Q&A

宇宙論

Dark matter and dark energy

ダークマターとダークエネルギー

Robert Caldwell & Marc Kamionkowski

Nature Vol.458(587-589)/2 April 2009

宇宙の大部分が私たちの目に見えないダークマターとダークエネルギーによって占められていることを、さまざまな観測結果が示唆し続けている。この宇宙の闇を解明することは、天文学者と物理学者にとって重要な課題である。

宇宙はどのような成分から成り立っているのか？

平均エネルギー密度への寄与という観点からみると、宇宙は約 75% のダークエネルギー、約 20% のダークマター、約 5% の通常の（原子を作っている）物質、そしてほんのわずかの光子とニュートリノからできている。この値は、ビッグバンモデル、一般相対論、および、宇宙は最も大きなスケールでは一様であるという「宇宙原理」が正しいという仮定のもとに得られたものである。これらの仮定の裏づけとなる実験と観測の広範さと緻密さは、この宇宙モデルが確固たる基礎の上に成り立っているという自信を与えてくれる。

ダークマターが存在するという証拠は何か？

私たちはダークマターを見ることはできないが、間接的な方法でその存在を推測することができる（図 1）。ニュートンの法則によると、天体の質量はその衛星の運動によって求めることができる。計算の結果、銀河団の質量はその銀河団を構成する銀河の質量よりもずっと大きく、銀河の質量は銀河を構成する星と星間ガスの質量を合わせたものよりもずっと大きいと推定された。このことを裏づける証拠はほかにもたくさんある。その上、この余分な「もの」が通常の物質ではないと信じるに足る理由があるのだ。通常の物質がそれほどたくさんあったとしたら、ダークマター探しにやっきになっている天文学者たちの目から逃れ続けることはむずかしいだろう。また、ダークマターが通常の物質であったとしたら、ビッグバンの名残の宇宙マイクロ波背景放射や、銀河や銀河団の性質の中にはっきりした痕跡を残すはずだが、そのようなものも見つかっていない。

銀河や銀河団といった大きなスケールではニュートンの法則は破綻する、と結論することはできないのか？

数十年前なら悪くない仮説だったかもしれない。しかし、観測されている銀河や銀河団の運動を説明するためにニュートンの法則に代わって構築される新しい重力理論は、重力レンズ効果（遠方の光源からくる光が屈曲する現象）、宇宙マイクロ波背景放射、および宇宙の大規模構造に関する膨大な量のデータも説明できなければならない。その理論はまた、太陽系内で得られた精密な観測結果によって課せられる制限も満たしていなければならない。

地球の近くにはどのくらいの量のダークマターがあるのか？

私たちの天の川銀河の星の軌道速度から、地球の近くのダークマターの平均質量密度は、1 立方センチメートルあたり陽子 1 個の 3 分の 1 程度の質量であることが示唆される。この数字は宇宙の平均密度の 10^6 倍の大きさであるが、水の平均密度と比べると 24 桁も小さい。ダークマターが何からできているにしても、銀河の重力ポテンシャルの井戸の中を星と同様に運動しているため、その速度は毎秒 200 キロメートル程度であることがわかる。また、地球は太陽の周りを回っているため、地球に入射するダークマターの量には夏と冬とで約 10% の差があるはずだ（図 1）。さらに、銀河のダークマターの分布は滑らかではないかもしれない。銀河の形成は現在も進行中であり、計算機を使った研究からは、ダークマターの固まりや潮汐力による流れといった下部構造がかなりあるかもしれないことが示唆されている。

図1 ダークマターとその検出方法。a、b、私たちの天の川銀河を構成する星とガスの回転速度から、この銀河が半径約200キロパーセク（1パーセクは約3.26光年）のダークマターハローに包まれていることがわかる。近隣の矮小楕円体銀河や、ダークマター密度が高いと予想される銀河中心近くでのダークマター粒子の対消滅によって、高エネルギーのガンマ線が生み出されている可能性がある。いて座矮小楕円銀河から引きずられ、天の川銀河にからまっている物質の流れの中でも、ダー

クマター密度は高くなっているかもしれない。c、地球は銀河のダークマターハローの中を通過している。ダークマターを直接検出しようとする実験で検出されるダークマター流は、地球が太陽の周りを公転しているために季節によって変化する可能性がある。ダークマター流は、地球が銀河ハローからのダークマター風と同じ方向に運動するとき（冬）のほうが、ダークマター風と逆向きに運動するとき（夏）よりも小さい（約10%減）と予想される。

ダークマターの正体に関する最も有望な仮説は何か？

ダークマターの正体については無数の仮説が出されているが、最も有望なのは新しい素粒子を考えるものである。長年にわたる理論的検討に耐えてきた候補としては、WIMP（弱い相互作用しかない質量のある粒子）とアクシオンがある。WIMPは、ニュートリノのように通常の物質とは弱くしか相互作用しない素粒子であり、素粒子物理学の標準模型への拡張（例えば、超対称性理論や余剰次元モデル）の中で自然に現れてくる。WIMPの検出は、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）に建設された大型ハドロン衝突型加速器（LHC）の最重要目標の1つである。もう1つのダークマター候補であるアクシオンは、陽子や中性子の中のクォークを結びつける強い相互作用の対称性の一部を説明するために仮定された素粒子である。ダークマターの正体についてはほかの可能性もあり、偏見のない心

を保つことが必要である。しかし、ダークマター粒子と通常の物質との相互作用の強さ、ダークマター粒子の崩壊に対する安定性、その「冷たさ」（今日のダークマター粒子は、光速よりも遅い速度で運動しているはずである）などの制限によって、可能性を絞り込むことができる。

ダークマターの正体を知るには、どういった実験や観測が有効か？

ダークマター問題に対する最も説得力ある答えが、ダークマター粒子の直接検出であることは明らかだ。銀河の周りにはダークマターが薄く広がったハローがあるが、このハローを構成するWIMPが地球に飛んできて検出器内に入り、これに衝突された原子核が反跳すると、検出器内に10～100キロ電子ボルトのエネルギーが残ることになる。現在、こうした反跳原子核の観測によりWIMPを検出しようという実験計画が約20ある。一部の検出実験では金属結晶中に標的

原子核があり、原子核の反跳は検出器内で集められた反跳エネルギーを通じて検出されるようになっている。このようなダークマター検出実験では、地球上の自然放射線のバックグラウンドからダークマターのサインを見つけ出すことが課題となる。しかし、今日の実験装置の感度は十分に高くなってきており、まもなく、ダークマターの主要な素粒子物理学モデルのいくつかにつき、その当否を調べるのが可能になる予定である。LHCで未知の粒子が発見されればダークマター候補の範囲を大きく絞り込むことができ、私たちは正しい道筋にいることを確信できるようになるだろう。しかし、だからといって宇宙物理学的なダークマター検出の必要性が否定されるわけではない。

ダークマターを検出したという報告はすでにあったのでは？

確かに検出したという報告はあった。イタリアのグランサッソ国立研究所の地下深くで行われている DAMA 実験は、地球がその公転軌道によって銀河のダークマターハローの中を運動していることに起因するとみられる、ダークマター流の年間変動を検出したと報告した。このシグナルは、まだほかの実験によって裏づけられていない。ほかの実験は異なる標的原子核を使っているため、さまざまな実験結果は特定のダークマター理論の文脈でしか比較できない。DAMA 実験の結果を説明するために、最も単純な超対称理論に現れる WIMP の質量および通常の物質との結合が提案されたが、これらはほかの実験によって否定されている。

図2 宇宙の膨張の加速とダークエネルギー。白色矮星の爆発により生じる Ia 型超新星は、標準光源（明るさがわかっている天体）であると考えられている。この性質のため、地上から超新星を観測したときの見かけの明るさから、その距離を決めることができる。天体が暗く見えるほど、その等級は高く、遠くにある。ある後退速度をもつ超新星が予想よりも暗いという観測から、宇宙の膨張は約 50 億年前までは減速していたが、それ以降、加速に転じて今日に至っていると結論された。このように宇宙の膨張が加速する原因はダークエネルギーにあると広く考えられている。

ほかの方法でダークマターを検出できないのか？

個々の WIMP は理論的には安定だが、WIMP の対は「対消滅」することがあり、高エネルギーの光子と、陽電子（反電子）、反陽子、ニュートリノの形の宇宙線が生成する。そうした粒子を検出できればダークマターの存在の間接的な証拠になるかもしれない。対消滅生成物が地球の近くから来ているならば、対消滅が起きている場所は、ダークマター密度が高い銀河中心か、天の川銀河を取り囲み、主としてダークマターからなる、いくつかの矮小銀河の中心である可能性が高い（図1）。1つの手がかりは単一エネルギーのガンマ線である。これらの手がかりを探すために、多数の地上実験、気球実験、衛星実験が行われている。

宇宙線実験の現状は？

2008 年、観測衛星 PAMELA を使った宇宙線実験と気球を使った ATIC（高度薄型電離カロリメーター）実験から、高エネルギー宇宙線陽電子の流量の超過が報告された。この観測結果は WIMP 対消滅が原因である可能性があるが、観測された流量は単純な WIMP モデルが予測するよりも数桁大きい。1つの解釈は、WIMP ダークマターはこれまで考えられていたよりも複雑であるというものだ。しかし、この異常の原因がダークマターにあるとみなす前に、もっと平凡な宇宙物理学的説明（地球近傍のパルサーによる粒子加速など）の可能性を除外しなければならない。

ダークマターの今後の研究計画は？

ダークマターを直接検出する実験は、WIMP の「風」を利用して（図1）、地球起源のバックグラウンドシグナルから WIMP 流の特徴的な年間変動を分離することをめざしている。一方、近い将来に打ち上げられる欧州宇宙機関（ESA）の天文衛星ガイアは、地球近傍の 10^9 個の星の位置と運動状態の地図を作成することになっている。この地図を使って天の川銀河の重力場を描けば、ダークマターハロー内のダークマター分布を推測することができるだろう。また、WIMP 対消滅から生成したガンマ線を探す実験もいくつか計画されており、最近打ち上げられたフェルミガンマ線宇宙望遠鏡を使う実験もその1つである。南極のアイスキューブ・ニュートリノ天文台などの高エネルギーニュートリノ望遠鏡は、太陽や地球に蓄積した WIMP の対消滅から生成したニュートリノを探すことになる。

ダークエネルギーとは何か？

通常の物質どうしは重力によって引き合うため、宇宙の膨張は減速するように思われる。けれども、観測によると宇宙の膨張は加速しており（図2）、私たちの宇宙の理解がまだまだ不足していることを示唆している。この観測結果の解釈と

して有力なのは、宇宙は「反重力」効果を及ぼす何かによって満たされているとする説であり、この「何か」はダークエネルギーとよばれている。ニュートンの重力理論では重力が反発作用を及ぼす可能性はないが、一般相対論ではその可能性がある。物質とエネルギーの等価性から、分子の熱運動によるガス圧が重力場の源となりうるのである。十分な負の圧力をもつ流体の重力場は反発作用を及ぼす。分子運動が負の圧力をどうやって引き起こすのかイメージすることはむずかしいかもしれないが、素粒子理論に現れる量子場の一部は、負の圧力をもつ流体の存在を可能にすることがわかっている。つまり、ダークエネルギーとは単に、宇宙の膨張の加速を説明するために仮定された、負の圧力の流体のことなのだ。

ダークエネルギーの候補として最も有望なものは何か？

ダークエネルギーの候補として最も単純なものは、アインシュタインの宇宙定数である。宇宙定数は、負の圧力をもつ完全に一様な流体を表しており、宇宙の最低エネルギー状態（真空状態）と関連づけられている。しかし、観測から要請される宇宙定数の値は、理論的な予想値の 10^{120} 分の 1 にしかない。ダークエネルギーのもう 1 つの有力候補は、アクシオンに似ているが質量はもっと小さい、未知の粒子の流体である。量子理論は、そうした粒子は宇宙の膨張の加速に必要な負の圧力を供給できると予測している。

既知の重力の法則は宇宙スケールではどれほど信頼できるのか？

一般相対論はうまくいっている。一般相対論の正しさは太陽系内の事象で詳細に試された。さらに、膨大な量の天体物理学および宇宙論的観測結果が、この理論に基づいて理解されている。しかし、一般相対論がこれだけうまくいっていても、宇宙的な長さのスケールにおける重力理論に変種が存在する可能性は否定されない。宇宙膨張の加速を説明するために、重力理論というバンドラの箱が開かれ、多数の理論が提案されてきた。しかし、太陽系内の観測結果から課せられる精密な制約に反することなく重力理論に手を加えることは、驚くほどむずかしいことがわかりつつある。そして、今のところ説得力のある代替理論はでていない。

ダークマターとダークエネルギーが関連している可能性はあるか？

素粒子物理学の標準模型を超えて、ダークマター粒子とダークエネルギー場を含めた「暗黒部門」が存在する可能性を考えてもおかしくないように思える。いずれも未知の重力場源の存在を要請しているようだが（1 つは引力、もう 1 つは斥力作用を及ぼす）、今のところ、2 つの現象を統一的にうまく説明する提案はなされていない。

宇宙の加速がほかの現象に起因している可能性は？

新種の重力（通常の物質がダークエネルギーと同じ反重力効果を生み出すような重力）や新しい電磁気効果（遠方の超新星を暗く見せるような効果。図 2 参照）が存在すると考える人や、私たちの基礎的な仮定（最大の長さのスケールでの宇宙の統計的な一様性や等方性）に何らかの欠陥があると考える人もいるかもしれない。現在までの観測結果は、こうした提案のどれかを特に支持しているわけではないが、私たちは偏見のない心を保たなければならない。

最近の観測でダークエネルギー問題の精密化に役立ったものは？

「バリオン音響振動」の観測は、宇宙の加速を裏づけ、精密化するのに使われた。バリオン音響振動は宇宙初期の音波によって作られたさざ波であり、宇宙マイクロ波背景放射と銀河分布に刻み込まれている。このさざ波の波長が地球からの距離とともにどう変化するかを測定することにより、宇宙の膨張の歴史を図で表すことができる。

ダークエネルギーの正体を知るためにはどんな実験が役立つか？

今日、宇宙の加速膨張という現象を説明できる説得力のある理論が明らかに欠けている。だから、これまでの研究では、何らかの手がかりがひょっこり現れるかもしれないと期待しつつ、同じようなデータが集められてきた。現在、超新星やバリオン音響振動を使う方法のほかに、加速膨張する宇宙において通常の物質とダークマターが重力の影響下で集まる速度を測定するという方法での研究も進められている。1 つの有望な方法として、弱い重力レンズ効果を使ってダークエネルギーへの制限を設けるといふものがある。強い重力レンズ効果では、遠方の光源からの光が前景の物質（レンズ）によって強く曲げられ、光源の像が強くゆがみ、弧の形に引き伸ばされる。一方、弱い重力レンズ効果では、光源の像はわずかに伸び、拡大されるだけである。もう 1 つの方法は、銀河団の高温ガスの X 線放射を使い、その重力ポテンシャルの井戸の深さを決定するというものである。こうした方法は有望視されているものの、宇宙の加速膨張の基礎にある物理を決定することはむずかしいかもしれない。一方で、このように困難で基礎的な問題に取り組むためには、ほかに方法がないようにも思える。

Robert Caldwell, ダートマス大学 (米)

Marc Kamionkowski, カリフォルニア工科大学 (米)

さらに深く読みたい方へ

- Caldwell, R. & Kamionkowski, M. the physics of cosmic acceleration. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* (in the press); preprint available at <http://arxiv.org/abs/0903.0866> (2009).
- Frieman, J. a., turner, M. s. & Huterer, D. Dark energy and the accelerating Universe. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **46**, 385–432 (2008).
- Hooper, D. & Baltz, e. a. strategies for determining the nature of dark matter. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **58**, 293–314 (2008).
- Hogan, J. & Brumfiel, G. Unseen Universe. *Nature* **448**, 240–248 (2007).