

宇宙論の進展

京都大学が東京・品川の「京都大学東京オフィス」で開く連続講演会「東京で学ぶ 京大の知」のシリーズ 13「宇宙に新たな知を求めて」。2013 年 12 月 11 日の第 3 回講演では、基礎物理学研究所の田中貴浩教授が「宇宙論の進展」と題して、宇宙のはじまりや果てについて観測と物理法則によって解き明かす宇宙論の進展について紹介した。

●宇宙のはじまりとは？



「宇宙論とは、宇宙のはじまりや果てに対する人間の根源的な疑問に、物理学を使って迫ろうとする学問です」と田中教授

1953 年、基礎物理学に関する研究を目的に、日本初の全国共同利用研究所として創設された基礎物理学研究所では、「世界のもっとも基本的な構成要素は何か。宇宙はいかに始まり、生命はどのようにして生まれたかのか」という誰もが持つ疑問に対して、素粒子論、原子核理論、物性論、宇宙論などを通じて取り組んでいる。その中で宇宙論を専門としているのが田中貴浩教授だ。

宇宙のはじまりを説明する理論があったとしても、そのはじまりの以前はどうなっていたのか、という新たな疑問が湧いてくる。ということは、宇宙の始まりに対する問いに究極の答えはないのではないだろうか。

「我々研究者も、宇宙論の研究には確かにそういう側面はあるだろうと思っています。一方で、観測可能な宇宙の諸現象を解明することによって、いずれ宇宙はこのように始まったと自信を持って説明できる時代がくることを期待しています。今は道半ばですが、研究の一端をご紹介したいと思います」

●宇宙解明に欠かせない相対性理論

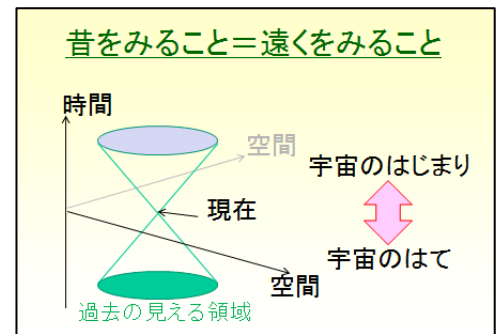
宇宙の話をする際、避けて通れないのがアインシュタインの相対性理論である。相対性理論には、特殊相対論と一般相対論の 2 つがある。

まず特殊相対論だが、基礎原理となるのが「光速度不変の原理」である。

「10万 km/秒の速度のロケットから光を発射したらどうなるでしょう。普通に考えれば、“光速度は30万 km/秒だから40万 km/秒になる”です。しかし、光速度不変の原理によれば、10万 km/秒のロケットから発射しても光速度は30万 km/秒のままだという不思議なことになります」

なぜ、このようなことが起こるのかは、光速度はあらゆるものの速度の限界であるからだ。光より速く伝わるものがないことは、さまざまな実験により確かめられている。

光速度は有限であり、現在我々のいる場所にやってくることができる情報は、有限の領域からのみである（図1参照）。外から情報を伝えるには、光速度を超えなければならない。我々が宇宙を観測する際には、光によって宇宙を見ているのであって、光速度が有限であることを考えると過去に遡れば遡るほど、我々のいるところから遠く離れたところを見ていることになる。



「遠くを見ようとすることは、遠い過去を見ることになります。そして、過去の宇宙を見ることは、現在の宇宙がどのようにできてきたかを見ることになるのです」

過去の宇宙を紐解くもう1つの鍵として、アインシュタインの一般相対論がある。一般相対論は万有引力の法則に代わる「重力の理論」である。一般相対論によれば、物質のエネルギーが時空をゆがませることによって、重力が生じると考える。大質量があると、その周囲には時空のゆがみが生じるため、光は直進せず、時間の流れも影響を受ける。これらは、重力場中では光が曲がる重力レンズ効果や重力赤方偏移効果として観測されている。

この一般相対性理論の解として得られる結論が、「宇宙は膨張または収縮し、定常にとどまることがない」とする膨張宇宙論である。一般相対論に従うと、宇宙の膨張率とエネルギー密度は関係している。宇宙の膨張率、つまり宇宙論的な距離にある2つの天体間の距離が離れていく割合は、宇宙に満ちている物質のエネルギーの濃さを反映しているということだ。

●膨張する宇宙

実際に宇宙が膨張していることが実証されたのは、1929年、「ハッブルの法則」の発見によってである。これは、天の川銀河の外にある、遠方の銀河はその距離に比例した速度で太陽系から遠ざかっている、という主張だ。この観測は一律に膨張する宇宙を強く示唆す

る。次のような例えを考えると理解しやすい。A と B という結び目をつくったゴムの端を釘に結ぶ。B は A より 2 倍遠い距離にある。これを、ゴム長さが 2 倍になるまで引っ張ると、B の移動した距離は、A の移動した距離の 2 倍となる。

当初のハッブルの法則を表したグラフでは、計算値と観測値とに少しずれがある。当時から、後退速度については赤方偏移を利用して比較的正確に測定可能であったが、距離については「銀河の明るさはどの銀河もだいたい同じだろう。だから、暗く見えるものは遠くにあるに違いない」という、大雑把な前提に立って測定されていたためだ。

現在のハッブルの法則はより精密で、計算値と観測値がきれいにそろっている。銀河は星の多少があって明るさが異なるため、現在行われているのは I a 型超新星を使った距離測定である。I a 型超新星は、最も明るい時の絶対等級がほぼ一定で、はるかに理想的な標準光源である。これによって精密なデータが得られ、ハッブルの法則は確固たるものとなっている。

●ビッグバン宇宙論

ビッグバン宇宙論は、「宇宙が高温高密度の火の玉から始まったと考えられる」とする説。多くの人が誤ったイメージを持ってしまいがちだが、「宇宙の外から見てここからが火の玉になっている、ということではなく、宇宙全体が高温高密度になっている状況です」

ビッグバン宇宙論の証拠とされるのが、軽い元素の合成やマイクロ波宇宙背景放射だ。宇宙は高温高密度の状態が始まり、最初の 3 分間に宇宙が膨張して急激に温度が降下。冷える過程で軽い元素が合成された。この軽い元素の生成量の割合を決めるのは、宇宙の物質と光子の数の比だ。この比は 10^{-10} から 10^{-9} というごく小さな数で、初期は圧倒的に光子の数のほうが多かったのである。

宇宙初期に存在していた物質と光子の数の比が決まると、現在の宇宙に存在する物質の量から光子の数が推定できる。その量は観測できるほど十分に多く、マイクロ波宇宙背景放射として、宇宙全体をほぼ一様に満たしているはずである。この初期の段階に宇宙を満たしていた放射の名残が 1965 年に実際に発見された。さらに、1992 年に打ち上げられた COBE 衛星によって、絶対温度 2.725 度の黒体放射に相当すること、また強度のゆらぎがわずか 0.001% 程度であることが確認された。

●見える世界のその先 — インフレーション宇宙

「ビッグバン宇宙論には今や十分な証拠があります。では、ビッグバンが起こる前の宇宙はどうなっていたのでしょうか。この直接見えない過去を遡るカギとなるのが理論の力であり、仮説を立て、検証するという過程です」と田中教授は話す。

現在、最も有力とされる仮説がインフレーション宇宙である。宇宙は誕生後に加速度的に膨張したとする説で、現在おおよそ実証されつつある。この説が、ビッグバン宇宙論の諸問題を解決するとされている。

諸問題の 1 つが、地平線問題である。これは宇宙背景放射が方向によらず一様であるという観測事実と、減速膨張宇宙論との間にある矛盾だ。通常の物質を考える限り重力波引力としてしか作用しないので宇宙膨張は減速する。減速膨張する宇宙においては、宇宙の地平線を越えた 2 つの領域は宇宙が生まれてから現在までの間にお互いに光をやりとりすることができない。つまり、そのような 2 つの領域は物理的な相関を持たないはずであるにもかかわらず、宇宙背景放射のゆらぎはわずか 0.001%、つまりどの領域も同じ物理状態にあるということを意味し、不思議である。

もう 1 つの大きな問題は平坦性問題だ。曲率と宇宙の密度の関係を見た時、適当な初期条件からスタートすると、密度に対する曲率の割合が大きくなっていくと予想されるのに、現在の宇宙の曲率の割合は小さい。となると、過去において非常に高い精度で、曲率が限りなくゼロに近かったことが必要になる。

これらの諸問題を解決するために、インフレーション宇宙では「宇宙初期では、真空のエネルギーが支配していた」と考える。宇宙創世において、大きなエネルギーを持っていた真空が、エネルギーの小さな真空へと、いわば“相転移”を起こし、保持されていたエネルギーがインフレーション後に熱に変換される。そのためにビッグバンが起こった、というわけだ。

これにより地平線問題が解決する。初期に因果関係があった領域が、地平線を越えて急激に膨張したと考えれば説明がつく。平坦性問題も急激な膨張によって平坦になったと考えられる。膨張して曲率は小さくなり平坦化されても、真空のエネルギーは真空なのだからエネルギー密度は一定のまま。つまり、創世記の宇宙がどんな曲率を持っていても、高い精度で、曲率を限りなくゼロに近づけることが可能になる。

「インフレーションという考え方はビッグバン宇宙論の起源を説明できますが、それだけではありません。インフレーションは宇宙の構造形成の種をつくるのです」

銀河が誕生するには温度のムラが必要であるが、インフレーションは量子力学的なゆらぎをマクロなゆらぎに成長させる機構を伴っており、それが 0.001%の宇宙背景放射のゆらぎを生む。このゆらぎが、重力の不安定性によって成長し現在の“銀河”となったと考えられるのである。

マイクロ波宇宙背景放射は COBE 衛星のほか 2001 年の WMAP 衛星、2009 年の Planck 衛星によって精密なゆらぎが観測されており、インフレーション宇宙論の検証が進んでいる。

●宇宙の始まり、さらなる発展へ

最近の、新たな実験や観測の動きとして、世界最大の粒子加速器を使った実験、ヒッグス粒子の発見が挙げられる。宇宙論は地上の物理の外挿によって成り立っているので、ヒッグス粒子の発見は宇宙論の議論に対してもさまざまな影響を与え始めている。また、Planck 衛星などにより、宇宙背景放射の偏光の観測も進行中である。偏光の観測により、宇宙初期のインフレーション時に密度ゆらぎと同時に生成されたとされる重力波が見えると言われる。重力波とは時空自身のさざなみのことである。重力波自身は直接的に検出されてはいないが、現在、直接的に重力波をとらえる試みも進められている。

また、宇宙にある物質のうち、その正体が明らかなものはわずか 4%。残りの 28%が光を放出も反射もしない未知の物質「ダークマター」で、68%が宇宙膨張を加速させる要因とされながらその正体がほとんど分かっていない「ダークエネルギー」である。「宇宙起源の解明には、未知の部分が数多く存在していますが、逆に言えばその存在が、宇宙を探る上での手がかりになるのです」

「ビッグバン宇宙論も、インフレーションも、それぞれがジグソーパズルの 1 つのピース」だと田中教授。「いろいろな説があって、本当に最終的にどのピースが全体像に合うかは分からない。一步一步地道に検証していくしかないのです」と結んだ。



熱心な参加者からは「膨張している宇宙の外側はあるのか」、「観測可能領域外でビッグバンが起こった可能性はないか」といった質問も活発に飛び出した