

Top-quark Physics

横谷洋 (Hiroshi YOKOYA), KIAS

素粒子年表:

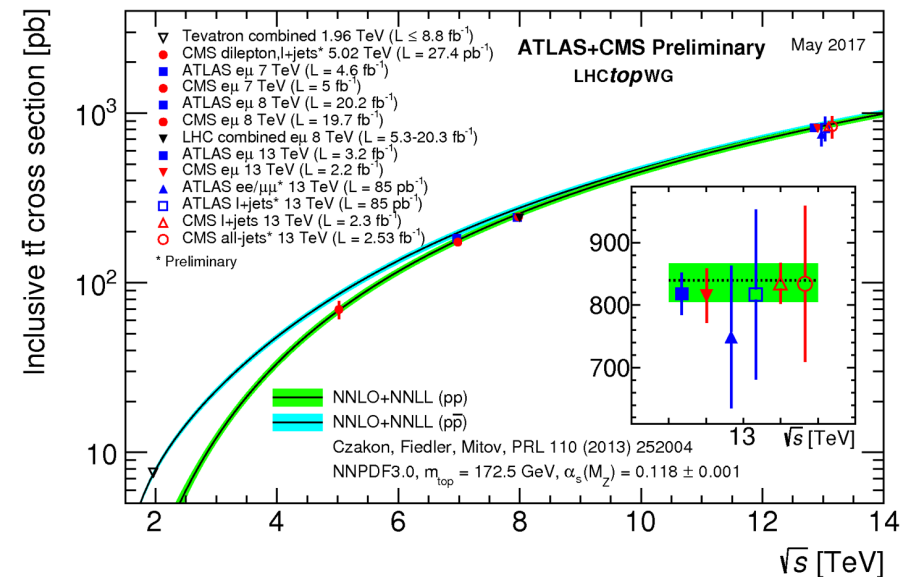
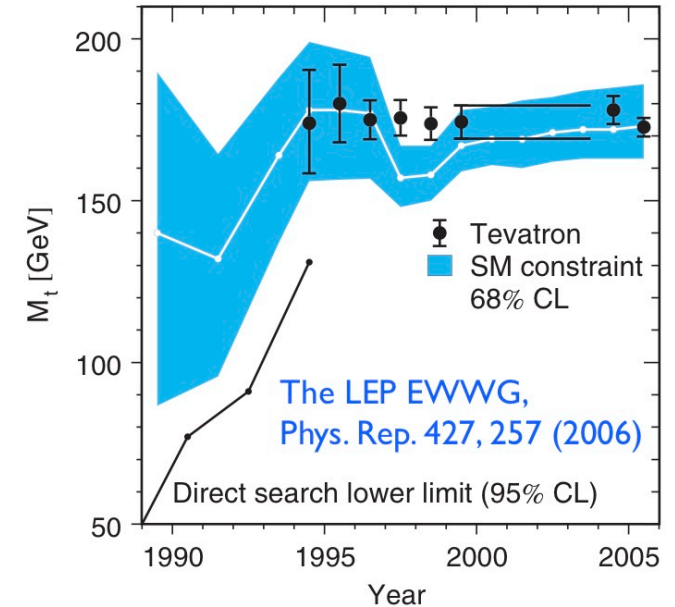
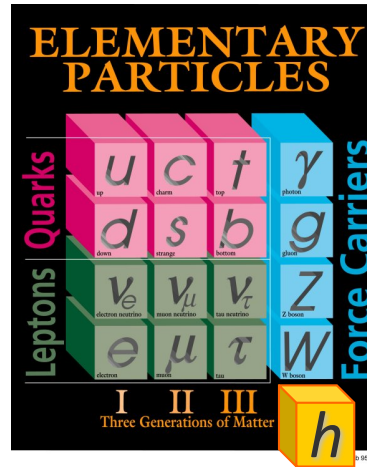
- 1970 GIM機構 (fermion 2重項)
- 1973 小林-益川理論 (第3世代)
- 1974 charm-quark
- 1975 tau-lepton
- 1977 bottom-quark ($m_b \sim 5$ GeV)
- 1979 gluon
- 1983 W- & Z-bosons
- '90s~ $m_t > 30$ GeV (TRISTAN)
- $m_t > 69$ GeV (SppS)
- EW fit (LEP) → 間接的制限
- $m_t > m_W \rightarrow$ no hadronization

1995 discovery at Tevatron

2000 tau-neutrino

2010 re-discovery at the LHC

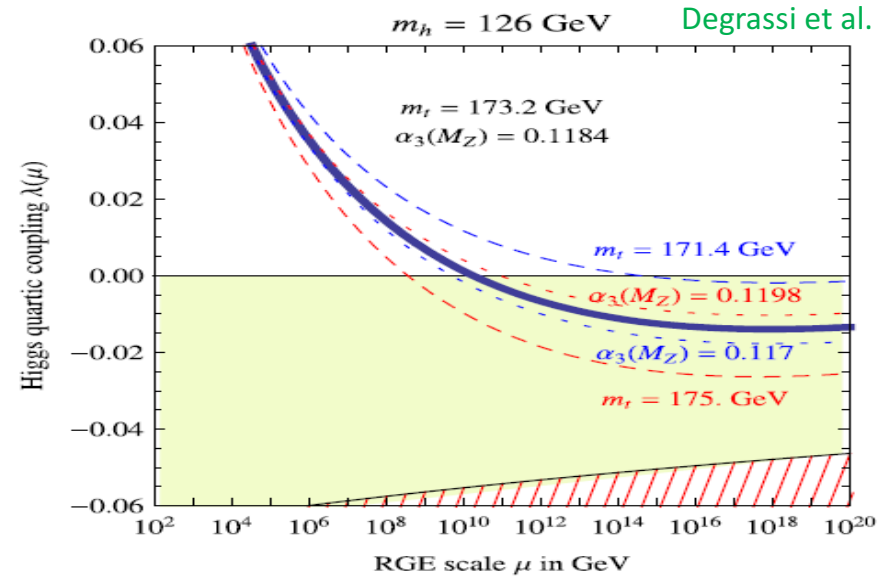
2012 Higgs-boson



- Higgs 4点結合のスケール依存性:

$$16\pi^2 \mu \frac{d\lambda}{d\mu} = 24\lambda^2 - 6y_t^4 + \dots$$

標準模型が破綻するスケールは、
トップ質量に大きく依存

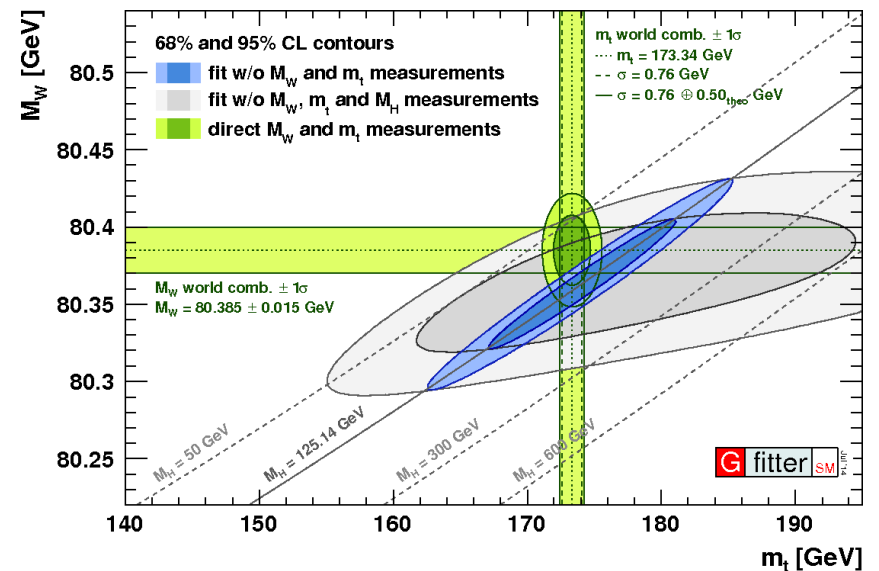


- 電弱精密測定:

$$\delta\rho \sim \frac{3y_t^2}{32\pi^2} - \frac{3g'^2}{32\pi^2} \ln \frac{m_h}{m_Z}$$

トップ質量は2次で効く。

トップ質量の不定性を抑えることで、
BSM物理が探究出来る。



さらに、もしかしたら、top-quark は、

1. EWSBの起源に関係しているかもしれない
2. (比較的軽い) partner粒子が存在するかもしれない
3. 暗黒物質と結合しているかもしれない

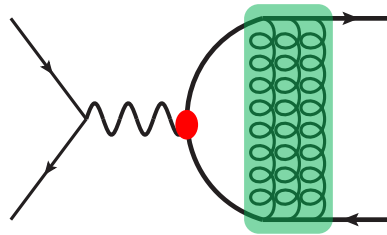
Composite Higgs models,
Supersymmetric models,
Top-portal DM models,,,

ILCでは、質量測定, カップリング測定(top-Yukawa, ttZ,,,)の精度の飛躍的な向上が期待される

Topは、ILC物理の主役の一つ (Higgs, Top & BSM)

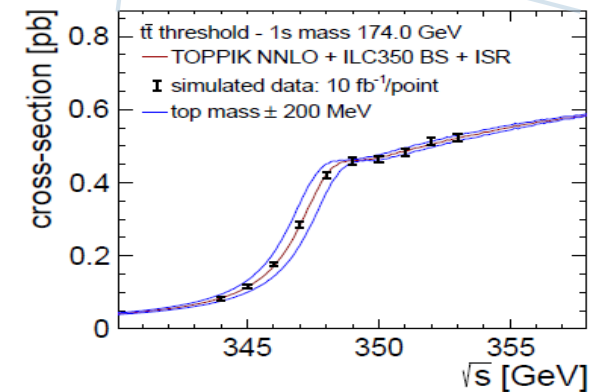
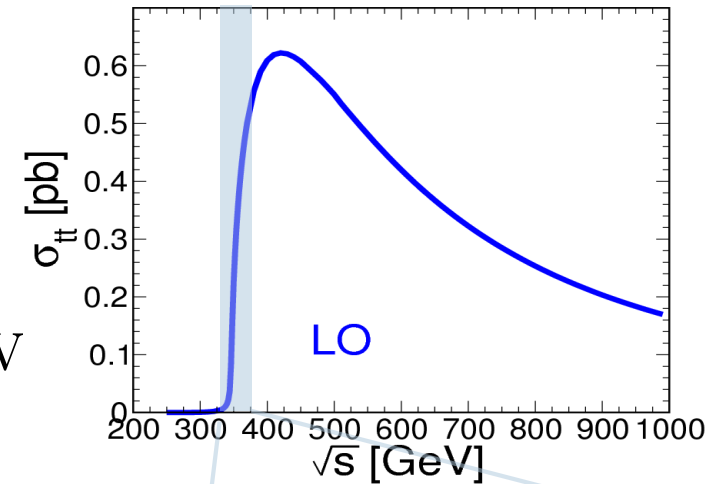
2つの重要な散乱過程:

$$e^+ e^- \rightarrow t \bar{t} \quad \sqrt{s} = 350 \text{ GeV} \sim 500 \text{ GeV}$$

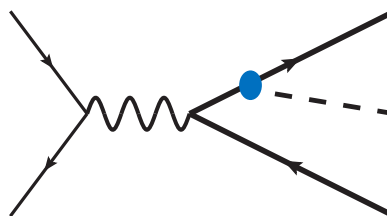


threshold scan: $(m_t, \Gamma_t, \alpha_s, y_t)$

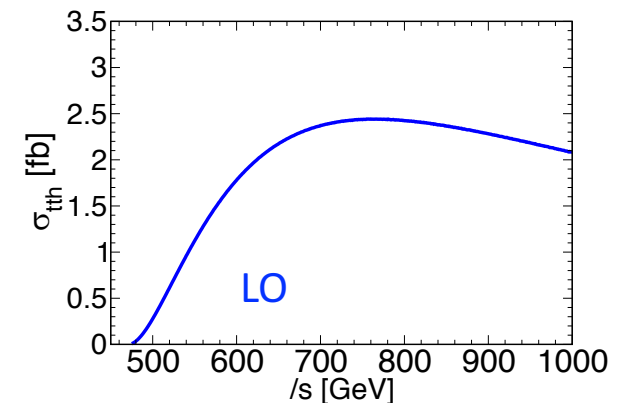
high-energy: $t\bar{t}Z$ couplings



$$e^+ e^- \rightarrow t \bar{t} h \quad \sqrt{s} = 500 \text{ GeV} \sim 1 \text{ TeV} \quad (550 \text{ GeV})$$



top-Yukawa coupling
の直接測定 $y_t = \sqrt{2}m_t/v \sim 1$
(+ 位相変化によるCP測定)



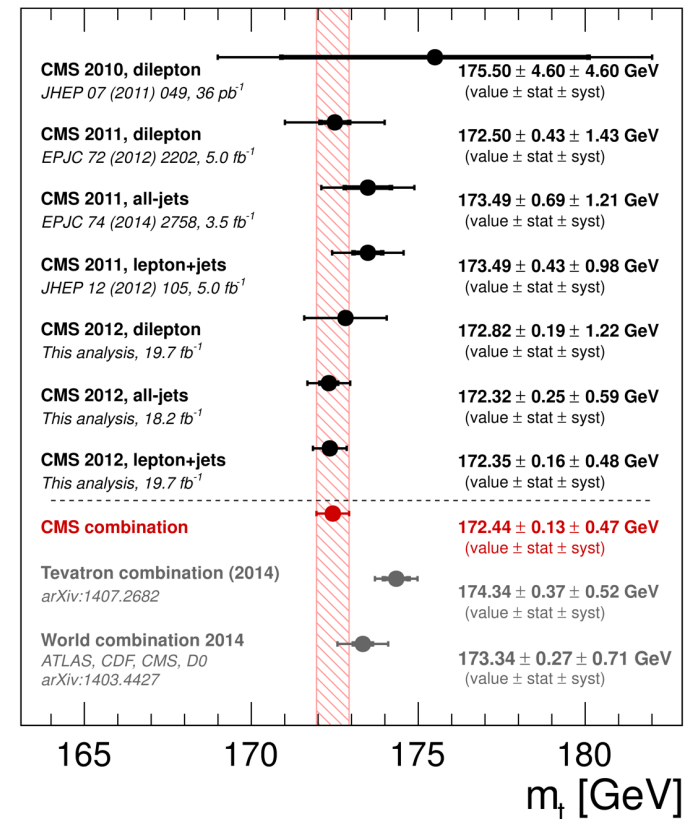
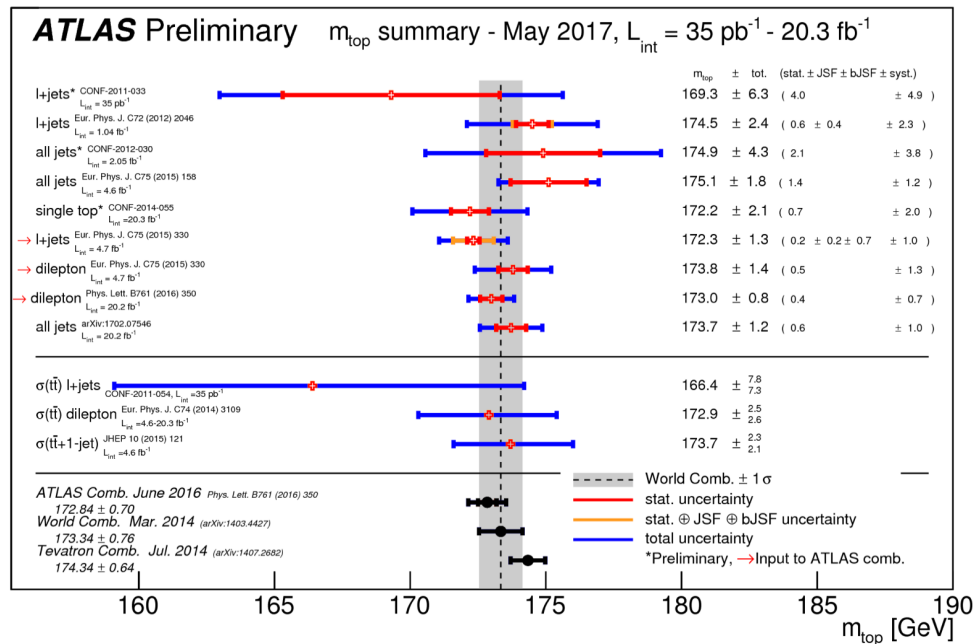
トップ質量測定の世界状況:

PDG Avg. (主にTevatron data): $m_t = 173.21 \pm 0.51 \pm 0.71 \text{ GeV}$

CMS Comb. : $m_t = 172.44 \pm 0.13 \pm 0.47 \text{ GeV}$

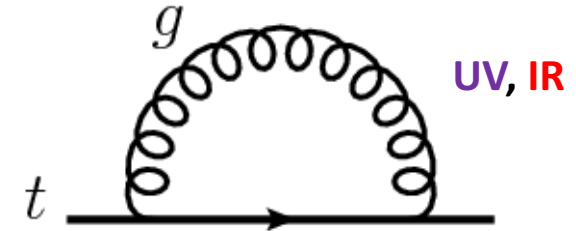
ATLAS Comb. : $m_t = 172.84 \pm 0.34 \pm 0.61 \text{ GeV}$

統計誤差 系統誤差



量子論では、繰り込み処方を通じて質量を定義する

$$S_F(\not{p})^{-1} = \not{p} - m - \Sigma(\not{p}) + \delta m_{\text{CT}}$$



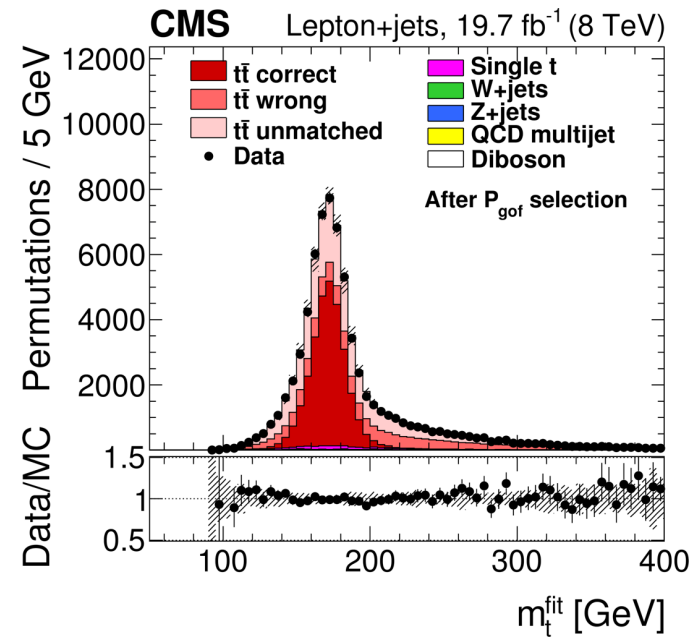
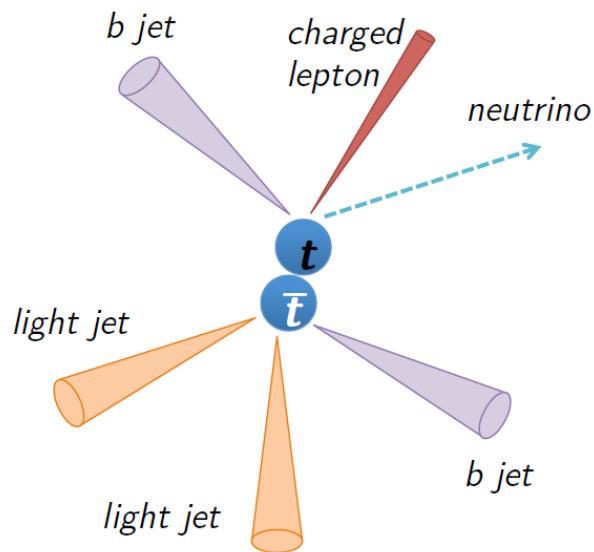
Pole mass : $S_F(\not{p})^{-1} \simeq \not{p} - m_{\text{pole}}$

プロパゲーターの極の位置として定義される。しかし、フリーなクォークは存在しないため、物理的な意味はない。UV発散とIR発散を繰り込む。Pole質量を用いた摂動計算は、収束性が悪いことが知られている。

$\overline{\text{MS}}$ mass : $\delta m_{\text{CT}} = \Sigma(\not{p}) \Big|_{\frac{1}{\epsilon} - \gamma_E + \ln 4\pi}$

次元正則化における発散項(+幾何学因子)のみを引き算する。単なる理論のパラメーター。UV発散のみを繰り込むshort-distance massの一種。高次補正の計算に適している。

Template method: トップ崩壊からの(b-)ジェットやレプトンの運動量で構成した測定量を、モンテカルロシミュレーションと比較して best-fitによって質量を決める。



(J_B-J-J)の不変質量は、正確には、top-quarkのpole-massではない。

クォークはカラー価を持つのに対して、
ジェットはカラー価を持たないハドロンを集めたもの。

クォークはカラー価を持ち、ハドロン化するまでの間、他のクォーク・グルーオンとの相互作用が切れない。(Color Reconnection効果)

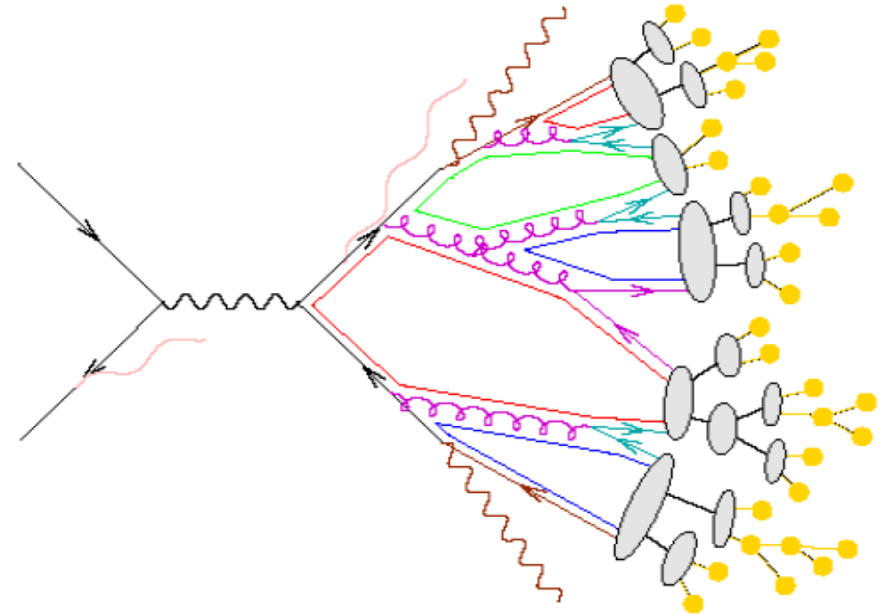
ハドロン化の仕組みはQCDから導くことが出来ず、モデル計算に頼っている。

さらに、Initial-State Radiation, Underlying Eventなどの寄与が加わり、ジェット運動量に対して非自明な影響を与える。

典型的に、 $M_{jjj} - m_t^{\text{pole}} = \pm \mathcal{O}(1) \text{ GeV}$

- Template methodで測った質量は、MC質量と呼ばれる。

MC質量: モンテカルロイベントジェネレータ(Pythia, Herwig,..)のパラメータとしてのトップ質量。
理論の基本変数としての質量との関係は自明ではない。



MC質量と”理論的に良く定義された質量”とを結びつける研究は試みられているが、ハドロンコライダーでの実用的段階までには至っていない。

A. Hoang et al., PRL(2016)

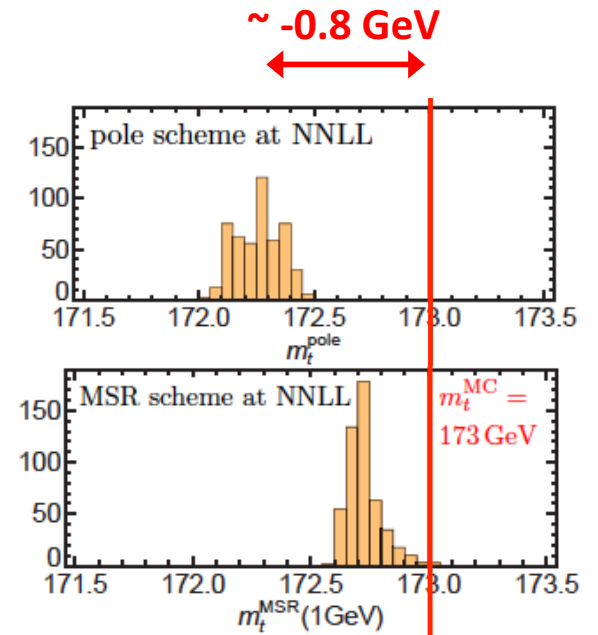
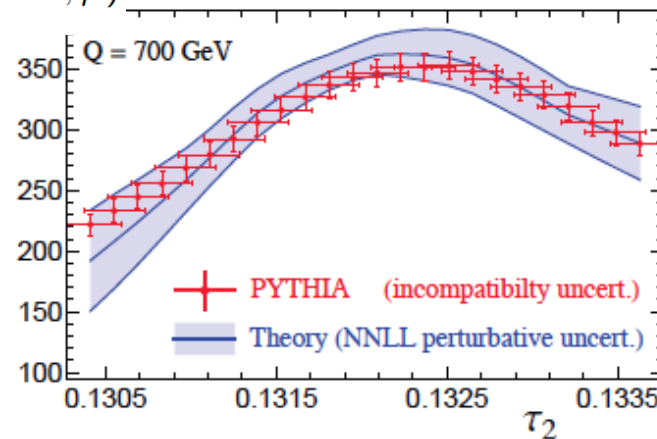
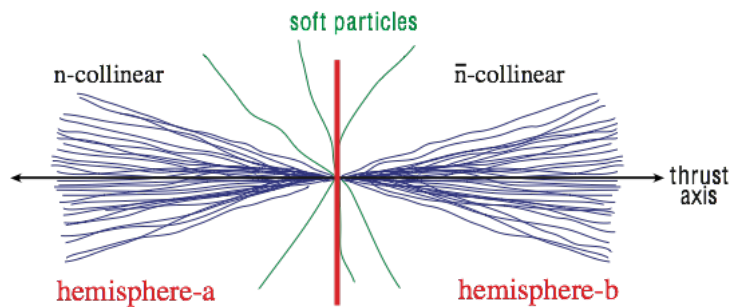
$e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ における2-jettiness(τ_2)分布 (~スラスト分布) を、SCETを用いて、ハドロンスケールの効果まで含めて計算する。

MCジェネレータの分布を、理論式でフィットする。
(フィットパラメータは、トップ質量と非摂動係数)

$$\tau_2^{\text{peak}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{4m_t^2}{Q^2}}$$

MC質量と理論式の質量との対応を得る。

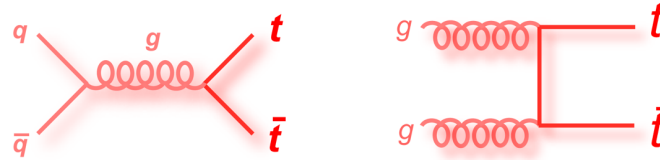
$$\frac{d\sigma}{d\tau} = Q^2 \sigma_0 H_0(Q, \mu) \int dl J_0(Ql, \mu) S_0(Q\tau - l, \mu)$$



問題点: ハドロンコライダーは、 e^+e^- よりもずっと複雑。

測定量依存性がある → 測定量になるべく近い量を計算しなければならない。

トッペア生成全断面積



$$\sigma_{t\bar{t}}(s; m_t) = \int dx_1 \int dx_2 f_i(x_1, \mu) f_j(x_2, \mu) \hat{\sigma}_{ij}(\hat{s}; m_t, \mu, \alpha_s)$$

NNLO:
Czakon, Fielder, Mitov (13)

パートンPDF

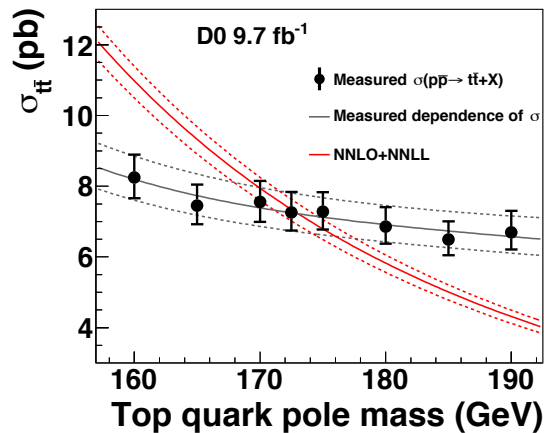
パートン散乱断面積

$$\frac{\delta m_t}{m_t} \simeq 0.2 \frac{\delta \sigma_{t\bar{t}}}{\sigma_{t\bar{t}}}$$

生成断面積を、摂動QCDで質量の関数として計算し (NNLO+NNLL)、実験測定と比較する。

繰り込みで用いたスキームの質量が得られる。

PDF, α_s , 測定誤差が、直接、測定量に反映する。

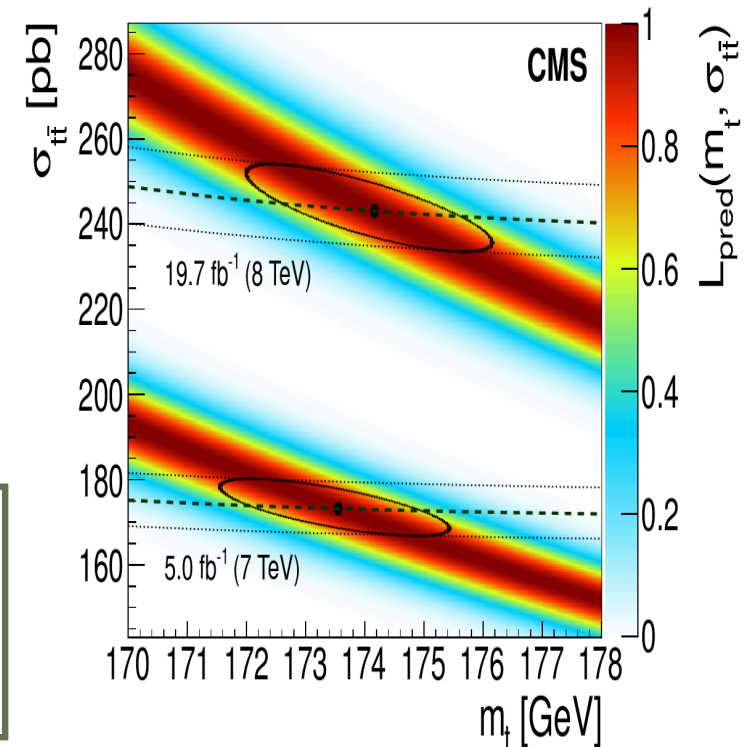


DO (2016) $m_t = 172.8^{+3.4}_{-3.2}$ (tot.) GeV.

CMS-TOP-13-004

	m_t
NNPDF3.0	$173.6 \pm_{1.8}^{1.7}$ GeV
MMHT2014	$173.9 \pm_{1.9}^{1.8}$ GeV
CT14	$174.1 \pm_{2.2}^{2.1}$ GeV

CMS-TOP-13-004



その他にも様々な方法が提唱され、実際に測定も行われている (ただし、殆どがMC質量)

- Kinematic endpoint: $M_{T2} = \text{Min}_{\mathbf{p}_{T,1} + \mathbf{p}_{T,2} = \vec{p}_T} [\text{Max}\{M_T(X, \mathbf{p}_{T,1}), M_T(Y, \mathbf{p}_{T,2})\}]$
...;Cho,Choi,Kim,Park;...

- B-hadron lifetime: $L_B = \beta\gamma c\tau_B$
Hill,Incandela,Lamb

- J/ ψ + lepton: $M_{J/\psi(\rightarrow\mu\mu)+\ell}$
Kharchilava

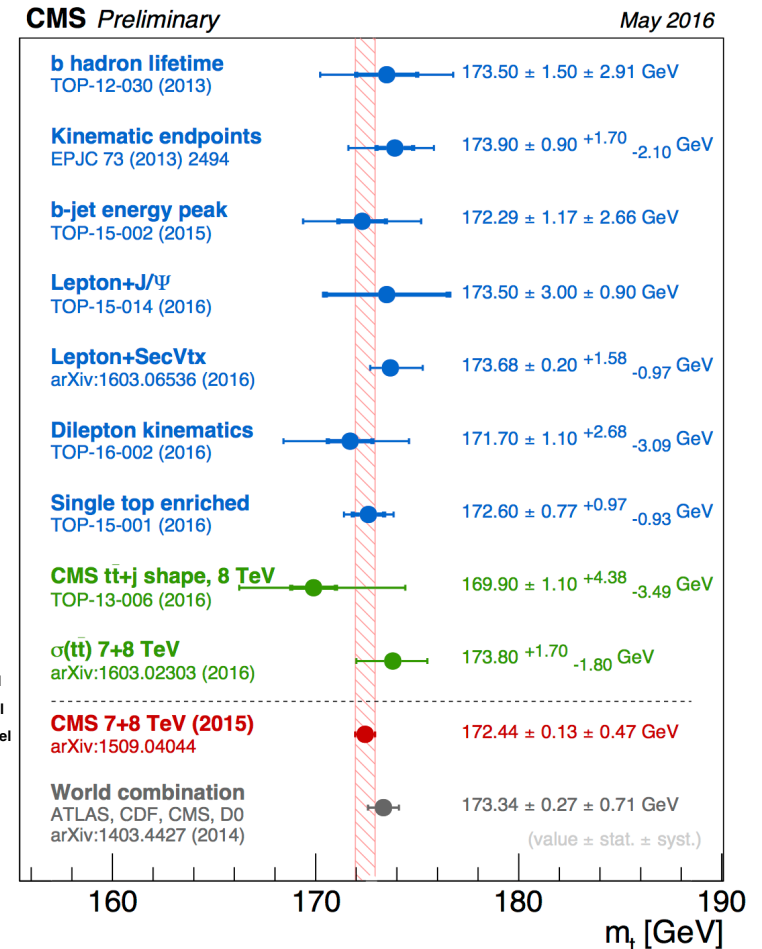
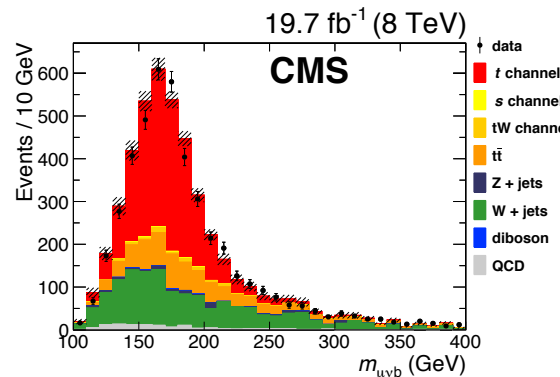
- tt + jet shape: $d\sigma/dM_{ttj}$
Alioli et al.

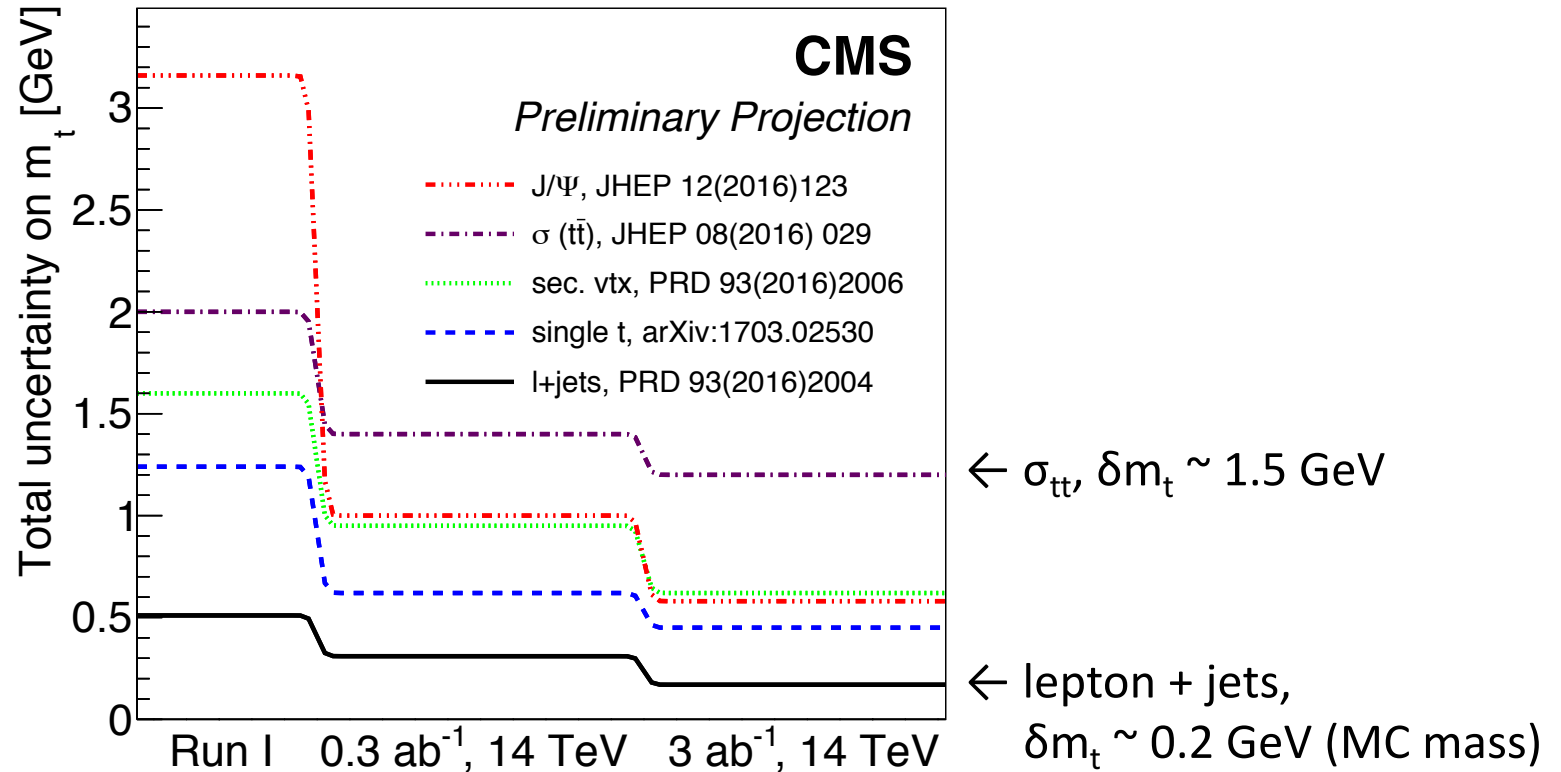
- B-jet energy peak: $E_b^{\text{peak}} = \frac{m_t^2 - m_b^2 + m_W^2}{2m_t}$
Agashe,Franceschini,Kim

- Leptonic moments: $\langle (p_T^\ell)^n \rangle, \langle (E^\ell)^n \rangle,$
Frixione,Mitov

- Single-top enriched:

- (Leptonic weight integral, Diphoton spectrum,...)





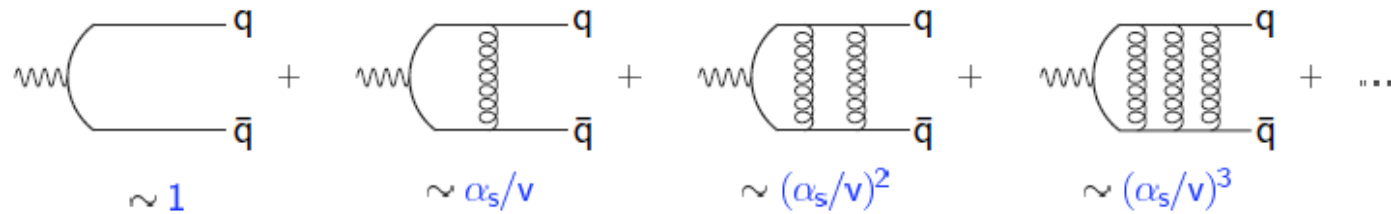
- LHC run-II, HL-LHCで、統計誤差は順調に減少する
- 検出器の理解、MCの調整等で、系統誤差を減らす試みも調べられている
- MC質量の不定性については、考慮されていない→ 理論側の発展が必要

ILC実験でのトップ質量測定

Threshold Scan: トップ対のしきい値付近での生成全断面積の変化を見る

しきい値付近では、トップは非相対論的 ($v/c \ll 1$)

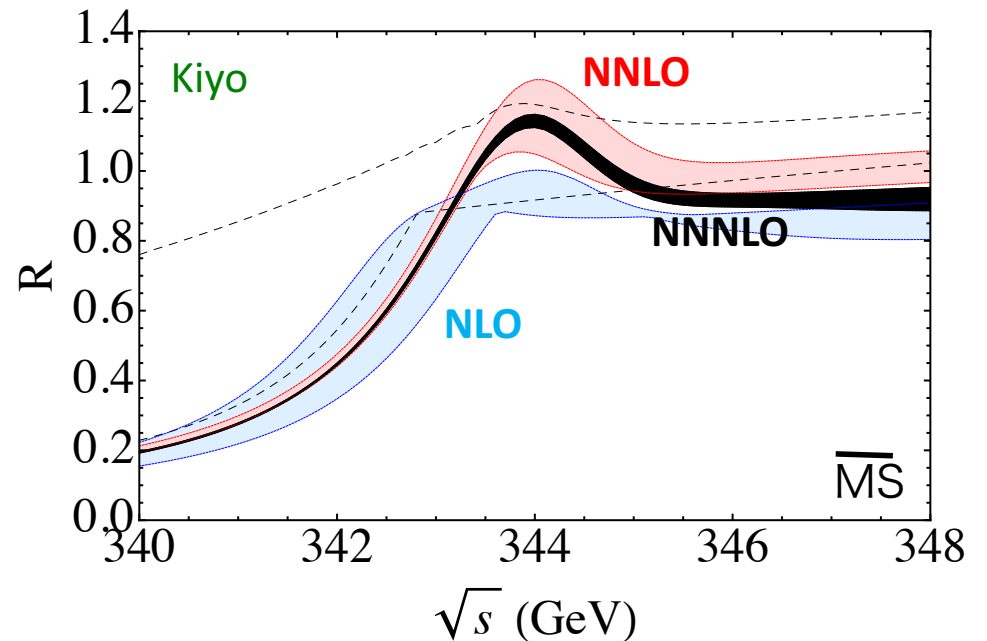
→ $(\alpha_s/v)^n$ 型補正(クーロン補正)を再足し上げする必要がある



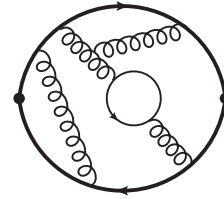
N³LO_NRQCD

Beneke, Kiyoyama, Marquard, Penin, Piclum, Steinhauser (15)

- ・ トップクォーク対の束縛状態の形成による共鳴ピークの存在。
- ・ ピークの位置、高さ、形をフィットして、 m_t , Γ_t , α_s の値が精密に決定できる。(トップ湯川結合も効く)



光学定理: $\sigma_{t\bar{t}}(s) \propto \frac{1}{s} \text{Im} [\Pi_v(s)]$



$$\Pi_v^{\mu\nu}(q) = (q^\mu q^\nu - q^2 g^{\mu\nu}) \Pi_v(q^2) + q^\mu q^\nu \Pi_{L,v}(q^2)$$

$$\Pi_v^{\mu\nu}(q) = i \int d^4x e^{iq \cdot x} \langle 0 | T \{ J_v^\mu(x) J_v^\nu(0) \} | 0 \rangle \quad \text{QCDカレントの2点関数}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{カレントマッチング} \\ \text{(QCD vs NRQCD):} \\ \\ \text{NRカレントの2点関数} \\ \text{(グリーン関数):} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} J^\mu \leftrightarrow j_v^i = c_v \psi^\dagger \sigma^i \chi + \frac{d_v}{6m^2} \psi^\dagger \sigma^i \mathbf{D}^2 \chi + \dots \\ \\ G(\vec{0}; E) = i \int d^4x e^{iEt} \langle 0 | T \{ [\chi^\dagger \sigma^i \psi](x) [\psi^\dagger \sigma^i \chi](0) \} | 0 \rangle \end{array}$$

シュレーディンガー方程式 with QCDポテンシャル

Fadin, Khoze 87

$$\left[(E + i\Gamma_t) - \left\{ -\frac{\nabla^2}{m_t} + V_{QCD}^{(c)}(r) \right\} \right] G^{(c)}(E, \vec{x}) = \delta^3(\vec{x})$$

虚部に崩壊幅を導入することで、不安定性を表現する

QCDポテンシャル
(短距離領域, $r < 1/\Gamma_t \rightarrow$ 摂動計算)

Penin,Steinhauser;Beneke,Kiyo,Schuller;
Kiyo,Sumino;Anzai,Kiyo,Sumino;Smirnov,
Smirnov,SteinHauser;Marquard;Smirnov,
Smirnov,Steinhauser

Green関数のピーク \Leftrightarrow (1S) Topponiumのエネルギー準位

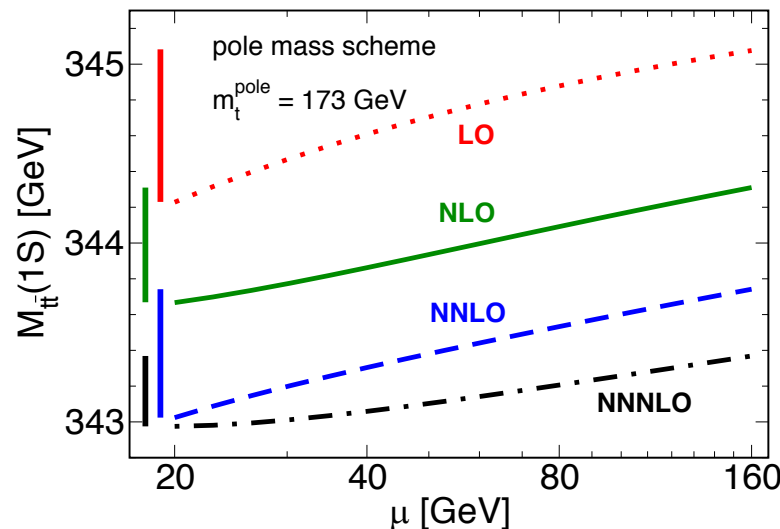
$$M_{1S} = 2m_t + \Delta E_{1S}$$

リノマロン相殺

リノマロン: QCDの摂動計算が漸近展開であることから由来する理論予言の不定性。
SD質量処方を使うことで、摂動各次数で不定性をキャンセルさせながら、エネルギー準位が計算出来る。

Pole-mass scheme

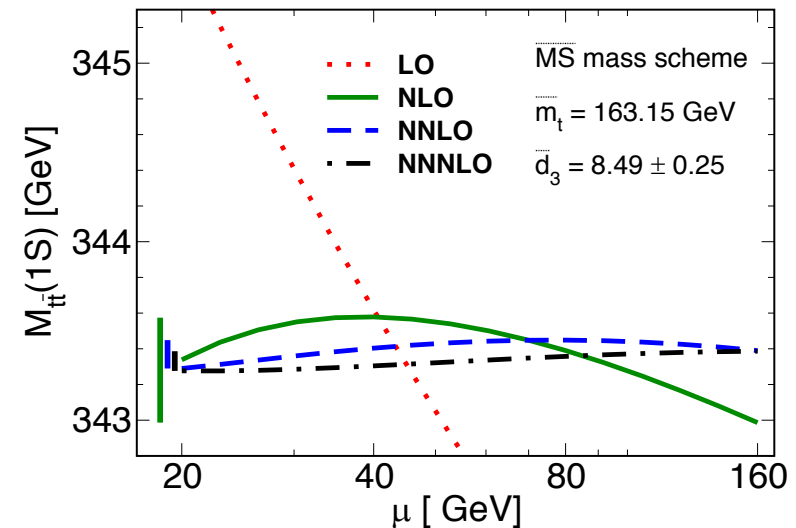
収束性が悪く、不定性もなかなか減っていかない; $\delta_{N^3LO} \sim 0.4 \text{ GeV}$



MSbar-mass scheme

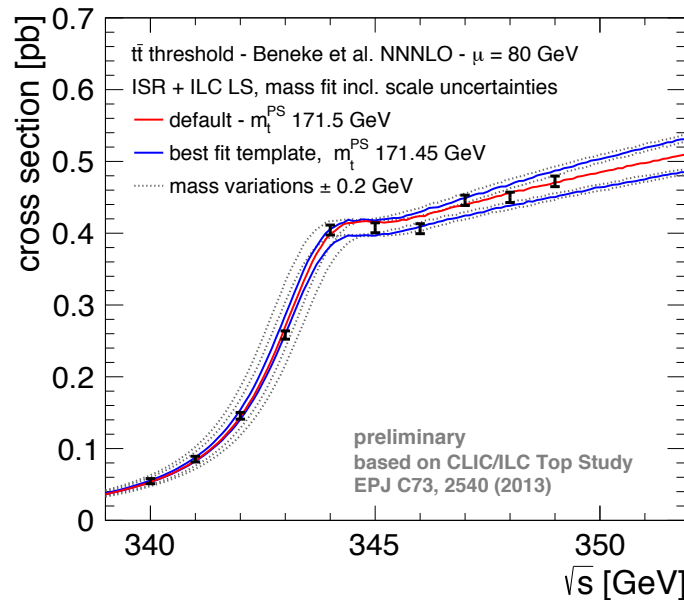
Kiyo,Mishima,Sumino

収束性が良く、不定性も大きく減っていく;
 $\delta_{N^3LO} < 0.1 \text{ GeV}$



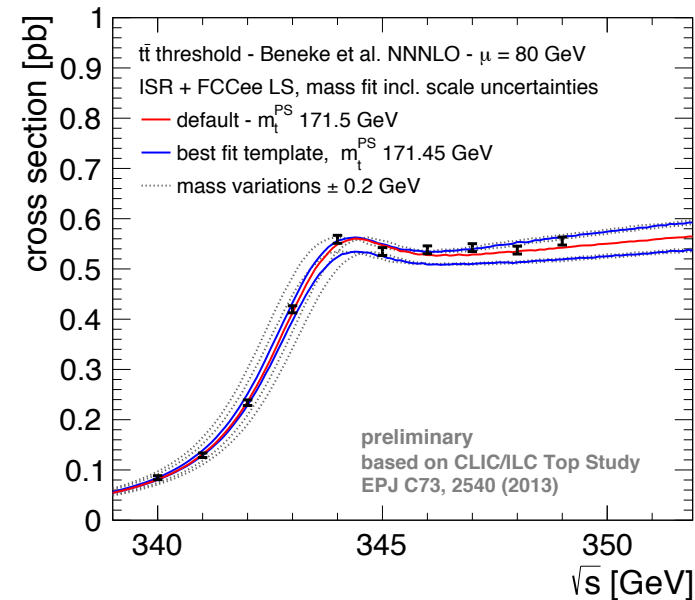
最新のスタディ: N³LO + ISR + LS (ILC, CLIC, FCCee)

F. Simon et al.



ILC:

fit uncertainty: 28.5 MeV (18 MeV stat)
scale uncertainty: 40 MeV



FCCee:

fit uncertainty: 27 MeV (15.5 MeV stat)
scale uncertainty: 40 MeV

- 崩壊幅、湯川結合も決まる。
(α_s を固定した場合の
full simulation)

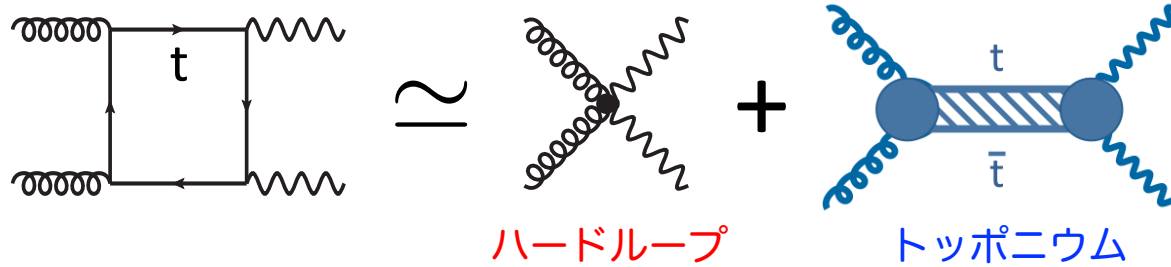
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{質量} \quad \delta m_t^{\text{fit}} \simeq 16 \text{ MeV} \\ \text{崩壊幅} \quad \delta \Gamma_t \simeq 21 \text{ MeV} \\ \text{湯川結合} \quad \delta y_t \simeq 4\% \end{array} \right.$$

Horiguchi et al. (13)

LHCにおけるdiphoton mass spectrumの測定

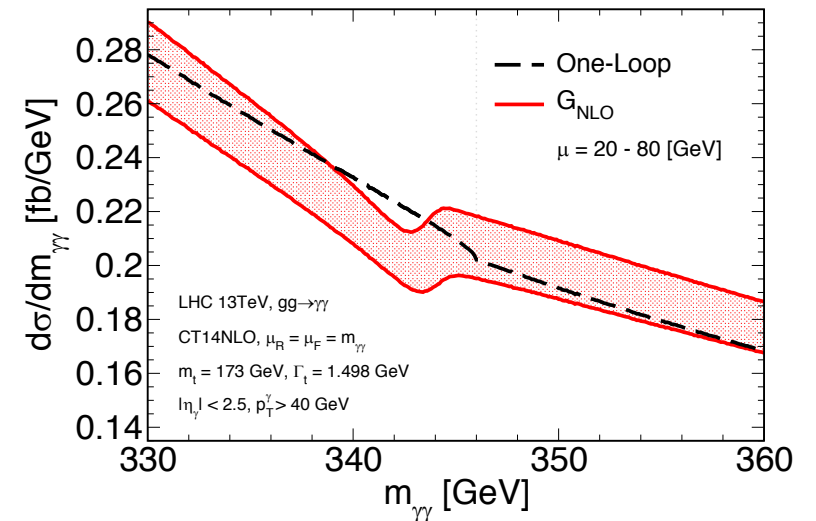
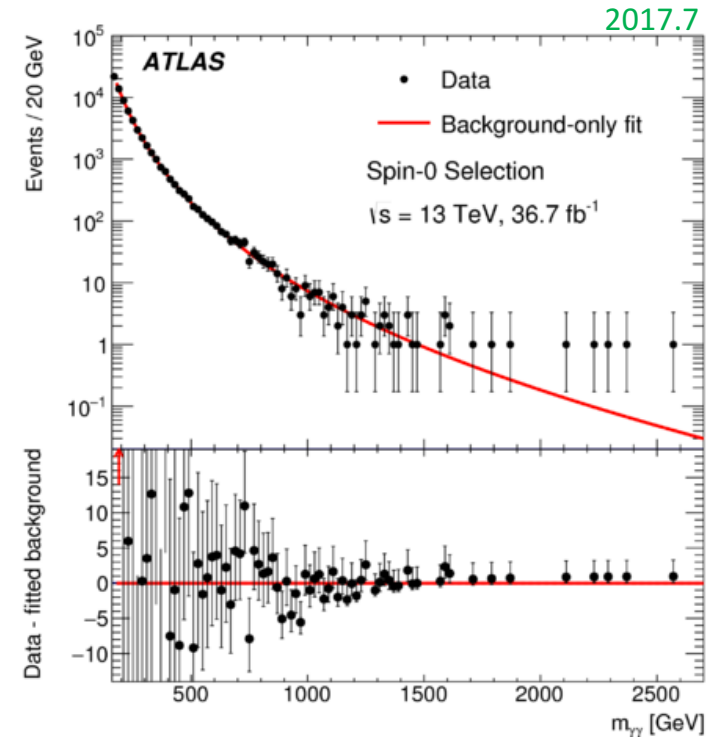
Kawabata, HY, arXiv:1607.00990

Gluon-fusion過程 @ $M_{\gamma\gamma} \sim 2m_t$



$$\mathcal{M}_t^{\text{NR}} = \mathcal{A}_t(\theta) + \mathcal{B}_t \cdot G(\vec{0}, \mathcal{E}) + \mathcal{O}(v^2)$$

- パラ-トッポニウム (スピン=重項) が形成される。
[オルソとの質量差は数MeV(NNLO効果)]
- ハードループとの干渉がスペクトラムに見える。
- 干渉効果の位置は、トップ質量に依存する。



Kawabata, HY (16)

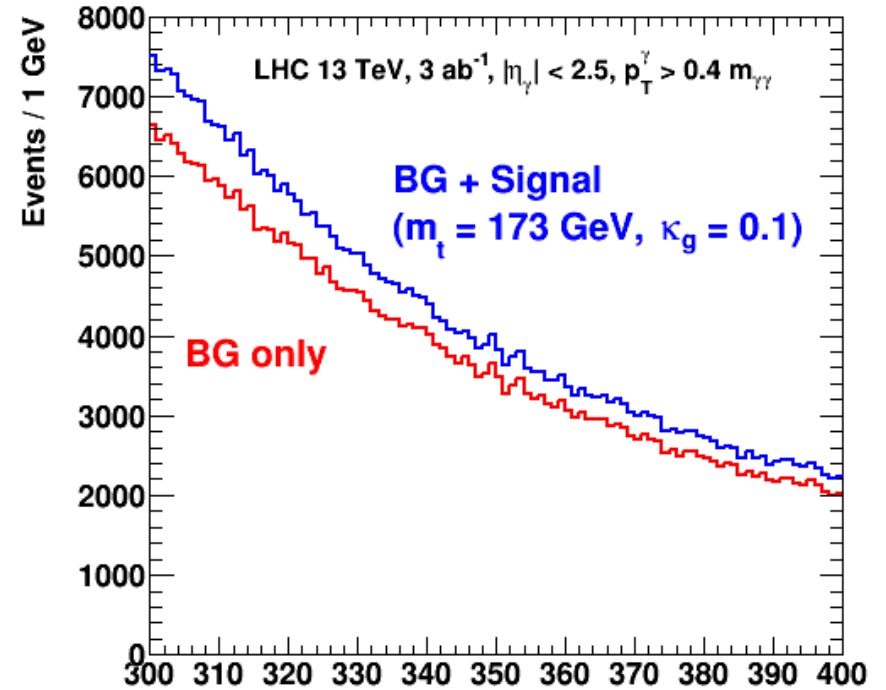
Diphoton mass spectrumを見るだけで、
トップ質量が測れる!

- ハドロンコライダーでも、
光子運動量の測定精度は良い。
- Short-distance massが測れる。
(e^+e^- でのthreshold scanと同じ理屈)

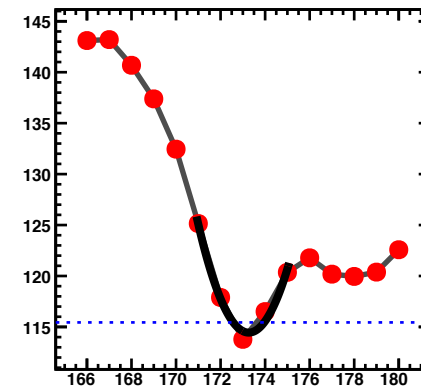
LHC 13TeV, 3000fb^{-1} での測定精度を
シミュレーションして見積もってみると、

{
統計誤差: 2 ~ 3 GeV
 [fit error by Toy MC assuming 5-10% signal ratio]
系統誤差: ~ 1 GeV [photon energy scale]

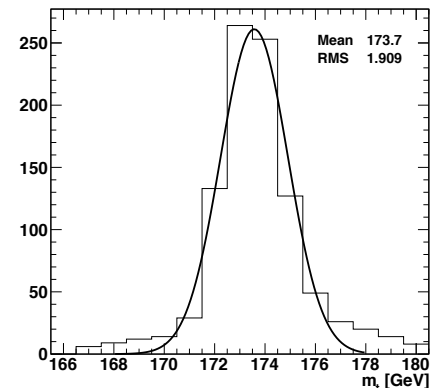
統計が足りず、それほどの精度は出ない、



χ^2 分布(m_t 毎のfit)



best-fit分布(ToyMC)



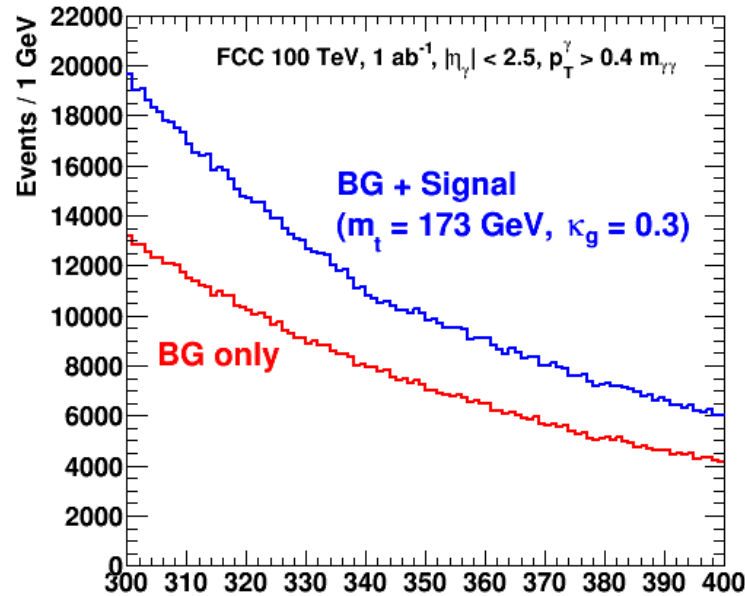
Kawabata, HY (16)

100TeV ppコライダー

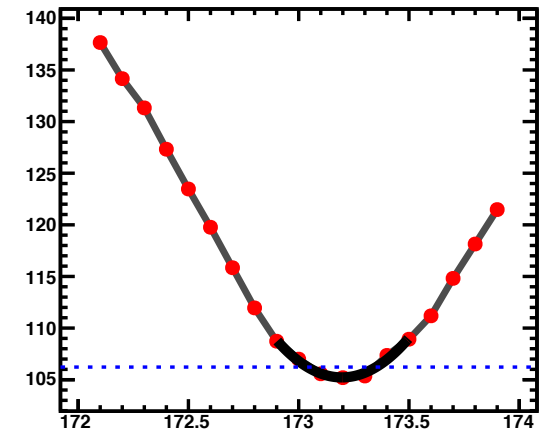
(FCCpp, SppC,,)

$$L = 1 / 10 \text{ ab}^{-1}$$

シグナル比10%~30%を仮定



χ^2 分布 (m_t 毎のfit)



Best-fit m_t in ToyMC

→ clear Gaussian

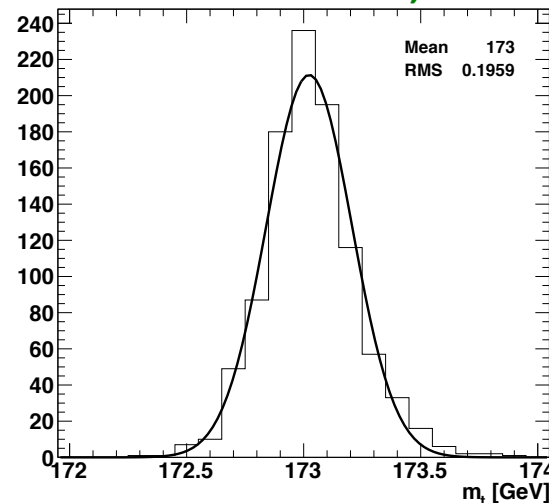
RMS ~ 0.2 GeV / 0.06 GeV ($\kappa=0.3$)

~ 0.6 GeV / 0.2 GeV ($\kappa=0.1$)

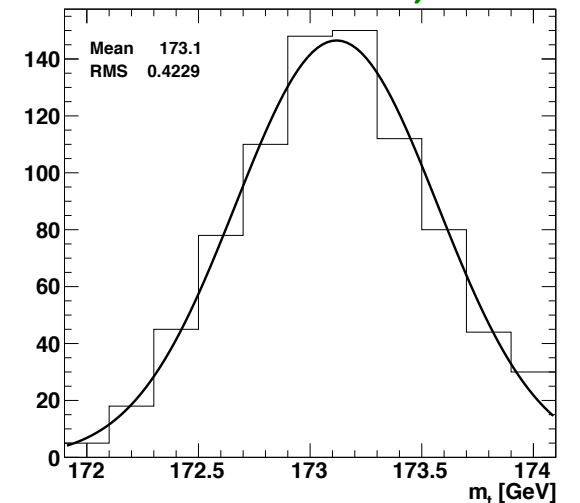
for $L = 1 \text{ ab}^{-1} / 10 \text{ ab}^{-1}$

系統誤差は、改善を期待する。

$L = 1 \text{ ab}^{-1}, \kappa = 0.3$



$L = 1 \text{ ab}^{-1}, \kappa = 0.1$



Topは、ILC物理の主役の一つ

質量測定, カップリング測定(top-Yukawa, ttZ,,,)の精度の飛躍的な向上が期待される。

質量: threshold scan @350GeV $\rightarrow \delta m_t \sim 50$ MeV (short-distance mass)

Yukawa結合: tth @1TeV $\rightarrow \delta y_t \sim 4\%$

ttZ結合: $e^+e^- \rightarrow tt$ @500GeV \rightarrow 数%レベル \rightarrow 東北大 佐藤さん

LHCのトップ質量測定は既に十分な精度が出ているけれど、QCDによる理解が追いついていない。

\rightarrow 新しい手法や、理論の進展が必要。

