

tSZ効果とハッブル定数の測定

CMB光子と銀河団

地球へと飛来するCMB光子は、その途中で銀河団の影響を受けることがあります。その中でも、熱的スニヤエフ・ゼルドヴィッチ効果（以下tSZ効果）と呼ばれる現象について見ていきます。

ここで一般に、光子が電子の集団と相互作用するとしたときの光子のエネルギー分布の変化は、次のカンパニエーツ方程式によって記述されます。

$$\frac{dN(t, x)}{dt} = \frac{K_C}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left[x^4 \left(\frac{\partial N}{\partial x} + \frac{T}{T_e} (N + N^2) \right) \right] \quad (5)$$

ここで、 t は時間、 x は光子のエネルギーを表す無次元量、 T, T_e はそれぞれ光子、電子の温度、 K_C は反応率で、 $N(t, x)$ がエネルギー毎の光子数を表す分布関数です。

CMB光子は、銀河団のプラズマ中で熱運動をする電子によって逆コンプトン散乱^{*1}されます。この影響を受け、CMB光子の強度分布はFigure 9のような変化を見せます。これがtSZ効果です。(5)式及び銀河団のスケールを用いて計算すると、典型的には温度にして0.1 mK程度の変化であることがわかります。元のCMB光子の温度は約2.7 Kなので、tSZ効果の影響はとても小さいですが、実際の観測によってもこの現象の存在は確かめられています。

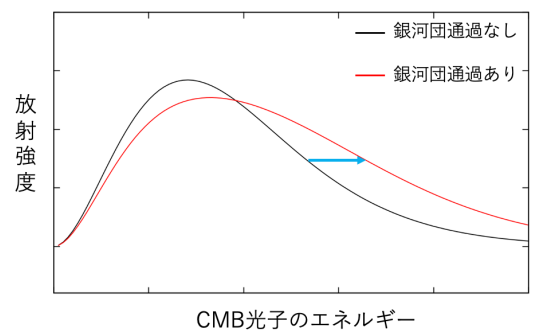


Figure 9. CMB光子のエネルギー分布の歪み。

*1. 光子と電子の散乱のうち、光子のエネルギーが増加するものことです。減少する場合はコンプトン散乱と呼ばれます。

ハッブル定数の測定

tSZ効果は、銀河団までの距離やハッブル定数 H_0 ^{*2}の測定にも用いられます。そのためには、銀河団のX線観測データが必要です。tSZ効果の影響の度合いを測定し、X線観測で銀河団の表面輝度などのパラメータを計測することで銀河団までの距離を知ることができ、そこから H_0 を求められるのです。数段階の物理過程を踏む必要のある距離梯子^{*3}での測定と異なり、tSZ効果を用いた測定は、極めて遠くの銀河団であっても直接計測できるという特徴があります。

tSZ効果とX線観測を用いた従来の計算では、銀河団に球対称性や等温性などを仮定します。しかし、現実の銀河団は必ずしもこの仮定を満たしません。よって H_0 の測定では、この影響による系統誤差を考慮する必要があります。この点を踏まえた上で、2019年には $H_0 = 67 \pm 3 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ という測定結果が得られています。

*2. ハッブル・ルメートルの法則によると、天体の後退速度は天体までの距離に比例します。この比例定数の現在における値をハッブル定数と呼びます。

*3. 目標とする天体までの距離を、地球近傍の天体から順々に決定していくことで測定する手法です。複数の天体を段階的に継いでいくことから「梯子」に見立てられています。

参考文献

- [1] 小松英一郎, 宇宙マイクロ波背景放射, 日本評論社, 2019
- [2] A. Kozmalyan, H. Bourdin, P. Mazzotta, E. Rasia, and M. Sereno. "Deriving the Hubble constant using Planck and XMM-Newton observations of galaxy clusters" ,A&A 621, A34, 2019