

gravity mediationにおける  
Qボール崩壊からの  
バリオンと暗黒物質の共生成

山田 將樹  
東京大学 宇宙線研究所



A. Kamada, M. Kawasaki and M.Y., Phys. Lett. B 719 (2013) 9

PPP 2013 @YITP  
8月8日



# Contents

---

## 1. Introduction

- バリオン反バリオン非対称性
  - ダークマター
- } coincidence problem

← アフレック・ダイン機構 と Q-ball

## 2. Q-ball の崩壊率

- 超対称性粒子 (→ ダークマター)
- クォーク (→ バリオン)

## 3. gravity mediationにおける バリオンとダークマターの共生成シナリオ

# Contents

---

## 1. Introduction

- バリオン反バリオン非対称性
  - ダークマター
- } coincidence problem

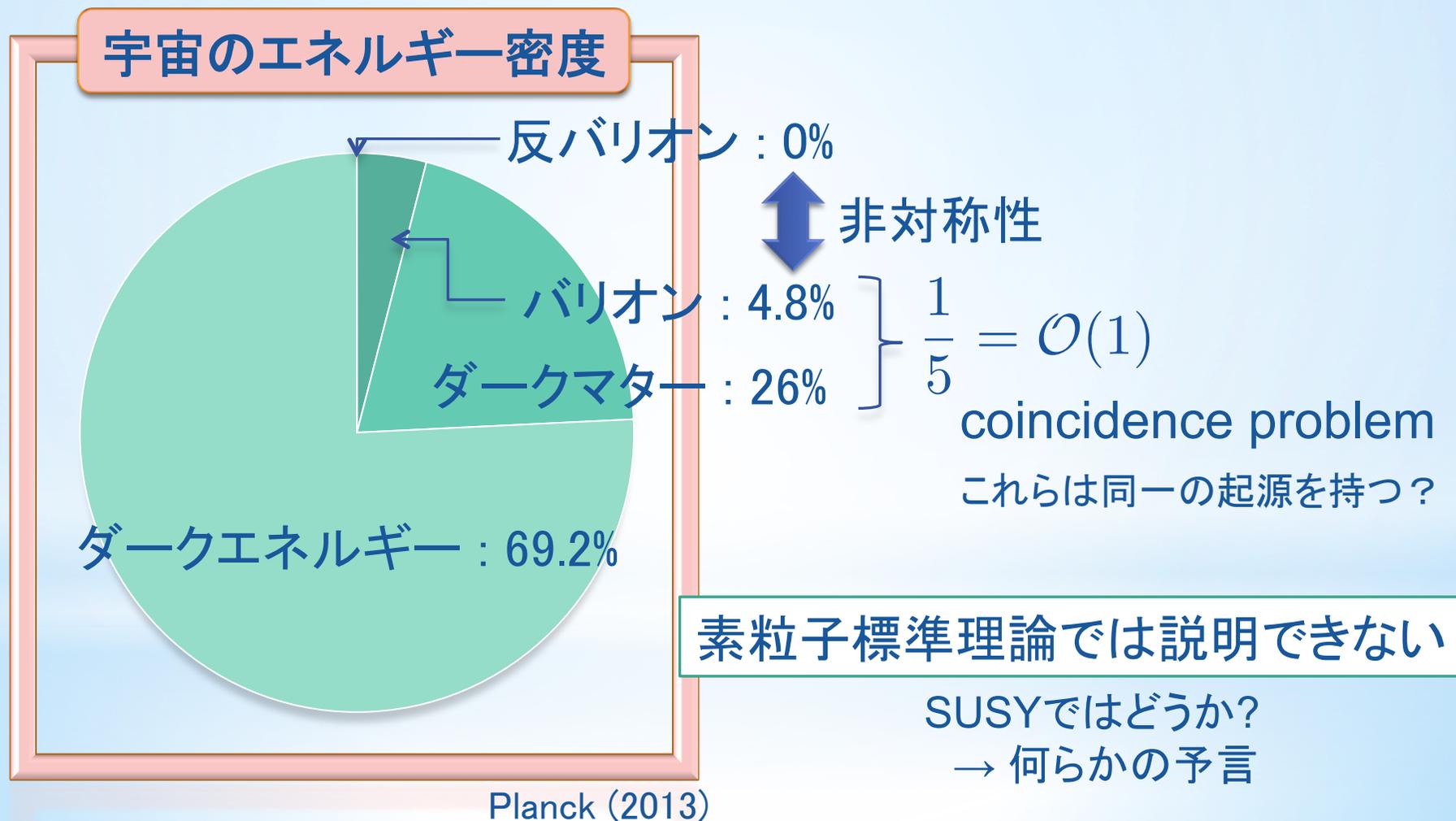
← アフレック・ダイン機構 と Q-ball

## 2. Q-ball の崩壊率

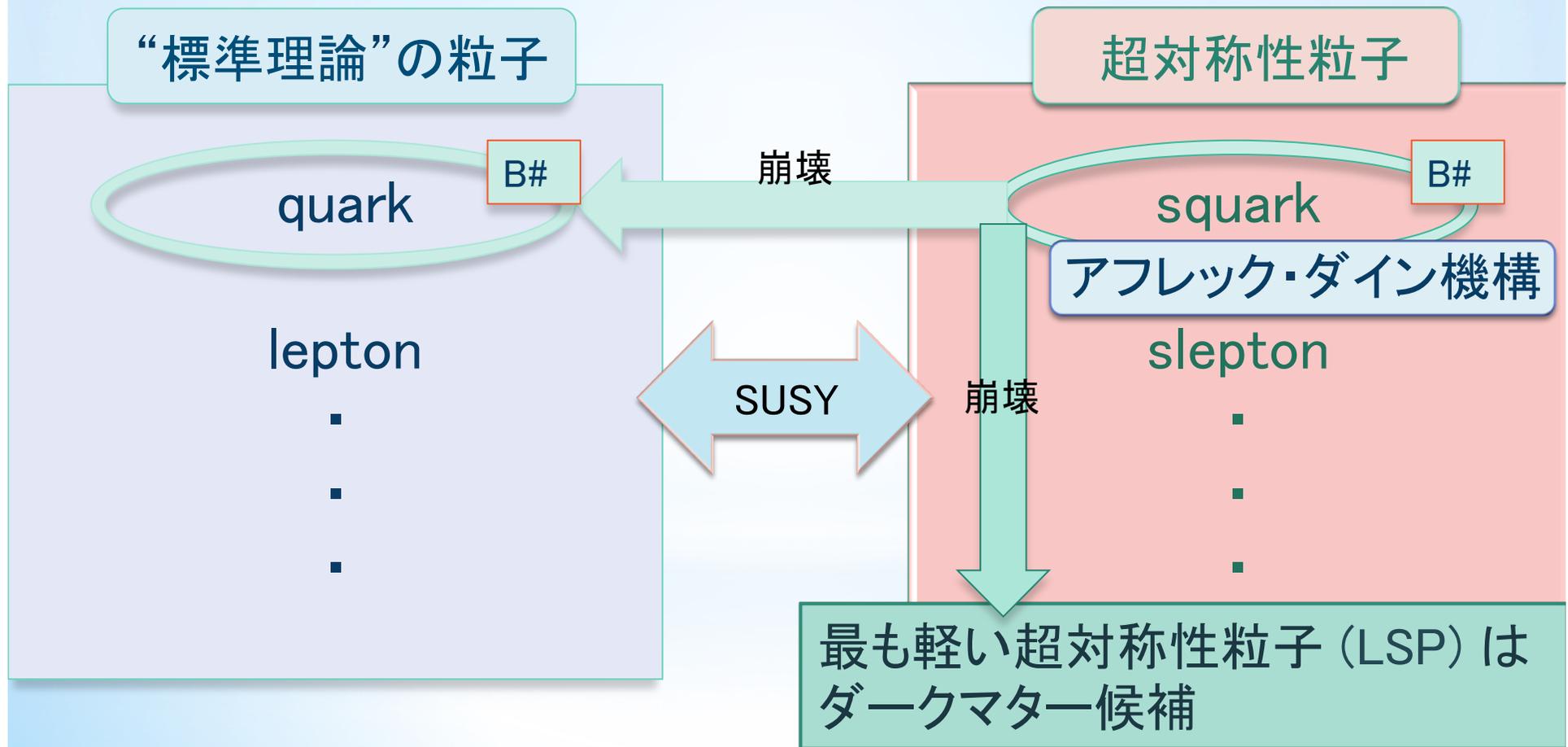
- 超対称性粒子 (→ ダークマター)
- クォーク (→ バリオン)

## 3. gravity mediationにおける バリオンとダークマターの共生成シナリオ

# Introduction: 宇宙論の問題



# Introduction: SUSYでの可能性



# Introduction: アフレック・ダイン機構

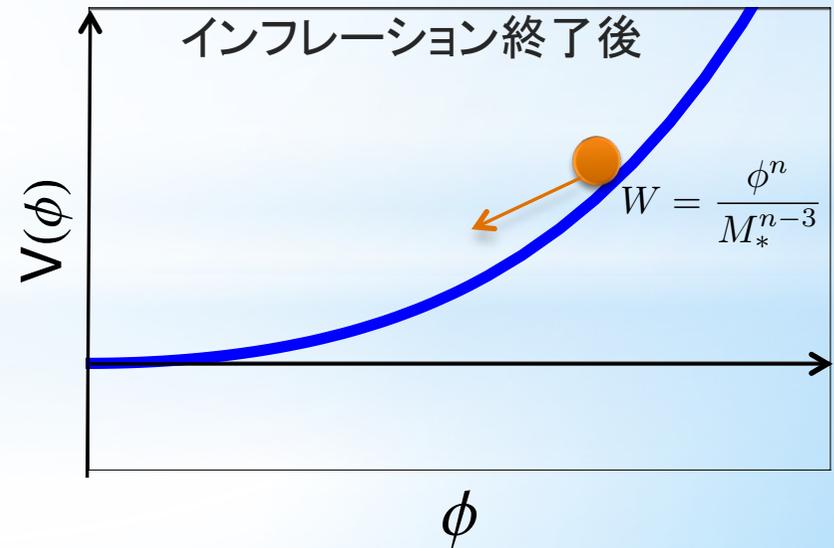
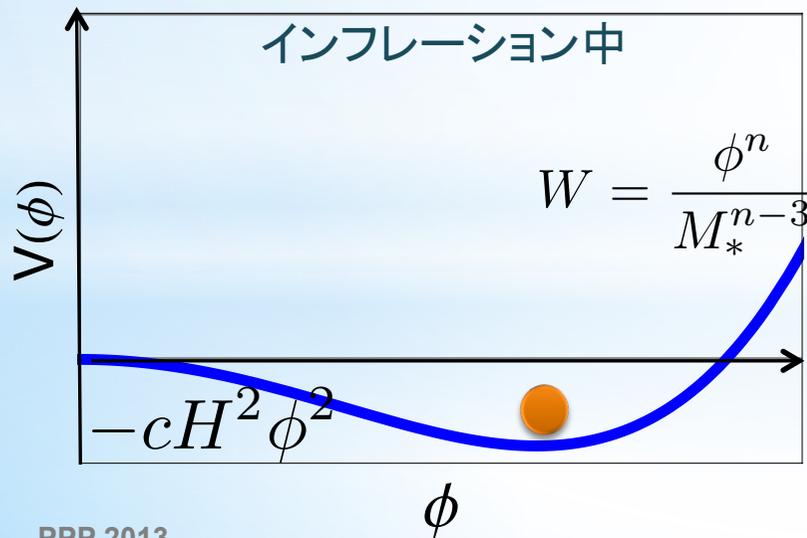
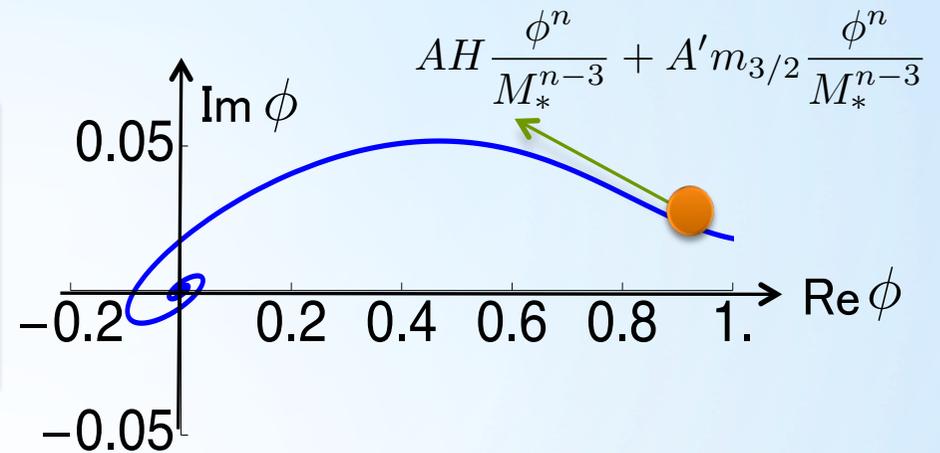
Affleck, Dine, 85  
Dine, Randall, Thomas, 96

SUSY → flat direction  $\phi$

ex)

$$\tilde{u}_1^R = \frac{1}{\sqrt{3}}\phi \quad \tilde{d}_1^G = \frac{1}{\sqrt{3}}\phi \quad \tilde{d}_2^B = \frac{1}{\sqrt{3}}\phi$$

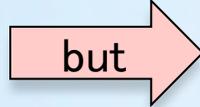
squark → B#



# Introduction: Q-ball

Coleman, 85

平坦方向を位相方向に回転させた (空間依存性はない)

 but バリオン数  $Q$  を固定して、エネルギーを最小にする配位は?

ラグランジュの未定乗数法で

$$E = \int dV \left( |\dot{\phi}|^2 + |\nabla\phi|^2 + V(\phi) \right)$$

$E + \omega_0 \left[ Q - \int dV \text{Im} \left( \phi \dot{\phi}^* \right) \right]$  を最小にする配位を求めてみると

  $\phi = \phi(r) e^{-i\omega_0 t}$

$$\frac{V(\phi)}{\phi^2/2} < \omega_0^2 < \frac{\partial^2}{\partial\phi^2} V(0)$$

“二次のポテンシャルよりも緩やか”

 局所化された解が存在 (Q ball)

空間的に一様なままではエネルギー的に損  
⇒ エネルギー的に得になるように  
Q ball を形成する

note :  $16\pi^2 \frac{d}{d \log \phi} m_\phi^2 = |c_y| y^2 m_{\text{squark}}^2 - |c_g| g^2 M_{\text{gaugino}}^2$   $c_y, c_g = \mathcal{O}(1)$

# Introduction: Q-ball

Coleman, 85

アフleck・ダイn機構

→ Coherent oscillation

↑ 空間的に不安定

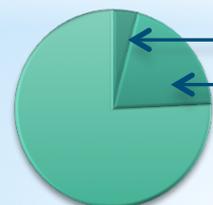
⇒ Q-ball と呼ばれる塊を大量に形成する

Q-ballは最終的に (BBNよりも前に)

- クォーク (→ バリオン)
- 超対称性粒子 (→ ダークマター)

へ崩壊する

➔ バリオンとダークマターが同一の起源を持つ

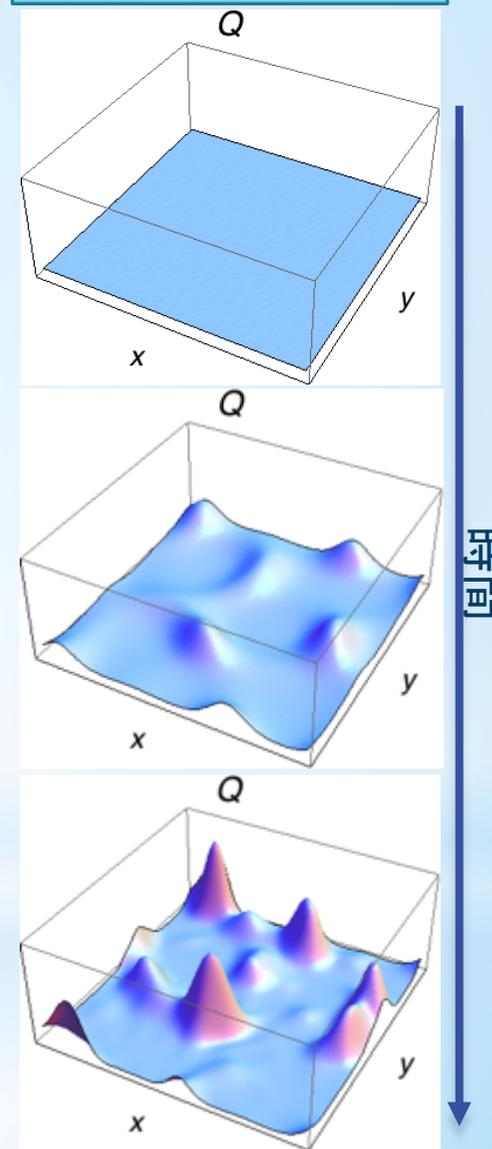


宇宙のエネルギー密度

$$\left. \begin{array}{l} \text{バリオン : 4.8\%} \\ \text{ダークマター : 26\%} \end{array} \right\} \frac{1}{5} = \mathcal{O}(1)$$

を自然に説明できる可能性

## 二次元の場合の例



# Contents

---

## 1. Introduction

- バリオン反バリオン非対称性
  - ダークマター
- } coincidence problem

← アフレック・ダイン機構 と Q-ball

## 2. Q-ball の崩壊率

- 超対称性粒子 (→ ダークマター)
- クォーク (→ バリオン)

## 3. gravity mediationにおける バリオンとダークマターの共生成シナリオ

# Q-ball の性質

Coleman, 85  
Cohen, *et. al*, 86

- ・ 形成される Q ball 一個あたりのチャージ  
~ 形成時のホライズンサイズ内にある B# の個数

$$Q = \int dV \text{Im}(\phi \dot{\phi}^*) \sim \frac{4\pi}{3} R^3 (\omega_0 \phi_0^2) \quad \left( R \sim H_{\text{osc}}^{-1} \sim m_\phi^{-1} \right)$$

↑  
非常に大きい VEV

- ・  $\omega_0$  の物理的意味 :  $\frac{dE_Q}{dQ} \simeq \omega_0 \simeq m_\phi(\phi_0)$  (gravity mediation の場合)

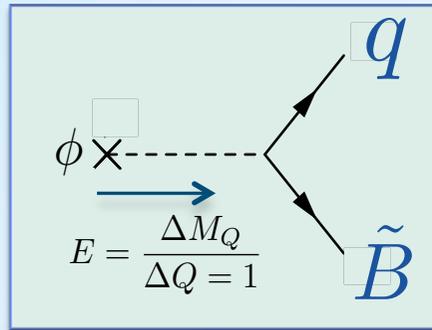
- ・ 他の場との相互作用を考えると、Q ballは表面から粒子を放出して崩壊する  
ただし、崩壊先の粒子が **質量 >  $\omega_0$**  であると、その粒子には崩壊できない

Q ball  $\xrightarrow{\text{崩壊}}$  クォーク, 軽い超対称性粒子  
 $q$   $\tilde{B}$  など

# Q-ball の性質: 崩壊率

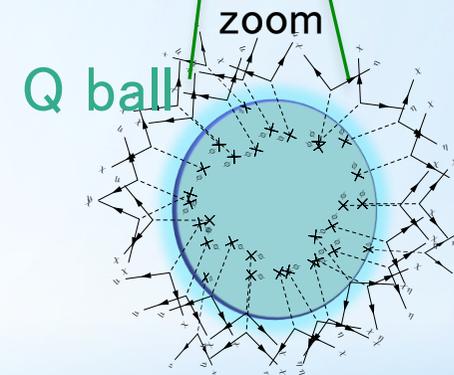
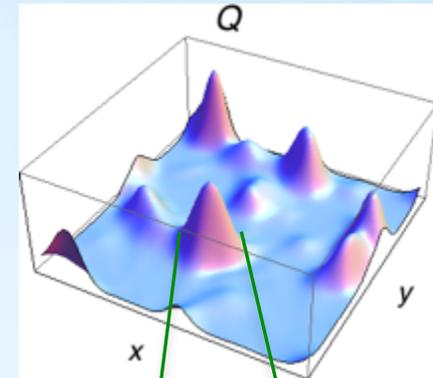
Cohen, et. al, 86

基本的に、Q-ballの崩壊は



$\times Q$  (Q-ballが持つバリオン数)

で見積もることができる



しかし、あまりにも大量の粒子が生成されるため、Q-ballの表面でパウリの排他率が効く

➡ 各粒子の生成率は

単位時間あたりに占められる位相空間体積

で決定される (次ページ)

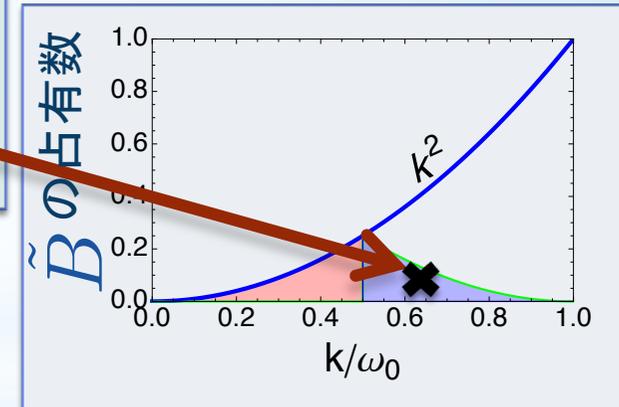
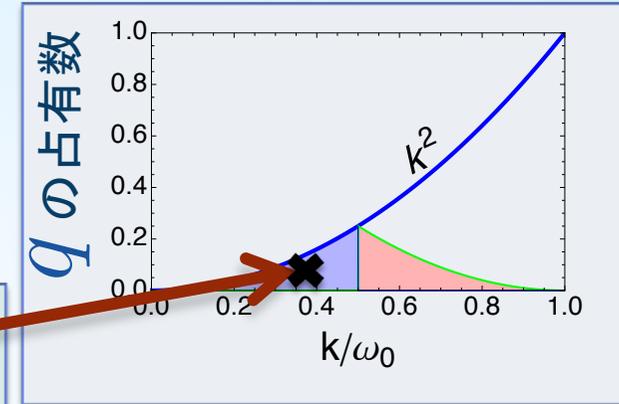
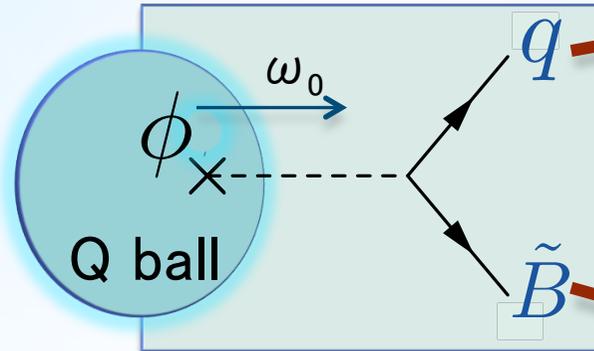
# Q-ball の性質: 崩壊率の上限

Cohen, et. al, 86

flux の上限 (masslessの場合):

$$n \cdot j \lesssim 2 \int \frac{d^3 k}{(2\pi)^3} \theta\left(\frac{\omega_0}{2} - |k|\right) \theta(k \cdot n) \hat{k} \cdot n$$

$$= \frac{2}{8\pi^2} \int_0^{\omega_0/2} k^2 dk$$



bino の生成率の上限  $(R \sim \omega_0^{-1})$

$$\frac{d}{dt} N_{\tilde{B}} \lesssim 4\pi R^2 \times (\text{flux}) = \frac{R^2 \omega_0^3}{24\pi} \llll \Gamma \times Q \sim g^2 \omega_0 \times \phi_0^2 / \omega_0^2$$

(質量が無視できなくなると  
これよりも小さくなる)

# Q-ball の性質: クォーク への崩壊率

Kawasaki, M.Y., 13

クォークへの崩壊には, gluino や higgsino を交換する反応も効く

- (反応のエネルギー) =  $2\omega_0$

➡ 位相空間体積は 8 倍

- カラー, Left-Right, フレーバー の自由度

→ 全クォークへの崩壊率は、

さらに  $n_q$  (クォークの自由度) 倍される

$$\text{最大で } n_q = 3 \times 6 \times 2 \times \frac{3}{4} = 27$$

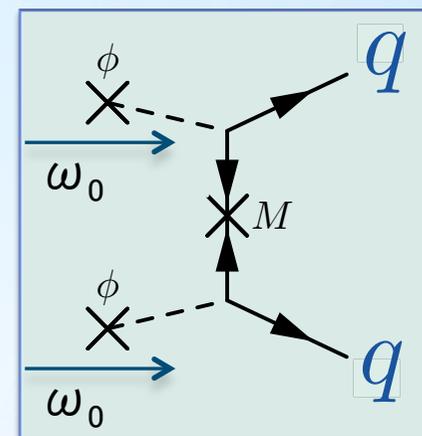
↑  
カラー

↑  
フレーバー

↑  
LR

↑  
中性の条件

(典型的なパラメータでは  
 $n_q = 15$  程度)



# Contents

---

## 1. Introduction

- バリオン反バリオン非対称性
  - ダークマター
- } coincidence problem

← アフレック・ダイン機構 と Q-ball

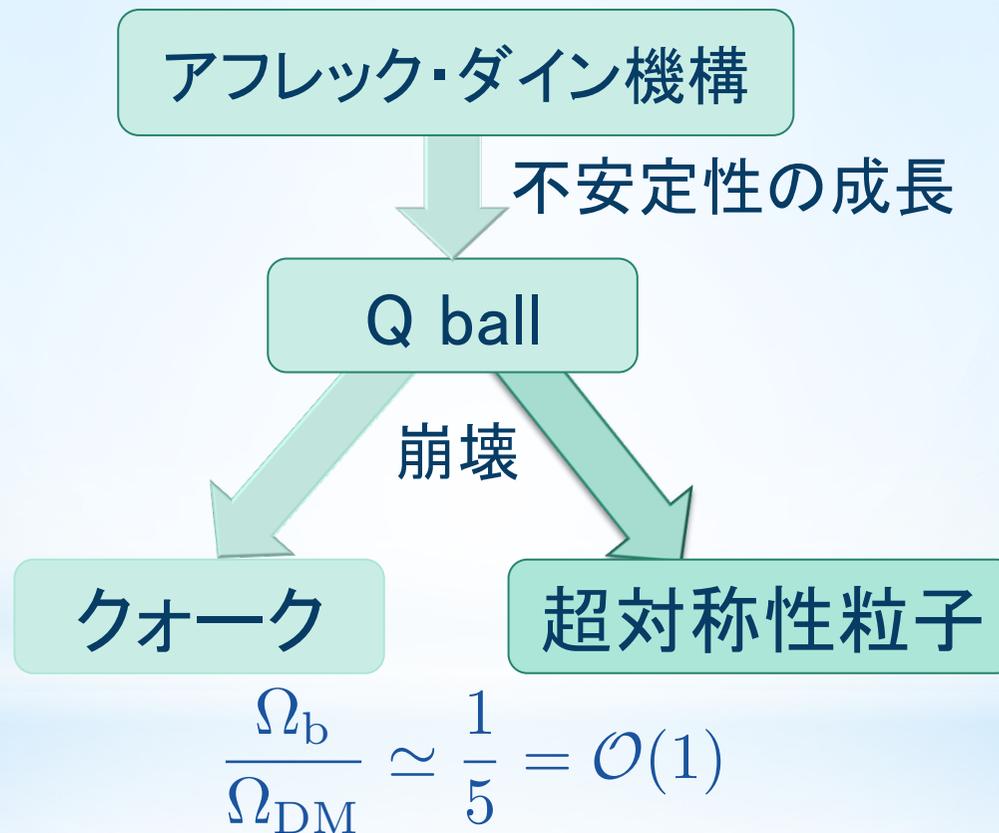
## 2. Q-ball の崩壊率

- 超対称性粒子 (→ ダークマター)
- クォーク (→ バリオン)

## 3. gravity mediationにおける バリオンとダークマターの共生成シナリオ

# gravity mediation における B# と DM の共生成シナリオ

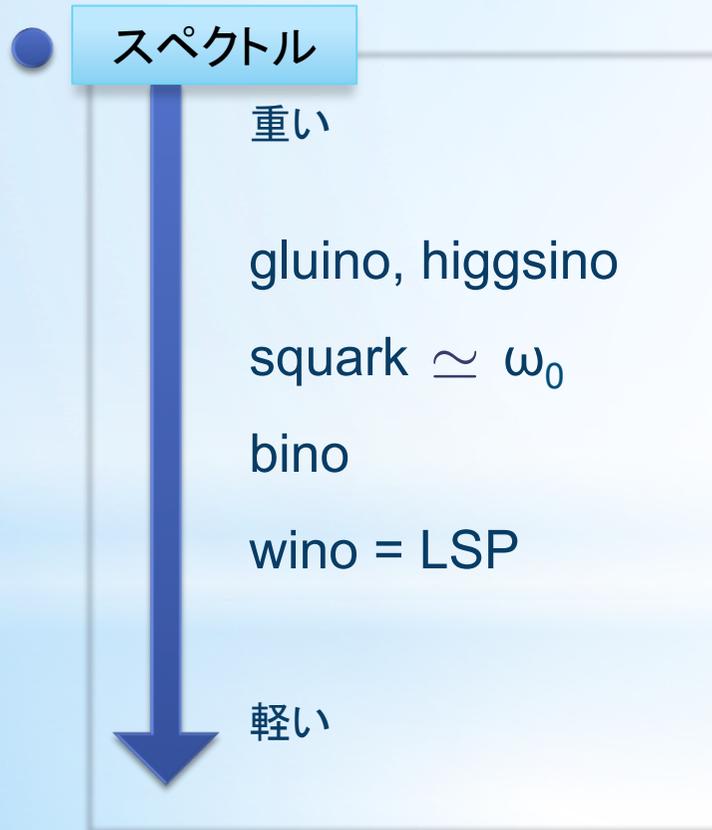
Kamada, Kawasaki, M.Y., 13



# B# と DM の共生成シナリオ: setup

Kamada, Kawasaki, M.Y., 13

- $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$  の平坦方向で構成される Q-ball が形成されたとする



Q-ball は クォーク と bino へしか崩壊しない

崩壊比  $\frac{B_q}{B_{\tilde{B}}} = \frac{8 \times n_q}{1}$   $\leftarrow (n_q \leq 27)$

$\leftarrow$  (質量が無視できないと もっと小さい)

→ bino は wino (DM) へ崩壊する  
得られた wino が対消滅せず残れば (次ページ)

バリオン : 4.8%

DM : 26%

$$\left. \begin{array}{l} \text{バリオン : 4.8\%} \\ \text{DM : 26\%} \end{array} \right\} \frac{1}{5} = \frac{m_p}{3m_{\tilde{W}}} \frac{B_q}{B_{\tilde{B}}}$$

→  $m_{\tilde{W}}$  が预言される

# B# と DM の共生成シナリオ: 問題点

Kamada, Kawasaki, M.Y., 13

- Q-ball の崩壊から得られた wino は、対消滅せずに残ってくれるか？

wino freeze out の後に Q-ball が崩壊すればよい

チャージが大きい Q-ball は遅く崩壊してくれる

$$H(t)^{-1} \simeq \frac{1}{Q} \frac{dQ}{dt} \sim \omega_0$$

アフレック・ダイン機構によって大量のバリオン数を作り出すと、  
形成される Q-ball のチャージが大きくなる

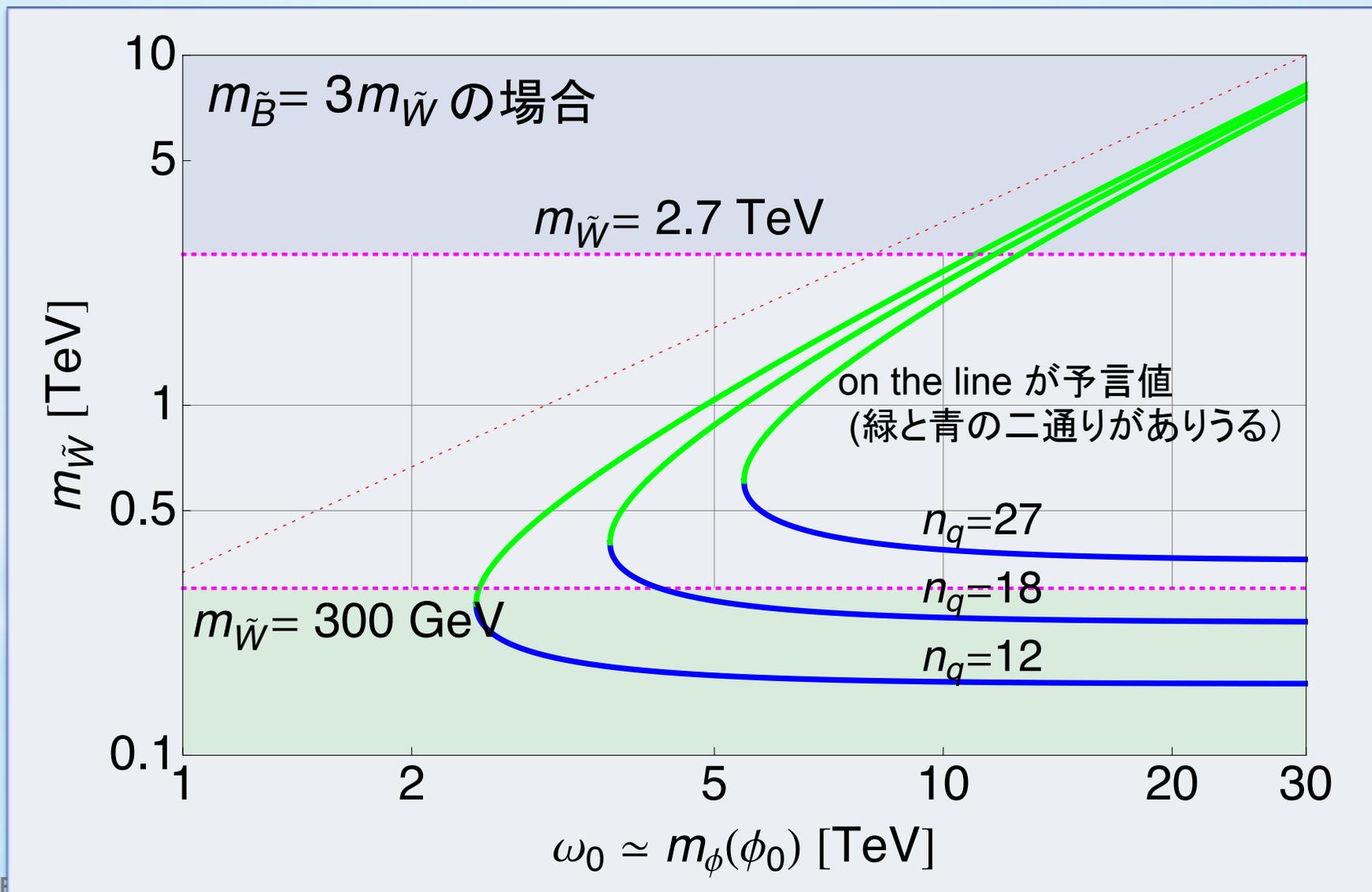
ただし、、、大量のバリオンが生成されてしまい

バリオンを薄める必要がある

← { thermal inflation  
domain wall decay } などが起こればよい

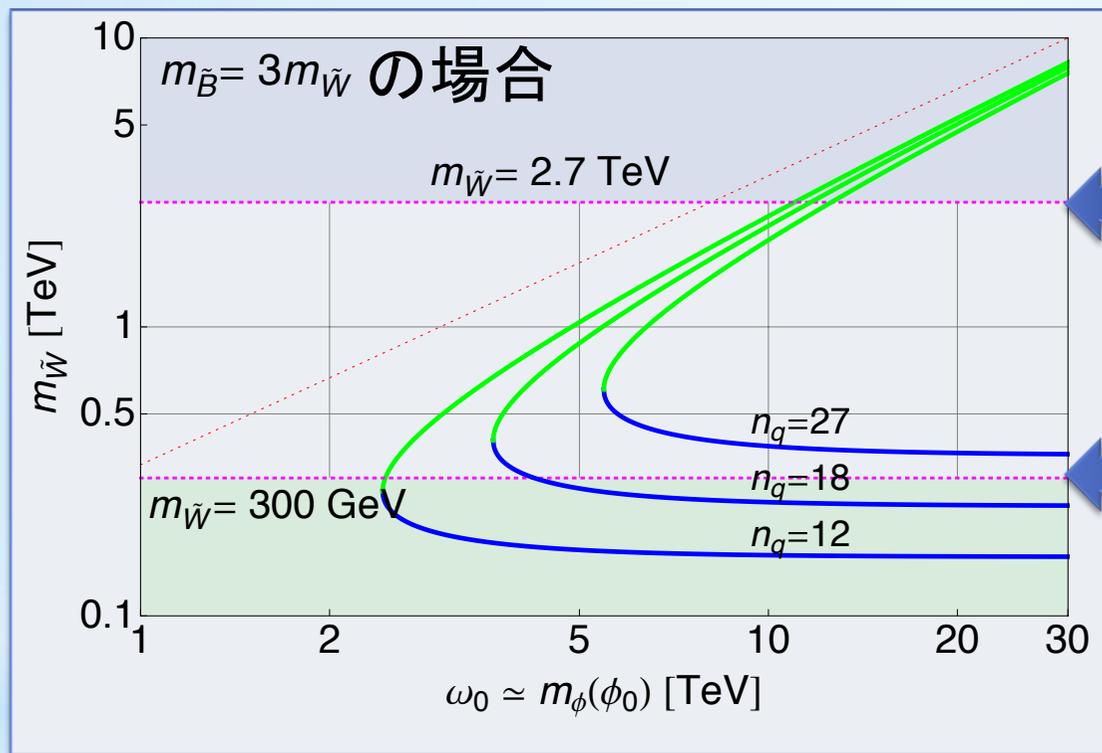
# B# と DM の共生成シナリオ: 結果

Kamada, Kawasaki, M.Y., 13



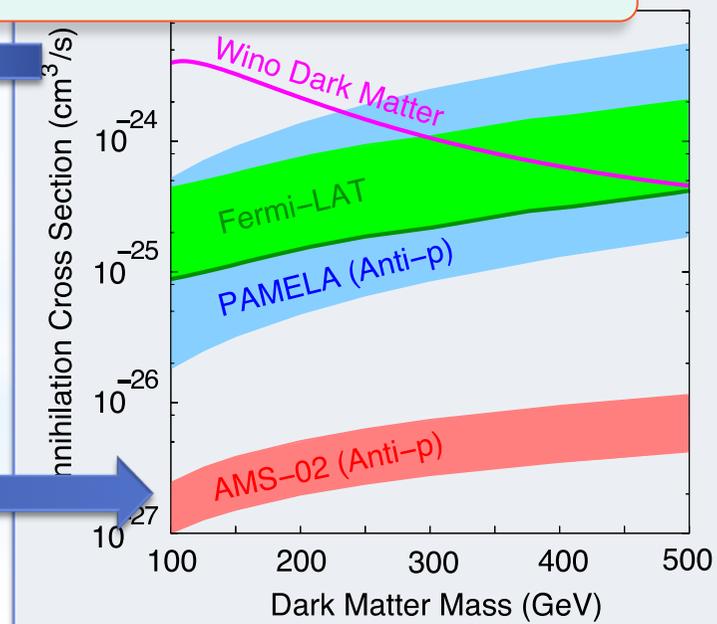
# B# と DM の共生成シナリオ: 結果

Kamada, Kawasaki, M.Y., 13



wino の thermal relic で DMが説明できる値

## ウィーノ LSPへの制限

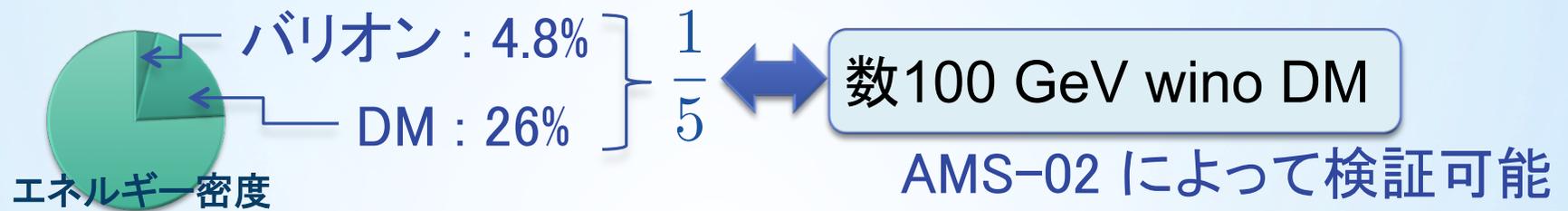


Future sensitivity  
 → 数100 GeV wino は  
 AMS-02によって検証可能

# Conclusion

Kamada, Kawasaki, M.Y., 13

- Gravity mediation (anomaly mediation でも同様), wino LSP
- $\bar{u}d\bar{d}$  平坦方向の Q-ball



- Q-ballの崩壊から生じた wino が対消滅せずに残るためには  
バリオンを薄める必要がある → { thermal inflation  
domain wall decay