

# 長生き粒子と新物理探索

Satoshi Shirai (Kavli IPMU)

# 1. 身近な長生き粒子

標準模型における具体例

長生き粒子の探査、観測は何をもたらすか？

# 2. 新物理における長生き粒子

Minimal dark matter

SUSY

Coannihilation dark matter

# 3. まとめ

# 長生き粒子

# 長生き@Collider

- 加速器実験でtrackやvertexの変位が見える
- おおよそ $O(10) \mu\text{m}$ 程度以上のdecay length

# 粒子の寿命

$$\text{崩壊率} \sim \sum_{\text{channel}} (\text{coupling})^2 (\text{mass dimension})$$

典型的には

$$\text{崩壊長} = 1/\text{崩壊率} \sim 10^{-15} \text{m} @ 1 \text{ GeV} \ll O(10) \mu\text{m}$$



普通はとても短命なように思える

# 長生きするために

長生き粒子は何か特殊なことを意味している

$$\sim \sum_{\text{channel}} (\text{coupling})^2 (\text{mass dimension})$$

限られたチャンネル: 何らかの対称性

弱い結合: 近似的な対称性や高エネルギーの物理起源

小さな質量次元: 娘粒子との質量の縮退

# 標準模型の場合

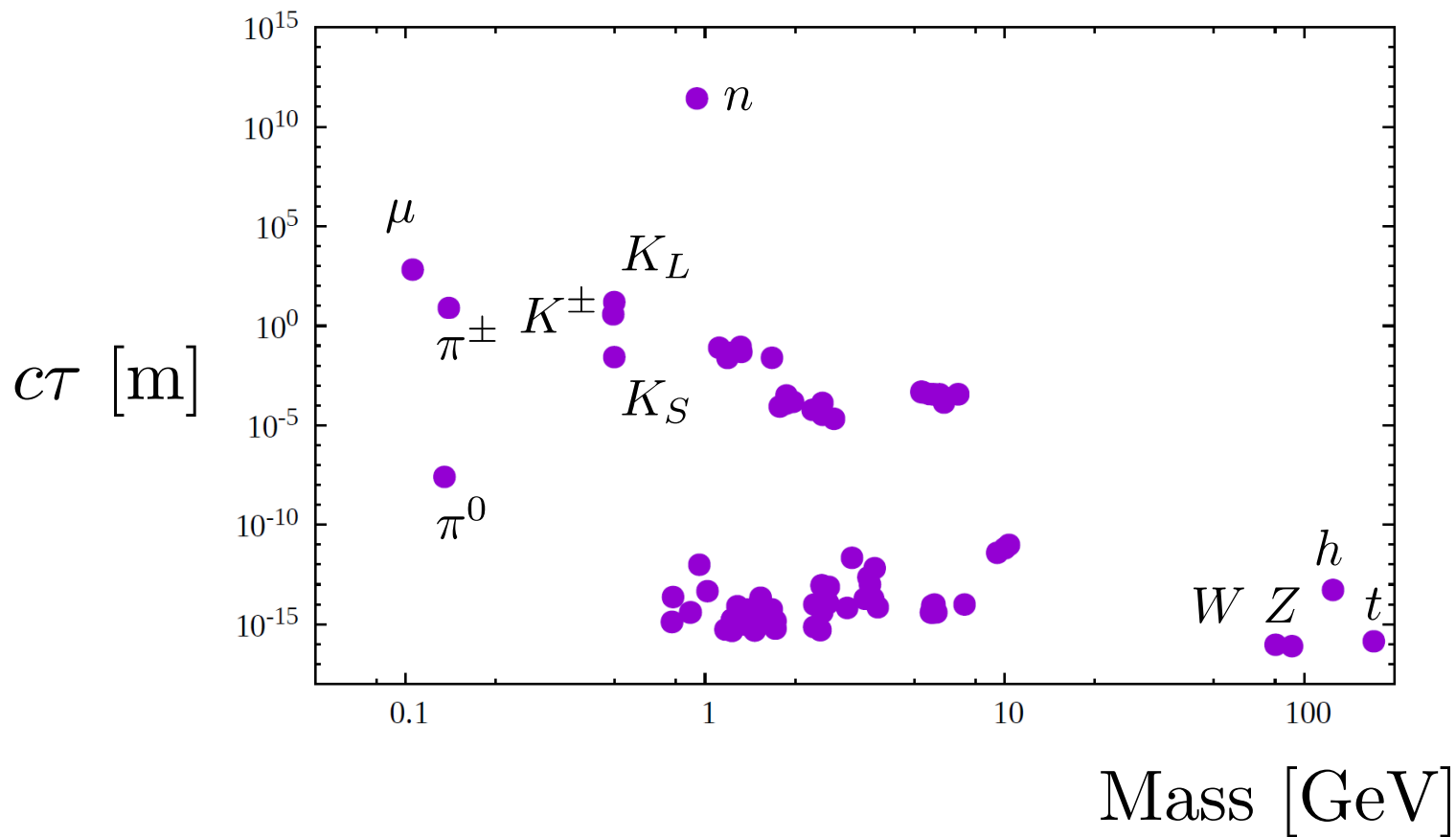
$\nu$



$e$



$p$

# 安定粒子

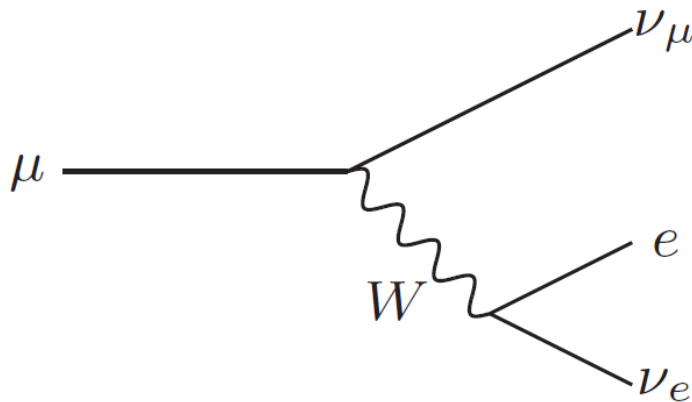
何らかの対称性をもっている  $\longleftrightarrow$  保存則

- 陽子
  - バリオン数を持つ中で最も軽い
- 電子
  - QED電荷を持つ中で最も軽い
- ニュートリノ
  - フェルミオン数、レプトン数を持つ中で最も軽い



# 準安定粒子: muon

質量: 105 MeV, 寿命: 2.2  $\mu$ s, 崩壊長: 660 m

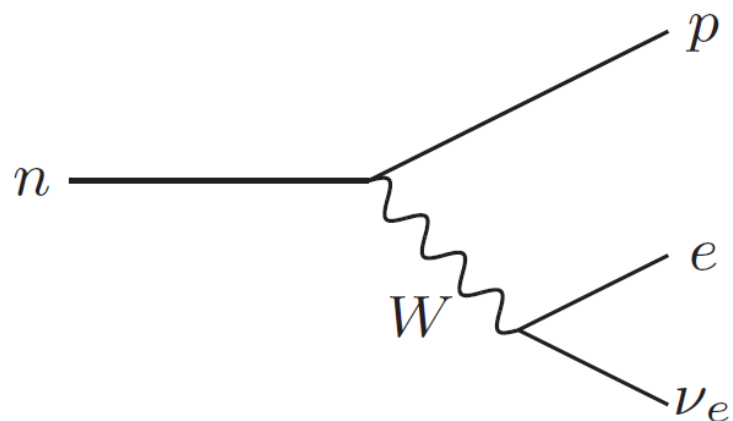


$$\Gamma_\mu \sim 10^{-6} \frac{m_\mu^5}{m_W^4}$$

弱い力: 高エネルギーの物理

# 準安定粒子: 中性子

質量: 939.56 MeV, 寿命: 886 s, 崩壊長:  $10^{11}$  m



弱い力: 高エネルギーの物理

質量の縮退:  $m_p = 938.27$  MeV,  $m_n - m_p - m_e = 0.8$  MeV

$$\left( \frac{m_n - m_p}{m_\mu} \right)^5 \sim 10^{-10}$$

# 準安定粒子: 中性子

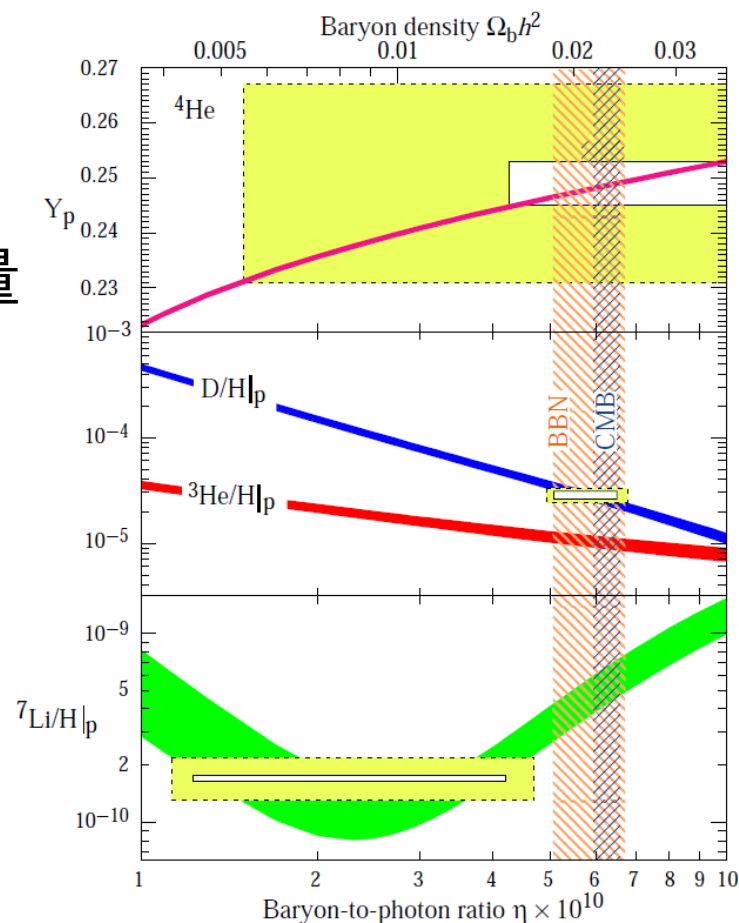
中性子の寿命や質量



ビッグバン元素合成期の中性子の存在量



元素の存在量



# 準安定粒子: 中性子

質量の縮退?

up: 2-3 MeV, down 4-6 MeV

近似的SU(2)対称性: isospin対称性が説明?

小さな質量差は安定な原子核に不可欠: 人間原理?

# 長寿命粒子

- K meson, charm meson, bottom meson
  - 弱い相互作用で崩壊
  - Flavor symmetry
  - CP対称性

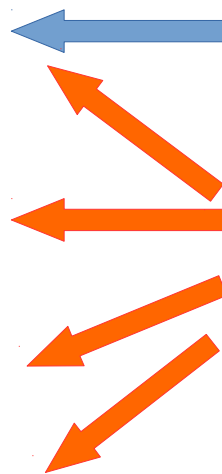
# 長寿命粒子

- 弱い結合
  - 高エネルギーの物理
  - 対称性(の破れ)
  - ...
- 質量の縮退
  - 対称性
  - 単なる偶然?
  - ...
- 観測がしやすい

# 新物理における長生き粒子

# 標準模型の拡張

- 暗黒物質
- バリオン数の起源
- 量子重力
- 宇宙項
- 階層性問題
- $U(1)$ 量子化
- Strong CP問題
- フレーバ問題
- …



e.g.,  
Minimal dark matter

超対称性

…





# Minimal Dark Matter

# いろいろな候補

- Axion
- (Primordial) Black hole
- **WIMP**
- Others...

# WIMP Dark Matter

Weakly Interacting Massive Particle

# WIMP Dark Matter

Weakly Interacting Massive Particle

~電弱程度

~100 GeV – 10 TeV

# WIMP Miracle

熱的残存量(thermal relic density)の近似式

$$\Omega h^2 \simeq 0.1 \left( \frac{\langle \sigma v \rangle}{10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}} \right)^{-1}$$

$$10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s} \simeq 10^{-9} \text{ GeV}^{-2} \sim \frac{g_2^4}{4\pi} \frac{1}{m_{\text{DM}}^2}$$

$m_{\text{DM}} = O(1) \text{ TeV}$  だとちょうどよい量

# Minimal Dark Matter

ElectroWeakly Interacting Massive Particle

=電弱相互作用       $\sim 100 \text{ GeV} - 10 \text{ TeV}$

# Gauge interacting DM

DMのゲージ相互作用 SU(2)xU(1)のチャージで決まる

		SU(2)					
U(1)	Y	n	1	2	3	4	...
	0			C	wino	C	
	1/2		C	higgsino	C		
	1		C	C		C	
	3/2		C	C	C		
	2		C	C	C	C	
	...		C	C	C	C	C

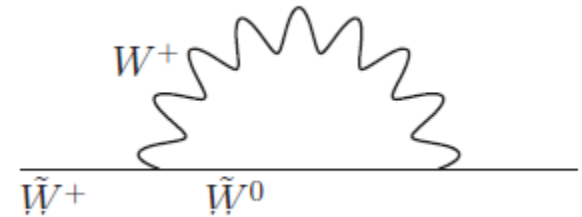
# Wino

- Majorana fermion
- Hypercharge  $Y=0$

- SU(2) triplet  $\begin{pmatrix} \widetilde{W}^+ \\ \widetilde{W}^0 \\ \widetilde{W}^- \end{pmatrix}$



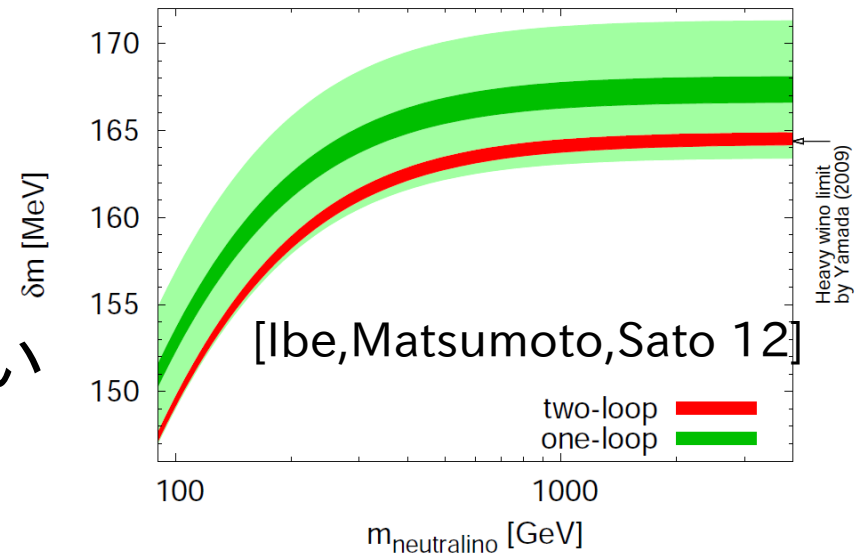
# Wino Spectrum



放射補正

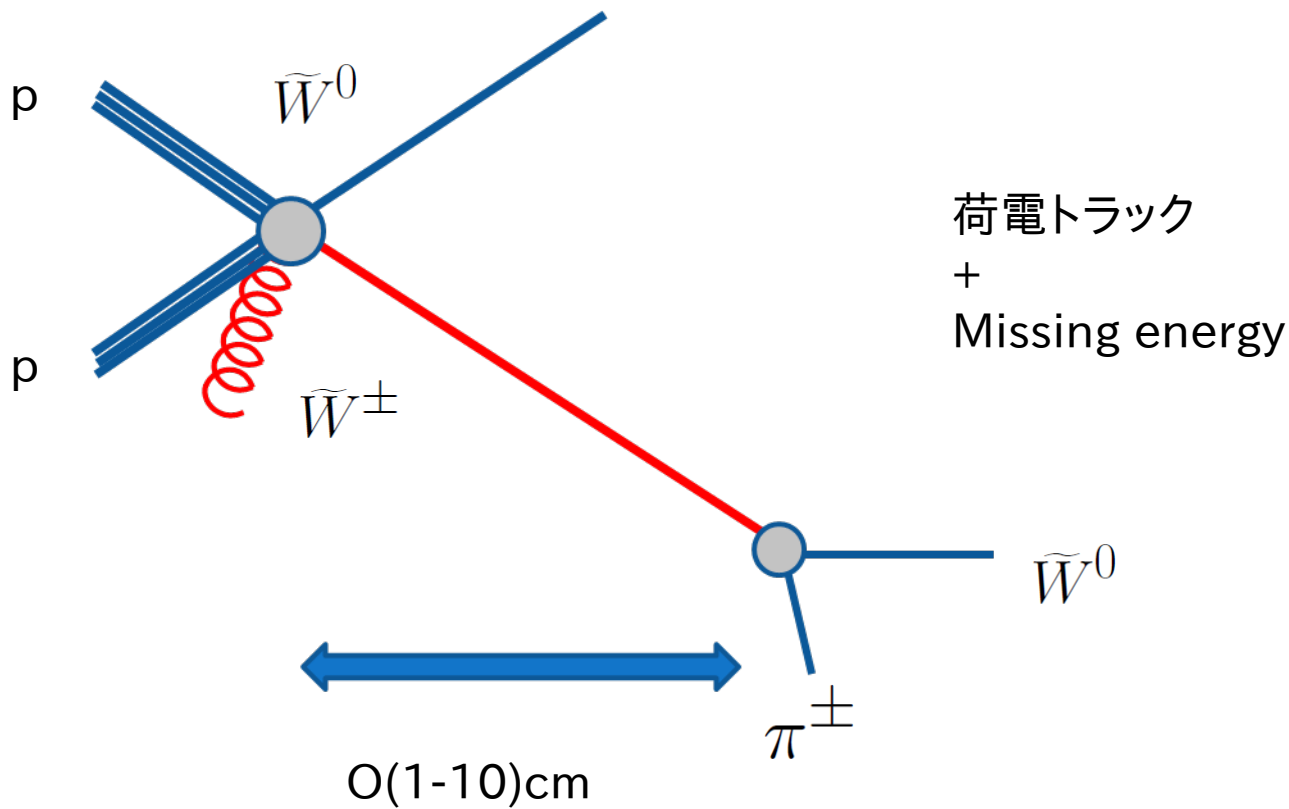


$\begin{pmatrix} \tilde{W}^+ \\ \tilde{W}^0 \\ \tilde{W}^- \end{pmatrix}$  荷電粒子が少しだけ重い

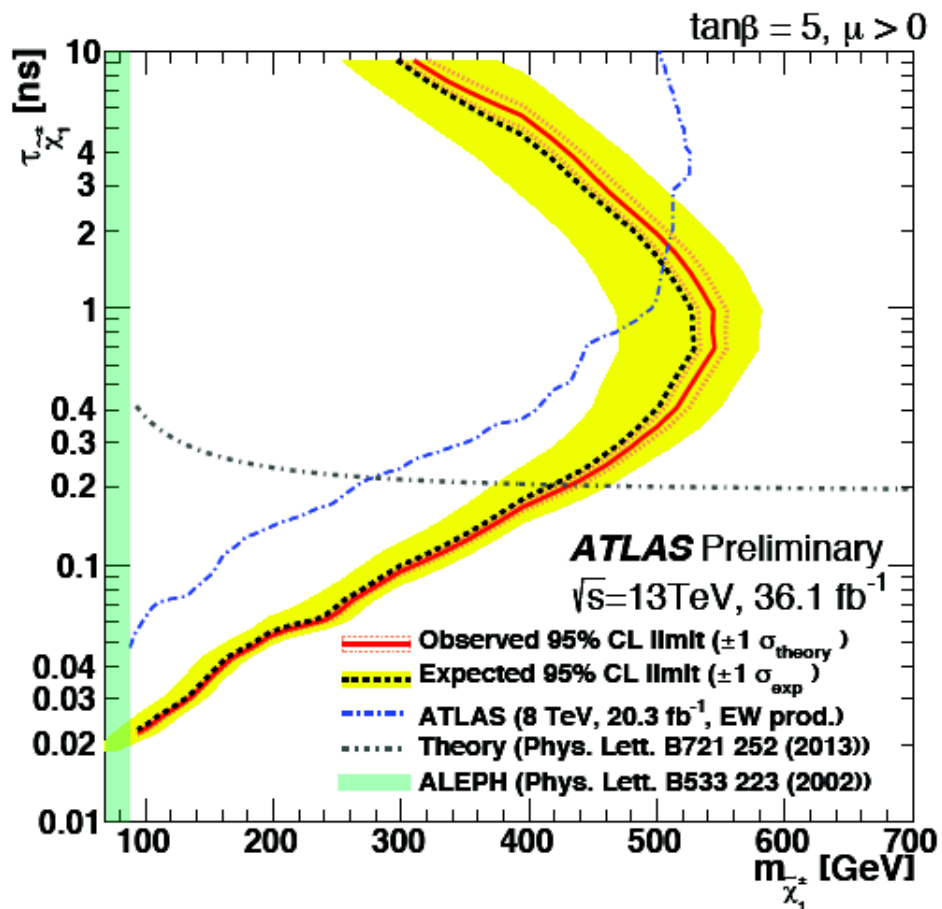


$$c\tau(\tilde{W}^\pm \rightarrow \tilde{W}^0 \pi^\pm) \simeq 7 \text{ cm} \left( \frac{\Delta m}{165 \text{ MeV}} \right)^{-3}$$

# 加速器でのシグナル



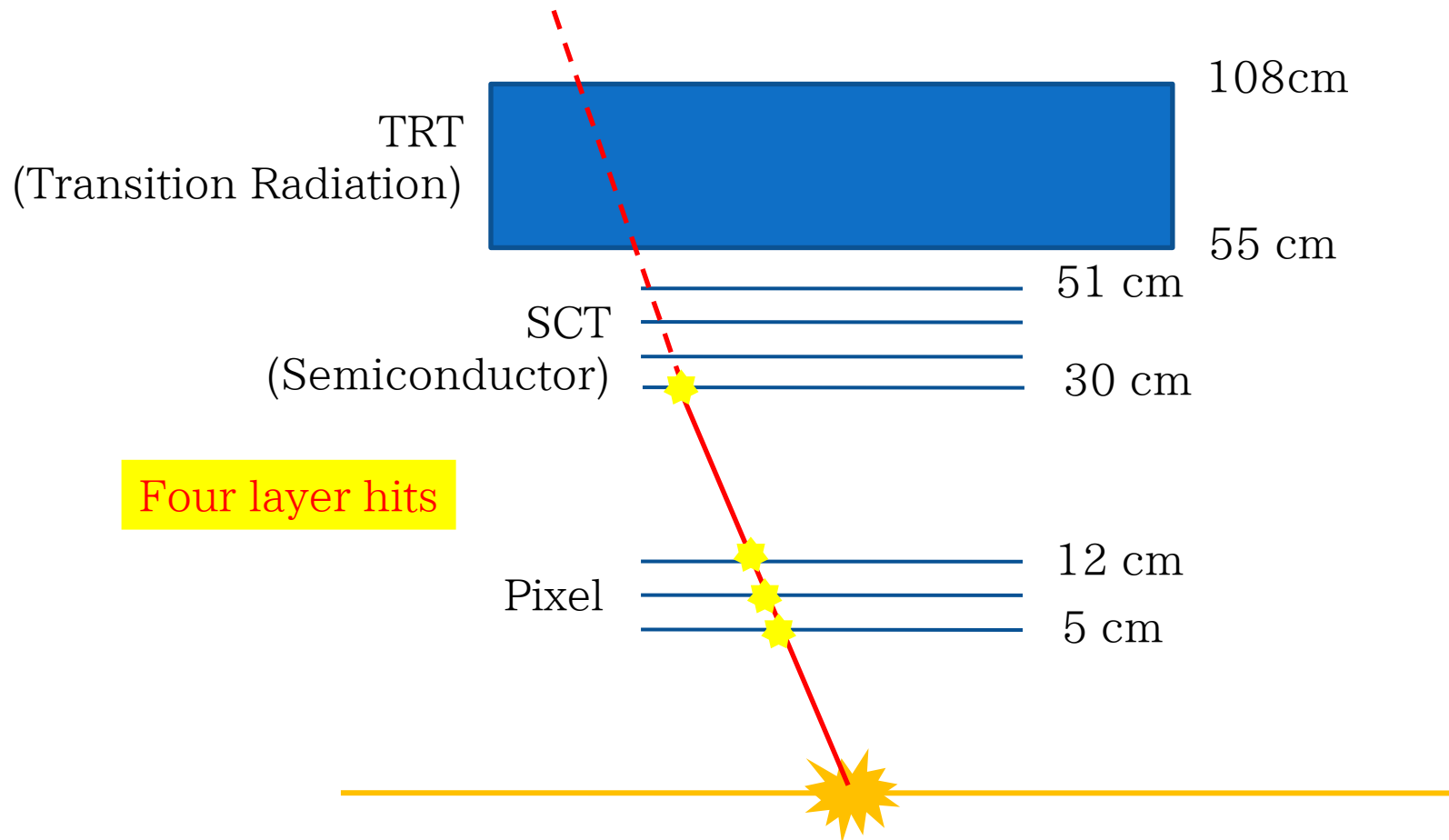
# LHCでの制限



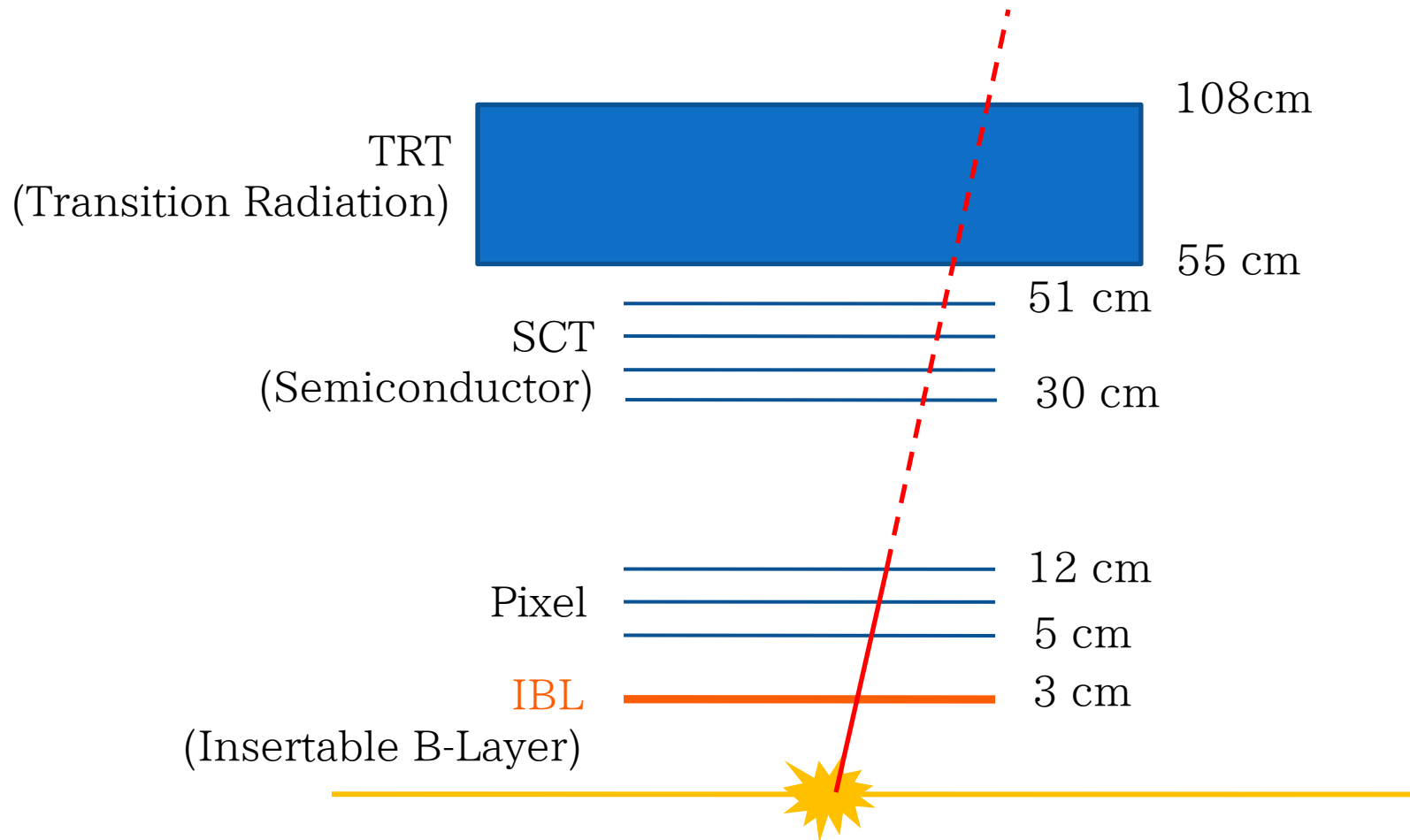
Wino 430 GeVまで排除

# Tracking @ Run1

8 TeV selection

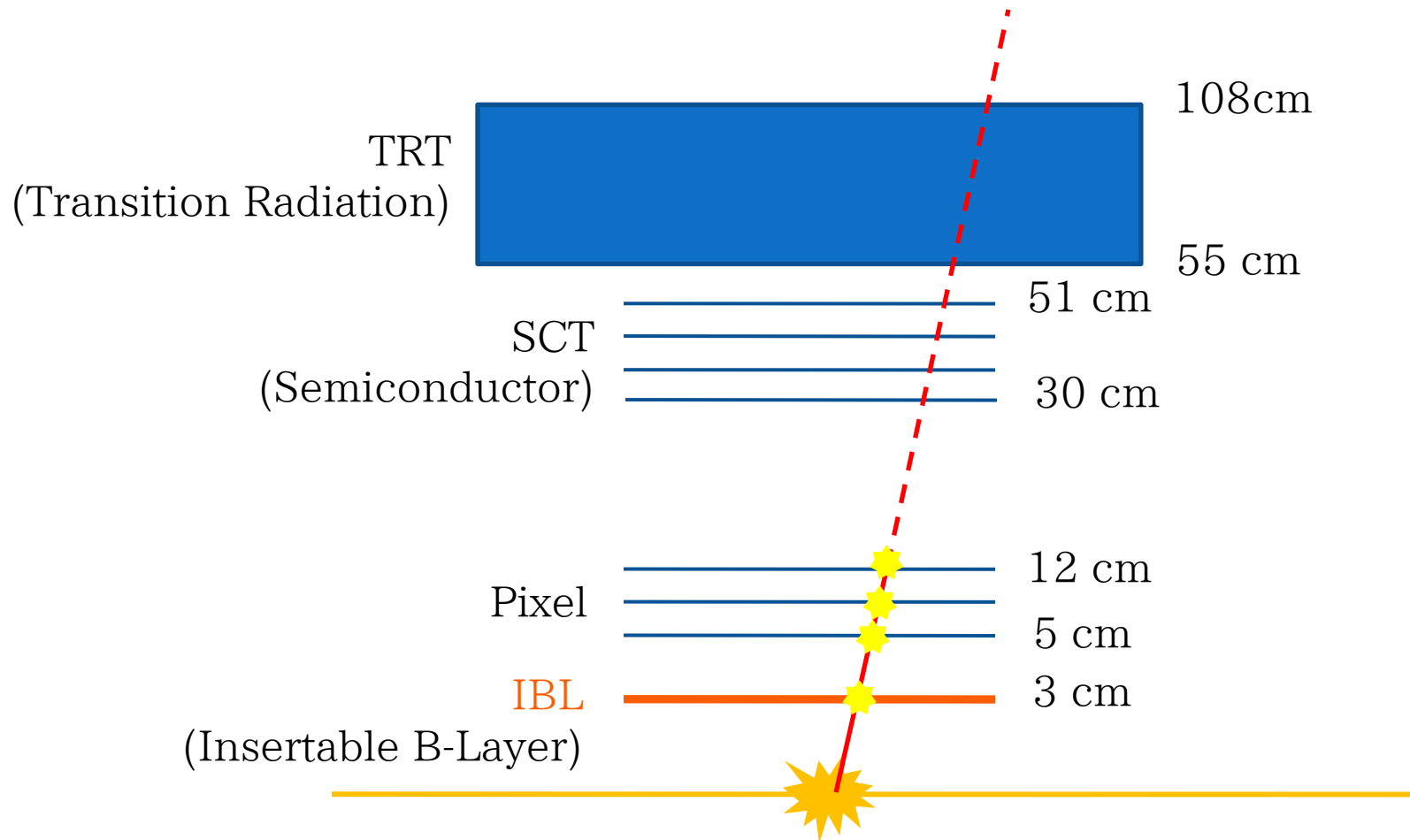


# Tracking @ Run2



\* CMS installed similar module

# Tracking @ Run2



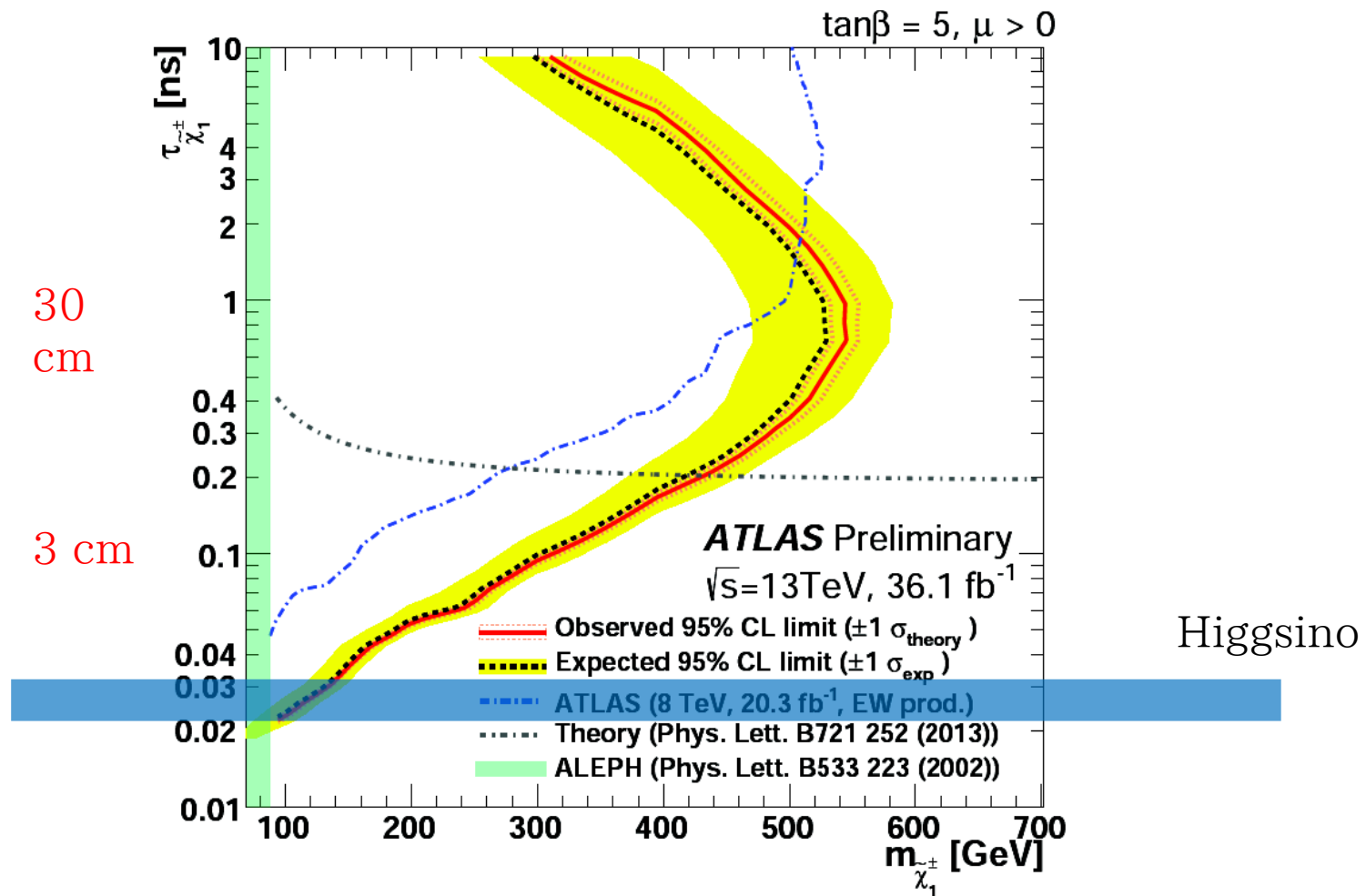
# 他の場合

[Fukuda Kobayashi, Nagata, Otono, SS, 17]

SU(2)

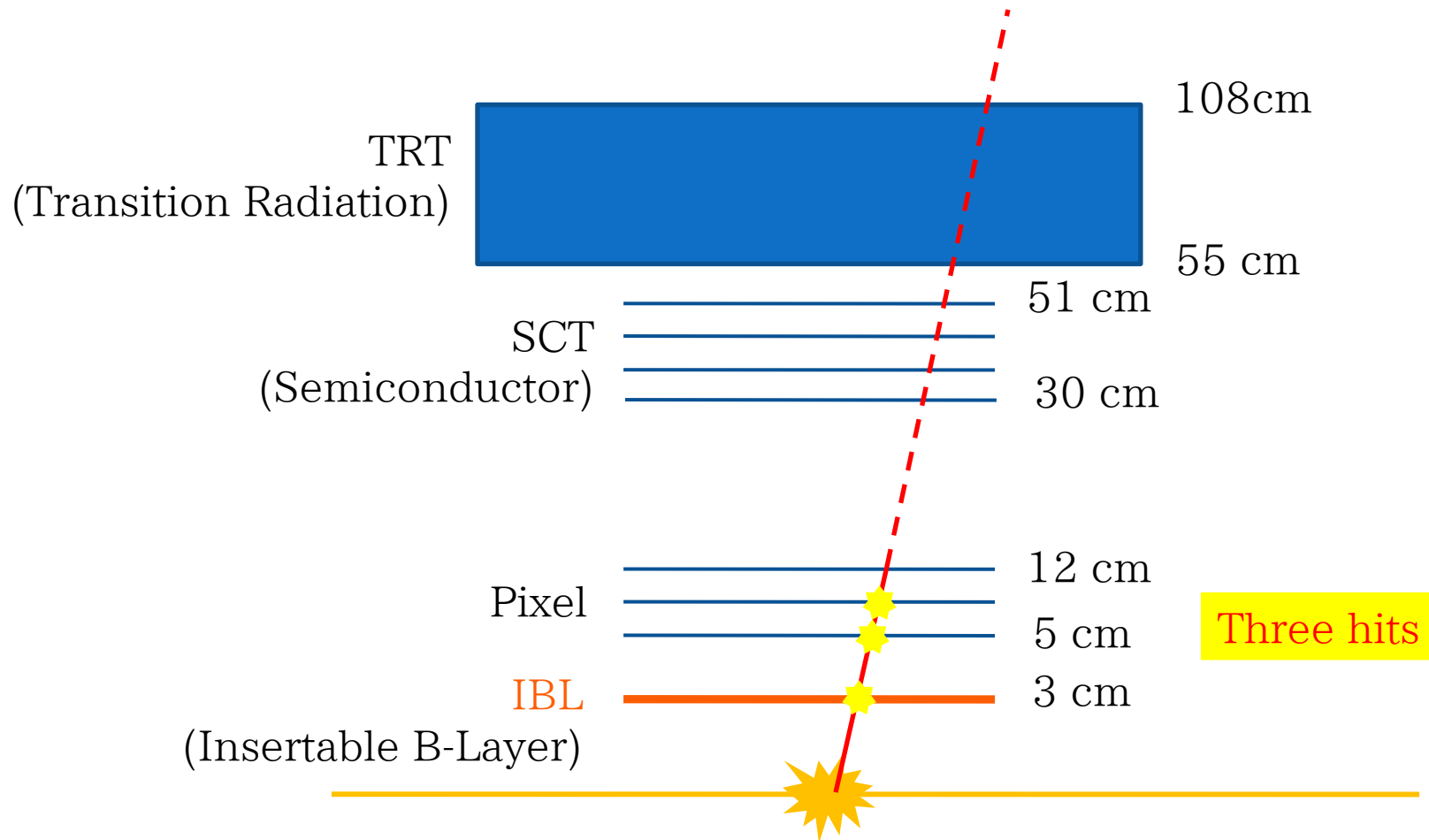
U(1)	Y	n	1	2	3	4	5
	0			C	~5 cm	C	~ 2 cm
	1/2		C	~1 cm	C	~ 1mm	C
	1		C	C	~1 mm	C	...
	3/2		C	C	C	~0.1mm	...
	2		C	C	C	C	...
	...		C	C	C	C	...

# Current Constraint(wino)

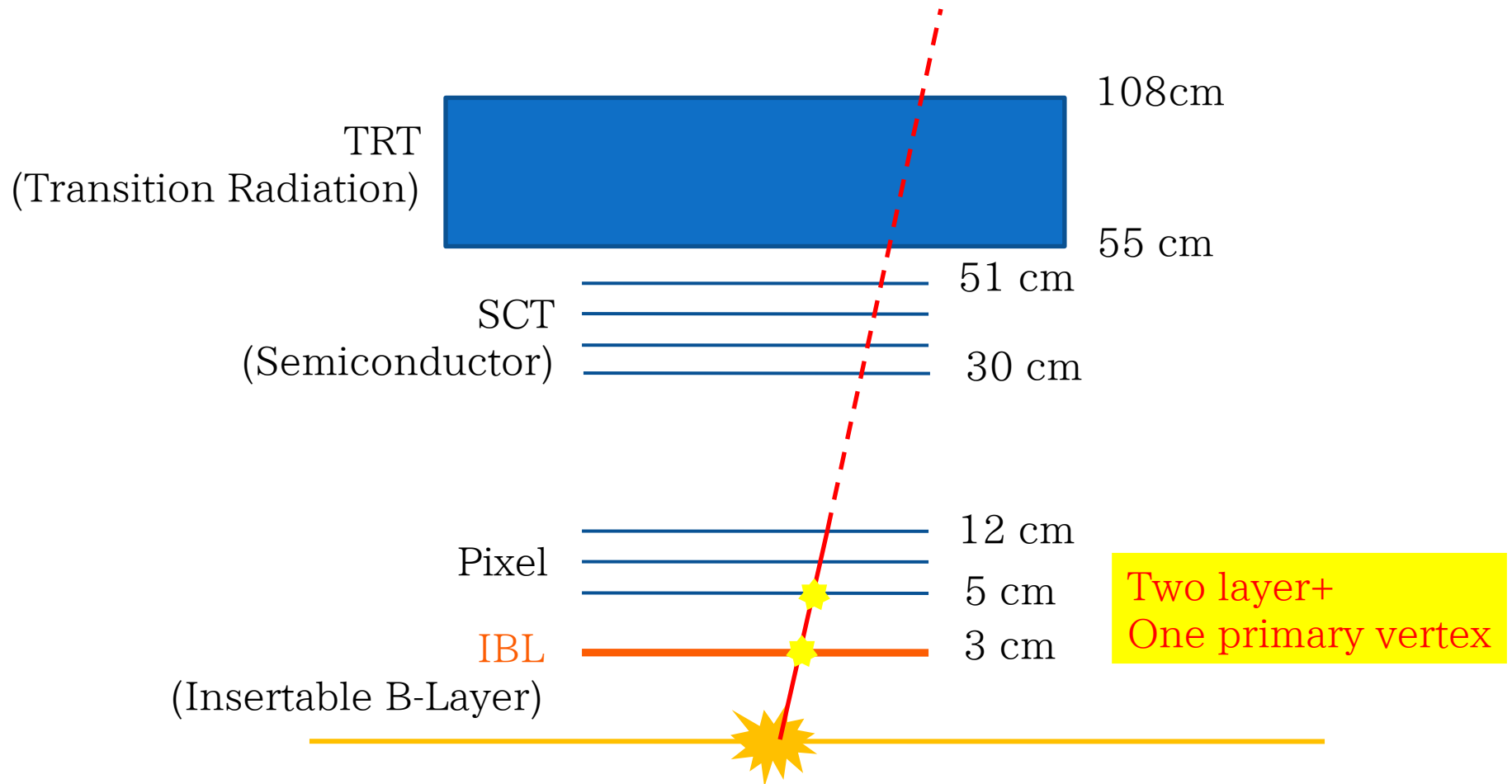




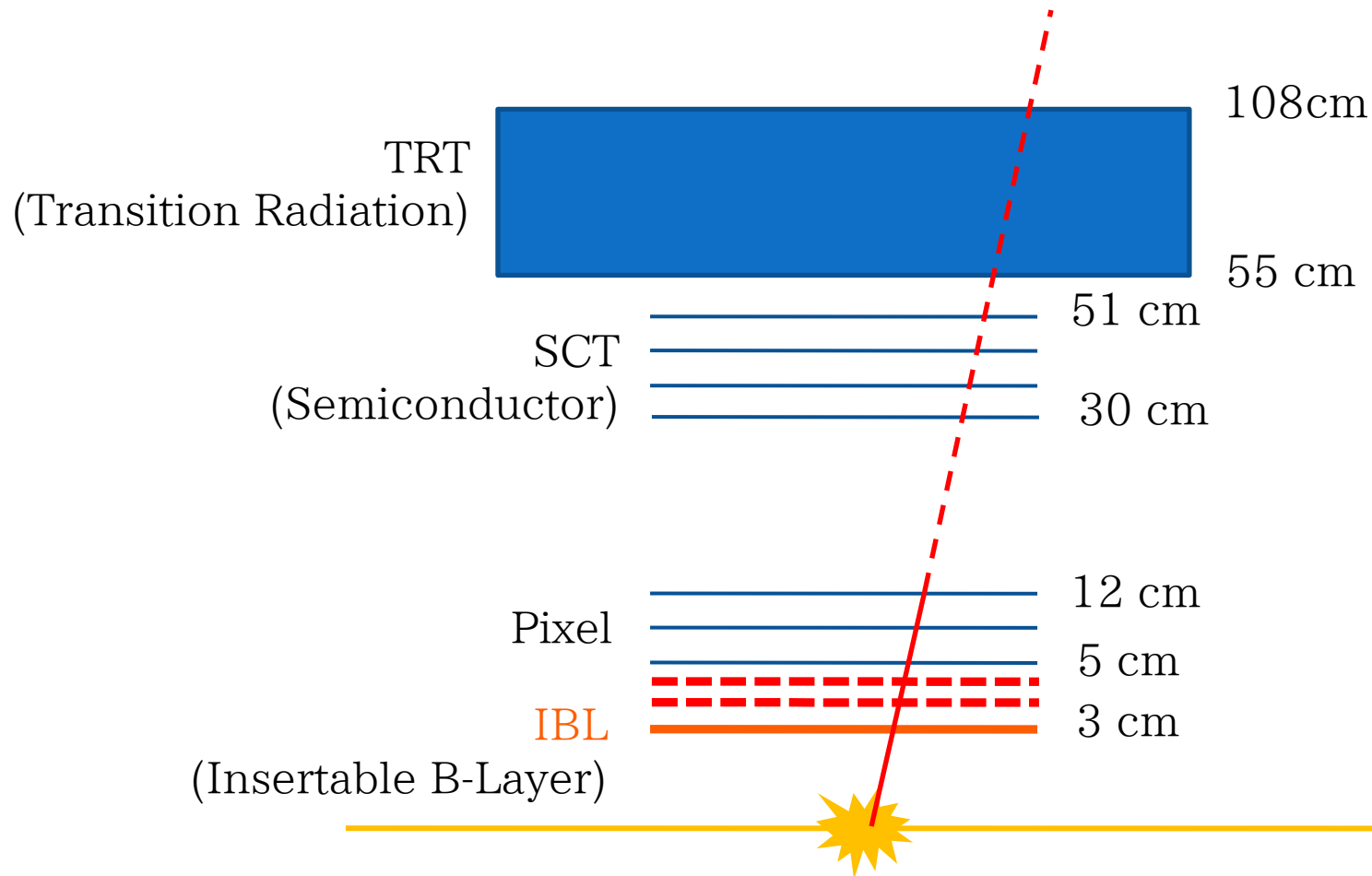
# Tracking shorter



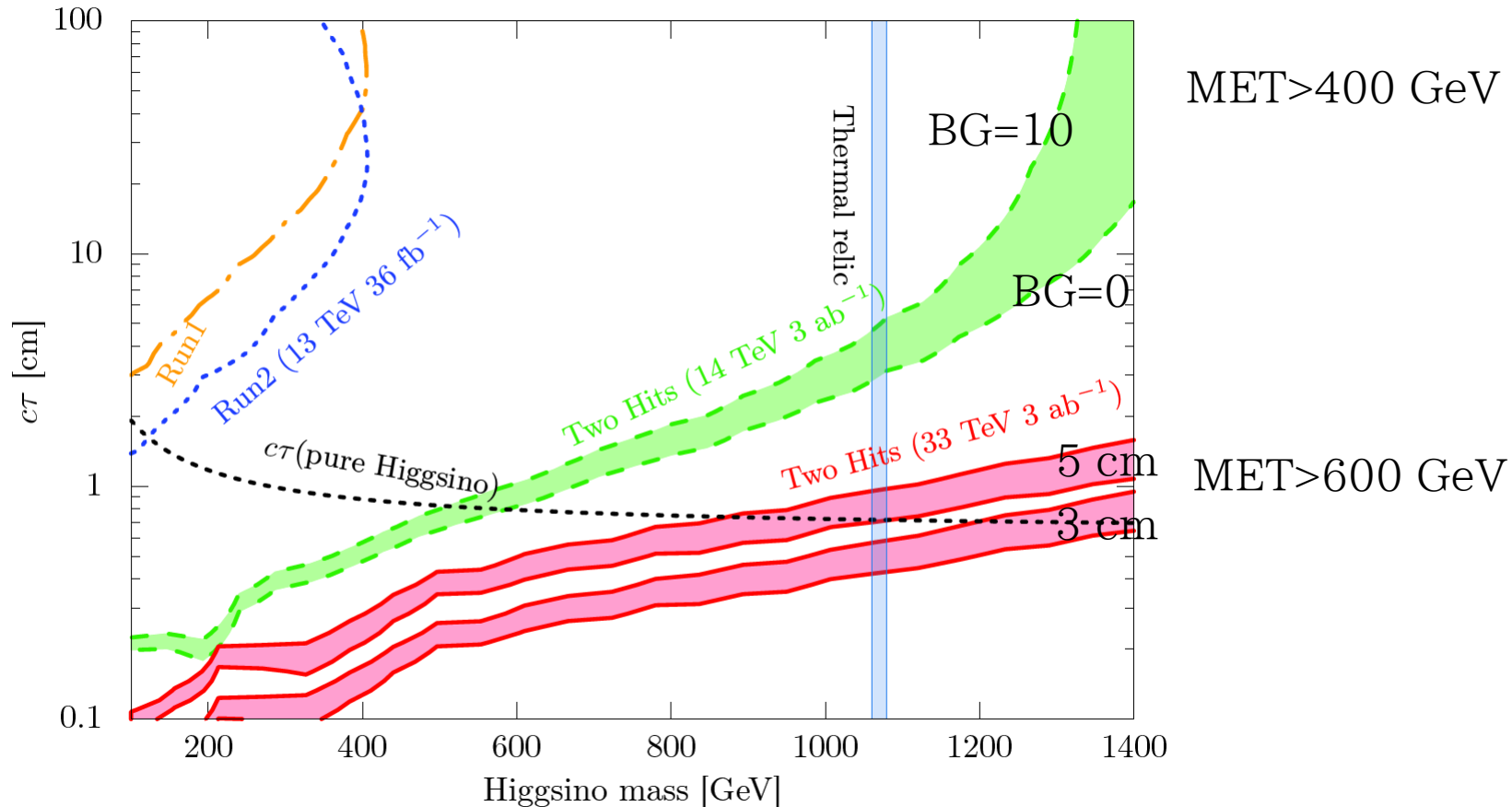
# Tracking shorter



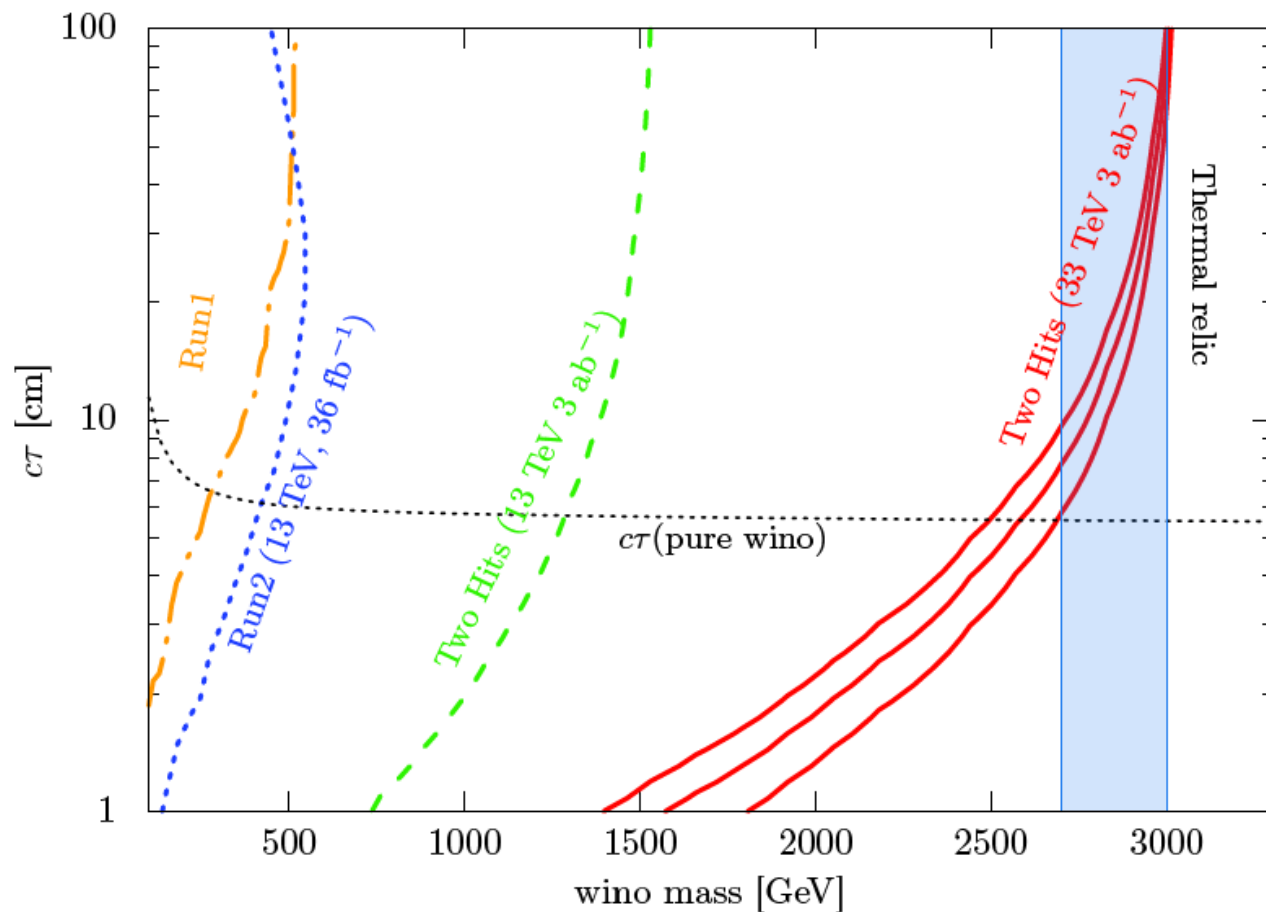
# Tracker for Run???



# Prospects for Higgsino



# Winoの楽観的な展望



- Trackerの向上
- Energyの向上
- 輝度の向上

3 TeVくらいまでいけるかも

# 荷電トラックから得られるもの

- 発見能力の向上
  - バックグラウンドを減らすのに効果的
- 寿命や質量差の測定
  - 暗黒物質の量子数の決定: 暗黒物質残存量

# SUSYの場合

# 超对称標準模型(SUSY)

## Standard Model (SM)

Lepton

Quark

Scalar Higgs

Gauge Boson

gluon

weak boson

photon

## SUSY Partner

Scalar Lepton

Scalar Quark

Higgsino

Gaugino

gluino

wino

bino



# 対称性

- 残っている対称性
  - R-parityなど
- 破れている対称性
  - SUSY
  - R-symmetry, PQ-symmetryなど
- 近似的対称性
  - G-parityなど

# Minimal模型の大雑把な特徴

- mSUGRA
  - Bino or HiggsinoがDM
- mAMSB
  - winoがDM
- mGMSB
  - gravitinoがDM

# Gravitino LSP

MSSMの中のNLSPは安定でない

NLSP  $\rightarrow$  gravitino + SM particle

$$\tau_X = \frac{48}{\pi} \frac{M_P^2 m_{3/2}^2}{m_X^5} \sim 10^5 \text{ sec} \left( \frac{m_X}{100 \text{ GeV}} \right)^{-5} \left( \frac{m_{3/2}}{1 \text{ GeV}} \right)^2$$

TOFやstopped Xなどが観測可能

寿命、質量の測定  $\rightarrow$  Planck scale 測定@加速器

# Split SUSY

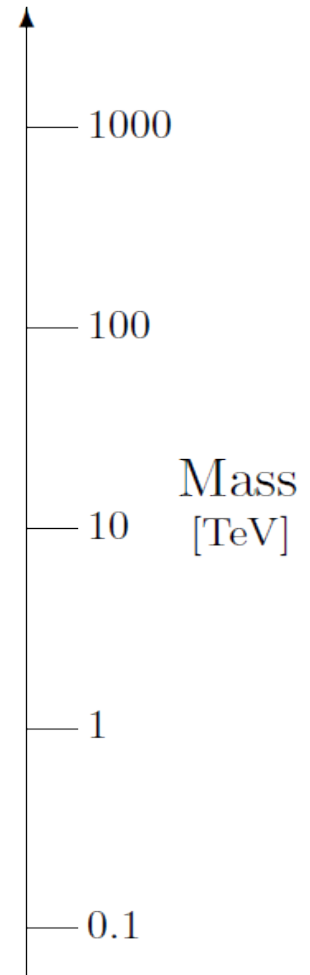
重いスカラー粒子

Gauginoとくにgluinoが安定化 (G-parity)

$$c\tau_{\tilde{g}} \sim 1 \text{ cm} \left( \frac{m_{\tilde{g}}}{1 \text{ TeV}} \right)^{-5} \left( \frac{m_s}{1 \text{ PeV}} \right)^4$$

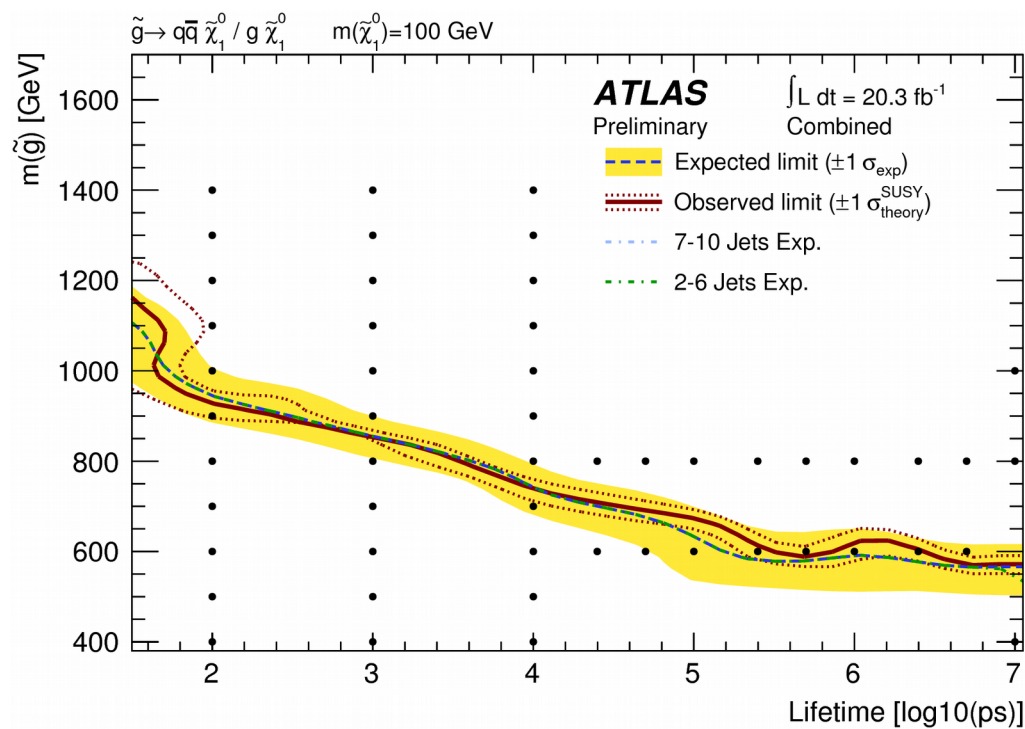
$$\frac{\tilde{q}, \tilde{l}, H}{\vdots} \quad \frac{\tilde{G}}{\tilde{h}}$$

$$\frac{\tilde{g}}{\tilde{B}} \quad \frac{\tilde{W}}{h^0}$$



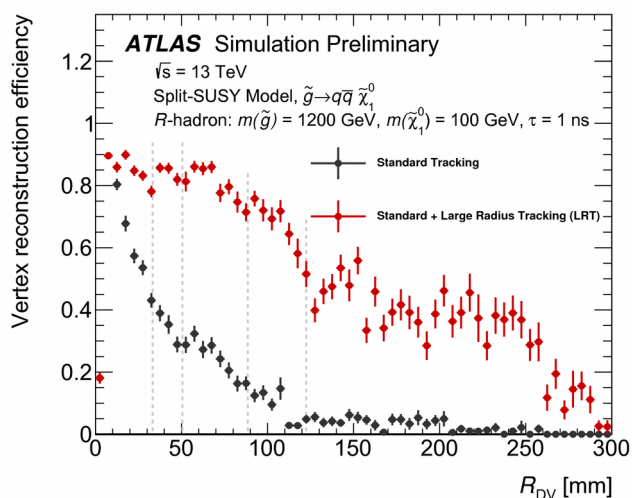
# Non-pointing シグナル

Conventional mutijets+METは悪くなる



ATLAS-CONF-2014-037

# Non-pointing シグナル

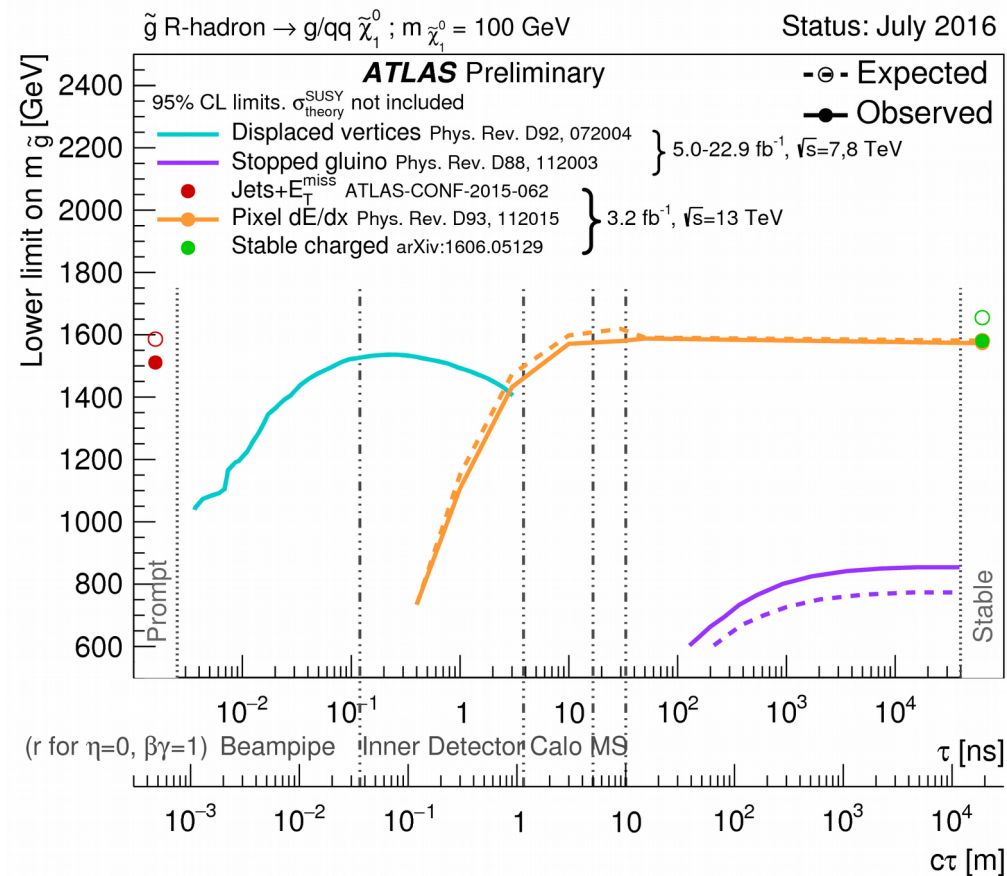


Displaced vertexを探す解析

Selection	Sub-Region	Category	Yield
<i>Event pre-selection</i> $n_{\text{trk}} = 3, m_{\text{DV}} > 10 \text{ GeV}$			Measured total 3093
	VRLM	(3 + 1)-track (2 + 2)-track Pure 4-track <i>Sub-total</i>	$12.6 \pm 0.3 \pm 1.1$ $3.6 \pm 3.6$ $0.3 \pm 0.9$ $16 \pm 4$
<i>Event pre-selection</i> $n_{\text{trk}} = 4, m_{\text{DV}} > 10 \text{ GeV}$			<b>Total</b> (after scaling by $\epsilon_{\text{VRLM}}$ ) $9 \pm 2$
	VRM	(3 + 1)-track Pure 4-track <b>Total</b>	$137 \pm 3 \pm 30$ $16 \pm 47$ $150 \pm 60$
		5-tracks (4 + 1)-track (2 + 3)-track Pure 5-track <b>Total</b>	$1.30 \pm 0.07 \pm 0.12$ $0.01 \pm 0.01$ $0.9 \pm 2.8$ $2.2 \pm 2.8$
<i>Event pre-selection</i> $n_{\text{trk}} \geq 5, m_{\text{DV}} > 10 \text{ GeV}$			
		6-tracks Pure 6-track <b>Total</b>	$0.37 \pm 0.03 \pm 0.04$ $0.2 \pm 0.6$ $0.6 \pm 0.6$
		$\geq 7$ -tracks (n + 1)-track Pure $\geq 7$ -track <b>Total</b>	$0.37 \pm 0.03 \pm 0.04$ $1 \pm 3$ $1 \pm 3$
	<b>Total</b>		$4.2 \pm 4.1$
<b>Full SR selection</b>	<b>Total</b>	(after scaling by $\epsilon_{\text{SR}} \times \kappa$ )	$0.02 \pm 0.02$

ATLAS-CONF-2017-026

# Meta-stable Gluino



# Coannihilation DM

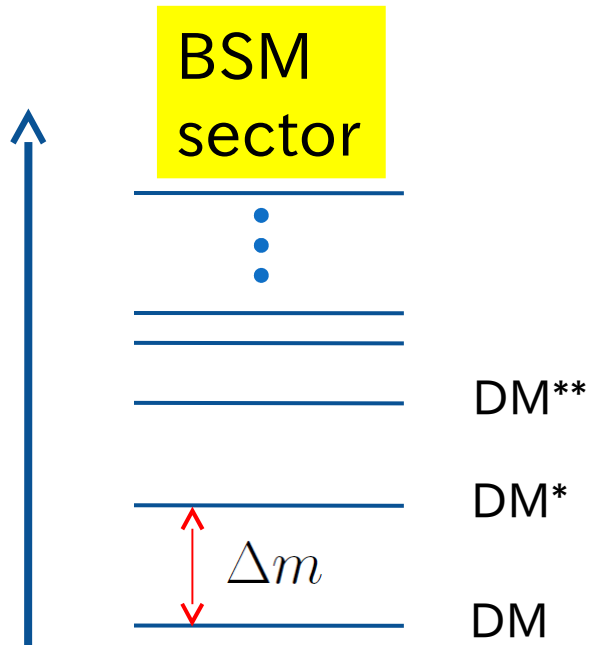
## 縮退した質量差によって長寿命になる可能性

[Nagata, Otono, SS, 15,17]



# Mass Spectrum

BSM models may provide several particles in addition to DM.



Examples:

SUSY

Neutralino, Chargino, Gluino...

Extra Dimension

KK photon, KK gluon...

$$\Delta m \ll m_{\text{DM}}$$



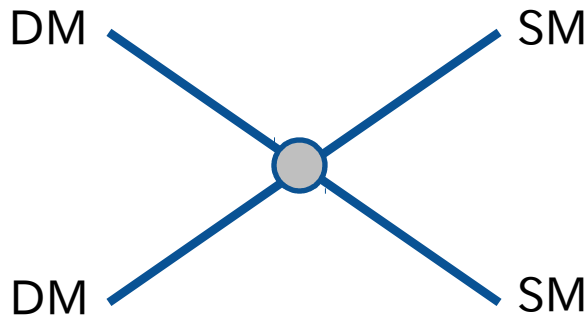
Coannihilation

# Coannihilation 1

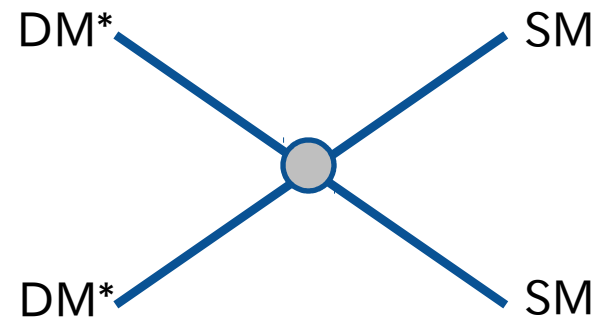


簡単のため

$$\sigma_{\text{DM}} \ll \sigma_{\text{DM}^*}$$



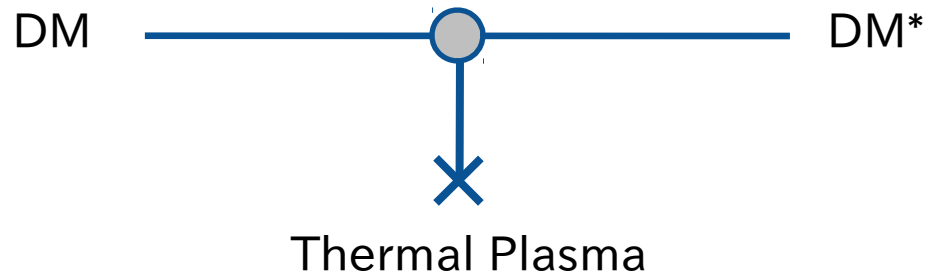
$\ll$



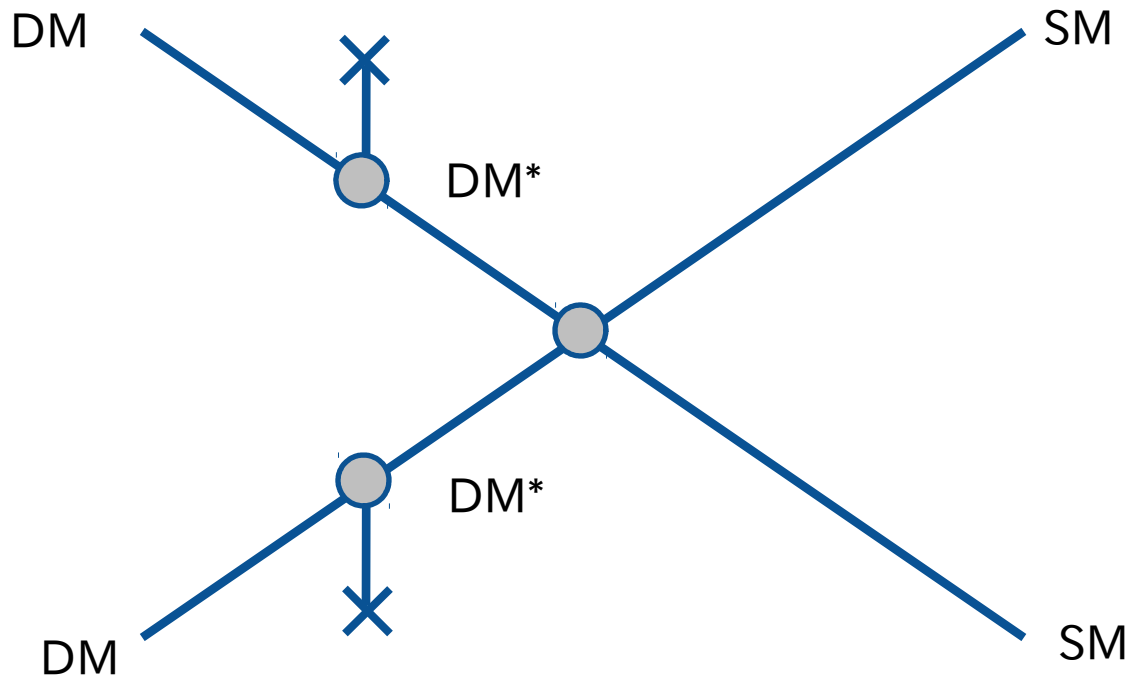
# Coannihilation 2

初期宇宙では

DM  $\leftrightarrow$  DM\*の変移は速い



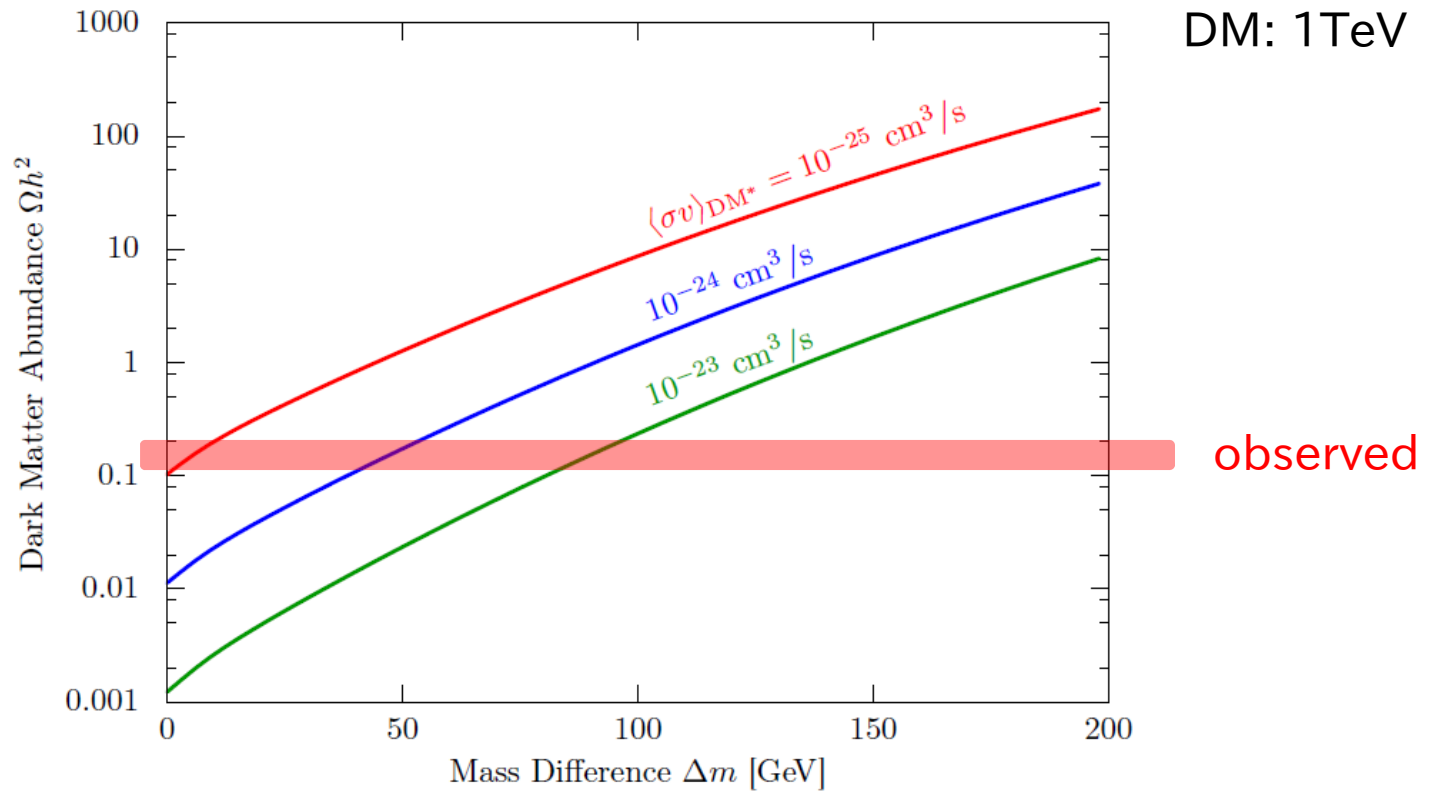
# Coannihilation 3



初期宇宙では $DM^*$ を介して有効的な対消滅が起きる

# Coannihilation 4

DM abundance v.s. mass difference



# Coannihilation 5

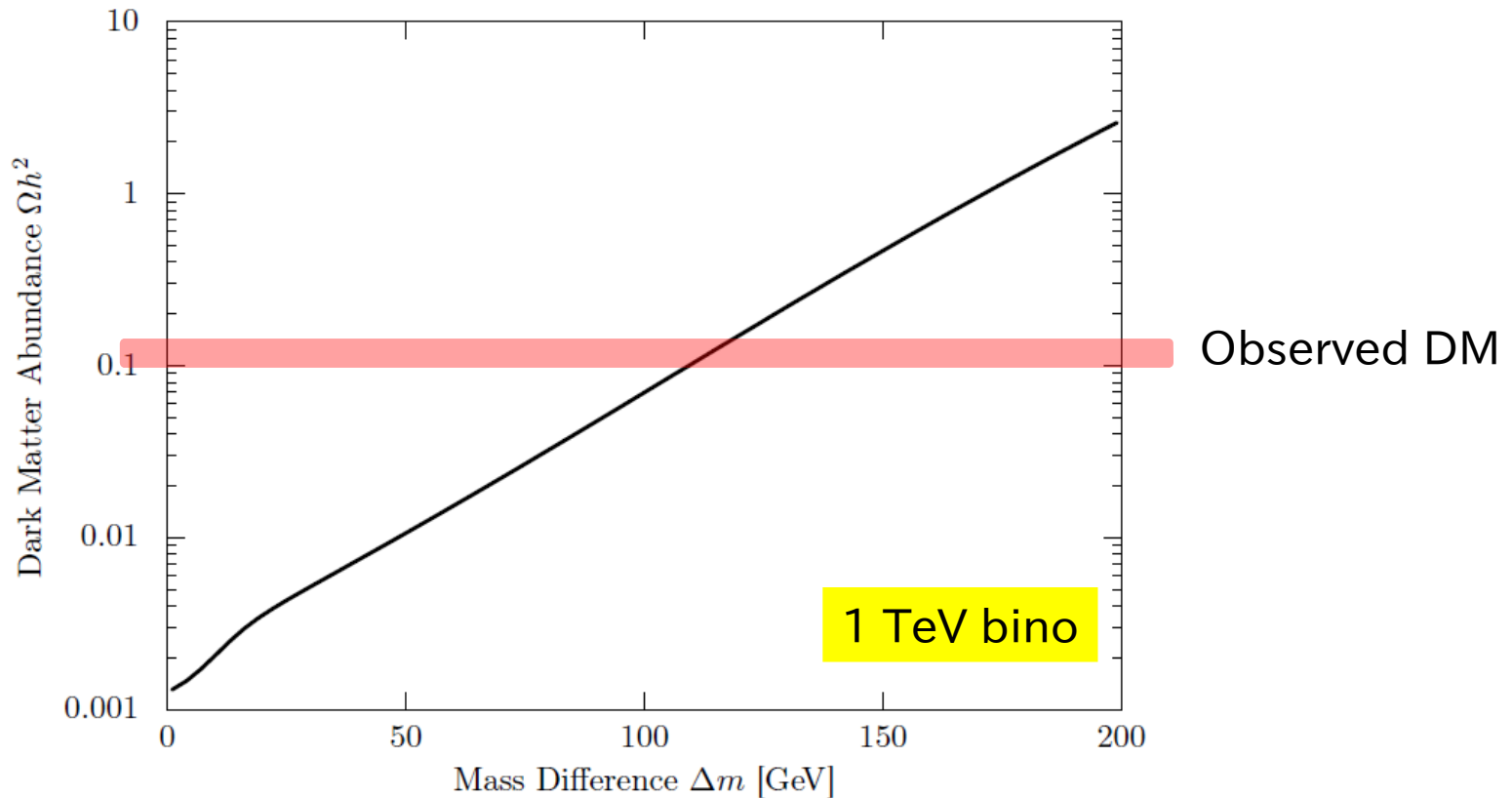


coannihilation に必要なこと

- 小さな質量差
- Large annihilation of DM\*
- (“Rapid”  $DM^* \leftrightarrow DM$  conversion )

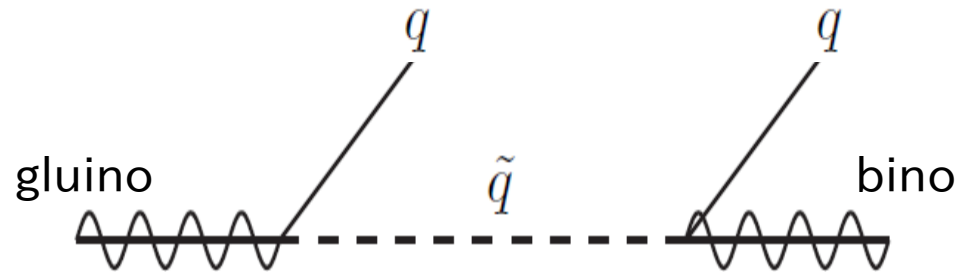
# 例1 Bino-Gluino Coannihilation

Dark matter abundance

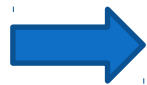


Glauino-bino mass difference

# Bino-Gluino Interaction



Bino-gluino interaction is suppressed by sfermion mass



Long-lived gluino

$$c\tau_{\tilde{g}} = O(1) \left( \frac{\Delta m}{100 \text{ GeV}} \right)^{-5} \left( \frac{M_s}{100 \text{ TeV}} \right)^4 \text{ cm}$$

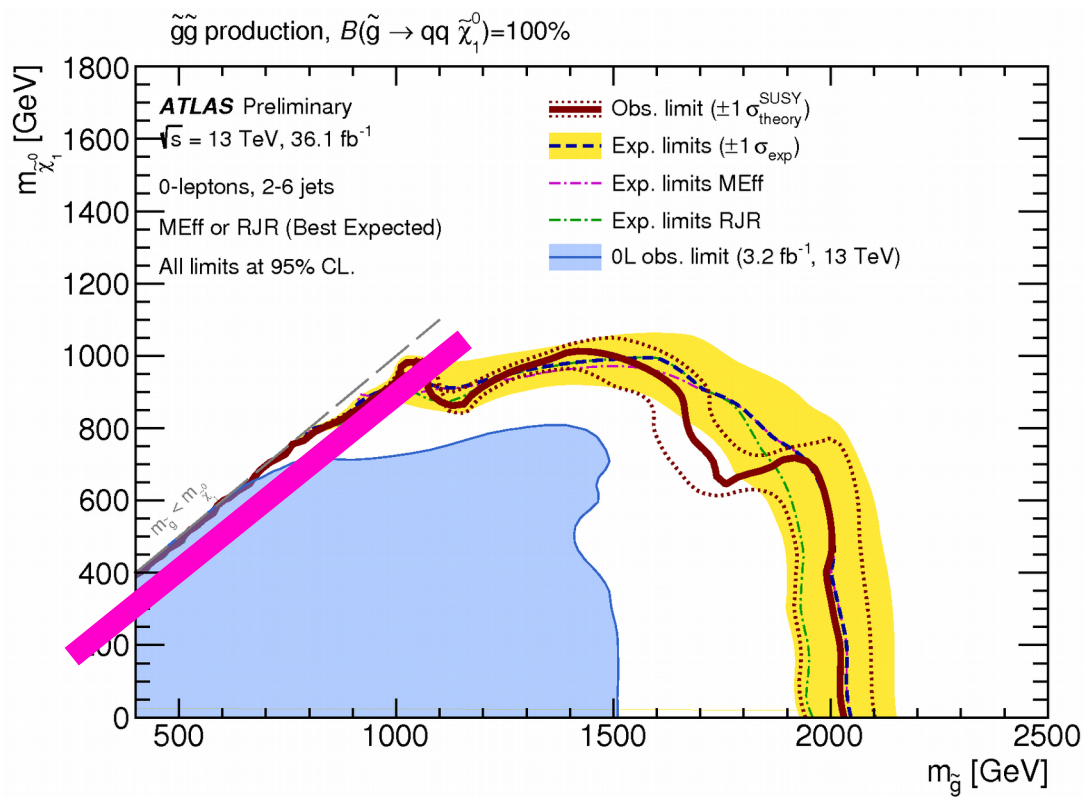


Too heavy sfermion prevents coannihilation

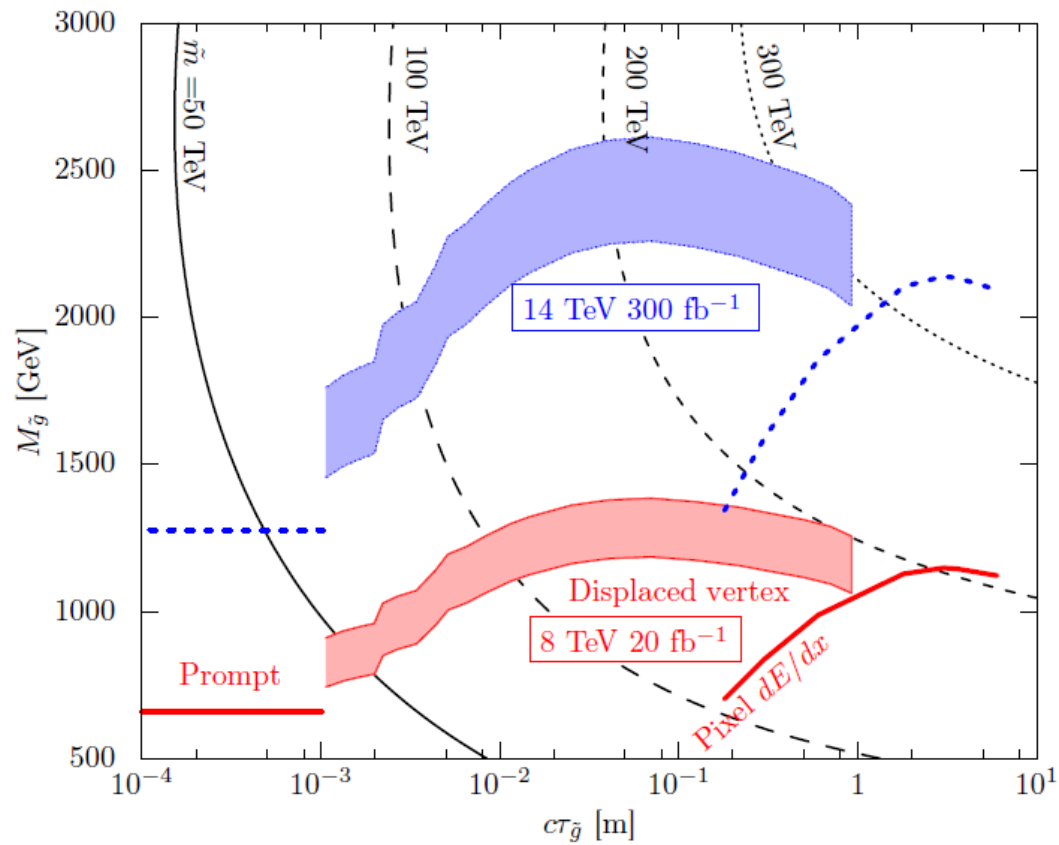
$$M_s \lesssim 250 \left( \frac{M_{\text{bino}}}{1 \text{ TeV}} \right)^{3/4} \text{ TeV}$$



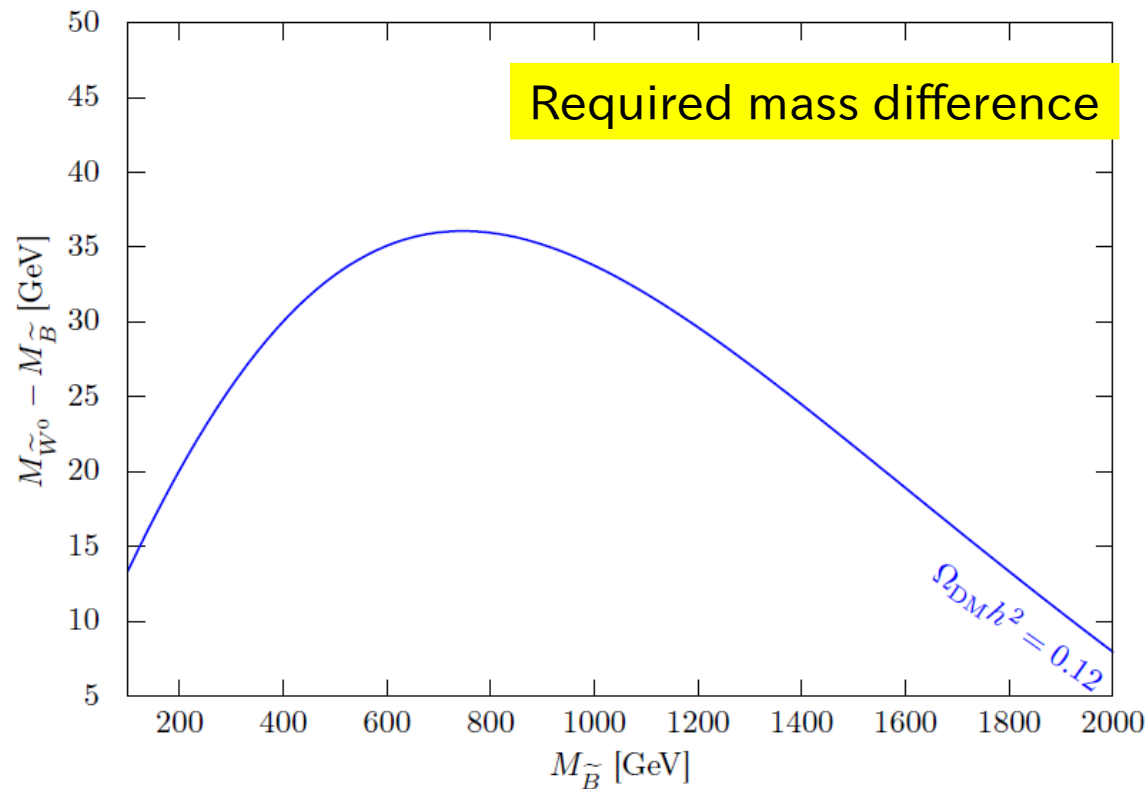
# 縮退は難しいシグナル



# Prospects

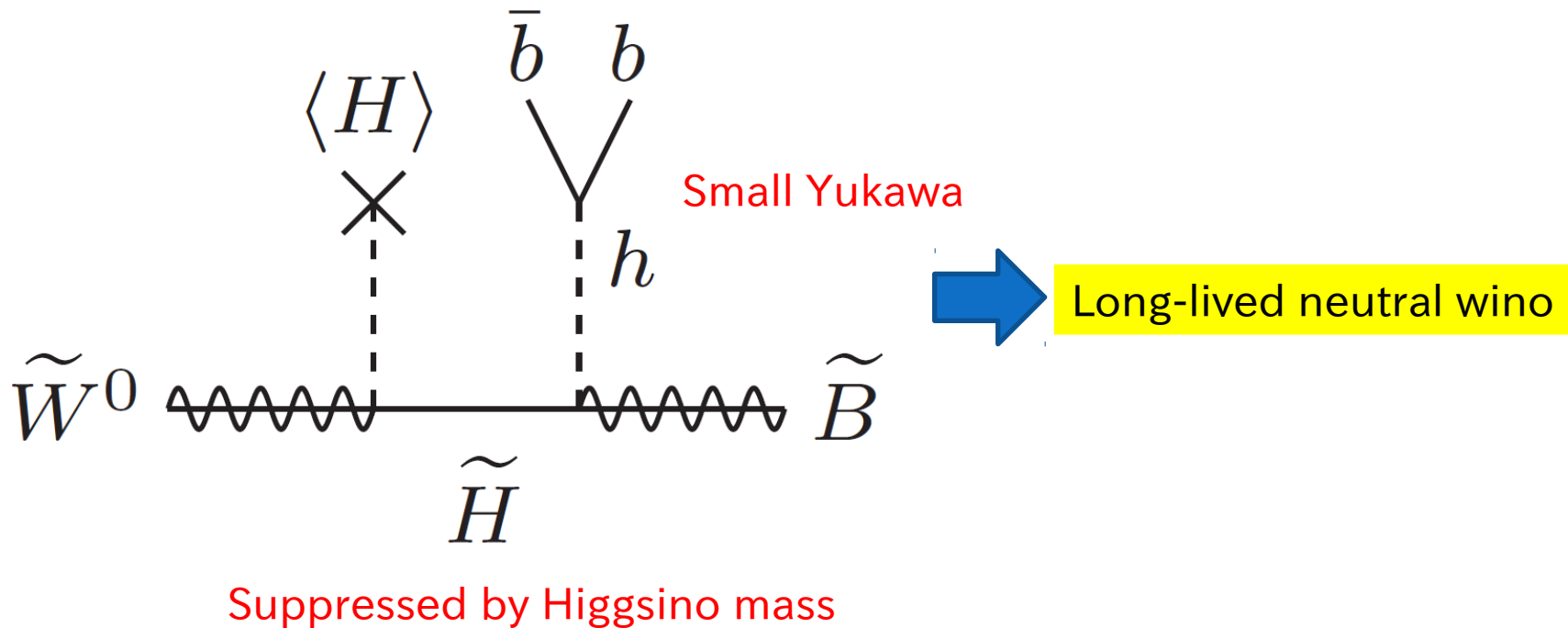


# 例2: Bino-Wino Coannihilation



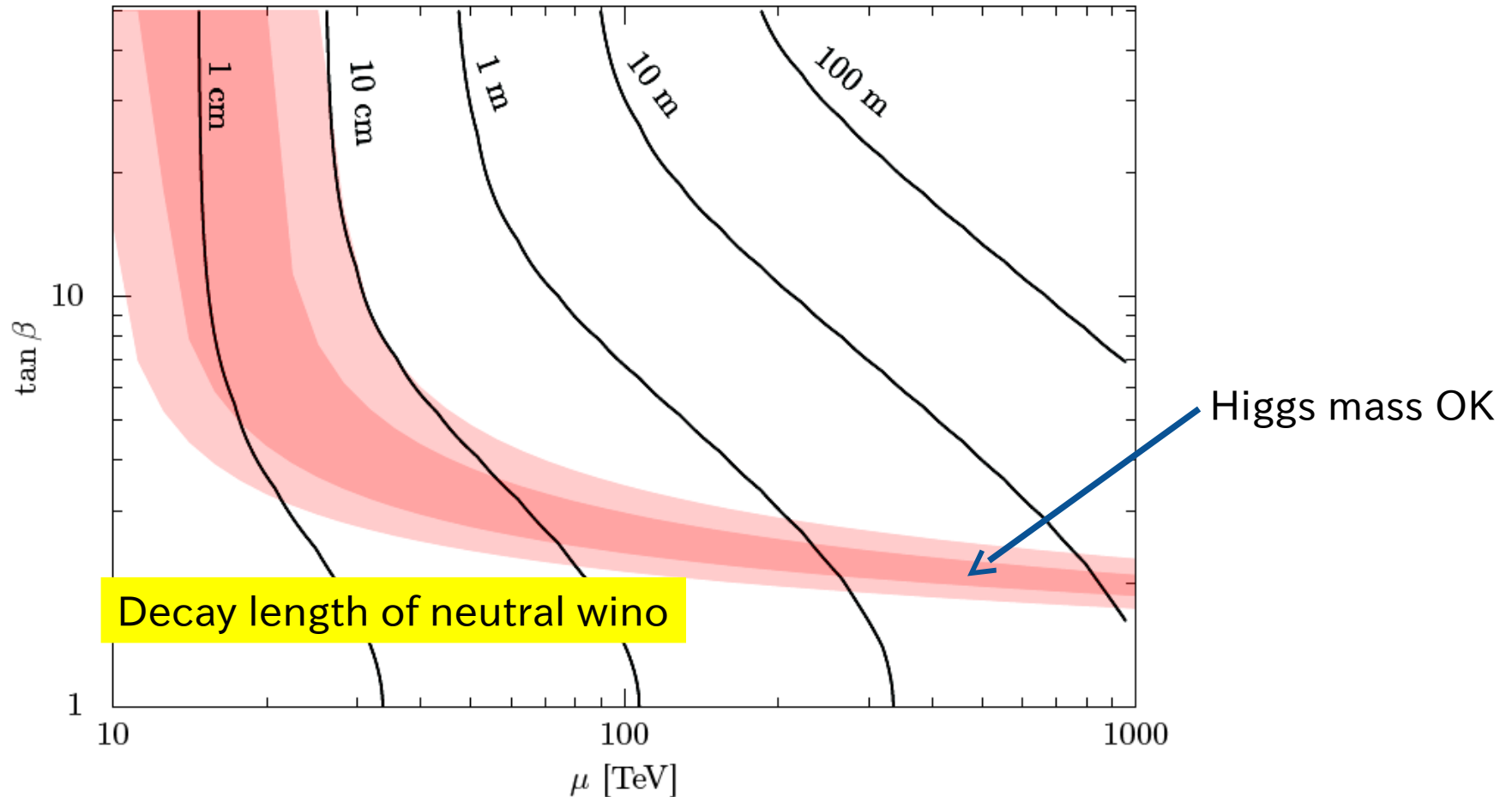
A few tens of GeV mass diff.

# Wino Decay (tree)

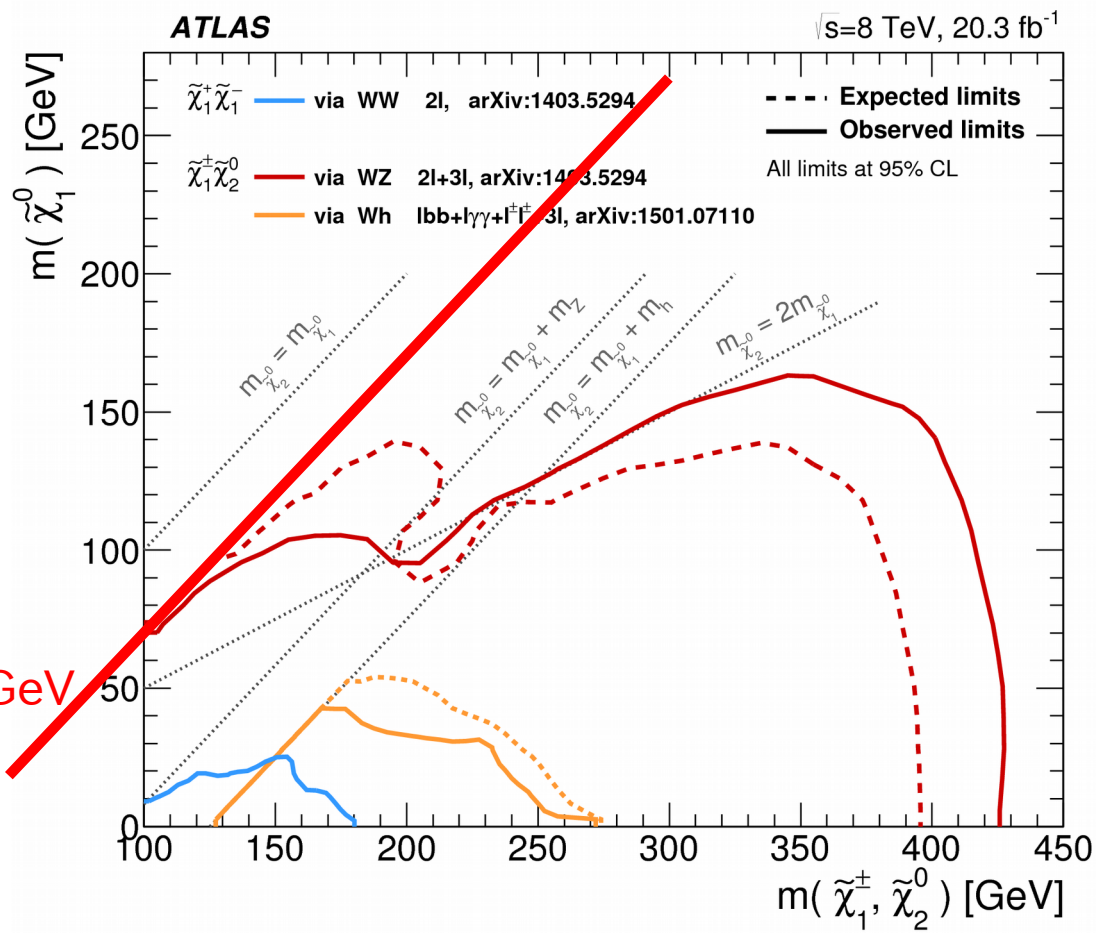


# Wino Decay

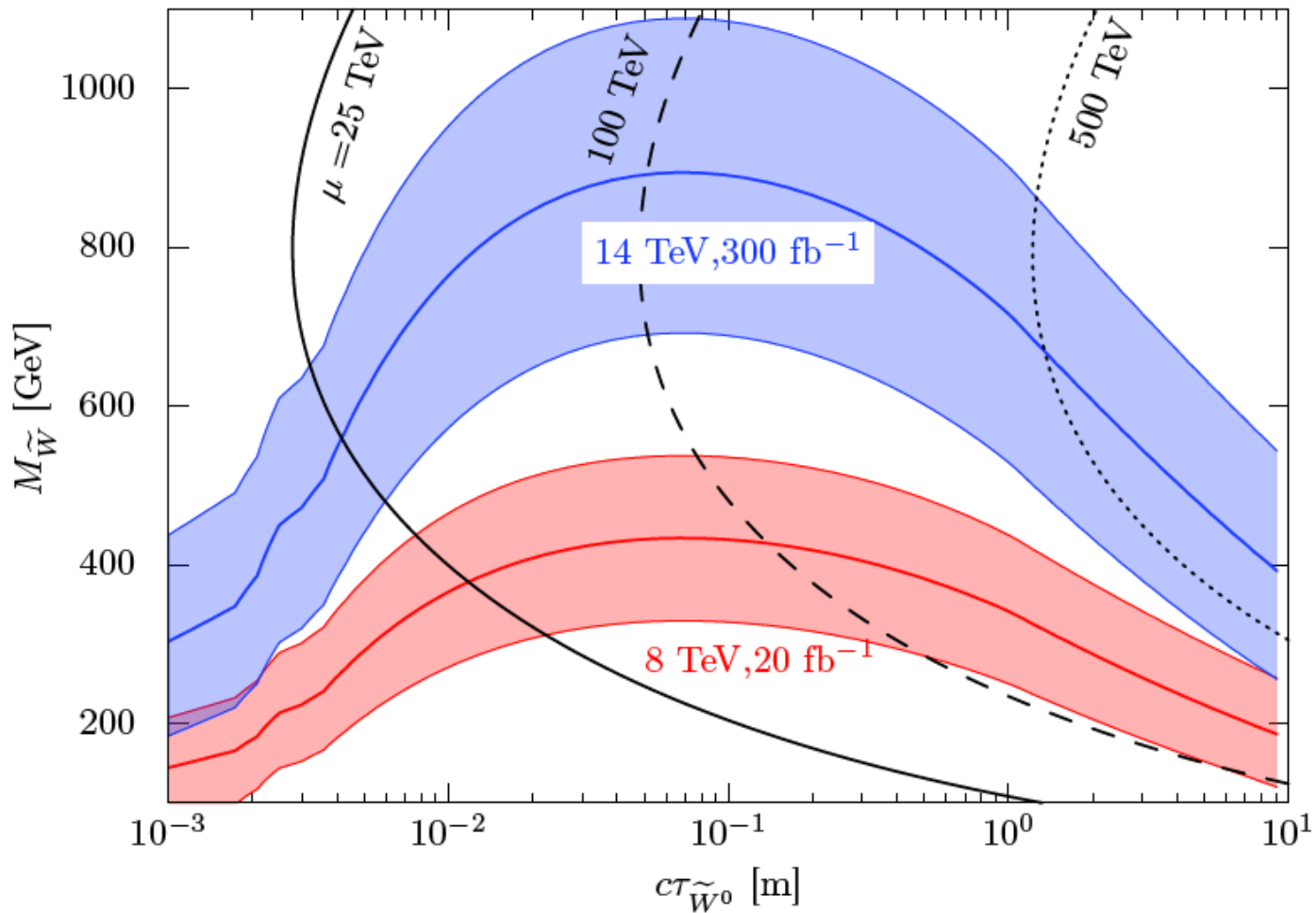
Bino = 400 GeV  
Wino = 430 GeV



# LHC Signals



# LHC Signals



# Coannihilation

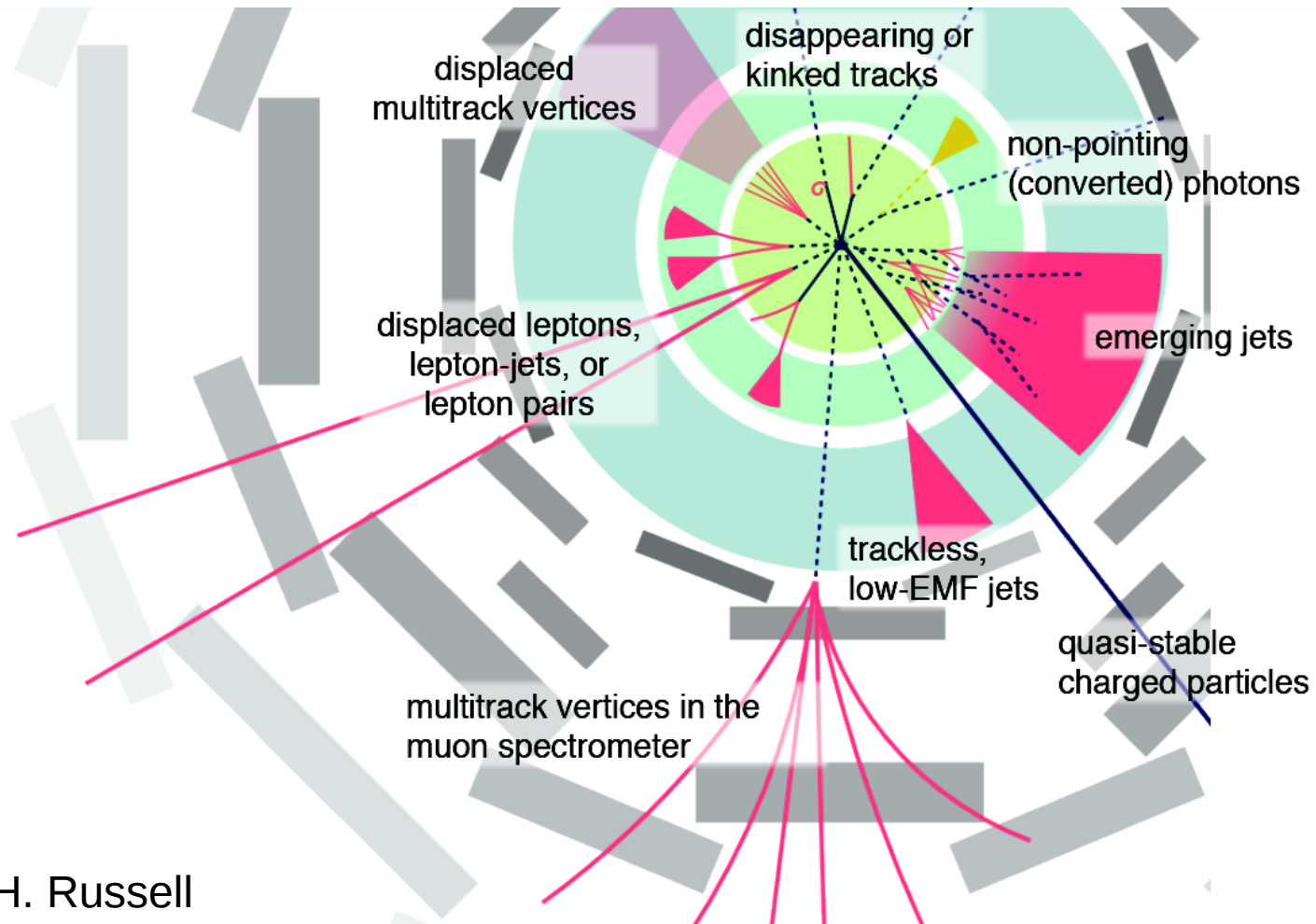
- 発見能力の向上
  - バックグラウンドを減らすのに効果的
- 質量差の測定
  - 暗黒物質残存量



# 他の可能性@SUSY

- Coannihilation
  - Stau-binoとかstop-binoでも起きうる
- R-parityの破れ
  - LSPの崩壊率は大きくない
- R-axion from R-symmetryの破れ
  - 軽いGoldstone粒子がlong-lived
- Axino (SUSY partner of axion)への崩壊
  - Gravitino LSPの時に似ている

# 様々な可能性

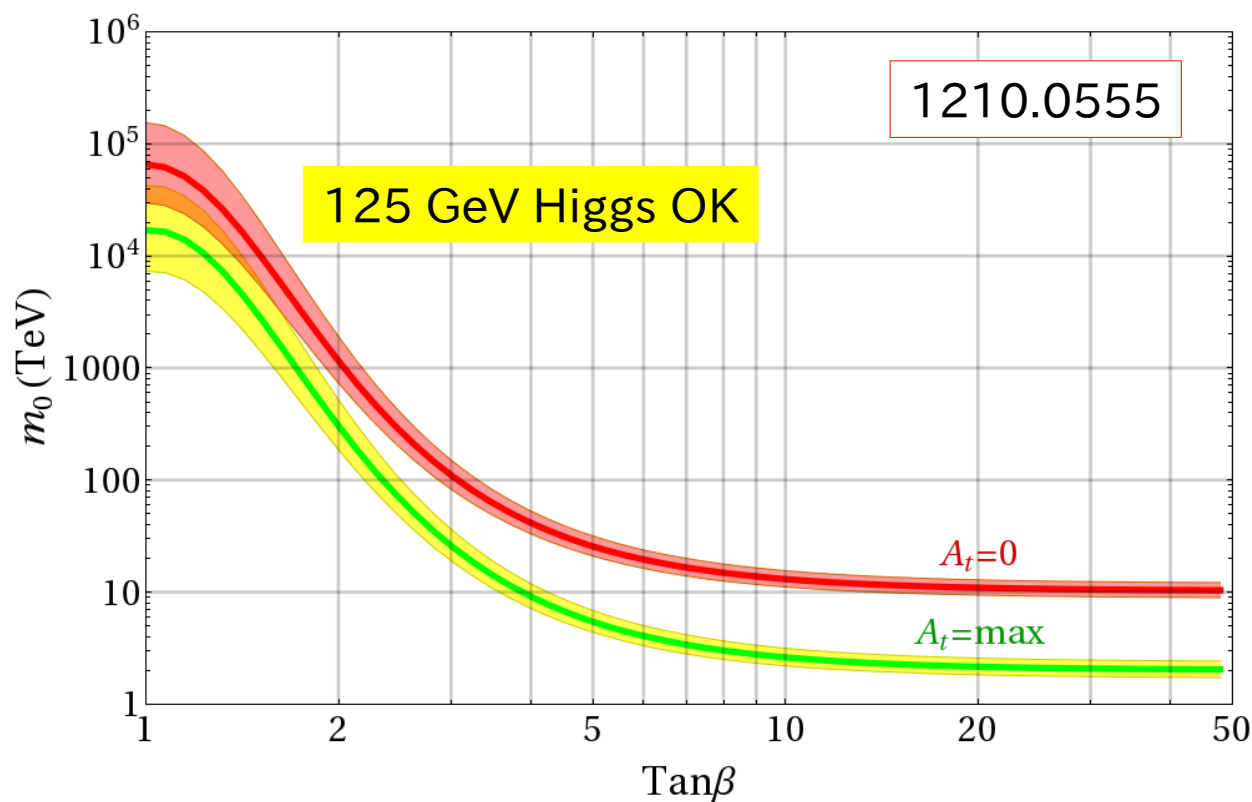


H. Russell

# まとめ

- 長生き粒子@BSMは自然な予言
- 長生き粒子は発見に役立つ
- 精密な測定は背後にある対称性や高エネルギーの物理に役立つ
- 宇宙論的にも極めて大事
- 探査方法はかなりnon-trivial

# SUSYの破れの大きさとHiggs



TeV以上のSUSYの破れが必要

# Wino Decay

$$\tilde{W}^\pm \rightarrow W^\pm + \tilde{B} \quad \propto \mu^{-1}$$



Prompt charged Wino decay

$$\tilde{W}^0 \rightarrow h + \tilde{B} \quad \propto \mu^{-1}$$

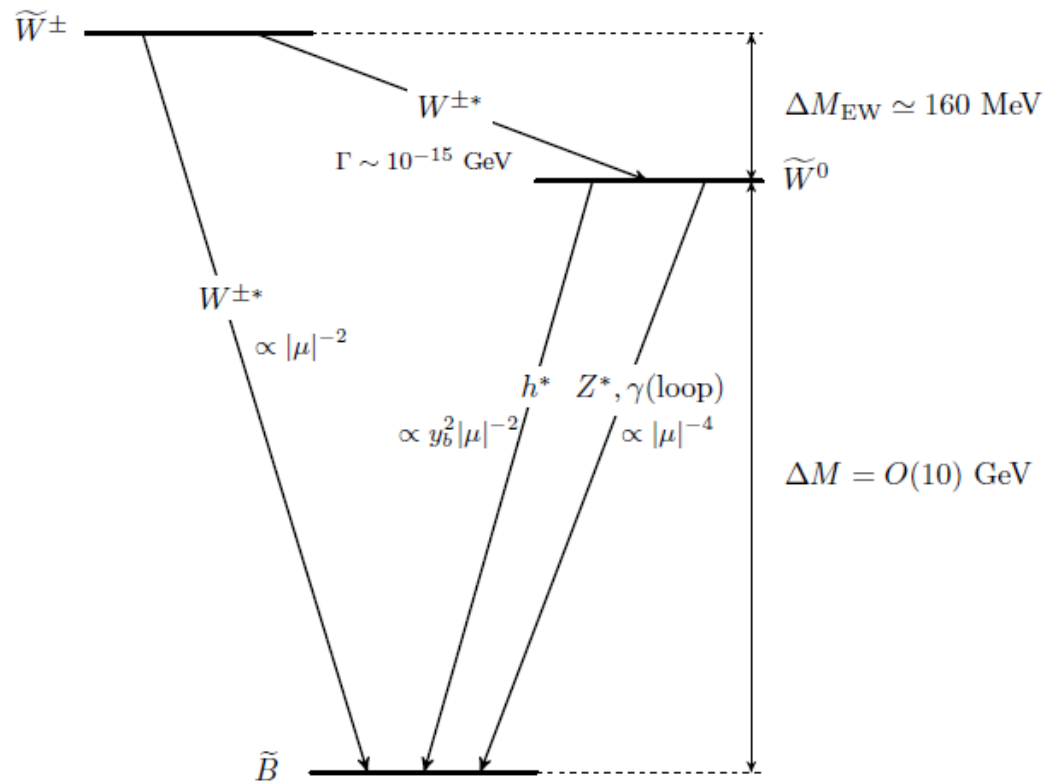
$$\tilde{W}^0 \rightarrow Z + \tilde{B} \quad \propto \mu^{-2}$$

$$\tilde{W}^0 \rightarrow \gamma + \tilde{B} \quad \propto \frac{\alpha}{4\pi} \mu^{-2}, \left(\frac{\alpha}{4\pi}\right)^2 \mu^{-1}$$

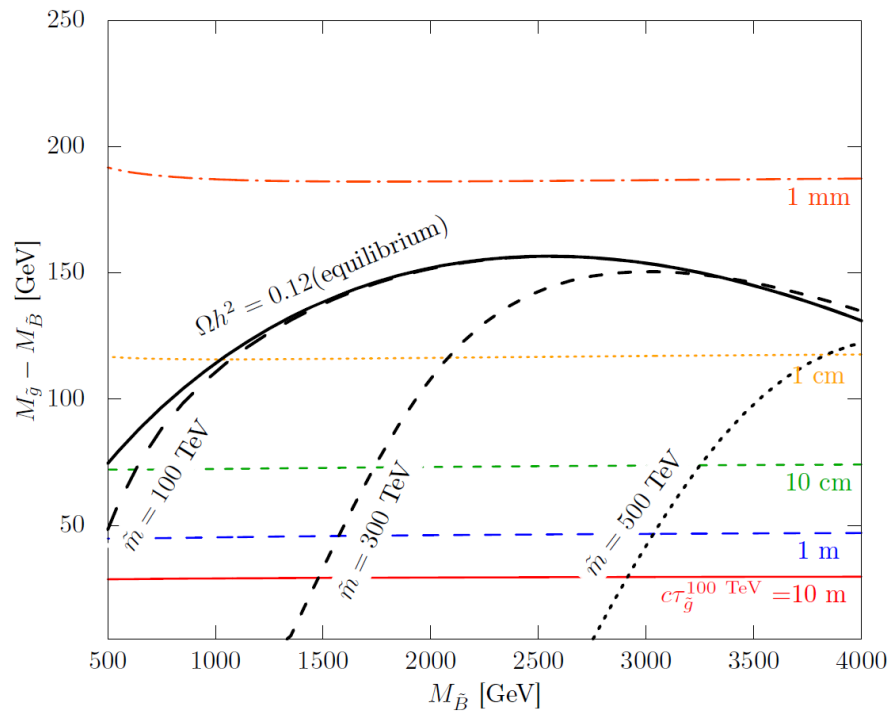


Displaced neutral Wino decay

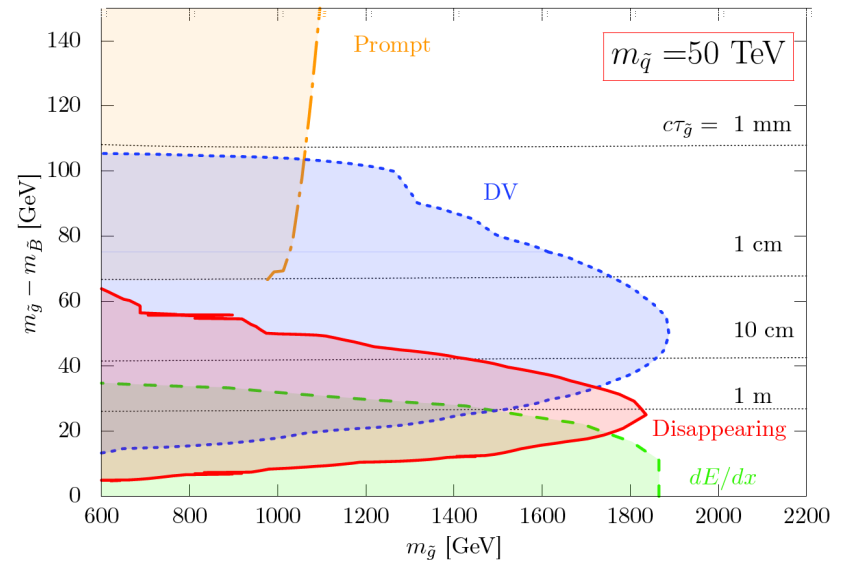
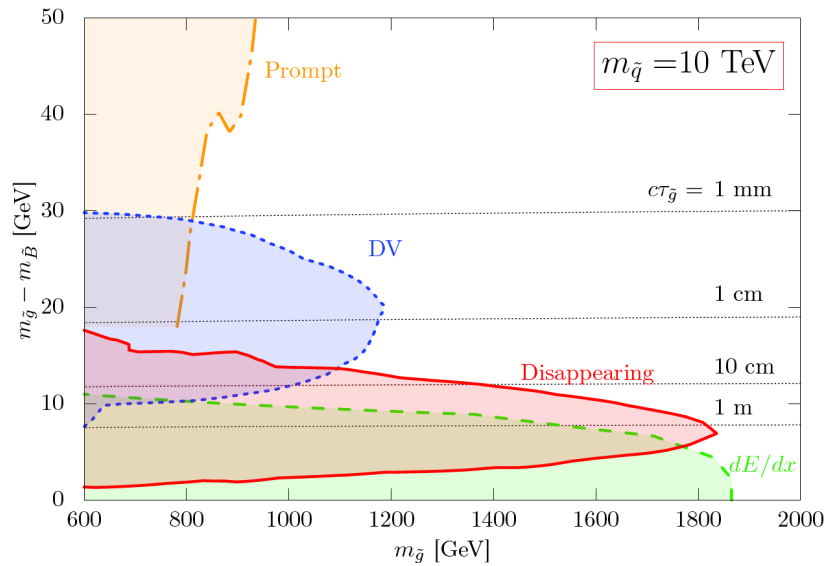
# Mass Spectrum



# Mass diff and abundance



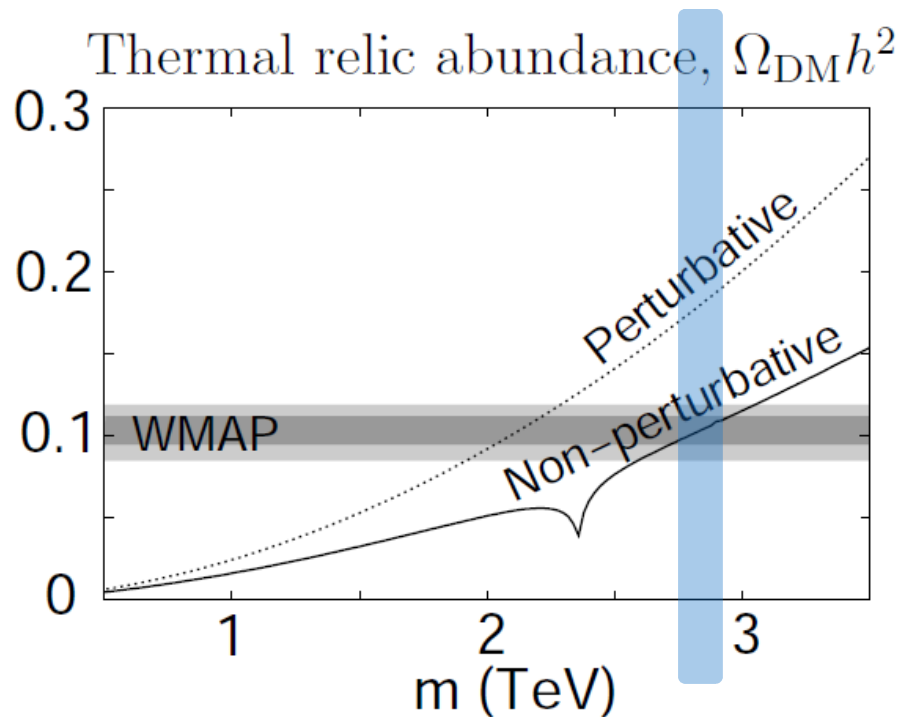
# Constraints





# Wino DMの(熱的)残存量

[Hisano, Matsumoto, Nagai, Seto, Senami, 06]



3 TeV以下ならOK