

宇宙線研究所Workshop 高エネルギー宇宙の総合的理解

始原的ブラックホールからの 宇宙線に見る膜宇宙の痕跡

東京大学理学系研究科 宇宙理論研究室

仙洞田 雄一

March 9, 2004

Ref.

[1] Y.S., Master thesis, University of Tokyo, submitted

[2] Y.S., S. Nagataki, and K. Sato, Phys. Rev. D **68**, 103510 (2003)

[3] Y.S., K. Kohri, S. Nagataki, and K. Sato, in preparation

内容

1. INTRODUCTION

2. 膜宇宙での始原的ブラックホール (PBH)

3. PBHからの宇宙線と膜宇宙への制限

- ・ 銀河系外背景 X, γ 線
- ・ 宇宙線反陽子

4. 議論と結論

Introduction

動機、目的&手法



知りたいこと

私たちの宇宙は何次元なのか？

重力(時空)を統一する理論
ex. 超重力、超ひも、M...

→必然的に高次元



$D=11$
($=4+1+6$)

しかし、まだ観測的証拠はまったくない

1998- **膜宇宙論**が登場(ADD, RS)

- 余次元はとても小さな空間領域に隠されている
- 素粒子の階層性問題を解決する可能性がある

RS2膜宇宙論

Randall & Sundrum (1999)

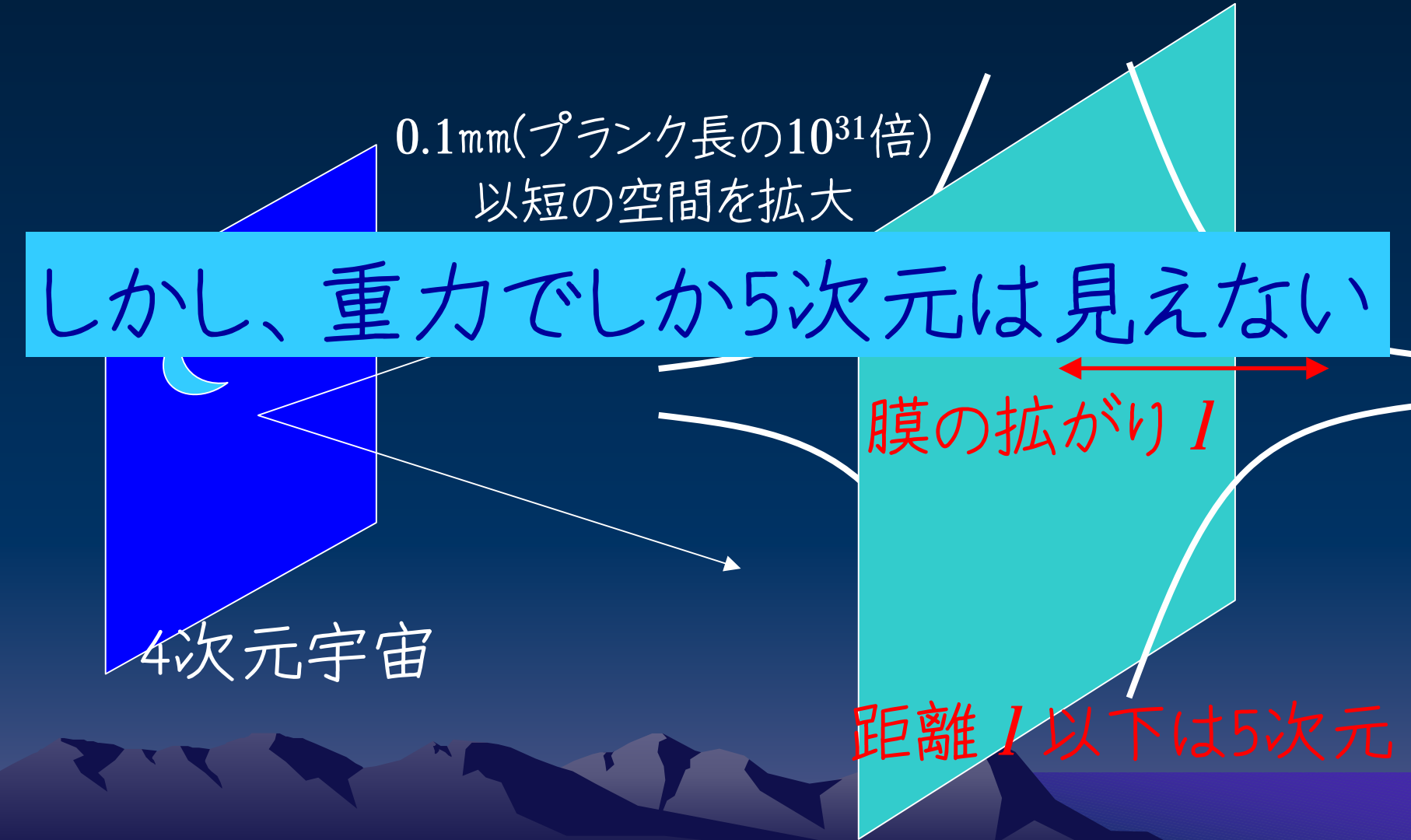
0.1mm(プランク長の 10^{31} 倍)
以短の空間を拡大

しかし、重力でしか5次元は見えない

4次元宇宙

膜の広がり l

距離 l 以下は5次元



膜宇宙論とPBH

「膜宇宙を探る=サブミリ重力を見る」ための手段

候補1. 空間そのものが小さかった宇宙最初期

候補2. 短距離での重力相互作用

PBH&宇宙線を使って膜宇宙を探る

- 宇宙が5次元だったころ(p^2 -PHASE)にできた
→ 当時の宇宙の情報を残している
- いま5次元の大きさ
→ 蒸発物の宇宙線を見れば5次元が探れる

Primordial black holes in the RS2 braneworld

膜宇宙での始原的ブラックホールの
特性



RS2 Brane Cosmology

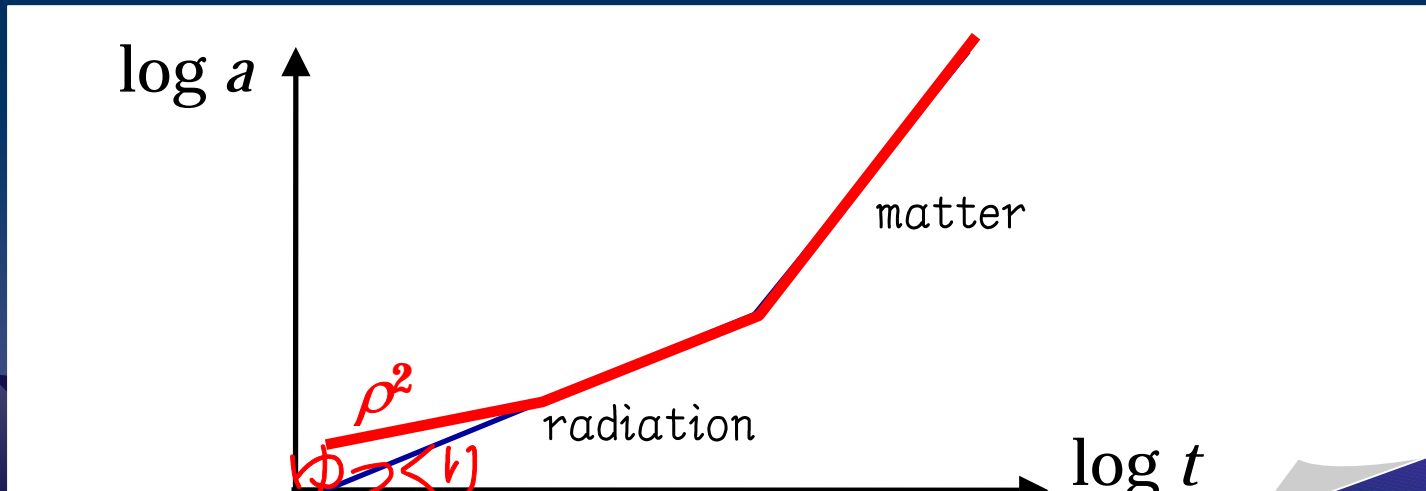
MODIFIED Friedmann方程式

$$H^2 = \frac{8\pi}{3M_4^2} \rho \left(1 + \frac{\rho}{\lambda} \right) + \frac{\Lambda_4}{3}$$



5次元のエネルギー密度スケール
= 膜の厚さの長さスケール

極初期($t \ll l$ のとき)に $\rho \ll \lambda$ になり、
 $H^2 \propto \rho^2 \propto a^{-4} \propto t^{-1}$

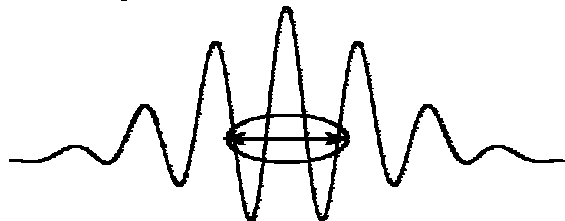


PBHの形成

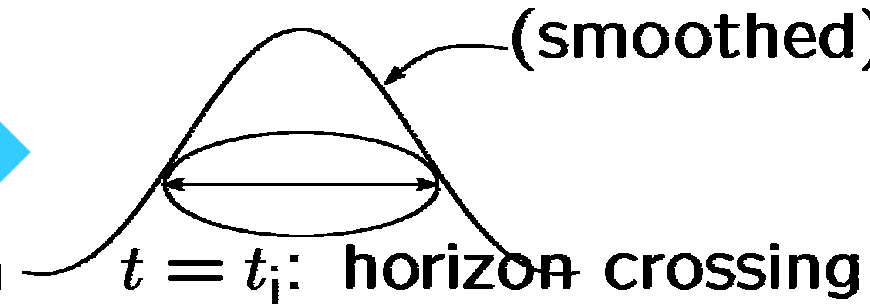
密度揺らぎから生まれる

Carr (1975)

primordial fluctuation
(super-horizon)



$H(t)^{-1}$: Hubble horizon

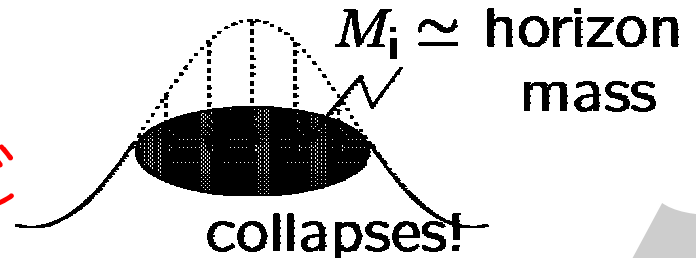


$t = t_i$: horizon crossing

密度揺らぎがHORIZONに

入ってCOLLAPSEする:

(スペクトル以外)4次元と同じ



PBHの成長

5D PBHは成長する

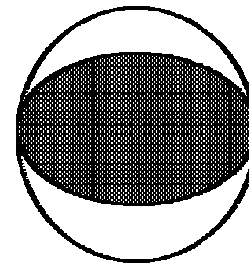
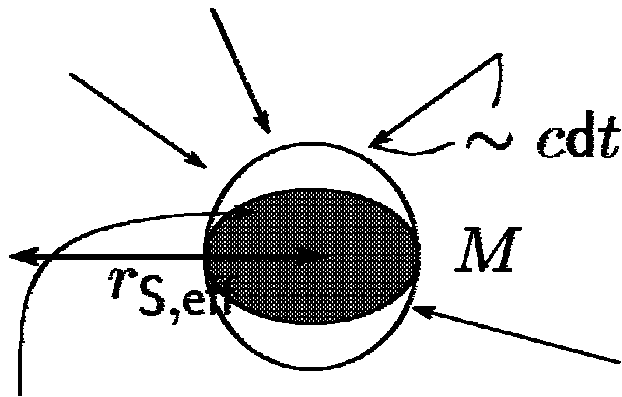
Guedens, Clancy & Liddle (2002)
Majumdar (2003)

5D PHASE の特徴

$$\rho(t) \propto t^{-1} : \text{radiation}$$

薄まりが遅い

ACCRETIONが起きる
(4次元では起こらない)



$M + dM$
grows!

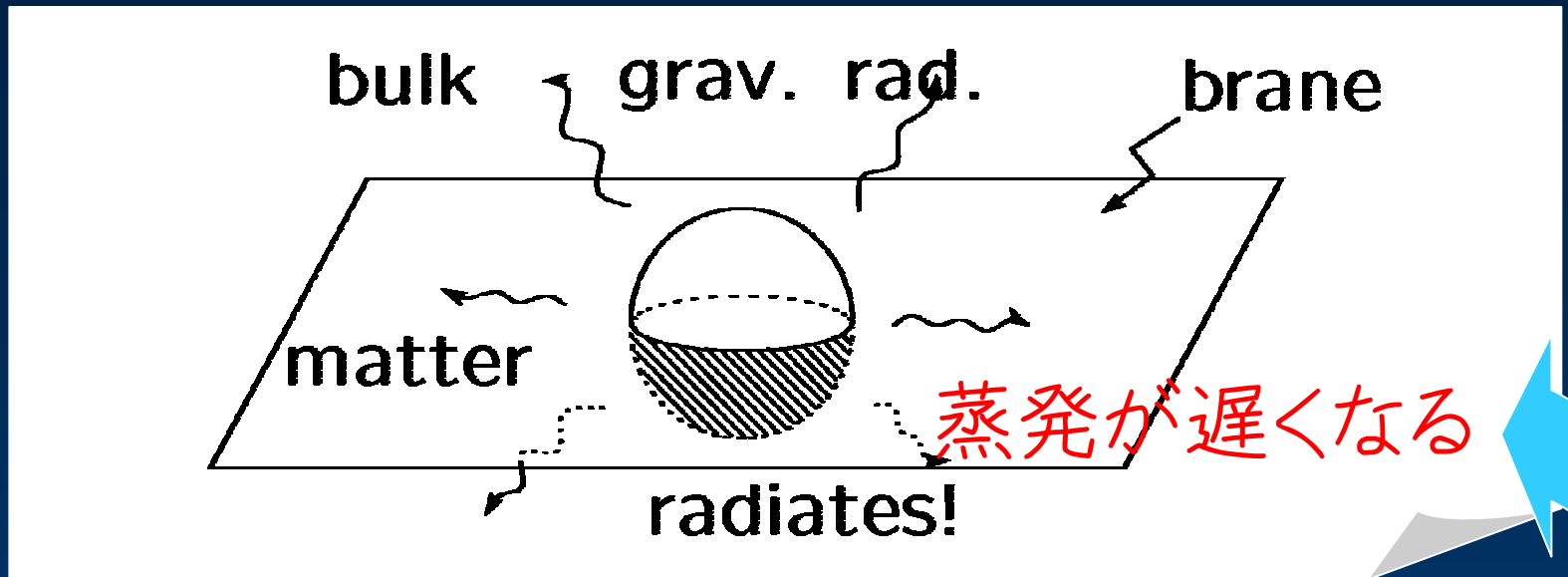
降着率: $\frac{dM}{dt} = F \pi r_{S,\text{eff}}^2 \rho(t)$

F : ACCRETIONの効率 (0 F 1)

PBHの蒸発

5D PBHも蒸発する

Hawking (1974,1975)
Guedens, Clancy & Liddle (2002)



ブラックホール蒸発のStefan-Boltzmann LAW

$$\frac{dM}{dt} \approx -g_D \sigma_D A_{\text{eff},D} T_H^D$$

→ M^1 に比例 (4Dでは M^2)

PBHの量

PBHの種として、スケール不変の密度ゆらぎ

しかし、完全にスケール不変で 10^{-27} 作るのは
 $\Delta T/T \sim 10^{-5}$ (CMB) 等と矛盾し不可能

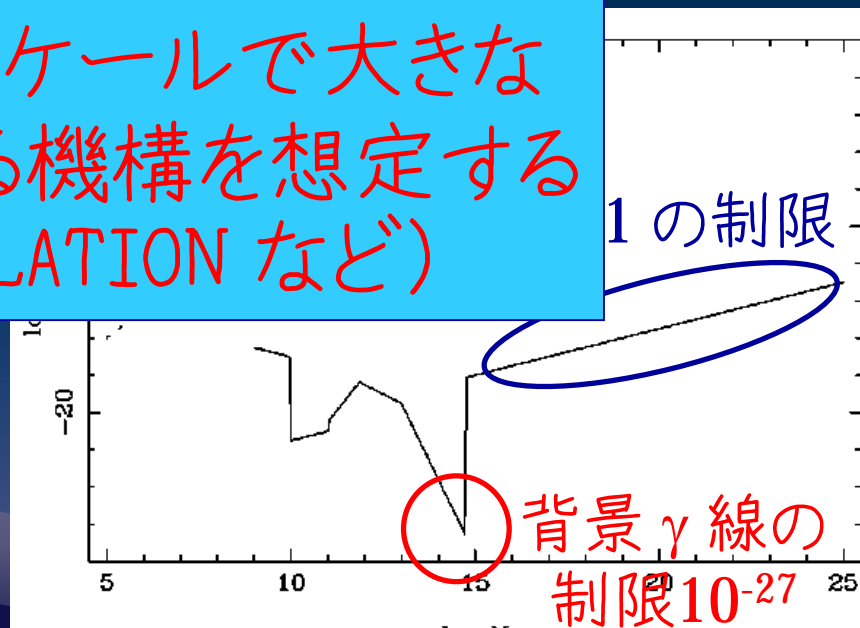
PBHの量は α_i に比例する。

$$\frac{dM_i}{M_i^2} = \alpha_i$$

4次元

ここからは、小スケールで大きな
不変揺らぎを作る機構を想定する
(DOUBLE INFLATION など)

10^{-27} の制限ぎりぎり
ある場合が面白い



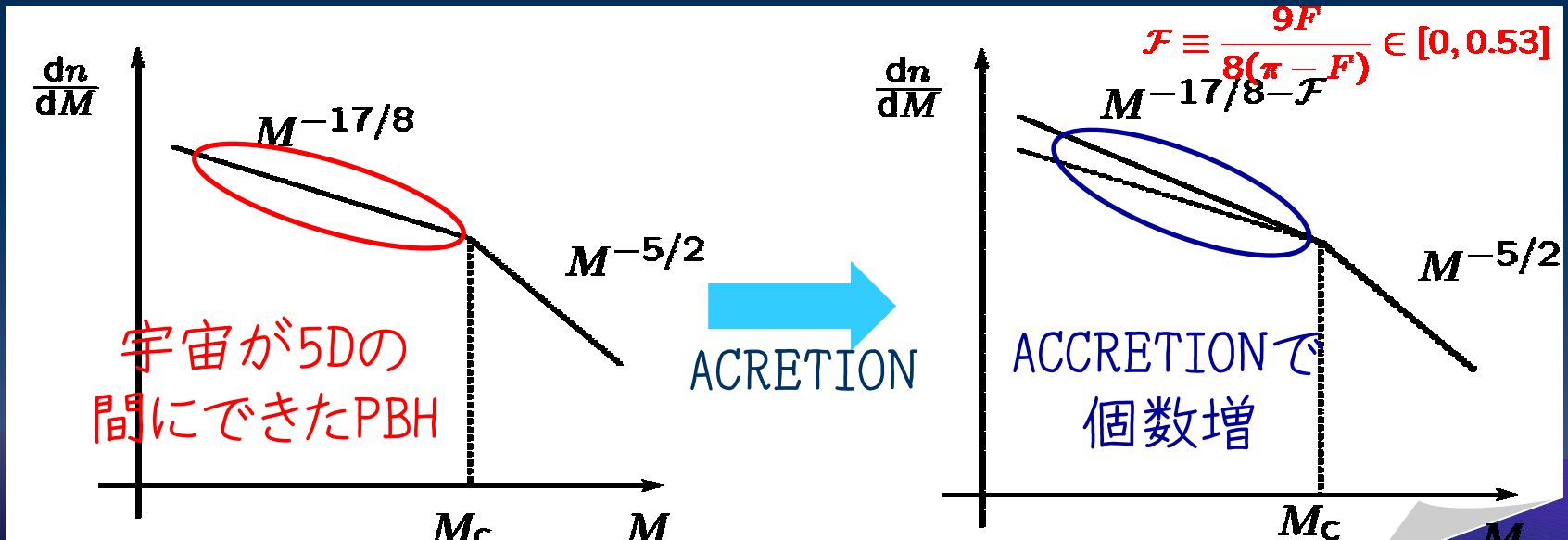
PBHの進化 まとめ

5次元PBHの進化

$$M(t) = \left(\frac{t}{t_i}\right)^{2F/\pi} M_i \rightarrow \text{ACCRETIONで成長} \quad \text{for } t \leq t_c$$

$$= \left[\left(\frac{M(t_c)}{M_4}\right)^2 - g_{\text{eff}} \left(\frac{l}{l_4}\right)^{-1} \left(\frac{t-t_c}{t_4}\right) \right]^{1/2} M_4 \quad \text{for } t \geq t_c$$

質量スペクトルとしては



PBHの質量と温度

宇宙年齢の寿命を持つPBHの質量と温度

$$M(t_c)^* = 3.0 \times 10^9 \left(\frac{l}{10^{31} l_4} \right)^{-1/2} \text{ g}$$

$$T_H^* = 57 \left(\frac{l}{10^{31} l_4} \right)^{-1/4} \text{ keV}$$

余次元 l が大きくなると cf. 4次元

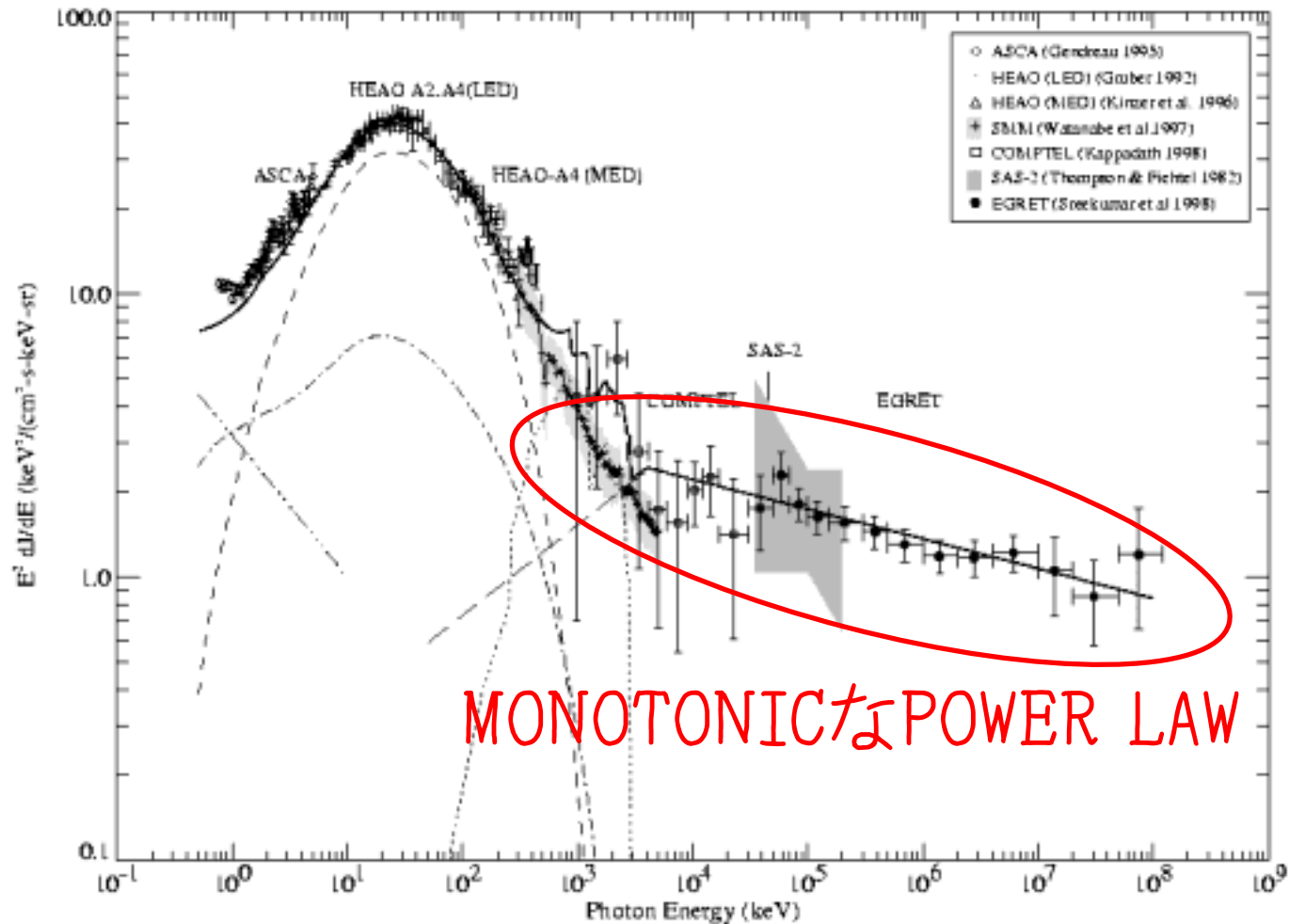
質量…軽くなる 10^{15} g

温度…**低くなる** 100 MeV

High-energy diffuse photon background

背景 X, γ 線で PBHの量と
膜宇宙の拡がりを制限する

背景X, γ 線の観測



PBHからの背景X, γ 線

背景光子は次のような式で求まる

Guedens *et al.* (2002)

$$I(E_0) = \frac{c}{4\pi E_0} \int dM \frac{dn}{dM} \int_{t_{\text{dec}}}^{t_{\text{evap}}} dt \frac{d^2 N_\gamma}{dE dt} E^2 \frac{a^4(t)}{a^4(t_0)}$$

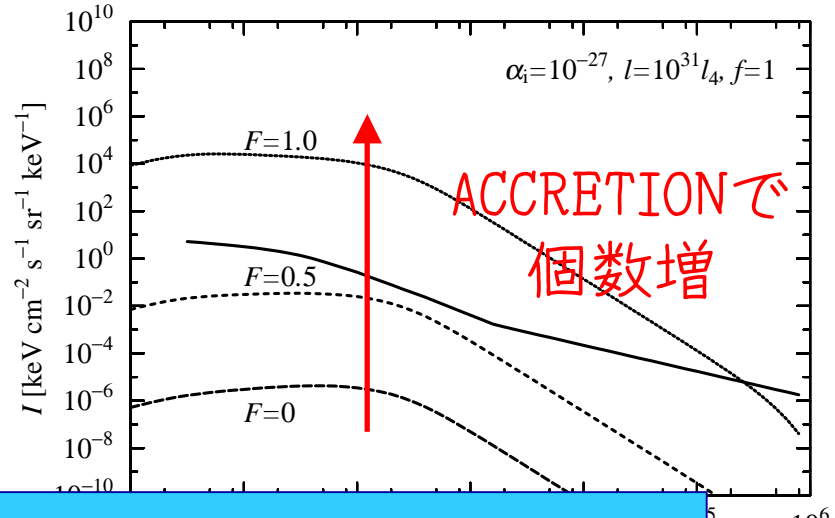
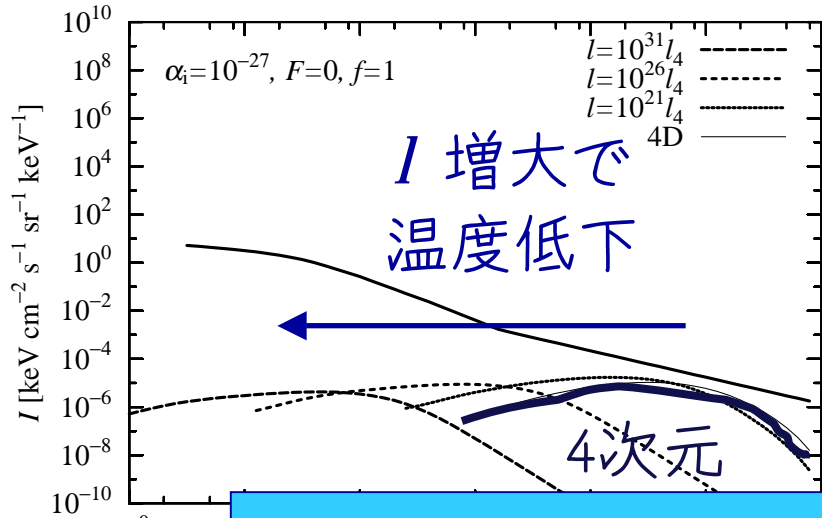
質量スペクトル

REDSHIFT

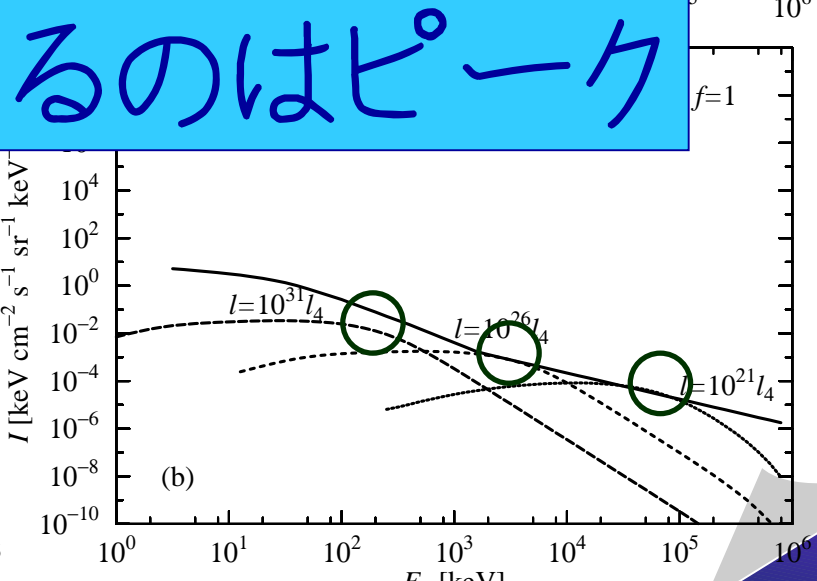
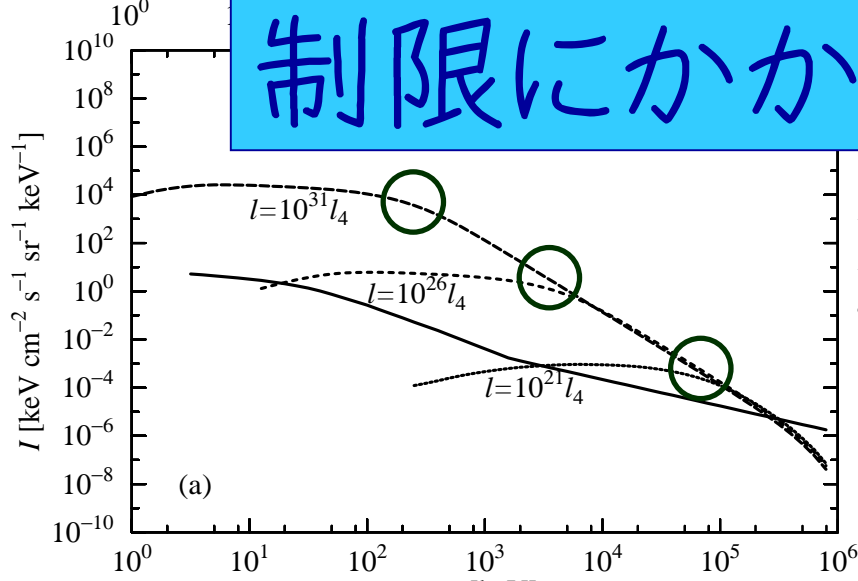
PBH1個あたりの放出率

$$\frac{dN_\gamma}{dE dt} = \frac{\sigma(E)}{\exp(E/T_H) - 1} \frac{E^2}{\pi^2}$$

PBHからの背景X, γ 線



制限にかかるのはピーク



PBHからの背景 X, γ 線

ピークの性質

位置 ... 最近蒸発したPBHの温度

$$E_{\text{peak}} = T_{\text{H}}^*$$

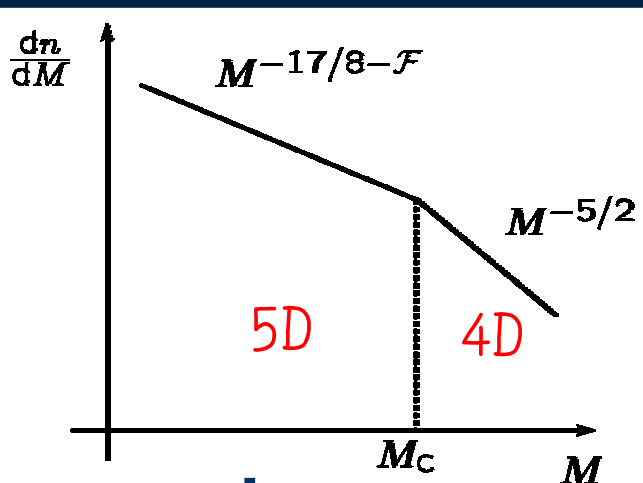
高さ ... PBH個数 PBH質量/PBH温度

$$I_{\text{peak}} \propto n(M_{\text{p}}^*) \frac{M_{\text{p}}^*}{T_{\text{H}}^*} \propto \alpha_i T_{\text{H}}^{*1/4-6\mathcal{F}}$$

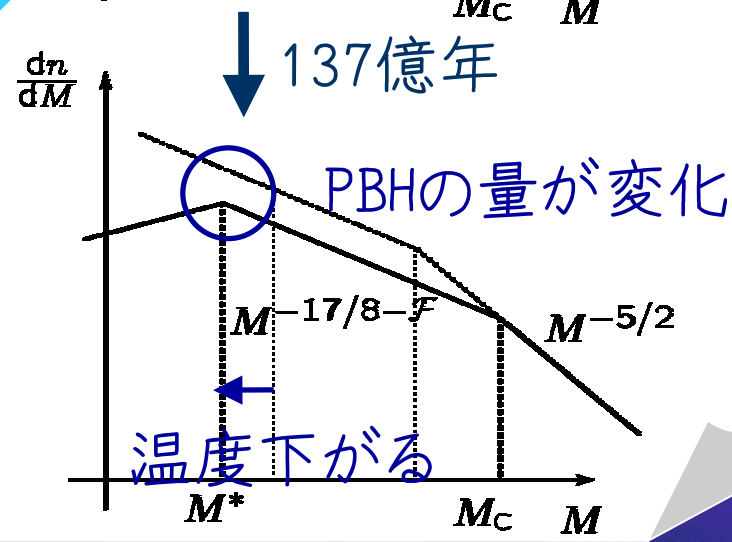
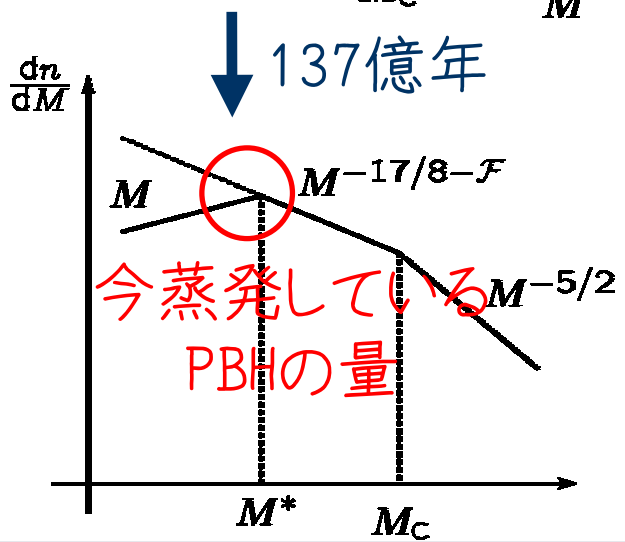
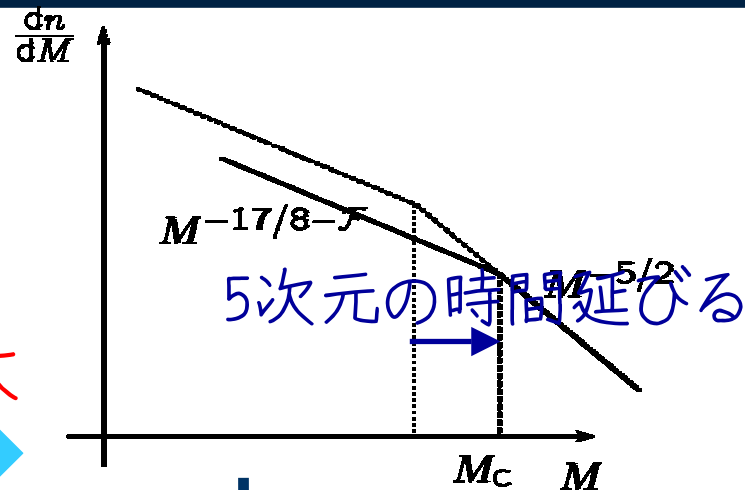
これらの関係で、
ピークがどう動くかわかる

PBHからの背景 X, γ 線

質量スペクトルで見ると

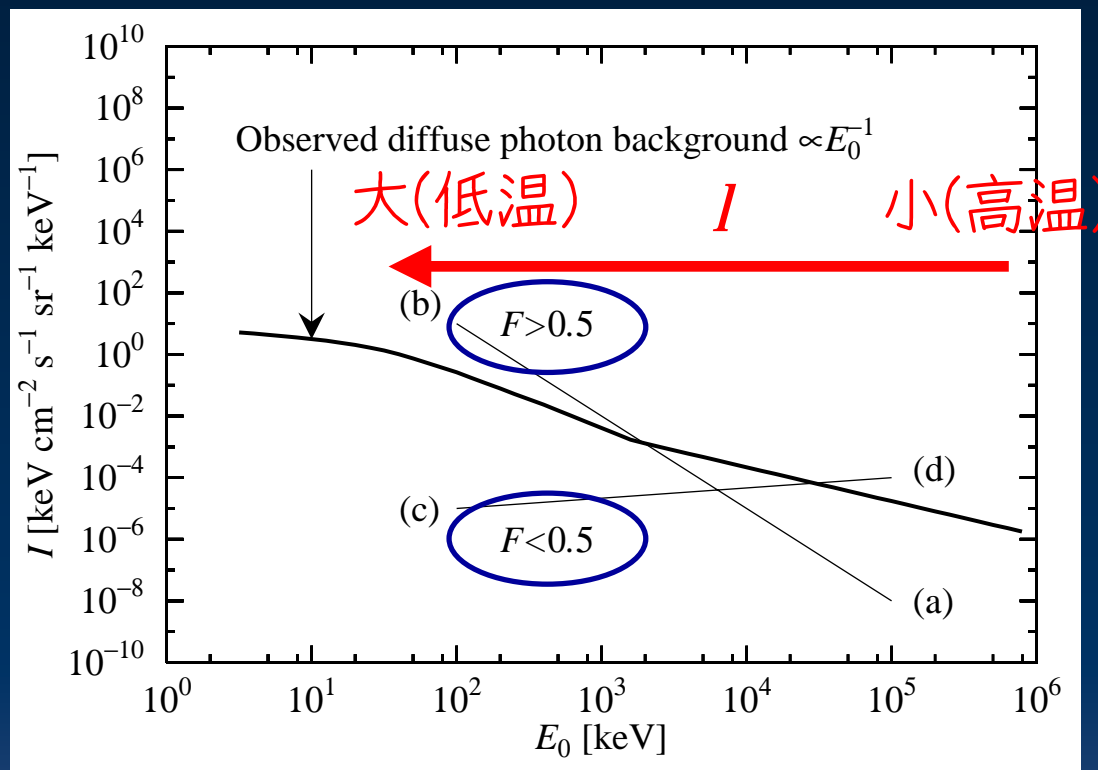


I 増大



PBHからの背景X, γ 線

ピークの動きを追う

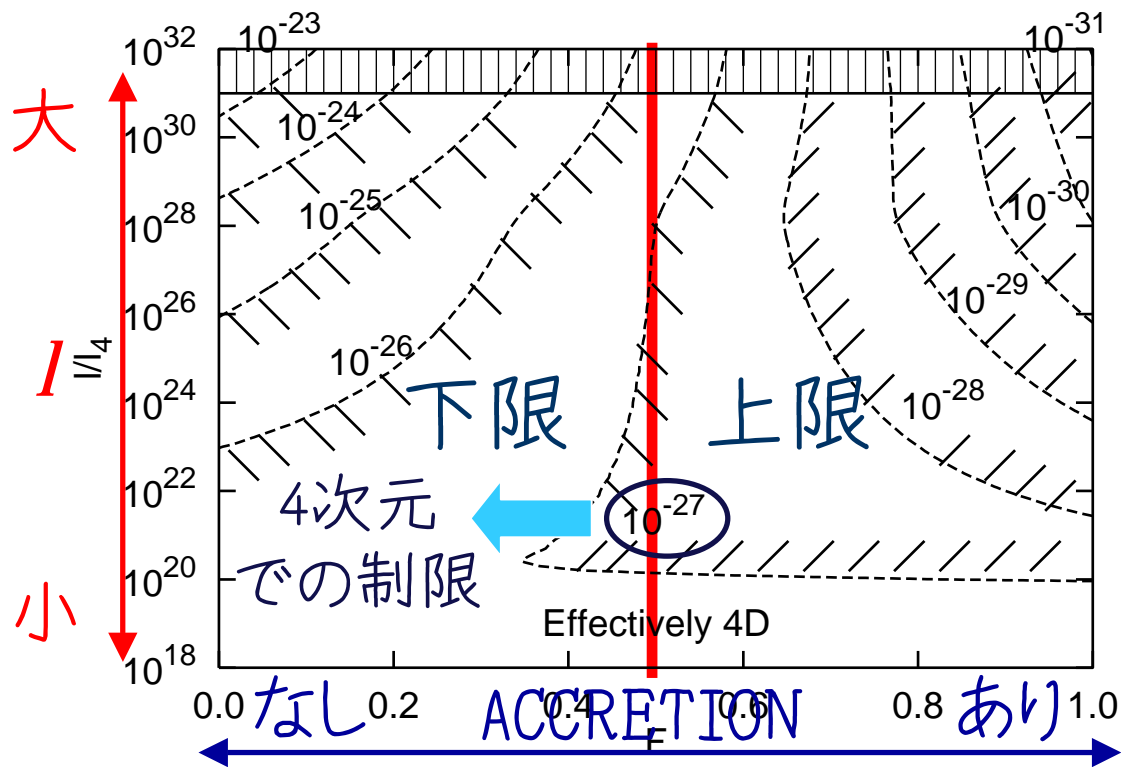


I が大きくなったとき、

1. $F > 50\%$... ACCRETIONが効く(効き過ぎる)
2. $F < 50\%$ ACCRETIONはあまり効かない

PBHからの背景 X, γ 線

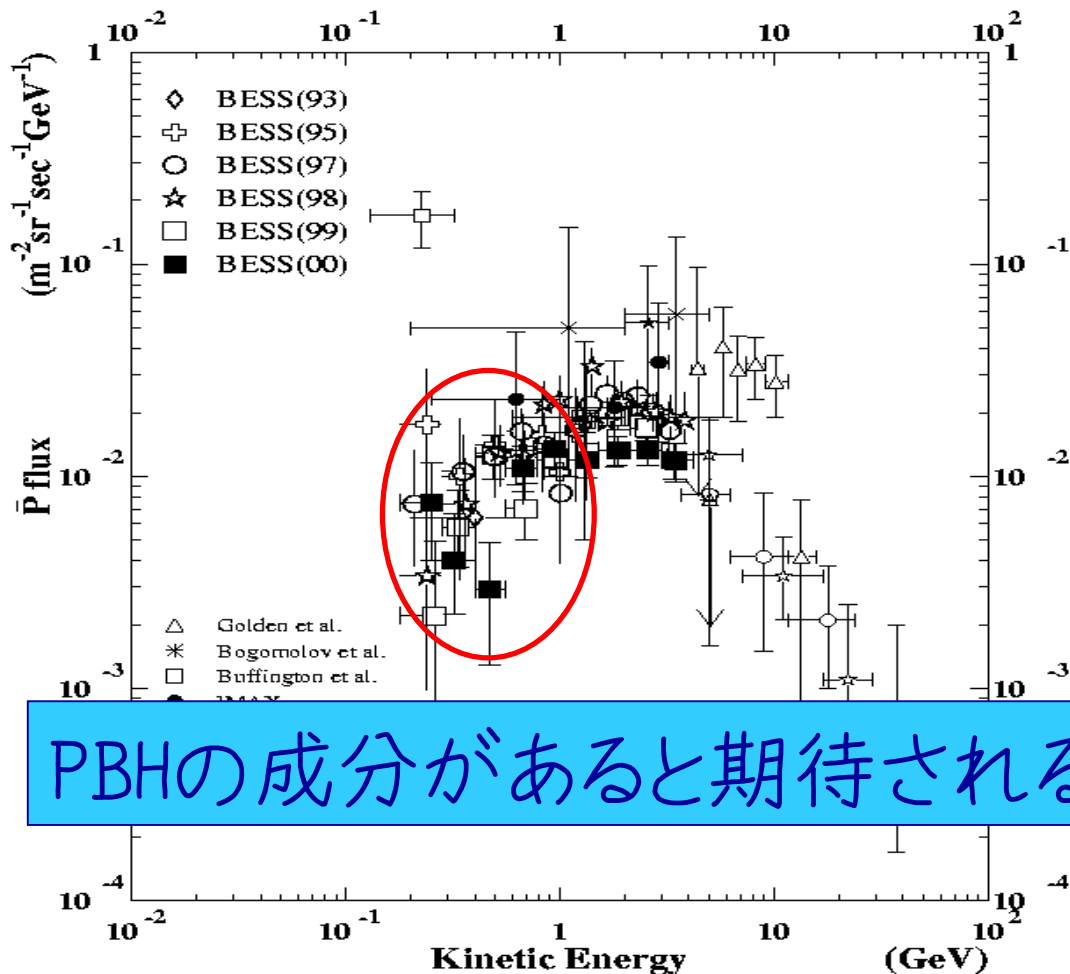
いろいろな I と F に対してPBHの上限量を決める
→逆に、PBHの量に応じて I (と F) の
ALLOWED REGIONが決まる



Cosmic-ray antiprotons

宇宙線反陽子でPBHの量と
膜宇宙の拡がりを制限する

反陽子の観測(主にBESS)



PBHの成分があると期待される領域

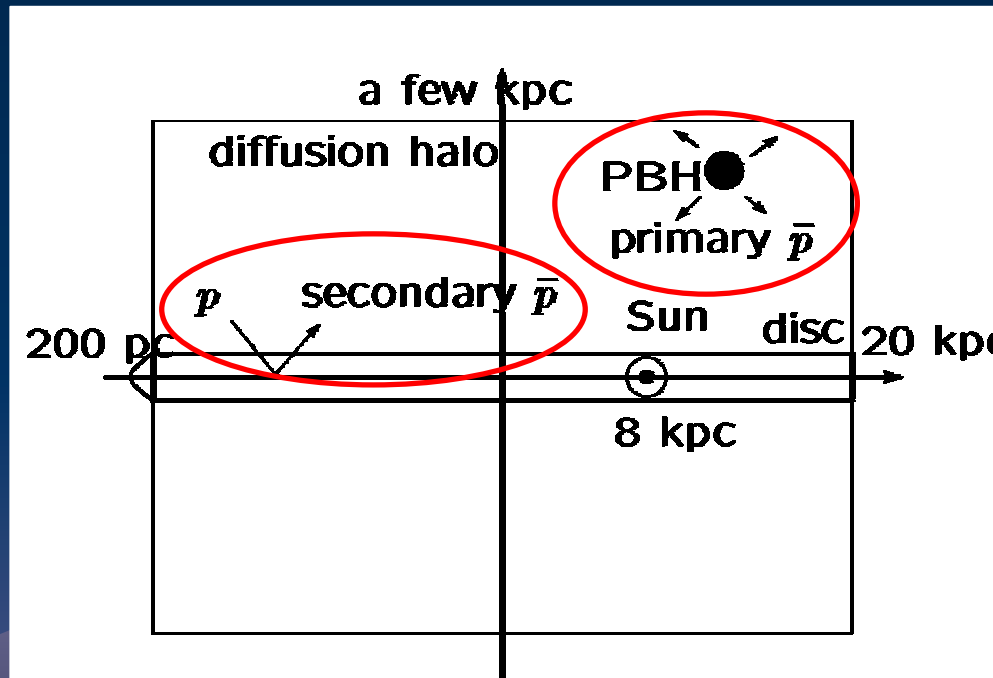
反陽子の起源

二種類の起源

- 二次反陽子…宇宙線陽子と星間ガスの素粒子反応(WELL-KNOWN)

- 一次反陽子…

PBH蒸発、
超対称粒子の崩壊、
etc. (LESS-KNOWN)



二次反陽子

バックグラウンドとして二次反陽子の量を押さえる

しかし、地球に届く反陽子フラックスを知るには、**伝播を解かねばならない**

現状では宇宙線核種の観測データごとに伝播パラメータを決定する必要がある

反陽子の伝播

- 空間的伝播

1. 銀河磁場による拡散
2. 銀河風による対流(吹き流し)

- エネルギー的伝播

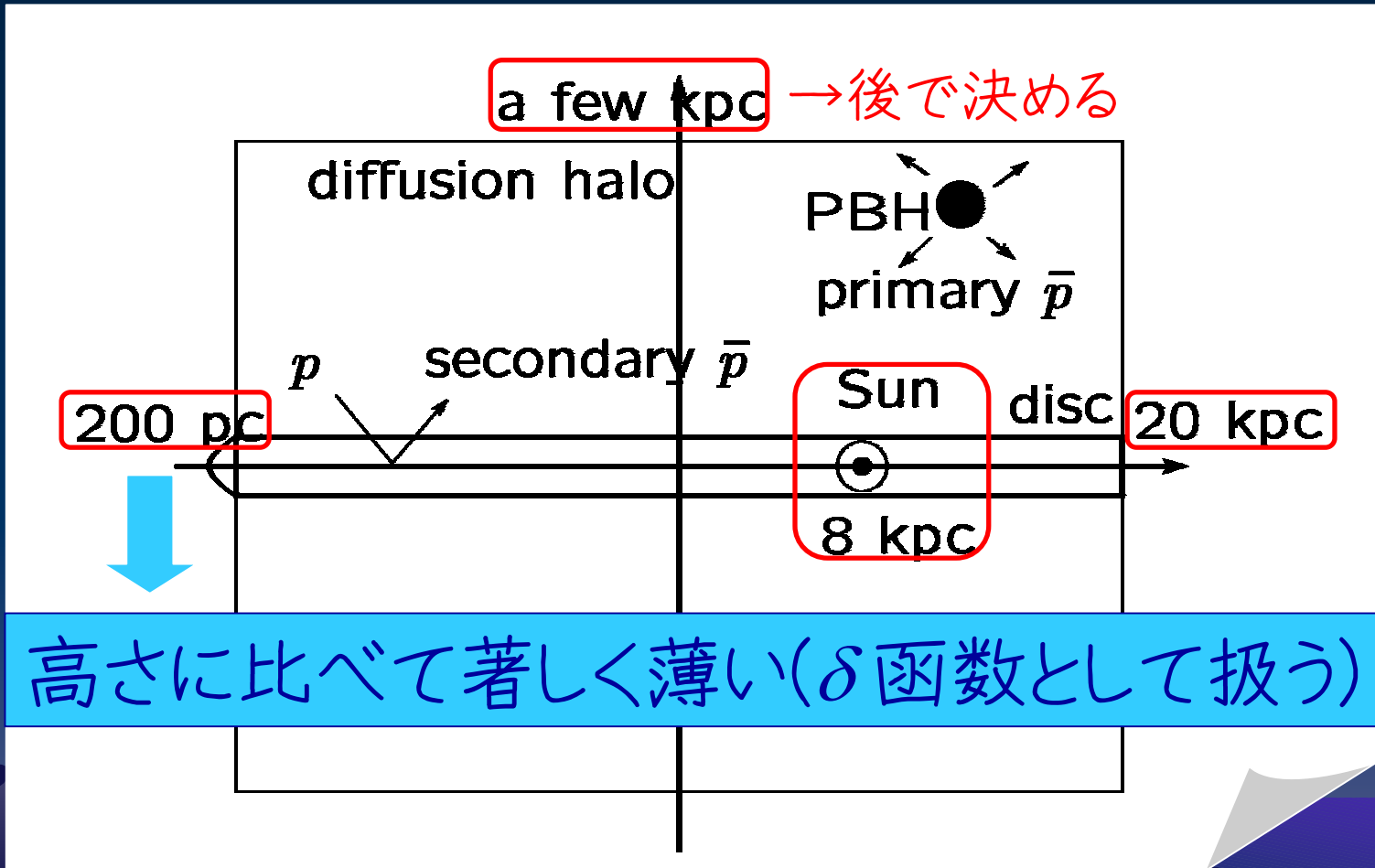
1. GAIN...フェルミ加速
2. LOSS...星間ガス(電子)とクーロン散乱、原子をイオン化、媒質の断熱膨張、核子との散乱
3. SOLAR MODULATION...太陽圏内に入る際、 ϕ =数百MeV 1GeVのエネルギーを失う

$$E^{1\text{AU}} = E^{\text{IS}} - \phi \frac{\phi^{1\text{AU}}(E^{1\text{AU}})}{\phi^{\text{IS}}(E^{\text{IS}})} = \left(\frac{p^{1\text{AU}}}{p^{\text{IS}}} \right)^2$$

反陽子の伝播

銀河を円柱としてモデル化する

Webber, Lee & Gupta (1992)



拡散を解く

拡散とみなして伝播を解く

Ginzburg, Khazan & Ptuskin (1980)
Berezinskii *et al.* (1991)

定常状態の拡散方程式:

$$0 = \frac{\partial N}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot [K(E)\vec{\nabla}N(r, z, E) - \vec{V}_c(r, z)N(r, z, E)]$$

未確定のパラメーター $\left. \begin{matrix} \text{ } \\ \text{ } \\ \text{ } \end{matrix} \right\} \left[\begin{matrix} \text{ } \\ \text{ } \\ \text{ } \end{matrix} \right] - \Gamma(E)N(r, z, E)$

拡散	拡散係数 K_0 [kpc ² /Myr] インデックス δ	$K = K_0(p/1\text{GeV})^\delta$
対流	銀河風速度 V_c [km/s]	$\mathbf{V}_c = V_c \mathbf{z} / z $
フェルミ加速	Alfven速度 V_A [km/s]	$K_{pp} = V_A^2 / K^2$
境界条件	円柱の高さ L [kpc]	

拡散を解く(解法1)

円柱対称性を利用し、ベッセル関数で展開

$$\left[\frac{1}{x} \frac{d}{dx} \left(x \frac{d}{dx} \right) + \left(1 - \frac{\nu^2}{x^2} \right) \right] J_\nu(x) = 0$$

$$\int_0^1 J_\nu(\zeta_{\nu,i} x) J_\nu(\zeta_{\nu,j} x) x dx = \frac{1}{2} [J_{\nu+1}(\zeta_{\nu,i})]^2 \delta_{ij}$$

ζ はゼロ点

半径方向の成分ごとに解いて重ね合わせる

$$0 = \left[K(E) \frac{\partial^2}{\partial z^2} - V_c \frac{\partial}{\partial z} - \left\{ K(E) \frac{\zeta_i^2}{R^2} + 2h\delta(z) \Gamma_{\bar{p}p}(E) \right\} \right] N_i(z, E) \\ + Q_i(z, E) + \left[\frac{\partial}{\partial E} \left\{ -b(E) + \beta^2 K_{pp}(E) \frac{\partial}{\partial E} \right\} \right] N_i(z, E)$$

拡散を解く(解法2)

各Bessel成分の解き方の手順

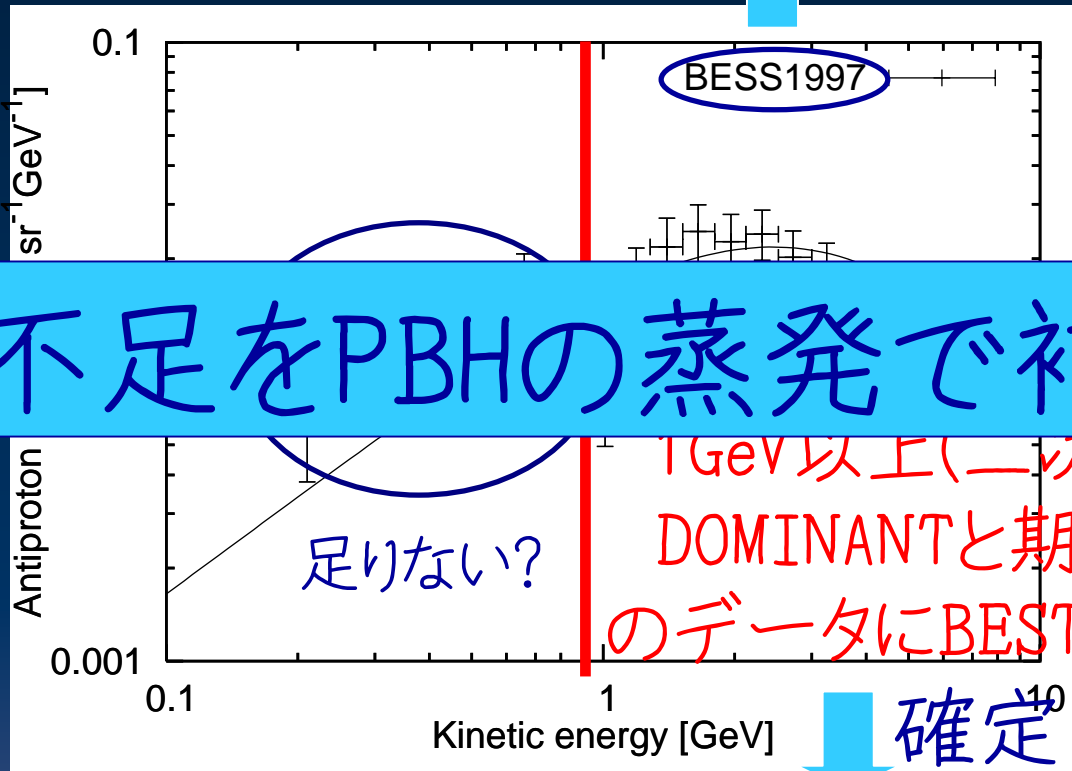
$$0 = \left[K(E) \frac{\partial^2}{\partial z^2} - V_c \frac{\partial}{\partial z} - \left\{ K(E) \frac{\zeta_i^2}{R^2} + 2h\delta(z)\Gamma_{\bar{p}p}(E) \right\} \right] N_i(z, E) \\ + Q_i(z, E) + \left[\frac{\partial}{\partial E} \left\{ -b(E) + \beta^2 K_{pp}(E) \frac{\partial}{\partial E} \right\} \right] N_i(z, E)$$

1. **空間** …先に0次近似として解く
2. **エネルギー** …摂動として解く
(tertiaryも入れてiteration)

二次反陽子フラックス

計算する

SUB-GeVが見たいのでSOLAR MINIMUMを使う



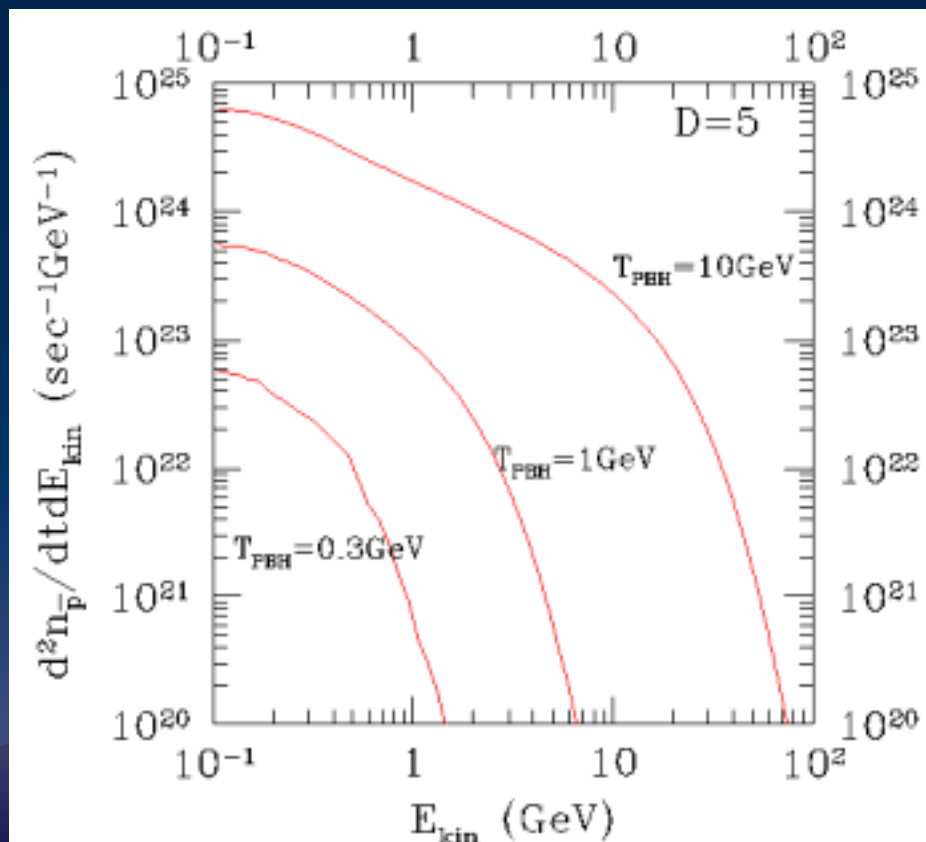
L	K_0	δ	V_A	V_C
4.8 kpc	0.017 kpc ² /Mvr	0.6 (FTX)	89 km/s	4.2 km/s

一次反陽子

一個一個のPBHから放出される反陽子のスペクトルをモンテカルロ計算(郡さん@阪大による)

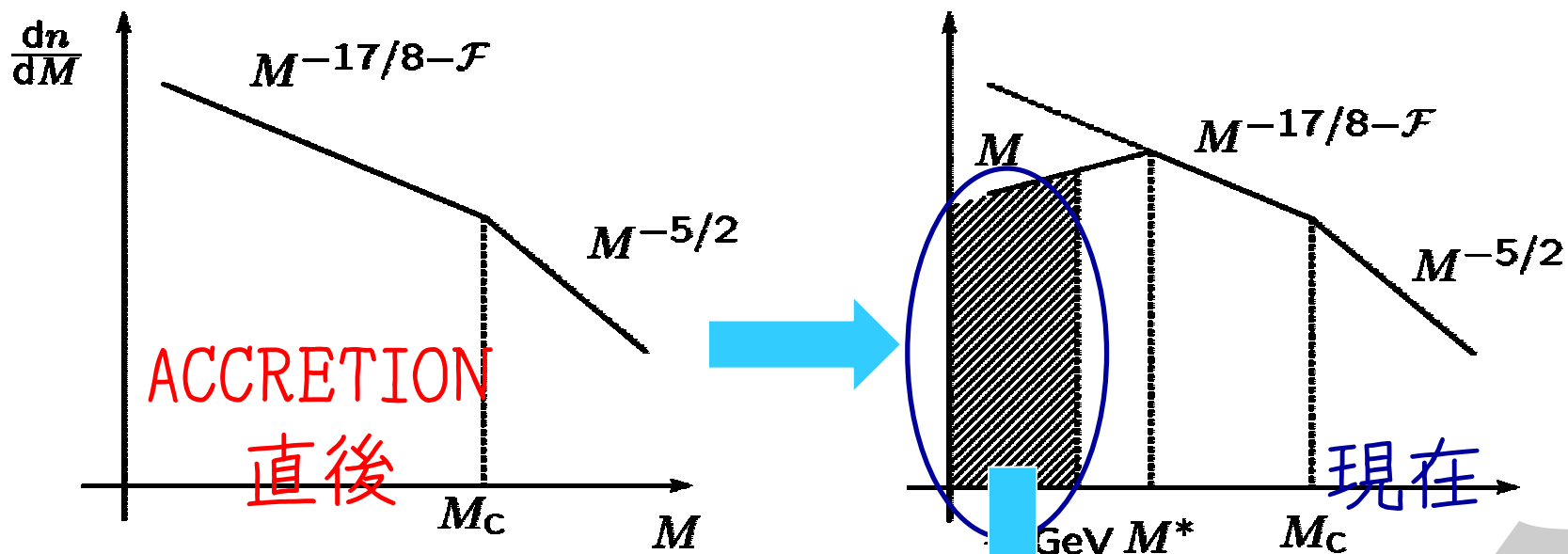
↳ JETSET: クォーク・グルーオンジェットのフラグメント

$$\frac{d^2\tilde{N}}{dE dt}$$



一次反陽子

TOTALの生成量を定めるために、PBHの量を求める



反陽子フラックスはこの領域
(温度1GeV以上)のPBHの個数に比例する

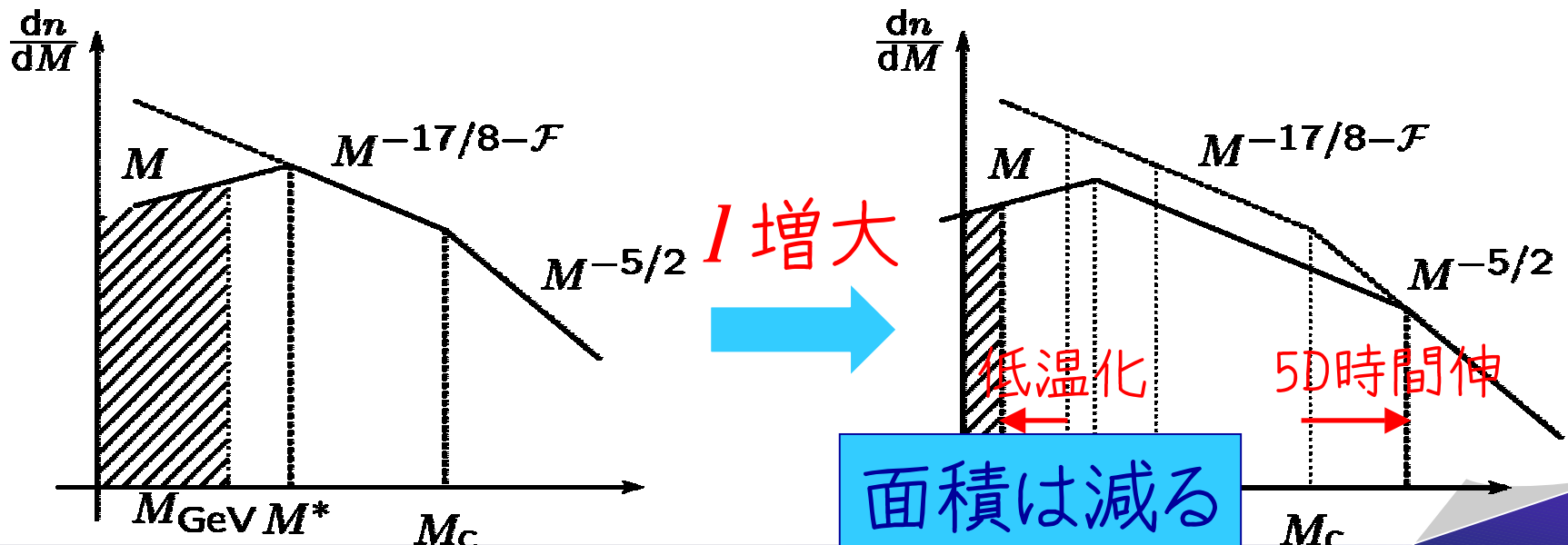
一次反陽子

フラックスを式で書くと

$$\Phi_{\bar{p}} \propto \int^{M_{\text{GeV}}} dM \frac{d^2 \tilde{N}}{dEdt dM} \frac{d\tilde{n}}{dM} = \int^{M_{\text{GeV}}} dM \frac{d^2 \tilde{N}}{dEdt} \frac{M}{M_{\text{GeV}}} \frac{d\tilde{n}}{dM} \Big|_{M_{\text{GeV}}}$$

$$\propto M_{\text{GeV}} \frac{d\tilde{n}}{dM} \Big|_{M_{\text{GeV}}}$$

→ 下の斜線部分の面積



一次反陽子

具体的に I 依存性を求めれば
($G = 10^5$ を銀河の密度 ENHANCEMENT として)

$$\Phi_{\bar{p}} \propto G \alpha_{\text{eff}}^{-13/16 + 3\mathcal{F}/2} [g_{\text{eff}, 5t_0}]^{-\mathcal{F}/2}$$

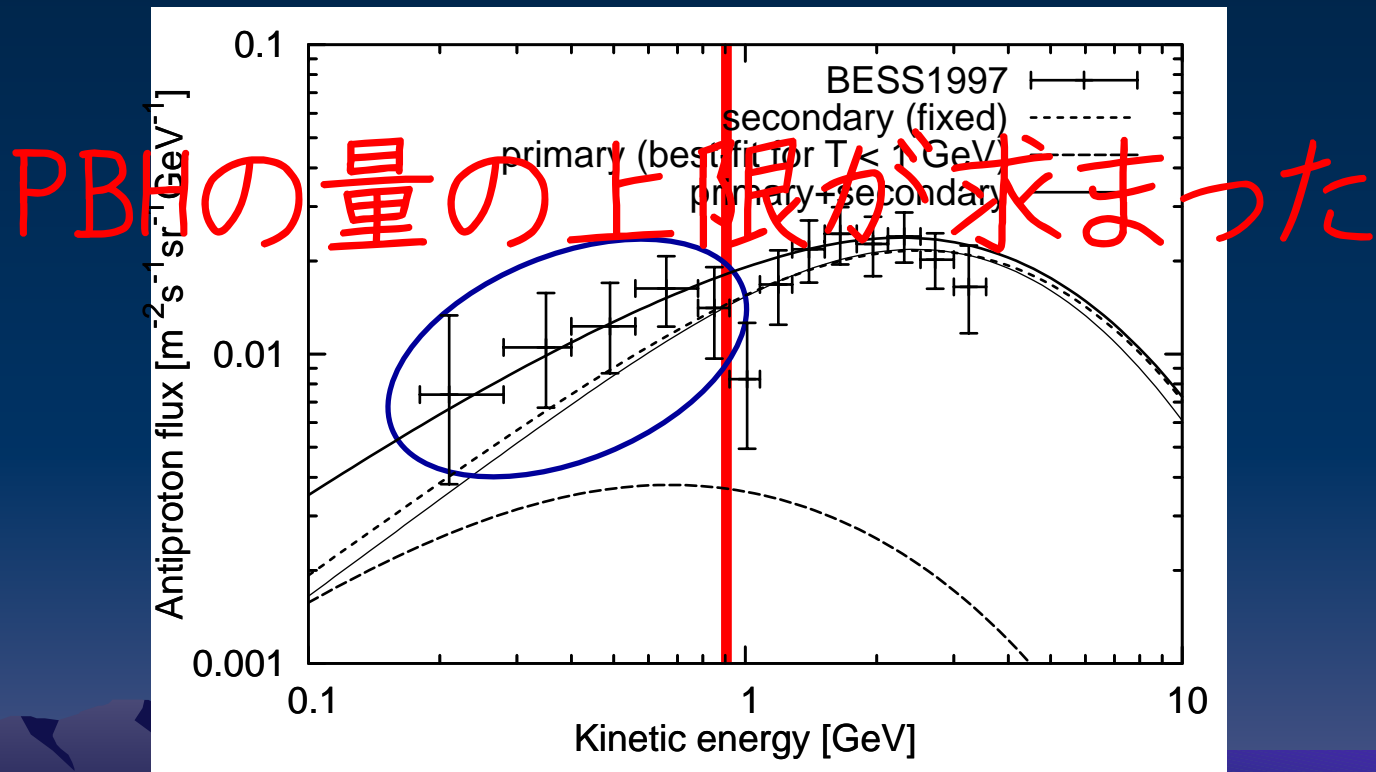


反陽子フラックスは I の減少函数

PBHの量が多すぎても、 I を大きくすることで
フラックスを落とすことができ、制限内に抑えられる

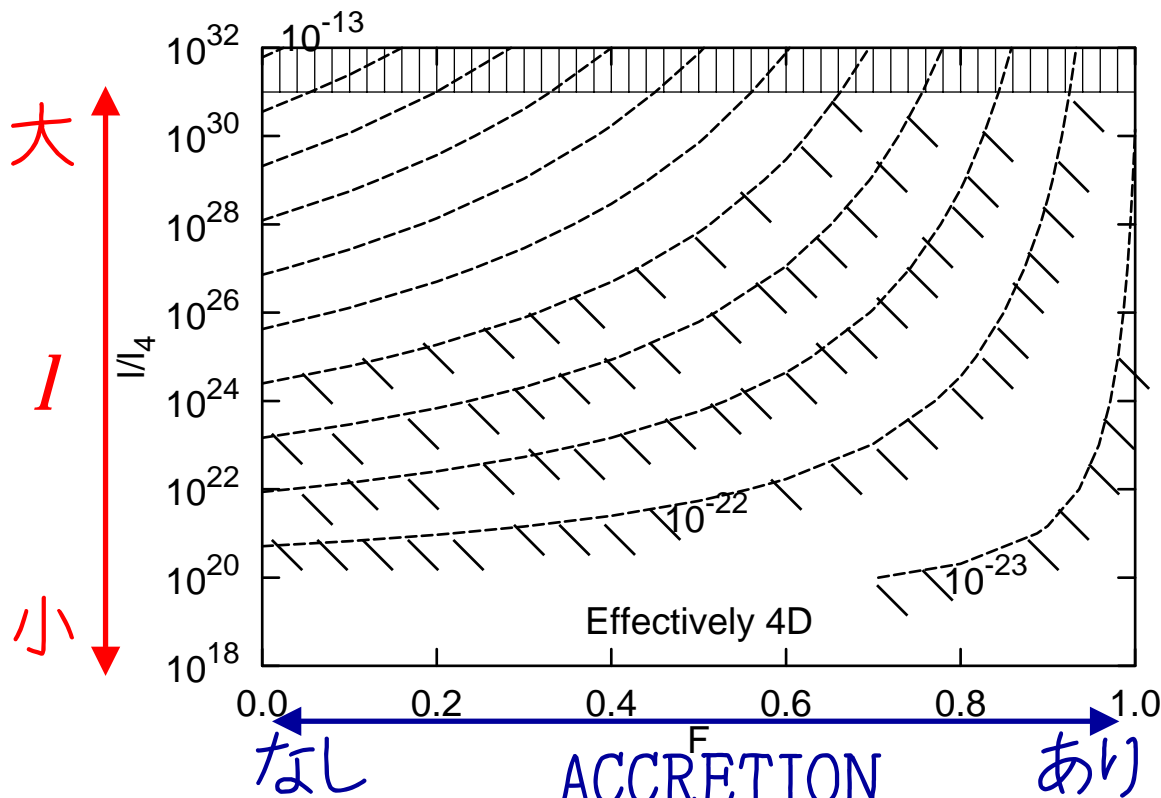
一次反陽子フラックス

二次で求めたパラメターを使って伝播させ、
今度は1GeV以下でフィットさせる



一次反陽子

いろいろな I や F でPBHの上限を決めることで、 $G\alpha_j$ の値に応じて以下のように I の下限が決まる



Conclusions

わかったこと

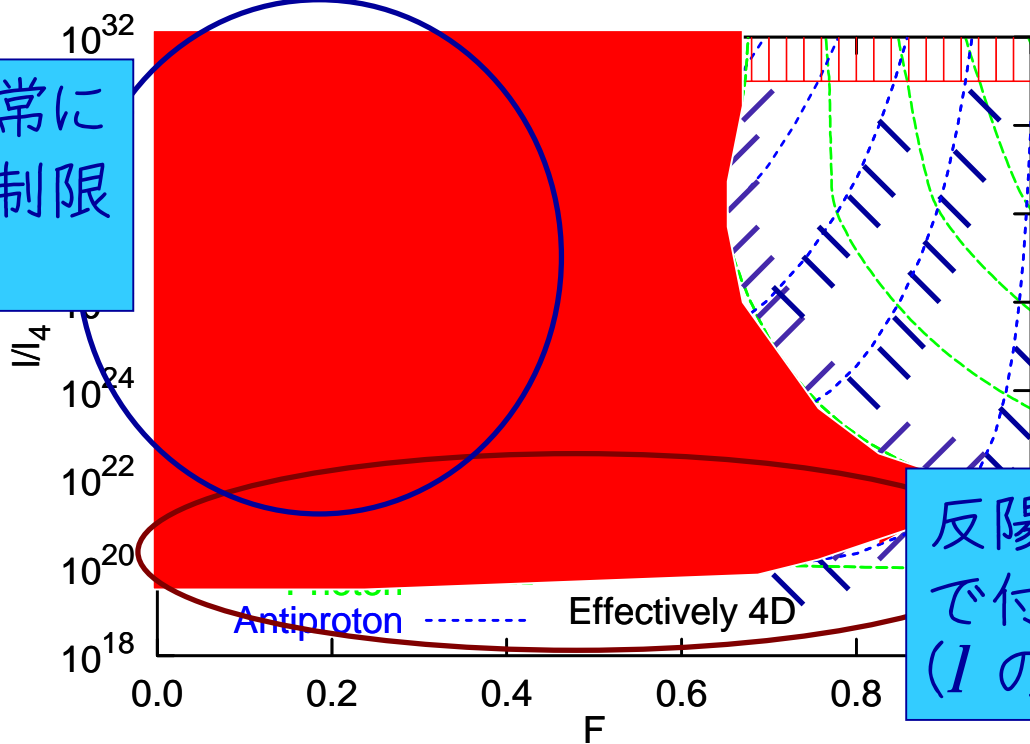


二つの結果の比較

光子と反陽子の結果を合わせてみる

反陽子では、銀河内外の密度比が未定だったが、 $G = 10^5$ を用いて α_i に直す

$\alpha_i > 10^{-27}$ では常に
光子が強い制限
(I の下限)



反陽子が光子
で付かない制限
(I の下限)を付けた

結論

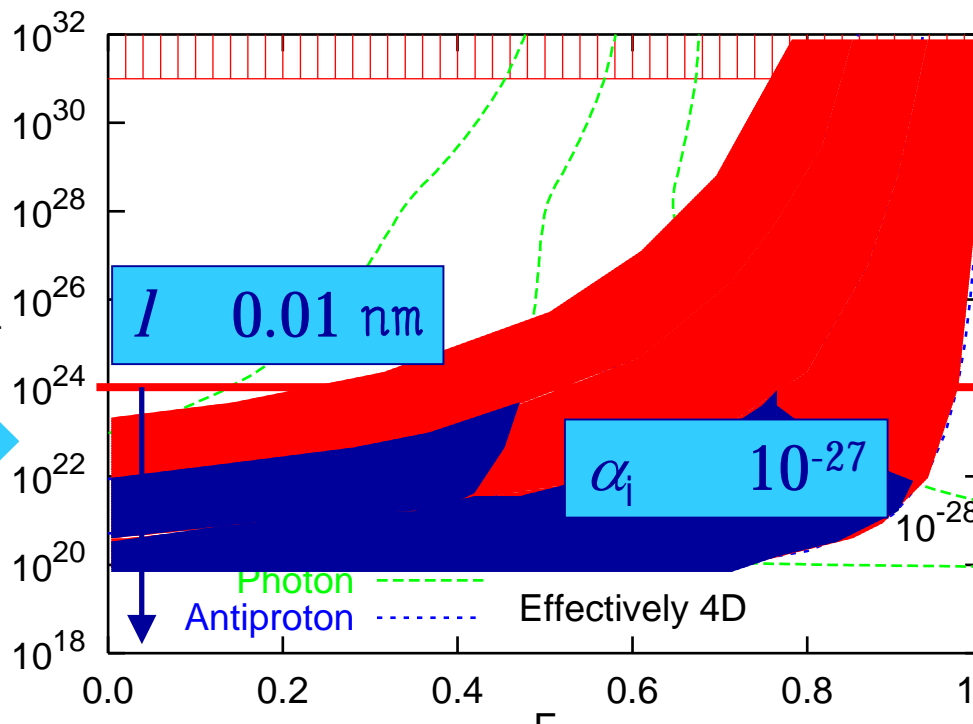
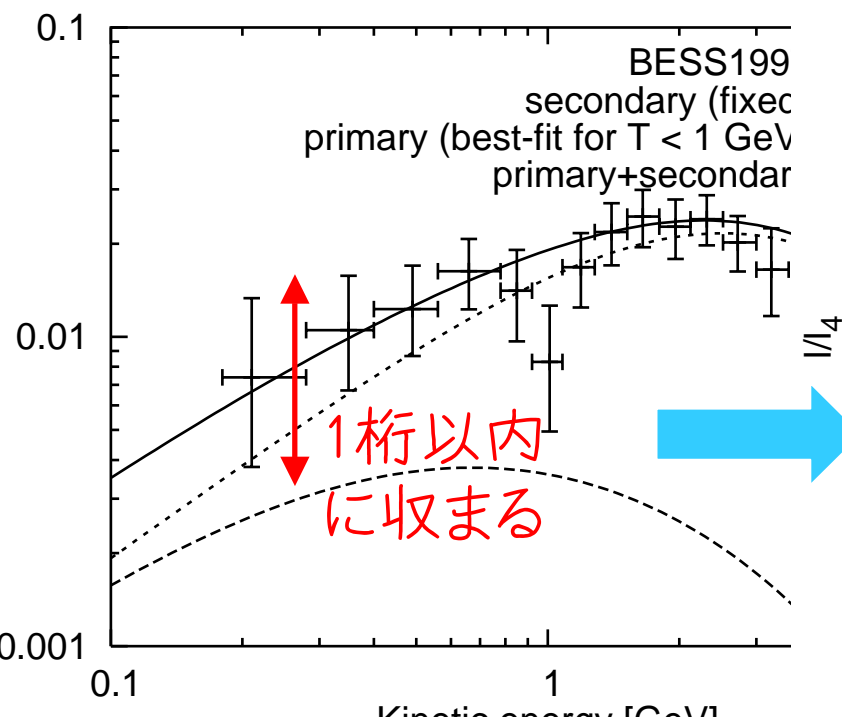
PBHは膜宇宙のよい探針である

蒸発物から、以下の結論を得た:

- ・反陽子のフラックス…見えているかかもしれない
→膜の拡がりに対して**下限**を付ける
- ・背景 χ, γ のフラックス…見えていないが、
 1. $F < 50\%$ なら**下限**
 2. $F > 50\%$ なら**上限**を付ける →今後、 F (降着の効率)を決めたい
- ・両者の制限は、 $\alpha_i \sim 10^{-27}$ 付近で競合している
今後膜宇宙のパラメータを決定するためには、
PBHの量 α_i をきちんと押さえねばならない

今後の展望

- 反陽子では、PBH由来成分が見えている可能性
しかし、観測精度が上がっても、反陽子スペクトルの形から膜宇宙の証拠を見つけるのは困難... だが実際にすべてPBHだとすると...?



今後の展望

・一方、光子は、ピーク的位置が見えれば
ただちに I を決められた

反陽子は α_i 10^{-27} を示唆？



可能性もある？

今後は、より多面的な研究が必要 たとえば：

BOTTOM-UP

・他の反陽子源を考える

反原子核が見つければ？

・背景光子の成分を考える

まだ皮算用？

TOP-DOWN

・小スケールで大きい α_i を作る膜(INFLATION)モデル？

おわり

