

宇宙の創生と鉄

私たちを取り巻いている大宇宙。その始まりは今から150億年前だといわれている。私たち人類の持つ、わずか500万年の歴史とは比べようもない。

大空で輝く太陽や月を仰ぎながら、私たちの祖先はいつも宇宙に思いを馳せてきた。たとえば古代インドでは、大きな蛇の上に亀が横たわり、その上にのった象の背によって地球が存在すると考えた。またギリシャの哲人、プラトンは、宇宙は地球と天の2つの同心球で構成されると考えた。現代に生きる私たちは、地球は太陽系の一員であり、大宇宙の中ではきわめて小さな存在であることを知っている。そして現代社会になくてはならない鉄が、長い宇宙の歴史の中で重要な役割を果たしてきたことを知っている。

これは多くの先人たちの英知と努力の賜物であるが、現在でもなお宇宙には多くの謎がある。宇宙はどうやって生まれ、どのように変貌してきたのか。そしてこれからどうなるのか。人類が手にした最先端の理論と技術が、いま宇宙の謎に取り組んでいる。

宇宙はどうやって始まったのか

東京大学大学院理学系研究科 佐藤 勝彦 教授

Katsuhiko Sato

宇宙の初期に起こったビッグバンはあまりにも有名だが、それ以前の宇宙、つまり宇宙誕生の謎に迫る宇宙論の研究が進んでいる。現在では、初めにある「無」、そして急激なインフレーション、ビッグバンが起こるというシナリオが考えられている。宇宙の始まりはどうだったのか、その後どうやって物質が誕生したのか。インフレーション理論の提唱者で、世界的に注目される宇宙物理学者である佐藤勝彦教授にお話をうかがった。

力の統一理論とインフレーション

— 宇宙の謎の解明と物理学とは、どのような関連があるのでしょうか。

佐藤●1970年の初めごろ、素粒子の理論である「力の統一理論」が大きな成果を修めました。これは、この世界にある4つの力（重力、電磁気力、弱い力、強い力）を一つの法則にまとめ、この方程式さえわかれば、この世界の力は基本的に全部わかるという究極の理論です。

私は、この研究を進めるうち、この理論によって、物質の最大の構造物である宇宙の謎が解明できるんじゃないかと考えました。その第一の理由は、宇宙の初期に起こったビッグバン、つまり火の玉の状態では、あらゆる物質は、その根源ともいえる素粒子に分解されているはず。第二の理由は、現在の宇宙は膨張を続けていますが、これは過

佐藤 勝彦
(さとう かつひこ)

京都大学理学部物理学科卒業。同大学院理学研究科物理学専攻、修士課程、博士課程終了。1979年デンマークのニールス・ボーア研究所客員教授、80年「インフレーション宇宙論」を提唱。また「宇宙の多重発生の理論」を発表。90年「素粒子論的宇宙論」で仁科記念賞受賞。国際天文学連合宇宙論委員会委員長を務めた。現在、東京大学理学部教授。95年度開設の東京大学初期宇宙研究センター長に就任。



去に遡ると非常に小さなところから始まったと思われるのです。つまり、大宇宙といえども、昔に遡ればミクロの世界なのです。ならば、素粒子の世界を支配する量子力学などを基礎として研究し、それによってはじめて宇宙の開びゃくを知ることができるということになります。

— 具体的にはどのような研究をされたのですか。

佐藤●私たちが行ったのは、力の統一理論と一般相対性理論を連立微分方程式として解くということでした。これによって、次のようなシナリオが生まれました。

もし宇宙の小さな種のようなものが生まれたと仮定すると、指数関数にしたがって急激に大きくなるというものです。つまり倍々ゲームで、宇宙が急激に大きくなるのです。しかも大きくなった最後に、真空の相転移を迎えます。相転移というのは、たとえば水蒸気が水になる、水が氷になるというのと同じことです。急激に大きくなった宇宙で真空の相転移が起こり、潜熱が解放されると、その熱によって宇宙は大きな火の玉、つまりビッグバンを迎えるのです。

— 先生がインフレーション理論を提唱されてからすでに10年がたちますが、その後の宇宙論にどのような影響がありましたか。

佐藤●いま振り返ると、ビッグバン宇宙を作るメカニズムとして大きな意味を持つ理論だったと思います。インフレーション理論については、アメリカのアラン・グースが、私より少し後に似た考え方を発表し、「インフレーション」という、いかにもネイティブスピーカーらしいアピールする名前を付けたのです。

— インフレーションの過程で起こるマザーユニバースとチャイルドユニバースとはどういうものですか。

佐藤●インフレーションの最初にちょっとしたデコボコがあると、その部分が初めに急激にインフレーションを起こすのです、まるでニキビが吹き出るように。つまりインフ

*1 CCD
charge coupled deviceの略で、電荷結合素子のこと。
光信号を電気信号に変える固体撮像素子としてビ
デオカメラなどに使われている。

*2 COBE
「コービー」と読む。1989年NASAが宇宙背景放射を
正確に測定するため打ち上げた人工衛星。92年4月に
公表された観測結果は、宇宙全体からやってくるゆ
らぎをとらえたものとして、世界的に大きな注目を
集めた。

レーションは、全体で一様に起こるわけではないのです。
元の宇宙、これがマザーユニバースですが、その宇宙か
らデコの部分が吹き出るようにチャイルドユニバースが
生まれてくるのです。

「子どもの宇宙」と呼ぶのは、最初は子どもとおかあ
さんがつながっているのに、大きくなると乳離れしたよ
うに連絡が取れなくなるからです。物理学的にいうと、
子どもとおかあさんの間はワームホール、つまり虫穴構
造でつながっており、ここに事象の地平線ができるため
に、ちょうどブラックホールの中に入ってしまったよう
に互いにコミュニケーションが取れなくなるのです。こ
の子どもの宇宙から、同じように孫の宇宙が生まれます。
これを「宇宙の多重発生の理論」と名付けました。私た
ちの宇宙が子どもの宇宙か、孫の宇宙か、それとももっ
と後なのかはわかっていません。

「ゆらぎのある無」とは何か

— インフレーションが起こる前の宇宙はどうなってい
たのですか。

佐藤●宇宙の創生論で大切なことの 하나가、元になる種
の宇宙の問題です。これに取り組んだのが有名なホーキ
ングやビレンケンです。ビレンケンは「creation of universe
from nothing」つまり「無からの創生」という論文を登
表しました。

数年前NHKの番組の中で、アフリカのサハラ砂漠に
住むドロ長老という人が「宇宙は何もないところから突
然ポコッと生まれたんだ」と、滔々と説明していました。
私たちが言っているのと同じように、無から生まれたん
だと言っているんです。つまり、哲学的にも、存在を説
明するのに存在から始めたのでは、話にならないのです。
科学的には、無から生まれたというのなら、それに対応
する式や物理学の法則に基づいて説明しなければなりま
せん。ホーキングやビレンケンのやったことは、科学の
言葉でドロ長老の言ったことを語ったということなのです。

— 現在「宇宙の種」はどのように考えられていますか。

佐藤●ビレンケンは、宇宙の種は量子力学のトンネル効果
に似ていると述べています。有名なエザキダイオードは、
半導体の中で本当は電子が越えられないところを自分でト
ンネルを掘ってこちらに進入してくるという効果、つまり

宇宙創生のシナリオ

宇宙は無から誕生し、誕生後すぐ
にインフレーションと呼ばれる急
激な膨脹を起こす。誕生後 10^{-34}
秒たつと、潜熱の解放によって熱
のエネルギーが生まれ、火の玉宇
宙になる。その後、宇宙は膨脹し
ながら温度が下がり、30万年後
には電子と原子核が結合し、宇宙
の晴れ上がりを迎える。これが光
で見ることができる最も初期の宇
宙である。

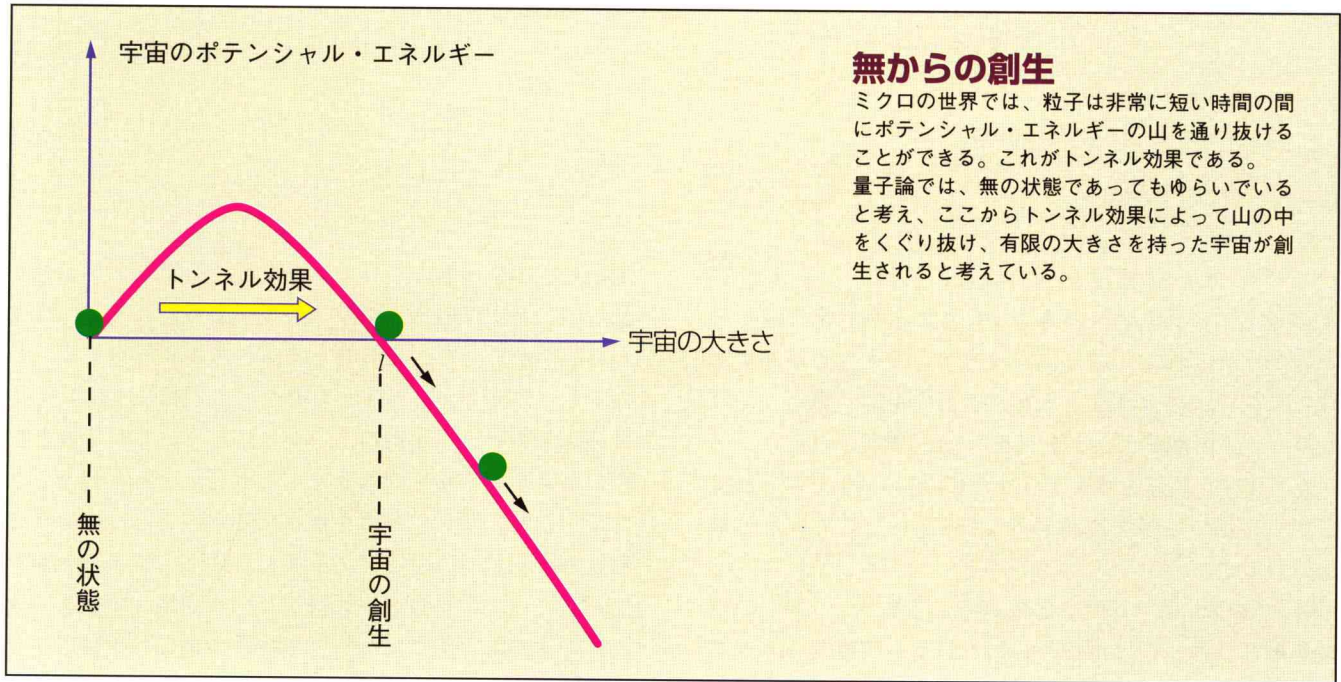
現在

宇宙の晴れ上がり(30万年後)

ビッグバン

インフレーション(指数関数的膨脹)

宇宙の誕生



無からの創生

ミクロの世界では、粒子は非常に短い時間の間にポテンシャル・エネルギーの山を通り抜けることができる。これがトンネル効果である。量子論では、無の状態であってもゆらいでいると考え、ここからトンネル効果によって山の中をくぐり抜け、有限の大きさを持った宇宙が創生されると考えている。

トンネル効果を持った素子です。同じように宇宙も無からポッと出てくるというのです。

ホーキングは、もう少し数学的な立場で「始まりは特異点から始まってはならない」と言っています。一般相対性理論だけを使ったガモフのビッグバン理論は、実は宇宙のあらゆるものが無限の数値になったところ、つまり特異点から始まっています。ホーキングはわれわれがいま測っている時間ではなく、時間を複素数に拡張し、虚数の時間から宇宙が始まるということにしたのです。

数学的に言うとビレンケンとホーキングの言っていることはほとんど同じです。私は2人の言っていることは本質をとらえていると思いますが、今後10年、20年の間に訂正され、大きく変わる可能性もあります。

ビレンケンの言っている「無」とは、量子論的にゆらぎがある無です。量子論では、完全に何も無いということは許されません。だからこの「無」とは「存在していないといっても、ゆらいでいて何かある状態」のことです。物理学ではグランドステートとか基底状態といいます。この中から宇宙が生まれ、しかも生まれたてのときすぐにインフレーションを起こして、巨大な宇宙になれるというように話がつながるのです。

宇宙の晴れ上がりを観測したCOBE

— 最近の宇宙論の話題というのと、どんなことがありますか。
佐藤●まず挙げられるのは、1980年代の終わりから観測的な研究が爆発的に進歩したことです。最近の光電技術では、CCD*1や画像処理、コンピュータの利用などで、100万個もあるという銀河の数の解析などがすぐできるようになりました。つまり、80年代の理論主導の時代から

90年代の観測主導の時代に移行したのです。

大きな成果の一つは、1992年4月にアメリカの人工衛星のCOBE*2が、宇宙全体から届くマイクロ波の電波を受けて宇宙の地図を作ったことです。ここからわかったことは、宇宙が生まれてからわずか30万年しかたっていないところ、つまり今から150億年の昔そのままの地図を描けたということです。宇宙では光の速さが有限であるために、遠くを見ることはすなわち過去を見ることになります。電波や光を使うと、宇宙が晴れ上がる瞬間までを見ることができますが、これが宇宙が生まれてから30万年たったときのことです。晴れ上がりとは、火の玉でプラズマ状態だった宇宙が、電氣的に中性に変わるために宇宙が透明になることです。

COBEによる地図を作ったアメリカのジョージ・スムートは「この観測によってインフレーション理論をみんなが信用することになるだろう」といいました。この地図に出ているデコボコは、インフレーション理論のデコボコを示しており、この中のデコが固まって銀河や天体が生まれてくることになるのです。このようにインフレーション理論が実験的、観測的に証拠が得られるなどと、私たちも考えていませんでしたが、この地図によってインフレーション理論への大きな支持が得られたといえるでしょう。

— 今後の観測技術の進歩が、大いに期待されますね。

佐藤●ええ。これから100年の間には、インフレーションが起こっている瞬間の写真を撮れる可能性もあるでしょう。しかし晴れ上がりの前までは不透明だから、電磁波を使っても観測できません。それならもっと透明な、たとえば重力波などを使えば宇宙の開びやくのころまで見えるという期待があります。

次は、ちょっと都合の悪い話です。NASAが打ち上

げたハッブル望遠鏡が昨年9月に観測した宇宙の膨張の速さは、われわれが考えているのより非常に速かったのです。これでは過去に遡って宇宙の大きさがゼロになる時刻を求めようとすると、宇宙の年齢が短いことになり、最近の観測データを見ると、100億年より短いことになります。誤差を考えてもせいぜい120億年です。ところが古い星の年齢を観測すると150億年たっている星があるのです。

— この違いについて、どうお考えですか。

佐藤●これは、いま再びわれわれの宇宙が第二のインフレーションを迎えているんだという立場に立つと解決できます。つまり、宇宙の誕生のころのインフレーションを起こした真空のエネルギーがわずかに残っており、それが今ごろ第二のインフレーションを起こしているというものです。しかしなぜこんな微小な数値だけエネルギーが残っているのか。これにはまだ確かな理屈がなく、いまだに謎です。

宇宙はどうして鉄ばかりではないのか

— それでは、宇宙の歴史の中で物質が誕生したのはいつごろだったのでしょうか。

佐藤●無から生まれた宇宙は、陽子や中性子などの素粒



子よりも小さいものでした。しかしインフレーションが起こると宇宙は巨大になり、最後に潜熱として熱のエネルギーが解放され、このとき物質エネルギーが生まれるのです。エネルギーが生まれたというのは、実はマイナスのエネルギーが宇宙のどこかに隠れていて、これと物質のエネルギーを足せばほとんどゼロになるということです。ただ、たんに物質を作ったといっても、このとき物質と半物質が等量できてしまいます。このまま宇宙が冷却していくと物質と半物質が互いに消滅してしまいます。ですから実際には物質と半物質の量にわずかながら差ができる必要があります。この「物質の非対称性の起源」は宇宙論の大きな問題ですが、素粒子の統一理論によって説明できる可能性があるといわれています。

宇宙の開びやく後100秒ぐらいになると、陽子や中性子などから、少し原子が生まれ、水素、ヘリウム、リシウムあたりまでができます。

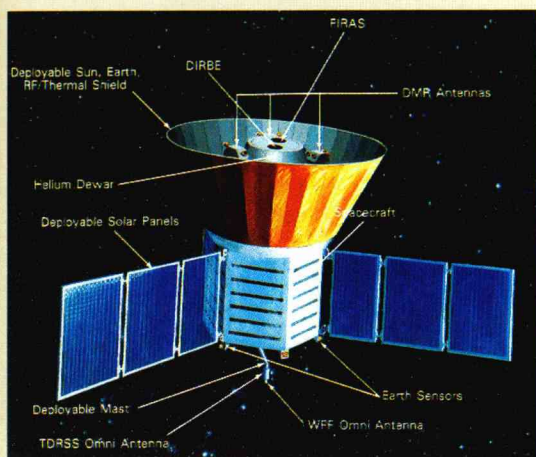
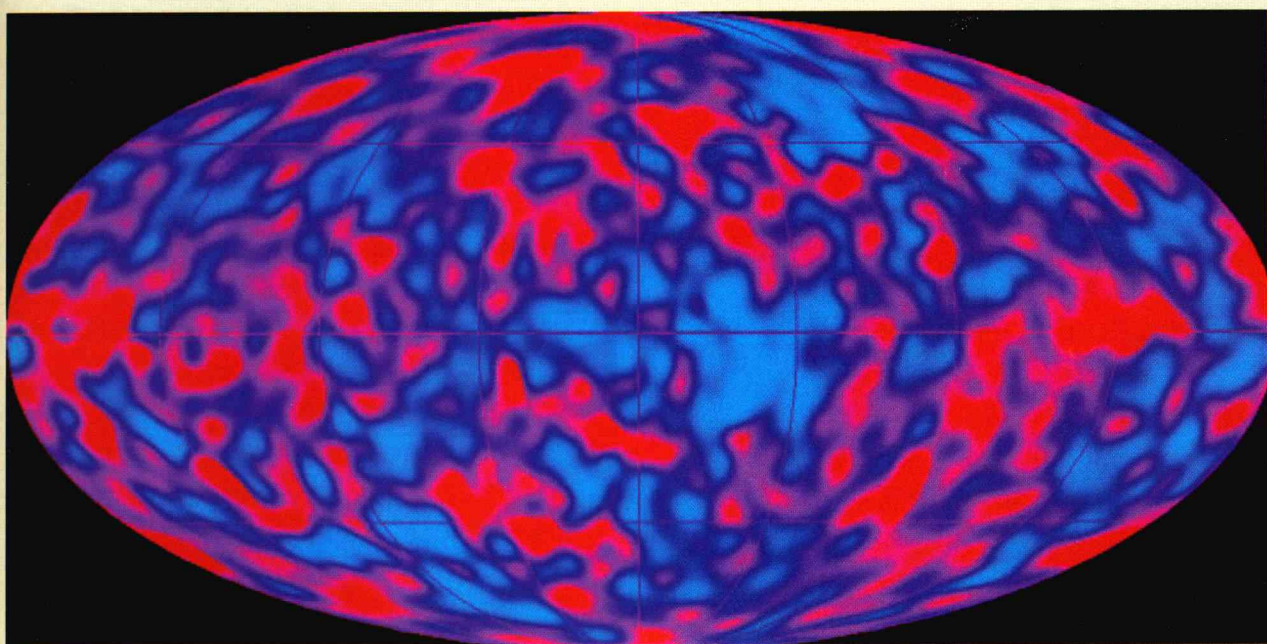
— 有名なガモフは、宇宙にある物質の研究からビッグバン理論に到達したそうですね。

佐藤●ガモフがビッグバン理論を研究したのは、ある意味では「われわれの宇宙はどうして鉄ばかりでないのか」を考えたからなのです。1922年に宇宙が膨張していると発表したフリードマンは、温度0度の宇宙を考えましたが、それはそのまま膨張したとすると、最初は宇宙全体に陽子や中性子がぎっしり詰まっている、まるで巨大な原子核のようなものでした。それをゆっくり離していくと、いちばん安定で結合力の強い鉄の原子核として、宇宙に分かれていくはずですが。ところが宇宙でいちばん多いのは水素の仲間で、重さで約73%、それからヘリウムが25%ぐらいです。後のわずか2%の中に、酸素や炭素、それ以外の元素があり、鉄は金属の中では一番多いのですが、全体から見ればほんのわずかです。

これは、全然核融合反応が進んでいないということなのです。みんな鉄になろうとするのを邪魔しなければなりません。それならば、陽子や中性子が結び付こうとしても温度が高くて結び付けない、火の玉ということになったのです。

— 鉄はどうやって誕生したのでしょうか。

佐藤●簡単にいうと、鉄は超新星の爆発で作られます。超新星爆発を起こすのは、生まれた時の重さが太陽の8倍より大きい星です。重いので順調に核融合反応が進み、真中に大きな鉄の塊、つまりアイアンコアができます。



宇宙背景放射探査衛星COBEと宇宙背景放射の温度のゆらぎ

NASAの打ち上げたCOBEのマイクロ波による観測によって、宇宙の晴れ上がり（宇宙誕生後30万年後）にゆらぎが存在することがわかった。写真の丸は全天を表す。現在の宇宙の平均温度は3 Kであり、赤い部分は平均より10万分の1 K高い部分、青い部分は平均より10万分の1 K低い部分を表す。

[写真提供：NASA]

これ以上核融合反応のできない、いわば燃えかすが鉄なのです。ですから鉄は、宇宙にエネルギーを与える役割を果たした後に、いま私たちの世界で金属材料として役立っているのです。この鉄のコアはその後、自重でつぶれていき、最後に中性子星やブラックホールになってしまいます。太陽の8倍以上、30倍以下ならばその星の中心には中性子星ができるだろうと考えられています。

このとき星全体が収縮していき、最後にはコアは原子核の密度と同じくらいの高密度になります。だいたい1cm³で10億トンの重さになるのです。そこまで圧縮されると圧力が高くなって跳ね返り、そのときにできる衝撃波で外側の層は吹き飛び、真中は中性子星になって残ります。しかしその外にあるシリコンの層に衝撃波が伝わり、シリコンが核融合反応を起こして鉄になります。これが爆発的な燃焼を起こし、宇宙空間に飛び出すのです。

—— 宇宙空間では、いたるところに鉄があると考えられますか。

佐藤●超新星がどんどん爆発すれば、確かに鉄の量は増えていきます。とくに銀河が生まれるときはあちらこちらで超新星爆発が起こりますので、そのときは一挙に鉄が増えたと思います。われわれの太陽系は、そのような、いわば汚染されたガスの中で生まれたのです。われわれがお星さまの子どもだというのは確かな話なのです。

—— もし私たちの宇宙とは違う宇宙があるならば、そこにも鉄がたくさん存在しているのでしょうか。

佐藤●宇宙の創生のシナリオを考えれば、私たちの宇宙とは別の宇宙が存在している可能性が確かにあります。私たちが信じている物理学の法則は普遍的であると思っていますので、その立場からいうと、別の宇宙でも同じようにシナリオが進んでいると思います。ただ生命が誕生しているかということについてはいろいろな考え方があり、私たち人間は、たくさんの幸運の積み重ねで現在のような知的生命体となったという考え方もあります。

—— どうもありがとうございました。

[写真提供：Atlas Photo Bank, 沼澤 茂美]