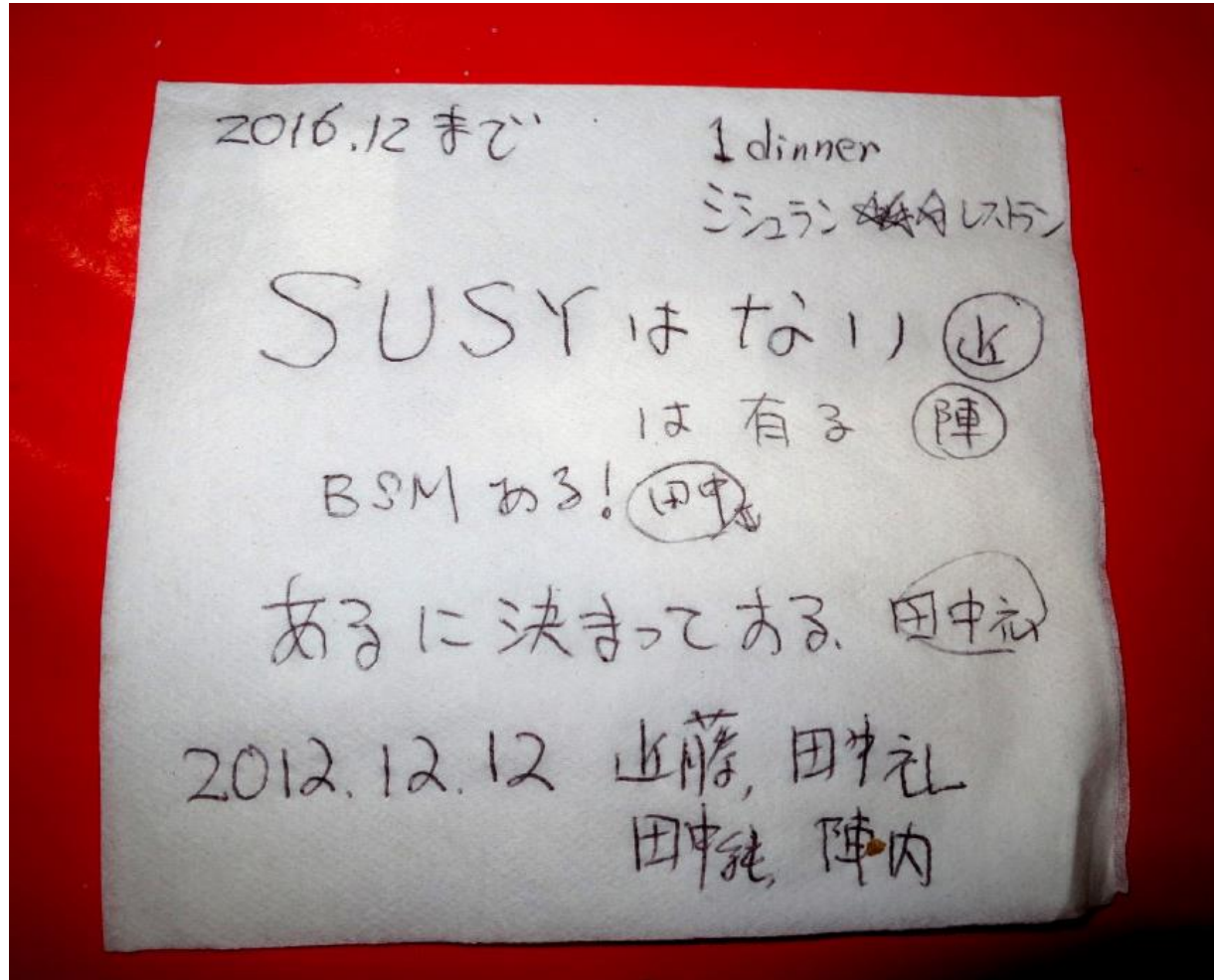


LHC SUSY探索

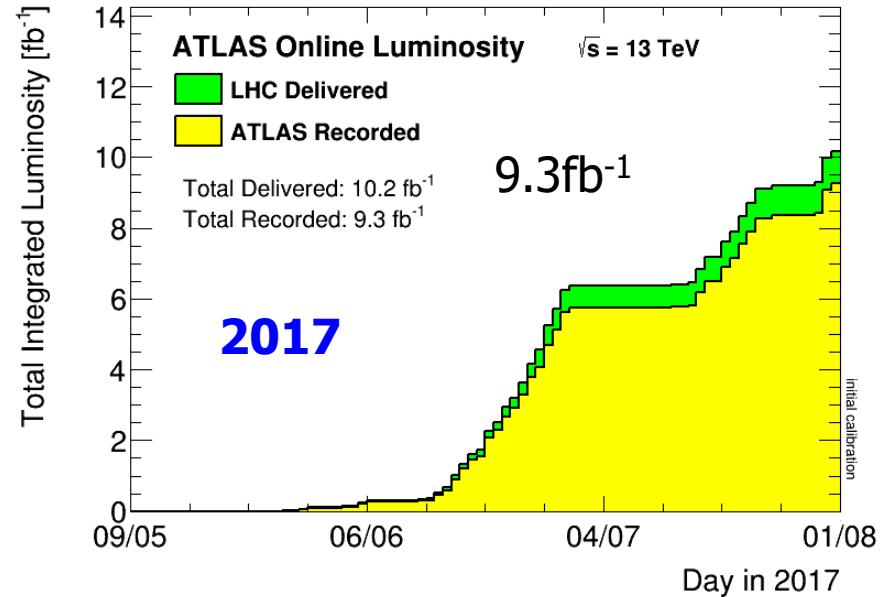
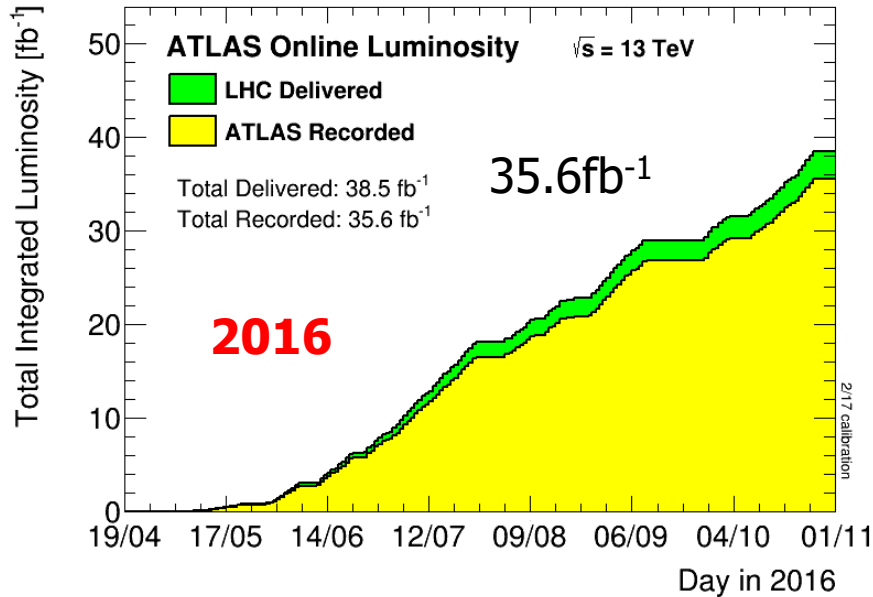
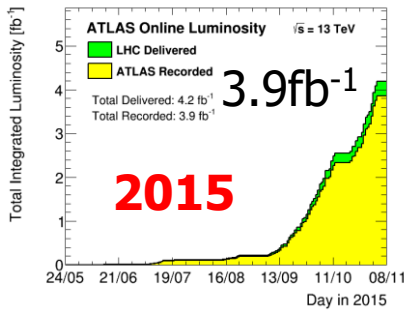
Junichi Tanaka
ICEPP, UTokyo

ヒッグスからSUSYへ



LHC

陽子・陽子コライダー
 重心系エネルギー $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ (2015~)



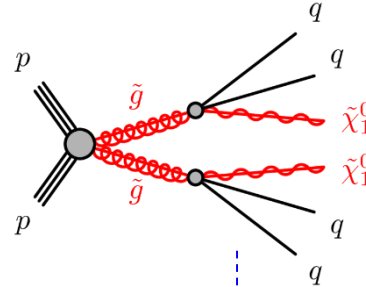
データ解析の現状：2015+2016の約 36fb^{-1} のデータを用いた解析
 → Preliminaryな結果(EPS2017 etc)や論文

2017年も稼働しています！ → ATLASの運転手は石野さん(東大ICEPP)
 (目標:今年だけで 45fb^{-1})

LHCでのSUSY探索(1)

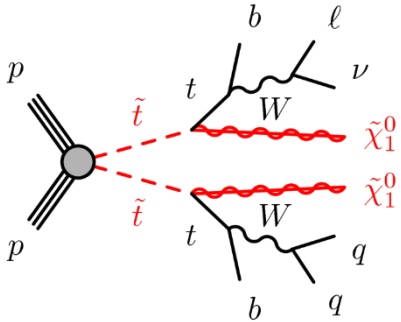
① Gluino & Squark(1st/2nd)

- LHCはQCDマシーン → 生成断面積 ... 大
- Higgs 125GeV → グルイーノがまだある。
- 「初志貫徹」



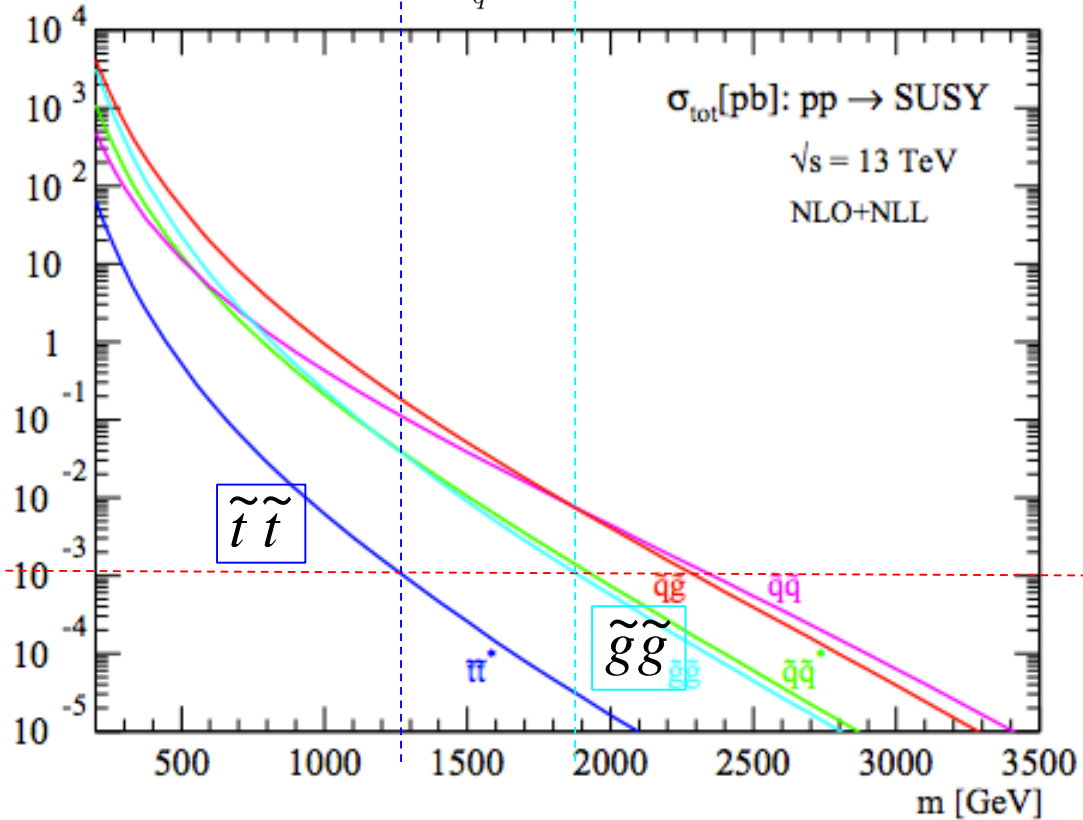
② Stop

- Higgs 125GeV
- 「Naturalness」を信じるなら、
分が悪くなったが...まだまだ現役。



$\sigma = 1\text{fb}$

$L = 36\text{fb}^{-1}$ で
36発生成



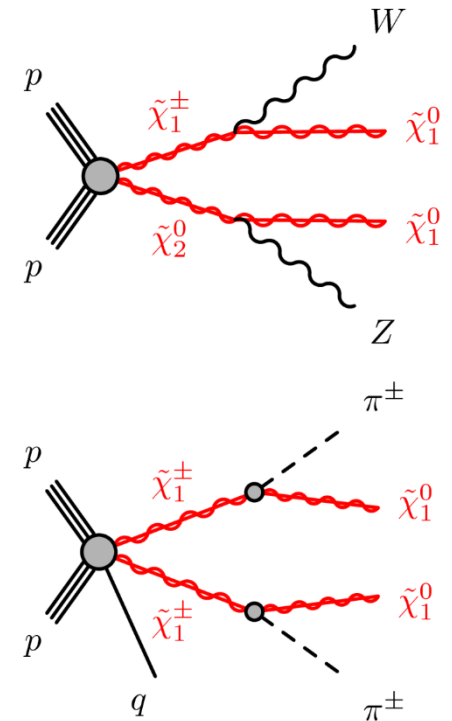
LHCでのSUSY探索(2)

LHCでなかなかSUSYが見えない。

- 観測できないのは実験屋のせい？努力不足？
- やっぱり重い？
一方、「観測されているDM relic density(27%) \rightarrow DM \sim O(100GeV)」

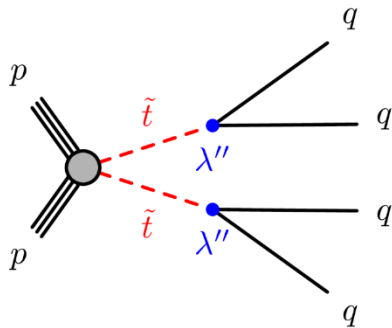
③ Wino & Higgsino

- あくまでも「Naturalness」(Gaugino mass \sim Higgs mass)
- これがLSP! \rightarrow 直接生成 (他のSUSYは重いから...)
- 生成断面積 Wino/Higgsino LSP \sim O(10fb)@300GeV

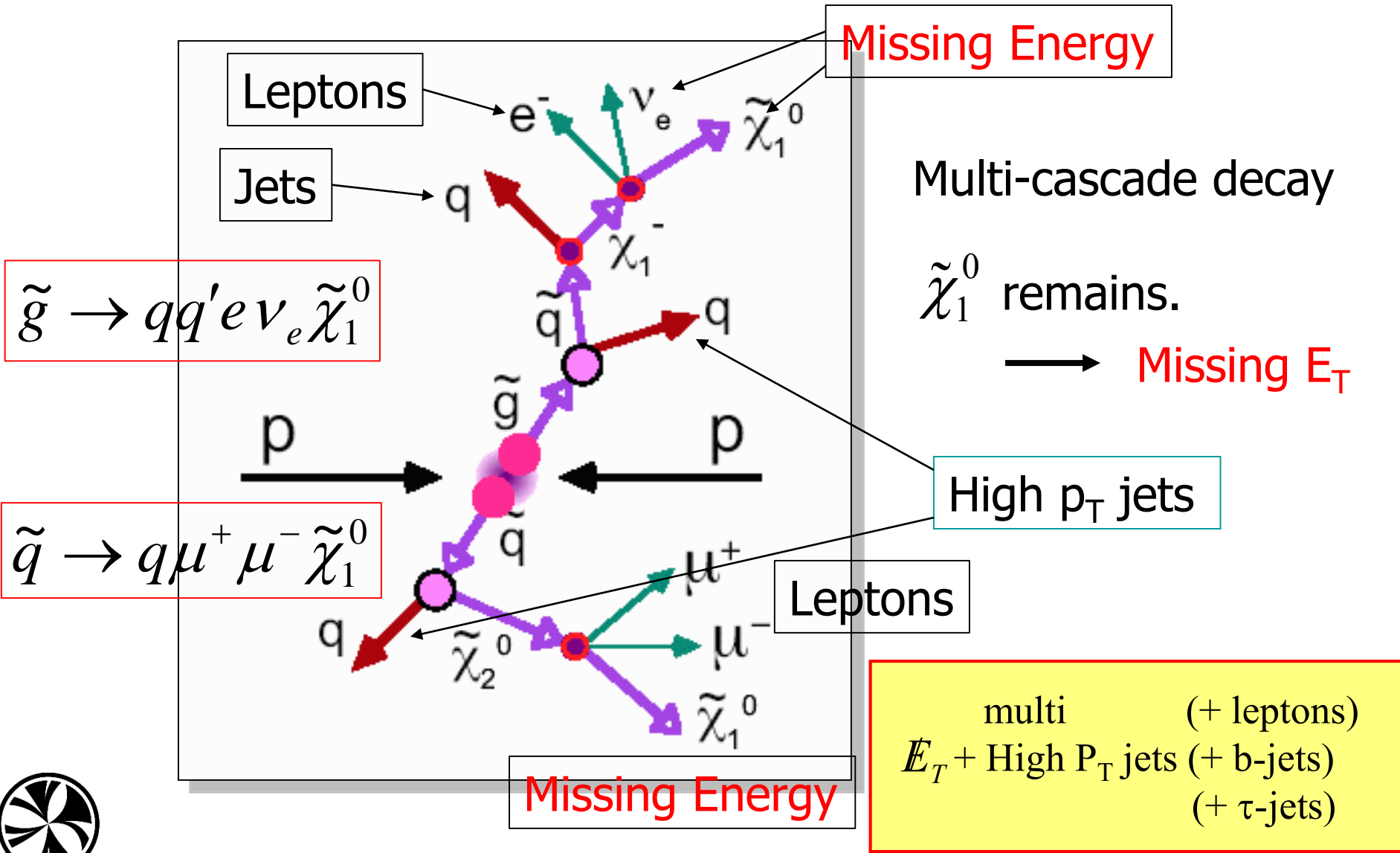


④ RPV

- ここも。(東京グループは全くやっていませんが...)

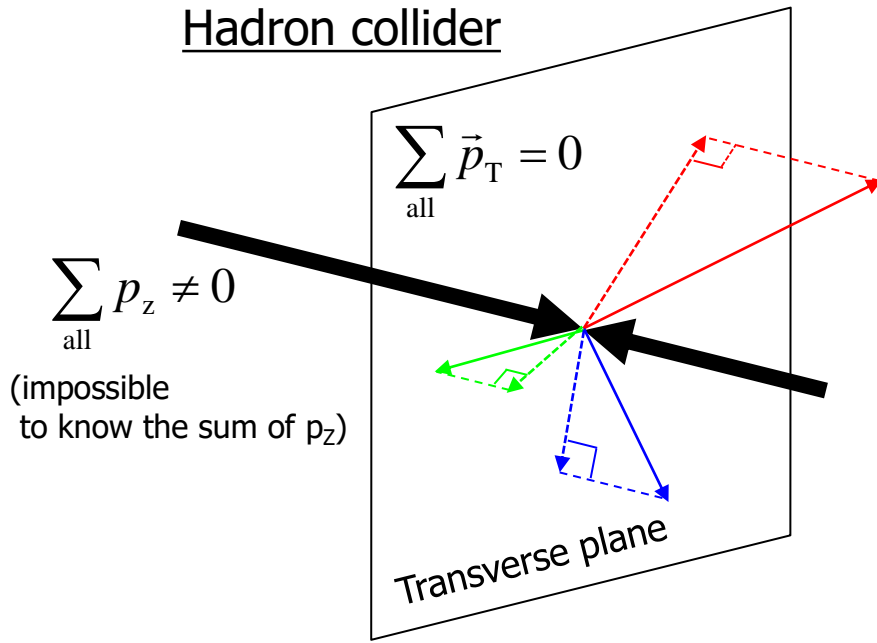


Typical event topology (Strong生成できたなら)



Missing E_T Measurement

Hadron collider



$$\sum_{\text{visible}} \vec{p}_T + \sum_{\text{invisible}} \vec{p}_T = 0$$

$$MET \equiv \sum_{\text{invisible}} \vec{p}_T$$



$$\sum_{\text{invisible}} \vec{p}_T = - \sum_{\text{visible}} \vec{p}_T = MET$$

↑
Neutrinos and LSP

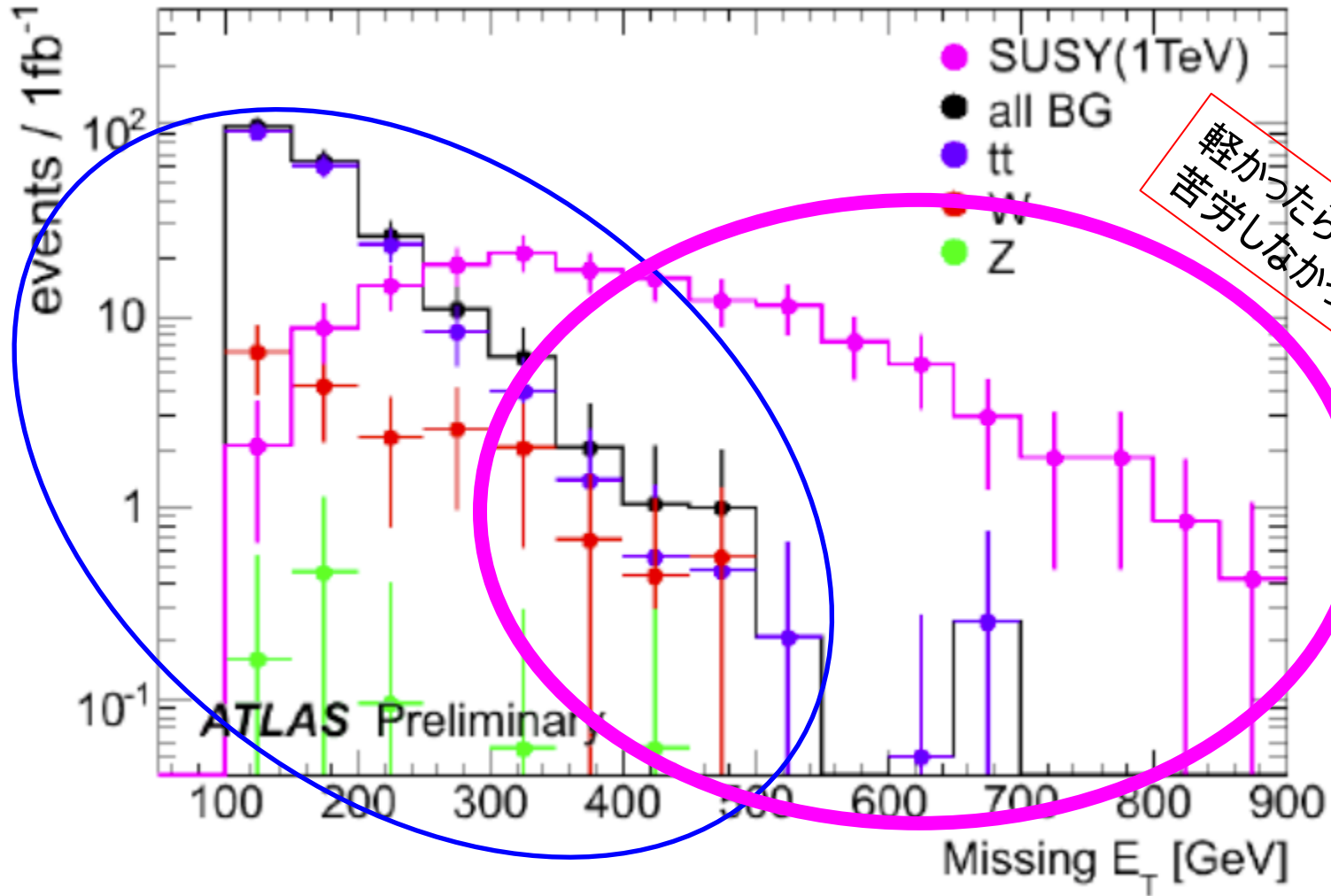
Missing transverse momentum

$$MET$$

 Missing E_T
 \cancel{E}_T

如何に正しい「Visible」オブジェクトを選択するか。
 如何に正しく「Visible」オブジェクトをCalibrationするか。

理想的にはこんな感じの分布が観測できれば「発見」



MET of SUSY signal is larger than the SM background.

パイラアップの話し

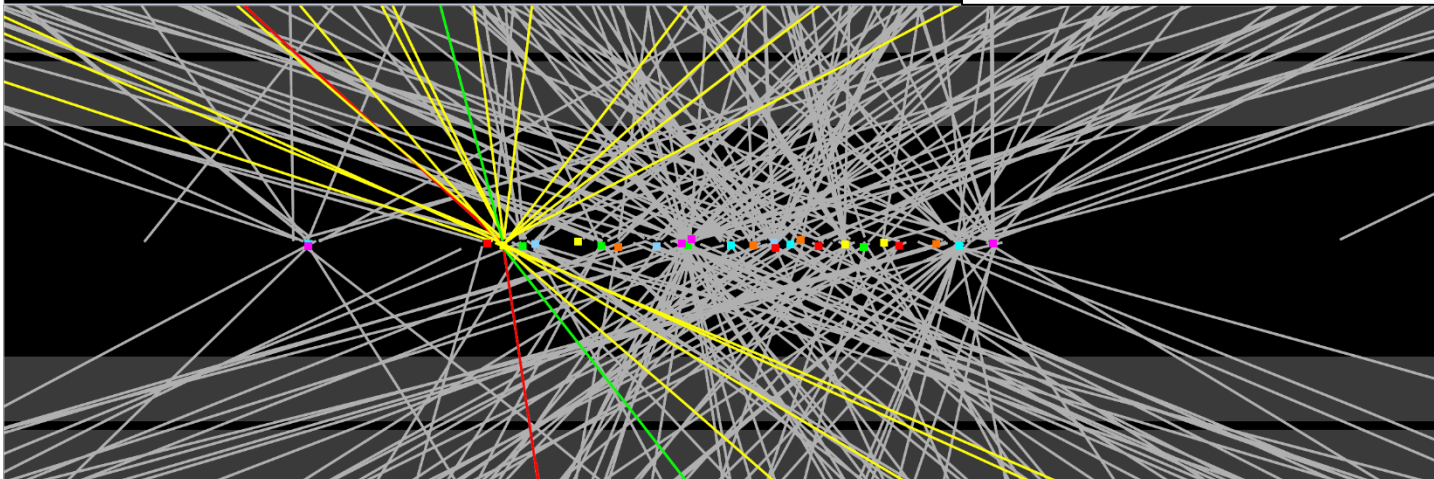
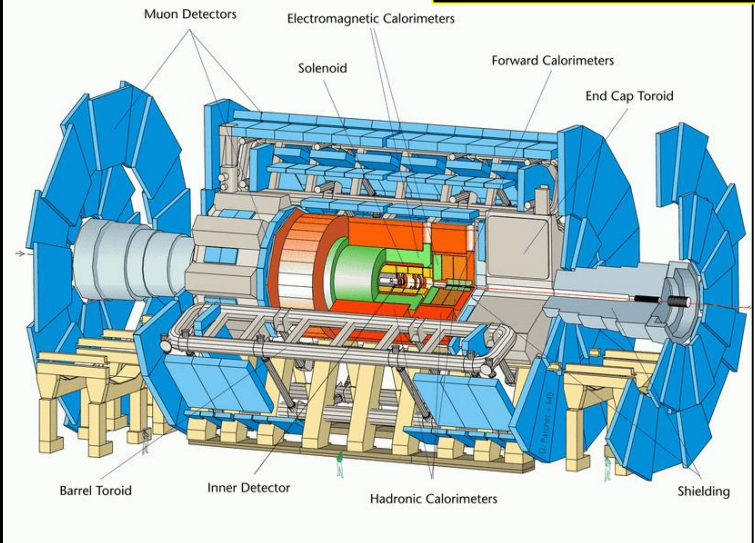
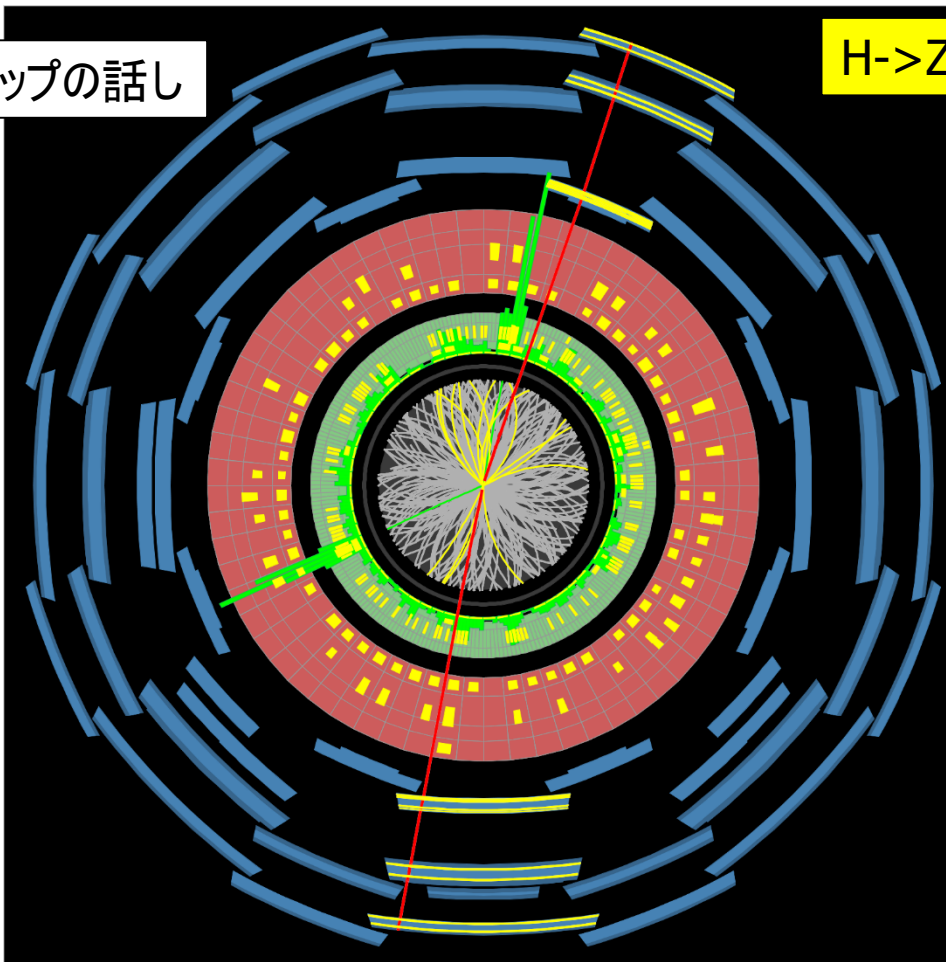
H \rightarrow ZZ \rightarrow 2e2 μ candidate



Run Number: 304431, Event Number: 2206548301

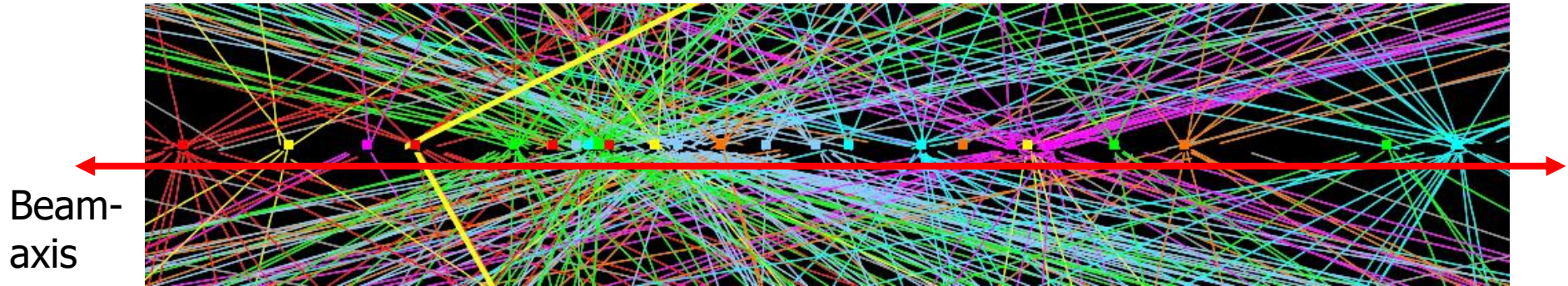
Date: 2016-07-25 05:01:07 UTC

アトラス検出器



Pileup

Z- $\mu\mu$ candidate with 25 proton-proton collisions (ATLAS)



"a few mm" between vertices
($\pm 10\text{cm}$ in z , $\sim 15\mu\text{m}$ for x,y)

1 bunch has $\sim 10^{11}$ protons.

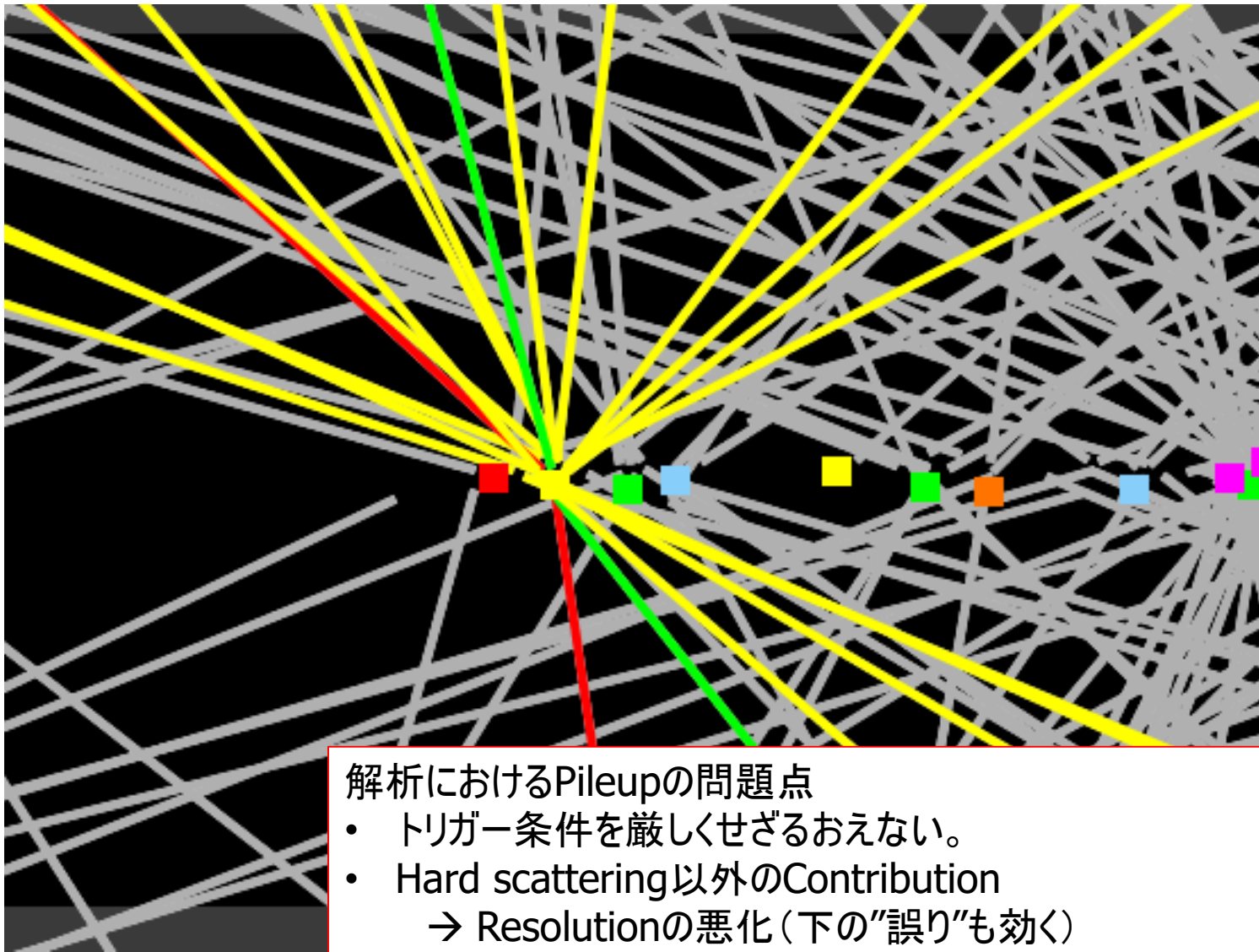
Number of pileup (パイルアップ数)

$$80\text{mb} \times 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} / 40\text{MHz} = \sim 40 \text{ collisions/bunch crossing}$$

Inelastic scattering
cross section
(非弾性衝突の生成断面積)

Instantaneous
Luminosity
(瞬間ルミノシティ)

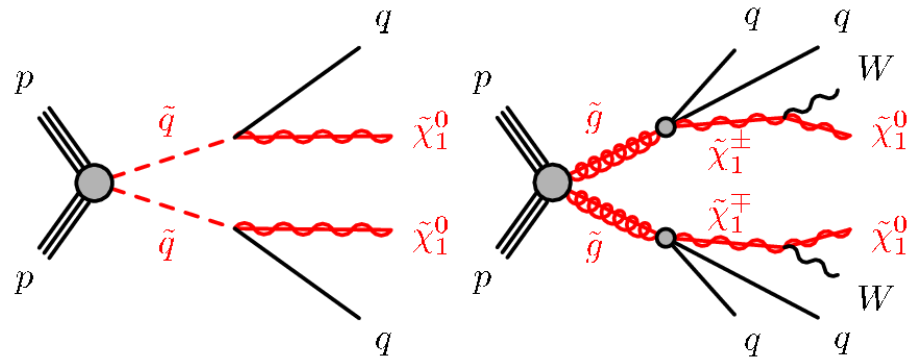
Rate of bunch crossing
(LHCの1秒間でのバンチ衝突回数)



解析におけるPileupの問題点

- トリガー条件を厳しくせざるおえない。
- Hard scattering以外のContribution
 - Resolutionの悪化(下の“誤り”も効く)
 - 本来考えなくていいJet、Tracksなどを解析に使ってしまう。
- Hard scattering自体
 - 使うべきものを誤ってRejectしてしまう。
 - (アルゴリズムを導入することは、成功率と失敗率のバランス)

グルイーノとスクォーク生成の探索



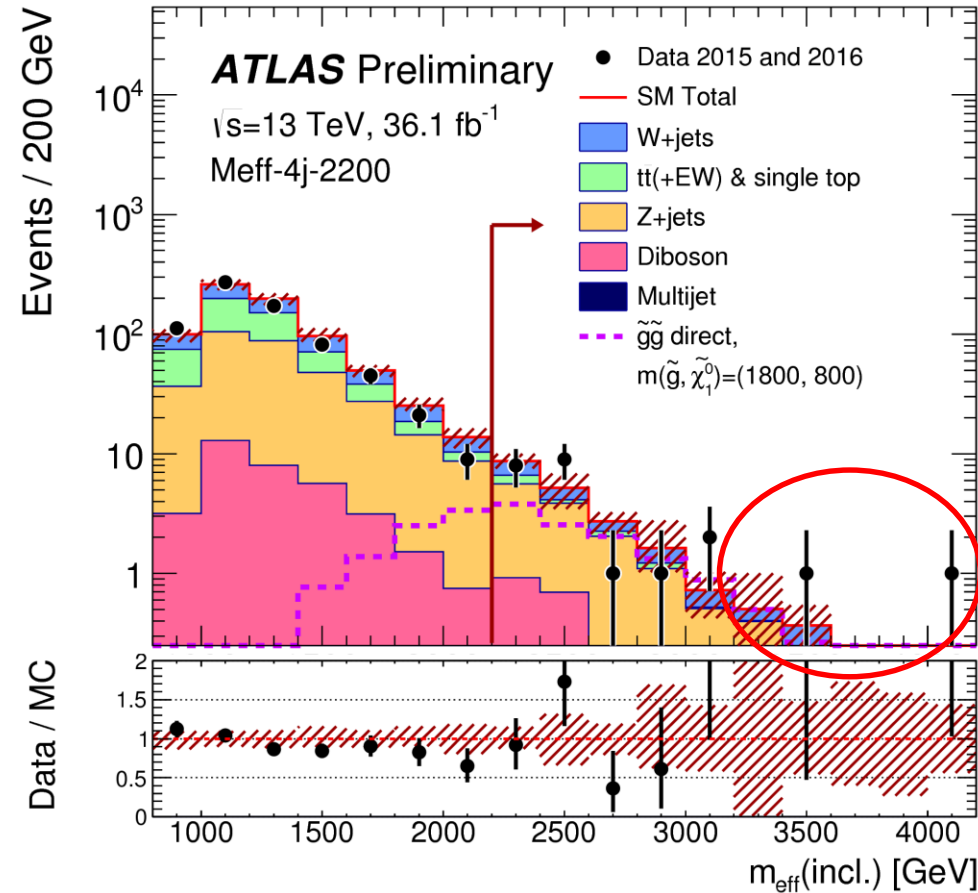
2つの解析方法

① Cut & Count

- 2~6ジェット ($p_T > 250, \dots 50\text{GeV}$)
- Large Missing ET ($> 250\text{GeV}$)
- No lepton ($p_T > 7\text{GeV}$)
- Variable: $m_{\text{eff}} = \sum \text{jet } p_T + \text{MET}$

② Recursive Jigsaw Reconstruction

- ≥ 1 jet ($p_T > 50\text{GeV}$)
- No lepton ($p_T > 7\text{GeV}$)



Obs=23, Fitted BG= 15.4
 (BG before fit=20.3)
 $p_0=0.07, Z=1.45$

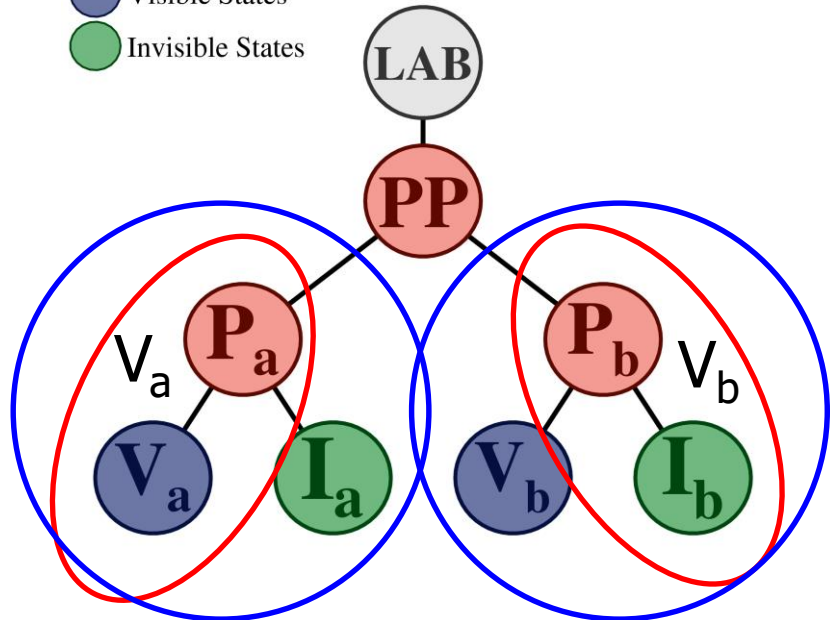
Recursive Jigsaw Reconstruction

- ① ジェットを分ける。
- ② METを分ける。

V ... n jets in an event
 4vec: $p_1, p_2, \dots, p_{n-1}, p_n$

① Separate them into 2 groups: V_a and V_b maximizing $|\vec{p}_{V_a}| + |\vec{p}_{V_b}|$.

- Lab State
- Decay States
- Visible States
- Invisible States



1. The direction of $\vec{p}^{Vrest}_{V_a} (= -\vec{p}^{Vrest}_{V_b})$ corresponds to the thrust axis of the jets (V) in the V rest frame.

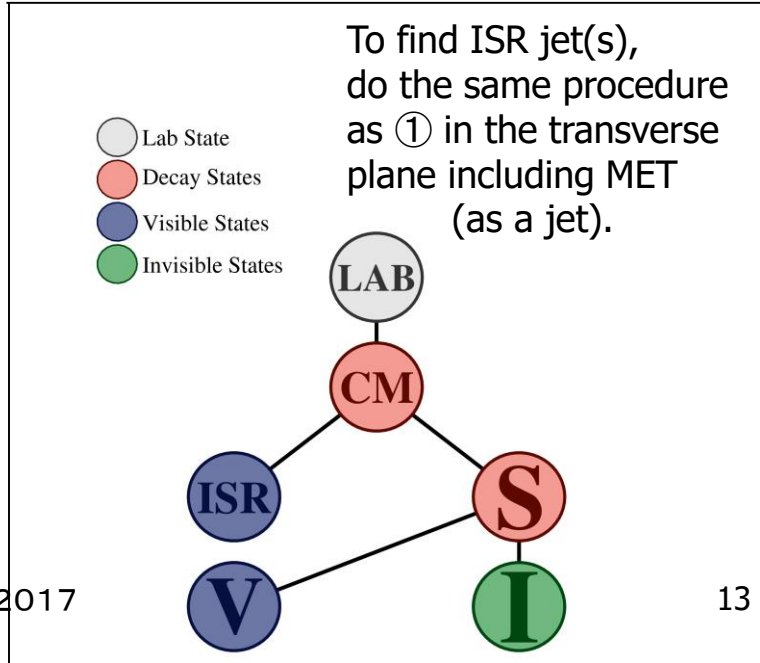
2. similar to the operation of minimizing

$$\sum_{i=a,b} M_{V_i} (= \sqrt{p_{V_i}^2})$$

(not identical AFAIK)

② minimize $\sum_{i=a,b} M_{V_i} (= \sqrt{p_{V_i}^2})$

including the missing transverse energy and its longitudinal component.





Simplified model

Mass limit

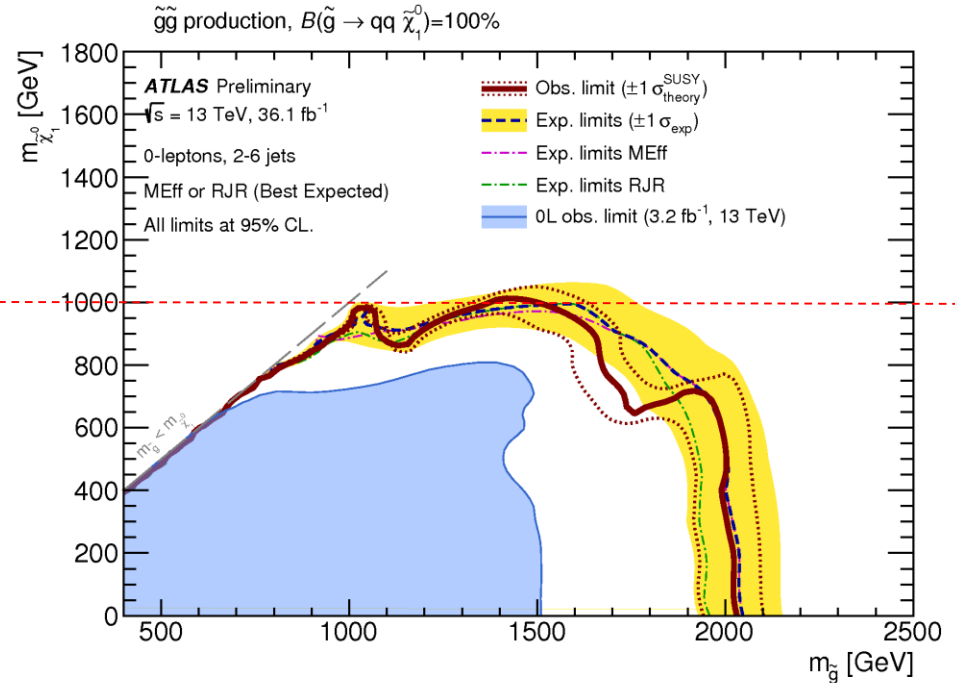
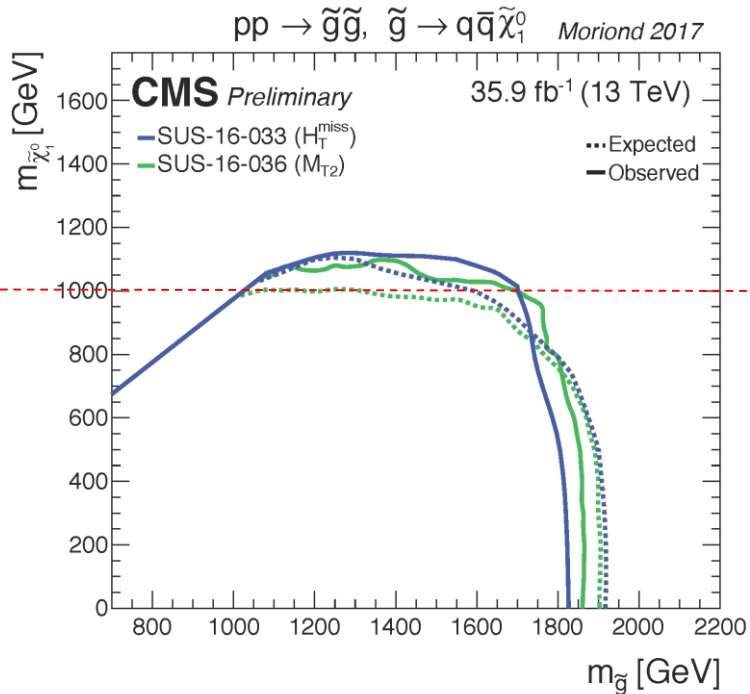
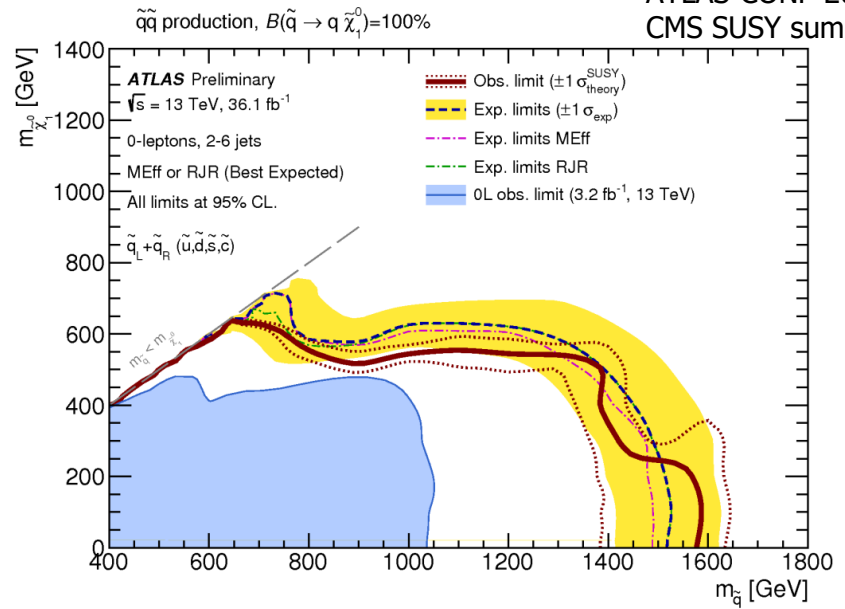
ATLAS

- Squark $\sim 1.6\text{TeV}$
- Gluino $\sim 2\text{TeV}$

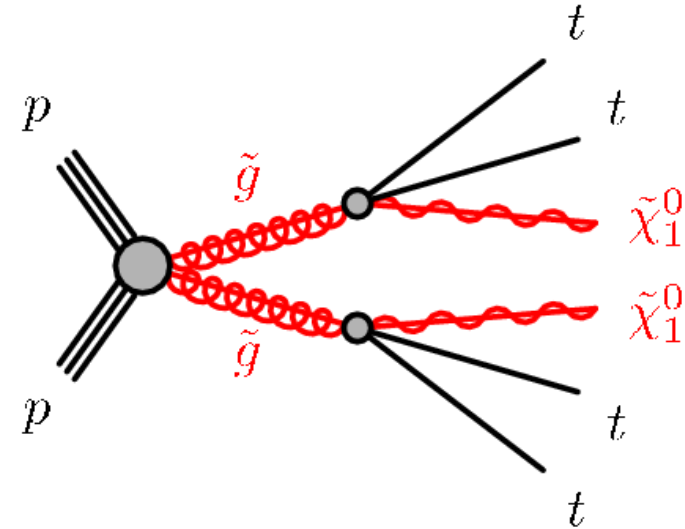
CMS

- Squark $\sim 1.6\text{TeV}$
- Gluino $\sim 1.85\text{TeV}$

もう2TeVか...



$\tilde{g}\tilde{g}$ 生成でTopが多い場合

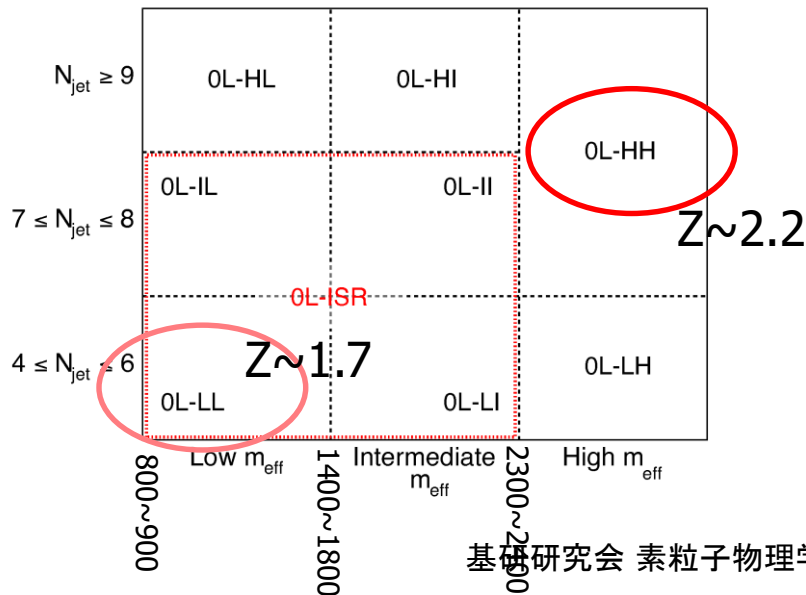


$N_{jet} > 4jets$
 うち、b-jetが3本以上
 Large Missing ET ($>200GeV$)

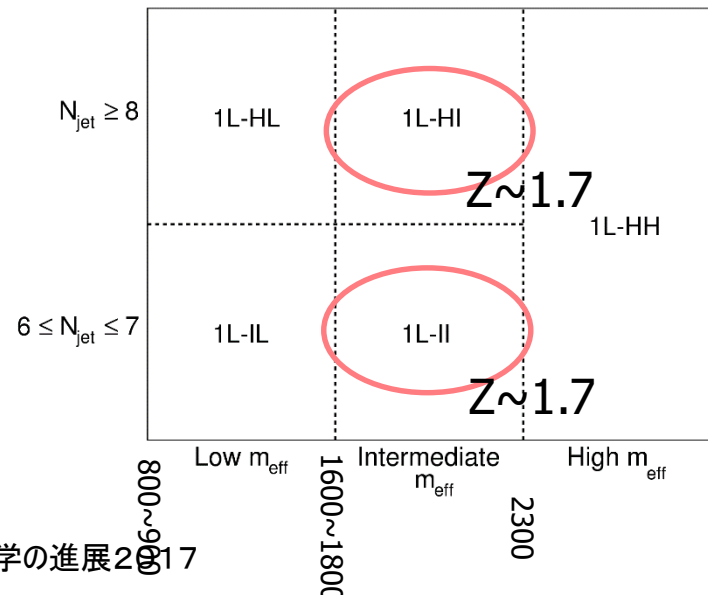
分類方法

- Low $m_{eff} \sim$ low Δm
- High $m_{eff} \sim$ high $\Delta m \rightarrow$ boosted top

0lepton



≥ 1 lepton

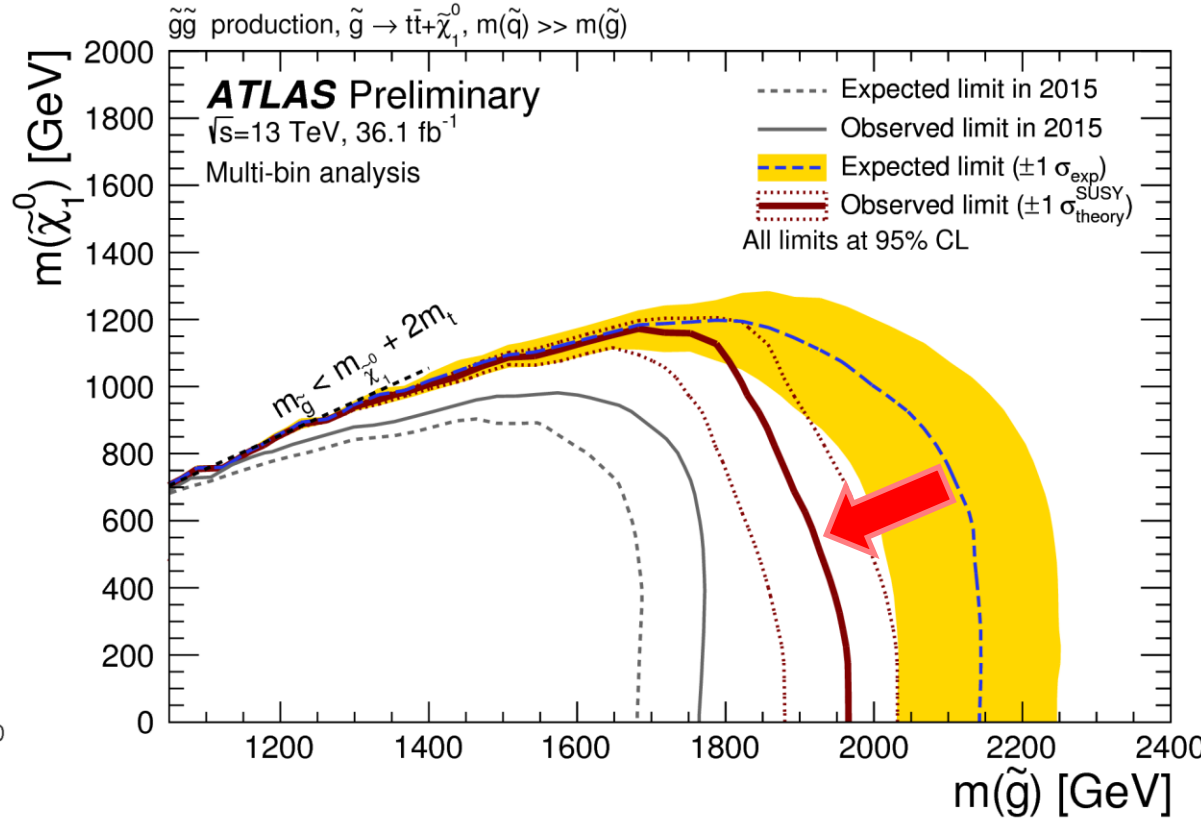
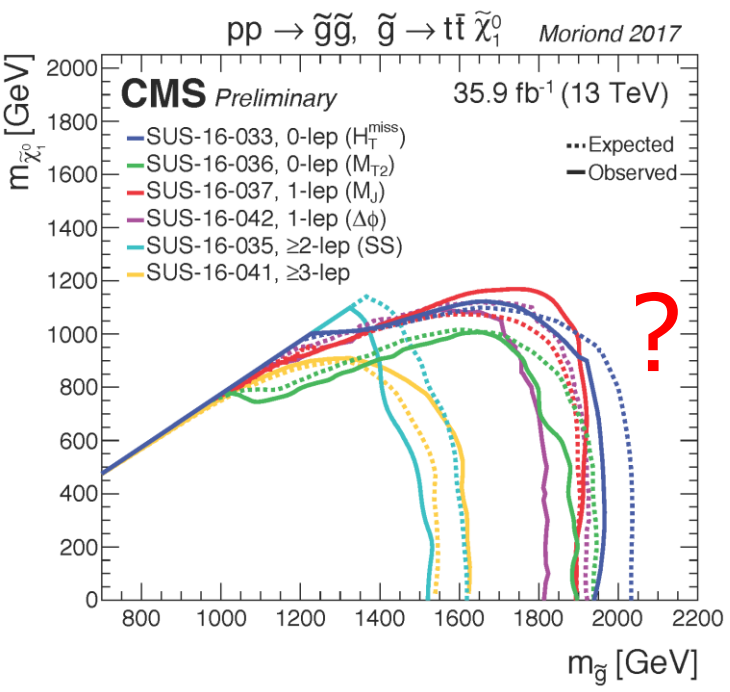
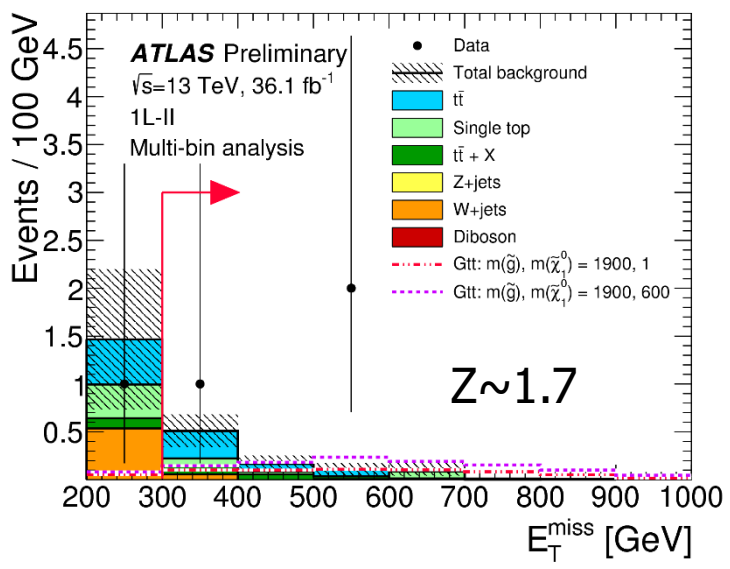




Multi-topの結果

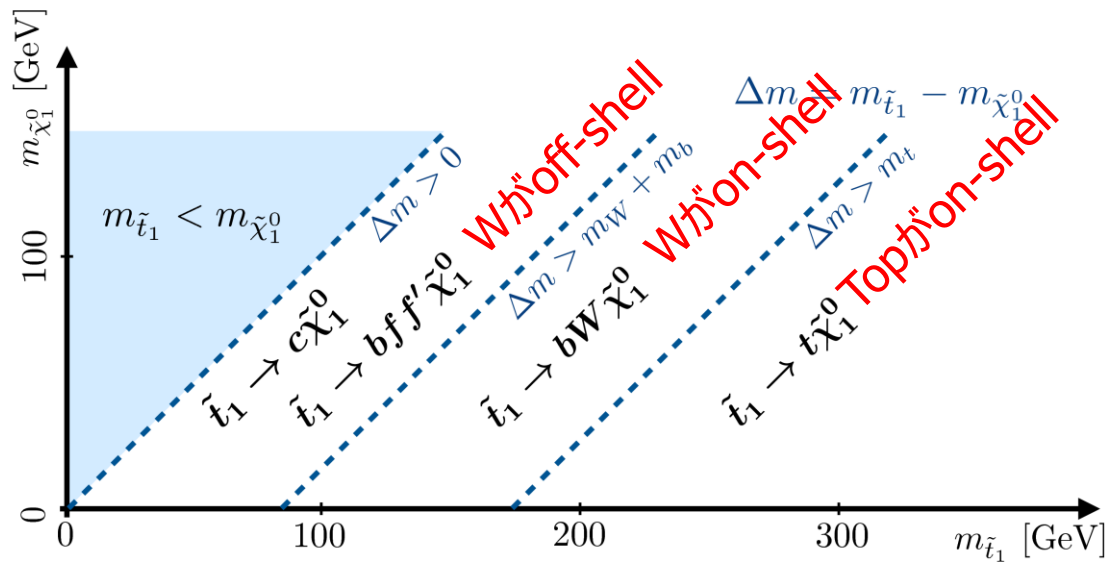
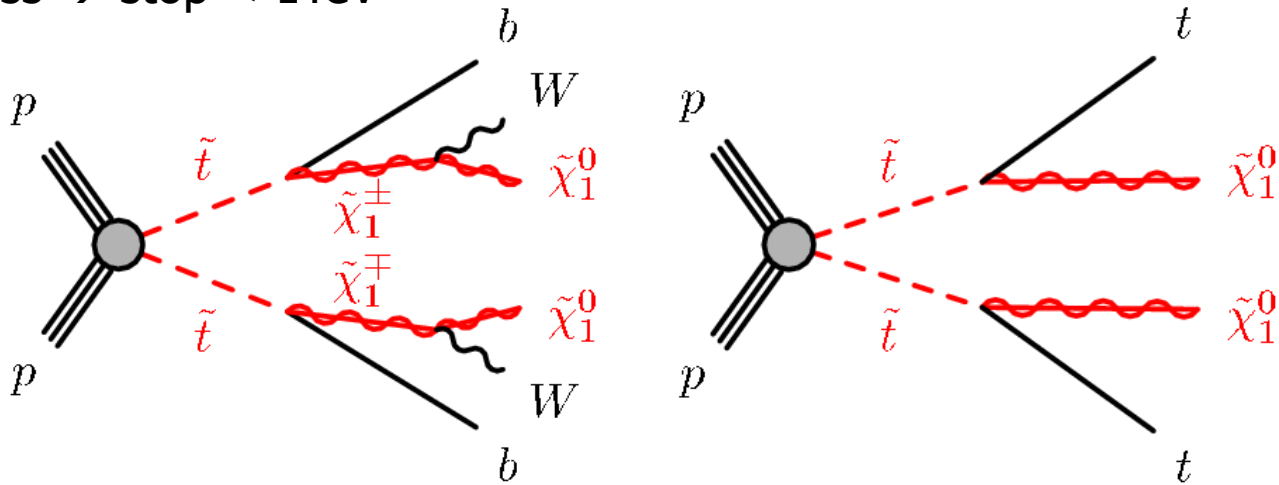
CMSもバイアスした目でみると気持ちあるけど...

($g \rightarrow qq\chi$ で発見後のモデル検証)

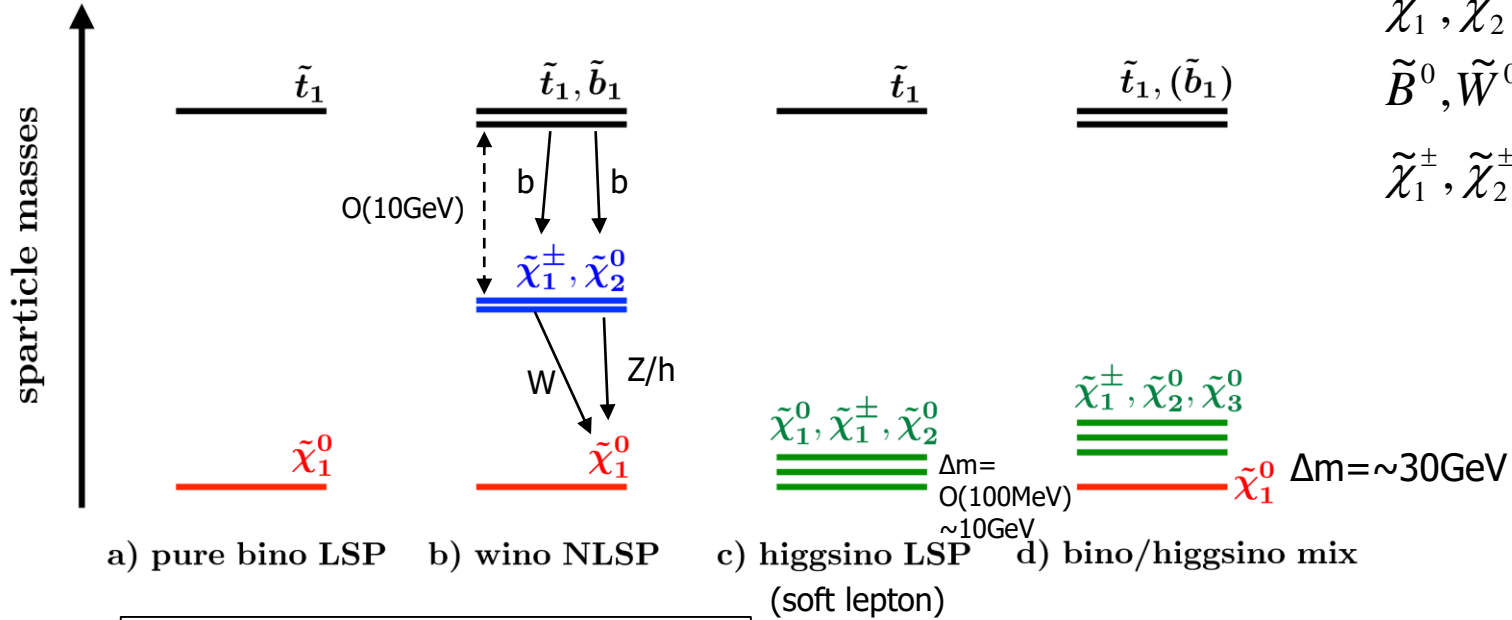


Scalar top生成

Naturalness \rightarrow stop < 1TeV



Scalar top解析



$$\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0 = \tilde{B}^0, \tilde{W}^0, \tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0$$

$$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^\pm = \tilde{W}^\pm, \tilde{H}^\pm$$

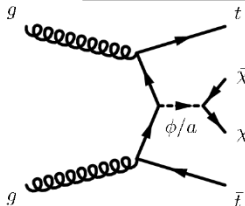
Pure bino LSPだけでなく、

- Wino NLSP
- Higgsino LSP
- Bino/Higgsino mixed LSP
- DM

も検証できる探索

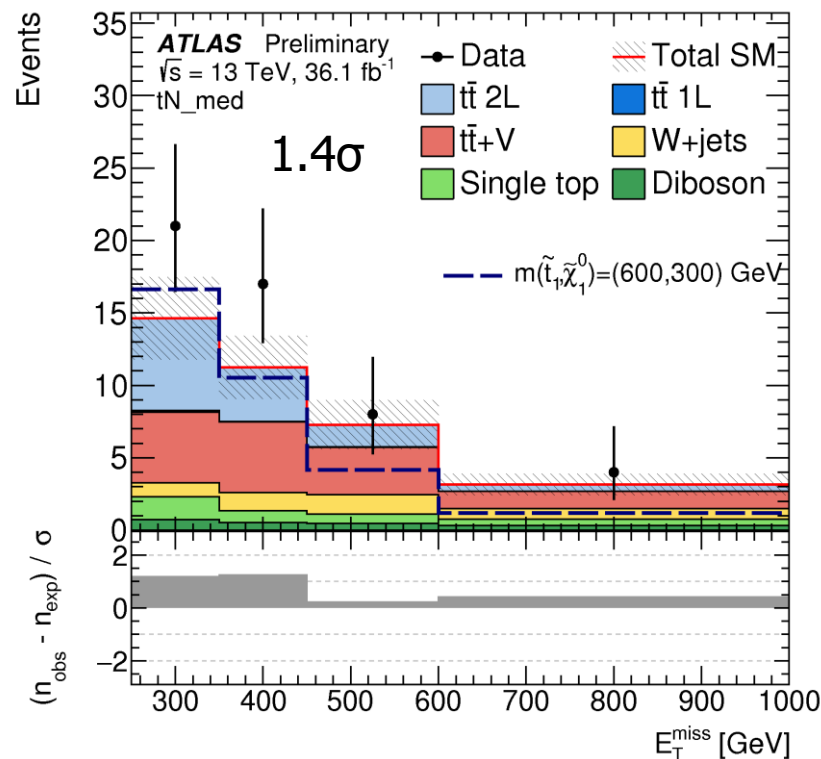
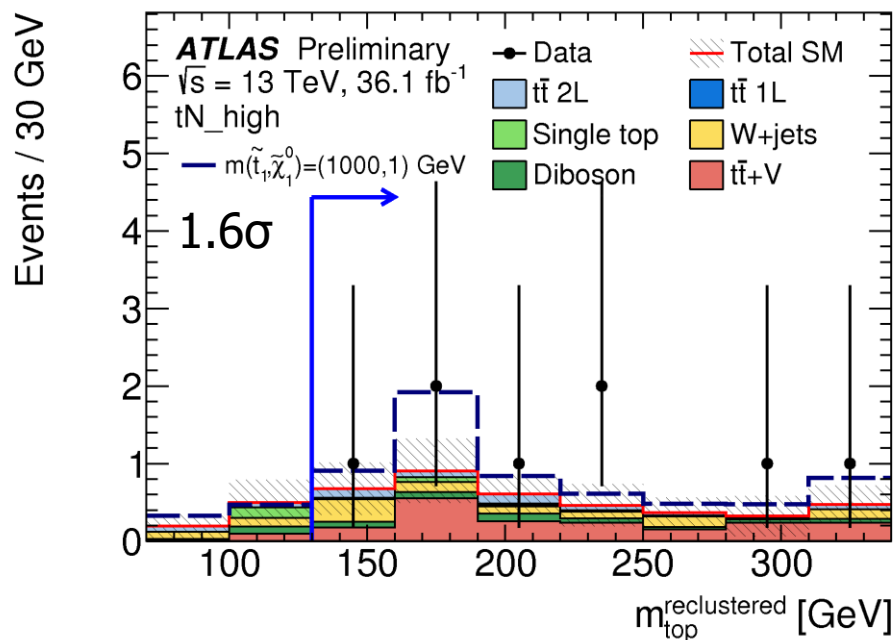
1 lepton解析では、
16個の信号領域を定義して評価。

Soft lepton : 4GeV for muon,
5GeV for electron



Stop結果(1lep)

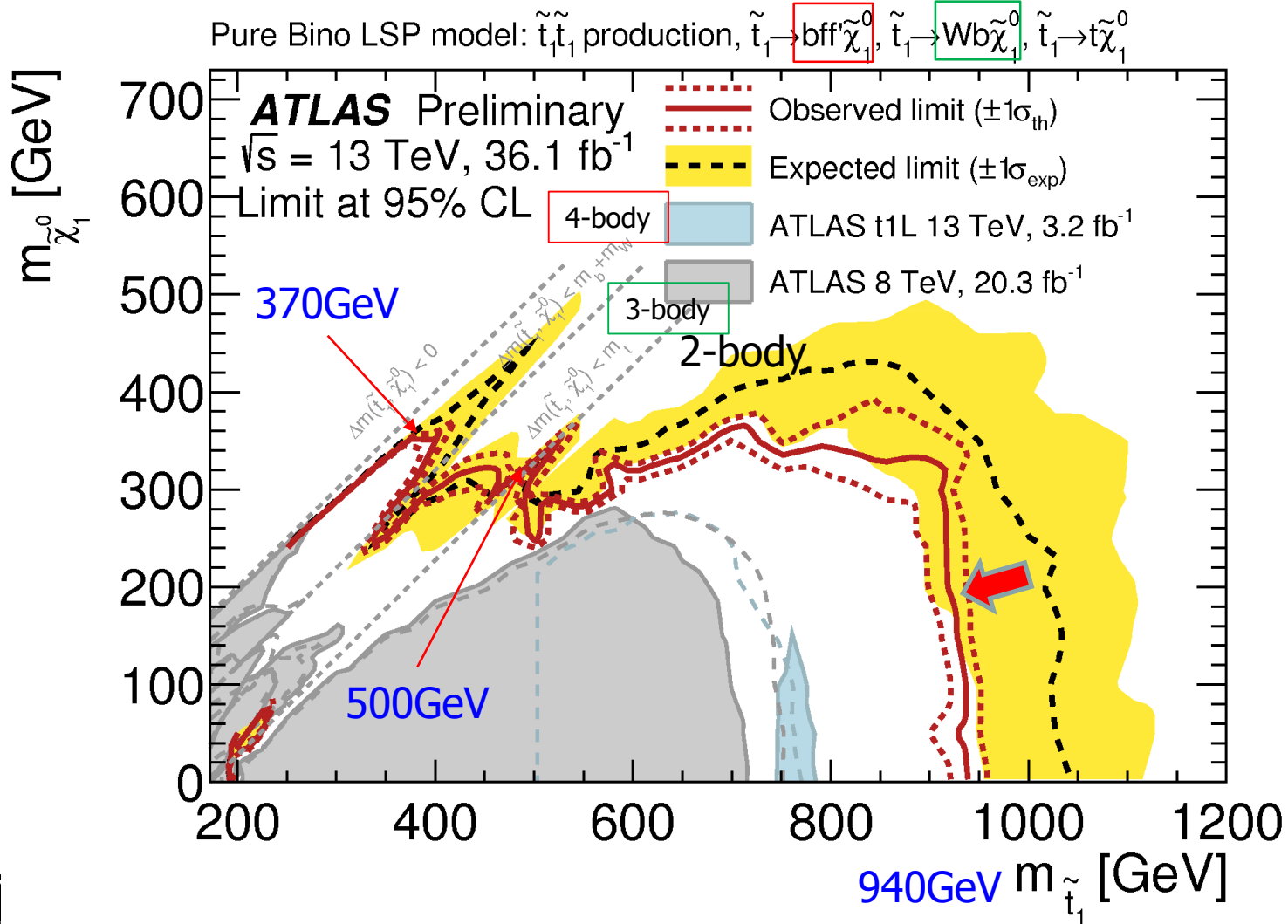
現データでは「stop \rightarrow top χ_0 を狙った信号領域で約 1.5σ 」が最大



前回 3.3σ あった信号領域(DMサーチ領域)は
 今回 1.5σ となり、成長しなかった...



Stop探索: Bino LSP



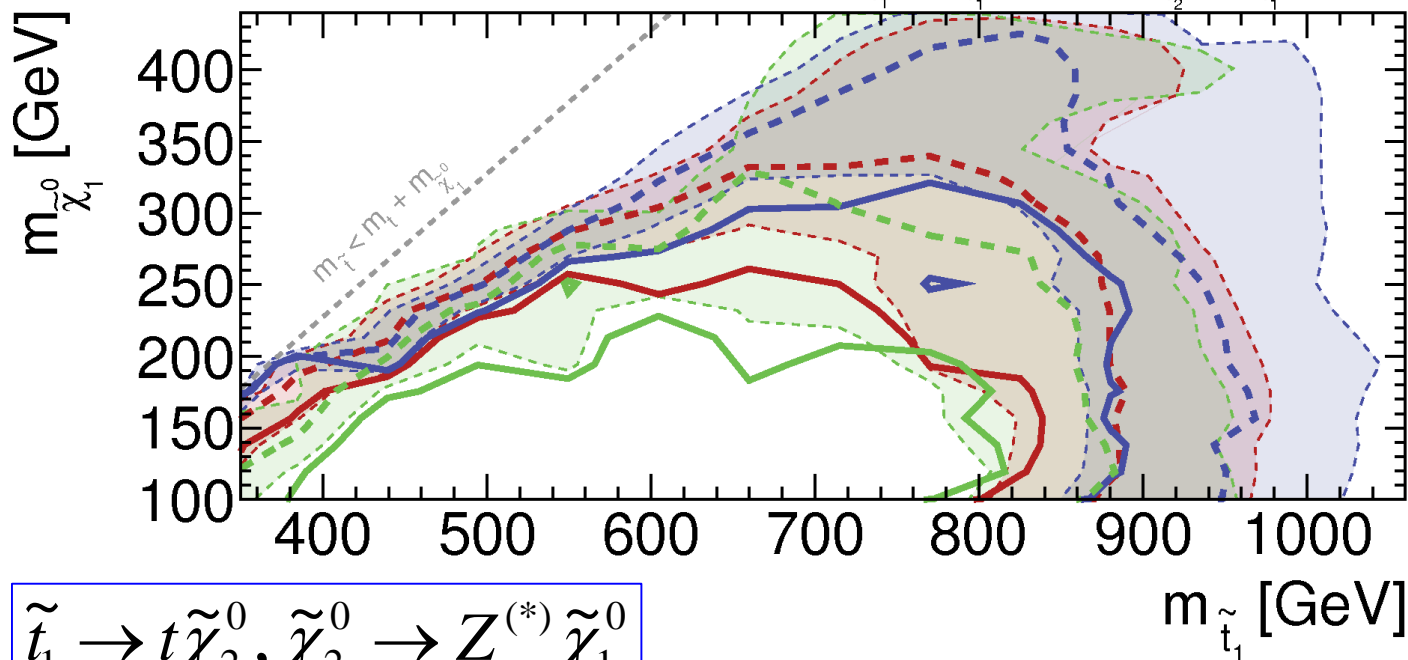
Stop探索: Higgsino LSP

ATLAS Preliminary
 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}, 36.1 \text{ fb}^{-1}$
 Limit at 95% CL

- Observed limit
- - - Expected limit ($\pm 1\sigma_{\text{exp}}$)
- $\tilde{t}_1 \approx \tilde{t}_L$ — $\tilde{t}_1 \approx \tilde{t}_L$ (large $\tan\beta$) — $\tilde{t}_1 \approx \tilde{t}_R$

$\tilde{t}_1 \rightarrow b \tilde{\chi}_1^\pm, t \tilde{\chi}_{1,2}^0$
 $\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow W \tilde{\chi}_1^0 \quad \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow h \tilde{\chi}_1^0, Z \tilde{\chi}_1^0$
 $\text{BR}(t\tilde{\chi}_2^0, b\tilde{\chi}_1^\pm, t\tilde{\chi}_1^0) \approx$
 $\tilde{t}_L, \text{ small } \tan\beta: (45, 10, 45)\%$
 $\tilde{t}_L, \text{ large } \tan\beta: (33, 33, 33)\%$
 $\tilde{t}_R: (25, 50, 25)\%$

Higgsino LSP model: \tilde{t}_1, \tilde{t}_1 production, $m_{\tilde{\chi}_1^\pm} = m_{\tilde{\chi}_1^0} + 5 \text{ GeV}$, $m_{\tilde{\chi}_2^0} = m_{\tilde{\chi}_1^0} + 10 \text{ GeV}$

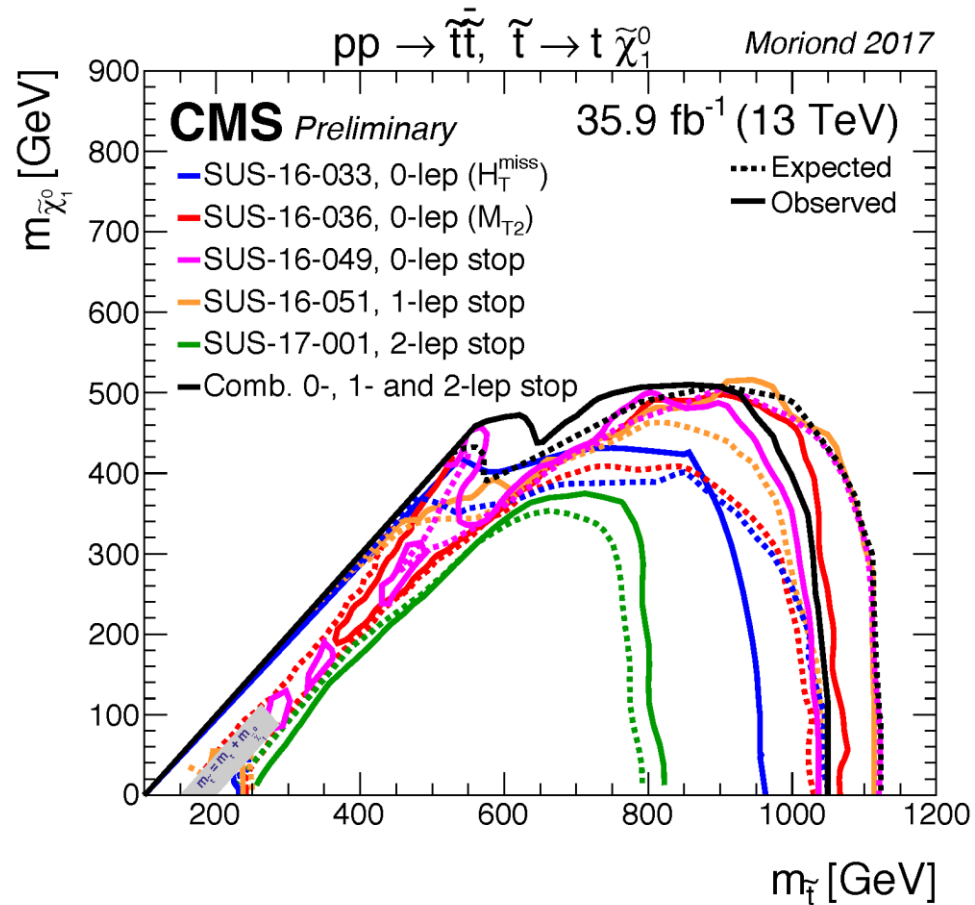
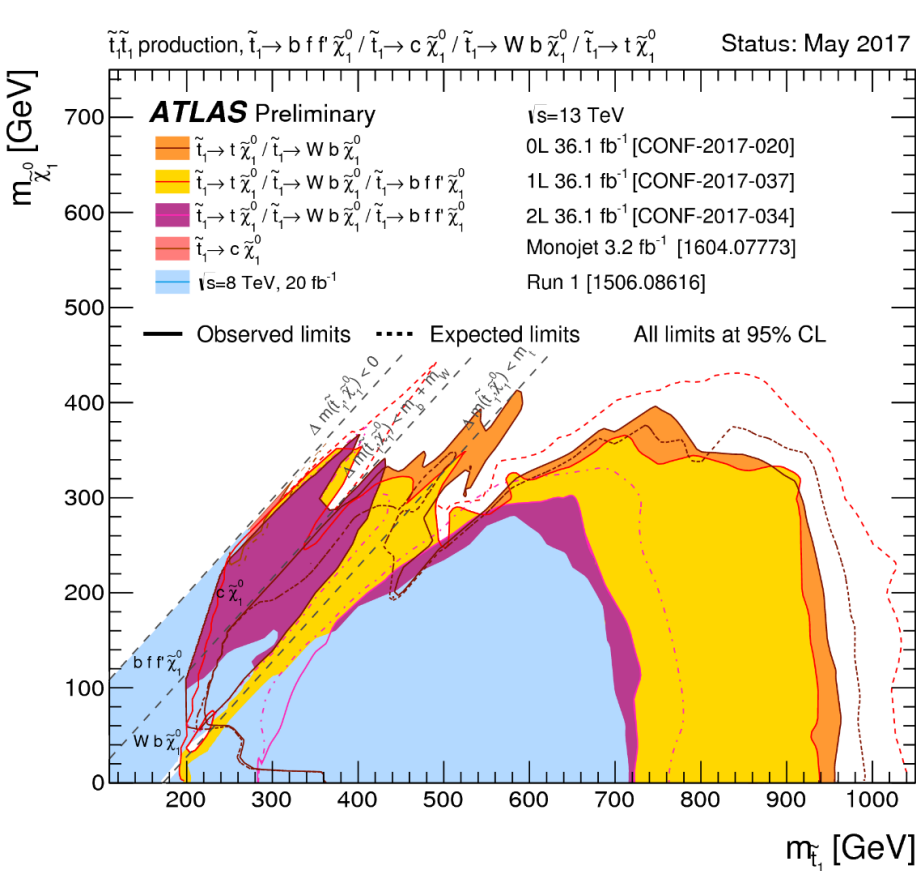


$$\tilde{t}_1 \rightarrow t \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow Z^{(*)} \tilde{\chi}_1^0$$

$$\tilde{t}_1 \rightarrow b \tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow W^{(*)} \tilde{\chi}_1^0$$

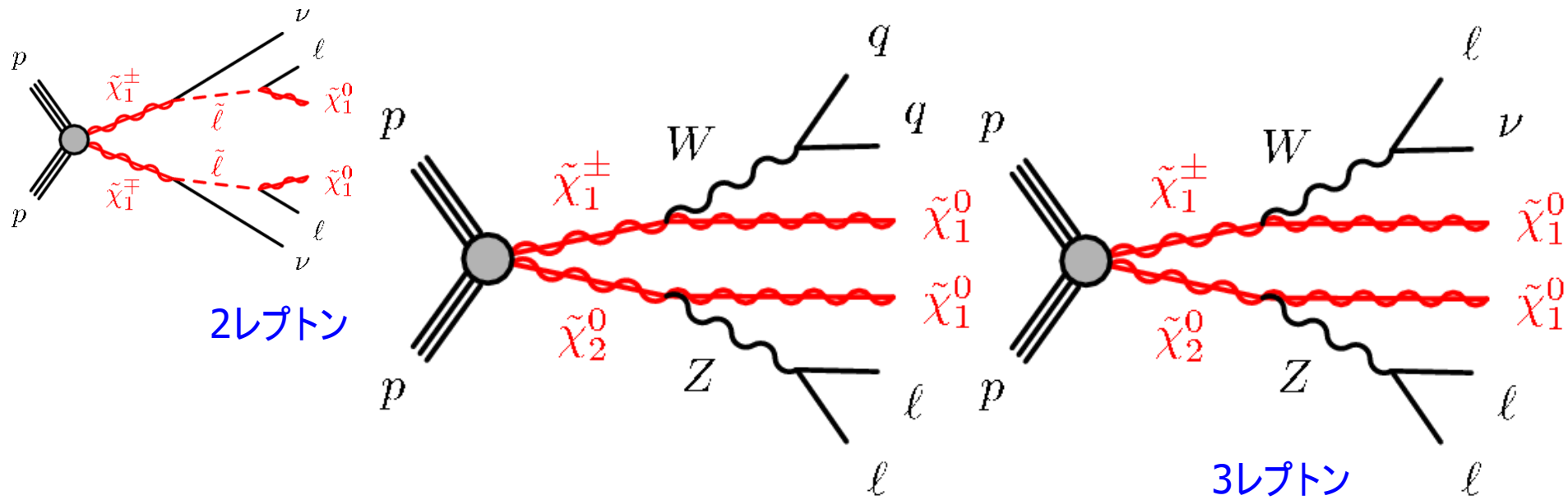
$Z^*/W^* \rightarrow \text{Soft } p_T \text{ lepton}$

Stop探索: ATLAS vs CMS



1TeVに軽い超過(1-2 σ)

Electroweak SUSY



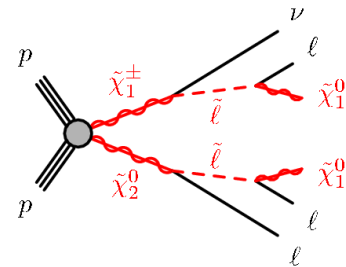
網羅的な探索(ATLAS-CONF-2017-039)
ただし、肝心の W^*/Z^* 弱い \rightarrow 現在進行中

$p_T > 25/20 \text{ GeV}$ の lepton (electron or muon)

1) 2lep+0jets, 2) 2lep+jets, 3) 3lep

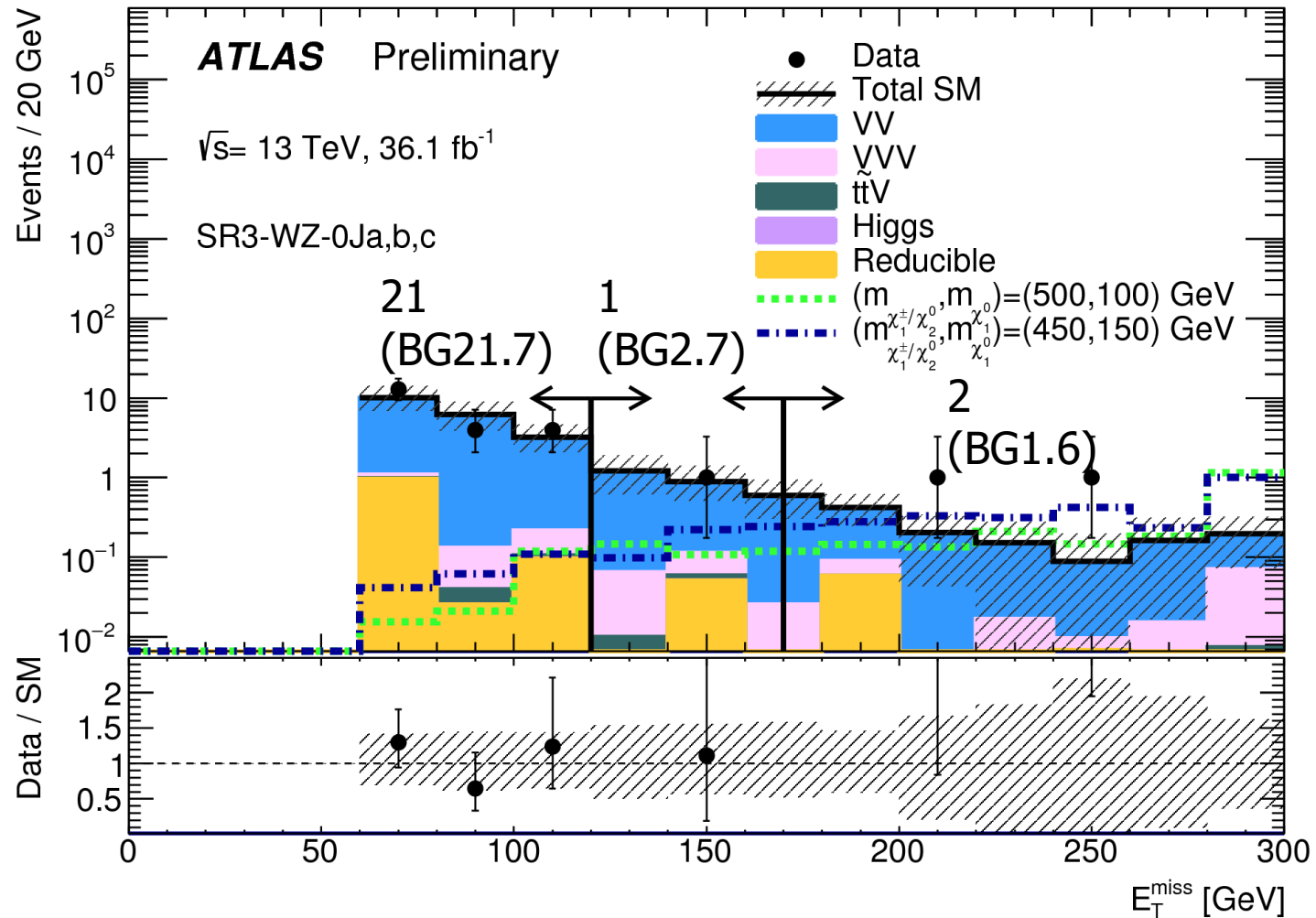
Zボソンを期待する場合は $m_{\parallel} \sim m_Z$

(slepton狙いのときは、low and high m_{\parallel} も)

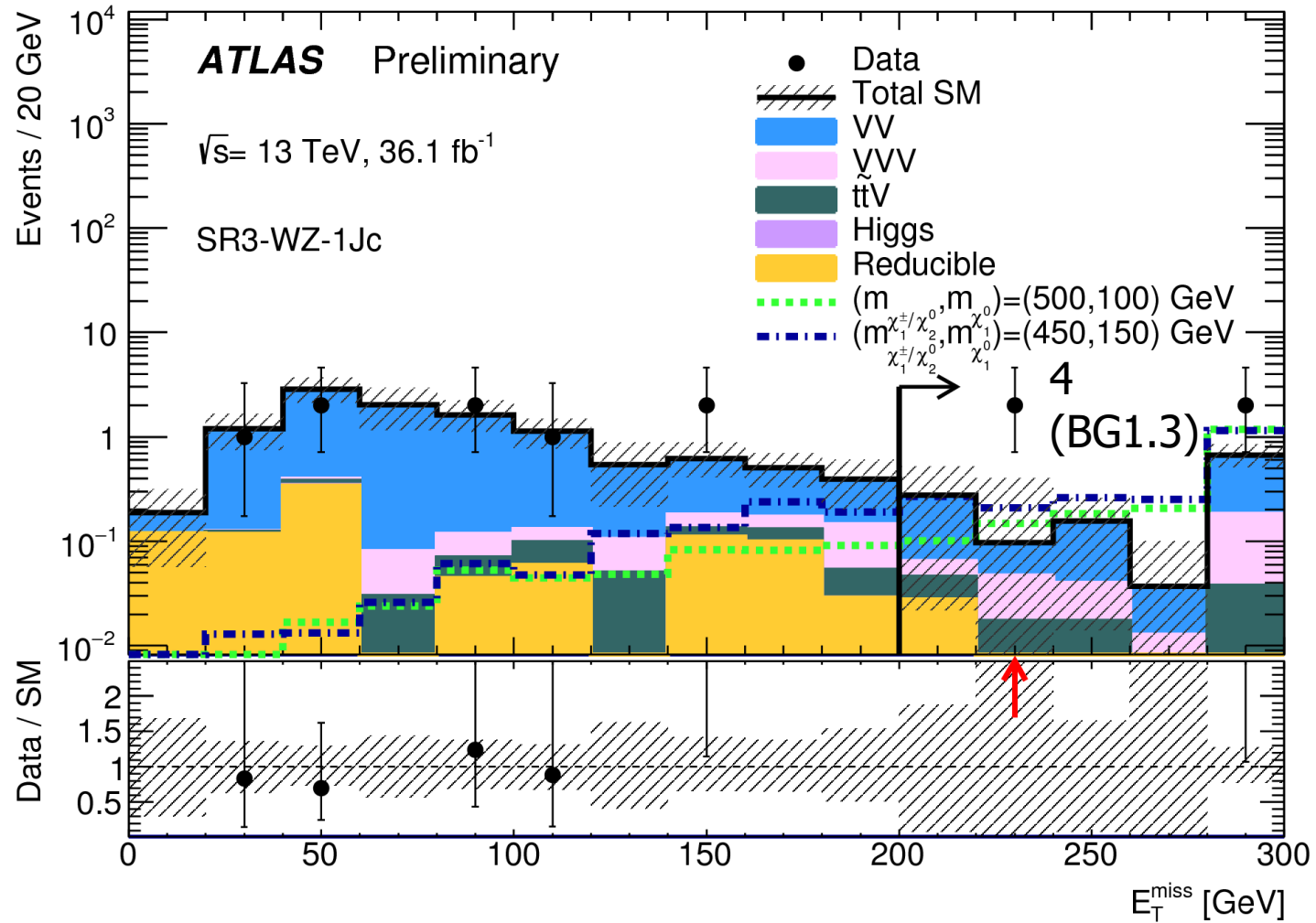


3lep+0jets解析

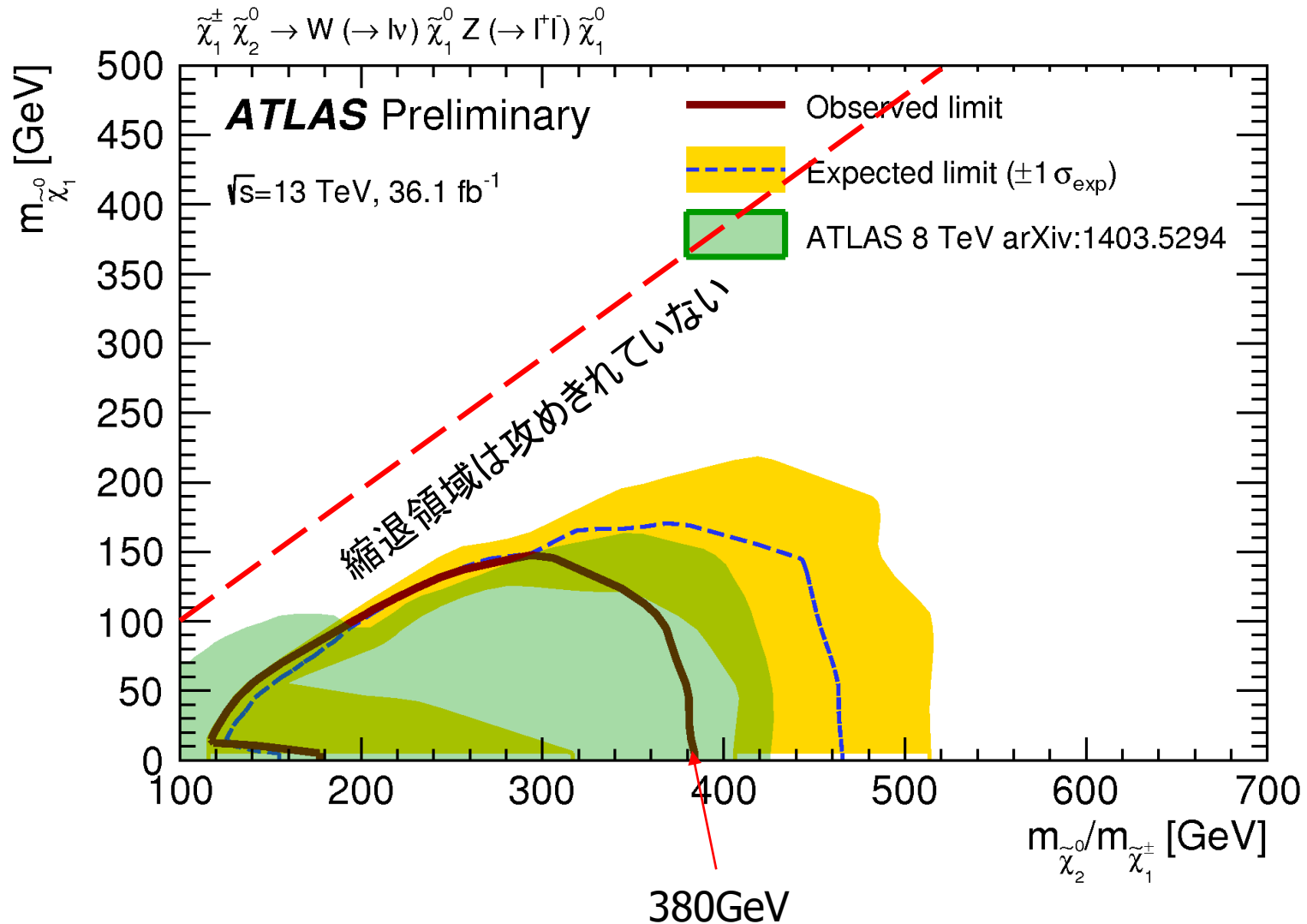
$81.2 < m_{\parallel} < 101.2$, $\text{MET} > 60 \text{ GeV}$, $n_{\text{jet}} = 0$, $m_{\text{T}}^{\text{min}} > 110 \text{ GeV}$



3lep+ ≥ 1 jets解析

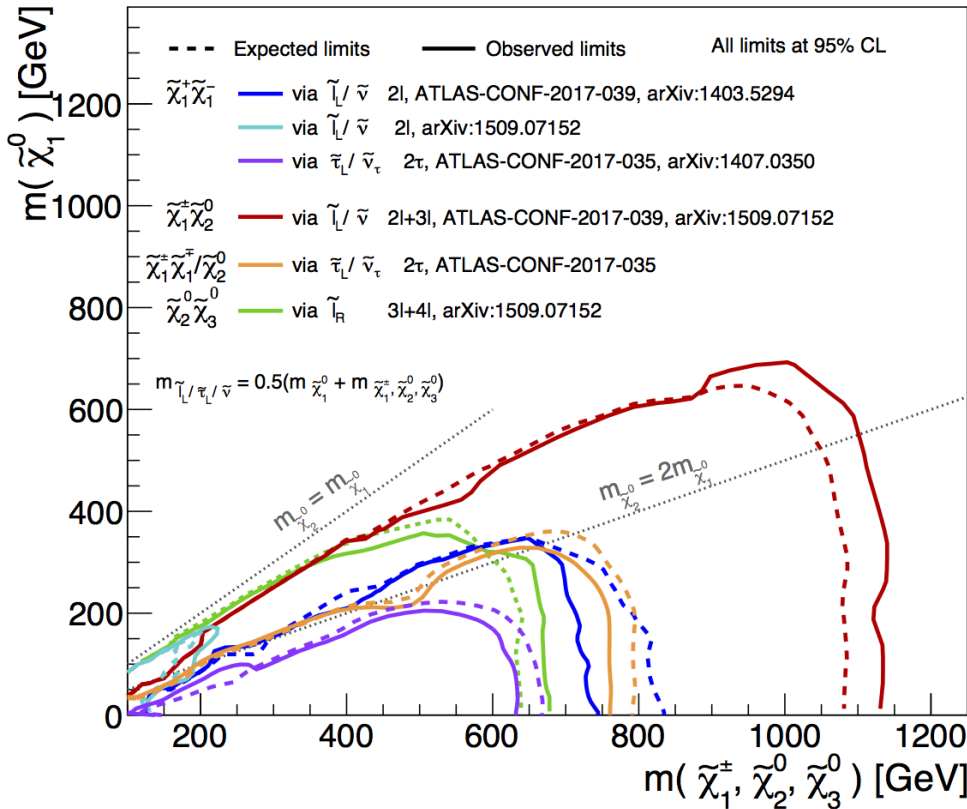


Mass Limit (3lep via W/Z)

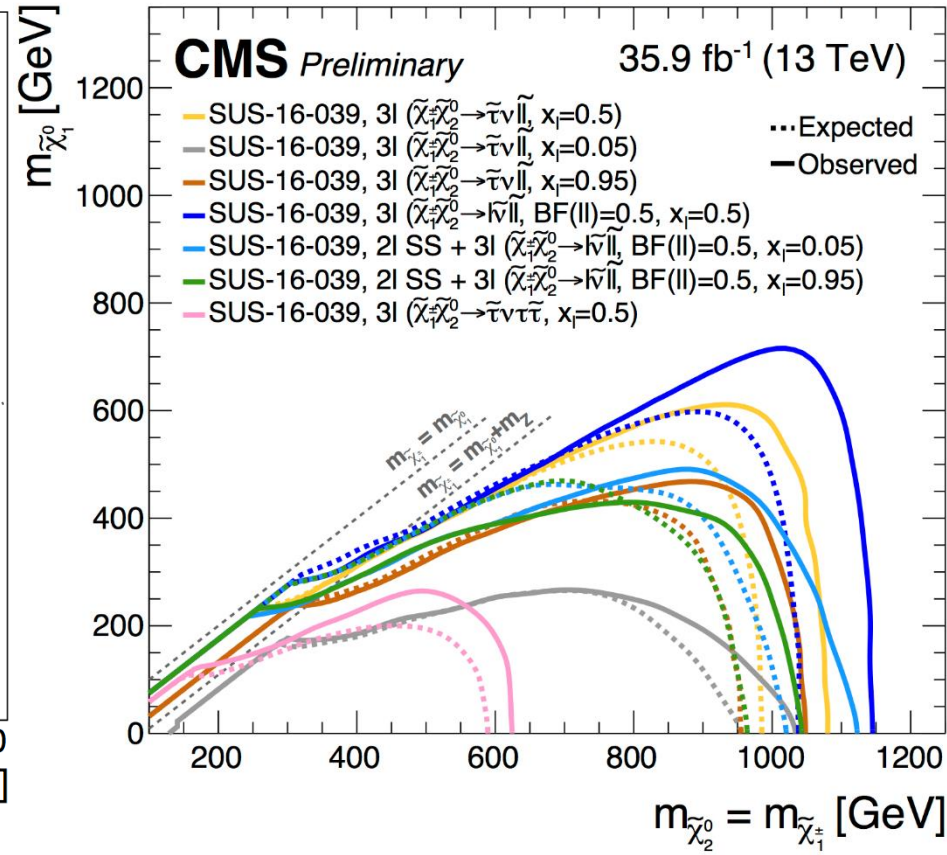


EW "lep via slep": ATLAS vs CMS

May 2017 **ATLAS Preliminary** $\sqrt{s}=8,13$ TeV, 20.3-36.1 fb⁻¹



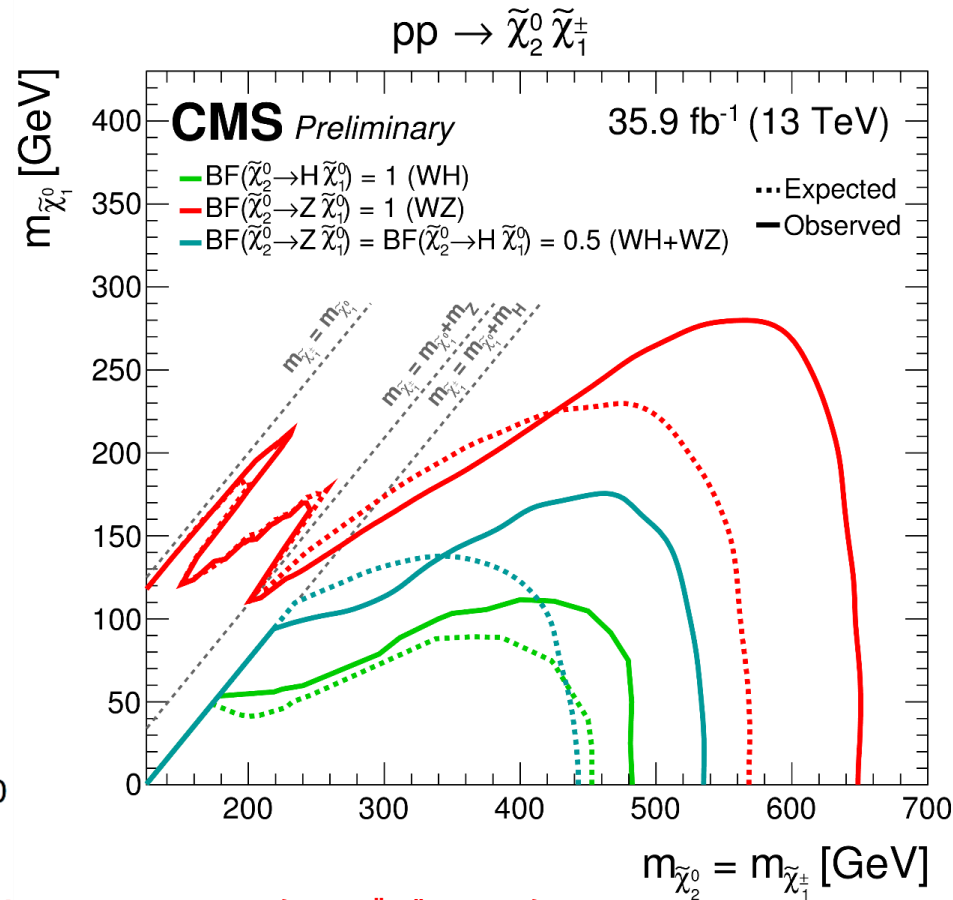
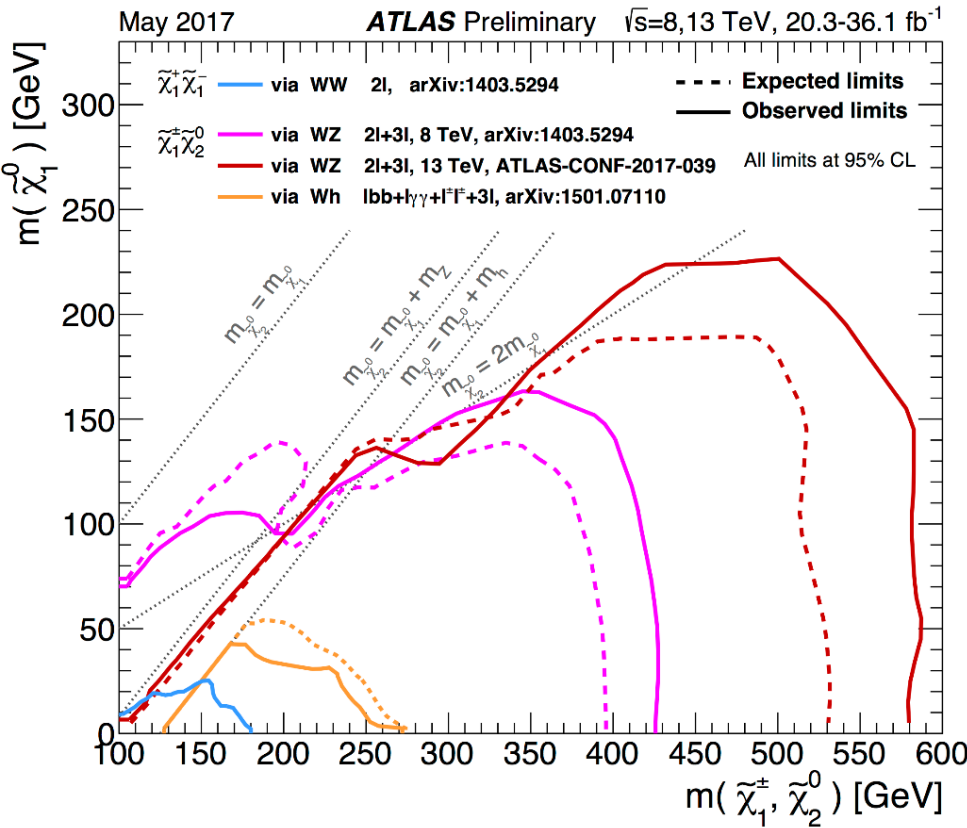
pp $\rightarrow \tilde{\chi}_2^0 \tilde{\chi}_1^\pm$ *Moriond 2017*



Slepton経路の場合、1TeV程度のリミットがかかっている。

EW "lep via W/Z/h": ATLAS vs CMS

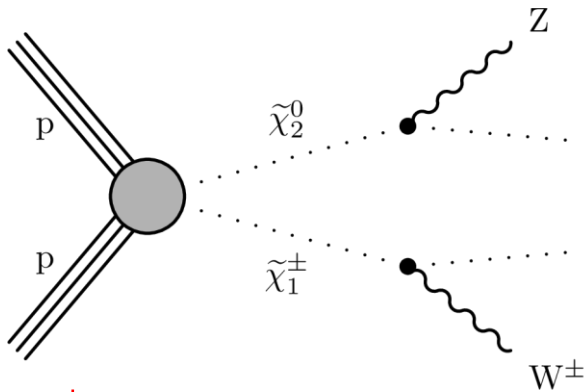
W/Z/h経由なら、まだまだ。
 特に「縮退」している場合は、これからが本番



縮退領域のための解析手法の開発 (Softなオブジェクトなど)

CMS EW SUSY Search

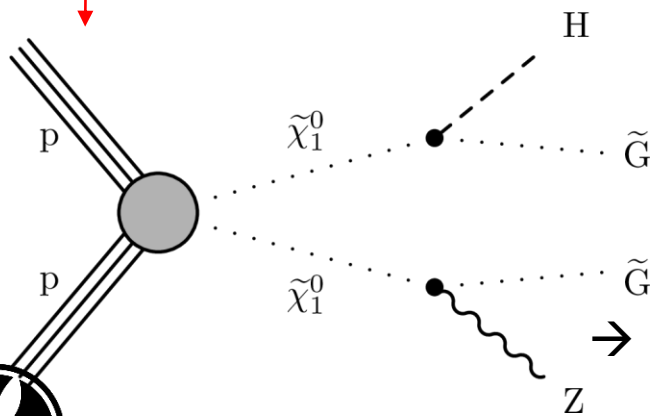
GMSB NLSP=Higgsino (縮退): $\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_1^0$



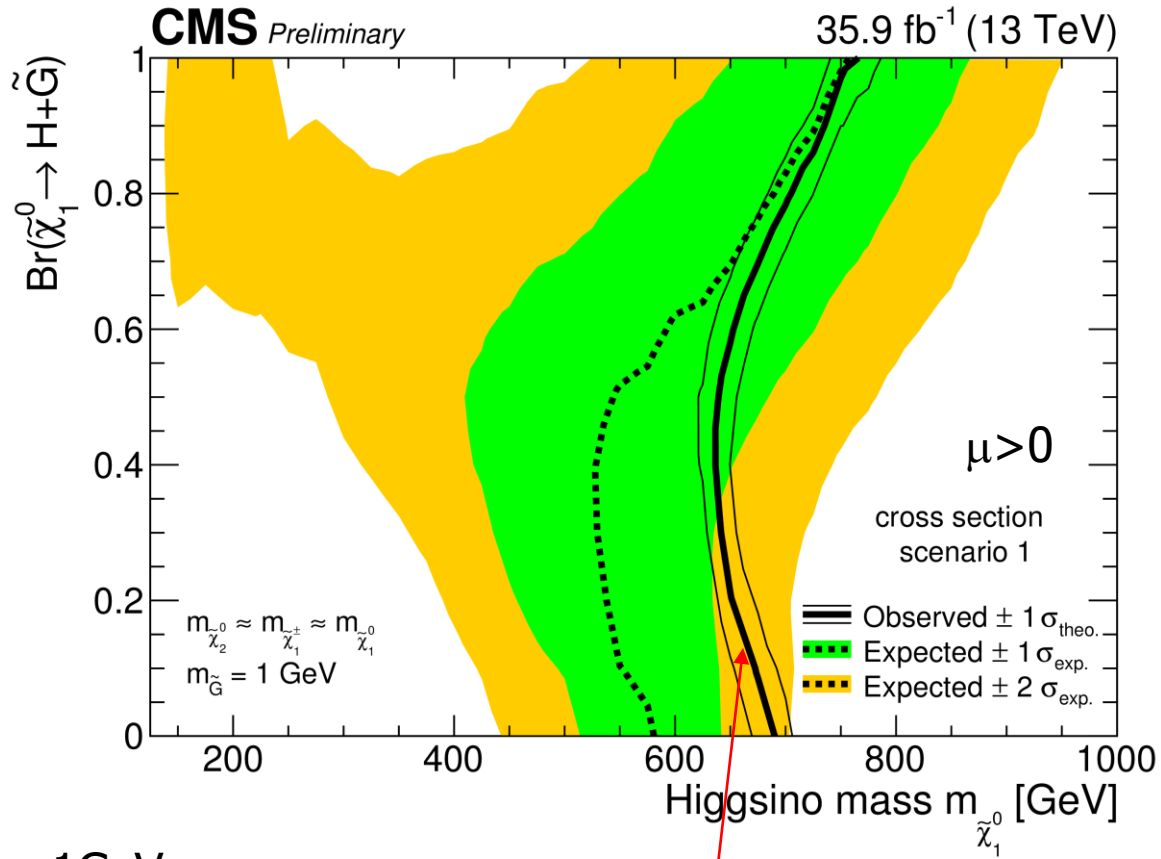
$$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + X_{soft}$$

$$\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + X_{soft}$$

Similar event topology



$\tilde{G} \sim 1\text{GeV}$
→ 実験的には無視

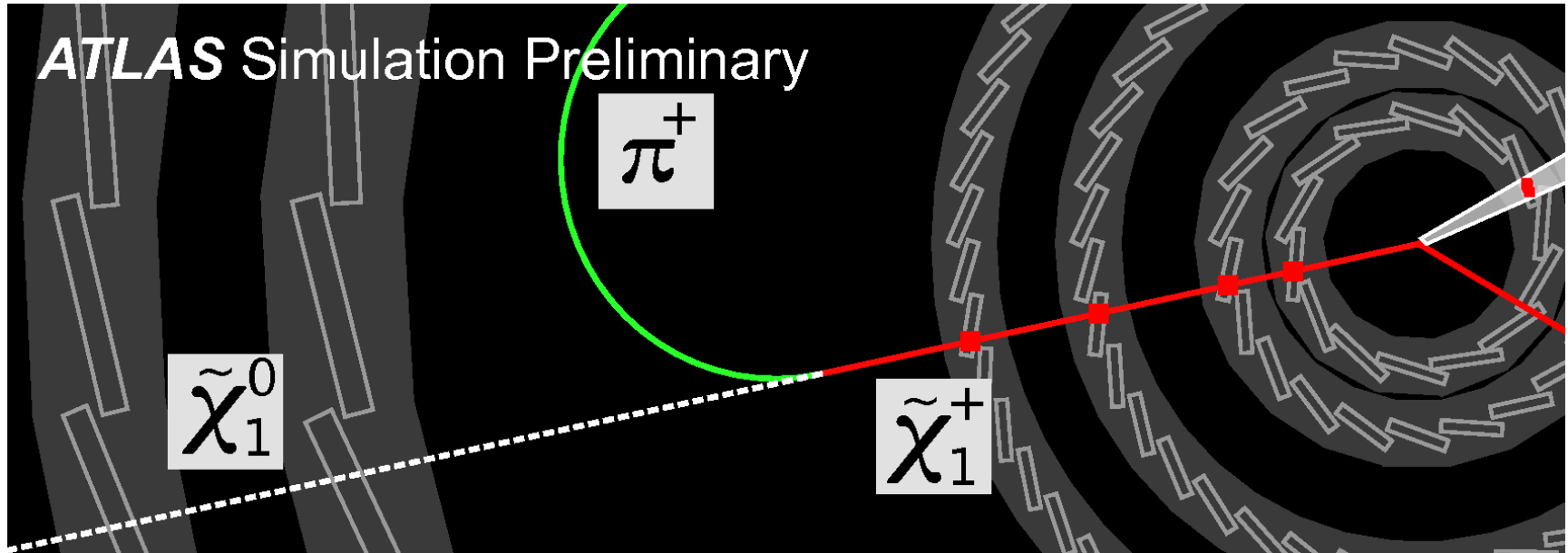


Up to 650-750GeV

Wino LSP (degenerated)

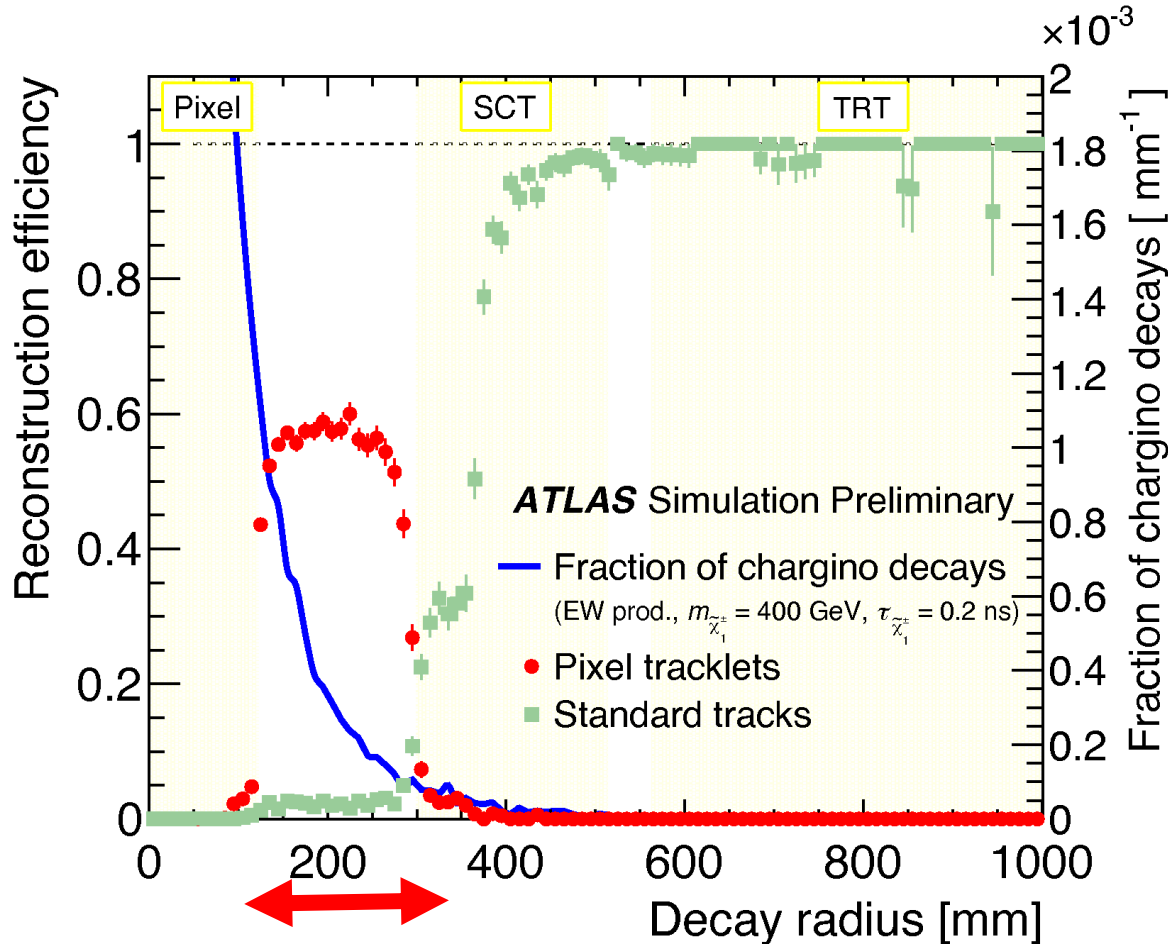
Ex) AMSB

チャージーノは縮退しているため、比較的長寿命(0.2ns)



電荷をもつチャージーノはトラッキング検出器で検出可能
 ただし、途中で崩壊してニュートラリーノになるため、検出できなくなる。
 (Soft charged pionもlow p_T のため(今のところ)検出できない。)
 → **トラッキング検出器の中で、途中で消えたような荷電粒子を探す。**

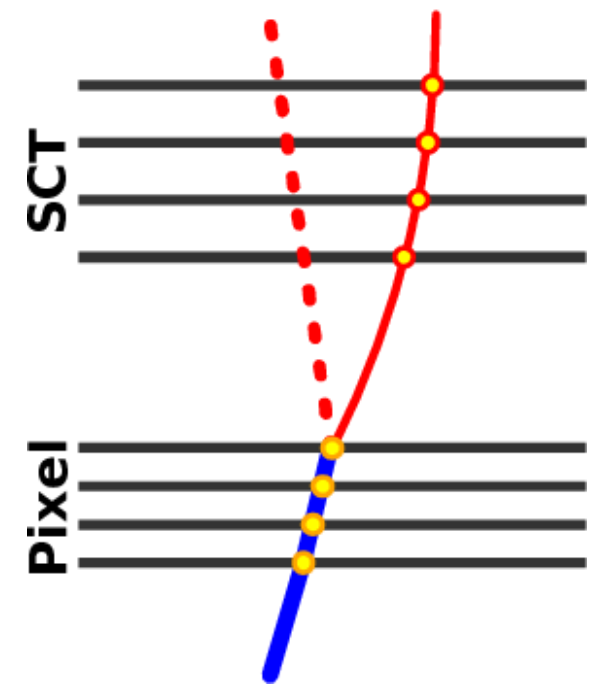
トラッキングの改善とBG



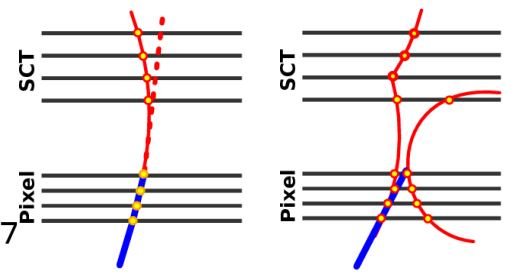
Run2で改善した部分

ATLASはRun1後の停止期間中に、Pixel検出器を1層追加しました！合計4層！

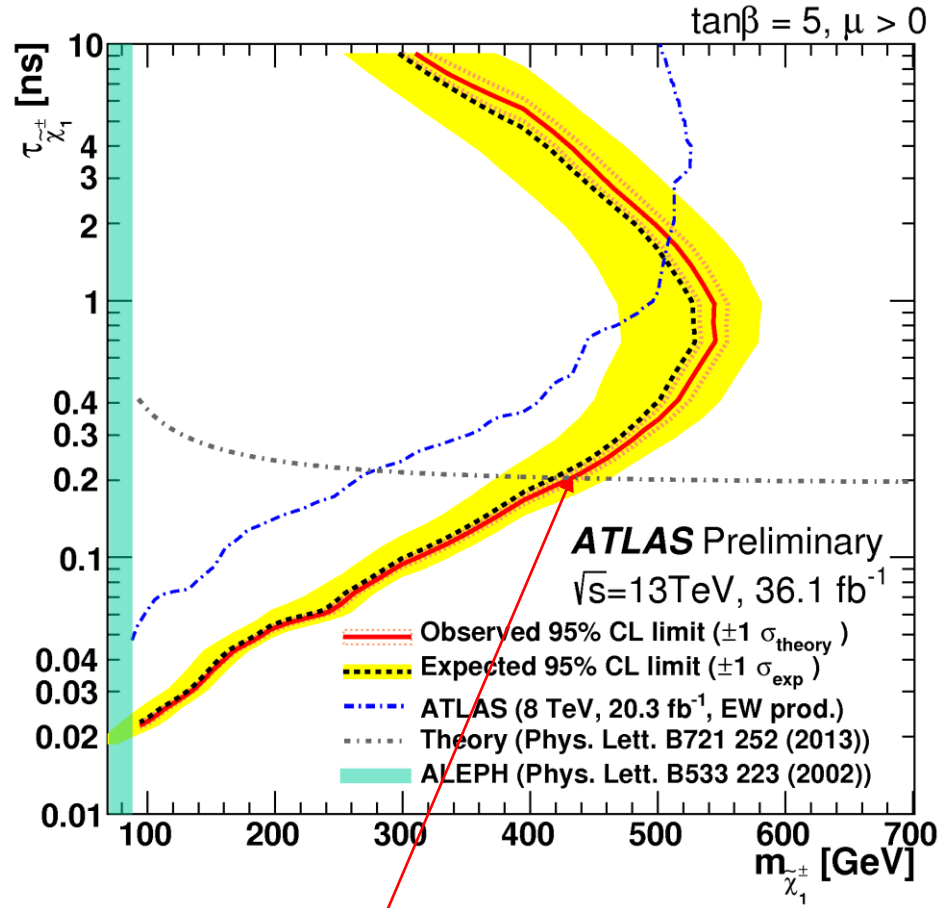
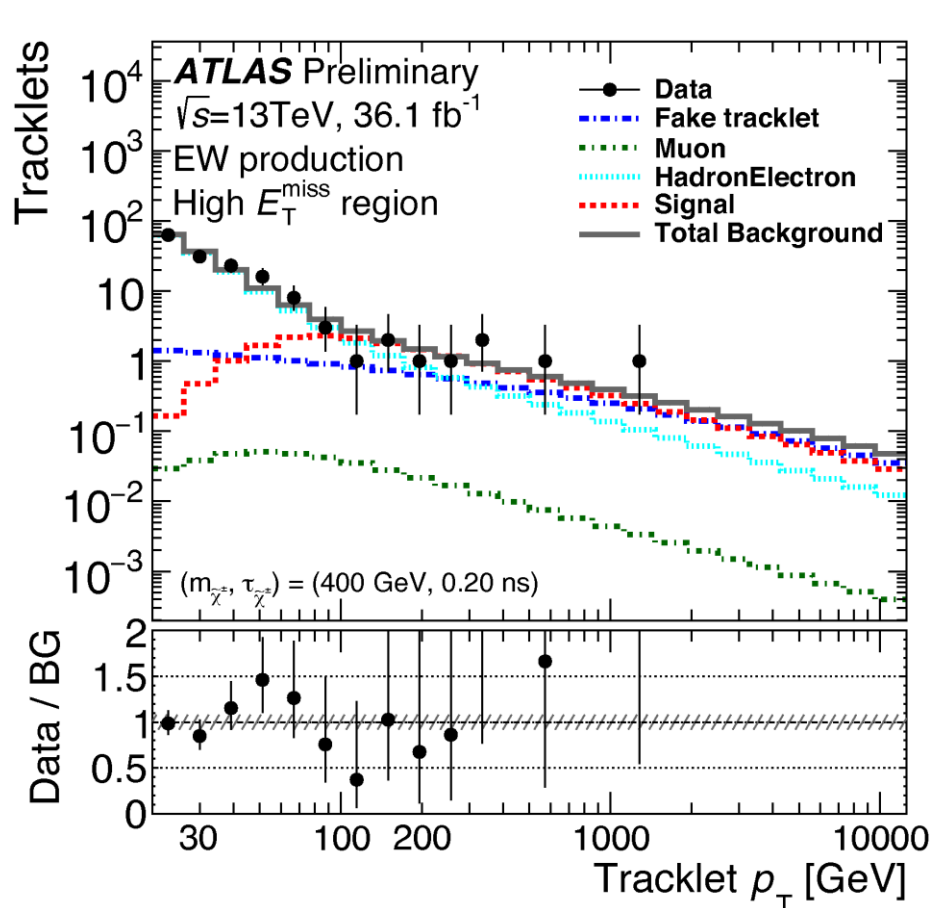
バックグラウンドの一例
"Hadron interaction"



Charged pionが検出器(物質)と相互作用して、Charged pionsやNeutral pionsを生成する。



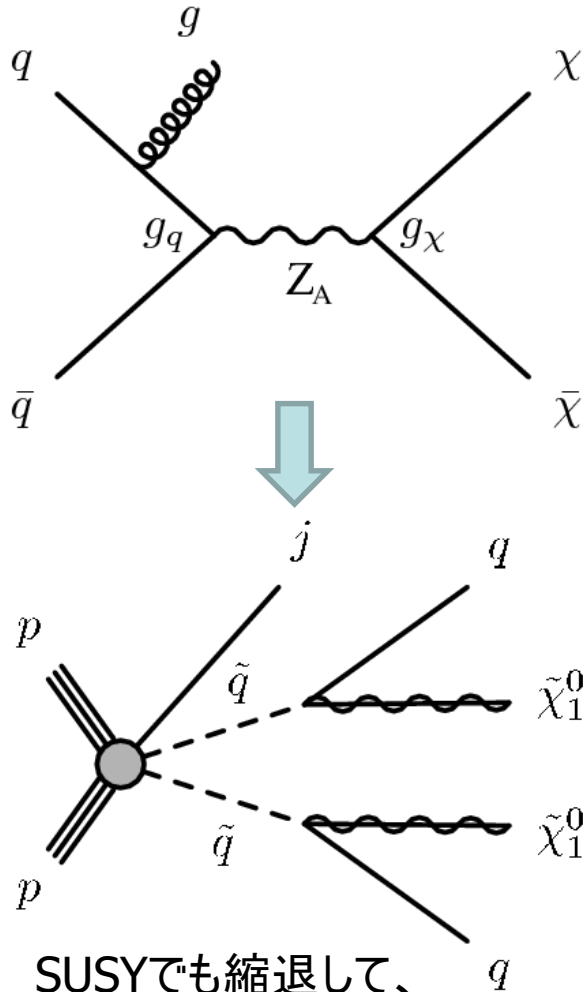
p_T 分布と結果



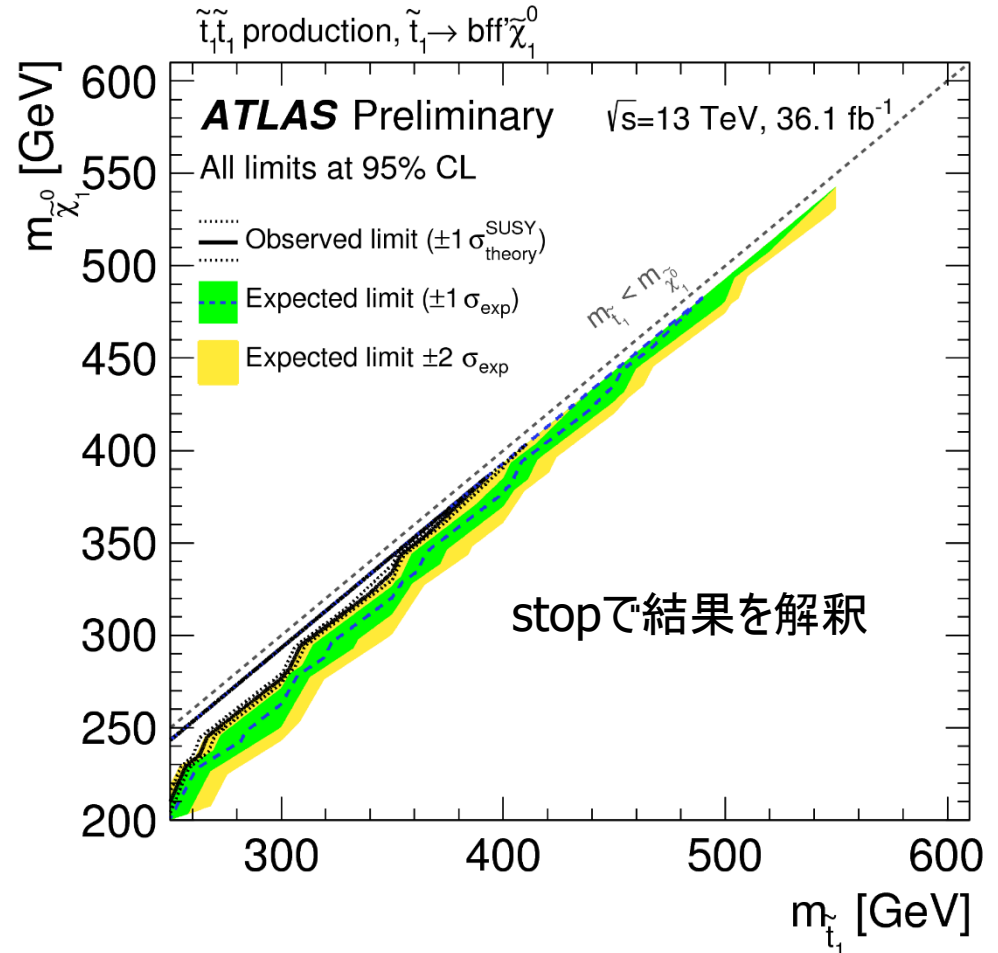
430GeV for 0.2ns lifetime

High p_T jets ($>250\text{GeV}$)
 Large MET ($>250\text{GeV}$)

DM search



SUSYでも縮退して、
 HardなISRが付く場合、
 上のDMサーチと同じトポロジー



$m(\text{stop})-m(\chi_1^0) \sim m(\text{bottom})$ の場合
 $\rightarrow 390\text{GeV}$

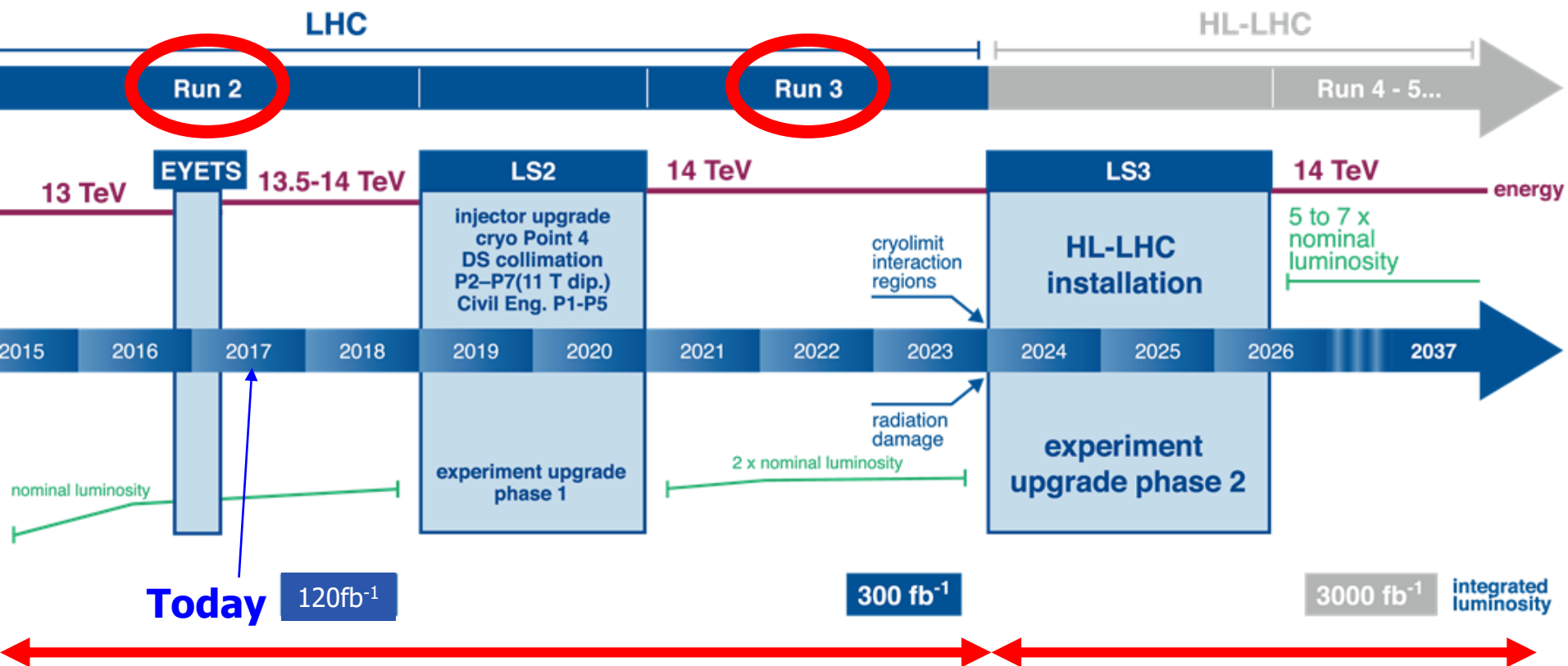
今後のSUSY探索

(東京グループの方針)

- グルイーノ生成過程の探索
 - 「初志貫徹」
 - LHCのリーチ内であれば、これが最強
 - 解析の改善: **q/g separation**
 - LSPと縮退している積極的な理由ありますか？
- EW生成過程の探索
 - ダークマターはある。→ $O(100\text{GeV})$ の可能性大
 - LSP=DM → EW SUSY direct production
 - 縮退している可能性大 → LHCではこれからが本番
 - 解析の改善: **Soft lepton (or soft track)** → low p_T
Disappearing track → 使うPixel数を減らしてもっと短い寿命。**Slow pion ID**
- Stop生成過程の探索
 - ナチュラルネスからは遠くなっていますが、実験屋は($>$)1TeVでも受け入れます！
 - 解析の改善: **Track jets for b-tagging** (top由来のHigh p_T ジェット ATL-PHYS-PUB-2014-013)
Boosted hadronic decay top tagging ($W \rightarrow qq$ もそうですが)

LHC Schedule

→ Plan this project **until ~2037**



LHC

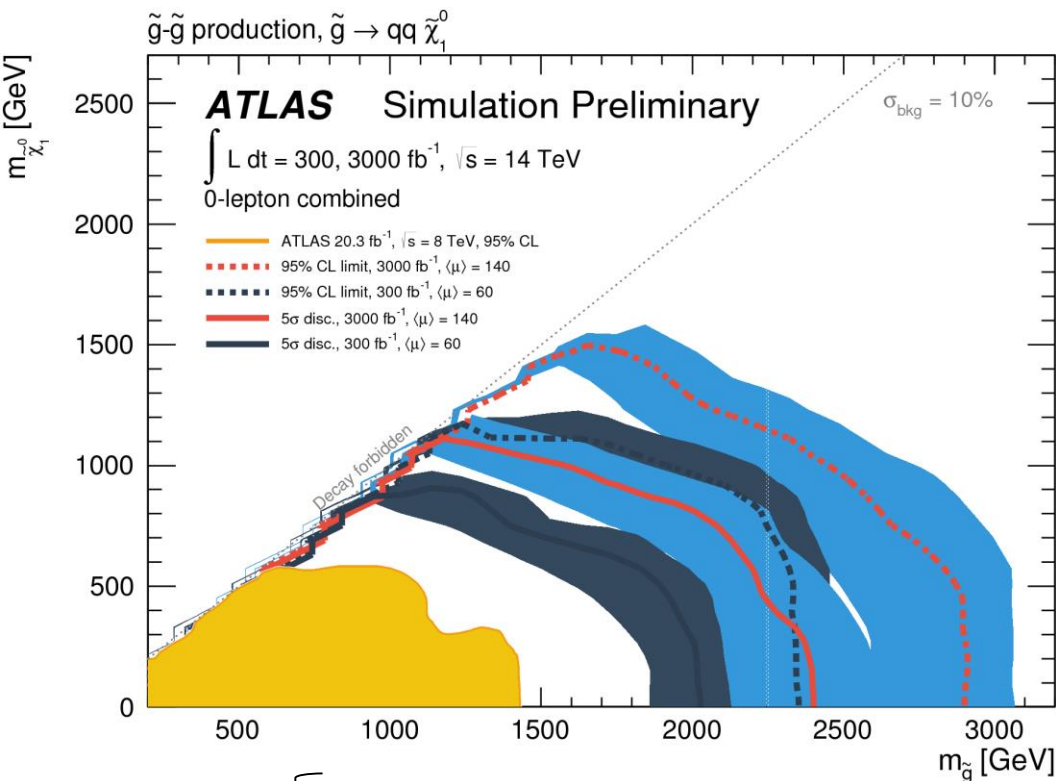
Run2 (2015-2018) : ~120fb⁻¹
 Run3 (2021-2023) : ~300fb⁻¹
 HL-LHC (2027-2037) : ~3000fb⁻¹

HL-LHC (High Luminosity LHC)
 (CERNでは正式に承認@2014)

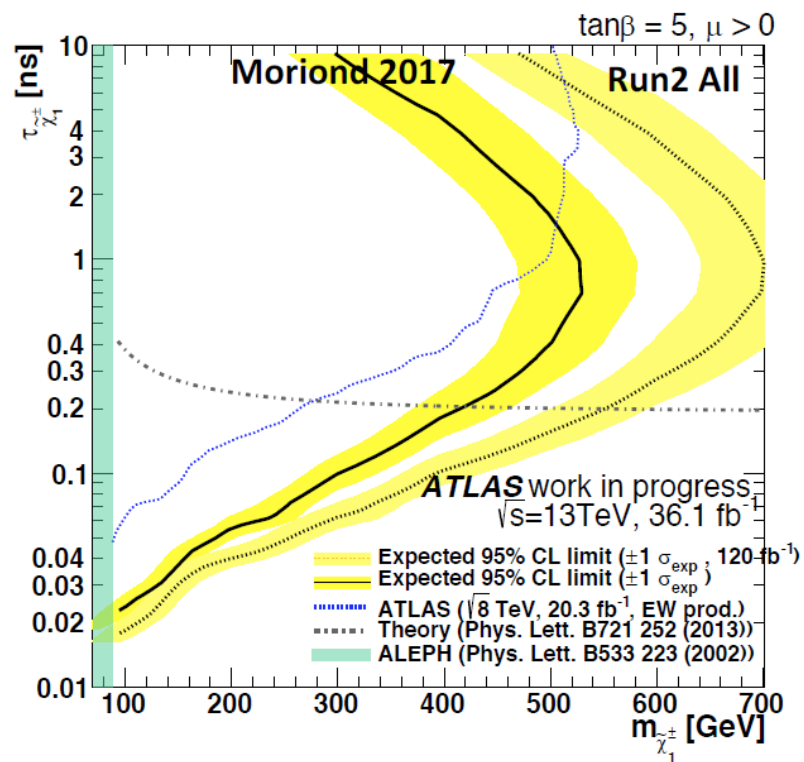
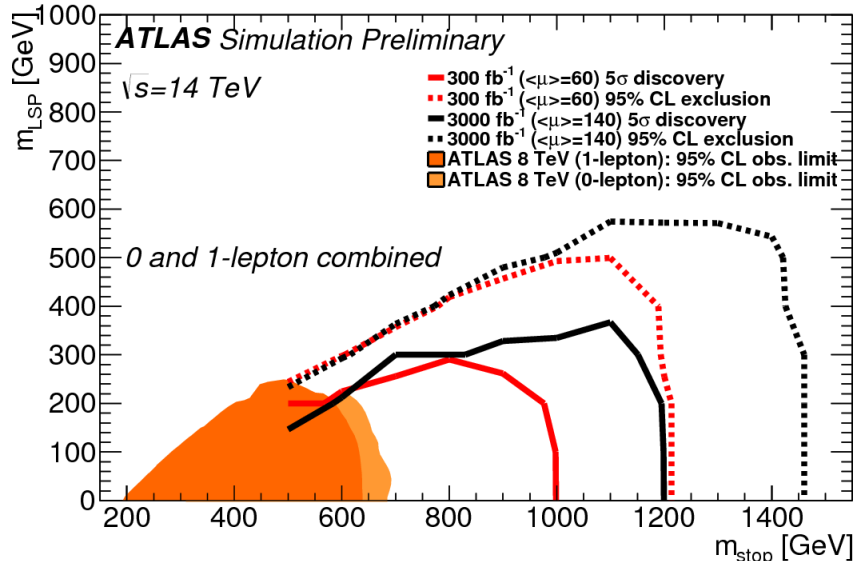
日本も前進: 文科省ロードマップ2017に採択

Energyを徐々に上げようか、という話もあります。たとえば16TeVに。

Run3とHL-LHCの感度



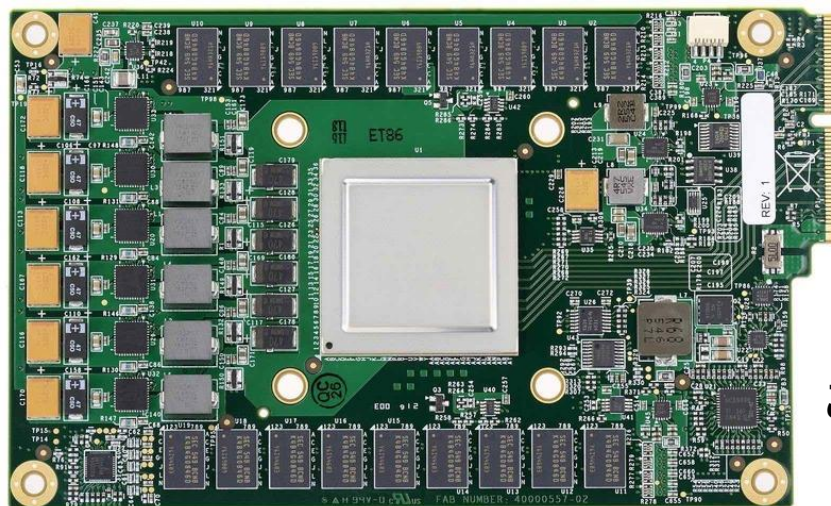
- 2σ (95%CL)
- 300 fb^{-1} (2023年)
 - Gluino $\sim 2.4\text{TeV}$
 - Stop $\sim 1.2\text{TeV}$
 - Wino $\sim 550\text{GeV}$
 - 3000 fb^{-1} (2037年)
 - Gluino $\sim 2.9\text{TeV}$
 - Stop $\sim 1.45\text{TeV}$



チェス、将棋、囲碁などを見ていると
... 計算機の方が賢い？



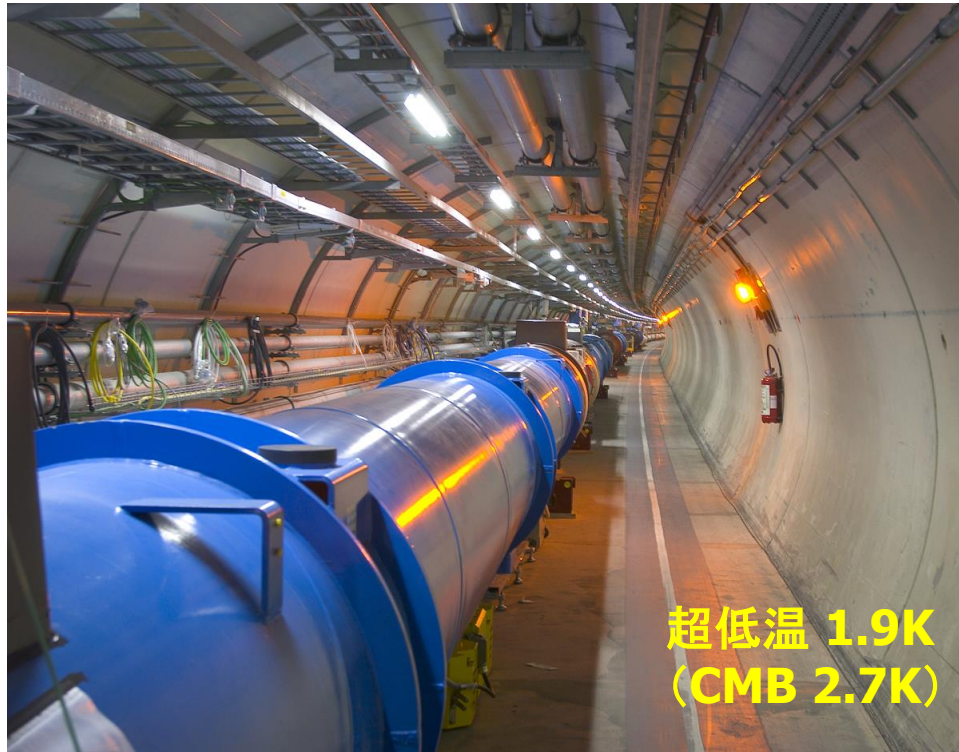
Tensor Processing Unit (Google)



これ1枚に負けました。
(+大量学習)

Machine Learning (機械学習), Deep Learning (深層学習), AI (人工知能)

超伝導磁石



超低温 1.9K
(CMB 2.7K)

LHC = 「超伝導線材 NbTi」

→ 16T実現のための線材 Nb₃Sn
まだまだ技術的な問題が残っている。

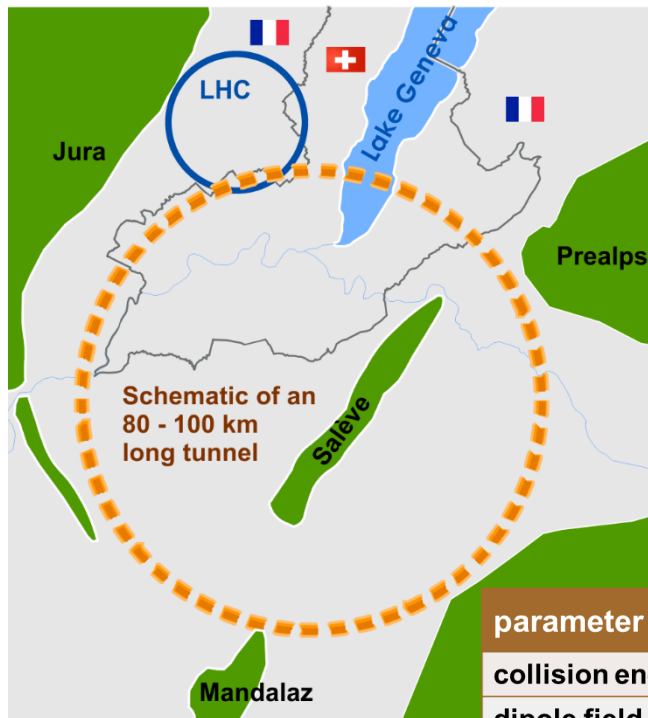
	NbTi	Nb ₃ Sn
相転移温度	10K	18K
臨界磁場(Hc) @4.2K	~12T	~25T

大きな磁場を得るためには、大電流が必要(だからこそ超伝導)

しかし、臨界磁場より大きな磁場が線材にかかる、超伝導が破れる。

鉄系超電導体(細野さん@東工大)
→ 56K, 50T可能?

8.3Tの強力な超伝導dipole magnet
この磁石の強さがLHCのエネルギーを決めている
(15m x 1232台 = 18.5km)
(実際は6.5TeVなので、7.7Tです。)
27kmという巨大なシステムで安定に超伝導状態を維持できなければならない。



CERNが中心となって、
Future Circular Collider (FCC)建設に向けた
基礎研究が始まっている。

- FCC MoUはすでに33か国、116機関で締結
- 2018年秋にCDR(Conceptual Design Report)出版予定
- FCC week@ベルリンの参加者は約500人
(我々の業界では最大級の国際会議並み)

parameter	FCC-hh		HE-LHC	(HL) LHC
collision energy cms [TeV]	100		27	14
dipole field [T]	16		16	8.33
circumference [km]	100		27	27
straight section length [m]	1400		528	528
# IP	2 main & 2		2 & 2	2 & 2
beam current [A]	0.5		1.12	(1.12) 0.58
bunch intensity [10^{11}]	1	1 (0.2)	2.2 (0.44)	(2.2) 1.15
bunch spacing [ns]	25	25 (5)	25 (5)	25
rms bunch length [cm]	7.55		7.55	(8.1) 7.55
peak luminosity [$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	5	30	25	(5) 1
events/bunch crossing	170	1k (200)	~800 (160)	(135) 27
stored energy/beam [GJ]	8.4		1.3	(0.7) 0.36
beta* [m]	1.1-0.3		0.25	(0.20) 0.55
norm. emittance [μm]	2.2 (0.4)		2.5 (0.5)	(2.5) 3.75

FCC-hh
(陽子・陽子コライダー)は、
High-Energy
LHC (HE-LHC)も含む。

Conclusion

SUSY今のところありませんが、データ出る限り諦めません。

- (データを増やす)
 - 解析手法の改善
 - 新しい手法の導入
 - ある程度事象選択するとSignalとBGはかなり似てくる。(当然と言えば当然ですが)
→ MLをもっと積極的に
- Run2(100-120fb⁻¹)にSUSYの証拠を！

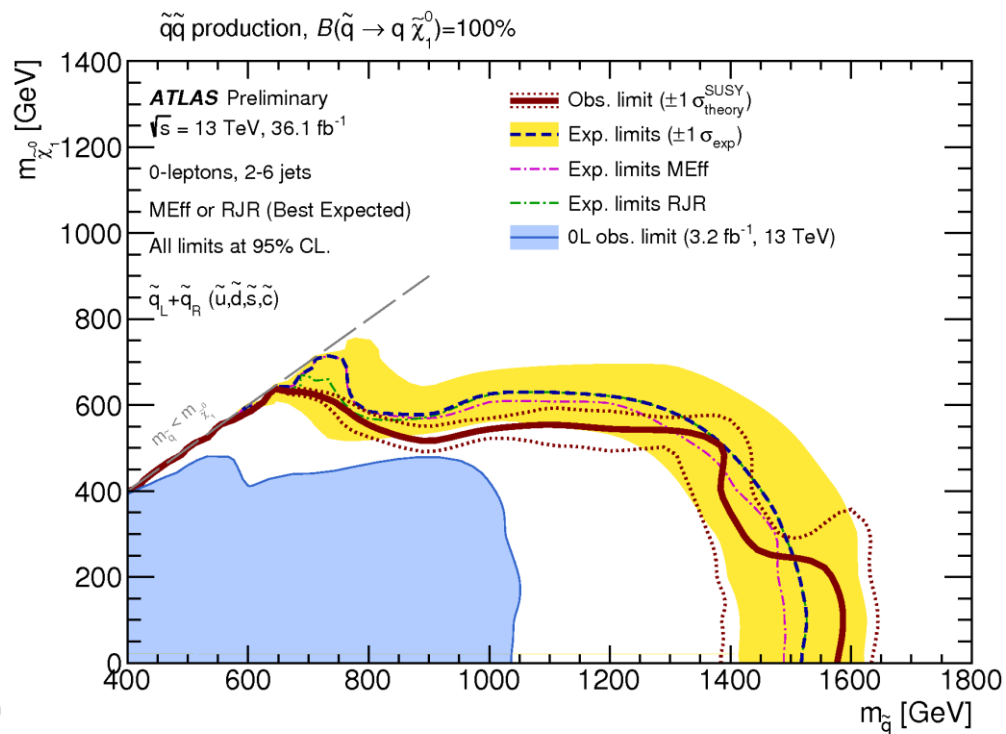
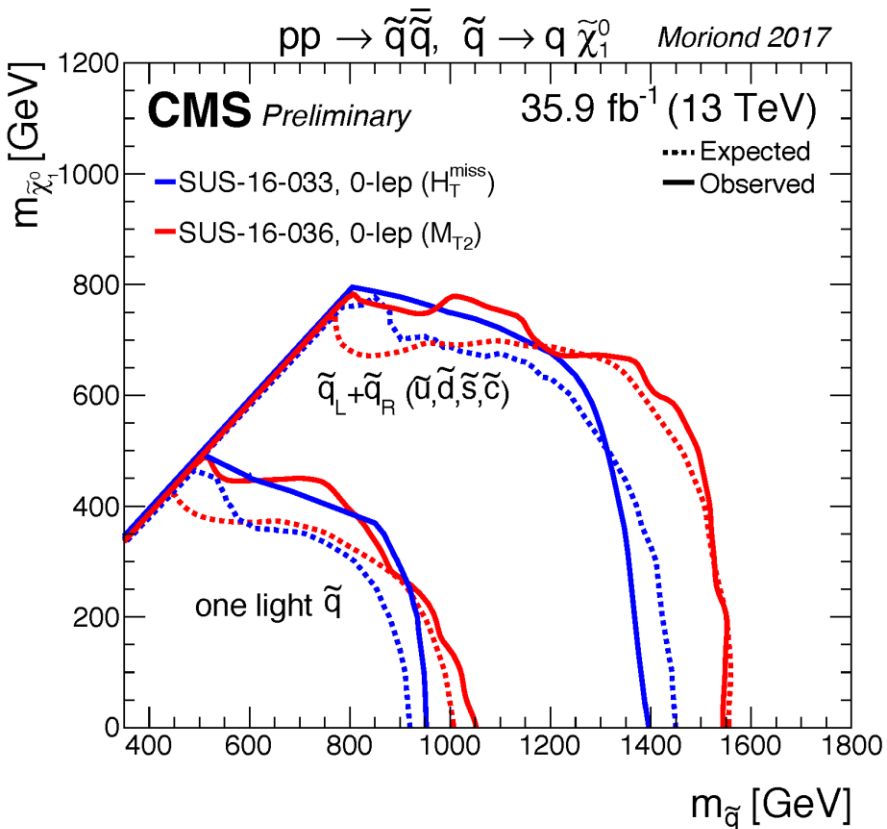
- 是非、アイデアをください。
 - 解析の改善や新手法:まだ使っていない情報
 - 縮退している場合のSoft trackは検証中
 - 面白いモデル、期待できるモデル

リファレンス

- ATLAS SUSY Summary web
 - <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/SupersymmetryPublicResults>
 - <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CombinedSummaryPlots/SUSY/>
- CMS SUSY Summary web
 - <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsSUS>

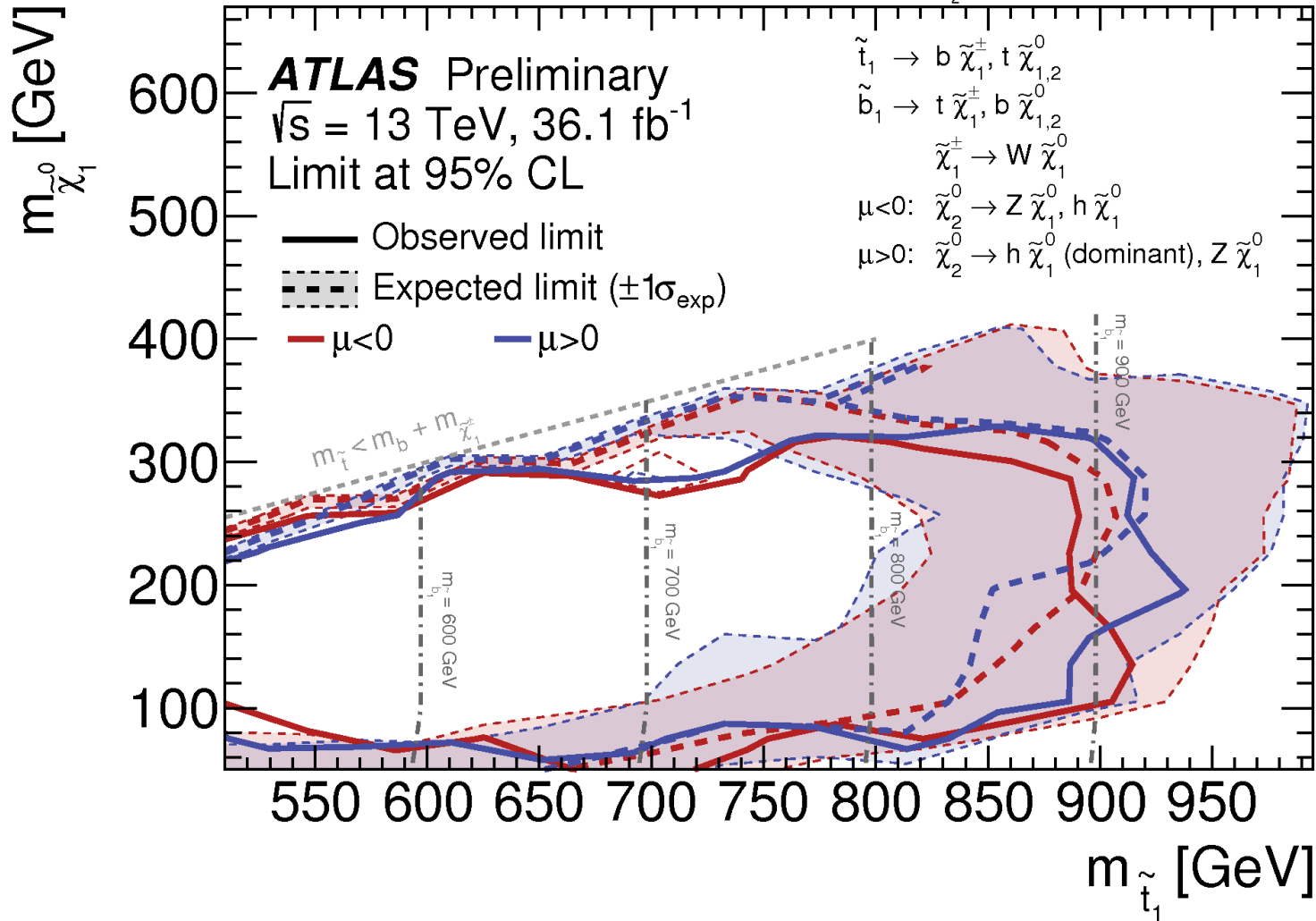
バックアップ

Squark (simplified model)



Stop (Wino NLSP)

Wino NLSP model: \tilde{t}_1, \tilde{b}_1 production, $m_{\tilde{\chi}_1^\pm} \approx m_{\tilde{\chi}_2^0} \approx 2 \times m_{\tilde{\chi}_1^0}$ ($M_2 = 2 \times M_1$)



Stop (Bino/Higgsino mix LSP)

Bino/Higgsino mix model: $\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 + \tilde{b}_1, \tilde{b}_1$ production, $\Delta m(\tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_1^0) = 20-50$ GeV

