Angle

宇宙の暗黒問題

究極の謎――暗黒物質と暗黒エネルギー

なんだかすごいことになっている。 宇宙は謎の物質やエネルギーに満ちあふれ、 自分の間違いを認めたアインシュタインは ある部分では間違っていたかもしれなくて (つまり結果的に正しかった可能性が高くて) 我々の住む宇宙は唯一の宇宙ではないのかもしれない。



重力レンズ効果とアインシュタイン

分身する天体

「見えないということと、存在しないということはイコールではありません。存在しないどころか、実は目に見えないものがこの宇宙の主役になっている。その正体が一体何なのかはまだ誰にもわかりませんが、絶対にあるはずのその何かを探しているのが我々の研究なんです|

天体観測データに基づき、宇宙は何からできているのか、といった問題を探究する観測的宇宙論。その第一人者である須藤靖さんが教えてくれるのは、見えないものの存在に思いをはせることの大切さ。

昼間は青空しか見えない。でも幸運なことに地球には夜があるから、青空の向こうに無数の星々がきらめいていることを私たちは知っている。そこに星は見えなくても。

夜が訪れ星が現れる。その星たちの間には……何も見えないから何もない、という"常識"を持ち出すことはもうできない。なぜなら目には見えない星々が、青空の向こうでちゃんと輝いていることを、私たちはすでに認識しているのだから。

「すばる望遠鏡 (ハワイ・マウナケア山山 頂) などの大望遠鏡は、星を観測するとい

> うよりもむしろ、星と星の間を満たす 暗い領域を調べているんですよ」

> > 奇妙な言い方だけれど、見えないものの存在が視覚的に示されることもある。左の画像がその典型だ。

「中央にあるオレンジ色の銀河の周りに4つの白い天体が見えるでしょう。本当はこれ、一つのクエーサー*!があたかも4つあるように見えているんです。そう見える理由はちゃんとわかっていて、重力レンズ効果と呼ばれています」

いて、里刀レンス効果を呼ばれています」 この4つの(実は一つの)クエーサーは 2003年に、須藤さんの研究室の大学院生 であった稲田直久さん(現理化学研究所 基礎特別研究員)と大栗真宗さん(現ス タンフォード大学博士研究員)によって 発見された。一方、重力レンズ効果を"予 言"したのは、かのアインシュタイン。彼 の一般相対論によると、光の軌道も重力 の影響によって曲げられる。

須藤 靖 (すとうやすし)

Yasushi Suto



東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻教授 理学博士

1958年、高知県生まれ。1986 年、東京大学大学 院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。カリフォルニア大学研究員、京都大学基礎物理学研究 所助教授、東京大学助教授などを経て現職。 2007年から日本学術振興会先端拠点事業として 発足した『暗黒エネルギー研究国際ネットワーク』 のコーディネーターを務める。著書に『一般相対論 入門』『ものの大きさ一自然の階層・宇宙の階層 一』『解析力学・量子論』など。

つまり、こういうことだ。クエーサーと 地球を結ぶ直線上に障害物となる天体が あるため、そのままではクエーサーの光 は地球まで届かない(地球からクエーサー は見えない)。ところが、障害物であるは ずの天体の重力を受けたクエーサーの光 は、野球の変化球のようにググッと軌道を 曲げる。だから地球に辿り着けるというわ けだ。ストライク。4つのクエーサーが見 えるのは、多彩な変化球よろしく光が複 数の軌道を描くことによる。

「アインシュタインの、と聞くとみなさんまずは、何だかスケールの大きな話になりそうだと期待するでしょう。でも、アインシュタインの一般相対論は、という解説に進むと、数式が出てきて一般の人たちはたちまちわからなくなってしまう。ところがこの画像の場合は、一般相対論的な効果のおかげで、本当は一つしかない星が4つに見えているんだよ、と説明できるので、とにかくすごいことだなと実感してもらえるわけです」

しかもこれはまだインパクトの一部でしかない。

※1 クエーサーとは、中心にブラックホールがあり、周りの 物質が落ち込む際に解放される重力エネルギーによって 明るく光っている天体。

暗黒物質の間接的観測法

暗黒をのぞくレンズ

先の画像で重力レンズ効果を引き起こしている天体はどれかというと、普通に



考えれば4つのクエーサーに囲まれたオレンジ色の銀河ということになるだろう。しかし、それでは100点満点中10点の答え。「天体の明るさからその質量を、質量から重力を推定することができます。そうして導き出したオレンジ色の銀河の重力だけでは、クエーサーの光をここまで曲げることはとてもできません。目には見えないけれど、そこにオレンジ色の銀河の10倍もの質量が存在するのでなければ、観測された重力レンズ効果を説明することができないのです。実はこのことが、目に見えない物質である暗黒物質が宇宙に存在することの直接的な証拠になっています」

アインシュタインの予言の通り光は曲 がった。それにより、目に見えないレンズ の存在が突き止められた。

「オレンジ色の銀河を中心とするこの領域では、たくさんの銀河が密集した銀河団が全体として、一つの重力レンズとして働いていることがわかりました。これは世界で初めての観測例です。それまでに観測された重力レンズ効果は、どれも銀河一個によるものでしたからね。そういう意味でも非常に珍しい天体なんです」

ということは、重力レンズ効果それ自 体はポピュラーなものだと。

「ええ、1979年に初めて観測されて以来、

現在までに100個以上は報告されているでしょう。だから今やもう、重力レンズ効果の発見自体ではなく、重力レンズ効果を通して宇宙の暗い部分を調べることが観測の目的になっています。重力レンズ効果が暗黒物質を探す一つの道具、手段になっているんですね

探す道具がたくさんあるということは、 探される暗黒物質も決して稀有なものではないということ。最新の観測データに 裏付けられた宇宙モデルによると、暗黒 物質は宇宙の2割以上を占めているという。でもこれはまだ控えめなほうだ。後述 する暗黒エネルギーの場合はなんと宇宙 の7割以上にも及んでいる。残りの4%が 星や銀河であり、いわゆる通常の物質(元素)。だから須藤さんの言うように、「宇宙 はダークな成分に支配されている」。

宇宙論と素粒子物理学

世界は何からできている?

須藤さんは物理学教室を出て、現在は 観測的宇宙論を専門としている。そこで 物理学と天文学との関係を尋ねてみた。

「明確な境目というものはないと思いますよ。ずっと以前の天文学は、とにかく空を観測しておもしろいものを見ようとい

う博物学的なものでした。やがてそこに、いったいなぜそんなものが存在するのだろうという疑問が生じ、世界の基本法則というものにぶち当たります。自然界の基本法則を探るのが物理学ですから、今や天文学と物理学は実際にはほとんど同じということですね|

研究者としてのタイプの違いといった ものも特にはないと。

「そうですね。ただどちらかというと、天文から来た人が観測そのものに力を注ぐのに対し、物理の人は装置開発を重んじる傾向はあるかもしれません。たとえば宇宙のこういうところを見たいからX線の検出器を開発する、というように。それは微視的世界の階層をよく知りたいから高エネルギー加速器をつくる、加速させた陽子の衝突によって飛び出した粒子を捉える検出器を開発する、ということと、基本的なマインドは一緒なのではないでしょうか。対象が違うだけで」

微視的世界の階層を知るということは、 分子⇒原子⇒原子核⇒素粒子(クォーク・ レプトン)というように、物質をその構成 要素にどんどん分けていくこと。根底に あるのは素朴な疑問──物質は何からで きているのだろう?

微視的世界の対極は巨視的世界。つま り宇宙。宇宙の階層を知るということは、



地球⇒太陽系⇒星団⇒銀河⇒銀河団⇒宇宙の大構造というように、理解のスケールをどんどん大きくしていくこと。根底にあるのは素朴な疑問──宇宙の果てには何があるのだろう?

尻尾はもうつかんでいる。宇宙にはあったじゃないですか、正体不明の暗黒物質が。それは今わかっている微視的世界の階層には収まり切らない物質。だから新しい階層を知る突破口となる物質。

ほら、つながった。巨視と微視が。宇宙 の遠くを見ることと、物質世界のおおも とを探ることが。

「暗黒物質が予測通り未知の素粒子だとすると、探索実験の感度がもう一桁ほど上がれば発見できるかもしれない、というところまできています。ひょっとすると5年、10年の間に暗黒物質の正体が突き止められるかもしれません」

一時、話題になったニュートリノは候補からはずれたんですよね?

「ちゃんと名前が付いているということは、素粒子モデルとして性質がよくわかっているということなんです。だからニュートリノが暗黒物質として大量に存在するならば、現実の世界と矛盾するということもすぐに計算できてしまう。だからこそ暗黒物質は、今はまだ性質のわかっていない物質という範疇に押し込められてきました。でもそれではいつまでたっても責任転嫁しているようなものなので、最近は暗黒物質を直接見つけようという取り組みが進んでいます」

(内容不明) として封をされたままだった箱をこじ開けようと。

「性質がよく知られているということは、よく相互作用をするということです。性質の知られていない物質は、ほとんど相互作用をしないからこそ、わかっていなかったわけですね」

人間だって、何の反応も返してくれなかったら性格がつかめない。

「そう、しかもそれが透明人間だったら部屋にいるかいないかさえわかりませんよね。机にぶつかって音を立てるとか、何らかの反応をしてくれれば、気づくことできるのですが。素粒子の実験というのはそのようなもので、何らかの相互作用を起こさせることによって存在をつかもってま近は実験のレベルが上がってきて、以前だったらないに等しいようできんのわずかな相互作用でさえも検出できるようになってきました。たとえば山手線一周くらいの加速器**2で、粒子を勢いよく衝突させてやると、暗黒物質の兆候が捉えられるかもしれない」

気配を消した透明人間に揺さぶりをかけ、その尻尾をつかもうというわけだ。

※2 昨年9月、欧州合同原子核研究機構の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) がスイスのジュネーブ郊外で運転を開始した。1周は約27キロで、山手線(約34.5キロ)にほぼ匹敵。国際プロジェクトであり日本も参加している。

暗黒エネルギーと一般相対論

復活した方程式

だけど透明人間ならまだいい。そこにいるかいないかで、わずかなりとも差が生まれるから。

「今、私とあなたの間には透明な空気が

ありますよね。空気はまだわかる。真空ポンプで抜くことができるから。しかし空気を抜いた後にも何かがこの部屋に充満しているとしたら、それどころか宇宙に満ち満ちているとしたら、その存在をどうやって知ることができるのでしょう。あらゆるところに一様にあるものは、あるかないかを区別できない。暗黒エネルギーとはそういうものなのです」

観測とは「違い」を見ることだという。同じ無色透明でも、暗黒物質の場合は空間に不均一に分布し、それが存在する領域では重力レンズ効果によって宇宙の見え方が「違う」。だから、ああそこにあるんだと察知できる。でも、空間をあまねく満たしているものは違いがないから、あることがわからない。これはややこしい。

「もし私たちがピンク色のサングラスをかけて生まれてきたとしたら、世の中がピンク色をしているのか、自分のサングラスがピンク色なのか区別することができない。サングラスをとらない限り絶対にわからない。そういうことですよ」

ではどうして、暗黒エネルギーがある、と考えられているのだろう。

宇宙は膨張している。1929年にハッブルが観測的にこの事実を発見した。それから約70年後の1998年、宇宙が等速で膨張しているとする場合の宇宙モデルよりも少しだけ超新星(星の終末の爆発現象)が暗い、つまり遠くにあることがわかり、宇宙の加速膨張が発見された。

万有引力を考える限り膨張は減速する はずなのに、実際は加速膨張している。こ の事実を説明するためには、万有引力に

■宇宙の組成 ――宇宙はダークな成分に支配されている

2003年、ビッグバンの名残である宇宙マイクロ波背 景放射の温度ゆらぎを、WMAP衛星によって全天に わたって精密測定(宇宙の古文書を作成)。この結果 とそれ以前の宇宙論に基づき、宇宙の組成を求めた。

暗黒エネルギー (ダークエネルギー)⇒宇宙定数?

- ●万有斥力(負の圧力)。
- ●アインシュタインの宇宙定数?
- ●宇宙空間を一様に満たしている。
- ●暗黒物質とは異なり空間的に 局在しないが、宇宙の主成分。

22.8±1.5% 4.6±0.2% 72.6±1.5%

暗黒物質(ダークマター)

- ●銀河・銀河団は星の総和から予想される 値の10倍以上の質量を持つ。
- ●未知の素粒子が正体?

通常の物質(元素)

●現時点で知られている物質は実質的には すべて元素(陽子と中性子)からなる。 対抗して、すべてのものを互いに引き離すような『万有斥力』が作用していると考えればいい。その万有斥力を及ぼす『もの』が暗黒エネルギーというわけだ。

この暗黒エネルギーの存在を予言していた人がいる。またまたアインシュタインだ。「アインシュタインが一般相対論の基礎方程式をつくり、その解を求めたところ、宇宙は安定ではないことに気がついてしまいました。つまり膨張するか縮小するかしかない。困った彼は宇宙を静止させるために、自らの方程式に本来はなくてもよいはずだった項を加えました。これは宇宙定数と呼ばれています」

アインシュタインは理論的に宇宙が静 止していると考えたわけではないと。

「彼の哲学ですね。宇宙が変化するなどあり得ないと。その哲学を貫くために、一般相対論の枠内で許されるパラメータ、

宇宙定数を加えたということです。無理にでっちあげたわけではないですよ。数学的にはあっても全然おかしくない。ただ物理的に必要である理由がなかったのでゼロにしていた。この値をゼロでなくし、うまく選んであげると宇宙を静止させることができるわけです|

でも実際には宇宙が膨張していること をハッブルが発見した。

「そう。もともと宇宙の膨張を自然に説明 していた方程式に、あえて膨張を抑える ためのパラメータを加える必要はないと いうことで、アインシュタイン自身が宇宙 定数の導入を撤回しました」

それがどうして暗黒エネルギーに結び つくのですか?

「アインシュタインは静的宇宙モデルを 構築しようとして宇宙定数を導入しまし たが、その符号を変えると逆に膨張が加 速され、1998年の観測事実と合致するのです。今のところ、暗黒エネルギーが宇宙 定数であるという仮説は、すべての観測 事実と不思議なほど合致しています」

かくして天才科学者が自ら撤回したアイデアが、今では揺るがぬ王座に君臨し、 あまたの挑戦者を退けている。

人間原理と多宇宙

この宇宙は奇跡なのか

須藤さんは、日本が組織して英米も参加する『暗黒エネルギー研究国際ネットワーク』の日本側代表を務めている(「略して『暗黒ネットワーク』ですが、決して怪しいことをしているわけではありません」とは、あるシンポジウムでの須藤さんの言)。

でも宇宙を一様に満たす暗黒エネルギー

■ 宇宙は加速膨張している —— I a 型超新星による発見(1998年)

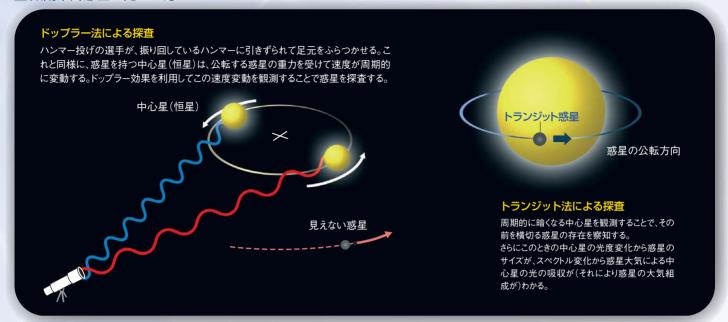


■ 宇宙の 7 割以上を占める暗黒エネルギーはこんなに奇妙 ―― 膨張しても密度は変わらない





■太陽系外惑星の見つけ方



をどのように研究するのだろう。

「時間的な変化をみるしかありません。たとえば10億年前と100億年前、つまり10億光年先と100億光年先の宇宙を観測し、膨張のスピードを比べるわけです。暗黒物質と違い、暗黒エネルギーについては今のところ天文学的観測しか研究手段がありません。まともな理論モデルさえまだ出ていないし、実験的検出となると100年かかっても可能かどうか」

結局、見つからなかったということも あり得るのだろうか。

「一般相対論が本当は間違っていて、実際には存在しない暗黒エネルギーを追い 求めている可能性もあります。私たちの観測の及ばない宇宙が一般相対論に従っているという根拠はどこにもないのですから。もしそうだとするとそれ自身、物理学の歴史を変える大発見なので、多くの人が一般相対論に代わる理論モデルを一生懸命構築しようとしています。でも今のところいずれも観測結果と矛盾してしまう。必ず綻びが出てしまうようです。最も簡単なモデルであるはずの一般相対論を超えることができないのですよ」

方程式。理論モデル。そもそもこの宇宙はどうしてある決まった物理法則に従うようにできているのだろう。もっというとこの宇宙はどうして、人類 (知的生命)が誕生し、進化できるような微妙なバランスを保っているのだろう。この疑問に対する一つの回答が [この宇宙が奇跡的

にも思えるようなある種の秩序や法則を有しているのは、人間が存在しているからにほかならない」という考えだ。これが『人間原理』。しかし、ここまで科学の最先端の話をしておきながら、〔人間がいるから〕はないだろう。そう感じる方もいるかもしれない。

「こう考えてみてください。自分が1億分の1の確率の宝くじに当たったとします。これは奇跡だ、で片付けてしまえばそれでおしまい。でも、ああ1億の人が宝くじを買ったんだと思った瞬間に、それは奇跡でも何でもなくなります。誰か1人が当たって当然。当たらなかったら詐欺ですからね。同様に多くの宇宙があり、そのなかでたまたま生命を生み出す特別な条件を満足した宇宙に私たちが住んでいる。そう考えれば、この世界の不自然さを自然に説明することができるのです」

つまり、ほかにもっと「自然な物理的定数」を持つ無数の宇宙があるのだけれど、そこには「なるほど、自然だ」と納得してくれる知性は残念ながら存在しない、ということらしい。では逆に、私たちのこの宇宙が唯一の宇宙だと仮定すると……なんだかそれはとても傲慢な考えのような気もする。

「そう、まったくの傲慢。人間が存在するように必ず物理法則が調整されていることになりますからね。そういう解釈をする人もいるかもしれませんが、私は人間原理には無数の宇宙の存在が不可欠だと考え

ています。多宇宙という前提に立てば人間 原理はとても謙虚な考えなのですから」

最後にもう一つ。須藤さんは別の宇宙ならぬ別の地球探しも行っている。その第一歩は太陽系外惑星探査。ただ、明るい恒星の近くにある惑星を直接観測するのは「野球場の巨大な照明の光の中で蛍を見つけるようなもの」で、今はまだ不可能だという。でもそこはアイデアしだい。上に紹介する方法により、すでに300を超える太陽系外惑星が発見されている。

「これもまさに見えないものを見るということですね。最終的にはまだ見つかっていない地球型惑星を発見し、そこに生命がいるかどうかを探るのが私のゴールです。そのためのウォーミングアップといいますか、惑星のスペクトル観測 (分光観測) によって植物の存在を確認する研究を始めたところなんですよ」

たぶん人間はわくわくすることに生きる意味を見いだす生命。そんな生命が生存できるようにこの宇宙は成り立っている。だから宇宙はわくわくする謎でいっぱいだ!これも人間原理なのだろうか。



宇宙物理学者と二人のお子さん。須藤さんの奥様が10年ほど前に描いた絵が研究室のホワイトボードに残されている。

- outp