

Introduction to Cosmology 2nd Edition

C1SB2064 辻 勇吹樹

2023 年 12 月 7 日

From 7.5 What's the Matter?[2]

1 暗黒物質の候補

表 1 暗黒物質の候補

分類	バリオン	非バリオン	非バリオン	非バリオン
名前	原始ブラックホール	ニュートリノ	アクシオン	ニュートラリーノ
特徴	宇宙初期から存在。 重力レンズで検出可能。	現在では否定。 弱い相互作用のみ作用。	未確認の素粒子。 電磁場とわずかに作用。	超対称性粒子の 1 つで 最も軽い。中性。
質量 (mc^2)	$10^5 M_\odot$	$\approx eV$	$\approx \mu eV$	$\approx GeV$
由来	ホーキングが予言 (1971)	背景放射で宇宙に広がる。 質量を持つ素粒子。	強い相互作用が CP 対称性をもって いるが理論上は 破れている項を 持つことから導入。	超対称性粒子の中で 最も軽く、R 対称性から 現在まで安定して 残っていると予測。

暗黒物質が存在する理由、検出する方法について前節までで確認した。それでは実際に暗黒物質の正体に迫っていこう。まず暗黒物質の必要条件は以下が挙げられる [3]。

- 光子とほとんど相互作用しない
- 質量を持つ
- 宇宙年齢以上の寿命を持つ
- 銀河スケール ($\sim 10kpc$) 以内に局在できる

前節で見たように暗黒物質には非バリオン物質が有力と考えられている。ただしバリオンの密度パラメータは観測されている星の密度パラメータの 10 倍以上であることも前節から確認したように、光では観測されないバリオン物質も存在する。その有力候補が「原始ブラックホール」である。あまり深くは触れないが $m_{BH} \sim 10^5 M_{sun}$ の質量を持つと考

えられている。ブラックホールとはいっても大質量星の重力崩壊で生成されるものとは異なり、初期宇宙の密度のムラで高密度の領域ができたことで重力崩壊してつくられたと考えられている。それでもブラックホールなので重力レンズ効果をもち、観測によって分布を調べることができる。しかし前節の通り重力レンズは局所的にしか発生せず暗黒物質のすべてを説明できるような分布を示してはいない。したがって非バリオン物質が暗黒物質の有力な候補として挙げられる。

2 ニュートリノ

ニュートリノは 5.1 節でも述べたように背景放射として宇宙に広がっている。光子が自由に動けるようになるよりも前の非常に高温であったときに、ニュートリノは宇宙に解き放たれて今もその時の記憶を伝えている。ニュートリノの数密度 n_ν と光子の数密度 n_γ はそれぞれフェルミ粒子とボーズ粒子であることから

$$n_\nu = \frac{1}{h^3} \int 2f_{FD}(\epsilon = cp) d^3p \quad (1)$$

$$= \frac{3\zeta(3)}{2\pi^2} \left(\frac{k_B T_\nu}{\hbar c} \right)^3 \quad (2)$$

$$n_\gamma = \frac{1}{h^3} \int f_{BE}(\epsilon = cp) d^3p \quad (3)$$

$$= \frac{2\zeta(3)}{\pi^2} \left(\frac{k_B T_\gamma}{\hbar c} \right)^3 \quad (4)$$

$$(5)$$

と求められる。ただしニュートリノは反ニュートリノの分も考えている。さらに電子の対消滅を考えることで

$$T_\nu = \left(\frac{4}{11} \right)^{1/3} T_\gamma \quad (6)$$

となることを示すことができる。またニュートリノには 3 つのフレーバー (ν_e, ν_μ, ν_τ) があるので実際には合計を考えると 3 倍になる。以上より

$$n_\nu = 3 \left(\frac{3}{11} \right) n_\gamma \approx 3.36 \times 10^8 \text{m}^{-3} \quad (7)$$

という関係が導かれる。ニュートリノは弱い相互作用のみを受けるので星間塵の吸収などを受けることもなく宇宙に広がることができる。しかし暗黒物質に必要な質量には達していない。ニュートリノの質量は 2 章で述べられたようにニュートリノ振動や宇宙の大規模

構造からの制限で

$$0.019\text{eV} < m_\nu c^2 < 0.1\text{eV} \quad (8)$$

を導くことができる (3 つのニュートリノの質量が同じと考えた場合)。一方非バリオン物質の密度パラメータは $\Omega_{dm,0} \approx 0.262$ で与えられる ($\Omega_{m,0} - \Omega_{bary,0}$) ことから

$$m_\nu c^2 = \frac{\Omega_{dm,0} \epsilon_{c,0}}{n_\nu} \quad (9)$$

$$\approx 3.8\text{eV} \quad (10)$$

と求められる。この値はニュートリノが暗黒物質のすべてを占めるためには先程の制限よりも 10 倍以上大きな質量をもつ必要があることを示している。またニュートリノ背景は光速に近い速度で飛び回っていることから、銀河スケールに局在するという条件を満たすことができない (熱い暗黒物質)。したがって現在ではニュートリノが暗黒物質として考えられることはない。

3 アクシオン

アクシオンはまだ発見されていない素粒子の一つである。この素粒子が登場した背景は、強い相互作用での CP 対称性である。CP 変換は、荷電共役変換 (C) 変換とパリティ (P) 変換を連続して行ったものである。C 変換では粒子と反粒子を入れ替え、P 変換では空間を反転させるものであり、弱い相互作用ではそれぞれは破れていて CP 変換でもわずかに破れている。一方強い相互作用では C,P,CP 対称性を持つが、強い相互作用を記述する Color の理論 (量子色力学) では破る項が存在する。この対称性を回復するために作られた理論の中で登場するのがアクシオンである。アクシオンはニュートリノとは異なりボーズ粒子であり、また電磁場とわずかに相互作用する性質を持っている。Buschmann et al(2022) によればアクシオンの質量はおおよそ $65\mu\text{eV} = 6.5 \times 10^{-5}\text{eV}$ であることがシミュレーションによって示されている [1]。もし暗黒物質のすべてをアクシオンで説明できるとすればその数密度 n_{ax} は

$$n_{ax} = \frac{\Omega_{dm,0} \epsilon_{c,0}}{m_{ax} c^2} \quad (11)$$

$$\approx 1.96 \times 10^{13} \text{m}^{-3} \quad (12)$$

と求められ、ニュートリノよりも 5 桁も多く分布する必要がある。アクシオンや次に紹介するニュートラリーノはひとまとめに WIMP と呼ばれ、ニュートリノよりは大きな質量を持ちながら弱い相互作用と重力のみが作用する。

4 ニュートラリーノ

「超対称性理論とは何か」[4] を参考にしている。ニュートラリーノは超対称性粒子の中で最も軽い粒子である。超対称性粒子とは、まだ見つかってはいないが標準理論やヒッグス粒子のいくつかの問題を解決するために考え出された素粒子群である。超対称性変換は整数スピンのボーズ粒子と半整数スピンのフェルミ粒子をまとめる変換であり、標準理論での素粒子に対応する、スピンの異なる超対称性粒子が存在する。例えば photon に対して photino, neutrino に対して sneutrino となる。しかしこれらの素粒子はスピン以外にも (これまで観測されていないことから) 質量の違いが存在し、超対称性は破れていると考えられている。それでも高エネルギーでは対称性があったと考えられていて重力を含む大統一理論の形成など多くの問題の処方箋として役立っている。

ニュートラリーノはニュートラリーノの対応する素粒子ではなく、photino, higgsino(\leftrightarrow ヒッグス粒子), zino(\leftrightarrow Z 粒子) の混合状態で作られるフェルミ粒子である。超対称性の理論では R 対称性を仮定していて、標準理論の粒子を R パリティ +1, 超対称性粒子の R パリティを -1 としてその積が反応の前後で変化しないこととしている。超対称性粒子が崩壊するときも必ずより軽い超対称性粒子が出る必要があるため、最も軽い超対称性粒子はそれ以上変化することができず非常に安定であることが R 対称性から導かれる。これを含めてニュートラリーノは暗黒物質の候補として上の 4 つの条件を満たしている。ニュートラリーノの質量は GeV オーダーであると考えられており、上の計算でもニュートリノよりも低密度でよいことが確かめられる。宇宙論の問題や素粒子の問題を一気に解決するため非常に有望視されてはいるがアクシオンと同様に未だ見つかってはいない。

参考文献

- [1] Malte Buschmann, Joshua W Foster, Anson Hook, Adam Peterson, Don E Willcox, Weiqun Zhang, and Benjamin R Safdi. Dark matter from axion strings with adaptive mesh refinement. *Nature communications*, 13(1):1049, 2022.
- [2] Barbara Ryden. *Introduction to Cosmology*. Cambridge University Press, 2 edition, 2016.
- [3] 敏史 二間瀬, 了 池内, and 柁司 千葉. 宇宙論 II. Number 3 in シリーズ現代の天文学. 日本評論社, 第 2 版 edition, 2019.
- [4] 富雄 小林. 超対称性理論とは何か : 宇宙をつかさどる究極の対称性. Number B-1960

in ブルーボックス. 講談社, 2016.