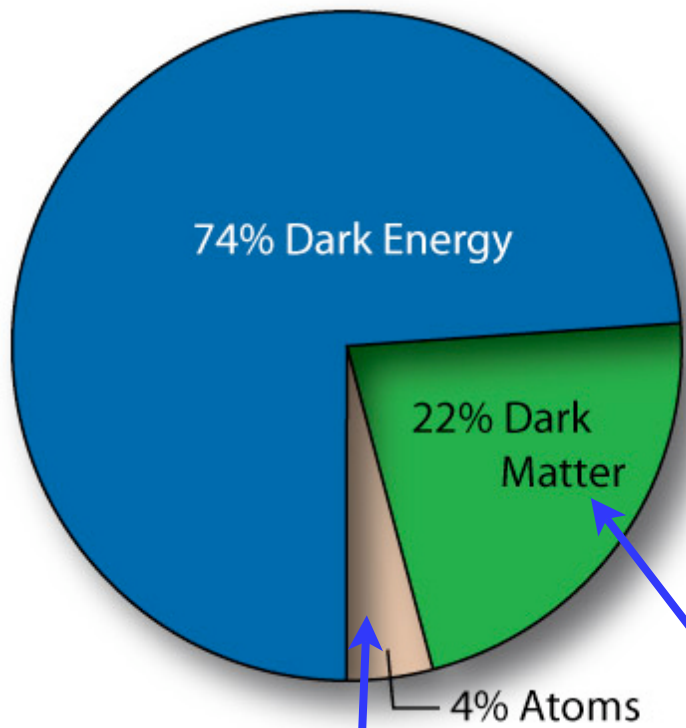


Baryon Asymmetry in Heavy Moduli Scenario

東京大学宇宙線研究所 中山和則

M. Kawasaki and KN, arXiv:0705.0079 [hep-ph]

研究会「宇宙初期における時空と物質の進化」 東京大学(2007/5/30)



ダークマター (~22%)
バリオン (~4%)

バリオン>>反バリオン
(バリオン非対称性)

いずれも標準模型を超えた物理の
存在を示唆している

Lightest SUSY Particle(LSP)

Affleck-Dine mechanism, etc.

超対称性

SUSY breaking mechanism

Gravity-mediation

Gauge-mediation

Anomaly-mediation

Mirage-mediation ...

FCNC, CPV

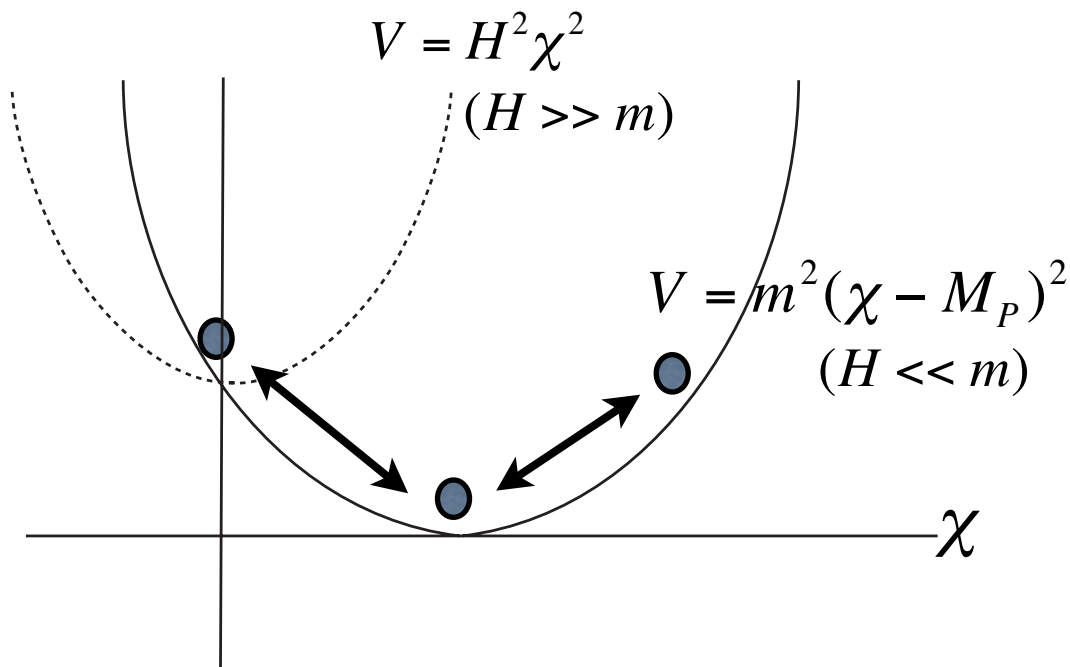
グラビティーノ問題

Moduli(Polonyi)問題

Moduli Problem

B.de Carlos, J.A. Casas, F. Quevedo, E. Rouet ('93)

T. Banks, D. B. Kaplan, A. E. Nelson ('94)



- SUSYの破れを担う

Hidden sector field

- 超弦理論における
余次元のコンパクト化



Singlet scalar場 χ : **moduli**

moduli : 超対称性の破れに伴い $m = m_{3/2}$ 程度の質量を持つ

→ $H \approx m$ でコヒーレントな振動を開始

→ 宇宙のエネルギーを支配

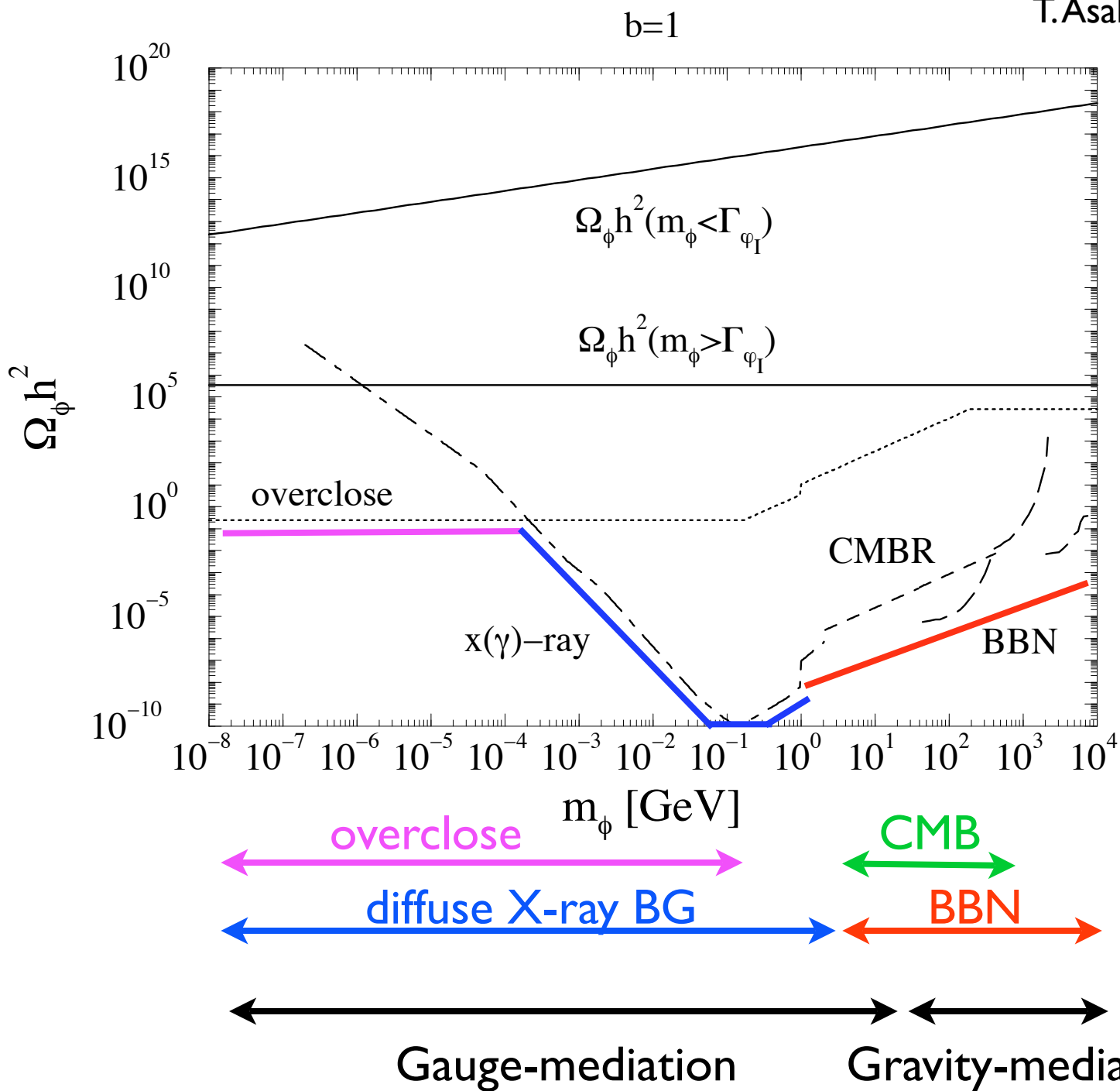
長寿命—BBN, CMB, diffuse

Gamma等から強い制限

$$\tau \approx \Gamma^{-1} \approx \left(\frac{m^3}{M_P^2} \right)^{-1} \geq 1 \text{ sec}$$

Constraints on moduli density

T.Asaka, M. Kawasaki (1999)



Strong disagreement
with observation for
 $m \leq O(10\text{TeV})$



What if the modulus is
heavy enough ?

$m > O(10\text{TeV})$



$\tau_\chi < 1\text{sec.}$

Heavy moduli ?

- Anomaly-mediation $m_{3/2} \approx (8\pi^2)m_{SUSY} \rightarrow m_{3/2} \approx O(10\text{TeV} - 100\text{TeV})$
- Mirage-mediation Motivated by KKLT flux compactification in type IIB string theory
Kahler moduli : $m_\chi \approx (4\pi^2)m_{3/2} \gg O(100\text{TeV})$

このような Heavy moduli scenario において
バリオン数やダークマターを説明することができるか？

Heavy moduli ?

- Anomaly-mediation $m_{3/2} \approx (8\pi^2)m_{SUSY} \rightarrow m_{3/2} \approx O(10\text{TeV} - 100\text{TeV})$
- Mirage-mediation Motivated by KKLT flux compactification in type IIB string theory
Kahler moduli : $m_\chi \approx (4\pi^2)m_{3/2} \gg O(100\text{TeV})$

このような Heavy moduli scenario において
バリオン数やダークマターを説明することができるか？

Moduli decay による再加熱温度 $T_\chi \approx O(1\text{MeV} \sim 1\text{GeV})$

→ Large dilution of baryon number

→ Affleck-Dine mechanism ?

→ $T_\chi < T_f \approx m_{LSP}/20$ Dark matter can not be produced thermally

→ Non-thermal origin ?

→ Moduli-induced gravitino problem (discussed later)

Affleck-Dine baryogenesis

I. Affleck, M. Dine (1985)
M. Dine, L. Randall, Thomas (1996)

超対称標準模型 $\longrightarrow$ Squark, Slepton
(superpartner of quark and lepton)

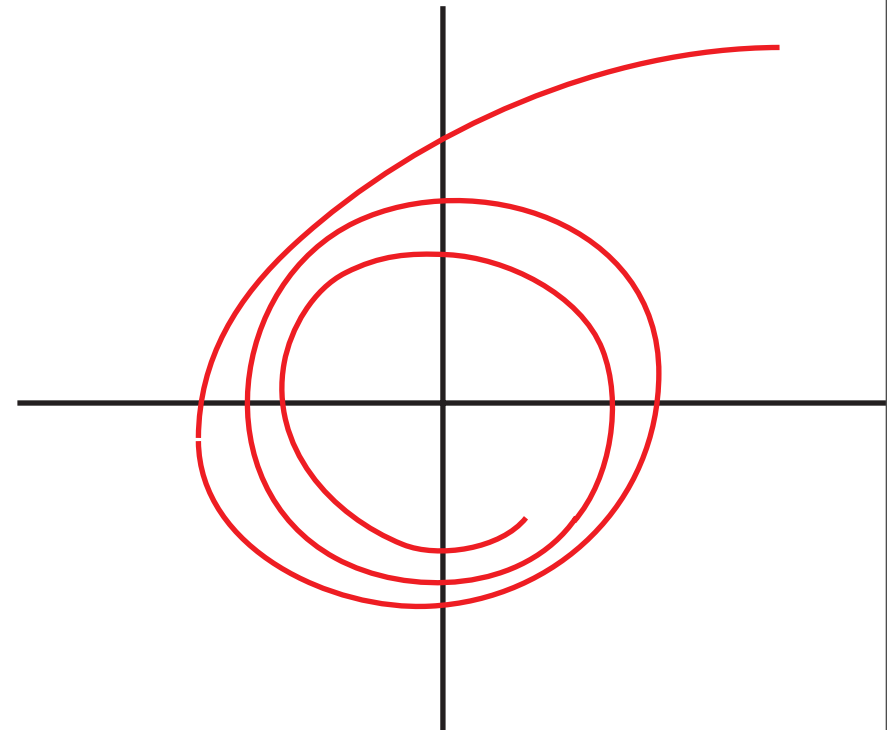
バリオン数を持ち、
ポテンシャルがflatなスカラー場
= Affleck-Dine field

複素平面内でのスカラー場の運動

$\longrightarrow$ バリオン数

$$\text{U(1) charge : } n_B = i(\dot{\phi}\phi^* - \phi^*\dot{\phi}) = |\phi|^2 \dot{\theta}$$
$$\dot{n}_B + 3Hn_B = 2\text{Im}\left(\phi \frac{\partial V}{\partial \phi}\right)$$

$$\text{e.g.) } \tilde{L}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi \\ 0 \end{pmatrix} \quad H_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ \phi \end{pmatrix}$$



Potential of the Affleck-Dine field

$$V(\phi) = (m_\phi^2 - cH^2)|\phi|^2 + \frac{m_{3/2}^2}{M^2}(a_m \phi^4 + \text{h.c.}) + \frac{H^2}{M^2}(a_H \phi^4 + \text{h.c.}) + \dots$$

baryon & CP violating non-renormalizable terms
from Kahler potential

(1) Initially stopped at $\phi_0 = v$

(2) Oscillation begins when $H = m_\phi$

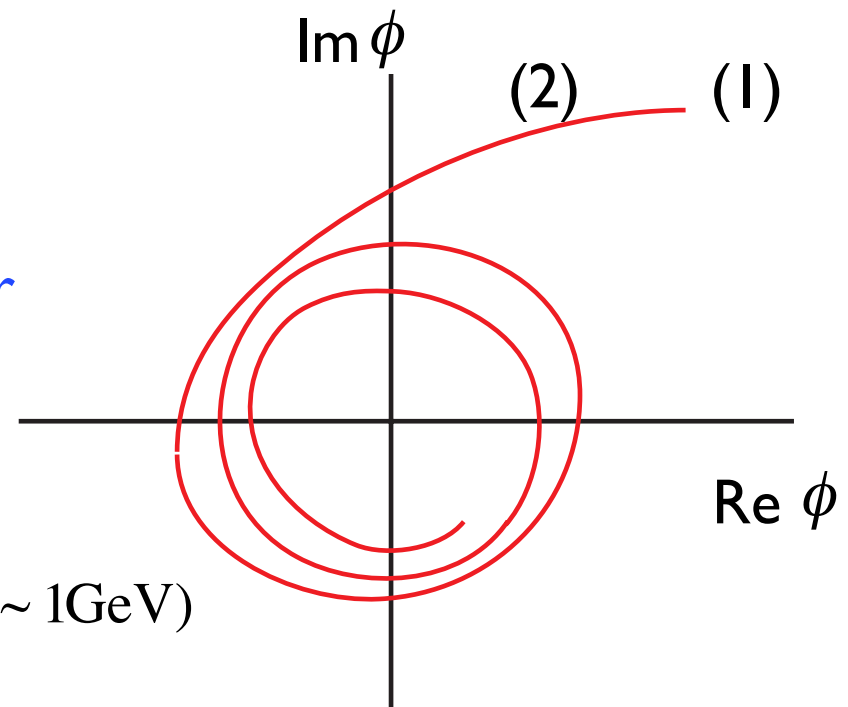
$B \rightarrow$ Generation of baryon number

$CP \rightarrow$ Matter > Anti-matter

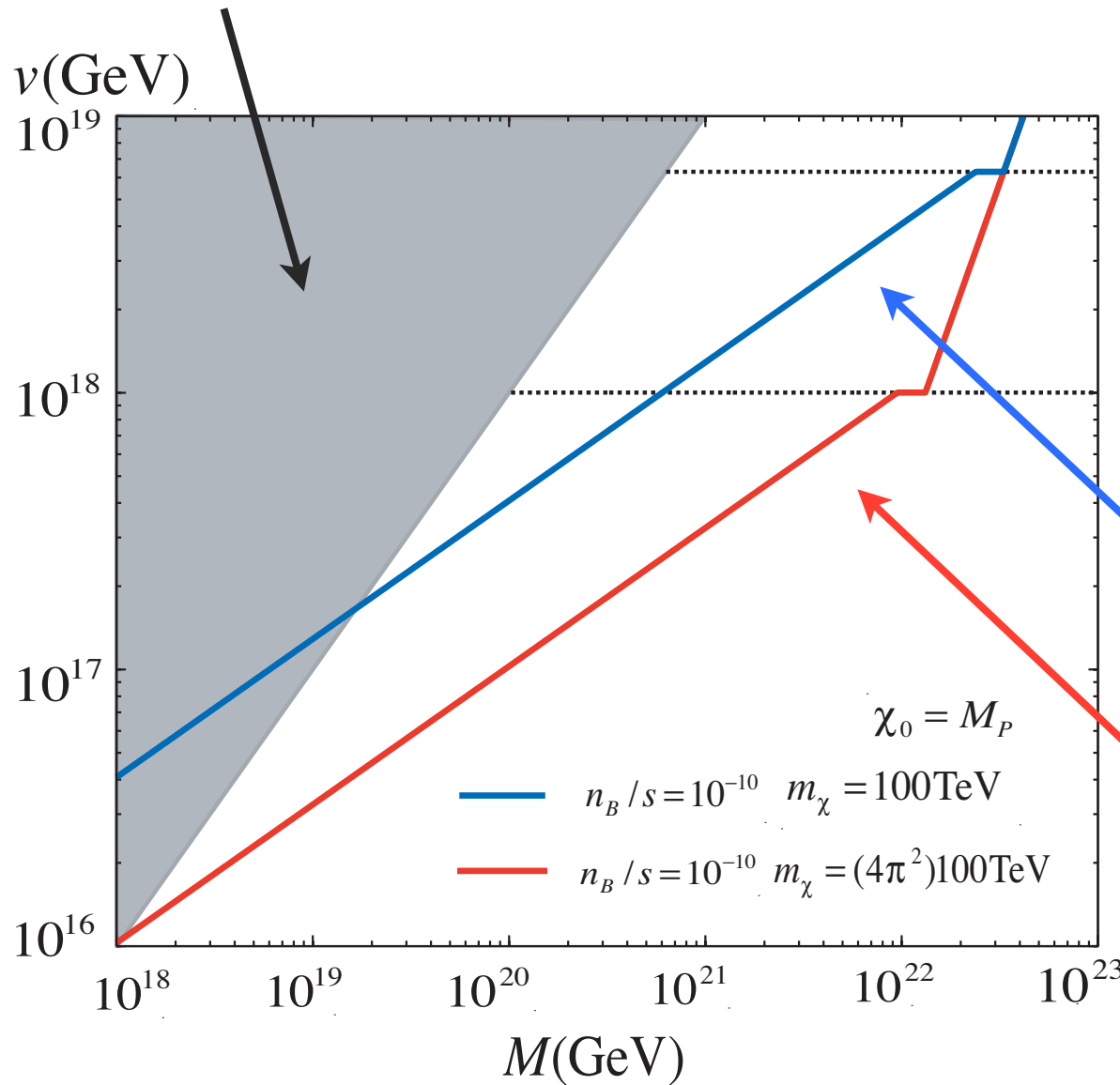
(3) Baryon-to-entropy ratio is
fixed when the modulus decays ($T_\chi \approx 1\text{MeV} \sim 1\text{GeV}$)

Large dilution $\longrightarrow$

Does the baryon asymmetry survive?



Trapped by CCB minimum



Correct baryon number

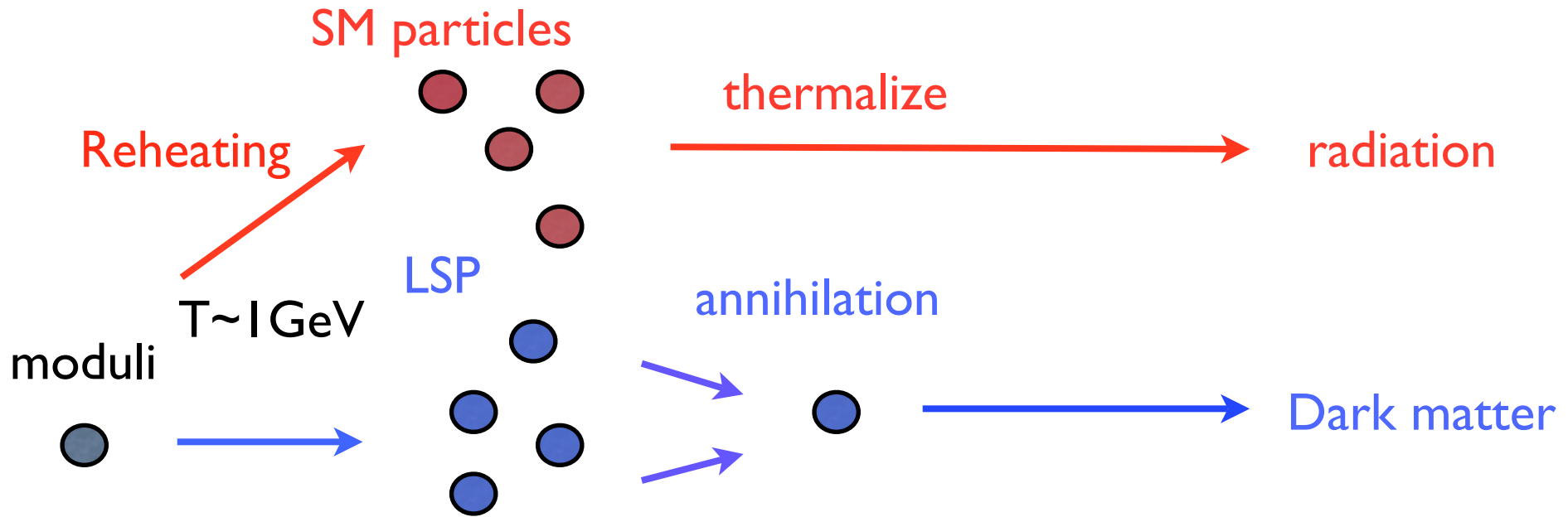
$(m_\chi = 100\text{TeV})$

Correct baryon number

$(m_\chi = (4\pi^2)100\text{TeV})$

ちょうどよいバリオン数を得ることが可能

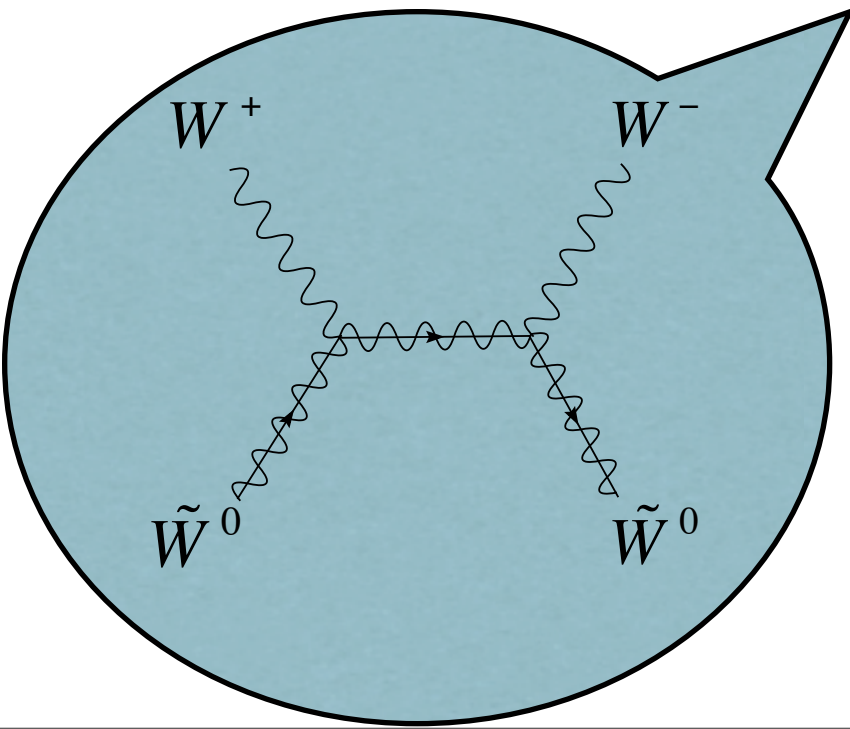
Non-thermal dark matter from moduli decay



LSPがhiggsino-likeあるいはwino-like
neutralino なら丁度良い対消滅断面積

$$\Omega_{LSP} h^2 \approx 0.2 \left(\frac{100 \text{ MeV}}{T_\chi} \right) \left(\frac{10^{-7} \text{ GeV}^{-2}}{\langle \sigma v \rangle} \right) \left(\frac{m_{LSP}}{100 \text{ GeV}} \right)$$

バリオン数とダークマター
を同時に説明可能



Moduli-induced gravitino problem

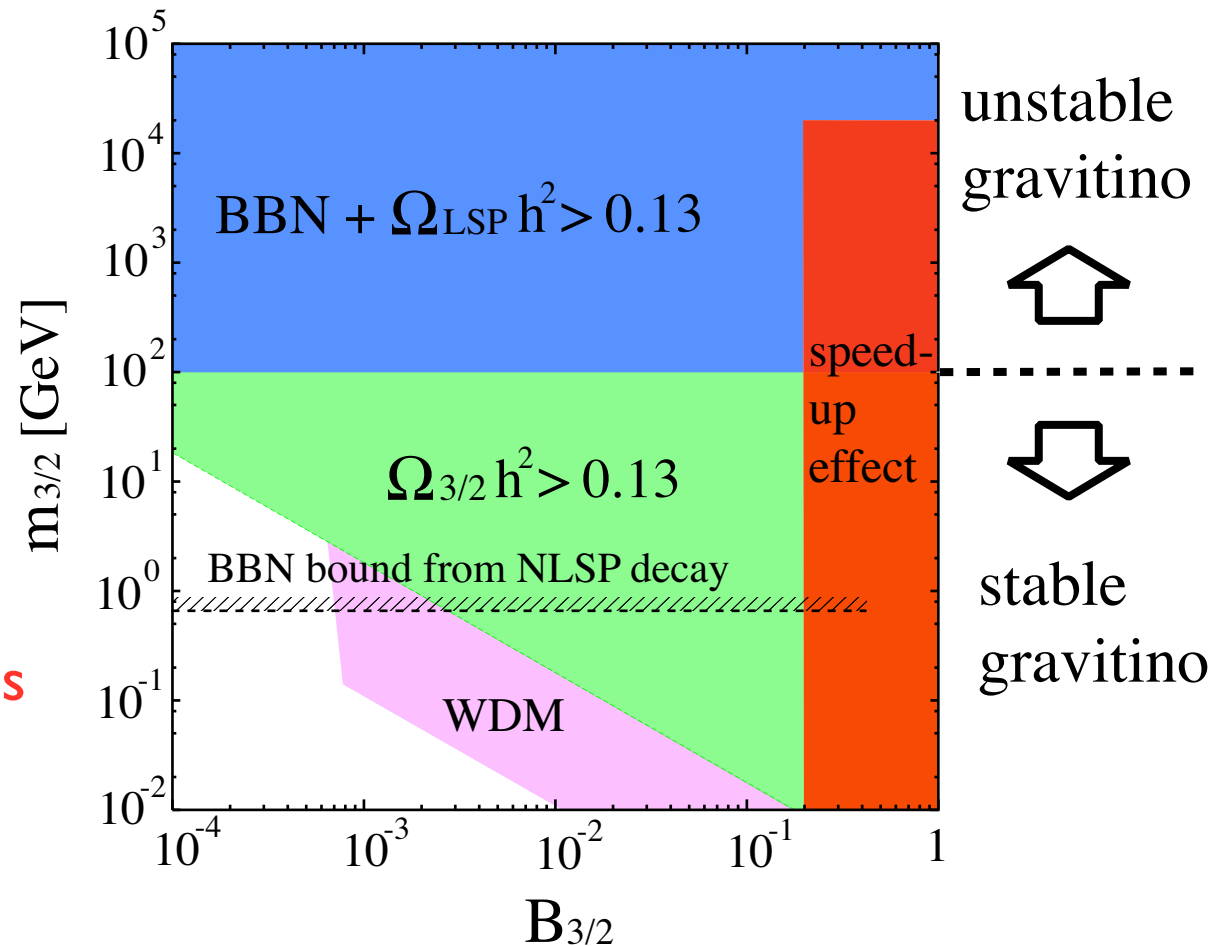
$$\chi \rightarrow \psi_{3/2} \psi_{3/2}$$

M.Endo, K.Hamaguchi, F.Takahashi (2006)
S.Nakamura, M.Yamaguchi (2006)

Moduli decay into gravitinos (spin 1/2 goldstino component)
is not suppressed

$$\text{Br}(\chi \rightarrow \psi_{3/2} \psi_{3/2}) \sim \mathcal{O}(0.01-0.1)$$

Non-thermally produced gravitinos
cause another serious
cosmological difficulty

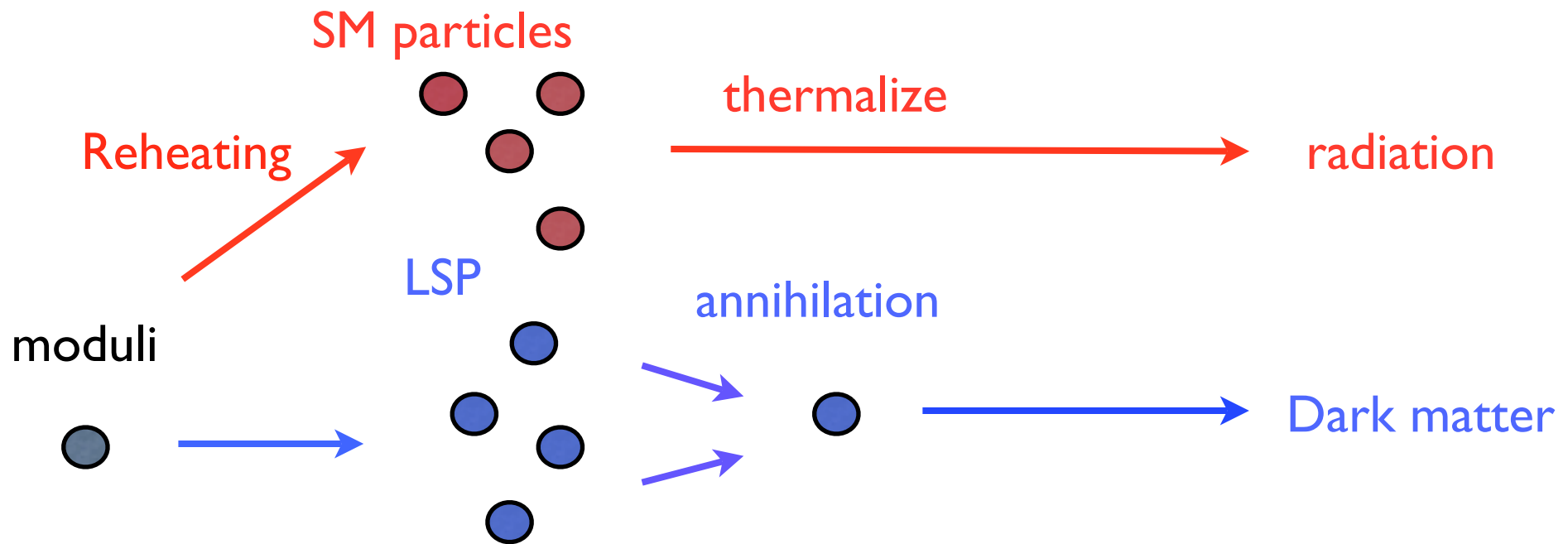


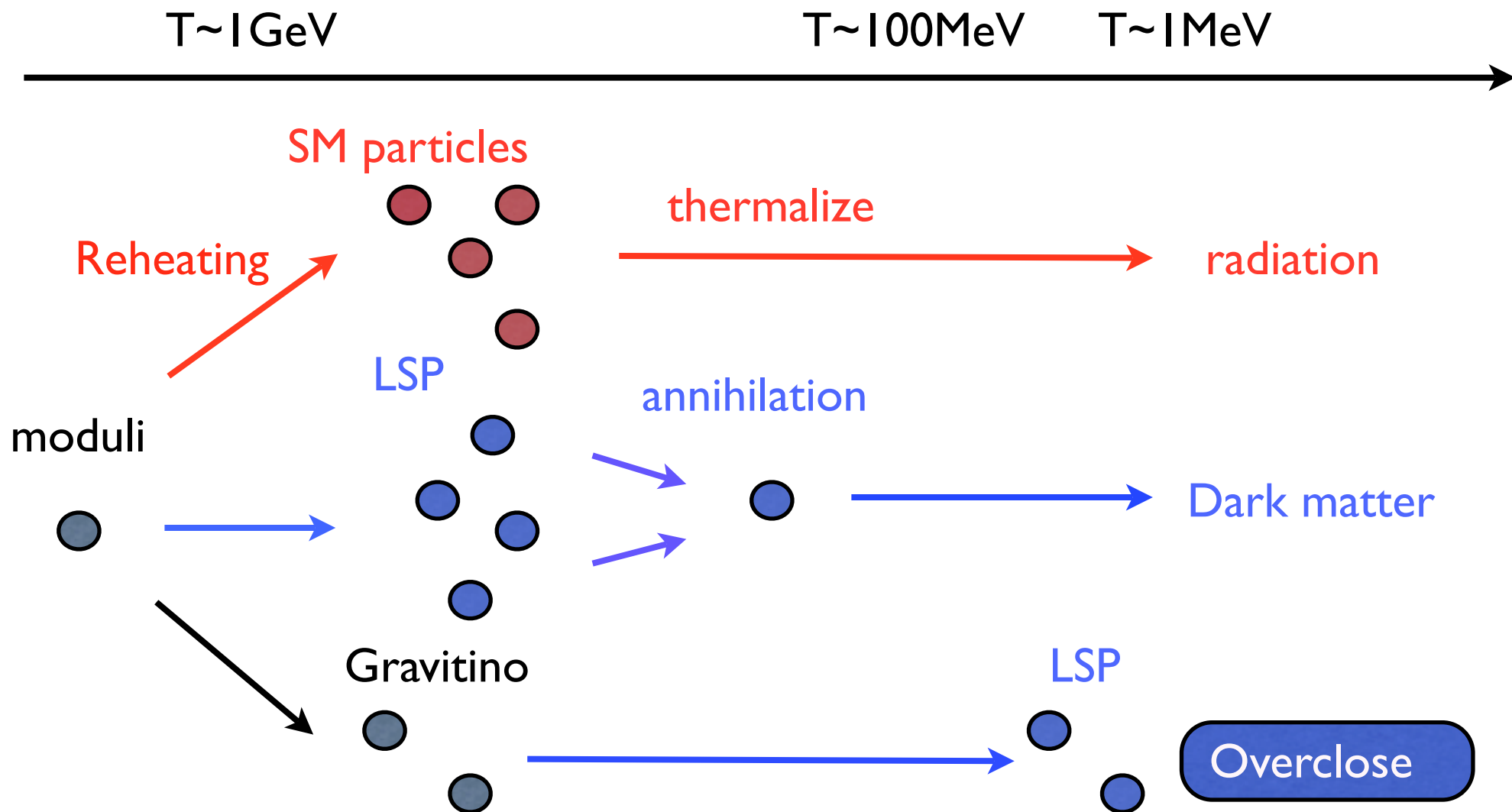
M.Endo, K.Hamaguchi, F.Takahashi (2006)

$T \sim 1 \text{ GeV}$

$T \sim 100 \text{ MeV}$

$T \sim 1 \text{ MeV}$





グラビティーノの崩壊から生じたLSPが宇宙をoverclose

$$\Omega_{LSP \leftarrow GRAVITINO} h^2 \approx 20 \left(\frac{Br(\chi \rightarrow 2\psi_{3/2})}{0.01} \right) \left(\frac{m_{LSP}}{100 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{m_\chi}{100 \text{ TeV}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Dilution of gravitinos by Q-ball decay

Affleck-Dine 場の発展に伴い instability が成長、
Non-topological soliton (Q-ball) が形成

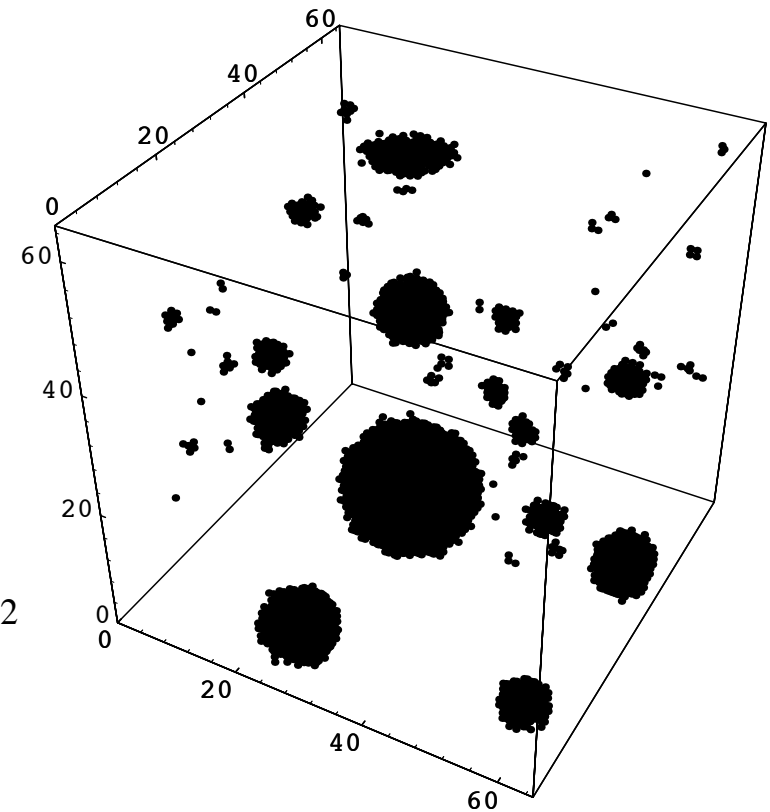
S. Coleman (1985)
A. Kusenko (1997)

↓
Affleck-Dine 場の寿命が長くなる

↓
Q-ball が宇宙を dominate
Q-ball の崩壊によって
グラビティーノを薄める

$$Q \approx 10^{26} \left(\frac{v}{M_P} \right)^2 \quad T_Q \approx 180 \text{ MeV} \left(\frac{10^{26}}{Q} \right)^{1/2}$$

Dilution factor : $\Delta = \frac{T_\chi}{T_Q} \left(\frac{v}{\chi_0} \right)^2$

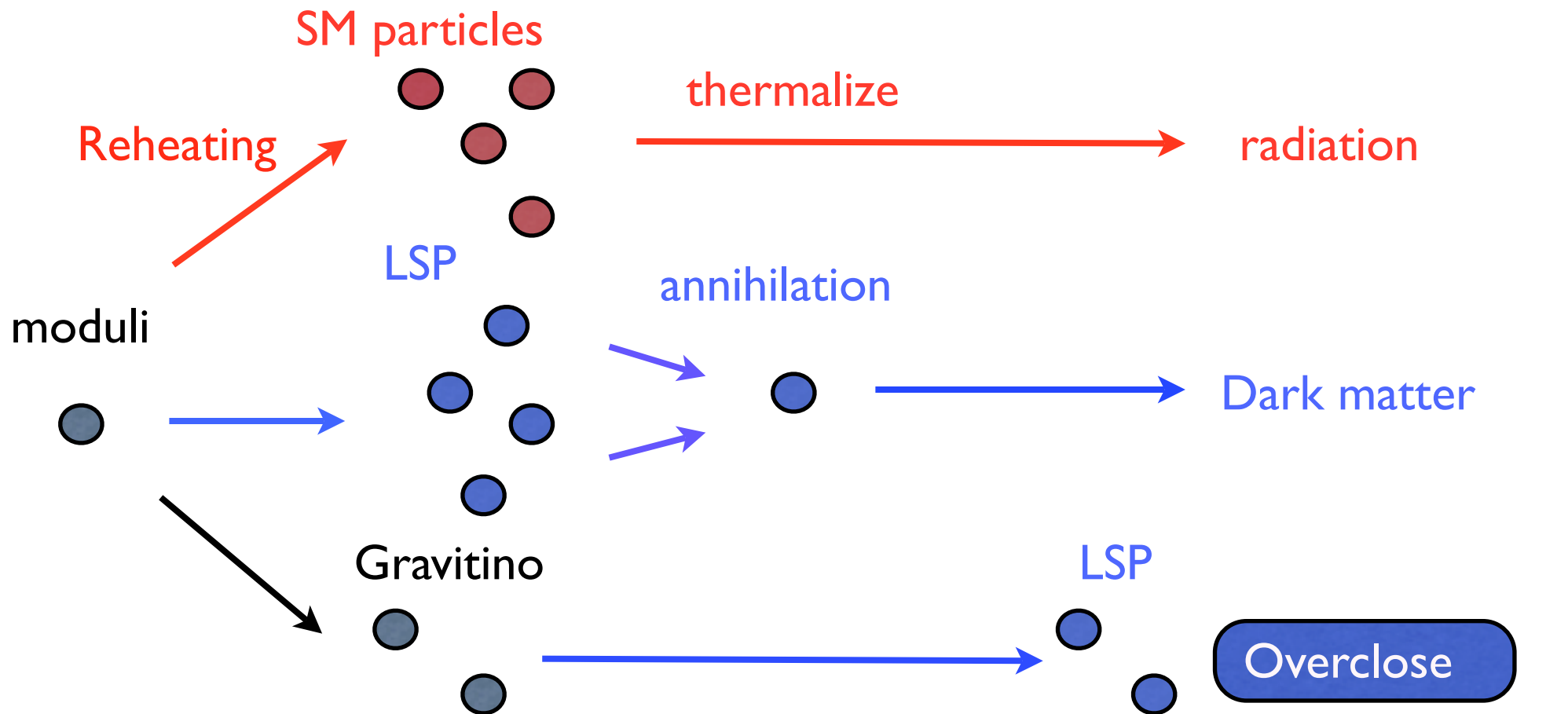


S. Kasuya, M. Kawasaki (2000)

$T \sim 1 \text{ GeV}$

$T \sim 100 \text{ MeV}$

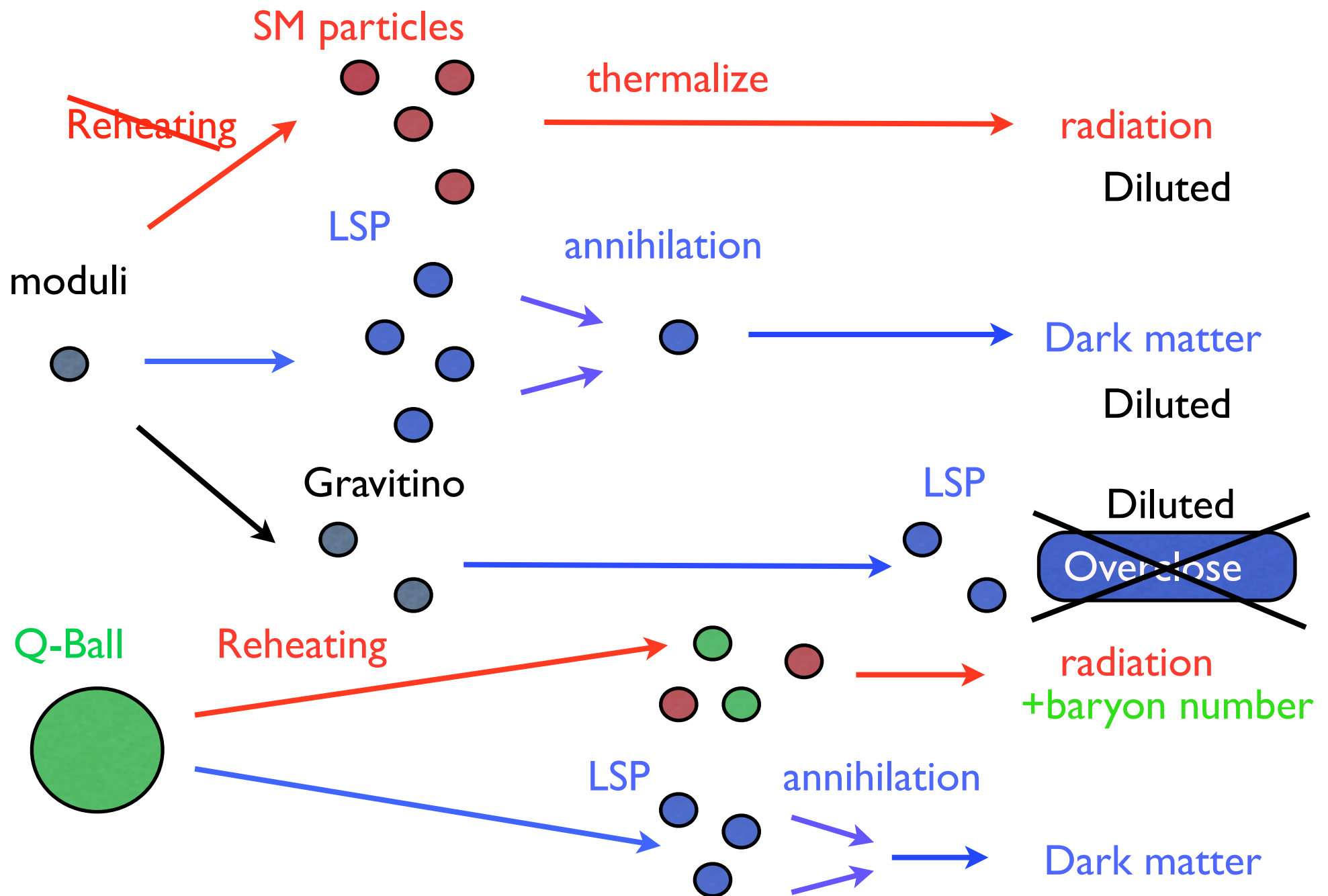
$T \sim 1 \text{ MeV}$

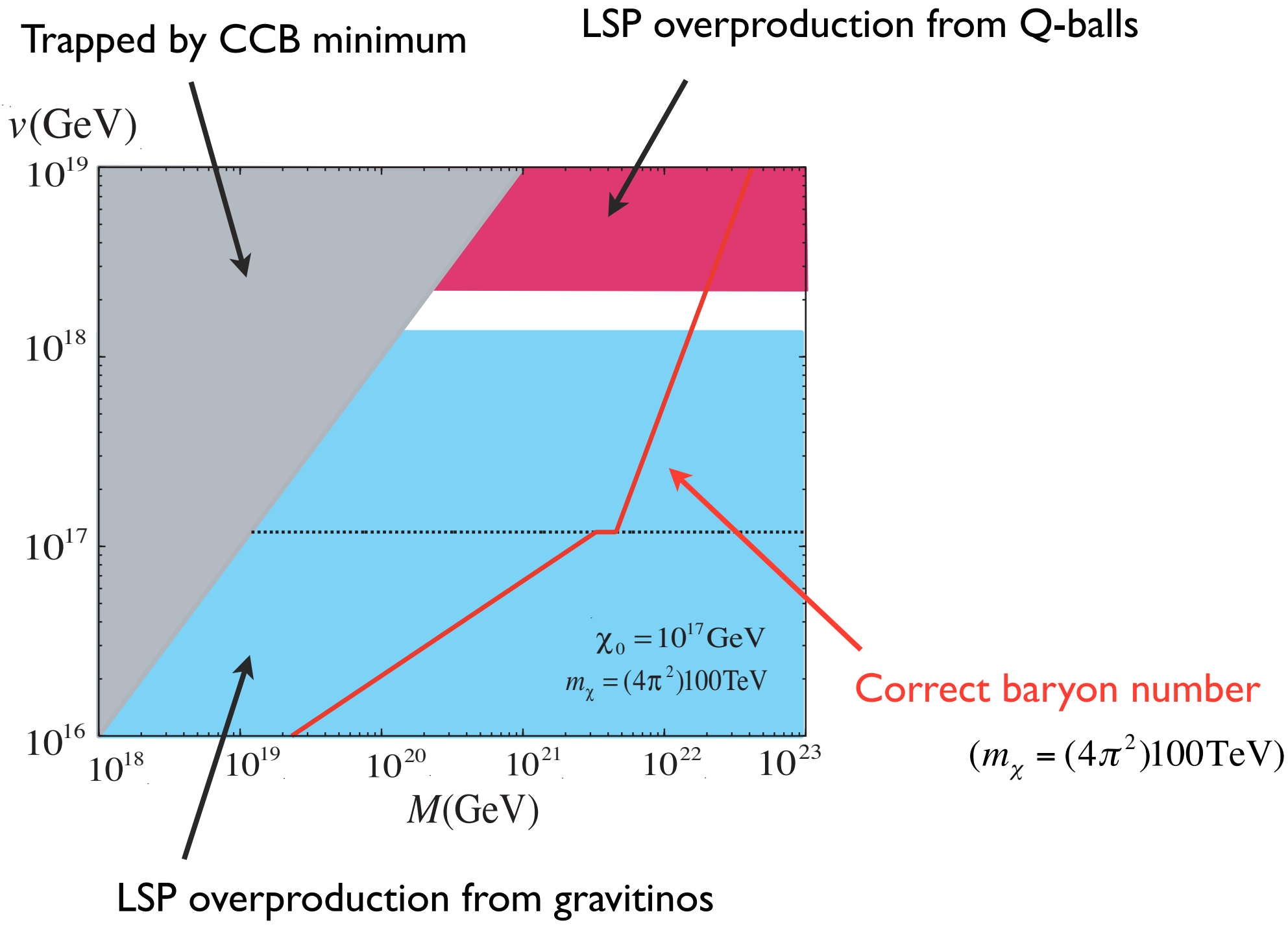


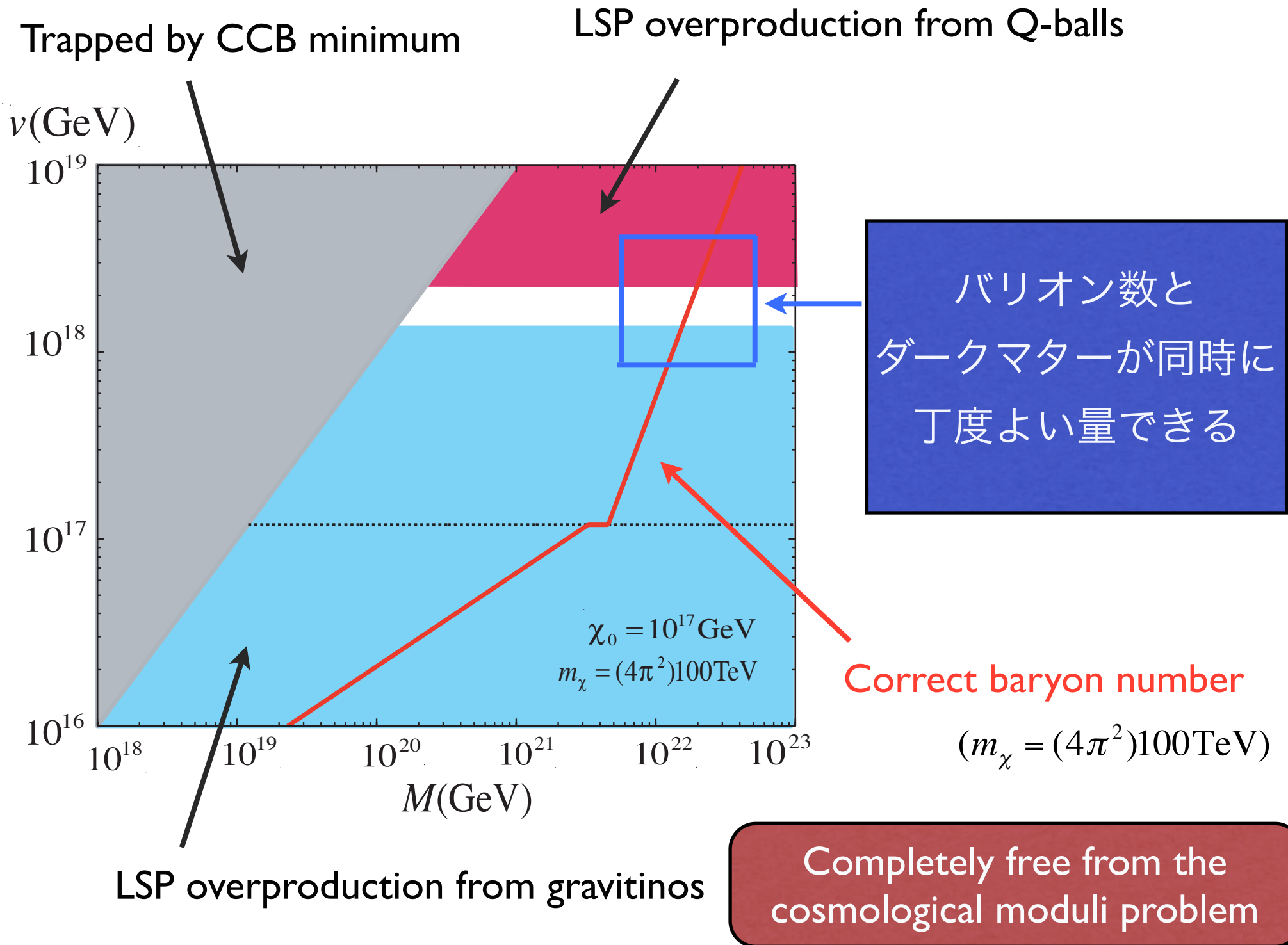
$T \sim 1 \text{ GeV}$

$T \sim 100 \text{ MeV}$

$T \sim 1 \text{ MeV}$







Summary

超重力理論、超弦理論



Moduli

Heavy moduli scenario (anomaly-mediation, mirage-mediation,...)
におけるバリオン数生成とダークマターの可能性

バリオン数 ← Affleck-Dine mechanism

ダークマター ← モジュライ、グラビティーノ、Q-ball等の
崩壊から生じる非熱的ニュートラリーノ



通常の熱的シナリオに比べて大きい対消滅断面積が必要
(wino-like, higgsino-like,...)

加速器実験、直接／間接検出等で区別可能

Hidden sector スカラー場のダイナミクスを考慮した
宇宙論的シナリオを構築することは重要