

宇宙を取り巻く謎に挑む

基礎物理学専攻 山口 昌英 研究室



山口 昌英 准教授 1970年長野県生まれ。東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。2010年より、東京工業大学大学院理工学研究科基礎物理学専攻准教授。

山口先生は、宇宙の始まりや宇宙の実態はどのようなものなのかを追い求め研究をしている。宇宙理論研究では、研究対象を直接手にとって実験を行うことができないため、どのように研究すべきかという根本的な問いが大きな問題となる。本稿では、宇宙理論研究に特有の3つのアプローチを手がかりに、広大な宇宙に挑む先生の研究スタイルを、具体的な宇宙現象を例に紹介する。

宇宙理論研究におけるアプローチ

山口研究室では、宇宙はどのように始まり、そして現在までどのように進化してきたのかという、誰もが一度は抱いたことのある疑問に理論的に取り組んでいる。宇宙に対する素朴な疑問がそのまま研究対象となる宇宙理論の研究室には、大掛かりな道具は一切見当たらない。この無限に広がる宇宙を数式によって記述するためには、紙とペンさえあれば事足りるのだ。宇宙論の研究は、それ自体が特別な性質をもった学問分野であるため、その対象を解明するための研究アプローチも非常に特別なものである。本稿では、その中でも特徴的である3つのアプローチを紹介する。

1つ目は、仮説にもとづいてモデルを作り、そのモデルが観測された実際の宇宙とどの程度一致するのかということを確認するというアプローチである。宇宙理論の研究はその対象のスケールの大きさから、他の科学分野で広く採用されている

ような、対象物に何らかの作用を施し、その反応を見るという直接的な実験を行えない場合がほとんどである。当然ながら、宇宙と同じ状況を地球上で再現して実験を行うこともできない。このような宇宙理論特有の性質により、できるかぎり多くの仮説を立て、それらを実際の観測結果をもとに検証していくというアプローチを取らざるを得ない。その際に、宇宙理論の研究者が最も気を使うことは、予測される観測結果に対して漏れないようにモデルを立てておくことで、どのような観測結果が出ても対応可能な状態にしておくことである。

2つ目のアプローチは、いくつもの異なる宇宙の現象を関連付けて考えるというものである。宇宙理論の研究には先ほど挙げた以外にも大きな難点がある。それは、未知なる現象を解明するために必要なヒントが、人間のもっている現在の知識の中に存在するとは限らないということである。このような可能性があるときには、研究対象とし

ている現象一つに目を向けるだけでは十分でなく、一見無関係に見える別の現象にも焦点を当てる必要がある。すべての現象が密接にからみあって成り立っている宇宙においては、一つの現象を部分的に取り出して研究することは意味をもたないと考えられている。そのため、宇宙理論の研究者は、何か一つの宇宙の現象を専門に研究するのではなく、いくつもの現象を研究対象にしている人が多い。たとえ一つの現象を詳細に研究する場合でも、常に他の現象と矛盾しないか、心配りをする必要がある。

3つ目のアプローチは、既存の理論に拡張を加えるというものである。宇宙論の分野で定説とされているような理論は、多くの検証に耐え抜いてきた優秀な理論である。これらの理論は、現段階では観測結果と極めて良い精度で一致しているため、根本的な修正を迫られることはない。しかし、その理論の適用範囲外のところでは何らかの不一致が現れてしまう。これを解決するために、既存の理論に拡張を施すことによって、元の理論では説明できなかったような現象を説明できるようにする。この一見地道な理論の拡張というアプローチこそが着実に宇宙理論を強固なものにし、新理論の発見にもつながっていくのだ。

以降では、先生の具体的研究を例にとって、これらのアプローチを詳しく見ていこう。

宇宙の始まりの検証

山口先生の研究室では、宇宙の始まりはどのようなものだったのかを主な研究のテーマとしている。宇宙の始まりを説明する上で欠かせない理論の一つとして、インフレーション理論がある。インフレーション理論とは、宇宙の始まった直後を説明する理論であり、宇宙の始まりから 10^{-36} ~ 10^{-34} 秒の間に宇宙が指数関数的に膨張したとする理論である(図1)。

かつてはビッグバンによって宇宙は始まったと考えられていたが、この仮説はいくつかの矛盾を抱えていた。その矛盾を解消するため、1981年に佐藤勝彦、アラン・グースによって提唱されたのがインフレーション理論である。現在では、インフレーションという急膨張が宇宙誕生直後に起こり、そのエネルギーが潜熱として解放されることにより、高温高压の宇宙ができたという説が定説として受け入れられている。この潜熱の解放がビッグバンである。

インフレーション理論は、ほとんど完成された理論であると同時に、それまで説明できなかったその他の宇宙の現象を説明することができる優れた理論である。具体的には、星や銀河のもととなる種が作られること、宇宙に地平線のようなものが見当たらないこと、宇宙背景放射として四方八

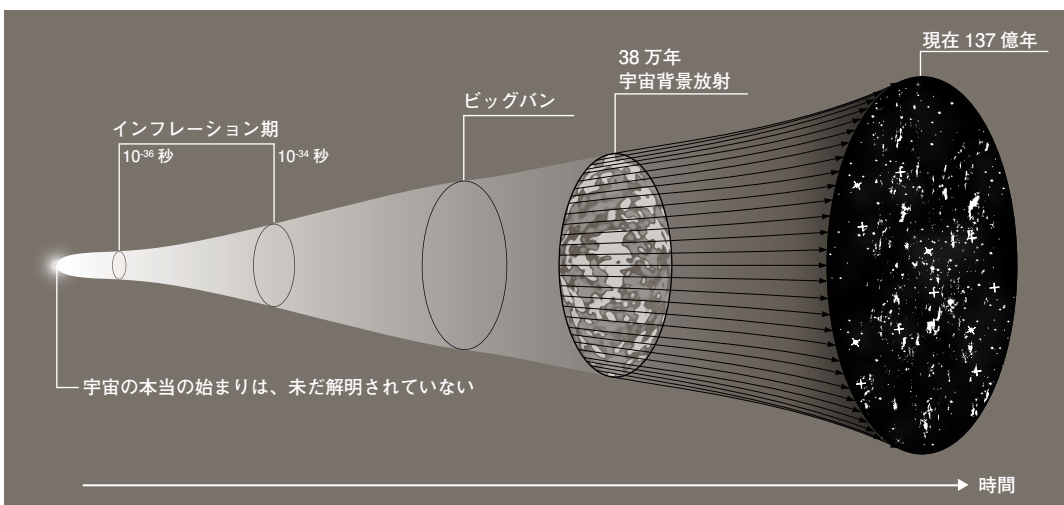


図1 宇宙の歴史
宇宙誕生直後に、インフレーション期があり、その後ビッグバンが引き起こされた。

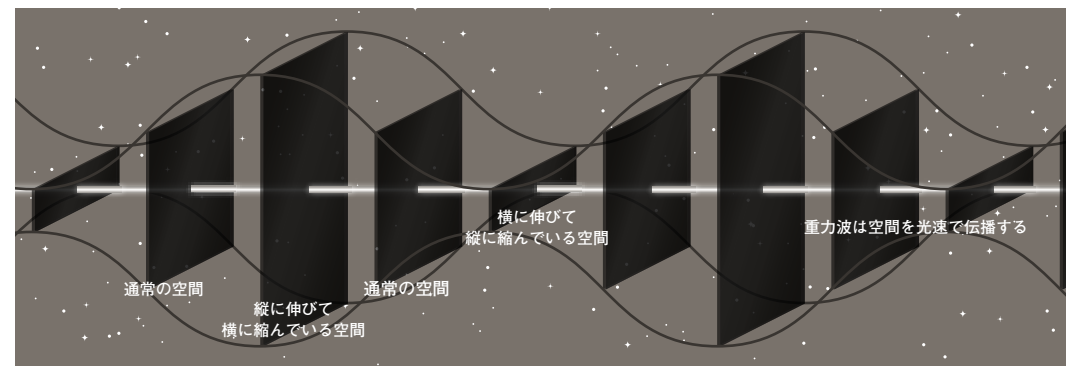


図2 重力波が宇宙空間を伝播する様子

質量をもつ物質が及ぼす重力は、その周りの空間の歪みとして解釈される。物質の位置や質量が時間的に変化すると空間の歪みが波のように伝播する。これを重力波という。原始重力波は重力波の中でも、時空の微小なゆらぎがインフレーションによって拡大されたものである。

方から光子がほぼ同じエネルギーで宇宙を飛び交っていることなどがインフレーション理論によって説明できる。

宇宙背景放射とは宇宙の最初期に飛び出した光子の名残であり、その観測は世界中の物理学者の間で進められている。観測される宇宙背景放射とインフレーションから理論的に導かれる宇宙背景放射の様子を照らし合わせることで、インフレーションが実際にあった現象かどうかを検証しているのである。

この検証で用いられてきたアプローチは、インフレーション理論にもとづいた宇宙モデルを構築し、そのモデルが実際の宇宙とどの程度一致するのかを確かめるというものである。先生も実際にこの検証を行ってきた一人だ。宇宙背景放射の解析によるモデルの検証は、世界中の物理学者の手によって大きく進められ、それによって、インフレーション理論がほぼ確定的なものとなった。

しかし現時点では、現在の宇宙が存在するためにはインフレーションが不可欠であると断言するには至っていない。直接対象を手にとって実験を行うことができないという宇宙物理学の性質上、100%この理論でしかありえないということを証明することができないのだ。そのため、一つ検証が終わるとまた次の検証方法を考える、という繰り返しによって、理論が正しいということの証拠を積み重ね、その可能性を100%に近づけていく。

そこで、インフレーション理論をより確実なものとするための次なるステップとして現在試みら

れているのが、原始重力波の観測とその解析である。インフレーション期の時空は微視的にゆらいでおり、この時空のゆらぎが宇宙の膨張とともに巨視的なスケールにまで拡大され、時空の歪みとなった。その歪みが現在でも宇宙に残っていると考えられている。この歪みが原始重力波である(図2)。原始重力波の観測実験は、インフレーションがどのエネルギーレベルで起こったのか、言い換えるとインフレーションがいつ起こったのかを解明する手がかりになるため、重要視されている。

先生は、インフレーション理論にもとづいた原始重力波の予測をいくつか立て、その予測が実際の宇宙とどの程度一致するのかを検証している。世界中の原始重力波の研究グループによって観測結果が得られたら、直ちに理論モデルとの照合に移れるように準備を整えておくことが理論家の重要な役割の一つなのだ。

消えた反物質とインフレーション

インフレーションは、急激な膨張と同時に、次の物質生成プロセスであるビッグバンへと進むための環境を整えた。しかし、この物質生成プロセスには未だに多くの謎が残されており、中でも多くの宇宙論研究者の頭を抱えこませているのが反物質の消滅である。

反物質とは、粒子と同じ質量とスピンをもつが、電荷などの符号が反対である反粒子によって構成されたものである。本来、エネルギーがあれば対

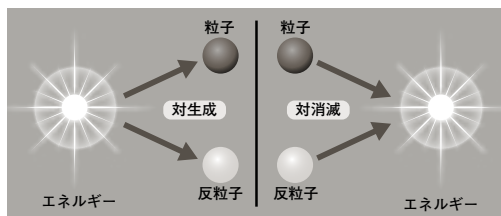


図3 対生成と対消滅

対生成によりエネルギーから粒子と反粒子が生じる。また、対消滅により粒子と反粒子はエネルギーに変換される。

生成によって粒子と反粒子が生じ、粒子と反粒子が衝突すれば、対消滅によりその質量のすべてがエネルギーに変換される(図3)。つまり、粒子と反粒子は同じ量存在するはずなのだ。しかし、実際の宇宙ではビッグバンの時に物質が生成し、そこで同じ量だけ生じたと考えられる反物質がほとんど見当たらない。

理論的には物質と反物質の量は同等であるはずだが、この宇宙では反物質ではなく物質に偏っている。この原因を説明するための研究に、これまで多くの日本人物理学者が貢献してきた。その代表的なものが小林誠、益川敏英のCP対称性の破れや、南部陽一郎の自発的対称性の破れに関する理論である。しかし、これらの理論は宇宙を満たす物質のほんの一部に説明を与えるものにすぎない。反物質消滅の謎を解決するためには、新たな理論を付け加える必要がある。

そこで先生は、物質生成プロセスの前段階であるインフレーションと反物質の消滅という、今までまったく関係がないと思われていた2つの現象に関係性を見出そうと研究を進めている。ではなぜ、先生は反物質の消滅を解明するためにインフレーションに焦点を当てようと考えたのだろうか。そのことを説明するためには、まず対称性の破れとはどういうことかを理解しておく必要がある。

粒子と反粒子は電荷の正負が反対である以外にも、いくつかの異なる性質がある。例えば、粒子に+1、反粒子に-1という数を当てはめると、この数の和が0のとき、物質には対称性があると言える。しかし、実際にはこの合計が0となっていない。これが対称性の破れの大雑把な説明である。

物質生成プロセスにおいて、どのようにして対称性の破れが生じたのかはまだ明らかになってい

ない。高温高压であるビッグバンの初期に、対称性の破れが生じた原因を求める研究者は多い。しかし山口先生は、その直前に起きたインフレーション中にすでに対称性の破れが生じるための条件が整えられたと仮定して研究を進めている。物質が作られた瞬間ではなく、その直前の状態に反物質が消滅した原因があったと考えたのである。

このように先生は、物質を生成する過程の前後に起こった現象とインフレーションを関連付けることで、反物質の消滅を解明しようとしている。

一般相対性理論の拡張

最近では、宇宙は誕生してから現在に至るまでの各段階で、それぞれ異なる形での膨張を遂げてきたことがわかってきた。例えば、インフレーションは加速的膨張であり、ビッグバンは減速的膨張である。この違いの原因は宇宙に充満していたエネルギーの種類の違いに帰着されることがわかっている。さらに、インフレーションのあとエネルギーは物質に転化され、膨張によりエネルギー密度の小さくなった宇宙は万有引力が作用することによって減速的膨張に転じる。

ところが、それから何億年もの時を経て、宇宙は再び加速的膨張の時期に突入する。この加速的膨張は、宇宙を満たすエネルギーによって膨張しようとする作用が、万有引力に打ち勝つという特殊な状況であると言える。それ以降、現在に至るまで宇宙は加速的に膨張し続けているのだが、未だにその原因は解明されていない。

山口先生は、アインシュタインの一般相対性理論に拡張の余地を見出し、宇宙の加速的膨張の原因を探っている。

一般相対性理論は多くの観測結果と矛盾することなくこの宇宙の構造を説明する、いわば現代物理学の柱となる理論である。しかし、一般相対性理論を用いて宇宙の加速的膨張を説明しようとすると、その膨張の原因として暗黒エネルギーという概念を導入する必要性が出てくる。暗黒エネルギーとは、現在の宇宙の加速的膨張を説明するために仮定された未知なるエネルギーである。

先生は重力子の質量に着目して、暗黒エネ

ギーという概念を導入せずに、現在の宇宙の加速的膨張を説明しようとしている。重力子とは、未だに観測されていない、物体に重力を伝えるとされている素粒子である。

現在の一般相対性理論から理論的に導出される重力子の質量は0であり、重力子は光子と同様に自由に宇宙空間を飛び交うことができるとされている。しかし、従来の理論に修正を加え、重力子に質量があると仮定すると、重力子の飛び交うことのできる範囲が減少し、重力を伝搬できる距離も減少する。その結果、宇宙を満たす物質が宇宙の果てに及ばず万有引力は弱まり、宇宙が加速的に膨張しているように見える。このように、重力子が質量をもつとすれば暗黒エネルギーのような未知なるエネルギーの存在を仮定しなくて済む。

ところが、重力子が質量をもたないということは、現在の一般相対性理論から理論的に導かれる仮定であるので、重力子に質量をもたせようとするならば一般相対性理論に立ち返って変更を加える必要がある。先ほども、一般相対性理論は多くの観測結果を矛盾なく説明できる理論であると述べたが、0.1mm～銀河スケール以外では、未だに観測的に確認されていない。先生はこの観測的に確かめられていないスケールが存在することに一般相対性理論を拡張する余地を見出し、それを重力子が質量をもつことができるように、拡張しようと試みている。

このように、現段階では、観測結果と極めて良い精度で一致している理論であっても、その適用範囲外のところでは何らかの不一致が現れる可能性がある。これを解決するために、宇宙理論研究者は、既存の理論に拡張を施すというアプローチによって理論の適用範囲を広げようと試みている。

また、先生はこの仮説を検証するために重力子が質量をもつ場合とたない場合では、現在の宇宙の姿にどのような違いが出るのかを理論的に予測して、それを将来的に得られる観測結果と照らし合わせようとしている。ここでも仮説を確認するための膨大な検証が行われる。

さらに、反物質消滅の研究を例にとりて述べたように、すべての宇宙理論は互いに密接に関係しているため、仮に重力子が質量をもっていたとし

て、そのことが他の物理法則にどのような変更を生じさせるのかも研究しなければならない。なぜなら、ある理論が物理法則全体のどこかに矛盾をきたすとわかれば、それは破綻しているとみなされるからである。

山口研究室の目標

従来の理論では説明のつかない現象が現れると、その現象を説明するための理論が仮説として提唱され、その仮説が予言するものを探し求める。このような構図で今までの宇宙論は発展を遂げてきた。これこそが宇宙理論研究のもっとも基本的なアプローチ、すなわち膨大な数の仮説を立て、それを検証により取捨選択するアプローチである。

また、本稿の始めにも述べたように、宇宙論における問題は、必ずしも人類が現在もっている知識だけを用いて解明できるとは限らない。さらに、本稿では宇宙理論の研究アプローチに焦点を当てたが、宇宙論は非常に難解な数学的概念を利用しながら研究するため、研究対象を現在人類がもっている数学では記述できない可能性もある。ある現象を解明するために他の現象と関連付けて考えるというアプローチと、既存の理論をベースに拡張していくというアプローチは、このような困難に直面したときの打開策となりうるのだ。

山口先生の最終的な目標は自らの疑問の一つ残らず解決することである。先生は、これらのアプローチを拠り所に、あらゆる観点を総動員して、未だに解明されていない宇宙の謎にこれからも挑んでいく。

執筆者より

この度はLANDFALLの記事制作に御協力いただき、ありがとうございました。抽象的な概念の多い宇宙理論研究を学部生にわかりやすく説明するという試みは大変困難なものではありましたが、先生が僕たちの疑問に対して丁寧な説明してくださったおかげで、納得のいく記事を書くことができました。お忙しい中、本当にありがとうございました。(塩川 巧)