstone boson?
- The Englert-Brout-Higgs Mechanism.

Englert & Brout: June 26th 1964

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

Higgs paper: July 27th 1964 & Aug 31st 1964

BROKEN SYMMETRIES, MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS

P. W. HIGGS

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Scotland

Received 27 July 1964

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

さかのぼること約50年

- 標準理論→ゲージボソンはmassless
- 自発的対称性の破れ by 南部(1960) Goldstone(1961)
 - 超伝導理論をヒントに。
 - Massless Goldstone boson?
- The Englert-Brout-Higgs Mechanism.

Englert & Brout: June 26th 1964

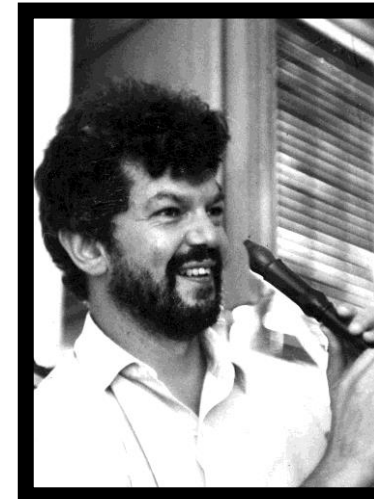
BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

Brout



Higgs paper: July 27th 1964 & Aug 31st 1964

7月20日 Englert&PESKIN @Paris

7月4日 Fabiola & Higgs @CERN MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS

P. W. HIGGS

Department of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Scotland

Received 27 July 1964

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

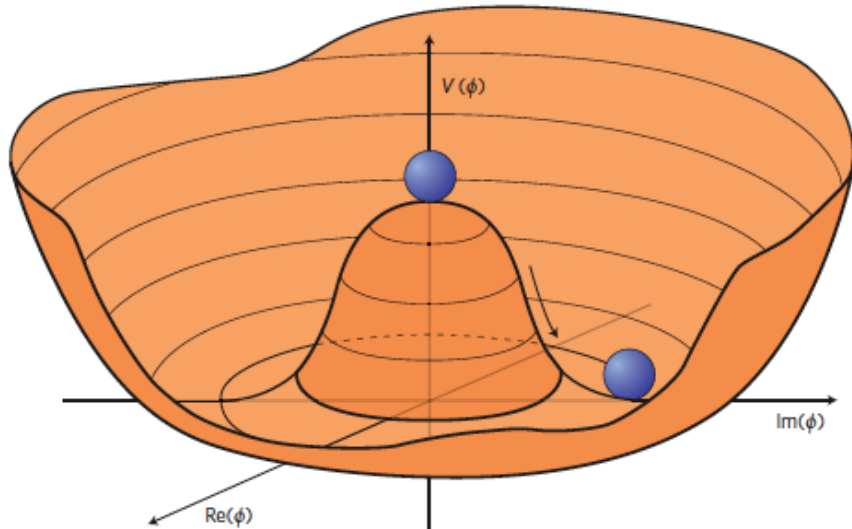
Peter W. Higgs

Department of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)



Nambu&G - EB&H – GHK Model?



Englert & Brout

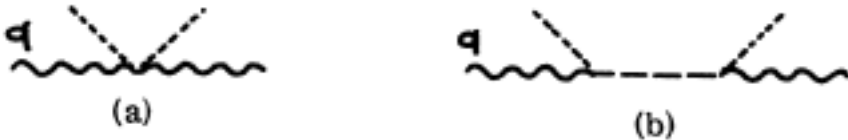


FIG. 1. Broken-symmetry diagram leading to a mass for the gauge field. Short-dashed line, $\langle \varphi_1 \rangle$; long-dashed line, φ_2 propagator; wavy line, A_μ propagator. (a) $\rightarrow (2\pi)^4 i e^2 g_{\mu\nu} \langle \varphi_1 \rangle^2$, (b) $\rightarrow -(2\pi)^4 i e^2 (q_\mu q_\nu / q^2) \times \langle \varphi_1 \rangle^2$.

Guralnik, Hagen & Kibble

We consider, as our example, a theory which was partially solved by Englert and Brout,⁵ and bears some resemblance to the classical theory of Higgs.⁶ Our starting point is the ordinary electrodynamics of massless spin-zero particles, characterized by the Lagrangian

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2} F^{\mu\nu} (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) + \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} + \varphi^\mu \partial_\mu \varphi + \frac{1}{2} \varphi^\mu \varphi_\mu + i e_0 \varphi^\mu q \varphi A_\mu,$$

With no loss of generality, we can take $\eta_2 = 0$, and find

$$\begin{aligned} (-\partial^2 + \eta_1^2) \varphi_1 &= 0, \\ -\partial^2 \varphi_2 &= 0, \\ (-\partial^2 + \eta_1^2) A_k^T &= 0, \end{aligned}$$

where the superscript T denotes the transverse part. The two degrees of freedom of A_k^T combine with φ_1 to form the three components of a

Higgs Boson?

- Higgs が質量のあるボソンの存在を指摘

$$\{\partial^2 - 4\varphi_0^2 V''(\varphi_0^2)\}(\Delta\varphi_2) = 0, \quad (2b)$$

Equation (2b) describes waves whose quanta have

(bare) mass $2\varphi_0\{V''(\varphi_0^2)\}^{1/2}$.

- EB – GHK は質量のあるボソンの存在にはno-comment.



問題なのは、Higgsの質量がわからなかったこと。

Higgs search? 1974-1975

- Emission from stars :
 - $m_H > 0.7 m_e$ (Sato & Sato, 1975)
- Neutron-electron scattering :
 - $m_H > 0.7 \text{ MeV}$ (Rafelski, Muller, Soff et. al. 1974)
- Neutron nucleus scattering :
 - $m_H > 13 \text{ MeV}$ (Barbieri & Ericson, 1975)
- Nuclear $0+ \leftrightarrow 0+$ transitions:
 - $m_H > 18 \text{ MeV}$ (Kohler, Watson & Beeker, 1974)

Prog. Theor. Phys. Vol. 54 (1975), Nov.

**Higgs Meson Emission from a Star
and a Constraint on Its Mass**

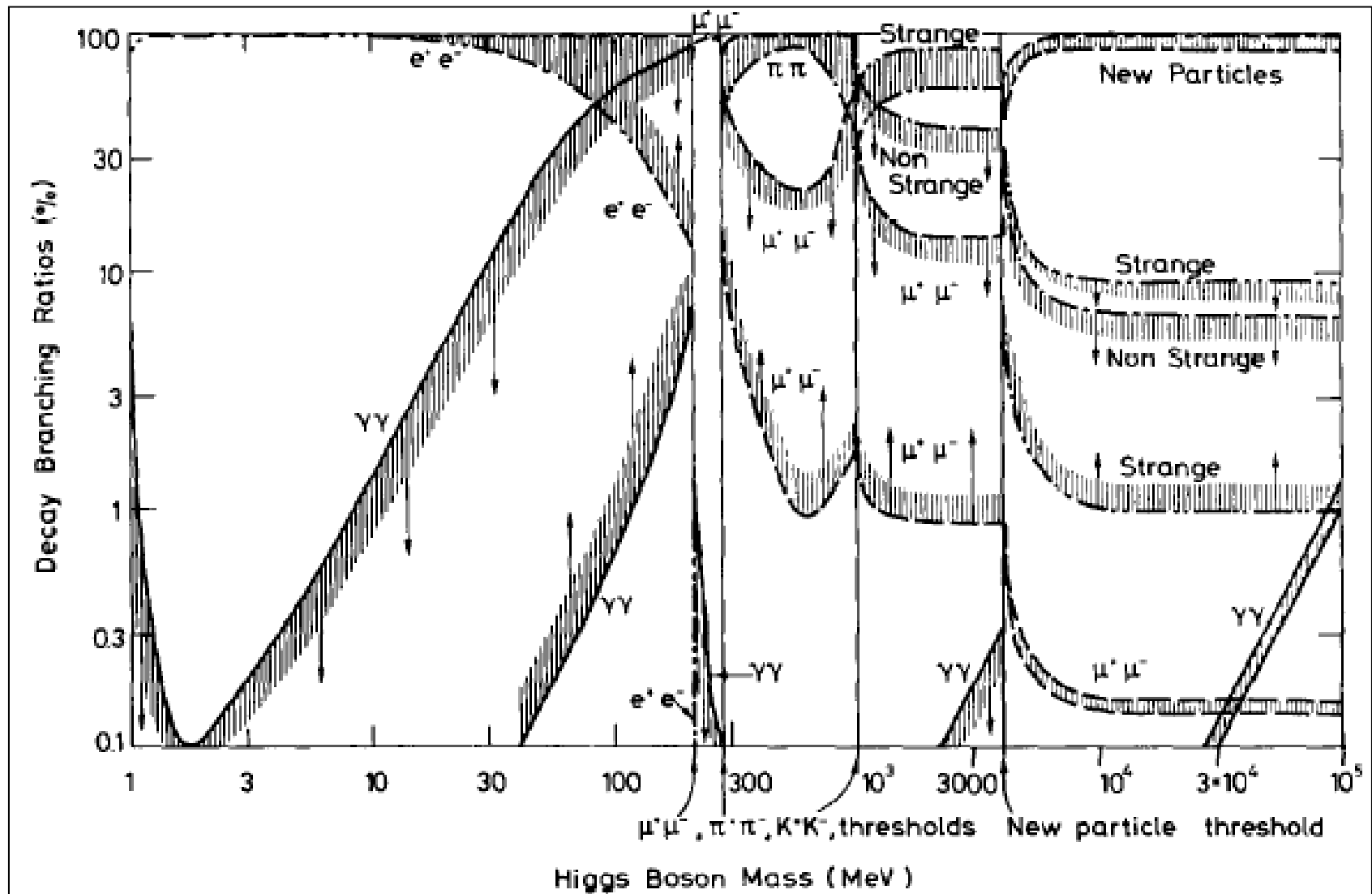
Katsuhiko SATO and Humitaka SATO
*Research Institute for Fundamental Physics
Kyoto University, Kyoto*

July 3, 1975



それくらいHiggsの質量は不確か...

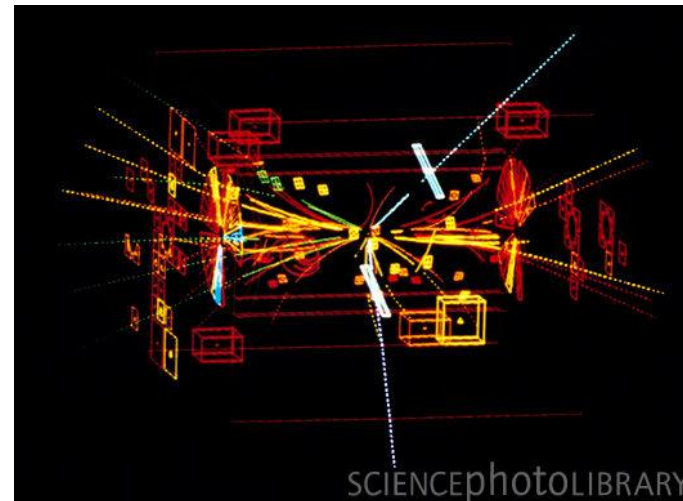
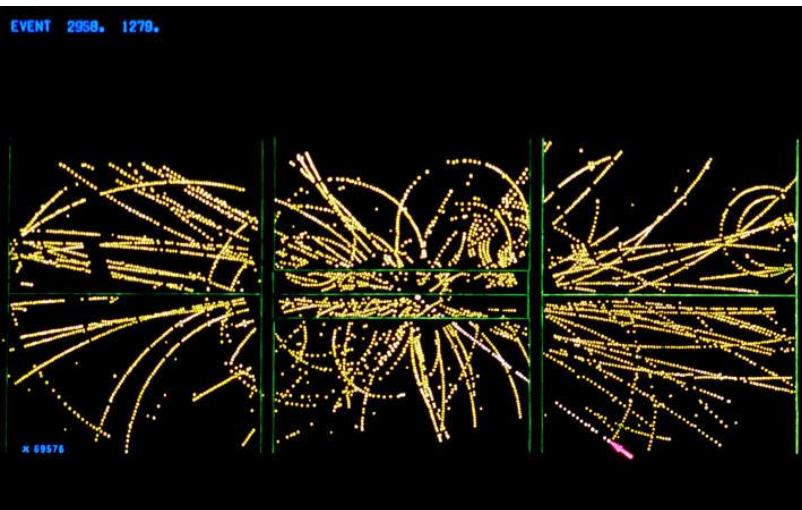
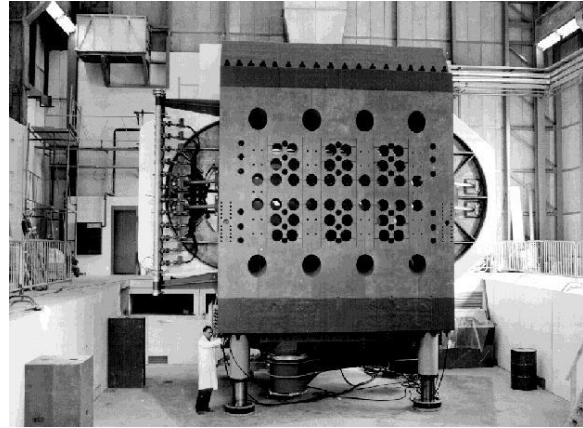
Higgs Decay mode ?



似たような時期に...

- Gargamel bubble chamber @ CERN
 - Neutral Current(1973)
- J/ψ (1974)
- τ (1975)

- UA1 & UA2 @ CERN
 - W, Z bosonの発見(1983)
 - W, Z の質量が決定



LEPの時代 I 間接測定

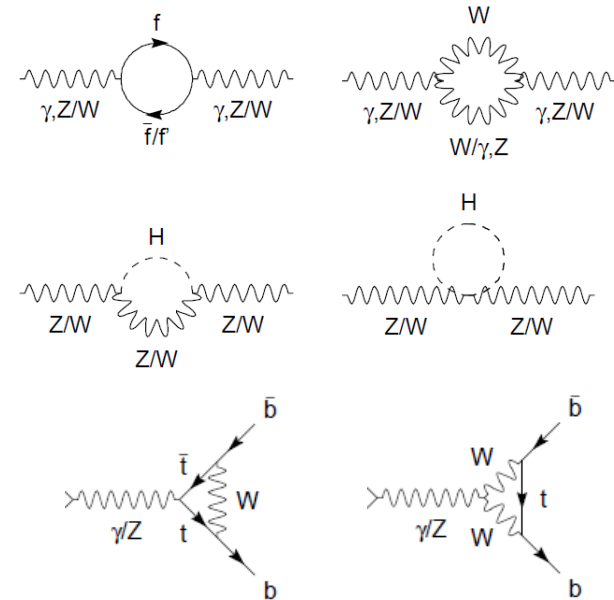
- 初めてHiggsの質量を予測できるようになった。

– 電磁輻射補正は重い粒子にセンシティブ

$$m_W^2 \sin^2 \theta_W = m_Z^2 \cos^2 \theta_W \sin^2 \theta_W = \frac{\pi\alpha}{\sqrt{2}G_F} (1 + \Delta r)$$

– Top の輻射補正 $\frac{3G_F}{8\pi^2\sqrt{2}}m_t^2$

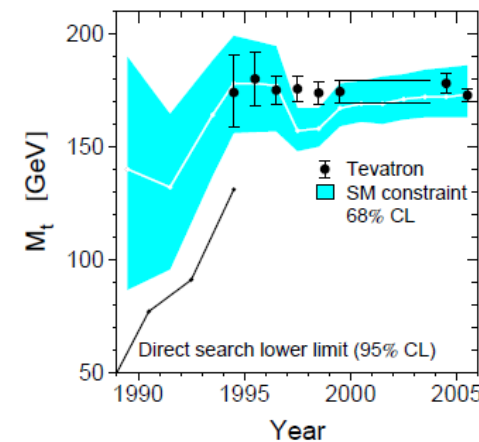
– Higgs? $\frac{\sqrt{2}G_F}{16\pi^2}m_W^2\left(\frac{11}{3}\ln\frac{M_H^2}{m_Z^2} + \dots\right), M_H \gg m_W$



- 1994年 Top quark の質量の間接測定

– 173+21.6-23.8GeV

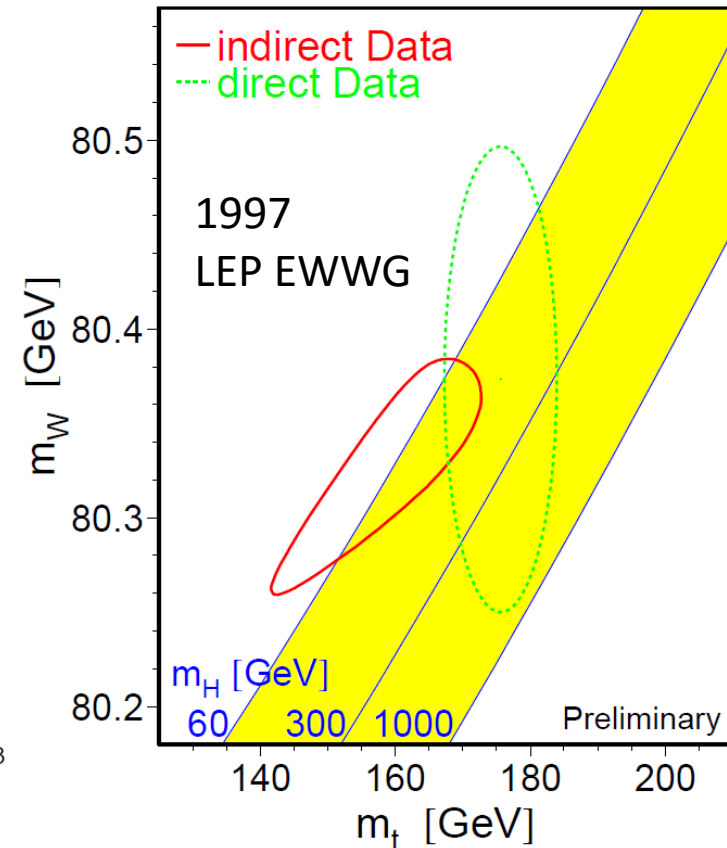
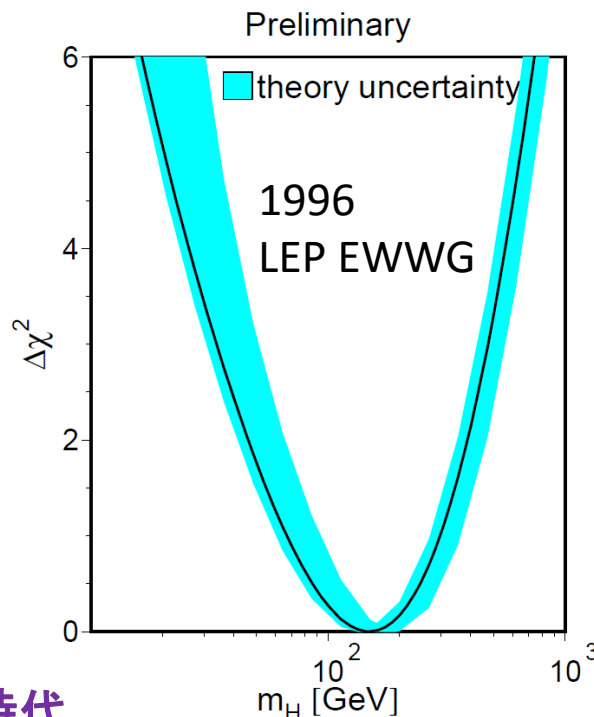
- Higgsの質量に関してはTop quarkの質量に大きく依存 : o(1GeV) – o(1TeV)



Top quarkの発見とEW fit

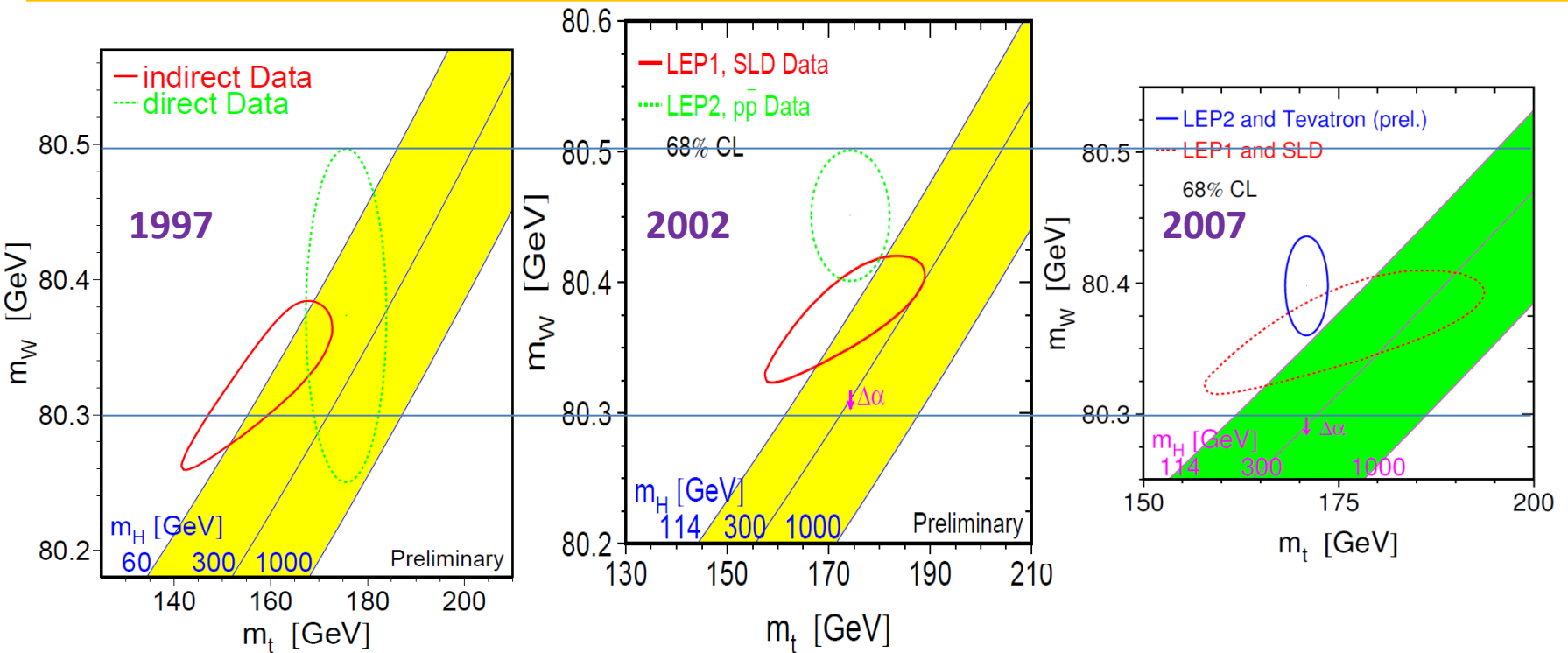
- 1994年 evidence of Top quark by CDF
- 1995年 discovery of Top quark by CDF and D0

$$M_{\text{top}} = 176 \pm 8 \pm 10$$

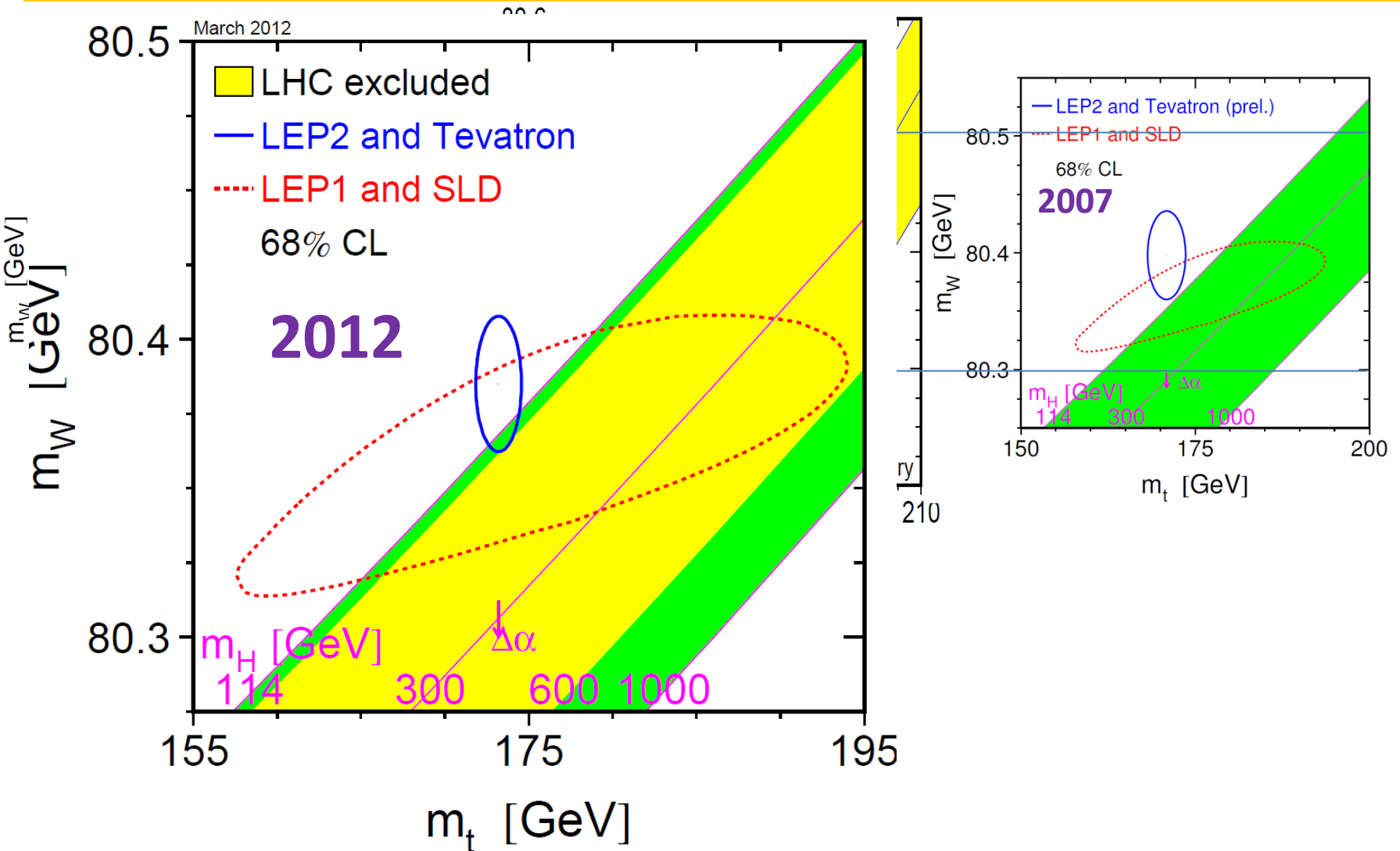


M_w とM_{top}の精密測定で
Higgs の質量が予測できる時代

1997-2012 in 5year step

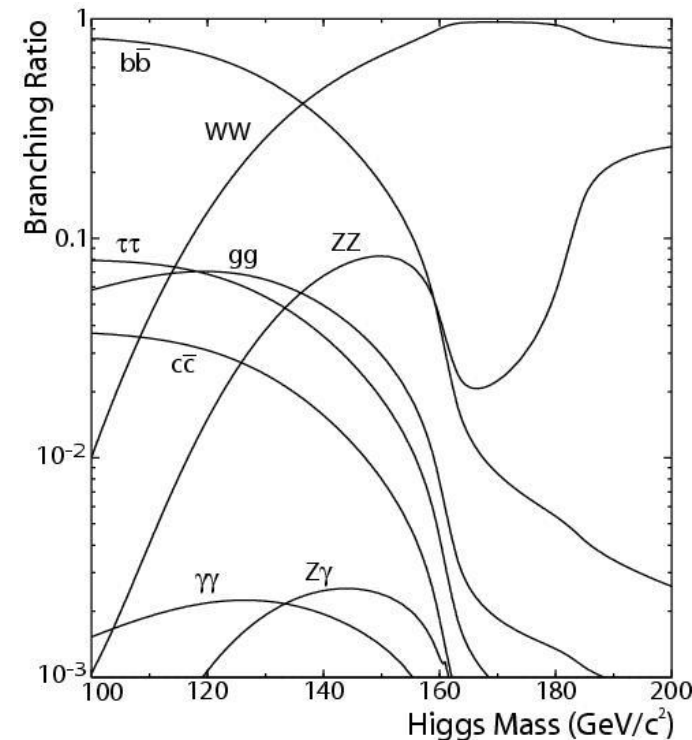
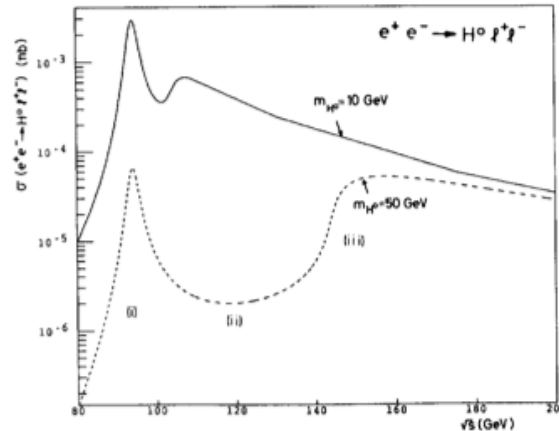
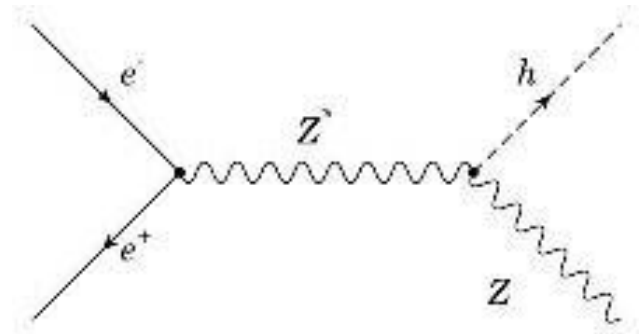


1997-2012 in 5year step

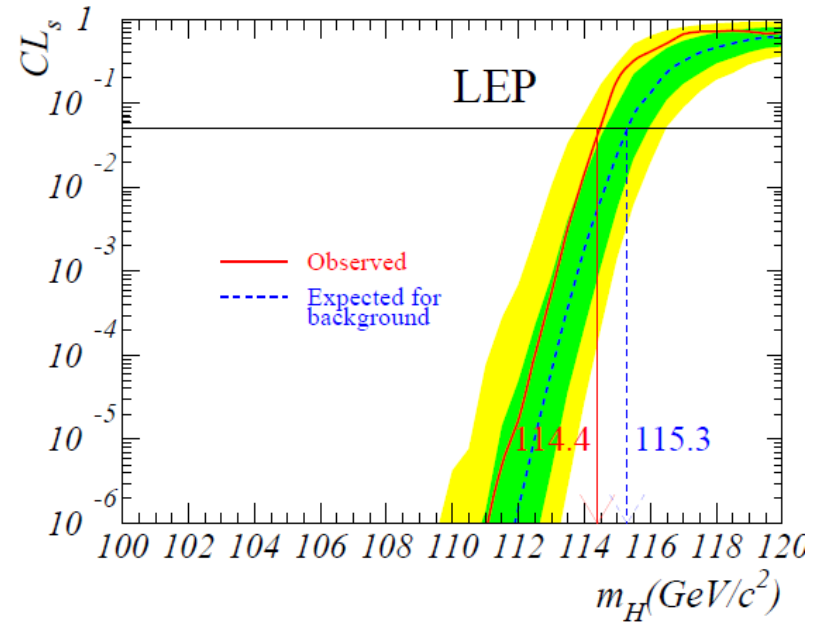
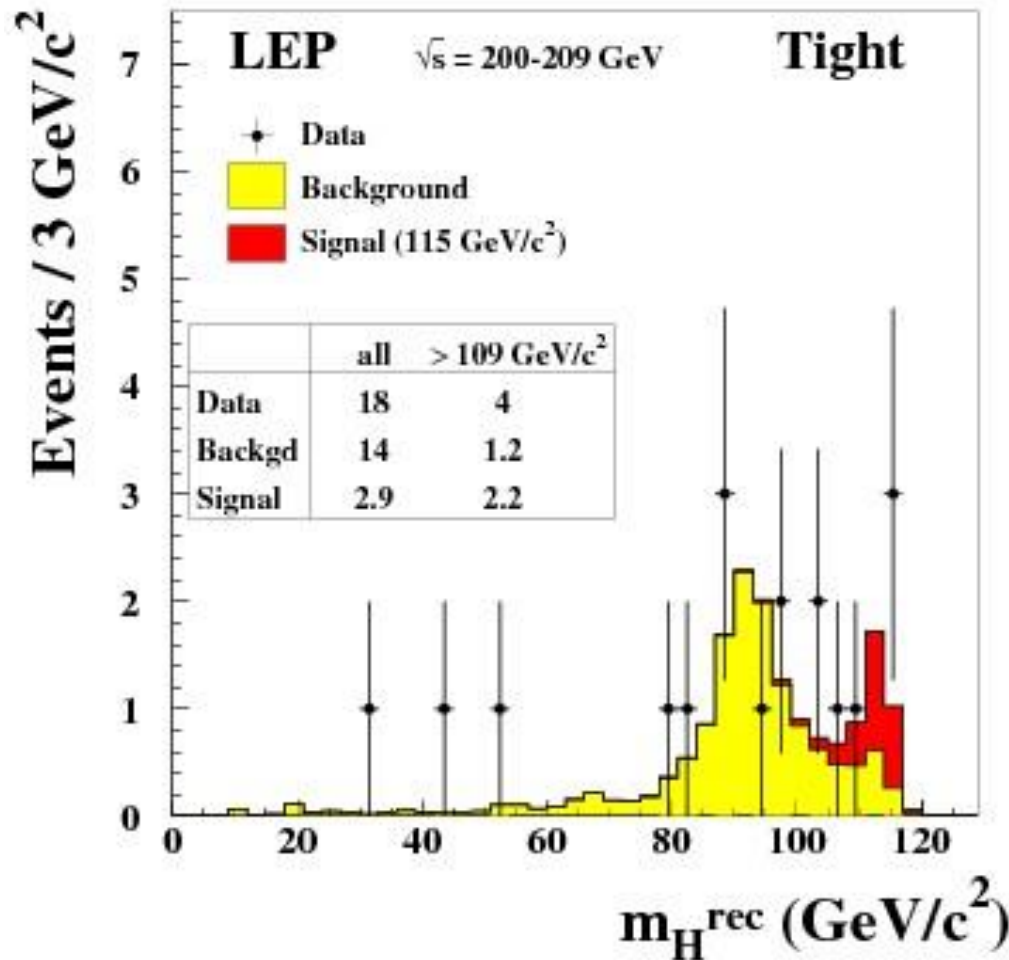


LEPの時代 II 直接測定

- Higgsの質量がZの質量以下
 - $Z \rightarrow H + \mu\mu$
- もっともメインなモード
 - $ee \rightarrow Z^* \rightarrow ZH$
 - 生成断面積は m_H による
 - 崩壊過程 bb を中心に探索



疑惑の事象とLimit in 2001年



ヒッグス粒子が存在する確率みたいなもの
→詳しくは後半

存在確率が5%以下のとき95%CLで棄却

Observed limit : < 114.4 GeVを棄却

expected limit : < 115.3 GeVを棄却

ちょっとしたネタ

S L Wu @ SLAC Summer Institute 2012

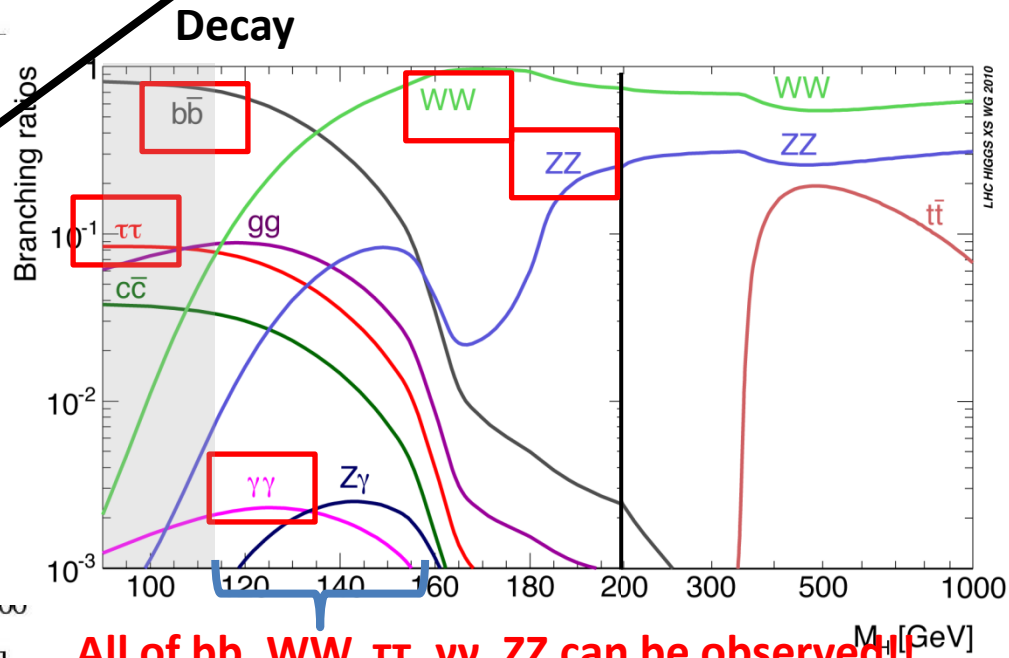
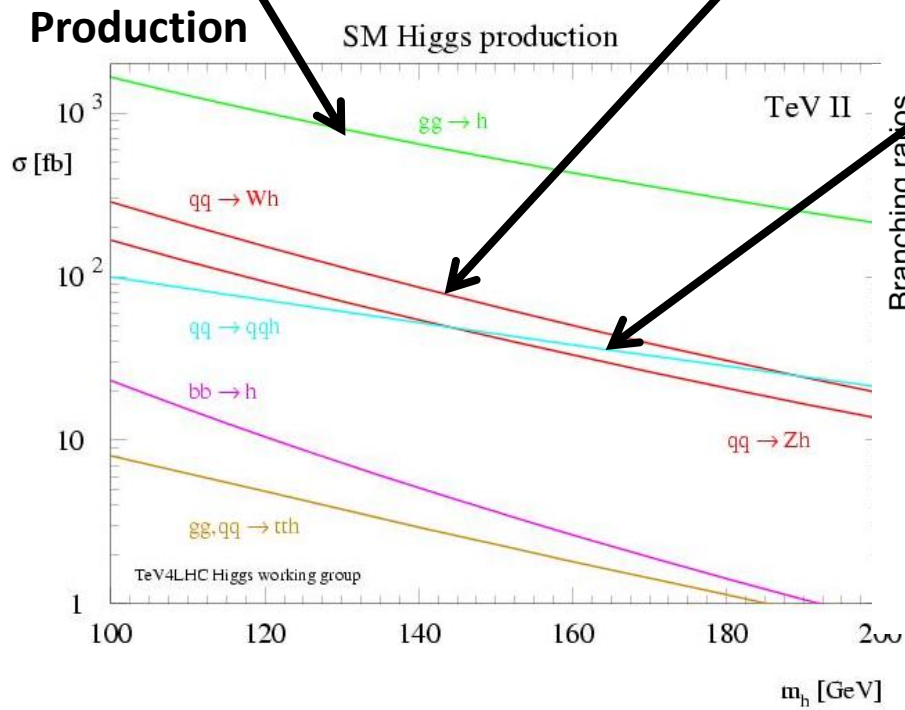
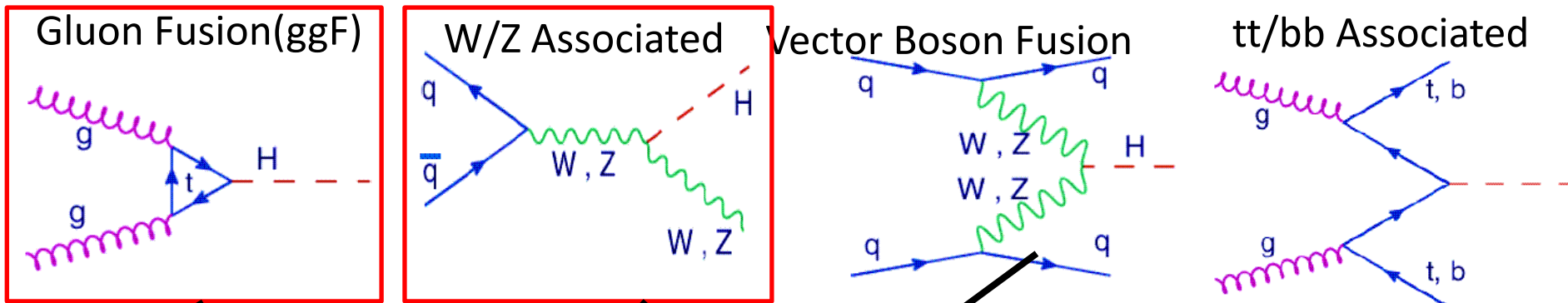
Oops!

• I am 12 years behind.

• The Higgs has grown from 114 GeV to 126 GeV by gaining 1 GeV per year.

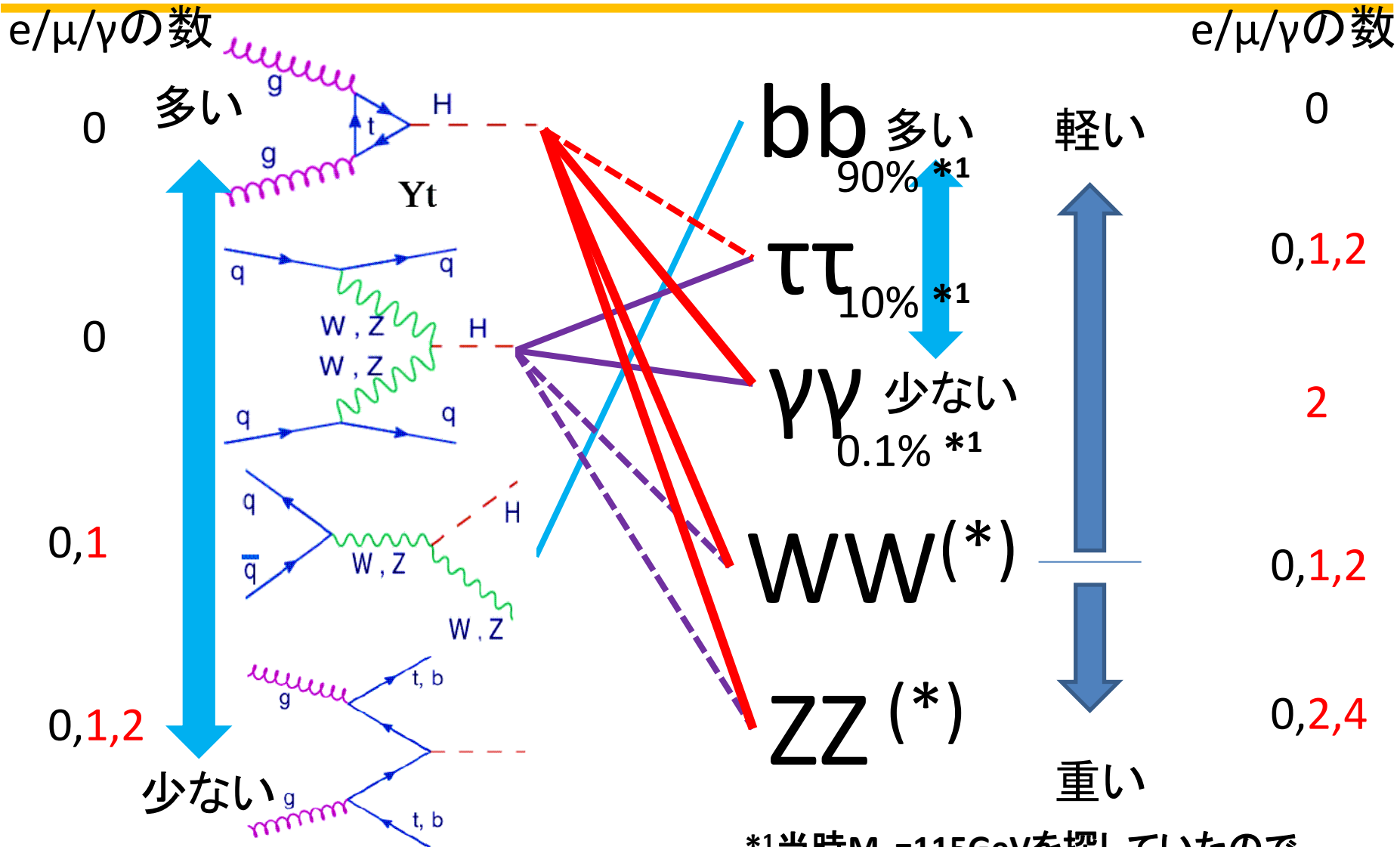


Higgs searches at Tevatron



All of $bb, WW, \tau\tau, \gamma\gamma, ZZ$ can be observed!!

生成崩壊過程の組み合わせ



*1 当時 $M_H = 115 \text{ GeV}$ を探していたので

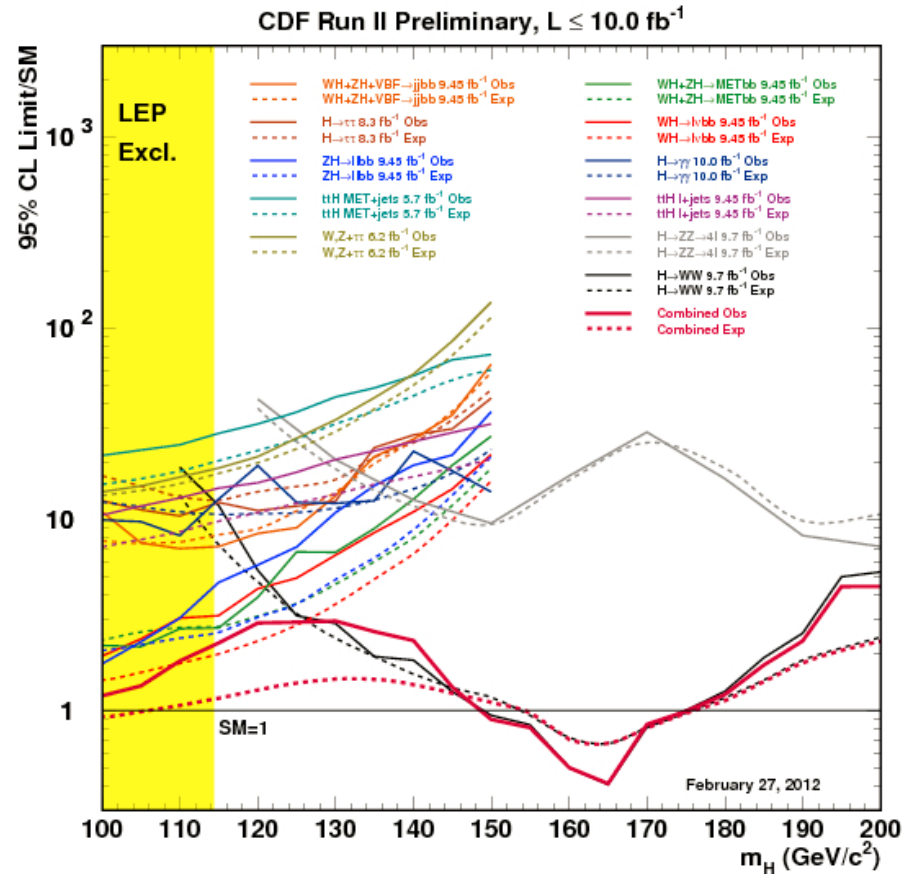
Higgs searches at Tevatron

CDF

Channel	Luminosity (fb^{-1})	m_H range (GeV/c^2)
$WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$ 2-jet channels	$4 \times (\text{TT, TL, Tx, LL, Lx})$	9.45
$WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$ 3-jet channels	$3 \times (\text{TT, TL})$	9.45
$ZH \rightarrow \nu\bar{\nu} b\bar{b}$ (SS, SJ, 1S)		9.45
$ZH \rightarrow \ell^+ \ell^- b\bar{b}$ 2-jet channels	$2 \times (\text{TT, TL, Tx, LL})$	9.45
$ZH \rightarrow \ell^+ \ell^- b\bar{b}$ 3-jet channels	$2 \times (\text{TT, TL, Tx, LL})$	9.45
$H \rightarrow W^+ W^-$ $2 \times (0 \text{ jets, 1 jet}) + (2 \text{ or more jets}) + (\text{low-}m_{\ell\ell})$		9.7
$H \rightarrow W^+ W^-$ $(e-\tau)_{\text{had}} + (\mu-\tau)_{\text{had}}$		9.7
$WH \rightarrow WW^+ W^-$ (same-sign leptons) + (tri-leptons)		9.7
$WH \rightarrow WW^+ W^-$ tri-leptons with 1 τ_{had}		9.7
$ZH \rightarrow ZW^+ W^-$ (tri-leptons with 1 jet) + (tri-leptons with 2 or more jets)		9.7
$H \rightarrow ZZ$ four leptons		9.7
$H + X \rightarrow \tau^+ \tau^-$ (1 jet) + (2 jets)		8.3
$WH \rightarrow \ell\nu\tau^+\tau^- / ZH \rightarrow \ell^+ \ell^- \tau^+ \tau^-$ $\ell-\tau_{\text{had}}-\tau_{\text{had}}$		6.2
$WH \rightarrow \ell\nu\tau^+\tau^- / ZH \rightarrow \ell^+ \ell^- \tau^+ \tau^-$ $(\ell-\ell-\tau_{\text{had}}) + (e-\mu-\tau_{\text{had}})$		6.2
$WH \rightarrow \ell\nu\tau^+\tau^- / ZH \rightarrow \ell^+ \ell^- \tau^+ \tau^-$ $\ell-\ell-\ell$		6.2
$ZH \rightarrow \ell^+ \ell^- \tau^+ \tau^-$ four leptons including τ_{had} candidates		6.2
$WH + ZH \rightarrow jj b\bar{b}$ (SS, SJ)		9.45
$H \rightarrow \gamma\gamma$ (CC, CP, CC-Conv, PC-Conv)		10.0
$t\bar{t}H \rightarrow WW b\bar{b} b\bar{b}$ (lepton) $(4\text{jet}, 5\text{jet}, \geq 6\text{jet}) \times (\text{SSS, SSJ, SJJ, SS, SJ})$		9.45
$t\bar{t}H \rightarrow WW b\bar{b} b\bar{b}$ (no lepton) $(\text{low met, high met}) \times (2 \text{ tags, 3 or more tags})$		5.7

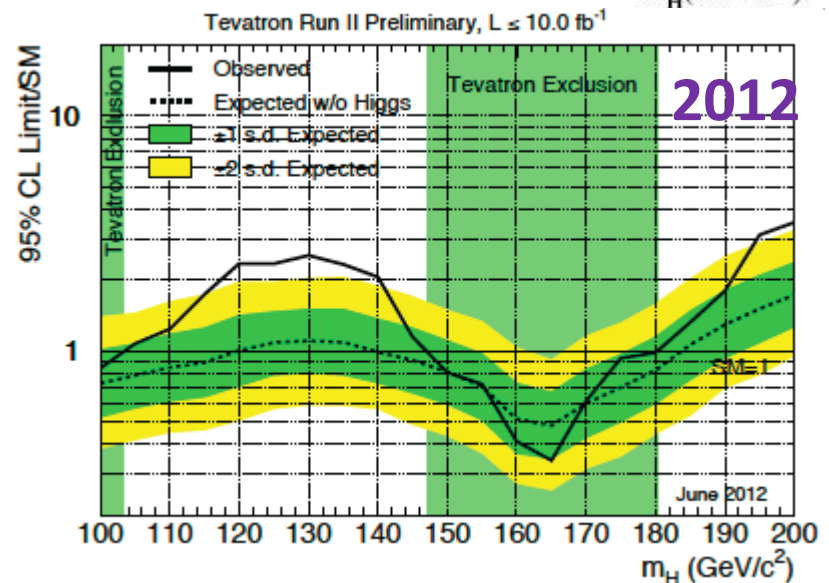
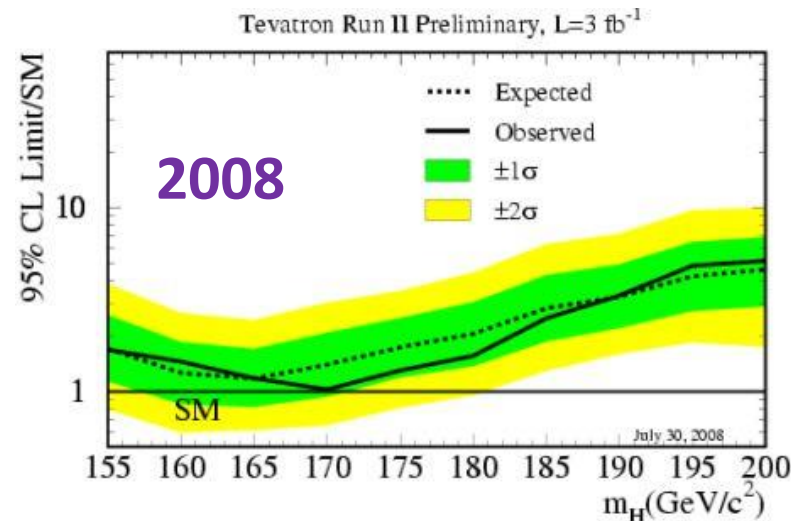
D0

Channel	Luminosity (fb^{-1})	m_H range (GeV/c^2)
$H + (X) \rightarrow \ell\nu + \geq jj$ $(0, 1, \geq 2b\text{-tags}) \times (2, 3, 4 + \text{jet})$	9.7	100-200
$ZH \rightarrow \nu\bar{\nu} b\bar{b}$ (MS, TS)	9.5	100-150
$ZH \rightarrow \ell^+ \ell^- b\bar{b}$ (TST, TLDT) $\times (ee, \mu\mu, eeICR, \mu\mu_{\text{trk}})$	9.7	100-150
$VH \rightarrow e^\pm \mu^\pm + X$	9.7	115-200
$H \rightarrow W^+ W^- \rightarrow \ell^\pm \nu \ell^\mp \nu$ $(0, 1, 2 + \text{jet})$	9.7	115-200
$H \rightarrow W^+ W^- \rightarrow \mu\nu\tau_{\text{had}}\nu$	7.3	115-200
$H \rightarrow W^+ W^- \rightarrow \ell\nu jj$	5.4	130-200
$VH \rightarrow \ell\ell\ell + X$	9.7	100-200
$VH \rightarrow \tau\tau\mu + X$	7.0	115-200
$H \rightarrow \gamma\gamma$	9.7	100-150



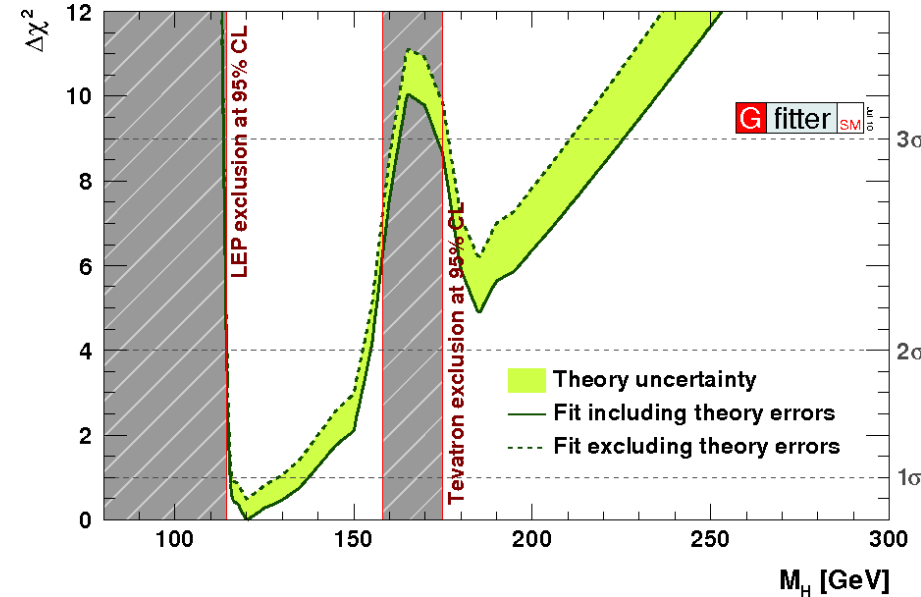
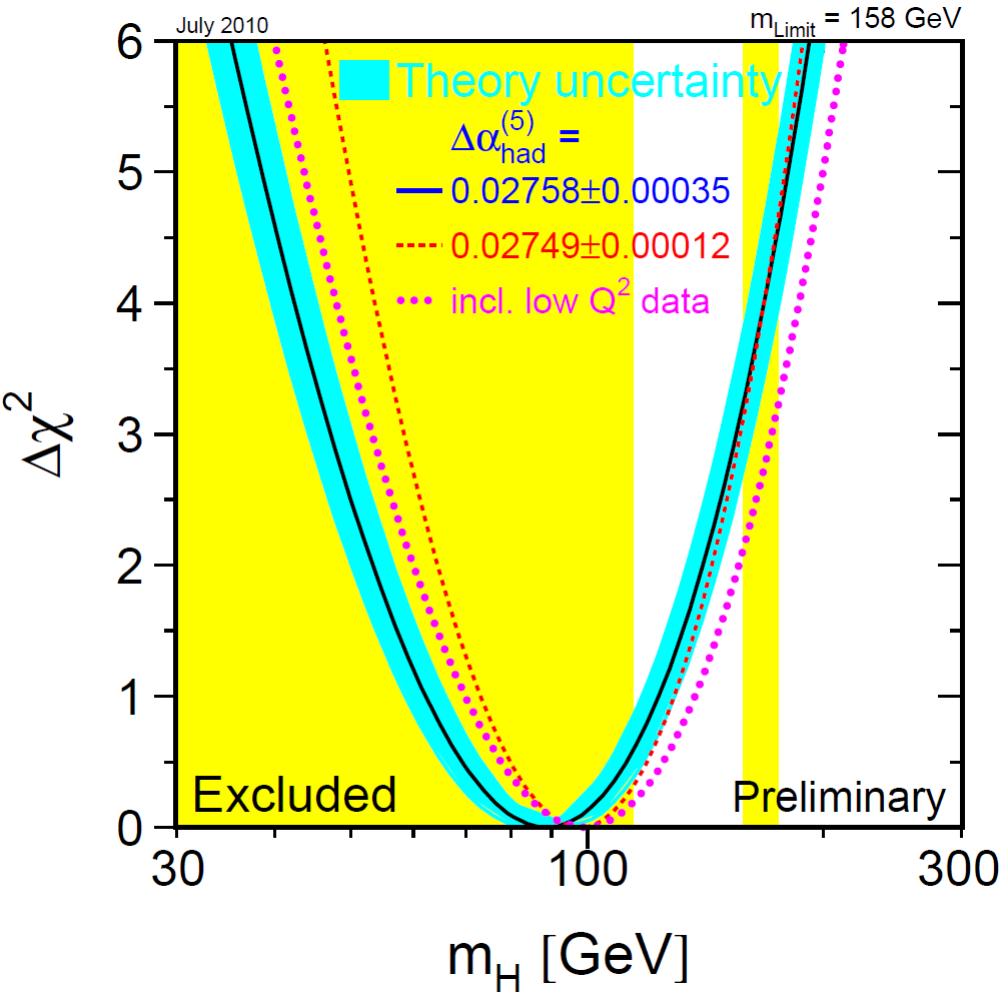
Start excluding... and Now

- 2008年ICHEP @ Pennsylvania
 - 7年ぶりに新たな質量の制限
- 2012年7月Tevatron all data
 - 148-182GeVを棄却
 - 120-130GeV付近に 3σ の超過

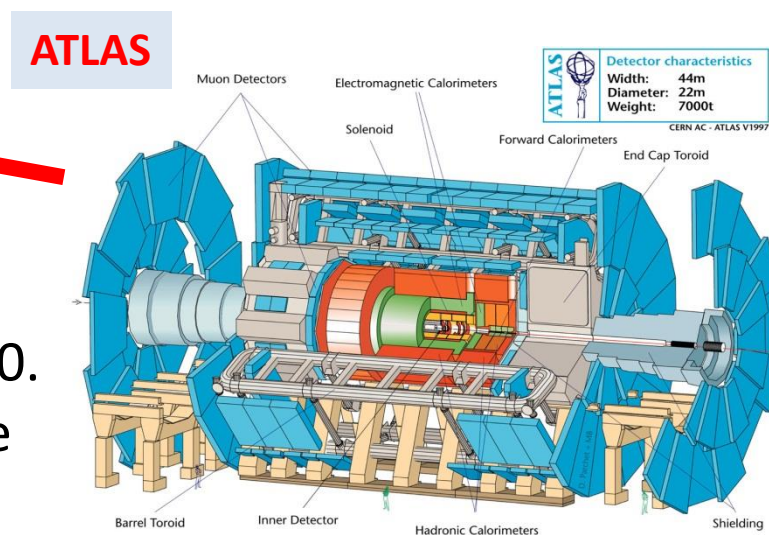
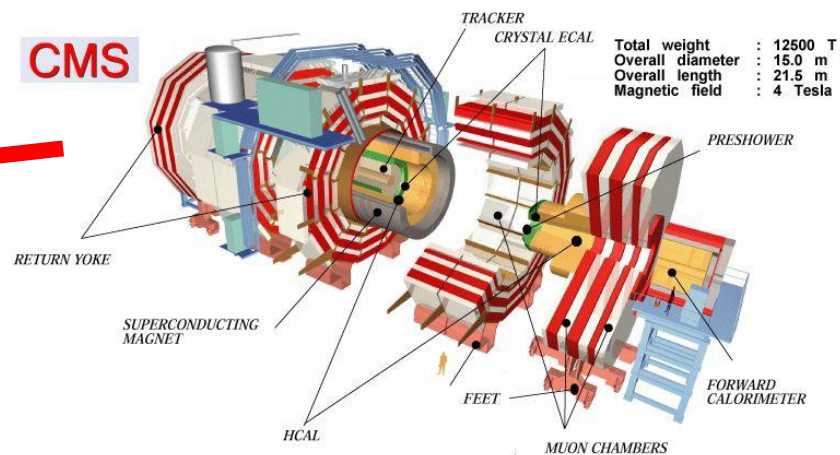
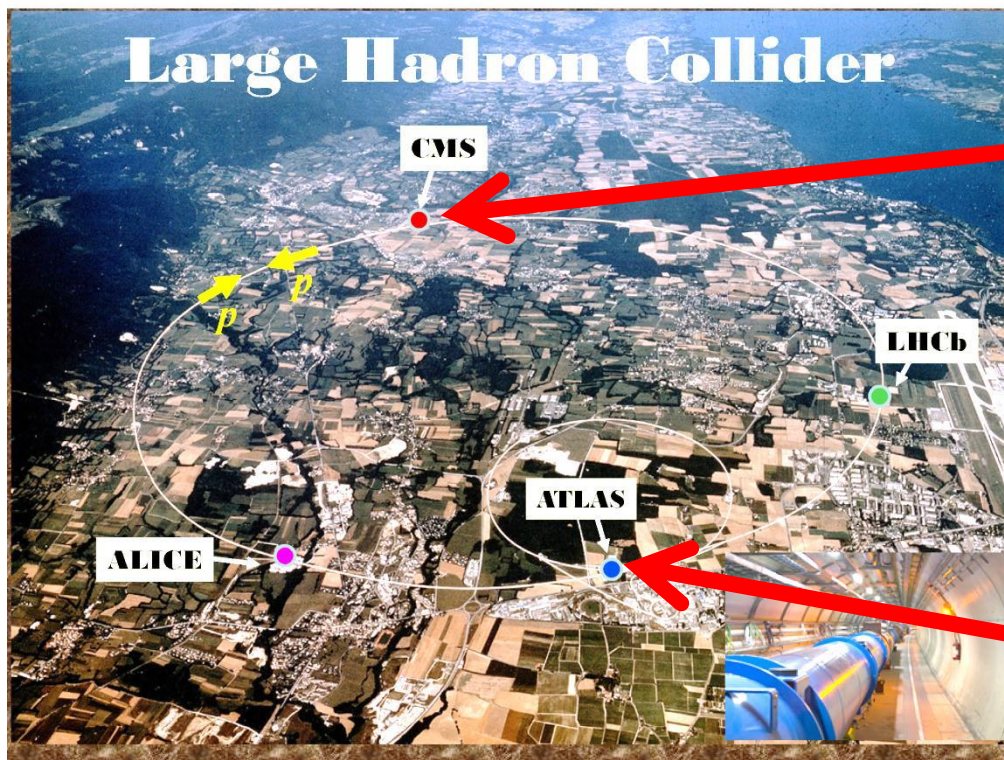


間接測定+直接測定 before LHC

2010年夏



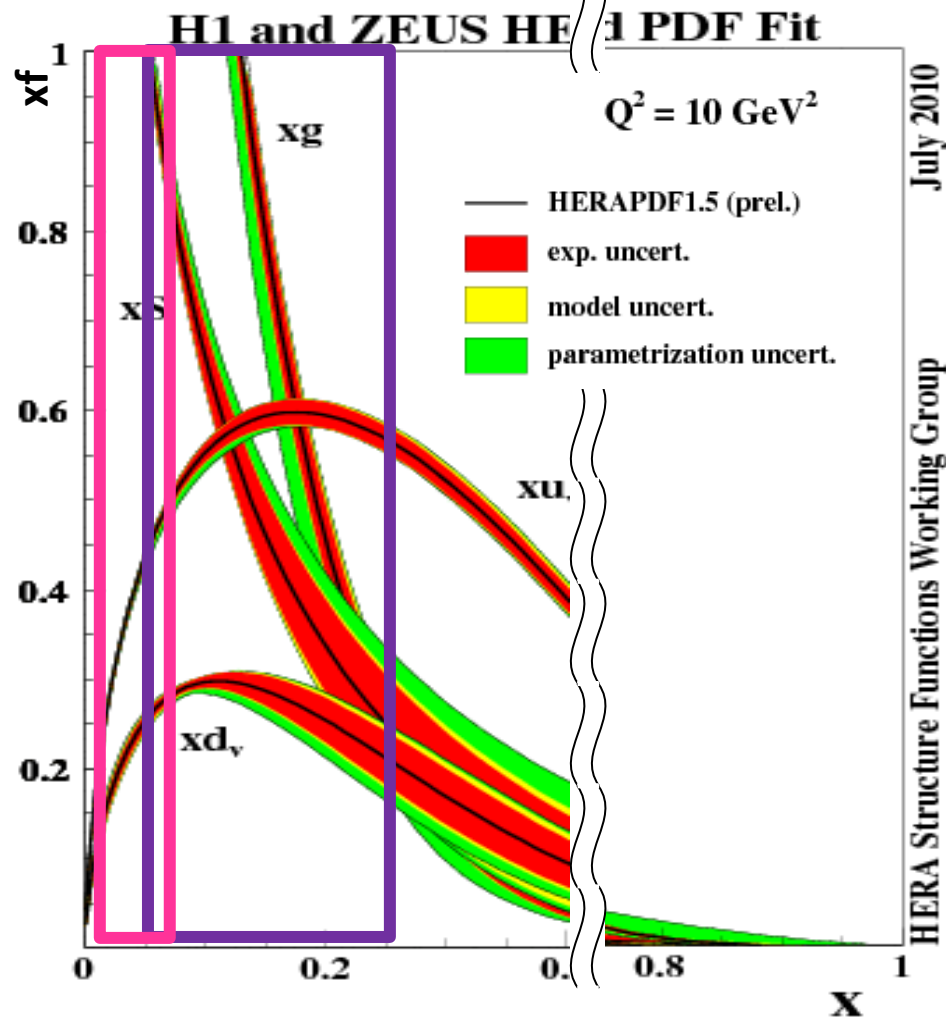
Higgs searches at LHC



- 7TeV collisions are Started in March 2010.
- Extremely successful operation for these 2.3 years.
- Upgraded CM energy to 8TeV in 2012.

Tevatron とLHCの違い I

Parton Distribution Function (PDF)



	Tevatron	LHC
\sqrt{S}	1.96 TeV	7 TeV
ビーム	$p-\bar{p}$	$p-p$
x for $\sqrt{\hat{s}}=100-500\text{GeV}$	0.05-0.25	0.01-0.07

基本的に等量のデータがあればLHCの発見感度が圧倒的。

LHCはquark対から生成される過程の生成断面積がさほど高くない...
 →2ボソンや、軽いヒッグス探索が難しい理由。

Tevatron とLHCの違い II

	115GeV		160GeV	
実験	Tevatron	LHC	Tevatron	LHC
σ_{ggF}	1.24 pb	18.1 pb	0.44 pb	8.35 pb
σ_{VBF}	0.08 pb	1.32 pb	0.39 pb	0.84 pb
$\sigma_{WH/ZH}$	0.29 pb	1.17 pb	0.08 pb	0.33 pb

基本的に生成断面積は、

$$\sigma_{LHC} = 15 \times \sigma_{Tevatron} (ggF M_H=115GeV)$$

$$\sigma_{LHC} = 20 \times \sigma_{Tevatron} (ggF M_H=160GeV)$$

しかし... WH/ZHの生成断面積は、

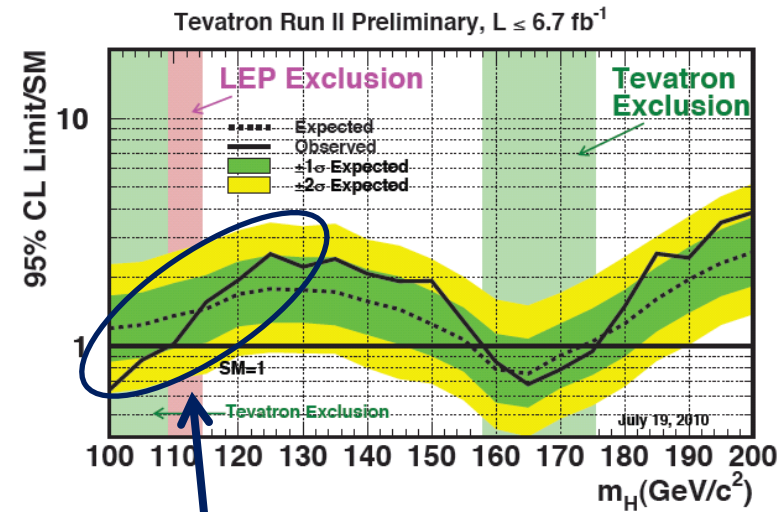
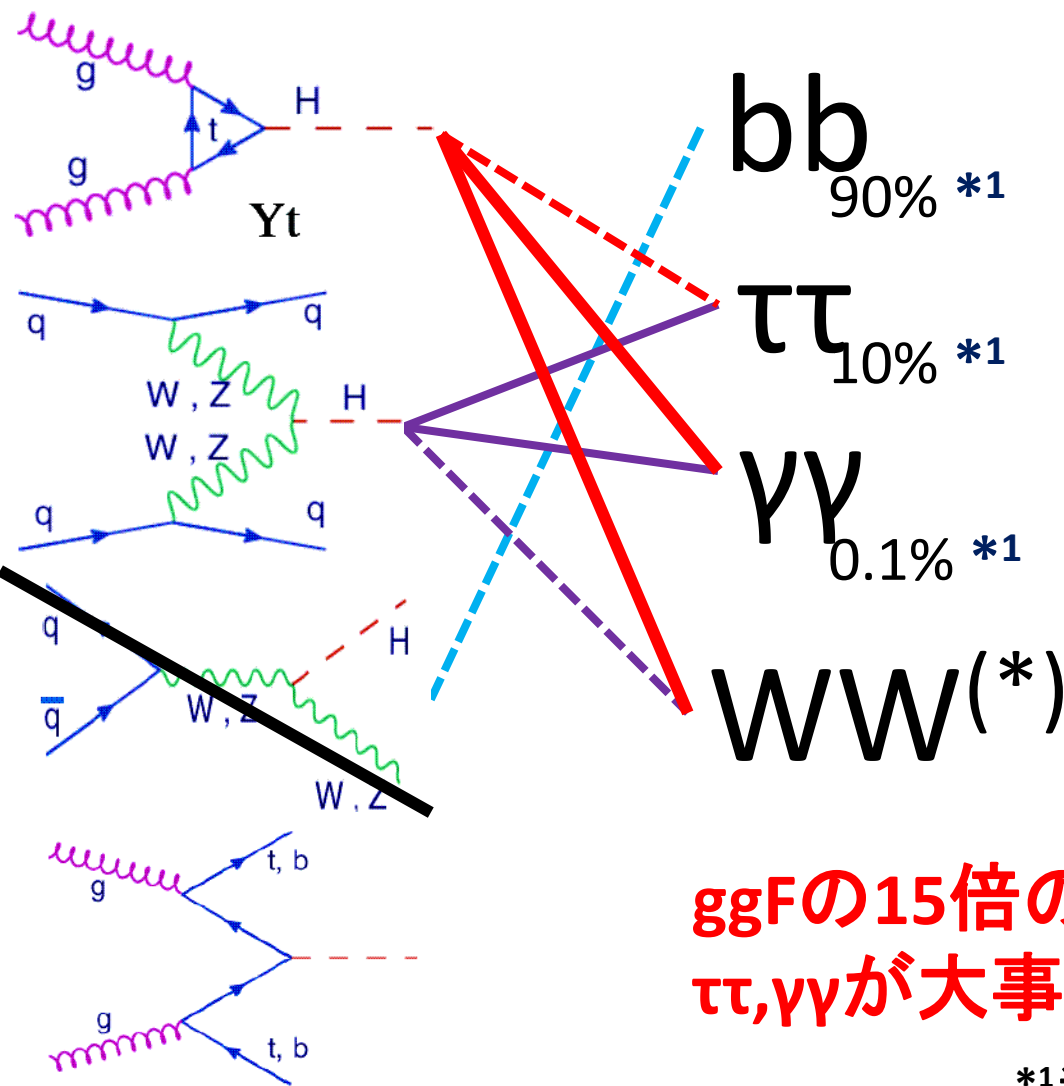
$$\sigma_{LHC} = 4 \times \sigma_{Tevatron} (M_H=115GeV)$$

バックグラウンドプロセスに比べて相対的に小さい

S/Nが同じだと、
115GeV: 450pb⁻¹
160GeV: 340pb⁻¹
でTevatron 6.7fb⁻¹
に相当。

Tevatron とLHCの違い III

WH/ZHが見えないと...
90%の信号を失う*1



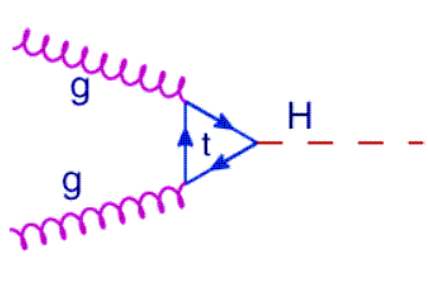
この部分が下がってこない...

ggFの15倍の生成断面積を生かす。
 $\tau\tau, \gamma\gamma$ が大事。WW, ZZもlow ptを攻める。

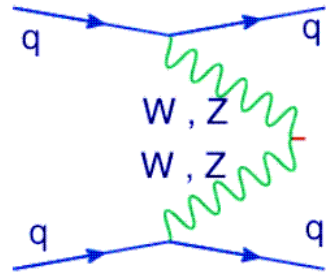
*1当時 $M_H=115\text{GeV}$ を探していたので

Higgs searches at LHC

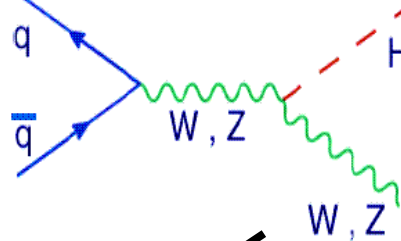
Gluon Fusion (ggF)



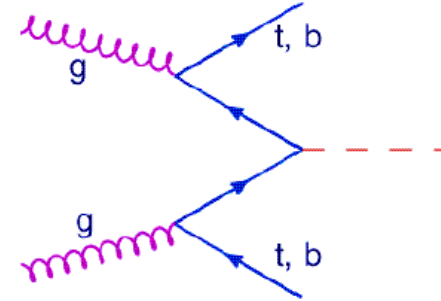
Vector Boson Fusion



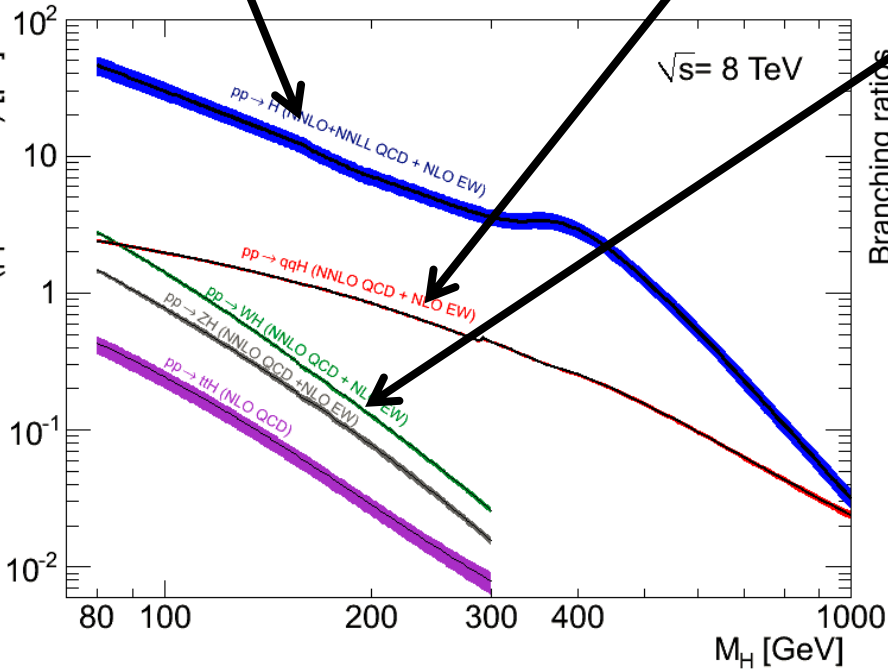
W/Z Associated



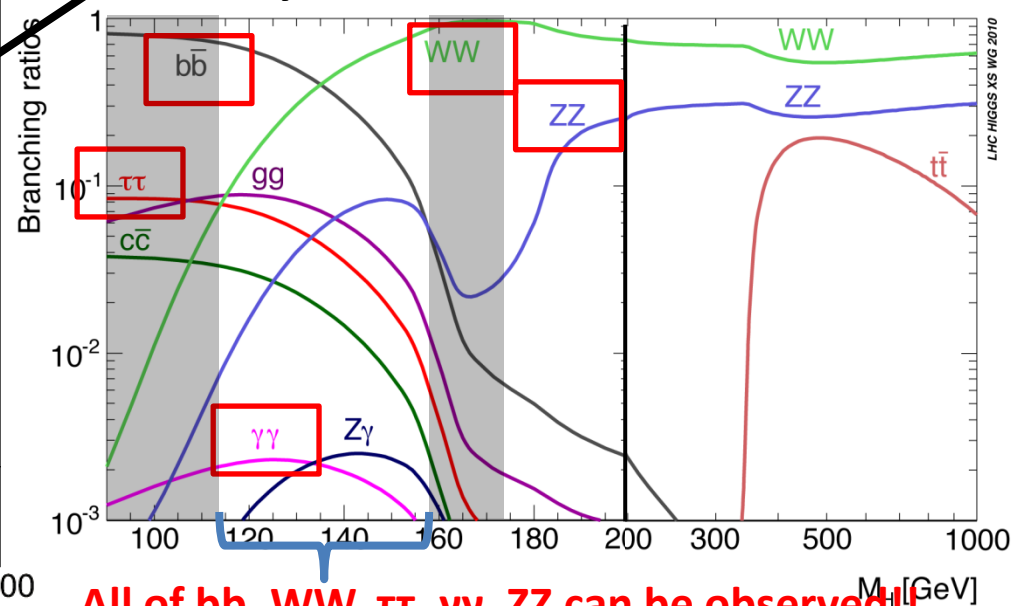
tt/bb Associated



Production

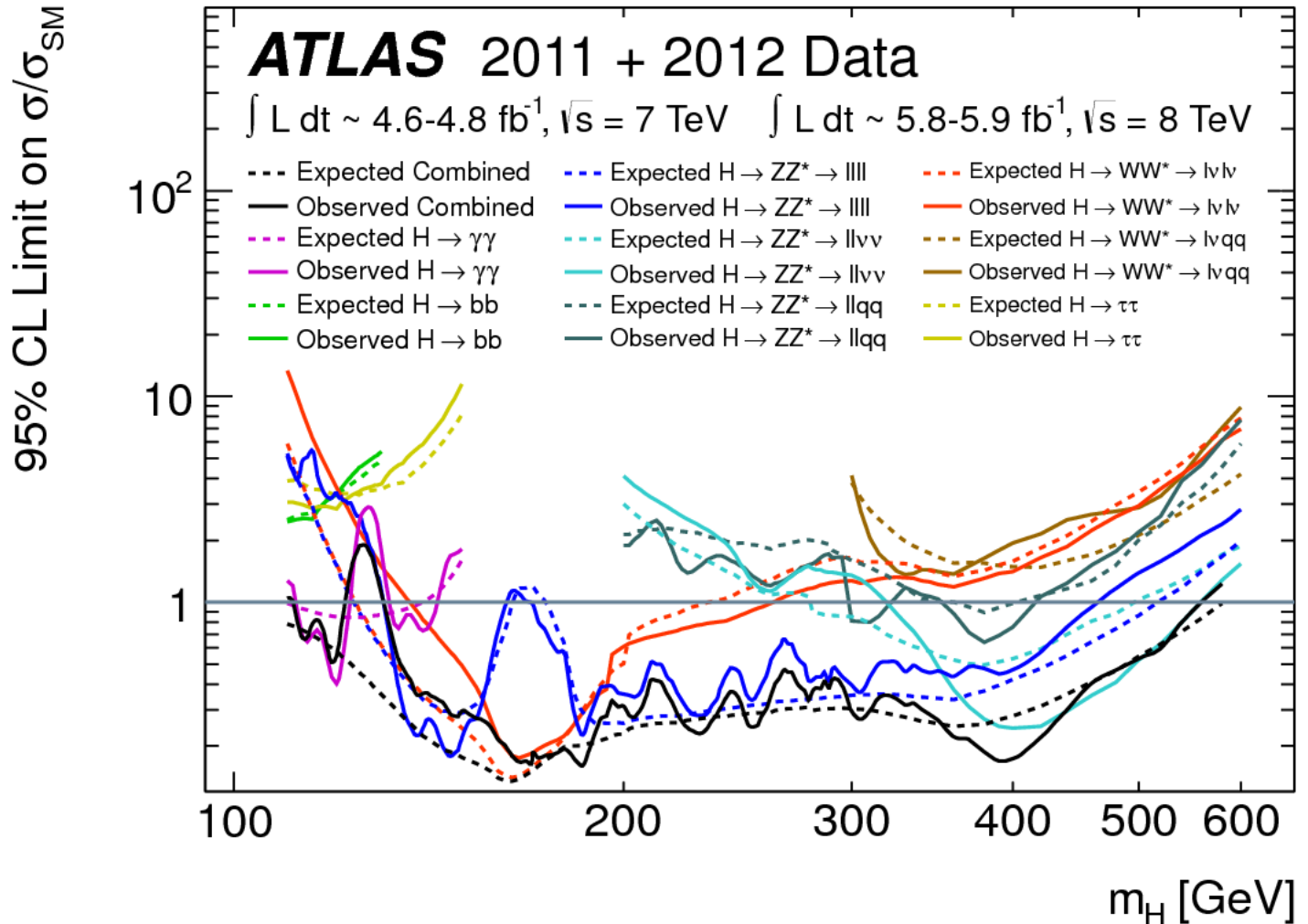


Decay



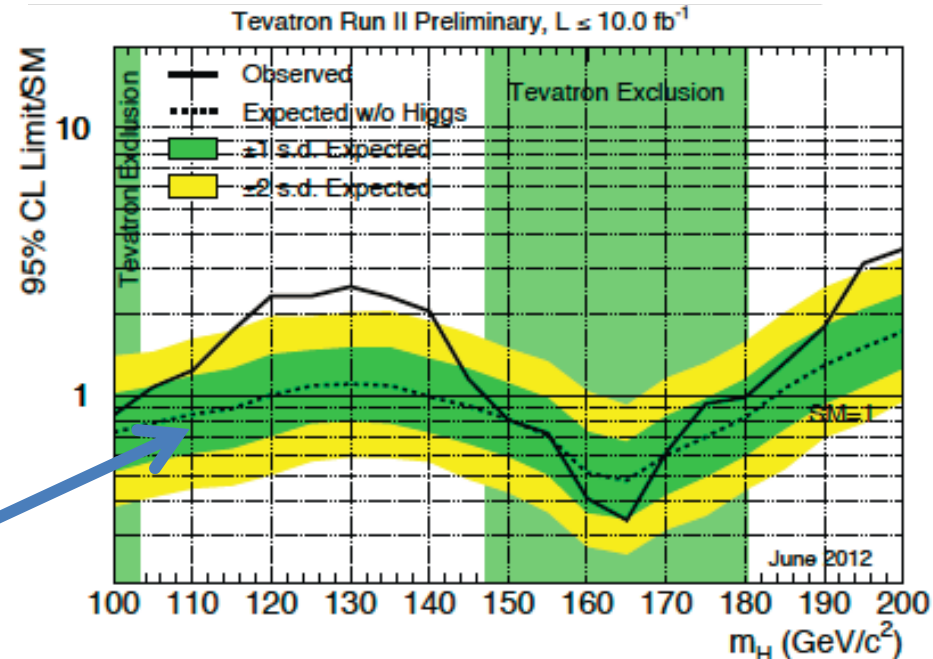
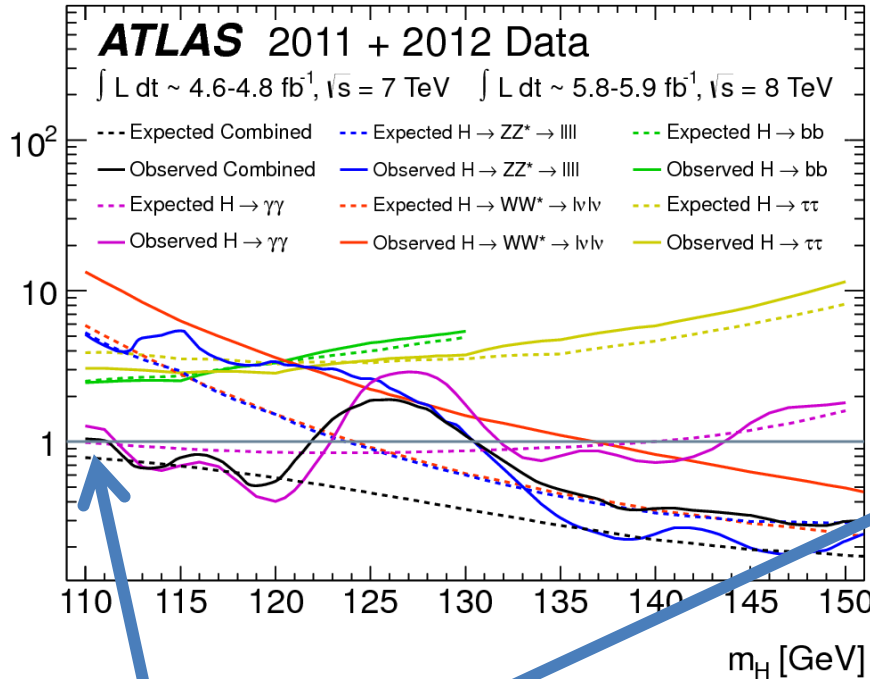
All of bb, WW, $\tau\tau$, $\gamma\gamma$, ZZ can be observed!!

そして幅広い領域に感度

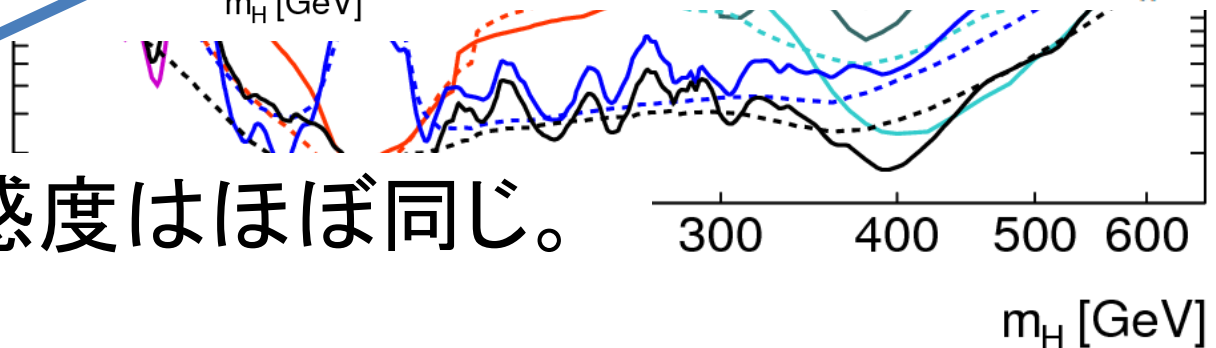


Low mass も Tevatron を超えた。

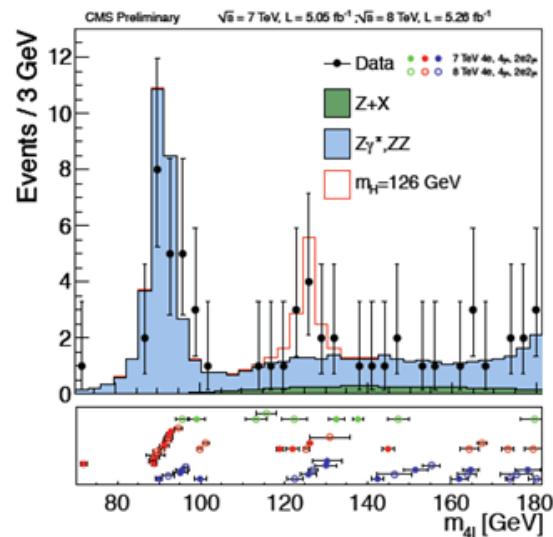
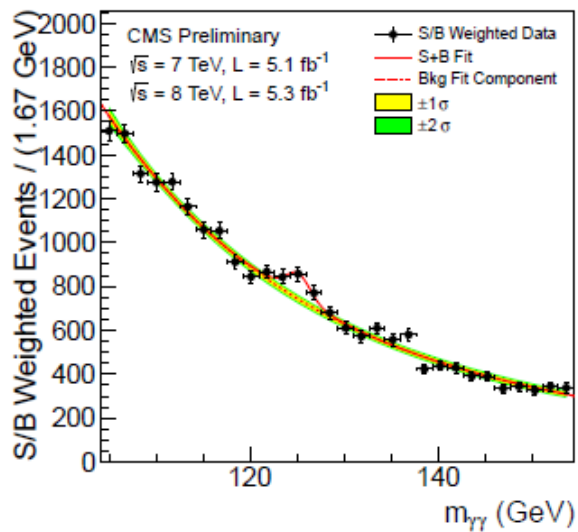
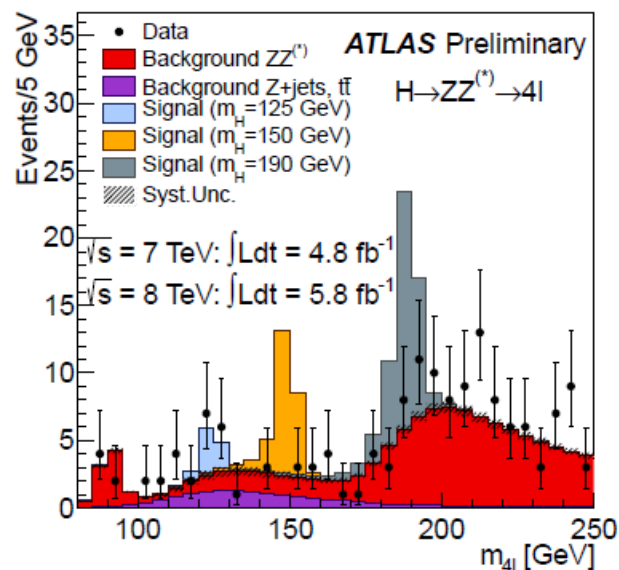
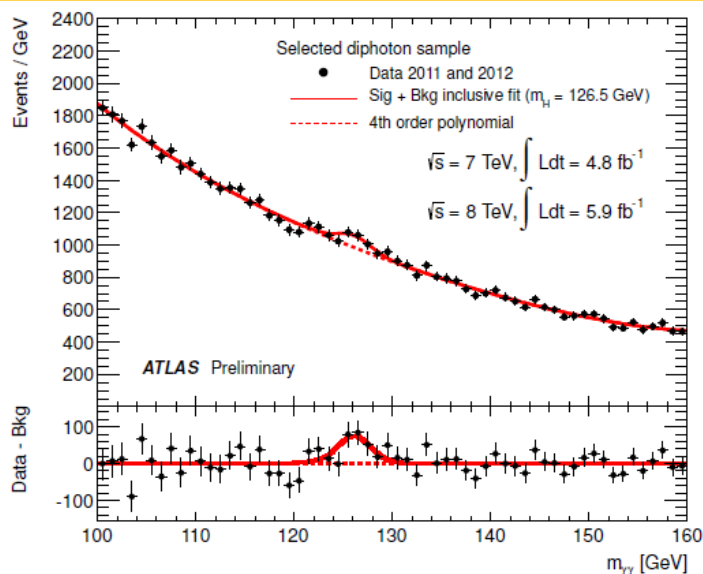
95% CL Limit on σ/σ_{SM}



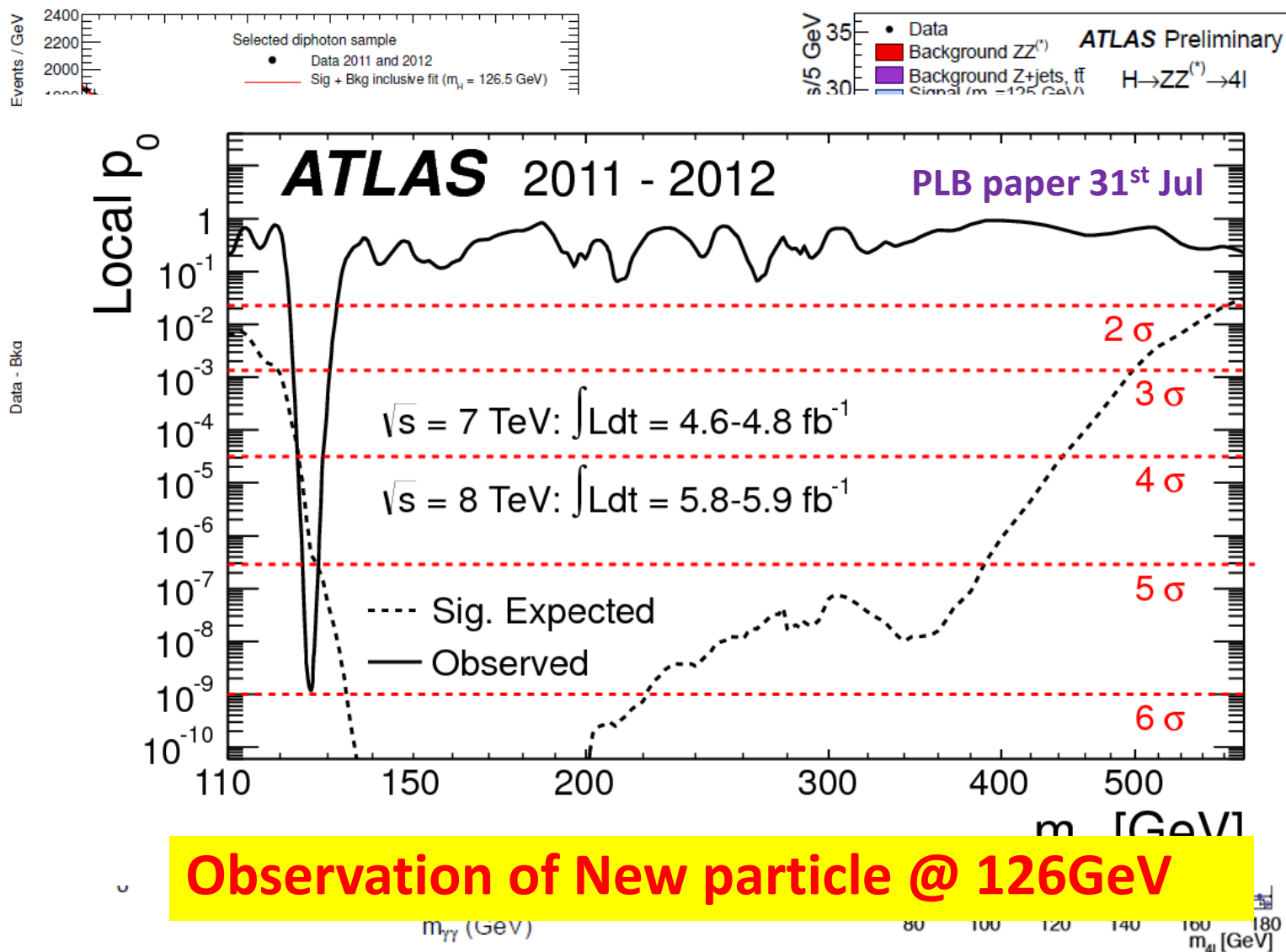
- 110GeVの感度はほぼ同じ。



7月4日



7月4日



物理解析 ~ヒッグス粒子~

2012年7月4日
ヒッグス粒子発見か？

私が生きている間に見つかるとは
思っていなかった！



アングレールさん

ヒッグスさん

CERN歴代の所長さんたち



日本の新聞

物理解析 ~ヒッグス粒子~

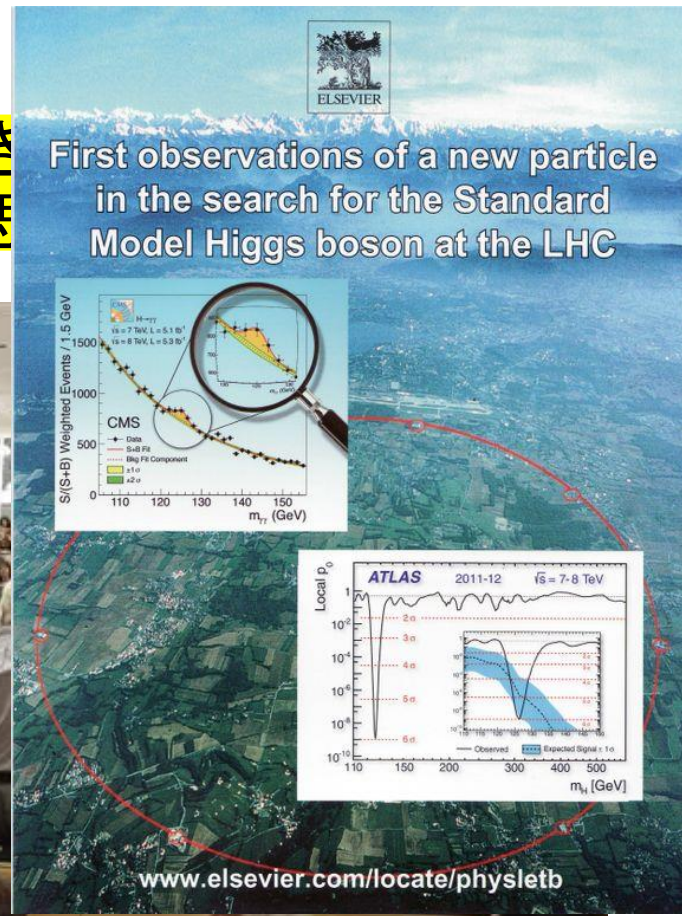
2012年7月4日
ヒッグス粒子発見か？



アングレーールさん

ヒッグスさん

私が生き
思



日本の新聞

日本人の貢献

H \rightarrow $\gamma\gamma$ グループリーダー
田中純一さん(東大)

H \rightarrow WW グループリーダー
増淵達也さん(東大)

H \rightarrow WW グループ会議

H \rightarrow $\tau\tau$ コーディネータ
中村浩二(高エネ研)

H \rightarrow bb グループBBQ

H \rightarrow bb コーディネータ
江成祐二さん(東大)

その他、日本人のスタッフ、博士課程の学生さんも
多大なる貢献をしています。
(東大、高エネ研、阪大、神戸大、筑波大、九州大)

さて、

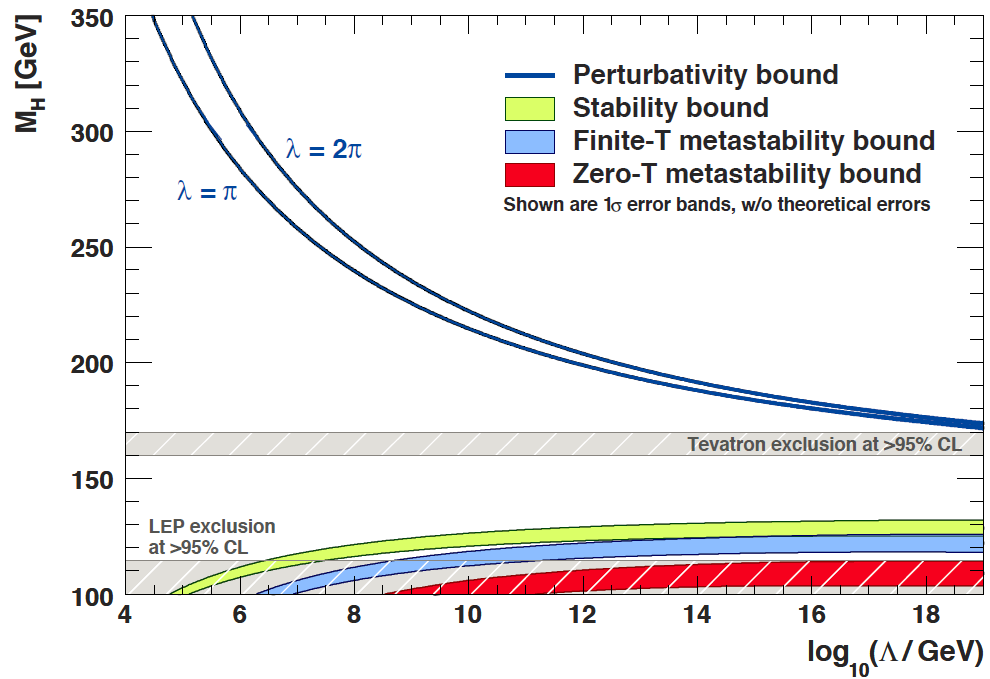
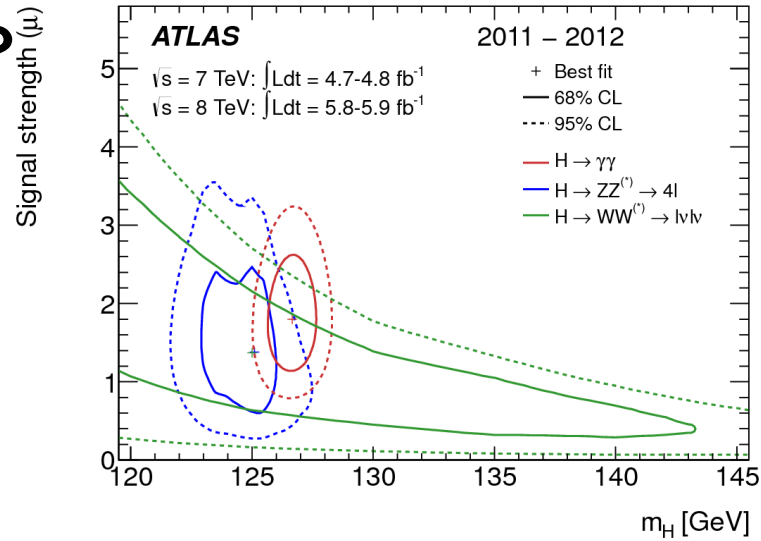
- 発見前と何が変わったのか？

さて、

● 発見前と何が変わったのか？

– 新粒子の質量がわかった！！

$m_H = 126.0 \pm 0.4 \pm 0.4$



さて、

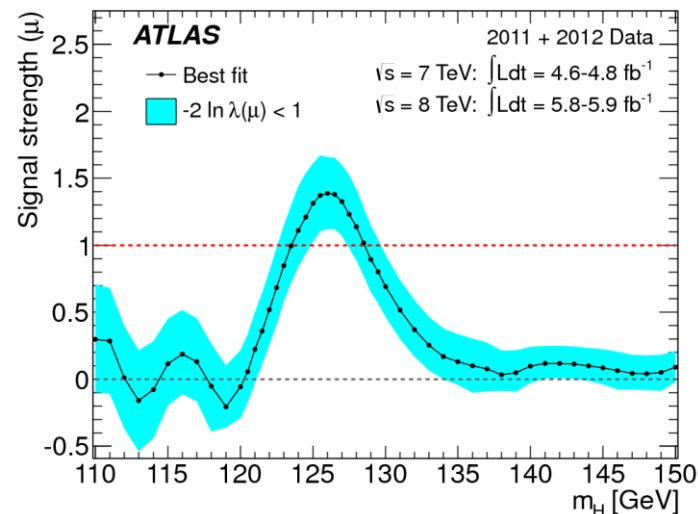
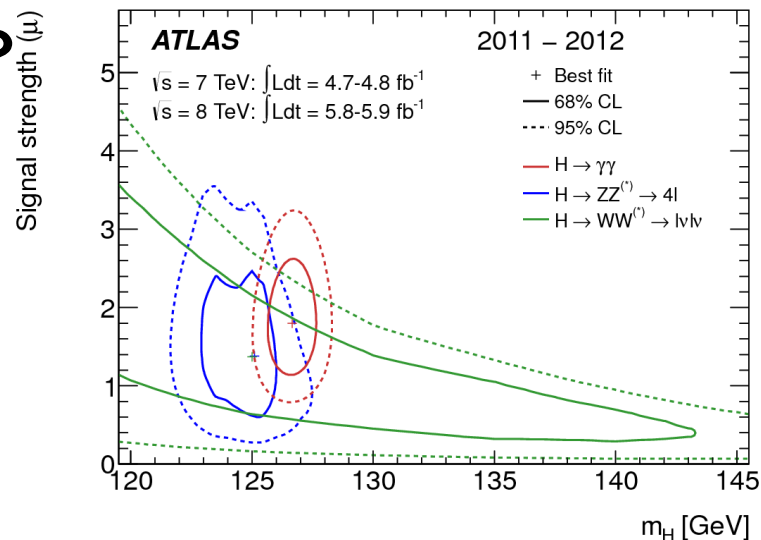
- 発見前と何が変わったのか？

- 新粒子の質量がわかった！！

$$m_H = 126.0 \pm 0.4 \pm 0.4$$

- 断面積も大体わかった。

$$\sigma_H = (1.4 \pm 0.3) \times SM$$



さて、

- 発見前と何が変わったのか？

- 新粒子の質量がわかった！！

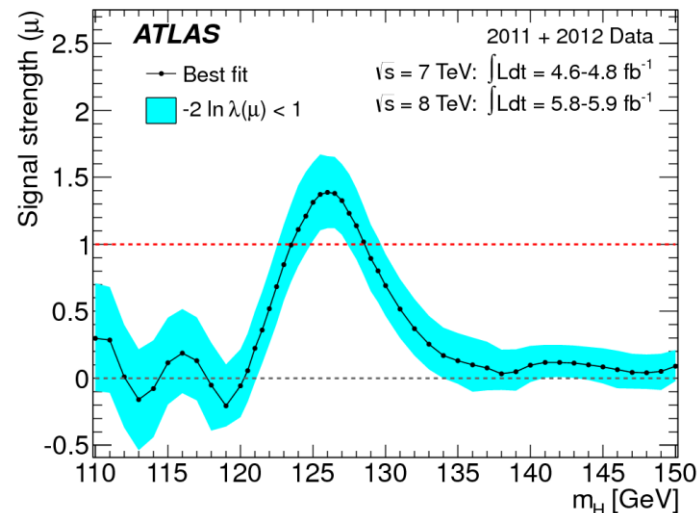
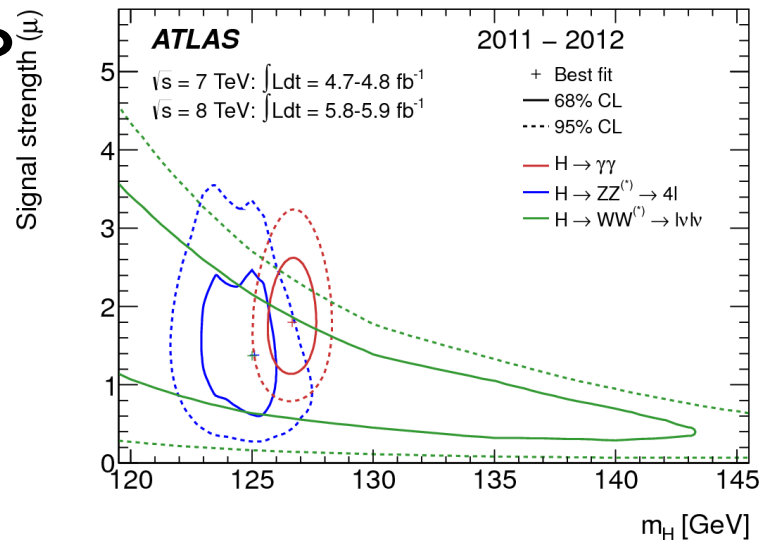
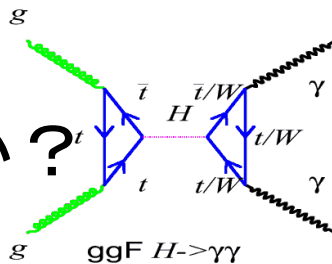
$$m_H = 126.0 \pm 0.4 \pm 0.4$$

- 断面積も大体わかった。

$$\sigma_H = (1.4 \pm 0.3) \times SM$$

- 新粒子はWやZとの結合をもつ。
 - Quarkとの結合もたぶんある。

本当にヒッグスなのか？



Higgsと呼ぶには？

- どうすれば、新粒子をヒッグスと呼べるのか。
- すくなくとも当時CERNはまだこの粒子をヒッグスと呼んでいなかった？
- 明確な基準はないが、たぶん $\tau\tau$, bb の兆候をつかんだとき？(うやむやになってしまったが...)
 - ボソンとのcouplingはすでに検証済み。
 - Directなquark coupling の証拠($H \rightarrow bb, ttH$) **not yet**
 - Directなlepton coupling の証拠($H \rightarrow \tau\tau$) **done**

物理解析の基礎

ハドロンコライダーの解析 1

- 基本的にはバックグラウンドとの闘い

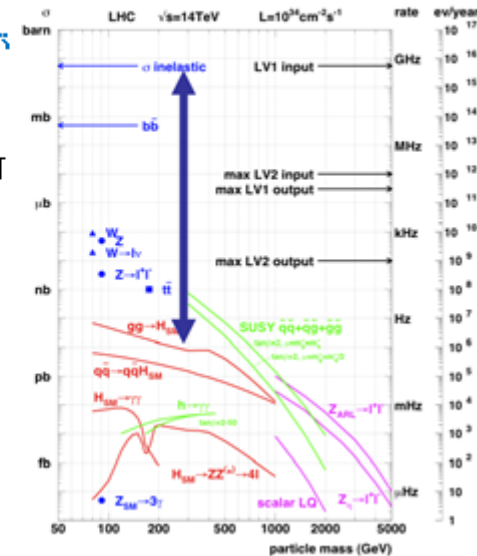
- トリガー(lepton, MET)
 - 検出器を駆使してQCD起源のBkgを除去($\sim 10^9$ くらいおとす) \rightarrow トリガーされたデータでセレクションを掛けずにW,Z,top,dibosonが見えるくらい!

- ヒッグスを見るためには解析でさらにW,Z,top,dibosonを 10^2 - 10^3 落としたい。

- よりきついオブジェクトの同定
- Kinematicsの選択
 - ヒッグスの特徴を持つ事象を選択
 - 背景事象(W, Z, topなど)の特徴がある事象を積極的に落とす。
- カテゴリゼーション
 - 支配的な背景事象が違う領域やS/Nの異なるカテゴリーに分けて解析して最後にコンバイン。

断面積の非常に大きな背景事象

- 見たいプロセスと陽子の非弾性散乱断面積の間に10桁以上の違いがある。
 - つまり、Higgs粒子1事象に対して 10^{10} 事象の背景事象
 - 当然、データを取得することも不可能 \rightarrow trigger(最終的には500Hzくらい)
- 本物っぽい事象だけ記録して後で解析
 - それでも、割と似ている(fake)プロセス(W+jets, Z+jets, トップ対など)は3-5桁以上多くある。
 - 検出器の情報を酷使したり、シミュレーション(モンテカルロ)の助けを借りて信号を探す作業が解析そのもの。



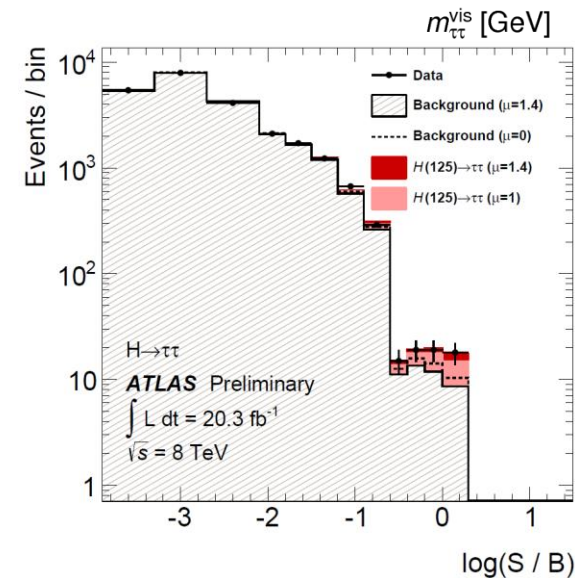
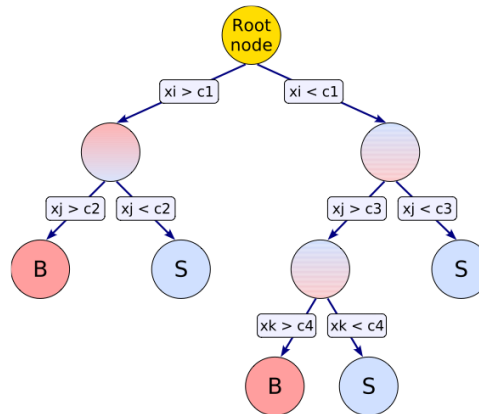
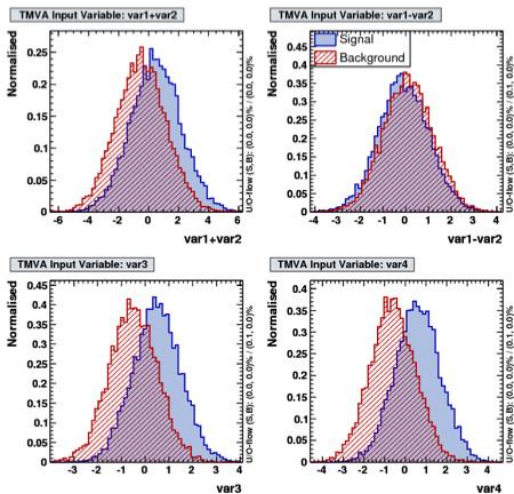
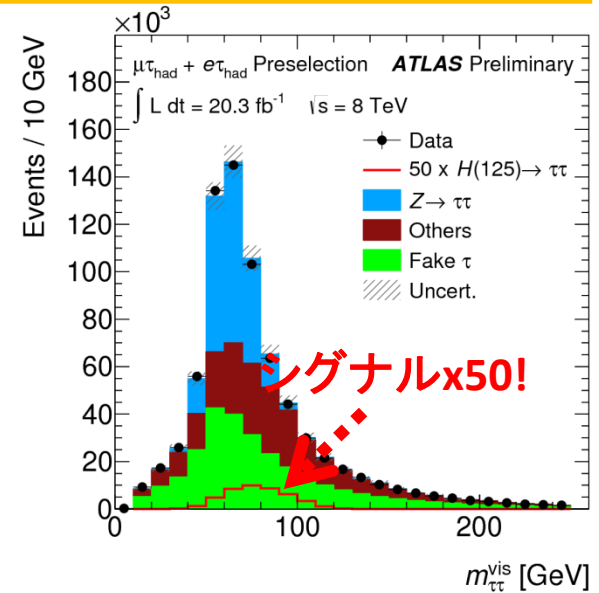
とにかくS/Nをよくするステップ

ハドロンコライダーの解析 2

• それでもどうにもならない場合は...

– 例えば、 $H \rightarrow \tau\tau$

- 事象選択に工夫を重ねてみたもののS/Nは話にならない...
- Multi-variate Analysis (MVA)
 - Kinematics cutをすると信号を若干enhanceできるが数を減らしてしまうようなときカットせずに情報を使って方程式を定義する。(人がやると大変なので実際はTrainingを自動で行う。)
 - いろいろ流派がある(NN, BDT etc...)



ハドロンコライダーの解析 3

背景事象の見積もり

MC手法

- 完全MCを信用する
- 理論/実験の不定性が少ないとき
- ❖ ATLAS MCは割とデータと良い一致を見せている
- ❖ ZZ in H → ZZ → 4l

Control Region(CR)を用いる手法

- 目的の背景事象をenhanceしたCRを定義し、データで背景事象のNormalizationを決める
→ TheoryのX-secに頼らない
- CR → SRはMCを用いる → SRとCRで共通の誤差はキャンセル

$$N_{SR}^{bkg} = N_{CR}^{data} \frac{N_{SR}^{MC}}{N_{CR}^{MC}}$$

- ❖ 特定のphase spaceの理論値の不定性が大きいとき有用
- ❖ WW, top 背景事象 in H → WW analysis

Data-Driven手法

- MCが信用ならないとき(fake lepton, fake MET)
- データで背景事象のNormalization (& shape)を推定
- Fakeする割合をデータで直接観測 → SRに外挿
- “原理的”に全くMCを使わずに背景事象を見積もれる(ミスモデリングはデータに入っている)

$$N_{SR}^{bkg} = \alpha^{data} N_{CR}^{data}$$

- ❖ 系統誤差は基本的に大きい
- ❖ W+jets(fake) in dilepton analysis, QCD(fake) in one-lepton analysis

基本的にハドロンコライダーの実験屋の腕の見せ所！
これを間違えると簡単にexcessを作る。
→そして論文を見てもはっきりと間違っているかわからない

基本的には間違った解析は内部レビューでつぶしています。

系統誤差の見積もり

- 基本的によくわからないので系統誤差になるので、決まった方法はない。
 - だからと言って、excessを消すために系統誤差を大きくしたり...感度を上げるために系統誤差を小さくするのは論外
 - とはいえ、間違った結果を出すのはやはり怖いので、conservativeになるのは許してください。
 - Statとsysの誤差が並べて書いてありますが、2乗和のrootを取るのはいやっぱり厳密には正しくない。
 - 2sigmaのexcessをもつ解析が全解析の5%ないとおかしいという議論もありますが、これも系統誤差を大きめにつけているから実際はもっと少ないですね。
 - **大事なことはATLAS実験(理想的にはCMSとも)で共通の方法を使うこと。基本的にこの方針でつけています。**

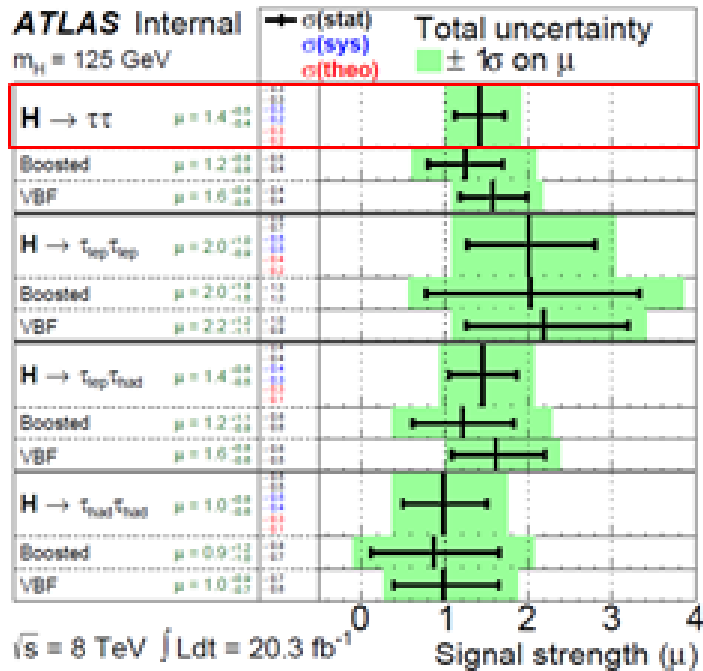
系統誤差の例

Significance and Signal strength

For $m_H=125\text{GeV}$,

Evidence of $H \rightarrow \tau\tau$ decay!

$$p_0^{\text{exp}} = 6.2 \times 10^{-4} (3.2\sigma), \quad p_0^{\text{obs}} = 1.9 \times 10^{-5} (4.1\sigma)$$



Assuming $m_H=125\text{GeV}$:

$$\mu_{\text{best}} = 1.4 + 0.5 - 0.4$$

Impact of uncertainty sources

Source of Uncertainty	Uncertainty on μ
Signal region statistics (data)	0.30
$Z \rightarrow \ell\ell$ normalization ($\tau_{\text{lep}}\tau_{\text{had}}$ boosted)	0.13
ggF $d\sigma/dp_T^H$	0.12
JES η calibration	0.12
Top normalization ($\tau_{\text{lep}}\tau_{\text{had}}$ VBF)	0.12
Top normalization ($\tau_{\text{lep}}\tau_{\text{had}}$ boosted)	0.12
$Z \rightarrow \ell\ell$ normalization ($\tau_{\text{lep}}\tau_{\text{had}}$ VBF)	0.12
QCD scale	0.07
$di\text{-}\tau_{\text{had}}$ trigger efficiency	0.07
Fake backgrounds ($\tau_{\text{lep}}\tau_{\text{lep}}$)	0.07
τ_{had} identification efficiency	0.06
$Z \rightarrow \tau^+\tau^-$ normalization ($\tau_{\text{lep}}\tau_{\text{had}}$)	0.06
τ_{had} energy scale	0.06

背景事象の見積もり
 コントロール領域の
 規格化

理論の不定性

オブジェクト選択