

ダークマターとバリオンの相対速度

1 宇宙の95%は謎!?

皆さんの身の回りにはたくさんの物質がありますね。物質は原子という小さなツブツブが集まってできている、と聞いたことがある人も多いと思います。そのような、皆さんがよく知っている、いわゆる「普通の」物質(バリオンと言います)、実は、宇宙では**超少数派**なのです。宇宙は**ダークマター**という謎の物質と、**ダークエネルギー**という謎のエネルギーに満ち溢れている、とされています。



図 1: 宇宙を構成するモノ

ダークマターとは、正確には「電磁波を放出も吸収もせず、バリオンとはほとんど相互作用しない物質^{*1}」のことを指します。ざっくりと言うと、望遠鏡では直接見えないものの、確かにそこに「ある」物質... という感じでしょうか。難しいですね。望遠鏡では見えないのに、ダークマターという物質があると考えられるようになったのは、銀河中心から離れても銀河を回る星のスピードが遅くならないという観測があったおかげなのです。

2 宇宙の物質について数式にすると

*1 質量があって重力相互作用はあります

*2 実際に研究で扱うのは、これらのもっと複雑なバージョンですが、語り始めたら止まらなくなるので割愛!

*3 宇宙の晴れ上がりとも

*4 宇宙で遠くを見ると言うことは、より昔の様子を観察することに対応します

*5 太陽の質量を表す記号です

*6 BAO: Baryon Acoustic Oscillations

物理学では、自然現象を数式で表現して、その性質について議論します。ですので、宇宙の様子も数式にして表します。例として、よく使われる方程式を記しました^{*2}。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0 : \text{連続の方程式}$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}$$

$$= -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{f}$$

$$: \text{Navier - Stokes 方程式}$$

$$\nabla^2 \Phi(\mathbf{x}) =$$

$$4\pi G a^2 \left(\frac{m}{a^3} \int d^3 p f(\mathbf{x}, \mathbf{p}) - \rho_m \right)$$

$$: \text{Poisson 方程式}$$

3 バリオンとダークマターのスピード

では、バリオンとダークマターのスピードについての面白い話 [1] に入りましょう! 宇宙初期には水素の再結合^{*3}と呼ばれるイベントがあります。これは、ビッグバン後の高温高密度の状態から宇宙膨張により宇宙の温度が下がり物質密度が減少して、電子と陽子が結合し電気的に中性な水素原子を形成する現象です。この後の時代に、大規模なスケールで見て、バリオンとダークマターが、超音速の相対速度(速度の違い)を持つという重要な現象があるのです。

ダークマターとバリオンの相対速度は、数学的には2次の効果であり、線形な理論の範囲では無視されます。簡単に言うと、「めっちゃ小さな効果な

ので普通は無視する」として無視する」ということです。しかし、この相対速度は無視できないレベルの効果をもたらすことがわかったのです。

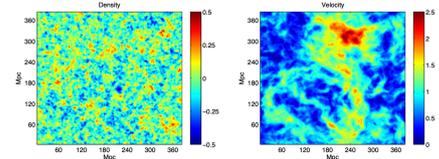


図 2: 赤方偏移 $z = 20$ における密度の相対的な変動の二次元スライス (左) および冷たい暗黒物質とバリオン間の相対速度の大きさの二次元スライス (右) を、A. Fialkov et al. (2013) がシミュレートしたもの。

より遠く^{*4}では、超音速の速度は $M \sim 10^6 M_{\odot}$ ^{*5} のハローの量に強い影響を与えます。ハローとは物質が自己重力で集まった塊のことです。これは宇宙で一番初めに生まれた星、すなわちファーストスターの形成を妨げるのだそうです。また、銀河の分布から測定されたバリオン音響振動^{*6}という現象へ伝播することもあります。また、中性水素の赤方偏移した 21 cm 線にも痕跡を残します。これは、星形成の黎明期や暗黒期の間の高赤方偏移宇宙を研究する、唯一の既知の手段なので、非常に重要です。

参考文献

- [1] A Fialkov, "Supersonic Relative Velocity between Dark Matter and Baryons: A Review", *Int. J. Mod. Phys. D* **23**(8), 40(2014)