

1991 年春季年会公開講演

本年度春季年会は 5 月 14 日から 17 日にかけて東京大学本郷キャンパスで開かれたが、その初日の 14 日夕刻 6 時より、東京大学安田講堂において、本会主催の公開講演会が行なわれた。佐藤勝彦東京大学理学部教授が「宇宙はいかに生まれたか——現代科学の描く創世紀」と題してまた岡村定矩東京大学理学部教授が「宇宙の構造を探る——宇宙は永遠に膨張を続けるか」と題して、美しく改装なった安田講堂に集まった約 1000 名にも及ぶ聴衆を前に講演を行った。佐藤氏の講演は、アイスランドのサガに始まり最新の宇宙論を議論して中国の古典で締めくくるといふ、教養に溢れた格調の高いものであった。岡村氏の講演もまた、宇宙のスケールを日常的なスケールと比較する話から始まり聴衆をいつのまにか宇宙の構造を探るといふ核心に引きずり込んで現在の観測宇宙論を議論するという準備の行き届いた誠に見事なものであった。両氏の熱い講演を前に参加者からも多くの質問がなされ、講演会の予定時間であった 2 時間をかなりオーバーする大盛會であった。

宇宙はいかに生まれたか

——現代科学の描く創世紀——

佐藤 勝彦*

「われわれの住むこの世界はどの様に始まったのだろうか？」

この疑問は人類の歴史が始まったところから問い続けている問題です。われわれの祖先がいかに世の始まりを考えてきたかは、世界の国々いろんな創世神話として残されています。そのなかでも最も論理的に世界の始まりを語っているのはキリスト教の聖書でしょう。聖書の創世紀によれば、宇宙は「光あれ」という神の言葉から始まり、一週間で作られたことになっています。この始まりは偶然としか言えませんが、現在の科学的宇宙のモデル、ビッグバンモデルがまさに光の宇宙として始まったことと、一致しています。

しかし古代の素朴な宇宙論では創世とは、どうも何等かの混沌とした状態からの物質やその構造の形成であり、開びやく前から空間そのものは存在していたと考えているようです。科学的意味で宇宙の創生とは入れ物である時空と物質の 2 つの創生を論じなければならないのです。しかし時空を科学的に研究することが可能になったのは、ほんの 80 年前、アインシュタインによる一般相対論が完成してからのことです。一般相対論に基づいた、ビッグバン理論は現在の宇宙の観測とも一致し、標準理論と呼ばれています。この理論では、宇宙は時空の計量が発散した、また無限のエネルギー密度をもった数学的特異点から生まれたことになっています。宇宙の昔に遡るのぼっていけば、必ずこの特異点に至り、もはやそこから先には遡れないという時間の果てがはっきりと存在しているわけです。宇宙はまさに神の最初の一撃によ

って「光ありき」として始まったことになるのです。1980 年以前においては、私自身も含めて宇宙論の研究者も初期値というものは物理法則で決まるものではなく、自由意志をもった存在者が決定するもの、少なくとも物理学の対象外であると信じていたといつてよいでしょう。しかし 1970 年末から飛躍的進歩を遂げた素粒子的宇宙論は、ビッグバン宇宙の誕生、宇宙の初期値についても、科学の言葉で語る事が可能であることを示したのです。

インフレーション モデル

素粒子的宇宙論、宇宙創生論はまずインフレーション理論として始まったと言ってよいでしょう。宇宙という最も巨大な存在の起源が、逆に最もミクロな存在である素粒子の研究が基礎となるというのは何とも逆説的ですが、まずその理由の第一は、宇宙の創生期に遡るにつれ宇宙の温度が極めてたかくなり、全ての物質は素粒子にまで分解されてしまっていることでしょう。そのような初期を研究するためにはどうしても素粒子の理論無しには進むことはできません。現在自然界には重力、電磁気力、弱い力、強い力という基本的な“力”が存在していることが分かっています。物質間に働く 4 つの基本力の一つの統一的理論によって記述することは“アインシュタインの夢”とも言われる理論物理学の大問題ですが、これが大きく進歩し宇宙の初期に遡る研究を可能にしたのです。この理論によって、宇宙が生まれた時点では宇宙には 1 つの種類のみしかなかった、しかし宇宙が膨張し冷却する過程でちょうど生物の進化と同様に、力も枝別れを起こし種類が増えるというシナリオが描きださ

* 東大理 Katsuhiko Sato

れました。統一理論ではこの力の枝別れは、“真空の相転移”によっておこることになっています。相転移とは水が温度の上昇によって沸騰し水蒸気になったりする現象のことをさす言葉です。我々がカラッポの空間と考えている“真空”が同様な相転移をおこすというのは何とも考えにくいことではあるのですが、物理学者の描いている真空は決して何にも物が無いカラッポの状態ではないのです。現代の物理学を支える柱である量子論によるならば、全ての物理量は“揺らぎ”をもっており、その値は定まることはなく“不確定”であることがわかっています。真空も決して完全な“無”ではなくそこでは物質粒子と反物質粒子が生まれたり消えたりしている実体として考えなければなりません。そして極めて高温の宇宙初期では“真空”は大きなエネルギーを持つことになるのです。現在の宇宙ではこの様な真空のエネルギーは存在しないが宇宙の始めには、その様なものが存在していたことになります。それでは真空のエネルギーが存在すると言うことは宇宙の進化にどのような影響があるのでしょうか？ 佐藤¹⁾と A. グース²⁾は独立に、この真空のエネルギーによって宇宙はこれまでの普通のビッグバンモデルとは比べものにならない急激な速さ、つまり数学的には指数関数的に急激な膨張を示すことを示しました。この様に宇宙が指数関数的に膨張することは、グースの命名によってインフレーションと呼ばれています。宇宙はなぜ真空のエネルギーがあると急激な膨張をするのでしょうか？ 実は真空のエネルギーが宇宙に存在するという事実と、一般相対論の基礎方程式であるアインシュタイン方程式に“宇宙項”が存在する事と数学的に同値であることがすぐわかるのです。アインシュタインは 1915 年一般相対論を完成させましたが、彼は直ちに自分の作り上げたこの理論が宇宙全体に適用できることを悟り、宇宙のモデルを作ろうとしたのです。しかし当時まだ宇宙が膨張していることは発見されておらず、アインシュタインも当然の事として宇宙は膨張も収縮もしない永遠不変のものと信じていました。ところが困ったことに一般相対論に基づき静止したモデルを作っても、それはすぐに収縮に転じてしまい最後にはつぶれてしまうのです。アインシュタインの相対論は当然の事ですが、ニュートンの万有引力の拡張です。物質を静止させそれを宇宙においた場合、それが引力によって引合い最後には点に集まり潰れてしまうのは、一般相対論でも同じなのです。アインシュタインは万有引力に抗して宇宙が崩壊しないように空間に斥力を持たすように自分の方程式を変更することをきめました。つまりそのために新しく付け加えたのが宇宙項なのです。このことから明らかなように、宇宙項と数学的に同値である真空のエネルギーは、空間に対して“斥力”として働き、宇宙

を急激に膨張させる効果を持つことになるのです。宇宙は真空のエネルギーによってインフレーションを起こし殆ど瞬時に何十桁、何百桁と大きくなりますが、インフレーションはいつまでもつづくものではありません。相転移の終了と共に真空のエネルギーは潜熱として解放され普通の熱エネルギーとなります。これは水蒸気が水になるとき、また水が氷になるときに潜熱が解放されるのと同様です。宇宙はこの潜熱によって再び熱い火の玉となって膨張することになり、これ以後の宇宙の進化は従来のビッグバンモデルと基本的に同じものとなります。

インフレーションは、いったいどのような意味をもつのでしょうか？ 皆さんはインフレーションがなくても宇宙はゆっくりではあるけれど膨張しているのだから、結局大きな現在の宇宙になれるのだからなくても良いのではないかと考えるかも知れません。インフレーション理論の必要な理由はまずそれがそれまでの標準モデルであるビッグバンモデルでどうしても解決できなかった困難を解決できるという点です。まず原理的問題として知られていたのは地平線問題や平坦性問題と呼ばれるものです。地平線問題とは宇宙を満たして 3K 背景放射が本来因果関係のない領域からまったく同じ強さで一様にやってくることからくる問題です。3K 背景放射は宇宙がいびく 10 万年ころに宇宙が晴れ上がったころの宇宙の姿を示しているのですが、そのころには互いに連絡できない遠方の地点同志がまったく同じ温度でそろっていることは不思議なことです。平坦性問題は現在の宇宙がなぜこんなに宇宙の曲率が測定できないほど平坦に近い、もしくは本当に平坦なのかという問題です。実は標準モデルで宇宙を曲率が小さいままがいびくのころから現在まで平坦性を保ちながら膨張させることは一般相対論の式から見る限りきわめて難しいことなのです。宇宙は少しでも曲率があるとすぐひん曲ってしまう性質があるのでこの様な疑問が生じるわけです。これらの問題がインフレーション理論で解決されることは直にち理解できます。インフレーション前に、その内部で因果関係をもつことができ、十分一様になっている小さな領域があったとしましょう。この様な領域はインフレーションによって引き伸ばされ大きな様な領域となります。つまり現在の宇宙が一様であるのはこの様な領域が急激な膨張で何百桁も大きくなり現在観測的に知っている宇宙のハテよりも大きくなったからなのです。また現在の宇宙が極めて平坦にみえるのは、たとえ空間が有限の曲率を持っていても、急激な膨張が起こると曲率は急激にゼロに近づくのです。

インフレーション理論のもう一つの重要なセールスポイントは、宇宙の構造の種を仕込むことができることです。私自身が 10 年ほど前、指数関数的宇宙膨張の重要

な役割として最も強調したのはこの点で、銀河や銀河団、超銀河団などの大きなスケールの構造の種がこのモデルでは原理的に作れることでした。その後の観測で宇宙はさらに巨大な構造を持っていることが明らかになりました。巨大なボイド、グレートウォール、またそれが何層にもわたって存在している等が発見されていますが、これらの巨大な構造の種はおそ標準理論では地平線をはるかに越えた種を作ってやらねばならないことになり、とても原理的に不可能なことです。しかしインフレーション理論では相転移前に存在した揺らぎを、インフレーションで拡張してやることで容易にできることです。もっとも、銀河からグレートウォールまでの全ての構造を、インフレーション時に量子的揺らぎから推測されている単純なハリソン・ゼルドビッチ型の密度揺らぎだけで説明してしまうのは困難のようで、インフレーションモデル、揺らぎの成長理論の改良等が必要かもしれません。

インフレーションはこの様に我々の観測できる宇宙の領域が一樣で平坦である事を説明するが、宇宙の地平線を越えた領域まで一樣で平坦だと言っているのではけっしてありません。むしろインフレーション理論は地平線を越えた大きなスケールでは宇宙は非常に凸凹で在ることを予言していると言っても良いのです。第1の理由は宇宙で相転移が進む時、因果関係もない異なった場所で同じ様に相転移が進むとは考えられないからです。相転移が宇宙のいろんな場所で勝手に進む様子はちょうど沸騰しているお湯の中のようなものです。ぽこぽこ泡が発生し大きいスケールでは宇宙は凸凹となりその時空構造は極めて複雑になります。私たちは⁹⁾この相転移の進行を一般相対論に取り扱い、ワームホールやブラックホールが次から次へと生まれることを示しました。宇宙は地平線を越えた領域ではアインシュタイン・ローゼン・ブリッジと呼ばれる空間のくびれた領域で結合されたような複雑な構造を持つようになります。アインシュタイン・ローゼン・ブリッジによってたがいに結合されている領域は因果的にもはやり切り放されており、それぞれ別の宇宙とよぶことができます。さらにこのように相転移によって作られたミニ宇宙の中でも再度相転移が進行するので、ミニ宇宙から更にミニミニ宇宙が作られるのです。これらの子供、孫宇宙もインフレーションによって1人前のマクロな宇宙となることができるでしょう。つまり宇宙で起こる相転移によって宇宙は多量に作られるかも知れないのです。

“無”からの宇宙創生

このシナリオはしかし、完全な宇宙創生のシナリオとはなりえません。なぜなら私たちのシナリオではどうしても最初の宇宙、ここで母宇宙と呼んだものはじめか

ら存在しなければならぬからです。インフレーション理論の自然な発展はビレンケン⁴⁾やハートル・ホーキング⁵⁾などによって展開されている宇宙の創生論でしょう。ビレンケン⁴⁾は「“無”からの宇宙創生」という論文を発表し、母宇宙となるミニミニ時空が“何も無いところ”から生まれることができるのだと主張したのです。多くの科学者がこの論文のタイトルを見てまず考えたことは、彼の言う“無”とは一体何かと言うことです。一般相対論では宇宙とは時間と空間を合わせた時空多様体とそこに満たされている物質の事です。ビレンケンのいう“無”とは従って単に物質が存在しないという意味ではなくその入れ物である時空——時間空間——も存在しない状態なのです。ビレンケンはこの時間も空間も物質もない“無”の状態から量子重力効果により、極めて小さいが、しかし真空のエネルギーが高い状態になる、ミニミニ時空がトンネル効果により作られることを示したのです。創生された宇宙はそれ自体は、陽子や中性子と言った素粒子よりも桁違いに小さいもので何ら現実の宇宙と見なされるものではありません。しかし創生された宇宙は真空のエネルギーが高い状態にあるので、たとえその誕生直後は小さくても、ただちにインフレーションを起こし極めて短い時間のうちに巨大な宇宙へと進化して行くのです。宇宙はただ単に急激に膨張して大きくなったとしてもその中でのエネルギー密度が小さくなってしまえば、それはまったく物質のないカラッポの宇宙であり何ら現実の豊かな物質構造をもった宇宙とはなりません。しかし先ほど述べたようにインフレーションの終わるときに潜熱の解放によって宇宙は火の玉宇宙となりその中をエネルギーによって満ちあふれさせることができるのです。

この事からも明らかなようにインフレーション宇宙モデルの意味は、単に地平線問題などの困難を解決するというような消極的意味をもつだけでなく、実は宇宙創生の重要なステップなのです。つまり無から作られたミニミニ時空を①巨大なマクロな宇宙へと拡大し、それに②膨張の初速度を与え、且つ③その中にエネルギーを満たしてやるメカニズムだったのです。ホーキングはビレンケンの直感的考察とは異なり、宇宙の創生からインフレーション、膨張、そして収縮、消滅に至るすべてを量子論的に取り扱い、その進化を記述する宇宙の波動関数を求めることにより、宇宙の進化を量子論的に議論を展開しています。そして、量子論的に最も確立の高い宇宙の進化の経路は創生後直ちにインフレーションを起こすもので、ビレンケンのシナリオと一致しています。

現在、私たち宇宙論研究者が到達した現代の“創生紀”は以下のようなものです。1)“宇宙”は時間・空間・物質のまったくない“無”の状態から量子重力の効果

によって創生された。2) 創生された宇宙はプランクサイズ 10^{-34} cm 程度の閉じた宇宙であるが、それはインフレーションによってただちに何十桁、何百桁と引き延ばされ、マクロな宇宙となった。3) またその中での相転移の進み方が空間的に異なれば、子供、孫の宇宙がその中からも生まれる。それらもまたマクロな 1 人前の宇宙へと進化することができる。そしてそれらの中では銀河が生まれ、星が生まれ、また人類が誕生するというドラマが進行する。

ここで紹介した宇宙創生論には、基本的本質的なことならについても実はまだ多くの問題が残されています。インフレーションのモデルとして理論観測と完全に無矛盾なモデルはまだ見つかっていません⁶⁾。また創生論の基礎になっている量子重力理論はいまだ未完の理論であり、今後の発展をまたねばなりません⁷⁾。従ってこのシナリオが 10 年先、20 年先大きく塗りかえられまた大きな修正を受ける可能性は否定できません。

最近の観測的宇宙論の研究は、次の岡村先生の講演で紹介されるように爆発的進歩を遂げています。観測データは急激に増大し、ハッブル定数、宇宙の密度パラメータ、曲率に関するデータも豊富となり、インフレーションが予言するように宇宙は平坦であるというデータと共

に、それに矛盾するような結果も多く発表されています。洪水のように出される観測データは理論の証明となるものもあるでしょうが、多くはさらに謎を深めるものになるでしょう。しかし矛盾が生じることはむしろ歓迎すべきことかもしれません。なぜならその矛盾を解決することによって新たな深い理解に到達するというのが科学の進歩の姿なので、矛盾は新たな「宇宙の起源」理解への鍵とも言えるからです。この世紀末の混沌の中から新たな 21 世紀の発展の種が芽生えてくるにちがいない。

参 考 文 献

- 1) K. Sato, *Month. Not. Rpoj. Astron. Soc.* 195 (1981), 467, *Phys. Lett.* 99b (1981), 66.
- 2) A. Guth, *Phys. Lett.* D23 (1981), 347.
- 3) K. Sato, M. Sasaki, H. Kodama and K. Maeda, *Prog. Theor. Phys.* 65 (1981), 1443 and *Phys. Lett.* 108B (1982) 103.
- 4) A. Vilonkin, *Phys. Lett.* 117B (1982), 25, and *Phys. Rev.* D27 (1983), 2848.
- 5) J. B. Hartle and S. W. Hawking, *Phys. Rev.* D28 (1983), 296.
- 6) 前田恵一, 数理科学, 1991年7月号23頁.
- 7) 細谷暁夫, 数理科学, 1991年7月号13頁.

宇宙の構造を探る

—宇宙膨張は永遠に続くか—

岡 村 定 矩*

本日は最も広い意味での宇宙そのものの構造についてお話し致します。ある対象の構造を知ることとは、そのものの大きさ、重さ、年齢、姿かたち、成分などを知ることです。宇宙は過去のある瞬間にビッグバンによって誕生し、膨張を続けて今日に到っています。つまり我々は静的な宇宙ではなく、進化する宇宙に住んでいます。宇宙の構造を決める大枠、すなわち大きさと重さと年齢は、実は宇宙の膨張率とその変化に密接に関連しています。そしてそれがまた「宇宙膨張は永遠に続くか」という宇宙の命運とも結びついているのです。

宇宙は広大で暗い空間です。もし天体が何もなければ宇宙の膨張率など測ることはできません。しかし幸いなことに宇宙には多数の銀河があります。我々の太陽も、銀河系と呼ばれる一つの銀河の片隅にあります。太陽系の一つの惑星である地球から大望遠鏡の目を凝らして見ると、銀河系の星々の間隙から、深宇宙に点々と浮ぶ銀河が見えてきます。これらの銀河が宇宙の構造を探

るほぼ唯一の貴重な探針です。

宇宙の構造を記述する今日の標準的なモデルはビッグバン宇宙論です。この理論には、万物の入れ物としての膨張宇宙の記述と、その入れ物内での物質の創造と進化の記述という二つの側面があります。本日は前者についてお話しします。入れ物としての膨張宇宙は、一般相対論に基づくフリードマンモデルで記述されます。このモデルの大前提は、「宇宙は大きなスケールで見ると一様等方的である」という「宇宙原理」です。このモデルに関する重要なパラメータは、宇宙の膨張率を表わすハッブル定数 (H_0)、その変化率である減速パラメータ (q_0)、宇宙にある物質総量に対応する密度パラメータ (Ω_0)、空間の曲率 (k)、および宇宙の年齢 (T_0) の五つです。しかしこれらは相互に関連しているため独立なものは二つしかありません。通常 H_0 と q_0 をとります。この二つの量を決めれば宇宙の構造と命運が決まります。 H_0 は主に宇宙の大きさと年齢を決め、 q_0 は主に宇宙の重さと命運を決めます。 $q_0 < 0.5$ だと宇宙膨張は永遠に続

* 東大理学部 Sadakuni Okamura