



Prospects for TeV Scale New Physics at LHC

岡山大学 理学部

田中 礼三郎

2004年11月25日

東京大学宇宙線研究所 (ICRR)

話の内容

1. はじめに
2. LHC加速器とアトラス実験
3. EWSB – ヒッグス機構
4. 超対称性理論 (SUSY)
5. 標準理論を超える物理
6. QCDの物理
7. まとめ

1. はじめに

20世紀末の素粒子物理学

標準理論の大きな成功

W/Z/topの発見

ニュートリノは3世代(質量がある)

ゲージ理論の精密検証

21世紀の素粒子物理学

エネルギー・フロンティアで目指す物理

EWSBの解明

ヒッグス機構

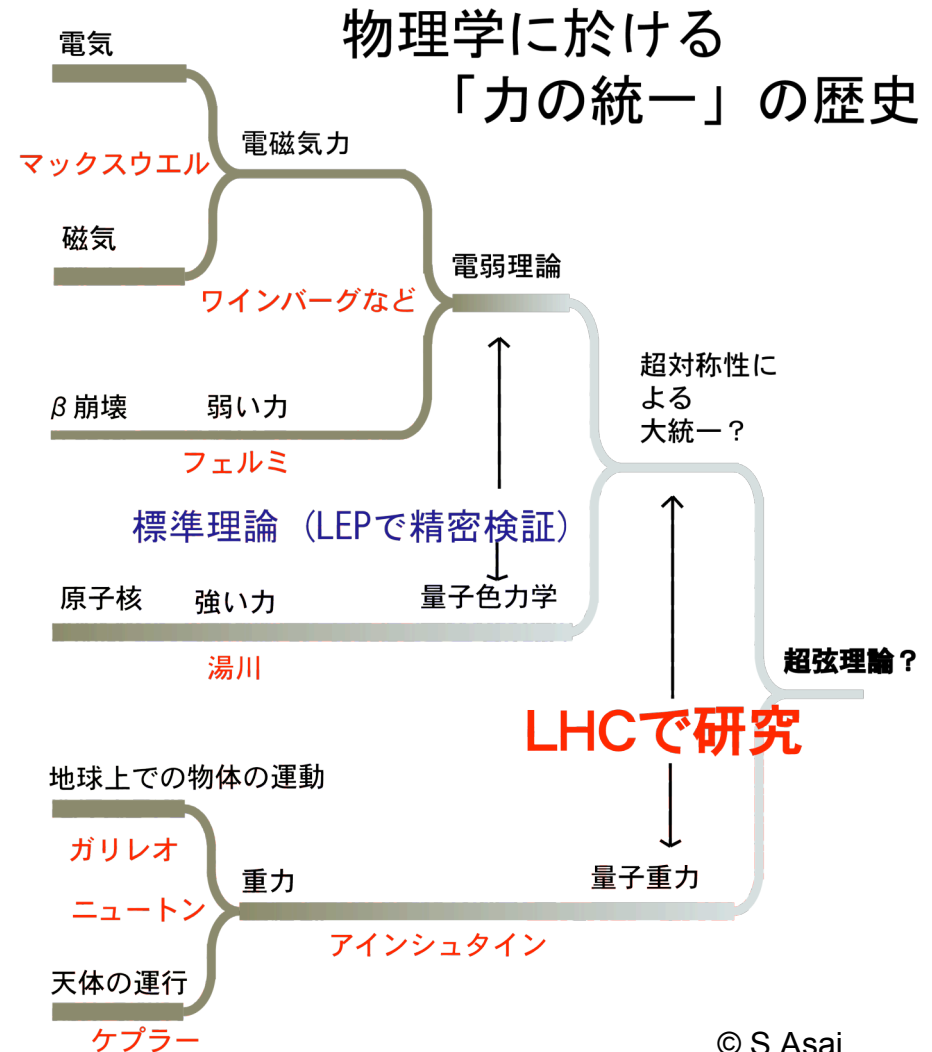
湯川結合、ヒッグス凝縮

ヒエラルキー問題、ナチュラルネス



標準理論を超えるTeV領域の物理を直接探索

超対称性理論、余剰次元 etc.



© S.Asai

TeV領域の物理とLHC

🍏 TeV領域に新しい物理がある。ハズ

- ✓ SM without Higgs violates unitarity ($W_L W_L \rightarrow W_L W_L$) at 1.3TeV !
- ✓ Higgs field vacuum expectation value $v=246$ GeV.
- ✓ Evidence for light Higgs ($M_H < 260$ GeV@95%C.L).
- ✓ Dark matter consistent with (sub-)TeV scale WIMP (ex.SUSY-LSP).
etc.

🍏 LHCは初めてTeV領域の物理を直接探索する。

- Electroweak Symmetry Breaking の起源
 - ヒッグス場、Composite、その他？
- 量子重力理論との統一
 - String理論
- エネルギー次元→数TeV、 空間、 時間 10^{-12} secまで遡る。

Standard Model Lagrangian

R. Barbieri, hep-ph/0410223

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + i\bar{\psi}D\psi$$

$$+ \psi_i \lambda_{ij} \psi_j h + h.c.$$

$$+ |D_\mu h|^2 - V(h)$$

$$+ \frac{1}{M} L_i \lambda_{ij}^\nu L_j h^2 \text{ or } L_i \lambda_{ij}^\nu N_j$$

実験的検証

The gauge sector LEP, SLC, Tevatron

The flavor sector Bファクトリー

The EWSB sector LHC

The ν-mass sector ニュートリノ実験

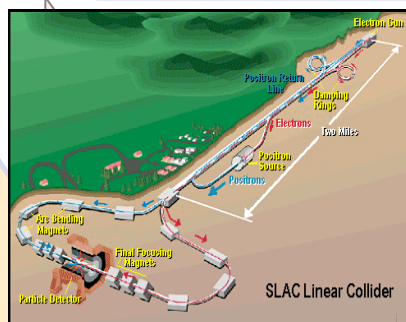
エネルギー・フロンティア加速器

e^+e^- TRISTAN
60 GeV

e^+e^- SLC
91 GeV

e^+e^- LEP
91-209 GeV

e^+e^- ILC
91-1000 GeV



2007年
LHC開始

1985

1990

1995

2000

2005

2010

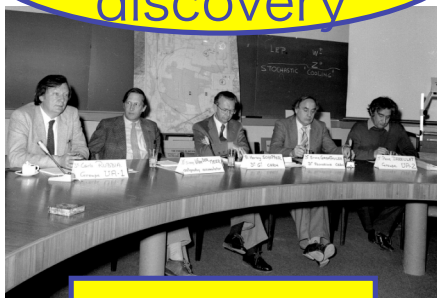
2015

2020

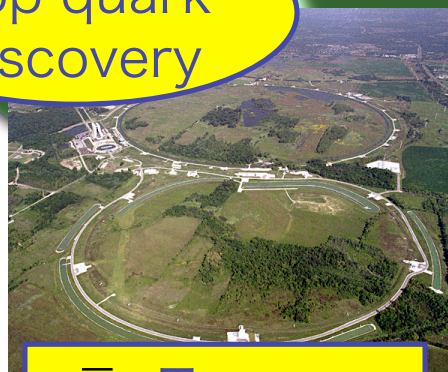
W, Z boson
discovery

Top quark
discovery

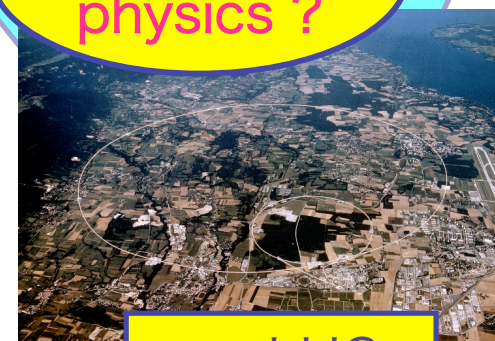
TeV new
physics ?



$p\bar{p}$ Sp $p\bar{p}$ S
600 GeV



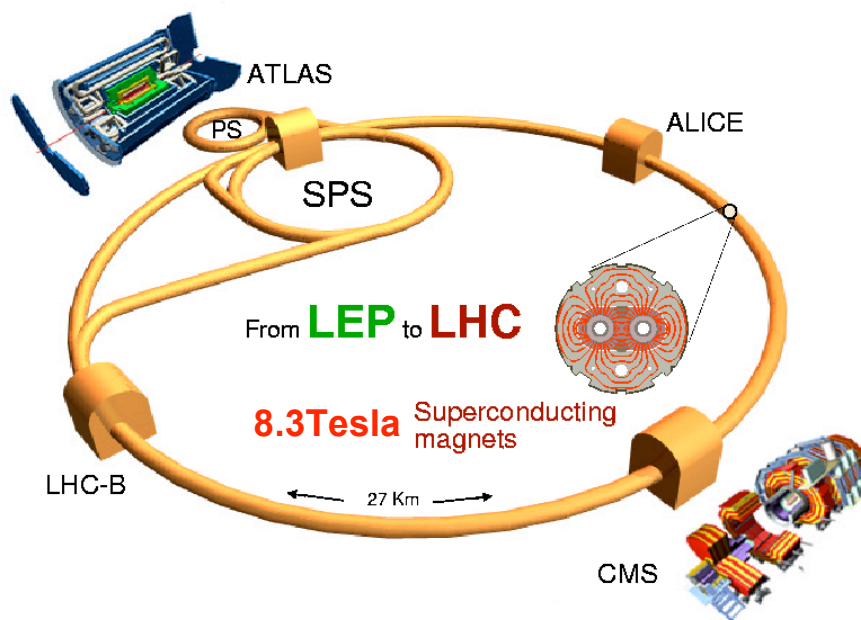
$p\bar{p}$ Tevatron
1.80-1.96 TeV



pp LHC
14 TeV

2. LHC加速器とアトラス実験

The Large Hadron Collider (LHC)



	Beams	Energy	Luminosity
LEP	$e^+ e^-$	200 GeV	$10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
LHC	$p p$	14 TeV	10^{34}
	$Pb Pb$	1312 TeV	10^{27}

予定

2007年4月 加速器コミッショニング
(シングル・ビーム)

2007年夏 衝突実験開始(2ビーム)

43+43バンチ

$L=6 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

4ヶ月+2〜3ヶ月シャットダウン(?)の後

2808+2808バンチ

$L=2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

7ヶ月 Physics RUN

初年度のルミノシティー $1 \sim 10 \text{ fb}^{-1}$

最初の3年 Low Lumi. ($10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) $10 \text{ fb}^{-1}/\text{yr}$

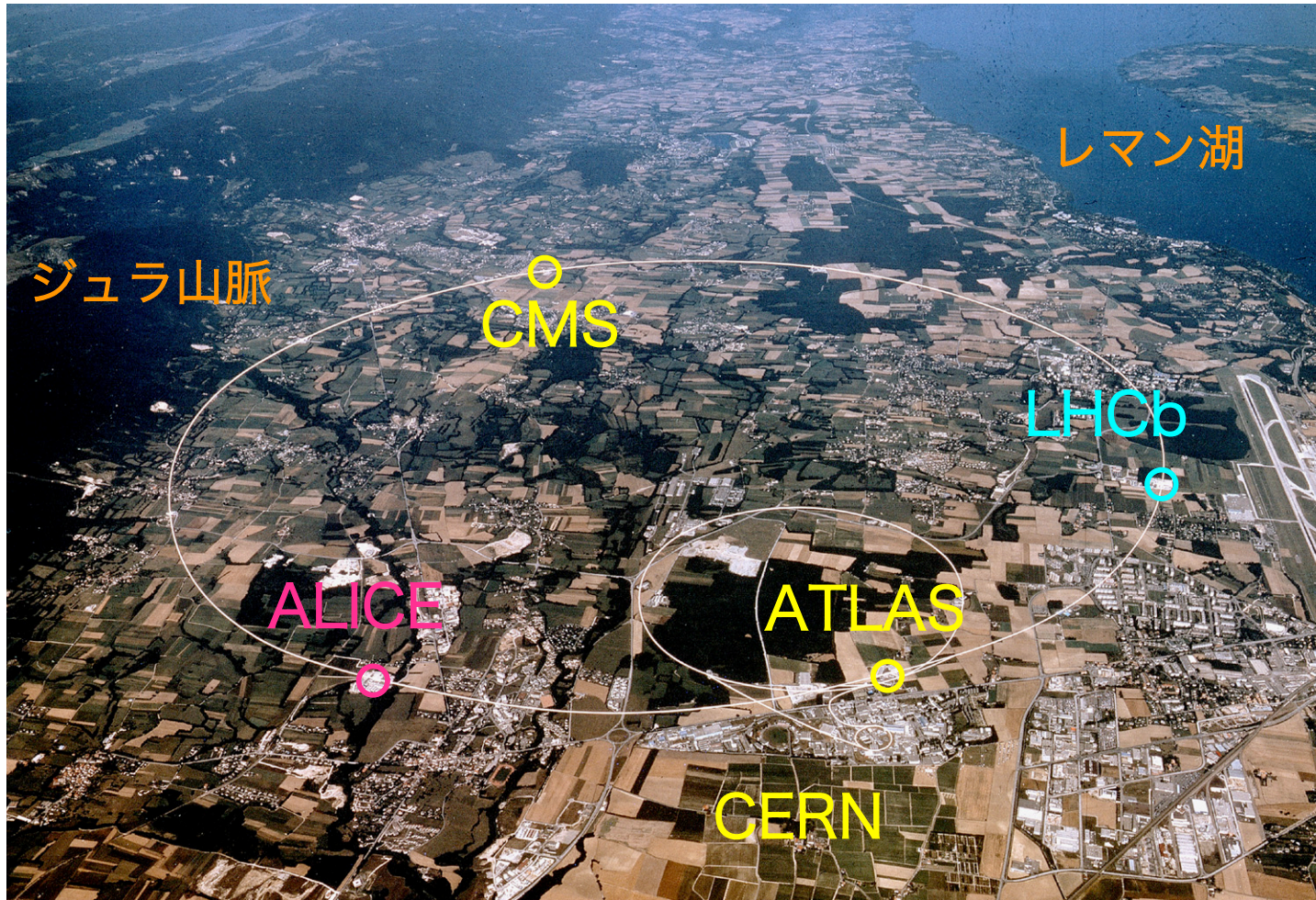
→ 2009年までに 30 fb^{-1}

その後 High Lumi. ($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) $100 \text{ fb}^{-1}/\text{yr}$

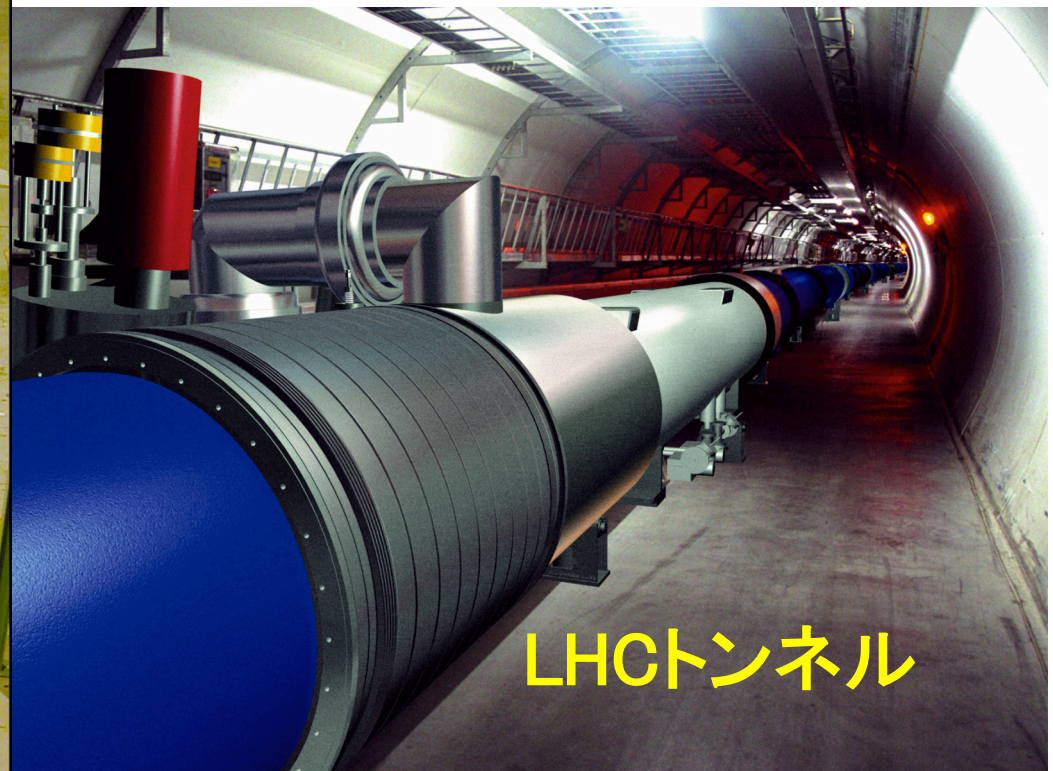
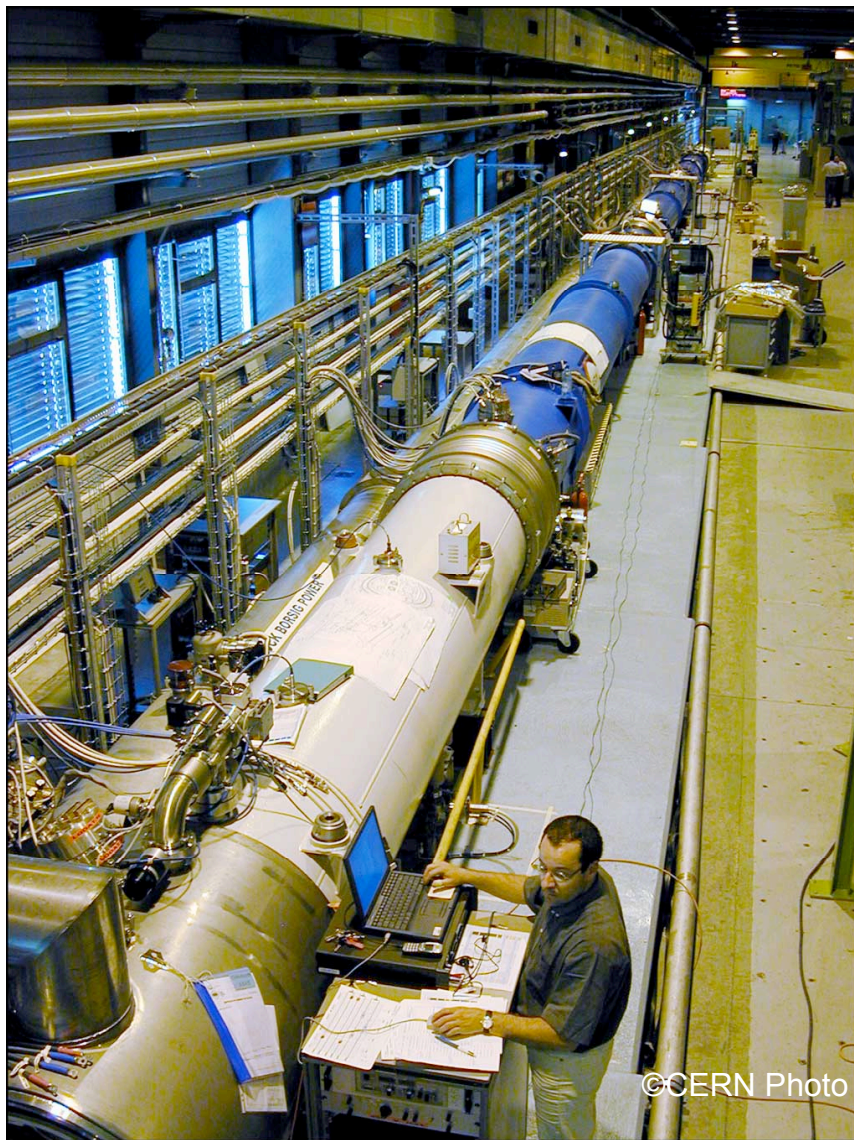
✓ 最初の検出器は、ステージされる。

- 2/3ピクセル・レイヤー、HLT etc.
- 主にBの物理に影響。

CERN



8.3 Tesla Superconducting Magnets



A Toroidal LHC Apparatus (ATLAS)

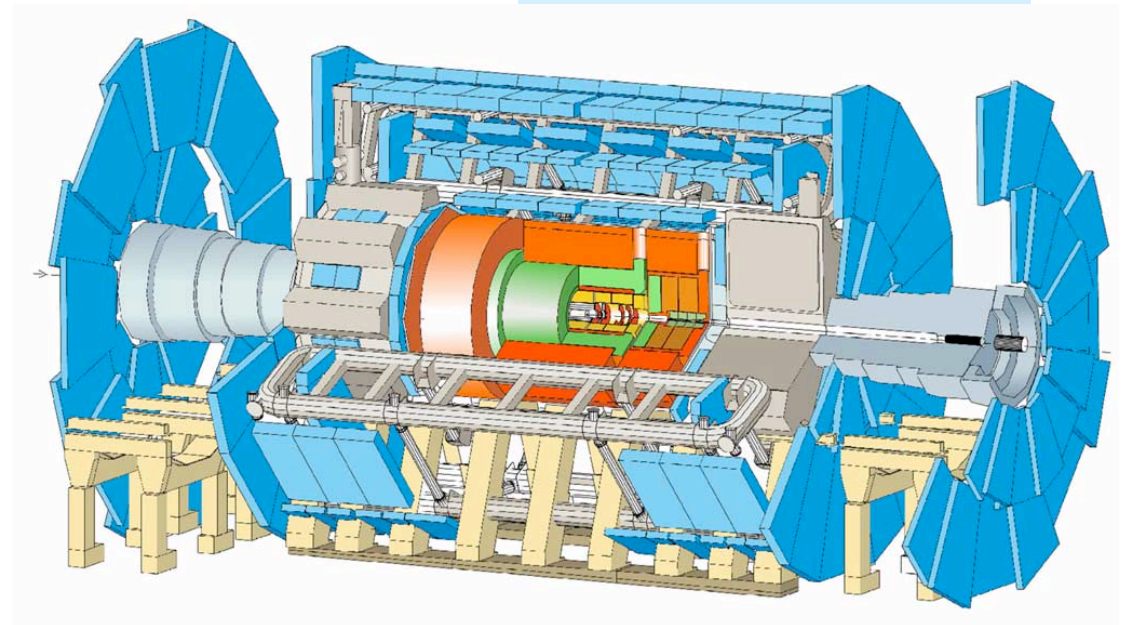
- Liq.Ar EM calorimeter
good e/γ id, energy, E_T^{miss}
- Muon spectrometer
air-core toroidal magnet
 $\int B dl = 2\sim 6\text{Tm}$ ($4\sim 8\text{Tm}$)
- Inner tracking system
pixel, silicon strip, TRT
2T solenoid magnet
good e/γ id, τ/b -tag

ATLAS detector

Tracker $|\eta| < 2.5$

Calorimeter $|\eta| < 4.9$

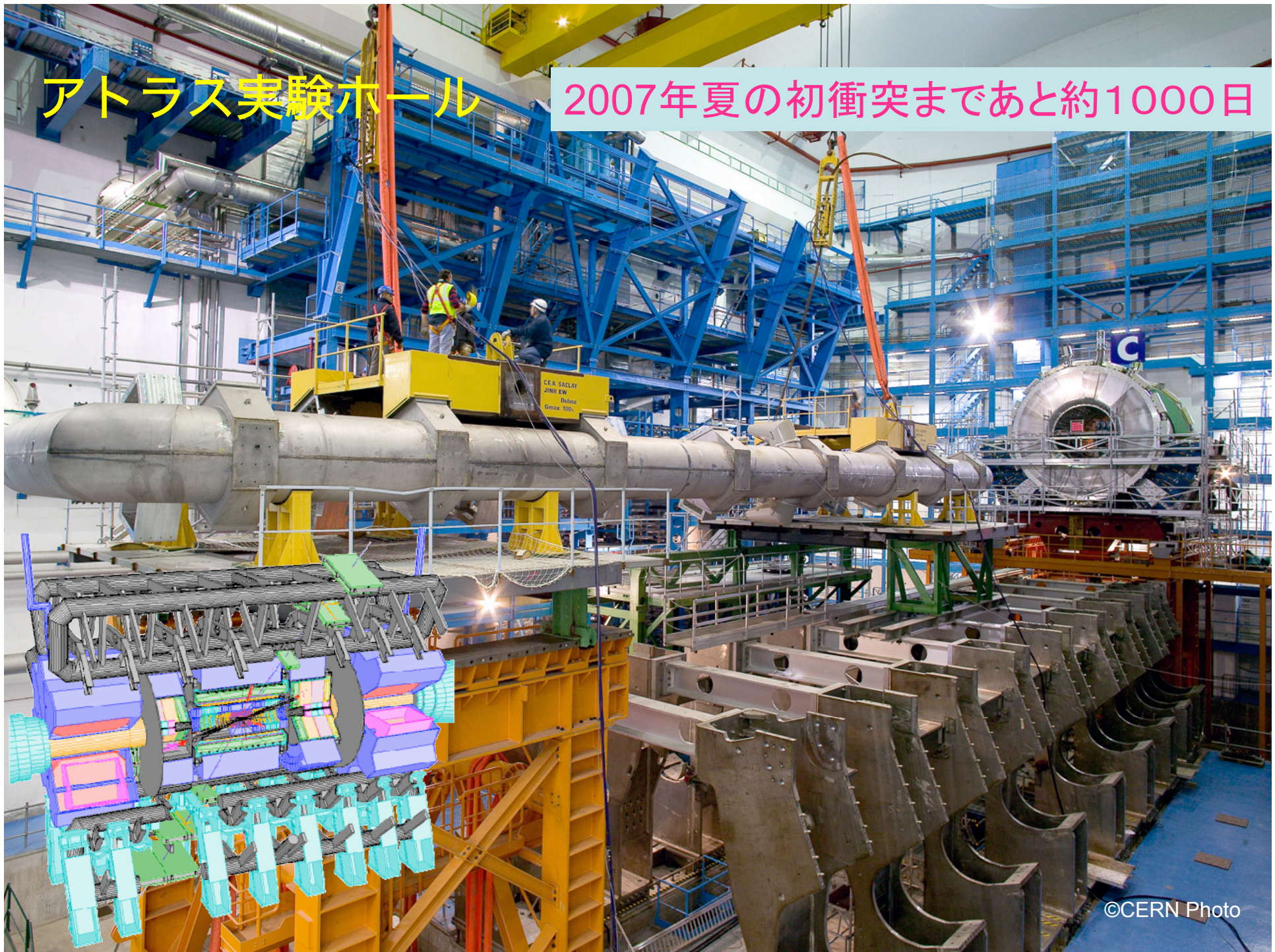
1850 physicists
150 universities
34 countries



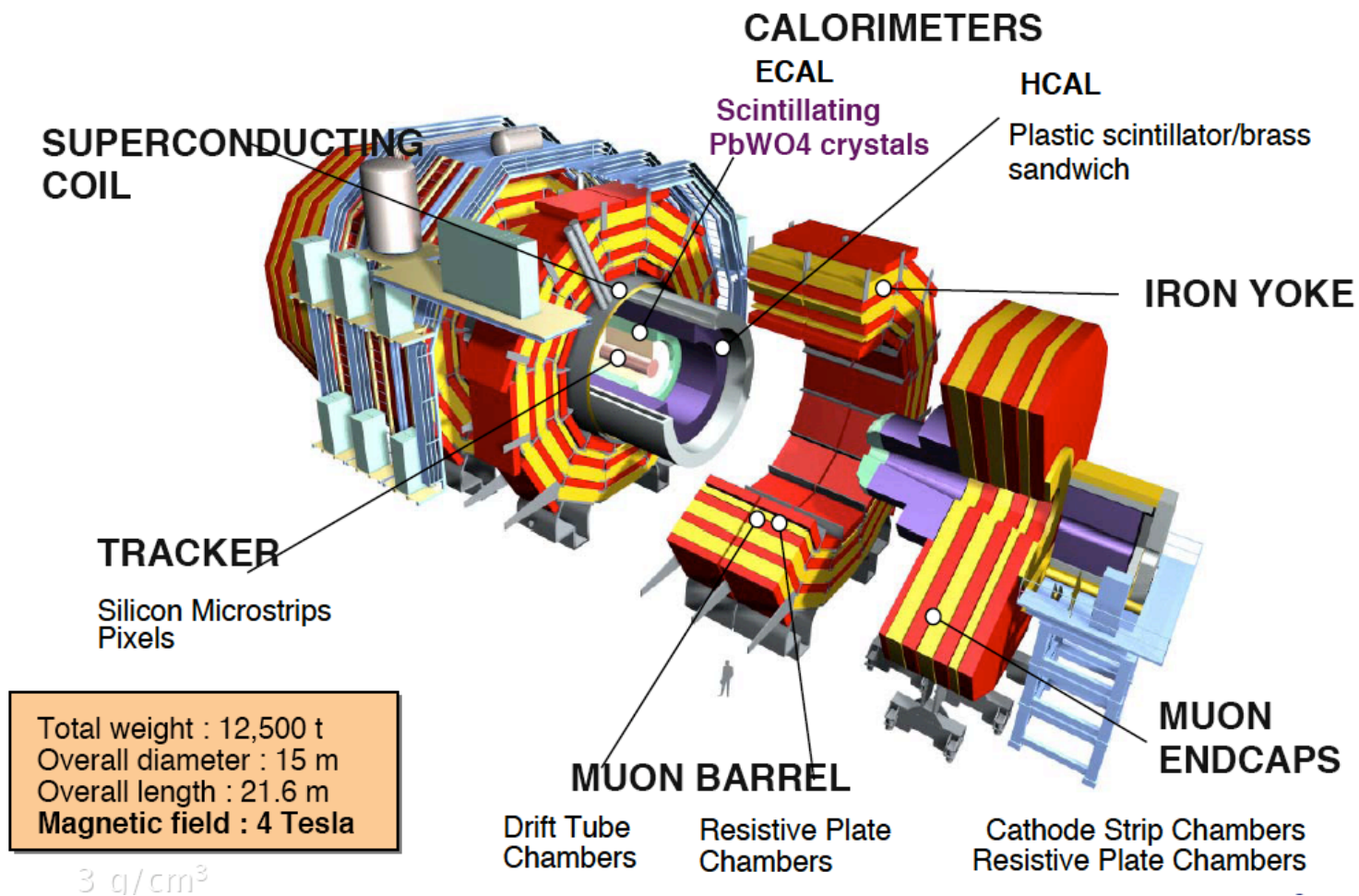
<i>Diameter</i>	25 m
<i>Barrel toroid length</i>	26 m
<i>End-cap end-wall chamber span</i>	46 m
<i>Overall weight</i>	7000 Tons

アトラス実験ホール

2007年夏の初衝突まであと約1000日



Compact Muon Spectrometer (CMS)



日本の貢献



2Tesla ソレノイド磁石



©CERN Photo



2004.10.28 ATLAS Cavern

SC Quadrupole Magnet

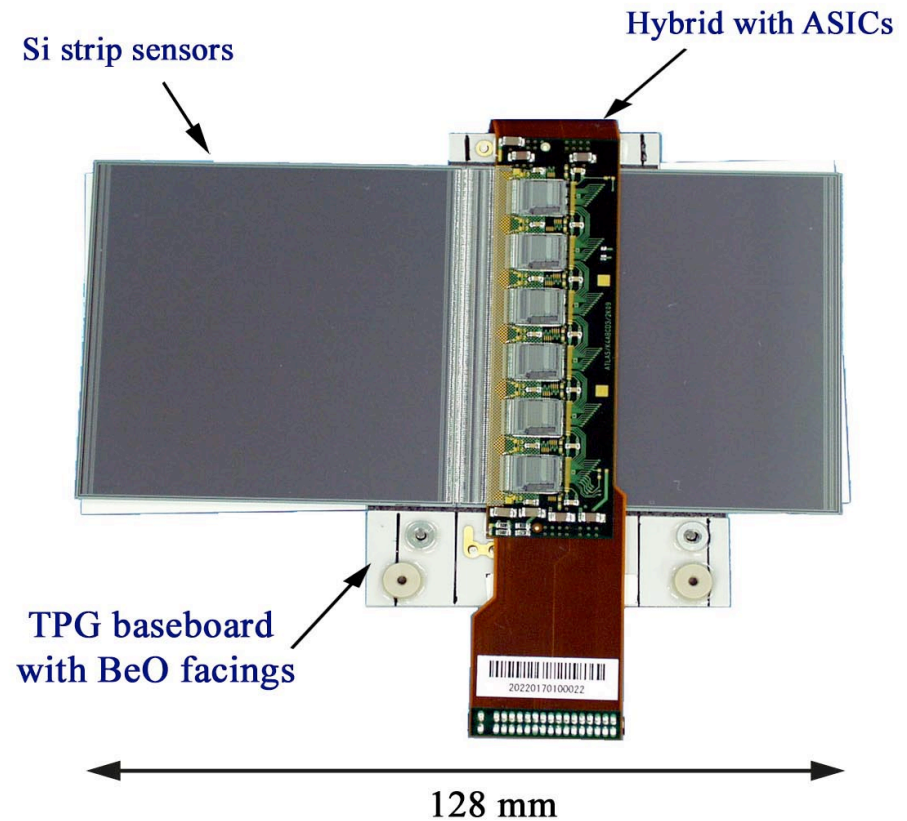
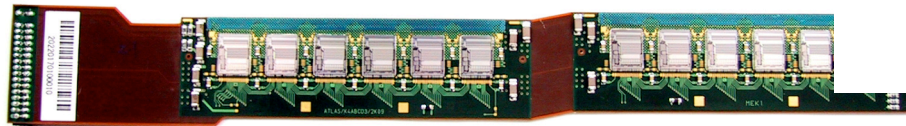
LHC加速器の衝突点でビームを絞るための超伝導四重極マグネットのプロトタイプ。
長さ6メートル。日本の高エネ研で開発し東芝で製造した16台がLHC加速器に組み込まれる。



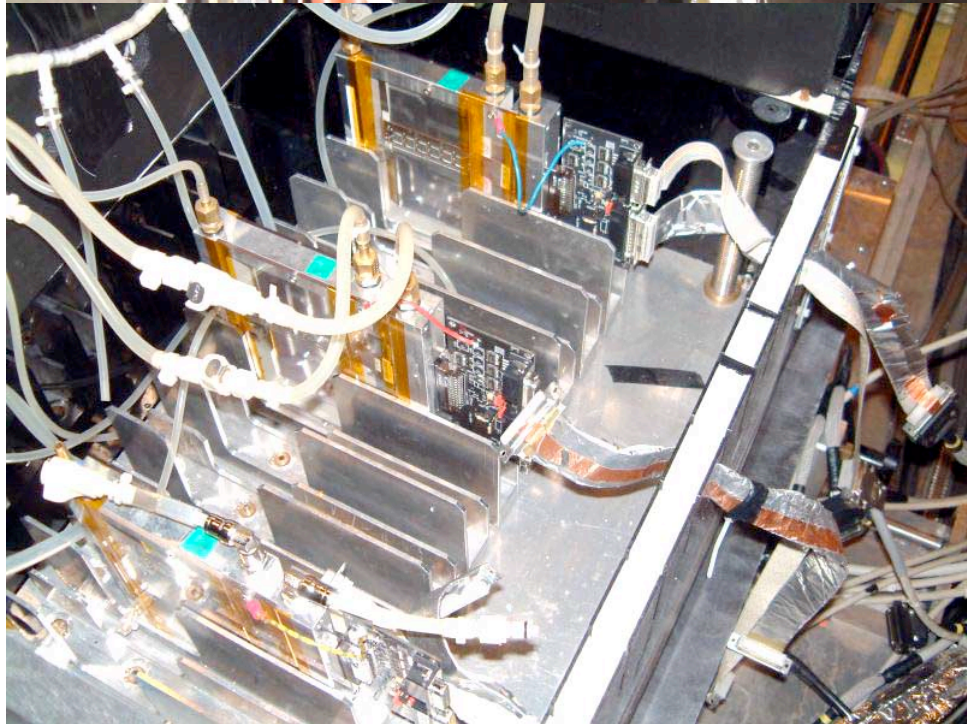
Silicon Micro-strip Detector

浜松ホトニクスで製造された6.4 cm角のシリコン半導体検出器4枚をモジュールに組立てたもの。
粒子の飛跡を高い精度で測定する。
このモジュールは全部で2600台だが、日本はそのうち980台を製造した。

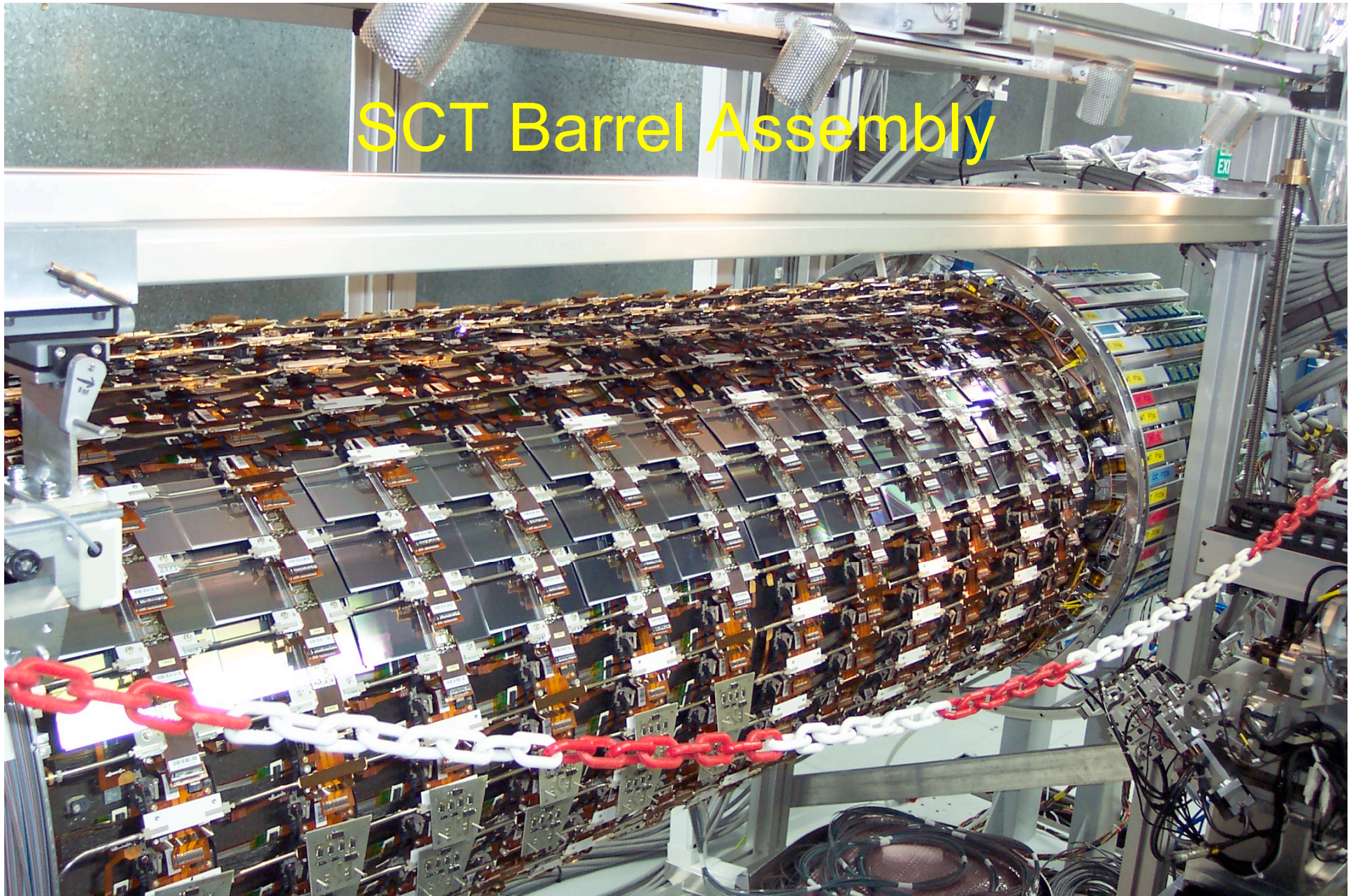
日本のデザインが採用されたハイブリッド回路フレキシブル基板。



シリコン半導体飛跡検出器



SCT Barrel Assembly

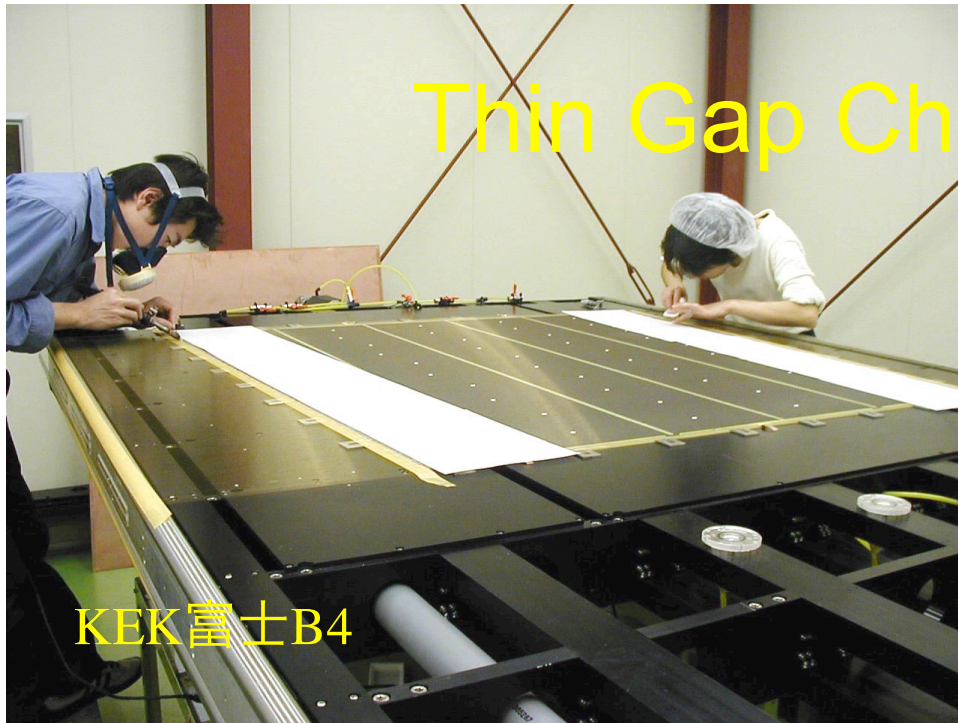


2004.11.25

Prospects for TeV Scale New Physics at LHC

17

Thin Gap Chamber (TGC)



KEK富士B4



CERN H8ビームテスト

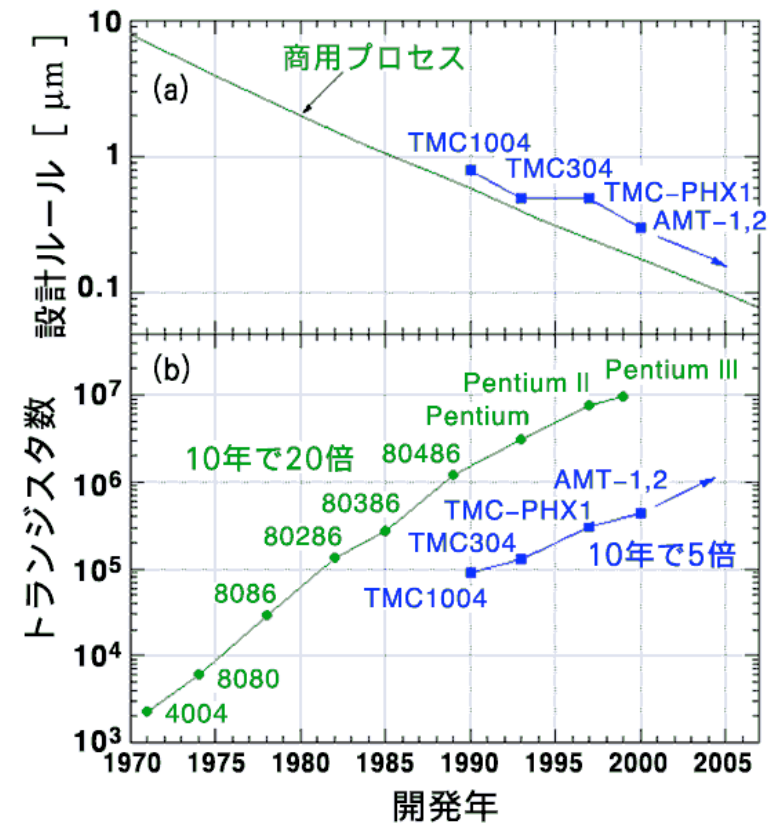
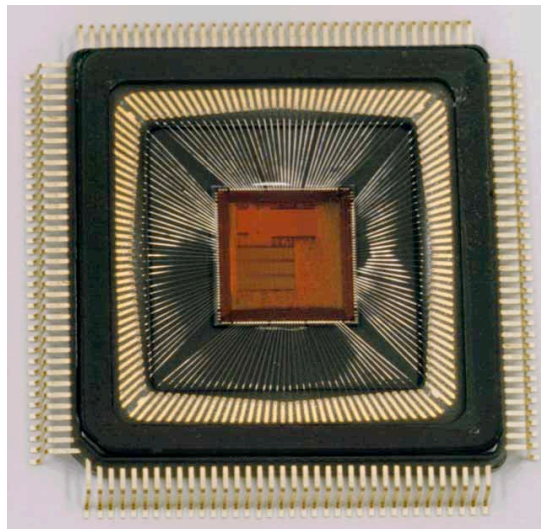
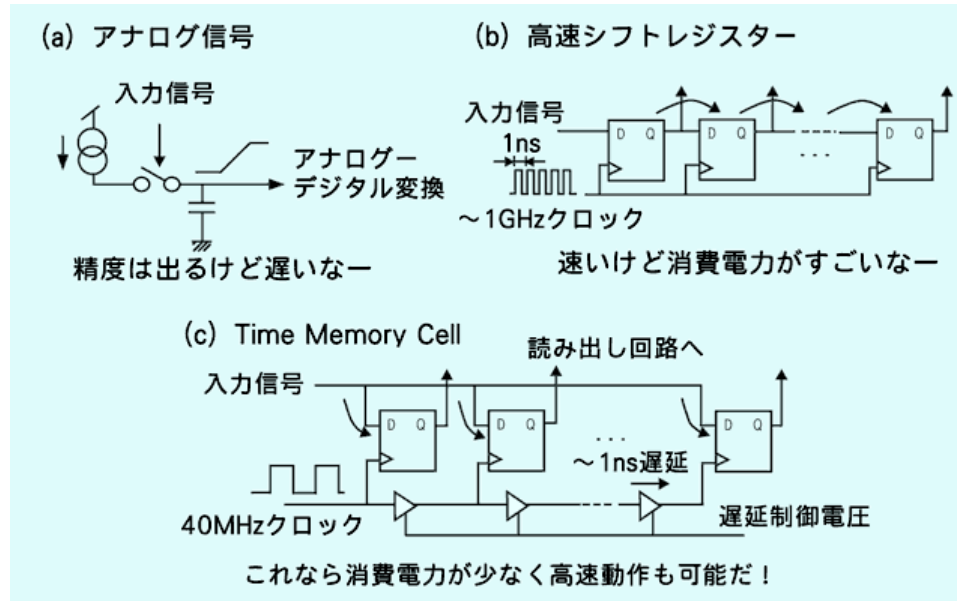


神戸大学で検査



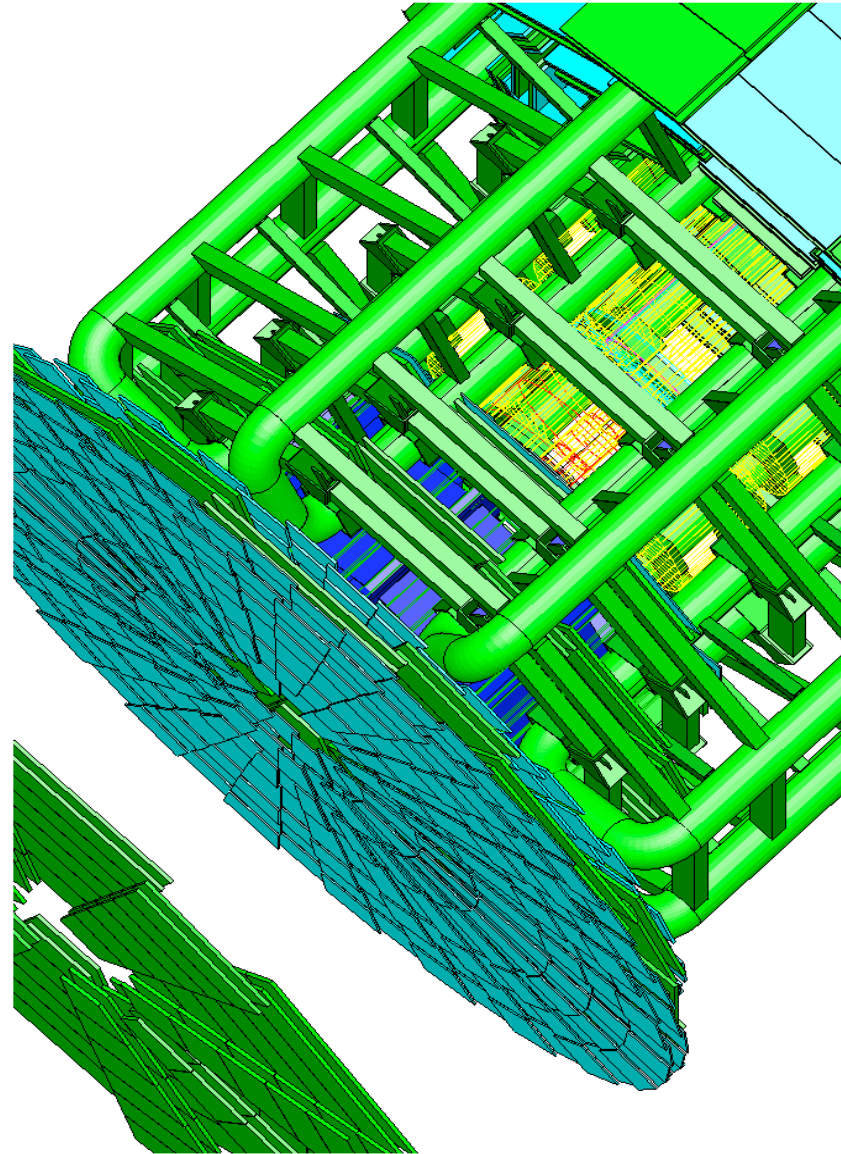
CERNへ向け搬出

AMT(Atlas Muon TDC)



GEANT4

オブジェクト指向のソフトウェア
技術を用いた検出器シミュレーション
プログラムの開発。



3. EWSB - ヒッグス機構

Two fundamental questions on Higgs boson.

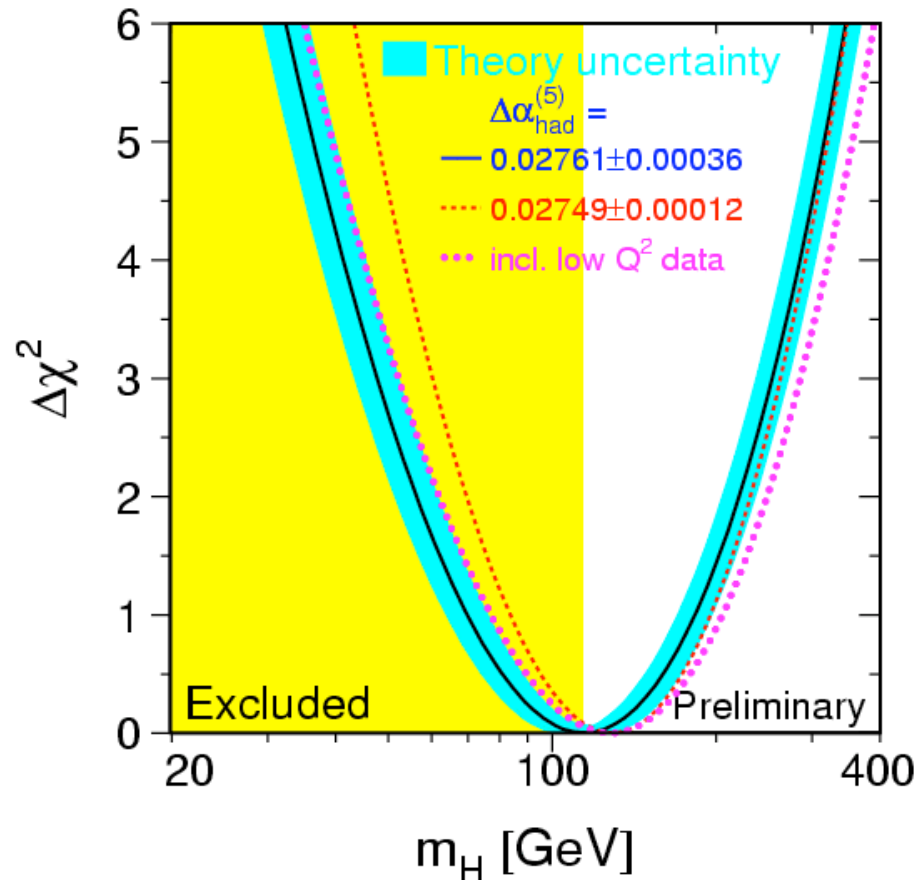
Q1) 質量起源(湯川結合)は存在するのか？
Q2) Higgボソンは自己結合するのか？

LHCではHiggs粒子を発見し、その性質を研究する。

$$M_H, \Gamma_H, J^{PC}, g_{ffH}/VVH, \lambda_{HHH}$$

Electroweak Precision Measurements

F.Teubert ICHEP2004@Beijing



LHCではさらに精密測定をする。

Top quark質量

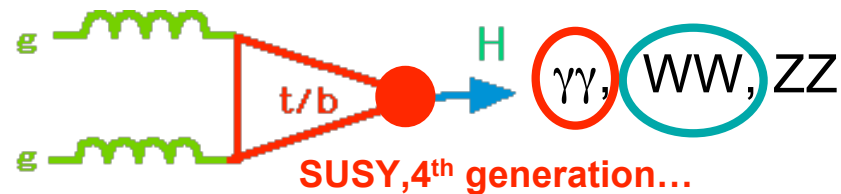
ΔM_{top}

Tevatron		LHC
RUN-I	RUN-II	
$\pm 5.1 \text{ GeV}$	$< 3 \text{ GeV}$	$< 2(1) \text{ GeV}$

$$M_H = 114 \pm {}^{69}_{45} \text{ GeV} \quad (M_H < 260 \text{ GeV} @ 95\% \text{ C.L.})$$

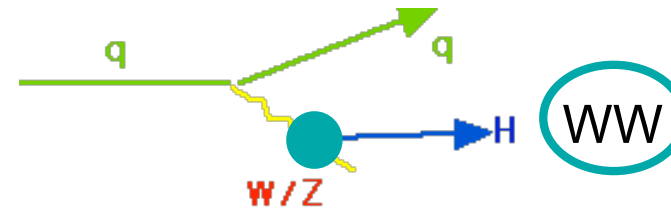
ハドロン・コライダーでのHiggs粒子生成

gg fusion



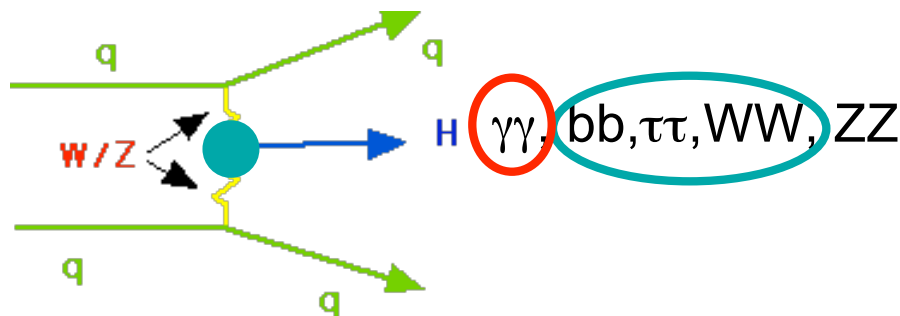
large σ , low P_t jets except H

Associated WH, ZH



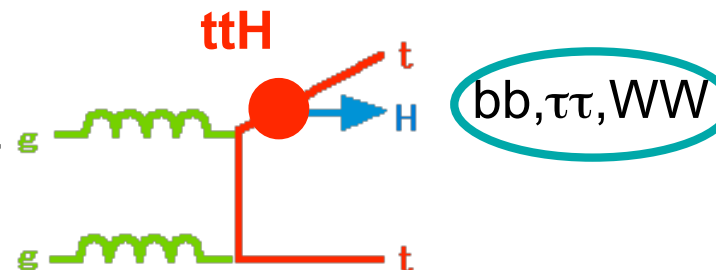
gauge boson in final state (clean)

Vector boson fusion (VBF)



2 forward jets with $P_t \sim M_W/2$

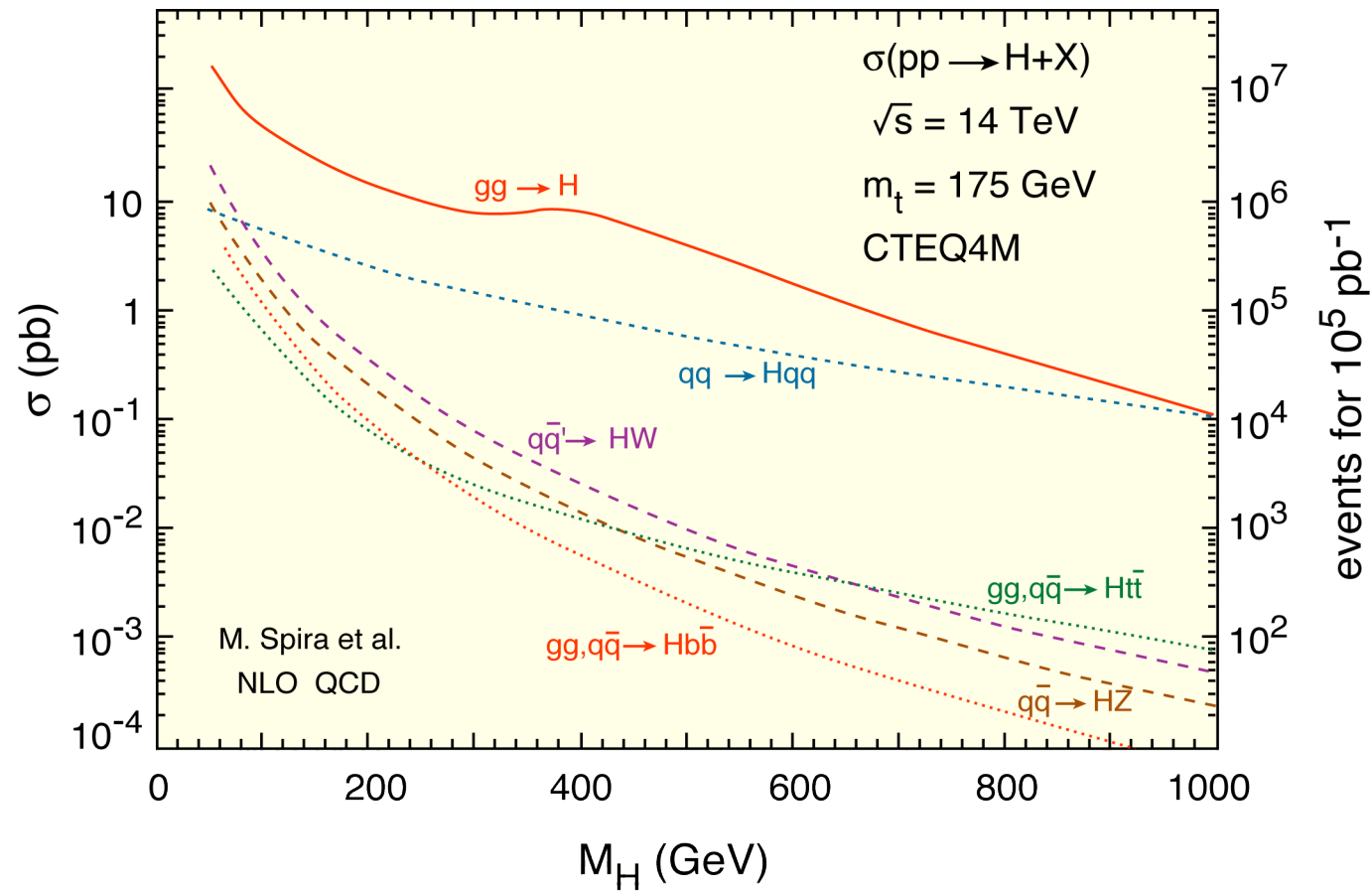
Associated ttH



Top-Yukawa Coupling

Higgs production&decay $\leftarrow g_{ffH}, g_{VVH}$ information!

Higgsの生成断面積



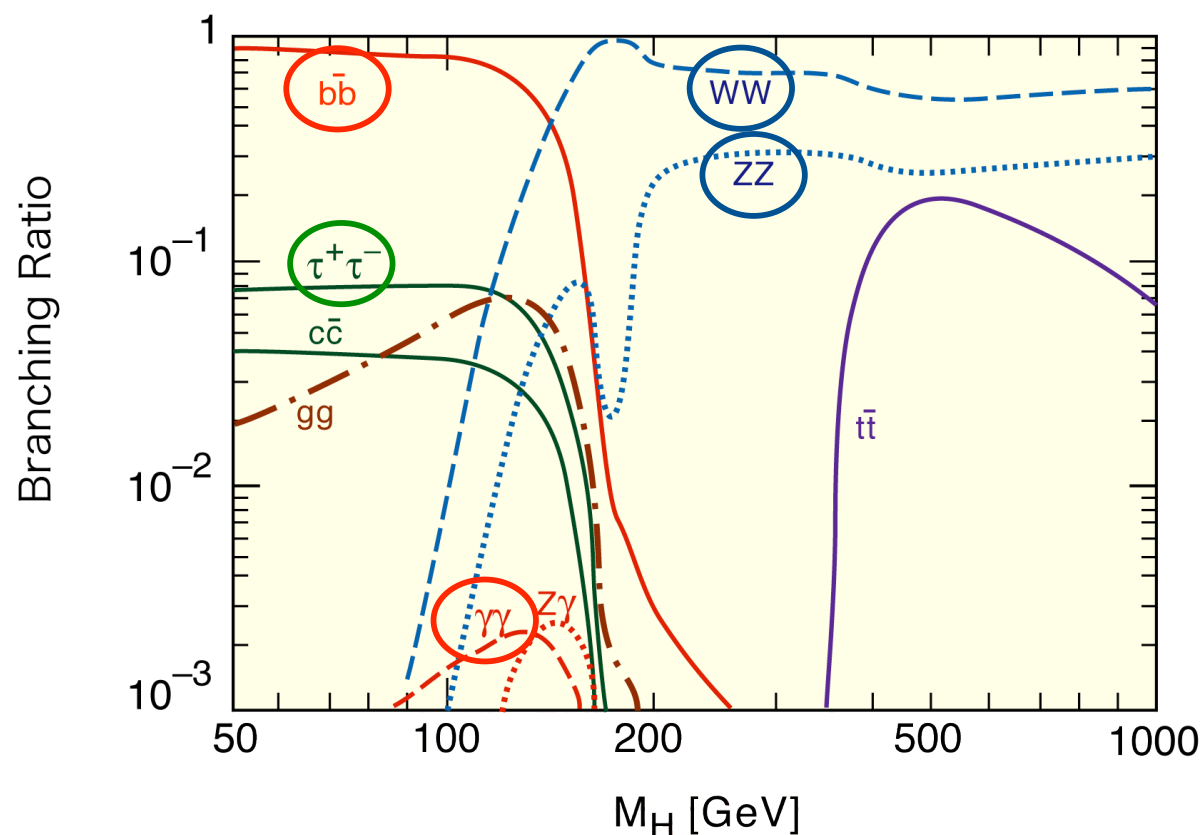
Higgsの崩壊過程

軽いHiggs ($M_H < 200$ GeV)

- 湯川結合の測定。
- 複数のチャンネルでの測定が重要。
- $b\bar{b}$, $\tau^+\tau^-$, $\gamma\gamma$, $WW^{(*)}$, $ZZ^{(*)}$

重いHiggs ($M_H > 200$ GeV)

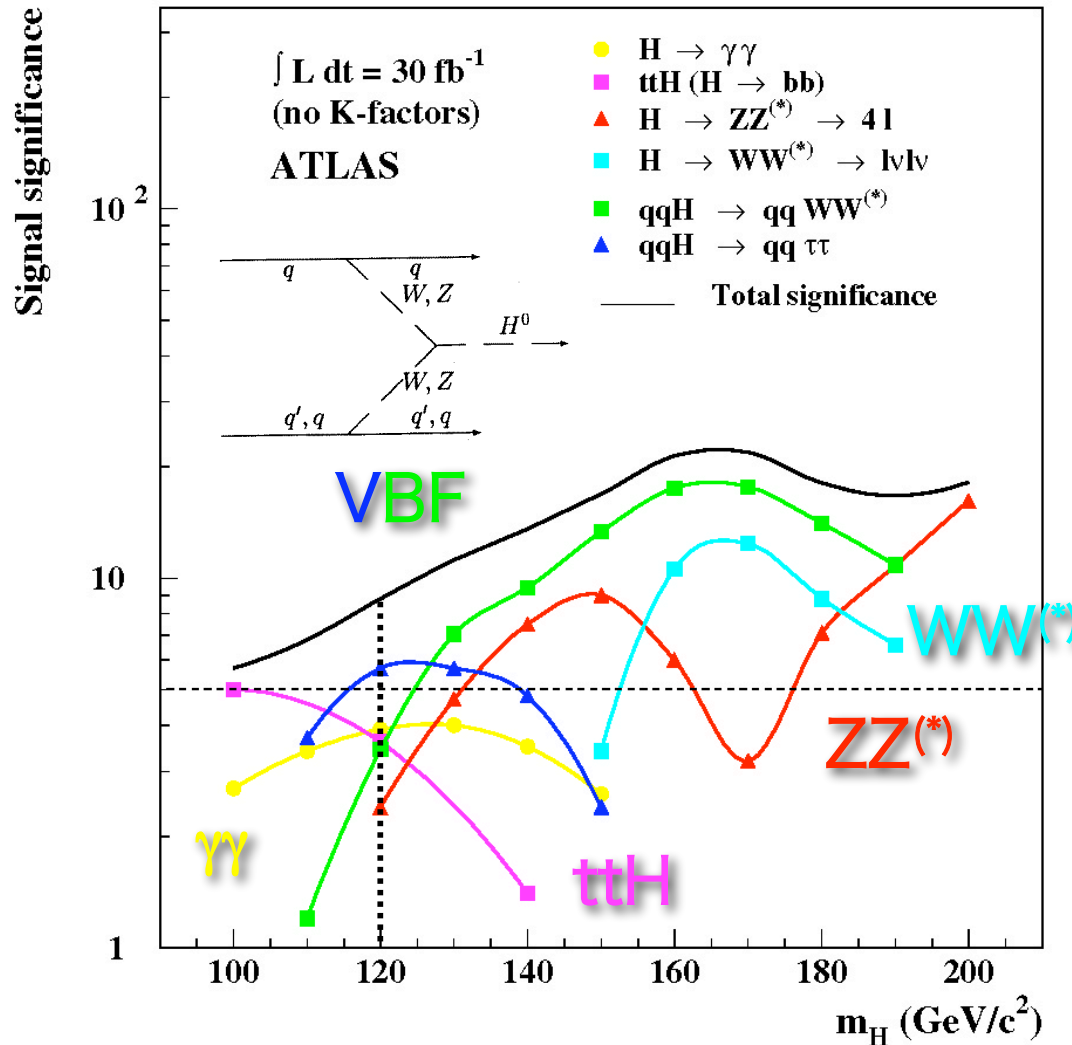
- ほとんどが WW/ZZ へ。
- $ZZ \rightarrow 4\text{leptons}$ は、gold-plated (S/Nが良い)。



LHC 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)

S.Asai *et al.*, Eur.Phys.J.direct C32 Suppl. 2 (2004) 19



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

$L=10\text{fb}^{-1}$ で約 5σ

→ 実験開始約1年で発見可能

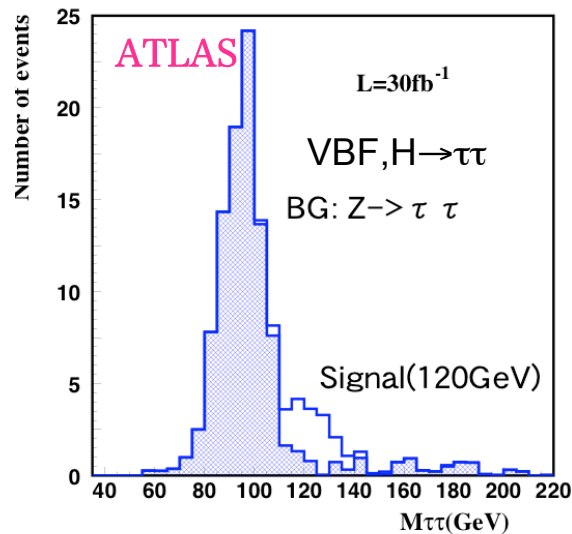
$M_H < 120 \text{ GeV}$ 領域は、TevatronとLHCの激しい発見競争となる。

Vector Boson Fusion

VBF ($H \rightarrow \tau \tau$) $\sigma \times \text{Br} \approx 300 \text{ fb}$

Forward jet reconstruction 必要
湯川結合の測定にも重要、**bタグなし**
バックグラウンド

Z+jets (Drell-Yan)



$t\bar{t}H$ ($H \rightarrow b\bar{b}$)

$\sigma \times \text{Br} \approx 300 \text{ fb}$

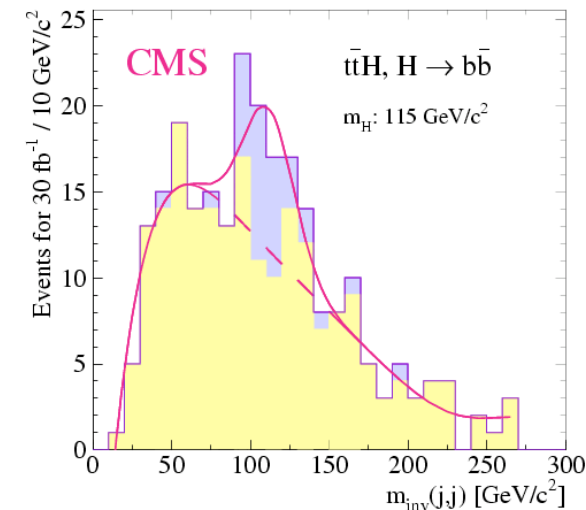
トップー湯川結合の測定に重要

bタグ効率 $\varepsilon_b = 60\%$, $R_j(\text{uds}) \sim 100$

バックグラウンド (**5–10%の理解が必要！**)

$t\bar{t}j$, $Wjjjjj$, $WWbbjj$ etc.

combinatorials (4- b' s)



W/Z+n-jets, $t\bar{t}$ +n-jetsの研究が非常に重要。

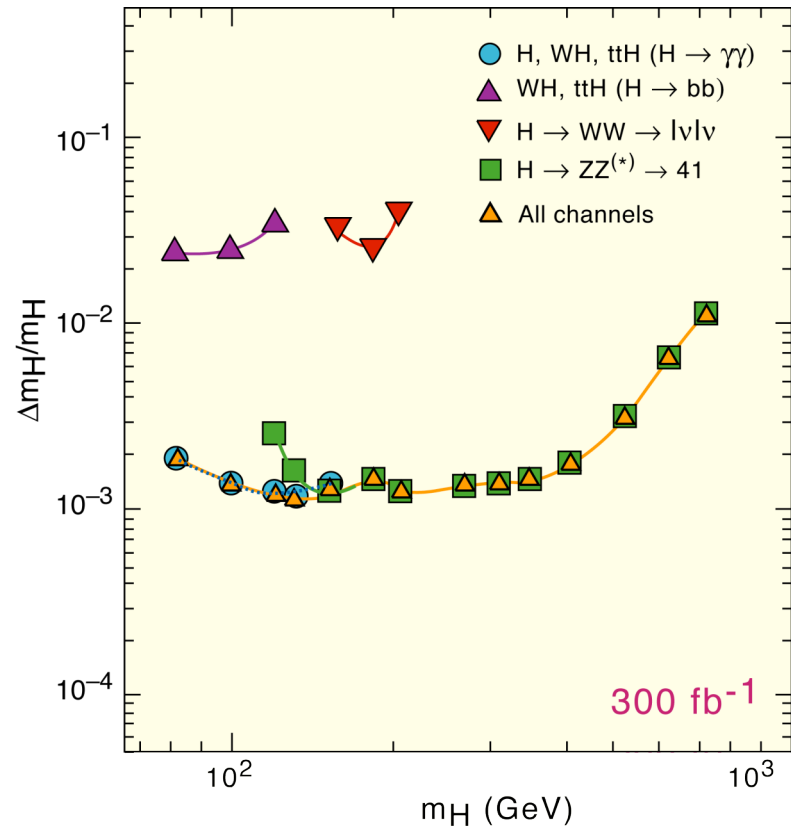
Higgs boson discovered. What's next ?

Higgs粒子の性質の測定

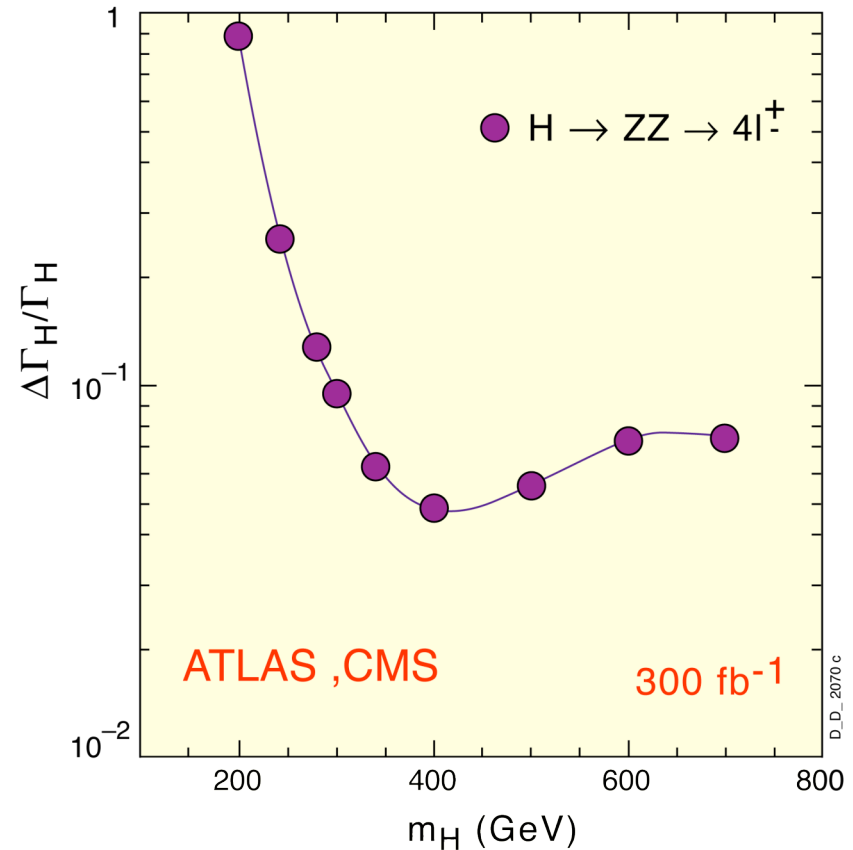
- Higgs Mass
- Higgs Decay Width
- Spin, CP
- Branching Ratios
- Top-Yukawa Coupling
- Higgs Self-coupling

+ Charge, Color ...

Higgsの質量と崩壊幅



エネルギー・スケールの絶対誤差が問題
 レプトン&フォトン 0.1% (in situ Zcalibration)
 ジェット 1%



Radiative decayが問題
 系統誤差は、1.5%を仮定

Yukawa coupling

$$g_{f\bar{f}H} = \frac{m_f}{v} \quad (v = 246 \text{ GeV})$$

Higgs-W/Z coupling

$$g_{VVH} = 2 \frac{M_V^2}{v} \quad g_{VVHH} = 2 \frac{M_V^2}{v^2}$$

Higgs boson self-coupling

$$g_{HHH} = 3 \frac{M_H^2}{v} \quad g_{HHHH} = 3 \frac{M_H^2}{v^2}$$

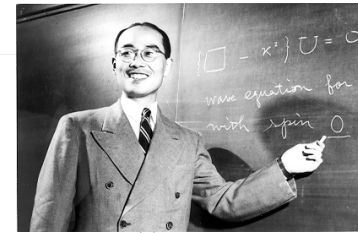
Non-linear Yukawa couplings

⇒ direct evidence of physics beyond the Standard Model.

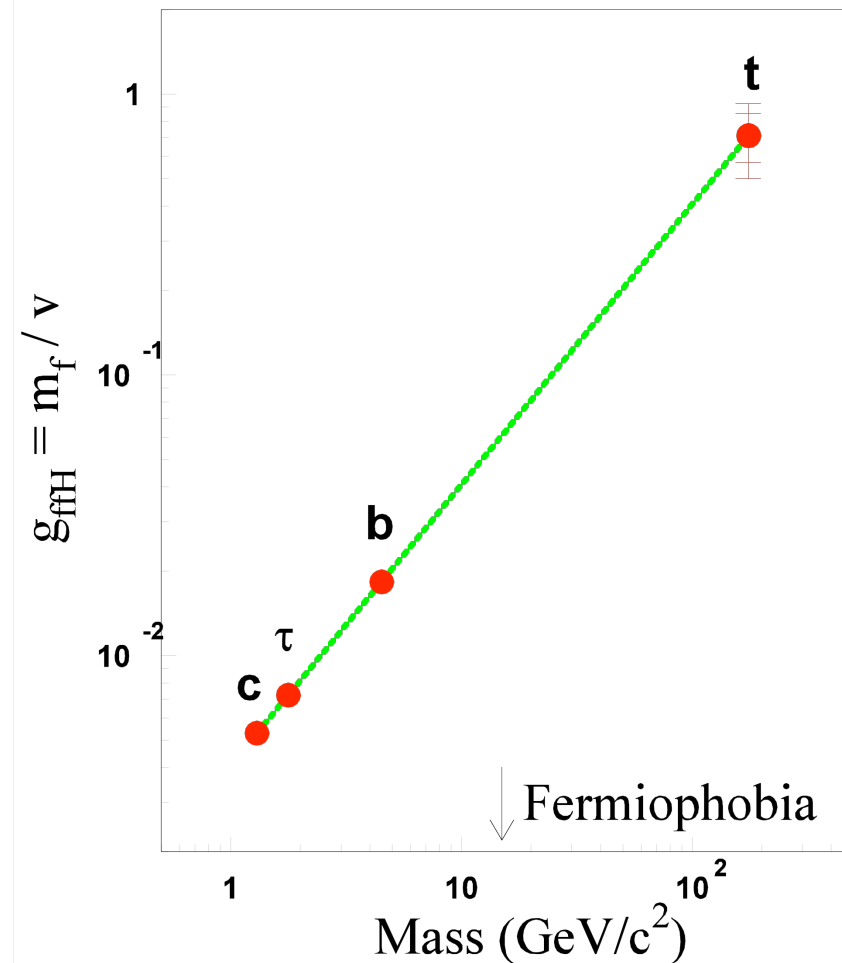
Example. In MSSM,

$$\frac{g_{bbh,\tau\tau h}^{\text{MSSM}}}{g_{bbh,\tau\tau h}^{\text{SM}}} = -\frac{\sin \alpha}{\cos \beta}, \quad \frac{g_{tth}^{\text{MSSM}}}{g_{tth}^{\text{SM}}} = \frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$$

湯川結合



Yukawa Coupling ©基研



Top-Yukawa coupling plays the key role

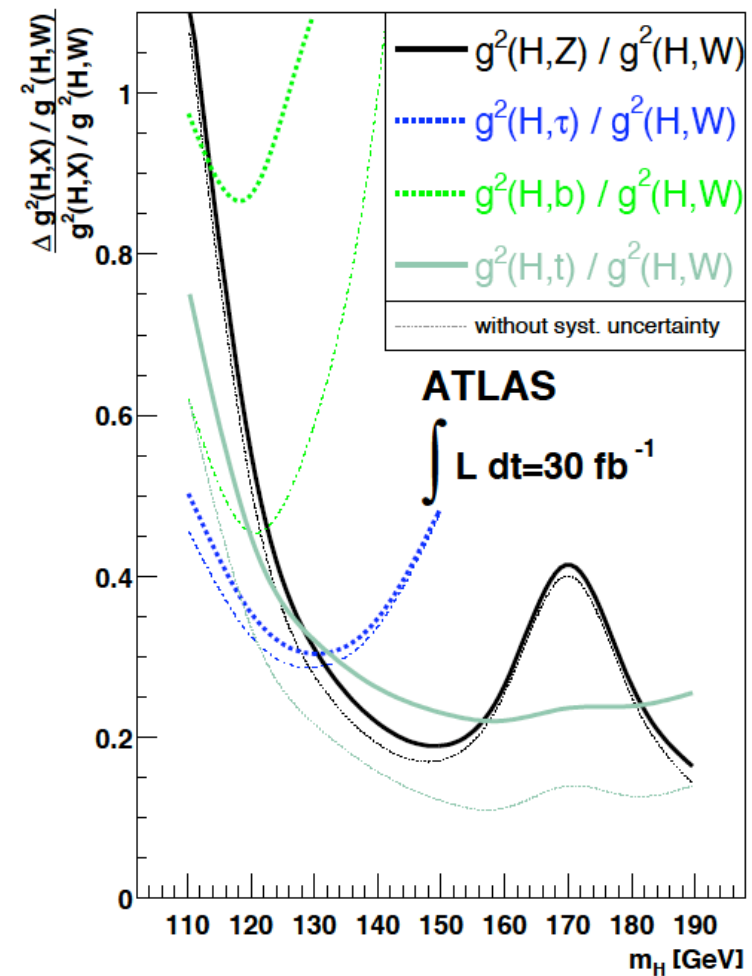
湯川結合

質量の起源を直接解明

結合定数の比の測定精度
(HWWで規格化)

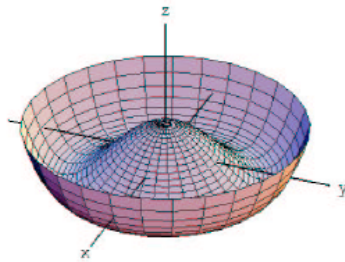
- ・ ttH , $\tau\tau H$ は、15-20%程度
 - ・ bbH は、45%程度(VBF bb 必要)
 - ・ ZZH は、10-25%程度
- で測定可能。

M.Dührssen *et al.*,
ATL-PHYS-2003-030, hep-ph/0406323



Higgs自己結合

ヒッグスセルフポテンシャル



$$V = \lambda \left(|\phi|^2 - \frac{1}{2} v^2 \right)^2$$

$$V = \lambda v^2 H^2 + \lambda v H^3 + \frac{1}{4} \lambda H^4$$

$$M_H = \sqrt{2\lambda} v$$

$$\text{trilinear coupling} \quad \lambda_{HHH}^{\text{SM}} = 3 \frac{M_H^2}{v}$$

$$\text{quadrilinear coupling} \quad \lambda_{HHHH}^{\text{SM}} = 3 \frac{M_H^2}{v^2}$$

これは当分先(10年以上)にしか測定できない。

SLHC High Luminosity Upgrade $L=10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

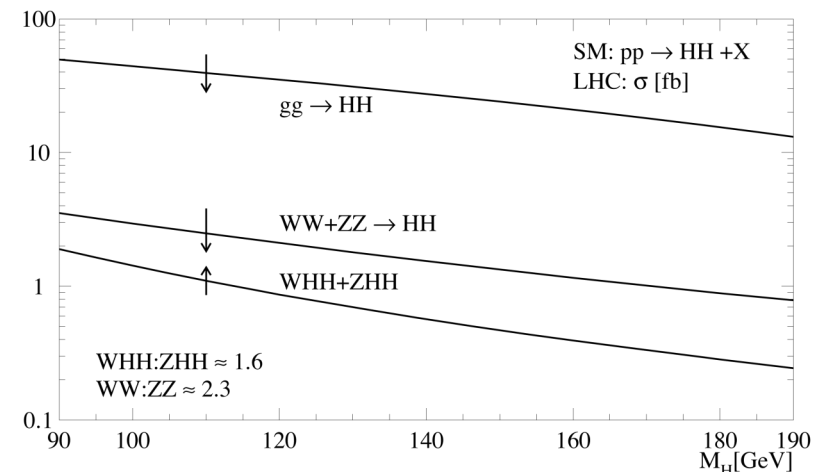
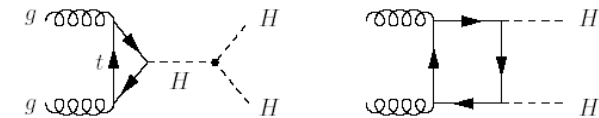
$gg \rightarrow HH \rightarrow WWWW \rightarrow \nu jj / \nu jj$ (like-sign di-lepton)

$L=6 \text{ ab}^{-1}$ (!)

$\Rightarrow$ Significance 5.3(3.8) for $M_H=170(200) \text{ GeV}$

$$\Delta \lambda_{HHH} / \lambda_{HHH}^{\text{(stat.)}} = \pm 19(25)\%$$

F.Gianotti *et al.*, hep-ph/0204087



Higgs $J^{PC}=0^{++}$

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ (S/B > 3)

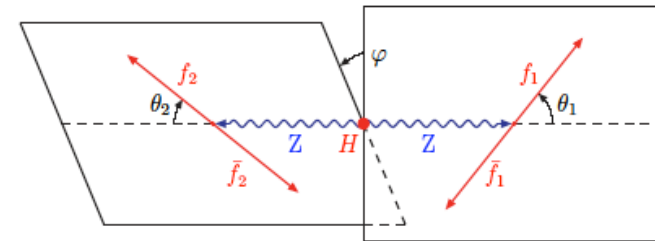
Ex. π^0 $J^P=0^-$ $\leftarrow$ double Dalitz decay

$\Rightarrow$ Angle between decay planes of two Z 's from Higgs decay

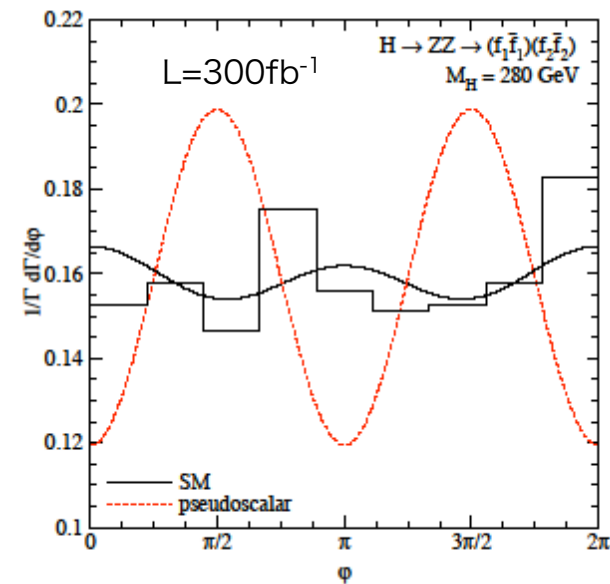
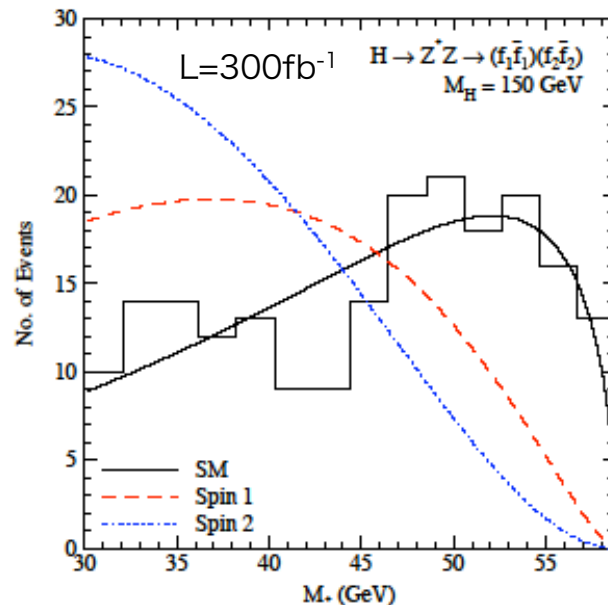
C.A. Nelson, Phys.Rev.D37(1988)1220,

C.P. Buszello *et al.*, Eur.Phys.J. C32(2004)209

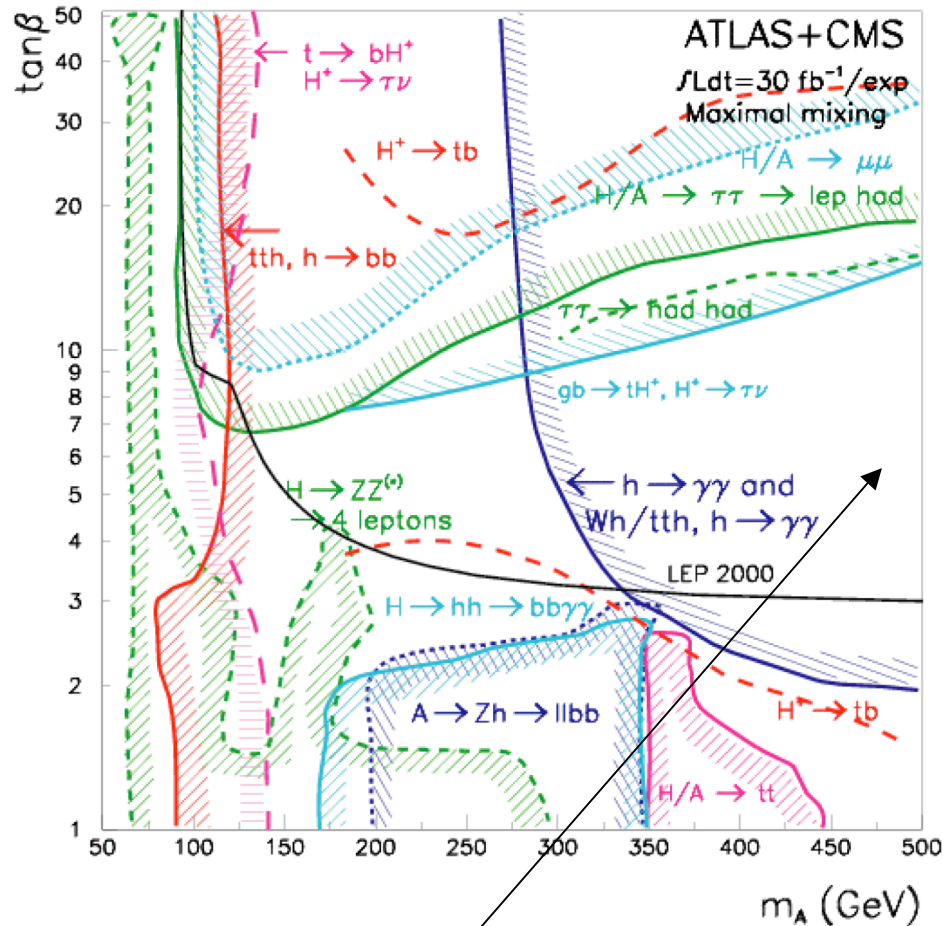
この他に、VBF $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ spin correlation、 $t\bar{t}H/t\bar{t}A$ など研究。



S.Y. Choi *et al.*, Phys.Lett. B553(2003) 61



MSSM Higgsの発見能力



この部分は、 H_{SM} に似た性質の h が観測されるだけ。

$h, H^0, A^0, H^{\pm}$ の4種類

Tree levelで M_A と $\tan \beta$ の2 parameterで記述。

$\tan \beta$ が大きいと bbH/A の結合が大きくなる。

$H/A \rightarrow \tau \tau, \mu \mu, bb$

特に $\mu \mu$ チャンネルは実験初期に重要
 $\therefore$ コミッシュニング $\mu \mu < \tau \tau < bb$

$\tan \beta > 10$ で $gb \rightarrow tH^-$ で
 charged Higgs が観測可能。



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

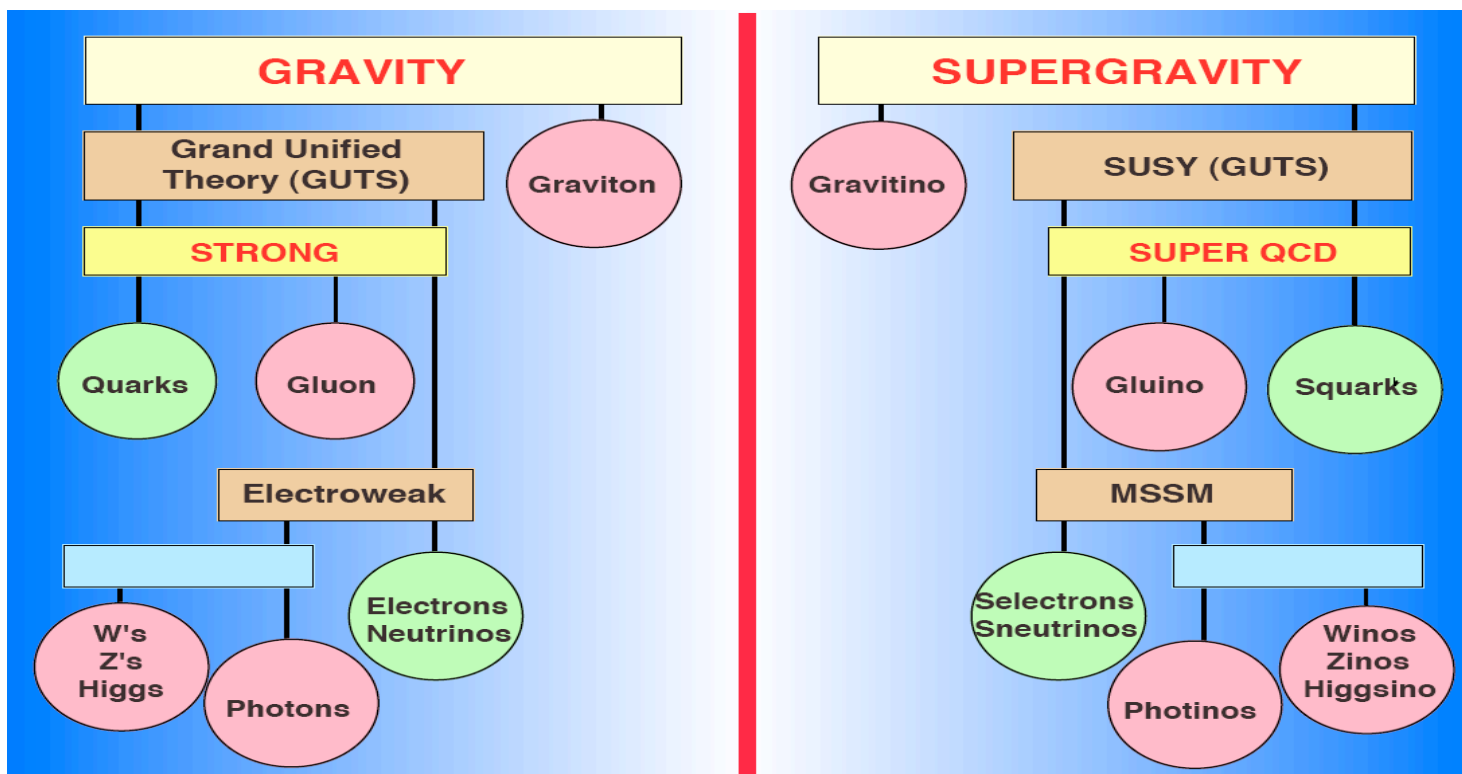
4. 超対称性理論 (SUSY)

超対称性理論により 2 次
発散問題が自然に解決！

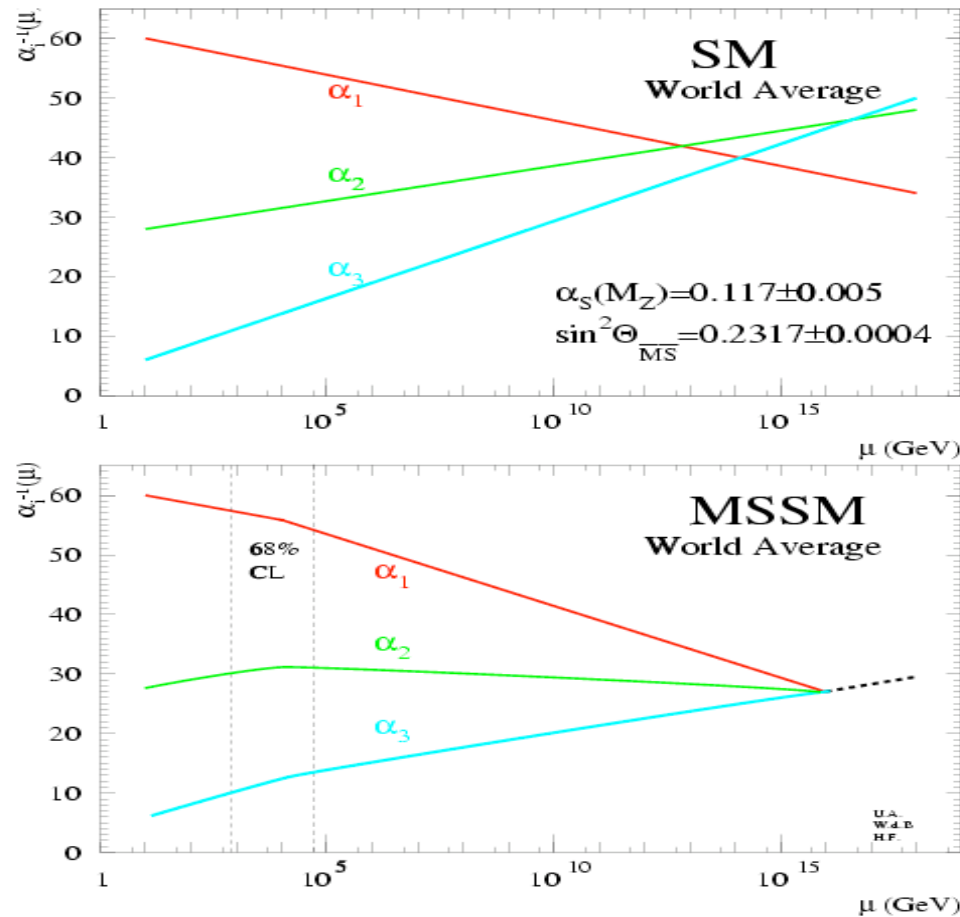
With SUSY, infinities disappear:

$$\text{---} \bigcirc \text{---}^{J=1/2} + \text{---} \bigcirc \text{---}^{J=1} = 0$$

(as long as $M(J=1/2) = M(J=1)$)



SUSYの間接的な証拠？



一番軽い超対称性粒子（LSP、例えばニュートラリーノ）は、宇宙のコールド・ダークマターの候補。

SUSY at LHC

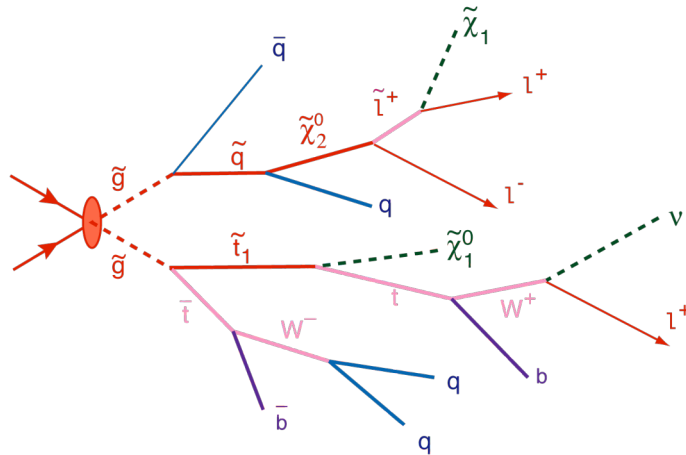
強い相互作用による大きな
生成断面積 $\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q}\tilde{g}, \tilde{g}\tilde{g}$

$$\sigma \approx 3\text{pb for } m(\tilde{q}, \tilde{g}) = 1\text{ TeV}$$

$$\Rightarrow 100\text{ events/day@}10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

発見は容易

質量測定は、1年以上かかる(?)



3 isolated leptons
+ 2 b-jets
+ 4 jets
+ E_T^{miss}

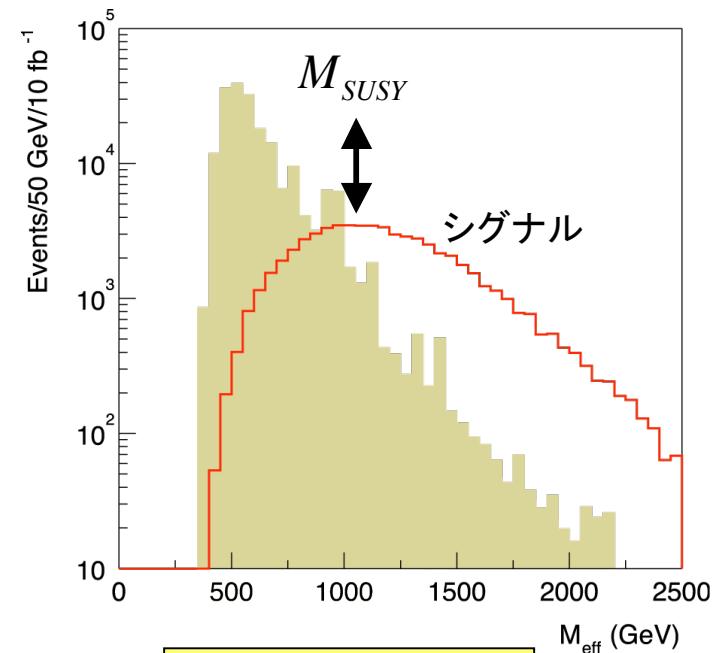
Missing E_T + high p_T jets + Leptons
(モデルに依存しない解析、Rパリティ保存)

SUSYのスケール

$$M_{SUSY} = \min(m(\tilde{q}), m(\tilde{g}))$$

20%の精度で測定 ($L=10\text{fb}^{-1}$, mSUGRA)

Missing E_T の測定が大切 ($Z \rightarrow \ell\ell$ jetsで補正)



$$M_{eff} = E_T^{miss} + \sum p_T^{jet}$$

J.G. Branson *et al.*, Eur.Phys.J.direct C4(2002)N1

mSUGRA

5つのパラメーター : $m_0, m_{1/2}, \tan\beta, A_0, \text{sign}(\mu)$
(mass @GUT) (VEV) (scalar 3点) (Higgsino mass)

一般的な傾向

- Coloured particles ($\tilde{g}, \tilde{q}$) は重い
- $\tilde{\chi}_1^0$ はLSPで安定(R-parity) Cold DMの良い候補
- Higgsino mass ($|\mu| > 0.8m_{1/2}$ (Wino) ($m_0 \gg m_{1/2}$ の場合以外)
→ $\tilde{\chi}_1^0 \approx \tilde{B}^0, \tilde{\chi}_2^0 \approx \tilde{W}^0, \tilde{\chi}_1^\pm \approx \tilde{W}^\pm, \tilde{\chi}_{3,4}^0, \tilde{\chi}_2^\pm \approx \tilde{H}$
- 第3世代の $\tilde{f}$ は軽い。(Yukawa+LR mixingの効果)

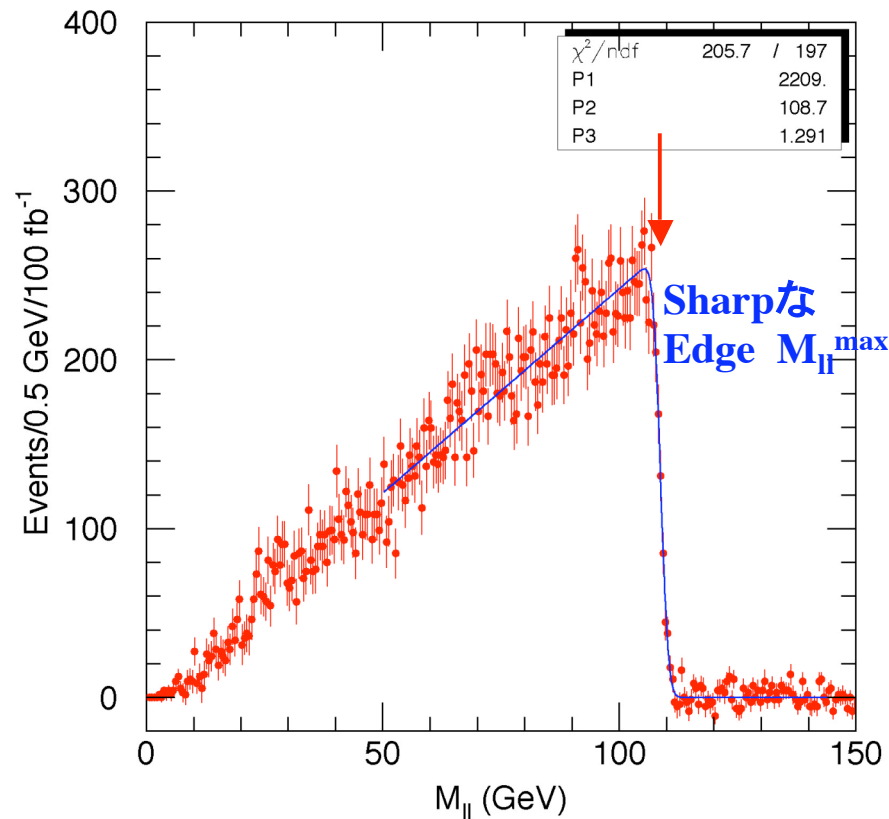
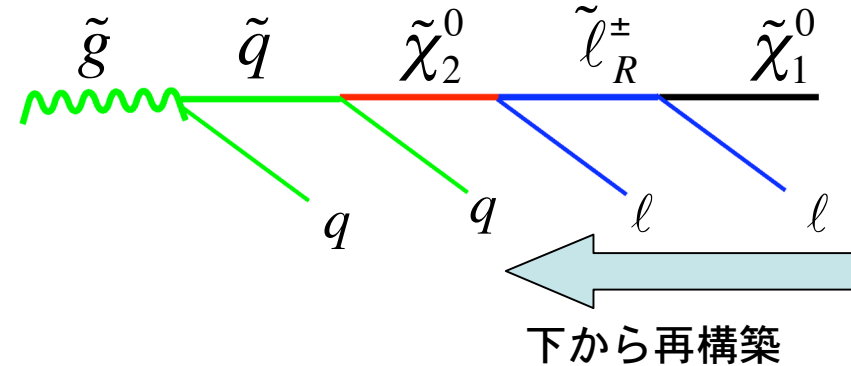
LHCでの主なSUSY生成過程は、($\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g}\tilde{q}, \tilde{q}\tilde{q}$) である。
生成断面積は、これらのmass以外にはモデル依存性が小さい。
ただのstrong interaction
 $\tilde{\chi}^0, \tilde{\chi}^\pm, \tilde{l}$ らは、 $\tilde{g}, \tilde{q}$ の崩壊過程で出てくる (多段cascade崩壊)

質量の再構成

kinematical endpoint

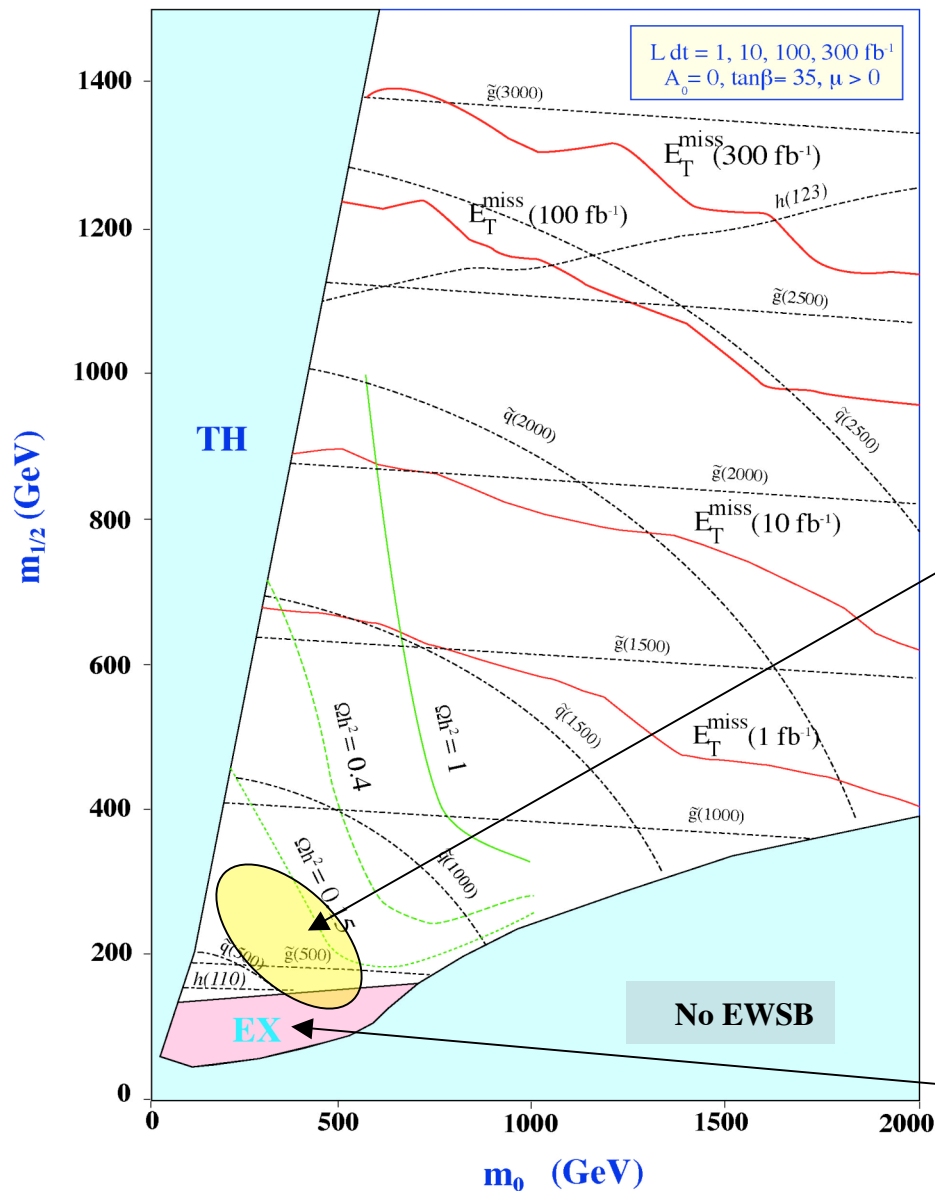
B.C. Allanach *et al.*, JHEP 0009(2000)004

$$M_{\ell\ell}^{\max} = m(\tilde{\chi}_2^0) \sqrt{1 - \left(\frac{m(\tilde{\ell}_R^\pm)}{m(\tilde{\chi}_2^0)} \right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{m(\tilde{\chi}_1^0)}{m(\tilde{\ell}_R^\pm)} \right)^2}$$



- ・一般に関係式の方が未知数（質量）より少ない。Modelの助けを借りてMassの絶対値を決める。
- ・2body decay chainが最低3連発した場合は model independentに決めることができる。
- ・ $\tan\beta$ が大きいと段数が増えたり、 τ 、 b が多くなる。
- ・発見と違って、model依存性が強い。
- ・質量の不定生は、主にLSPの運動量から。
- ・スピンやBrの測定は難しい。

mSUGRAの発見能力



L=10fb⁻¹で約2TeVまでの
squark/gluinoを発見。
Cold Dark Matterの検証
は一瞬。

L=300fb⁻¹ で約2.5TeVまで

Cold DMとして面白い領域は
ほぼ一週間のrunで十分

WMAP $0.0094 < \Omega_m h^2 < 0.129$

約1年のrun(L=10fb⁻¹)で、約2TeVまで

約1ヶ月のrun(L=1fb⁻¹)で、
 $m(\tilde{q}, \tilde{g}) \sim 1.5\text{TeV}$ まで5 σ の発見が可能。

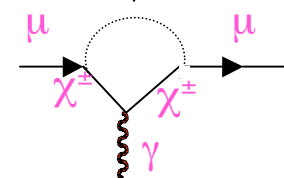
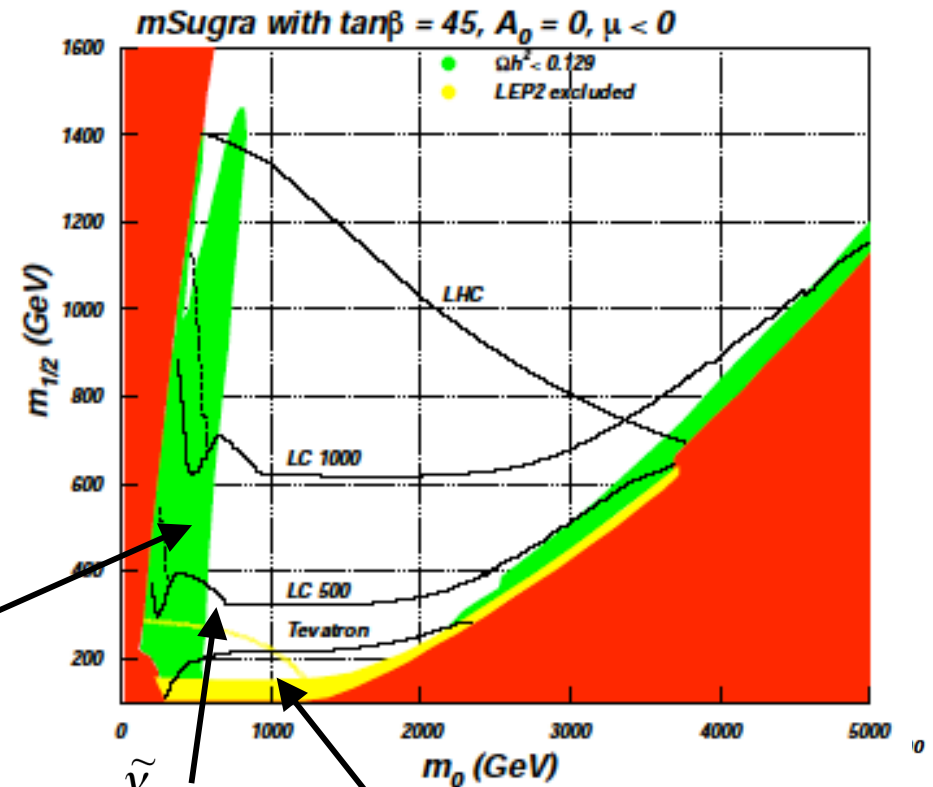
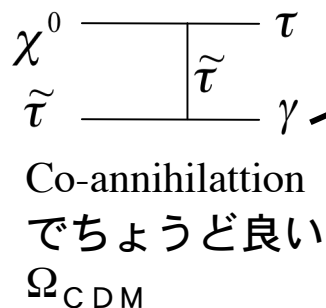
LEPやTevatronで期待される領域

SUSY-LSPとダーク・マター

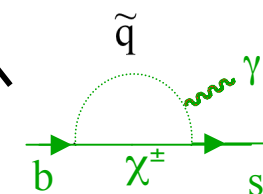
H.Baer et al., JHEP 0402(2004)007

WMAP $\Omega_{CDM} h^2 = 0.113^{+0.016}_{-0.018}$

Ω をこの程度の小ささにするは、
 $\tilde{\chi}_1^0$ と $\tilde{\tau}_1^\pm$ が縮退していてこの
 Co annihilationが効くような
 ところでないといけない。
 かなり制限されてしまう。
 (あと、 $M_A=2m(\tilde{\chi}_1^0)$ の時)

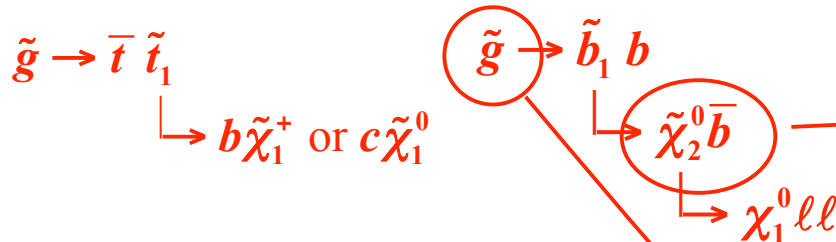


が見えた？



がないので駄目

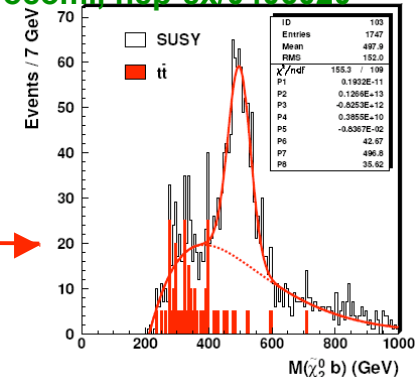
- 3rd generation squarks



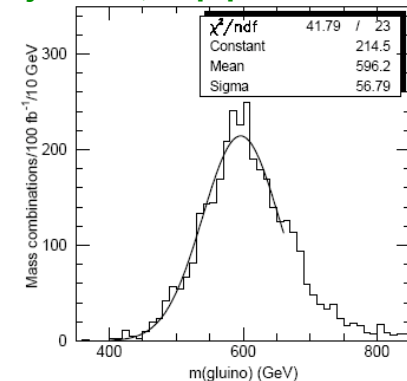
- important for distinguishing between SUSY models
- difficult, but possible to measure combination of masses (m_{tb})
- knowing $\tilde{\chi}$ masses, can reconstruct $\tilde{g}$ and $\tilde{b}$
- mass relation method:
 - constraint: require same masses in several events

- $\tilde{\tau}$'s
 - identification of τ 's in leptonic decays difficult because of E_T^{miss}
 - use hadronic decays, but high background
 - polarisation measurement appears possible

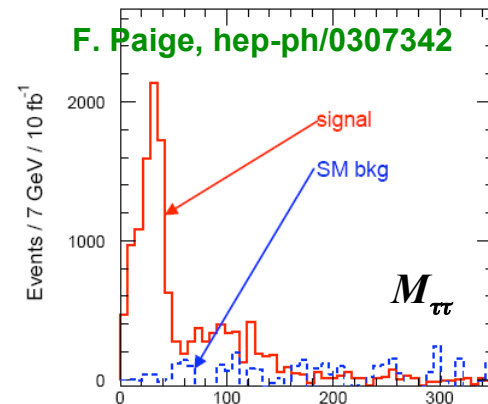
A. Trocomi, hep-ex/0406020



Nojiri et al, hep-ph/0312317



F. Paige, hep-ph/0307342



その他のモデル

GMSB

$LSP : \tilde{G}, \quad NLSP : \tilde{\chi}_1^0 \text{ or } \tilde{\ell} (\tilde{\tau}_R)$

jets + E_{miss}: $\sim$ similar reach as mSUGRA

signatures:

$\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{G} \ell^+ \ell^-$ for short lifetimes, or

$\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{G} \gamma$: non-pointing photons for long lifetimes

$\tilde{\ell} \approx$ slow “muon” $\rightarrow$ TOF measurements

$\tilde{\ell} \rightarrow \ell \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \ell \gamma \tilde{G}$: non-pointing photons

AMSB

light $\tilde{W}$ or $\tilde{\nu}$

$\tilde{\ell}$ pairs: $p\bar{p} \rightarrow \tilde{\nu}_L \tilde{\ell}_L^\pm \rightarrow \ell^\mp \tilde{W}^\pm \ell^\pm \tilde{W}^0$; displaced vtx from $\tilde{W}^\pm \rightarrow \tilde{W}^0 \pi^\pm$

R-parity violating processes

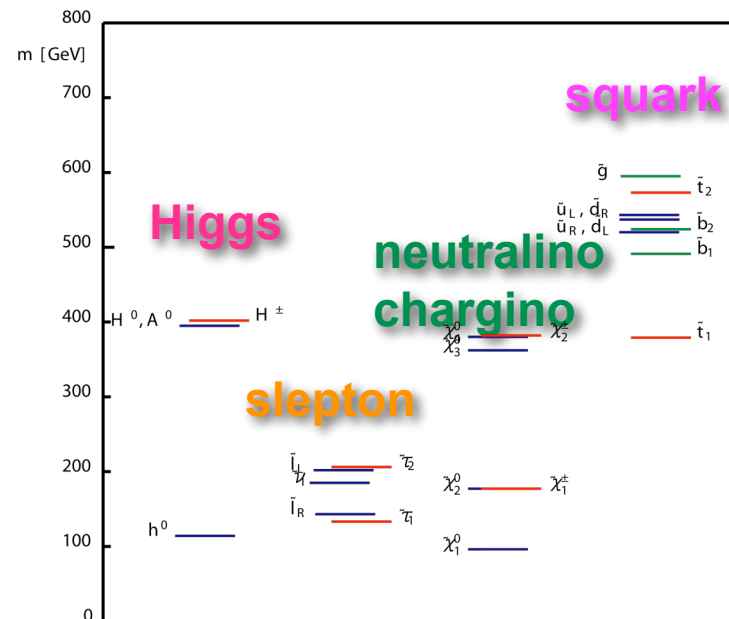
Split Supersymmetry

heavy, stable gluino $\rightarrow$ R-hadron

LHC vs ILC

Typical **mSUGRAシナリオ**

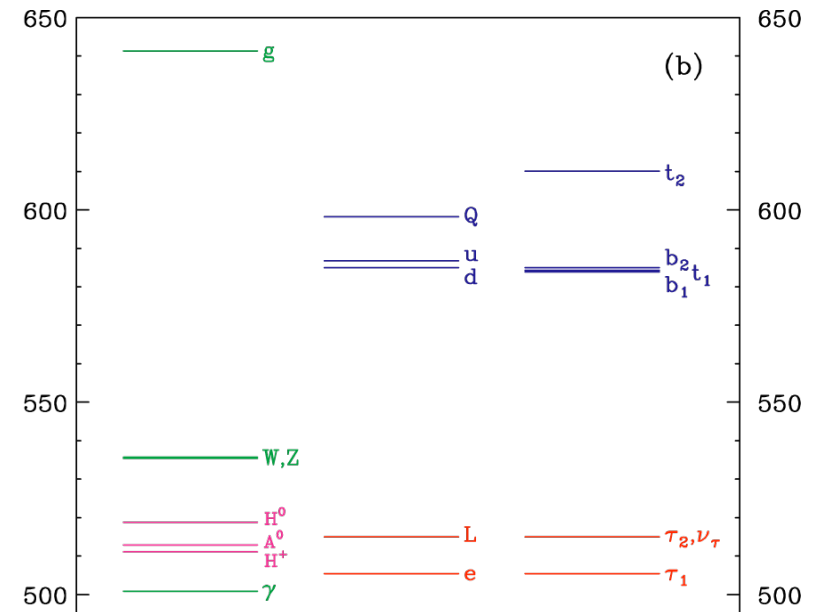
B.C.Allanach *et al.*, Eur.Phys.J.C25(2002)113



Universal Extra-Dimensionシナリオ

H-C.Cheng *et al.*,
Phys.Rev.D66(2002)036005, *ibid.* 056006

LHC
↕
ILC



LHC / LC Study Group
G. Weiglein *et al.*, hep-ph/0410364
<http://www.ippp.dur.ac.uk/~georg/lhclc/>

5. 標準理論を超える物理

ElectroWeak Symmetry Breaking (EWSB) ← Naturalness & Hierarchy Problem

いろいろなシナリオ

- SUSY

mSUGRA, GMSB, AMSB

- Extra-Dimension

LED(ADD), R-S, Universal ED(KK)

- Extended Gauge Symmetry

Little Higgs, Left-Right Symmetric Model

- Dynamical Symmetry Breaking

Strong EWSB, Chiral Lagrangian, Technicolor,

Composite Higgs, Top-quark Condensation

- Compositeness, Lepto-quarks, Higgsless, LFV, Monopole ...

Extra-Dimension

- string theory requires 10 dimensions!
 - the only theoretical approach towards a quantum description of gravity: consistency of quantum mechanics and general relativity
 - includes supersymmetry
- the extra dimensions assumed to be compactified.
 - initially the assumption was that compactification radius was order of M_{PL}^{-1}
 - then it was realised that this could be as large as a millimeter!

3 models studied in some detail (there are more!):

- ADD scenario:
several compactified, but large ($\gg 1/\text{TeV}$), dimensions, gravity propagates in bulk, SM in brane.
- Randall-Sundrum model:
1 extra dimension y with non-factorizable metric, 5D space of $-ve$ curvature, bounded by 2 branes
 - SM brane (TeV) at $y = p r_c$
 - Planck brane at $y = 0$
- Small extra dimensions:
Only fermions confined to brane, gauge-bosons propagate in a number of small ($\gg 1/\text{TeV}$) compactified dimensions.

ADD

ADD

- Large flat compactified extra-dimensions

⇒ conjecture:

- SM particles localized in 4D brane
- gravity propagates in the bulk of higher dimension

$$M_{Pl(4)}^2 = M_{Pl(4+\delta)}^{\delta+2} R_C^\delta \equiv M_D^{\delta+2} R_C^\delta$$

δ	M_D^{max} (TeV) LL, 30 fb ⁻¹	M_D^{max} (TeV) HL, 100 fb ⁻¹	M_D^{min} (TeV)
2	7.7	9.1	~ 4
3	6.2	7.0	~ 4.5
4	5.2	6.0	~ 5

Uncertainty in $\alpha(Z+jets)$

will lower the reach

Reach in M_D for γG

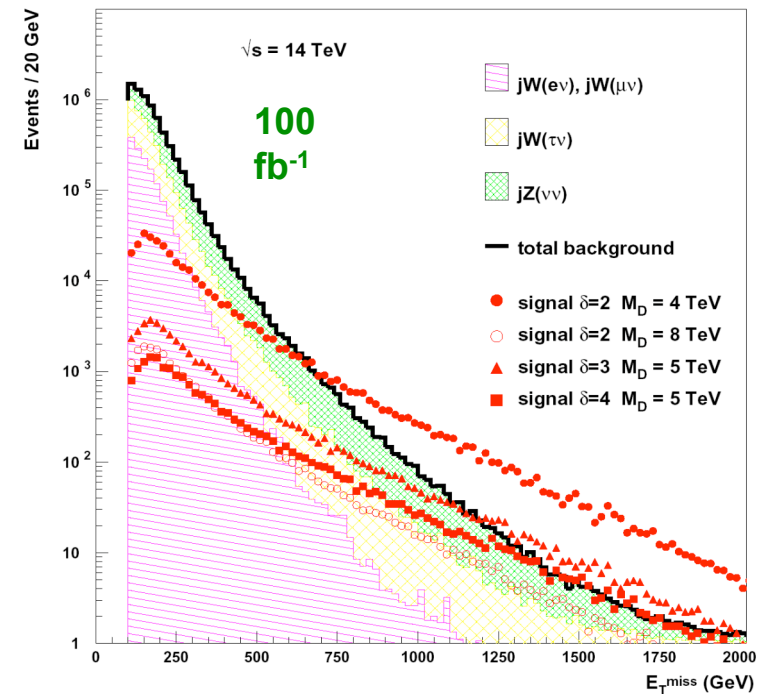
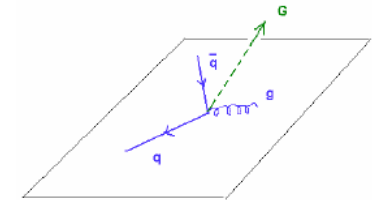
δ	M_D^{max} (TeV) HL, 100 fb ⁻¹	M_D^{min} (TeV)
2	4	~ 3.5

Ex. Direct Graviton production at LHC

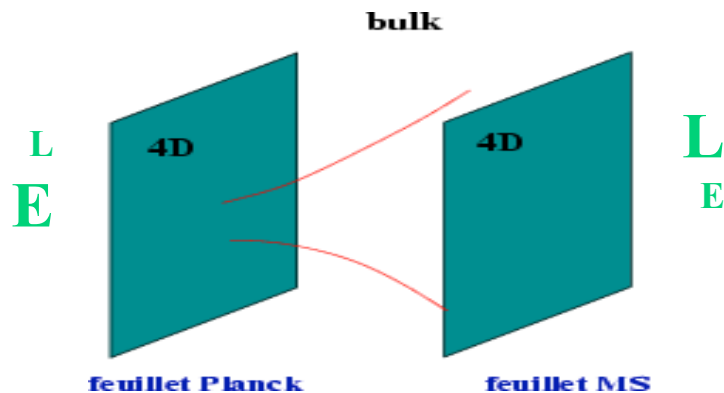
L. Vacavant, I. Hinchliffe, J.Phys.G27(2001)1839

Signals in ATLAS:

$$\left. \begin{array}{l} \bar{q}q \rightarrow gG^{(k)}, \gamma G^{(k)} \\ qg \rightarrow qG^{(k)} \\ gg \rightarrow gG^{(k)} \end{array} \right\} \text{jets} + \cancel{E}_T, \gamma + \cancel{E}_T$$



Randall-Sundrum



KK graviton excitations $G^{(k)}$

- scale Λ_π
- coupling & width determined by: $c = k/M_{Pl}$
- $0.01 < k/M_{Pl} < 0.1$
- mass spectrum: $m_n = k x_n \exp(-k\pi r_c)$

Golden channel: $G^{(1)} \rightarrow e^+e^-$

spin-2 could be determined (spin-1 ruled out)

with 90% CL up to graviton mass of 1720 GeV.

ATLAS, e^+e^- , $L=100 \text{ fb}^{-1}$
 $m_G = 1.5 \text{ TeV}$, $c = 0.01$

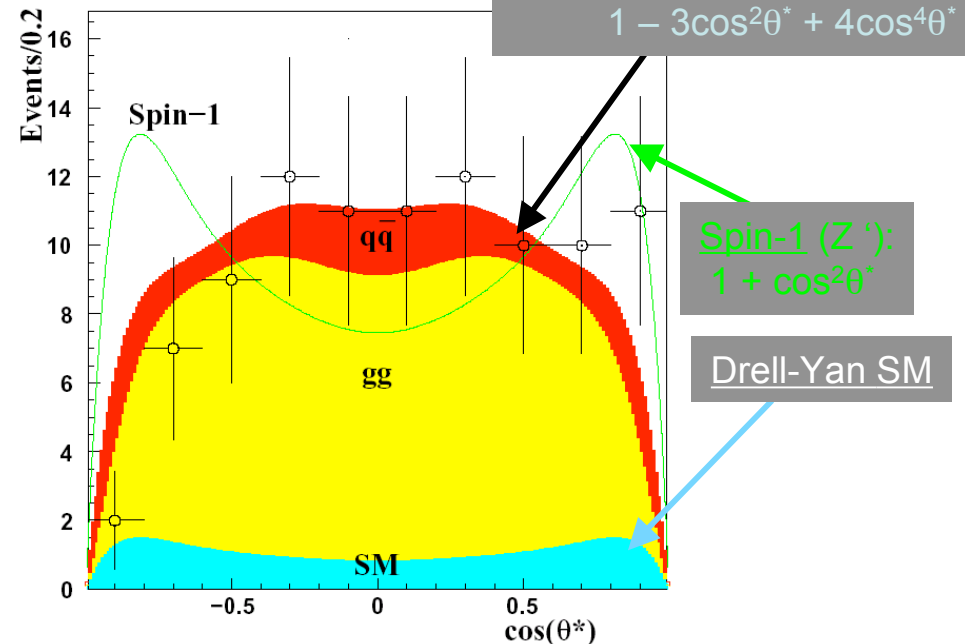
Signal:

- from gluon fusion

$$1 - \cos^4\theta^*$$

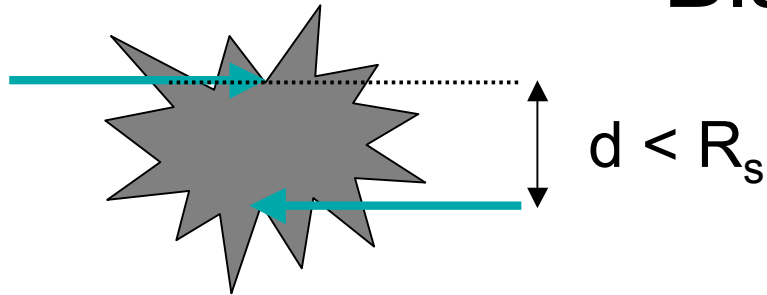
- from quark annihilation

$$1 - 3\cos^2\theta^* + 4\cos^4\theta^*$$



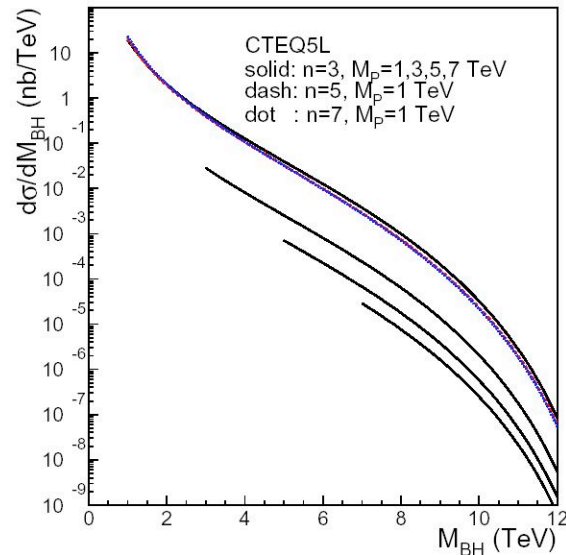
B.C. Allanach, *et al.*, JHEP9(2000)19, hep-ph/0211205

Black Hole



R_s より小さい d でpartonが衝突すると
ブラックホールができる。断面積が大きい。
衝突するパートンの不変質量 M_{BH}
(Black Holeの質量)

$$R_s = \frac{1}{\sqrt{\pi} M_P} \left[\frac{M_{BH}}{M_P} \left(\frac{8\Gamma(\frac{n+3}{2})}{n+2} \right) \right]^{\frac{1}{1+n}}$$

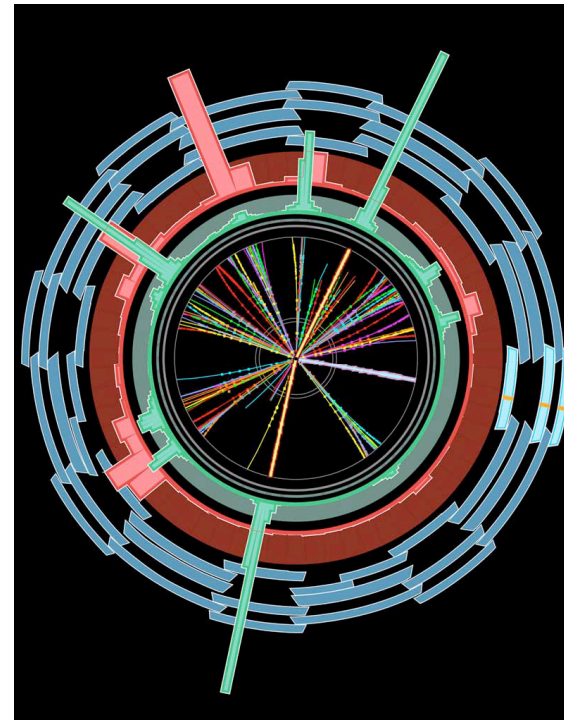


main phase ?

= Hawking radiation, or evaporation

黒体輻射: emission of particles

- high multiplicity
- “democratic” emission
- spherical distribution



Little Higgs

N.Arkani-Hamed *et al.*,
Phys.Lett.B513(2001)232

G. Azuelos *et al.*, hep-ph/0402037

Higgs is a pseudo-Goldstone boson
from global symmetry breaking.

Little Higgs signal at LHC

Heavy top $T \rightarrow tZ, bW$

Reach $M_T \sim 1$ (2) TeV for $x_\lambda = 1$ (2).

Higgs acquires a mass radiatively
at the EW scale v .
→ quadratic divergences absent
at one-loop level.

Goldstone bosons

→

Heavy Gauge Bosons

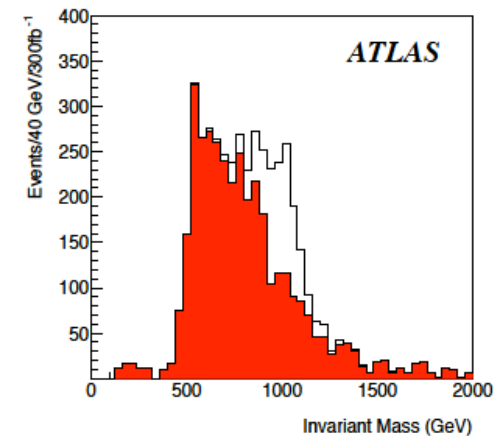
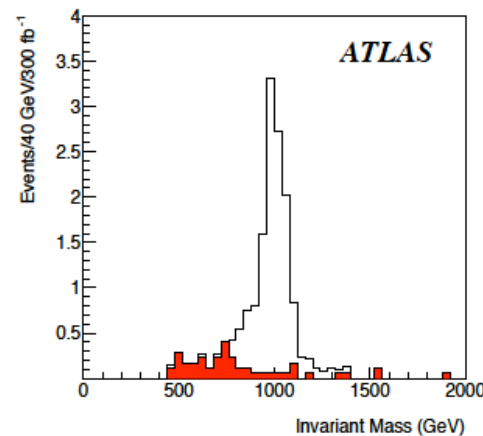
$W_H^\pm, Z_H, \gamma_H \sim 1$ TeV

Heavy Top quark

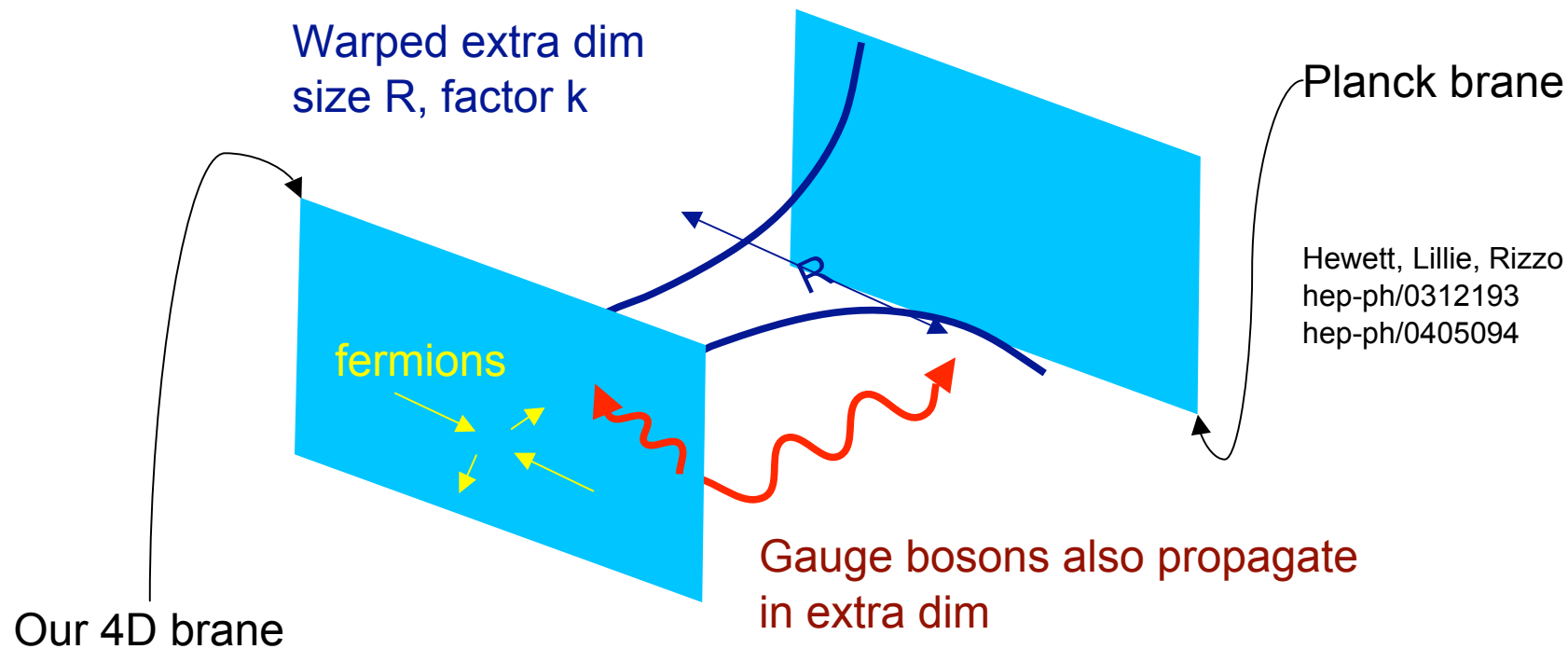
$T \sim 1$ TeV

Triplet Higgs

$\phi^{\pm\pm}, \phi^\pm, \phi^0 \sim 10$ TeV



Higgsless Model



- Gauge group in 5D : $SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)$
- Different boundaries conditions on branes break $SU(2) \times U(1)$ to $U(1)$: No Higgs needed
- Z and Z' are KK excitations of the neutral gauge field

6. QCDの物理

B.Webber TeV4LHC@FNAL

- N(N)LO計算、ME+PSマッチング
- パarton分布関数 (PDF)
- Underlying Events
- ジェット・アルゴリズム
 - Jet cone vs k_T
 - Jet energy較正

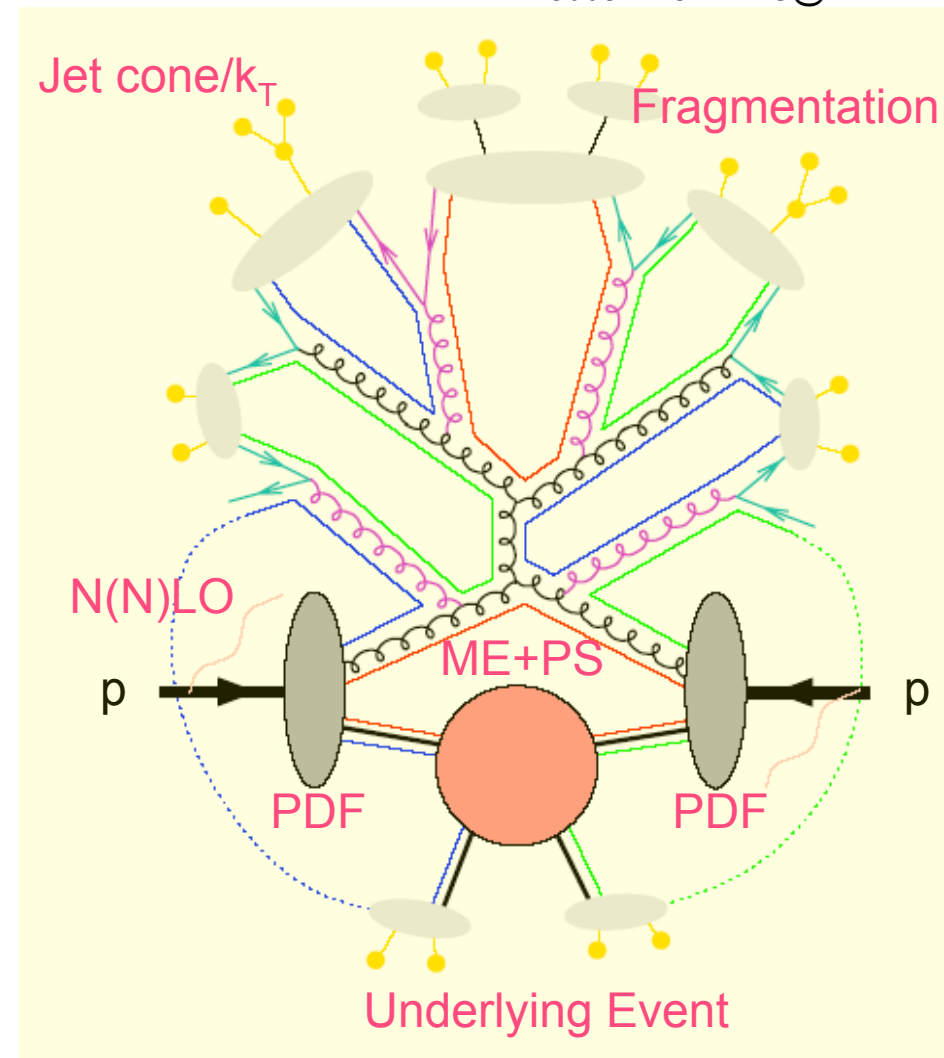
QCDプロセスと検出器(ex. E_T missing)
をちゃんと理解しないと、新粒子探索
は砂上の楼閣

Example:

VBF($H \rightarrow \tau\tau$), ttH for low M_H

W/Z+n-jets, tt +n-jetsが非常に重要

TeV4LHC Workshop (2004-2005)
<http://conferences.fnal.gov/tev4lhc/>



LHCにおける反応断面積

- $\sigma_{\text{tot}} = 70 \text{ mb}$ for LHC $\rightarrow 10^9$ 相互作用/秒 @ $10^{34} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$

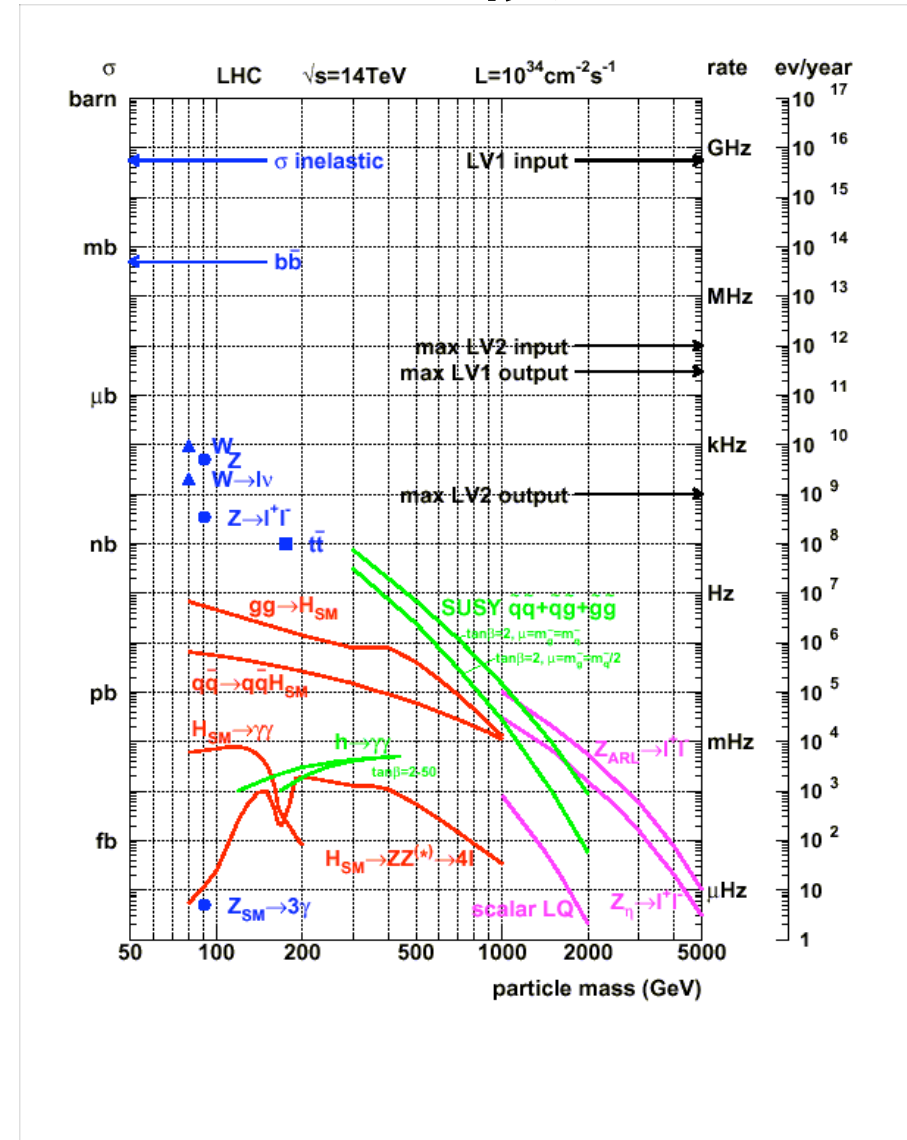
重要なプロセス

Wボソン: $\sim 2 \text{ kHz}$

トップクォーク: 10 Hz

ヒッグス粒子:
 $0.1(0.01) \text{ Hz}$

for $M_H = 100(500) \text{ GeV}$



LHCでのイベント

A simulated event in ATLAS (CMS) $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$

pp collision at $\sqrt{s} = 14$ TeV

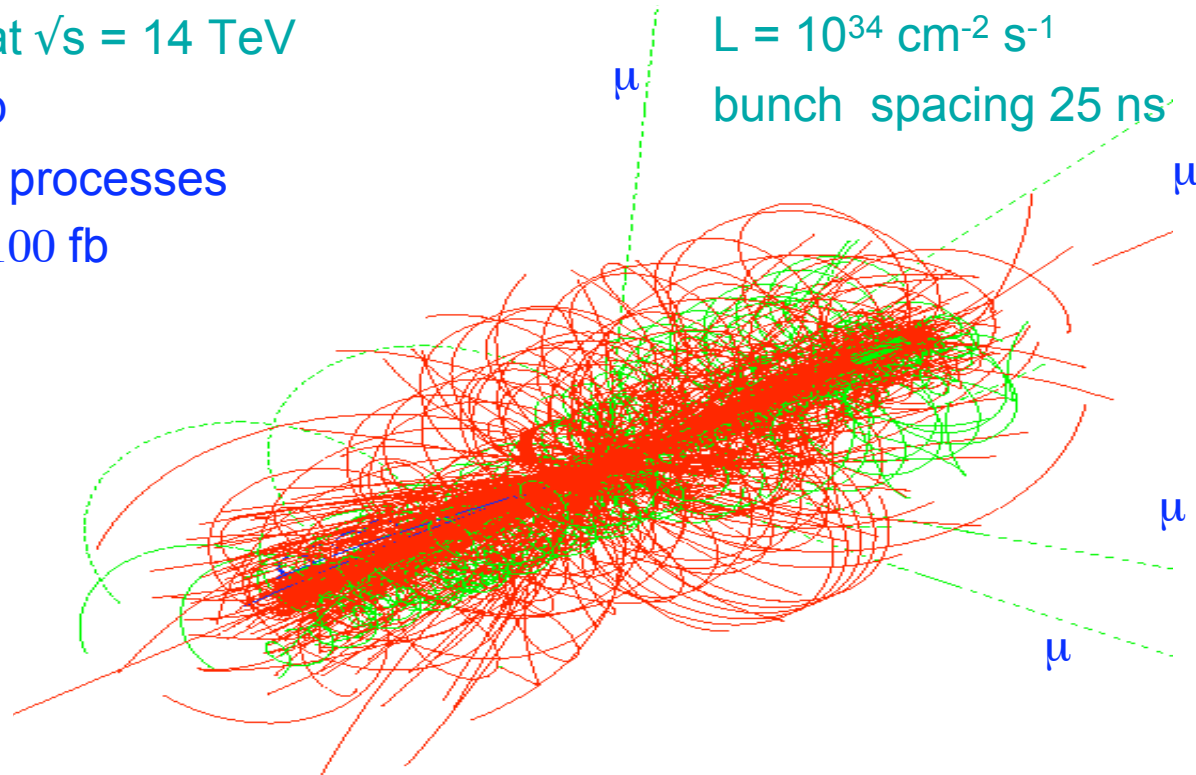
$\sigma_{\text{inel.}} \approx 70$ mb

Interested in processes

with $\sigma \approx 10\text{--}100$ fb

$L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

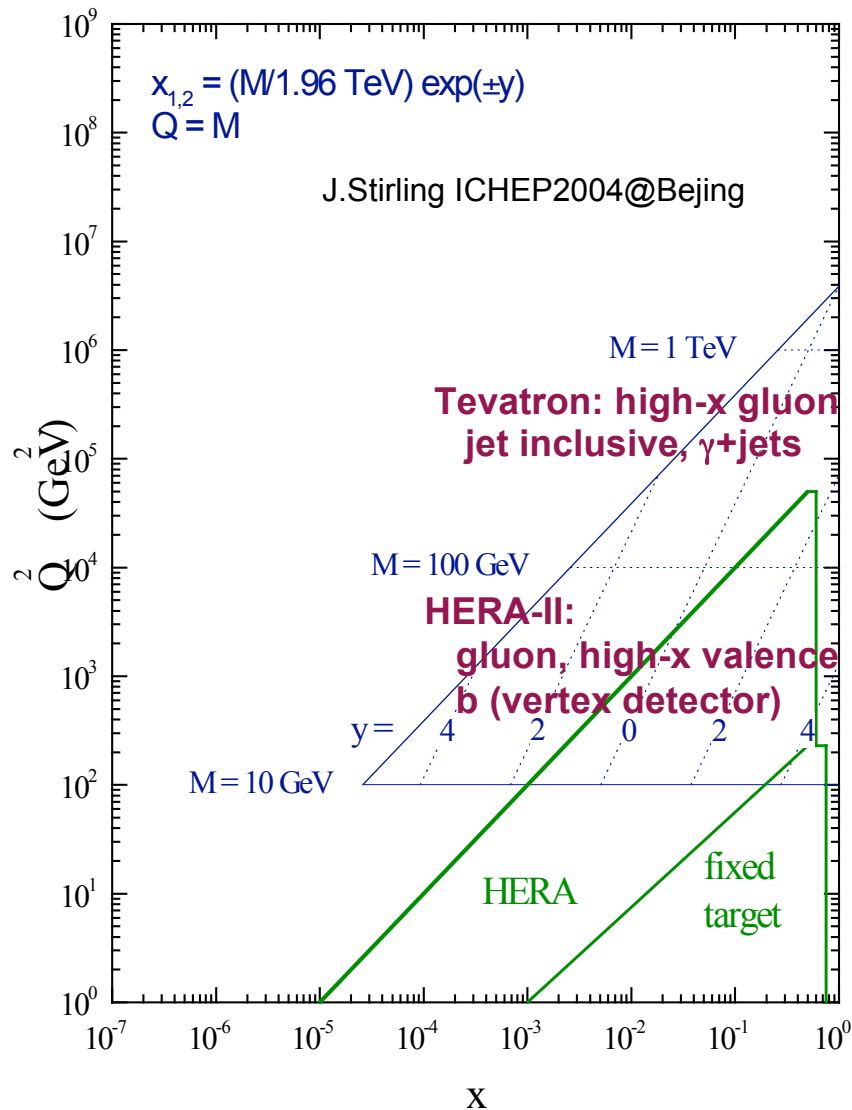
bunch spacing 25 ns



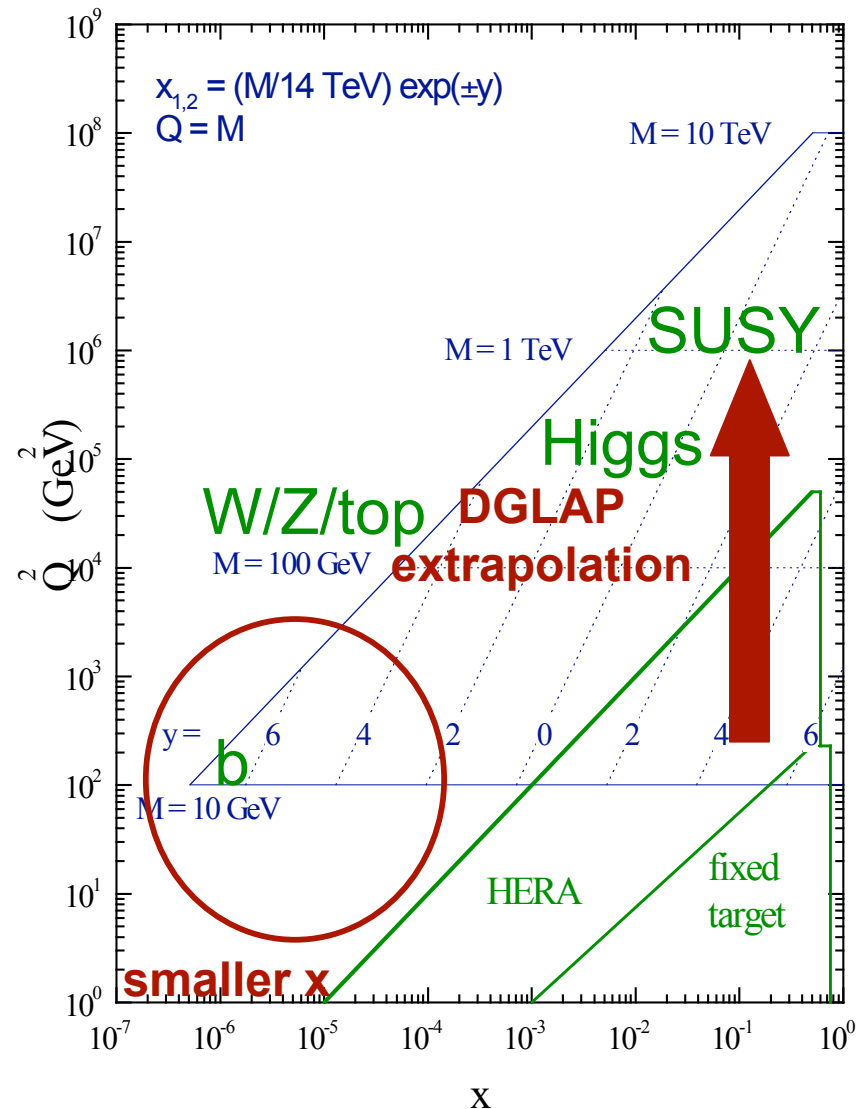
≈ 23 overlapping minimum bias events / Beam Crossing

≈ 1900 charged + 1600 neutral particles / Beam Crossing

Tevatron parton kinematics



LHC parton kinematics



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

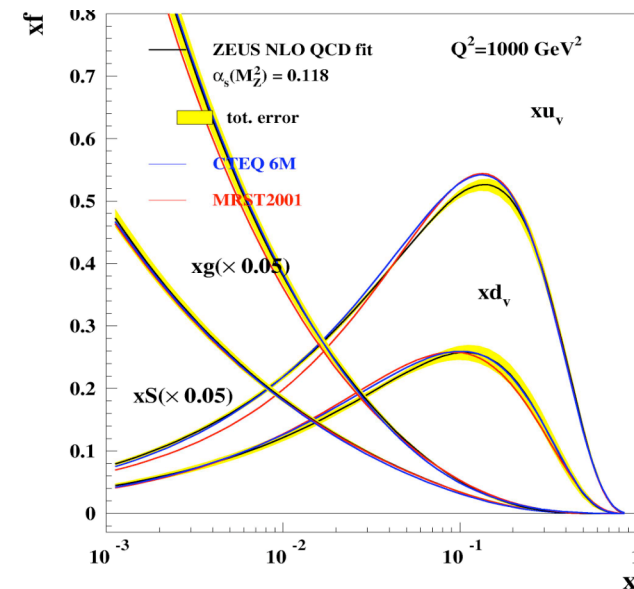
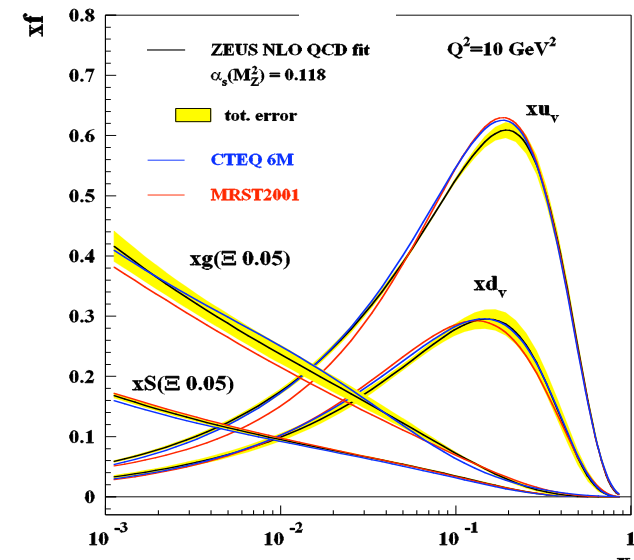
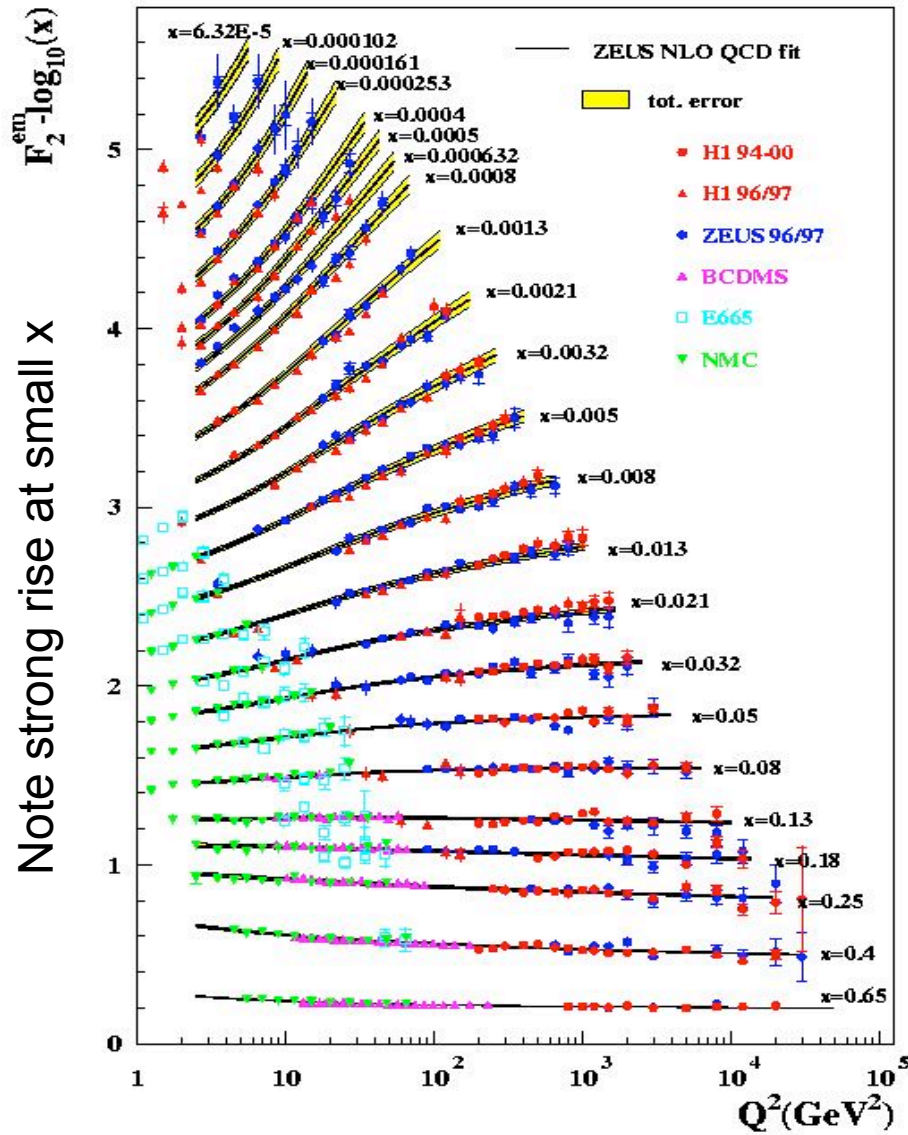
2004.11.25

Prospects for TeV Scale New Physics at LHC

HERA-LHC Workshop (2004-2005)
<http://www.desy.de/~heralhc/>

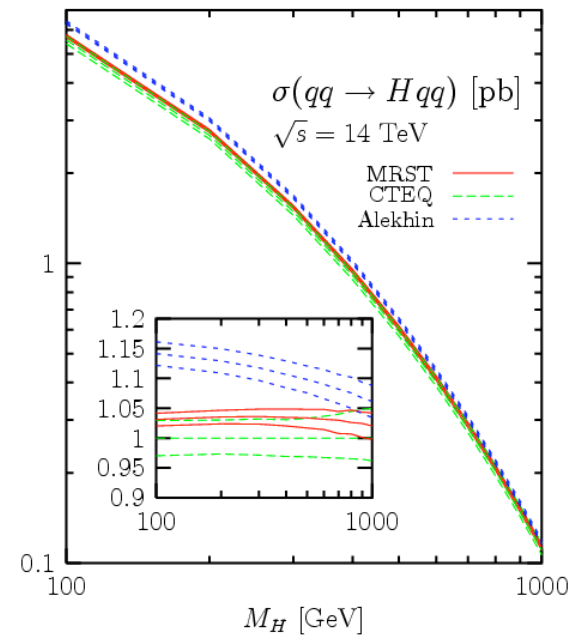
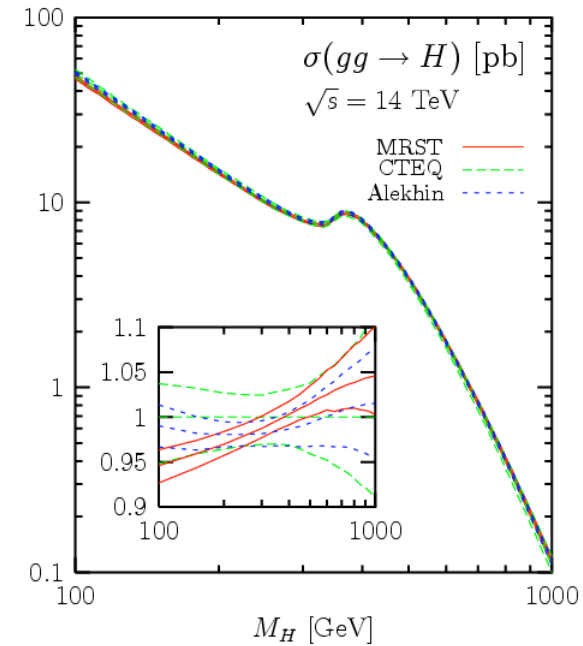
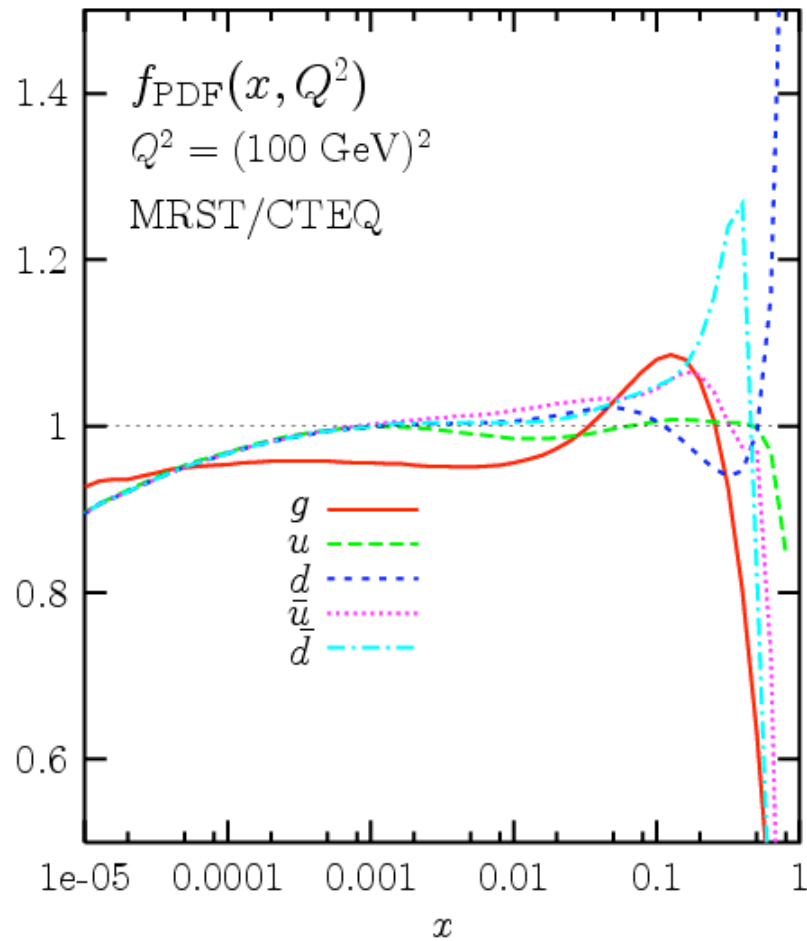
55

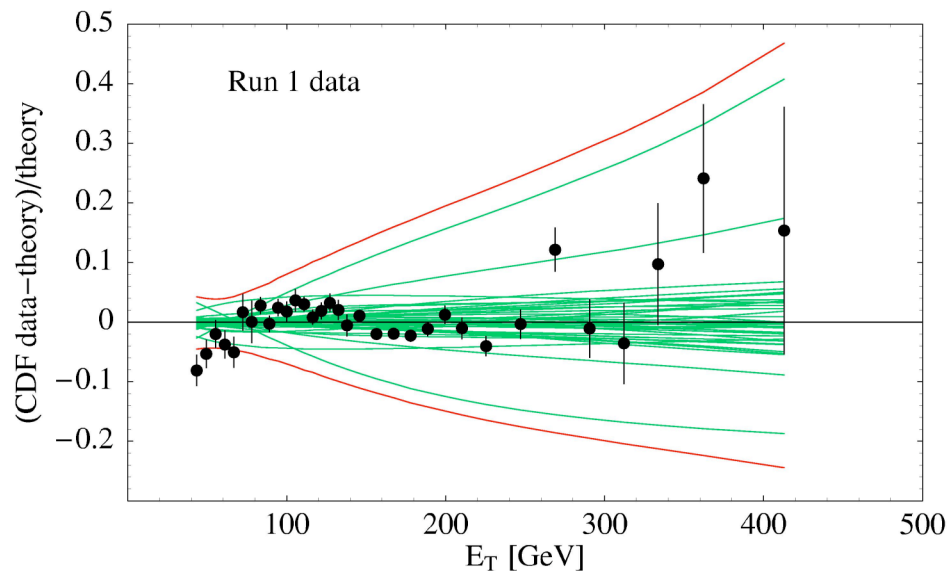
パートン分布関数(PDF)



SM Higgs production 生成断面積

→ 断面積のPDFによる不定性は5%以下。

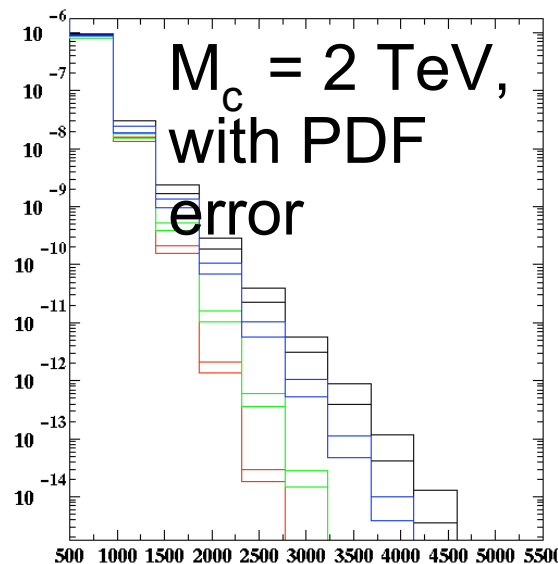
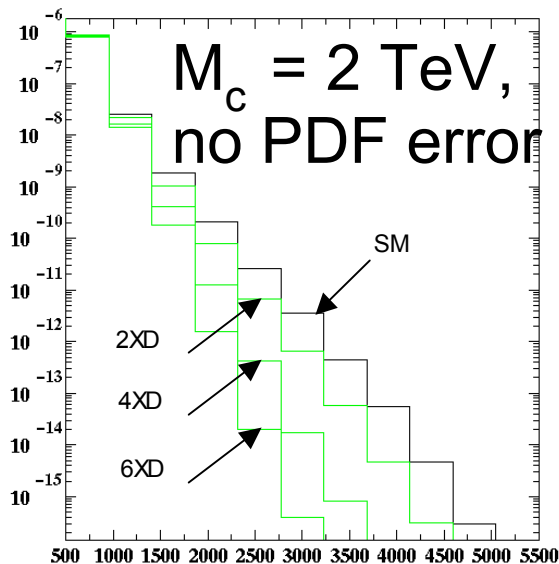




Example of how PDF uncertainties matter— **Tevatron jet data were originally taken as evidence for new physics**

Today they are within PDF uncertainties. (Example from CTEQ hep-ph/0303013)

Uncertainties is dominated by the high x gluon uncertainty.



LHC example:
Dijet cross section potential sensitivity to compactification scale of extra dimensions (M_c) reduced from ~ 5 TeV to 2 TeV.

7. まとめ

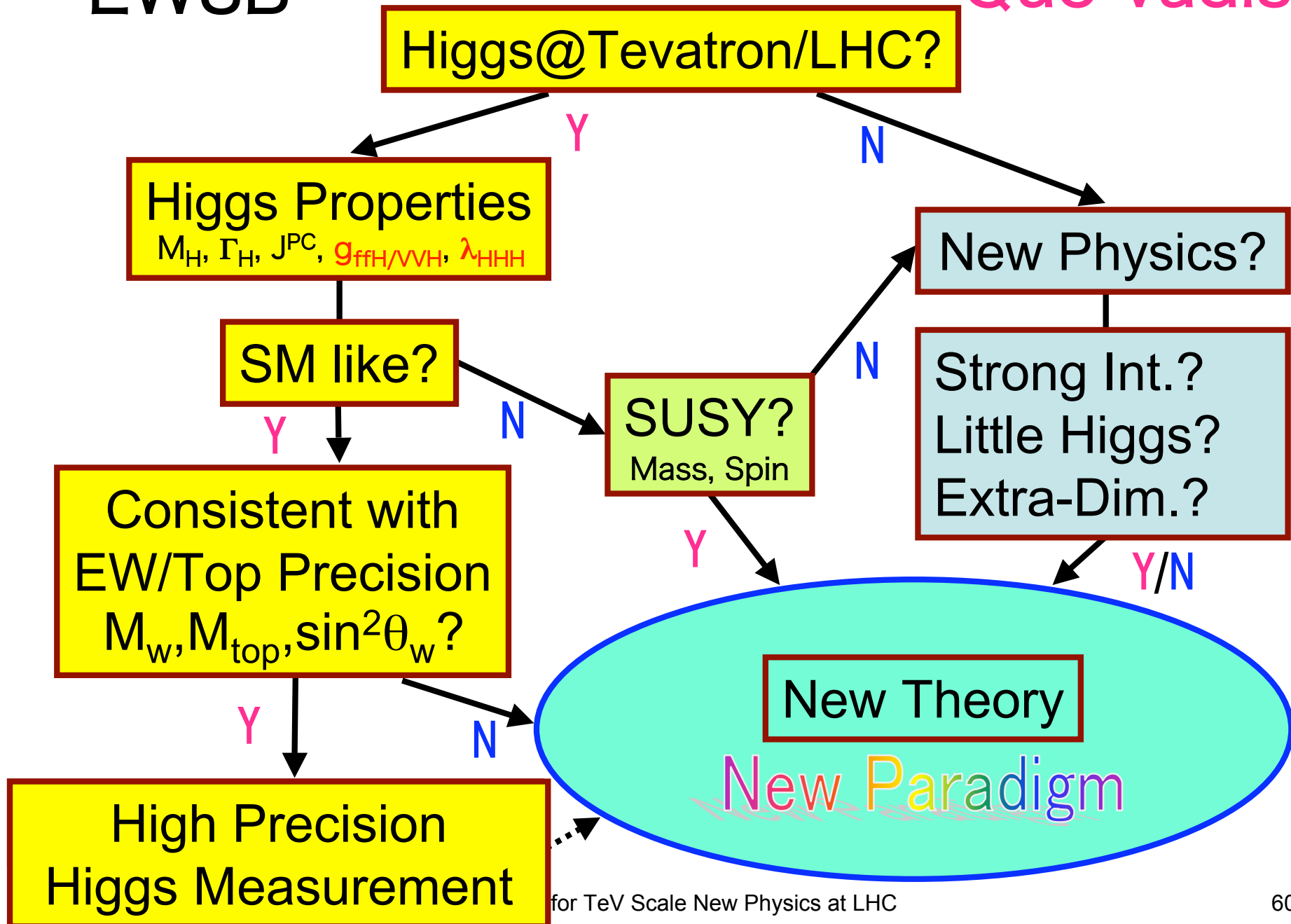
LHCでTeV領域の新しい物理が必ず見つかるはず。

⇒ LHCにより今後の素粒子物理学の進むべき方向が分かる！

- ヒッグス粒子は、あれば必ず一つ以上発見。
- 超対称性粒子や余次元といった新しい物理の発見が可能。
- 数TeV以下の新粒子の発見が可能。モデルによらないサーチも重要。
- 発見のみならずパラメーターの測定をする。誤差30%→10%が目標。
- SM/QCDプロセスの理解とツール(W/Z/top)としての利用が不可欠。
ヒッグス粒子もそのうちツールに。

EWSB

Quo vadis?



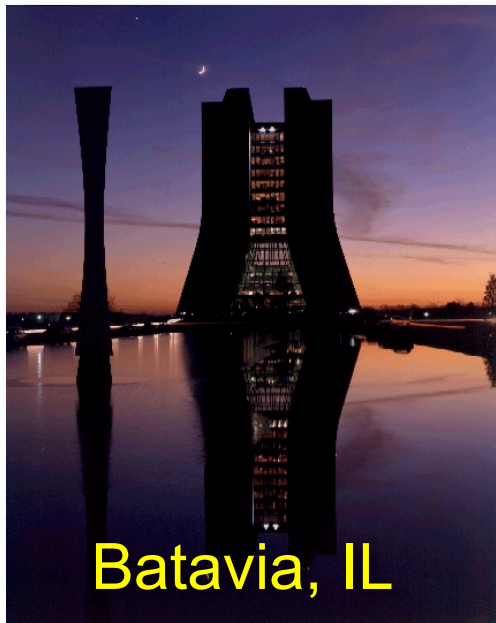
for TeV Scale New Physics at LHC

特に若い実験・理論の人へ

Tevatron/LHCは、エネルギー・フロンティアで
物理を研究するまたとないチャンス！

"If you are lucky enough to have lived in Paris as a young man,
then wherever you go for the rest of your life, it stays with you,
for Paris is a moveable feast."

A. Hemingway *「A Moveable Feast」*



Batavia, IL

Wilson Hall ©FNAL Photo
2004.11.25



Paris

Prospects for TeV Scale New Physics at LHC



Genève, CH

Bldg.40 ©CERN Photo
Eclipse on August 11, 1999