

非熱的暗黒物質とその 検出可能性

東京大学宇宙線研究所 中山 和則

M.Nagai and KN, PRD76, 123501(2007)

M.Nagai and KN, arXiv:0807.1634

J.Hisano, M.Kawasaki, K.Kohri and KN, in preparation

「第8回 宇宙における時空・物質・構造の進化」研究会 (2008/8/31)

Contents

- 超対称性理論における非熱的暗黒物質
- 非熱的暗黒物質の直接／間接検出
 - 原子核散乱による直接検出
 - 銀河中心での対消滅からくるガンマ線
 - 太陽近傍での対消滅からくる陽電子
 - 太陽内での対消滅からくるニュートリノ

Contents

- 超対称性理論における非熱的暗黒物質
- 非熱的暗黒物質の直接／間接検出
 - 原子核散乱による直接検出 → CDMS, XENON, XMASS...
 - 銀河中心での対消滅からくるガンマ線 → GLAST
 - 太陽近傍での対消滅からくる陽電子 → PAMELA
 - 太陽内での対消滅からくるニュートリノ → IceCube

超対称標準模型

- Higgs質量の2次発散をキャンセル
- GUT scaleでゲージ結合定数が統一
- 局所化：超重力理論
- 暗黒物質の候補

超対称標準模型

- Higgs質量の2次発散をキャンセル
 - GUT scaleでゲージ結合定数が統一
 - 局所化：超重力理論
 - 暗黒物質の候補
- SUSY particles
- Squark
Slepton
Gaugino
Higgsino
Gravitino

超対称標準模型

- Higgs質量の2次発散をキャンセル
- GUT scaleでゲージ結合定数が統一
- 局所化：超重力理論
- 暗黒物質の候補

SUSY particles

Squark

Slepton

Gaugino
Higgsino

Gravitino

Chargino
Neutralino

超対称標準模型

- Higgs質量の2次発散をキャンセル
- GUT scaleでゲージ結合定数が統一
- 局所化：超重力理論
- 暗黒物質の候補

SUSY particles

Squark

Slepton

Gaugino
Higgsino

Gravitino

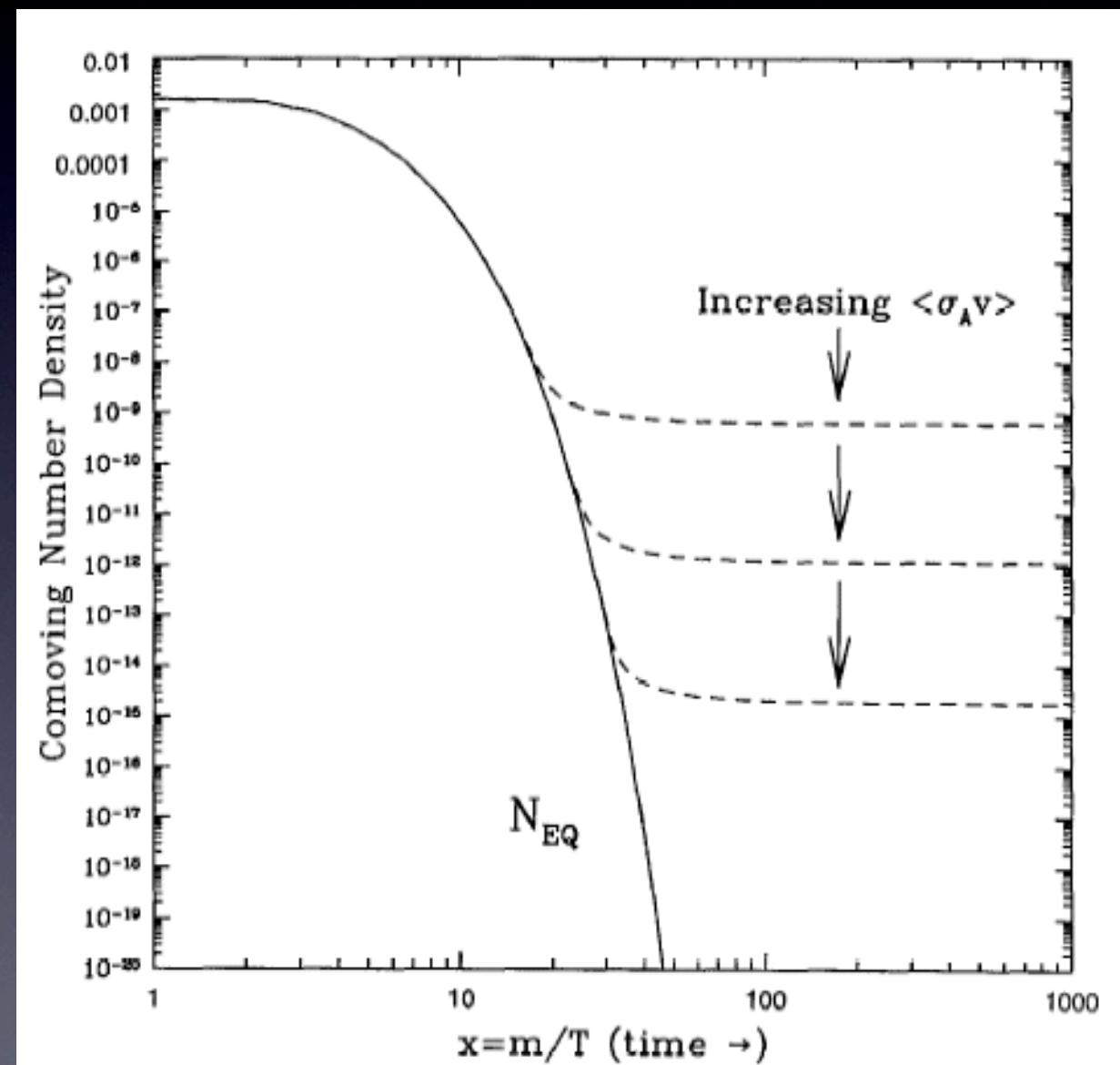
Chargino
Neutralino

暗黒物質の候補

ここではニュートラリーノを考える

■ Thermal production scenario

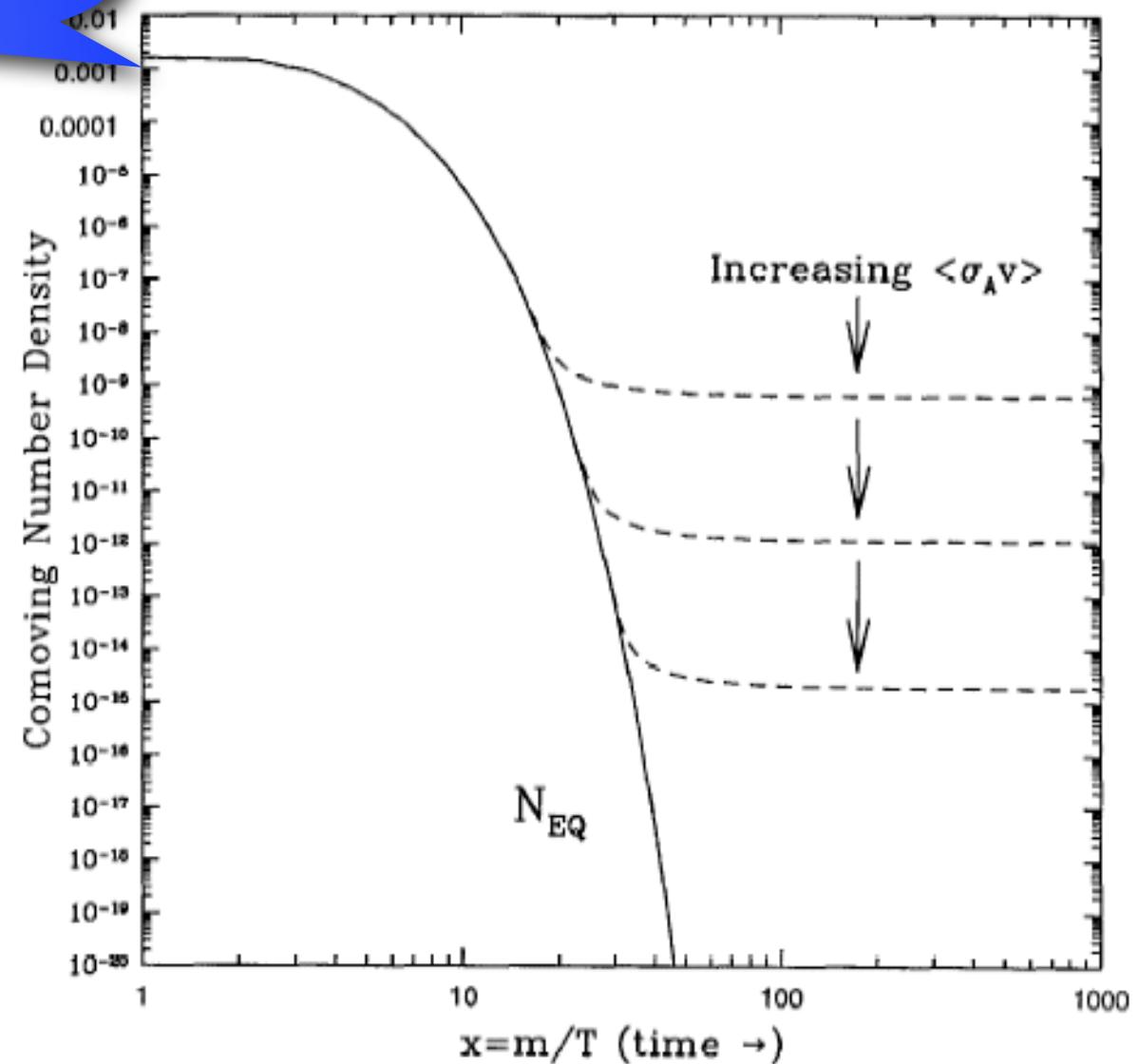
宇宙初期：ニュートラリーノは熱平衡



■ Thermal production scenario

宇宙初期：ニュートラリーノは熱平衡

$$T > m : n_{\tilde{\chi}} \sim T^3$$

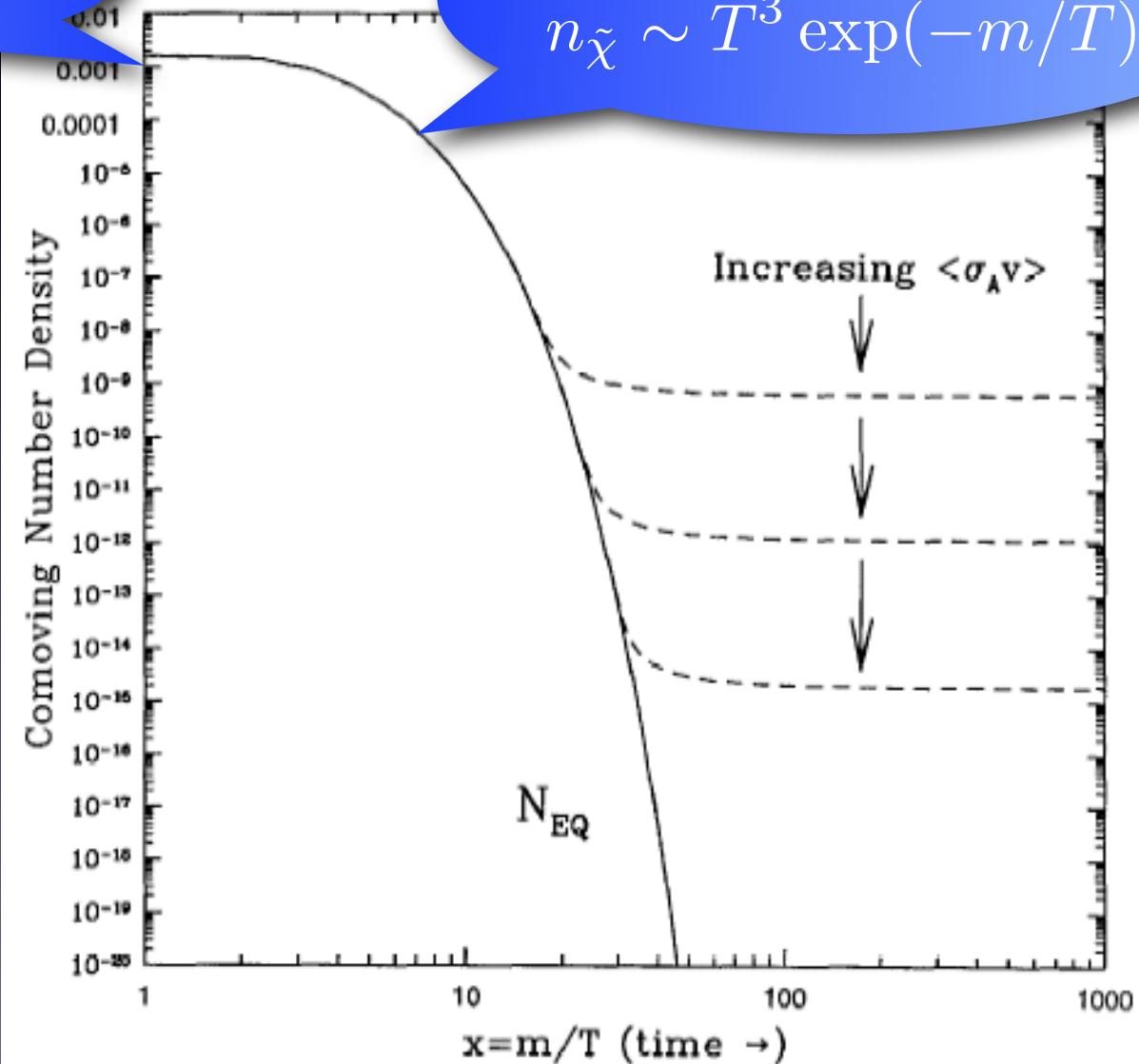


■ Thermal production scenario

宇宙初期：ニュートラリーノは熱平衡

$$T > m : n_{\tilde{\chi}} \sim T^3$$

$$T < m : n_{\tilde{\chi}} \sim T^3 \exp(-m/T)$$

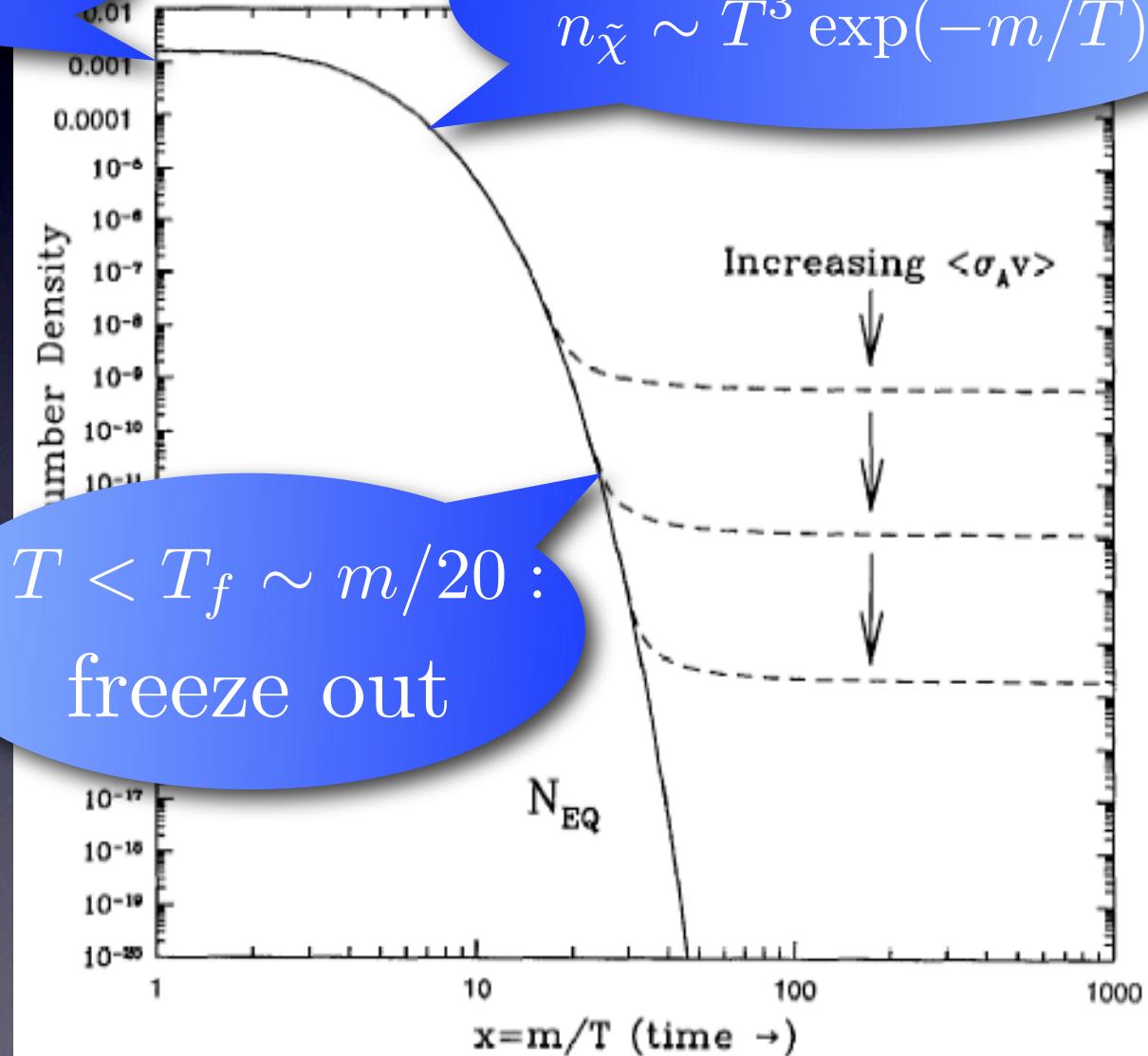


■ Thermal production scenario

宇宙初期：ニュートラリーノは熱平衡

$$T > m : n_{\tilde{\chi}} \sim T^3$$

$$T < m : n_{\tilde{\chi}} \sim T^3 \exp(-m/T)$$



■ Thermal production scenario

宇宙初期：ニュートラリーノは熱平衡

$$T > m : n_{\tilde{\chi}} \sim T^3$$

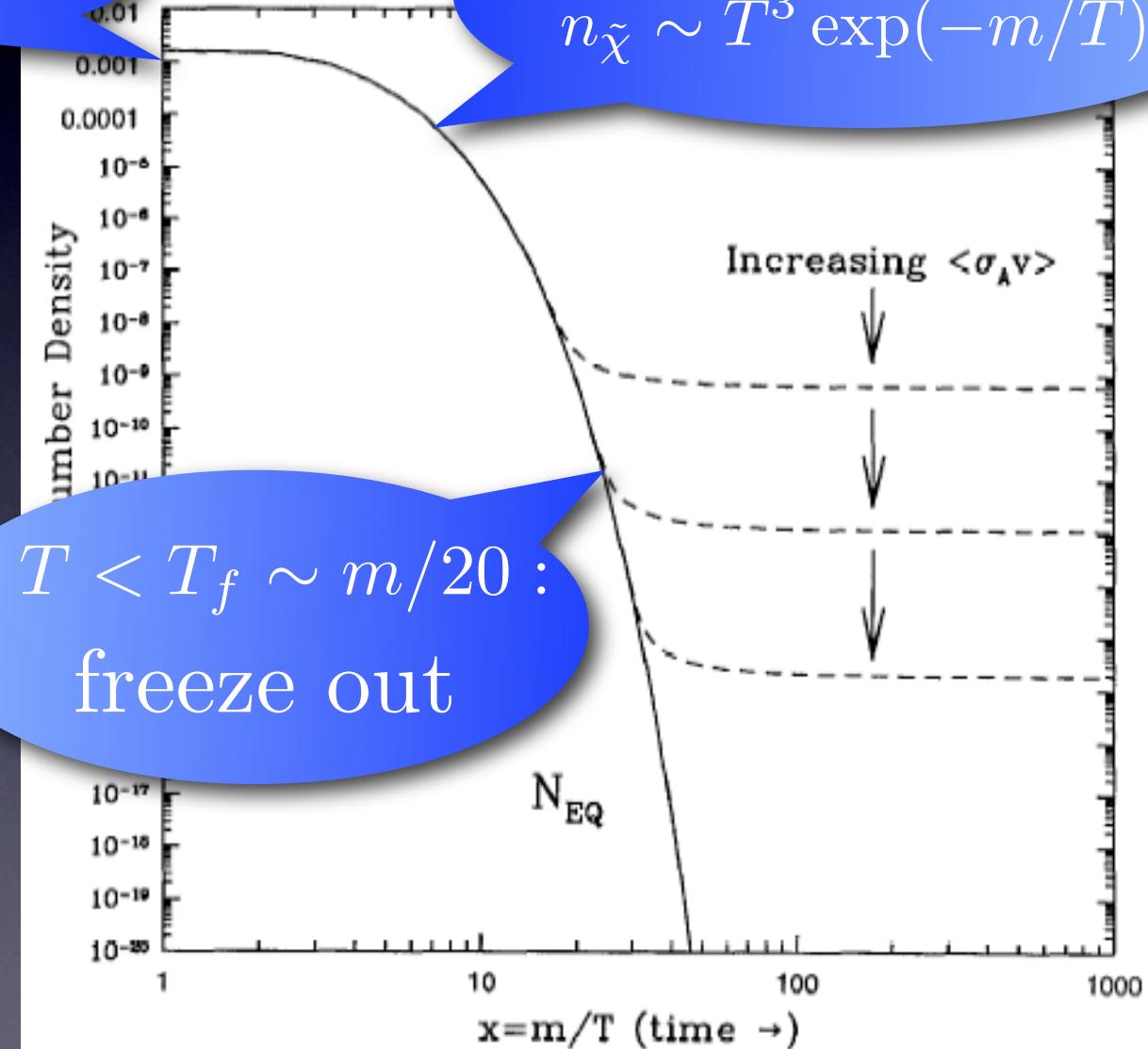
$$T < m : n_{\tilde{\chi}} \sim T^3 \exp(-m/T)$$

脱平衡時の数密度

$$\langle \sigma v \rangle n_{\tilde{\chi}} \sim H \sim \frac{T_f^2}{M_P}$$

$$\frac{n_{\tilde{\chi}}}{s} \sim \frac{1}{M_P T_f \langle \sigma v \rangle}$$

$T < T_f \sim m/20$:
freeze out



■ Thermal production scenario

宇宙初期：ニュートラリーノは熱平衡

$$T > m : n_{\tilde{\chi}} \sim T^3$$

$$T < m : n_{\tilde{\chi}} \sim T^3 \exp(-m/T)$$

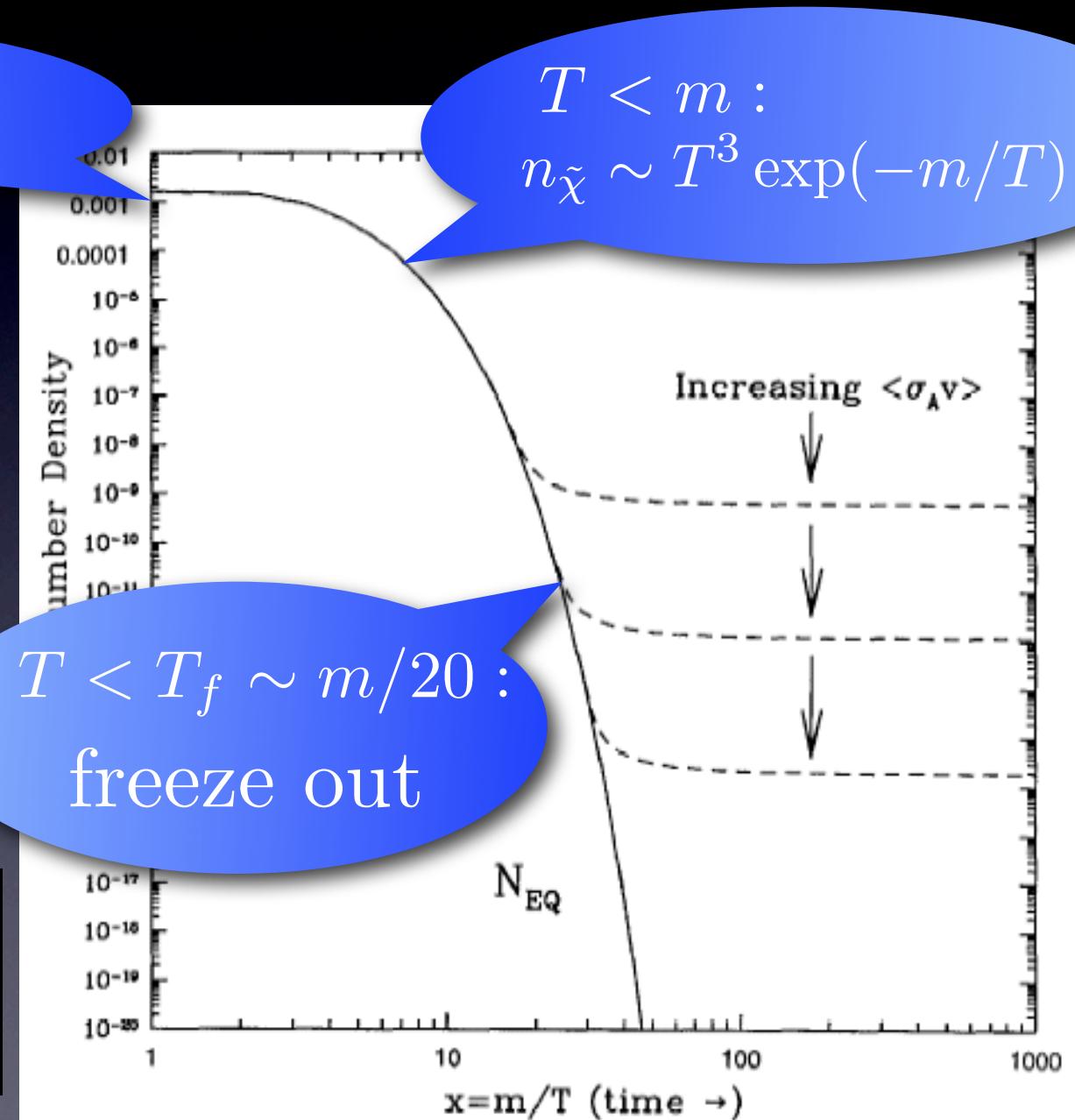
脱平衡時の数密度

$$\langle \sigma v \rangle n_{\tilde{\chi}} \sim H \sim \frac{T_f^2}{M_P}$$

$$\frac{n_{\tilde{\chi}}}{s} \sim \frac{1}{M_P T_f \langle \sigma v \rangle}$$

$T < T_f \sim m/20$:
freeze out

$$\rightarrow \Omega_{\tilde{\chi}} h^2 \sim 0.1 \left(\frac{1 \text{TeV}^2}{\langle \sigma v \rangle} \right).$$



■ Nonthermal production scenario

SUSY → Long-lived particle

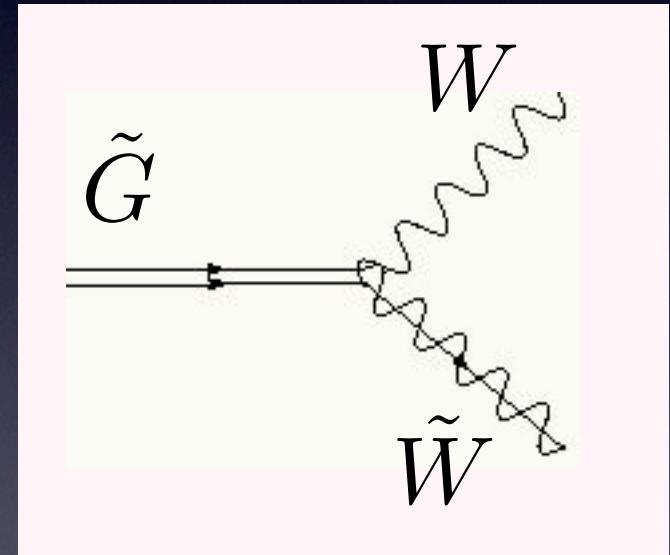
Gravitino, Polonyi, Moduli, Saxon, Q-ball, ...

典型的な崩壊温度 $T_d \lesssim 1\text{GeV}$

- 例：グラビティーノ

寿命 $\tau_{\tilde{G}} \sim \left(\frac{m_{\tilde{G}}^3}{M_P^2} \right)^{-1}$

→ $T_d \sim 100\text{MeV} \left(\frac{m_{\tilde{G}}}{10^3\text{TeV}} \right)^{3/2}$



Long-lived particleの崩壊によって大量に
neutralinoが生成される

● Nonthermal

$$\frac{n_{\tilde{\chi}}}{s} \sim \frac{1}{M_P T_d \langle \sigma v \rangle}$$



非熱的に生成された
ニュートラリーノが
DMの候補になりうる

Kawasaki,Moroi,Yanagida(96)
Moroi,Randall(00), Nagai,KN(07)

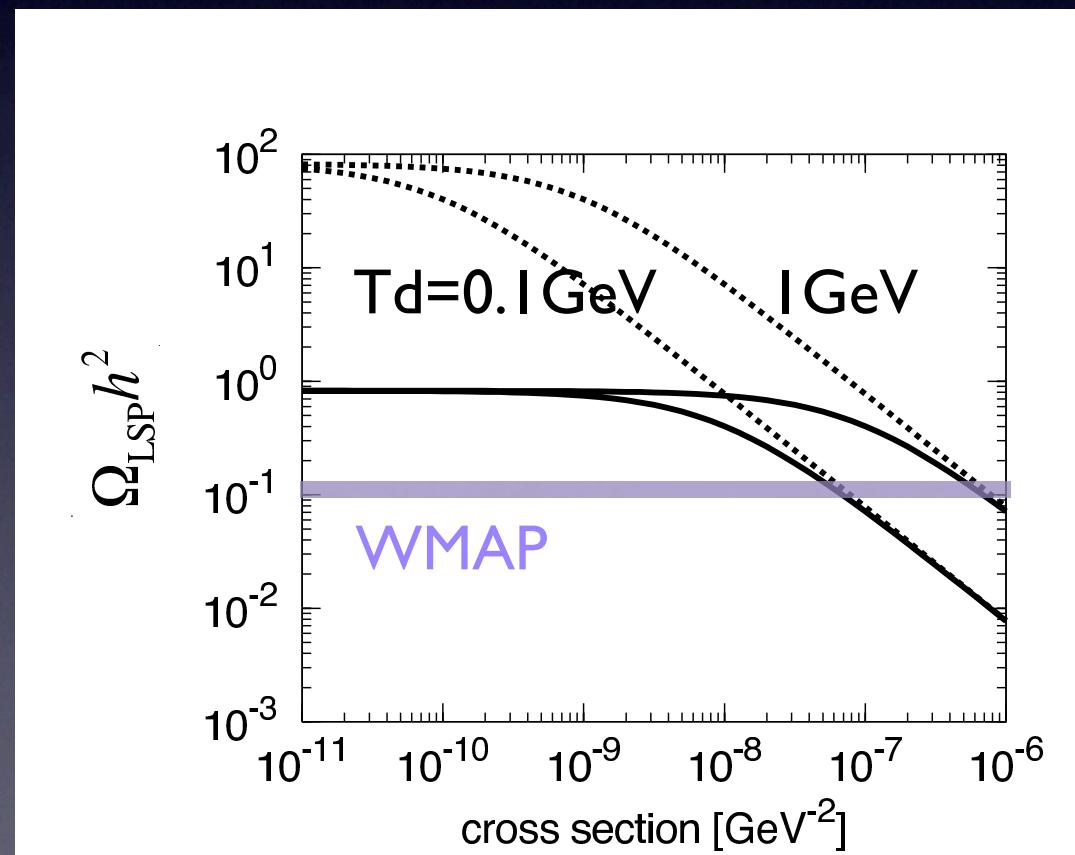
- 特徴：大きな対消滅断面積

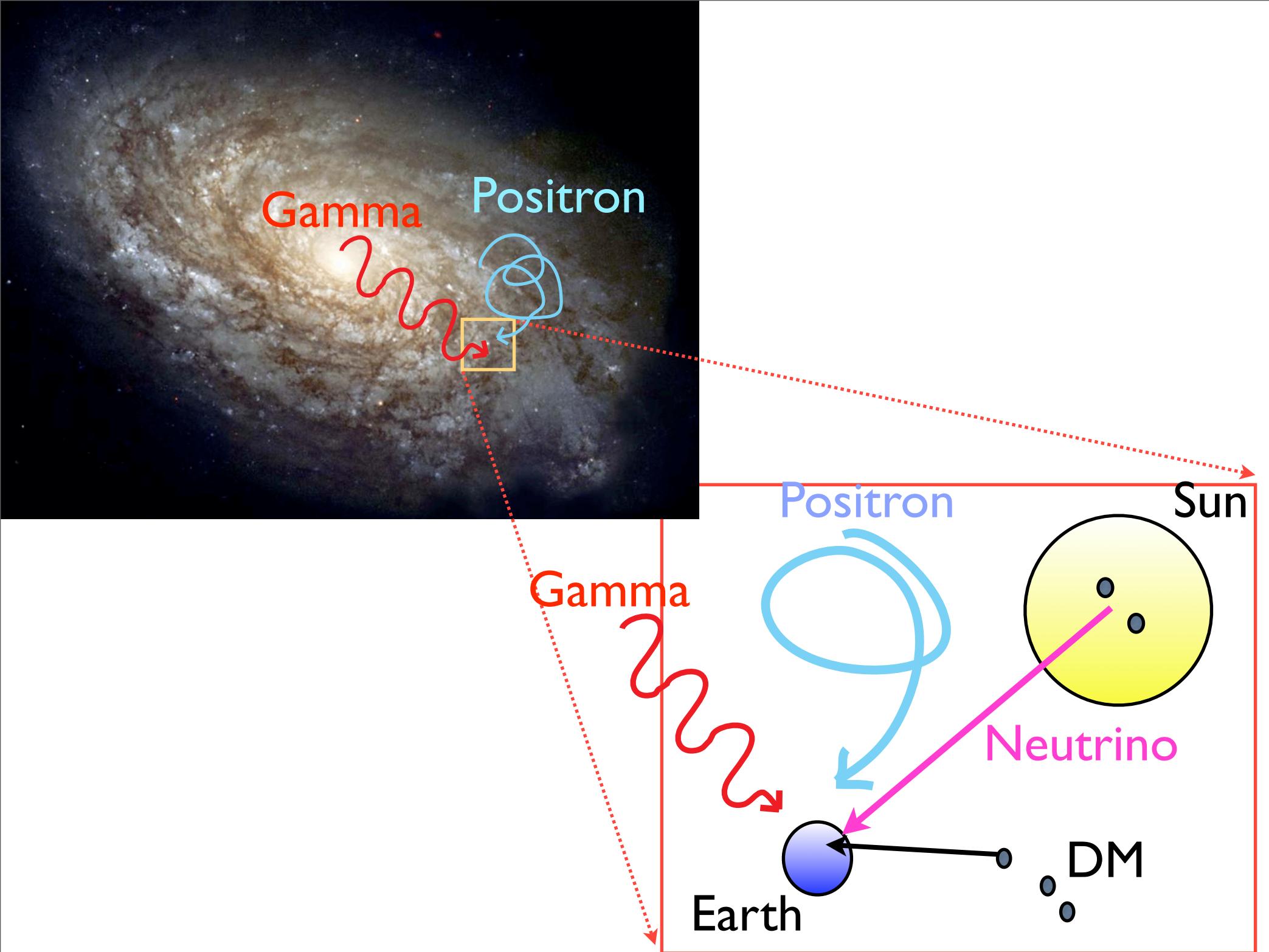


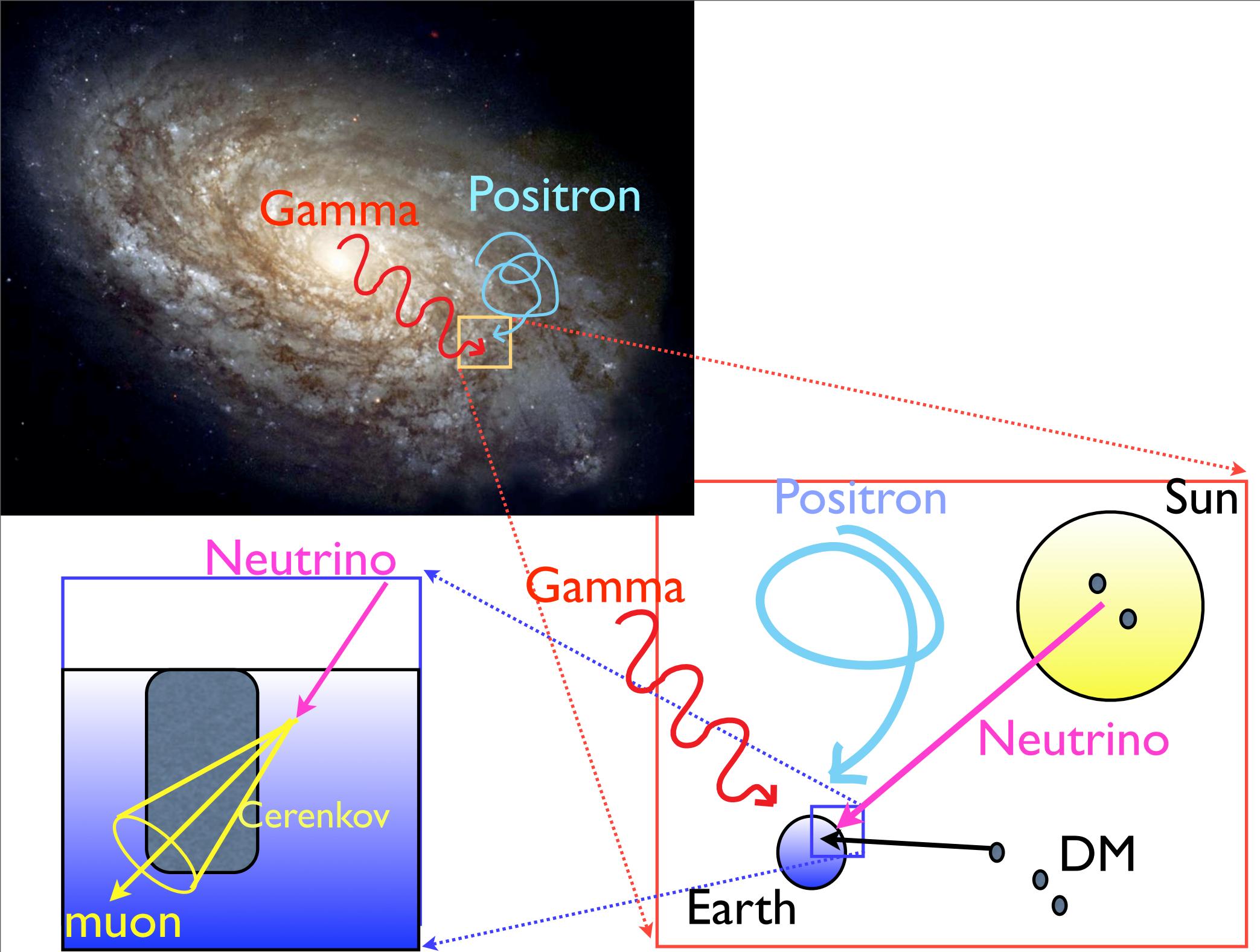
検出できるか？

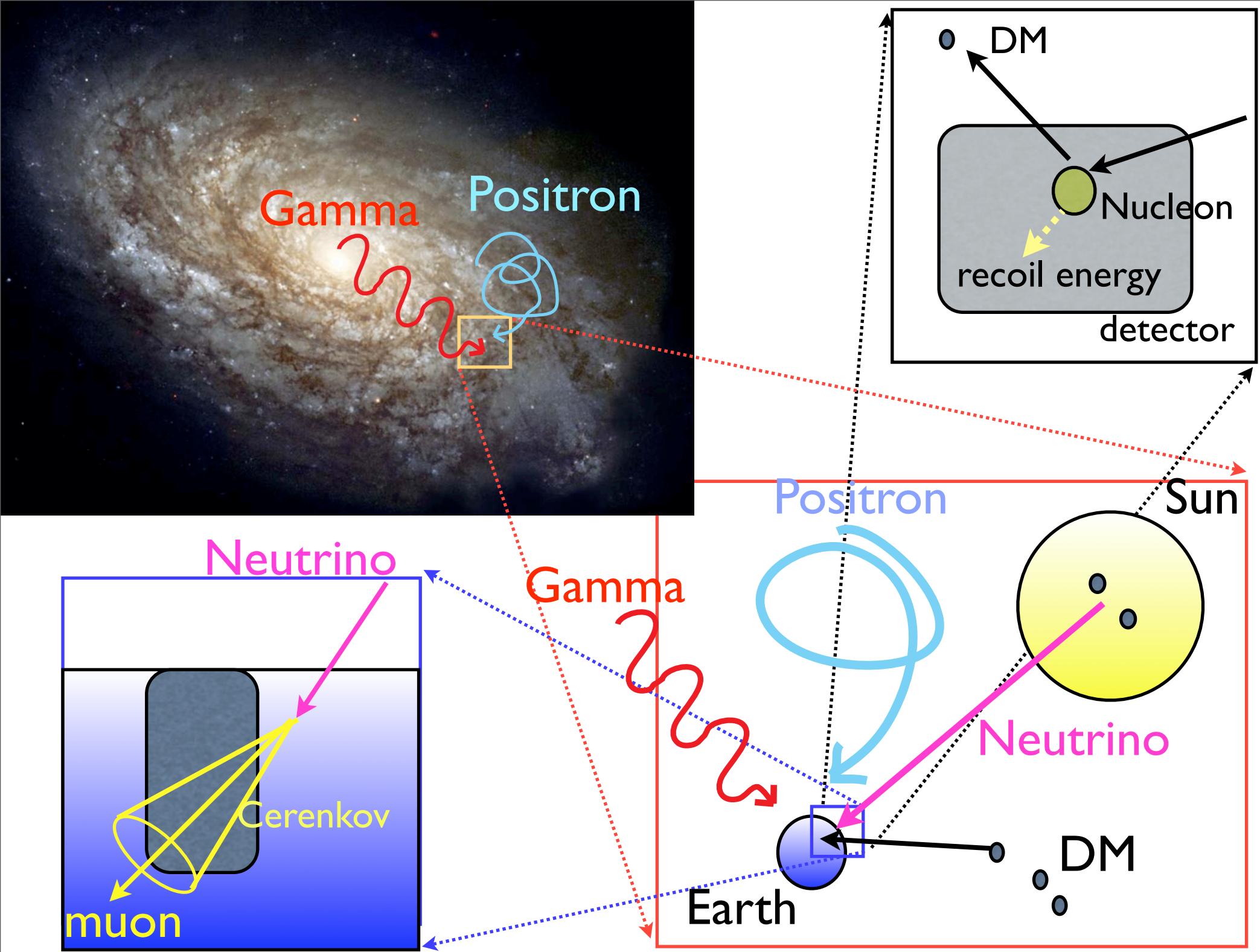
● Thermal

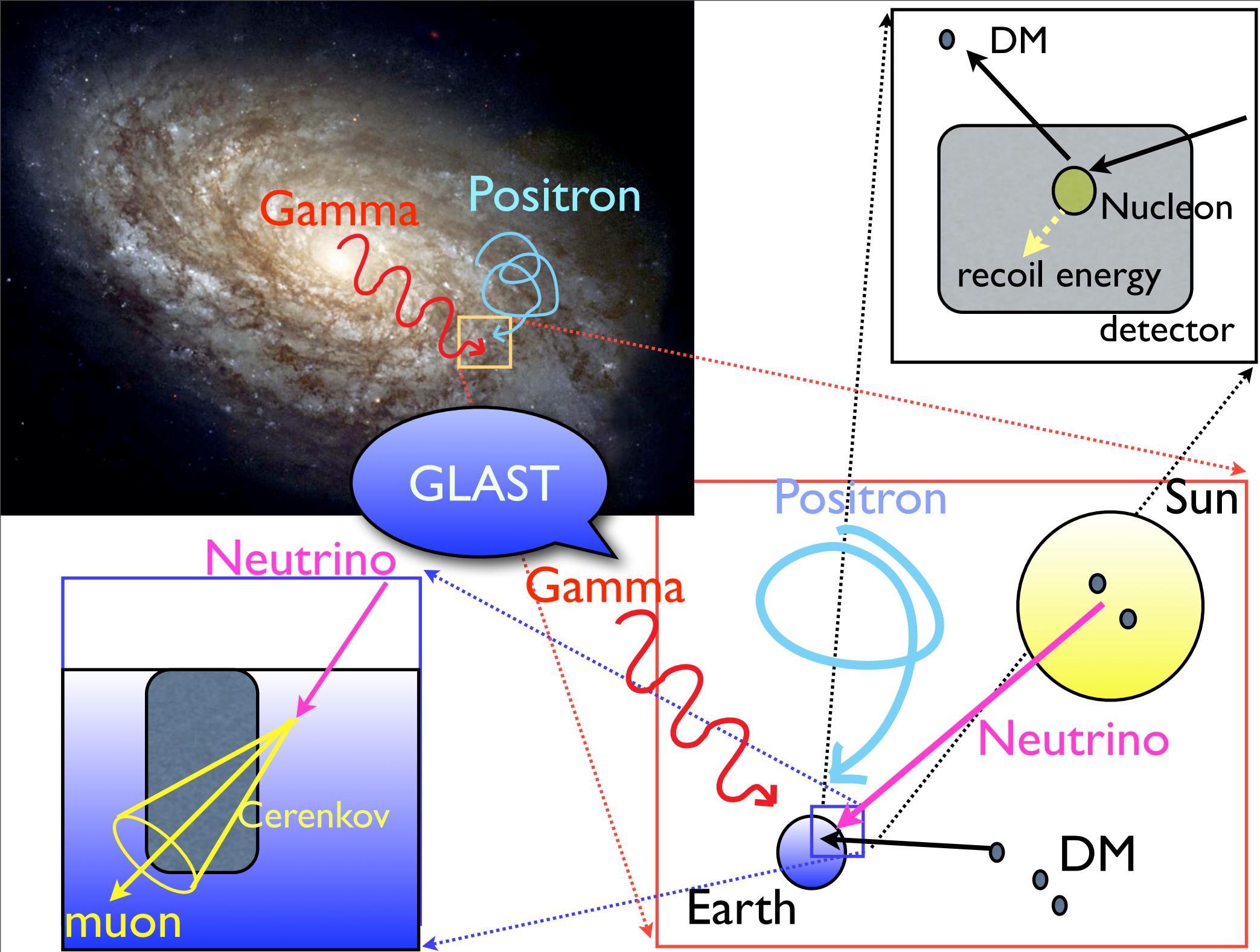
$$> \left(\frac{n_{\tilde{\chi}}}{s} \right)^{\text{thermal}} \sim \frac{1}{M_P T_f \langle \sigma v \rangle}$$

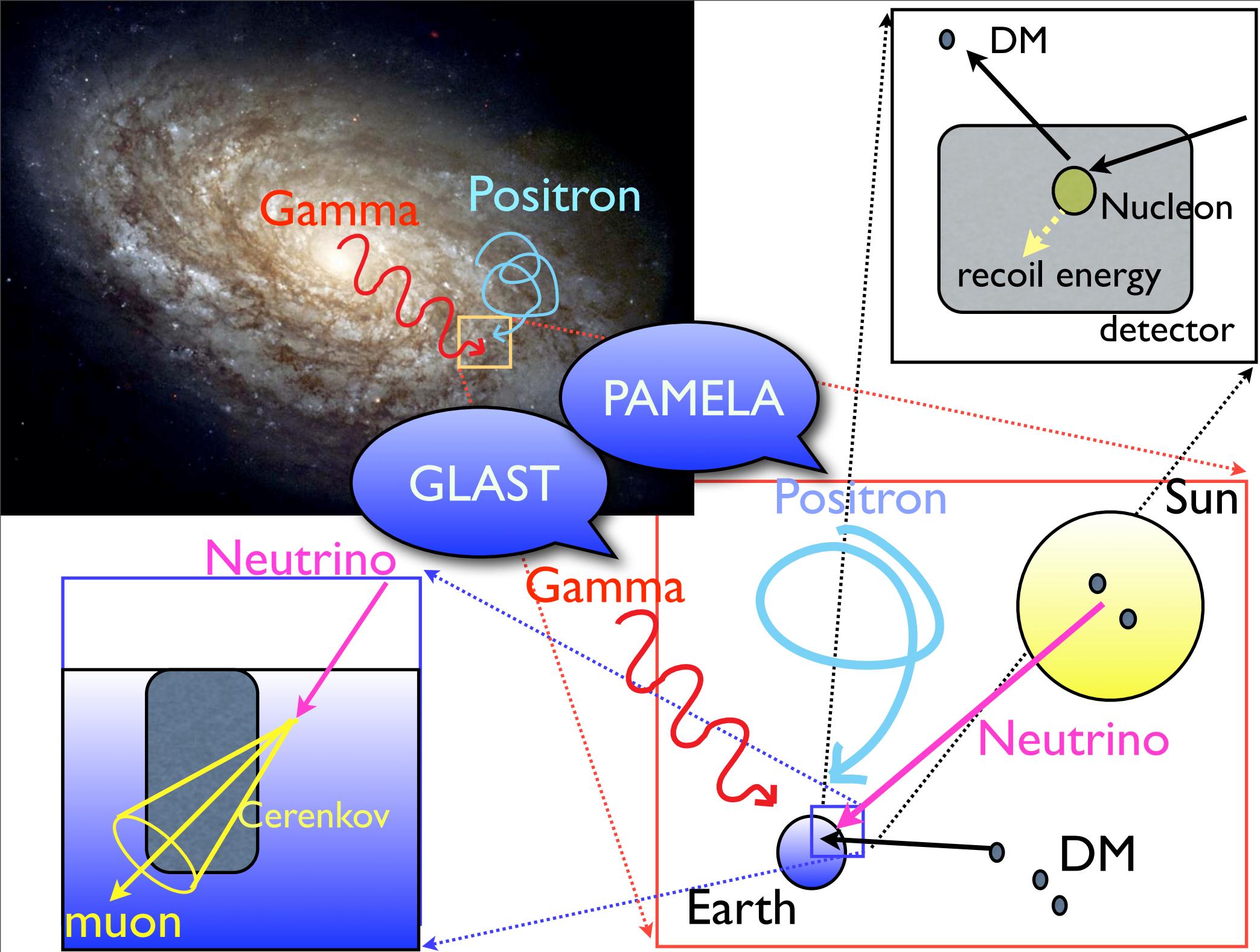


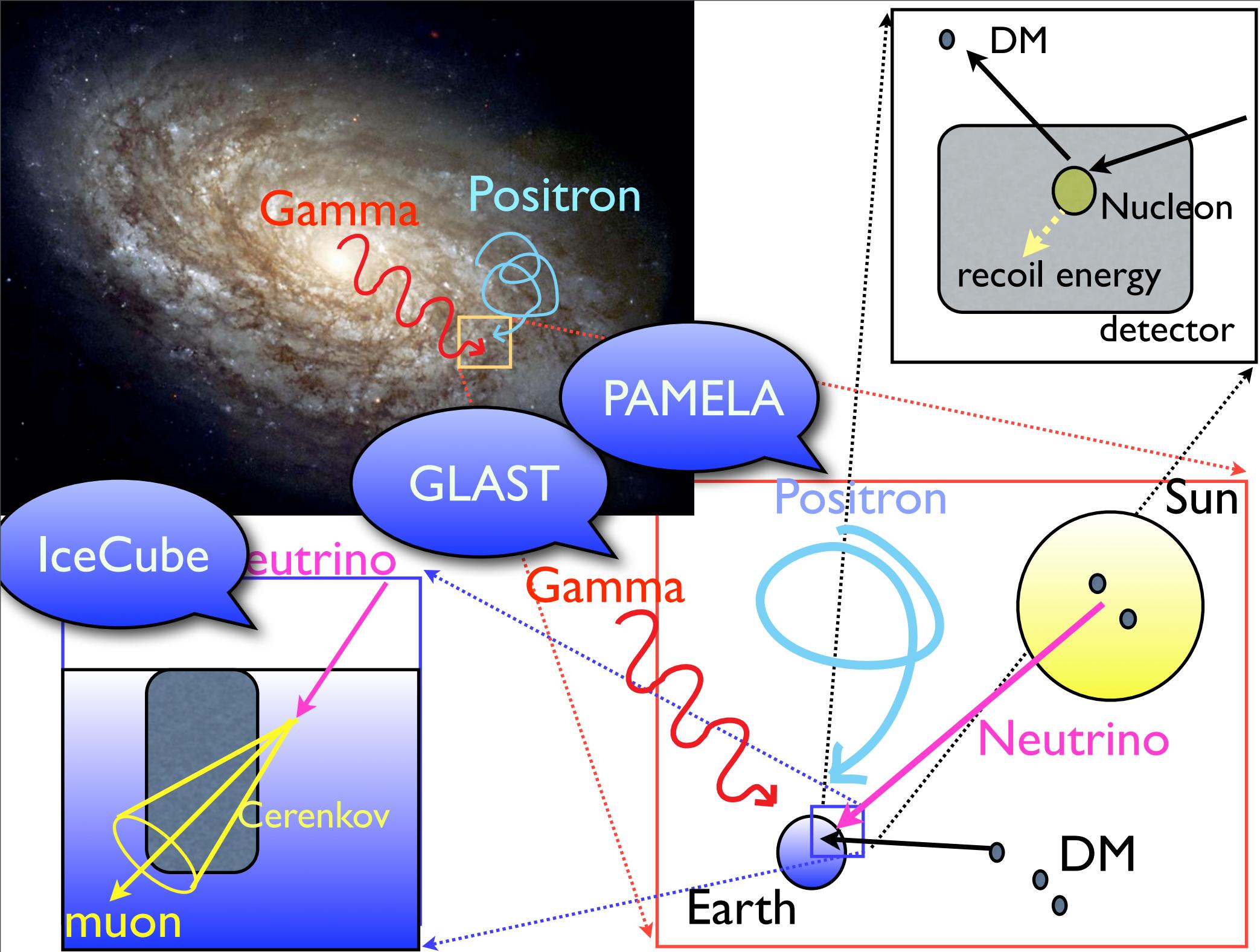


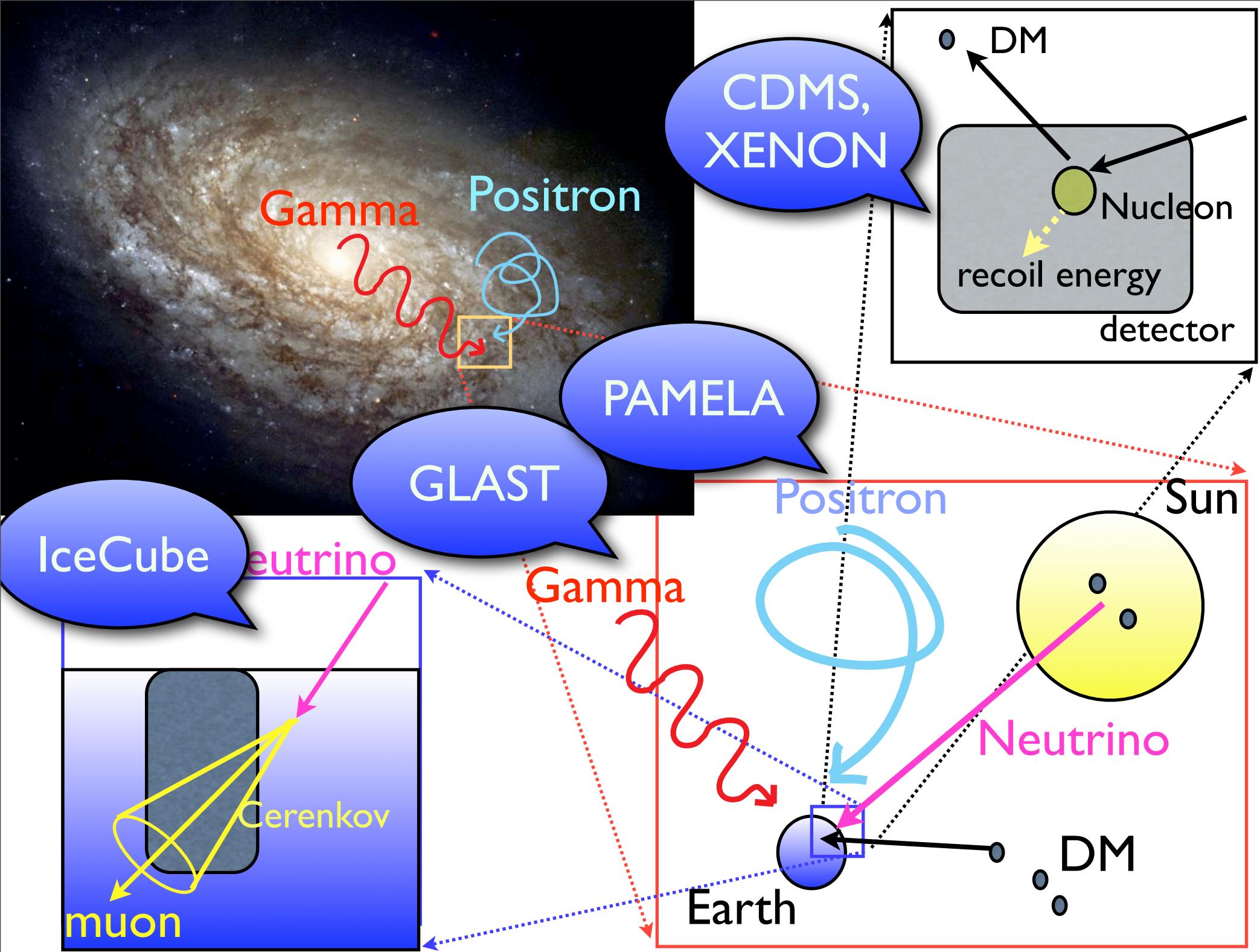












■ Gamma-ray

Bergstrom,Ullio,Bukley(96),...

EGRET(Satellite), HESS, MAGIC(Ground) —→ GLAST, CTA,...

銀河中心からの対消滅ガンマ線

Nonthermal DM —→ Large annihilation rate



Gamma ray flux is enhanced.

- $\tilde{\chi}\tilde{\chi} \rightarrow \gamma\gamma$
 $\rightarrow Z\gamma$ Monochromatic gamma
→ Branching ratio is too small.
- $\tilde{\chi}\tilde{\chi} \rightarrow f\bar{f} \rightarrow \text{hadrons}, \gamma, \dots$ Continuum gamma
→ Significantly enhanced

■ Gamma-ray

Bergstrom,Ullio,Bukley(96),...

EGRET(Satellite), HESS, MAGIC(Ground) —→ GLAST, CTA,...

銀河中心からの対消滅ガンマ線

Nonthermal DM —→ Large annihilation rate



Gamma ray flux is enhanced.

- $\tilde{\chi}\tilde{\chi} \rightarrow \gamma\gamma$
 $\rightarrow Z\gamma$ Monochromatic gamma
→ Branching ratio is too small.
- $\tilde{\chi}\tilde{\chi} \rightarrow f\bar{f} \rightarrow \text{hadrons}, \gamma, \dots$ Continuum gamma
→ Significantly enhanced

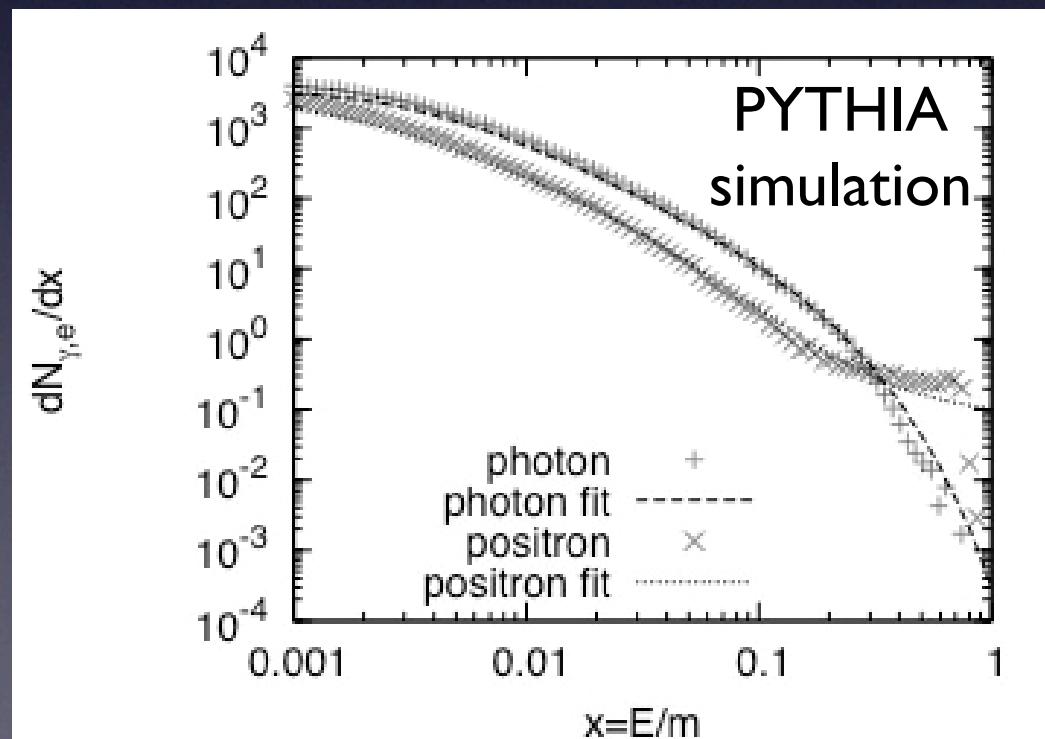
Photon flux from Galactic Center

$$\Phi_\gamma(\psi, E) \sim \frac{\langle \sigma v \rangle}{4\pi m_{\text{DM}}^2} \frac{dN_\gamma}{dE} \int_{\text{l.o.s.}} \rho^2(l) dl(\psi)$$

Particle physics model DM density profile

- Fragmentation function

例 : $\tilde{\chi}\tilde{\chi} \rightarrow W^+W^- \rightarrow \dots \rightarrow \gamma, e^+$



- DM density profile

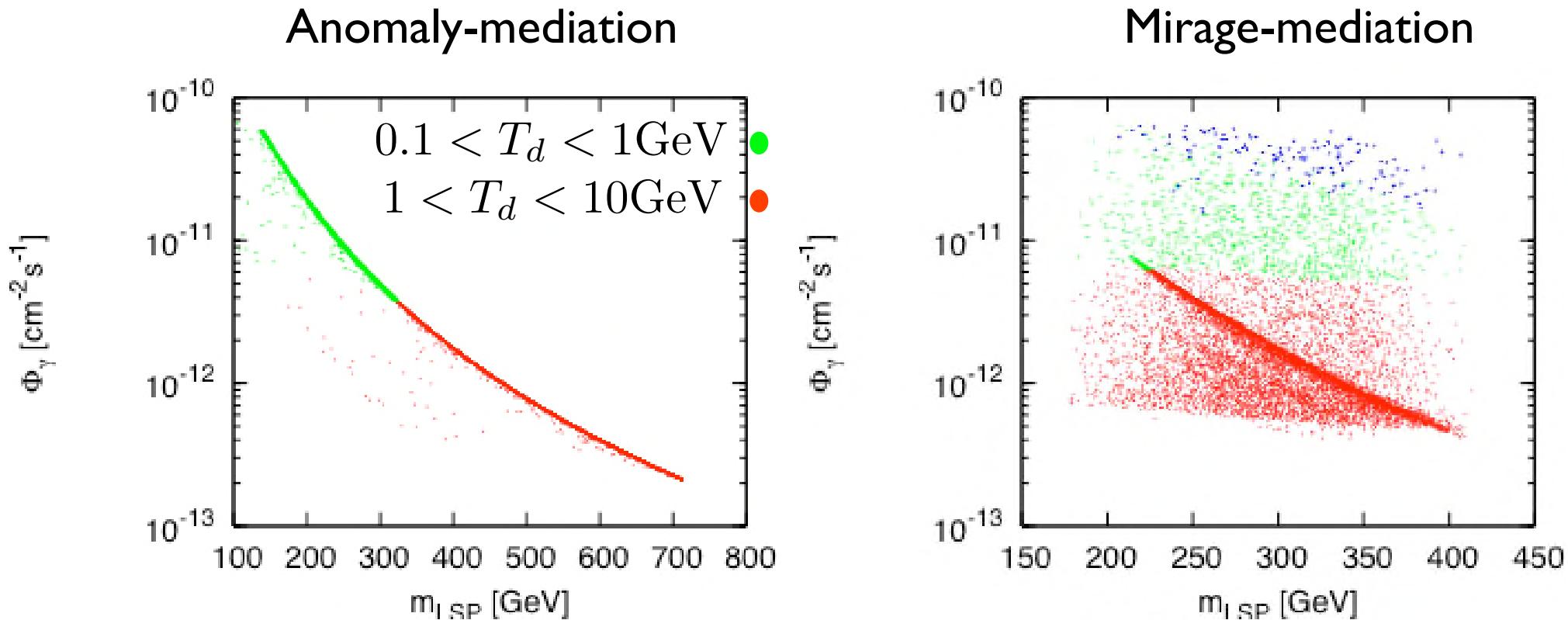
NFW profile

$$\rho(r) \sim \frac{\rho_0}{(r/a)(1 + (r/a))^2}$$

Isothermal profile

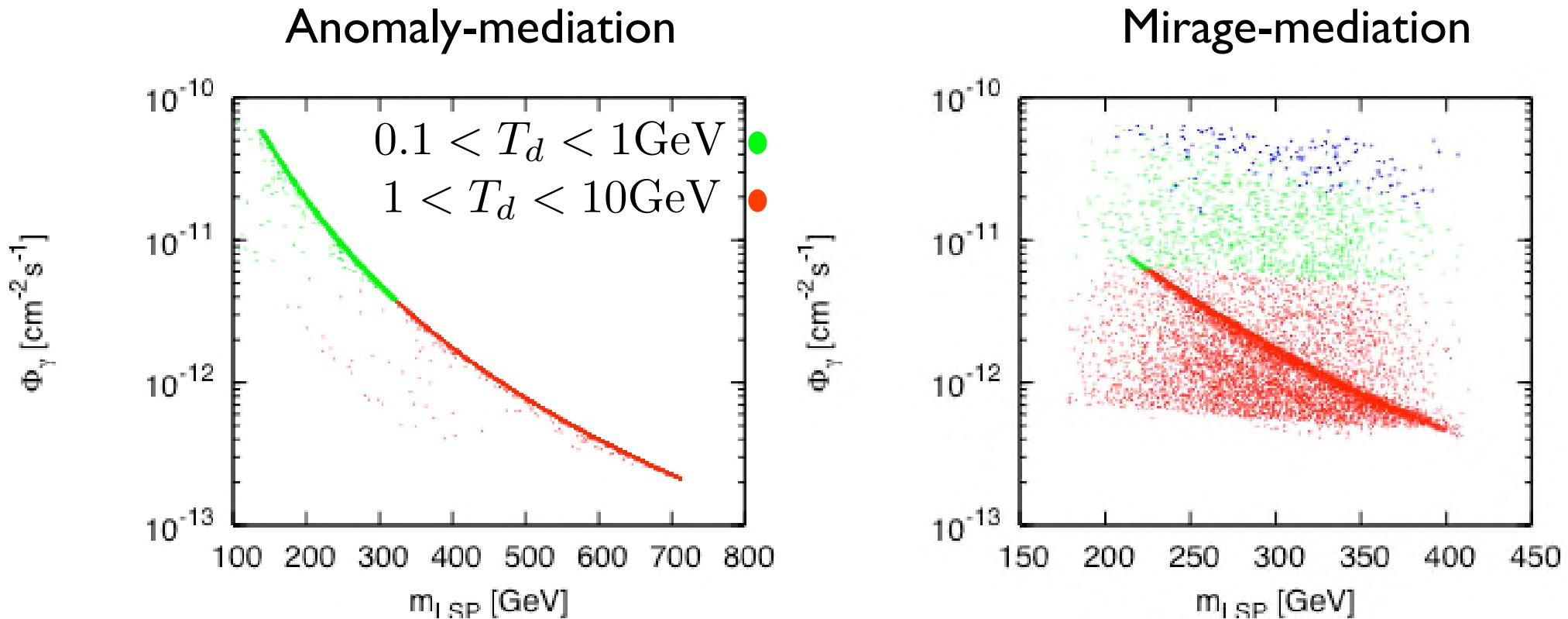
$$\rho(r) \sim \frac{\rho_0}{1 + (r/a)^2}$$

- SUSY breaking model のパラメータをランダムに振る
制限: $b \rightarrow s\gamma$ $m_h > 114\text{GeV}$...
- Isothermal profile を仮定 (**NFW profile**なら約300倍)



GLAST: $\Phi_\gamma(E > 1\text{GeV}) > 10^{-10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ なら検出可

- SUSY breaking model のパラメータをランダムに振る
制限: $b \rightarrow s\gamma$ $m_h > 114\text{GeV}$...
- Isothermal profile を仮定 (**NFW profile**なら約300倍)



GLAST: $\Phi_\gamma(E > 1\text{GeV}) > 10^{-10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ なら検出可



Halo profileによっては広い範囲で検出可能

■ Positron

Kamionkowski, Turner(91), Baltz, Edjso(98), ...

$$\tilde{\chi}_0 \tilde{\chi}_0 \rightarrow W^+ W^-, b\bar{b}, \dots \rightarrow \pi' s, e^+, \dots$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \boxed{K(E) \nabla^2 \Phi(E)} + \boxed{\frac{\partial}{\partial E} [b(E) \Phi(E)]} + \boxed{Q(E)}$$

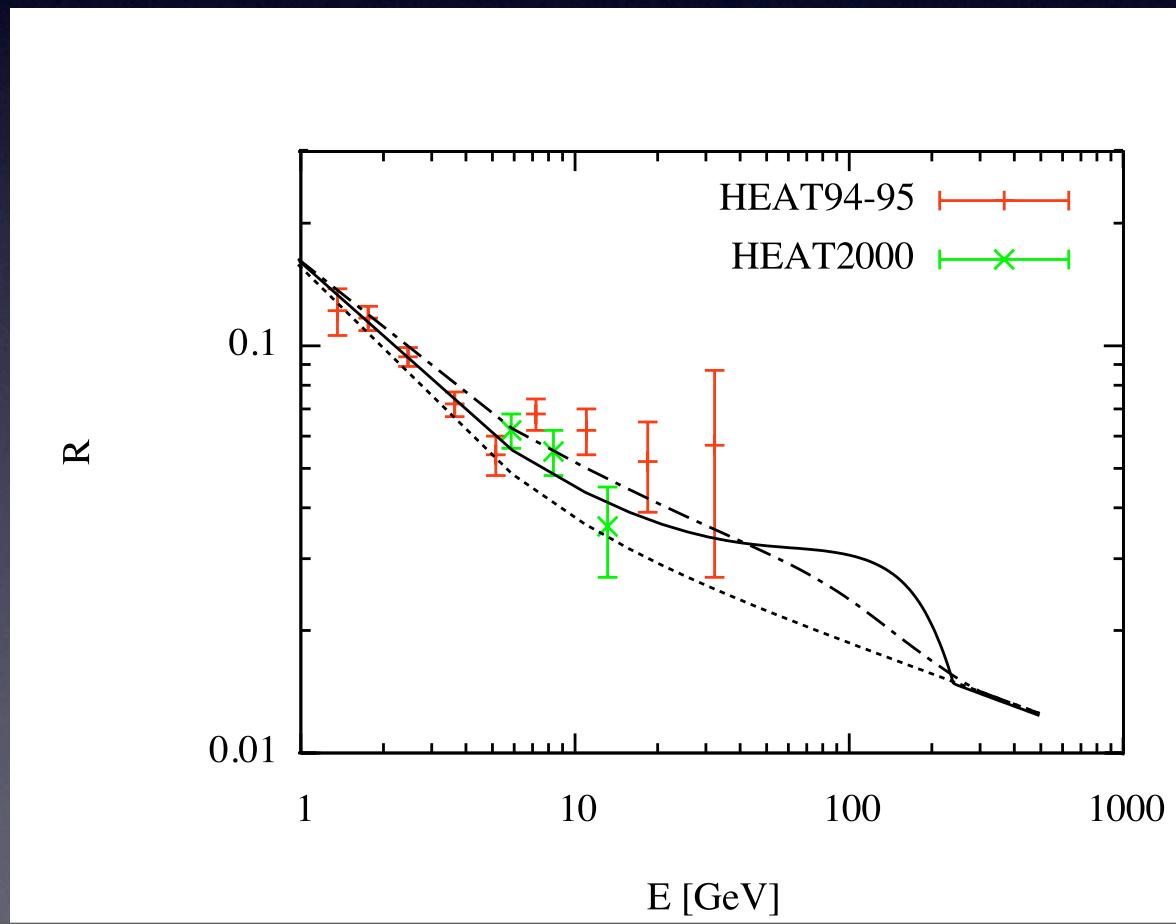
Diffusion Energy loss by synchrotron and inverse compton Source term from DM annihilation

地球近傍から
しか届かない

→ Density profile
依存性は小さい

$$R = \frac{\Phi_{e^+}}{\Phi_{e^-} + \Phi_{e^+}}$$

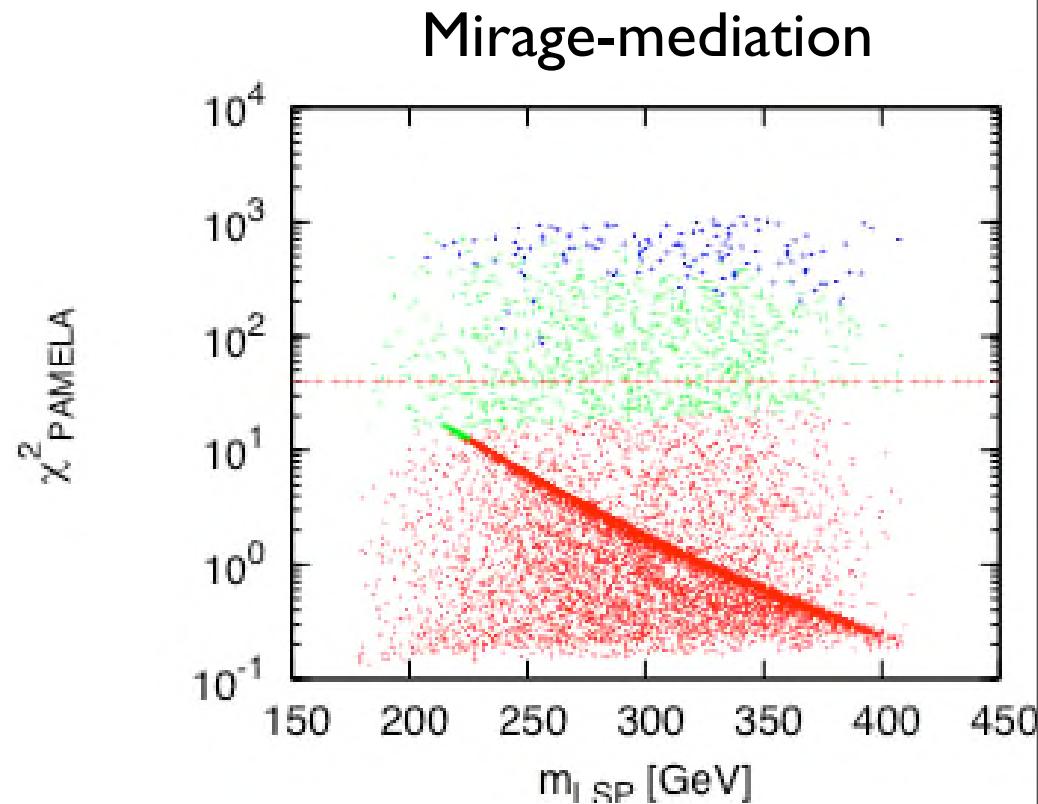
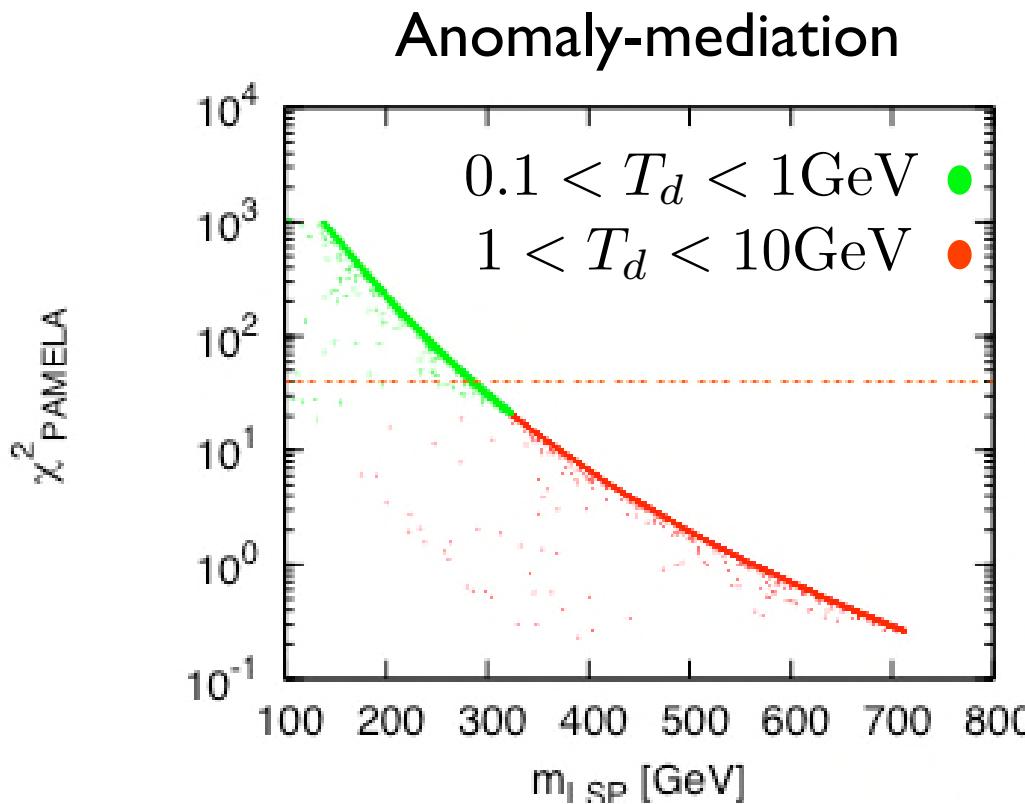
(BG: Moskalenko & Strong (1998))



$$\chi^2 = \sum_i \frac{(N_i^{\text{obs}} - N_i^{\text{BG}})^2}{N_i^{\text{obs}}} \quad \text{Hooper, Silk (2004)}$$

i : i -th Energy bin ($10 < E < 270$ GeV) $0 < i < 22$

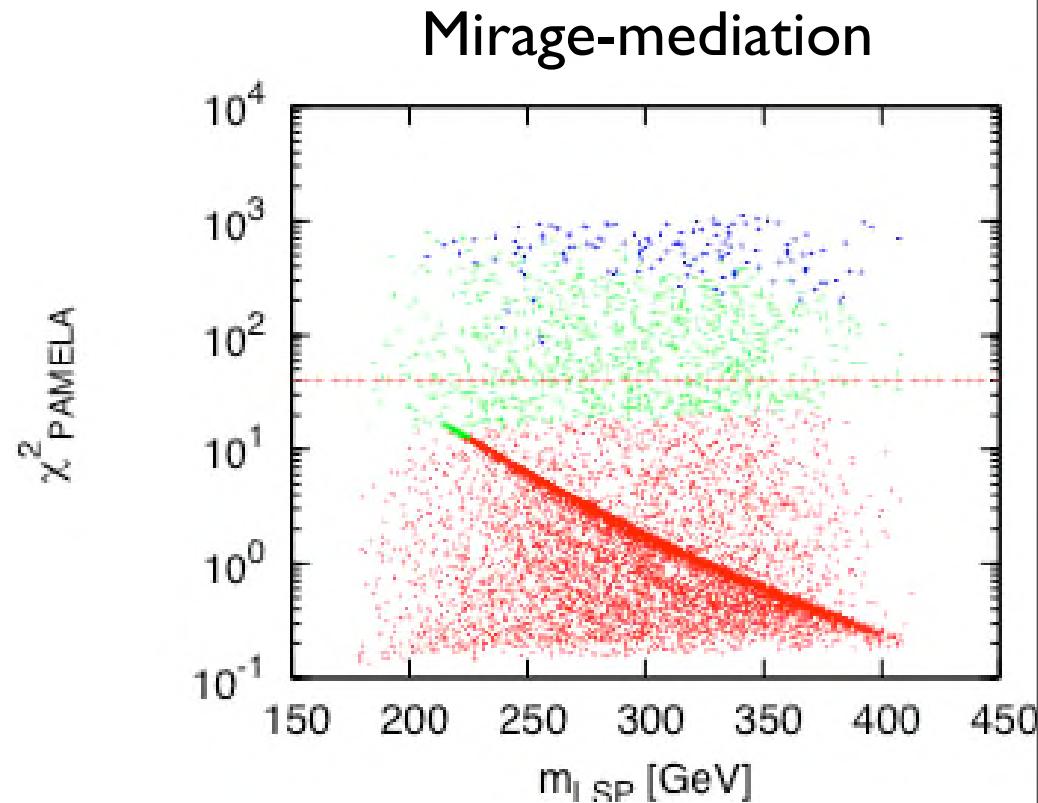
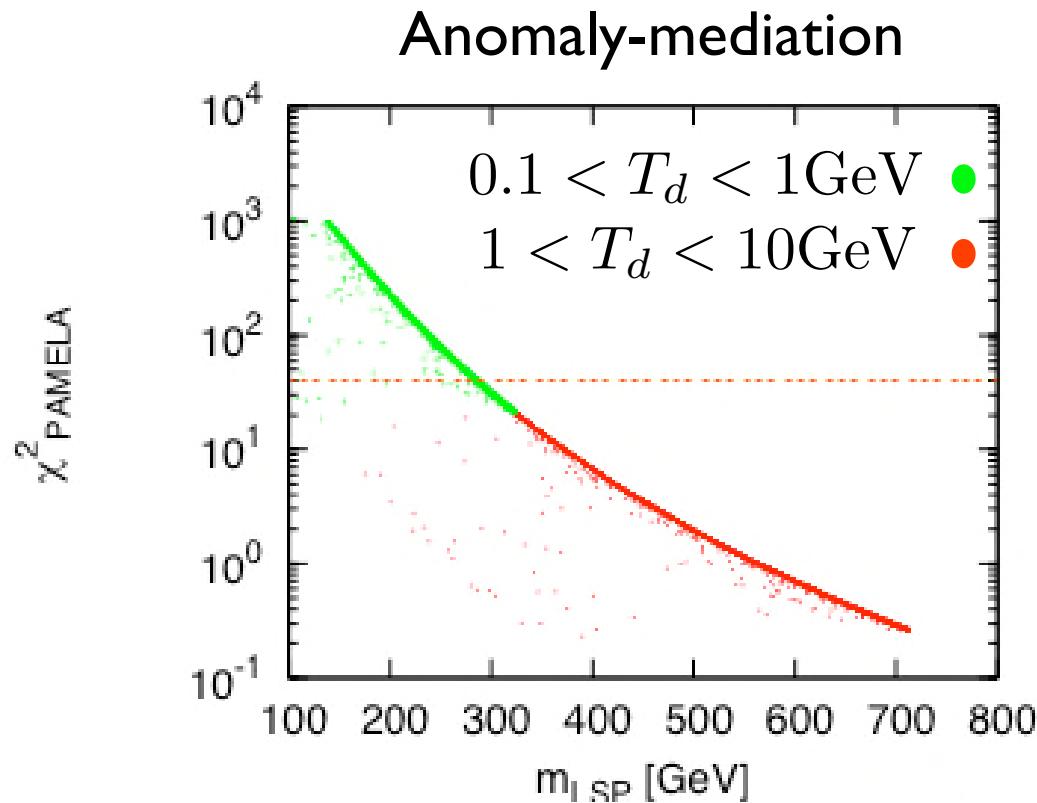
$\chi^2 > 40 \longrightarrow \text{99\% detection}$



$$\chi^2 = \sum_i \frac{(N_i^{\text{obs}} - N_i^{\text{BG}})^2}{N_i^{\text{obs}}} \quad \text{Hooper, Silk (2004)}$$

i : i -th Energy bin ($10 < E < 270$ GeV) $0 < i < 22$

$\chi^2 > 40 \longrightarrow \text{99\% detection}$



広い範囲で検出可能

Summary

- 暗黒物質は非熱的過程で生成され得る
大きな対消滅断面積が必要 → 検出し易い！
- 銀河中心からのガンマ線
→ DMのhalo profileによっては検出可能
- 太陽近傍からの陽電子
→ 検出可能性大
- 太陽からのニュートリノ
→ パラメータによっては探索可
- 直接検出

■ Direct Detection

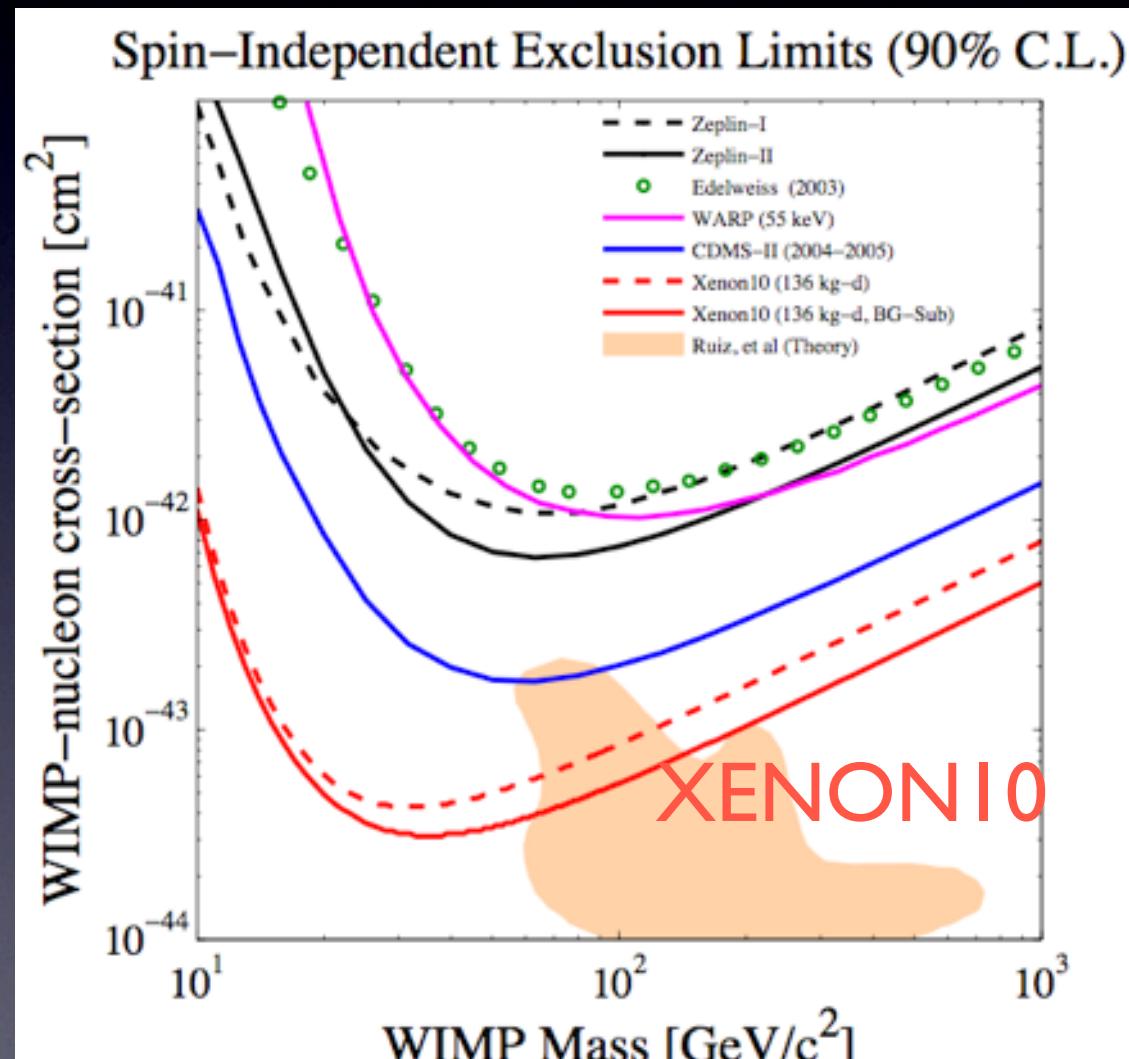
CDMS, XENON10... → XENON100, XMASS, Super-CDMS,...

Neutralino-nucleon scattering

→ Kinetic energy is transferred to nucleon.

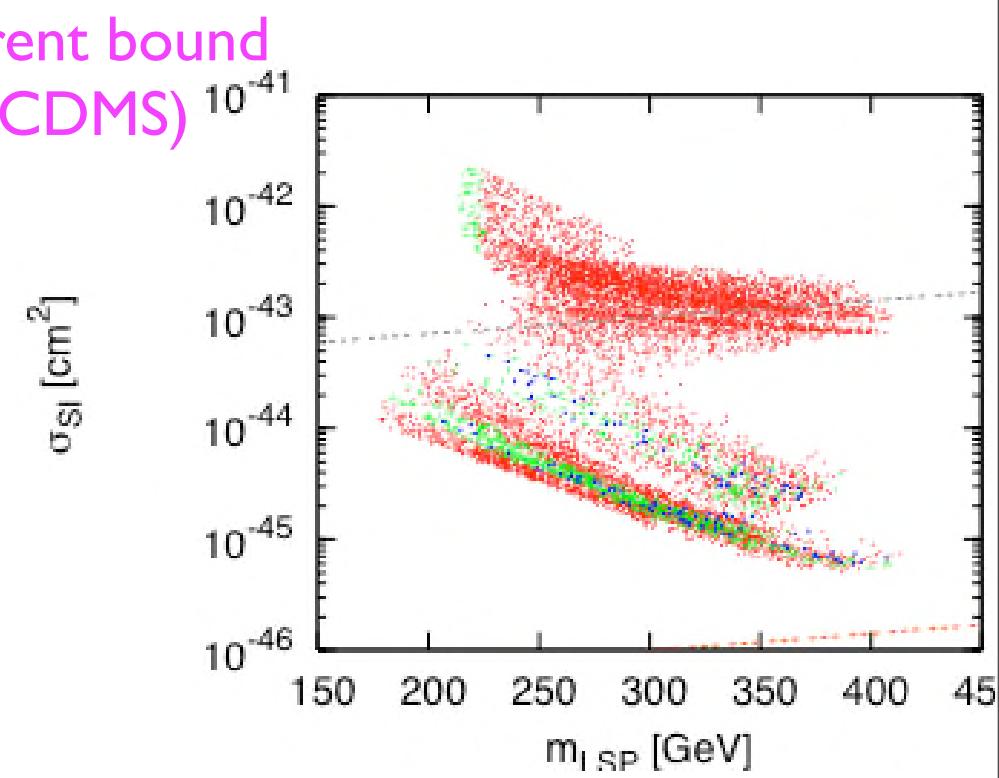
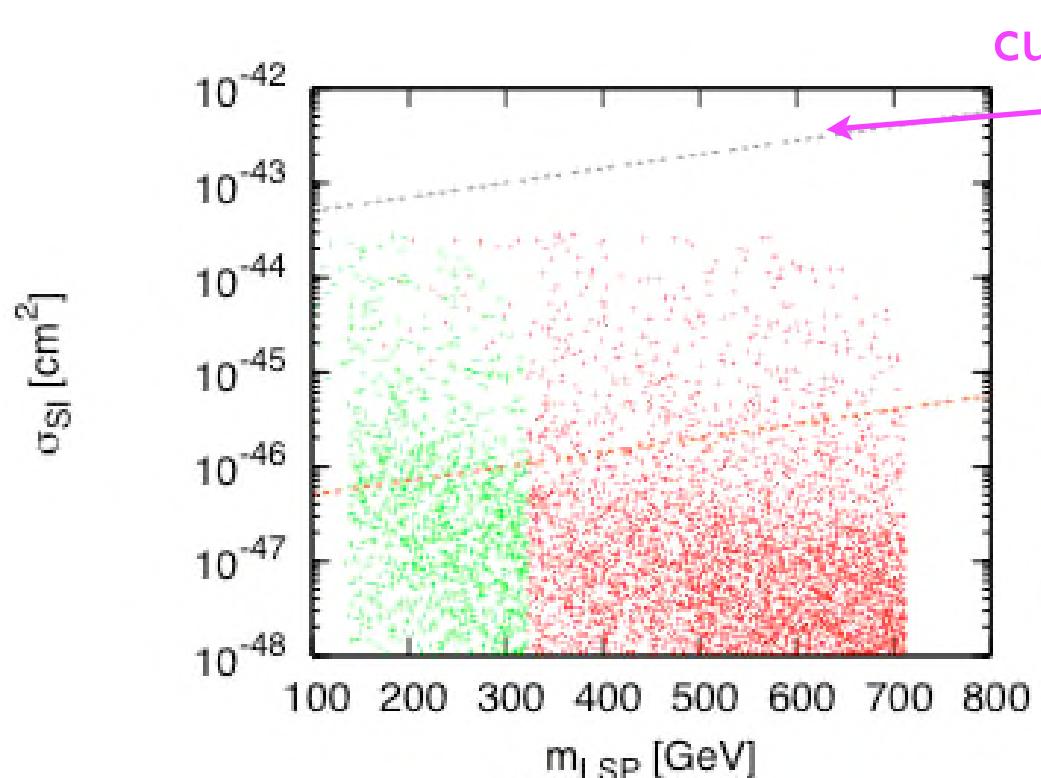
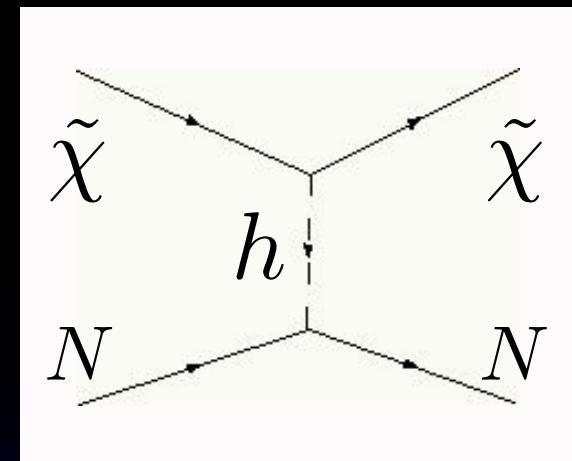
$$E \sim m_{\text{DM}} v^2 \sim 100 \text{ keV}$$

Ionization,
Scintillation,
Heating signal



- Dominant process : Higgs exchange

→ Gaugino-higgsino mixingが
 大きいときに効く
 対消滅断面積との相関はない



SuperCDMS → $\sigma_{\text{SI}} \gtrsim 10^{-46} \text{ cm}^2$ まで探索可能

■ Neutrinos from the Sun

太陽内部にたまつたニュートラリーノが対消滅
→ 高エネルギーニュートリノ

- 太陽内のニュートラリーノ数の発展

$$\dot{N} = C_{\odot} - A_{\odot} N^2$$

N : number of neutralinos trapped in Sun

A_{\odot} : annihilation rate $\sim \langle \sigma v \rangle / V_{\odot}$

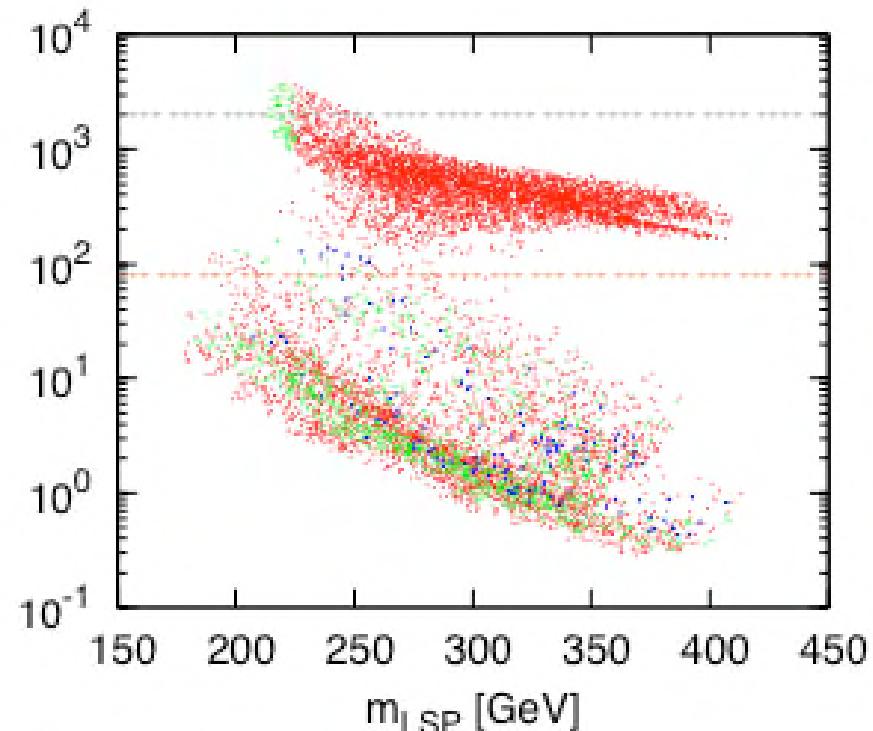
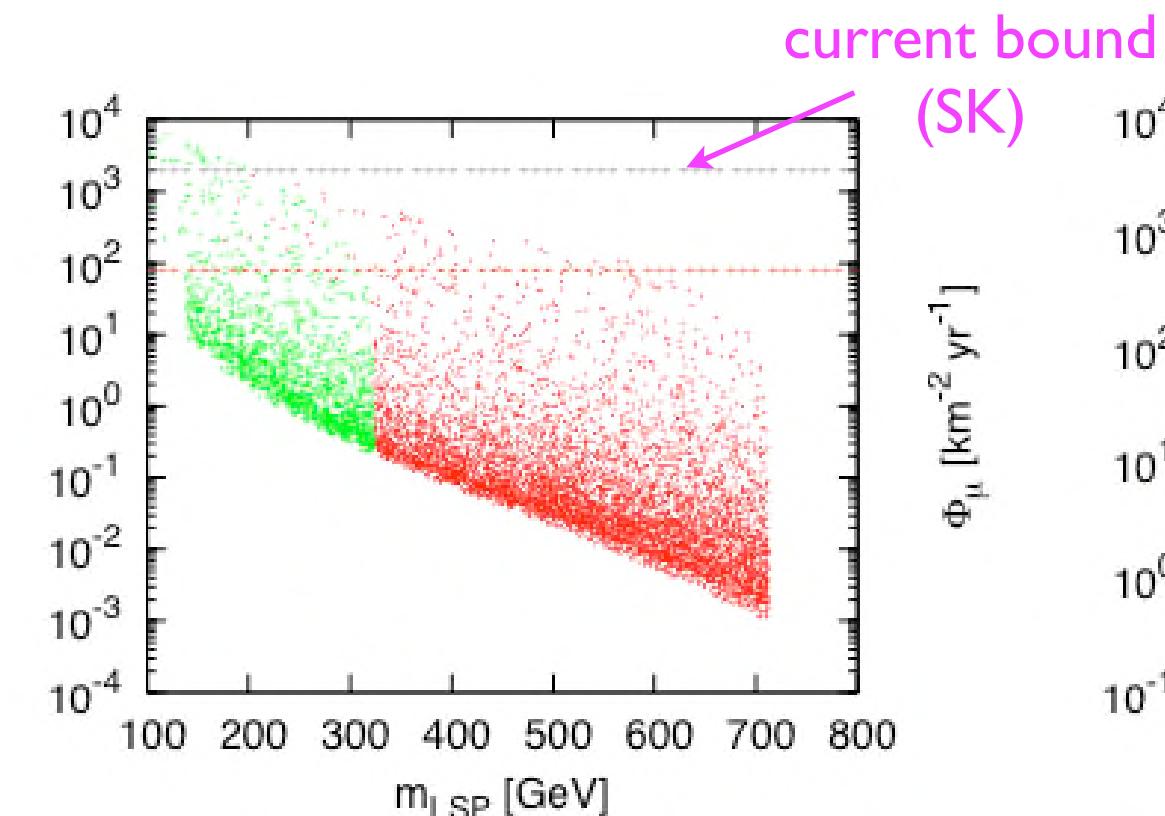
C_{\odot} : trapping rate $\sim 3 \times 10^{20} \text{sec}^{-1} \left(\frac{\sigma_{\text{H}}^{(\text{SD})}}{10^{-42} \text{cm}^2} \right)$.



定常解では

$$\Gamma = \frac{1}{2} A_{\odot} N^2 = \frac{1}{2} C_{\odot}$$

ニュートリノfluxは原子核散乱断面積で決まる



$\Phi_\mu \gtrsim 80 \text{ km}^{-2}\text{yr}^{-1}$ なら IceCube で発見可

Anomaly-mediation

Randall, Sundrum (98)

Giudice,Luty,Murayama,Rattazzi (98)

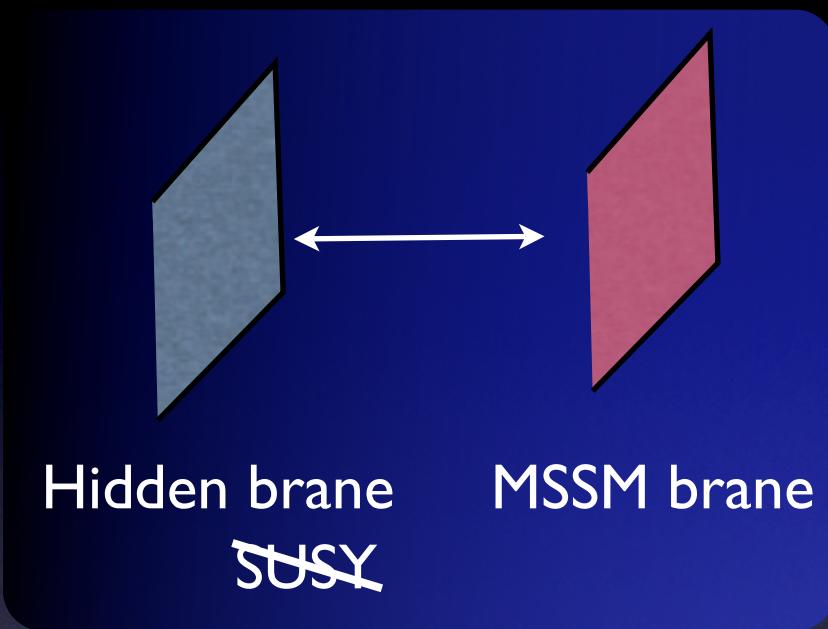
SUSY breaking effect is transmitted via super-Weyl anomaly effect.

$$m_{\tilde{B}} = \frac{11g'^2}{16\pi^2} m_{3/2}$$

$$m_{\tilde{W}} = \frac{g^2}{16\pi^2} m_{3/2}$$

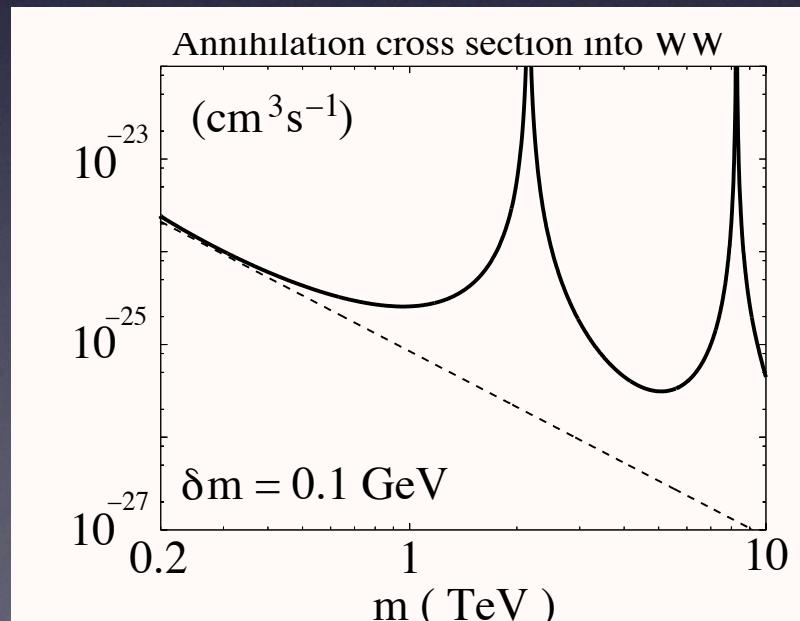
$$m_{\tilde{g}} = \frac{3g_s^2}{16\pi^2} m_{3/2}$$

LSP



- Tachyonic slepton → Universal scalar mass (MAMSB)
- LSP is wino like → Large annihilation cross section

Hlsano,Matsumoto,Nagai,Saito,Senami(05)



Mirage-mediation

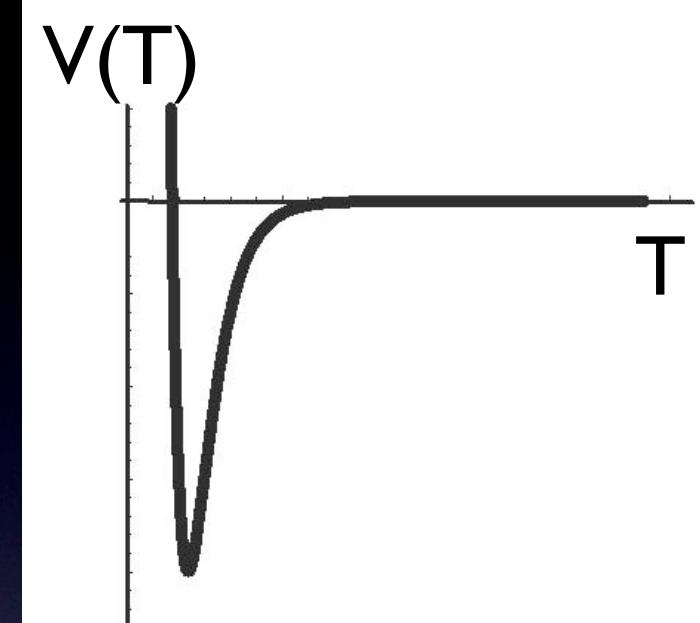
T : moduli Φ_i : MSSM fields

$$K = -3 \ln(T + T^*) + \Phi_i^* \Phi_i$$

$$W = w_0 - A e^{-aT} + \frac{\lambda_{ijk}}{6} \Phi_i \Phi_j \Phi_k$$

The vacuum is AdS.

Modulus potential



Mirage-mediation

T : moduli Φ_i : MSSM fields

$$K = -3 \ln(T + T^*) + \Phi_i^* \Phi_i$$

$$W = w_0 - A e^{-aT} + \frac{\lambda_{ijk}}{6} \Phi_i \Phi_j \Phi_k$$

The vacuum is AdS.

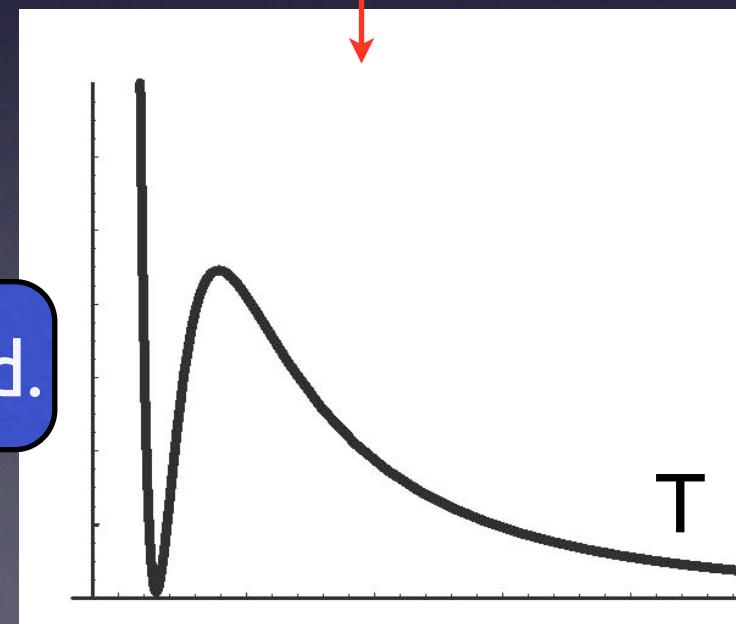
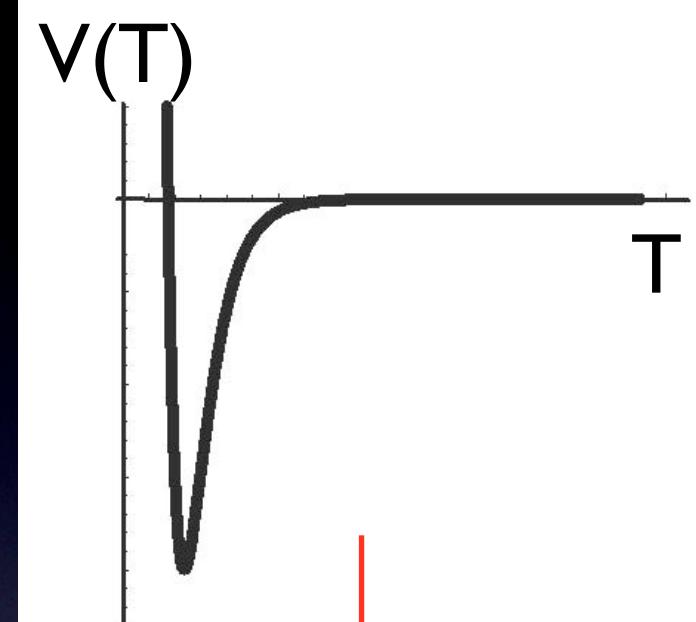
- Add extra uplifting term
(KKLT-type moduli stabilization)

$$V_{\text{lift}} = \frac{D}{(T + T^*)^m}$$

Positive vacuum energy can be obtained.

→ Source of SUSY breaking

Modulus potential



SUSY breaking

- $F_T \neq 0$ at dS minimum

→ Modulus mediation \sim Anomaly mediation

- Uplifting to break SUSY



e.g., Gaugino mass : $M_a = M_0 +$

$$m_{\text{SUSY}} \sim \frac{F_T}{T} \sim \left[\frac{1}{8\pi^2} \frac{F_{\text{total}}}{M_P} \right] + \frac{m_{3/2}}{16\pi^2} b_a g_a^2$$

Mixed-modulus-anomaly mediation

Choi et al (04), Endo et al (05), Choi, Jeong and Okumura (05)

$$m_{3/2} \sim (8\pi^2)m_{\text{SUSY}} \gg 1\text{TeV} \quad \text{Heavy gravitino}$$

$$m_T \sim (8\pi^2)m_{3/2} \sim O(10^3)\text{TeV} \quad \text{Heavy moduli}$$

SUSY breaking

- $F_T \neq 0$ at dS minimum

→ Modulus mediation

- Uplifting to break SUSY



Anomaly mediation

$$m_{\text{SUSY}} \sim \frac{F_T}{T} \sim \left[\frac{1}{8\pi^2} \frac{F_{\text{total}}}{M_P} + \frac{m_{3/2}}{16\pi^2} b_a g_a^2 \right]$$

e.g., Gaugino mass : $M_a = M_0 +$

Mixed-modulus-anomaly mediation

Choi et al (04), Endo et al (05), Choi, Jeong and Okumura (05)

$$m_{3/2} \sim (8\pi^2)m_{\text{SUSY}} \gg 1\text{TeV}$$

Heavy gravitino

$$m_T \sim (8\pi^2)m_{3/2} \sim O(10^3)\text{TeV}$$

Heavy moduli



Heavy moduli significantly affect cosmology.

Mirage-unification

Choi et al. (05)

Gaugino mass

$$\text{input : } M_a = M_0 + \frac{m_{3/2}}{16\pi^2} b_a g_a^2$$

- mirage-scale

$$M_{\text{mir}} = \frac{M_{\text{GUT}}}{(M_P/m_{3/2})^{\alpha/2}}$$

$$\alpha = 1$$

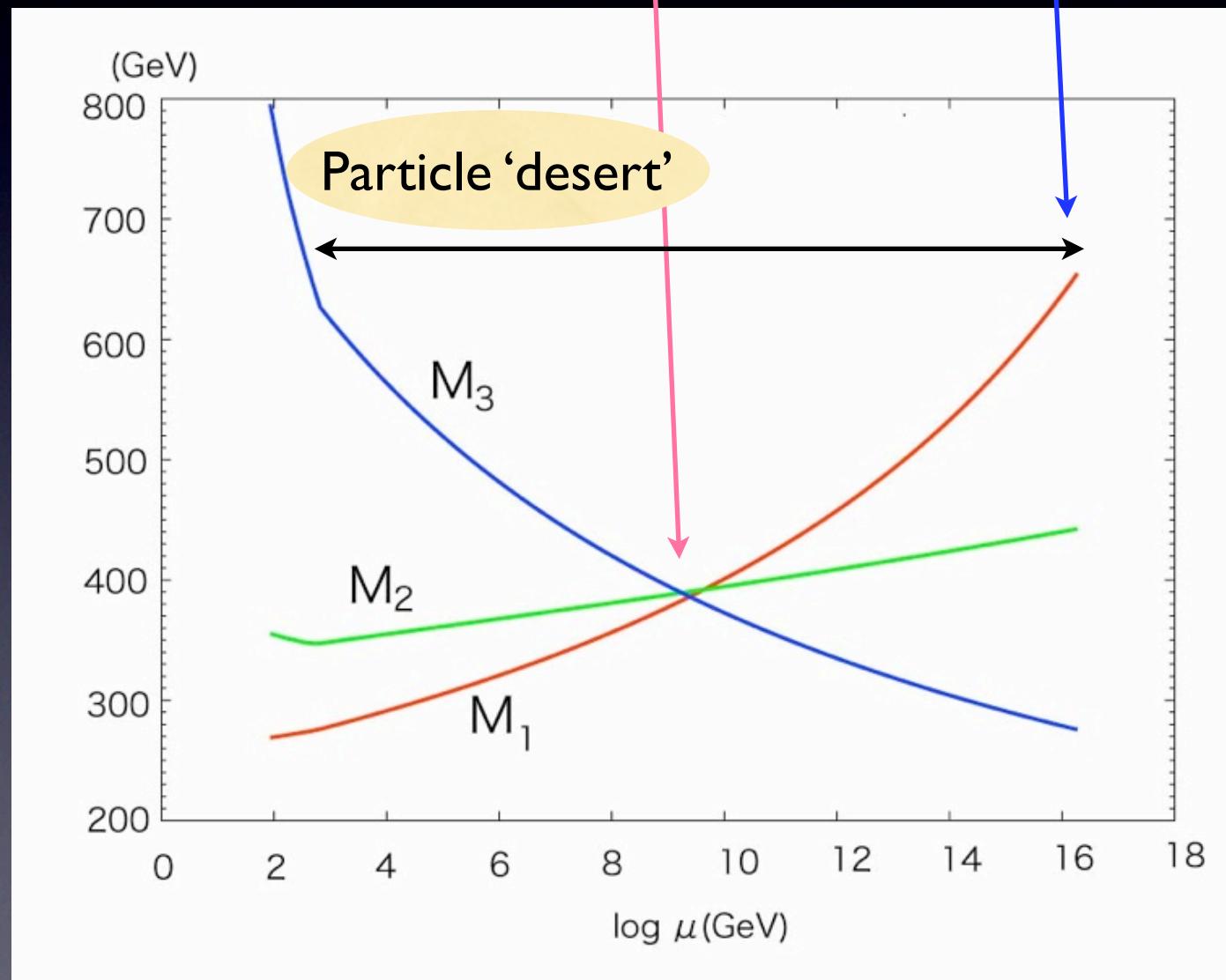
$$M_{\text{mir}} \sim 10^9 \text{ GeV}$$

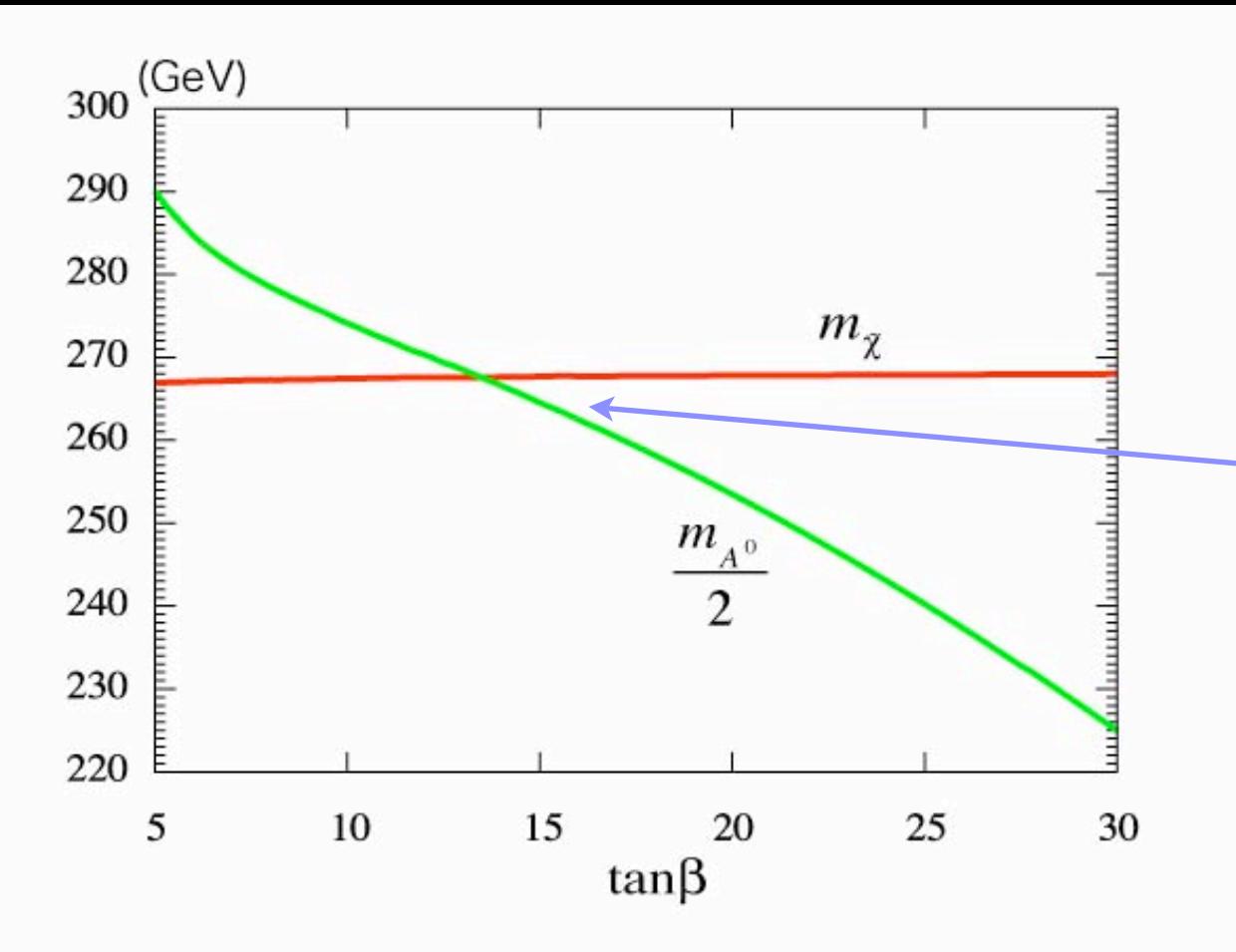
$$\alpha = 2$$

$$M_{\text{mir}} \sim 1 \text{ TeV}$$

‘Mirage’ scale

GUT scale (true ‘oasis’)





Annihilation through the S-channel Higgs resonance enhances annihilation cross section.

Choi, Lee, Shimizu, Kim and Okumura (06) for thermal DM case

In fact, cross section can naturally be large

Bino

CP-odd Higgs

$$m_{\tilde{\chi}} \sim m_{A^0}/2$$

