



ダークマターとは何か

森山 茂栄

Moriyama Shigetaka

1. ダークマターの由来とその性質

宇宙に興味がある方ならば、ダークマターという言葉を目にされたことがあるでしょう。あわせてダークエネルギー^{*1}という言葉もご存知かもしれません。西暦 2000 年前後に打ち上げられた人工衛星を使って、宇宙が始まった時に放出された電波の詳しい観測結果が発表された頃から特にこれらの言葉が有名になったように思います。これら宇宙初期の研究は、1930 年代から宇宙のあちこちで見られていた、“見えないけど何かある”現象の正体を解明することに大きな一歩を与えました。得られたデータの解析により、宇宙の物質やエネルギーの総和の 68% はダークエネルギーと呼ばれる宇宙の膨張を加速する不思議なエネルギー、27% はダークマターと呼ばれる私たちが知らない物質、最後の 5% だけが私たちがよく知っている原子や分子などであることが分かりました。子供の頃から習ってきた“私たちの周りの物質は原子や分子でできています”との説明には、大きな見落としがあったことがはっきりしたのです！

^{*1} ダークエネルギーについては分かっていないことが多いのですが、極めて興味深い研究が進んでいます。これから 10 年程度かけてダークエネルギーの検証が進んでいくと期待されています。興味のある方は是非参考文献 1) をご覧ください。

ダークマターの正体を解明する研究を説明する前に、物質とは何か、ダークマターは原子や分子とはどこが違うのかを一度振り返ってみましょう。図 1 に、現在私たちが知っている全ての粒子を示しています。大きく分類すると、(1) 物質の基となる粒子、(2) 力を媒介する粒子、(3) 粒子に質量を与えるヒッグス粒子、に分けられます。物質とはこの (1) に当たりますが、ダークマターはこれらと決定的に違う点があります。それは電気を帯びていないことと、十分な重さを持つことです。もしダークマターが電気を帯びていると光や電波で観測できてしまい、観測事実と反するため、ダークマターは電気を帯びていないと考えられます。2 つ目はダークマターは重くないといけないことです。これは宇宙の歴史を考えたとき、ダークマターが軽すぎると物質の凝縮を阻害し宇宙の成長が遅れ、観測事実と反するからです。例えば (1) の中で電気を帯びていない粒子はニュートリノですが、ダークマターになるには軽すぎるのです。更に考えると、条件がもう 1 つあります。それは、壊れる性質があるとしても宇宙の年齢くらいの寿命があることが挙げられます。宇宙の初期に作られたとしても、今壊れてなくなってしまったのでは、ダークマターとして役割を果たせないからです。(2) や (3) のうち質量のない光以外はすぐに壊れるので、

物質粒子				力を媒介する粒子
	第一世代	第二世代	第三世代	強い力 グルーオン
クォーク	アップ ダウ	チャーム ストレンジ	トップ ボトム	電磁力 光子
レプトン	電子ニュートリノ 電子	ミューニュートリノ ミューオン	タウニュートリノ タウ	弱い力 W, Zボゾン

ヒッグス場に伴う粒子：ヒッグス粒子

図1 私たちの知っている素粒子たち

ダークマターにはなり得ません。

さて、ダークマターと名前が付いていて、さも分かったかのように説明をしてくれています。正直に告白するとその正体は上の性質以上のことは分かっていません。これはとりわけ、ダークマターが存在すると証拠づけるデータの全てが、重力の働きによって引き起こされる現象を基にしているため、重さがあること以上の性質を教えてくれないからです。それではダークマターの正体が皆目見当がつかないかというと実はそうではありません。素粒子の研究者は、素粒子の理論を深く考えるとうまく説明できないところがあることを知っていて、それを解決する“理屈”を考え出すのが得意です。そしてそれらの“理屈”が正しければ、これまで未発見の素粒子の存在を予言する場合があります。もしその素粒子がダークマターだとしたらどうでしょう。一石二鳥、エコノミカルな解決方法なわけで、できるだけ単純な理屈を好む研究者が大好きな考え方なのです。

その1つの未発見の素粒子がニュートラリーノと呼ばれる超対称性理論が予言する粒子です。超対称性は、ヒッグス粒子が安定であることを説明できることや、素粒子の世界をより統一的に理解させてくれる極めて興味ある理論です。もしニュートラリーノがダークマターだったら、素粒子物理学の研究者は世の中が簡潔に成り立っていることを発見して大喜びでし

う。ほかにもアクシオンと呼ばれる粒子も考えられています。これは陽子や中性子を結び付ける力に関連するある値を測定すると、理論的には1くらいの量があっても良さそうなのに、実験結果は 10^{-10} 以下となっている不自然さと関係しています。アクシオンはこの不自然な状況をうまく説明してくれる“理屈”に関係しています。これらの例は“動機が強い”ダークマターの候補として有名です。ここではニュートラリーノ

を例にとってその性質を明らかにする実験を紹介してみます。

2. ダークマターの探索実験とその現状

ニュートラリーノの研究も、普通の物質でできた実験装置を使って行うしかありません。もしダークマターが普通の物質にぶつかる現象があればそれを利用できます。ニュートラリーノは普通の物質とぶつかり合う性質があり、図2はそれを示しています。ぶつかり合うさまは上から下に見た時の現象ですが、ほかにも左から右、右から左に見ることもできます。それぞれの見方によって3つの測定方法が考えられています。(1) 身の回りに飛び交っているダークマターが原子や分子に衝突するところを観察すること、(2) 2つのダークマターが出会い頭に消滅して、光やその他の粒子になるところを観察すること、(3) 加速器を使ってダークマターの候補を製造すること、です。これらを通じて、ダークマターの質量や空間的性質、その他どのような物質とどのようにぶつかるかを測定できるので、ダークマターのより詳しい性質を明らかにできると考えるわけです。それでは、この3つを順次説明していきます。

(1) 直接探索と呼ばれているもので、現在最も進んでいます。図2に示したダークマターが物質を跳ね飛ばすさまを詳しく計算すると、原子番号の大きな原子核を跳ね飛ばす確率が大き

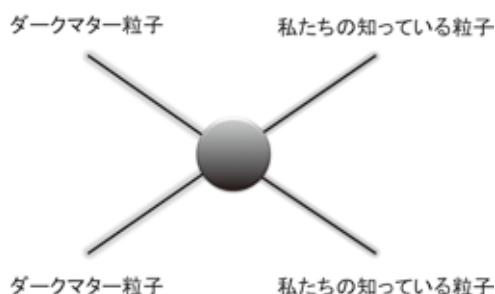


図2 暗黒物質の様々な探索法

上から下に見ると、ダークマター粒子が私たちの知っている粒子を跳ね飛ばすように見える（直接検出）。左から右に見るとダークマター粒子が衝突して消滅し、私たちの知っている粒子に変換される（間接検出）。逆に右から左に読むと加速器でダークマター粒子を作るように見える。灰色の部分では様々な相互作用があり得る

いことが分かっています。ニュートラリーノの質量は、陽子の100倍か、もっと重いと思われる傾向があるため、原子核を跳ね飛ばす効率が高いのです。原子核の候補としては実験的に有利なXeやGe等が選ばれてきています。Xeの場合、 -100°C にすると液体になるので、その状態で利用されます。ダークマターがXe原子核を跳ね飛ばすと、光が出るとともに、イオンや電子が生じます。そこに電場を掛けておくと、イオンや電子の電荷信号も読み出すことができます。この光と電荷の信号を利用すると、ありふれたノイズ源である電子を跳ね飛ばす事象を排除して原子核を跳ね飛ばした事象だけを選ぶことができ、高感度の実験ができます。図3に、現在までに行われた直接探索による制限曲線群を示します。横軸はダークマターの未知の質量で、縦軸はダークマターと核子（陽子や中性子）を跳ね飛ばす断面積を表します（実験には様々な原子核が用いられますので、比較がしやすいように核子との断面積に変換して描かれています）。ダークマターの性質は分かっていますが、この2次元平面上のどこかの点が答えだと考えます。まず、左上の塗りつぶされた領域を見てください。これは幾つかの実験のデータに、ダークマターの信号と矛盾

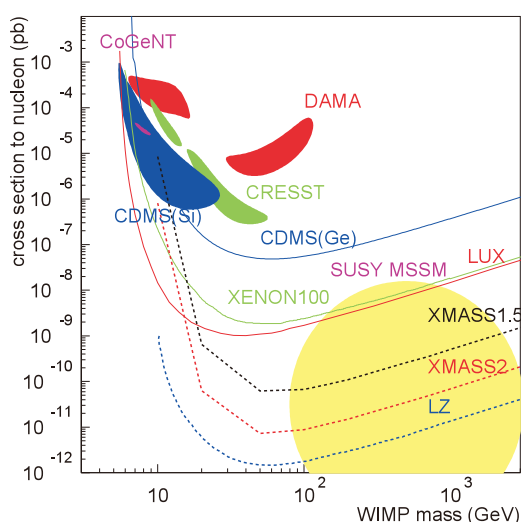


図3 直接探索の現状

左上の塗りつぶされた領域はダークマターらしき信号を見付けたグループの主張する領域。実線は信号が見付からず、その上の領域を否定しているもの。両者は矛盾しているように見える。右下の黄色の領域は最も簡単な超対称性（SUSY MSSM）理論の予言する領域。点線は、今後の計画の感度を示す。真の発見を期待したい²⁾

しないデータが含まれたため、それらをダークマターに由来するものと考え、ダークマターの質量や断面積を求めたものです。これだけ見ると、ダークマターが見付かったのかと思いたいのですが、一方で何本か曲線も描かれています。これらは別の実験ではダークマターの信号が見付からなかったため、その線より上の領域の可能性を否定したことを意味します。左上の塗りつぶされた領域はこれらの実験により否定されてしまっているのです、誰もが認めるダークマターの存在の証拠はありません。なお、実験の感度は線が下になればあるほど高く、現在LUX実験が最も感度が高いことを意味しています。これを見るだけでも世界中の研究者がダークマターの発見について非常にホットな戦いをしていることが分かります。なお、黄色で塗りつぶした領域は、ダークマターがニュートラリーノだとした場合にあり得る領域を示しており、将来実験の感度を徹底的に上げてこの部分

を調査していくのが世界中の研究者が望んでいることです。この方法が打ち勝つべきものは、Xe 等ダークマターのぶつかる物質の量を増やすことと、ダークマターの信号と間違ふ可能性のあるバックグラウンド事象を減らすこと、そして得られた信号がダークマター由来であることをいかに証明するかに掛かっています。点線で書かれたものは将来の実験計画の感度を示しており、将来の LZ 実験や、筆者の参加している XMASS^{*2} 実験もこれらの領域に深く踏み込み、発見を狙う計画を持っています。

(2) 2 つ目は、間接検出と呼ばれる方法です。これは、図 2 を左から右に見た時に、ダークマターの 2 つの粒子が出会い頭に普通の粒子に変換されてしまうことを利用します。例えば変換後に γ 線が 2 つ発生するとしたら、宇宙のあちこちからダークマター由来の γ 線が観測されることになります。このような γ 線に限らず、陽電子や反粒子を探す実験も多数行われています。現在までのところダークマター由来であると確信が持てる信号は得られてきていません。間接検出手法では、ほかの理由（例えば星の効果等）によってダークマターの信号のような信号があり得ると、ダークマターの証拠として利用することができません。しかし、 γ 線やニュートリノ等の観測で特徴的なエネルギー（ダークマターの質量に相当する）を持つ信号が多数得られる等、ほかには説明のできない現象が観測されれば確実な証拠として認識される可能性があります。CTA 実験計画等、大型の γ 線望遠鏡の建設に期待が集まっています。

(3) 最後は加速器を用いた研究です。これは図 2 を右から左に読む、つまりダークマターを製造する野心的なアプローチです。ヨーロッパで行われている LHC 実験では、既に探索が行われています。ニュートラリーノが作られる

と、検出器に捉えられないため特徴的なパターンが見付かるはずですが、これまでの探索では証拠は得られていませんが、2015 年からエネルギーを上げて更に高感度の探索が行われます。素粒子の研究者はいよいよ超対称性理論の信号が得られると期待しています。加速器で発見された新粒子が本当に宇宙にあふれるダークマターであるかどうかは直接探索や間接探索との両輪で進める必要がある一方、加速器では細かい研究ができます。こうなれば一気にダークマターの理解が進むと期待されています。

3. ダークマター探索のこれから

さて、ざっとダークマターの候補とその研究について述べてきましたが、近年少し違った候補を考えようという考えも生まれてきています。それは、原子核を跳ね飛ばす現象をこれだけ探索しているのに誰もが認める信号はまだ発見されないこと、LHC での探索で超対称性の兆候が見えないこと等に影響されています。本当に陽子の 100 倍やそれ以上といった重いニュートラリーノを中心に探索するばかりでよいのか？ もっと広い種類のダークマターを探索すべきではないか？ との考え方です。そこで考えられているものの 1 つは、“軽い”ダークマターと呼ばれるものです。図 3 で左上に幾つかダークマターの存在を示唆するデータがあったこともその興味を加速しました。“軽い”ダークマターは検出器に付与するエネルギーが小さいため、これまで探索が難しかったものです。近年、工夫を行うことにより陽子の何倍か程度の軽いダークマターに感度があるようになってきています。ほかに気になる点は、これまでのダークマター探索の高感度化は主として原子核を跳ね飛ばす信号だけに感度があるように工夫されてきた点です。もしダークマターが原子核だけでなく、電子を跳ね飛ばすような性質があるものだとすると、すっかり信号を見落としていたのかもしれない。

実は筆者が関わっている XMASS 実験の検出

^{*2} XMASS 実験は約 1 t の液体 Xe (約 -100℃) を用いてダークマターを直接探索することを目的としている実験。

器は、この視点にぴったり合うものです。XMASS 実験も前出のように液体 Xe を用いていますが、電荷の信号を用いて電子を跳ね飛ばす信号を排除して原子核を跳ね飛ばす事象だけを選ぶことをしません。これは検出器の“ノイズ”となる現象を減らしづらい弱点でもあります。逆に電子を跳ね飛ばす信号も含めて高感度で捉えることができる強みでもあります。例えば最近行った研究では、極めて弱く相互作用する質量を持ったボゾン型の素粒子がダークマターの可能性があるかどうかを検証しました。ボゾン型であることは、ダークマターの質量がエネルギーに転化し、明白な信号としてキャッチできることを意味します。XMASS 実験装置は、世界一大量の液体 Xe を用いていながら、電子事象を含めたバックグラウンドが世界一低いのが強みです。169 日分の観測データを詳しく調べたところ、残念ながら信号は見当たりませんでした。探索結果は図 4 にまとめられています。図が 2 つありますが、上はダークマターが擬スカラーである場合で、下がベクトル粒子である場合です。横軸がダークマターの質量、縦軸は吸収のされやすさと考えてください。特にベクトル粒子である場合は、黒実線の上に本当の答えがあれば、観測されているダークマターの量をちょうどぴったり予言することが期待されています。太い実線は筆者らの探索結果を表しており、この線より上の領域には本当の答えはないことを意味します。つまり、探索された質量範囲においてはこのベクトル粒子で全てのダークマターを説明することができないことを証明したのです。これは大きな成果として認められ、アメリカの物理学会誌 *Physical Review Letters* に記載され、面白くたくさんの人に読んでもらいたい論文 (Editors' Suggestion) として選抜されました³⁾。

このようにダークマターの正体はまだ解明さ

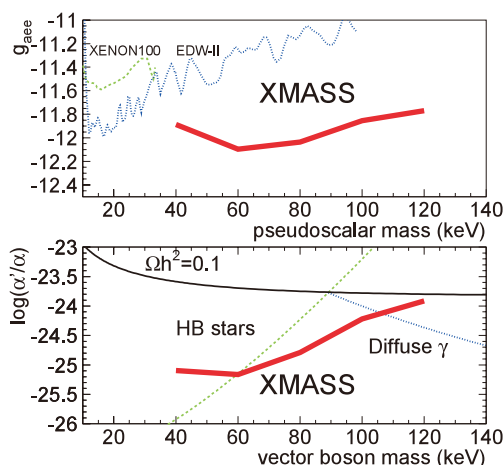


図 4 XMASS 実験による電子と相互作用するダークマター候補の探索結果

上は擬スカラー、下はベクトル粒子の探索結果。下の図に示した黒線はベクトル粒子がダークマターとなり得る条件を示している。XMASS 実験の結果はその興味ある領域の検証に世界で最初に成功した。本文参照³⁾

れていません。本当に超対称性理論の予言するニュートラリーノかもしれませんし、全く違う性質を持つ粒子なのかもしれません。こういった粒子なのか、研究者は様々な考えを持って探索しています。ただし、実験的な探索の感度はこの 10 年で何桁も向上しており、近々発見されるのではないかと期待されています。最大の宇宙を研究することによって、最小の素粒子物理学の研究が進むなんて、面白いですね。今後ともダークマターの探索に注目してください。

参考文献

- 1) 松原隆彦, *RADIOISOTOPES*, **63**, 201–213 (2014)
- 2) Akerib, D.S., et al., *Physical Review Letters*, **112**, 091303 (2014), and references are therein.
- 3) Abe, K., et al., *Physical Review Letters*, **113**, 121301 (2014)

(東京大学 宇宙線研究所)