

ダークマターとダークエネルギー

岐阜県飛騨市神岡町 旧神岡鉱山跡。超新星ニュートリノを検出して有名になったカミオカンデなど、多くの宇宙素粒子実験施設がある。その地下 1000 メートルでは、液体キセノンを 1 トン近く充填した検出器が、宇宙から降り注いでいるはずの粒子を静かに待っている。XMASS(エクスマス)と呼ばれるこの大規模な実験は、宇宙を満たすダークマターの直接検出を目指しており、世界初の成果を挙げると期待されている。最高とされる感度でデータを取りつづけており、その中にはダークマターによるシグナルが既に含まれているかもしれない。

「これでじいーっと待っているわけですか。気の長いとなみですね。」
私が大学時代の恩師を地上ガンマ線望遠鏡（のモックアップ）に案内したときにいただいた感想である。たしかに、天文学や宇宙物理学では望遠鏡を特定の天体に向けたり、観測対象をアクティブに探す研究もあるが、宇宙からたまに飛来する粒子や、起こるであろう現象をただひたすら待つというタイプのもも多い。冒頭のダークマター検出も後者の類である。しかも、期待する反応がおこるかどうかさえ分からない。ダークマターが、多くの研究者が考えているように微視的な未知の素粒子で構成されているならば、なんらかのシグナルが検出されるであろう。しかしそうでない可能性も少なからずある。ダークマター直接検出の可能性は、宇宙はダークマターで満たされているとして、そしてそれらは未知の素粒子で構成されているという仮説の上ではじめて期待できる。

銀河などの光輝く天体が生まれるには、はじめに星間ガスなどが互いに重力を及ぼし合い、一カ所に集まってくることが必要となる。ところがその重力の源となる物質のほとんどは、我々がよく知っている水素や酸素、炭素といった通常元素ではなく、正体不明の物質であると考えられている。読者も「暗黒物質」や「ダークマター」あるいは「ミッシングマス」という言葉を聞いたことがあるかもしれない。ダークマターは 20 世紀前半には既にその存在は議論され、実に 80 年近くにもわたって天文学の大きな謎として残っている。さらに最近では、宇宙の膨張に大きな影響をおよぼす「ダークエネルギー」というものも発見され、大きな話題となっている。

「正体不明のものが存在するとわかっている」とは何だかとても奇妙な言い方

だ。本稿では、現在の宇宙の96パーセントを占める、ダークマターとダークエネルギーという謎について解説していく。

ダークマターとは

ダークマターの存在は、特殊な実験や理論モデルから導かれたのではなく、様々な宇宙観測の結果から共通に示唆されている。ほぼ確定的といってよい事柄である。以下にその根拠となる代表的な観測事実を挙げる。

- 1 銀河の回転速度が、星々の存在しない外側でも顕著に減少しないこと
- 2 銀河団内の構成銀河の速度分散が非常に大きいこと
- 3 多くの銀河団に見られる重力レンズ現象
- 4 宇宙の大規模構造の形成

これら全ての観測結果を説明するためには、大量の「重力相互作用をするもの」を持ち出さなくてはならない。上記のいずれも、重力による引力が関わっていることはすぐに分かるが、なんらかの形で輝いている、つまり電磁波を放出したり吸収したりする通常の物質（元素）を重力源としても全然足りない。主要な重力源となるべきミステリアスな物質はどうやら電磁波を放出しない「暗黒」の物質であるらしい。

歴史的には、もともとダークマターはいくつか異なる研究の流れの中でその存在を議論されていた。1930年代にオランダの天文学者オールトは、太陽系近傍のいくつかの星の運動から、我々の天の川銀河の円盤には大きな重力源、星によるものを足し合わせたよりも大きな重力源が必要であると結論づけた。一方、スイスの天文学者ツビッキーは、髪座銀河団の構成銀河の運動から、猛烈な速度で運動する銀河をつなぎとめておくには、それらの銀河をすべて足し合わせたものよりもずっとたくさんのも（=重力源となる物質）が必要であると考えた。この時点ではまだ仮説というよりは、なにかがおかしい、という謎として捉えられていた。

ダークマターが再び重要視されたのは1970年代である。カーネギー研究所の天文学者ベラ・ルービンは、いくつかの渦巻き銀河の回転速度を測定し、銀河に

は見えているものよりもっと多くの「何か」があるにちがいないと主張した。また、プリンストン大学のオストライカーとピーブルズは、銀河の力学的進化の先駆的な数値シミュレーションを行い、薄い銀河円盤が安定に存在しつづけるためには、円盤を大きくとりかこむ球状の重い器「ハロー」が必要であると結論づけた。

さらには宇宙の軽元素の存在量からも重要な情報が得られた。1960年代に既に宇宙初期の元素合成の理論計算が行われ、宇宙に存在する水素とヘリウムの量を説明することに成功していた。しかしその計算から推定される物質の密度は小さく、それではどうして宇宙の膨張を引き止めるのに必要な量（これを臨界密度という）にはならないことが分かった。つまり、通常物質だけだと現在の宇宙はすかすかの宇宙であるということになってしまう。すかすかの宇宙でも特に問題はなさそうに思えるが、宇宙の膨張はそもそも不安定である。宇宙がビッグバン以降 100 億年以上も膨張し続けてきたことを考えると、宇宙は現在ほとんど全く何も無い状態で膨張しているか、ぎっしり物が詰った状態で収縮してすでにつぶれてしまっているかのどちらかでないとおかしいのだ。仮に現在の時点で中途半端な密度（0でもなければ臨界密度でもない）になっているとするならば、宇宙のごく初期に微妙なさじ加減とでもいふべき働きがあったと考えなくてはならなくなる。我々の宇宙は巧妙な調整のおかげで存在するという仮説は奇妙だ。納得のいく可能性として考えられるのは、宇宙の密度ははじめからきっちり「1」すなわち臨界密度であって、その後の宇宙膨張によってもこの値が変化しない、という場合である。このとき、同時に元素合成の計算結果との整合性を保つには、通常物質の何十倍もの量の「謎の物質」が存在し、合わせてきっちり「1」になっていると考えるしかない。最近の宇宙論では、普通の物質に加え、ダークマター、ダークエネルギーが足し合わさってきっちり「1」になると考えられている（図1）。

ダークマターが宇宙にどれほど存在するのか最終的な答えが得られたのはつい最近のことである。宇宙の大規模構造の解析や、宇宙マイクロ波背景放射の非等方性の解析から、現在の宇宙では、エネルギー密度にして 23 パーセントほどをダークマターが占めると判明した。同様の解析から通常元素は 4.5 パーセント程度であるとも分かっているため、実に宇宙にある「物質」の 8 割以上は謎のダークマターであることになる。

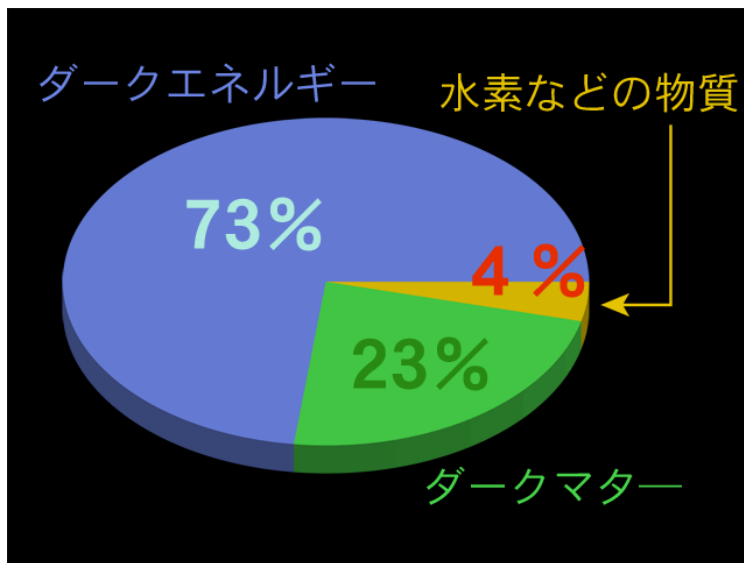


図1 現在の宇宙の構成要素。エネルギー密度に換算し、およそ4分の3ほどがダークエネルギーであり、残り4分の1のほとんども謎の物質ダークマターである。通常物質は4パーセントほどでしかない。

(出典 KEK ホームページより)

<http://www.kek.jp/newskek/2010/mayjun/darkmatter.html>

もしダークマターがなかったら

仮説の検証にはいろんな手法が考えられる。「存在の検証」には、「それがなかったらどうなるか」を考察するのも一つの手であろう。ダークマターのない宇宙を実際に観測することはできないが、コンピューターシミュレーションを行ってその進化を調べることはできる。宇宙の構造形成の標準理論モデルでは、銀河や銀河団などの天体は次のように形成されたと考えられる。ビッグバン後の初期に、ごくわずかだけ物質密度の揺らぎがあり、その揺らぎを種としておもに重力により物質分布の偏りが成長し、やがて現在みられるような様々な天体や大規模な構造が形成された。この様子をコンピューターシミュレーションで見てみよう。図2には、ダークマターのある宇宙と無い宇宙の進化を比較して示す。宇宙初期の密度揺らぎやその後の宇宙膨張などは同じにしてあるため、ダークマターが構造形成におよぼす影響を直接見ることができる。

図の左パネルに示された、ダークマターがないモデルでは、137億年たった現在でもはっきりとした構造が何もないことがすぐにわかるであろう。当然ながらそのような宇宙では銀河や惑星系も形成されず、我々人類もダークマターについて思索するということはなかったであろう。

一方で、ダークマターがある場合（右パネル）には、宇宙年齢10億年の頃から既に複雑な構造が形成されている。137億年とは非常に長い時間に思えるが、通常物質だけで天体や構造をつくるにはどうにも短すぎるようだ。

大量のダークマターが引力を及ぼし合い、塊をつくることで数十億年という「短期間」に銀河が生まれることができるのだ。

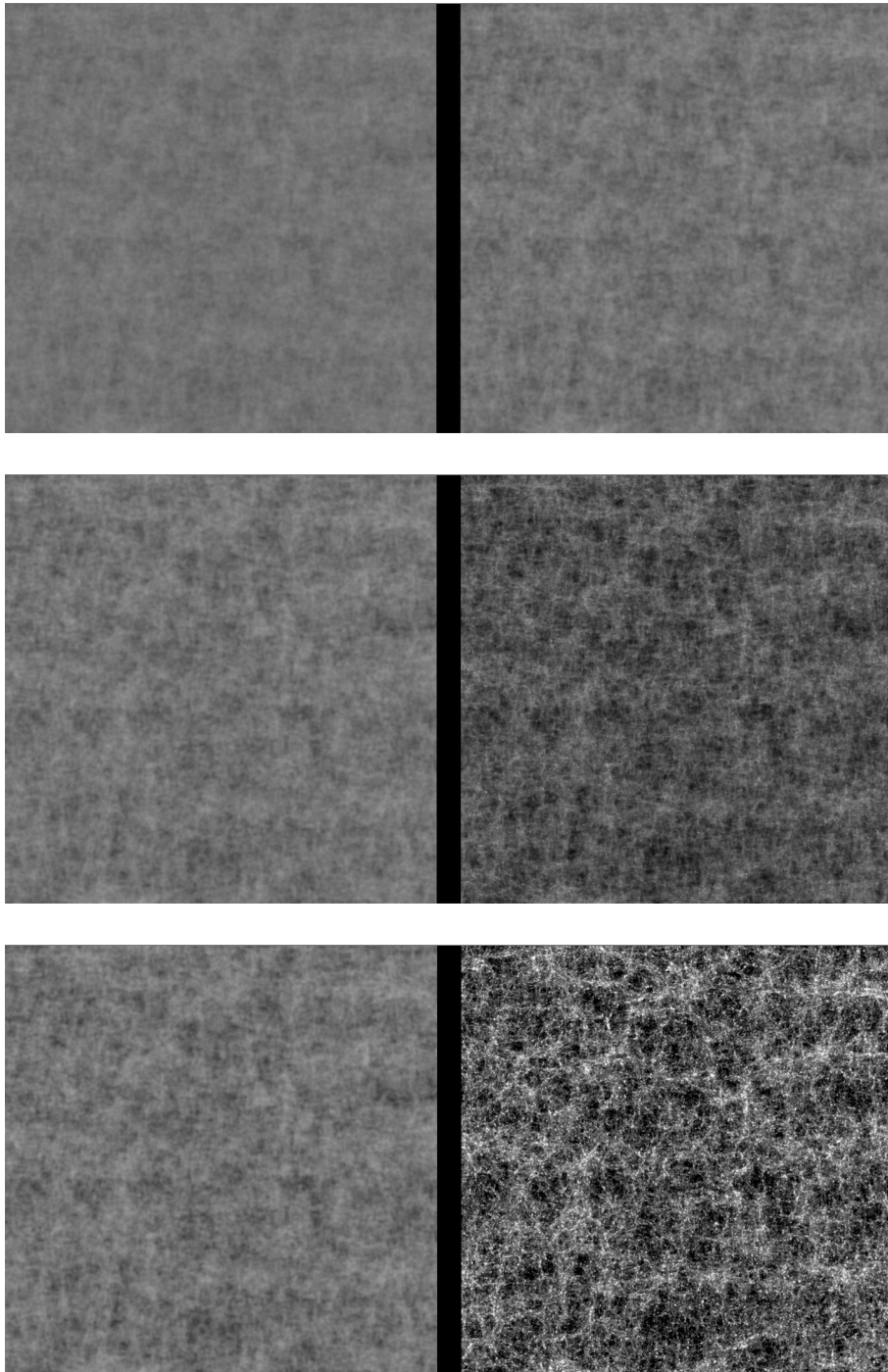


図2 ダークマターがない宇宙（左）とある宇宙（右）における大規模構造の形成。図は、宇宙年齢2億年（上）、10億年（中）、137億年（下）での物質分布をあらわしている。一辺がおよそ3億光年で、色の明るい部分ほど物質密度が高く、銀河などの天体が密集している。ダークマターがないとそのような場所は137億年たっても存在しない。（出典 オリジナル画像）

ダークマターは「冷たい」？

その存在が確かな一方で、ダークマターがどのような物質なのか、もし微視的な素粒子ならその質量など、具体的なことはほとんど分かっていない。定義上重力以外には他の物質とほとんど相互作用せず、電磁波を吸収あるいは放射することもないため、その性質に関する何らかの情報をスペクトル分光などの伝統的な天文学的観測から得ることは困難である。当然ながら地上でなんらかの方法により検出する、つまり確実にダークマターがあるという証拠を押さえることも難しい。

また、素粒子物理学の理論からはダークマターとなりうる基本粒子としていくつも有力な候補が提唱されているが、いずれも可能性として考えられているにすぎず、未だ決定的な結論・理論予言にはいたっていない。それではやはりダークマターについては本当に何もわかっていないのだろうか。面白いことに、そして奇妙だが、いくつかの性質はおおよそ分かっているのである。さらに宇宙の中での存在量、つまりエネルギー密度に換算して他の要素に比べてどれくらいあるのかということは「正確に」分かっている(図1)。ダークマターの性質や存在量に関して重要な手掛かりを与えたのは天文観測であり、その観測結果の解釈には構造形成の理論とコンピューターシミュレーションが必要であった。本特集のテーマに沿うならば、宇宙の構造形成の研究ではコンピュータシミュレーションが「仮説の検証」に大きな役割を果たしてきたのだ。

1980年代以降現在に至るまで、最有力と考えられている宇宙の構造形成の理論モデルは「冷たいダークマターモデル」と呼ばれている。ダークマターが「冷たい」とはどういうことだろう。ダークマターを無数の微視的な粒子であると仮定した場合、宇宙に飛び交うダークマター粒子の速度の分散(乱雑さ)がとても小さい場合に「冷たい」と表現する。これは例えば水の温度と同様に考えればよいだろう。水の温度は、水を構成する分子の乱雑な動きの速度によって定まる。分子の乱雑な動きの速度が小さいと温度が低い、すなわち「冷たい」と表現するのと同じだ。ダークマター粒子の乱雑な動きが小さければ、宇宙初期にはダークマター粒子は周りに対してあたかも「じっと」していたことになる。反対に、ダークマターの乱雑な動きが大きいつまみダークマターは「熱い」と呼ばれる。さらにダークマター粒子の乱雑な動きの程度によって「温かい」と呼んだりもする。この熱いとか冷たいという性質が、構造形成の観点からは

もっとも重要である。

ダークマター粒子の乱雑な動きは、物質分布を滑らかにする働きをもつ。乱雑な動きが大きいほど、つまり「熱い」ほど、宇宙初期での物質分布はある距離以下（およそ平均的な速度をもつ粒子が到達できる距離）ではならされてしまい、天体形成のもととなる物質密度の揺らぎはそれより大きな波長のものだけが残ることとなる。

ダークマターのこの定義からみれば、ニュートリノは「熱い」粒子に分類される。ニュートリノは実際に存在が確認された素粒子であるために、1980年代前半までは宇宙の構造形成の主役たるダークマターの有力な候補であった。その当時、ニュートリノをダークマターの主要素とするモデルに基づいた大規模コンピューターシミュレーションが行われ、観測されるような宇宙の大規模構造が形成されるかが詳細に調べられた。残念ながら、物質分布の進化の詳細な解析から、ニュートリノがダークマターとして宇宙全体の物質密度に大きな寄与を与え、構造形成を支配する可能性は否定された。ダークマターの候補探しは振り出しにもどってしまったのだ。代わってさかんに研究され、現在最も有力な候補となったのが「冷たいダークマター」とよばれるモデルである。ここで強調するが、これまでにそのような物質が実際に直接検出されたわけではない。したがってまだ仮説上の存在である。また、ダークマターは必ずしもある単一の物質や素粒子である必要もなく、たとえば質量が小さく光らない天体（例えばブラックホールなど）の集合であってもよい。

構造形成の様子からダークマターの正体に迫る方法について具体的に示そう。冷たいダークマターを基本とした宇宙モデルでは、小さい塊が合体してどんどん大きいものへと成長していく。反対に、ダークマターが熱い場合には、その乱雑な動きが無視できるくらいのもとも大きな塊しか形成されない。それより小さな天体は、後にその巨大なダークマターの塊の中でおこる様々な物理的不安定性をもとにしてできると考えられる。この違いは現在の時点での物質分布にも顕著に現れ、図3に示したような様子になる。熱いダークマターモデルでは、物質分布が全体に滑らかである。一方で、冷たいダークマターモデルでは無数の小さな塊が見られる。図の下に示した、全天の銀河の分布を明らかにした 2MASS サーベイの結果と比べた場合、どちらのモデルがより現実に近いかは明らかであろう。より定量的に（つまり科学研究として）、物質分布の相関関

数を詳細に比較した研究により、現在では冷たいダークマターモデルが宇宙の構造をきわめて正確に再現することが示された。この理論モデルによれば、ダークマターは天の川銀河の中でも無数の小さな塊をつくっていることが予想される。太陽系近傍でもダークマター分布は滑らかではなくはげしい密度差がある可能性もあり、冒頭で紹介したダークマター直接検出実験に対し重要な示唆を与える。

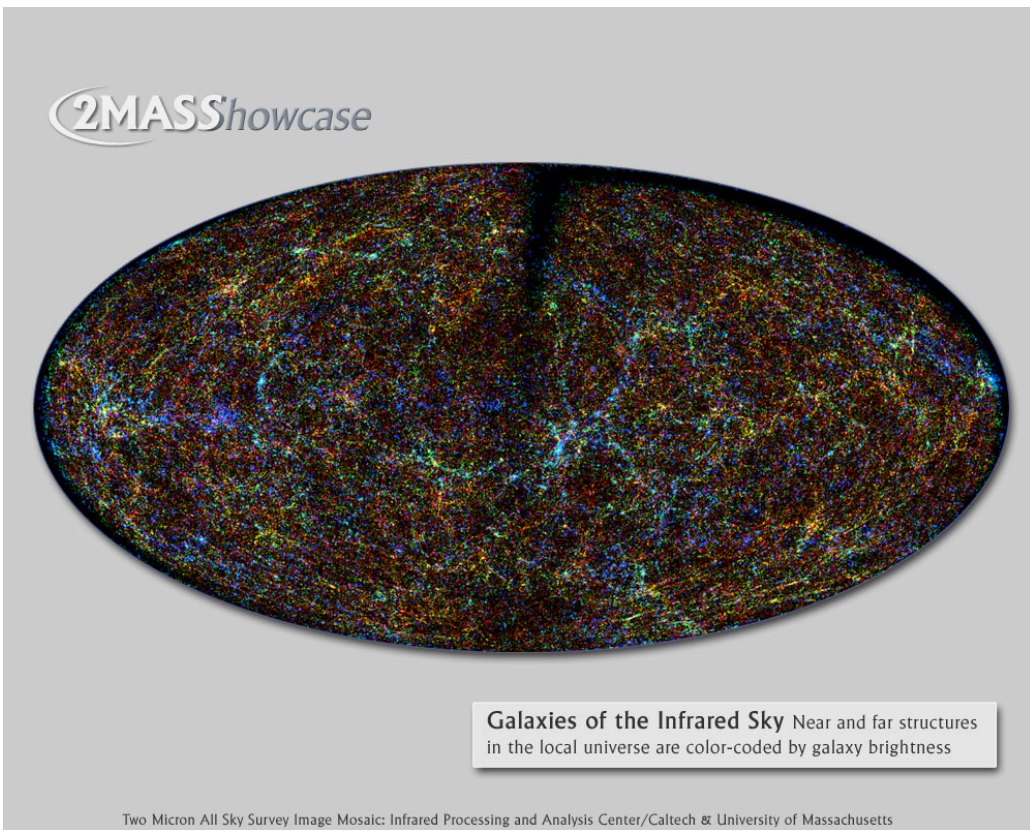
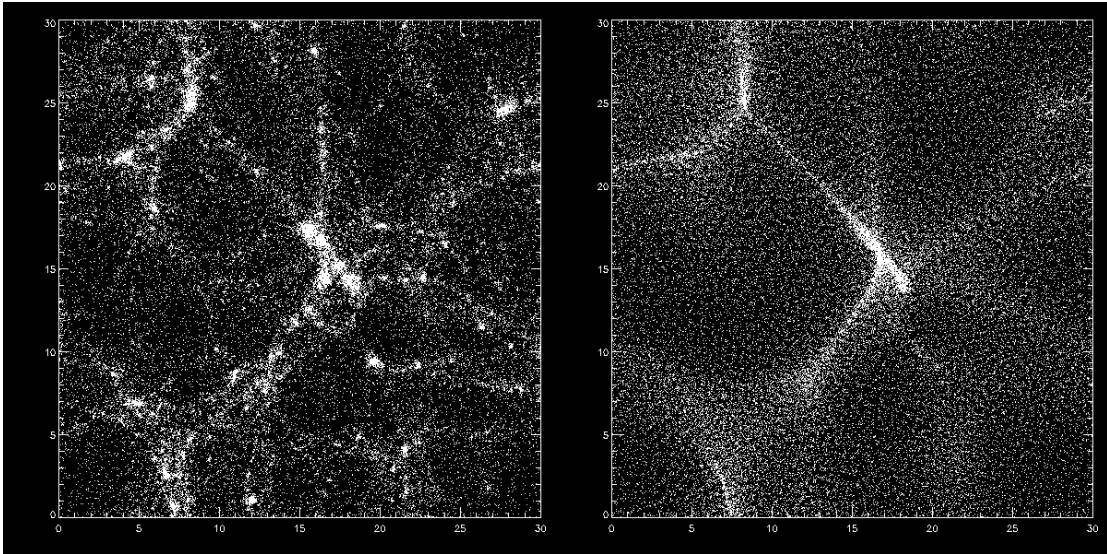


図3 ダークマターが冷たい場合（左上）と熱い場合（右上）の物質分布。
 下の図は、2MASS 全天サーベイによって得られた、天球上に投影された銀河の分布。上記の2つのモデルのうち、どちらが現実に近いかは明らかであろう。
http://pegasus.phast.umass.edu/ipac_wget/gallery/showcase/allsky_gal_col/index.html

宇宙膨張を加速させるダークエネルギー

ダークマターと並んで、いやあるいはそれ以上の謎かもしれないのがダークエネルギーの存在と正体である。そもそも重力場の方程式を導いたアインシュタイン自身が、静的宇宙モデルをつくるために「宇宙項」なる定数項を重力場の方程式に導入したことはよく知られている。それから数十年後、宇宙を静的に保つどころか、その膨張をさらに加速させるはたらきをもつ「ダークエネルギー」として復活することになった。

1990年代後半に、2つの国際研究グループが多数の遠方超新星を観測し、それらの明るさ、距離、そして赤方偏移を測定するという観測プロジェクトを遂行した。その観測データからは、遠くの超新星は「思ったよりも」ずっと暗く見えることが判明した。何故かは分からないが、多くの超新星はとても遠くにあるように見えるのだ。ここで「思ったよりも」と書いたのは、宇宙には物質や電磁波しか存在せず、その膨張率が時間とともに減速していく場合よりも、という意味である。

超新星までの距離（見かけの明るさが暗くなる度合い）と赤方偏移（宇宙進化の時間に対応）との関係を詳細に調べて得られた結論は、宇宙は過去数十億年ほどのあいだに猛烈な速さで膨張していたと考えざるを得ないというものだった。そして宇宙を加速度的に膨張させるものとして考えられたのがダークエネルギーである。

ダークエネルギーがなかったら

これまでに、ダークエネルギーに対して何か「物的証拠」が得られたわけではない。したがってこれもまた仮説である。現在の宇宙の構成要素の実に96パーセントが厳密には仮説にすぎないというのはなんとも残念だが、人類が挑む謎として十分魅力的だとも言えよう。ダークエネルギーは、過去から現在までの宇宙全体の膨張率を増加させるものとして必要と理論的には考えられているが、そんな（変な）ものが本当はなかったらどうなるのだろうか。純粹な疑問としても興味深い。ダークエネルギーが存在するというのなら、ダークエネルギーの効果を取り入れた構造形成シミュレーションの結果は観測される宇宙の構造とあらゆる面で整合していなくてはならない。さもなくば、宇宙の加速膨張をダークエネルギーの効果以外で --例えば重力理論の変更-- で説明する方がよいかもしれないのだ。

そこで、ダークエネルギーがある場合と無い場合では構造形成がどのように異なるのか考察してみよう。2つの場合の違いを明らかにすることでダークエネルギーの働きについてもより理解しやすくなるだろう。ダークエネルギーの働きは、場所によらず均一な斥力をおよぼすだけである。基本的には宇宙の大域的な振る舞いである膨張則を変更するだけであり、構造形成に直接影響を及ぼすものではない。しかし、離れたもの間に働く重力は必然と弱くなるので、猛烈に膨張する宇宙の中で構造形成は次第に阻害されてしまう。こうしてダークエネルギーは、宇宙の大規模構造が過去のある時点からどれくらいの速さで進化してきたかを大きく左右することになる（図4）。ダークエネルギーの効果が卓越すると宇宙が加速度的膨張をはじめ、ものは離ればなれになり、構造形成はそれ以上すすまない。つまり現在の宇宙と、少し前（といっても数十億年前）の宇宙の姿があまり変わらないようなら（図4の右パネル）、ダークエネルギーの効果があったと考えてよいだろう。

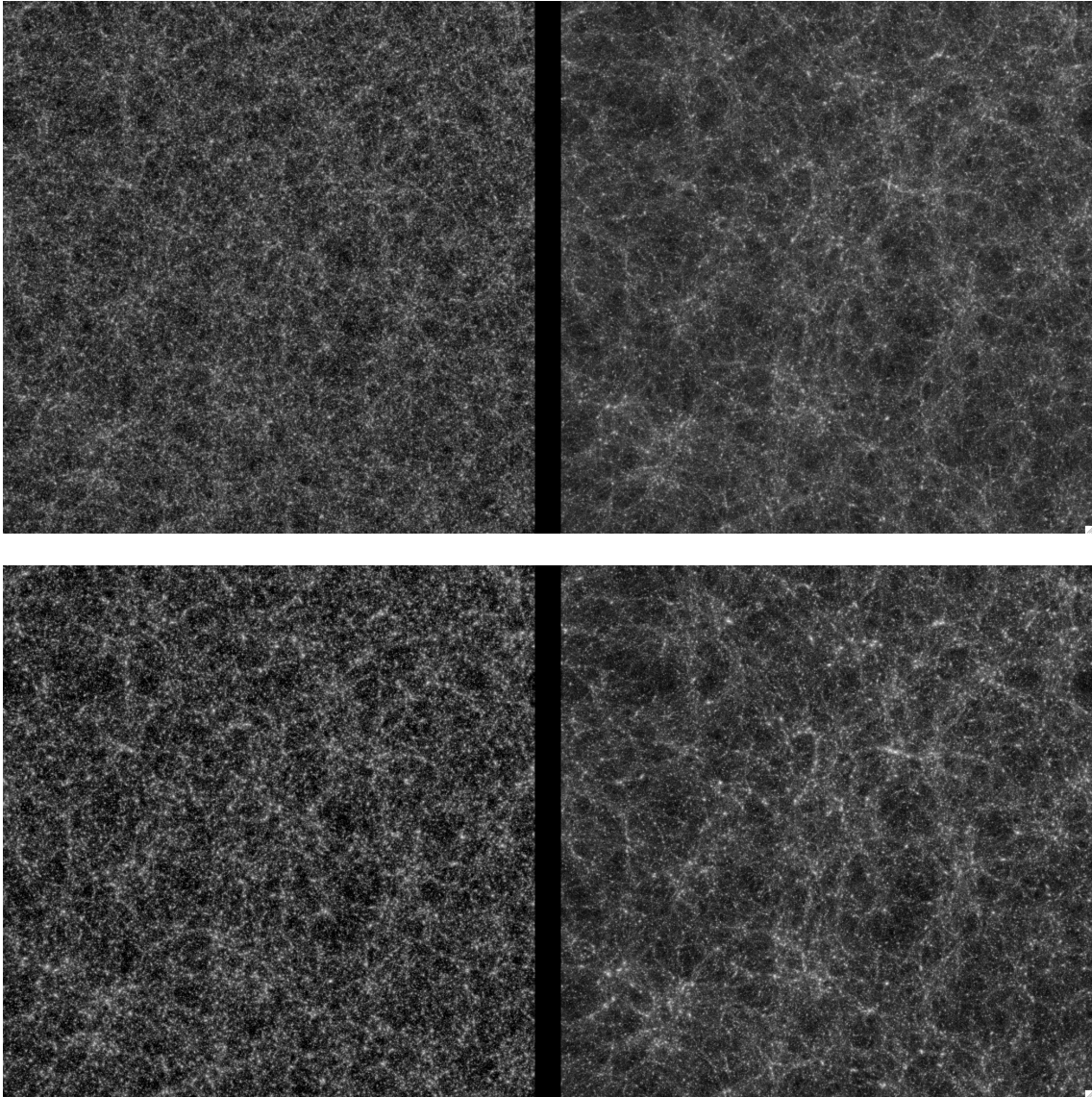


図4 ダークエネルギーの無い宇宙（左）とある宇宙（右）における構造形成の進化。宇宙年齢 70 億年の頃（上段）と宇宙年齢 137 億年、つまり現在の時点（下段）。1 辺が 3 億光年の領域の中での物質分布を表している。ただし、宇宙膨張による空間の広がりには差し引いて表示している。

（出典 オリジナル画像）

みえないものを見る

観測的にダークエネルギーの効果を確かめるにはどうすればよいだろう。最近の天文学では、大規模サーベイが一つのトレンドになっている。天空のおおきな領域を特定の電磁波波長帯でくまなく掃き（文字通り掃天観測という）、様々な天体を発見、観測するとともに、多数の天体の統計や空間分布などを精度良く求める。宇宙の構成要素など、主要な宇宙論パラメータを決定することができる。ダークエネルギーが構造形成の進化に与える影響は、図 4 にみられるように、小さなものである。異なる時点（宇宙年齢）にある多数の天体を観測することではじめてその微妙な差を抽出することができる。ダークエネルギーという、文字通り目にはみえない仮説上の存在をなんとか確かめ、正体を明らかにするのだ。

2020 年までに遂行、あるいは開始が予定される大規模なサーベイ計画は世界で複数あり、日本もそのうちのひとつ、すばる超広視野サーベイ計画を主導している。重力レンズ現象を用いてダークマターの分布の進化を探り、また、銀河の大域的分布から宇宙の膨張則を決定することが計画されている。これらの観測によりダークエネルギーの性質を知り、究極的には宇宙の将来について論ずることができるようになるだろう。

現在の標準宇宙モデルは 96 パーセントもの「目にはみえないもの」を含み、はなはだ未完成であると言わざるを得ないが、宇宙（自然）の謎と豊かさを人に教えてくれるようにも思える。

参考文献

- 1 宇宙はどこまでわかったか？ 岡村定矩編 日本評論社 2010 年
- 2 宇宙 137 億年解説 吉田直紀 東京大学出版会 2009 年
- 3 宇宙は何でできているのか 村山斉 幻冬舎 2010 年