

2017.12.26 第30回理論懇シンポジウム「星の物理の新地平」

原始ブラックホールの観測的制限

仙洞田 雄一 (弘前大学)

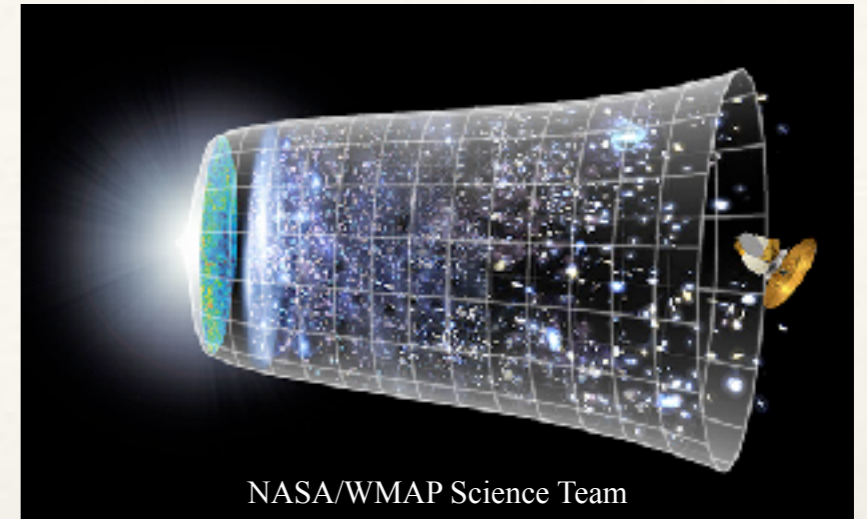
構成

1. 序
2. 制限
 - A. $M > 10^{17}$ g: 蒸発なし
 - B. $M < 10^{17}$ g: 蒸発あり
3. まとめ

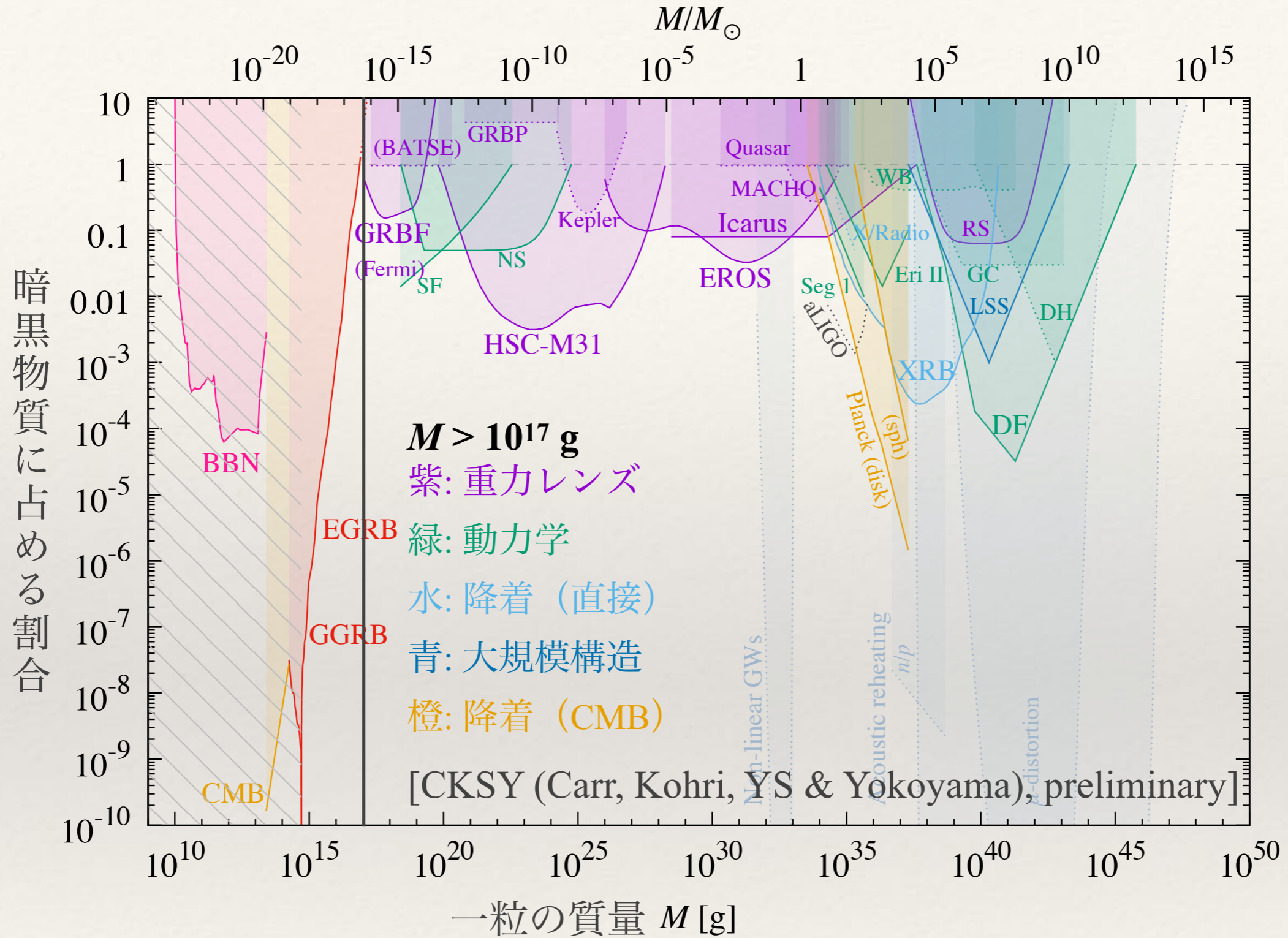
序

原始ブラックホール (PBH)

- ❖ 等密度時以前から存在するブラックホール [Zel'dovich & Novikov (1967); Hawking (1971)]
 - ▶ 恒星起源のものとは対照的、相補的
- ❖ 悪くない暗黒物質候補 ($M > 10^{15}$ g)
 - ▶ 重さが自由 (形成については、この後の後の原田さんの講演)
 - ▶ 普通の物質から作れる \leftrightarrow 未知の物理を必要としない
 - ▶ aLIGO重力波源? [Nakamura *et al.* (1997); Ioka *et al.* (1998); Sasaki *et al.* (2016); Bird *et al.* (2016); Clesse & García-Bellido (2017)]
- ❖ 質量ごとに多種多様な検出方法 (現状は観測的制限) が考えられている



PBHへの観測的制限の概観 (2017年11月版)



- ▶ 仮定：単色の質量関数、クラスターなし

$M > 10^{17}$ g のPBHへの制限

留意点

- 蒸発しない ($M < 10^{17}$ g との対比)
- 制限のすべてが「ブラックホール」であることに依拠するわけではない
- 単色の質量関数、DM総量のそれに比例する空間分布を仮定 (クラスターなし、連星もなし)

重力レンズ

❖ 多様なソースのレンズ現象 (の非検出)

❖ マイクロレンズが最も広範

▶ $10^{-7} < M/M_{\odot} < 10$: MACHO+EROS
[Tisserand *et al.* (2007)]

▶ $10^{-9} < M/M_{\odot} < 10^{-7}$: *Kepler* [Griest *et al.* (2014)]

▶ $10^{-13} < M/M_{\odot} < 10^{-5}$: M31 (Subaru HSC) [Niikura *et al.* (2017)] ※波動効果?

▶ $10^{-5} < M/M_{\odot} < 10^4$: Icarus: $z = 1.49$ の銀河内の星で $z = 0.54$ の銀河団内の
レンズ天体を探査 [Oguri *et al.* (2017)]

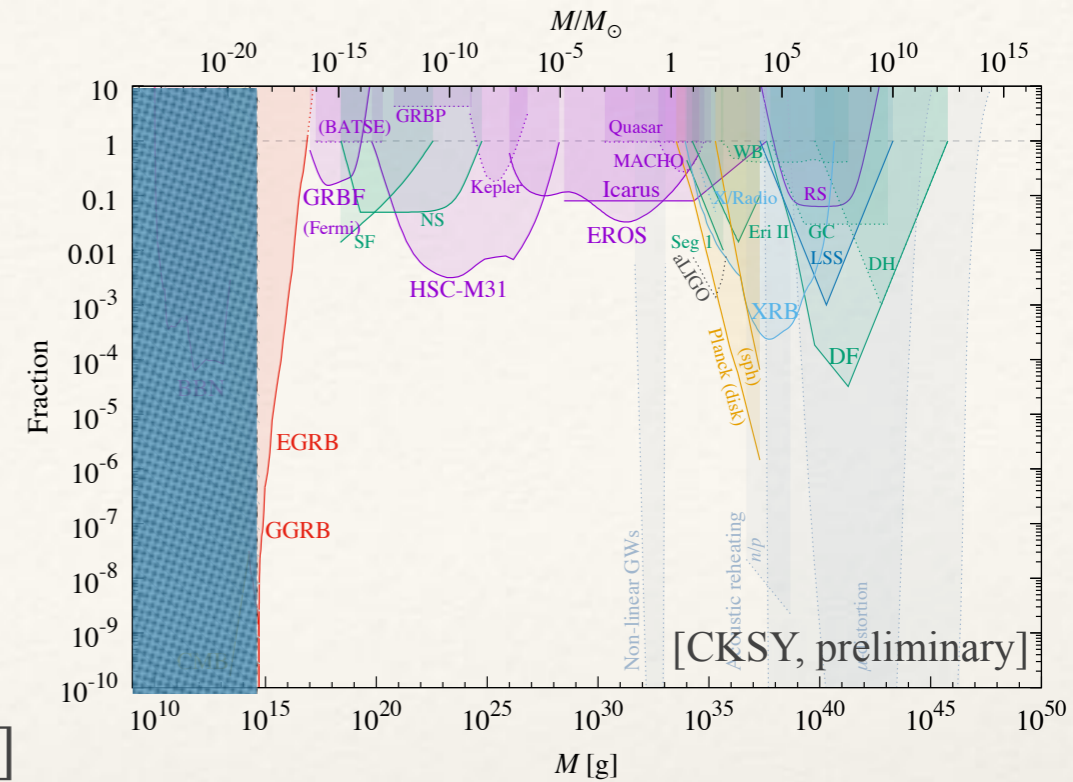
▶ $10^{-3} (3?) < M/M_{\odot} < ?$: Ia型超新星 (未描入)

[Zumalacárregui & Seljak (2017); García-Bellido *et al.* (2017)]

❖ 他のレンズ

▶ $10^5 < M/M_{\odot} < 10^9$: クエーサー像のレンズ [Wilkinson *et al.* (2001)]

▶ $10^{-16} < M/M_{\odot} < 10^{-14}$: GRBのフェムトレンズ [Barnacka *et al.* (2012)]



動力学

❖ 質量分離

- ▶ Segue 1 [Koushiappas & Loeb (2017)] と Eridanus II 内の星団など [Brandt (2016)]

$$10 < M/M_{\odot} < 10^4$$

- ▶ 銀河中心への集積 [Carr & Sakellariadou (1999)]

$$10^4 < M/M_{\odot} < 10^{12}$$

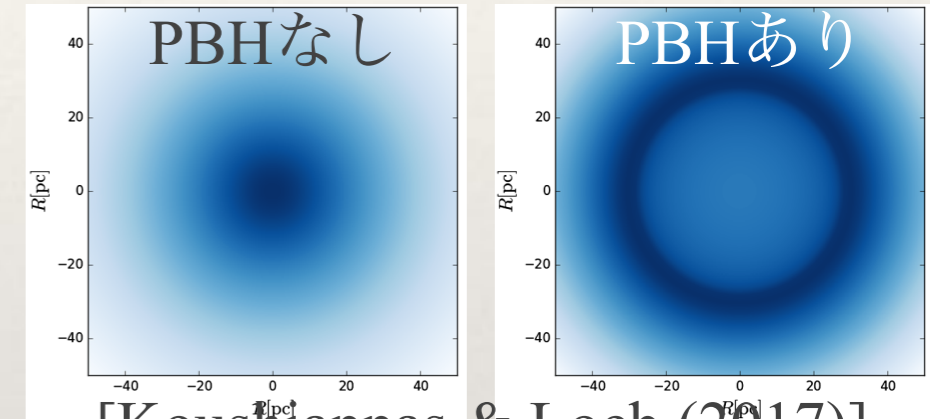
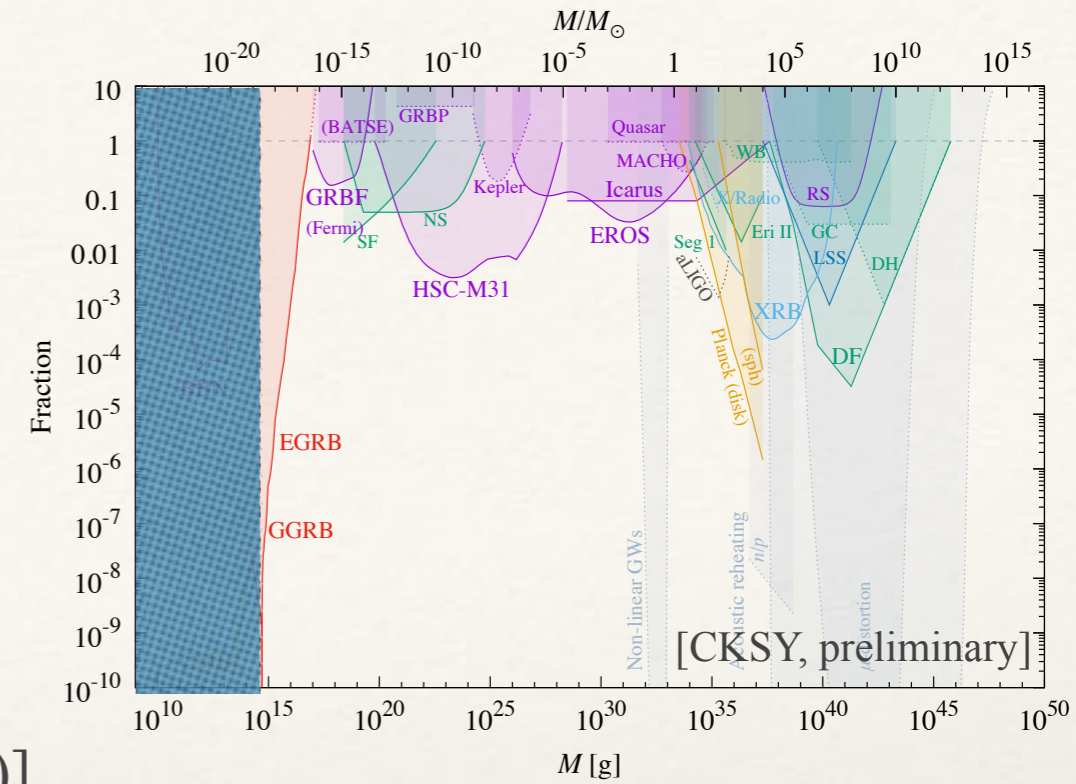
❖ 重力束縛系の破壊、擾乱（銀河系内）

$$10^2 < M/M_{\odot} < 10^{12}$$

- ▶ 大長半径の連星 [Yoo *et al.* (2004); Monroy-Rodríguez & Allen (2014)];
- 球状星団 [Carr & Sakellariadou (1999)];
- 銀河円盤加熱 [Lacey & Ostriker (1985)]

❖ コンパクト天体の「捕食」 [Capela *et al.* (2013a, 2013b); Pani & Loeb (2014)]

$$10^{-15} < M/M_{\odot} < 10^{-9}$$



[Koushiappas & Loeb (2017)]

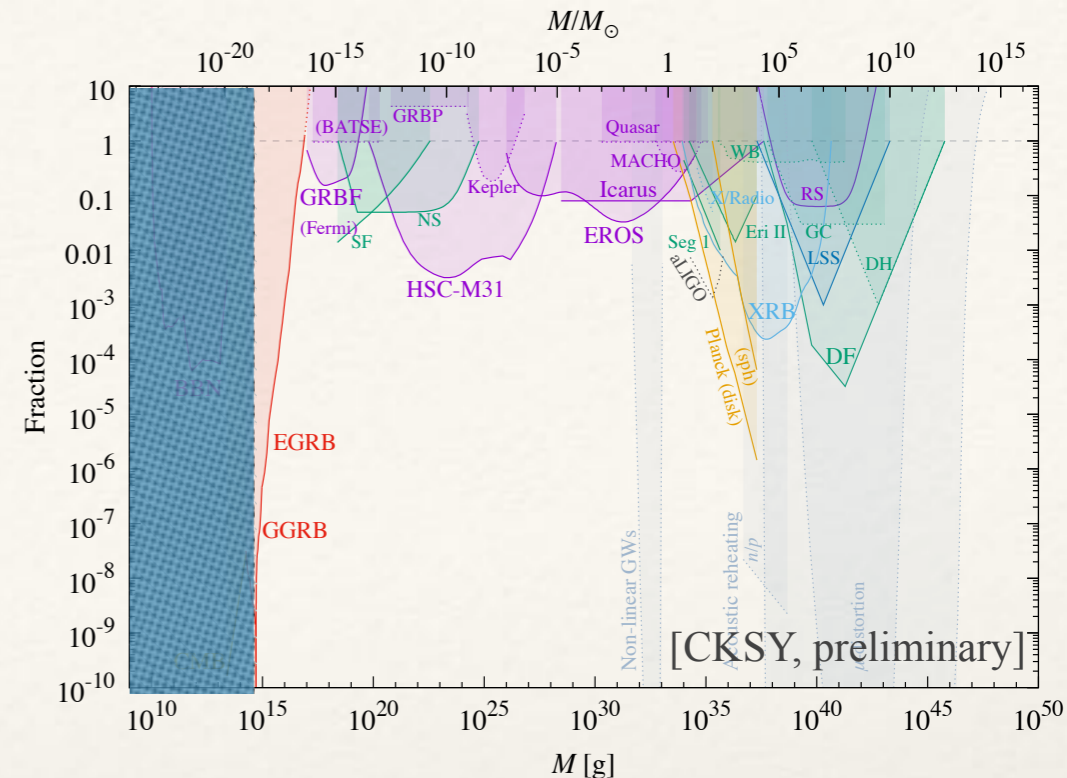
降着

❖ 銀河系内のX線/電波源

[Inoue & Kusenko (2017); Gaggero *et al.* (2017)]

$$10 < M/M_{\odot} < 10^7$$

- ▶ 星間物質の降着 → 放射

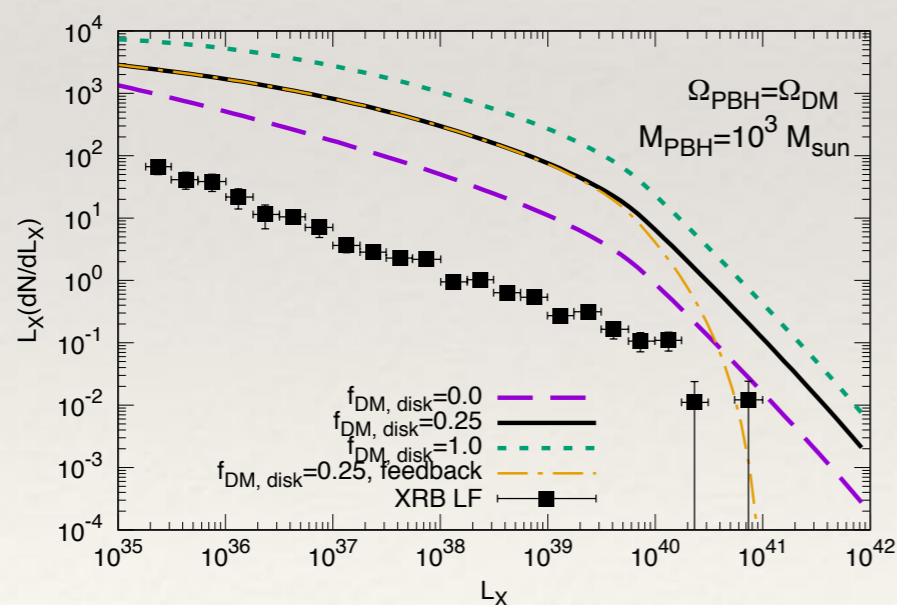


❖ CMB非等方性

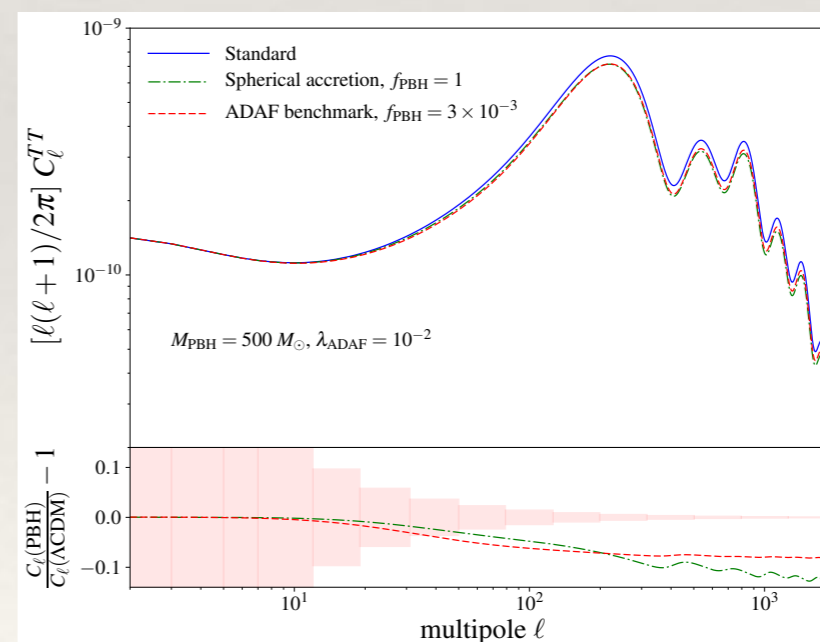
[Riccoti *et al.* (2008); Ali-Haimoud & Kamionkowski (2017); Poulin *et al.* (2017)]

$$1 < M/M_{\odot} < 10^4$$

- ▶ $z < 1000$ での加熱 → 高- ℓ でのTT減衰、低- ℓ でのEE増長



[Inoue & Kusenko (2017)]



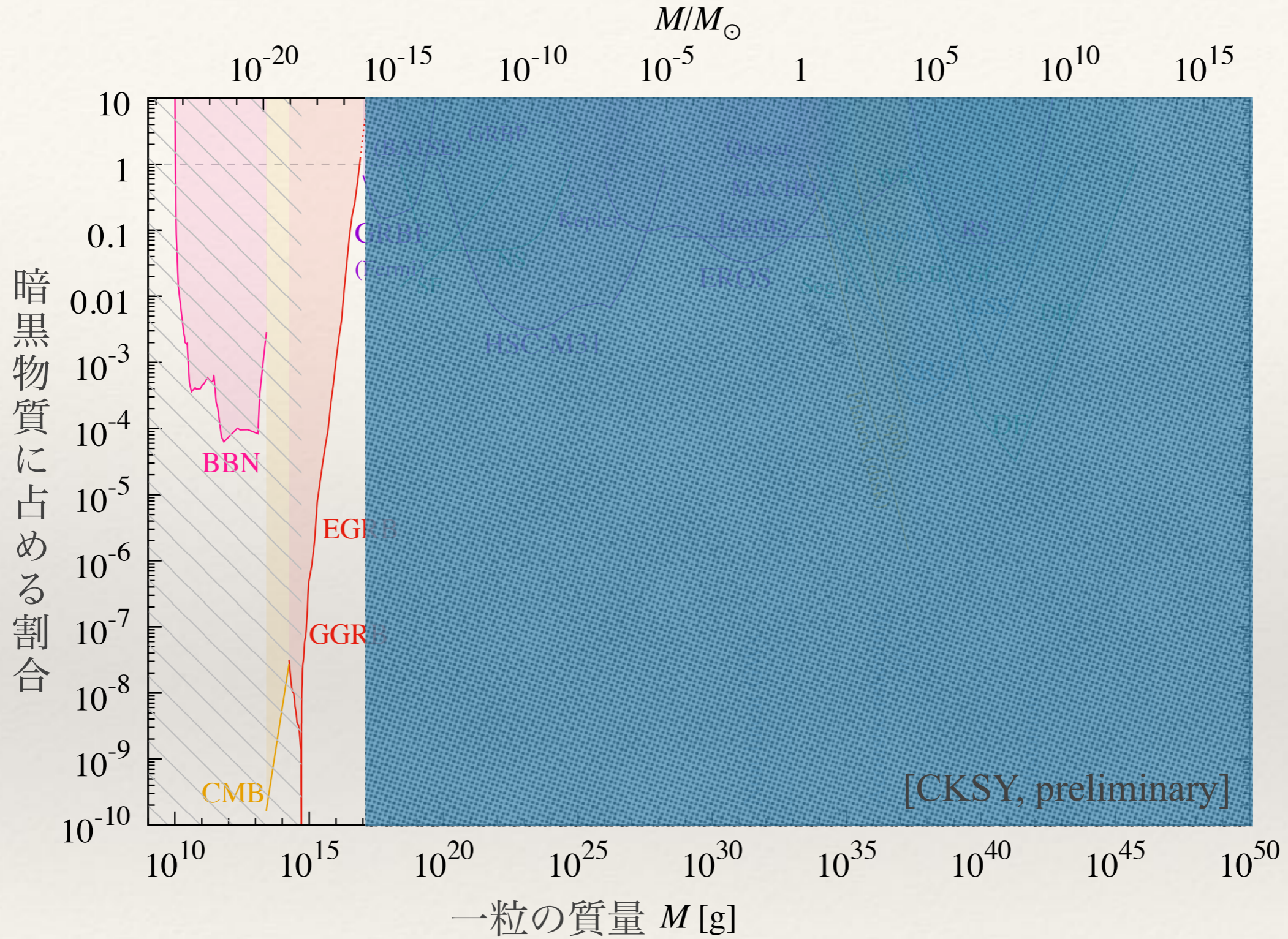
[Poulin *et al.* (2017)]

$M < 10^{17}$ g のPBHへの制限

留意点

- 蒸発する
- $M < 10^{15}$ g は現在もう存在しないのでDMになれない
- 単色の質量関数、DM総量のそれに比例する空間分布（クラスターなし、連星もなし）を仮定

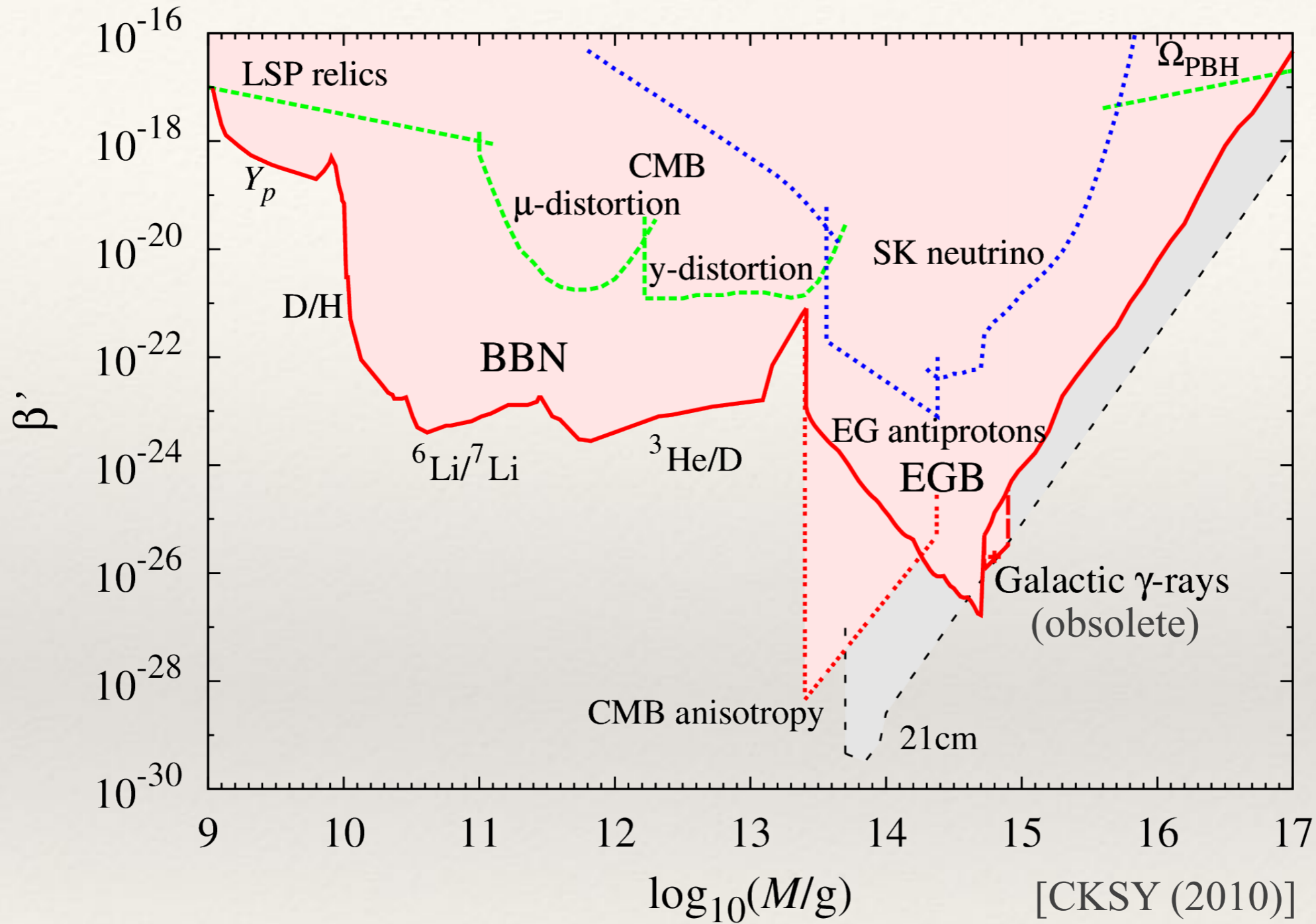
PBHへの観測的制限



- ▶ 仮定：単色質量関数、クラスターなし

$10^9 \text{ g} < M < 10^{17} \text{ g}$ の様子

$$f = \frac{\Omega_{\text{PBH}}}{\Omega_{\text{CDM}}} = 4.11 \times 10^8 \beta'(M) \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1/2}$$



▶ 粒子放射が特異な寄与をしている

PBHからの粒子放射と蒸発

1次放射

❖ 重力崩壊する背景時空での粒子生成 [Hawking (1974, 1975)]

▶ 概ね黒体スペクトル [Page (1976)]

$$\frac{d\dot{N}_s}{dE} = \frac{1}{2\pi^2} \frac{E^2 \sigma_s(M, E)}{e^{E/T_{\text{BH}}} - (-1)^{2s}} \quad (8\pi G = 1)$$

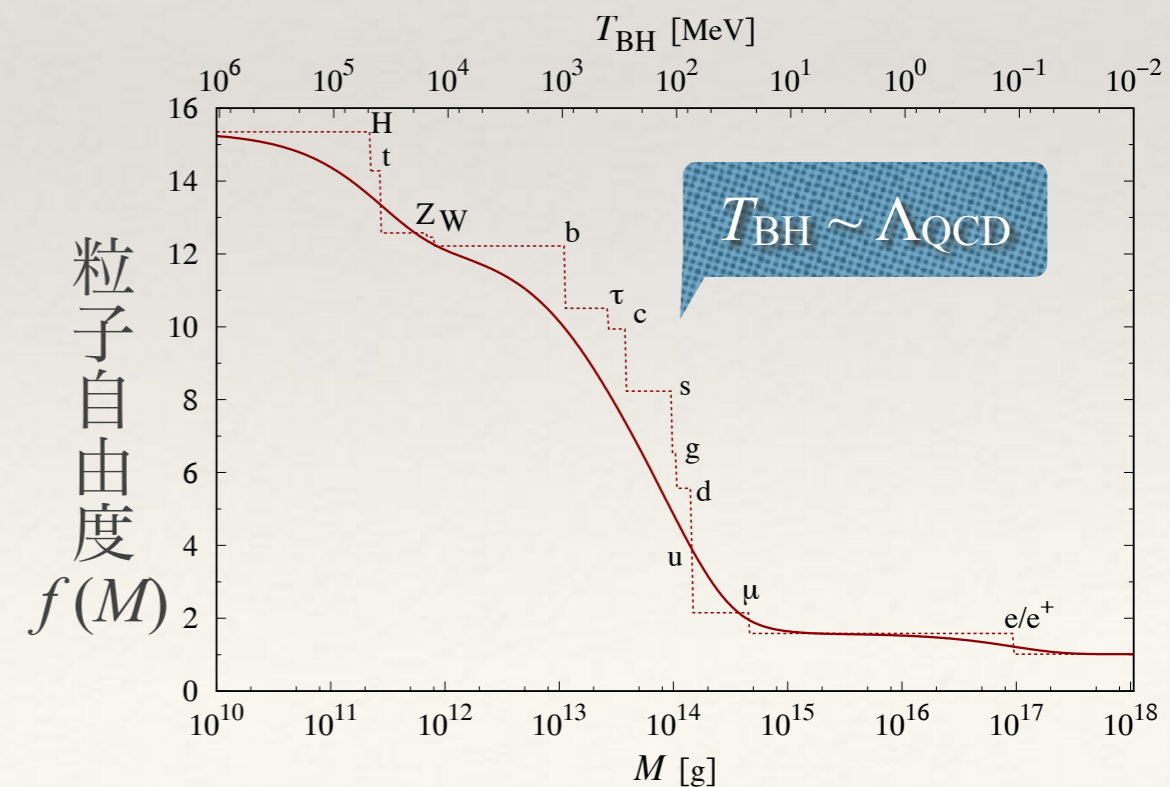
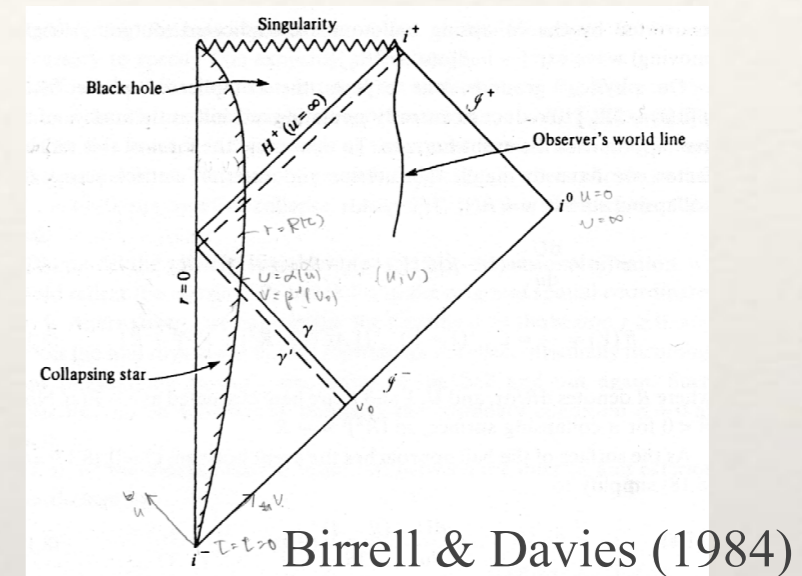
▶ 温度

$$T_{\text{BH}} = \frac{1}{M} \approx 106 \left(\frac{M}{10^{14} \text{ g}} \right)^{-1} \text{ MeV}$$

❖ 放射光度

\propto (表面積) \times (温度)⁴ \times (粒子自由度)

▶ 温度以下の質量を持つ素粒子が放射される [MacGibbon (1991)]



PBH質量の時間進化

❖ 粒子生成の反作用として質量 M を減らす

▶ (質量損失率) = -(光度)

$$\frac{dM_{14}}{dt} = -5.34 \times 10^{-17} f(M) M_{14}^{-2} \text{sec}^{-1}$$

$$M_{14} \equiv \frac{M}{10^{14} \text{g}}$$

▶ 質量減 → 温度上昇 → 放射粒子種増加

❖ 質量の時間進化 $M(t)$

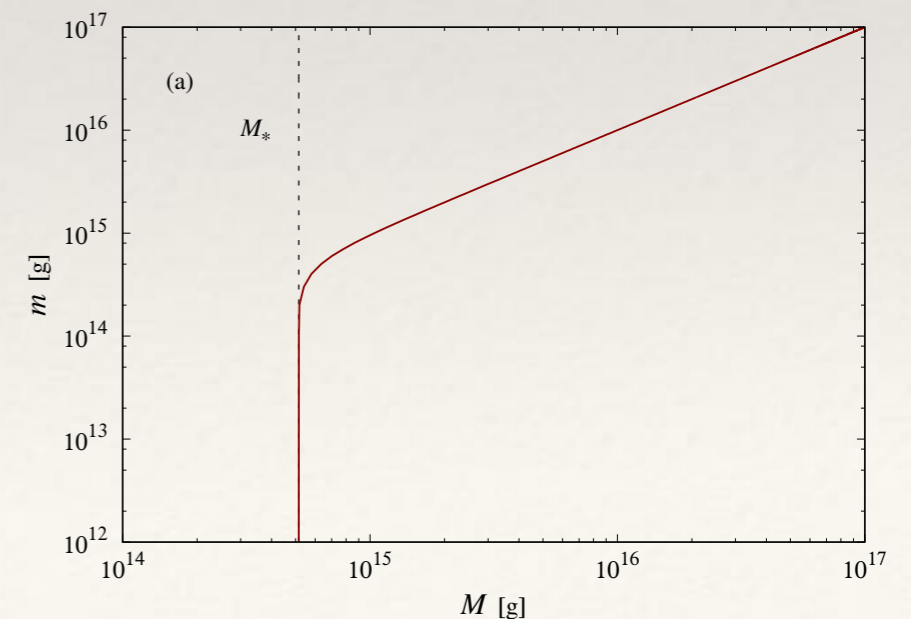
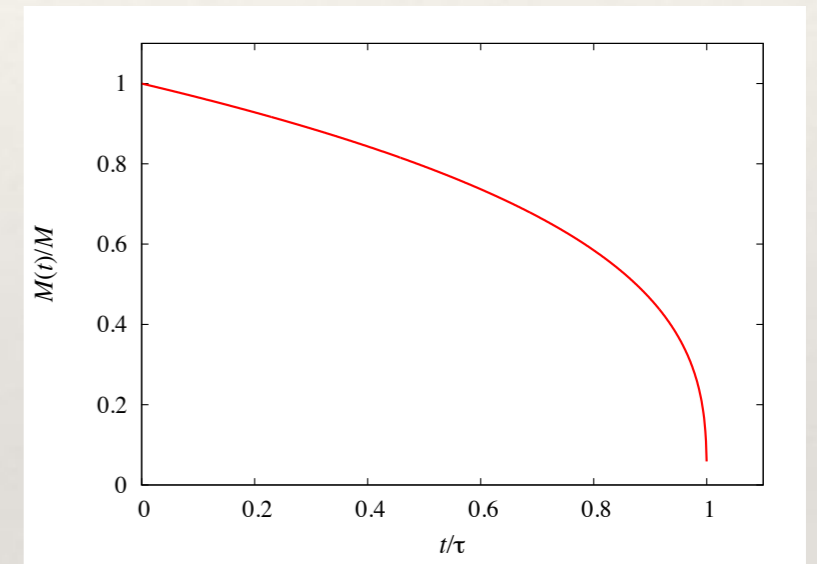
▶ $f(M) = \text{const.}$ と近似し、 $\frac{M(t)}{M} \approx \sqrt[3]{\frac{\tau - t}{\tau}}$

▶ $\tau =$ 宇宙年齢 とおいて

$$\tau(M) \approx 13.8 \text{ Gyr} \left(\frac{M}{M_*} \right)^3 \quad M_* \approx 5.15 \times 10^{14} \text{ g}$$

▶ 初期質量 M のPBHが現在持つ質量は

$$m \approx \begin{cases} \sqrt[3]{M^3 - M_*^3} & (M \geq M_*) \\ 0 & (M < M_*) \end{cases}$$

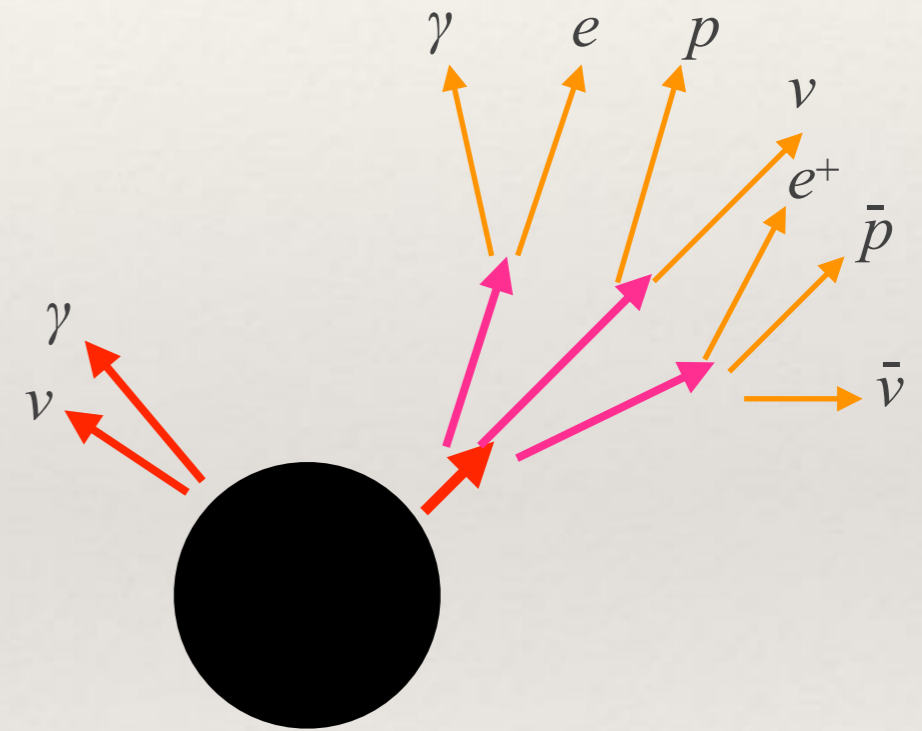


2次放射

- ❖ 宇宙線として観測することを念頭におくと、最終的にできる安定粒子のスペクトルを計算しないといけない
- ❖ 1次粒子が起こすQCDジェット／電磁シャワーをモンテカルロ計算してスペクトルを知る必要がある（例: PYTHIA [Sjöstrand *et al.* (2006, 2015)]）

- ▶ $\gamma, e^\pm, \nu_i, \bar{\nu}_i$ （素粒子）：1次+2次
- ▶ p, \bar{p} （複合粒子）：2次のみ

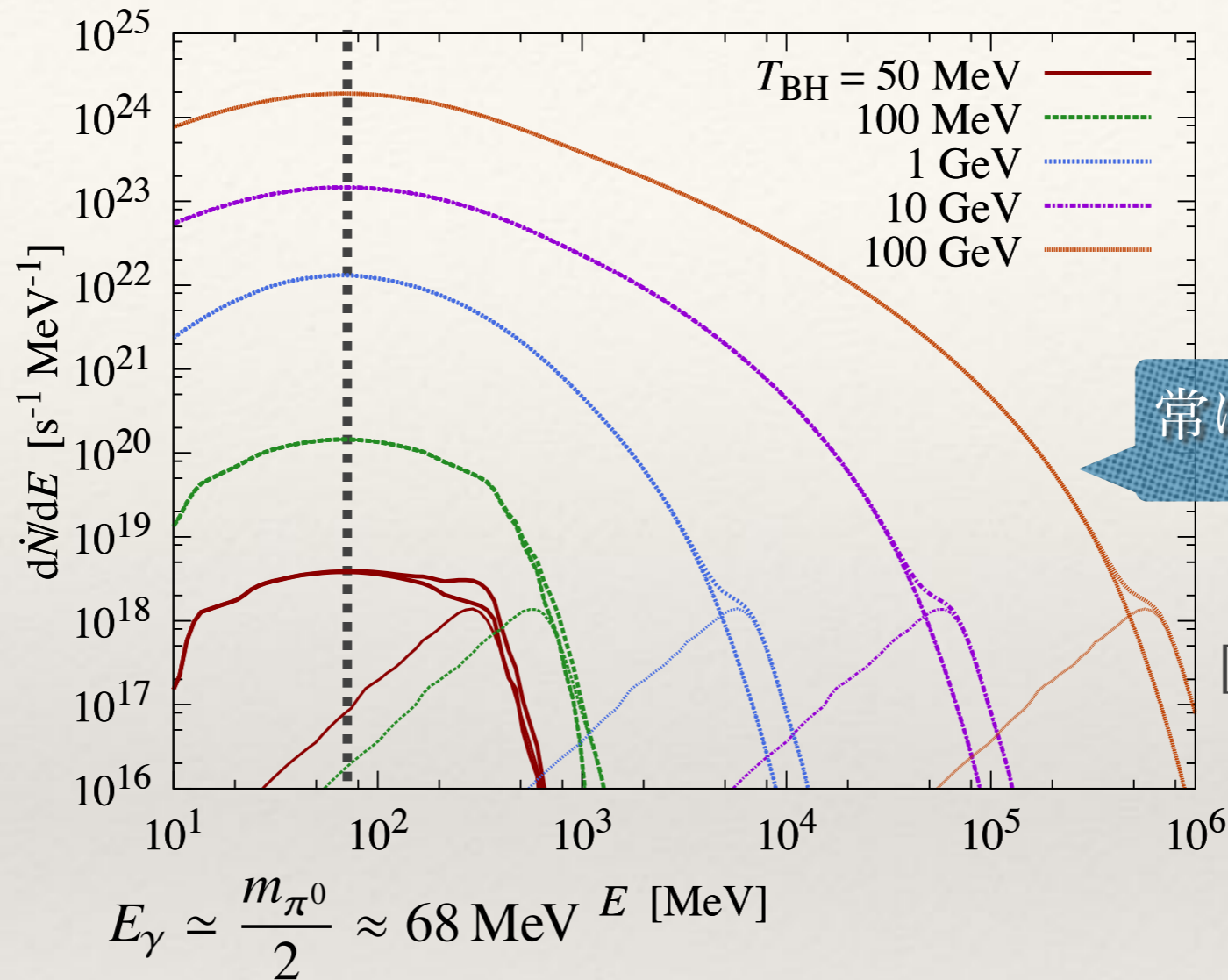
$$\frac{d\dot{N}}{dE}(E, M) = \underbrace{\frac{d\dot{N}^{\text{pri}}}{dE}(E, M)}_{\text{Blackbody}} + \underbrace{\frac{d\dot{N}^{\text{sec}}}{dE}(E, M)}_{\text{QCD jets/EM showers}}$$



- ▶ $\gamma, e^\pm, \nu_i, \bar{\nu}_i$ は π の崩壊経路が支配的 [MacGibbon & Webber (1990)]

光子

❖ $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 崩壊が支配的寄与 [MacGibbon & Webber (1990)]



常に1次より卓越

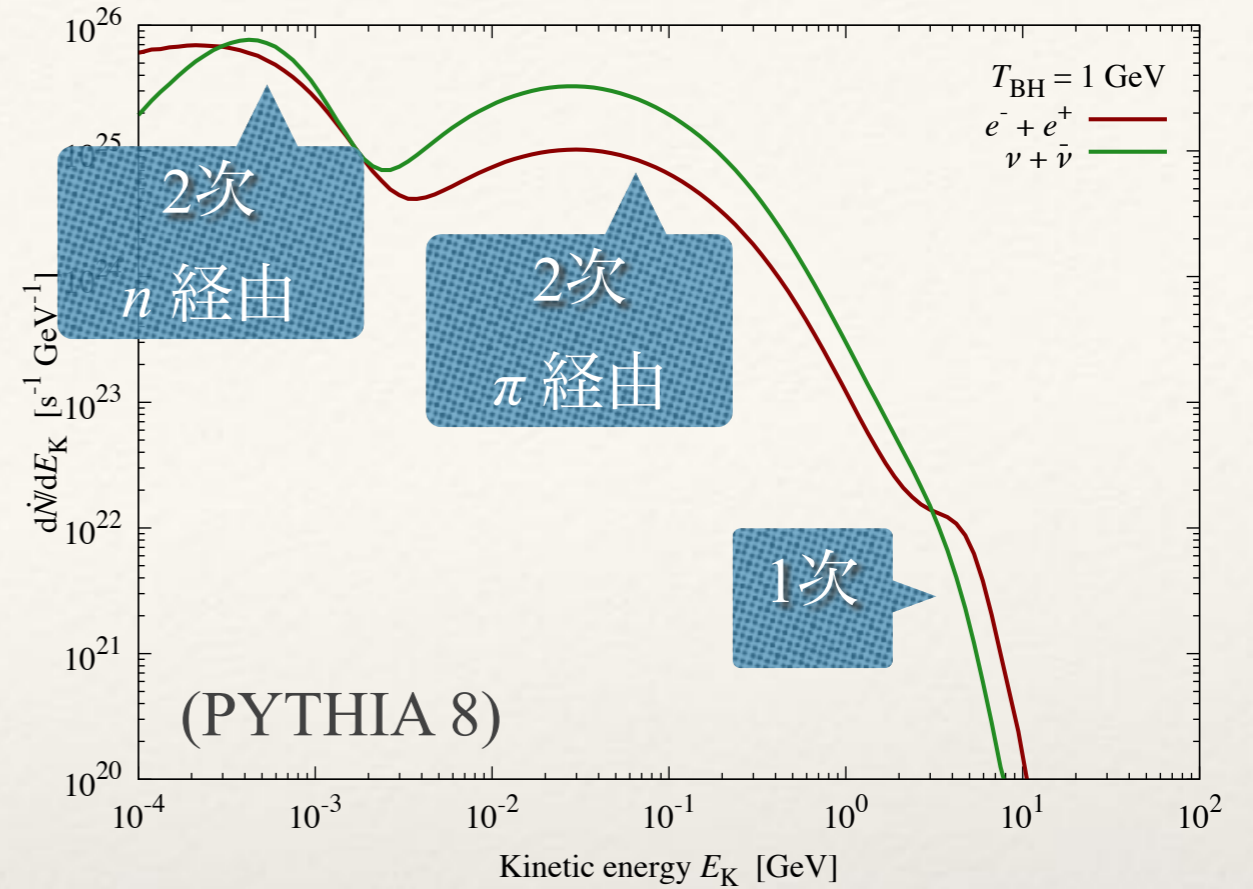
[CKSY (2016)]
(PYTHIA 6)

$$\frac{d\dot{N}^S}{dE} = E^{-1} \int_E^\infty \frac{(Q/T_{\text{BH}})^2 (1 - E/Q)^{2s-1} \Theta(E - k m_\pi)}{e^{Q/T_{\text{BH}}} \pm 1} dQ \propto \begin{cases} G(E, M) & (E < \Lambda_{\text{QCD}}) \\ E^{-1} M^{-1} & (M^{-1} > E > \Lambda_{\text{QCD}}) \\ E^2 M^2 e^{-EM} & (E > M^{-1}) \end{cases}$$

カットオフ $E \sim M^{-1}$

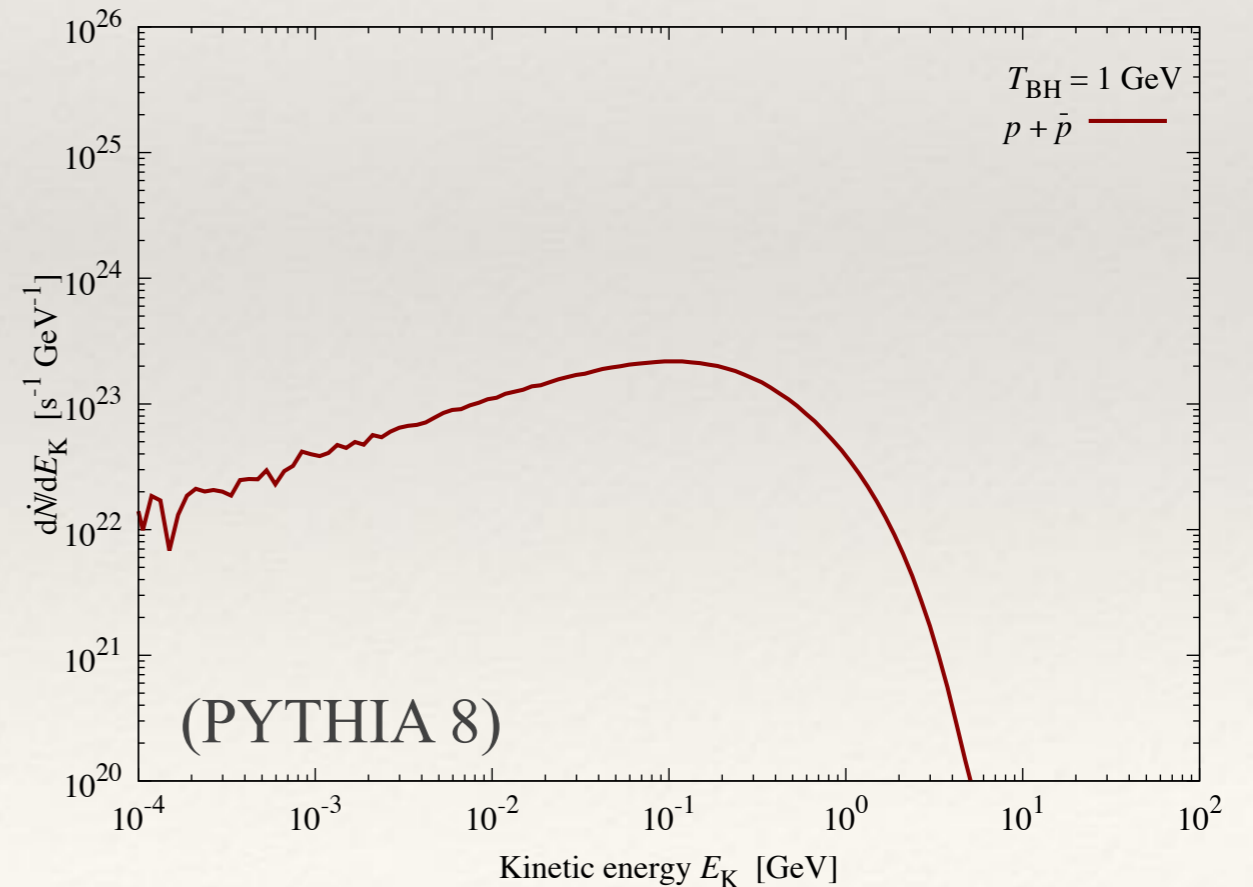
レプトン ($e^\pm, \nu_i, \bar{\nu}_i$)

- ❖ 数10MeVでは
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu + \nu_\mu$ などが支配的
- ❖ MeV以下では n, \bar{n} の β 崩壊が支配的
 [MacGibbon & Webber (1990)]



ハドロン (p, \bar{p})

- ❖ π を介さないのので、他とだいぶ違うスペクトルになる



蒸発からの制限

宇宙線観測

❖ X・ガンマ線

[Page & Hawking (1976); Lehoucq *et al.* (2009); CKSY (2010, 2016)]

$$2 \times 10^{14} \text{ g} < M < 10^{17} \text{ g}$$

$$M \sim 5 \times 10^{14} \text{ g}$$

❖ 反陽子

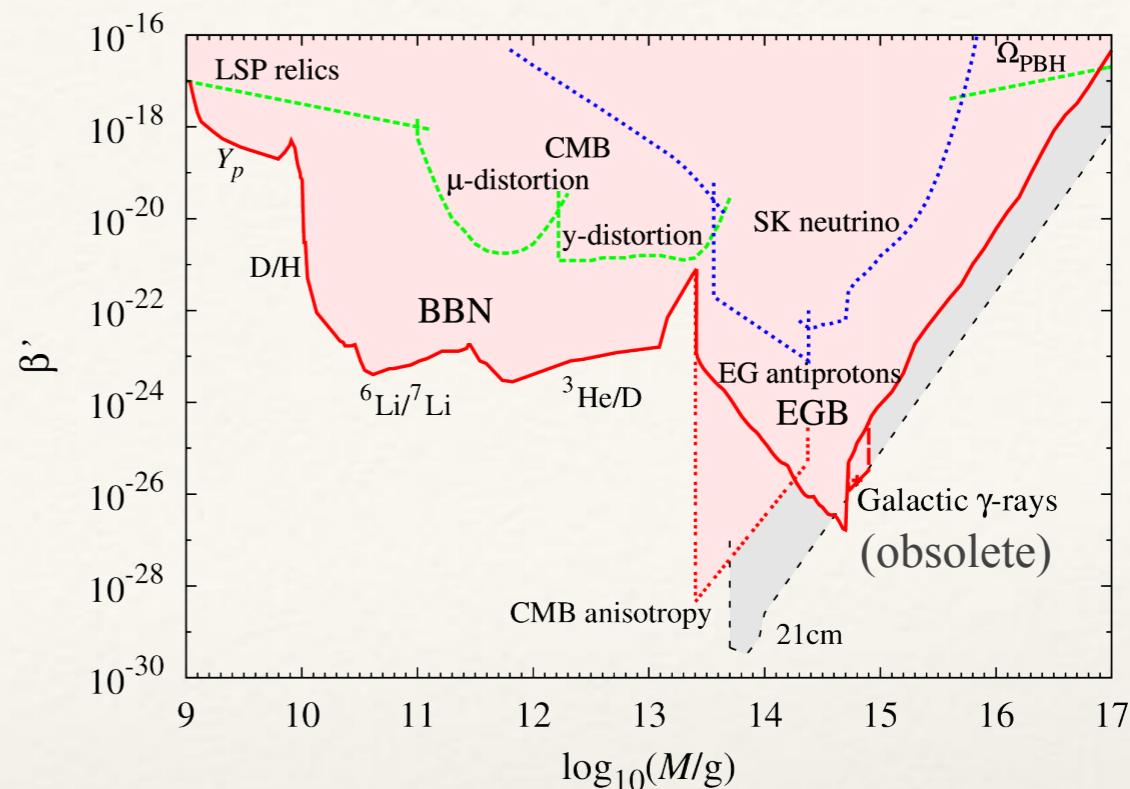
[CKSY(2010); Barrau *et al.* (2002)]

$$4 \times 10^{13} \text{ g} < M < 2 \times 10^{14} \text{ g}$$

$$M \sim 5 \times 10^{14} \text{ g} \text{ (未描入)}$$

❖ ニュートリノ [CKSY (2010)]

$$10^{12} \text{ g} < M < 10^{16} \text{ g}$$



ビッグバン元素合成

[Kohri & Yokoyama (1999); CKSY (2010)]

$$10^9 \text{ g} < M < 3 \times 10^{13} \text{ g}$$

CMB

❖ 非等方性: 降着円盤と類似

[Zhang *et al.* (2007)]

$$3 \times 10^{13} \text{ g} < M < 2 \times 10^{14} \text{ g}$$

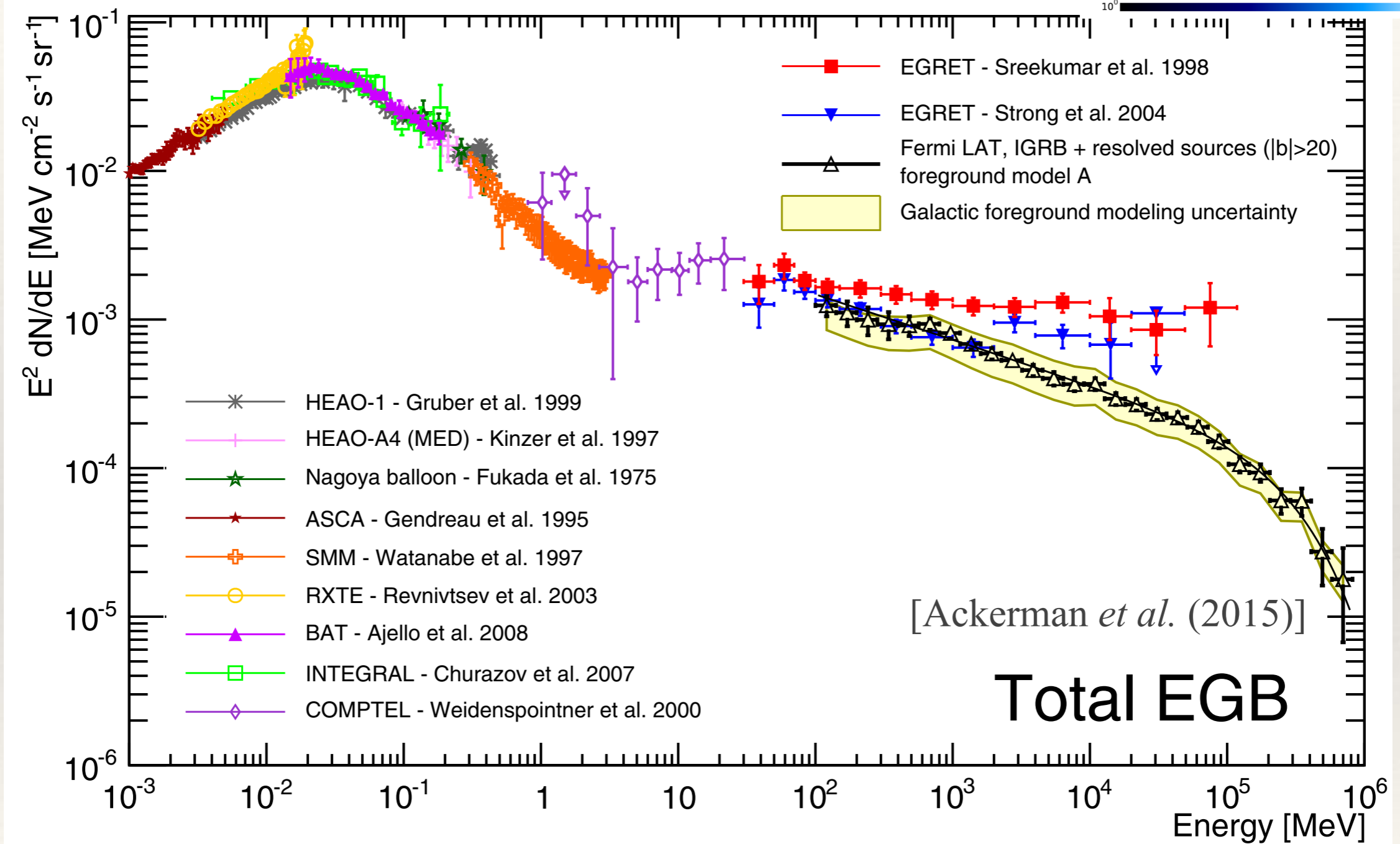
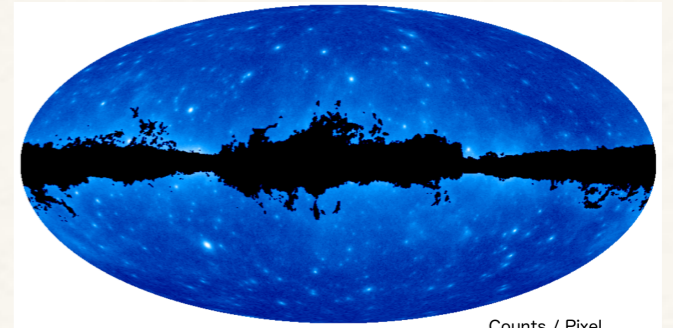
❖ スペクトル歪み

[Tashiro & Sugiyama (2008)]

$$10^{11} \text{ g} < M < 10^{14} \text{ g}$$

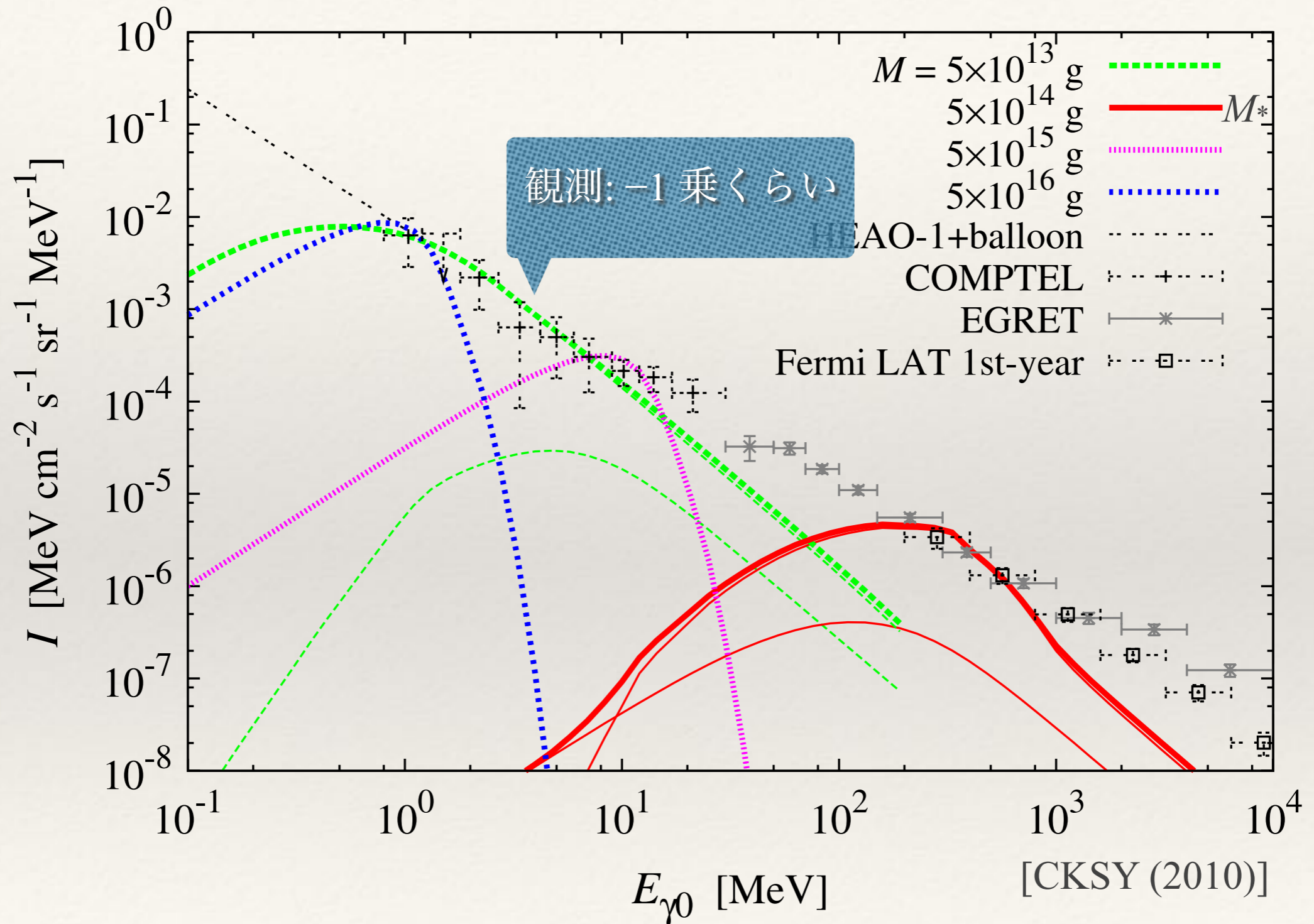
光子からの制限

❖ 銀河系外X・ガンマ線（等方成分）の観測



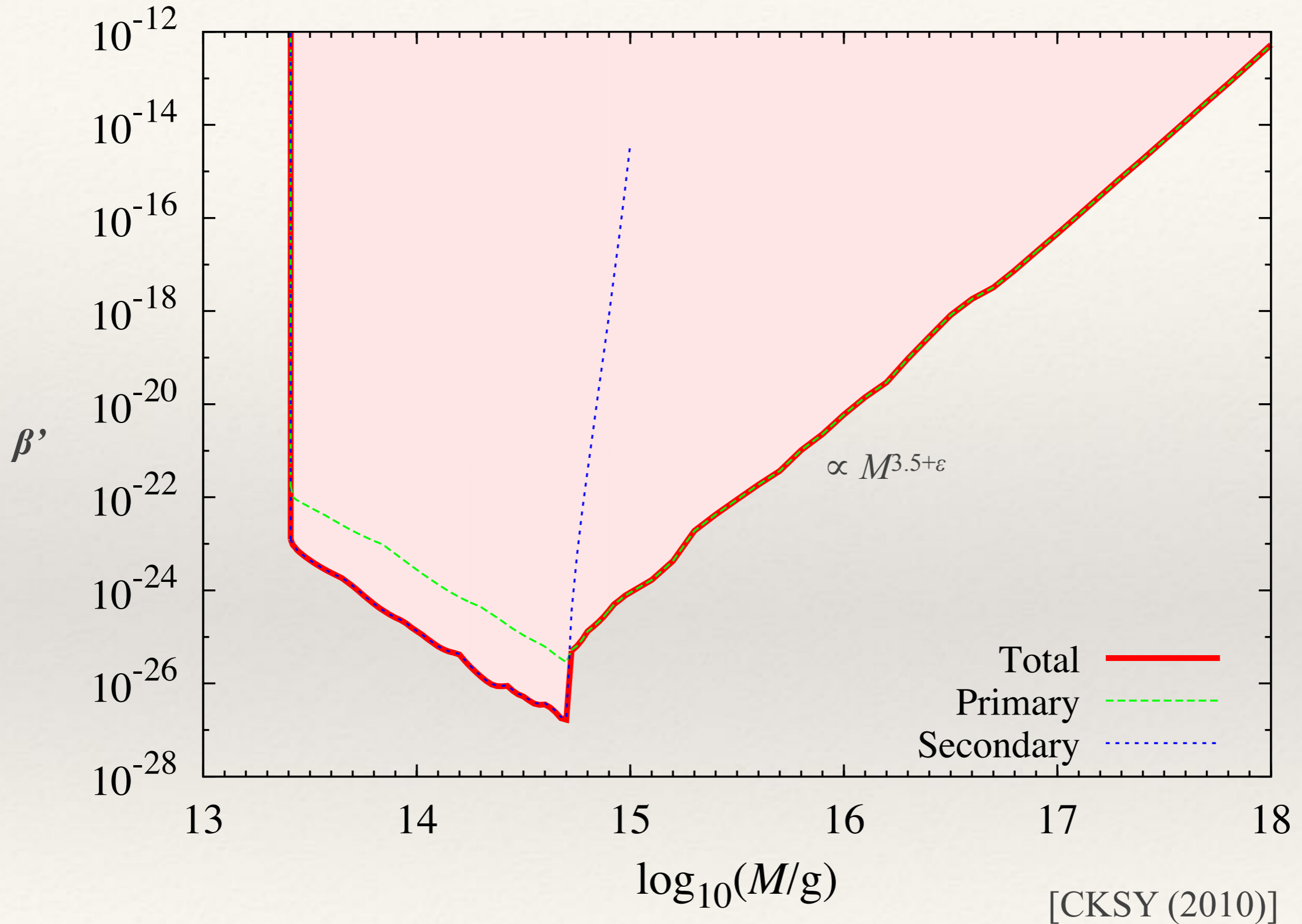
❖ 銀河系外PBHの制限

- ▶ 等方成分の観測値が最大許容値 → PBH量の上限

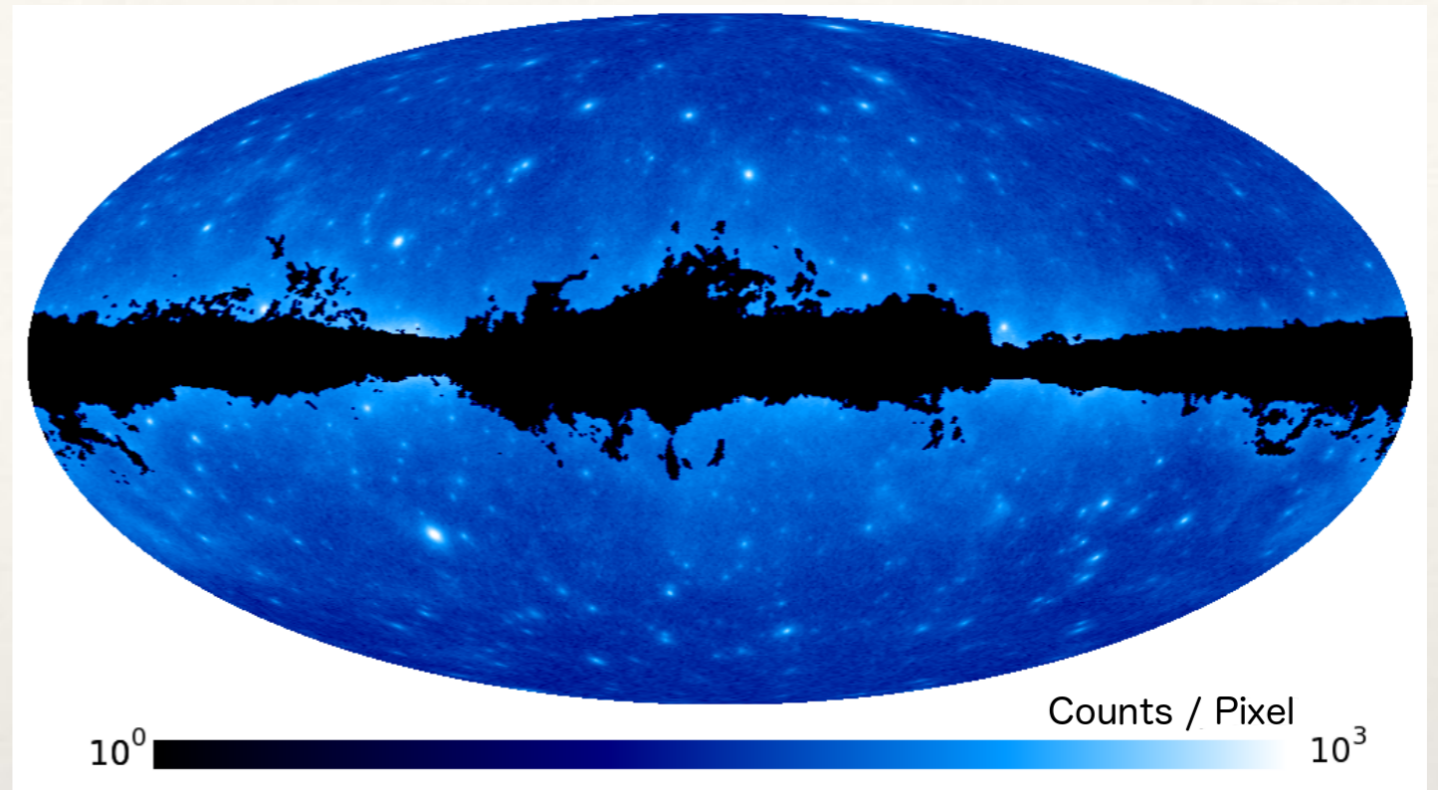
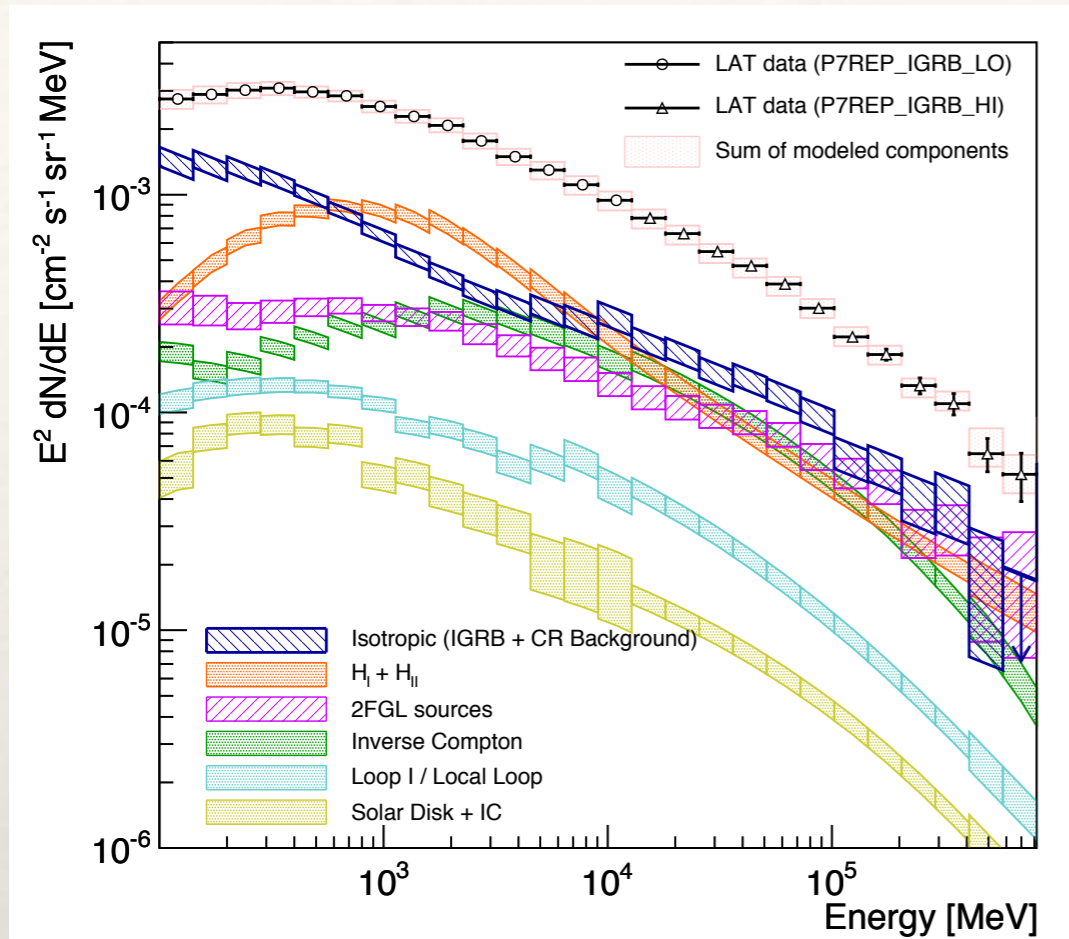


❖ 銀河系外PBH存在量の上限

$$f = \frac{\Omega_{\text{PBH}}}{\Omega_{\text{CDM}}} = 4.11 \times 10^8 \beta'(M) \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1/2}$$

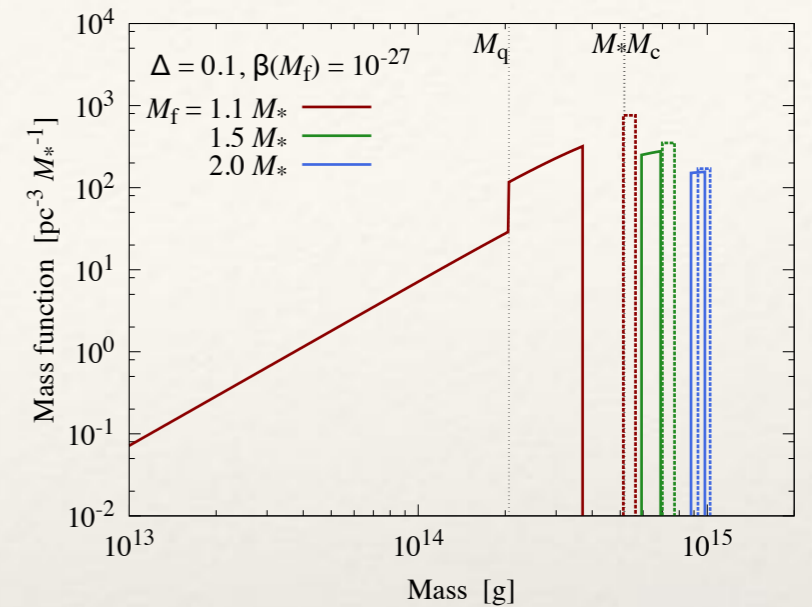
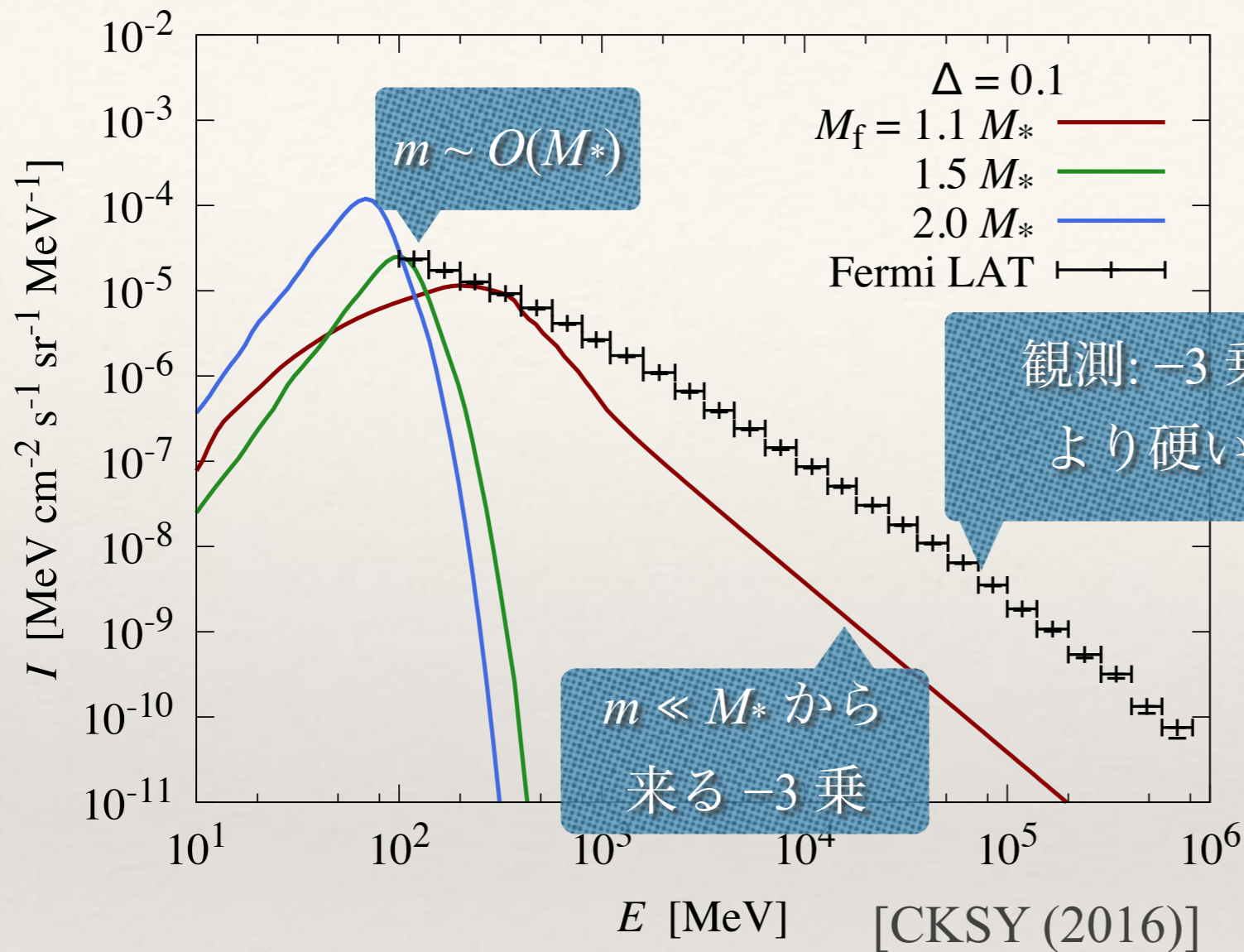
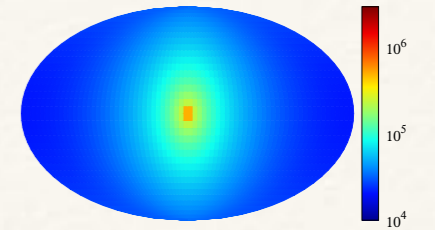


❖ 銀河系内ガンマ線の観測: *Fermi* LAT [Ackerman *et al.* (2015)]



- ❖ $100 \text{ MeV} < E < 820 \text{ GeV}$
- ❖ $|b| > 20 \text{ deg}$ の高銀緯で平均化されている
- ❖ 異方的銀河系内成分と等方的銀河系外成分を両方含み、成分への分解は宇宙線モデル依存 → 制限では、保守的に全部使うことにする

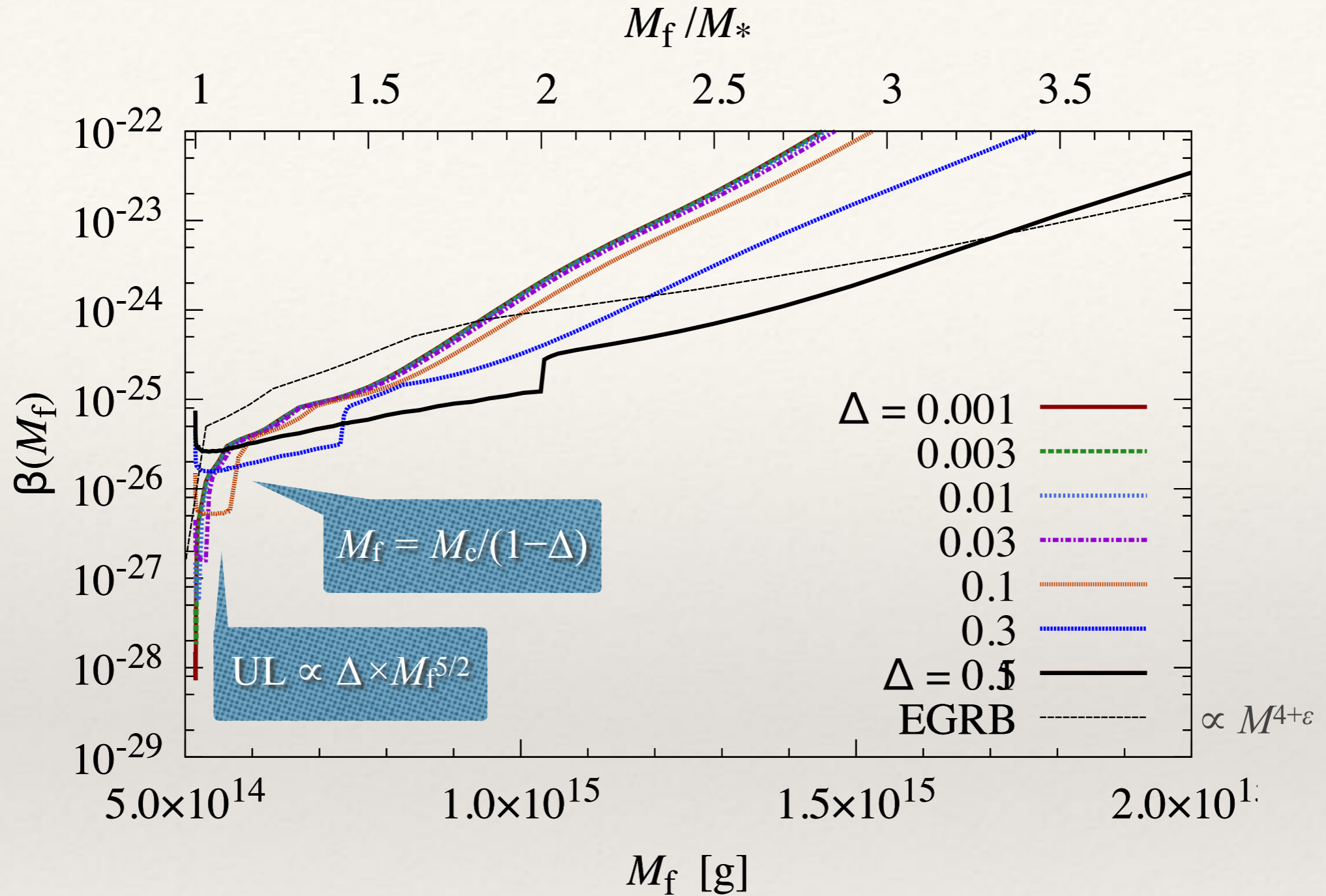
❖ 銀河ハロー内PBHからのガンマ線（単色質量関数）



$$\frac{dn}{dM} = \begin{cases} \frac{n}{\Delta M_f} & ((1 - \Delta)M_f < M < M_f) \\ 0 & (M < (1 - \Delta)M_f, M_f < M) \end{cases}$$

- ▶ 初期質量関数から現在の質量関数を得て、放射スペクトルを計算
- ▶ 高E尾部ができる場合は、 $m \sim M_*$ のPBHから来る $E \sim 300$ MeV で制限
- ▶ できない場合、 $m \sim M_f$ のPBHをWien領域の $E = 100$ MeV で制限

❖ $\beta(M_f)$ の上限 (幅 Δ をパラメータとして)

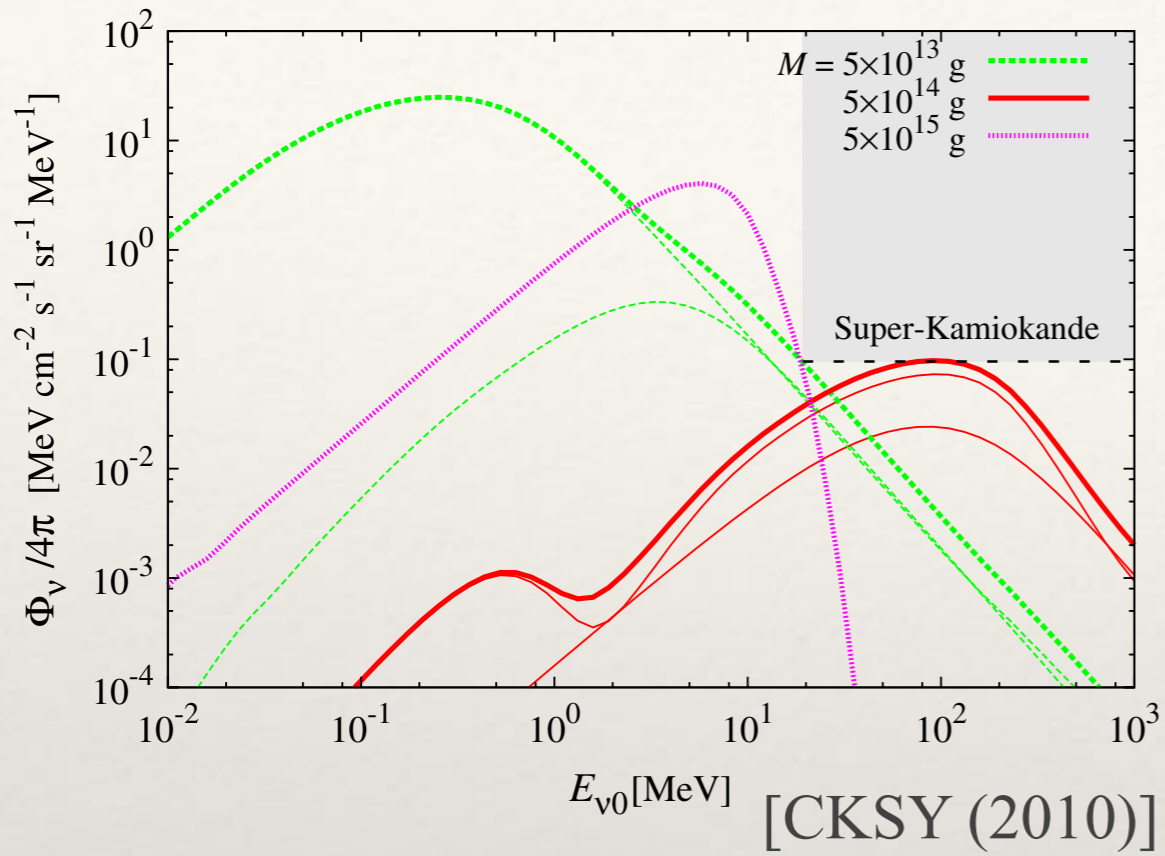


$$\beta(M_f) \lesssim \begin{cases} 5 \times 10^{-26} \left(\frac{\Delta}{0.1}\right) \left(\frac{M_f}{M_*}\right)^{5/2} & (M_c < M_f < M_c / (1 - \Delta)) \\ 10^{-27} \exp\left(\frac{\tilde{\chi}(1-\Delta)M_f}{M_*}\right) & (M_f > M_c / (1 - \Delta)) \end{cases}$$

▶ $M > M_*$ の少々の領域で系外PBHより強い制限 [CKSY (2016)]

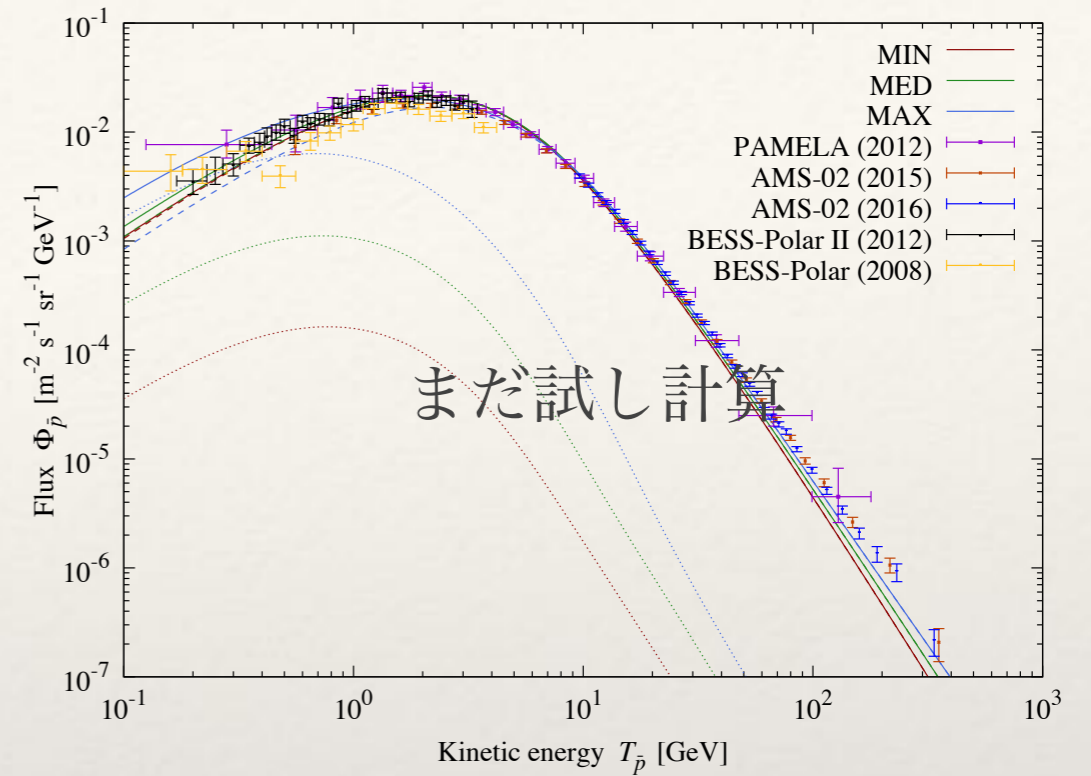
❖ ニュートリノ

▶ 銀河系外から

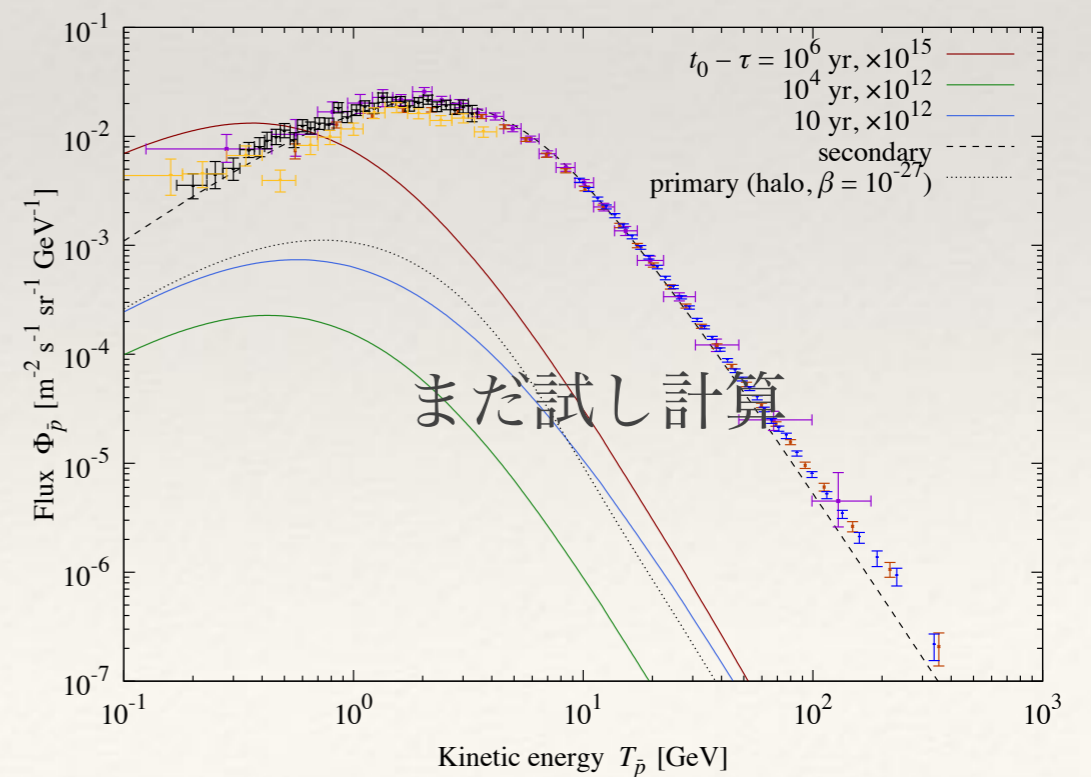


❖ 反陽子 (計算中)

▶ 銀河ハローから . . .



▶ 近傍のバーストから . . .



まとめ

PBHへの主要な制限

❖ $M > 10^{17} \text{ g}$ では、

- ▶ 重力レンズ
- ▶ 動力学
- ▶ 降着
- ▶ 大規模構造

[Mészáros (1975); Afshordi *et al.* (2003)]

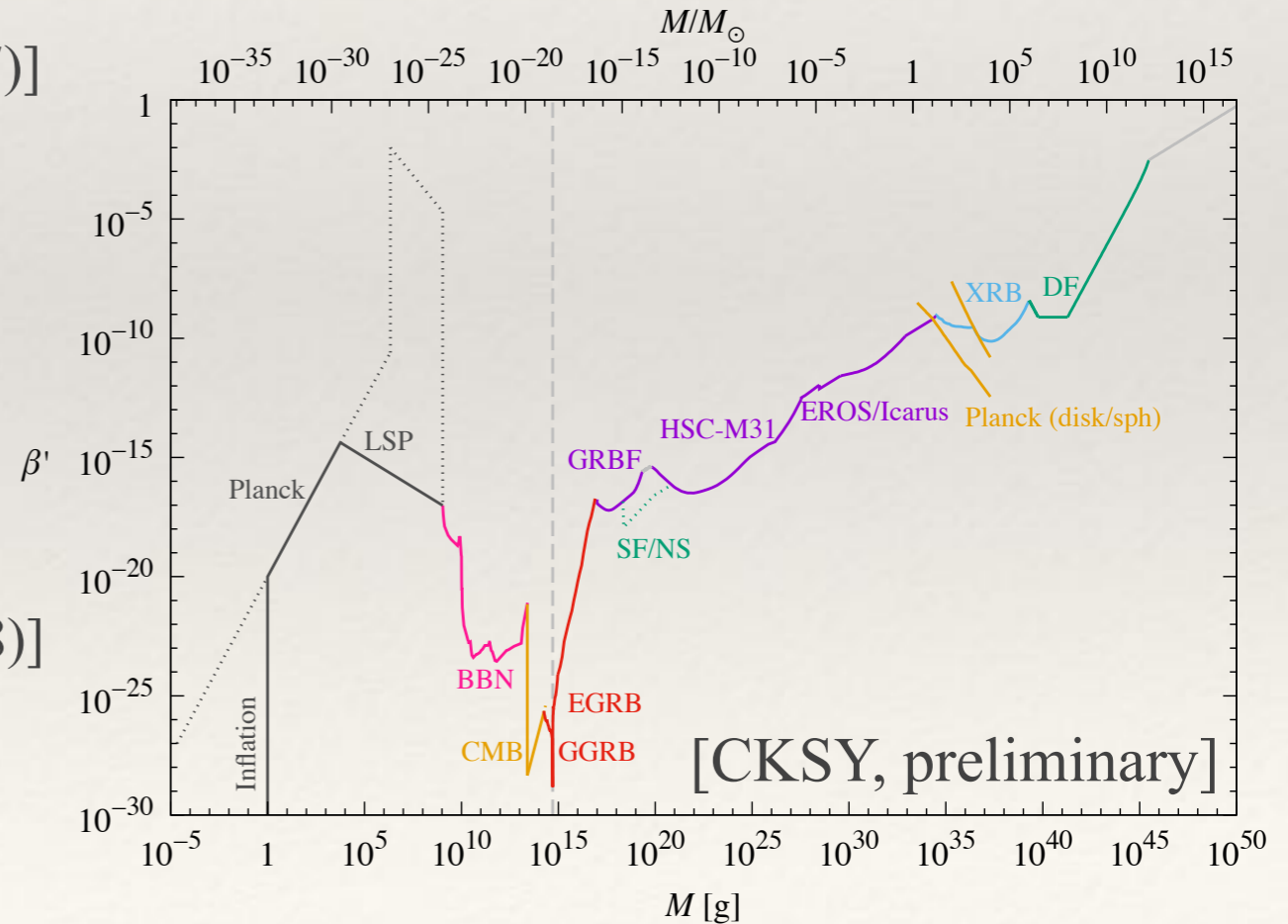
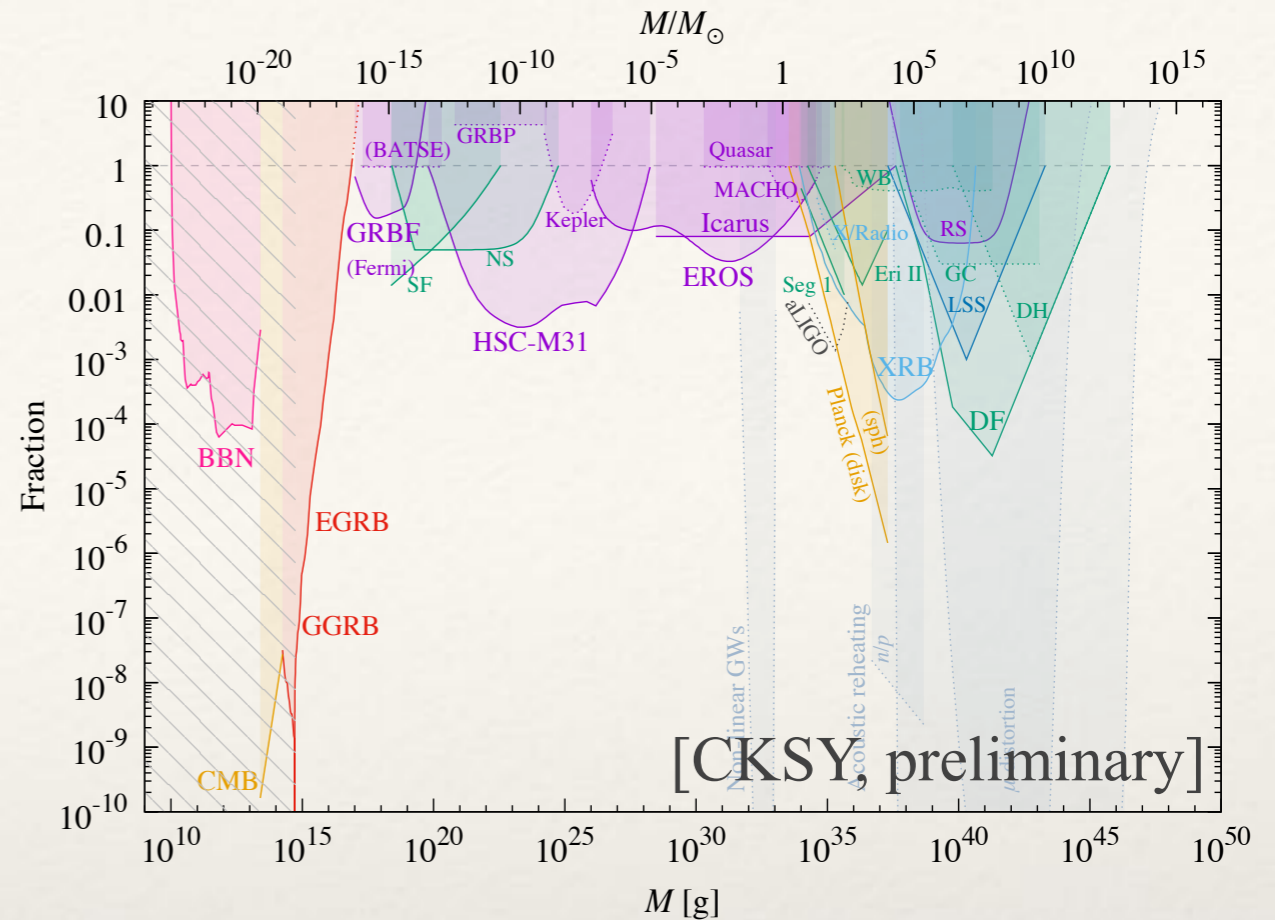
- ▶ 重力波?

[Ali-Haïmoud *et al.* (2017); Raidal *et al.* (2017)]

❖ $M < 10^{17} \text{ g}$ では、蒸発の制限が主:

- ▶ 宇宙線
- ▶ ビッグバン元素合成
- ▶ CMB
- ▶ エントロピー生成 [Miyama & Sato (1978)]
- ▶ Planck/SUSY残存粒子

[MacGibbon (1987); Lemoine (2000)]

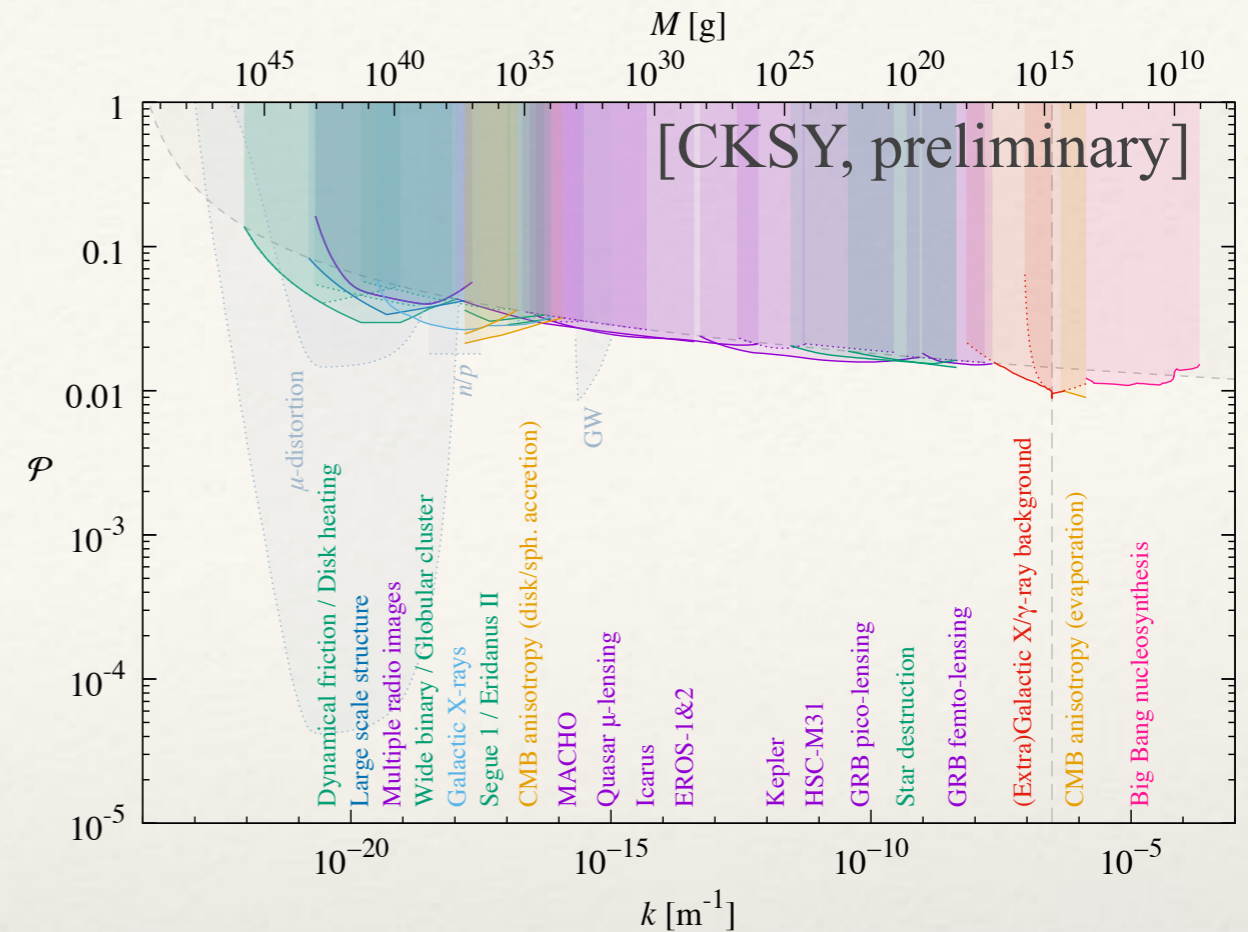


応用: スカラー揺らぎへの焼き直し

- ❖ 小スケールのユニークな情報
- ❖ インフレーションモデルの制限

今後考えるべきこと

- ❖ クラスターした空間分布 [Chisholm (2006); Clesse & García-Bellido (2017)] を考えると、相当状況が変わると思われる
- ❖ 単色での制限さえあれば、任意の質量関数の場合での制限が計算できるので、質量関数 [e.g., Carr, Kuhnel & Sandstad (2016)] を変える議論は?
- ❖ 重力波源の連星は原始ブラックホールなのか? [Nakamura *et al.* (1997); Ioka *et al.* (1998); Sasaki *et al.* (2016); Bird *et al.* (2016); Clesse & García-Bellido (2017)]
 - ▶ $M < M_{\odot}$ のブラックホールが重力波で見つかれば・・・



おわり