

暗黒物質の対消滅が CMBの分布関数に与える ゆがみについて

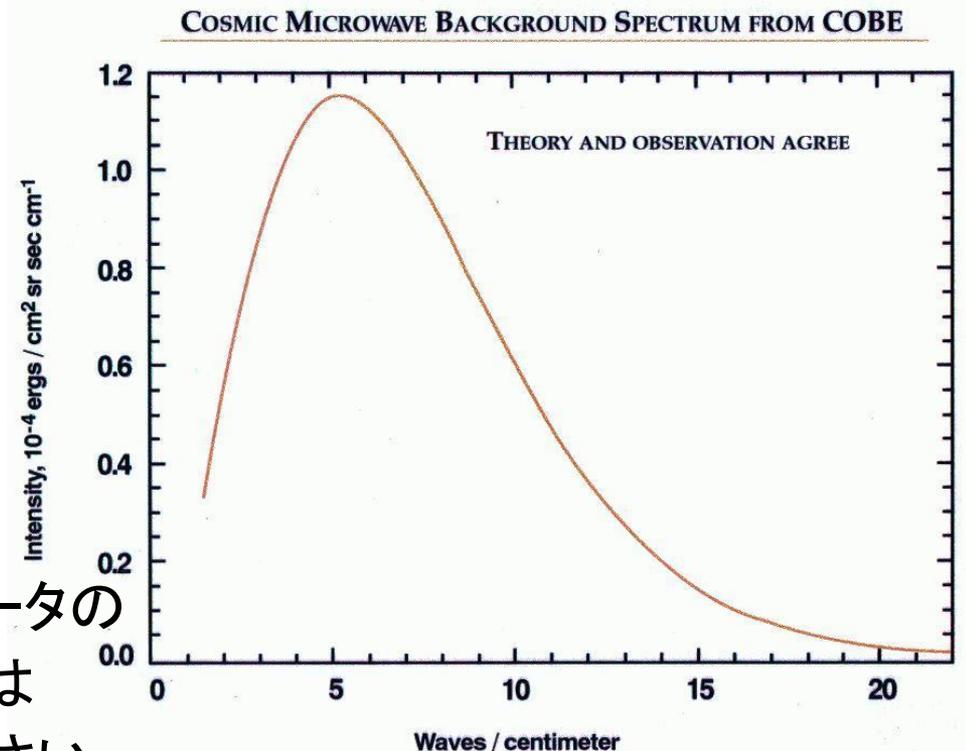
Reference

- Jesús Zavala, Mark Vogelsberger, & Simon D. M. White, 2010, PHYSICAL REVIEW D 81, 083502
- Junji Hisano, Shigeki Matsumoto, & Mihoko M. Nojiri, 2004, PHYSICAL REVIEW LETTERS 92, 031303
- Junji Hisano, Masahiro Kawasaki, Kazunori Kohri, Takeo Moroi, and Kazunori Nakayama, 2009, PHYSICAL REVIEW D 79, 083522

名古屋大学大学院理学研究科
素粒子宇宙物理学専攻
理論天体物理学研究室[AT研]
修士1年
青山尚平

宇宙マイクロ波背景放射[CMB]について

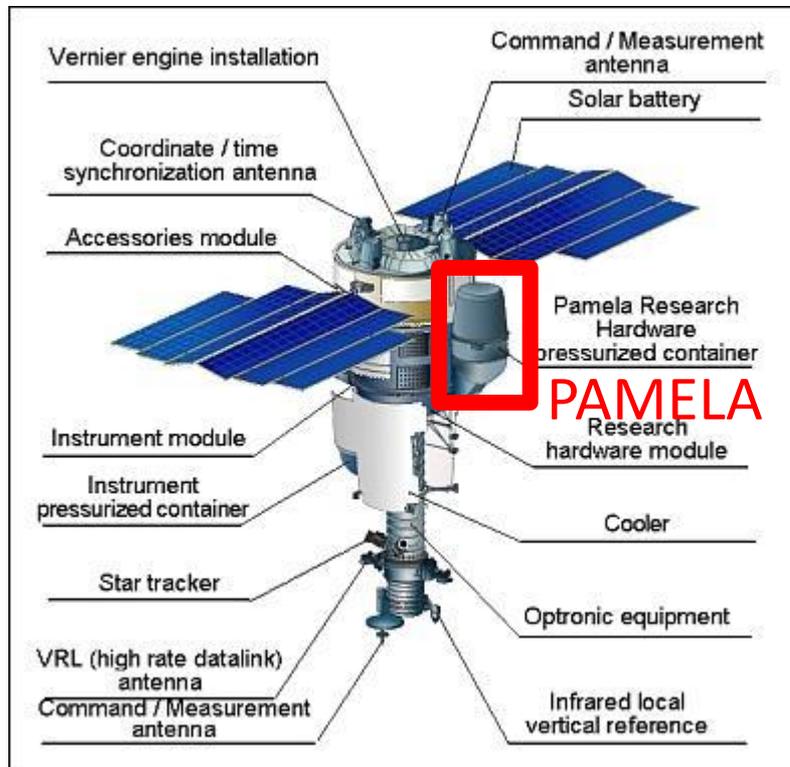
1. 天球上の全方向からほぼ等方的に飛来する電磁波である。
2. George Gamowがビッグバンの痕跡、宇宙最古の光としてその存在を予言し、1964年にA. A. PenziasとR. W. Wilsonにより偶然発見された。
3. スペクトルは温度 $T_0=2.725(\pm 0.002)$ [K]の黒体輻射[プランク分布]と極めてよく一致している。
4. この温度ゆらぎを分析して宇宙年齢や暗黒エネルギーがこの宇宙を支配していることがわかった。
5. 暗黒物質などの対消滅などで光子が注入されるとスペクトラムは歪められる。
6. その歪みの大きさを表すパラメータの1つの“有効化学ポテンシャル” μ は $\mu/k_B T_0 < 9.0 \times 10^{-5}$ を満たすほど小さい。



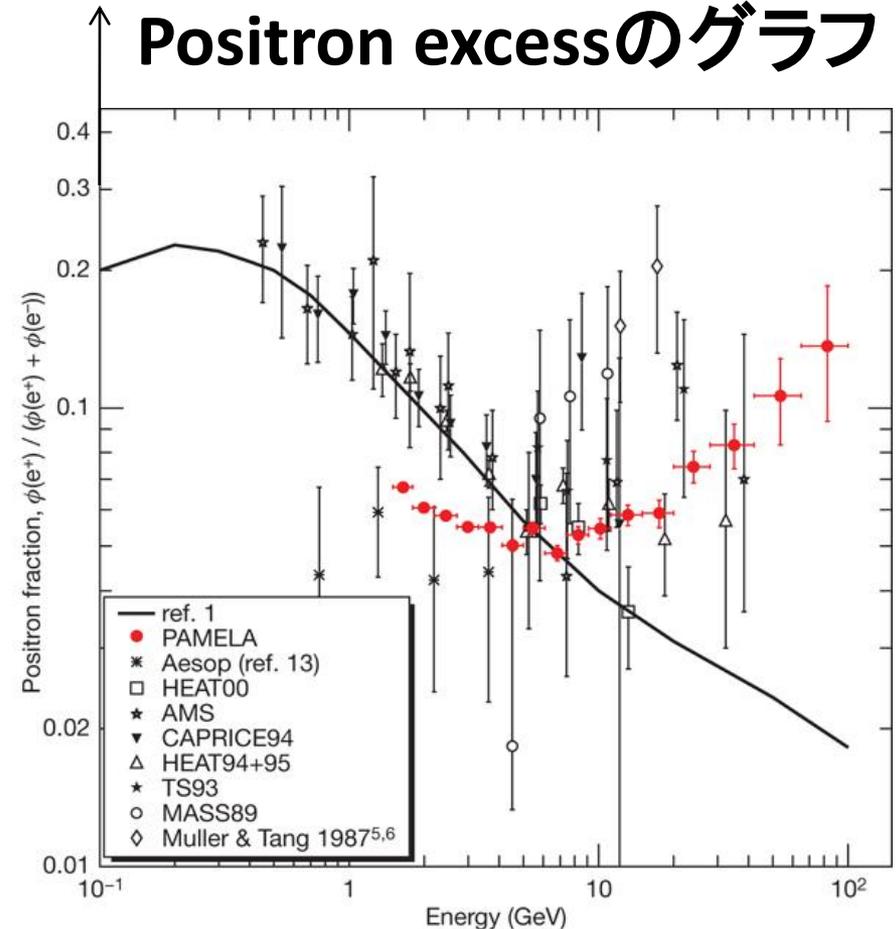
反物質をとらえるため開発された PAMELAが示唆したpositron excess

2009年4月, PAMELA groupが科学雑誌Natureに地球に単位時間・単位面積あたりに届く電子の反粒子である陽電子の数が10GeVより高いエネルギー領域で理論予測より多いという報告をしました。

Resurs DK1に搭載された
PAMELA

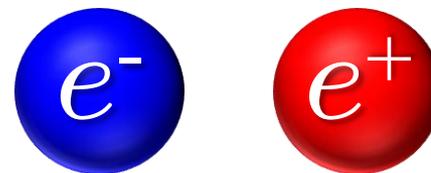
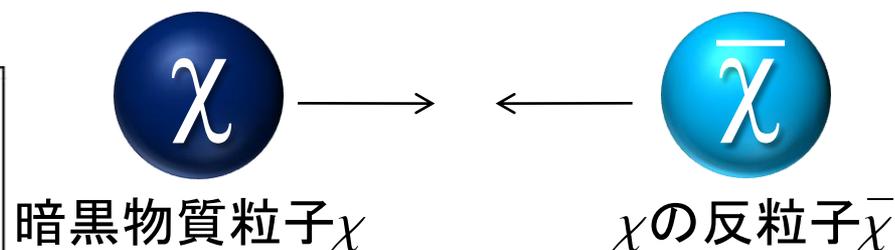
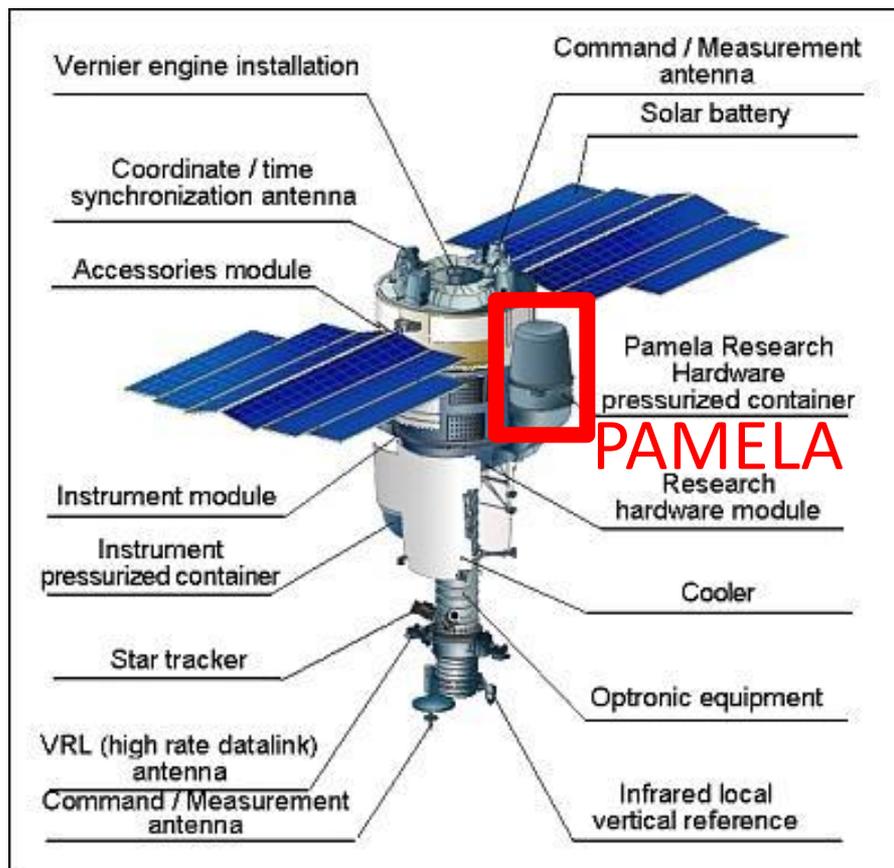


Positron excessのグラフ



PAMELAが示唆しているpositron excessの起源は 暗黒物質粒子の対消滅ではないかと 世界的に注目されました。

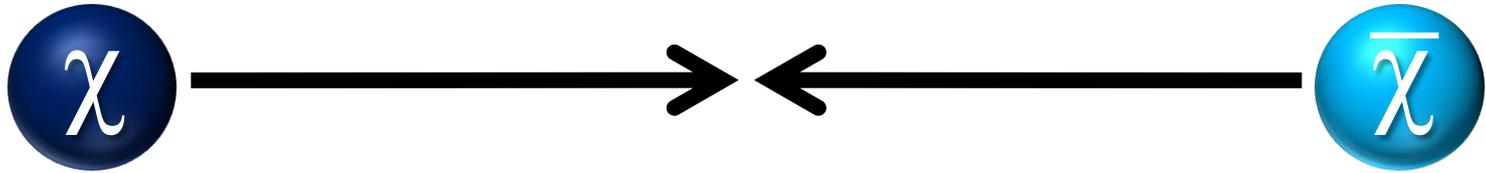
Resurs DK1に搭載された
PAMELA



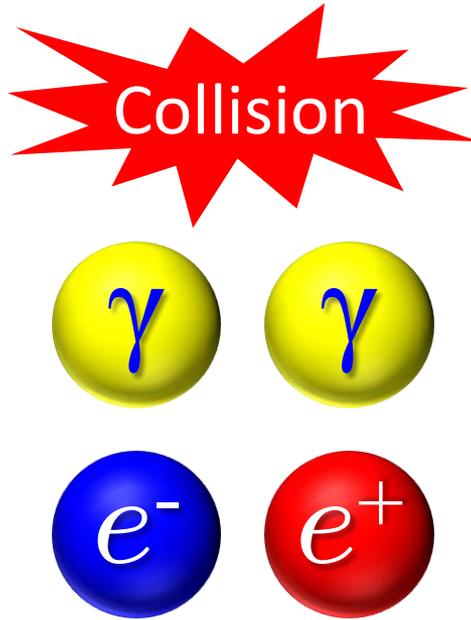
このpositron excessは 暗黒物質起源ではないのか。

- このexcessが暗黒物質起源だとすると主に下記の2つ問題がある。
 1. 膨張した宇宙で暗黒物質粒子 χ は薄まってしまっているため、その反粒子 $\bar{\chi}$ と出会って対消滅する頻度は極めて小さい。
 2. 通常の散乱過程において、暗黒物質から光子などへの崩壊断面積は非常に小さいことがわかっている。
- 現在までの観測と矛盾せずに以上を説明する増幅機構として注目されているのがSommerfeld enhancementである。
- PAMERAの結果を説明するためには1000倍程度増幅される必要がある。

通常の対消滅過程



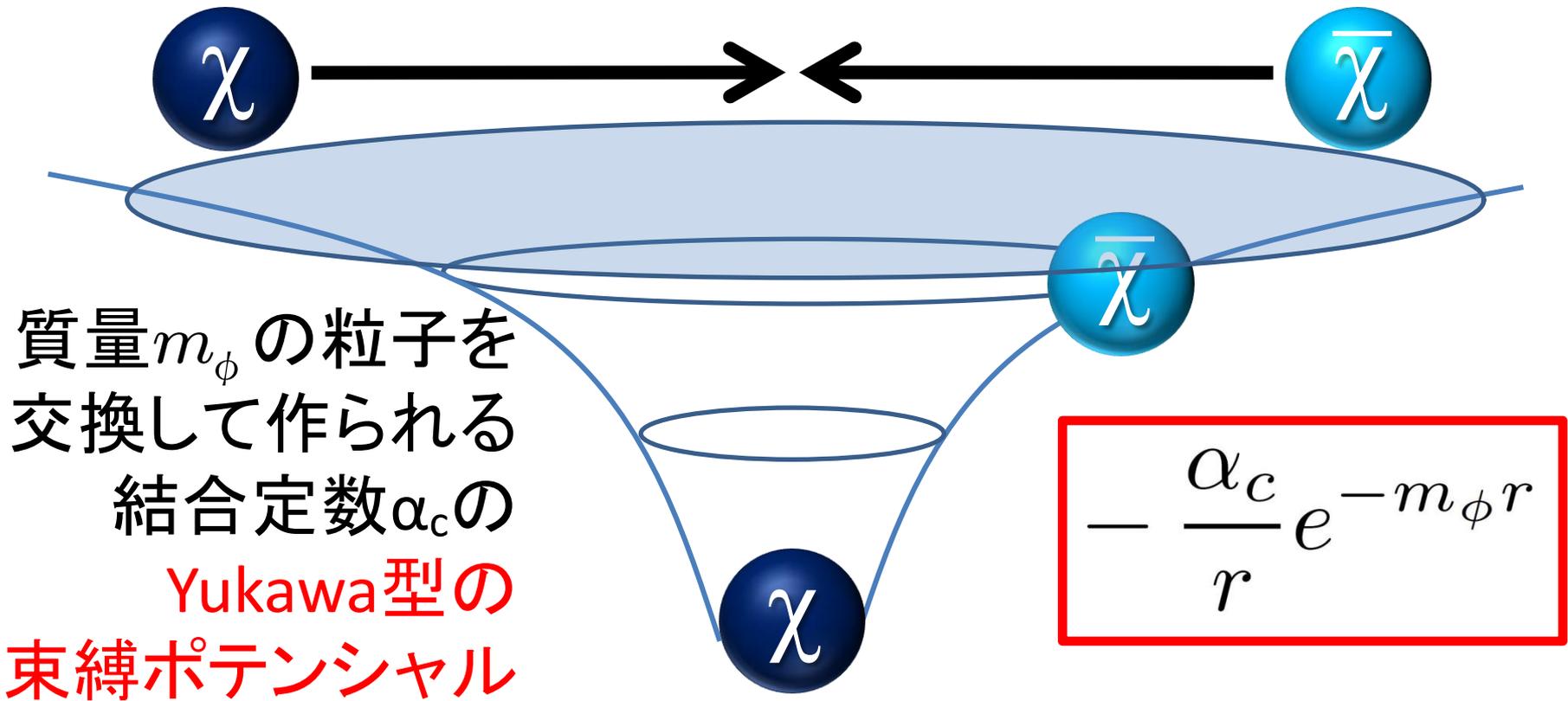
暗黒物質粒子 χ の場と
その反粒子 $\bar{\chi}$ の場が
何の束縛力もなく
直接相互作用して
対消滅する場合を
まず考える。



- 暗黒物質粒子 χ とその反粒子 $\bar{\chi}$ が対消滅する。
- 対消滅の断面積と体積数密度がとても小さい。

Sommerfeld enhancement

Sommerfeld enhancementは対消滅の断面積を増幅する機構の1つである。



- χ と $\bar{\chi}$ が接近すると一時的な束縛状態が作られ、散乱断面積が大きく増大する。その増幅率 $S(\beta)$ は相対速度の大きさを $c\beta$ として

$$S(\beta) = \frac{\pi\alpha_c}{\beta} \left(1 - \exp\left(-\frac{\pi\alpha_c}{\beta}\right) \right)^{-1} \quad \text{で与えられる。}$$

χ の数密度はボルツマン方程式で決まる。

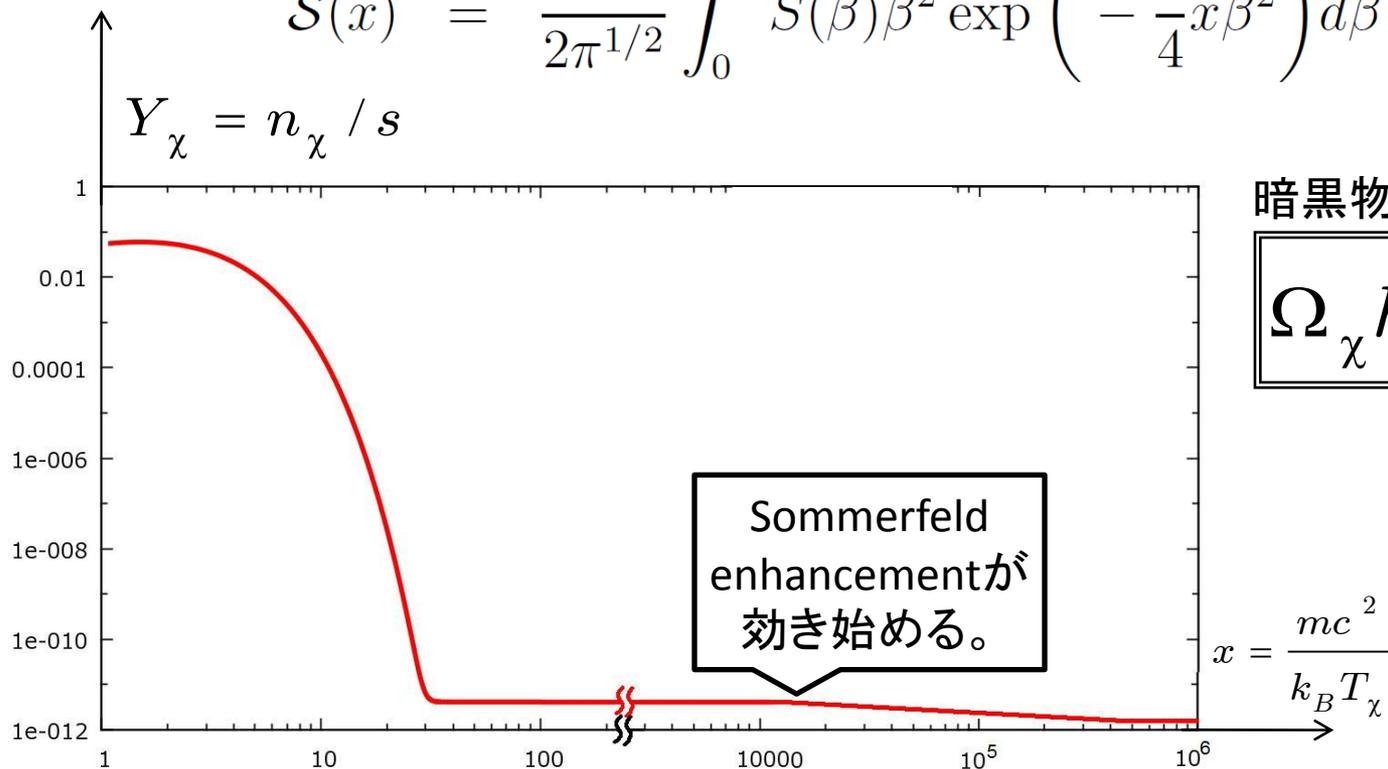
膨張する宇宙において χ の時間変化 \dot{n}_χ はハッブルパラメータを H 、散乱断面積を $\langle\sigma v\rangle$ として次のようになる。

$$\dot{n}_\chi + 3Hn_\chi = -\langle\sigma v\rangle(n_\chi^2 - (n_\chi^{EQ})^2)$$

$$\langle\sigma v\rangle = \langle\sigma v\rangle_S \mathcal{S}(x)$$

$$\langle\sigma v\rangle_S \sim 2.4 \times 10^{-26} [\text{cm}^3/\text{sec}]$$

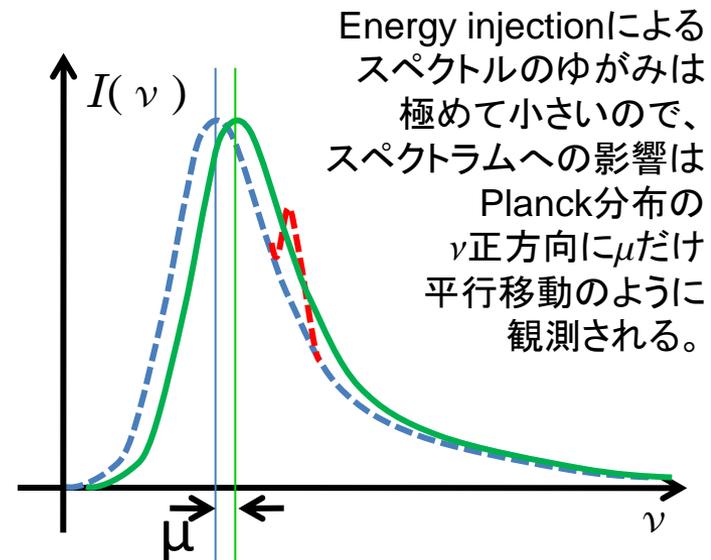
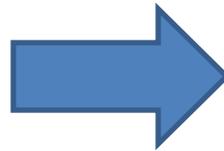
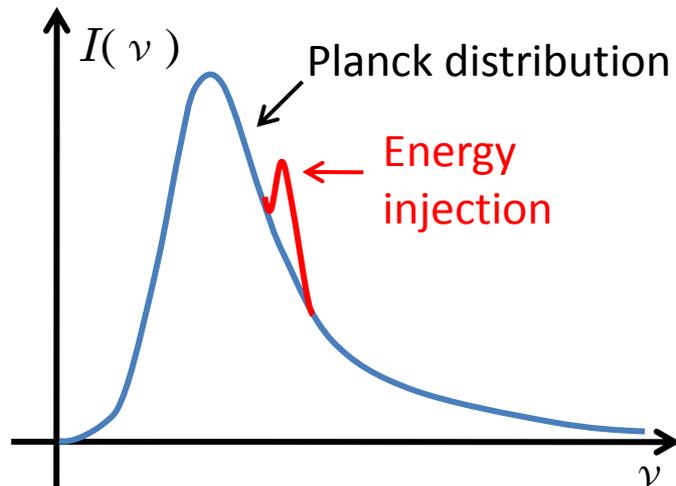
$$\mathcal{S}(x) = \frac{x^{3/2}}{2\pi^{1/2}} \int_0^1 S(\beta)\beta^2 \exp\left(-\frac{1}{4}x\beta^2\right) d\beta$$



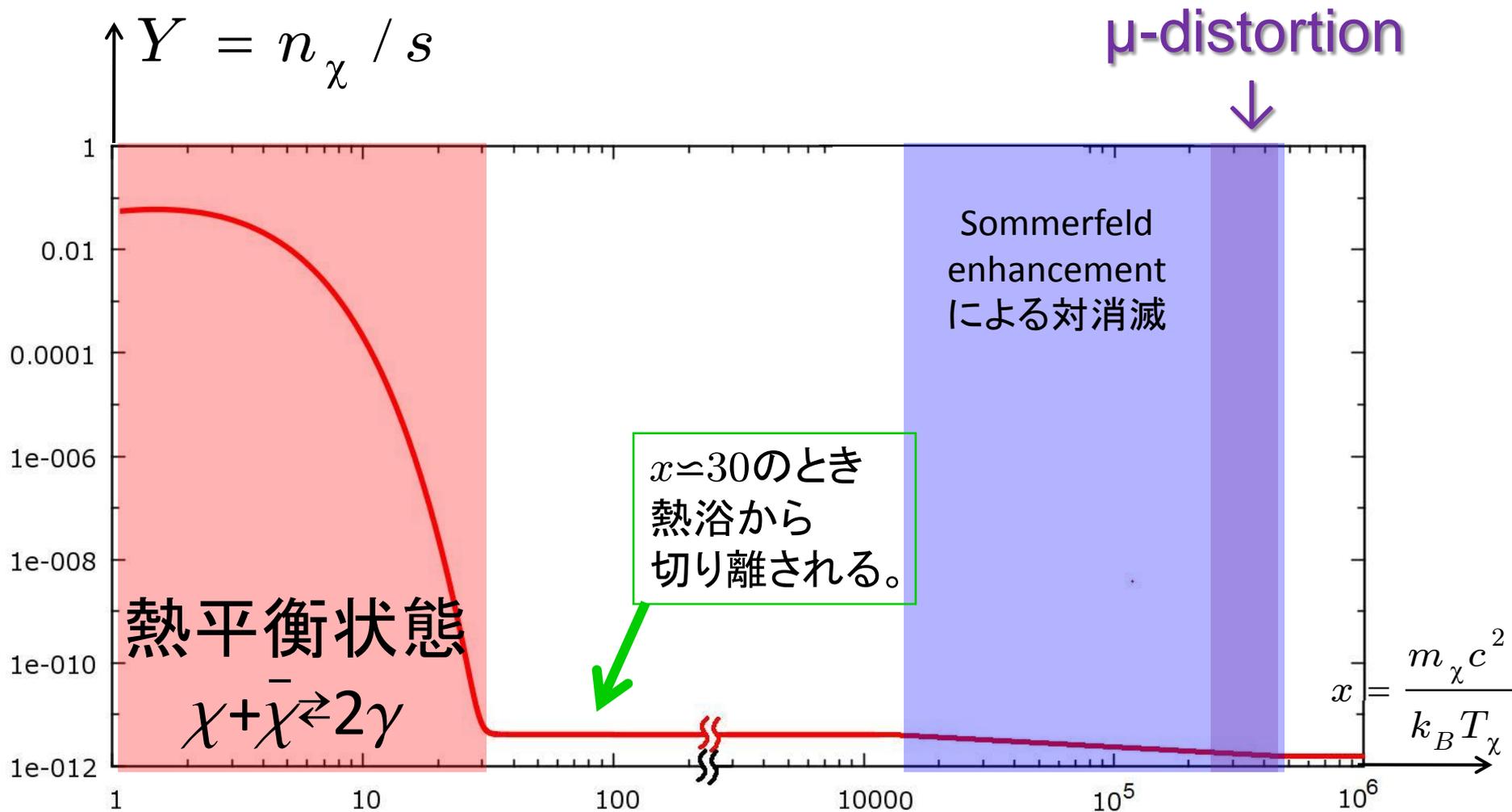
μ -distortion のパラメータ

“有効化学ポテンシャル” μ について

- 相互作用が存在すると宇宙の初期の対消滅で光子を対生成する。
- その光子は宇宙マイクロ波背景放射のプランク分布を歪ませる。
→この効果を μ -distortionという。
- Sommerfeld enhancementにより μ -distortionが起きるのは $5.1 \times 10^4 < z < 2.0 \times 10^6$ で時刻としては50日から230年の間である。
(ただし m_χ や m_ϕ などのパラメータに強く依存する。)
- J.Hisano et al.(2009)によると電子・光子などの軽い粒子に崩壊する場合、ビッグバン元素合成に影響を及ぼさないことがわかっている。



暗黒物質の個数の変化



この μ はCOBE/FIRASの制限をクリアしているか。

$$\mu = 1.4f \left(\frac{\Omega_{\chi,0} h^2}{\Omega_{\gamma,0} h^2} \right)^{3/2} \left(\frac{\Omega_{\chi,0} \rho_{crit,0}}{m_{\chi}} \right) t_0 \langle \sigma v \rangle_S \int_{x_{\chi}^1}^{x_{\chi}^2} \mathcal{S}(x_{\chi}) x_{\chi}^{-1} \left(\frac{Y(x = (x_{kd} x_{\chi})^{1/2})}{Y(x_0)} \right)^2 dx_{\chi}$$

x_{χ} は χ の温度を T_{χ} として $x_{\chi} = \frac{m_{\chi} c^2}{k_B T_{\chi}}$

上記の式を使い、数値計算により確認する。

暗黒物質として

• $m_{\chi} = 100 \text{ GeV}$

• $m_{\phi} = 8 \text{ MeV}$

• $T_{kd} = 8 \text{ MeV}$

• $\Omega_{\chi,0} h^2 = 0.1143$

を代入して μ を計算。

$\log_{10}(\mu), \log_{10}(\alpha_c)$ と $\log_{10}(S)$ の関係を見る。

この μ はCOBE/FIRASの制限をクリアしているか。

- 宇宙の初期において暗黒物質が対消滅すると当時宇宙を満たしていた電子-光子プラズマに光子が注入される。
- それによるスペクトラムのゆがみを表す有効化学ポテンシャル μ は注入されたエネルギーが宇宙全体の光子の持つエネルギーに対してどれだけの割合であったかで決まる。
- その割合、つまり暗黒物質の対消滅から注入される $\delta\rho$ を全体の光子のエネルギー ρ で割ったもの $\delta\rho/\rho$ は下の式で与えられる。
- 係数1.4はIllarionov and Syunyaevの1975bにより与えられた。

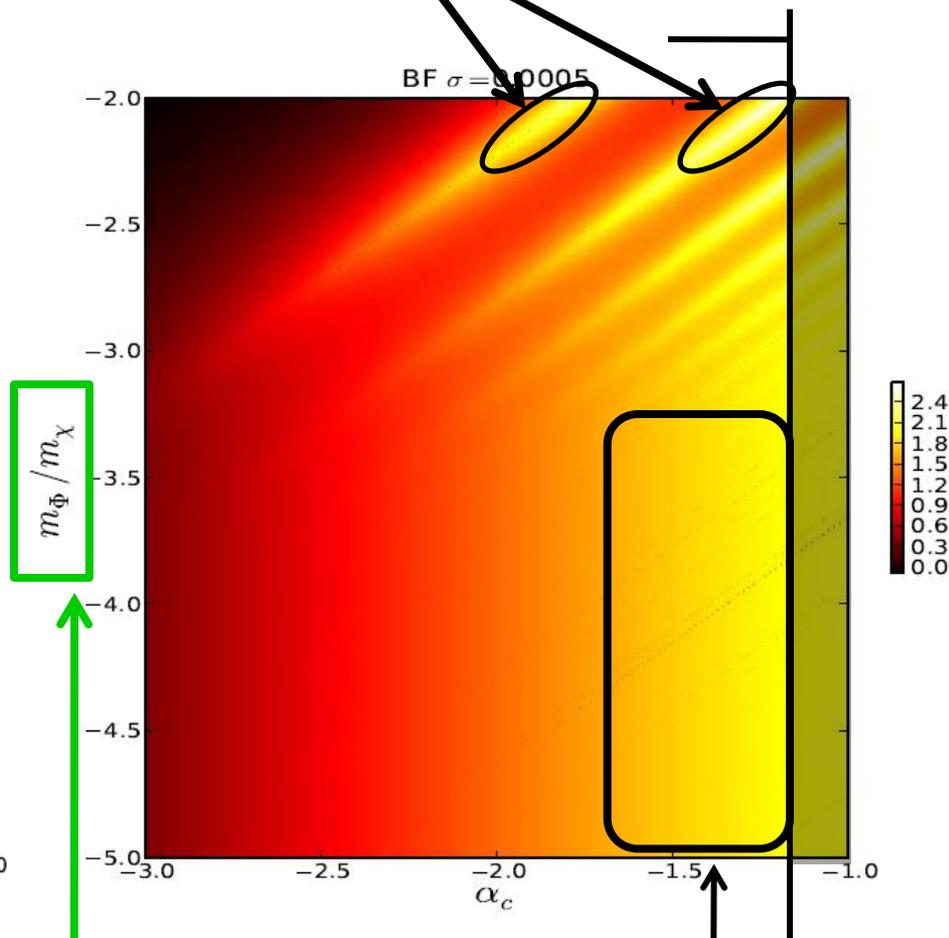
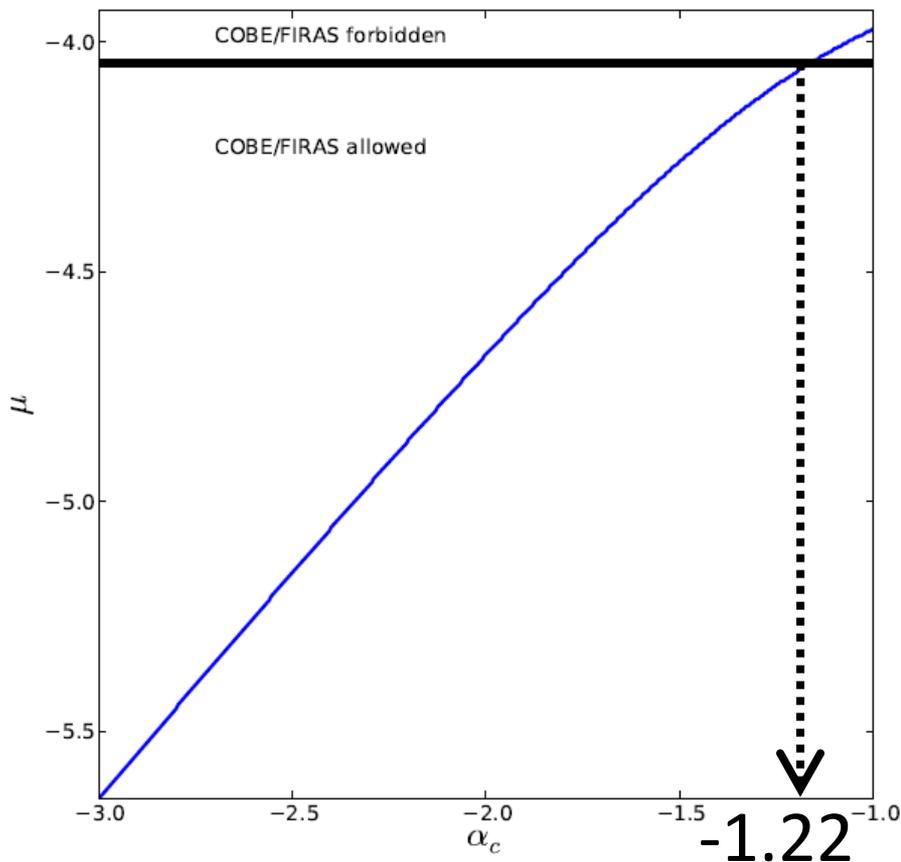
$$\mu = 1.4f \left(\frac{\Omega_{\chi,0} h^2}{\Omega_{\gamma,0} h^2} \right)^{3/2} \left(\frac{\Omega_{\chi,0} \rho_{crit,0}}{m_{\chi}} \right) t_0 \langle \sigma v \rangle_S \int_{x_{\chi}^1}^{x_{\chi}^2} \mathcal{S}(x_{\chi}) x_{\chi}^{-1} \left(\frac{Y(x = (x_{kd} x_{\chi})^{1/2})}{Y(x_0)} \right)^2 dx_{\chi}$$

$$x_{\chi} \text{ は } \chi \text{ の温度を } T_{\chi} \text{ として } x_{\chi} = \frac{m_{\chi} c^2}{k_B T_{\chi}}$$

計算結果

Boost factor ~ 500 の領域

$m_\phi \rightarrow +0$ の極限での α_c の制限



Boost factor ~ 100 の領域

$\log_{10}(\alpha_c) < -1.22$ で COBE/FIRAS の制限を満たす。

結論

- Sommerfeld enhancementは暗黒物質の持ちうる性質の1つであり、PAMELAのpositron excessの一部は説明できる。
- 対消滅の断面積がSommerfeld enhancementにより増幅されれば、暗黒物質の粒子の対消滅の反応確率は大きく増幅される。
- 崩壊により生じた光子はCMBに μ -distortionという影響を与えるためCMBの詳細観測で原理的に検出可能であり、COBE/FIRASの観測結果による現在の制限 $\mu/k_B T_0 < 9.0 \times 10^{-5}$ とも矛盾しない。
- CMBの詳細な観測はILCなどの加速器実験と同様に暗黒物質の性質やその相互作用の理論を検証し、それに制限を加えていく上で極めて重要である。