D. PARKINS

Welcome to the dark side

ダークマター粒子発見に迫る

Nature Vol.448 (240-245) / 19 July 2007

物理学者によると、宇宙の96パーセントは光で見ることができないという。ダークマター（暗黒物質）とダークエネルギーは、この見えない質量とエネルギーを説明するために考え出された。この記事では、謎に包まれたダークマターの正体を探る研究が発見の前夜にあることを Jenny Hogan が報告する。

私たちは今、イタリア中部の都市ラクイラの近くにある山の地下1400メートルのところで、長さ10キロメートルの道路用トンネルから分岐した、ほら穴のようなホールを歩いている。グランサッソ国立研究所の地下実験施設の巨大な金属球や塔や足場の前で働く科学者たちの姿は、アリのように小さく見える。物理学者 Elena Aprile は、自分の研究グループをせき立てている。1つのプロジェクトに指示を与えていたかと思うと、次のプロジェクトに指示を与えている。その途中で、彼女は

1つの実験装置の前で立ち止まって写真を撮り、その大きさに驚きの声を上げた。やがて私たちは、小さな枝トンネルの奥におさまった XENON10 の実験装置のところにやってきた。XENON10 は Aprile がここ数年にわたって精力を注ぎ込んできたプロジェクトであり、ここを通過するダークマター粒子が姿を現すのを待っている。こうした実験装置は、同研究所のほか、世界にもいくつかある。

かつての新粒子の探索は、粒子が偶然姿を現すのを待つ方法が主流だった。

1940年代の科学者たちも山に向かったが、彼らがめざしたのは地下の洞窟ではなく頂上だった。彼らは、奇妙な新しい宇宙線を捕らえるために、乳剤を塗った乾板を抱えて山を登ったのである。しかし、粒子加速器が強力になり、物理学者たちが自力で新粒子を作り出せるようになると、偶然の発見を待つ方法は時代遅れになった。その点では、ダークマターの探索はやや時代に逆行した方法をとっているといえる。

ダークマターの探索は、別の点でも昔

を思い出させる。加速器が強力になれば、検出器も巨大化し、その出力を分析するのに必要な研究チームの人数も膨れ上がる。スイスのジュネーブ近郊にある欧州原子核共同研究機関（CERN）の大型ハドロンコライダー（ハドロン衝突型加速器、LHC）の建設には30億ユーロ（約5000億円）の費用がかかると見積もられており、数千人の科学者とエンジニアが働いている。これに対して、XENON10検出器はわずか30人の科学者で動かすことができ、それが魅力の1つになっている。「これは、昔ながらの方法で物理学研究を行う最後のチャンスなのです」とAprileは話す。

ダークマターの探索においては、小さな研究チームでも大きな成果を上げることができる。XENON10は、WIMP（ウィンプ、弱い相互作用しかしない質量をもった粒子）という種類のダークマターの検出器であるが、既存の共同研究プロジェクトの検出器の感度を短期間のうちに追い抜くことができた。ほかの共同研究プロジェクトも巻き返しをはかっているので、今後2～5年間は、感度の最高記録が何度も入れ替わることになりそうだ。サバティカル（研究休暇）でCERNに滞在している英国のシェフィールド大学の理論研究者Leszek Roszkowskiは、「数年前にダークマター検出器がWIMPを発見したと聞いたら、私はびっくりしただろう」と話す。「我々の理解が正しいならば、WIMPは数年後には見つかるはずだ。そうでなかったら、私はびっくりするだろう」。

暗黒の巨人

ダークマターの最初の手がかりが得られたのは1930年代のことだった。天文学者のフリッツ・ツビッキーが、かみのけ座銀河団の中の銀河が奇妙なふるまいをしていることを発見したのである。銀河の速度の観測結果は、この銀河団が目に見える物質の質量よりも大きな質量で結びつけられていることを示唆していた。ツビッキーは、「これが確かめられれば、光を発する物質よりもはるかに大きな密度をもつダークマターが存在するという驚くべき結論に達することになる」と書き記した。

宇宙論研究者たちは現在、ダークマターは、銀河、銀河団、超銀河団、さらにはその上の大規模構造まで、すべての宇宙の構造が形をなすための足場となっていると考えている。天文学者たちは、ダークマターの分布地図を作成できる大望遠鏡を建設中だ。しかし、ダークマターは星やガス雲や惑星を作っているありふれた物質ではありえない。ビッグバンの名残であるマイクロ波放射の詳細な観測は、そうした通常物質が宇宙のわずか4パーセントにしかならないことを示唆している。残りは、通常物質の5倍の量のダークマターと、ダークエネルギーとよばれる奇妙な反発力であると考えられている。

シカゴ大学（イリノイ州）の宇宙論研究者Michael Turnerは、「宇宙の歴史は、2つの暗黒の巨人の闘いだった」と説明する。「（宇宙は今から約137億年前に誕生したといわれているが、）最初の10億年はダークマターが優勢で、宇宙のすべての構造を形作った。その後、約50億年前にダークエネルギーが優勢になり、構造の形成を止め、宇宙の膨張を加速させた」。

1970年代になると、ダークマターは単に暗いだけでなく、ほかの物質とは基本的に異なっているのかもしれないという考えが支持されるようになった。1980年代には、Aprileの実験装置のような地下の検出器の建設計画が始まった。けれども、この研究分野が熱気を帯びてきたのはつい最近のことである。1つは、WIMPに対する検出器の感度が向上したため

あり、もう1つは、違った角度からこの問題に挑戦する実験が行われるようになったためである。

粒子を作り出す

理論研究者たちがWIMP候補として提案する粒子のほとんどは質量が大きく、少なくとも陽子の質量の100倍はある。これまでの粒子加速器にはここまで重い粒子を作ることはできなかったが、LHCはおそらくそうした状況を変えることができ、ダークマター検出器がまだ捕らえられずにいるものを実験室で作り出せるかもしれない。

LHCの研究者たちが新しい加速器を使ってこの問題に挑戦している一方で、天文学者たちは、これとは別のアプローチから同じ問題に取り組もうとしている。理論研究者たちが気に入っているWIMP粒子の中には、互いに相互作用するとき特徴的なガンマ線バーストやそのほかの奇妙な痕跡を残す可能性があるものもある。天文学者たちは今、人工衛星や望遠鏡を使ってそうしたシグナルを探しているのだ。

地下実験施設でダークマターを捕らえようとしている科学者たちは、それでも一番乗りをめざしている。「今ががんばりどきののだ。さもないと、間に合わないような気がする」とAprileは話す。過去にCERNで働いたことのある科学者でさえ、直接探索に注いだ努力に対する報いを得たいと思っている。現在はカリフォルニア

J. HOGAN

グランサッソ国立研究所（イタリア）のElena Aprile（写真右）は、自分の地下検出器がダークマターを捕らえるだろうと期待している。

大学バークレー校でダークマター探索実験を行っているBernard Sadouletもその1人で、「私はダークマターの探索に人生の20年を費やしたんだ。最初の目撃者になりたいと願うのは当然だろう?」と話す。

こうした実験のいずれからも、ダークマター粒子の証拠が得られる可能性がある。今までのところ、ダークマター粒子を直接検出したとする研究結果は1つしかなく、その解釈をめぐる論争が起きている（コラム「ダークマターの検出をめぐる論争」を参照）。だから、宇宙の新しい構成要素を発見したと科学者たちが自信をもって主張するためには、複数の方法から得られた証拠が必要不可欠なのである。この粒子が物理法則の新しい枠組みを示すことになる可能性を考えれば、なおさらである。マサチューセッツ工科大学（同州ケンブリッジ）の物理学者Max Tegmarkは、「ダークマターの正体についてあれこれ思いをめぐらすときほど楽しいときはない。私たちは本当に発見の前夜にあると実感している。ダークマター粒子を発見する方法にはいくつかの種類があるが、それらのすべてが成功を目前にしているのだ」と話す。

ダークマターの正体が何であるかはまだ誰も知らないが、それが何でないかはわかっている。物理学の「標準模型」は、

通常の物質とその相互作用についてわかっていることのすべてを含んでいるが、ダークマターは標準模型には含まれない。標準模型は大成功を収めたが、いくつかの問題点もあり、それを解決しようとする理論研究者たちは多くの新しい基本粒子を予測してきた。当初は、こうした仮説的粒子は余計物扱いされていたが、現在は、そのうちのいくつかがダークマターの筆頭候補になっている。Roszkowskiは、「最近では、ダークマター候補をもたない理論は興味深い理論とは見なされない。ダークマター問題は、標準模型を超える物理現象が存在することを示唆する証拠の中で、最も説得力のあるものといえるかもしれない」と話す。

標準模型を超える今日の主要な物理理論の多くは、超対称性理論の仲間である。超対称性理論では、通常の粒子はそれぞれ重い超対称性パートナーをもつとされているが、これらのパートナーの一部がWIMP候補になっているのである。驚いたことに、ビッグバンから残存していると考えられるそうしたWIMPの数を計算したところ、ダークマターの宇宙論的観測値と一致していた。この一致は、ダークマターが新種の粒子であるという主張を裏づけるものである。ただし、残存するWIMPの数の推定値に面食らう人も多

い。典型的なWIMPが陽子の100倍の質量をもつとすると、銀河系内のダークマターのモデルからは、地球では1平方メートルあたり毎秒約100億個のWIMPが通過していることになる。これだけの数の粒子が気づかれずに通過していることから、通常の物質や光ではWIMPの存在をほとんど感知できないと考えられる。

このため、WIMPを見つけることは信じられないほどむずかしい。計算によると、AprileのXENON10検出器を通過するダークマター粒子は毎週ほぼ1000兆個に上るが、そのごく一部しか検出できないと考えられている。XENON10実験では、54個の陽子と54個の電子からなる大きなキセノン原子を標的としている。実験装置を通過するWIMPがごくたまにこの標的に衝突すると、少数の光子や電子としてエネルギーが放出され、感度の高い装置によって検出されることになる。

ダークマターを直接検出しようとするすべての実験と同様、XENON10検出器は地下に設置されている。これは、実験結果に影響を及ぼすおそれのある宇宙線などの粒子や放射線を途中の岩石に吸収させるためである。実験チームにとっての課題は、バックグラウンドをできるだけ小さくして、何が残るかを調べることにある。

Aprileは今年になって、XENON10の

ダークマターの検出をめぐる論争

ダークマターはすでに見ついているのだろうか? イタリアのDAMA共同研究プロジェクトは、自分たちの地下検出器が記録したイベント数の季節変動はダークマターのシグナルであると主張している。だが、ほかの研究者たちは懐疑的だ。彼らのライバルである米国のCDMSのBernard Sadouletは、「DAMAの観測結果を、この分野のほかの観測結果と調和させることはますますむずかしくなっている」と話す。

銀河系（および銀河系のダークマター）の静止座標に対する地球の速度は1年の間に変化するので、地球にぶつかるダークマター粒子の数も変化すると考えられる。すなわち、夏には太陽が銀河系の中心に対して運動するのと同方向に地球も運動するので速度は足し合わされるし、冬にはこの方向が逆になる。

1995年から2002年にかけてイタリアのラクイラの近くにあるグランサッソ国立研究所で

行われたDAMA実験は、この効果を探すためのものだった。この実験で、100キログラムのヨウ化ナトリウム標的から成る検出器は、確かに冬よりも夏に多くの粒子を検出したため、研究チームはDAMAがダークマターを記録したと結論づけた。

問題は、ダークマターを探索しているほかの検出器が、DAMAの結果から予想される性質の粒子を見いだせないことにある。この実験を批判する研究者たちは、季節変動の原因と

なりうるほかの因子（温度や地下の状態の変化など）の影響を十分に考慮できていないと指摘する。DAMAの科学者たちは、そうした問題は解決済みであるとし、ダークマター粒子は何かもっと風変わりなものに違いないと主張する。

2008年末までにDAMA/LIBRAとよばれる改良型検出器での観測結果が得られる予定になっており、この論争を前に進めると期待されている。

J.H.

WIMPの探索

WIMPとよばれるダークマター粒子を捕らえるための検出器は、今のところまだWIMPを見つけないことができていない。しかし、悪い知らせばかりではない。

WIMPの存在を予言する物理理論を使って、WIMPがどのような性質をもっているかを計算することができる。このグラフ中の雲のような形は、WIMP候補として人気のあるニュートラリーノがもっているはずの性質を推測してみたものである²。

このグラフで、各検出器の感度限界（グラフを左右に横切る線）よりも上にある粒子は、これまでの実験結果から除外

される。それよりも下のすべての領域（つまり、理論から推定される雲状の領域のほとんど）にある粒子は、これから見つかる可能性がある。

検出器の感度は、これから数年以内に雲状の領域の中心部（赤で図示した部分）に到達するはずだ。理論計算は、この領域をニュートラリーノが最もありそうな領域と推定している。一方、大型ハドロンコライダー（LHC）でもニュートラリーノを作れるかもしれないが、それはニュートラリーノの質量が十分に軽いときに限られる。

J.H.

最初の観測結果が得られたと報告した¹。まだ論文は発表されていないが、その報告はライバルたちを驚かせた。XENON10は、これまでで最もよい観測結果を得ていた低温ダークマター探索実験（CDMS）という地下実験とはまったく異なる技術を使っていたからである。米国ミネソタ州で行われているCDMSは、極低温に冷却したゲルマニウムとケイ素の結晶の中で、粒子衝突によって生じる振動と電荷を探そうとするものである。これに対してXENON10検出器は、15キログラムの液体キセノンを満たした容器を使ってダークマター粒子を捕らえようとするものである。Aprileの結果が発表されたことで、希ガス液体を使った実験は、これまでの遅れを取り戻したのだ。

XENON10は最初の60日間の運転で、直ちに捨て去ることができない10個のイベントを記録した。「ここで飛び上がって『私たちは10個のWIMPを見つけた』と叫ぶ人もいるかもしれないが、もちろん私たちはそうはしなかった」と彼女は話す。Aprileの研究チームは、詳細な分析によりイベントの半数を除外し、残りは

分析をくり返したバックグラウンドシグナルであるとした。研究者たちがWIMPの一端を捕らえたと考えるためには、ほかの方法では説明できないイベントが少なくとも15個は必要なのだ。そしてその場合も、「直接検出したと主張する前に、バックグラウンドの理解を深めることが必要なのだ」とAprileは話す。

獲物を追い詰める

否定的な結果も重要だ。XENON10検出器の感度の高さは、仮説上の存在であるWIMPの性質（その質量や物質との相互作用の強さなど）を絞り込むことを可能にする。こうした情報は、ダークマター粒子のように謎に包まれたものを探している場合には極めて重要だ。XENON10は、これまでで最もよい観測結果よりもさらに厳しい絞り込みをかけることができる。すでにその実験結果は、超対称性理論がWIMPの存在を予測している領域に食い込み始めている（コラム「WIMPの探索」を参照）。

ほかの観測プロジェクトもXENON10のすぐ後ろに迫っていて、さらに弱い相互作用しにくい粒子を探している。そ

うした粒子を見つける可能性を高めるためには、ダークマター検出器の規模を大きくし、バックグラウンドを減らしていく必要がある。

キセノンを使った実験にはZeplin3というライバルがいる。Zeplin3の設計者らは、検出器にさまよい込んでくるシグナルを最小にするために細心の注意を払ってきた。この実験の結果は、今後1、2年で得られると期待されている。Zeplinは、1990年代の初めに始まった英国の共同研究プロジェクトであり、Aprileは単独で実験を行うことを決めるまでこのチームと連絡を取り合っていた。プロジェクトの代表者であるロンドン大学インペリアルカレッジのTim Sumnerは、「私たちがZeplinの設計をすでに終えていたときにXENON10が参入してきて、いいところをもって行ってしまった。これはいらだたしいことだ。しかし、前向きに考えるようにすべきだろう。Aprileらの装置は、この技術がうまくいくことを示したのだから」と話す。

12キログラムのキセノンを使った最新の検出器を英国北東部のノースハンプ

見えるダークマター：
銀河系内のダークマターは
ガンマ線の輝きを生じさせるかもしれない。

M. KUHLER, J. DIEMAND & P. MADAU

シャー州にあるカリ岩塩鉱山に設置した Sumner は、「Zeplin3 は XENON10 よりもすぐれていると自負している」と話す。Zeplin3 は、バックグラウンドノイズをより厳しく制限できるだけでなく、「WIMP 発見の栄誉も授けてくれるだろう」と自信をみせる。

XENON10 にはグランサッソ国立研究所内にもライバルがいる。Aprile が自分の実験装置のところに行く途中で写真を撮影した容器は、Carlo Rubbia が率いる WIMP アルゴン計画 (WARP) の中心となる予定の装置である。Rubbia は、CERN での W ボソンと Z ボソンという力を媒介する粒子の発見に貢献して、1984 年にノーベル物理学賞を共同受賞した研究者である。WARP は大きな容器に入った液体アルゴンを使ってダークマターを捕らえようとしている。「これは真剣な競争なのだ」と、Rubbia の元学生である Aprile はいう。

Aprile も、今後数か月の時間をかけてバックグラウンドを減らし、検出器の大きさを液体量で 60 キログラムに増やすことで、XENON10 を改良する予定である。容器を大きくすると WIMP 発見の可能性が高くなる。検出器の質量が増えれば、ダークマター粒子が相互作用する可能性が高くなるからだ。「その次になすべき

改良は 1 トンに増やすことだ。それ以外の小さな改良を重ねても意味はない」と Aprile はいう。

答えはどこに？

しかし、大きな検出器は多額の資金を必要とする。米国エネルギー省 (DOE) と全米科学財団 (NSF) が昨年設置したダークマター科学評価委員会は、7 月 13 日に発表した報告書の中で、米国のダークマター研究に提供する資金を、現在の年間 400 万ドル (約 5 億円) 未満から年間 1000 万ドル (約 12 億円) へと大きく増額するよう勧告した。委員長を務めた Hank Sobel は、「これは 1 トン規模の実験の資金には足りないが、さまざまな実験技術の検証を加速させることはできる」と話す。この委員会は、大規模検出器への移行のしかたを決めるために、2009 年に再検討を行うことも勧告した。

液体を使う XENON10 は、固体を使う CDMS にくらべて装置を大きくするのが容易である。一方で、バックグラウンドを同定し、これを除去するのは CDMS のほうが容易である。CDMS は 1 年前に改良を行い、ゲルマニウムを 1 キログラムから 4 キログラムに増量したため、この夏の終わりに得られる予定の新しい観測結果は、XENON10 の観測結果以上のものになる

ことが期待されている。CDMS の代表者である Sadoulet は、「来年には、私たちの測定限界は少なくとも 10 倍か 15 倍は向上し、何かを発見しているかもしれない」と話す。

研究者たちがどんなに熱心であっても、自然が協力してくれるとはかぎらない。実験の測定限界がどんなに向上しても、粒子が検出されないという可能性もある。英国のオックスフォード大学の理論物理学者 Roberto Trotta は、超対称性理論が予言する WIMP 候補の一部は「事実上、検出不可能である」という。粒子は LHC で作り出すには重すぎ、地下実験で検出するには相互作用が弱すぎるのかもしれない。「今後 10 年のうちに大きな発見があるだろう。そうでなければ、私たちは大きな困難に直面することになる」と Trotta は話す。

2008 年になって LHC が陽子衝突実験を始めると、複雑な生成物の中に WIMP が作られる可能性がある。こうした粒子は、加速器の検出器で直接記録することはできないだろうが、衝突時のエネルギーの収支を求めたときに「質量の不足分」として現れるだろう。このような間接的な証拠では、LHC で WIMP のサインを見つけても、それがダークマターであることの裏づけにはならない。「それでもまだ観察の機会はある」と Roszkowski は話す。例えば、粒子が 1 秒に満たない間だけでも安定であれば、検出器の外に飛び出して、どこかほかの場所で崩壊するかもしれない。これは、粒子を直接検出する第 2 のルートも必要であることを意味する。「ダークマター問題を解決するためには両方の検出法が必要なのだ」と彼は話す。

加速器は理論面でさらなる情報を与えてくれる。例えば、幸運にも粒子を同定できた場合には、LHC の結果から、超対称性理論のさまざまな粒子ファミリーの中のどれに相当するのかが明らかになるはずだ。

各種の超対称性理論は、さまざまな質量の超対称性パートナーを WIMP 候補として予言する。これにはアクシーノ、グラビティーノ、ニュートラリーノなどがある。ダークマター候補になるのは、最も軽

い超対称性パートナーである。なぜならこれは、崩壊して別のものになることができないからだ。単純なモデルの多くは、4種類の粒子の超対称性パートナーの混合粒子であるニュートラリーノが最も軽く、ビッグバンから現在まで生き残っているほど安定していると予言する。その結果、この奇妙な粒子（これは自分自身の反粒子でもある）は、素粒子物理学者の間で最も人気のあるWIMP候補になっている。

ニュートラリーノを検出する第3のルートは、それが崩壊した証拠を探すことである。ニュートラリーノはそれ自身の反粒子であるため、十分に接近すると衝突して対消滅するはずだ。このような対消滅の結果、ガンマ線、ニュートリノ、あるいは粒子と反粒子の対が生まれるかもしれない。

例えば、銀河系のダークマターのモデルは、銀河系のダークマターハロー（ダークマターが分布している領域）や銀河系の中心部に集中したニュートラリーノの対

消滅からガンマ線の輝きが生じる可能性を示唆している（左ページの図を参照）。2008年の初頭に打ち上げられる予定のガンマ線広域宇宙望遠鏡（GLAST）などの人工衛星は、これを見つけることができるかもしれない。さらに、ニュートリノ望遠鏡（南極に建設中のアイスキューブニュートリノ検出器など）を使った観測から、太陽の中心部に集まったニュートラリーノの対消滅が推測できるかもしれない。この場合には、ほかのプロセスよりも高エネルギーのニュートリノが生成すると考えられているからである。

しかし、ダークマターがニュートラリーノではなく、WIMPでさえなかった場合にはどうなるのだろうか？ ダークマターの正体については、超対称性理論やWIMPをまったく必要としない説明も提案されている。こうした仮説には、重力の法則を修正することでダークマターを不要とするもの（コラム「重力の法則を変える」を参照）

から、まったく異なる種類の粒子を提案するものまで、さまざまな種類がある。

ニュートラリーノの主なライバルはアクシオンだ。アクシオンは、標準模型の小さな問題点を解決するために1977年に素粒子物理学者によって提案された粒子である。多くの理論研究者たちは、アクシオンは、いつかは見つかるだろうと考えているが、宇宙論から期待されるとおりの質量と相互作用をもっているかどうかははっきりしない。アクシオンの質量はすでに、一方は理論から、他方は超新星の観測から限界を設定されており、典型的なニュートラリーノの10兆分の1未満であると予測されている。

米国カリフォルニア州のローレンスリバモア国立研究所で行われているアクシオンダークマター実験は、ダークマター問題におけるアクシオンの役割につき最終的な答えを出すことをめざしている。この実験の共同代表者であるLeslie Rosenberg

重力の法則を変える

1970年代の詳細な観測により、銀河の外側にある星の速度は、銀河内の「見える質量」の重力だけでは引き止めておけないほど速いことがわかった。ダークマターは、これを引き止めるのに必要な重力を補う方法の1つとして提案された。しかし、だれもが新しい種類の物質が必要であると考えているわけではない。一部の科学者は、観測結果を説明する1つの方法として修正ニュートン力学（MOND）を提案した。

MONDは1981年に初めて提案された理論であり、長距離で重力が弱くなるベースが、ニュートン力学から期待されるベースよりもゆっくりになるとするものである。MONDの現代版には少数の支持者がいるが、この理論では説明しにくい観測結果が多く、支持を広げるには至らなかった。

昨年夏に、2つの衝突する銀河団の観測から「ダークマターが存在する直接的な証拠」が得られたと米航空宇宙局（NASA）が発表したことで、MONDはさらなる打撃を受けたようだ。銀河団の周囲で光が曲げられる「重力レンズ」という現象に注目することで、ダークマターについて調べることができる。この重力レンズ効果から、銀河団の質量の分布が銀河団の高温のガスの分布とは異なっていることがわかったのである。

研究者たちは、「弾丸銀河団」（右写真）は、1つの銀河団がもう1つの銀河団を引き裂くように通過したことで形成されたと結論づけた。その際、銀河のガスは衝突に巻き込まれたが、ダークマター粒子はまっすぐに進んでいったとみられている。

銀河団1E 0657-56（別名弾丸銀河団）。ハッブル宇宙望遠鏡が撮影した可視光の画像にX線天文衛星チャンドラで観測された高温ガスの分布（ピンク）と重力レンズで検出されたダークマターも含めた質量の分布（青）が重ね合わされている。見える物質（ピンク）とダークマター（青）の分離が検出され、ダークマターが存在する有力な証拠となった。

MONDの研究者である英国セントアンドリュース大学のHongSheng Zhaoも、NASAの観測結果がある種の「暗い」粒子の存在を裏づけていることは認めている。しかし彼は、これによりMONDが否定されたとは考えておらず、観測結果

はMONDと通常のニュートリノの組み合わせにより説明できると主張する。「代替理論を追求することは研究として健全なことだ」とZhaoは話す。彼の解釈が正しいか否かは、将来のニュートリノ質量の測定により検証されることになる。 J.H.

NASA/M. MARKEVITCH ET AL./D. CLOWE ET AL.

によると、シアトルのワシントン大学に検出器を移設した後、2011年までに結果が得られる予定であるという。アクシオンの相互作用は非常に弱いので、粒子加速器ではめったに生じない。このため実験では、わずかな粒子エネルギーを検出できる無線受信機を使ってアクシオンの兆候を探すことになるという。

アクシオン探索計画の数は、WIMP探索計画に比べて非常に少ない。これには、アクシオンを見つけるのに必要な技術が素粒子物理学者にはあまりなじみがないものであることが関係しているとRosenbergは考えている。さらに彼は、「超対称性理論はとても人気が高く、WIMPはその人気に乗っている」と指摘する。今回紹介したダークマター探索チームはどれも、ダークマターの正体が自分たちの予想とはかけ離れたものであったとしても、自分たちの研究を続け、何らかの答えを出したいと決意している。Aprileは、「ダークマターが予想とはまったく違うものであったとしても、それは受け入れる」と話す。「私はイタリア人女性でせっかちな。検出器を改良しながら、次のステップをどんどん進めていくだけです」。

しかし、1つの実験が成功したからといって、ほかの実験が失敗したことにはならない。科学者たちは単純さを好むので、WIMPが見つかったらアクシオンはいらないし、アクシオンが見つかったらWIMPはいらないと考えるかもしれない。けれども、両方があってもいいのではないか？ダークマター問題は、私たちが考えているよりも豊かな問題であることが分かるかもしれない。Tegmarkは、そうした結果を期待している。「それはすばらしい番狂わせだ。自分たちに見えないからといって、ダークマターが1種類しかないと考えるのは、人間の傲慢というものだ。」 ■

Jenny Hogan はロンドンの *Nature* 記者。

1. Angle, J. et al. preprint at <http://arxiv.org/abs/0706.0039>(2007).
2. Roszkowski, L., Ruiz de Austri, R. & Trotta, R. preprint at <http://arxiv.org/abs/0705.2012> (2007).