

# $O(1)$ eV のグラビティーノ質量の決定

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

素粒子論研究室


白井智

# 内容

1. なぜ軽いグラビティーノ？
2. グラビティーノ@LHC
3. グラビティーノの質量決定

# 1. なぜ軽いグラビティーノ？

# グラビティーノ

(Local) SUSY  グラビティーノ

SUSY の破れ   $m_{3/2} \sim \frac{\Lambda^2}{M_P}$

$\Lambda$  : SUSY breaking scale.

$$m_{3/2} = 1 \text{ eV} - 100 \text{ TeV}$$

# グラビティーノ問題

1. **重い場合**  $m_{3/2} > \mathcal{O}(100)$  GeV

不安定. ビッグバン元素合成を妨げる.

2. **軽い場合**  $\mathcal{O}(10)$  GeV  $> m_{3/2} > \mathcal{O}(1)$  MeV

安定. DMを作りすぎる.

3. **非常に軽い場合**  $m_{3/2} = \mathcal{O}(1)$  eV

相互作用の強さ  $\propto \frac{1}{m_{3/2} M_P}$

# グラビティーノ問題

1. 重い場合  $m_{3/2} > \mathcal{O}(100) \text{ GeV}$

不安定

グラビティーノ問題

$m_{3/2} > \mathcal{O}(1) \text{ MeV}$

$M_{\text{Pl}}$ を作りすぎる。

3. 非常に軽い場合  $m_{3/2} = \mathcal{O}(1) \text{ eV}$

相互作用の強さ  $\propto \frac{1}{m_{3/2} M_P}$

# グラビティーノ問題

1. 重い場合  $m_{3/2} > \mathcal{O}(100) \text{ GeV}$

不安定

グラビティーノ問題

$m_{3/2} > \mathcal{O}(1) \text{ MeV}$

$M$ を作りすぎる。

3. 非常に軽い場合  $m_{3/2} = \mathcal{O}(1) \text{ eV}$

相互作用の強さ  $\propto \frac{1}{m_{3/2} M_P}$

$m_{3/2} = \mathcal{O}(1) \text{ eV}$  のとき

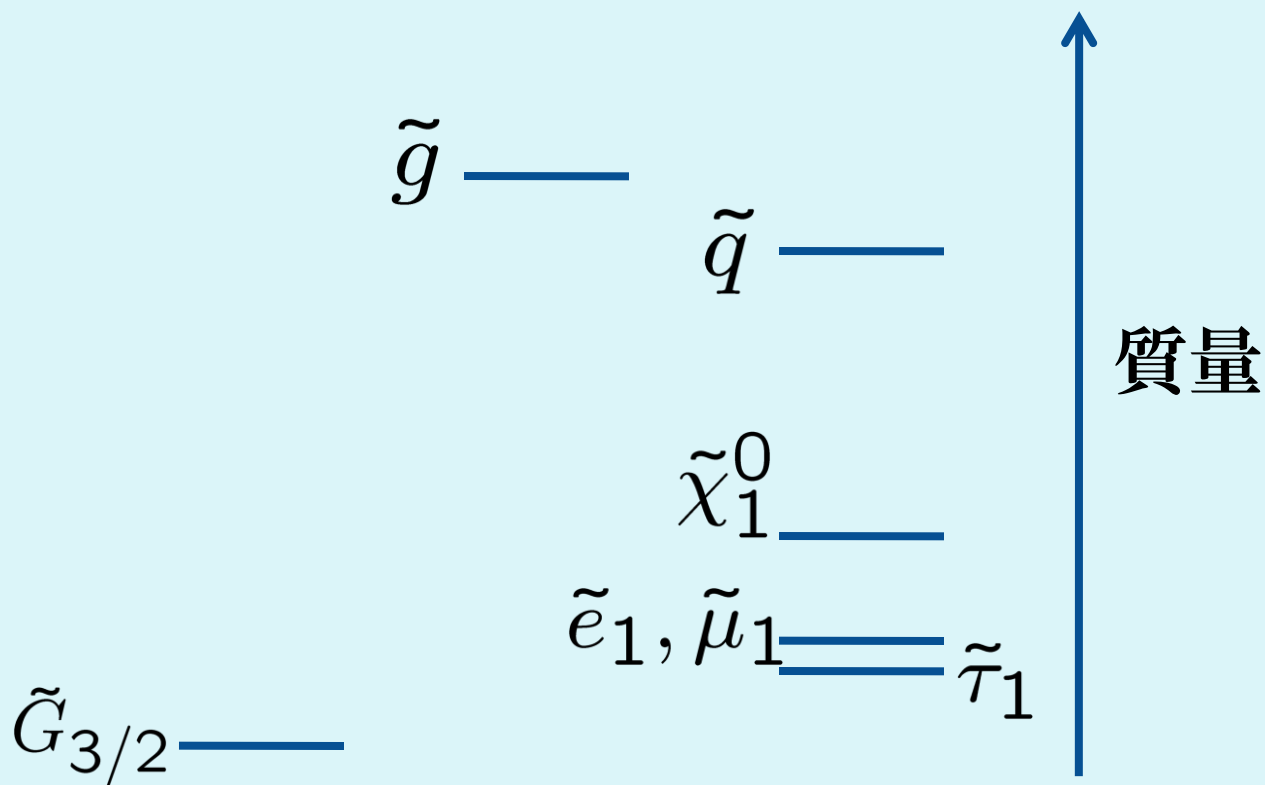
LHCでは？



## 2. グラビティーノ@LHC

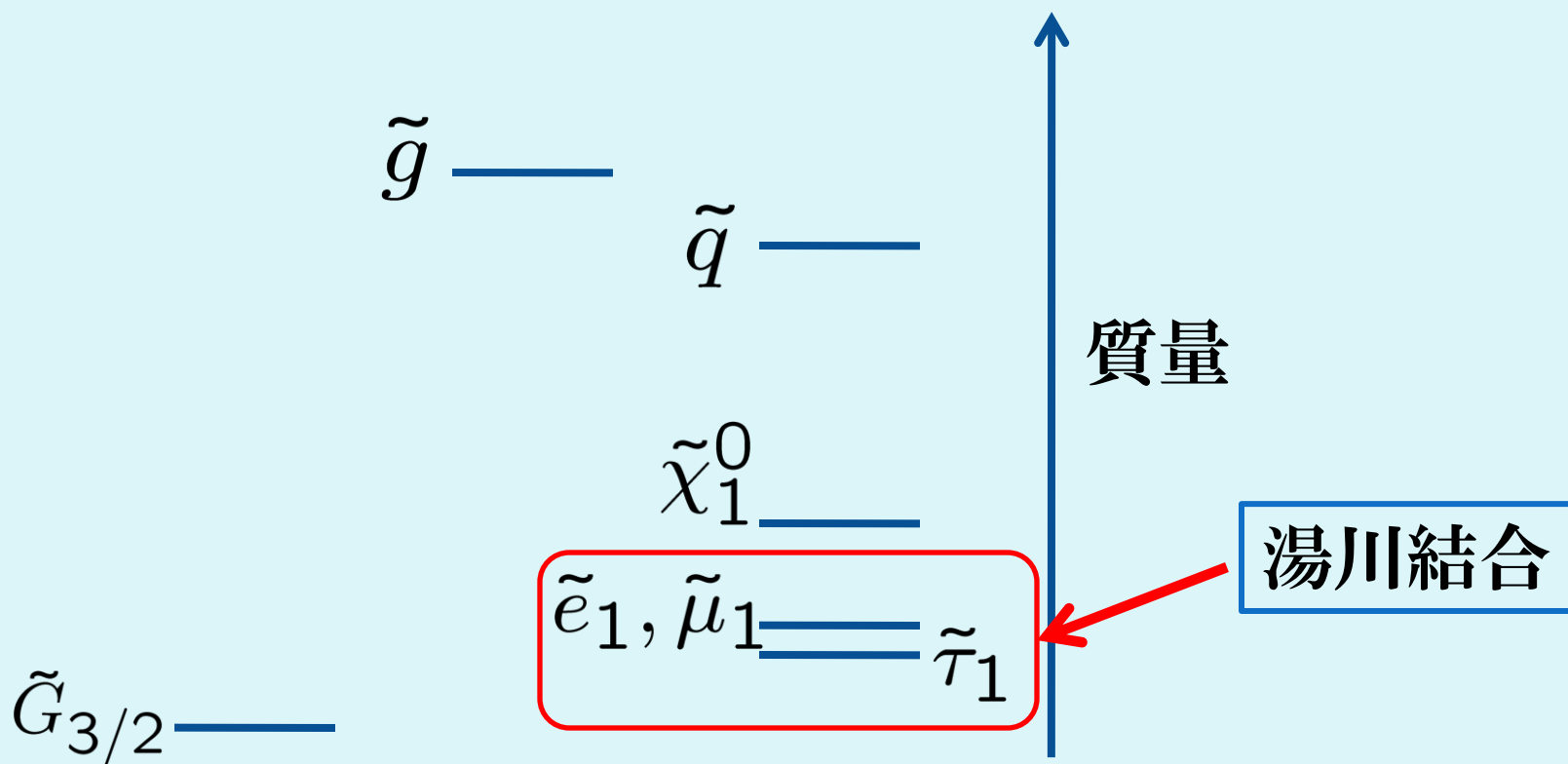
# 質量スペクトル

Gauge mediated SUSY breaking でのスペクトル

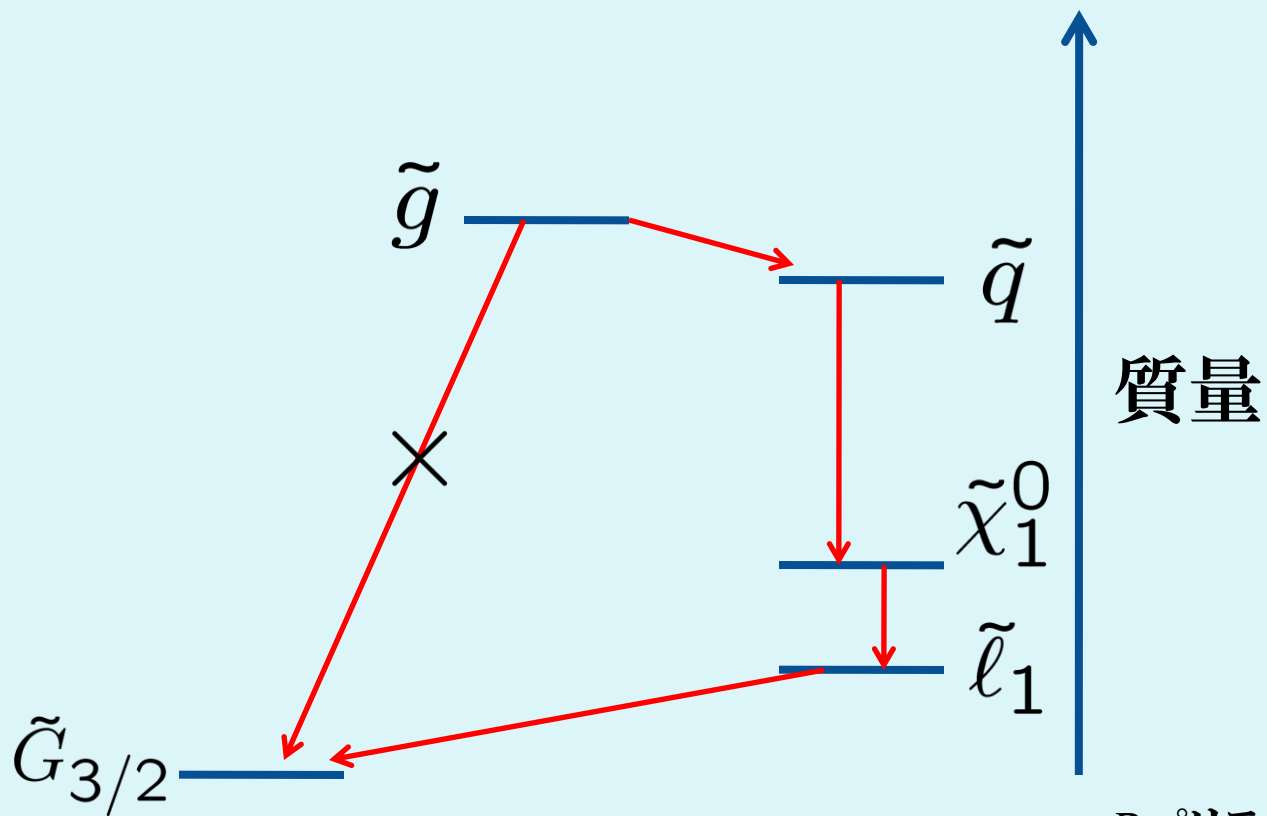


# 質量スペクトル

Gauge mediated SUSY breaking でのスペクトル

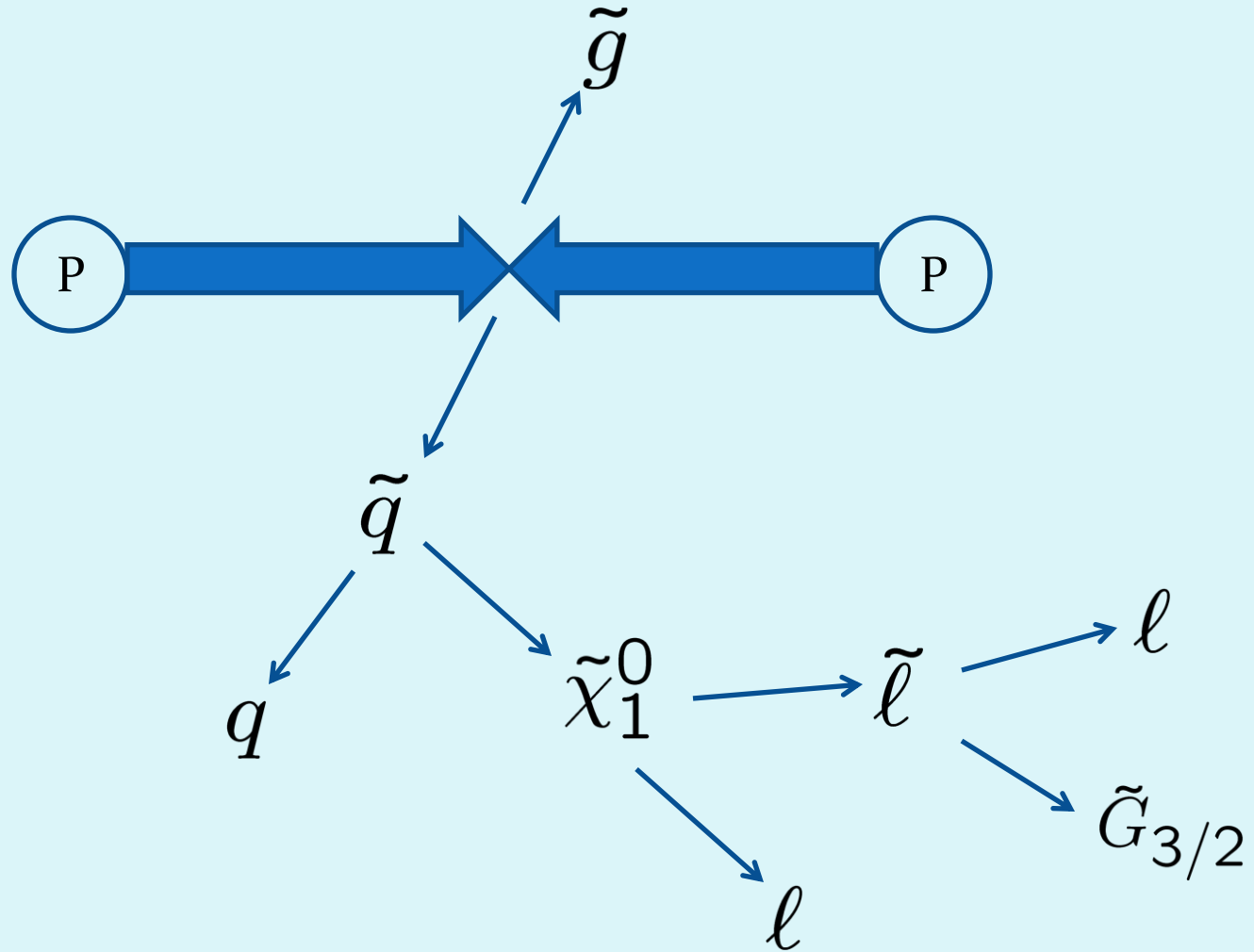


# SUSY粒子の崩壊



Rパリティは保存と仮定.

# 軽いグラビティーノ@LHC



# SUSY粒子の質量

運動学的手法



SUSY粒子の質量測定

$$m_{\text{soft}} = \mathcal{O}(100) \pm \mathcal{O}(1) \text{ GeV}$$

$m_{3/2} = \mathcal{O}(1) \text{ eV}$  グラビティーノの質量測定は？

### 3. グラビティーノの質量決定

# グラビティーノ質量測定の意味

$$m_{3/2} \sim \frac{\Lambda^2}{M_P} \quad \Lambda: \text{SUSY breaking scale.}$$

グラビティーノ質量がわかる.

||

SUSYの破れのスケールそのものがわかる.



# グラビティーノの質量を決める

$$\Gamma_{2\text{body}} \equiv \Gamma(\tilde{\ell}_1 \rightarrow \ell + \tilde{G}_{3/2}) = \frac{m_{\tilde{\ell}_1}^5}{48\pi M_P^2 m_{3/2}^2}$$

スカラーレプトンの寿命はグラビティーノ質量に依存.



**崩壊長**を測ればグラビティーノ質量がわかる.

# グラビティーノの質量を決める

ところが

$$c\tau \simeq 20 \mu\text{m} \left( \frac{m_{3/2}}{1 \text{ eV}} \right)^2 \left( \frac{m_{\text{NLSP}}}{100 \text{ GeV}} \right)^{-5}$$

# グラビティーノの質量を決める

崩壊長を測れないときに

$$\Gamma_{2\text{body}} \equiv \Gamma(\tilde{l}_1 \rightarrow l + \tilde{G}_{3/2}) \propto m_{3/2}^{-2}$$

をどうやって調べるのか.



**崩壊分岐比を利用**

K. Hamaguchi, S. S, T. T. Yanagida '07  
arXiv:0705.0219  
arXiv:0712.2462

# スカラーレプトンの崩壊

$$m_{\tilde{e}_1} \approx m_{\tilde{\mu}_1} > m_{\tilde{\tau}_1} + m_\tau$$



$$\tilde{l}_1 \rightarrow \tilde{\tau}_1 + \tau + l$$

$$\tilde{l}_1 \rightarrow l + \tilde{G}_{3/2} \quad l = e \text{ or } \mu$$

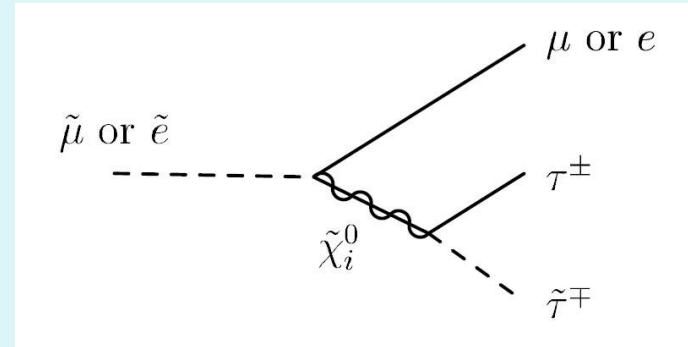
スカラーレプトンには主に二つの崩壊モードが存在する。

# 二体崩壊

$$\Gamma_{2\text{body}} \equiv \Gamma(\tilde{l}_1 \rightarrow l + \tilde{G}_{3/2}) \propto m_{3/2}^{-2}$$

グラビティーノの質量がわからなければ未知.

# 三体崩壊



$$\Gamma_{3\text{body}} \equiv \Gamma(\tilde{\ell}_1 \rightarrow \tilde{\tau}_1 + \tau + \ell)$$

標準模型ゲージ相互作用.

スカラーレプトンとゲージノの質量が決まれば  
計算可能.

# 崩壊分岐比

$$\Gamma_{2\text{body}} = \left( \frac{\Gamma_{2\text{body}}}{\Gamma_{3\text{body}}} \right) \Gamma_{3\text{body}}$$

# 崩壊分岐比

$m_{\tilde{\ell}_1}, m_{\tilde{\tau}_1}, m_{\tilde{\chi}}$  で決まる.

$$\Gamma_{2\text{body}} = \left( \frac{\Gamma_{2\text{body}}}{\Gamma_{3\text{body}}} \right) \Gamma_{3\text{body}}$$

実験で決める.



# スカラーレプトンの崩壊

$$\tilde{l}_1 \rightarrow \tilde{\tau}_1 + \tau + l$$

$$\tilde{l}_1 \rightarrow l + \tilde{G}_{3/2}$$

# スカラーレプトンの崩壊

$$\tilde{l}_1 \rightarrow \tilde{\tau}_1 + \tau + \boxed{l}$$

$l$  をみる.

二つのレプトンは  
何が違うか

$$\tilde{l}_1 \rightarrow \boxed{l} + \tilde{G}_{3/2}$$

# スカラーレプトンの崩壊

$$\tilde{l}_1 \rightarrow \tilde{\tau}_1 + \tau + \boxed{l}$$

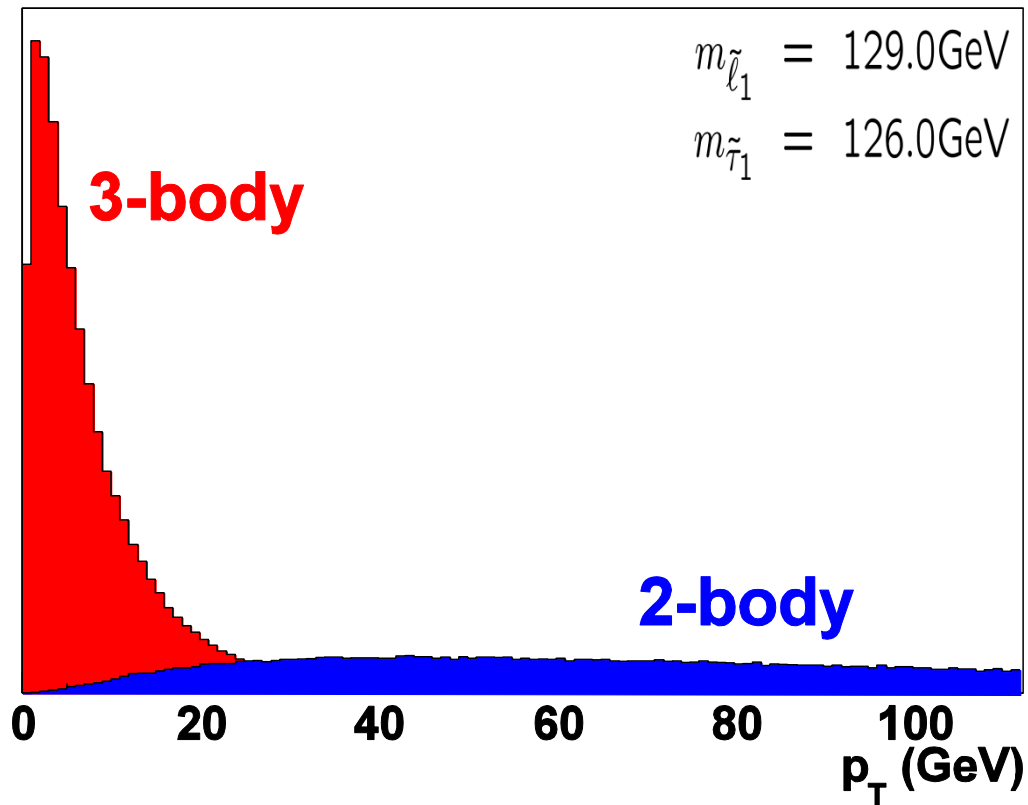
↓ 三体崩壊.

運動量分布が異なる.

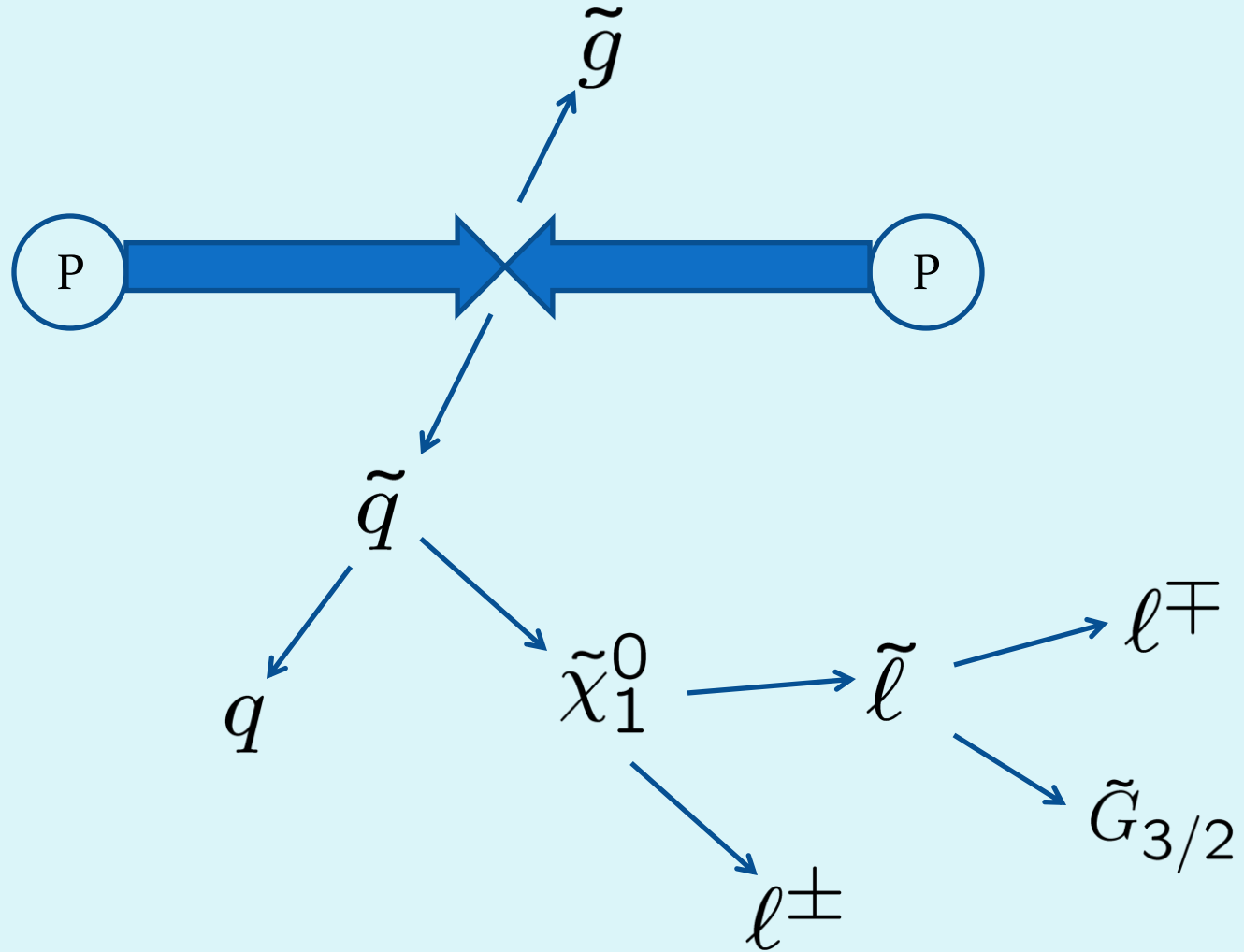
↑ 二体崩壊.

$$\tilde{l}_1 \rightarrow \boxed{l} + \tilde{G}_{3/2}$$

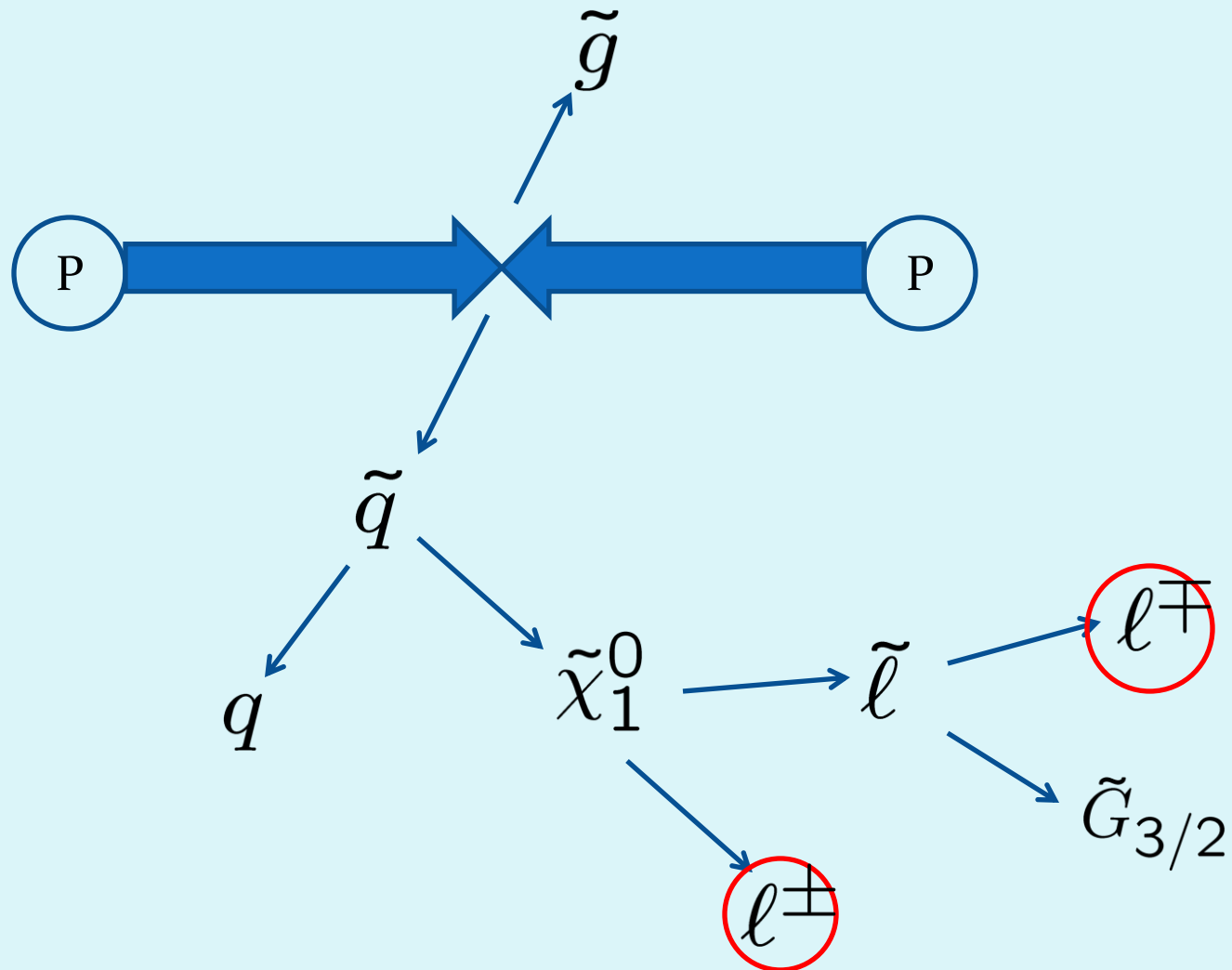
# レプトンの運動量分布



# 軽いグラビティーノ@LHC

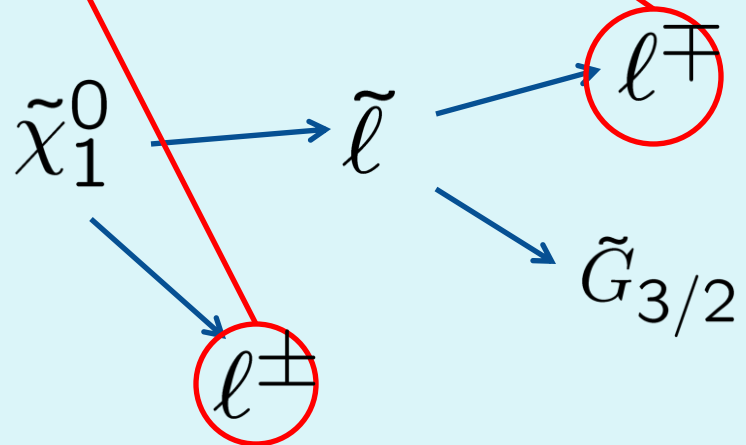


# 軽いグラビティーノ@LHC



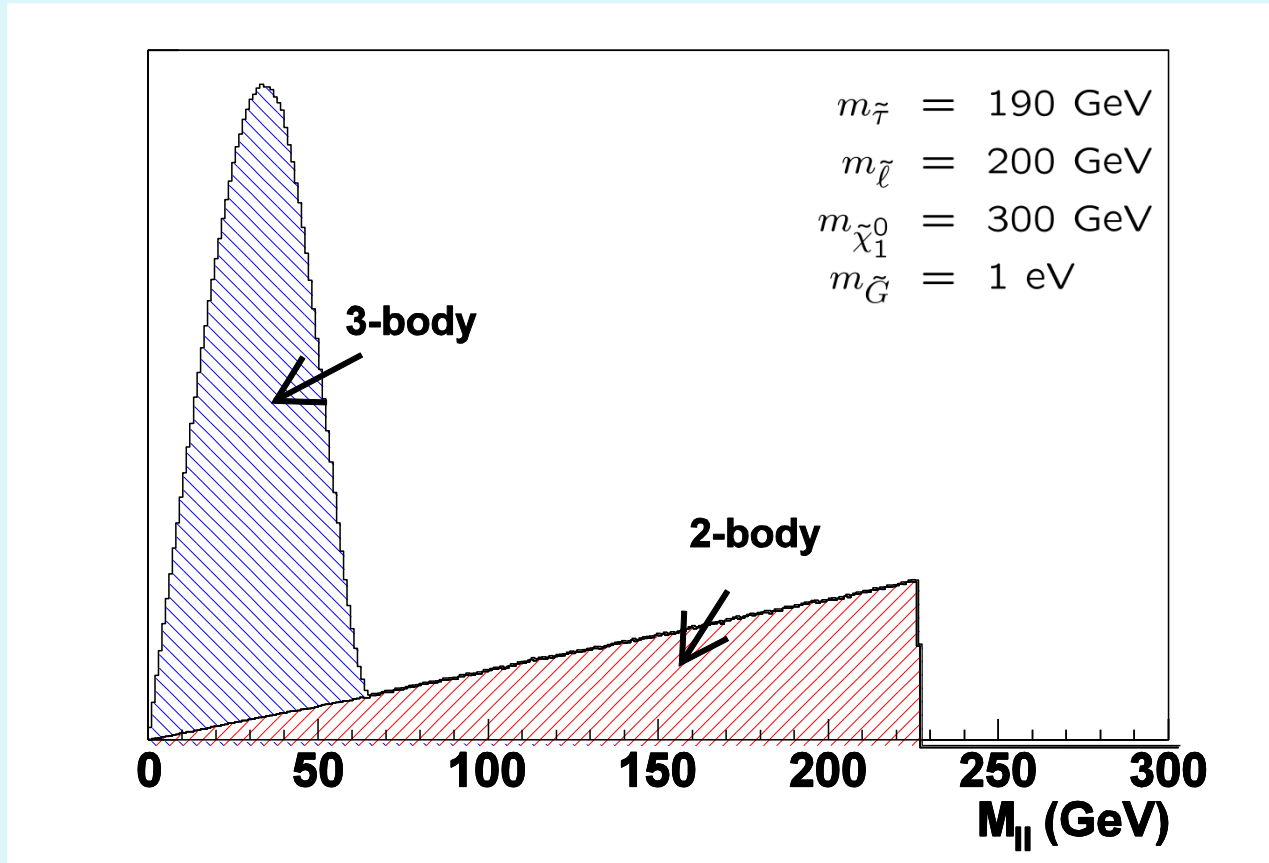
# 軽いグラビティーノ@LHC

$$m_{ll}^2 = (p_{l^\pm} + p_{l^\mp})^2$$



# スカラーレプトンの崩壊

$$\frac{\Gamma_{3\text{body}}}{\Gamma_{2\text{body}}} = 1.23$$





# シミュレーション

$\Lambda = 40 \text{ TeV}$   
 $M = 80 \text{ TeV}$   
 $\tan \beta = 13$   
 $N_5 = 3$

$\tilde{G}_{3/2} \underline{0.77 \text{ eV}}$

$\tilde{g} \underline{952 \text{ GeV}}$     $\tilde{q} \underline{\sim 850 \text{ GeV}}$

$\tilde{\chi}_1^0 \underline{160 \text{ GeV}}$

$\tilde{e}_1, \tilde{\mu}_1 \underline{\quad}$     $\tilde{\tau}_1 \underline{\quad}$

124 GeV

質量

129 GeV



# カット

$$P_{j1T} > 200 \text{ GeV}, P_{j2T} > 150 \text{ GeV}$$

$$P_{j3,4T} > 25 \text{ GeV}$$

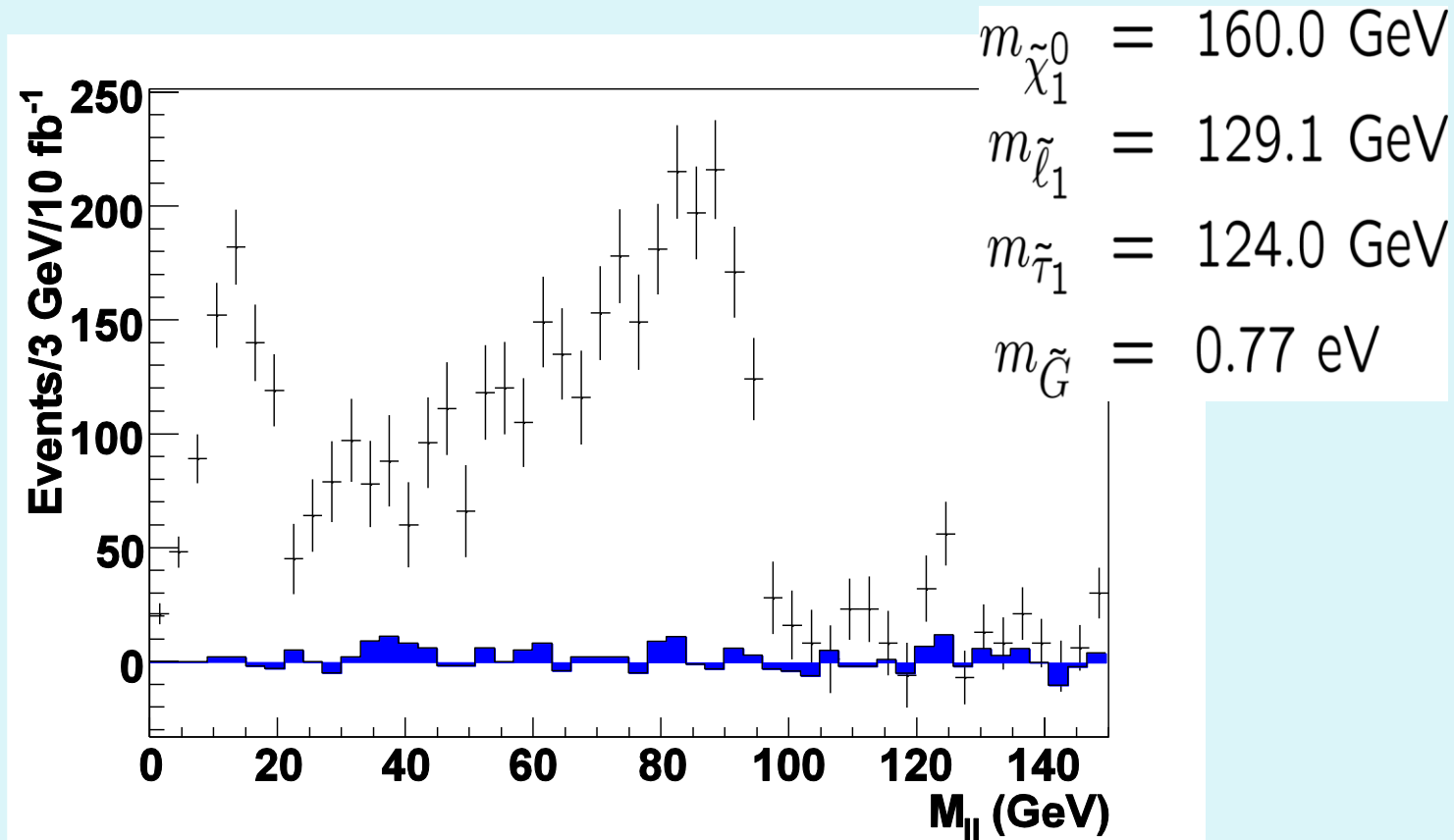
$$p_{T,\text{miss}} \geq 100 \text{ GeV}$$

# カット

For  $m_{\ell\ell}$ , our requirements are as follows:

- two leptons have opposite charge.
- One lepton has  $p_{\text{T}} \geq 20$  GeV, and another  $p_{\text{T}} \geq 10$  GeV.
- $|\eta| < 2.5$ .

# スカラーレプトンの崩壊



Herwig + AcerDet

# スカラーレプトンの崩壊

$$\begin{aligned} m_{\tilde{\chi}_1^0} &= 160.0 \text{ GeV} \\ m_{\tilde{\ell}_1} &= 129.1 \text{ GeV} \\ m_{\tilde{\tau}_1} &= 124.0 \text{ GeV} \\ m_{\tilde{G}} &= 0.77 \text{ eV} \end{aligned}$$

$$m_{3/2} = (0.76 \pm 0.13) \left( \frac{R_2}{0.76} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{R_3}{0.04} \right)^{-\frac{1}{2}} \text{ eV}$$

# スカラーレプトンの崩壊

$$\begin{aligned} m_{\tilde{\chi}_1^0} &= 160.0 \text{ GeV} \\ m_{\tilde{\ell}_1} &= 129.1 \text{ GeV} \\ m_{\tilde{\tau}_1} &= 124.0 \text{ GeV} \\ m_{\tilde{G}} &= 0.77 \text{ eV} \end{aligned}$$

$$m_{3/2} = (0.76 \pm 0.13) \left( \frac{R_2}{0.76} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{R_3}{0.04} \right)^{-\frac{1}{2}} \text{ eV}$$

**カットの効果.**

$$R_2 = 0.76 \pm 0.05$$

$$R_3 = 0.04 \pm 0.01$$

# スカラーレプトンの崩壊

$$\begin{aligned} m_{\tilde{\chi}_1^0} &= 160.0 \text{ GeV} \\ m_{\tilde{\ell}_1} &= 129.1 \text{ GeV} \\ m_{\tilde{\tau}_1} &= 124.0 \text{ GeV} \\ m_{\tilde{G}} &= 0.77 \text{ eV} \end{aligned}$$

$$m_{3/2} = (0.76 \pm 0.13) \left( \frac{R_2}{0.76} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{R_3}{0.04} \right)^{-\frac{1}{2}} \text{ eV}$$

カットの効果.

$$R_2 = 0.76 \pm 0.05$$

$$R_3 = 0.04 \pm 0.01$$

$m_{\tilde{g}}, m_{\tilde{\chi}}, m_{\tilde{q}}, m_{\tilde{\ell}}, m_{\tilde{\tau}}$   
から決まる.

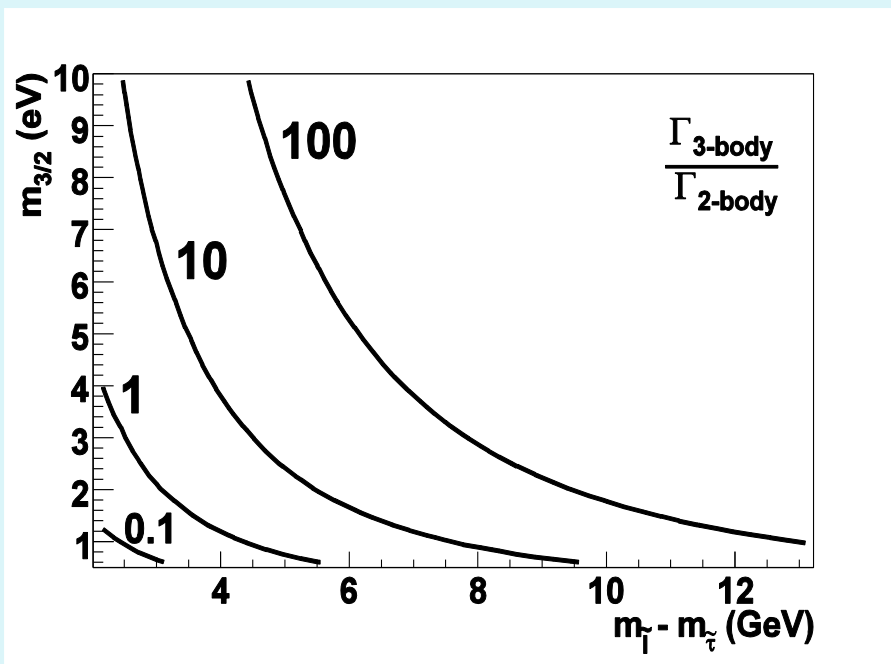
# 結論

$m_{\tilde{\chi}_1^0} > m_{\tilde{\ell}} > m_{\tilde{\tau}} + m_{\tau}$  のもとで  
軽いグラビティーノでも質量が測れる.



# 結論

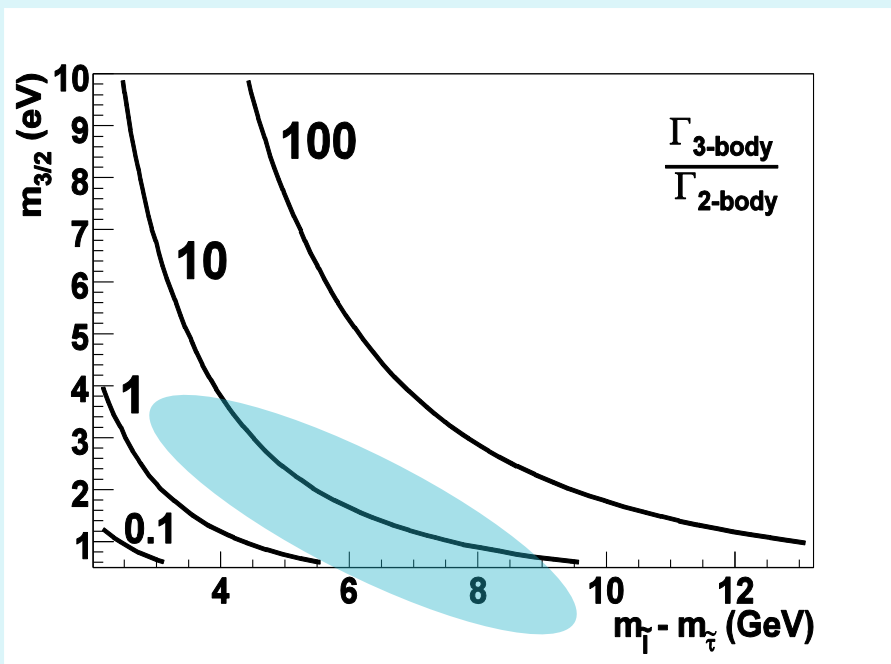
$m_{\tilde{\chi}_1^0} > m_{\tilde{\ell}} > m_{\tilde{\tau}} + m_{\tau}$  のもとで  
軽いグラビティーノでも質量が測れる.



$$m_{\tilde{\chi}_1^0} = 300 \text{ GeV}$$
$$m_{\tilde{\ell}_1} = 200 \text{ GeV}$$

# 結論

$m_{\tilde{\chi}_1^0} > m_{\tilde{\ell}} > m_{\tilde{\tau}} + m_{\tau}$  のもとで  
軽いグラビティーノでも質量が測れる.



# 課題

- ソフトレプトン

- NLSPがスカラーレプトン以外のときは？

- LSPの特定は可能か？



予備

# Gravitino Problem 1

不安定な場合

元素合成期に崩壊

$$\tilde{G}_{3/2} \rightarrow g + \tilde{g}, \gamma + \tilde{\gamma}, \dots$$

生成された軽元素を壊す。



~~ビッグバン元素合成~~

# Gravitino Problem 2

安定な場合

暗黒物質になる.

現在の観測

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 = 0.1$$

を超える量の暗黒物質.

# 非常に軽いグラビティーノ

相互作用が強い



グラビティーノ生成の逆反応  $g + \tilde{G}_{3/2} \rightarrow \tilde{g} + g$



熱平衡



グラビティーノの個数密度は**温度のみ**に依存

# 非常に軽いグラビティーノ

$$\Omega_{3/2} h^2 \sim n_{3/2} m_{3/2}$$

モデルに依存しない

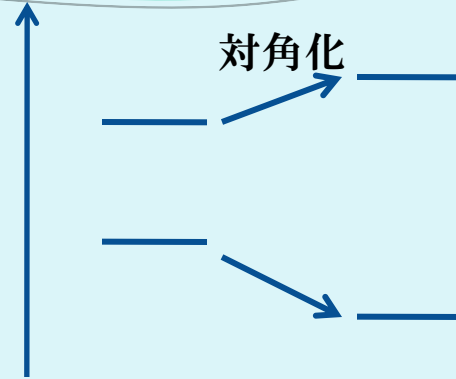
小さな値

宇宙に対するグラビティーノの寄与は  
モデルによらず小さい。



# スカラーレプトン

スカラー粒子の質量行列



$\tilde{\ell}_L$

$\tilde{\ell}_R$

$$M^2 = \begin{pmatrix} (m_{\tilde{L}}^2)_{ii} + m_{e_i}^2 - (\frac{1}{2} - s_W^2)M_Z^2 c_{2\beta} & m_{e_i}((A_E)_{ii} - \mu \tan \beta) \\ m_{e_i}((A_E)_{ii} - \mu \tan \beta) & (m_{\tilde{e}}^2)_{ii} + m_{e_i}^2 - s_W^2 M_Z^2 c_{2\beta} \end{pmatrix}$$

対角化  $\longrightarrow$  質量固有状態  $\tilde{\ell}_1, \tilde{\ell}_2$

$$m_{e,\mu} \ll m_\tau \longrightarrow m_{\tilde{e}_1} \approx m_{\tilde{\mu}_1} > m_{\tilde{\tau}_1}$$