

## ■ 研究紹介

# ダークセクターの物理: 非対称ダークマターの観点から

基礎科学研究院 純粹物理理論研究団

鎌田 歩樹

[akamada@ibs.re.kr](mailto:akamada@ibs.re.kr)

2020 年 (令和 2 年) 10 月 30 日

## 1 概要

クォークは強い相互作用をするが、レプトンは強い相互作用をしない。それでは、素粒子標準模型のゲージ相互作用を感じないが、独自のゲージ相互作用を持っている粒子群はないのだろうか。このような考え方は、素粒子物理学において長い歴史を持つ。例えば、弱い力によるパリティの破れに端を発するミラーセクターや、超対称性の破れを担う隠れたセクターが挙げられる。近年、宇宙のダークマターを構成する粒子が、標準模型以外のゲージ相互作用をしている、つまりダークセクターを構成している、という可能性が注目を集めはじめている。本稿では、それに至った経緯およびその動機について筆者の主観で概観する。まず、ダークマターの基礎的な事項及び、旧来のウィンプ・ダークマターについて振り返る(2章)。その後、ダークセクターにもとづくダークマターの簡単な模型を導入し、その現象論を議論する(3章)。特に、昔からあるミラーセクターという考え方を振り返りながら、非対称ダークマターという考え方を導入する(4章)。非対称ダークマターは、ダークマターの質量密度が通常の物質の質量密度とほとんど同じであることに説明を与えてくれる。さらに、筆者らの提案した非対称ダークマターの模型について詳しく議論する。図1は、旧来のウィンプ・ダークマターとダークセクターにもとづくダークマターの考え方の違いを表したものであるが、種々の用語がまとめられており、目次・索引の役割も果たすと期待している。

## 2 ことはじめ

### 2.1 ダークマター

現代宇宙論は一般相対性理論を基礎として、宇宙がどう成長してきて今に至るのかを明らかにしてきた。その結果、驚くべきことに、宇宙の構造がダークマターと呼ばれる未知の重力源によって支えられていることが分

かった。また、ダークマターの満たすべき性質もわかっている:

1. 宇宙年齢(約138億年)より長寿命である。
2. 宇宙のエネルギー密度の約3割を占める(通常の物質の約5倍)。
3. ほとんど電磁相互作用をしない。
4. 非相対論的であり、重力源として振る舞う(熱くない)。

素粒子標準模型にはこの条件を満たす粒子が存在しない。ニュートリノは1-3の条件を満たすが、4の条件を満たさない。軽すぎるために、銀河や銀河団といった構造を作ることができないためである。このため、ダークマターの正体は天文学から素粒子物理学にまで及ぶ現代物理学の最大の問題の一つである。ダークマターが原始ブラックホールである可能性も残されているが、本稿ではダークマターが未知の素粒子からなる可能性を考える。ちなみに、宇宙のエネルギー密度の残りの約7割は、ダークエネルギーというさらにトンデモないものに占められているが、本稿では触れない。(ダークセクターという際には、ダークマターとダークエネルギーを指すこともあるが、本稿ではダークマター粒子が標準模型以外のゲージ相互作用をしていることを指す。)ダークマター粒子の有力候補として、最もよく耳にするのは、ウィンプであろう。それが何故だったのかについて、まずは復習する。

### 2.2 階層性問題とウィンプ・ダークマター

素粒子標準模型のゲージ相互作用の中で、弱い相互作用のみがもつ特異な性質がある。それは、運動の向きとスピンの向きが逆の左巻きのフェルミオンにしか作用しないということである(カイラルであると呼ばれる)。一方、電磁相互作用も強い相互作用も左巻き・右巻きの区別なく同様に作用する(ベクトル的であると呼ばれる)。

弱い相互作用は右巻きフェルミオンと左巻きのフェルミオンを区別するカイラルな理論である。カイラルな理論では、フェルミオンは質量を持たない。<sup>1</sup>

つまり、ナイーブには素粒子標準模型では、フェルミオンは質量を持たない。一方我々のよく知るフェルミオンは、多かれ少なかれ質量を持っている。この矛盾は、ヒッグス粒子の真空期待値が解決している。電荷を持っているクーパー対が巨視的に凝縮することで、超伝導中の電磁相互作用を自発的に破るように、電弱電荷を持つヒッグス粒子が巨視的に凝縮することで、カイラルな電弱相互作用をベクトル的な電磁相互作用に自発的に破っている。のために、標準模型の粒子等が、ヒッグス凝縮のスケール  $v_{ew} \simeq 246 \text{ GeV}$  かそれよりも小さい質量を持っている。標準模型ではニュートリノはヒッグスと相互作用していないので、質量をもたない。一方、ニュートリノ振動を通じて、ニュートリノに微小の質量があることが実験的にわかっている。この微小のニュートリノ質量は、標準模型を超えた物理の存在を示唆している。

ここまで非常によくできているのだが、肝心のヒッグス凝縮の起源が謎である。何か高いエネルギーの新物理がこの起源になっていると考えられる。その候補としては、素粒子標準模型に含まれていない重力の量子論が挙げられる（例えば超弦理論）。そのスケールは、 $M_{pl} \simeq 2.4 \times 10^{18} \text{ GeV}$  のプランクスケールである。もし、素粒子標準模型からこのプランクスケールまでに新物理が何もないとする、 $M_{pl} \sim 10^{18} \text{ GeV}$  のダイナミクスが  $v_{ew} \sim 100 \text{ GeV}$  のヒッグス凝縮を出したということになる。それはちょっと考えにくいのではないか。乱暴に言ってしまえば、これが階層性問題であり、標準模型を超えた物理を考える上で、ここ数十年間における指導原理であった。

階層性問題からは、100-1000 GeV にヒッグス凝縮の起源となる新物理があることが期待される（例えば、超対称性や複合ヒッグス粒子模型）。この新物理に伴う新粒子がダークマターを説明するのではないか、と思ってしまう。その起源は新物理の詳細によって説明できたり・できなかつたりするが、現象論的にダークパリティを導入しよう。ダークパリティのもとで、標準模型粒子は偶、新粒子は奇だとすると、新粒子の標準模型粒子への崩壊が禁制され、ダークマター粒子の候補になる。これがウインプである。

ダークパリティは、ウインプが 2 つやってきて標準模型粒子に対消滅する可能性は許している。宇宙の初期に

<sup>1</sup>ある観測者からみて、左巻きのフェルミオンだけがゲージ相互作用しているとしよう。もしフェルミオンが質量を持っていても、観測者はフェルミオンと同じ方向にしかもより速く運動することができる。この運動している観測者からみると、フェルミオンの運動方向は元と逆になり、右巻きのフェルミオンだけがゲージ相互作用しているということになる。これは、観測者によって物理が変わらないという、特殊相対性理論の要求（ローレンツ不変性）を満たさない。

おいて、ウインプはこの対消滅・対生成を通じて標準模型粒子と熱平衡にある。宇宙膨張によってプラズマが冷えて、標準模型粒子のエネルギーが下がると、ウインプの対生成は起きなくなる。そのまま放っておくと、ウインプは対消滅で完全に消えてしまう気がするのだが、ここで宇宙膨張が再び重要になる。ウインプが対消滅するためには、別のウインプを見つけなくてはいけないが、宇宙膨張によってウインプ間の距離が引き延ばされる。このため、ある程度ウインプの数が減ったところで、対消滅することができなくなり、熱的残存量が決まる。この熱的残存量はウインプの対消滅断面積のみで決まり（質量にも依らない），

$$(\sigma v)_{\text{WIMP}} \simeq 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s} \simeq 3 \times 10^{-9}/\text{GeV}^2 \quad (1)$$

の時に宇宙のエネルギー密度の約 30% を占める（前 2.1 章の 2 の条件）。

この対消滅断面積は、1 TeV 程度の新粒子が 電弱相互作用で電弱ゲージ場に対消滅する断面積とおおよそ一致する：<sup>2</sup>

$$(\sigma v)_{\chi\chi \rightarrow VV} \sim \alpha^2/m_\chi^2 \sim (\sigma v)_{\text{WIMP}} (\text{TeV}/m_\chi)^2 \quad (2)$$

( $\alpha \sim 0.01$  は電弱相互作用の微細構造定数、 $m_\chi$  はダークマター粒子の質量)。つまり、階層性問題から 1 TeV 程度に期待される新粒子の熱的残存量が、自然に宇宙のダークマターの質量密度を説明する。これがウインプの奇跡と呼ばれる所以である。

## 2.3 ポスト階層性問題の時代

階層性問題の解決という教義にピタリとハマるウインプは、最有力候補として直接検出実験・間接検出実験・加速器探査と徹底的に調査されてきている。しかし、今の所ウインプの明白な実験的証拠は見つかっていない。単に待ていればいいだけかもしれないが、そもそも待つていればウインプが見つかるという根拠も弱くなっている。階層性問題の解決という教義が揺らいでいるためである。階層性問題の有力な解決策には、トップクォークと同じ量子数を持つトップパートナーがいる（例えば、超対称性パートナーのトップ）。階層性問題をピシャリと解決するには、トップパートナーが LHC 実験で見つかなくてはいけないが、朗報は聞こえてこない。（LEP・Tevatron で見つからなかった時点で諦めるべきだった

<sup>2</sup>ハイパー荷ゲージ場の超対称性パートナーであるビーノは、ゲージ相互作用を感じないので、本稿の意味ではウインプではない。ビーノ-スフェルミオン-フェルミオンという湯川結合を通じて対消滅するので、スフェルミオンが重いと熱的残存量が容易に宇宙のダークマターの質量密度を超してしまう。しかし、この湯川結合は超対称性でゲージ相互作用と関係づいているので、ウインプと呼びたくなる気持ちもある。このように、ウインプを広義に捉える人も多いため、本稿のような狭義のウインプは電弱ウインプと呼ばれることも多い。

と言う人もいるが、流石に後出しジャンケンではないかと思う。)もちろん階層性問題は重要な問題だし、完璧ではないにしても階層性問題を緩和する新物理のトップパートナーが、LHC ではギリギリ見つからないところにいるのかもしれない。 ウインプがダークマター粒子の有力候補であることには変わりない。ただ、今までと同じくらいウインプ探査だけに精を出していくのかと言われると、疑問がある。<sup>3</sup>

一方、“野に下って”，指導原理からトップダウンに考えるのでなく、どういう探査が可能かに応じてボトムアップで考えていこうというのが、ダークマター現象論である(筆者の専門でもある)。いったんダークマター物理を説明するのに重要なところだけ取り出して、現象論的模型を作り、どういうダークマター粒子を考えるかは、各自の興味・専門に応じている。そんな中、ダークマター粒子が標準模型以外のゲージ相互作用をしているダークセクターを考える人が多い。次3章で、その経緯と動機を説明する。その前に、これまで説明してきた階層性問題にもとづくウインプ・ダークマターと、これから説明するダークセクターにもとづくダークマターの考え方の違いを、図1にまとめておく。図1にも表れているように、ダークマター現象論の人は階層性問題を忘れた訳ではない(少なくとも筆者は、忘れていない)。ヒッグス凝縮の起源となる未知のダイナミクスがあるとする。すると、このダイナミクスがダークセクターにも働き、ダークセクターもヒッグス凝縮のスケールで特徴付けられる。このため、ダークセクターを構成する粒子として、MeV-GeV 程度の質量を持つものを考えることが多い。

### 3 ダークマター現象論とダークセクター

#### 3.1 ダークマター現象論の興隆

実は LHC 実験の前から、ダークマター粒子が標準模型以外のゲージ相互作用をしている可能性は、考えられていた。前2.3章で述べたように、当時は超対称性などの階層性問題の解決という教義が極めて有力であったため、どうしてウインプ以外のダークマター粒子を考えたのか、と思うかもしれない。それは主に二つの天文・宇宙観測からきている(文献[1]も参照)。

<sup>3</sup>本稿では扱わないが、アクション・ダークマターには、強い相互作用の CP 問題を解くという素粒子からの動機が存在し、有力候補である。強い相互作用の CP 問題とは、強い相互作用には CP を破るチャーン・サイモンズ項があり、一般にその係数はクオータの湯川結合の位相から寄与を受けるのに、実験的にはなぜかほとんど0であるという問題。この問題の解決に、ミラーセクターの考え方が一役買っている可能性も提案されている。

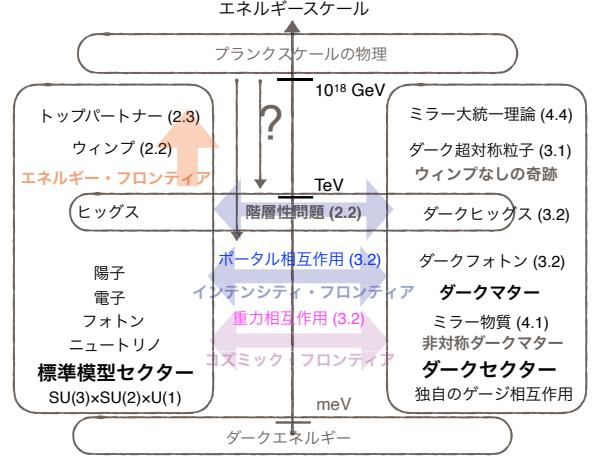


図1: 旧来の階層性問題にもとづくウインプ・ダークマターと、ダークマター粒子がダークセクターを構成しているとする新しい考え方の違いの略図。括弧内にその概念が説明される章番号を示した。標準模型粒子以外の新粒子は、全てが関係づいているわけではないことに注意してほしい。どれか一つだけが現れるかもしれないし、最悪どれも現れないかもしれない。

一つは、ウインプ・ダークマターの構造形成における、銀河スケールでの問題である(詳しくは、文献[2]を参照)。一例として、コア・カスプ問題が挙げられる。ウインプ・ダークマターの構造の重力的な成長をシミュレーションで追うと、ウインプ・ダークマターのハローは中心に向かってダークマターの質量密度が高くなる、カスプ状の分布を持つことが知られている。しかし、観測されている銀河の回転曲線から示唆されるダークマターの質量密度分布は、内側で密度が一定なコア状のものである。一方、ダークマター粒子が核子同士の散乱と同程度の散乱断面積

$$\sigma_{\chi\chi \rightarrow \chi\chi} / m_\chi \sim 1 \text{ cm}^2/\text{g} \simeq 2 \text{ barn}/\text{GeV} \simeq 5 \times 10^3 / \text{GeV}^3 \quad (3)$$

で弾性散乱をしていると、コア・カスプ問題が解決される。

もう一つは、高エネルギー宇宙線における陽電子過剰である。ATIC [3] や PAMELA [4] といった実験が、単純なベキ関数的エネルギー分布では説明できない、陽電子過剰を報告した(詳しくは、文献[5]を参照)。この過剰がダークマター粒子の対消滅起源であるとすると、熱的残存量の議論から期待される式(2)よりも、数桁大きい対消滅断面積が要求される。この数桁大きい対消滅断面積を、熱的残存量を変えずに実現する一つの方法が、ダークマター粒子間に新しい引力相互作用を導入することである。この引力相互作用がダークマター粒子間の距離を近づけてくれるので、お互いを見つけやすくなり、対消滅しやすくなる[6]。この効果は、ダークマター粒子の速度が低いほど重要である。つまり、熱的残存量が決まる

宇宙初期ではほとんど影響しないが、高エネルギー宇宙線実験で問題にしている現在の宇宙では大きな影響をもたらす。

ダークマター粒子間に新しいゲージ場を伴う相互作用を導入し、上二つの問題を解決するという考え方は、文献 [5, 7] によって現象論的に導入された。同時に、文献 [8] によって“ワインプなし奇跡”が指摘された。式 (2) 付近で議論したように、ワインプが奇跡であるのは、階層性問題で期待されている新物理が、その対消滅断面積を自然に実現するためである。階層性問題の解決として超対称性を考えると、標準模型粒子だけでなく、ダークセクターの粒子にも超対称性パートナーが導入される。特に、ゲージ伝達型と呼ばれる超対称性の破れを考えると、標準模型セクター・ダークセクターの区別なく、超対称性粒子は超対称性の破れのスケールで決まる対消滅断面積を持つ。このため、ダークセクターの超対称性粒子も、ワインプと同程度の対消滅断面積をもち、その熱的残存量はダークマターの質量密度を説明する。(ただし、標準模型のゲージ相互作用をしないので、ワインプとは呼ばない。) 階層性問題で期待されている新物理は、ワインプだけではなく、ダークセクターにも奇跡を起こしうるのである。

ここで強調しておきたいのは、上二つの問題とゲージ伝達型の超対称性の破れを忘れたとしても、文献 [5, 7, 8] の登場がダークマター探査における一つの転換点であったということである。これ以降、新物理のおまけとしてのダークマターではなく、ダークマター自体の現象論を研究対象とする人が増えた。さらに、ダークセクターという考え方方が広まりはじめた。<sup>4</sup>

### 3.2 単純なダークセクター模型

ダークセクターという考え方には、ダークマター現象論的はどういう良さがあるだろうか。もしダークセクターが標準模型セクターと何の相互作用もしないとすると、これを検証する手立てがない。しかし、少なくとも 2 つのセクターは、時空の幾何学である重力を共有しており、重力相互作用を通じてつながっている。このため、天文観測を用いた探査が可能である。以下で具体的な模型の例を取り上げながら説明する(図 1 も参照)。

最も単純なダークセクターの模型は、ダークマター粒子にダーク電荷を持たせ、ダークフォトンを導入することである。電荷の保存から、電荷を持つ最も軽い粒子で

<sup>4</sup> この直後に大学院に入学した筆者は、これらの論文の影響を色濃く受けていることを申し添えておく。これらの論文を発表した文献紹介や、これらの論文をもとにした修士論文の審査会では、一部の方から“大変励みになる”お言葉をかけていただいた。当時はムツとしたものの、学生の指導に携わるようになった今、ワインプや階層性問題を深く考えないまま、ダークセクターの研究をしている学生を見ると、とても不安になる。親になって知る親心ということなのか、年齢を重ねて保守的になっているのか、よく分からない。

ある電子が安定なように、ダーク電荷の保存から、ダーク電荷を持つ最も軽い粒子であるダークマター粒子が安定であることが保証される。ダークフォトンがダークヒッグス凝縮から質量をもらっていたとしても、ダークヒッグスのダーク電荷とダークマター粒子のダーク電荷が異なれば、ダークマター粒子の安定性は保証されたままである。

ダークマター粒子がダークフォトンよりも重ければ、ダークマター粒子はダークフォトンへ対消滅することで、その熱的残存量が決まる。対消滅断面積は、

$$(\sigma v)_{\chi\chi \rightarrow A'A'} \sim \alpha'^2/m_\chi^2 \quad (4)$$

( $\alpha'$  はダーク電荷の微細構造定数) である。式 (2) およびワインプなしの奇跡と比べると自由度が増えており、ダークマター粒子の質量を小さくしたら、その分ダーク電荷の微細構造定数を小さくすることで、ダークマター粒子の熱的残存量を観測されている質量密度に合わせることができる(なので、奇跡ではない)。

実はこの時、宇宙におけるダークフォトンの熱的残存量が問題になってくる。ダークフォトンが質量を持っていると、ダークマターとして寄与することになる。 $m_\nu \sim 0.1 \text{ eV}$  の質量を持つニュートリノが、ダークマターの質量密度の 1% 程度寄与するので、MeV-GeV のダークフォトンは、ダークマターよりもはるかに高い質量密度を持ち、問題である。このため、何か崩壊を考えたい。ここで重要なのは、我々のフォトンとの運動学的混合である [9]<sup>5</sup>。運動学的混合により、ダークフォトンは標準模型の荷電粒子に結合するが、フォトンはダークマター粒子に結合しない。この結合を通じて、ダークフォトンは標準模型粒子に崩壊し、標準模型セクターとダークセクターの両方に結合するポータル粒子となる。

運動学的混合の由来を説明しておきたい。運動学的混合は、標準模型電荷とダーク電荷の両方を持つ粒子がいると、量子効果で生成される。今の簡易模型には、そんな粒子登場しないじゃないかと思われるかもしれない。しかし、プランクスケールには量子重力に伴って重い粒子が現れるであろうことを思い出してほしい。また、運動学的混合は繰り込み可能な相互作用である。繰り込み可能な相互作用では、重い粒子の量子効果からの寄与も軽い粒子の量子効果からの寄与も、区別がない。つまり、

<sup>5</sup> フォトンはグルーオンと異なり、それ自体は電荷を持たないので、フォトンとダークフォトンの任意の線形結合を、“フォトン”と“ダークフォトン”と呼ぶことができる。本文のようにダークフォトンが質量を持っている時、我々は質量を持たない方を“フォトン”と呼ぶ。この結果、“ダークフォトン”は標準模型の荷電粒子に結合するが、“フォトン”はダークマター粒子に結合しないように定義する。一方、ダークフォトンが極めて軽いか、質量を持たない時には、我々の荷電粒子に第 5 の力を作用させたくない。この時、“ダークフォトン”は標準模型の荷電粒子に結合しないが、“フォトン”はダークマター粒子に結合するように定義する。つまり、ダークマター粒子が混合パラメータに比例する微小電荷を持つ。本文では、明らかな場合、質量の固有状態だとして、二重引用符を省略する。

プランクスケールに現れるであろう標準模型電荷とダーク電荷の両方を持つ重い粒子からの寄与が無視できないので、ダークフォトンが存在するなら、運動学的混合はある方が自然である。その大きさは、

$$\epsilon \sim 10^{-3} \sqrt{\alpha'/\alpha} \quad (5)$$

だと期待される。4.4章で議論するように、標準模型ハイパー荷ゲージ相互作用またはダーク電磁相互作用が大統一理論に入ると、運動学的混合はこの値よりもかなり小さくなりうる。これは、プランクスケールに現れる粒子の寄与が互いに打ち消し合うためである。

素晴らしいのは、ダークフォトンが標準模型の荷電粒子に結合しているため、加速器での探査が可能なことである（詳しくは、文献[10]を参照）。実際、MeV-GeVで $\epsilon \sim 10^{-3}$ の運動学的混合を持つダークフォトンの生成・レプトンへの崩壊が、LHCb 実験[11]等において探査・制限されており、現行の Belle II 実験[12]等でさらに詳しく探査される予定である。以下では、これらの実験を短寿命粒子探査と総称する。ビームと標的物質の制動放射でダークフォトンを生成する CHARM 実験[13, 14]や LSND 実験[15, 16]等では、検出器が標的物質から離れたところに設置されており、ダークフォトンの寿命がある程度長くないと、シグナルを残すことができない。この兼ね合いで、 $\epsilon \sim 10^{-6}$ の運動学的混合を持つダークフォトンに感度がある。文献[10, 14, 16]が、文献[5, 7]を受けて過去の実験を再解析していることは、ダークマター現象論の興隆を如実に反映している。また、LHC ビームの超前方散乱で生成されたダークフォトンを検出する FASER 実験[17, 18]等が 2021 年にも開始されようとしている（詳しくは、文献[19]を参照）。以下では、これらの実験を長寿命粒子探査と総称する。図 2 は短寿命および長寿命粒子探査からの制限のまとめである。

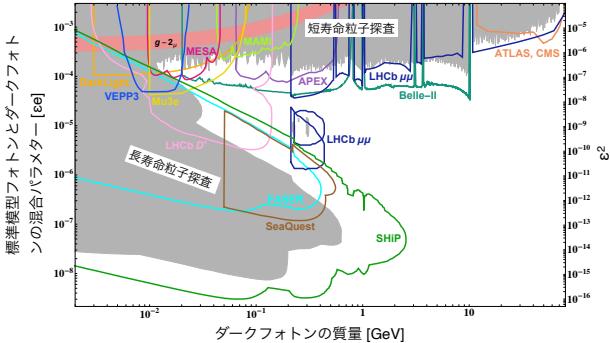


図 2: ダークフォトンがダークマター粒子よりも軽い場合の、ダークフォトンに対する短寿命・長寿命粒子探査からの制限（文献[20]から転載）。陰影がついている領域は、既存の実験からの制限を表す。それ以外は、計画中の実験で探査される領域を表す。

ダークマター粒子がダークフォトンよりも軽い場合に

は現象論が変わってくる。ダークマター粒子はダークフォトンを媒介して、標準模型粒子に対消滅する。対消滅断面積は、

$$(\sigma v)_{\chi\chi \rightarrow A'^*\rightarrow \text{SM}} \sim \alpha\alpha' \epsilon^2 m_\chi^2 / m_{A'}^4 \quad (6)$$

である。先と同様に式(2)と比べて、運動学的混合による結合の弱さを、ダークマター粒子およびダークフォトンの質量 $m_{A'}$ を軽くすることで、その熱的残存量がダークマターの質量密度を説明するようにできることがわかる。ここで、一点注意しておきたいのが、軽いダークマター粒子に関しては、間接検出実験の制限が強いことである。我々が重力的に知っているのはダークマターの質量密度であるが、ダークマター粒子の対消滅率は数密度の 2 乗に比例する。つまり、ダークマター粒子が軽いほど、ダークマター粒子の対消滅が効率的に起こる。ダークマター粒子の対消滅は、光子・電子プラズマを温めて、宇宙再結合の様子を変えてしまう。現在の Planck 衛星の CMB 搖らぎの観測から、対消滅断面積に速度依存性がない場合は、10 GeV よりも軽いダークマター粒子は制限されている（文献[21]の図 46 を参照）。<sup>6</sup> また、ダークフォトンの主な崩壊先が、ダークマター粒子になる。この時は、加速器で作ったダークフォトンが、見えないシグナルになるため、反応前後でエネルギー・運動量保存則を満たしていないように見える事象を探す必要がある。この事象は、すでに BaBar 実験[22]や NA64 実験[23]で探査・制限されており、Belle II 実験[12]や LDMX 実験[24]でさらに探査が進むと期待されている。

以下、筆者的好きなダークセクター模型を紹介するが、その前に、ダークセクターという考え方の一般的な利点をまとめておく：

- ダークマター粒子の安定性と大きく関係している。
- 標準模型セクターとダークセクターの両方に結合するポータル粒子があれば、加速器実験で検証することができる。
- 重力相互作用を通じて天文観測を用いて検証することができる。

## 4 非対称ダークマターとダークセクター

### 4.1 ミラーセクター

前 3.2 章の単純な模型は、ダークマター現象論としては申し分ないが、ちょっと夢を欠いている気もする。人

<sup>6</sup> ダークマター粒子がフェルミオンの場合には速度依存性がないで、この制限が当てはまる。一方、ボソンの場合は速度が遅くなると対消滅断面積が下がるため、この制限は当てはまらない。この制限は、ダークフォトンが標準模型粒子に崩壊するのであれば、ダークマター粒子がダークフォトンよりも重い場合にも当てはまる。

はパンのみに生くるにあらずとも言うので、もう少し夢を見れないだろうか。(ただ、超対称性による階層性問題の解決という大きな夢を、すでに妥協させられたことも忘れてはいけない。) こう言う時は歴史を振り返ってみるといい。実はダークセクターという名前は新しいが、その考え方自体は昔からある。そこからはじめよう。

2.2章で述べたように素粒子標準模型では、左巻きの電子と右巻きの電子は別の粒子である。ニュートリノに至っては、左巻きしか存在しない。パリティは左巻きの粒子を右巻きの粒子に変換するため、弱い相互作用はパリティを破っている(ウーたちの実験[25])。

実験事実なので受け入れざるを得ないのだが、対称性が大好きな素粒子物理学者としては、自然は別の形のパリティを採用しているのではないか、と思いたくなる。ここでミラーセクターという考え方方が登場する。標準模型のゲージ場・ヒッグス場を含む各粒子にパートナーを導入する。(粒子数が2倍になるが、対称性のためならそんなことは気にしない。乱暴に言えば、ディラックも対称性から陽電子を予言した。) パリティは左巻きの電子を右巻きの電子に変換するのではなく、左巻きの電子を右巻きのミラー電子に変換する、と考える。このミラーパリティ変換で理論が不变であるためには、パートナー粒子間の相互作用は対応する標準模型粒子間の相互作用と全く同じでないといけない。パリティ変換が古典的には鏡に映した世界だったことを思い出すと、あたかも鏡の向こうにそっくりのダイナミクスに従う別の世界があるように見えるので、ミラーセクターと呼ばれる。この考え方方はウーの実験を提唱したリーとヤンの論文[26]にすでにあらわれている。

その起源は謎であるが、バリオン数(バリオンと反バリオンの数の差)が良い保存量であるため、陽子は長寿命である。さらにその起源も謎であるが、宇宙には粒子・反粒子に非対称性があり、現在の宇宙には反陽子はほとんど存在しないが、陽子は豊富に存在しており、太陽、地球、ひいては人類を構成している。もしミラーパリティが保たれているとすると、ミラーセクターでも同様に、ミラーバリオン数が保存し、粒子・反粒子の非対称性があるはずである。そうすると、ミラー陽子が同様のミラータンク、ミラーアース、ミラーヒューマンを構成しており、それを我々人類から見るとダークマターになっているというのは、自然な上に夢のある話である(ミラーヒューマンから見ると我々がダークマターである)。

残念ながら、ミラーパリティが保たれているとすると実験事実と合わない。ミラー物質からなるダークマターの質量密度と通常の物質の質量密度は同じでないといけない。しかし、宇宙マイクロ波背景放射の揺らぎの精密観測から、ダークマターの質量密度は通常の物質の質量密度よりも、5倍程度大きいことが分かっている(2.1章

の2の条件)。また、ミラーフォトンが運動量・エネルギーを持ち出すために、通常の銀河ディスクと同様のミラー銀河ディスクを構成することになる。しかし、銀河の回転曲線の観測から、ダークマター・ハローは通常の銀河ディスクよりも外側まで、ほぼ球形に存在していることが分かっている。つまり、何らかの形でミラーパリティを破ることが要求される(詳しくは、例えば文献[27]を参照)。

ここで強調しておきたいことは、ダークマターの質量密度は通常の物質の質量密度よりも、高々5倍程度しか大きくないということである。もしダークマターと通常の物質に何の関係もなければ、その質量密度は何桁も違っていてもおかしくない。これは、偶然の一致問題と呼ばれ、ダークマターの起源を解明する上で、大きなヒントになっていると考えられる。ウインプの残存量はバリオンの非対称性と関係がなく、偶然の一致問題をそのままでは解いていない。一方、ミラーセクターはこの偶然の一致問題を、完全にではないにしろ解いている。ミラーパリティによって、ミラー物質からなるダークマターの質量密度と通常の物質の質量密度が関係づいているためである。

## 4.2 非対称ダークマターと共生成シナリオ

前4.1章でみたように、ミラーセクターはそのままでは上手くいかない。ミラーセクターのいいとこ取りをして、偶然の一致問題を解くようなダークセクターの模型を考えたい。ミラーセクターを通じて学んだ、偶然の一致問題を解くために必要な条件は以下の通りである:

- a ダークマター数(ダークマター粒子と反ダークマター粒子の数の差)が良い保存量であり、ダークマター粒子が長寿命である。
- b 宇宙のダークマター数に非対称性があり、我々のバリオン数の非対称性と同程度である。
- c ダークマター粒子の質量が我々のバリオンの質量と同程度である。

一般にこれらの条件を満たすダークマターを非対称ダークマターという。ミラー物質は非対称ダークマターである。また、ミラーセクターの議論では、バリオン数非対称性およびそれと関係したミラーバリオン数非対称性が、初期宇宙にどうやって作られたのかを指定しなかった。これらを作る機構をも指定したシナリオは、共生成シナリオと呼ばれる。以下、上記の条件をさらに詳しく説明しながら、我々の提案した共生成シナリオを導入する(文献[28]にもとづく)。

まず、aとbの条件は一見矛盾している。ダークマター粒子を長寿命にするには、ダークマター数は良い保存量

である必要があるが、ダークマター数の非対称性をもたらすためには、ダークマター数は破れてないといけない。この矛盾は、宇宙を遡ると高温であることを思い出すと、解消できる。ダークマター数を保存しない相互作用を媒介する重い粒子がいるが、その相互作用は繰り込み不可能である。運動学的混合のような繰り込み可能な相互作用とは異なり、繰り込み不可能な相互作用の強さは、今考えているエネルギーースケールと重い粒子の質量の比で抑制されている。弱い相互作用のフェルミ相互作用は、繰り込み不可能な相互作用の代表例で、その強さは、今考えているエネルギーースケールとヒッグス凝縮のスケール  $v_{ew}$  の比で抑制されている。逆にいうと、高エネルギー反応になればなるほど、繰り込み不可能な相互作用は重要になる。(実際ニュートリノの散乱断面積は、エネルギーの2乗に比例して大きくなる。) つまり、初期宇宙の高温プラズマでは、ダークマター数を保存しない繰り込み不可能な相互作用が重要で、ダークマター数の非対称性を作ることができる。

これは、宇宙初期のバリオン数自体は弱い相互作用の非摂動量子効果(スファレロン)で破れているが、現在の宇宙では陽子が長寿命であるのと同じである。(スファレロン効果のため、宇宙初期に保存しているのは、バリオン数からレプトン数を引いたものであるが、以下混乱のない限り、バリオン数と呼ぶ。) また大統一理論には、バリオン数をレプトン数に変える媒介粒子が存在するが、それも繰り込み不可能な相互作用で、今考えているエネルギーースケールと  $v_{GUT} \sim 10^{16} \text{ GeV}$  の大統一理論のスケールの比で抑制されている。この相互作用が繰り込み不可能であるのは、陽子がクォークからなる複合粒子であることに起因する。逆にいうと、複合粒子を考えないと、ダークマター数の破れの相互作用が強くなりすぎて、寿命が短くなりすぎてしまう。よって、標準模型粒子全てをコピーすると問題だったが、強い相互作用(クォークとグルーオン)だけはダークセクターにコピーすることにしよう(世代数は自由)。この時、最も軽いダークバリオンがダークマター粒子になり、ダークマター数はダークバリオン数のことである。

実は、bの条件はそれだけでは済まない。もしダークマター数の非対称性とバリオン数の非対称性に何の関係もなければ、現在のダークマターの質量密度と通常の物質の質量密度にも何の関係もなく、偶然の一一致問題が解決できないからである。この条件を満たす簡単な方法は、ダークマター数の非対称性とバリオン数の非対称性を関係づける、繰り込み不可能な相互作用を考えることである。つまり、高温ではバリオン数とダークマター数のとある線型結合が真の保存量になっていて、バリオン数がダークマター数、またはその両方の非対称性が作られると、それらを熱力学のルールに従って分配してくれる。

しかし、この相互作用には、標準模型セクターの粒子とダークセクターの粒子のどちらも関わるため、何か重いポータル粒子が必要となる。これには、右巻きのニュートリノがうってつけである。右巻きのニュートリノは、標準模型のゲージ相互作用を感じないので、ダークセクターに結合することができ、ダークマター数の非対称性とバリオン数の非対称性を関係づける、繰り込み不可能な相互作用を提供してくれる。

右巻きニュートリノには以下の二つの素晴らしい点がある。一つは、左巻きニュートリノの質量を説明してくれるところである。(2.2章で述べたように、ニュートリノの質量は新物理である。) 左巻きニュートリノと右巻きニュートリノは、ヒッグス凝縮を通じてレプトン数を保つディラック質量項をもつ。だとすると、ヒッグス凝縮程度 ( $v_{ew} \sim 100 \text{ GeV}$ ) の質量を持つ方が自然だが、その質量は  $m_\nu \sim 0.01 - 0.1 \text{ eV}$  と不自然に小さい。右巻きのニュートリノは、標準模型のゲージ相互作用を感じないので、レプトン数を破っているマヨラナ質量項を持つことができる。このマヨラナ質量  $M_N$  がディラック質量よりもとても大きいと、左巻きのニュートリノが、とても小さなマヨラナ質量

$$m_\nu \sim y_N^2 v_{ew}^2 / M_N \quad (7)$$

( $y_N$  はニュートリノの湯川結合定数) を持つことになる。これはシーソー機構と呼ばれる(例えば文献[29]を参照)。

二つ目は、右巻きニュートリノの崩壊が、レプトン数の非対称性を生むことである(レプトジェネシスと呼ばれ、例えば文献[30, 31]を参照)。右巻きニュートリノのマヨラナ質量項はレプトン数および粒子・反粒子対称性を破っている。このため、右巻きニュートリノ  $N$  のレプトン  $L + \text{ヒッグス } H$  へのレプトン数を増やす崩壊率と、反レプトン  $\bar{L} + \text{反ヒッグス } \bar{H}$  へのレプトン数を減らす崩壊率には違いが生じる:

$$\Gamma(N \rightarrow LH) \neq \Gamma(N \rightarrow \bar{L}\bar{H}) \quad (8)$$

この右巻きニュートリノの崩壊で作られたレプトン数の非対称性は、スファレロン過程によりバリオン数の非対称性に分配される。さらに、上述した右巻きニュートリノが媒介する繰り込み不可能な相互作用が、この非対称性をダークマター数の非対称性に分配してくれる。これが、我々の提案した共生成シナリオである。

これでまだ終わりではない。宇宙の温度が下がるとどうなるかを考えてみよう。ダーク強い相互作用が、ダーククォーク・グルーオン・プラズマが相転移を起こして、ダークハドロン・プラズマになるだろう。(これが1次相転移であれば、相転移に伴って泡が発生し、そこからの重力波を検出できる可能性がある。) ダーク核子と反

ダーク核子がダークパイオンに対消滅するが、ダークバリオン数の非対称性のために、最も軽いダークバリオンだけが残る。ここで、先のダークフォトンと同様に、ダークパイオンの熱的残存量が問題になる。ダークパイオンの崩壊・対消滅先を用意してやらないといけない。ここで、ダークフォトンの出番になる。つまり、電荷も含めて電磁相互作用をダークセクターにコピーする。ただし、ダークフォトンはダークヒッグス凝縮から質量を得ており、標準模型フォトンと異なる。簡単のためにダークフォトンがダークパイオンよりも軽いとすると、ダーク中性パイオンはダークフォトンに崩壊し、ダーク荷電パイオンはダークフォトンに対消滅する。(ダークヒッグスのダーク電荷とダーク荷電パイオンのダーク電荷が同じであれば、崩壊も可能である。) ダーク荷電パイオンは、ダーク電荷のために安定で、3.2章で議論した単純なダークセクター模型で“ダークマター粒子”と呼んでいたものと、ほぼ同じ性質を持つ。ただし、今の場合、その熱的残存量は無視できるほど小さい。3.2章と同様に、最終的にダークフォトンは、運動学的混合を通じて標準模型粒子に崩壊する。ダークセクターには、最も軽いダークバリオンであるダーク核子のみが残り、ダークマターをなす。

この我々の共生成シナリオの概略を図3にまとめておく。また、次4.3章で現象論を議論する(文献[32]にもとづく)前に、登場人物をまとめておく:

- ダークセクター: 強い相互作用+電磁相互作用のコピー(ダーク核子がダークマター粒子)およびダークヒッグス(ダーク電磁相互作用を破る)。
- ポータル: 右巻きニュートリノおよびダークフォトン。

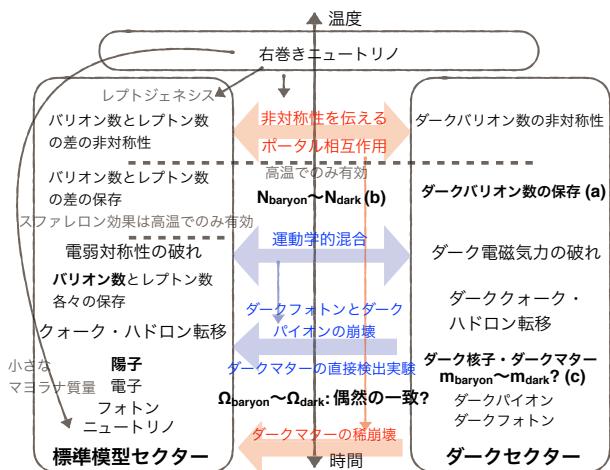


図3: 筆者らが提案した共生成シナリオにおいて、標準模型セクターとダークセクターがどのように進化してきたかの略図。

### 4.3 現象論

ダーク核子の質量は、前4.2章のcの条件から、 $m_{N'} \simeq 1\text{--}10\text{ GeV}$ 程度と決まってしまう。ダーク核子はダーク強い相互作用をしているので、3.1章で紹介した自己相互作用するダークマター(式(3))になっていても不思議ではない。ただし、実際の散乱断面積を計算するのは非常に困難である。そもそも歴史がそれを物語っている。我々の核子の散乱断面積はナイーブに期待される幾何学的なもの

$$\sigma_{NN \rightarrow NN} = 4\pi/m_N^2 \quad (9)$$

より大きい(ここでは、電磁相互作用の効果を無視している)。これを理解するために、ベーテは有効距離理論を展開し、核子の散乱断面積の散乱長が、非常に長いことを指摘した(詳しくは、文献[33, 34])。現代的には、これは非常に浅い束縛状態を作っているためであると理解されている(規格化できない束縛状態である仮想状態も含む)。散乱長はパイオンやバリオンの質量に応じて変化する。ここでは文献[35]の結果を用い、式(3)の散乱断面積を持つように、バリオンの質量に対してパイオンの質量を決める。<sup>7</sup>

自己相互作用以外にもダークマター現象論として面白い部分がある。ダークマターをなすのが、ダーク陽子かダーク中性子かで現象論は異なる。実は、ダークフォトンの質量がダーク重水素の束縛エネルギーよりも軽いと、ダーク元素合成が起きて、ダーク重元素がダークマターをなす可能性もある。以下では、簡単のために、ダークフォトンがダーク重水素の束縛エネルギーよりも重い時を考える。ダーク陽子とダーク中性子のどちらが支配的であるかは、ダーク核子の質量差で決まるが、ここでは50%:50%として扱う。(ダーク核子の質量差がダークパイオンの質量に比べて小さい時には、概ね正しい。) まずは、ダーク陽子から考える。ダーク陽子は、ダークフォトンを媒介して、標準模型荷電粒子と相互作用する。これは、直接検出実験で検出可能である。図4にPandaX-II実験[36]からの制限を、3.2章および図4で議論したダークフォトンからの制限の上に重ねて示した。XENON1T実験[37]の方がやや強い制限を与えると期待されるが、筆者の知る限り、軽い粒子が媒介するダークマター粒子と核子の相互作用は解析されていない。(ダークマターがダーク中性子のみからなる場合は、この制限はなくなることに注意してほしい。)

次にダーク中性子を考える。ダーク荷電を持たない右

<sup>7</sup>筆者の強い相互作用の素養では、文献[35]の結果がどの程度妥当なのか、判断がつかない。もし、読者の方で、ご自身が強い相互作用に詳しい、もしくは、身の回りに詳しい方がおられれば、是非ご一報いただきたい。近年ダークセクターの文脈で、ダーク強い相互作用が考えられることが増えてきた。しかし、強い相互作用特有の難しさのために、現象論的予言が進んでいない。強い相互作用の専門家とタッグを組みたい、と筆者は常常思っている。

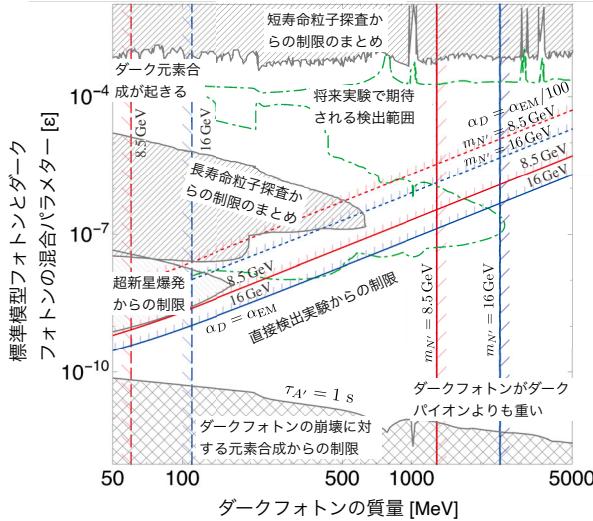


図 4: ダークフォトンに対する加速器実験、超新星爆発および元素合成からの制限(線影)の図(文献[32]から転載)。左方の垂直線よりも左では、ダーク元素合成が起き、ダークマターがダーク核子ではなく、ダーク原子核からなり、現象論が全く変わると考えられる。右方の垂直線よりも右では、ダークフォトンがダークパイオンよりも重く、加速器実験および宇宙論からの制限が変わる。中央のやや左肩上がりの線よりも上は、既存の直接検出実験で制限されている。直接検出実験に関しては、ダーク陽子とダーク中性子が 50%:50% でダークマターを構成していると仮定している。各線に対して、表示された質量を持つダーク核子が自己相互作用するダークマターになるように、ダークパイオンの質量を選んである。

巻きニュートリノと相互作用するのは、ダーク中性子である。つまり、ダーク中性子は右巻きニュートリノがもたらす非繰り込み項で崩壊する(長寿命ではある)。今の模型では、崩壊先は反ニュートリノとダーク中性パイオンである。前者はスーパーカミオカンデ実験で検出可能である(詳しくは、文献[38]を参照)。ダーク中性子の崩壊で作られたダーク中性パイオンは、ダークフォトンに崩壊し、ダークフォトンは、電子・陽電子に崩壊し、この際、終状態制動放射でフォトンを生成することもある。このようにダーク中性子の崩壊で生成された電子・陽電子は Voyager-1 [39] や AMS-02 実験 [40] で、フォトンは Fermi-LAT [41] で検出可能である。ダーク中性子の対消滅に対する間接検出実験の制限はどうだろうか。ダークバリオン数の非対称性のために、今の宇宙にはダーク中性子は残っておらず、ダーク反中性子しか残っていない。よって、そのままでは対消滅を起こさない(これは、一般的の非対称ダークマターにあてはまる)。しかし、右巻きニュートリノはダーク中性子・反中性子振動をもたらす。これにより、ダーク中性子とダーク反中性子がダーク中性パイオンに対消滅する。ダーク中性子の崩壊の場

合と同様に、最終的に生成される電子・陽電子およびフォトンは、間接検出実験において検出可能である[42]。これらの間接検出実験からの制限を図 5 にまとめておく。(再び、ダークマターがダーク陽子のみからなる場合は、これらの制限はなくなることに注意してほしい。)

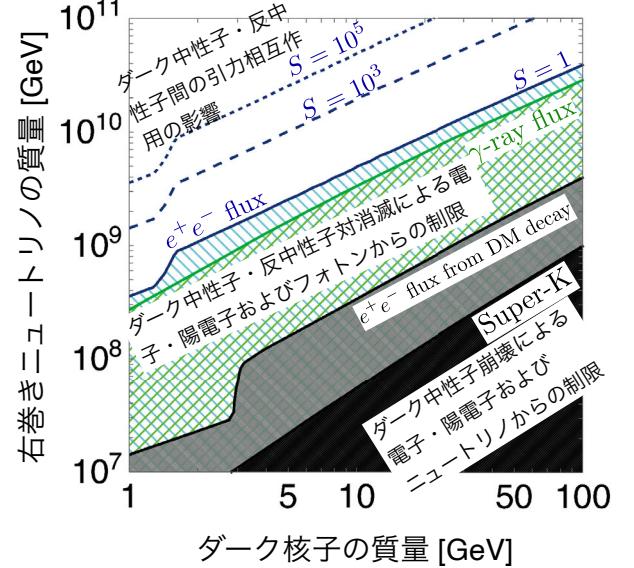


図 5: ダーク中性子の間接検出実験からの制限(文献[32]から転載)。左巻きニュートリノの質量と、観測されているバリオン非対称性を説明するために、右巻きニュートリノの質量は  $M_N > 10^9 \text{ GeV}$  でないといけない。ダーク中性子・反中性子の対消滅に対しては、引力相互作用によって対消滅断面積が幾何学的なものから  $S$  だけ増幅される可能性を考慮している。右巻きニュートリノの崩壊がバリオン数の非対称性を生成したと同時に、ポータル相互作用が重要でなくなるように、ポータル相互作用の大きさを選んである。ダーク陽子とダーク中性子が 50%:50% でダークマターを構成していると仮定している。

#### 4.4 ミラーセクター再び

前 4.3 章では、4.2 章の c の条件をダークマター粒子の質量を示唆するものとしたが、偶然の一致問題を本当に解決するためには、この質量も理論の予言でないといけない。ここで、バリオンの質量のほとんどが強い相互作用の閉じ込めのスケールから来ていることを思い出してほしい。つまり、今の模型では、強い相互作用とダーク強い相互作用の閉じ込めのスケールが同程度である理由づけが必要になる。ここで、ミラーセクターという考え方方が別の形で再び現れてくる。

4.2 章では述べなかったが、右巻きニュートリノとダーク中性子の相互作用は、非繰り込み相互作用であり、そ

れを媒介する重い粒子が必要である。このために、ダーク・スカラー・ダウンドクォークを我々は導入していた。実は、このダーク・スカラー・ダウンドクォークやダークヒッグスを含め、現象論的に必要なダークセクターの粒子は全て SU(4) 大統一理論に入る。<sup>8</sup> (ダーク電子だけが余分で、その質量はダーク陽子崩壊を禁制するために、重くしておく [43]。)

さらに、大統一理論を考えるメリットもある。標準模型が SU(5) 大統一理論、ダークセクターが SU(4) 大統一理論に埋め込まれると、大統一理論のスケールでは、運動学的混合が存在しない (ゲージ場がゲージ荷を持つためである)。運動学的混合は、さらに重い粒子によって媒介される非繰り込み項から、各々の大統一理論の破れを通じて現れる。さらに重い粒子がプランクスケール  $M_{\text{pl}}$  の質量を持つとすると、その大きさは、 $\epsilon \sim 10^{-2} (v_{\text{GUT}} / M_{\text{pl}})$  である。 $(v_{\text{GUT}})$  はダーク SU(4) 大統一理論の破れのスケール、標準模型の SU(5) 大統一理論の破れのスケールは  $v_{\text{GUT}} \sim 10^{16} \text{ GeV}$  にとった。) ダーク SU(4) 大統一理論の破れのスケールが低ければ、ビームダンプ実験で探査されている  $\epsilon \sim 10^{-6}$  を持つダークフォトンを説明してくれる。

さらに、ダーク SU(4) 大統一理論を眺めていると、これが標準模型の SU(5) 大統一理論で、標準模型のヒッグス粒子が高いエネルギーで凝縮した結果だということに気づく (文献 [44] にもとづく)。図 6 に、ゲージ相互作用の強さがエネルギーと共にどう変化するかの一例を示す。高エネルギーでは、標準模型もダークセクターも両方とも SU(5) 大統一理論で、互いのミラーだった可能性が示唆される。ただ、標準模型側とダークセクター側でその破れのパターンが異なり、ダークセクターではダークヒッグス粒子が、標準模型の SU(5) 大統一理論の破れのスケール程度で凝縮し、ダーク SU(4) 大統一理論になる。(このダークヒッグス粒子は、ダークフォトンに質量を与えるダークヒッグス粒子とは異なる。) 低いエネルギーで多少の違いは出るもの、その閉じ込めスケールは同程度になる。こうして、4.2 章の c の条件を強い意味で満たすことができ、偶然の一致問題を説明してくれる。

<sup>8</sup>最初の論文 [28] を書いた後に、筆者の所属する基礎科学研究院のラウンジでその話をした。すると、日本人ボスドクの桑原くんが、このダークセクターの模型は SU(4) 大統一理論に埋め込めるのではないか、と言いはじめたのがきっかけである。どういう思考回路をしているとそこに至るのか、筆者には今でも謎であるが、桑原くんは標準模型の大統一理論が大好きなので、そのためだと思う。

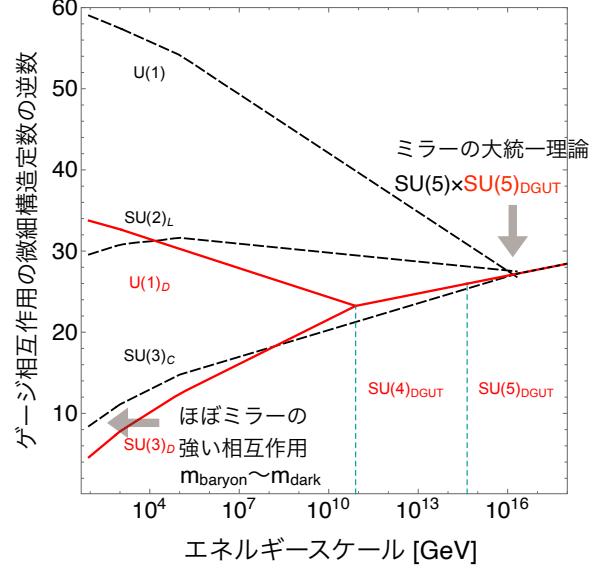


図 6: ミラー大統一理論における、ゲージ相互作用の強さのエネルギー依存性 (文献 [44] から転載)。ダークセクターの強い相互作用には 2 世代のクォークを仮定している。両セクターとともに、1-100 TeV 程度で超対称性粒子が現れると仮定している。

## 5 さいごに

本稿では、旧来のウインプ・ダークマターとは相補的な、ダークマター粒子がダークセクターを構成しているという考え方を紹介した。この考え方には、ダークマター粒子の安定性と大きく関係している上に、加速器実験におけるダークフォトン探査や、天文観測におけるダークマター探査が可能であり、興味深い。一方、ダークセクターという考え方自体は古くからあるものの、ダークマター現象論は興隆してから 20 年程度であり、超対称性のような多くの人を惹きつける夢がまだ出てきていないことも事実である。逆にいって、若手が大きく活躍するチャンスのある分野であり、さらに実験・理論ともに発展していくことを願う。

その中でも、筆者らはダークセクターが標準模型セクターのほぼミラーであるという考え方に対する目をつけている。この考え方には、なぜダークマターの質量密度が通常の物質の質量密度と同程度なのか、という問い合わせ自然な回答を与えてくれる。古くからあるミラーセクターはそのままでは上手くいかないが、その要点は非対称ダークマターという形で引き継がれている。我々の提案した共生成シナリオは、加速器実験、天文・宇宙観測と関係が深く、ダークセクターを考える醍醐味を伝えてくれたと期待する。さらに、このシナリオは大統一理論において、標準模型セクターとダークセクターがミラーであった可能性を示唆しており、少しでも夢を感じていただけたのであれば、幸いである。

## 6 謝辞

本稿は、基礎科学研究院の桑原拓巳博士およびHeejung Kimさん、宇宙線研究所の伊部昌宏准教授、中野湧天博士および小林伸さんとの共同研究にもとづいています。ダークマター自体を研究対象とし、その解明のためなら天文学から素粒子物理学まで何でもやる、という筆者の研究スタイルは、指導教官であった村山斉教授、吉田直紀教授および松本重貴准教授によって培われたものです。本稿は、松本重貴准教授に執筆を勧めていただき、音野瑛俊助教に編集を担当していただいたおかげで、世に出ることとなりました。皆さんに感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 鎌田歩樹, 天文月報 (印刷中)
- [2] J. S. Bullock and M. Boylan-Kolchin, “Small-Scale Challenges to the  $\Lambda$ CDM Paradigm,” Ann. Rev. Astron. Astrophys. **55**, 343-387 (2017)
- [3] J. Chang, J. H. Adams, H. S. Ahn, G. L. Bashindzhagyan, M. Christl, O. Ganel, T. G. Guzik, J. Isbert, K. C. Kim and E. N. Kuznetsov, *et al.*, Nature **456**, 362-365 (2008)
- [4] O. Adriani *et al.* [PAMELA], Nature **458**, 607-609 (2009)
- [5] N. Arkani-Hamed, D. P. Finkbeiner, T. R. Slatyer and N. Weiner, Phys. Rev. D **79**, 015014 (2009)
- [6] J. Hisano, S. Matsumoto and M. M. Nojiri, Phys. Rev. D **67**, 075014 (2003)
- [7] N. Arkani-Hamed and N. Weiner, JHEP **12**, 104 (2008)
- [8] J. L. Feng and J. Kumar, Phys. Rev. Lett. **101**, 231301 (2008)
- [9] B. Holdom, Phys. Lett. B **166**, 196-198 (1986)
- [10] J. D. Bjorken, R. Essig, P. Schuster and N. Toro, Phys. Rev. D **80**, 075018 (2009)
- [11] R. Aaij *et al.* [LHCb], Phys. Rev. Lett. **120**, no.6, 061801 (2018)
- [12] E. Kou *et al.*, PTEP **2019**, no.12, 123C01 (2019) [erratum: PTEP **2020**, no.2, 029201 (2020)]
- [13] F. Bergsma *et al.* [CHARM], “A Search for Decays of Heavy Neutrinos in the Mass Range 0.5- $\{GeV\}$  to 2.8- $\{GeV\}$ ,” Phys. Lett. B **166**, 473-478 (1986) doi:10.1016/0370-2693(86)91601-1
- [14] S. N. Gninenko, Phys. Lett. B **713**, 244-248 (2012)
- [15] C. Athanassopoulos *et al.* [LSND], Phys. Rev. C **58**, 2489-2511 (1998)
- [16] B. Batell, M. Pospelov and A. Ritz, Phys. Rev. D **80**, 095024 (2009)
- [17] J. L. Feng, I. Galon, F. Kling and S. Trojanowski, Phys. Rev. D **97**, no.3, 035001 (2018)
- [18] A. Ariga *et al.* [FASER], [arXiv:1901.04468 [hep-ex]]
- [19] 音野瑛俊, 田窪洋介, 高エネルギーNEWS **38-3**, 73 (2019)
- [20] M. Bauer, P. Foldenauer and J. Jaeckel, JHEP **18**, 094 (2020) doi:10.1007/JHEP07(2018)094
- [21] N. Aghanim *et al.* [Planck], Astron. Astrophys. **641**, A6 (2020)
- [22] J. P. Lees *et al.* [BaBar], Phys. Rev. Lett. **119**, no.13, 131804 (2017)
- [23] D. Banerjee, V. E. Burtsev, A. G. Chumakov, D. Cooke, P. Crivelli, E. Depero, A. V. Dermenev, S. V. Donskov, R. R. Dusaev and T. Enik, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **123**, no.12, 121801 (2019)
- [24] T. Åkesson *et al.* [LDMX], [arXiv:1808.05219 [hep-ex]]
- [25] C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes and R. P. Hudson, Phys. Rev. **105**, 1413-1414 (1957)
- [26] T. D. Lee and C. N. Yang, Phys. Rev. **104**, 254-258 (1956)
- [27] R. Foot, Int. J. Mod. Phys. A **29**, 1430013 (2014)
- [28] M. Ibe, A. Kamada, S. Kobayashi and W. Nakano, JHEP **11**, 203 (2018)
- [29] T. Yanagida, Conf. Proc. C **7902131**, 95-99 (1979)

[30] M. Fukugita and T. Yanagida, Phys. Lett. B **174**, 45-47 (1986)

[31] W. Buchmuller, R. D. Peccei and T. Yanagida, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **55**, 311-355 (2005)

[32] A. Kamada, H. J. Kim and T. Kuwahara, [arXiv:2007.15522 [hep-ph]]

[33] 島村勲, 別冊「しようとつ」, 原子衝突学会 (2017)

[34] X. Chu, C. Garcia-Cely and H. Murayama, JCAP **06**, 043 (2020)

[35] J. W. Chen, T. K. Lee, C. P. Liu and Y. S. Liu, Phys. Rev. C **86**, 054001 (2012) doi:10.1103/PhysRevC.86.054001

[36] X. Ren *et al.* [PandaX-II], Phys. Rev. Lett. **121**, no.2, 021304 (2018) doi:10.1103/PhysRevLett.121.021304

[37] E. Aprile *et al.* [XENON], Phys. Rev. Lett. **121**, no.11, 111302 (2018) doi:10.1103/PhysRevLett.121.111302

[38] K. Frankiewicz, Doctoral Thesis, National Center for Nuclear Research (2018)

[39] M. Boudaud, J. Lavalle and P. Salati, Phys. Rev. Lett. **119**, no.2, 021103 (2017)

[40] M. Aguilar *et al.* [AMS], Phys. Rev. Lett. **113**, 121102 (2014)

[41] M. Ackermann *et al.* [Fermi-LAT], Phys. Rev. Lett. **115**, no.23, 231301 (2015)

[42] M. Ibe, S. Kobayashi, R. Nagai and W. Nakano, JHEP **01**, 027 (2020)

[43] M. Ibe, A. Kamada, S. Kobayashi, T. Kuwahara and W. Nakano, JHEP **03**, 173 (2019)

[44] M. Ibe, A. Kamada, S. Kobayashi, T. Kuwahara and W. Nakano, Phys. Rev. D **100**, no.7, 075022 (2019)