

なぜ WIMP を探すのか、どうやって捕らえるのか

はじめに

神岡観測所は富山市と高山市の間、池ノ山の地下に位置しています。この観測所ではダークマターが発見されたわけではないのですが、その性質の一端が明らかにされつつあると言えるでしょう。そこで行われているXMASS実験は、同様の目的で行われている実験の一つです。以下、なぜダークマターを捕らえたいのか、またどうやって捕らえるのか、についてお話ししましょう。しかし、この話題はとても大きな広がりをもっているため、全体を網羅するのは難しく、適当に2、3の話題を取り上げ、また私たちがXMASSに適用した方針をとるに至った選択の特徴的な点を述べるにとどめることをお許しください。

私たちはカブリ数物連携宇宙研究機構の一員ですので、宇宙から話を始めることにします。

ダークマターと宇宙

科学上の偉大な成功談の一つに、私たちの宇宙の歴史について一貫した矛盾のない物語を提供するために、如何にして素粒子物理学と天文学が統一されたのが挙げられます。その中核となるのは、冷たいダークマター (Cold Dark Matter, CDM) モデルに宇宙項 Λ を加えた宇宙モデル (Λ -CDMモデル) のパラダイム

とビッグバンであり、この科学的体系が打ち立てられた基礎の一つが素粒子の標準模型です。それらが相俟って、はじめて天文観測の膨大なカタログが理解できるのです。このような物語が純粋に科学に基づいていることは、人類の歴史上初めてのことなのです。

この物語は、光や電波で観測できる宇宙の歴史全般を通じて天文学的観測結果をうまく描き出しています。望遠鏡により、赤方偏移が大きくなればなるほど遠い過去の対象が観測され、そこからズーム・アウトすることにより、私たちはこの歴史の進展を観ることができます。さらに、化学的要素の相対的存在量や、天球上の銀河の分布に見られる豊富な構造を説明することにより、この物語は電磁波で記録されている最も初期の宇宙よりも過去に遡りさえします。

しかし、もはや解決すべき問題が何も無いわけではありません。一致しない点が色々あります。リチウム7の存在量には、予言と観測量の間になくとも3倍の違いがあります。また、この模型により宇宙に存在する物質の大規模構造は非常に良く再現されますが、小規模構造は予想から外れているように見えます。しかし、全体的には私たちの物語は、最初の星が誕生した時点まで残存した元素の相対的存在量を、宇宙が光が初めて直進できるようになった瞬間 (宇宙の晴れ上がり) の残光に刻印されたパターンおよび現在の銀河の分布と有意に関連づけることに成功を収めています。素晴ら

しい成功であり、高くそびえ立つ成果と言えます。

実は、この成功談に伴う理解の中には、とても驚くべきことが2、3組込まれているのです。最大の驚きは過去よりも未来に関わっています。エドウィン・ハッブル以来、私たちは宇宙が何らかの形で膨張していることを知っています。宇宙マイクロ波背景放射の発見以来、それはビッグバンにより生じたものと仮定することが必要でしたが、それ自体はそれほど驚くことではありません。予想外だったことは、宇宙の膨張が加速していることです。私たちの物語によれば、これは宇宙のダークエネルギー（暗黒エネルギー）と呼ばれる成分が引き起こしているのです。ダークエネルギーは私たちのパラダイムの Λ に当たるもので、現在では宇宙の全成分の約3分の2を占めています。

しかし、本稿ではダークエネルギーについては脇に置いて、宇宙の成分の中で2番目に大きなダークマター（暗黒物質）に注目することにします。それはXMASS実験で探索しているもので、宇宙の全成分の4分の1をやや上回る量が存在します。宇宙のたった20分の1が私たちの知っているもの、例えば輝く太陽のような、あるいは私たちが握手する友達のような、あるいはまた私たちがシミュレーション計算を行っているコンピューターのようなもの、つまり「物質」なのです。私たちが望遠鏡で見ているのは宇宙の成分のうちの20分の1でしかない物質であり、水面に現れている氷山の先端を見ているようなものです。また、この20分の1は私たち素粒子物理学者が良く知っていると考えているもの、つまり素粒子の標準模型によって記述されるものです。標準模型では説明できない現象を発見しようとこれまで多大な努力と資金が注ぎ込まれてきましたが、大きな食い違いはまだ見出されていません。

それにもかかわらず、理論家たちは標準模型には欠点があると考えています。標準模型の成功を保証するには、多くのパラメーターを既知として与えることと、偶然とはとても考えられないような微調整が必要とされます。そこで理論家達は次の大仕事、つまり、標準模型を包含し、標準理論に内在することが認識されて

いる任意性を、少なくとも減少させる何らかの機構を有する理論の構築を競っています。こういった理論は大抵、理論家の目から見て標準模型がもつ欠点を大なり小なり緩和する役割をする新粒子を含むものです。

ダークマターの性質

ダークマターもまた微小な物質（素粒子）であるべきだという仮定は、少なくとも素粒子物理学者にとっては自然に見えます。天文観測とダークマターを含む模型を用いた計算から、ダークマター素粒子の性質についてある制約条件を導くことができます。標準模型に現れる素粒子でこの注文にぴったり当てはまるものはありません。私たちの宇宙にはダークマターが存在し、理論家には新粒子を期待する強い理由があり、そのうちの幾つかは注文にぴったり合うかもしれない、というこのニュースには興奮を禁じ得ません。実際、この宇宙論的な必要性和理論的な願望の相乗効果により引き起こされた実験の努力には2つの大きな流れがあります。一つはアクシオンの探索です。アクシオンは、私たちが強い相互作用のCP（物質と反物質の対称性）問題と呼んでいるものに対して理論家が示したエレガントな解決方法です。もしアクシオンが存在するならば、その性質によってはダークマター素粒子となり得ます。アクシオンは光子に転換する可能性があり、これを利用して探索します。WIMPは別種のダークマター素粒子の候補ですが、Weakly Interacting Massive Particlesを意味し、未知の重い素粒子で弱い相互作用しかしないものの総称です。観測によってはっきり示されていますが、ダークマターは普通の物質と強い相互作用や電磁相互作用をしません。従って、ダークマターが普通の物質やダークマター自身と相互作用するとすれば、知られている相互作用のうちで一番強いのは「弱い相互作用」ということになります。逆に、もしダークマターが何らかの形の弱い相互作用をするならば、私たちの周りにある普通の物質との弱い相互作用を通じて姿を現すはずで、このような事象が起きた



XMASSの実験室ホールと水遮蔽タンク。

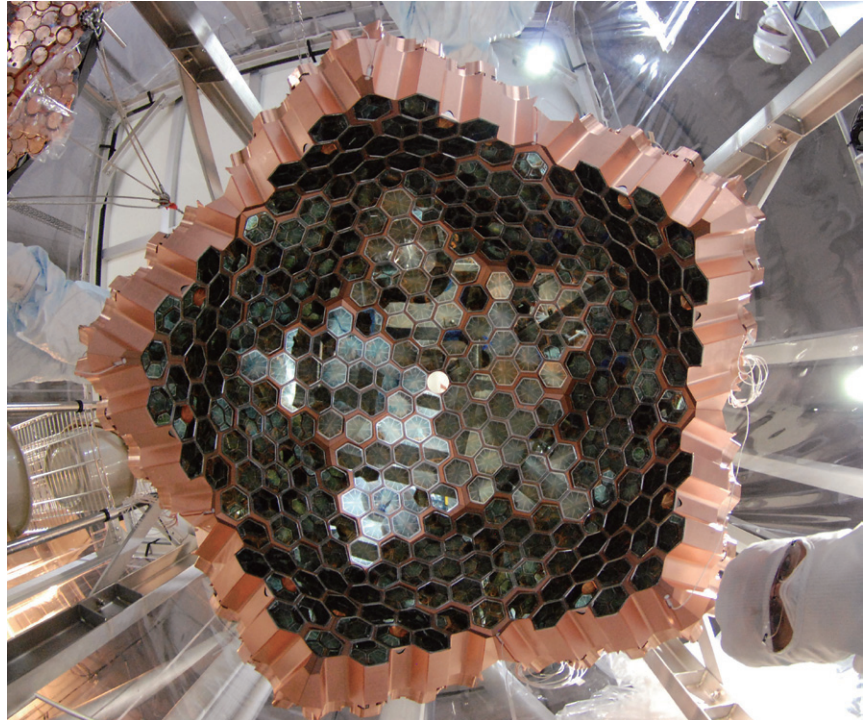
ことを示す信号を探す目的に特化した実験を、「直接測定実験」と呼びます。現状のXMASS実験は、WIMPに対する直接測定実験として計画されたものです。

ダークマター素粒子をWIMPと考える動機は、次の計算によるものです。粒子がそれ自身の反粒子と衝突して消滅する頻度が弱い相互作用のスケールで決まっているとすれば、私たちが現在の宇宙で観測するダークマターの密度が自然に得られることが示されるのです。実に興味深いことです。この定量的な一致は「WIMPの奇跡」として知られています。

片手落ちを避けるため、私たちが見る宇宙をダークマター無しに説明する試みもあることも述べておかなければなりません。冷たいダークマターのパラダイムは観測された数多くの異なる側面を説明することに成功を収めていますが、ダークマター無しではいかなる試みもその段階に及びません。典型的にはこのような試みは特定の（例えば銀河の回転のような）問題の解

決を図るものですが、冷たいダークマターとは違って、特に解決するように設定された問題以外の問題も同時に解決するという事はできていません。

私たちが神岡で行っている実験の各論について詳しく見る前に、もう一つコメントしておきますが、現在、直接測定実験でWIMPの相互作用ではないかとされている信号を得たという実験結果が幾つか報告されています。大部分の実験家は、これらのダークマターの信号だと言われているものが実験的な検出のしきい値（そこではバックグラウンドが優勢になる）に近いということを用意深く指摘していますが、理論家の一部は既にこれらの観測したと想定されているもの全て（それに加えて観測されないと報告された結果）に対応できるシナリオ作りを競い合っています。ダークマターについて、真実を発見するには時間と大変な努力を要するでしょう。詰まるところ、多様な異なる標的物質について首尾一貫した結果を得る迄は、私たちは



組み立て中のXMASS 800kg 測定器の内部。光って見えるのは光電子増倍管の光陰極面。外側は銅の光電子増倍管ホルダー。

WIMPの信号を信じる訳にはいきません。物質に働く弱い相互作用は良く理解されていますから、たった一つでも肯定的な測定があって、それから反応の断面積が推測できれば、異なる標的物質に対して期待される反応率も理論家は計算できるのです。

神岡での実験

XMASS とは、ユニークな測定器の構想とユニークな標的物質を基に構築された実験プログラムを表します。このプログラムについては、2000年にカブリIPMUの鈴木洋一郎副機構長がカナダのサドベリーで開催された LowNu (Low Energy Neutrino Physicsの略) 研究集会で初めてその構想を示しました。XMASS は略称ですが、Xenon detector for weakly interacting MASSive particles (弱い相互作用をする重い粒子検出用のキセノン測定器)、あるいはXenon MASSive

neutrino detector (キセノンを用いた巨大ニュートリノ測定器)、さらに Xenon neutrino MASS detector (キセノンを用いたニュートリノ質量測定器) という具合に英語で3つの読み方が可能です。この色々な読み方は実験プログラムの多様性を示しています。現在実現されている測定器は、有感体積内のキセノン総重量 835 kg ですが、これは WIMP 発見を目的としてデザインされたもので、一番目の読み方に相当します。プログラム最終段階の XMASS は解析に用いられる有効質量10トンとされており、これは世界の同業研究者達が現在準備している次世代測定器の標的質量の10倍に相当します。その段階の測定器の能力は、3番目の読み方が示すようにキセノン136の「ニュートリノを出さない2重ベータ崩壊」探索(発見されればニュートリノの質量について情報が得られる)に手が届くものとなるでしょう。同時に、このような巨大測定器は pp ニュートリノや⁷Be ニュートリノと呼ばれる太陽からのニュートリノを検



60面体のXMASS測定器と実験チーム。

出する、2番目の読み方の「巨大ニュートリノ測定器」でもあります。最終段階のXMASSに対して、実際には太陽ニュートリノの信号は測定器のWIMP検出能力を制限するバックグラウンドとなります。

稀な現象の探索全てにおいてバックグラウンドが主要な懸念要素であり、WIMPの探索だけに限った話ではありません。宇宙線により大気中で生成された高エネルギーのミュー粒子が突き抜けることによる測定器の放射化を避けるために、実験はできるだけ深い地下で行う必要があります。神岡の地下実験室は昼夜を問わず研究者がいつでも容易に立ち入ることができ、岩盤の厚みはミュー粒子に対して十分な遮蔽効果を与えてくれます。XMASSは水を能動的遮蔽体（宇宙線ミュー粒子がバックグラウンドとならないように、その通過を示す信号を出す）として用いた最初のダークマター測定器です。また、この水遮蔽体は受動的ではあるが外部から侵入するガンマ線を吸収し、周囲の

岩盤から出てくる速中性子を低速の熱中性子に変えます。このようにXMASS実験は外部からのバックグラウンドに対して何重もの厳重な防御機構を備えています。地下の環境に共通する悩みの種である放射性ラドンガスに対しては、実験室ホールの壁をラドンの透過を防ぐプラスチックで覆い、また外部（地上）から導入した空気を放出して実験室内のラドン濃度を低減させるという対策をとっています。また、XMASSを遮蔽する密閉水タンクの上部空気層には、スーパーカミオカンデで行われているように、特別に用意されたラドン除去空気を供給しています。

私たちの測定器の有感体積中では、外部から入り込むバックグラウンドに対して、高密度の液体キセノン自身が最も内側の防御層となります。この実験のデータ解析で、もし測定器内にあるキセノンの中心近傍から得られるデータだけを使うと、「有効体積」と呼ぶ最も内側の使用できる部分は小さくなりますが、その

外側の「使用されない」液体キセノンが外部から侵入するガンマ線を吸収して、有効体積内のバックグラウンドをさらに減らしてくれます。その意味で、私たちの測定器の有感体積には自己遮蔽機能があります。これは、この測定器のデザイン上の重要な特徴です。

XMASS 測定器の概念における中心的なアイデアは、放射化学的に非常にクリーンな環境を用意し、WIMPとの衝突により電荷を持った原子核がはじき飛ばされて発生するシンチレーション信号を最大限に利用しようというものです。液体キセノンはシンチレーション光を発生し、その発光量が大きいこと、またキセノンの質量数が大きいことから有感標的物質として選ばれました。アルゴン、クリプトンと違い、キセノンには有感領域での固有のバックグラウンドとなる長寿命のアイソトープがありません。しかし、ほんの微量でもクリプトンがキセノンに混入すると私たちの実験にとって有害な影響を与えます。XMASS実験は、キセノン中の残留クリプトンをppt (1兆分の1) レベルまで除去する、非常に効率の高い蒸留システムを開発しました。化学的に不活性な希ガスを除き、不純物は市販の「ゲッター」ユニットで容易に除去できます。私たちは、キセノンを連続的にゲッターに通さなくても測定器を最適な状態に維持できることを見出しました。私たちは、最適性能で非常に安定に稼働できる上、液体キセノンを積極的に循環させる必要が無い測定器の製作に成功したのです。一度稼働して初期の清浄化の過程が完了すれば、液体キセノンに熱を流入させる各種熱源とバランスさせるための冷凍だけが必要なこととなります。これは素晴らしい成果であり、私たちの戦略の重要な裏付けとなるものです。

現在のXMASS 800 kg測定器の調整運転を行った際、最大のバックグラウンド源として、測定器内部の表面あるいはその近傍にベータ崩壊する放射性同位元素が見出されました。個別のバックグラウンド源は特定され、現在、終了間近となっている改良作業で対処しています。このバックグラウンドにもかかわらず、測定器の調整運転の段階で得られた、低質量のWIMP

の相互作用と太陽からのアクションに関する制限について論文を発表しました。私たちは、改良された測定器でバックグラウンドの条件が大きく改善されることを楽しみにしています。

シンチレーション光については特に重要視しており、測定器の対称的な形状と642本の量子効率の高い光電子増倍管を用いて測定器内壁表面の60%を光電陰極でカバーしている点にそれが反映されています。現在の私たちの測定器の性能を証明する指標として、光電子増倍管によってシンチレーション光から得られる信号の大きさが優れていることが挙げられ、実際、運動エネルギー 122 keVの電子によって、1 keV当たり平均14.7個の光電子が発生します。これは、キセノンを用いるダークマターの実験の中で最も良い性能を誇っています。

XMASSで暗黒物質を検出するには、測定器内で暗黒物質との衝突によって電荷を持った原子核がはじき飛ばされて発生するシンチレーション信号だけを用います。私たちの測定器の幾何学的形状は60面体で、シンチレーション光を発生する領域は球対称と言えます。この簡単な幾何学的形状を選択したことから、XMASSは測定器の規模の拡大に柔軟に対応できるという大きな利点があります。競争相手の実験は1トン規模の測定器に移行しつつあるので、私たちも1トン規模のダークマター測定器を用いる次の段階のXMASS実験プログラム(XMASS 1.5と呼びます)に進む積もりです。測定器に使用されるキセノンの全重量は5トンで、来年から建設を開始したいと考えています。神岡観測所内の私たちの実験室ホールとそこに設置されている水遮蔽用のタンクは、解析に用いられる有効質量10トンを予定している私たちの実験の最終段階に対してさえ十分な大きさがあります。そこにたどりつくためには、一生懸命に働き、道中の要所所で物理の成果を上げることが必要です。さあ、張り切って行くことにしましょう。