

# 原始ブラックホールによる 宇宙線陽電子超過の説明

---

齊藤 遼（東大理、RESCEU）

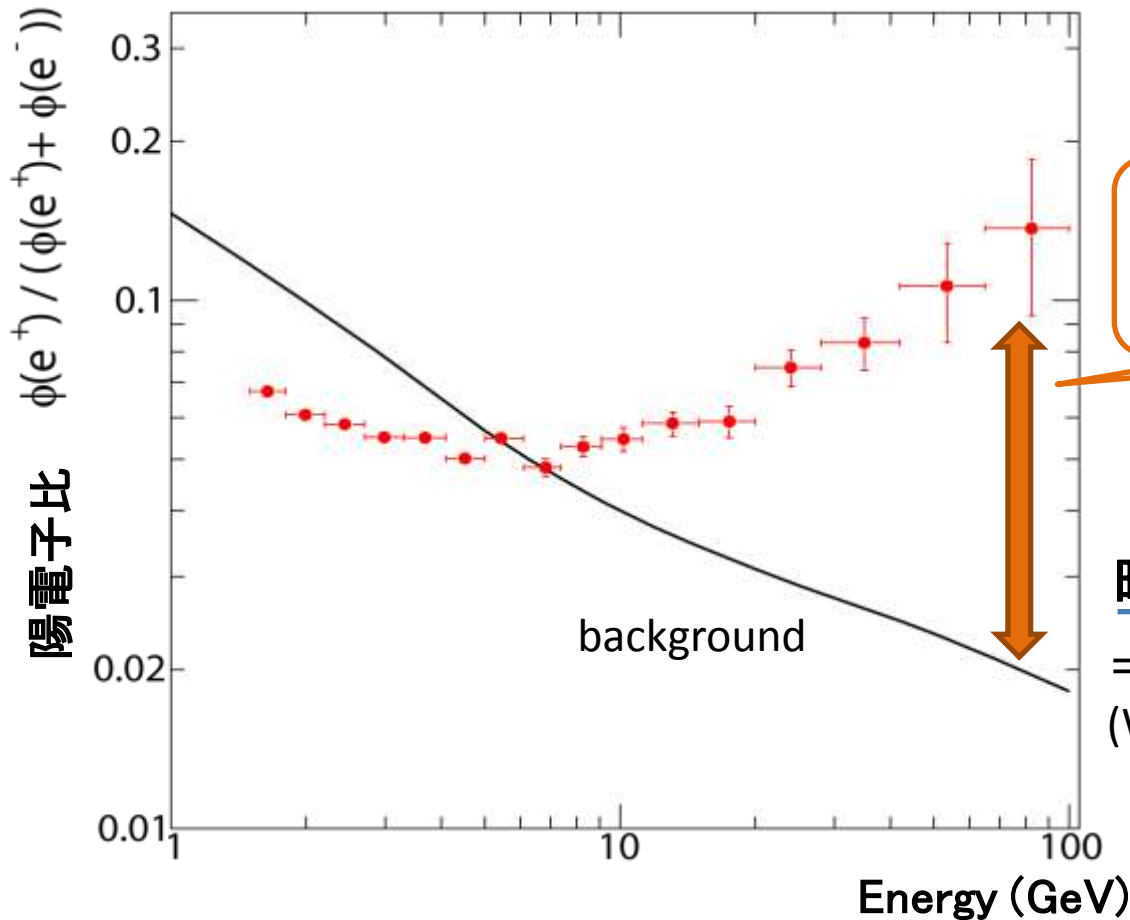
白井 智（東大理、素粒子論研究室）

Based on arXiv:1009.1947

# 導入

## - PAMELA衛星による陽電子超過(アノマリー)の観測

PAMELA collaboration, Nature (2009)



陽電子フラックスの超過

暗黒物質(DM)の対消滅?

= WIMP  
(Weakly interacting massive particle)

# 熱的残存粒子 & Boost Factor

## - 残存量

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

質量  $m_{\text{WIMP}} \simeq 300 \text{ GeV}$ . のWIMPの  
典型的な断面積

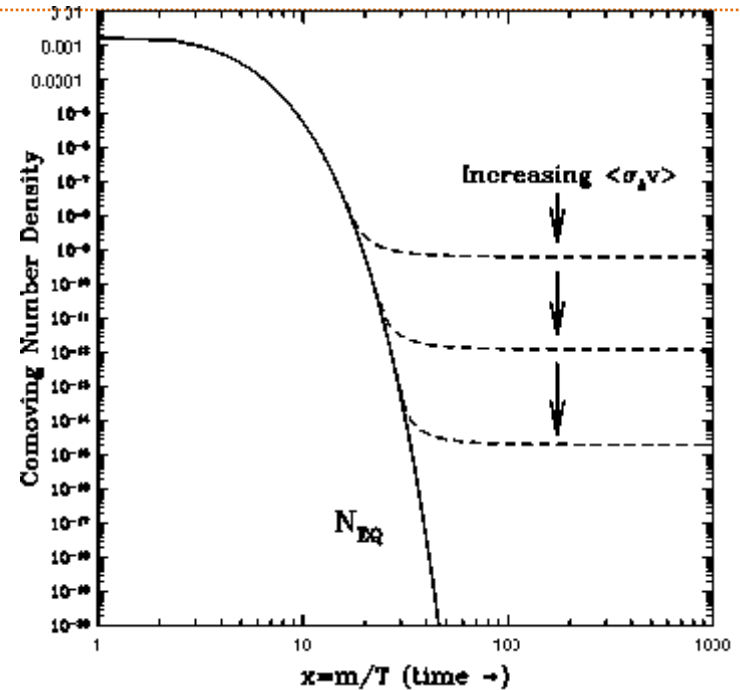


## - 宇宙線フラックス

$$E^3 \Phi_{\text{TR}} \sim 10^{-4} \text{ GeV}^2 / \text{cm}^2 \text{ s}^{-1} \quad < \quad E^3 \Phi_{\text{obs}} \sim 10^{-2} \text{ GeV}^2 / \text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

for  $m_{\text{WIMP}} \simeq 300 \text{ GeV} \quad \mathcal{O}(10^2)$  PAMELA result

$$\text{Boost factor } BF \equiv \frac{\Phi_{\text{obs}}}{\Phi_{\text{TR}}} \simeq 10^2$$



# Boost Factorの起源

- Sommerfeld/Breit-Wigner 増幅

速度(環境)依存した断面積

Arkani-Hamed, Finkbeiner, Slatyer, Weiner 08, Ibe, Murayama, Yanagida 09, ...

- 暗黒物質の非熱的生成

断面積  $\leftrightarrow$  残存量

BBN, CMB, ガンマ線観測から厳しい制限。

- 個数密度の非一様性(サブハロー)

対消滅確率  $\propto n_{DM}^2$

Brun, Delahaye, Diemand, Profumo, Salati 09, Hooper, Stebbins, Zurek 09, ...

N体シミュレーションによると、アノマリーを説明するには不十分。

- 崩壊する暗黒物質

断面積  $\leftrightarrow$  宇宙線フラックス

Nardi, Sannino, Strumia 09, Chen, Mandal, Takahashi 10, ...

# Boost Factorの起源

- Sommerfeld/Breit-Wigner 増幅

速度(環境)依存した断面積

Arkani-Hamed, Finkbeiner, Slatyer, Weiner 08, Ibe, Murayama, Yanagida 09, ...

- 暗黒物質の非熱的生成

断面積  $\leftrightarrow$  残存量

BBN, CMB, ガンマ線観測から厳しい制限。

- 個数密度の非一様性(サブハロー)

対消滅確率  $\propto n_{DM}^2$

Brun, Delahaye, Diemand, Profumo, Salati 09, Hooper, Stebbins, Zurek 09, ...

N体シミュレーションによると、アノマリーを説明するには不十分。

- 崩壊する暗黒物質

断面積  $\leftrightarrow$  宇宙線フラックス

Nardi, Sannino, Strumia 09, Chen, Mandal, Takahashi 10, ...



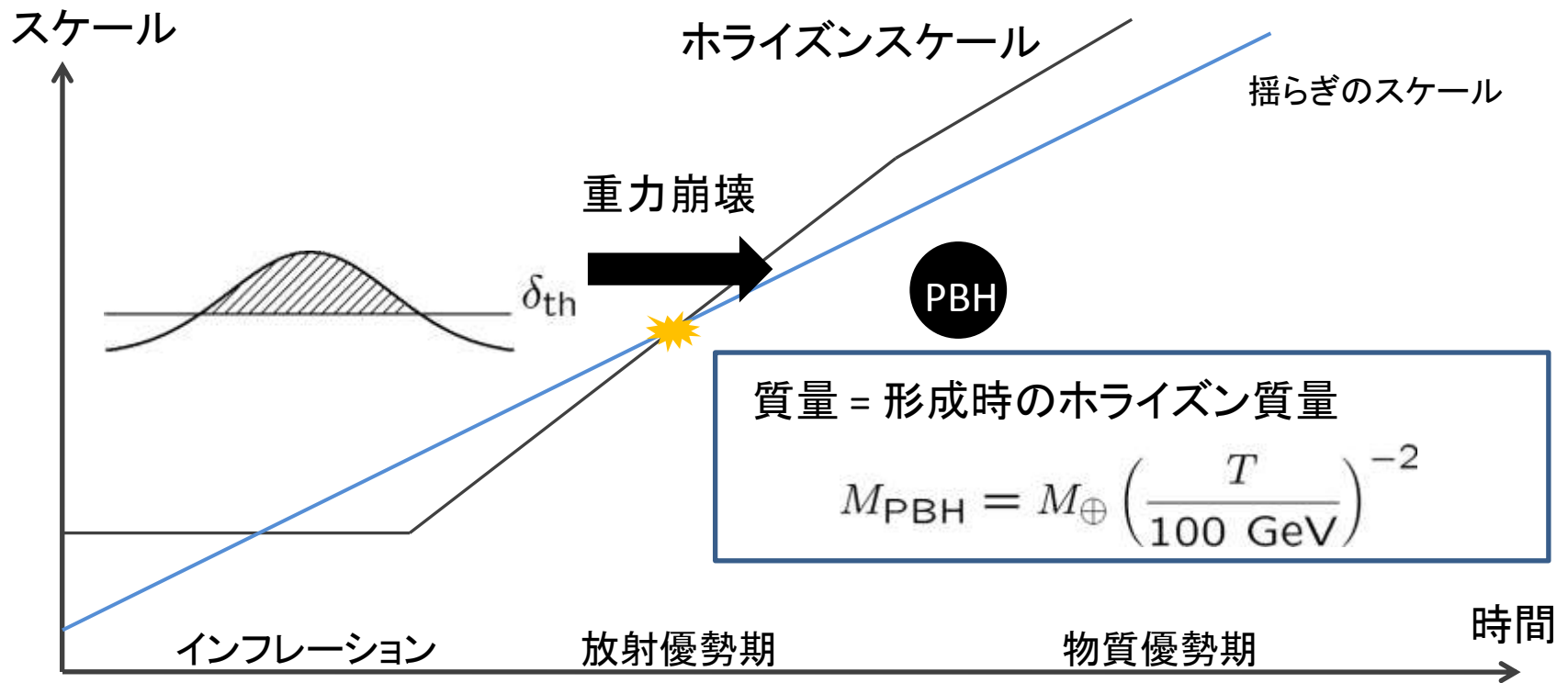
- 原始ブラックホール

機構  $\simeq$  非一様性、シグナル  $\simeq$  崩壊する暗黒物質

# 原始ブラックホール

## 原始ブラックホール (Primordial Black Hole、PBH)

宇宙初期に存在した大振幅の原始密度揺らぎの重力崩壊によって形成されたブラックホール



# 原始ブラックホールによるWIMPの降着

- PBHが形成時に暗黒物質の一部を占めていた場合、PBHは形成後、周囲のWIMPを集積する。

## → UCMHs (Ultraluminous microhalos) の形成

Mack, Ostriker, Ricotti 07

### ■ 降着過程

$$R_{\text{halo}} \equiv 18 \text{ AU} \left( \frac{M_{\text{PBH}}}{M_{\oplus}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$n_{\text{WIMP}} \sim 10^8 n_{\odot}$$

grow as  $\propto (1+z)^{-1}$

$$M_{\text{halo}} = M_{\text{PBH}}$$

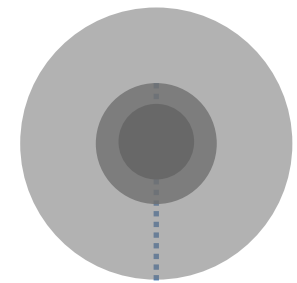
放射優勢期

物質優勢期

時間

形成

等密度時



# 原始ブラックホールによるWIMPの降着

- PBHが形成時に暗黒物質の一部を占めていた場合、PBHは形成後、周囲のWIMPを集積する。

## → UCMHs (Ultraluminous microhalos) の形成

Mack, Ostriker, Ricotti 07

### ■ 降着過程

対消滅率  $\Gamma$  は  $\mathcal{O}(10^{16})$  だけ増幅される。

$$R_{\text{halo}} \equiv 18 \text{ AU} \left( \frac{M_{\text{PBH}}}{M_{\oplus}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$n_{\text{WIMP}} \sim 10^8 n_{\odot}$$

grow as  $\propto (1+z)^{-1}$

$$M_{\text{halo}} = M_{\text{PBH}}$$

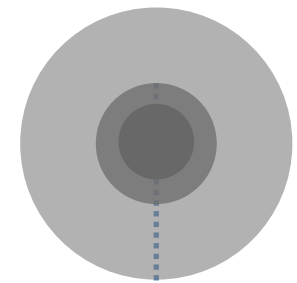
放射優勢期

物質優勢期

時間

形成

等密度時





# 原始ブラックホール起源のBoost Factor

- 宇宙線のソース

PBHなし

$$\Phi_{\cancel{\text{PBH}}} \propto \frac{1}{2} n_{\odot, \text{WIMP}}^2 \langle \sigma v \rangle$$

$$R_{\text{halo}} \equiv 18 \text{ AU} \left( \frac{M_{\text{PBH}}}{M_{\oplus}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

PBHあり

$$\Phi_{\text{PBH}} \propto n_{\odot, \text{PBH}} \Gamma \sim \underline{n_{\odot, \text{PBH}} R_{\text{halo}}^3} \times \mathcal{O}(10^{16}) \Phi_{\cancel{\text{PBH}}} \sim 10^{-10} \Omega_{\text{PBH}}$$

崩壊する暗黒物質の  
場合と同じ形

UCMHの占める体積の割合 × 増幅されたフラックス

**Boost Factor**

$$BF \equiv \frac{\Phi_{\text{PBH}}}{\Phi_{\cancel{\text{PBH}}}} = \mathcal{O}(10^6) \times \Omega_{\text{PBH}}$$

# Boost Factorの上限

- 降着の過程で角運動量(速度分散)が無視できるための条件

$$\rightarrow M_{\text{PBH}} \sim 10^{-7} M_{\oplus} - M_{\oplus}$$

- マイクロレンジングによるPBHに対する制限

$$\Omega_{\text{PBH}} < \begin{cases} \Omega_{\text{DM}} & (10^{-7} M_{\oplus} < M_{\text{PBH}} < 10^{-3} M_{\oplus}), \\ 0.1 \Omega_{\text{DM}} & (10^{-3} M_{\oplus} < M_{\text{PBH}} < M_{\oplus}). \end{cases}$$

## Boost Factorの最大値

$$BF = \mathcal{O}(10^{4-5}) \quad \text{PAMELAアノマリーを説明するのに十分な値}$$

# ガンマ線点源観測

崩壊する暗黒物質とUCMHの違いは？

低密度・大フラックス

➡ ガンマ線点源として観測可能？

UCMHは距離

$$d_{\text{point}} \equiv \left( \frac{\Gamma}{4\pi\Phi_{\text{obs}}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$\Gamma$ : UCMH単体の光子放射率  
 $\Phi_{\text{obs}}$ : 観測感度

より近くにある時、点源として観測される。

観測が見込まれるUCMHの数

$$R \equiv \frac{4\pi d_{\text{point}}^3}{3} n_{\text{UCMH}}$$

$\Gamma$  がPAMELAアノマリーを説明する程度の大きさであると仮定して、 $R$  を評価

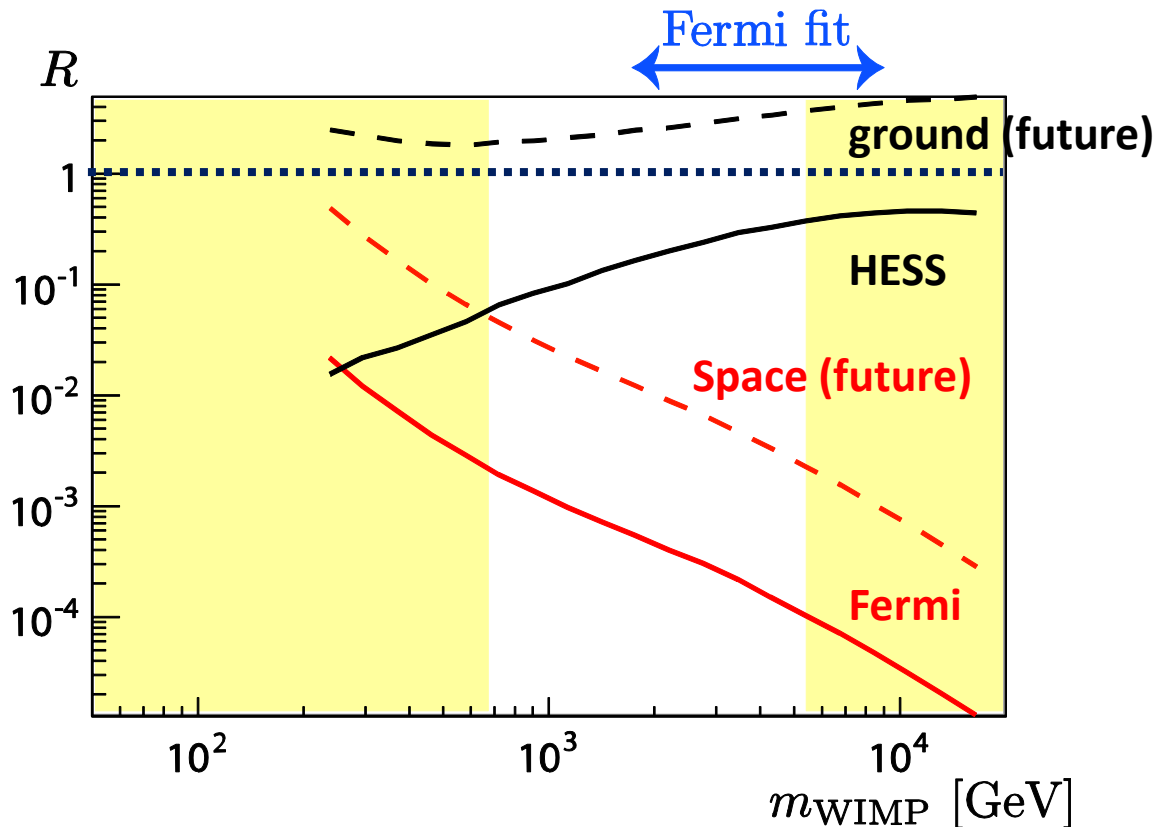
# ガンマ線点源観測

影の部分: ガンマ線の一様成分の観測から排除される領域

対消滅先

$$\tau^\pm$$

観測が見込まれるUCMHの数  
( $M_{\text{PBH}} = M_\oplus$ と仮定)



• WIMPの性質・PBHの質量によっては、将来、UCMHはガンマ線点源として観測可能

# まとめ

- PBHが形成時に暗黒物質の一部を占めていた場合、PBHは形成後、周囲のWIMPを集積する。

➡ **UCMHs (ultracompact minihalos) の形成**

• 集積されたWIMPによる対消滅確率、陽電子フラックスの増幅

$$BF = \mathcal{O}(10^{4-5}) \quad \text{PAMELAアノマリーを説明するのに十分}$$

• WIMPの性質・PBHの質量によっては、将来、UCMHはガンマ線点源として観測可能

• もしもPBHがPAMELAアノマリーを説明できるほど存在していた場合には、DECIGOなどの将来の宇宙重力波干渉計で検出できるほどの重力波を生み出す。(RS & Yokoyama 09, 10)

**Back Up**

# WIMP density profile in UCMH

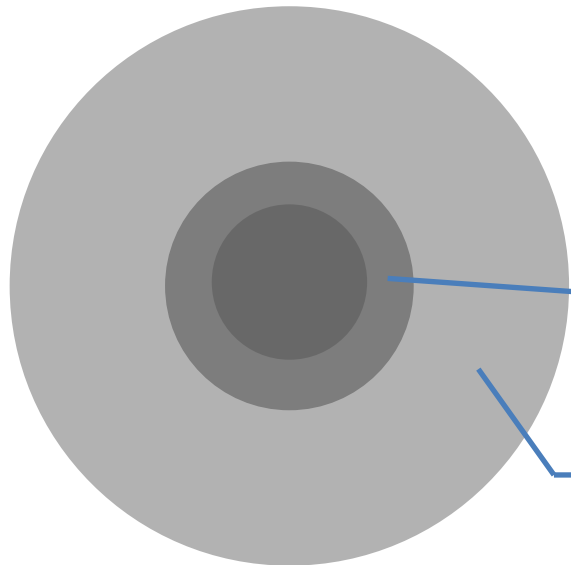
## Annihilation rate

$$\Gamma \sim 2\pi \langle \sigma v \rangle n_{\text{WIMP}}^2(R_{\text{eq}}) R_{\text{eq}}^3,$$

$$\sim 10^{29} \text{ s}^{-1} \left( \frac{m_{\text{WIMP}}}{100 \text{ GeV}} \right)^{-2} \left( \frac{M_{\text{PBH}}}{M_{\oplus}} \right) \left( \frac{\langle \sigma v \rangle}{3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}} \right)$$

$$n_{\text{WIMP}}(R_{\text{eq}}) \sim 10^7 n_{\odot}$$

## ■ Density profile



$$r < R_{\text{min}}$$

$$n_{\text{WIMP}}^2 r^3 \propto r^3$$

annihilations

$$R_{\text{min}} < r < R_{\text{eq}}$$

$$n_{\text{WIMP}}^2 r^3 \propto r^0$$

$$r > R_{\text{eq}}$$

$$n_{\text{WIMP}}^2 r^3 \propto r^{-\frac{3}{2}}$$

# Coreless UCMHs

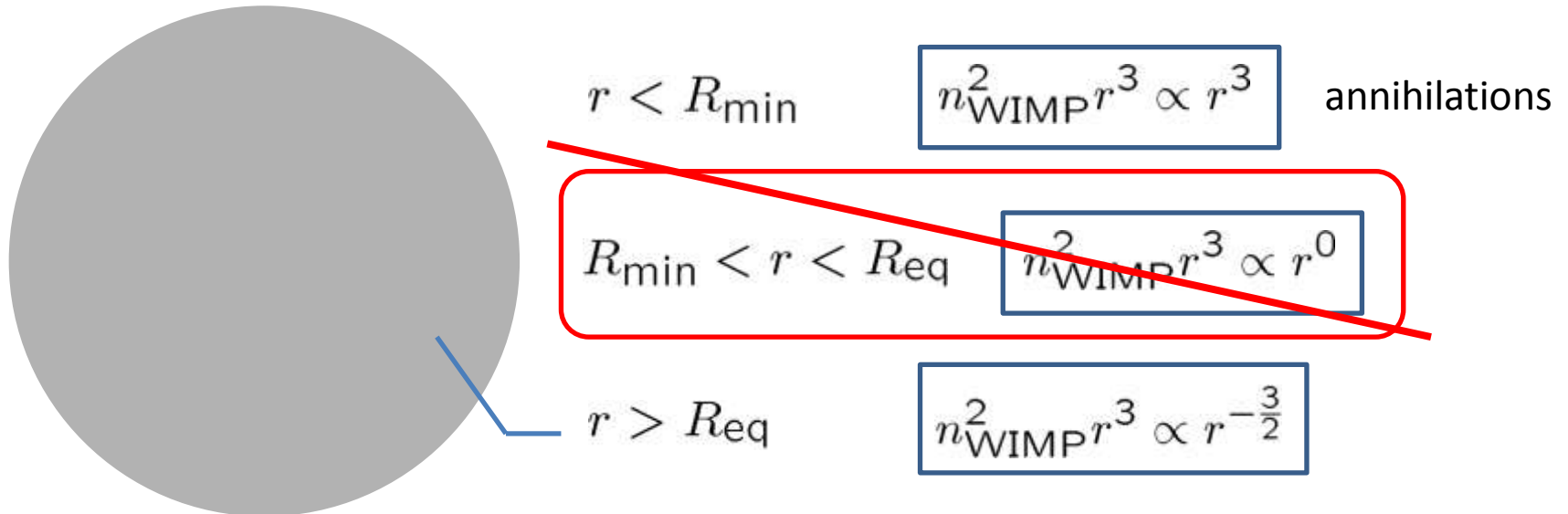
- Density fluctuations with amplitude  $\mathcal{O}(10^{-3})$  grow in the matter-dominated era and can form the UCMHs without the PBH formation.

Time-dependent annihilation rate



Severe constraints from  
extra galactic gamma -ray observations,  
CMB observations ?

## ■ Density profile





# Coreless UCMHs

- Density fluctuations with amplitude  $\mathcal{O}(10^{-3})$  grow in the matter-dominated era and can form the UCMHs without the PBH formation.

Time-dependent annihilation rate



Severe constraints from

extra galactic gamma -ray observations,  
CMB observations ?

■ Density profile

**WIMP free streaming can wipe out such fluctuations if**

$$M_{\text{PBH}} < 2 \times 10^6 M_{\oplus} \left( \frac{m_{\text{WIMP}}}{100 \text{ GeV}} \right)^{-1} \left( \frac{T_{\text{kd}}}{10 \text{ MeV}} \right).$$

ons

# Conditions for Large Boost Factor

- Negligible angular momentum of WIMPs

Peculiar velocity ← thermal + gravitational

$$6 \times 10^{-4} M_{\oplus} \left( \frac{m_{\text{WIMP}}}{100 \text{ GeV}} \right)^{-\frac{3}{2}} \left( \frac{T_{\text{kd}}}{10 \text{ MeV}} \right)^{-\frac{3}{2}} < M_{\text{PBH}} < M_{\oplus} \left( \frac{m_{\text{WIMP}}}{100 \text{ GeV}} \right)^{-\frac{3}{2}} \left( \frac{T_{\text{kd}}}{10 \text{ MeV}} \right)^{-\frac{3}{2}}$$

~~thermal~~ ~~gravitational~~

- Microlensing constraint on the PBH abundance

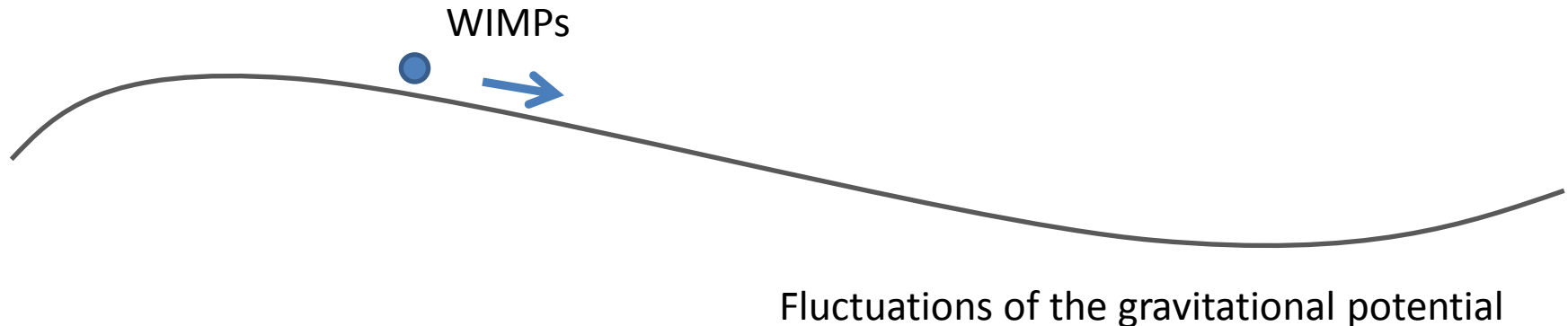
$$\Omega_{\text{PBH}} < \begin{cases} \Omega_{\text{DM}} & (10^{-4} M_{\oplus} < M_{\text{PBH}} < 10^{-3} M_{\oplus}), \\ 0.1 \Omega_{\text{DM}} & (10^{-3} M_{\oplus} < M_{\text{PBH}} < M_{\oplus}). \end{cases}$$

**The boost factor can be as large as**

$$BF = \mathcal{O}(10^{4-5}) \quad \text{sufficient to explain the PAMELA anomaly}$$

# Angular Momentum of WIMPs

- Peculiar velocity induced gravitationally



**WIMP free streaming can wipe out the fluctuations with scales less than**

$$l_{\text{fs}} \simeq 1 \text{ pc} \left( \frac{m_{\text{WIMP}}}{100 \text{ GeV}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{T_{\text{kd}}}{10 \text{ MeV}} \right)^{-\frac{1}{2}}.$$

**WIMPs turn around at smaller scales for lighter PBHs.**

# Angular Momentum of WIMPs

- Peculiar velocity induced gravitationally

The peculiar velocity induced by gravitationally can be neglected if

$$M_{\text{PBH}} < M_{\oplus} \left( \frac{m_{\text{WIMP}}}{100 \text{ GeV}} \right)^{-\frac{3}{2}} \left( \frac{T_{\text{kd}}}{10 \text{ MeV}} \right)^{-\frac{3}{2}} .$$

WIMP free streaming can wipe out the fluctuations with scales less than

$$l_{\text{fs}} \simeq 1 \text{ pc} \left( \frac{m_{\text{WIMP}}}{100 \text{ GeV}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{T_{\text{kd}}}{10 \text{ MeV}} \right)^{-\frac{1}{2}} .$$

WIMPs turn around at smaller scales for lighter PBHs.

# Angular Momentum of WIMPs

- Peculiar velocity induced thermally

$$\sigma_t \simeq 35 \text{ cm/s} \left( \frac{m_{\text{WIMP}}}{100 \text{ GeV}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{T_{\text{kd}}}{10 \text{ MeV}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{1+z}{1+z_{\text{eq}}} \right)$$

gravitational force > centrifugal force at  $r \sim R_{\text{eq}}$

**The peculiar velocity induced thermally can be neglected if**

$$M_{\text{PBH}} > 6 \times 10^{-4} M_{\oplus} \left( \frac{m_{\text{WIMP}}}{100 \text{ GeV}} \right)^{-\frac{3}{2}} \left( \frac{T_{\text{kd}}}{10 \text{ MeV}} \right)^{-\frac{3}{2}}.$$

# PBH as Source of Boost Factor

- Cosmic ray source

Without PBHs

$$Q_{\odot, \text{PBH}} \simeq 1.35 \times 10^{-31} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1} \\ \times \left( \frac{m_{\text{WIMP}}}{100 \text{ GeV}} \right)^{-2} \left( \frac{\langle \sigma v \rangle}{3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}} \right) \frac{dN_{e^\pm}}{dE}$$

With PBHs

$$Q_{\odot, \text{PBH}} \simeq \mathcal{O}(10^{-25}) \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1} \times \\ \Omega_{\text{PBH}} \left( \frac{m_{\text{WIMP}}}{100 \text{ GeV}} \right)^{-2} \left( \frac{\langle \sigma v \rangle}{3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}} \right) \frac{dN_{e^\pm}}{dE}$$

**Boost Factor**

$$BF = \mathcal{O}(10^6) \times \Omega_{\text{PBH}}$$

# 崩壊する暗黒物質との対応

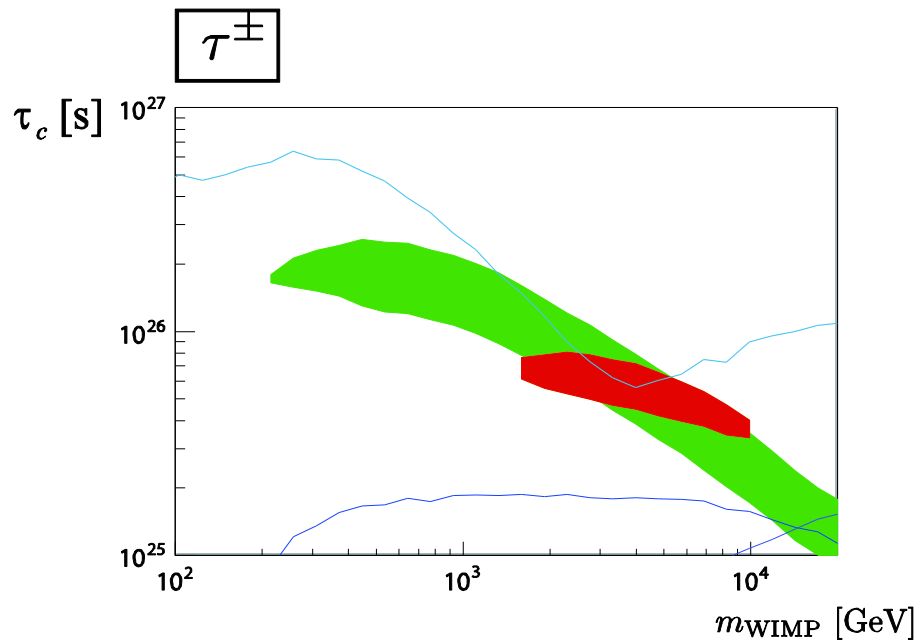
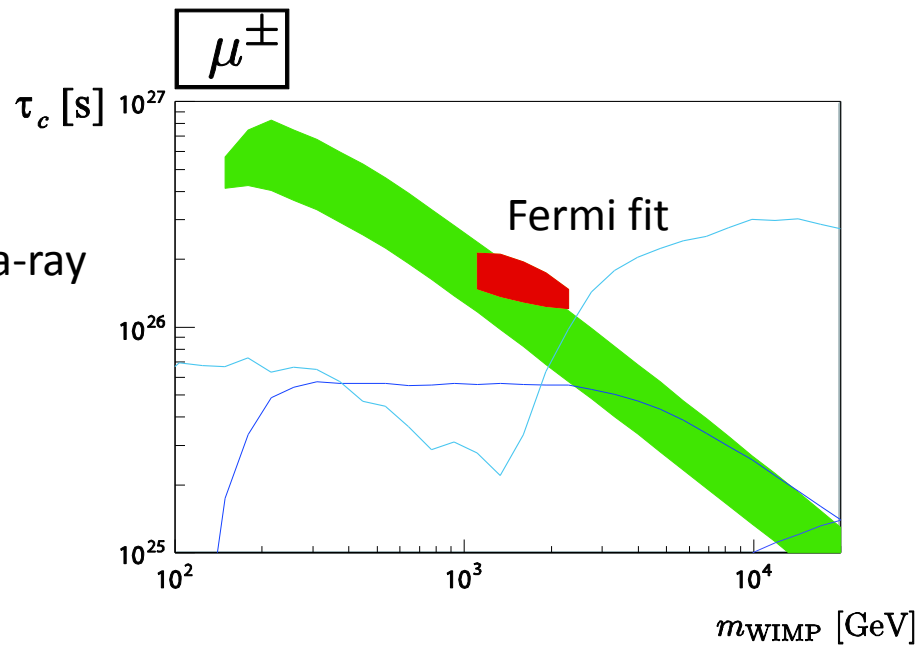
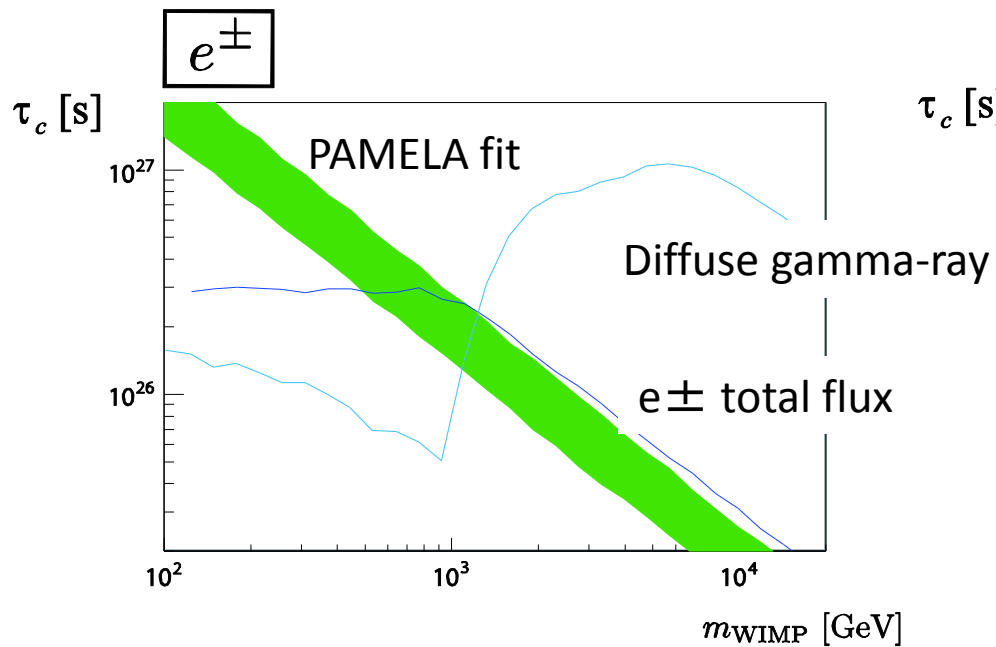
PBHあり

$$\Phi_{\text{PBH}} \propto n_{\odot, \text{PBH}} \Gamma \quad \text{崩壊する暗黒物質の場合と同じ形}$$

- 対応する崩壊する暗黒物質の崩壊率(寿命)

$$\Gamma_c \equiv \tau_c^{-1} \equiv \frac{n_{\odot, \text{PBH}}}{\rho_{\odot}/2m_{\text{WIMP}}} \Gamma$$

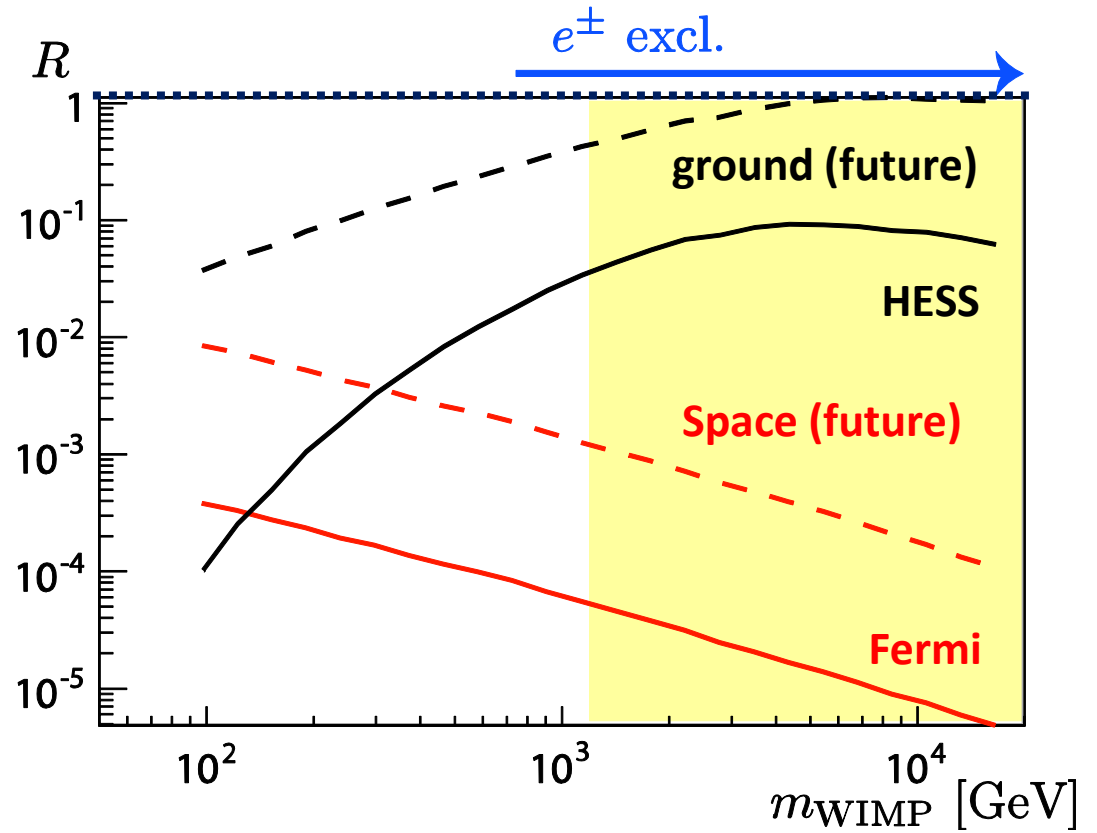
崩壊する暗黒物質に対する制限がそのままUCMHに対する制限になる。





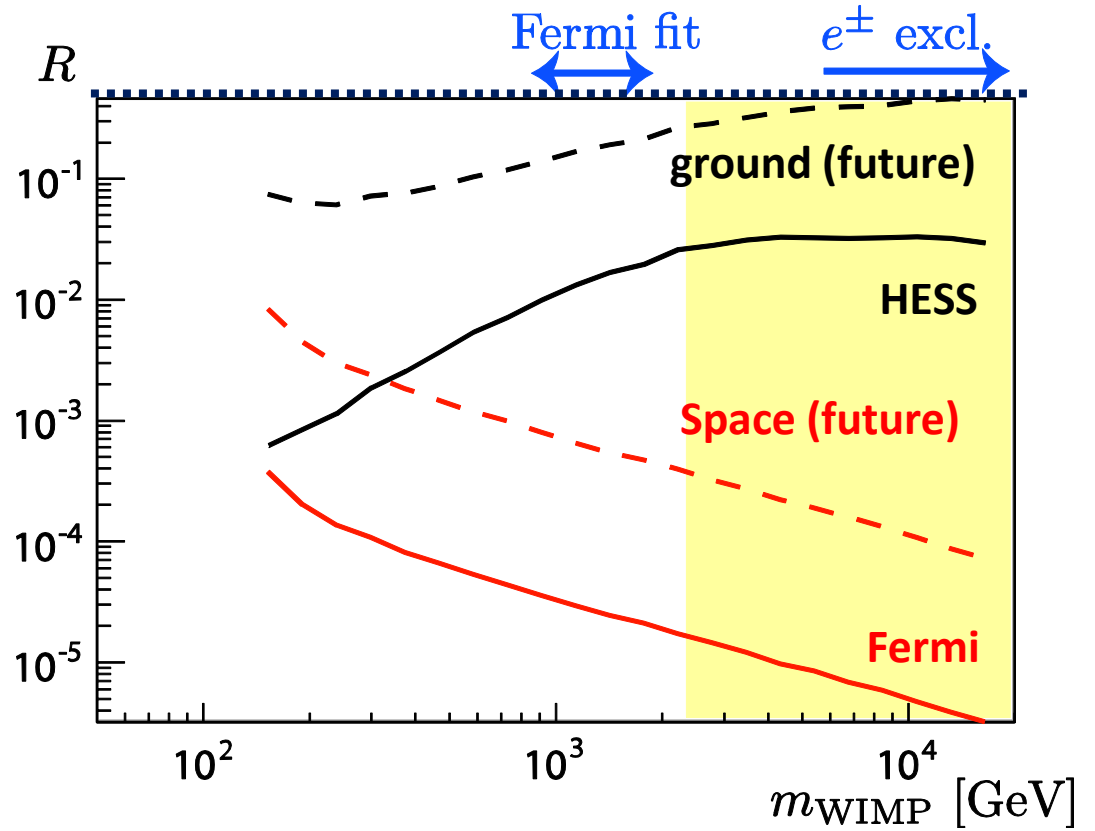
$$e^{\pm}$$

観測が見込まれるUCMHの数



$$\mu^\pm$$

観測が見込まれるUCMHの数



- ・ 1回あたりの対消滅過程で放出が見込まれる光子の数

mode \ mass	100 GeV	500 GeV	2000 GeV	5000 GeV
$e^+e^-$	0.7/0.5/0.2	0.9/0.7/0.4	1.1/0.9/0.7	1.3/1.1/0.8
$\mu^+\mu^-$	0.4/0.2/0.1	0.6/0.4/0.2	0.9/0.6/0.4	1.1/0.8/0.6
$\tau^+\tau^-$	2.4/2.2/1.0	2.6/2.5/2.0	2.9/2.7/2.5	3.0/2.8/2.6

数字は左から、100MeV、1GeV、10GeVよりエネルギーの高い光子の数を表す。