

- 岩波『科学』2023年10月号特集「ダークマターの正体は何か？」
- タイトル「ダークマターはどこまでダークなのか？」
- 山崎雅人（やまざきまさひと）  
 東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構  
 専門：素粒子理論，超弦理論，数理論物理，その他理論物理学  
<http://member.ipmu.jp/masahito.yamazaki/index-j.shtml>
- 著書：『場の理論の構造と幾何』2015年，サイエンス社

リード文：ダークマターはその名の通り「ダーク」な物質であり，その正体を突き止めることは容易ではない。それでは，そもそもダークマターは一体どこまでダークでありうるだろうか？ この問いを追究する過程で，我々は宇宙開闢の時を記述する量子重力の理論にまで遡り，我々の宇宙そのものの謎に迫ることになる。

## 覆面バンドとしてのダークセクター

ダークマター（暗黒物質）が何であるのかを説明するのは難しい。ダークマターについていろいろ勉強してみても，結局具体的なイメージがなかなか湧かないという感想をおもちの方も少なくないのではなかろうか。実際のところ，ダークマターの正体が何であるのかは専門家であってもさっぱりわからないのだから，そういう感想が出てくるのはまったくもって当然のことだ。

ダークマターをむりやり人間にたとえることにすれば，いわば正体不明の覆面歌手といったところだろうか。年齢も国籍も性別も不詳だし，発表される作品の声もコンピューターで加工してあるかもしれないので，例えば何となく可愛らしい若い女性を想像していたら実際は中年男性だったということがあってもおかしくない。また，ダークマターが一人の歌手である保証もなく，複数名からなる覆面バンドの一員という可能性もある。このとき，ダークマターを含む覆面バンドの全体を「ダークセクター」と呼んでいて，そのメンバーには例えば我々の世界のフォトン（光の粒子）に相当する「ダークフォトン」が含まれている可能性がある。いわば，我々の世界が「この世」であるとすると，「あの世」に存在するのがダークセクターというわけだ。ダークマターの正体はまったく謎に包まれているが，だからこそ科学者にとって考え甲斐のあるトピックであることも確かだ。

しかし，そんなに正体が謎めいているのならば，そもそもなぜダークマターが存在するということがわかっているのだろうか？ 覆面歌手ならばとりあえずCDを発売したりYouTubeに動画を公開したりするので世に知られるようになるだろうが，人里離れた山小屋に閉じこもって一人生活していたら誰もその存在に気づかないだろう。ダークマターだって我々の世界とまったく隔絶されていたならば我々の知るすべはないのではないか？ そんなに「ダーク」ならば，なぜ僕らはダークマターがあることを知っているのだろうか？

この問いに対する答えとして登場するのが重力である。ダークマター（暗黒物質）はその名の示す通り「物質」であるが，重力は普遍的な力であり，どんな物質であっても重さ，物理学の言葉でいえば質量に比例した重力が作用するのである（図1）。そこで，ダークマターの質量が宇宙の進化に及ぼす影響を調べてやれば，少なくともダークマターが存在する証拠が得られるというわけである。先ほどのたとえ話で無理やり説明すれば，仮に開かずの扉をもつ山小屋の中にこもっていても，その人の体重はゼロではないから，山小屋全体の重さを正確に測定してやれば，その人が外出中かどうかは原理的にはわかるということだ。ダークマターは，現在の宇宙のエネルギー密度の4分の1ほどを占めているのだから，ダークマターがなくなってしまうと宇宙の歴史に相当なインパクトがあり，その存在に気づいたとしても変な話ではないだろう。

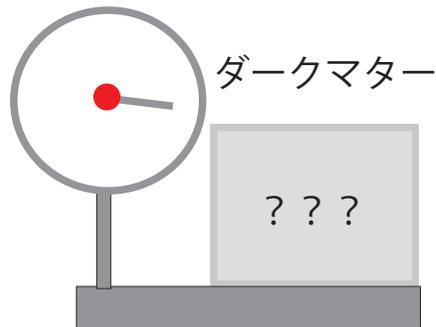


図1 ダークセクターは覆面集団か？ その正体は不明だが、彼らに体重があることは確かである。

それでは重力以外の力についてはどうだろうか？ 現在のところ、ダークマターが重力以外の力で相互作用するかどうかはまったくわかっておらず、その相互作用の強さに上限がついているだけである。例えば重力と別の力の一つに電磁気力がある。学校の理科の実験で扱う電流は電子の流れだが、仮にダークマターがこの電子のように電荷  $-1$  をもって電磁気力で相互作用をしたとするとその効果が既に実験的に検出できているはずである\*1ので、ダークマターは仮に電荷を持っていたとしてもその電荷はとても小さくしなければならない。電磁気力のほかにも、例えば原子核をまとめている力を記述する「強い力」があるが、ダークマターがこの力で相互作用したと仮定すると、原子核を使ってダークマターを検出できるはずである（このような実験をダークマターの直接検出実験と呼ぶ）。したがって、ダークマターと原子核の相互作用の強さにも強い制限が与えられる。

このように、ダークマターとの重力以外での相互作用については、観測的にはその大きさに上限がつけられているにとどまっている。現在も多数の方法でダークマターの検出の努力が続けられているが、今のところ重力以外の力についてはダークマターの性質はまったく未知であるというのが現状である。

## 重力が一番弱い？

しかしあらためて考えてみると、ダークマターが重力を通じて相互作用しているのに、なぜほかの力、例えば「強い力」で探索するのが難しいのだろうか？ 実は、これは我々の住んでいる世界から類推するとかなり異例の状況である。

我々が日頃暮らして一番気になる力は多分重力なので、重力が一番重要というのは自然に思われる方も多だろう。実際、物理学もニュートンが重力を定式化することによって学問としての地位を確立した歴史をもつ。しかし、実際には我々の世界では電磁気力の方が重力よりも圧倒的に強い。例えば理科の実験で使うような砂鉄があったとすると、この砂鉄に働く重力は巨大な地球全体に由来するが、手元に小さな磁石があったとすると、砂鉄は重力に逆らって磁石にくっつく（図2）。つまり、磁石由来の電磁気力の方が、地球由来の重力を軽々と凌駕してしまうのだ。この事情は、ミクロな世界を記述する素粒子の世界にいくと一段と鮮明になる。重力は常に引力であるのでマクロな世界では足し上がりその力は増幅されるが、ミクロな世界ではその力が一段と弱くなってしまいうのである。原子核を記述する「強い力」は、その名の通り原子核のスケールでは電磁気力よりも一層強いので、重力よりも格段と強い力になっている。

このように考えてみると、我々の世界はなかなか絶妙なバランスのもとにできていることに気づかされる。

\*1 ダークマターの電荷への制限については、例えば [1] を参照。

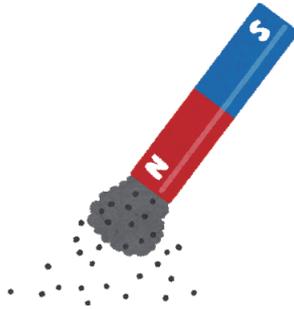


図2 磁石を使うと砂鉄を持ち上げることができる。このとき、磁石の電磁気力は地球全体の重力に打ち勝っている。重力はとても弱い力なのだ。

つまり、ミクロなスケールでは重力はとても弱い力であり、素粒子を議論する際にはしばしばその効果は無視されてしまう。しかし、重力には常に引力であるという性質があり、星や銀河、さらに宇宙スケールを考えるとその効果は足し上がって増幅される。一方、電磁気力は重力に比べて圧倒的に強いが、電荷の符号に応じて引力にも斥力にもなり得るし、その結果正の電荷があったとしてもそれは負の電荷を引き寄せてしまいその効果はやがては遮蔽されてしまう。このように、我々の世界は、考えたいスケールに応じて電磁気力と重力の両方が活躍するように上手くバランスが保たれているのである。仮にミクロなスケールでも重力が電磁気力よりも強かったとしたらどのスケールでも重力が強くなり、この世界はもっと退屈な世界になっていただろう。我々の世界を作った神様がいたとしたのなら、なかなかのセンスの持ち主だといえるかもしれない。

ここまで我々の自然界では重力がとても弱いという事実を説明してきた。それでは、なぜそうであるのか理由はあるのだろうか？ 伝統的な物理学者ならば、これはたまたまそうなっていると説明するかもしれない。電磁気力と重力の力の大きさの比は、物理理論ではパラメーターと呼ばれる数であり、そのパラメーターの値をいかに小さく取っても理論自体には特に問題がなさそうだからである。なぜ重力が弱いかはそうになっているからとしか言いようがなく、その理由を説明することはできないというわけである。

しかし近年、重力の弱さをより積極的に説明しようという試みがなされるようになってきた。この研究の発端となったのが、重力が弱いという素朴な観察を、大胆にも一般的な原理として定式化した論文 [2] である。この論文により提唱された原理は、大雑把に述べると次のようになる：「量子重力においては、不等式

$$(\text{電磁気力の大きさ}) \geq (\text{重力の大きさ}) \quad (1)$$

が満たされる。」

ここでいきなり量子重力が登場したことに驚かれる読者もいるかもしれない。量子重力についてインターネットで検索すると、「量子重力とは、重力と量子力学を統合する理論であり、宇宙のごく初期を記述するために必要となる」という記述が見つかるかもしれない。我々が今考えているのは宇宙初期ではなく、現在の宇宙に存在するダークセクターであるので、量子重力とダークセクターは一見無関係にみえる。しかし、仮に我々が現在の宇宙に興味があったとしても、その宇宙は量子重力において記述される初期宇宙から生まれてこなければいけないのだから、宇宙のすべてを記述する理論は必然的に量子重力からの制限を受けることになる。論文 [2] は、式 (1) がこの意味で量子重力理論から従うと予想したのである。この予想（弱い重力予想）は提唱から 20 年近くを経た現在でも予想にとどまっているが、様々な証拠が得られてきており、この予想を信じている専門家は多いというのが筆者の印象である。

さて、本稿の本題であるダークマターに戻ることにしよう。もし仮に精密な測定によりダークマターがなか

なか見つからず、その重力以外の相互作用の大きさにどんどん強い制限がついてしまうと、やがては重力以外の力、例えば電磁気力は重力よりも弱いことになっている可能性がある。したがって、やがては弱い重力予想 (1) に反することになると期待できる。つまり、弱い重力予想と矛盾する以前に、ダークマターが見つからなければいけないのである。これが基本的な方針である。

もっとも、弱い重力予想自体を使ってダークマターに制限を加えることは容易ではない。というのも、より正確には、弱い重力予想は「式 (1) を満たす粒子が少なくとも一つ存在する」というのが主張であり、この予想自体は既に我々の知っている電子により満たされているからである。したがって、ダークマターに制限を加えるためには、弱い重力予想を拡張してやる必要がある。この拡張には様々な方向性が考えられるが、一例として、弱い重力予想の左辺に現れる電磁気力を媒介する光の粒子 (光子) はスピン 1 をもつ粒子であることに着目したものがあ。スピン 1 というのは例えば電場や磁場が各点で方向を持つベクトル量になっていることを意味しているが、その代わりに方向を持たない単なる数で記述されるスピン 0 の場 (スカラー場と呼ばれる) を考えたらどうなるだろうか? その場合、素朴には (1) 式を一般化して、

$$(スカラー場の力の大きさ) \geq (重力の大きさ) \quad (2)$$

と定式化するのが良さそうである。もっとも、実際にはこの定式化はあまりに素朴なのもうひと捻りしてやる必要があるが\*2、ともかく筆者らの論文 [3, 4] では、式 (2) のより正確な定式化や我々の世界への応用の可能性について論じた。例えば、論文 [4] では、予想 (2) を用いることにより、スカラー場の引力により宇宙初期に原始ブラックホールが生成される可能性を論じた。この意味でスカラー版の予想 (2) は元々の予想 (1) よりも強力であるが、予想 (2) は予想 (1) に比べてその理論的な根拠が薄弱であるなどの問題点もあり、その制限について専門家の間で合意が形成されているというには程遠い状況にあるのが現状である。

## 複素数のマジック

さてここまでは量子重力についての予想にもとづいて考察を進めてきたが、筆者らは最近、全く別の議論により重力以外の力の強さに制限を加えることを試みた [5] ので、最後にその成果について説明したい。

この論文ではダークセクターに、ダークマターに加えてダークフォトン  $\gamma'$  という「あの世の光子」が存在する設定を考えた—いわば、覆面歌手だけではなく覆面ギタリストもいるような設定だ。このとき、 $\gamma' + \gamma' \rightarrow$  (中間状態)  $\rightarrow \gamma' + \gamma'$  という 2 体散乱の散乱振幅を理論的に考えることにしよう (図 3)。ここで中間状態では様々な粒子が一時的に生成される状態が考えられ、そのすべての効果を足し上げた量が散乱振幅と呼ばれるものである。今「量」と書いたが、散乱するダークフォトンのエネルギーは思考実験では自由自在に変えてやるので、エネルギーに応じて関数が定まっていると考えればよい。

さて、論文 [5] の仮定は、この散乱振幅が「性質のいい」関数であるというものである。これをもう少し説明すると、散乱振幅はダークフォトンのエネルギーの関数であるので通常は実数の関数であるが、エネルギーを複素数にすることで、散乱振幅をいくつかの条件を満たす複素数の関数にまで拡張することができるという

---

\*2 問題の一つは、一般的にスカラー場が質量を持つと期待されることから生じる。スカラー場の質量というのは理論のパラメーターなのだからそれはゼロとおけばいいと思うかもしれないが、実は量子補正により質量が生まれてしまうのである (これはヒッグズ粒子の質量についての「階層性問題」と関係している)。スカラー場は質量を持つと、その力の届く距離がその有限にとどまってしまう—重いボールならならば遠くまで投げるのは難しいというイメージだ。一方、重力はその力を媒介する粒子である重力子の質量がゼロ (実験的にはほぼゼロである) であるため、どこまでも届いてしまう。つまり、十分離れた距離を考えれば、やがては重力の方が勝ってしまい、式 (2) が満たされなくなってしまうのだ。そこで例えば [3] では、観測可能な宇宙のスケールに届くぐらいとても軽いスカラー場を考えることにした。そのようなスカラー場は、ダークエネルギーの候補の一つである。

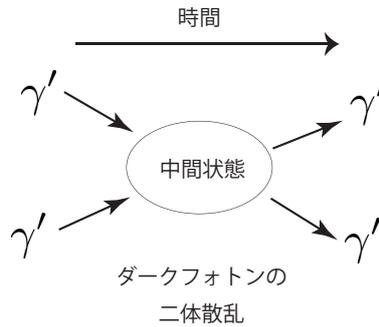


図3 思考実験として、ダークフォトン  $\gamma'$  の二体散乱を考える。中間状態では、重力を媒介する粒子である重力子を含む様々な粒子が生成され、これらを足し上げて得られる関数が散乱振幅である。

ものだ。エネルギーを複素数にするとはなんとも変な話に聞こえるが、例えば不安定粒子のエネルギーは複素数に値をもつとみなされることが知られており、物理学にとっては実はそれほど異端的な考えでない。

複素数については学校で習ったという読者の方も多いのではないかと思う。複素数はその実部と虚部を考慮することで、二つの実数の組みとすることもできる。ただし、ここで重要なことは、複素数の関数（数学的には正則関数）は、単に二つの実数の関数よりもはるかに強く制限されており、この制限（解析性）を用いると、しばしばごく少数の仮定だけから強力な主張が導かれてしまう点である。いわば、「複素数のマジック」を用いるのである。もちろん、この議論には数学的な仮定が必要であり、それは物理的に正当化される必要があるが、例えば解析性の背後には理論の因果律（過去には遡れない）の要請があることが明らかにされるなど、仮定の正当化のための研究も長年にわたって行われてきた。それでは「複素数のマジック」をダークフォトンの散乱振幅に適用すると何が起こるのだろうか？ 非常に大雑把にいて、次のような式を示すことができる [6]：

$$(\text{重力以外からの寄与}) \geq (\text{重力からの寄与}) \pm (\text{量子重力起源の誤差項}) \quad (3)$$

ここで「量子重力起源の誤差項」と書いたのは、量子重力についての我々の知識が完全ではないことから生じる誤差であり、その符号が正であるか負であるかもわかっていないので前に符号  $\pm$  をつけている。非常に大雑把には、これは量子重力の理論たる超弦理論の効果が見えはじめるスケール（弦のスケール）に関係しており、典型的な設定ではこの効果はとても小さいと期待されるので、以下ではこの効果をざっくりと無視することにしよう。このとき、式 (3) は散乱振幅に対して重力の効果がほかの力からの効果に比べて十分弱いことを示しており、これまでの議論してきた「重力は弱い」という直観の定式化になっていることがわかるだろう。

実は、理論的には制限 (3) にはいくつかの仮定が含まれており、我々の宇宙を記述する現実的な理論に制限が適用できるかどうかは必ずしも明らかではなく、今でも研究が進められている。しかし、もし仮に制限 (3) がダークセクターに適用できるとすると、その制限はとても強いことがわかる。ダークフォトンのパラメータ領域の制限の一例<sup>\*3</sup>を図 (4) に示した。この図では横軸はダークフォトンの質量  $m_V$  をエレクトロンボルト (1eV  $\sim 10^{-33}$ g) という単位で表しており、縦軸はダークフォトンの相互作用の強さを指定するパラメータ  $g_{B-L}$  を示した。色のついたパラメータ領域はすでに実験・観測により排除されており、ダークフォトンの相互作用の強さの上限を与えている。これらの制限から、ダークフォトンの相互作用はかなり小さくなく

<sup>\*3</sup> 参考までにもう少し補足すると、ここでは素粒子の標準模型に存在する  $B-L$  対称性（バリオン数とレプトン数の差）に相当するダークフォトンを考え、その質量がダークセクターに存在するスカラー場からヒッグズ機構により生成されると仮定した。

ればいけないことがわかるだろう。一方，制限 (3) を表した黒い実線と点線はダークフォトンの相互作用の下限を与えており，この線の上側のみが許されことになっている。つまり，相互作用の強さに下限を与えている。ここで，実験からの制限と，我々の理論からの制限を合わせると，ほとんどすべてのパラメーター領域がすでに排除されているのだ！

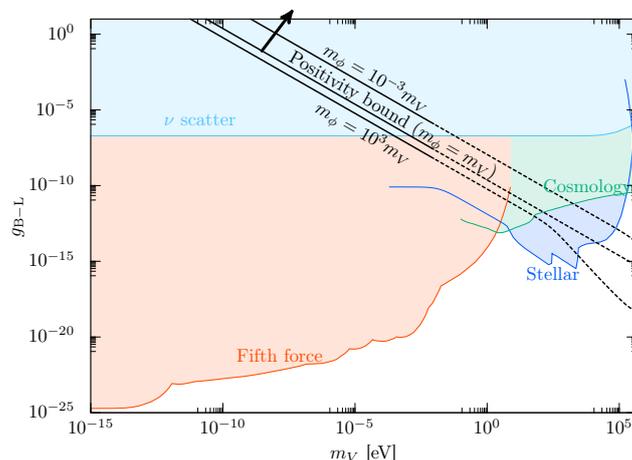


図4 ダークフォトンのパラメーター領域についての暫定的な制限。色のついた領域は観測によりすでに排除されている。論文 [5] から再掲。

もちろん，結論を急ぐのは禁物である。既に述べた通り，我々の理論からの制限にはいくつかの仮定や論理的ギャップがあることには注意する必要がある，理論的に排除されているように見える黒い実線と点線の下側でダークフォトンが見つかる可能性もないわけではない。しかし，その場合には，量子重力についての我々の仮定が誤っていることが示唆される可能性があり，実験的な成果から量子重力についての我々の成果が問い直されることになる。我々の世界に存在するかもしれないダークフォトンの実験から，初期宇宙を記述する量子重力についての知見が得られるとするのならば，物理学の歴史にとって大きなステップになることは間違いないだろう。

我々は「覆面集団」であるダークセクターがどこまでダークであるのかという問いから出発した。その問いを追究して行ったとき，我々の前に現れたのは初期宇宙を記述する理論である量子重力の理論であり，我々の宇宙そのものの根源に遡る考察であった。哲学者は時に，人は他者を通じて自らを理解すると主張する。その意味で，ダークマターは，我々にとってかけがえのない「他者」であるのかもしれない。ダークマターの謎が解明されるとき，それは物理学にとって重大な成果であると同時に，人類が自らをまた一段，深く理解するきっかけとなるのかもしれない。

## 参考文献

- [1] S. D. McDermott, H.-B. Yu and K. M. Zurek, “Turning off the Lights: How Dark is Dark Matter?”, *Phys. Rev. D* 83, 063509 (2011), [arxiv:1011.2907](https://arxiv.org/abs/1011.2907).
- [2] N. Arkani-Hamed, L. Motl, A. Nicolis and C. Vafa, “The String landscape, black holes and gravity as the weakest force”, *JHEP* 0706, 060 (2007), [hep-th/0601001](https://arxiv.org/abs/hep-th/0601001).
- [3] S. Shirai and M. Yamazaki, “Is Gravity the Weakest Force?”, *Class. Quant. Grav.* 38, 035006 (2021), [arxiv:1904.10577](https://arxiv.org/abs/1904.10577).

- [4] A. Kusenko, V. Takhistov, M. Yamada and M. Yamazaki, “*Fundamental Forces and Scalar Field Dynamics in the Early Universe*”, *Phys. Lett. B* 804, 135369 (2020), [arxiv:1908.10930](#).
- [5] K. Aoki, T. Noumi, R. Saito, S. Sato, S. Shirai, J. Tokuda and M. Yamazaki, “*Gravitational Positivity for Phenomenologists: Dark Gauge Boson in the Swampland*”, [arxiv:2305.10058](#).
- [6] J. Tokuda, K. Aoki and S. Hirano, “*Gravitational positivity bounds*”, *JHEP* 2011, 054 (2020), [arxiv:2007.15009](#).