

ダークマターは高次元からくるか？

Are higher dimensional gauge fields the origin of Dark Matter?

中央大学理工学研究科博士課程前期課程物理学専攻 深澤 裕一
Department of Physics, Chuo University Yuichi Fukazawa

概要

ダークマターの存在は様々な観測から強く示唆されている。観測証拠として、銀河の回転曲線、大規模構造の形成、WMAPの観測データを紹介し、ダークマターを構成する粒子の候補として、ニュートリノと現在最も有力な候補と考えられている WIMPs について説明する。さらに、高次元理論を考えることで現れる粒子がダークマターを構成する粒子の候補になることを述べる。

1. イントロダクション

宇宙にはダークマターと呼ばれる、星などのように光っていない物質が大量にあることが分かっている。しかし、ダークマターを構成する粒子は素粒子物理における標準模型には含まれておらず、大きな問題の1つとされてきた。標準理論には幾つか問題があり、それらを解決するために高次元理論や超対称性理論など標準模型を超えた理論が提唱されてきた。近年の研究により、これらの理論を考えるとダークマターの構成粒子を自然に記述できる可能性があることがわかった。本論分では、特に高次元理論を考えることで現れる粒子がダークマターの良い候補になることを説明する。

2. ダークマターの証拠

2.1 銀河の回転曲線

ダークマターの存在を示す観測は数多くあるが、古くから指摘され、有力なものは渦巻銀河の回転曲線である。銀河の回転曲線とは、銀河にある星や水素原子の運動を示したもので、その回転速度は理論的には次式で表される

$$v(R) = \sqrt{GM(R)/R} \quad (1)$$

v : 回転速度 M : 中心から半径 r 内にある全質量 R : 銀河中心からの距離

(1)式から、回転速度は \sqrt{R} に比例して減少していくはずである。しかし、観測の結果、中心から十分離れた所でも回転速度はほぼ一定となるという観測結果を得た。この観測事実は、光っていない物質 (=ダークマター) が銀河周辺に半径 R に比例して分布していることを示している。

2.2 大規模構造形成

銀河は宇宙に均一に分布しているのではなく、銀河団同士が連結し、その合間にボイドと呼ばれる空洞領域が存在している事がわかっている。このような構造の形成には、ダークマターが重要な役割を担っている。また、構造形成の時期に速度が光速に近いダークマター (Hot Dark Matter) は小さな揺らぎを消してしまい、構造形成が成されない事がわかっている。そのため、ダークマターを構成する粒子は構造形成時に速度が遅く質量の重い粒子 (Cold Dark Matter) である必要がある。

2.3 WMAP

WMAP (ウィルキンソン・マイクロ波異方性探査機) による宇宙背景放射 (CMB; Cosmic Microwave Background) の観測から、様々な宇宙論パラメータに制限が付けられている。宇宙に占めるバリオン、ダークマター、ダークエネルギーの割合も求められており、

$\Omega_\Lambda = 0.73 \pm 0.04$ ダークエネルギー密度パラメータ

$\Omega_b = 0.044 \pm 0.004$ バリオン密度パラメータ

$\Omega_m = 0.27 \pm 0.04$ 全物質密度パラメータ

となっている。全物質密度とバリオン密度の差がダークマターの密度パラメータとなり、 $\Omega_{DM} \sim 0.23$ である。

3. ダークマターの候補

3.1 ニュートリノ

ニュートリノは標準模型に含まれている粒子で、質量を持つことが実験から確かめられたため、ダークマターの候補になりうると考えられていた。しかし、ニュートリノの寄与を調べることでダークマターの主成分ではないことがわかる。宇宙全体に占めるニュートリノの寄与は次式で表せる

$$\Omega_\nu h^2 = \frac{\sum m_\nu}{94eV} \quad (2)$$

実験から $m_\nu < 2eV$ とされているので、 $\Omega_\nu h^2 < 0.064$ となり、ダークマターが宇宙全体に占める量 $\Omega_{DM} h^2 = 0.12$ には足りない。よって、ニュートリノはダークマターの主成分ではないことがわかる。

3.2 WINPs(Weakly Interaction Massive Particles) ダークマター

WINP は宇宙初期に生成され、その後は生成されない。さらに、WINPs は安定な粒子なので、対消滅して標準模型に含まれる粒子に崩壊することでしかその粒子数は減らない。初期では WINPs 同士で衝突して崩壊することができるが、宇宙が膨張していくにつれ WINPs の密度は薄くなるので、やがて衝突することができなくなり、WINPs の粒子数が減らなくなる。つまり、ある時期に WINPs の粒子数が固定されることになる。このことを Freeze out という。この時の値を freeze out value: x_f で表す。

4. 高次元理論とダークマター

高次元理論を提唱したのは、Th.Kaluza(1921 に提唱) と O.klein(1926 に提唱) である。Kaluza と Klein は重力理論を 5 次元に拡張することで、重力理論と電磁気理論が統一できる可能性を指摘した。2003 年、高次元理論を考えることでダークマターの構成粒子を自然に記述できる可能性があることが指摘された。

4.1 高次元理論

4.1.1 コンパクト化

コンパクト化とは、5 次元目を円筒のように丸めることである。 $X^M = (x^\mu, x^5)$ 、 $M = (0, 1, 2, 3, 5)$: 5 次元時空。 $x^5 = y$ が 5 次元目の時空であり、半径 R の円: S^1 に丸める。つまり、

$$y \sim y + 2\pi R \quad (3)$$

とする。

具体的に、質量ゼロの実スカラー場 $\Phi(x^\mu, x^5)$ の方程式は

$$\partial^M \partial_M \Phi = 0 \quad (4)$$

半径 R の S^1 にコンパクト化することで、 をフーリエ展開する。

$$\Phi(x^\mu, x^5) = \sum_{-\infty}^{\infty} \Phi^n(x^\mu) e^{in \frac{x^5}{R}} \quad (5)$$

すると、

$$\begin{aligned} 0 = \partial^M \partial_M \Phi &= (\partial^\mu \partial_\mu + \partial^5 \partial_5) \Phi \\ &= (\partial^\mu \partial_\mu - m_n^2) \Phi^n(x^\mu) \end{aligned} \quad (6)$$

$$m_n^2 \equiv \left(\frac{n}{R}\right)^2 \quad (7)$$

n: Kalzua Klein モード

となる。このように、5次元目をコンパクト化することにより、質量項が現れる。この質量項はnに比例して増加し、n=1 のとき最も軽い高次元粒子となる。

n=1 の粒子を、Lightest Kalzua Klein Particle = LKP と呼ぶ。

4.1.2 オービフォールド

標準模型では弱い相互作用は左手型の粒子にのみ働くとされている。しかし、4.1.1で行ったコンパクト化ではフェルミオンのゼロモードは左手型と右手型の両方が対等に現れてしまい標準模型を再現できない。これは高次元理論におけるカイラリティ問題と呼ばれる。

この問題を解決する方法が、オービフォールドである。5次元理論におけるオービフォールドは S^1/Z_2 であり、 (x^μ, x^5) と $(x^\mu, -x^5)$ を同一視することである。

オービフォールドすることにより、フェルミオンのゼロモードは左手型のみ生き残ることができる。

具体的には、

$$\Phi(x^\mu, x^5) \rightarrow \Phi(x^\mu, -x^5) = P\Phi(x^\mu, x^5) \quad (8)$$

$$P = \{1, -1\}$$

P=1 のとき、 Φ_+ :左手型, P=-1 のとき Φ_- :右手型とし、

$$\Phi_+(x^\mu, x^5) = \sum_0^\infty \Phi^{(n)}(x^\mu) \cos \frac{nx^5}{R} \quad (9)$$

$$\Phi_-(x^\mu, x^5) = \sum_0^\infty \Phi^{(n)}(x^\mu) \sin \frac{nx^5}{R} \quad (10)$$

となる。よって、n=0 のゼロモードでは左手型である Φ_+ のみを残すことができる。

また、オービフォールド後にはKKパリティの保存が成立し、n=1 の粒子はKKパリティを保存するような崩壊ができず、安定な粒子になる。

4.2 UED における LKP の存在量

高次元理論として Universal Extra Dimension (=UED) と呼ばれるモデルにおける LKP について考えていく。UED とは全ての粒子が5次元目を伝播できるとする理論である。ダークマターの存在量を求める際の基本方程式は

$$\frac{dn}{dt} + 3Hn = - \langle \sigma v \rangle (n^2 - n_0^2) \quad : \text{ボルツマン方程式} \quad (11)$$

である。また、非相対論展開近似より

$$\langle \sigma v \rangle \sim a + 6b/x \quad (12)$$

これらより、

$$\Omega_\chi h^2 \sim \frac{1.04 \times 10^9}{M_{pl}} \frac{x_f}{g_*^{1/2}} \frac{1}{(a + 3b/x_f)} \quad (13)$$

となり、freeze out value は

$$x_f = \text{In} \left(c(c+2) \sqrt{\frac{45}{8}} \frac{g}{2\pi^3} \frac{m M_{pl} (a + 6b/x_f)}{g_*^{1/2} x_f^{1/2}} \right) \quad (14)$$

$$c = 1/2$$

となる。

L K P が光子の first KK mode : $B^{(1)}$ の場合、観測値 $\Omega h^2 = 0.16 \pm 0.04$ と一致するためには、質量は 900 ~ 1200 GeV 程度になる。

5. 結論

本論分では、ダークマターの観測証拠として、1) 銀河の回転曲線からダークマターが銀河周辺に存在していること、2) 大規模構造の構成に重要な役割を果たすこと、3) WMAP による精密な観測から宇宙全体の 23 % 程度を占めることを示した。さらに、高次元理論として Universal Extra Dimension モデルを選ぶことにより、KK パリティから LKP が安定であること、質量は数 100 GeV ~ 1 TeV 程度になることがわかり、高次元理論がダークマターの構成粒子を記述する良い候補になることを述べた

関連図書

- [1] Geraldine Servant, Tim M.P. Tait, Is the lightest Kaluza-Klein particle a viable dark matter candidate?; Nuclear Physics B 650 (2003) 391-419 [arXiv:hep-ph/0206071v2]
- [2] Hitoshi Murayama, PHYSICS BEYOND THE STANDARD MODEL AND DARK MATTER; Les Houches Session LXXXVI particle physics and cosmology the fabric of spacetime, arXiv:0704.2276v1]
- [3] Yoshiharu Kawamura, Gauge Symmetry Reduction from the Extra Space S^1/Z_2 ; Progress of Theoretical Physics, Vol. 103, no.3, March 2000 [arXiv:hep-ph/9902423v2]
- [4] 佐藤勝彦, 二間瀬敏史 編「宇宙論 - 宇宙のはじまり」, 日本評論社, 2008
- [5] 二間瀬敏史, 池内了, 千葉柁司 編「宇宙論 - 宇宙の進化」, 日本評論社, 2007