

# 高エネルギーハドロン衝突の QCD物理

2017年 12月 5-7日

神戸大学 山崎祐司

[yamazaki@phys.sci.kobe-u.ac.jp](mailto:yamazaki@phys.sci.kobe-u.ac.jp)

# 講義の内容

1. ハドロン散乱の基礎過程  
ソフトな散乱とハードな散乱, 様々なプロセス
2. パarton密度  
フォーマリズム, 電子・陽子散乱による測定, 解釈
3. ハードな散乱と摂動論的QCD  
ジェットと破砕化, 高次の摂動計算入門,  $\alpha_s$  測定
4. 談話会: 「LHC 陽子散乱の理解と QCD:  
トッブクオーク, 新物理探索を例にとって」
5. ソフトな散乱 (+3. の続き)  
全断面積, 回折散乱, 多重parton散乱
6. 回折散乱の摂動論的理解  
回折散乱の実験・解析手法, 前方粒子生成

# プロローグ

- QCDの歴史は，それほど長くない
  - Gross, Politzer, Wilczek 1973 Asymptotic freedom of QCD  
あまり注目されていなかった
    - パートンと Bjorken scaling, SLAC-MIT: 1968 年（私が生まれた年）
    - にもかかわらず， $J/\psi$  が1974 年 11 月に発見されるまで，クォークは仮想的なものと考えられていた
    - グルーオンの発見 (素粒子の中で唯一ノーベル賞なし！) 1979年
- QCDは汚い？複雑？
  - だからこそ，いい加減でも十分エキスパートに
  - 高エネルギー QCD は，いわゆるハドロン物理ともちょっと違う，摂動論の世界
    - ある意味，場の理論のありがたみと困難を，同時に味わえる

# LHC (Large Hadron Collider) at CERN\*

\*CERN: 欧州原子核研究所

- 標準模型の予言する質量起源のヒッグス粒子, 標準模型を超える粒子・相互作用の発見が目的
- 世界最大, 最高エネルギーの加速器

周長27km

(電子・陽電子衝突実験  
LEP トンネルの再利用)

7TeV = 7 兆電子ボルト  
(TeV =  $10^{12}$  eV)

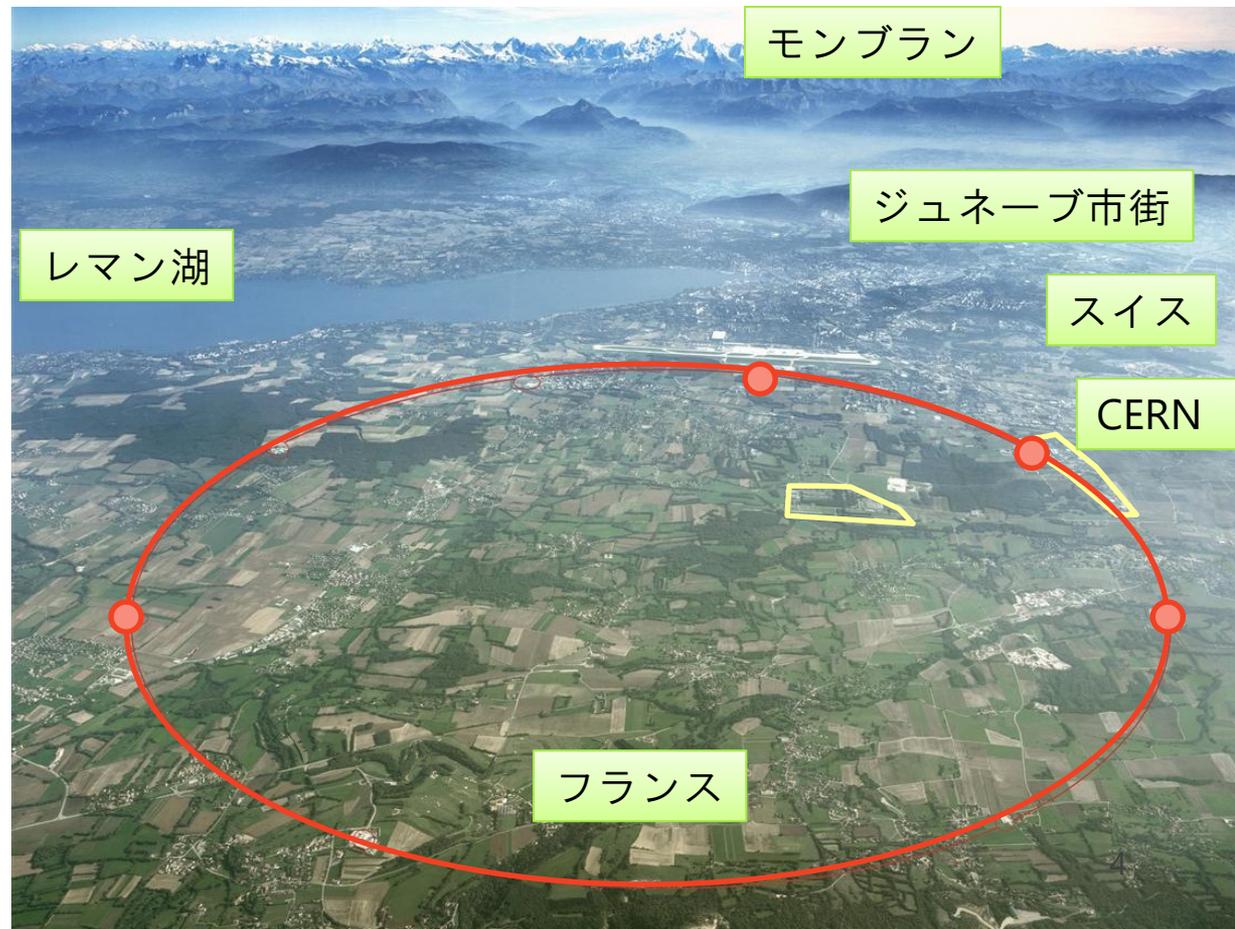
陽子同士の衝突

重心系エネルギー14 TeV

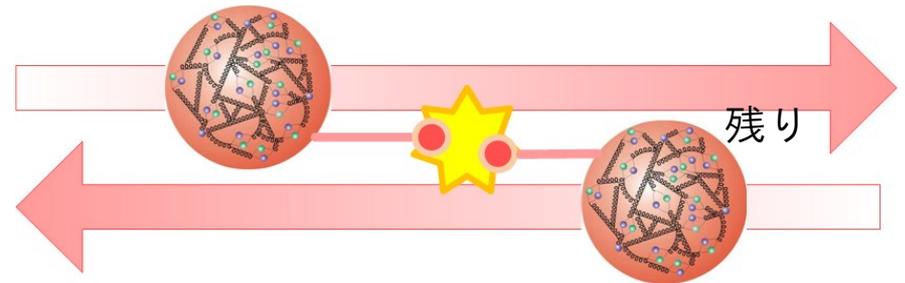
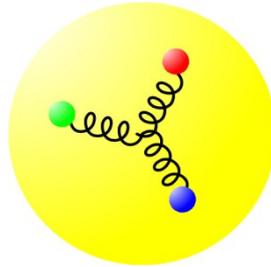
→ 2010-12 年は 7-8 TeV

**2015年から 13 TeV 衝突**

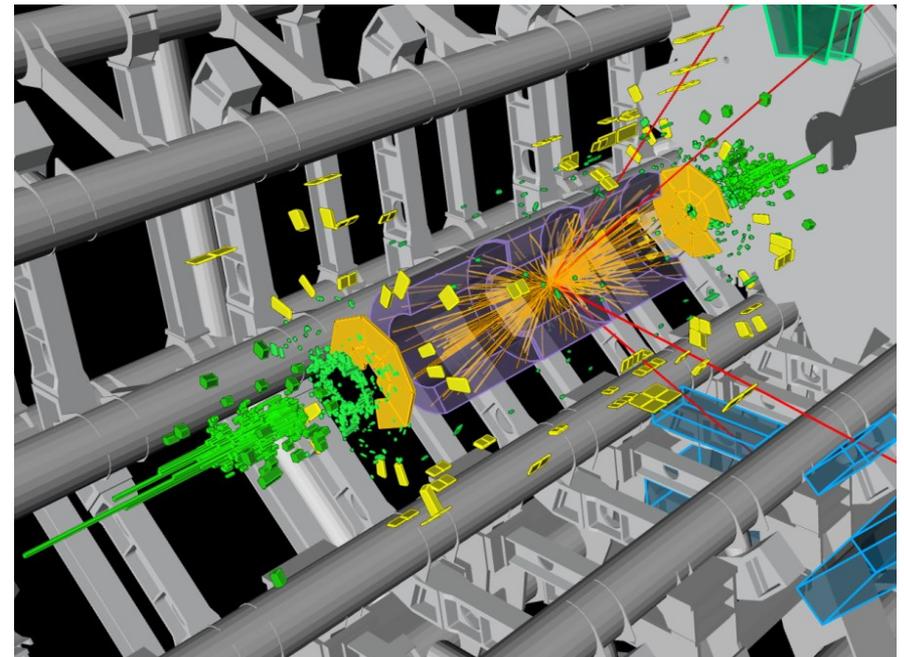
40MHz 衝突



# LHC は、陽子をぶつける



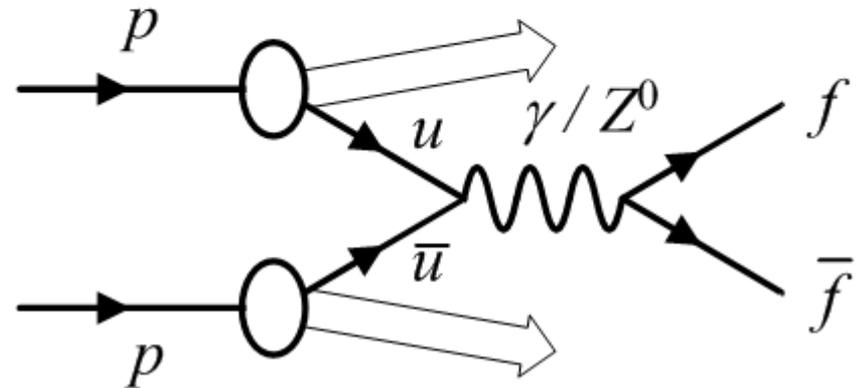
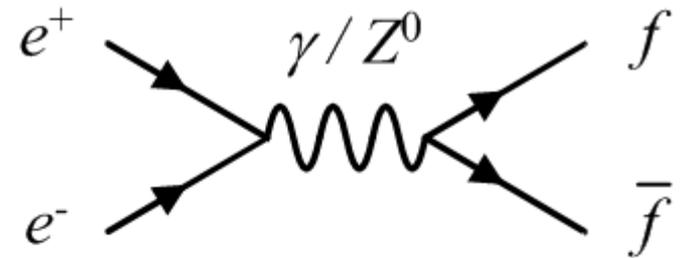
激しい散乱



- 陽子は複合粒子  
クォーク， グルーオンで  
できている
- 激しい散乱は， このクォーク，  
グルーオンのぶつかり合い  
残りは飛び去る
  - － ただし， パートンが見えないと  
全体がぐちゃっとぶつかる  
ように見える
  - － ぶつかる確率は， 陽子の  
「断面積」に比例

# ハドロンコライダー： $e^+e^-$ 衝突との違い

- $e^+e^-$ 衝突：
  - ビームが完全に対消滅できる
    - 新粒子の対生成が（エネルギー効率よく）できる
    - ビーム進行方向の運動量保存が使える
- ハドロンコライダー
  - : ビームの一部が散乱
    - ビームと垂直な面での運動量保存だけが使える



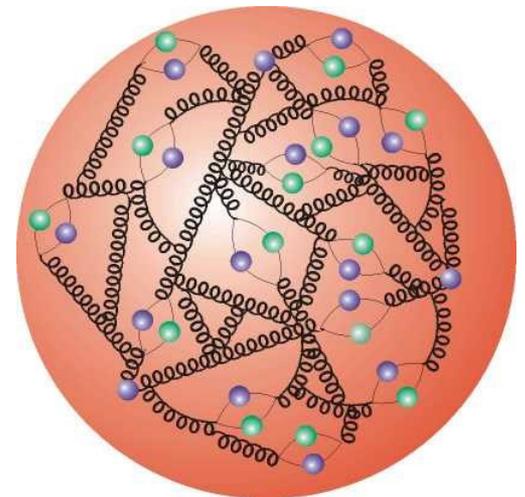
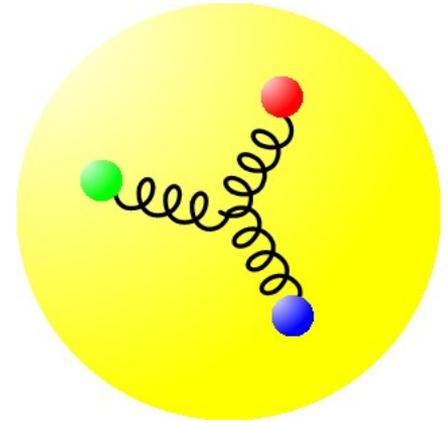
# 陽子の基本構造

- バリオン：3つのクォーク
  - 強い相互作用で閉じこめられている  
カラー相互作用＝グルーオン
  - RGB（赤緑青）でカラー中性

$$p = (u \quad u \quad d) \quad n = (u \quad d \quad d)$$

$$1 = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} \quad 0 = +\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{2}{3}$$

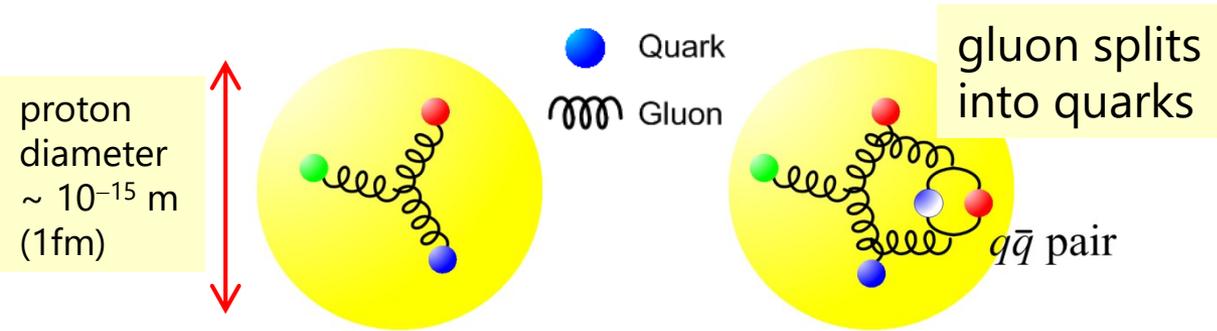
- 強い相互作用@低エネルギー  
結合定数大きい
  - もっと細かく見ると，右図の  
ようにうじゃうじゃしている？



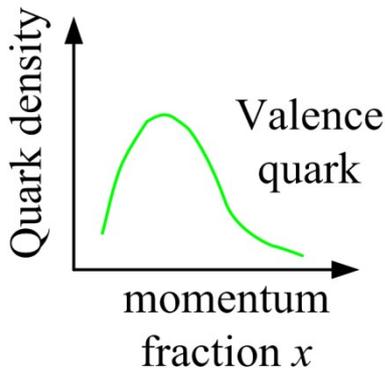
# 陽子中のクォーク， グルーオンの分布は？

- 想像してみてください
- 知っている人は，なぜそうなるのか教えて
  
- 関連するはなし：
  - ニュートリノ・核子散乱断面積（フォームファクター）
  - クォークの破碎関数，特に重いクォーク

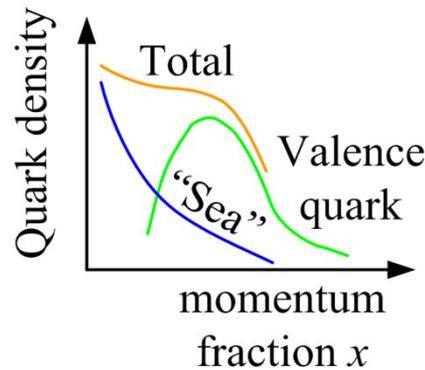
# 固定標的実験での陽子構造測定



- $Q^2$  が大きくなると波長が短くなる
  - 細かい内部構造が見えてくる
  - グルーオンがクォーク・反クォーク対に分解してできる「Sea (海) クォーク」



early fixed target exp'ts  
 $Q \sim 1-3 \text{ GeV} (10^{-1} \text{ fm})$



recent fixed target + muon  
 $Q \sim 1-10 \text{ GeV} (10^{-2} \text{ fm})$

Increasing resolution (large  $Q^2$ )  $\rightarrow$   $Q^2 \approx \frac{1}{\lambda^2}$

# 実際の分布

$x$ : パートンの  
運動量比

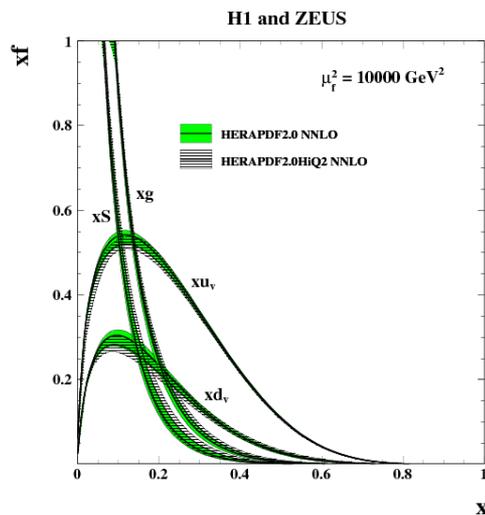
$f$ : パートンの密度

$g$ : gluon

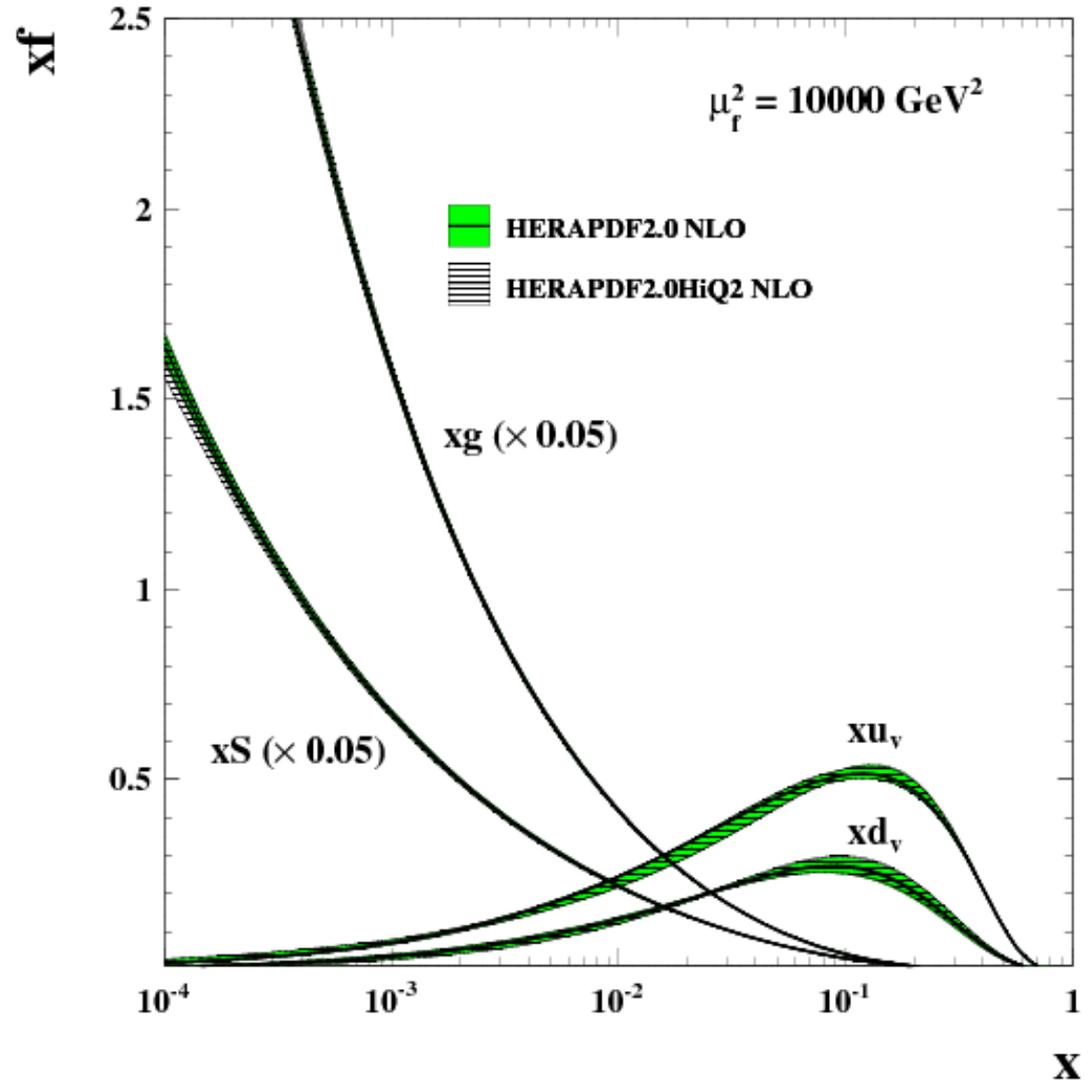
$s$ : sea quark

$u_V, d_V$ :

Valence (価) クォーク

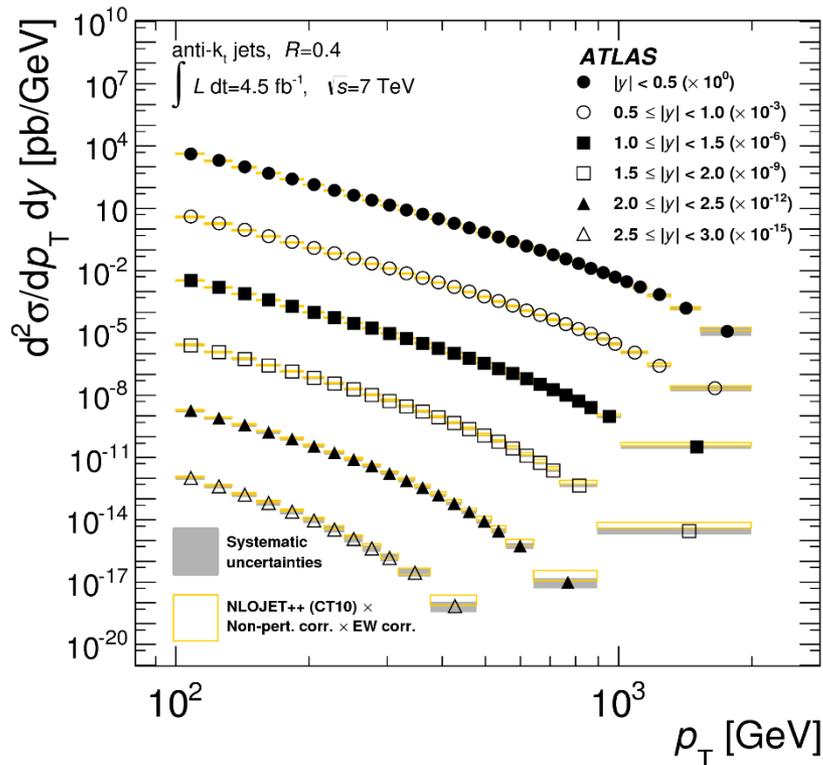


H1 and ZEUS

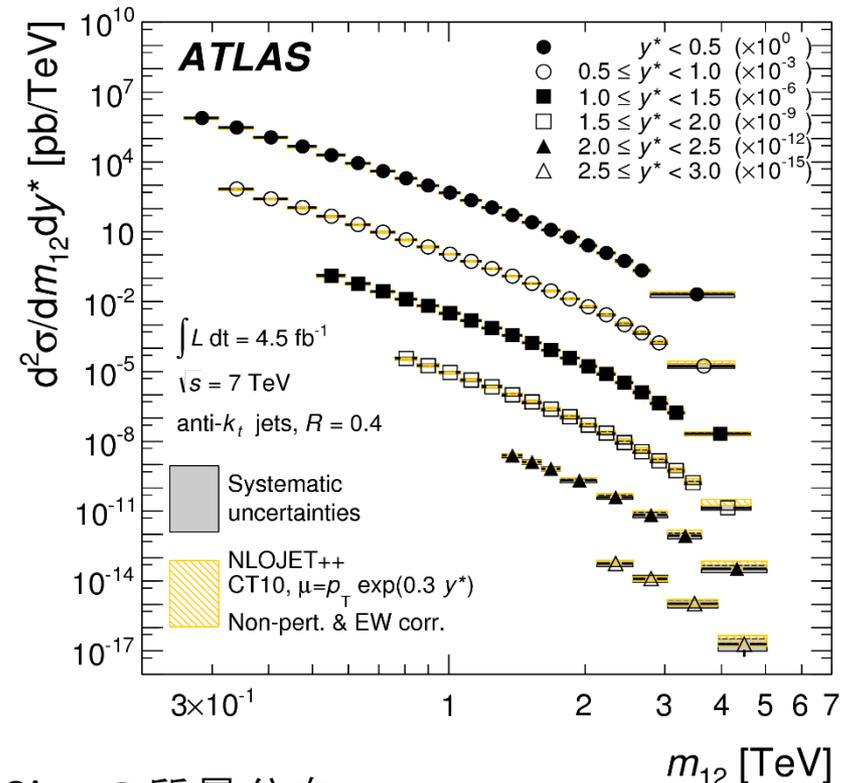


# 散乱断面積の形

- 低い運動量, 質量のものが圧倒的に多い



Jet ( $\approx$  quark or gluon)  
の横運動量分布



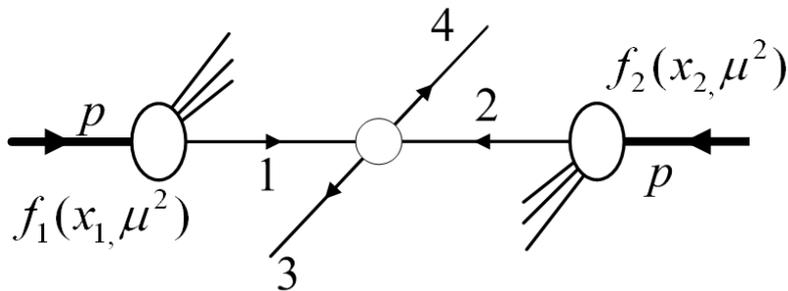
2jet の質量分布  
 8 TeV 衝突で 4 TeV くらいまでいける  
 でもたくさんあるのは 1 TeV くらいまで

# ハドロンコライダーと運動量保存

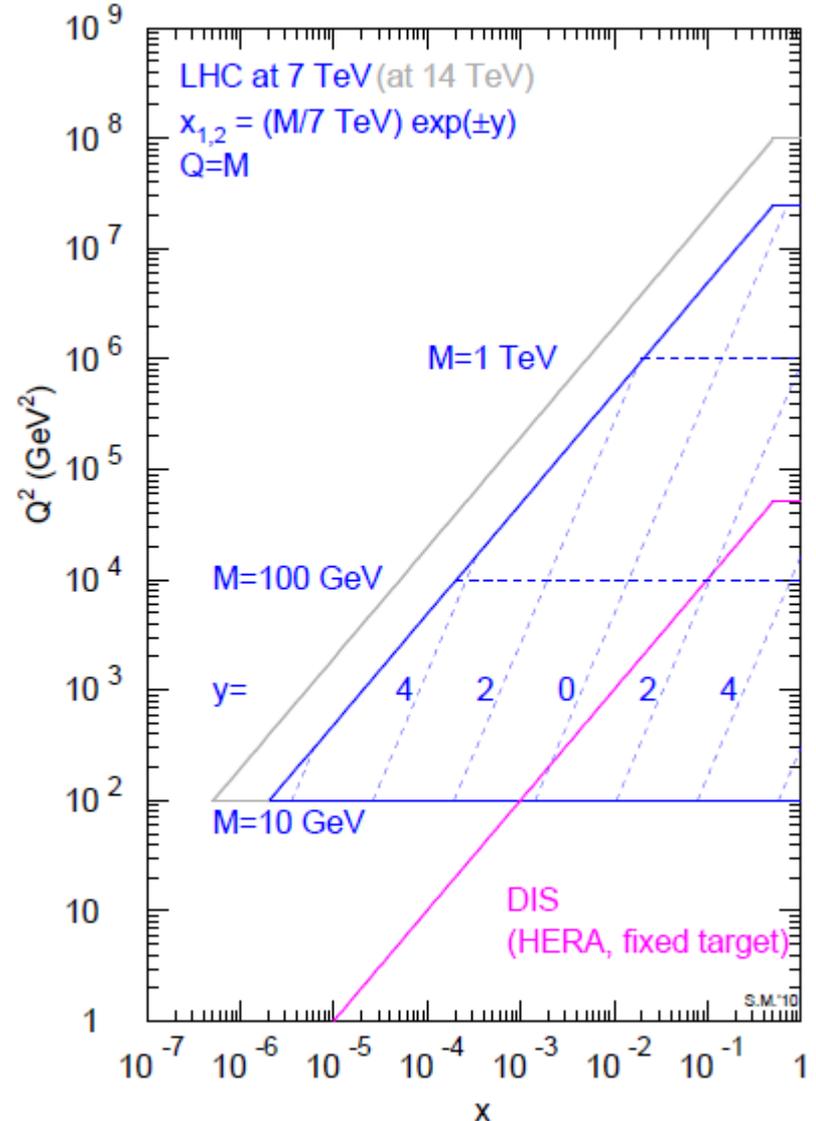
- 陽子の残り（ほぼすべて）は、前方に飛び去る
- パートン散乱の重心系エネルギー  

$$\sqrt{\hat{s}} = \sqrt{x_1 x_2 S}$$
- 移行運動量 (の負数の2乗)  

$$\hat{t} \equiv Q^2 \sim p_T^2$$



基本（再低次の摂動）は  
 パートン・パートンの2 → 2 散乱



# ハドロン衝突の運動学と Rapidity

偽ラピディティ (pseudorapidity)

$\eta = -\ln(\tan \frac{\theta}{2})$  つまり角度の関数, 90度でゼロ

ラピディティ

$$e^\eta = -\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \sqrt{\frac{1+\cos\theta}{1-\cos\theta}}$$

$$y = \ln \sqrt{\frac{E+P_z}{E-P_z}} = \ln \frac{E+P_z}{m_T} \quad (1) \text{ の massless 極限}$$

# Why rapidity?

- Lorentz boost

$$\begin{pmatrix} E' \\ p_{z'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma \\ -\beta\gamma & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ p_z \end{pmatrix} \text{ より}$$

$$\begin{aligned} y' &= \ln \frac{E' + p_{z'}}{m_T} = \ln \frac{(1 - \beta)\gamma(E + p_z)}{m_T} = y + \ln(1 - \beta)\gamma \\ &= y + \Delta y \end{aligned}$$

つまり, rapidity の計算は, 足し算でよい!

- 2つの終状態パートンの CM frame のラピディティは,
  - boost なしなら  $\pm y_0$ ,  $y_{CM} = 0$
  - $y_{CM} = y_B$  だけ boost していれば  $y_B \pm y_0$

# ハドロン衝突の運動学と Rapidity

ラピディティ

$$y = \ln \sqrt{\frac{E+P_Z}{E-P_Z}} = \ln \frac{E+P_Z}{m_T} \quad (1), \quad m_T^2 = p_x^2 + p_y^2 + m^2 = p_T^2 + m^2$$
$$(\because E^2 - p_Z^2 = \mathbf{p}^2 + m^2 - p_Z^2 = p_T^2 + m^2)$$

よって,

$$e^{y_{partonCM}} = \sqrt{\frac{(E+P_Z)_{partonCM}}{(E-P_Z)_{partonCM}}} = \sqrt{\frac{(E+P_Z)_{1+2}}{(E-P_Z)_{1+2}}} = \sqrt{\frac{x_1}{x_2}} \quad (2)$$

$$E_{1+2} = (x_1 + x_2)E, \quad p_{Z1+2} = (x_1 - x_2)E \quad (\text{ほぼmassless 仮定})$$

$$M \equiv \sqrt{\hat{s}} = \sqrt{x_1 x_2 s} \quad \text{と (2) より } x_1 = \frac{M}{\sqrt{s}} e^{y_{partonCM}}$$

$$Q^2 = M^2 = x_1^2 s \times e^{2y_{partonCM}} = x_2^2 s \times e^{-2y}$$

# パートンの運動量比

$$e^{y_{partonCM}} = \sqrt{\frac{(E+P_Z)_{partonCM}}{(E-P_Z)_{partonCM}}} = \sqrt{\frac{(E+P_Z)_{1+2}}{(E-P_Z)_{1+2}}} = \sqrt{\frac{x_1}{x_2}} \quad (2)$$

$$E_{1+2} = (x_1 + x_2)E, \quad p_{1+2} = (x_1 - x_2)E \quad (\text{ほぼmassless 仮定})$$

$$M \equiv \sqrt{\hat{s}} = \sqrt{x_1 x_2 s} \quad \text{と (2) より } x_1 = \frac{M}{\sqrt{s}} e^{y_{partonCM}}$$

終状態の運動量，エネルギーから

$$E_{1+2} = E_{3+4}, \quad p_{1+2} = p_{3+4}$$

よって，終状態から始状態の  $x_1, x_2$  を計算できる

# ハドロン衝突の運動学と Rapidity

$$\text{また, } x_1 = \frac{(E+P_Z)_{1+2}}{2E} = \frac{(E+P_Z)_1+(E+P_Z)_2}{2E}$$

Massless particle なら,  $E - p_Z = \frac{E_T(E-p_Z)}{E_T}$ ,  $E_T = \sqrt{E^2 - p_Z^2}$  より

$$E - p_Z = E_T \sqrt{\frac{(E-p_Z)^2}{E^2 - p_Z^2}} = E_T e^{-y} \text{ よって } x_1 = \frac{E_{T1}e^{-y_1} + E_{T2}e^{-y_2}}{2E_{beam}}$$

2 → 2 散乱の両粒子（あるいはジェット）の運動量（あるいは向きとエネルギー, 向きと横運動量）がわかれば, 始状態の運動量もわかる

# ハドロン散乱の基本変数: $E_T, y$ (or $\eta$ )

- ハドロン散乱の位相空間

$$d^4p\delta(p^2 - M^2) = \frac{d\mathbf{p}}{E} = \pi dy dp_T^2$$

$$\therefore \frac{dy}{dp_Z} = \frac{d}{dp_Z} \ln \frac{E+p_Z}{m_T} = \frac{d}{dp_Z} \left( \frac{E+p_Z}{m_T} \right) \cdot \frac{m_T}{E+p_Z} \quad (1) \quad m_T \text{ は約分できる}$$

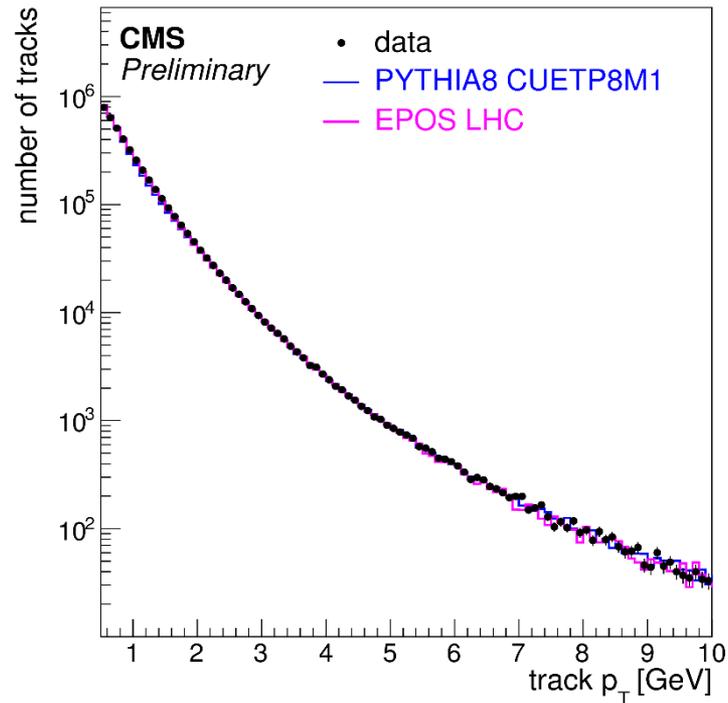
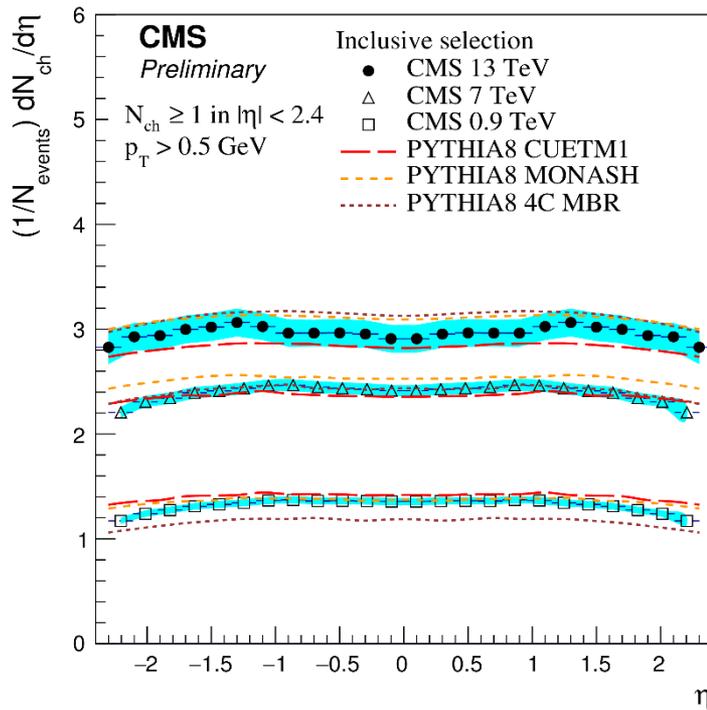
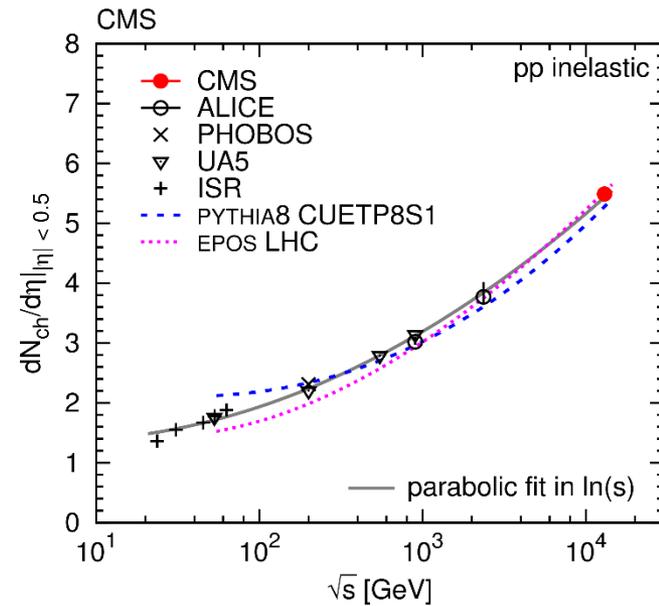
$$\frac{d}{dp_Z} (E + p_Z) = \frac{d}{dp_Z} \left( \sqrt{m_T^2 + p_Z^2} + p_Z \right) = \frac{p_Z}{\sqrt{m_T^2 + p_Z^2}} + 1 = \frac{p_Z + E}{E} \quad \text{より}$$

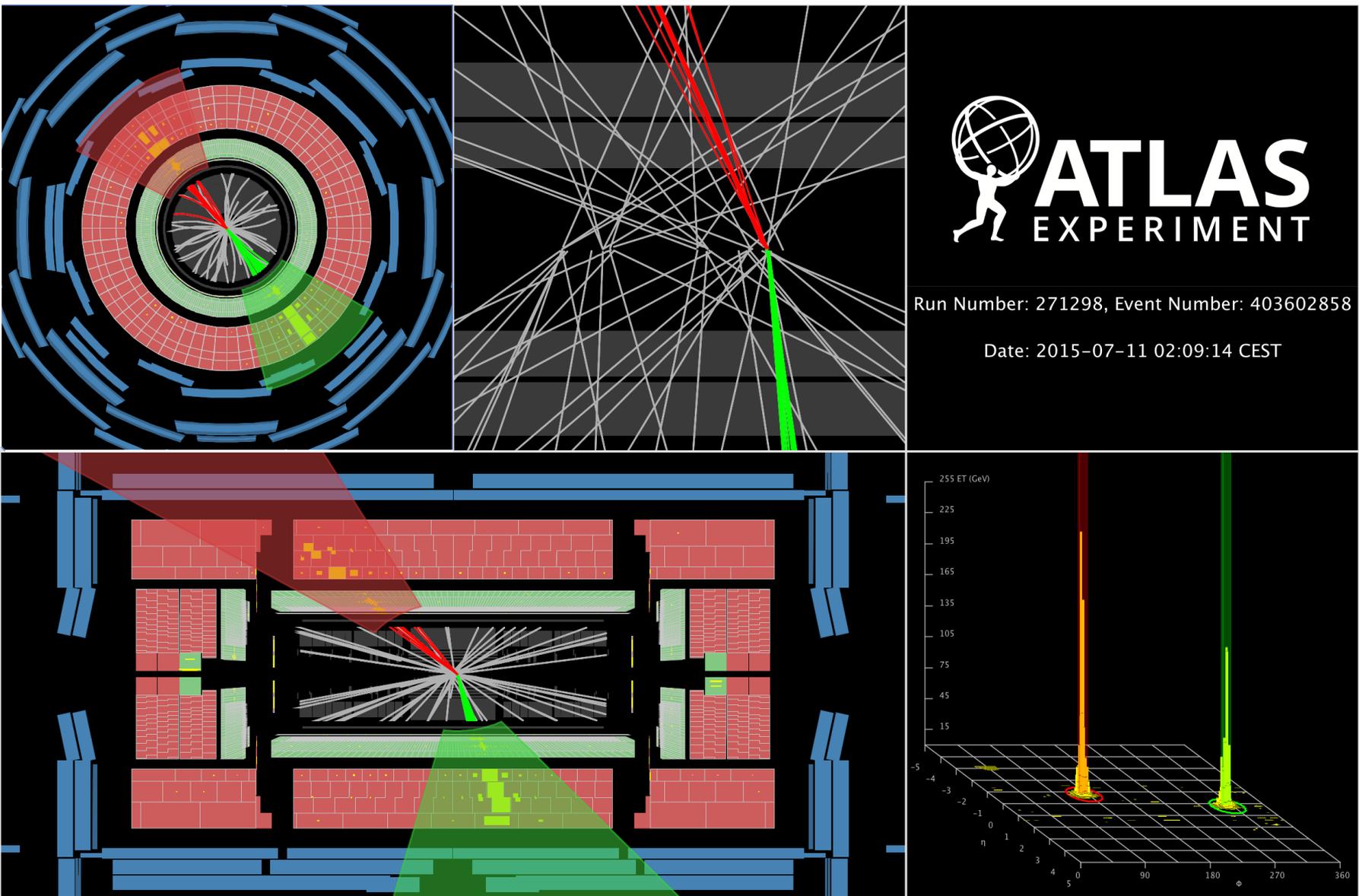
$$(1) = \frac{1}{E} \quad \text{よって} \quad \frac{dp_Z}{E} = dy$$

$$\text{また, } dp_X dp_Y = d\phi p_T dp_T \quad \text{積分して} = \pi dp_T^2$$

# 実際の粒子の分布

- ソフトな散乱（粒子間の強い correlation 希薄）な場合，粒子は位相空間に均等にばらまかれるはず  
→  $\eta$  にほぼ一定の分布
- 横方向 ( $p_T$ ) は，「かすり散乱」がやはり多い  
Exponential + tail





**ATLAS**  
EXPERIMENT

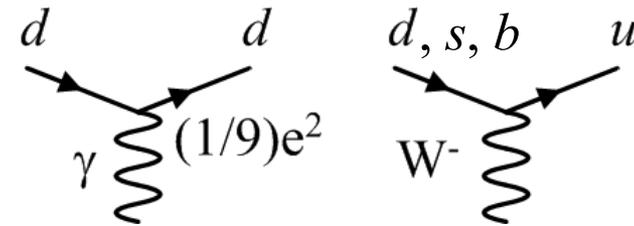
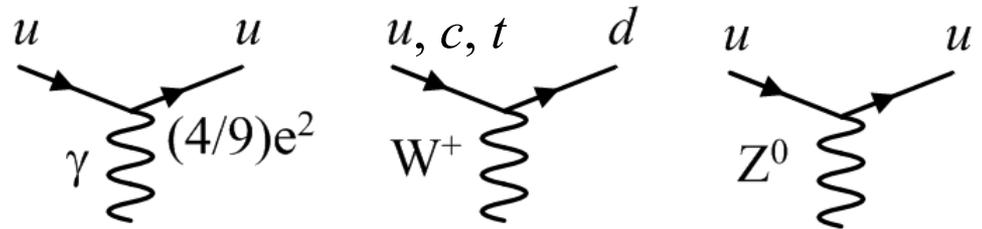
Run Number: 271298, Event Number: 403602858

Date: 2015-07-11 02:09:14 CEST

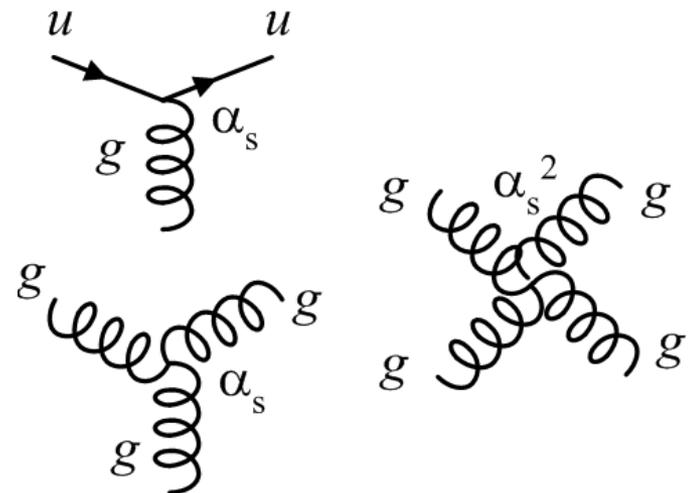
A high-mass, central dijet event collected in July 2015 (Event 403602858, Run 271298): the two central high- $p_T$  jets have an invariant mass of 3.25 TeV, the highest- $p_T$  jet has a  $p_T$  of 1.47 TeV, and the subleading jet has a  $p_T$  of 1.40 TeV. The missing ET and Sum ET for this event are 55 GeV and 3.12 TeV, respectively. Only tracks with  $p_T > 1$  GeV are displayed.

# クォークとグルーオン

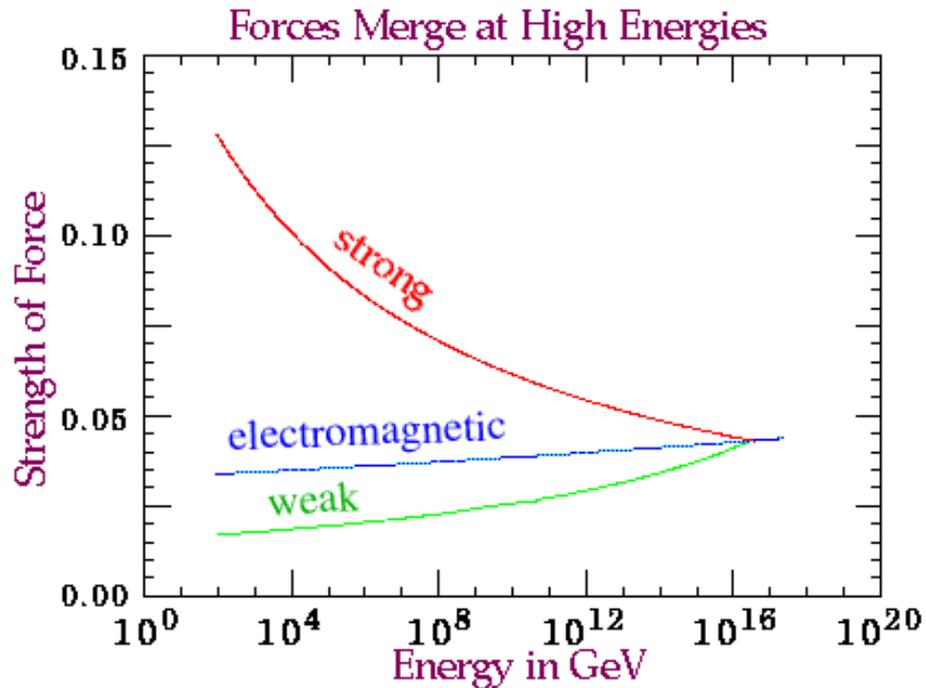
- クォークと電磁気 ( $\gamma$ )
  - u-type ( $e_u^2 = 4/9$ )
  - d-type ( $e_d^2 = 1/9$ )
- $W^\pm$ : u, d 同じ電荷
- $Z^0$  は複雑



- グルーオン
  - クォーク間の相互作用
  - 電弱相互作用との違い：
    - 結合定数がむちゃくちゃ大きい
    - 自己結合する  
(非可換群の性質,  
弱ゲージボゾンも同じ)



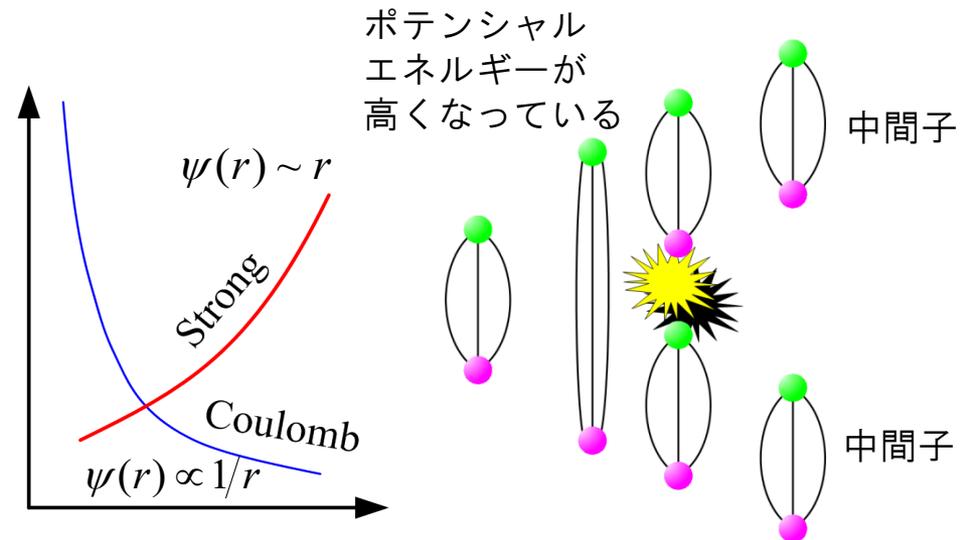
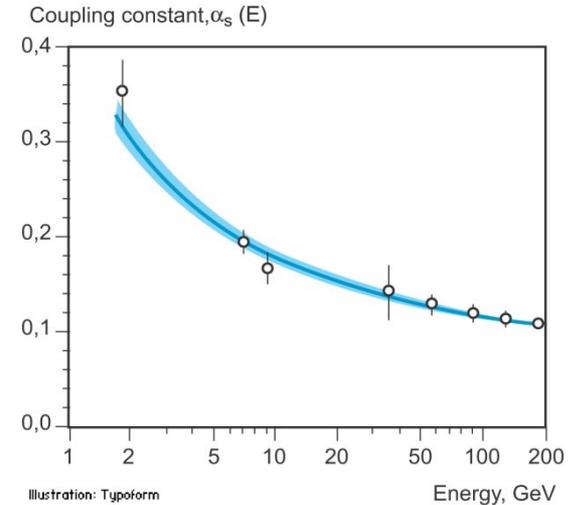
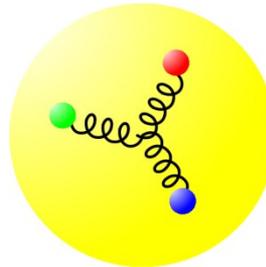
# 3つの力の結合定数



- 強い相互作用：摂動計算（逐次近似）が収束しにくい
  - 特に  $\sim 0.5$  GeV以下では収束しない
  - 非摂動論的な取り扱いが必要

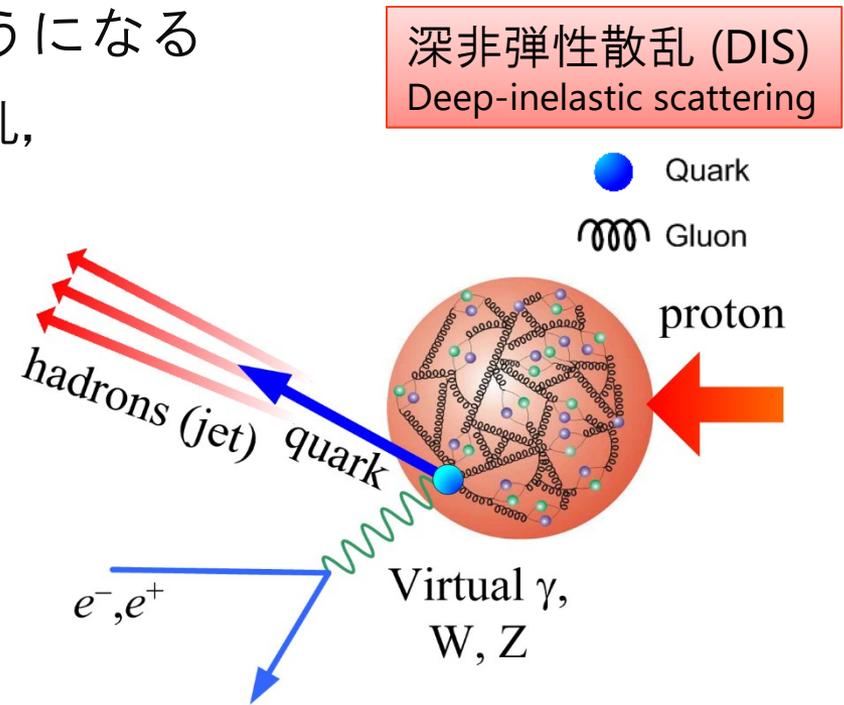
# 強い相互作用による クォークの閉じこめ

- 強い相互作用の結合定数は、相互作用のエネルギーが高いほど小さい（低いほど大きい）
- 力は距離が離れるほど強くなる
- ポテンシャルエネルギーにより新たに粒子・反粒子が対生成
  - 中間子を形成し、多粒子のジェットとなる
  - 破砕化（fragmentation）とよばれる



# クォークが「見える」条件

- 閉じ込めにより，クォークは外には出てこないが「見る」ことはできる
- 高いエネルギーの散乱（短い波長）で見れば， $\alpha_s$  が小さくなって，見えるようになる
  - 電子・陽子散乱（深非弾性散乱，deep inelastic scattering, DIS）
  - ハドロン同士のパートン散乱：いわゆる「ハード」な散乱  
横運動量が多い

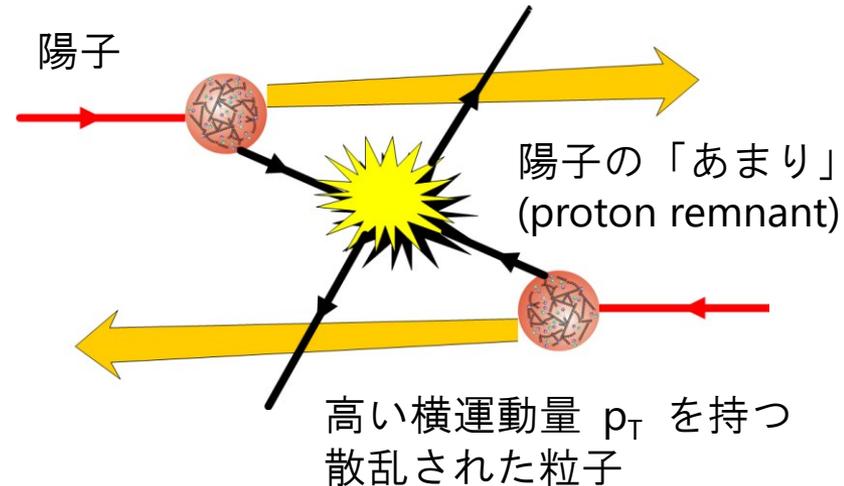


点状粒子（電子）で直接クォークをたたく

# ソフトな散乱とハードな散乱

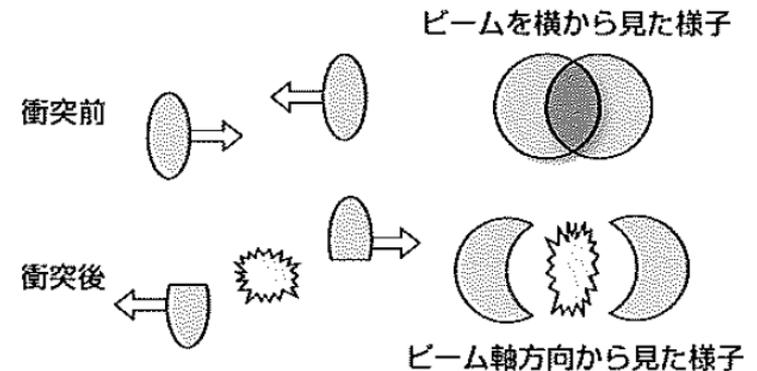
## ハードな散乱

- 高い運動量の粒子を交換  
ハドロン散乱では、主にパートン
- か、あるいは電弱相互作用で  
点状粒子 ( $\gamma, W^\pm, Z^0$ ) を交換
- 横運動量の大きな粒子が出る



## ソフトな散乱

- 陽子全体が、クォーク物質 (quark matter) として散乱する (パンケーキ)
- 強い短距離力で散乱  
当たるか、当たらないか
- 散乱断面積は、ハドロンの  
投影面積で決まる

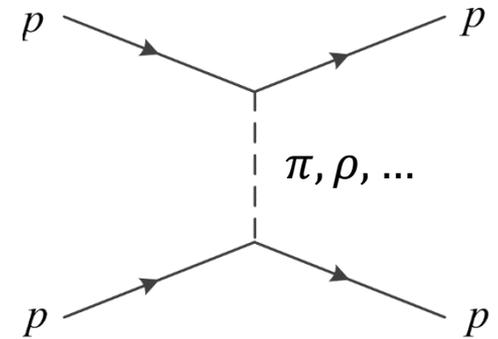


# 散乱断面積のふるまい

- 点状粒子：エネルギーの2乗に反比例

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{4\pi\alpha^2}{3s}$$

- なぜ？
- 意味するところ：高エネルギーではよりルミノシティが必要



- ソフトな散乱も，オリジナルの湯川理論（パイオン交換）で説明できると思われていた

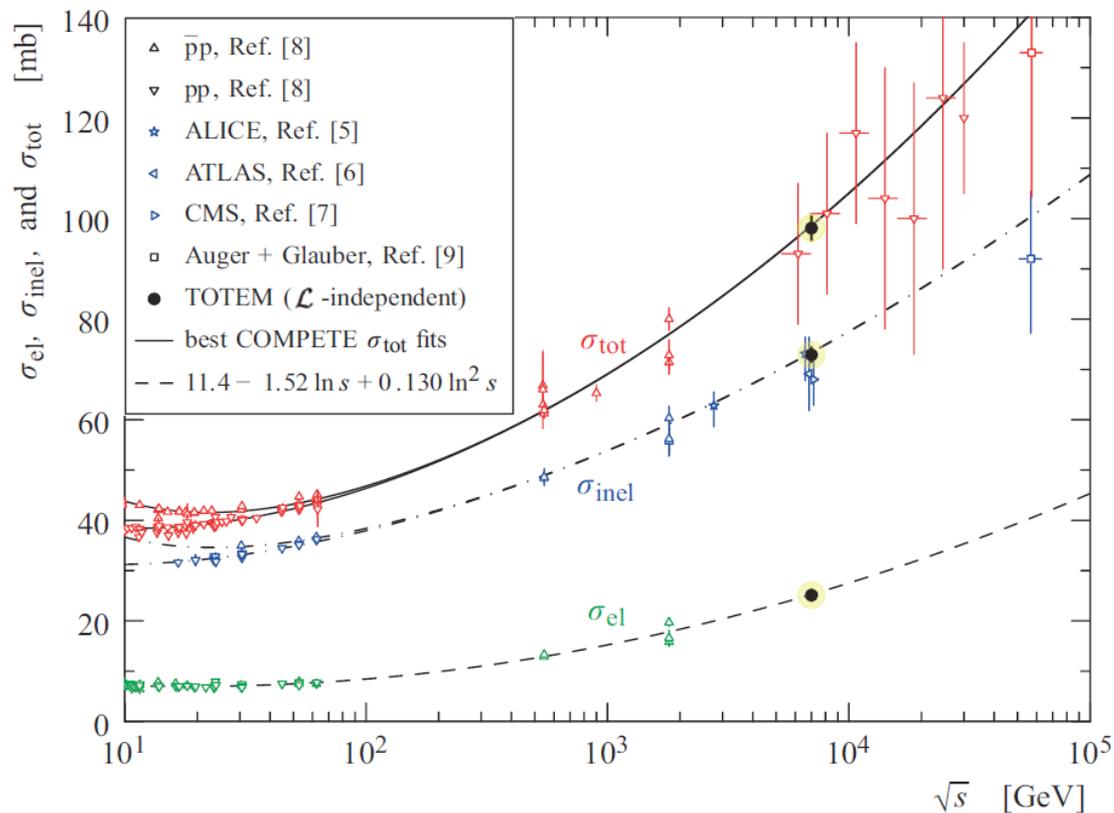
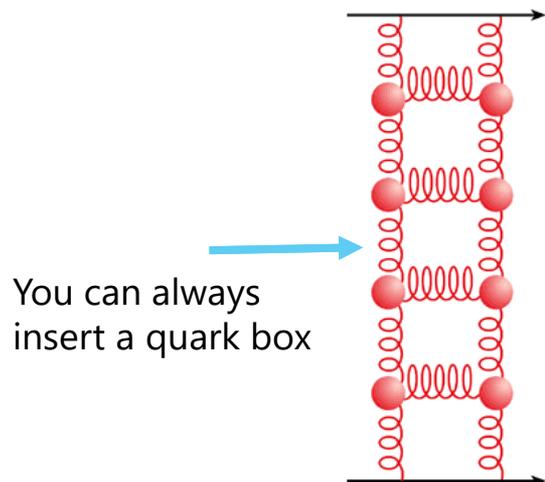
- $V(r) = -\frac{g^2}{4\pi} \frac{e^{-m_\pi r}}{r}$  : 短距離力
- 位相空間から， $1/s$  依存性は依然存在
- 散乱断面積は，エネルギーが上がるほど下がるはず？

# 実際のふるまい

- 断面積は，エネルギーに対してほぼ一定，逆にやや増加
  - パンケーキモデルが正しい

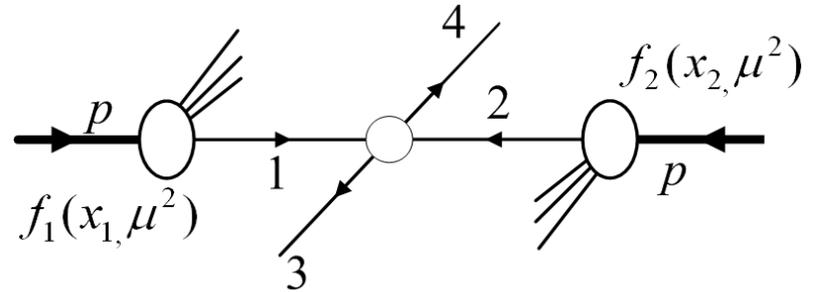
- 別の交換粒子？

グルーオンラダー  
と考えられている  
(いわゆる Pomeron)



# ハードな散乱の断面積

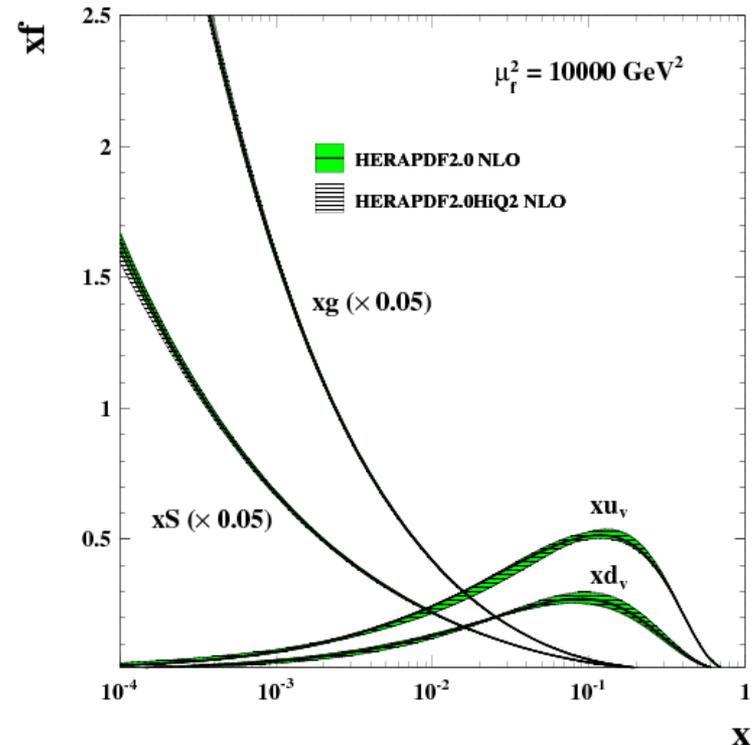
- やっぱりエネルギーが上がると減るはず？
  - 実際には、増える
  - なぜ増えるか？



(ビームからの素粒子の密度)<sub>1</sub> ⊗ (密度)<sub>2</sub>  
 ⊗ (粒子1, 2が3, 4に散乱する確率)  
 ⊗ (3, 4が特定の終状態に崩壊する確率)

$$\sigma \propto \sum_{q,g} f_1(x_1, p_T) f_2(x_2, p_T) \sigma_{12 \rightarrow 34}(p_T) p(34 \rightarrow FS)$$

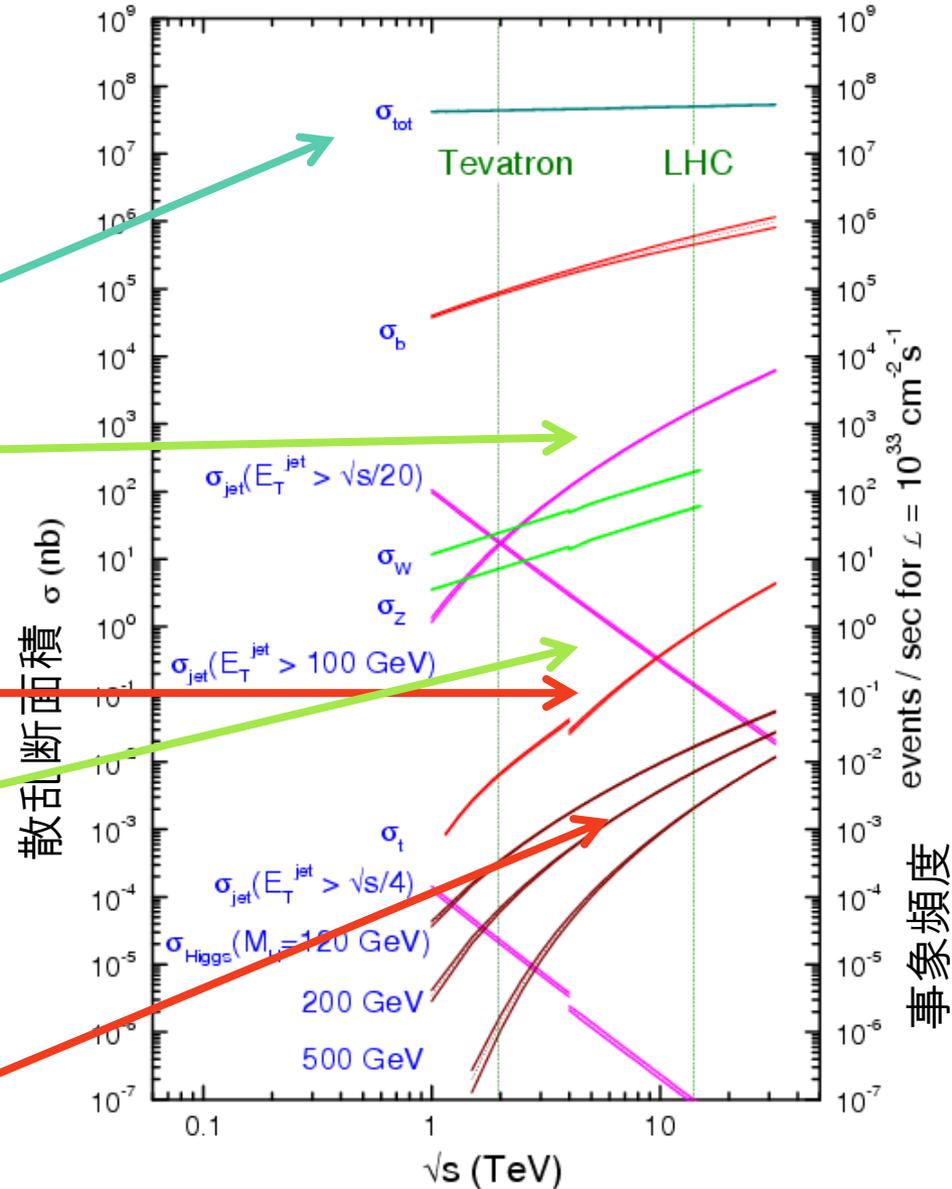
H1 and ZEUS



# 断面積のふるまい

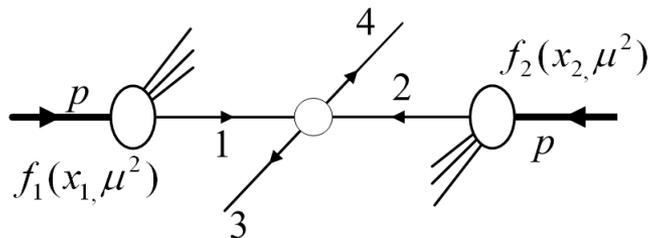
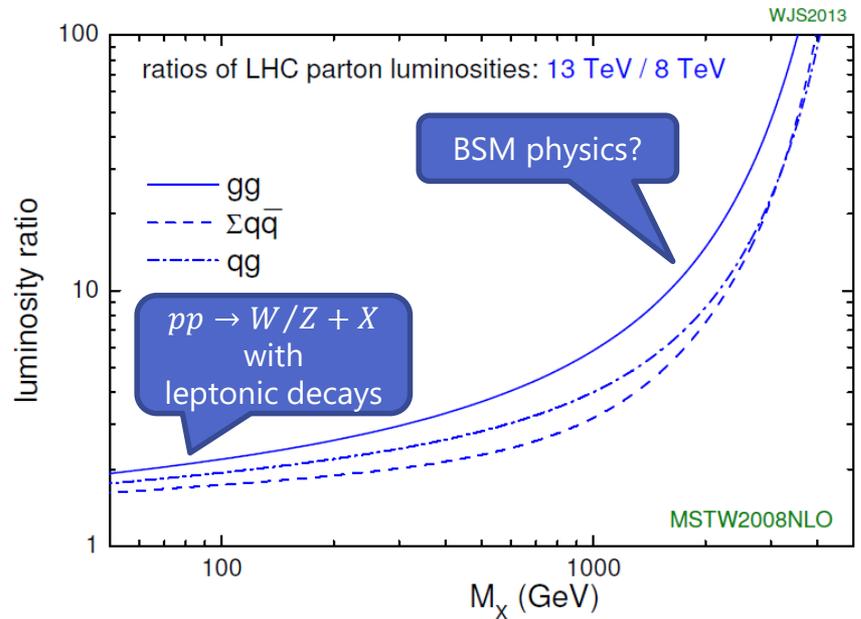
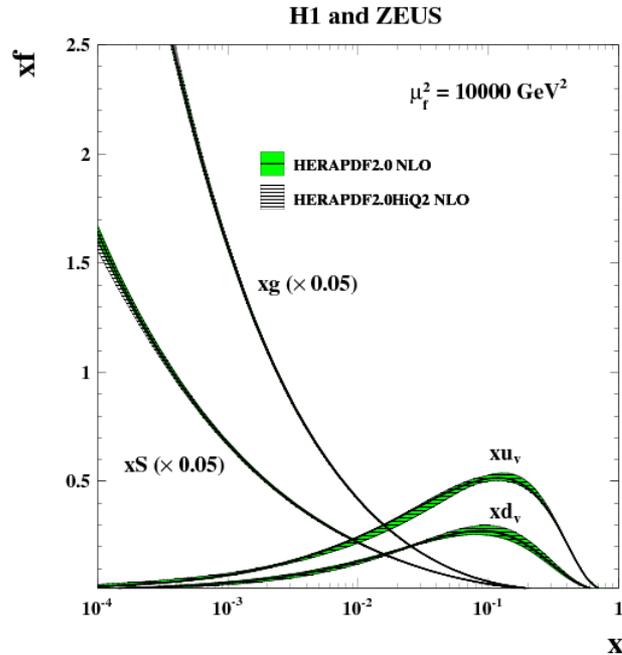
- Soft QCD 過程
  - クォーク・グルーオン散乱：  
100MHz
- Hard QCD 過程
  - ジェット 100 GeV: 1kHz
  - W/Z: ~ 100 Hz もう取るの大変
  - Top: 0.1 Hz
- ほしいもの
  - 350GeV  $\tilde{g}$  : 1 Hz  
(実際に観測できるものは  
ずっと少ない)
  - ヒッグス生成：0.001-0.01 Hz  
S/N  $\approx 10^{-10}$

proton - (anti)proton cross sections

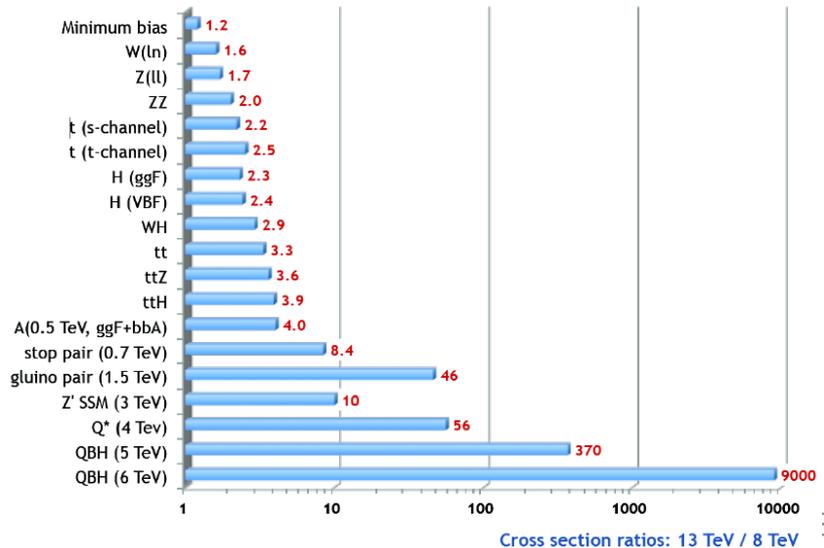


events / sec for  $\mathcal{L} = 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$   
事象頻度

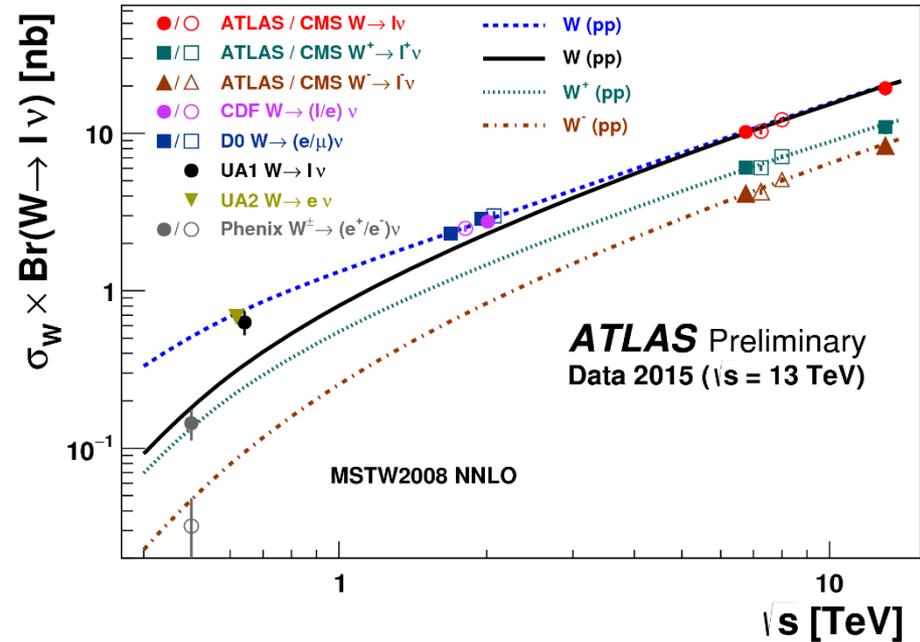
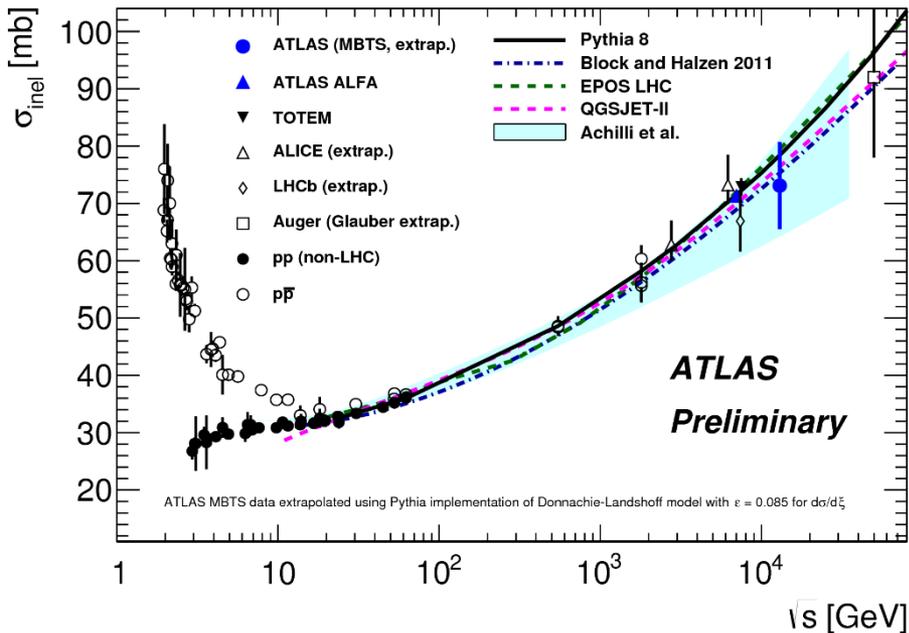
# 重心系エネルギーと散乱断面積



- $f \propto Ax^{-\lambda}, \lambda \gtrsim 0.4$
- CMS energy  $a$ 倍だと  $x$  は  $1/a$  両側の陽子が効くので  $\sigma \propto a^{2\lambda}$



# 標準模型のチェック：散乱断面積

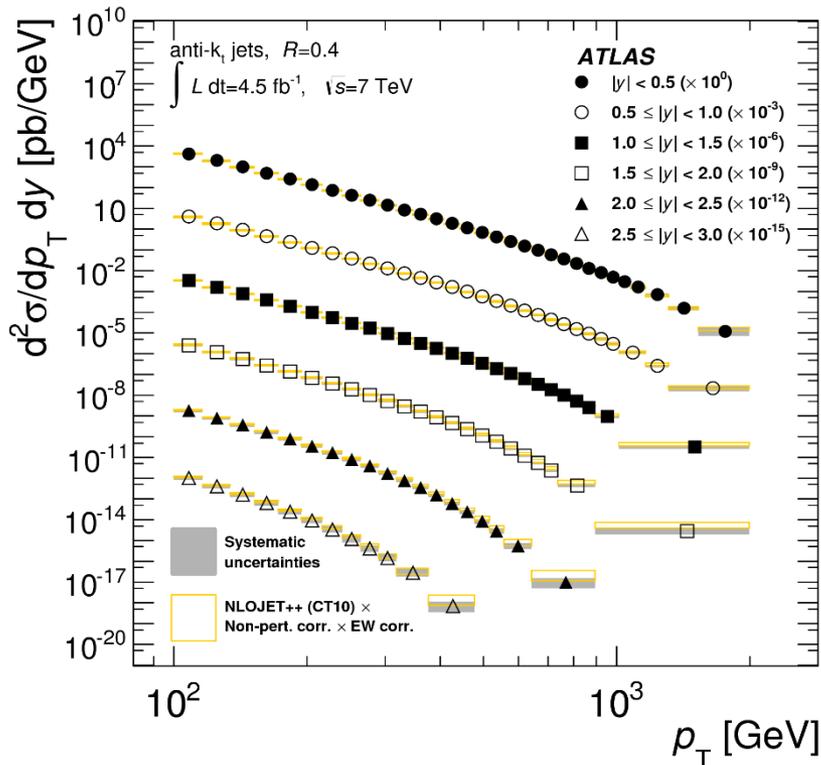


- 全散乱断面積は  
ゆっくりしか増えない  
 $\sigma \propto A \ln s + B \ln^2 s$
- 陽子は、エネルギーが大きくなると少しずつ「大きく」なっている

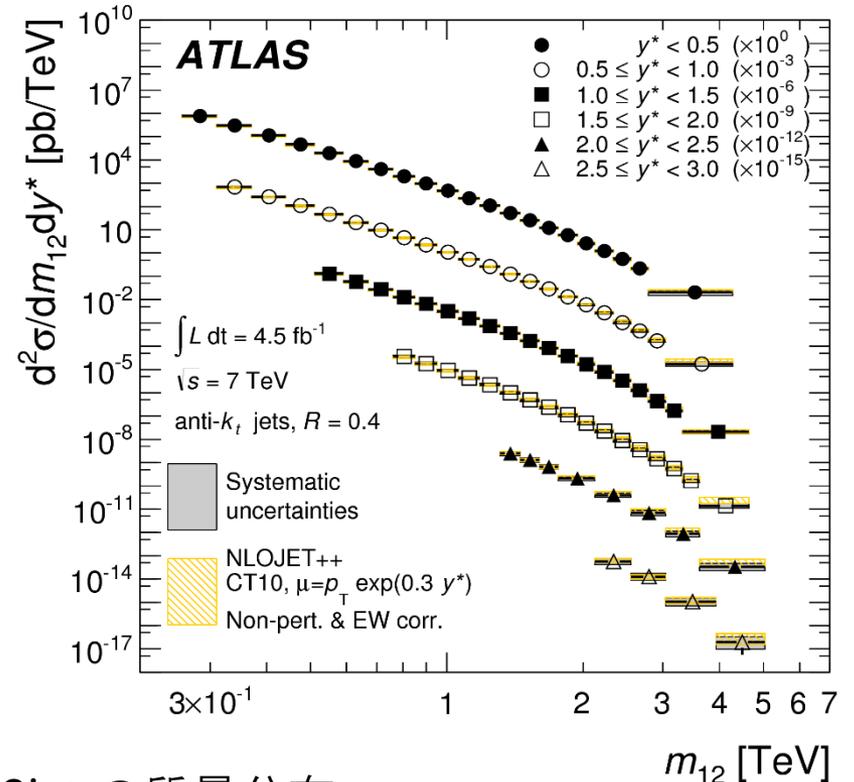
- パarton同士の散乱は「べき」で増える  
 $\sigma \propto A \cdot s^\lambda$
- パartonそのものが、衝突エネルギーが高くなるとべき乗で増加している

# 散乱断面積の形

- 低い運動量, 質量のものが圧倒的に多い



Jet ( $\approx$  quark or gluon)  
の横運動量分布

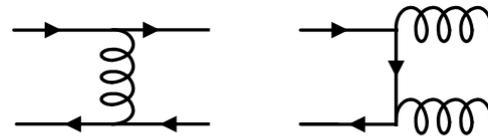


2jet の質量分布  
8 TeV 衝突で 4 TeV くらいまでいける  
でもたくさんあるのは 1 TeV くらいまで

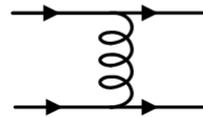
# ハドロンコライダーの主なプロセス

- QCD過程が主な断面積を占める

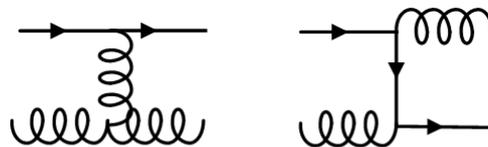
$$q\bar{q} \rightarrow q\bar{q}, gg$$



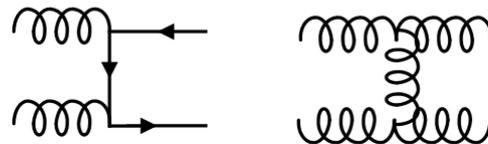
$$qq \rightarrow qq$$



$$qg \rightarrow qg$$



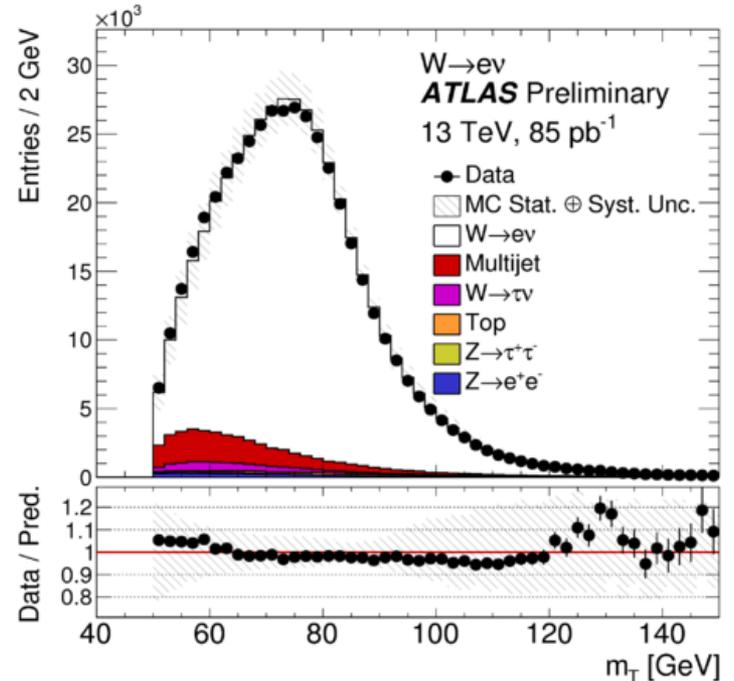
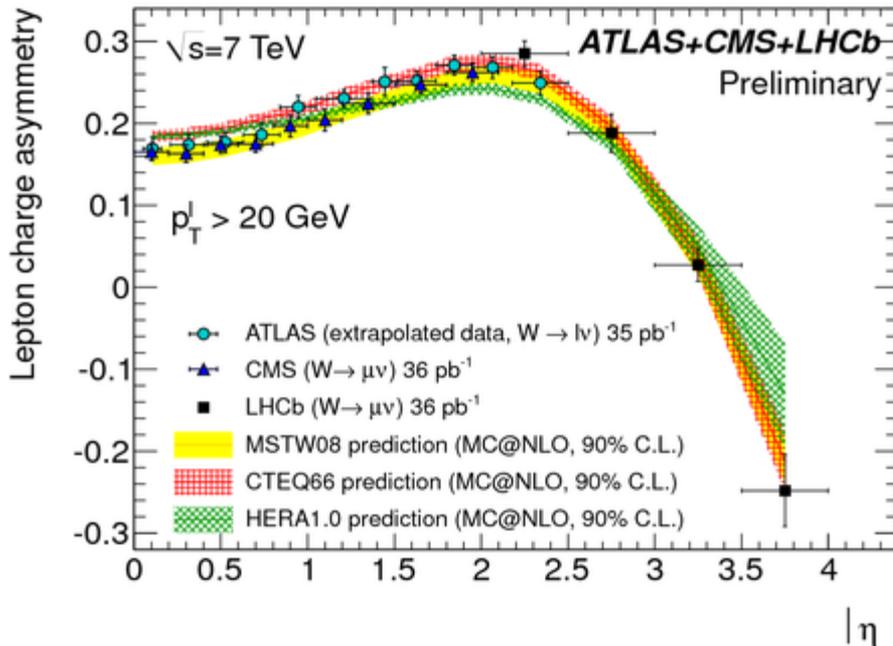
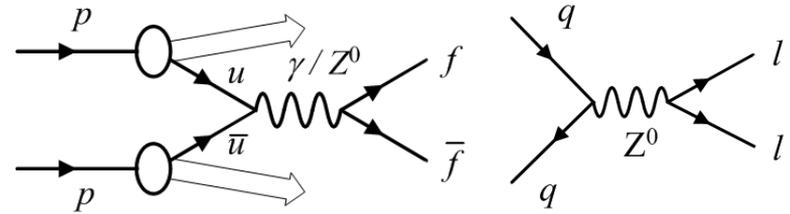
$$gg \rightarrow qq, gg$$



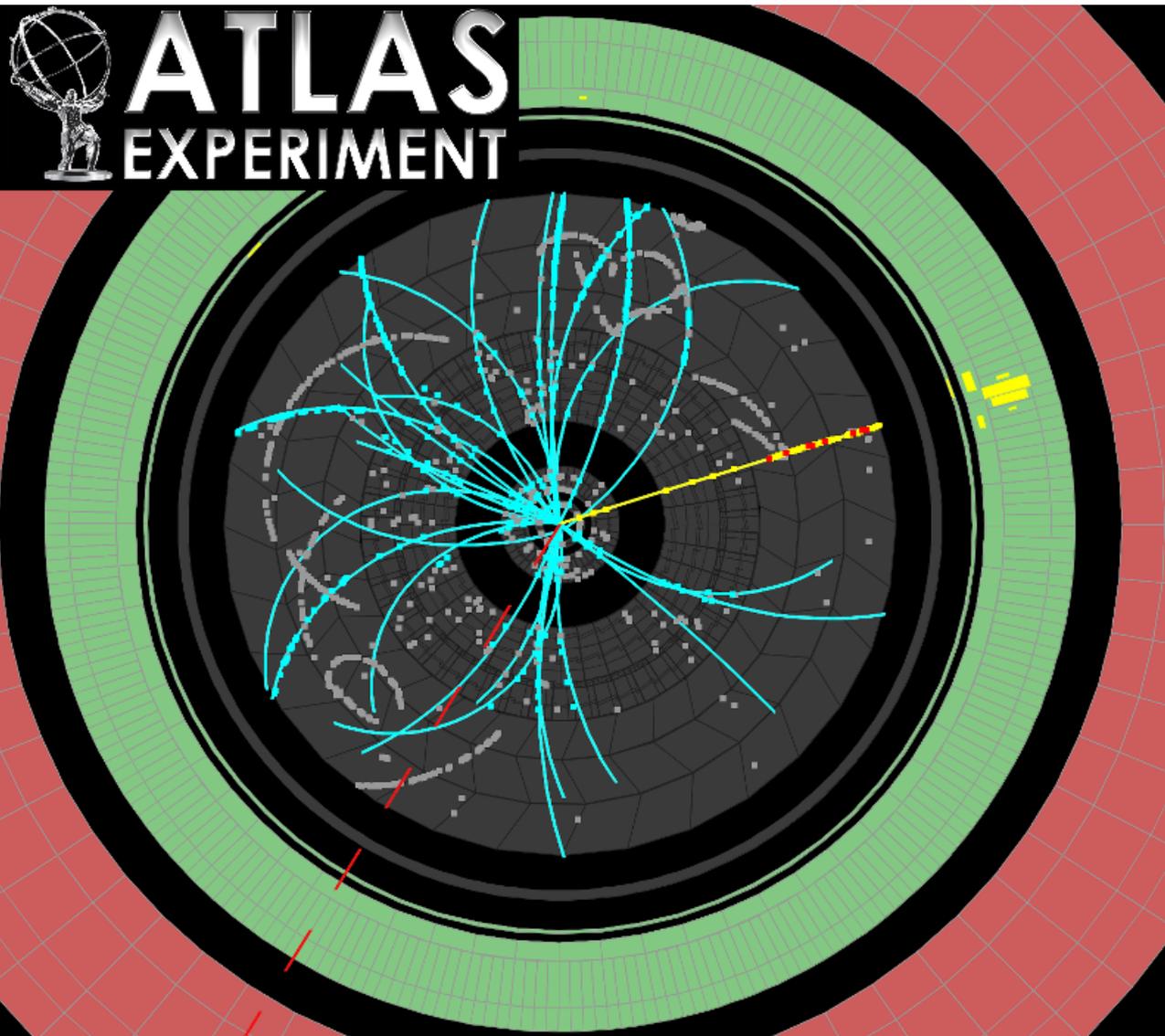
破砕化して，ジェットを生成

# 大基本: Drell-Yan (W, Z production)

- 電弱相互作用
  - 理論で正確に予測
  - 検出器, パarton密度の理解

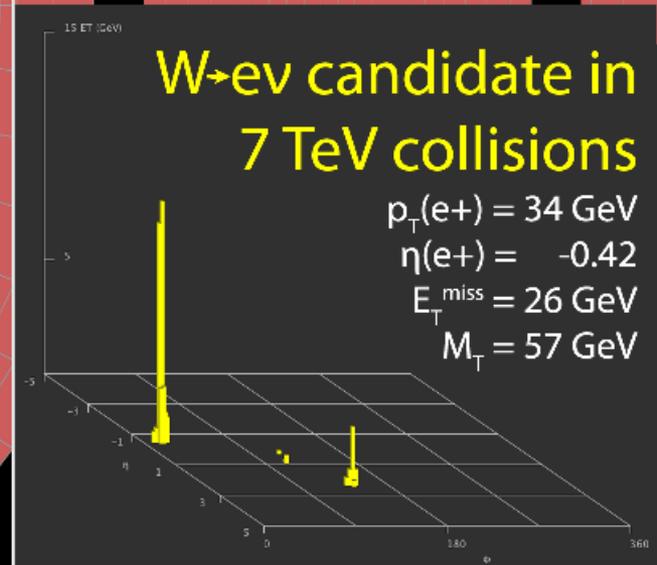
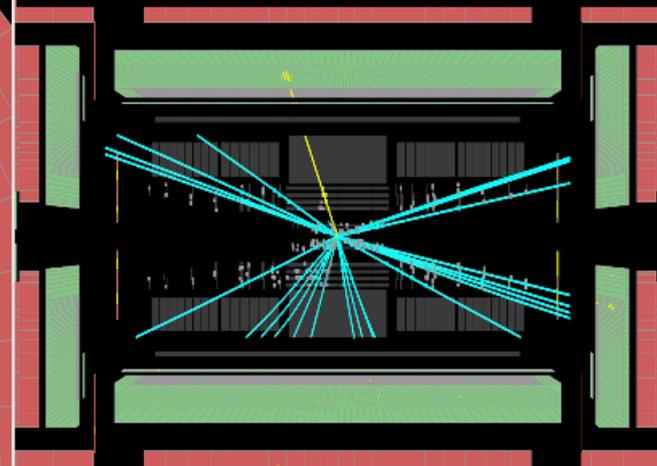


$m_T$ : 運動量の  $xy$  成分  
だけで計算した不変質量

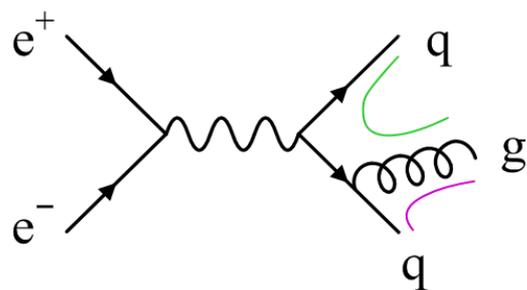


Run Number: 152409, Event Number: 5966801

Date: 2010-04-05 06:54:50 CEST



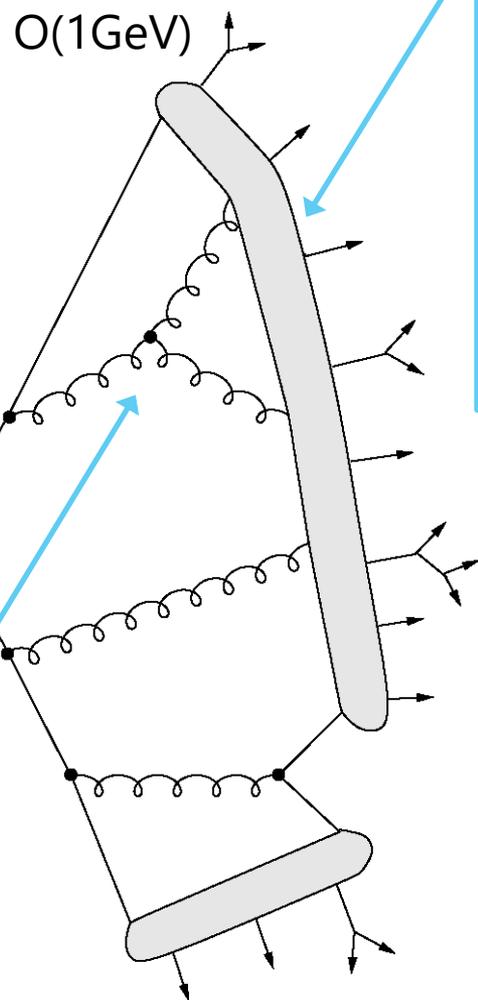
# クォーク・グルーオンの 破砕化



パートンが一つ放射  
 $ee \rightarrow qqg$   
 ハードな散乱の  
 「3体崩壊」

拡大すると...

次々にパートン  
 が放出される  
 ( $\alpha_s$  がかい)

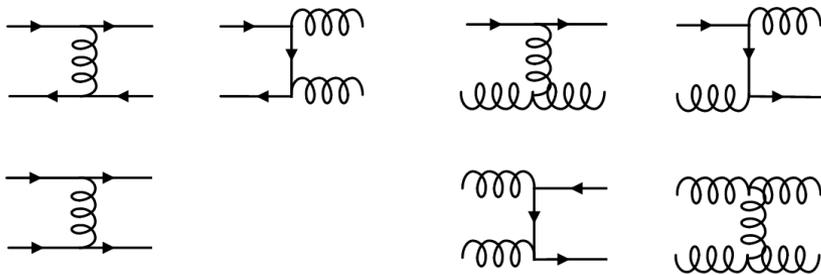


パートン間の不変質量が1 GeV 程度になると,  $\alpha_s \sim 1$  となり摂動計算が意味をなさなくなる  
 → 非摂動なQCDで説明される束縛状態(中間子)を形成

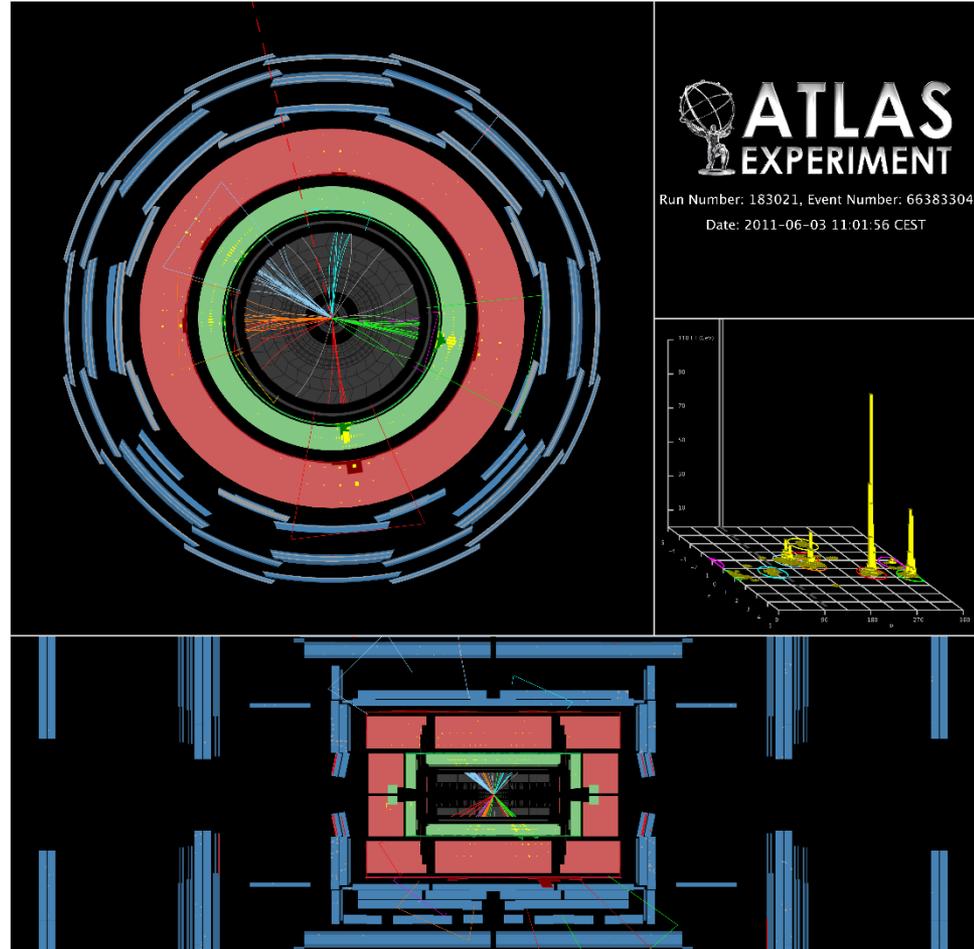
# ジェット生成

- クォークまたはグルーオンの破砕化

– 終状態がクォークか、グルーオンか判別は難しい

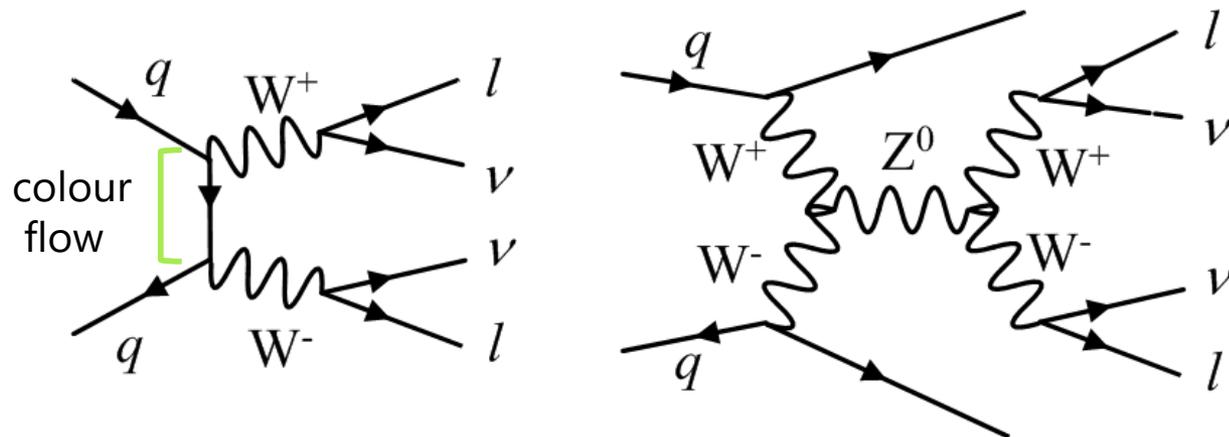


- パートンはパートンを放出  
3つ以上のジェットも多い  
(Next-to-Leading Order)



# Diboson production

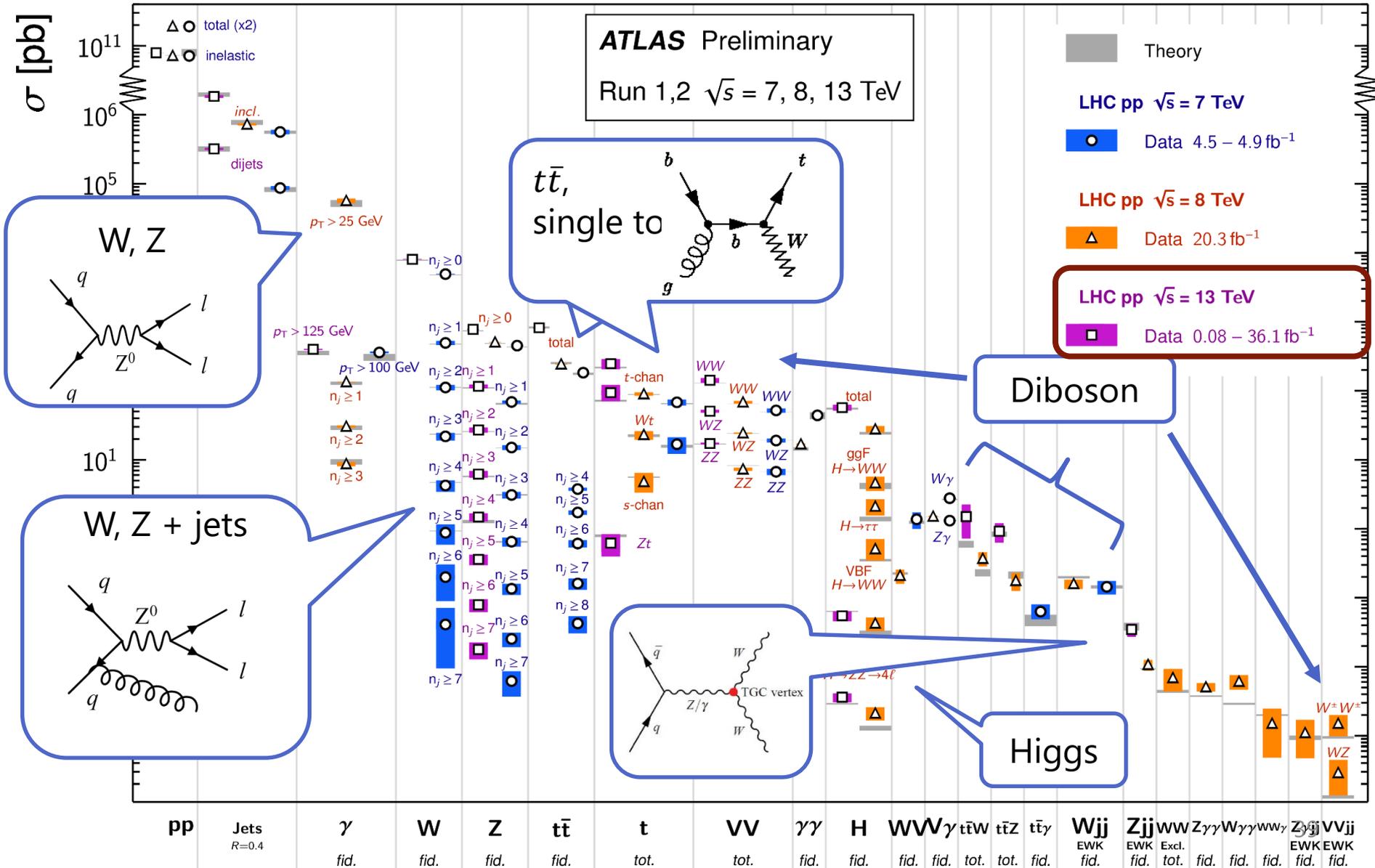
- WW, ZZ
  - Higgs  $\rightarrow$  WW  $\cdot$  ZZ と同じ終状態
- 新物理にも感度
  - Triple Gauge-boson coupling (右の diagram)



# ATLAS のRun1/2標準模型測定

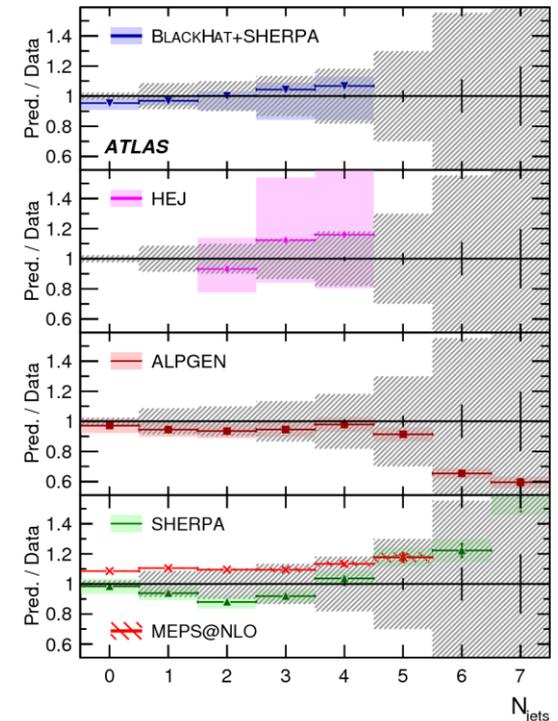
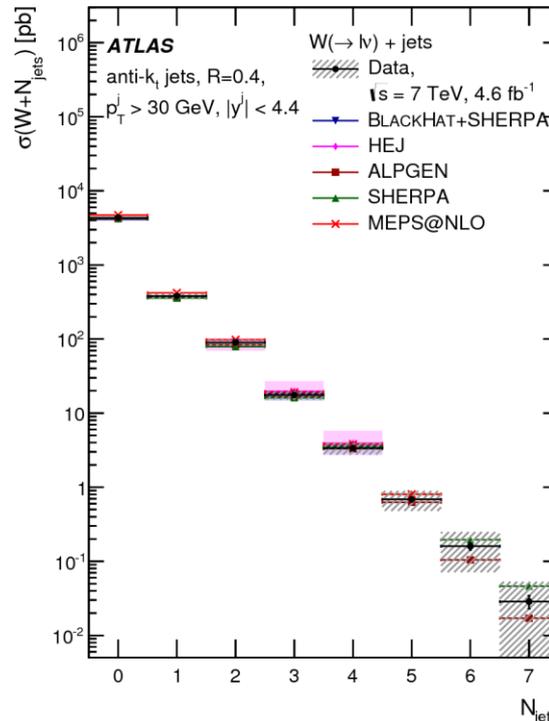
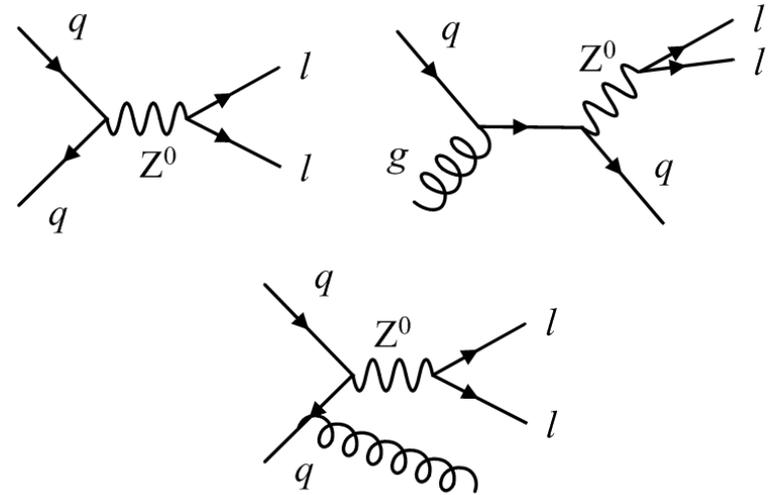
## Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: July 2017



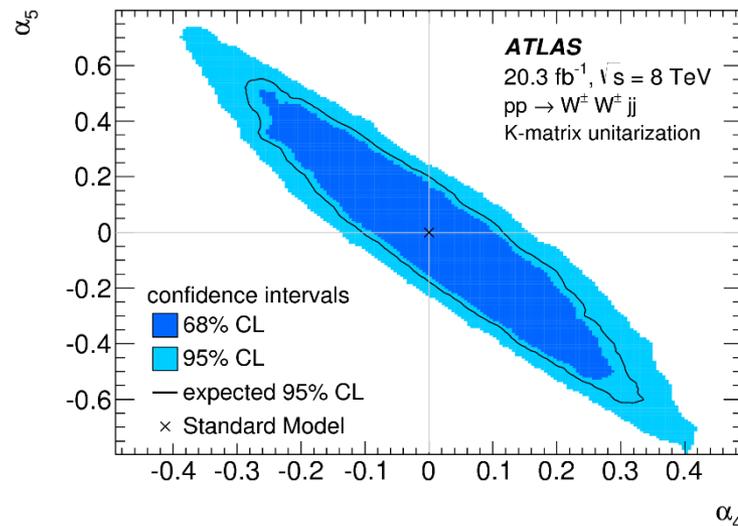
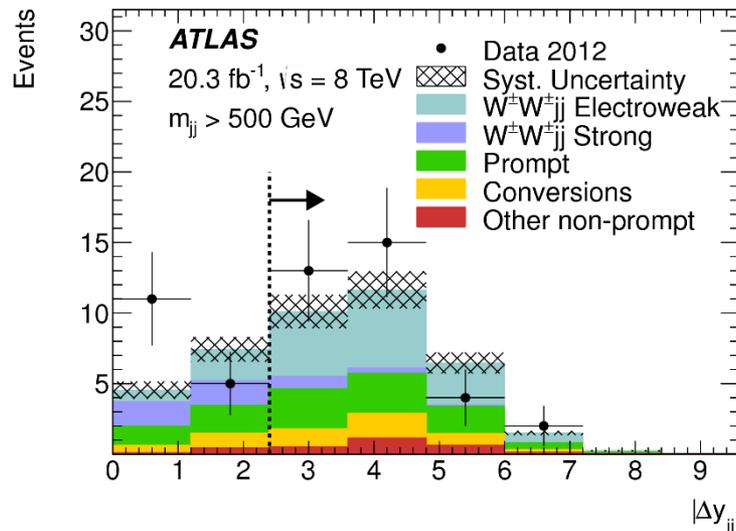
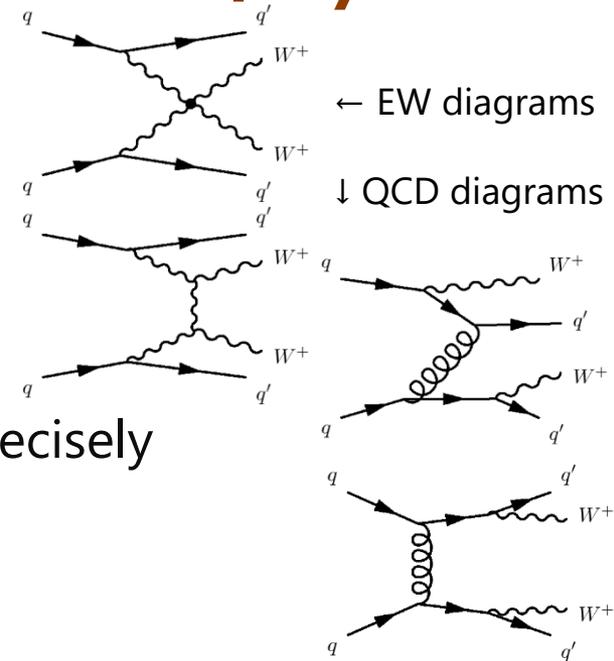
# W, Z + jets

- W, Z 生成の際に quark, gluon が放射されたもの
  - 高次の QCD 計算：計算が難しく，不定性大きい
- Heavy particle 測定のバックグラウンドになる
  - Higgs WW channel
  - Top (特に  $W + b\bar{b}$ )
  - SUSY ( $E_{Tmiss} + \text{jets}$ ) などなど



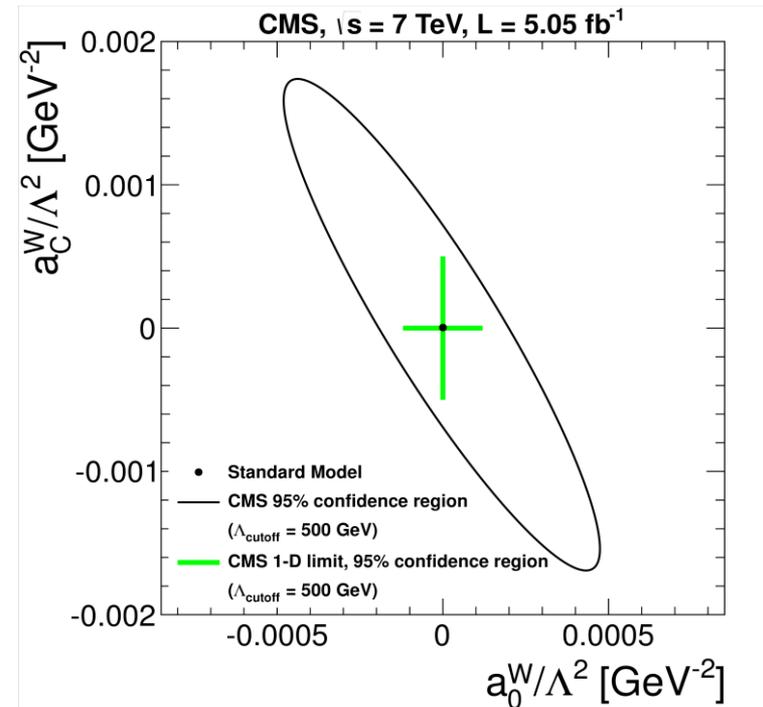
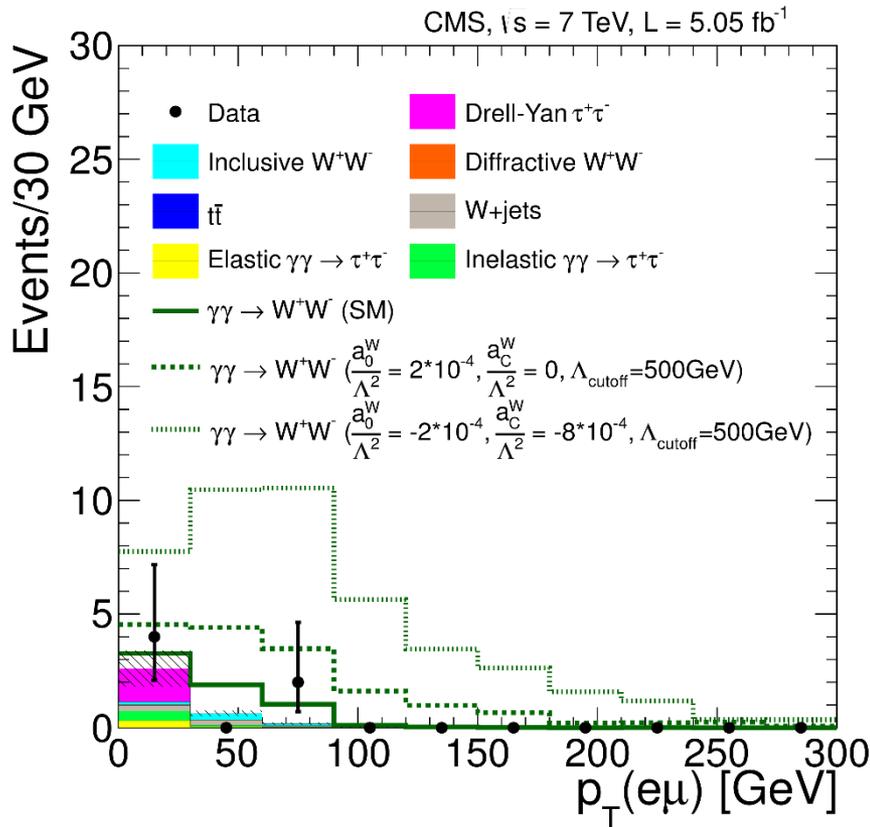
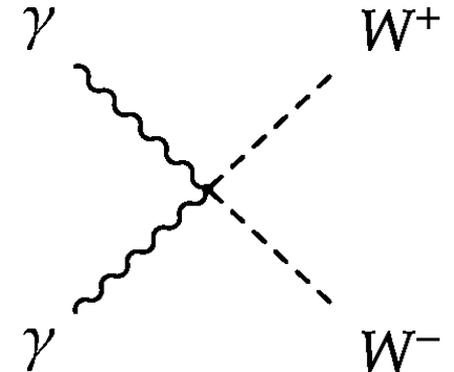
# Diboson – possible indication of new physics

- WW scattering amplitude vs  $\sqrt{s}$  : sensitive to new physics
  - would have diverged with  $\sqrt{s}$  if no Higgs. It still may, if BSM is present
  - worth measuring quartic coupling in SM precisely
- First EW scattering of  $W^\pm W^\pm$  !



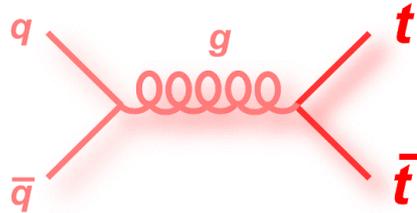
# Diboson production thru "UPC"

- Soft photon from proton through "form factor"

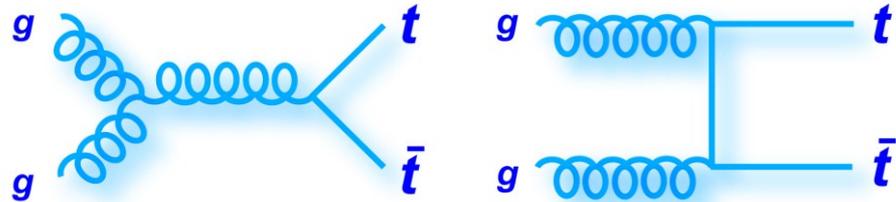


# Top production in hadron colliders

- The only quark heavier than EW scale:  $m_t \simeq 173 \text{ GeV}$
- pair production:**  
thru **strong** interaction



$pp\bar{p}$  @ Tevatron: 7.2 pb  
mostly  $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$



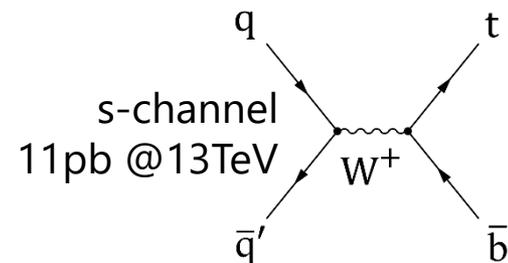
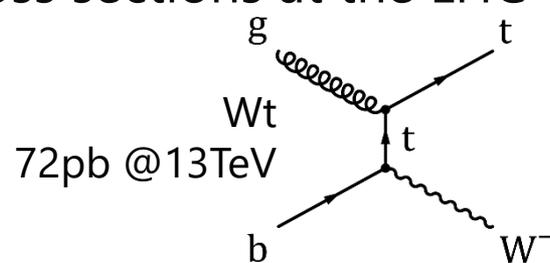
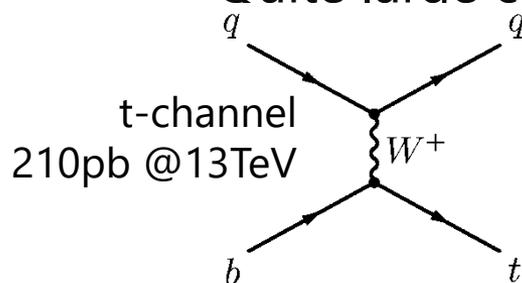
$pp$  @ LHC: mostly from  $gg \rightarrow t\bar{t}$

$\sim 820 \text{ pb}$  @ 13 TeV

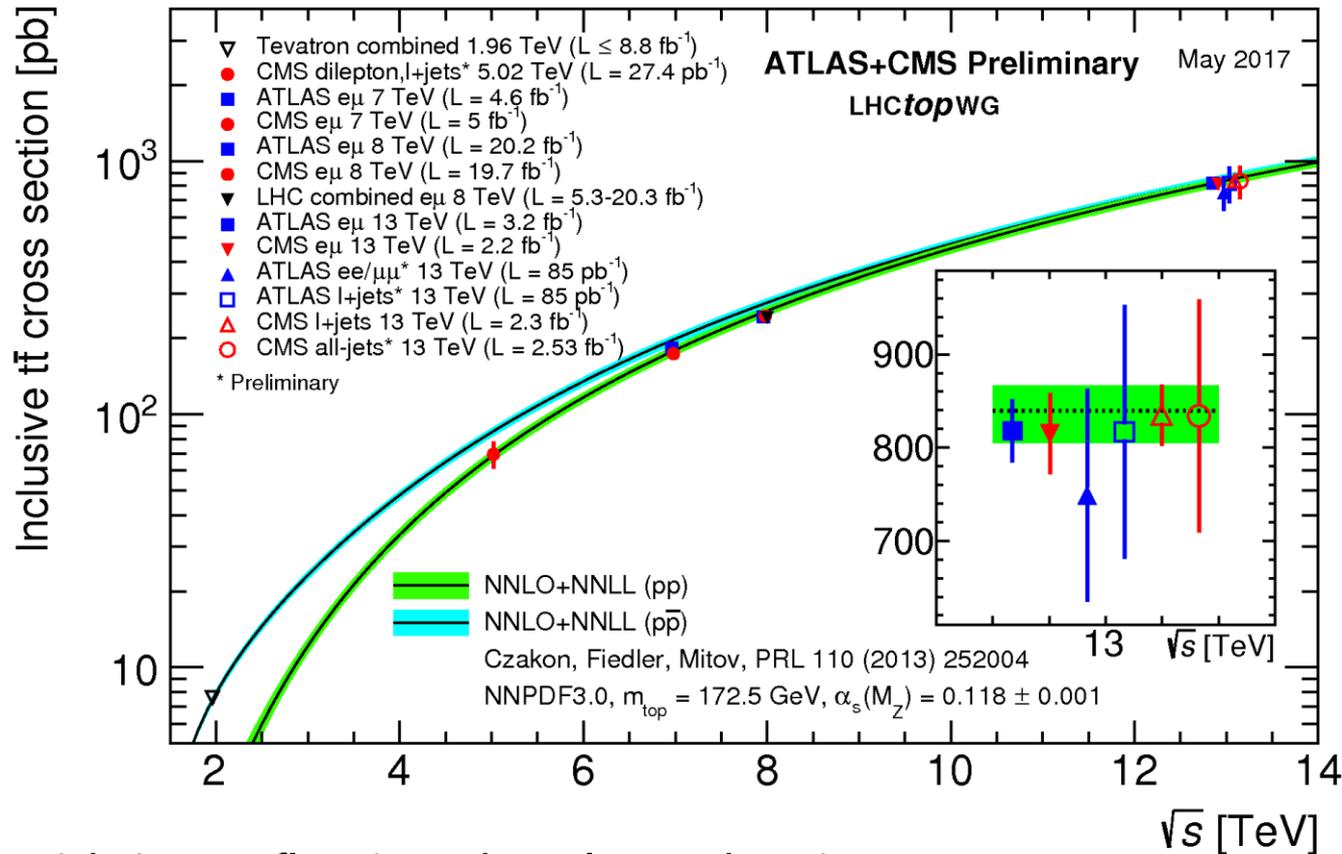
$> 40$  millions of top pairs already produced  
cf. Belle  $> 772$  millions of  $\Upsilon(4s)$

- single-top** production: **weak** processes

– Quite large cross sections at the LHC



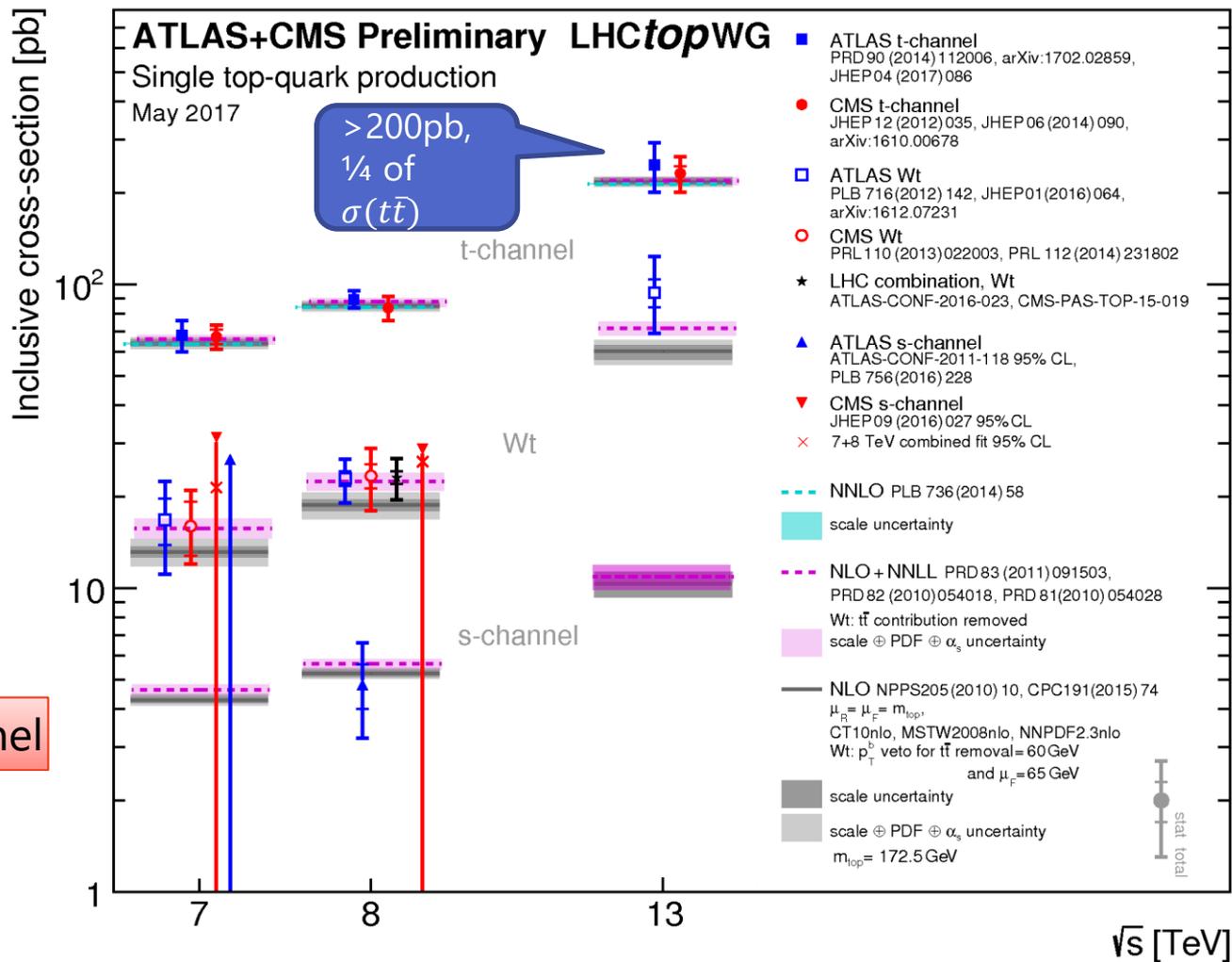
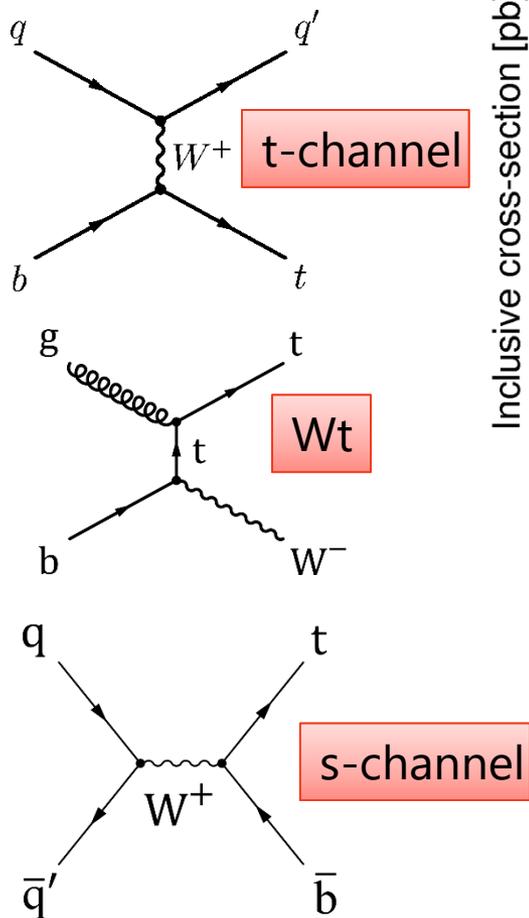
# Inclusive cross section behaviour



- Rapid rise: reflecting the gluon density
- 5 TeV data from CMS from 2015 data (reference  $pp$  run for heavy ions)

New result not included here: ATLAS 8TeV l+jets ( $\pm 13\text{pb}$ ) [ATLAS-CONF-2017-054](https://atlas.conf.cern.ch/2017/054)

# Single-top: overview

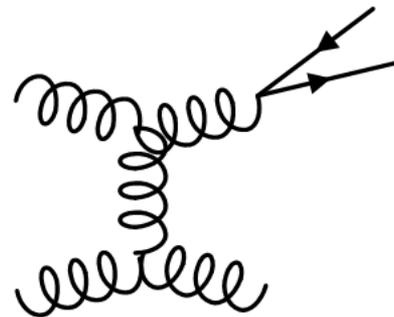
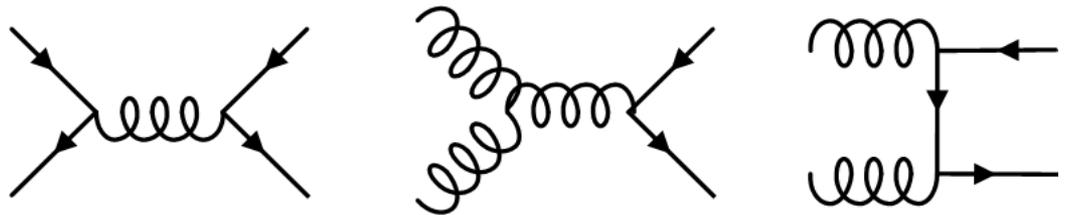


- No longer statistically limited for inclusive  $\sigma$
- Can measure t-channel without multi-variate analysis (and soon Wt as well)

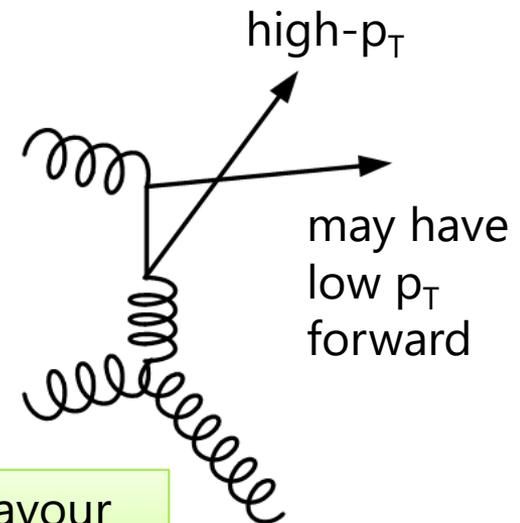
# (light) Heavy-flavour production

- Splitting: important at large  $p_T/m_Q$
- One must not miss terms suppressed by  $m_Q/p_T$ 
  - Must be important at  $m_Q \sim p_T$  or below

Heavy-flavour production (LO)



Gluon splitting (NLO) fragmentation-like

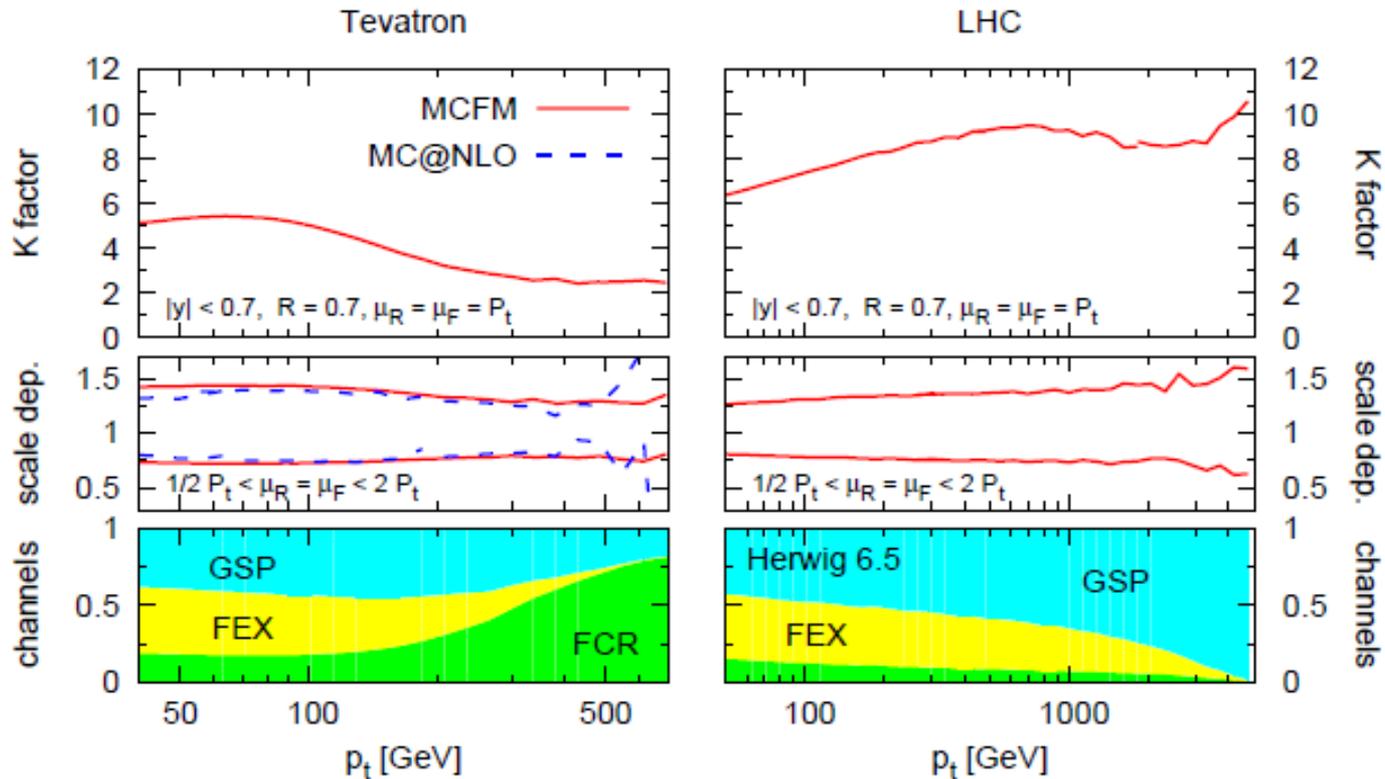


Flavour excitation

high- $p_T$

# Relative strengths of diagrams

- Gluon splitting becomes dominant at high- $p_T$ 
  - At Tevatron flavour creation is dominant (s-channel  $q\bar{q}$  annihilation)



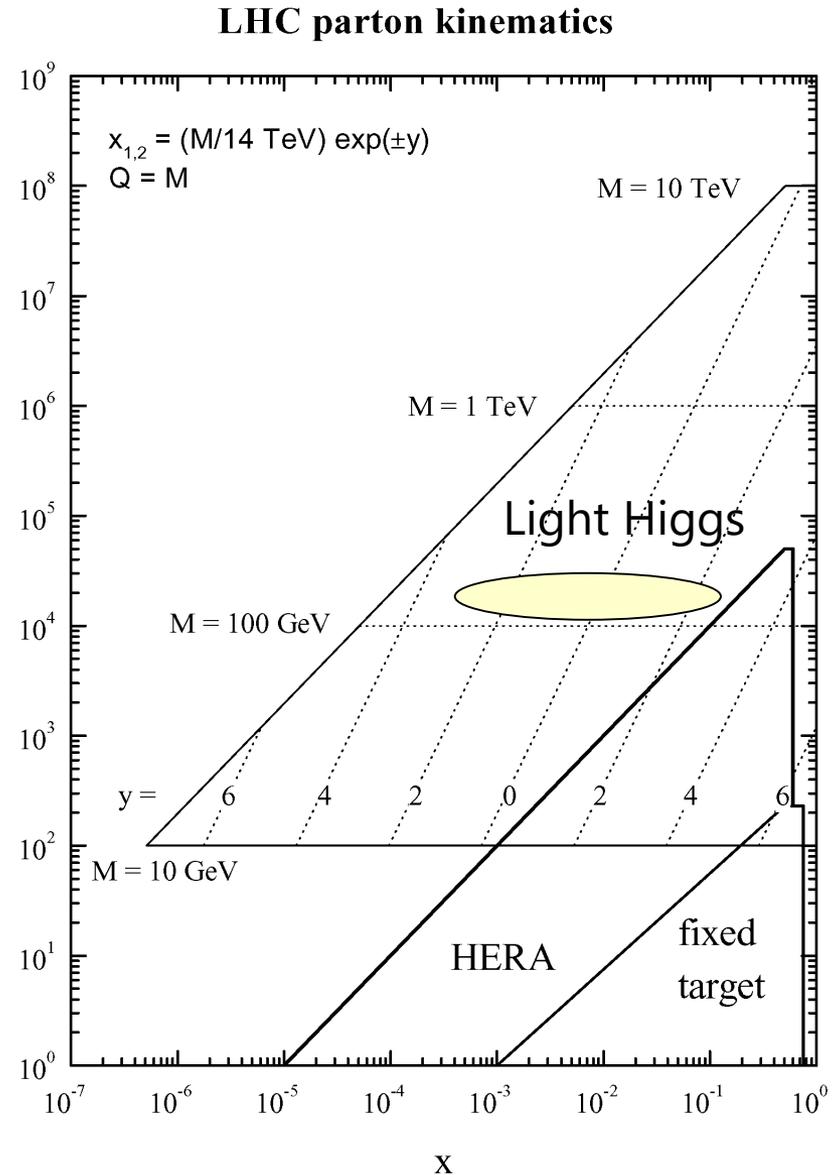
# ヒッグス粒子と SM 粒子の湯川結合定数

- W/Z: 電弱相互作用と同等
  - エネルギーが大きければ ( $\approx M_W$ )  
かなり大きい
- クォークとの結合
  - チャームかそれより軽いクォークでは無視できる
  - b: 電弱と同じくらい
  - t: 非常に強い
- ほとんどの場合そう大きくはない
  - 質量は全ての「もの」にあるのに、  
ちょっと不思議な気もする？

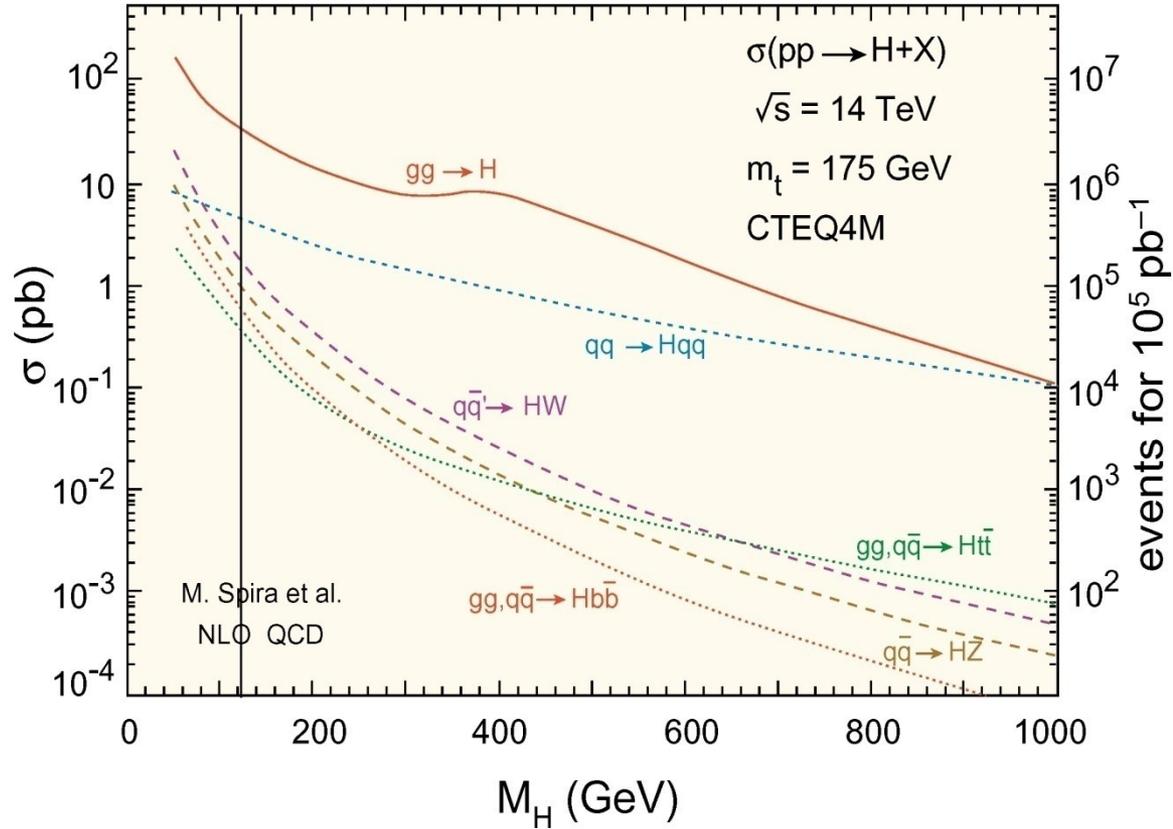
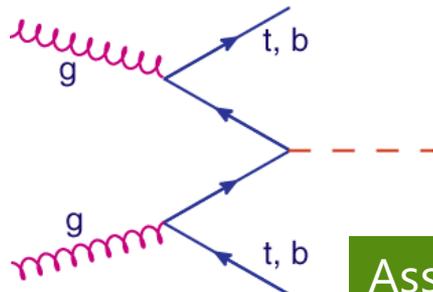
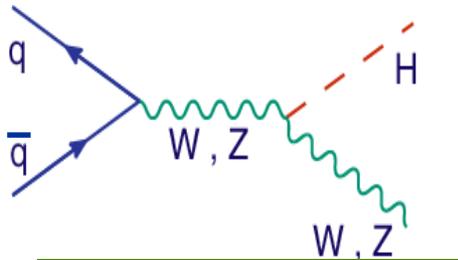
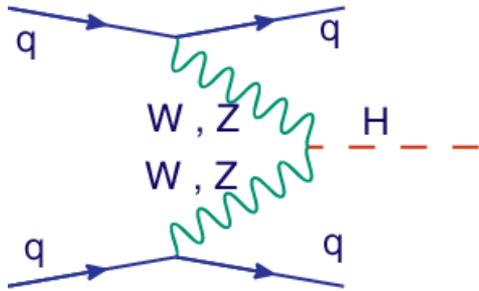
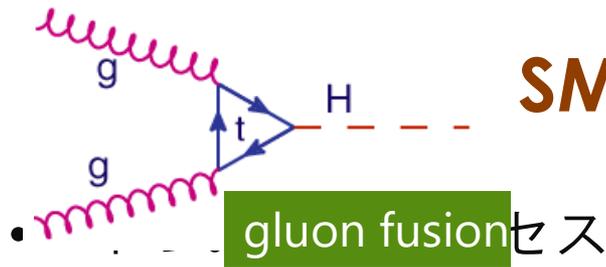
	$m_f/(\sqrt{2}\varphi_0)$
e	$2.0 \times 10^{-6}$
$\mu$	$4.1 \times 10^{-4}$
$\tau$	$7.0 \times 10^{-3}$
u	$2 \times 10^{-5}$
d	$3 \times 10^{-5}$
s	$5 \times 10^{-4}$
c	$5.2 \times 10^{-3}$
b	$1.7 \times 10^{-2}$
t	0.7

# LHC でのパートンの $x, Q^2$

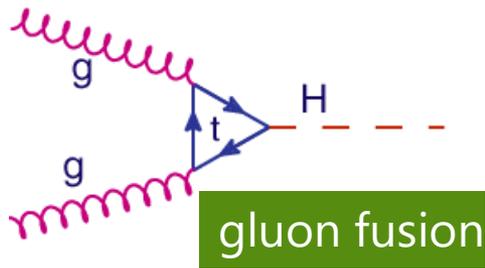
- Higgs を作るパートンは  $10^{-4} < x < 10^{-1}$  の領域
  - gluon-dominated



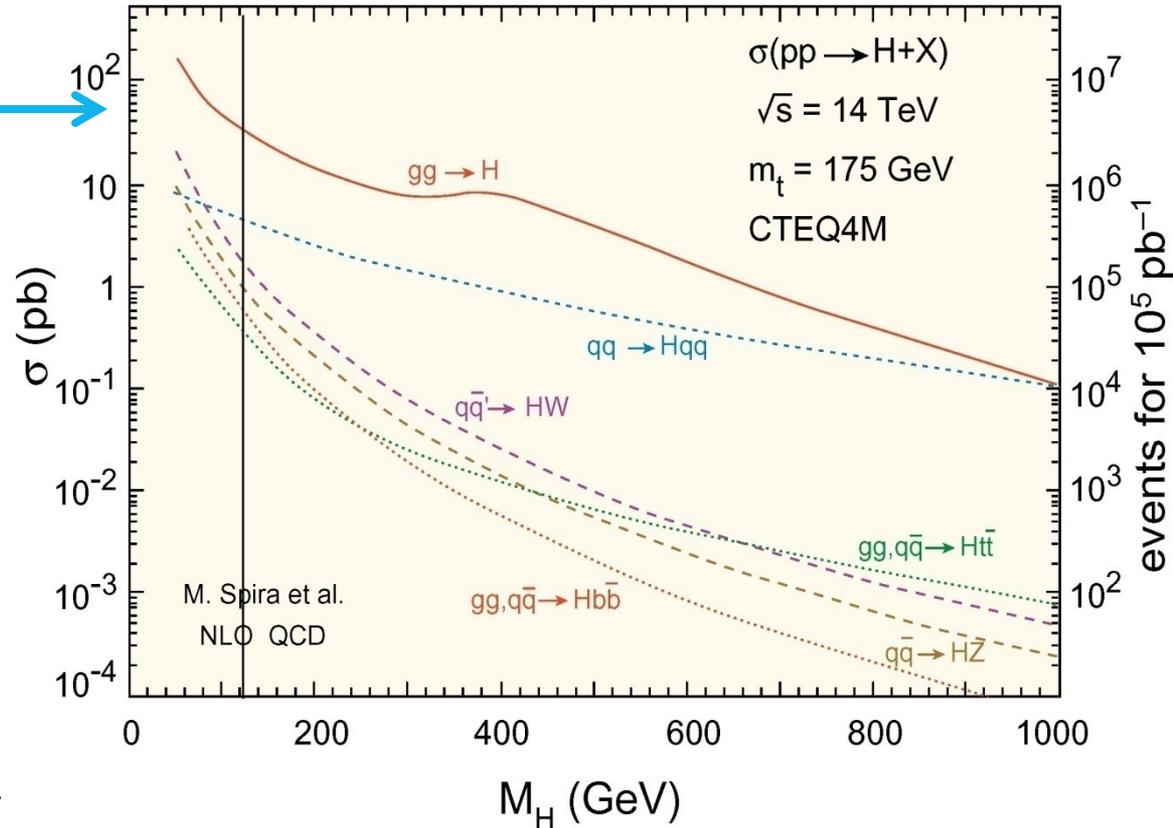
# SM Higgs boson production @ LHC



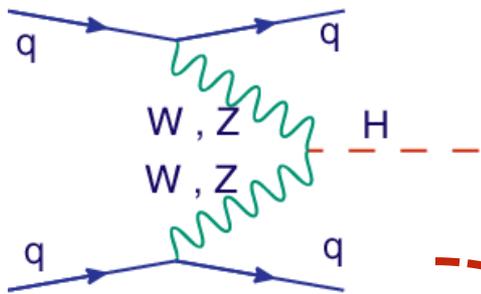
# SM Higgs boson production @ LHC



- 生成断面積が大きい
  - グルーオンが多いから
- バックグラウンド (似たような事象) も多い
  - 付随した特徴ある粒

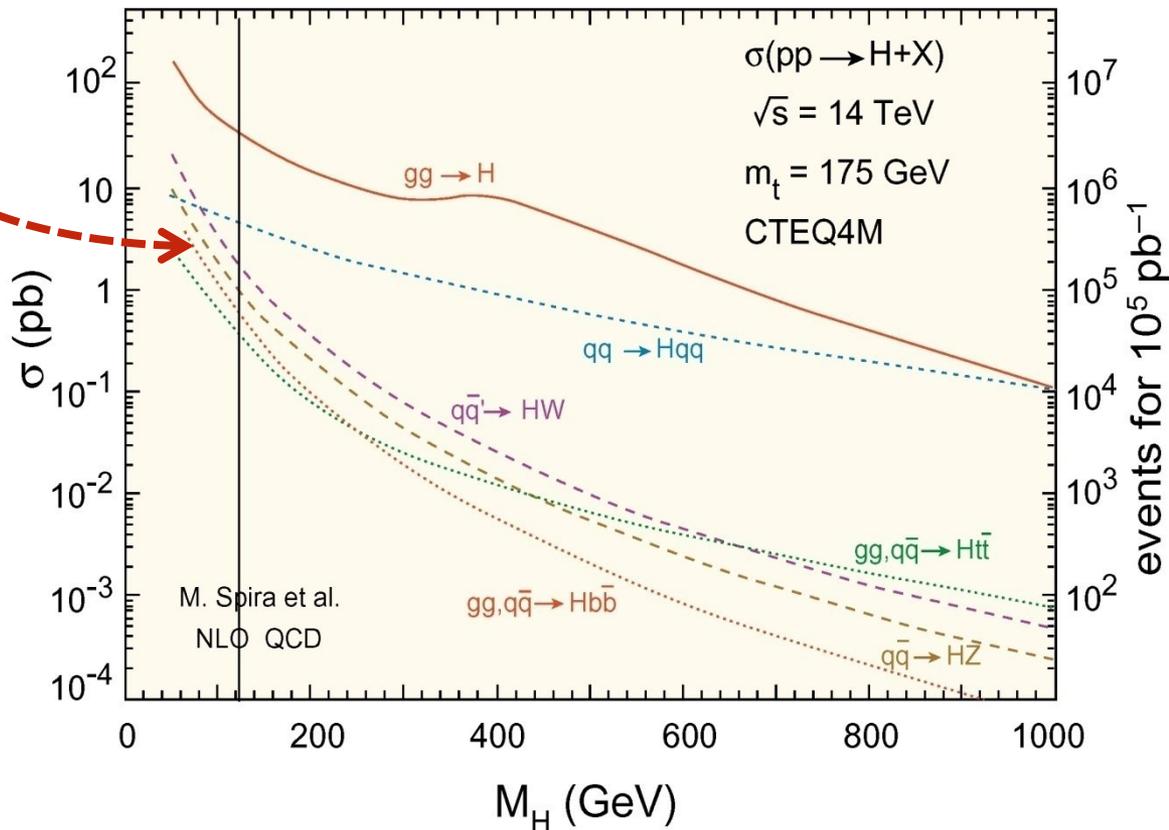


# SM Higgs boson production @ LHC

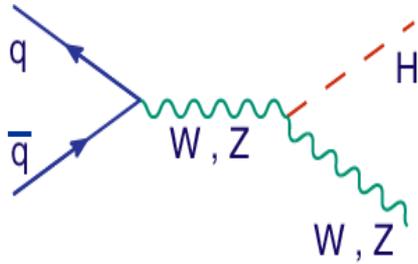


Vector-boson fusion (VBF)

- 前のプロセスの 1/10 程度の断面積
- 前方にジェットが生成される
  - これを捕まえバックグラウンドを落とす

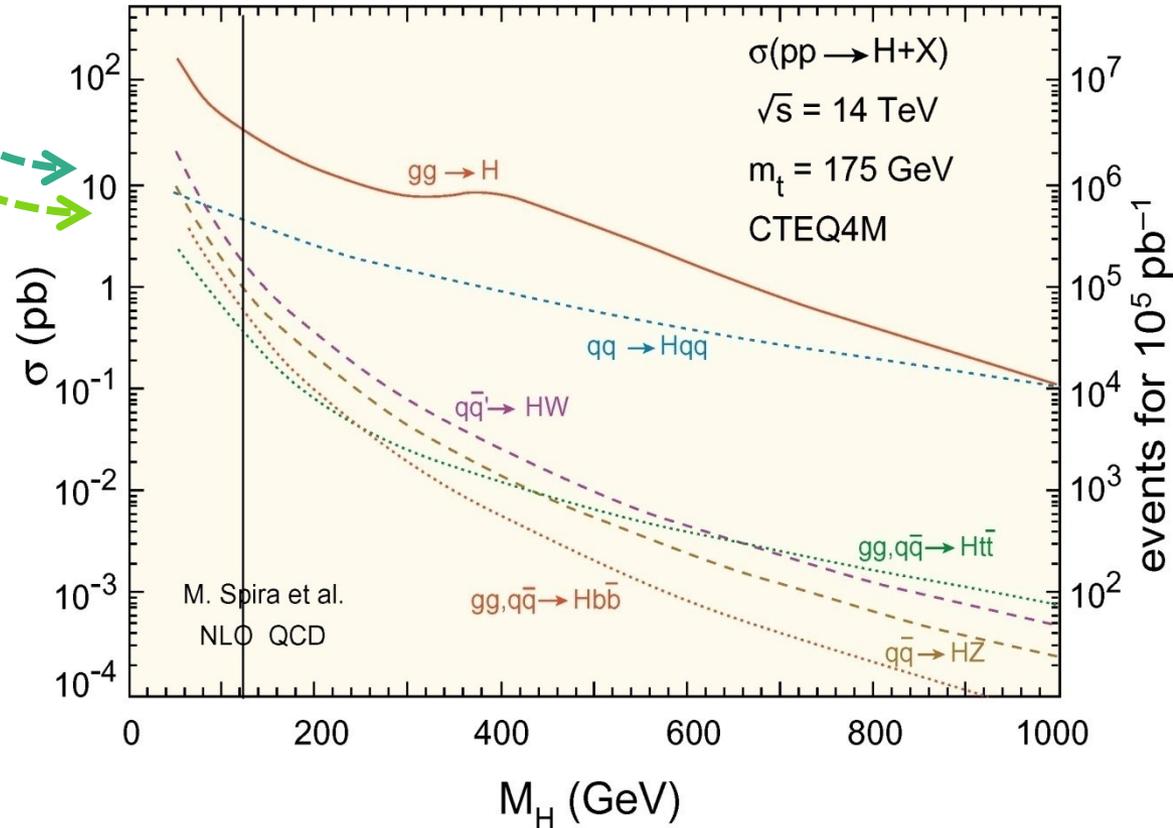


# SM Higgs boson production @ LHC

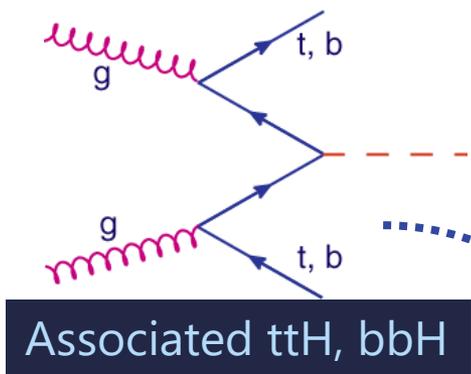


Associated WH, ZH

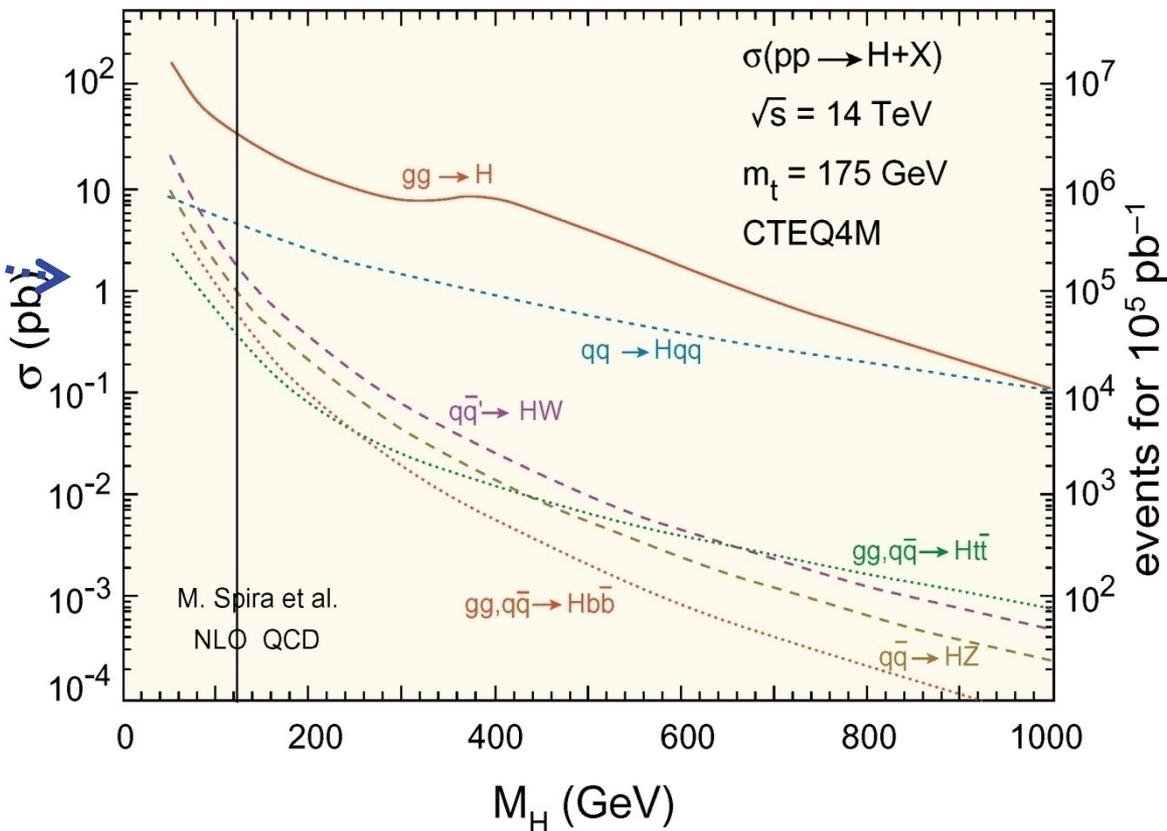
- VBF と同程度の生成断面積
- $bb, \tau\tau$  などのバックグラウンドの多いチャンネルでは  $W, Z$  をとらえることによりバックグラウンドを減らせる



# SM Higgs boson production @ LHC



- トップクォークとの湯川結合を測定できる
  - 解析は難しい...  
 トップクォーク対, W or Z + jets との区別が非常に難しい



# Higgs の崩壊

- $m_H = 125 \text{ GeV}$  では
  - $bb, WW^*$
  - $\tau\tau$  ( $< 10\%$ )
  - $\gamma\gamma$  ( $2 \times 10^{-3}$ )
- Golden channel:  
 $ZZ \rightarrow 4l, \gamma\gamma$ 
  - 全ての終状態の粒子が荷電レプトンか光子  
→ 不変質量を再構成できる
  - できる量は少なくとも、バックグラウンド少ない
- どうやって Higgs は photon と結合する？

