

新物理探査の橋頭保としての暗黒物質研究

新物理はどこに?

素粒子物理学の分野では、前世紀から今世紀にかけ、いかに自然に電弱対称性の破れのスケール、つまり基本的な力から弱い力と電磁気力が生じるエネルギースケール（弱い力を媒介するウィークボゾンの質量程度、1000億電子ボルト = 100 GeVのエネルギースケール）を自然に説明するのか、を主な指導原理として発展してきました。この文脈において活発に議論されたトピックが、超対称模型、余剰次元模型、複合ヒッグス模型であり、これらを検証するための実験や観測がこれまで行われ、また現在も続いています。しかし、近年の大型ハドロン加速器実験（LHC）をはじめとする様々な実験において、これら新物理の確かな証拠を見つけられないこともあり、この指導原理に疑義が生じています。確かに電弱対称性の破れのスケールは自然に説明されるべきですが、これまでに提案されてきた模型とはかなり異なった機構やアイデアで説明されるのでは? という疑義です。ごく最近ではこの考えに沿った研究も盛んになってきましたが、未だ皆が納得す決定的なアイデアの提案には至っていません。

注目される暗黒物質の正体解明

そこで注目されつつあるのが、暗黒物質の正体解明を指導原理として素粒子物理学を発展させる戦略で

す。暗黒物質は、1934年にフリッツ・ツビッキー博士により銀河団内の銀河の運動を説明するための未知なる物質として導入され、今世紀に入り宇宙背景放射の揺らぎ観測等を通じその存在が確立しましたが、その具体的な性質については未だ不明です。更に、素粒子標準模型の枠内に暗黒物質の候補となり得る素粒子、あるいはそれらから構成される物質は存在しません。そのため、暗黒物質の正体が解明されれば、それを橋頭保として新物理探査へと船出することが可能となります。つまり、まずはあらゆる手法を用いて暗黒物質の正体を明らかにし、そして標準模型の背後に存在する新物理探査を行おう、という戦略です。

ここで、暗黒物質の性質について現在までに分かっている主なことについてまとめておきます。まず、暗黒物質は電氣的に中性です。もちろん、暗黒物質粒子が非常に微小な電荷を持つことや、とても重い場合に多少の電荷を持つことは許されますが、このような極端な例について今回は考えないことにします。次に、暗黒物質は少なくとも零でない質量を持ち、現在の宇宙で（スピードが光速に比べ十分に小さい）非相対論的に運動しています。また、宇宙の年齢（約130億年）に比べて十分に長い寿命を持っています。更に、通常の物質と殆ど反応（相互作用）をしません。最後に、定量的な知見として、宇宙に存在する暗黒物質の平均質量密度（1立方センチメートルあたりの質量、通称暗黒物質質量）が約 $2 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ であることも知られ

ています。

しかしながらこれらの知見を踏まえても得られている情報は決して多いとは言えず、例えば暗黒物質が未知なる素粒子であると仮定したとしても、その質量が 10^{-55} gから 10^{-5} gの50桁の範囲にある、といった大雑把なものが導き出せるのみです。このような広範囲の質量にわたって暗黒物質の正体を実験的に探ることは不可能ですので、現在では幾つかの有力な仮説に基づいてその検出が試みられています。有名な仮説としては熱的暗黒物質仮説、アクシオン仮説、ステライル・ニュートリノ仮説、原始ブラックホール仮説等が挙げられますが、これまでのところ熱的暗黒物質仮説に基づいた探査が最も精力的に行われているため、本稿ではこの仮説に焦点を当て、その現状について要点を絞って解説したいと思います。

熱的暗黒物質仮説

熱的暗黒物質仮説とは「暗黒物質が（未知なる）素粒子であり、現在観測されている暗黒物質量は凍結機構により説明される」とする仮説です。凍結機構とは何かというと、宇宙初期において暗黒物質は他の物質との反応を通じて熱化学平衡にありましたが、やがて平衡を保とうとする反応率が宇宙の膨張率を下回ることで、その暗黒物質量（平均質量密度）が決定されたとする機構のことです。この様子を図示したもの

が図1です。ここで、暗黒物質の質量 m と宇宙の温度 T はいずれもエネルギーの単位で表されるものとします。宇宙の温度が暗黒物質の質量と同程度の時には暗黒物質量が熱化学平衡時のものと一致していますが、やがて温度が暗黒物質の質量の数10分の1以下に下がるとその量が平衡時のものからずれ、最終的に一定数残ることが見て取れます。同様の凍結機構が初期宇宙におけるビッグバン軽元素合成や宇宙の晴れ上がりにも適応され成功を収めていることもあり、それを暗黒物質質量に応用したものが熱的暗黒物質仮説の本質であることから、これは極めて自然な仮説と言えます。特に暗黒物質の質量が、上述の電弱対称性の破れのスケールと同程度の場合、この仮説を満たす暗黒物質はWIMP（Weakly Interacting Massive Particle）とも呼ばれ、具体的な標準模型を超える新物理の観点でも盛んに議論されています。

熱的暗黒物質は初期宇宙において他の物質と熱化学平衡にあったと仮定されるため、必然的に標準模型の素粒子と相互作用を持ちます。熱的暗黒物質の検出は、まさしくこの事実を当てに行われます。問題は標準模型のどの素粒子と相互作用を持つのかですが、それにより検証戦略も異なってきます。そこで、熱的暗黒物質を包括的に探査するため、その量子数に基づいた系統的な分類が行われます。量子数とは自然に存在する力に対する“電荷”のことであり、具体的には電磁気力における電荷が例として挙げられます。

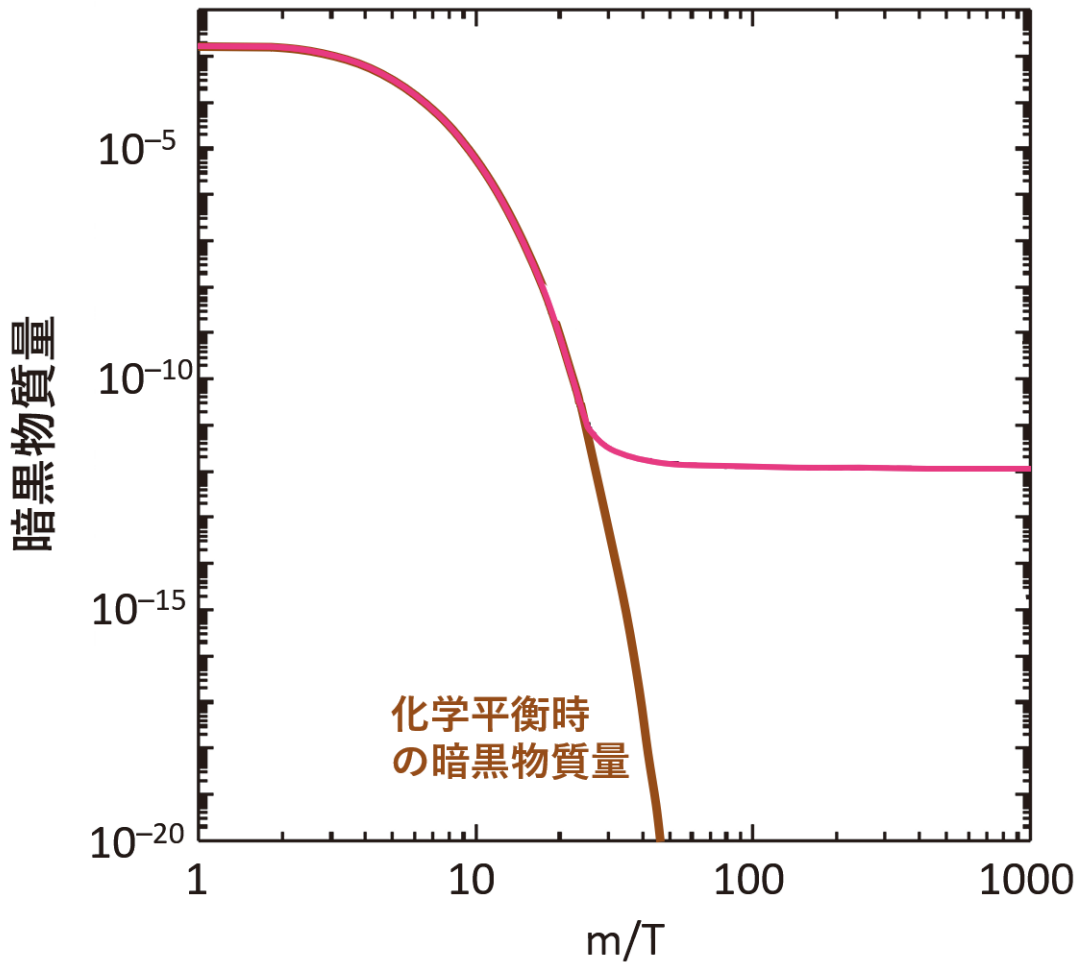


図1：熱的暗黒物質仮説における暗黒物質質量（暗黒物質と輻射の数密度比）の典型的な振舞い。ここで m は暗黒物質の質量、 T は宇宙の温度で、共にエネルギーの単位で表されるものとする。

上述の通り熱的暗黒物質は電気に中性であり、また強い力に対する電荷（カラー荷）を持つならば既に発見されているはずであるという事実を考慮しますと、ここで注目すべきは弱い力と重力に対する量子数ということになります。弱い力に対する量子数は弱荷と呼ばれ、重力に対する量子数（の一つ）はスピンです。

重力に対するもう一つの量子数は質量に他なりません。これは弱荷やスピンで熱的暗黒物質を分類した後に、計算により予言される暗黒物質質量が近年の宇宙観測の結果を再現するべしという要請からその範囲が導かれます。つまり熱的暗黒物質の質量は、この分類において従属的なアウトプットとなります。

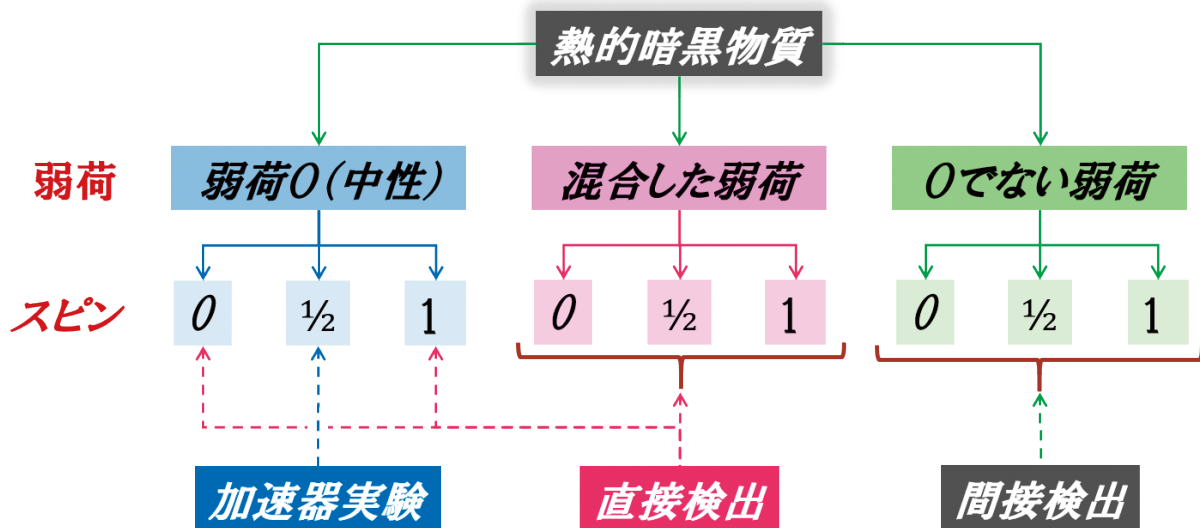


図2：熱的暗黒物質の分類と、それぞれのケースにおける有効な検出方法。

熱的暗黒物質の分類

熱的暗黒物質をその弱荷とスピンの基づいて分類したものを図2にまとめます。まず熱的暗黒物質の弱荷に関して、基本的には1/2を単位に 0、1/2、1、…の値のいずれかを持ちますが、例外が存在します。それは異なる弱荷が混じった（例えば弱荷 0と1/2 が混じった）ケースです。親しみのある電磁気学を例にとりますと、電荷0と電荷1が混じった素粒子を考えることに相当します。この混合は電弱対称性の自発的な破れに伴い引き起こされるのですが、もちろんこれは弱い力でのみ起こり電磁気力や強い力では起こりません。その結果、弱荷が0（弱い力に対して中性）である、特定の0でない弱荷を持つ、混合した弱荷を持つ3種類に分類されます。一方、熱的暗黒物質のスピンの関しては、暗黒物質と標準模型の素粒子との相互作用の

強さを保証する「繰り込み可能な相互作用」を念頭に置きますと、0、1/2、1の3種類に限定されます。相対論的場の量子論の特性により、熱的暗黒物質の弱荷（あるいはその混合）とスピンを決めることで標準理論の素粒子達との相互作用、つまりラグランジアンが一意に決まり、各々のケースについて熱的暗黒物質を系統的かつ定量的に探査することが可能となります。

分類に基づく熱的暗黒物質の検出法

上述の熱的暗黒物質の分類はKavli IPMUにおいて素粒子現象論を主に研究する研究者達により提案されたもので、現在では、種々の熱的暗黒物質が具体的にどのように検出され得るのかについて、様々な実験グループとの議論や共同研究を通して研究が進展しています。これらの議論からまとめられた、各々の熱的暗

黒物質のケースにおける最も有効と思われる検出実験についても図2に示してあります。

まず弱荷が混合したケースでは、その混合の起源となる相互作用が、熱的暗黒物質粒子とヒッグス粒子（あるいは弱い相互作用を媒介するZ粒子）との結合を呼び、必然的に核子との散乱が大きいと予言されます。そのため、地下実験における直接検出探査が非常に有効となり、実際、世界各国において精力的にそれらの実験が進められています。また、Kavli IPMUも参加している日本のXMASSグループが参加を決定したXENONnT 実験^{*1}をはじめとして、大型の直接探査実験計画が提案され、そして承認されており、もし暗黒物質がこのケースに相当するならば近い将来に検出されることが期待されます。

次に、特定の0でない弱荷を持つケースでは、一般にその質量が陽子の数千倍と予言され、加速器実験における探査が難しくなります。一方、筆者らにより暗黒物質の自己対消滅がゾンマーフェルト効果^{*2}により著しく増大することが明らかにされ、間接検出実験がその探査に大変に有効となることが判明しています。特に日本とドイツのCTAグループ^{*3}による（天の川銀河の）伴銀河のガンマ線観測が注目されています^{*4}が、暗黒物質を高感度で探査するためには、伴銀河内の暗黒物質分布に関する詳細な情報が必要となります。この点については、日本のすばる望遠鏡を用いた分光観測計画 PFS（Kavli IPMUが推進主体）が重要な役割を果たします。更に地下実験における直接探査が第3世代（XENONnTの次世代であるDARWIN実験^{*5}等）に移行した際には、このケースの熱的暗黒物質も探査可能となり、これら将来実験の実現が望まれます。本ケースの熱的暗黒物質は、LHC実験におけるヒッグス粒子発見後に特に注目されたアノマリー伝達機構に基づいた超対称模型^{*6}（Pure Gravity Mediation 模型等）において予言されており、暗黒物質の間接探査や直接探査における検証が喫緊の課題となっています。また幾つかの新物理模型においては、凍結機構のみならず他の非熱過程においても本ケースの暗黒物質が生

成されるシナリオが議論されており、その際にはテラスケール（1兆電子ボルト=1 TeVのエネルギースケール）のみならず電弱対称性の破れのスケールの質量領域の探査も大事になります。この場合、将来におけるLHC実験や国際線形加速器実験（ILC）等の将来レプトン加速器実験での探査が重要となります。

最後に、弱荷を持たないケースでは、そのスピニングが0や1のときは核子との散乱が大きく予言され、弱荷が混合したケースと同様に地下実験における直接探査が有効となります。一方、スピニングが1/2のときには必ずしも散乱が大きくなるわけではありません。特に熱的暗黒物質が主にレプトンと相互作用をする場合、主にヒッグス粒子と特殊な相互作用（擬スカラー結合）をする場合、更にはその質量が陽子以下となる「軽い暗黒物質」の領域が未探査であり、これまで議論されてきたものとは異なる手法を用いた探査が必要となります。前者の2つの例においては、ILC等の将来レプトン加速器実験における暗黒物質生成やヒッグス粒子の詳細な測定が重要な役割を果たします。一方、軽い暗黒物質領域については、場の量子論の特性により軽い暗黒物質のみならず軽い媒介粒子（スカラー粒子かベクター粒子）の存在が予言されます。これら軽い粒子の探査には、Belle II 実験やK中間子の稀崩壊実験

*1 XENONnTとはイタリアのグランサッソ国立研究所（LNGS）地下実験施設で行われる予定の暗黒物質の直接探査実験のことで、8トンの液体キセノンを用いる。暗黒物質とキセノン原子核との散乱により生じる反跳を捉えることを目的としている。

*2 ゾンマーフェルト効果とは、始状態の粒子間に働く長距離力が、非弾性散乱の断面積を長距離力が働かない場合と比べて著しく変更する効果のこと。暗黒物質が弱い力を媒介する素粒子（W、Zボソン）より十分に重いと、弱い力は暗黒物質にとって長距離力として働き、対消滅断面積等が著しく増大することが知られている。

*3 CTAとは20 GeV~100 GeV 領域に渡るガンマ線天文台（Cherenkov Telescope Array、チェレンコフ望遠鏡アレイ）の略称。

*4 伴銀河の中でも、特に「矮小楕円体銀河」と呼ばれる極めて暗い小さな銀河は、その質量の大部分が暗黒物質であるとされており、このためガンマ線観測による暗黒物質探査の主な対象の一つとなっている。

*5 DARWINとは約50トンの液体キセノンを用いる暗黒物質の直接検出実験（DARK matter WImp search with liquid xenON）の略。

*6 ヒッグス粒子発見後に特に注目を集めた超対称模型の一つ。ヒッグス質量を説明し大統一理論とも相性が良い一方、超対称模型でしばしば問題となるフレーバーやコスモロジーに関する問題を回避する最もシンプルな模型として知られている。

等の高輝度加速器実験がその検証に必要不可欠になります。また最近ではヒッグス粒子から媒介粒子への崩壊も重要な探査手法となり得ることが指摘され、その場合にはヒッグス粒子の稀崩壊に対する精密測定が重要となります。

おわりに

以上の通り、素粒子物理学の分野では、標準模型の完成と新物理のシグナル未発見の現状を受け、標準模

型を超える次の新物理のスケールの同定に全力が注がれています。この観点から暗黒物質の正体説明が役割を果たすことが期待されており、本稿でその現状と将来の見通しについて解説しました。後半でやや詳しく述べた通り、ここ数十年において、今ほど様々な分野の理論と実験の研究者の密な議論に基づいた素粒子物理学の研究が喫緊の課題である時代はありませんでした。その意味において、Kavli IPMUは望み得る最高の環境を提供してくれており、今後もこの線に沿って研究に邁進して行きたいと考えています。

Tea Break:

IPMUとは何の略語？

ドイツ人の数学者で数理物理学者でもあったダフィット・ヒルベルトは、19世紀末から20世紀初頭にかけて活躍し優れた業績を挙げました。彼が残したこんな逸話があります。ある時、彼の学生の一人が詩を学ぶために退学したと聞いてこう言いました。「結構なことだ。彼は数学者になるには想像力が足りなかった。」

さて、皆さんの想像力に訴えたいことがあります。IPMUという略語の意味について知らない人が見当をつけるとしたら何と言うか、気の利いた答えを競い合うことにしたいと思います。例えば、

The Institute for the Pretty Much Unknown,
The Infrared in Physics and the Mathematics of the Ultraviolet ...

優れた解答はKavli IPMUのウェブサイトに掲載すると共に、Tea Timeの会場の藤原交流広場に掲示し、Tea Breakというタイトルに一層ふさわしいものにします。

(アレクサンダー A. ボロノフ)

Feature