

暗黒物質

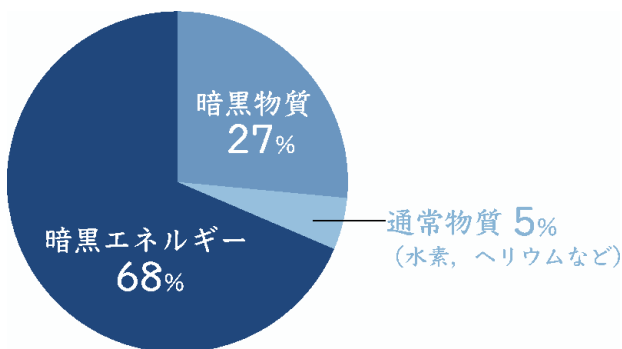
東京理科大学 創域理工学部 先端物理学科 准教授 あべ ともひろ
阿部 智広

1 はじめに

中学校で、身の回りのものは分子でできていて、分子は原子がいくつか集まったものである、と習うと思います。例えば水分子は H_2O で水素原子2つと酸素原子1つからできています。どんな原子があるかは周期律表にまとめられています。スイ・ヘイ・リーベ…などと覚えさせられた思い出がある方もいることと思います。

では、この世にある全ての物質は原子が組み合わさってできているのでしょうか？ いいえ、違います。なんと、この世界のほとんどの物質は原子ではできておりません。我々の宇宙に存在する物質のほとんどは「暗黒物質」です。

【図1】はプランク衛星による宇宙のエネルギー密度の測定結果です¹⁾。これによると、宇宙に存在する全ての原子を集めても、それは宇宙のもつエネルギーの、たった5%程度にしかなりません。では残りの95%はというと、およそ27%が暗黒物質、68%程度が暗黒エネルギーと呼ばれています。暗黒物質は重力ポテンシャルの源になり、暗黒エネルギーは宇宙を加速膨張させる働きをします。しかし、詳しい正体はわかっておらず、とりあえず名前がついているという状況です。以下では暗黒物質について説明します。



【図1】宇宙のエネルギーの内訳。アインシュタインの特殊相対性理論で有名な式、 $E=mc^2$ を用いて質量をエネルギーに換算して比較している。

2 暗黒物質と通常の物質との違い

暗黒物質と通常の物質の違いはなんでしょうか。暗黒物質は電氣的な力や磁氣的な力を感じない（電磁相互作用をしない）物質です。したがって、電磁波を放射したり反射したり吸収したりしません。電磁波というと馴染みのない方もいるかもしれませんが、可視光、赤外線、紫外線、エックス線などは波長が異なるだけで全て電磁波です。つまり、暗黒物質は、太陽のように自ら輝くこともなければ、通常の物質のように光を反射することも無い物質です。そのため通常の物質とは異なり、可視光やエックス線などでは観測できません。当たった光はそのまますり抜けます【図2】。暗黒と名前がついていますが、どちらかという透明なイメージです。

光だけではなく普通の物質と衝突しても、基本的にはそのまますり抜けます。これも電磁相互作用をしないことの帰結です。すり抜けてしまうので、直接触れることもできません。

ということで、暗黒物質は見ることもできなければ触ることもできません。ではどうして暗黒物質があるなどとわかっているのでしょうか。それは、万有引力の法則のためです。質量がある物体の間には引力が働きます。暗黒物質も例外ではありません。したがって、宇宙を観測していると、暗黒物質が集まっているところは、何も無いように見えますが、重力が生じています。光っている星や銀河の動きは重力で決まりますから、恒星や銀河の動きを観測することで間接的に暗黒物質の存在に気づくことができます。

暗黒物質の存在を示唆するものとして有名なものはツビッキーによるものです。彼は髪の毛座銀河団における銀河を観測し、銀河団の総質量を推定しました。また、銀河の速さも推定しました。銀河の速さがわかれば、ビリアル定理を用いることで銀河の総質量を理論的に求めることができます。このようにして総質量を2つの方法で求めて両者を比較したところ、異なる値が得られました。ちょっと違う程度なら誤差だと思えたかもしれませんが、なんと400倍も異なる結

果が得られました。彼はこのことから見えない物質が存在するのだと推測しました。

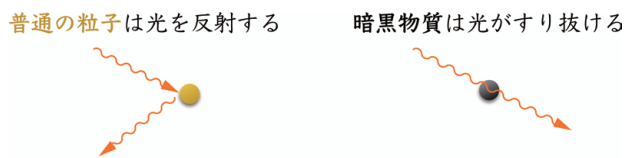
この他にも、暗黒物質の証拠はいくつもあります。星の動きから見えない重力源があることは、銀河を構成する星の速度と銀河中心からの距離の関係（銀河の回転曲線）を調べることでわかりました。ほかにも、銀河団同士の衝突の様子や、宇宙に銀河がどのように分布するか（銀河の大規模構造）の詳細な研究からも、暗黒物質がなければ我々が観測している宇宙は存在しないことがわかっています。さらに、すでに述べたように、プランク衛星による宇宙背景放射の測定（宇宙の温度の測定）から、宇宙に暗黒物質がどれだけの量なければならないかまで突き止められています。1つの測定を説明するだけなら暗黒物質以外にも測定結果を説明できる理論は構築できるかもしれません。しかし多くの測定があります。そして暗黒物質の存在を仮定することで、その多くの観測事実を一度に説明できるため、暗黒物質は存在するのだと考えられております。

3 WIMP 暗黒物質

暗黒物質は原子や分子など他の物質とは違うわけですが、ではその正体はなんなののでしょうか？ それはまだわかっていません。理論的には様々な可能性が指摘されており、どれが正しいかは、実験によってのみ決着がつきます。以下では様々な実験により検証が期待される WIMP 仮説（ウィンプ仮説）に着目します。

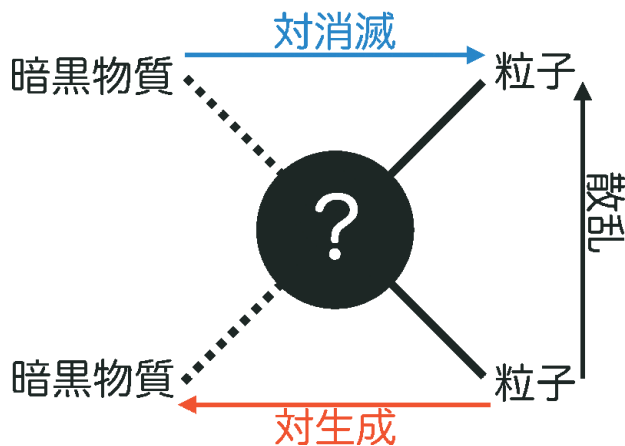
WIMP は Weakly Interacting Massive Particle の頭文字を繋げたもので、直訳すると、弱く相互作用する質量を持った粒子、となります。この仮説において、暗黒物質は通常の物質となんらかに弱く相互作用すると仮定します。この「弱く」というのは、電磁相互作用や重力相互作用のような長距離力ではなく、ベータ崩壊を引き起こす弱い相互作用のような短距離力だという意味です。相互作用が具体的になんなのかは、ここでは問いません。それこそ弱い相互作用でもいいですし、ヒッグス粒子の交換により生じる力でも構いません。あるいは、未知の力でも構いません。また WIMP 自体が未発見の素粒子と仮定します。

なんらかの弱い相互作用があると、様々な物理過程が予想できます。まず、暗黒物質の対生成過程が予想されます。これは十分なエネルギーを持った通常の粒子が2つぶつかるると暗黒物質粒子を2つ作ることができることを意味しています。【図3】で時間が右か



したがって「暗黒」というが実際には「透明」

【図2】普通の粒子と暗黒物質の違いのイメージ。



【図3】暗黒物質と通常の粒子の相互作用の概念図。点線と直線がそれぞれ暗黒物質と通常の粒子の散乱前後の軌跡を表している。中央の「？」の部分でなんらかの相互作用が生じているが、詳細は理論によるので隠している。このようにして対生成、対消滅、散乱などの各種反応が起こる。

ら左に流れていると考えてください。初期宇宙は十分高温であり、通常の粒子は高エネルギー状態であったと考えられています。それらの衝突のなかから暗黒物質が対生成され、それが現在の宇宙に残っていると考えられています。

また、対生成過程があると、加速器実験などで十分にエネルギーをもった粒子を2つ衝突させることで人工的に暗黒物質を生成することが予想されます。ただし残念ながら、これを執筆している時点では暗黒物質の生成に成功したという実験結果は得られておりません。暗黒物質を生成するのにエネルギーが十分ではない可能性や、暗黒物質を作れたとしてもそれを検出することの難しさなどもあるので、今後の実験の進展が待たれます。

対生成とは逆の反応も起こり、対消滅と呼ばれます。これは2つの暗黒物質粒子が衝突した際に消滅し、代わりに別の粒子が生成される反応です。【図3】でいうと、時間が左から右に流れている場合に相当します。この反応がいつまでも続くと暗黒物質は全て消えてなくなってしまいそうです。しかし、初期宇宙においては対消滅と対生成が同程度の割合で生じているため、暗黒物質が減りすぎると生成され、逆に生成されすぎると減るといふ、いわゆる平衡状態にあります。

宇宙は断熱膨張しているのでやがて温度が下がってきます。そうすると、対生成できるほどのエネルギーを持つ粒子がいなくなり、暗黒物質の生成がされなくなります。また、膨張によって暗黒物質の密度も減少します。対消滅は密度の2乗に比例しますから、対消滅も徐々に起こらなくなります。結果として暗黒物質の粒子数は固定されます。これを凍結機構 (freeze-out mechanism) と呼びます。現在の宇宙に存在する暗黒物質は、このようにして消滅を免れた残りかすだというのが WIMP 仮説による説明です。

凍結機構によって暗黒物質がどのくらい残るのかは、いくつかのもっともらしい仮定のもと、次の微分方程式で決まります。

$$\frac{dn}{dt} + 3Hn = -\langle\sigma v\rangle(n^2 - n_{\text{eq}}^2). \quad (1)$$

ここで n が暗黒物質の粒子数密度、 n_{eq} は暗黒物質が仮に対生成と対消滅をし続けていた場合の粒子数密度、 H は宇宙の膨張具合を表すハッブル定数、そして $\langle\sigma v\rangle$ は暗黒物質が対消滅する頻度を表す物理量です。この微分方程式を解くと、どれくらい暗黒物質が残るかわかります。実際に解いてみると、暗黒物質の対消滅が頻繁に起こるとあまり残らず、逆に対消滅が稀な反応であるとたくさん残ることがわかります。暗黒物質の量はすでに測定されているので、それを再現するためにはどれくらいの頻度で暗黒物質が対消滅しなければならぬかが決定できます。数値計算の結果によると $\langle\sigma v\rangle \approx 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ 程度であれば現実を説明できることがわかります。この値は大きすぎず、かといって小さすぎずといった値で、暗黒物質と通常の粒子がなんらか弱く相互作用しているとちょうど再現できる程度の値となっています。

対消滅過程は凍結機構のためだけではなく、暗黒物質探索にとっても重要です。凍結機構のところで、宇宙膨張によって暗黒物質の密度は減少し、そのため対消滅も徐々に起こらなくなると述べました。しかし、対消滅の確率が0になるわけではありません。現在の宇宙でも暗黒物質の密度が大きい領域では暗黒物質の対消滅が起こり得ます。ではどこで密度が大きいかというと銀河中心です。銀河中心には大量の星があり重力が非常に強いです。その重力に引かれて暗黒物質は銀河中心にたくさん集まっている、すなわち密度が大きくなっています。他にも矮小楕円銀河など、暗黒物質の密度が大きい領域が宇宙には存在します。そういった領域で暗黒物質が対消滅すると、最終的に陽電子やガンマ線などが生成されます。それらは宇宙線と

して観測されます。宇宙線は銀河や星の活動によっても生成されますが、それらがどの程度生成されるかはわかっています。それらにくらべて過剰に宇宙線が観測されたなら、それは暗黒物質の対消滅によって生成された宇宙線である可能性があります。このようにして暗黒物質の存在を確認することを間接検出とよびます。間接検出ができれば暗黒物質の質量と対消滅断面積 (対消滅が起こる頻度) の大きさについての情報が得られます。対消滅断面積は凍結機構で要求される $\langle\sigma v\rangle$ と関係づきます。どのような関係があるかは暗黒物質の詳細な性質によりますが、単純な場合には $\langle\sigma v\rangle$ とほぼ一致します。したがって、間接検出から対消滅断面積の大きさがわかれば、それを $\langle\sigma v\rangle \approx 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ と比較することで、暗黒物質が凍結機構によって生成されたのかどうかを検証することができます。

次に暗黒物質粒子と通常の粒子の散乱過程を考えます。これは【図3】で時間が下から上 (あるいは上から下) に流れている場合に相当します。凍結機構を認めると、対消滅の頻度がある程度あることが要求されるため、散乱もある程度の頻度で起こることが期待されます。この散乱過程を利用することで、地球上で暗黒物質を検出することができます。暗黒物質は宇宙にあり、地球も宇宙にありますから、地球は暗黒物質の海の中を移動しているとみなせます。そのため地球から見ると暗黒物質は宇宙から降り注いでくると見えます。その降り注いでくる暗黒物質は適切な検出器を用意しておけば検出できるだろうというのがアイデアです。例えば、液体キセノンを大量に用意しておく、降り注いできた暗黒物質がキセノン原子核と散乱することが期待されます。散乱した原子核は反跳するので、それを観測すれば暗黒物質が到来したことがわかります【図4】。ただし、暗黒物質以外にも、宇宙線や環境放射線などとキセノン原子核が散乱することもあるため、注意深く実験する必要があります。この手の実験を暗黒物質の直接探索実験と呼びます。直接探索実験は、複数の実験グループがそれぞれの実験装置を使って暗黒物質の検出を試みています。何十年も前から実験が行われておりますが、暗黒物質の到来だと誰もが納得できる事象は検出されておられません。このことから、暗黒物質は通常物質と散乱しないのだと結論づけたくなるかもしれませんがそれは早計です。この実験結果から言えることは、暗黒物質は通常物質との散乱の頻度はこれこれ以下だ、ということしか言えません。この散乱の頻度を表す物理量は散乱断面積と

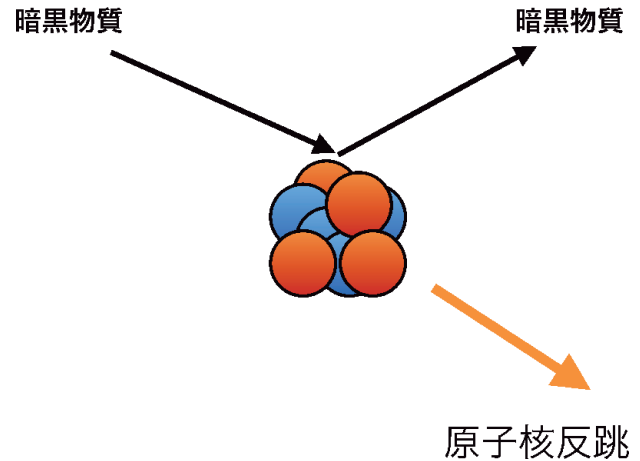
呼ばれ、これに上限がついています。暗黒物質の質量によって散乱断面積の上限は異なりますが、例えば暗黒物質の質量が $30 \text{ GeV}/c^2$ のときの上限値は $6.5 \times 10^{-48} \text{ cm}^2$ となっています²⁾。

対消滅の断面積の大きさは凍結機構と測定結果から決まってしまうこと、暗黒物質と通常の粒子との散乱断面積の大きさには直接検出から上限があることを説明しました。対消滅と散乱の頻度は、【図3】から推測できるように、互に関係づいていそうです。実際に、素朴な暗黒物質の理論を構築して計算してみるとおおよそ比例関係にあることがわかります。これが、なかなかの曲者です。なぜなら凍結機構がうまくいく対消滅断面積の値から素朴に期待される散乱断面積は、実はこの直接検出実験でわかった散乱断面積の上限値よりも大きいのです。このままでは実験結果と矛盾してしまいます。このことから、対消滅の頻度と散乱の頻度とが互に関係づいてはいけなことがわかります。WIMP 仮説がうまくいくためには、対消滅の断面積が適切な値のまま、散乱の頻度をうんと下げるような機構が必要です。【図3】でいうならば、左右の反応は保ったまま、上下の反応は抑制する必要があります。そんなことは可能なのでしょうか？

可能です。代表的なものであれば、ウィーノ暗黒物質 (Wino) があります。これは素粒子論で人気のある超対称性理論に基づくモデルでしばしば予言される暗黒物質で、散乱断面積の予言値は、直接探索からの現在の制限値よりも2桁小さい値となっています³⁾。したがって、現状はなんの矛盾もありません。むしろ直接実験の進展で検証される可能性があります。他の可能性としては、最近私が研究している擬南部ゴールドストーン (Pseudo-Nambu-Goldstone = PNG) 暗黒物質^{4,5)}などがあります。これは対称性の自発的破れをうまく使ったモデルなのですが、専門的になりすぎるのでここでの説明は控えます。他にも様々なアイデアが提案されています。

4 おわりに

暗黒物質の導入的なことと WIMP 暗黒物質について、かいつまんで説明しました。現状、直接探索実験の新しい結果が1~2年ごとに報告されておりますが、なかなか発見には至りません。発見の代わりに、実験からの制限が徐々に強くなってきている状況です。そのため、これまで研究者が思い描いていた暗黒物質像は徐々に変わってきています。また、今回触れた



【図4】直接探索実験の概念図。暗黒物質が原子核と散乱する様子を描いている。ほとんどの暗黒物質は原子核と散乱せずすり抜けるが、WIMP 仮説では稀に図のような散乱が起こると期待されている。散乱が起こるとエネルギー・運動量保存則にしたがって原子核が吹き飛ばされるので、それを利用して飛んできた暗黒物質を検出する。

WIMP 仮説以外にも、アクシオン暗黒物質、軽い暗黒物質シナリオなど、様々なアイデアがあります。軽い暗黒物質は、原子核反跳ではなく電子との散乱を用いるのが効率的なため、新しい検出方法も提案されている状況です。暗黒物質の研究の進展には今後も目が離せません。

【参考文献】

- 1) N. Aghanim *et al.* [Planck], *Astron. As-trophys.* **641** (2020), A6 [erratum: *Astron. Astrophys.* **652** (2021), C4] doi: 10.1051/0004-6361/201833910 [arXiv: 1807.06209 [astro-ph.CO]].
- 2) J. Aalbers *et al.* [LUX-ZEPLIN], *Phys. Rev. Lett.* **131** (2023) no. 4, 041002 doi: 10.1103/Phys. Rev. Lett.131.041002 [arXiv: 2207.03764 [hep-ex]].
- 3) J. Hisano, K. Ishiwata and N. Nagata, *JHEP06* (2015), 097 doi: 10.1007/JHEP **06** (2015) 097 [arXiv: 1504.00915 [hep-ph]].
- 4) C. Gross, O. Lebedev and T. Toma, *Phys. Rev. Lett.* **119** (2017) no. 19, 191801 doi: 10.1103/Phys. Rev. Lett. 119.191801 [arXiv: 1708.02253 [hep-ph]].
- 5) T. Abe and Y. Hamada, *PTEP* **2023** (2023) no. 3, 033B04 doi: 10.1093/ptep/ptad021 [arXiv: 2205.11919 [hep-ph]].

