

## 宇宙の誕生と進化

－現代物理学の描く創世紀－

東京大学大学院理学系研究科教授  
ビッグバン宇宙国際研究センター長

佐藤 勝彦



私の今日のタイトルは「宇宙の誕生と進化」  
「現代物理学の描く創世紀」という副題をつけています。私たちの住んでいる宇宙がどのように始まったのか。その話をさせていただきます。ただ、いきなりこの話をしてもわかりませんので、いくらかやさしい導入を触れさせていただきますと思います。そのあとに私も関係したインフレーション理論という誕生のパラダイムとなっている理論について簡単に話をさせていただきますと思います。

私は理論屋ですが、田村先生のように望遠鏡を使っておりません。純粋に理論の人間です。しかしこういうものが正しいかどうかは、基本的には田村先生のような観測的な証拠が必要です。現在宇宙の創世にかかわるようなものについてすら、創世の観測があります。その観測を紹介したいと思います。このような観測が進みますと、理論家がいろいろ提案した理論が嘘か本当か、チェックができます。しかし理論が考えなかったような新たな謎も、観測によって生まれてきます。いま一つ大きな謎が生じています。これを紹介したいと思います。それからこの謎を解く一つの考え方としてマルチバースとか人間原理とか、こういうことを紹介させていただきます。まだちょっと意味がわからない方もおられるかと思えます。

それでは最初に簡単な導入をさせていただきます。皆さんはBC4004年10月22日土曜日、午後6時という時間はどのような時間かご存じでしょうか。この中にキリスト教の信者の方がおられるとご存じなのかわかりません。

これはアイルランドのアッシャー司教が求めた宇宙創世の時間、この世界が始まった時間です。アッシャー司教はチャールズ1世の牧師でもありましたが、彼は一生をかけて旧約聖書に記載されているような出来事を、また新約聖書の内容を加味してこの年齢を求めました。

いったいどのようなことからこの推定をしたのかというと、旧約聖書にこのようにあります。アダムが130歳になったとき、男の子セトをもうけた。セトは800年生きて息子や娘をもうけた、という具合に旧約聖書に書かれています。この方は非常に真面目にこれを一生かけて計算をし、10月22日、しかも午後6時というのが出ていますが、これを求めました。この話はわれわれ宇宙論の研究者ではよく知られていることですが、ここにあります松浦さんが翻訳した本に詳しく書いています。興味のある方はご覧になるといいかと思えます。

ここで紹介する宇宙論の話はもちろん神話の話をする場ではありません。皆さんには科学的な宇宙論、宇宙の始まりがどうなっているかをお話したいと思います。科学的に宇宙の始まりを知るためにはきちんとした理論物理学が必要です。いまから100年以前では、この物理学の理論といえばニュートン力学でした。皆さんも高等学校や大学でも勉強されたかと思えます。しかしこのニュートン力学では時間や空間がこのように定義されています。これはニュートンの『プリンキピア』から翻訳を持ってきたものです。宇宙の始まり

を議論するのだから、時間の物理がなくしては何も語ることはできません。

しかしニュートンの『プリンキピア』にはこう書いてあります。「その本質において外界とは何ら関係するのか、一様に流れ、これを持続と呼ぶことができるもの」。わかったような書き方ですが、その次に、「その本質において、外界とは何ら関係することなく、常に均質であり、ゆらがないもの」、つまり時間や空間が物質の入れ物ではあるけれど、その物質を時間や空間の中に入れたとしても、時間や空間は決して変化しない。こういうのがニュートンの力学体系の中の時間や空間という概念です。

そういう意味では時間や空間は先見的なものである。先見的なものであるということは、質問してはだめだということです。そのように残念ながらむしろ物理学の対象ではないのです。物理学はただ単に時間や空間の中にあるものがどう動くか、どう変化するか。これがニュートン力学における物理学です。しかし残念ながらこれでは宇宙の始まりとか、空間が小さかった、大きかったとか、そんなことはもちろん議論はできません。

ここに一つ式を書かせていただきました。これは私の講演の中で唯一の式です。式を細かく説明するつもりはございません。これはアインシュタインの重力場の方程式、もしくはアインシュタインの方程式というものです。これによってわれわれは初めて時間や空間を物理学の対象として議論できるようになりました。これは一般相対論という相対性理論の二つ目のものです。特殊相対性理論のそれをより一般的に、普遍的にしたものです。これは時間や空間の物理学ということが言えます。どういうことか。この方程式の意味を考えればわかります。

方程式というのはこちらに書いてある左辺の何とかは右の式に等しい、同じだということを行っています。同じだとは何が同じなのか。左側に書いてあるのは何か。 $R_{\mu\nu}$ 何々と書いています。これは時間や空間の幾何学

を表わす量です。つまり空間の幾何学は皆さんがご存じのように、たとえば三角形の内角の和は180度、円周は $2\pi$ だ。それは幾何学です。いくらちよっと違うのは、時間も一緒にした幾何学という点がちよっと違います。拡張されています。つまり時間の進み方があるところでは速い、あるところでは遅い。これも時間の幾何学の一つです。そういうものを含めての幾何学を書いています。

それが何に等しいのか。右辺はいったい何を書いているのか。ここに $T_{\mu\nu}$ とありますが、これは物質やエネルギーが存在しているかないかを表わす量です。つまり物質があることによって時間や空間の幾何学が決まるという方程式です。皆さんがホールに入っていますが、入っておられるときと、入られたあとでは、このホールの中の物質やエネルギーの量が変わっています。ということはこれを使って計算すると、この朝日ホールの中の時間や空間の幾何学がわかる。こういう方程式になっています。これはまさに物質やエネルギーが存在することによって時間が変化する、空間が変化するという方程式です。ニュートン力学では時間や空間については何ら語ることはできませんでした。アインシュタインのこの方程式によって初めて時間や空間を物質と一体にして議論できるようになりました。

私は現在日本物理学会の会長を務めています。うれしいことに今年是世界物理年と、国連が提議してくれました。これはアインシュタインの奇跡の年から100年目に当たるということでこのように決めていただきました。つまり1905年、アインシュタインは三つの論文を書きました。ブラウン運動、光電効果、特殊相対論を発表した年です。これを一般的な理論に発展させたのが先ほどの一般相対論です。光電効果でアインシュタインはノーベル賞を受賞しています。

アインシュタインはこの方程式を見つけたときに、自分の方程式が宇宙の創世とか宇宙の進化を解くことができるのではないかと直

ちに考えました。彼が宇宙について語った言葉をちょっと引用しました。

私は神がどのような原理に基づいてこの世界を創造したのか知りたい。そのほかのことは小さいことだ。私の最も興味を持っていることは、神が宇宙を創造したとき、選択の余地があったかどうかである。

2番目の問題は結構微妙なことを言っています。神様が本当に宇宙を創造したならば、神様は自分の自由な意思をもって宇宙の始まりのものを決めることができたのだろうかという疑問でしょう。全能の神様に対してこのような質問をしていいのか。大変微妙な質問です。大変うれしいことに、20世紀から21世紀の始まりにかけて、これらの疑問に対して科学の言葉で答えることができる時代になってきたということを、私はお話したいと思います。

まず宇宙という言葉をもう一度復習しておきたいと思います。田村先生のお話しされた宇宙は太陽系、それから系外惑星です。太陽を中心としてこのように惑星が並んでいます。これをもっと広い世界で見ることになります。これは私たちの住んでいる天の川の銀河です。太陽と同じような星がだいたい2,000億個集まっています。もちろんこの中には田村先生がお話しされたような惑星系がたくさん存在します。その中にも何らかの生命体が必ず存在するのではないかと、私は思っています。

この大きさは10万光年、光で10万年かかるぐらいの大きさです。もっと大きなスケールで見ましょう。ここに私たちの銀河を書いています。天の川銀河です。われわれが住んでいます。これから230万光年離れたところにアンドロメダ銀河があります。われらの銀河よりは少し大きい銀河ですが、だいたいよく似た銀河です。これらの銀河はその周りに子どもを引き連れています。われわ

れ天の川銀河は小マゼラン雲、大マゼラン雲という子どもの銀河を周りに抱えています。この距離は230万光年です。これは10万光年ぐらいですから、10円玉のコインをだいたい20cm間隔で並べたように、宇宙の中には銀河が存在します。

実は銀河がどのような構造で群れをなしているのかを調べる研究がいま盛んに進んでいます。これは昨年のデータですが、太陽系はここにあると思ってください。ある方向を見ます。それから反対の方向を見ます。これは観測のデータがあるところだけを書いています。ここに書いてある一つひとつの点が2,000億個の集まりである銀河です。ここに書いてあるのはものすごい数の銀河です。宇宙の中で銀河というのが一様に分布しているのか。そうではありません。明らかに塊をなしています。銀河がこのように群れをなした構造をグレートウォール、中国の万里の長城にたとえて、銀河の壁があるようなものと呼

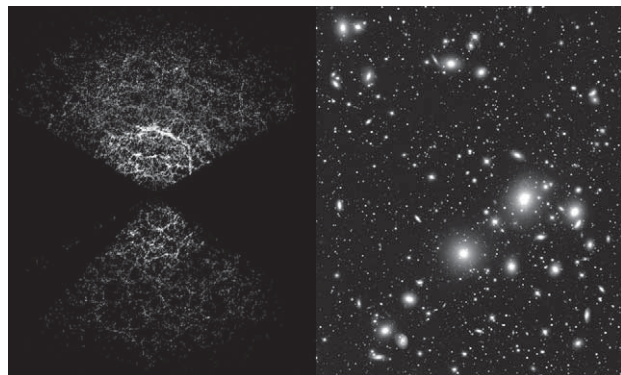


図1 スローンデジタルサーベイによる宇宙の地図  
一つ一つの点が我々の銀河系と同じ銀河を表す。銀河は群れをなして、蜂の巣のセルのように分布している。扇の要に我々はいる。  
(©スローンデジタルサーベイ)

んでいます。ここに書いてあるのは40億光年ぐらいの大きさ、光で40億年かかるぐらいの世界を書いています。

さて、私たちの宇宙はそういう意味で大きなスケールで見れば銀河の宇宙です。この銀河がいまの絵は40億光年程度でしたが、500億光年とか、そのような大きさまであることをわれわれは知っています。しかし宇宙は無

限に大きいのか、有限なのか。それはわかりません。とにかくいま見えている範囲では100億年を超えて宇宙があることはわかっています。

この銀河の宇宙は驚いたことに広がっているということを、エドウィン・ハッブルという人が1929年に発見しました。これは風船を描いてありますが、風船の上にAとかBとかCとか、1円玉のコインを貼り付けてあると思ってください。そして風船を膨らますと、1円玉の間の距離は広がってきます。ちょうどこれと同じようなことが、銀河と銀河の間で起こっていることをハッブル先生は発見しました。つまり銀河と銀河の互いの距離はだんだん広がっていていることを見つめました。つまり私たちの宇宙は広がっている。

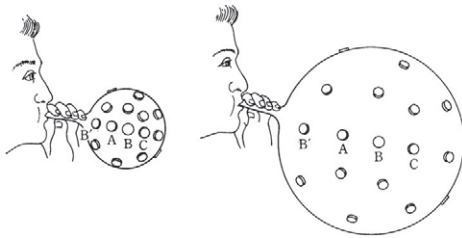


図2 宇宙の膨張を風船に例えた図  
風船の上のコインが銀河をあらわす。

この発見は私たちの世界観を大きく左右するような偉大な発見だと思います。われわれの住んでいる大きな宇宙は決して永遠不変のものではない。風船がいま広がっているのだったら、過去に戻るならば、この風船は大きさがゼロになるかもわからない。つまりこの宇宙には始まりがあるのではないか。このようなことをハッブルさんは発見しました。

しかしどのくらいの速さで宇宙は膨張しているのか。これはなかなか難しい観測です。ハッブルさんが膨張しているのを見つけたのですが、その値を決めることができたのは1998年、わずか8年ぐらい前と聞いていいでしょう。ハッブル望遠鏡が大きな活躍をして決めました。ハッブル望遠鏡は1990年に打ち上げられましたが、最初はピンボケの望

遠鏡でした。残念ながら宇宙の年齢を決めるような、宇宙の膨張の速さを決めるようなことはできませんでした。しかし1993年にエンデバー号によって修理が行われ、0.1秒角という非常にシャープな星が写るようになり、観測ができるようになりました。

この宇宙の年齢を決めるプロジェクトのヘッドはウェンディ・フリードマンという女性です。天文学者では女性の方が非常に活躍しておられます。彼女が決めた宇宙の年齢はおよそ140億年、±10億年ぐらいの誤差があるということを発表しました。彼女はしばしば日本にもきてくられて、大きな講演会もやったことがあります。大変女性的な方です。こういう偉い女性は何となく一般に怖い人のような印象がありますが、そういう印象はおよそない方で、ご主人も天文学者ですが、2人の子育てをしながら天文学をやっている。それでいながらアメリカで何千億円というお金をかけたようなプロジェクトのリーダーを務めています。すばらしい、男女共同参画のいい例だと思います。

このように宇宙が膨張していることがわかった。そうするとこれは一般相対論の研究からも予言ができることがわかっています。その相対性理論を使って宇宙の膨張を計算します。それから宇宙が始まる瞬間まで計算をすることができます。しかしちょっと困ったことがあります。宇宙の始まりの瞬間、時間ゼロです。その時間のときには残念ながら一般相対論も破綻します。なぜならば、その点が特異点であるからです。

特異点とはいろいろな数値が無限に発散するという意味ですが、中でも特に時間や空間の曲がり方を記述しているものが発散している点は、ほかにはブラックホールとか、そういうものです。時間や空間の果てのようなものです。そこから何かの情報が出てきたり、入ってきたりするような点です。われわれの世界に本来は何ら関係のなかったところから情報がやってくるような点にあります。このような特異点があることは、ある意味では神

様の一撃というか、物理学を超えた何かの情報が入ってくる点があるわけですから、われわれ物理学者としては何か特異点がないような格好で宇宙の始まりが議論できないのかということ、長く研究していました。

宇宙論にはいろいろほかにも問題があります。私たちの住んでいる宇宙はどうしてこんなにユークリッド幾何学が成り立つような、きれいに平坦なものか。皆さんにとってみれば空間が平坦であるのは当たり前ではないかと思うかもしれませんが、相対論を勉強すると、空間は実に簡単にひん曲がる。なぜ曲率がゼロの平坦なのか。これも宇宙論の大きな謎です。

2番目に一樣なのか、と書いてあります。宇宙はだいたい一樣です。近くでは決して一樣ではありませんが、大きなスケールで見れば銀河が塊になったりはしていますが、全体としては何百億光年とか何十億光年というスケールで見れば一樣です。どうして一樣なのか。こういうのも大きな謎です。

もっと天文学的にも根本的な疑問があります。大爆発で宇宙が始まったというのはいいけれど、この宇宙の中でどうして銀河や銀河の塊ができたのか。もちろん銀河とは星の集まりです。どうして星ができたのか。田村先生が話されたような惑星系がどうしてできるのか。何らかの理由が、最初に種が仕込んであったのだろうか。どうしたらそんな種が仕込めるのだろうか。開闢の瞬間に何らかの原因があるかもわかりません。現在このような疑問に対して答える一つの理論として、インフレーション理論が提案されています。だいたいのスケッチをお話ししたいと思います。

その前に、このように宇宙の始まりを研究している研究者はケンブリッジ大学のホーキング先生です。彼はALSという怖い病気になっていますので、現在声を出すことはできません。ですからコンピュータを使って車椅子の後ろについている音声合成装置で人と会話をしています。ホーキング先生、また私、その他の宇宙物理学者がどのようなことで宇

宙の始まりを考えているのでしょうか。これは驚くべきことですが、素粒子の理論を使って宇宙の始まりを議論しています。ここに人間を中心にしてだんだん大きなマクロの世界、また逆にミクロの世界を描いてあります。

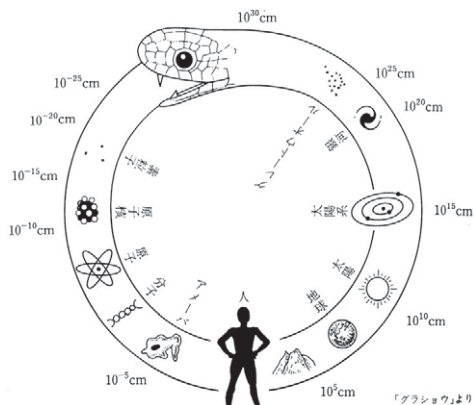


図3 ウロボロスの図  
宇宙というマクロの極限の起源を論ずるためにはミクロの極限である素粒子の理論が必要である。

マクロの一番大きなところに、現在観測的に知られている宇宙の大きさを書いてあります。だいたい100億光年です。これが蛇の頭です。一方、蛇の尻尾の部分はどんどん小さいスケールになってきます。現在素粒子の理論で考えられている一番小さなスケールは、ここには書いてありませんが、 $10^{-33}$ cmというスケールです。これはプランク長さと呼ばれるスケールです。ここに描いた絵はグラショウという方が描いたものですが、私たちは大きな世界、小さな世界についてだいたい30桁の範囲でこの世界がどうなっているかを知っています。

さらにこれを蛇のように描いたのは何かというと、大きな蛇の頭を説明するためにはミクロな物理や素粒子の法則が本質的に大きな役割を果たしていることを表わすために描いた絵です。蛇が自分の尻尾を噛んでいる絵です。これはヨーロッパでよく見られる絵で、ウロボロスの図といわれています。要するに素粒子の法則を使って、ミクロの世界の法則

を使って世界の始まりを議論できるということを示しました。

それではインフレーション理論とはいったい何か。きわめて簡単に紹介させていただこうと思います。下から上に向かって時間が進んでいると思ってください。ここに漏斗のような絵が描いてあります。この輪っかの大きさが宇宙の大きさを表わしていると思ってください。そしてこれが現在と思ってください。それからこれが宇宙の始まりの瞬間だと思ってください。ここに無からの創世と書いてあります。何もないところから宇宙は生まれてくるのか。皆さんは当然疑問に思われると思います。残念ながら詳しく話すことはできませんが、量子論というミクロの世界を支配している物理学の法則では、不確定性原理という原理であらゆるものがゆらいでいる。何もないと言っても、実は何もないということも空間的、時間的にゆらいでいることになっています。何もないと言っているのに何かある。そしてまた生まれたり消えたりしている。それが無の状態です。この状態から私たちの宇宙はトンネル効果という効果でポッと生まれてきます。

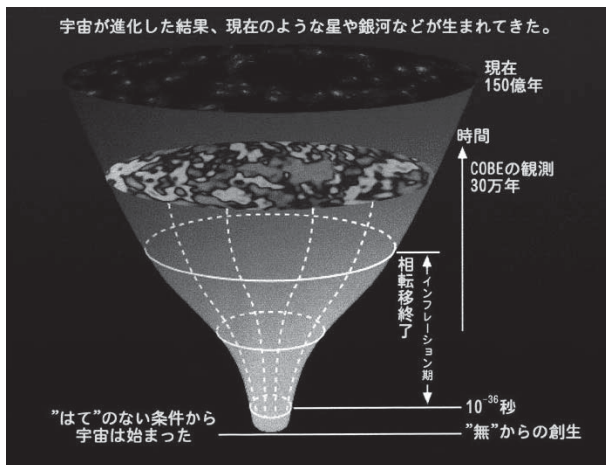


図4 宇宙の進化とインフレーション

創世間もない宇宙は、あとでお話ししますが、宇宙の中には真空のエネルギーというちょっと理解しがたいようなエネルギーが満ち

溢れていることになっています。このエネルギーによって宇宙はインフレーションと呼ばれる急激な宇宙膨張を起こします。数学の言葉では指数関数によって宇宙は大きくなるということになっています。この指数関数はすごい膨張です。このインフレーションが起こるときは $10^{-33}$ 秒という、きわめて小さな時間に宇宙の大きさが2倍になります。また同じだけの時間がたつと2倍になります。倍々ゲームで急激に宇宙は大きくなります。

そしてこの倍々ゲームはいつか破綻します。ねずみ講などは必ずいつか破綻します。それと同じようにインフレーションは必ず終わります。終わるときに、先ほどちょっと申し上げたわけのわからない真空のエネルギーが熱のエネルギーに変わります。これによって宇宙は熱い火の玉宇宙となります。現在の宇宙にその名残が見つかっています。

さらに大事なことは、このインフレーションの時代にわずかでありますが、この空間に凸凹ができます。量子論という難しい言葉を用いましたが、量子論は空間とか時間がゆらいでいる。決まらずにぶらぶらしていると言いましたが、その量子論的なゆらぎが引き延ばされ、現在の銀河や銀河団となる種が仕込まれます。インフレーションが終わったあと、次第にこの凸凹は成長していき、銀河や銀河団、それから現在の豊かな宇宙の構造ができたと思っています。豊かな構造と書いたことは、田村先生がお話しになったような太陽系のようなものができるとか、太陽系の中、第3惑星の地球で生命とかいろいろなものが誕生しています。このように宇宙の中で豊かな構造ができてきますが、そのすべての構造の原因は、この理論ではインフレーションのときの量子論的なゆらぎがすべての種である

という理論です。

インフレーション理論は正統的な、いまお話ししたような以外にも、ちょっと奇妙なこ

とも予言します。それはもともと宇宙があったならば、インフレーションを起こしている途中で子どもの宇宙とか、孫の宇宙とか、ひ孫の宇宙をたくさんつくりことができることを、20年ぐらい前に私も論文に書いたことがあります。現在無限の宇宙という考え方をマルチバースという言葉で言われています。ユニというのは一つですが、ユニではなくてマルチなのだということで、マルチバースと言われています。また後ほど関係しますので、そのときに話したいと思います。このように宇宙があったとしたなら、子どもの宇宙が生まれ、そこから孫の宇宙が生まれるという感じの事です。

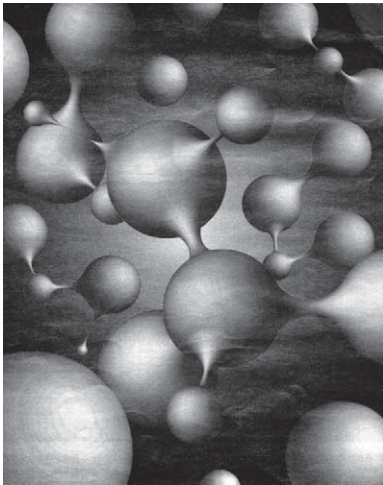


図5 宇宙の多重発生

さて、それでは次に、インフレーション理論は時間でいえば宇宙の $10^{-30}$ 秒とか、われわれの時計で計れるような時間でないところで起こったことなのだから、それを確かめるのは不可能ではないかと、皆さんは思われると思います。私も実はこのような理論を考えた二十何年前にはそう思っていました。しかしこのインフレーション理論を観測によって確かめることができるという観測がされるようになりました。私たちの宇宙は開闢から140億年もたっているというわけです。どうしてそんなことができるのか。140億年前の写真

が撮れるのか。皆さんは当然思われると思います。答はイエスです。いったいなぜなのか。

それは大変うれしいことですが、宇宙では遠くを観測すれば過去が見えます。私たち地球からの距離が書いてあります。地球から230万光年離れたところにアンドロメダ銀河があると仰いました。230万光年ということは、アンドロメダからやってくる光は230万年かかるのですから、今晚皆さんがご覧になっても、このアンドロメダ銀河は230万年前のアンドロメダ銀河です。4億光年のところにグレートウォールという銀河の密集した集団があります。これは4億光年ですから、4億年前の姿です。いまはひょっとしたらないかもわからない。それが見える。これをどんどん端まで行ければ、原理的にはビッグバンの瞬間だって、インフレーションの瞬間だって見えます。

ただ、残念なことにわれわれは光、つまり電磁波を使って宇宙を観測しています。それで見えるのは、宇宙開闢から30万年以後です。それ以前はプラズマ状態で光が真っ直ぐ進まない。ちょうど飛行機が雲の中に入ったような状況にあります。周りは温度が高くて光っていますが、一寸先も見えません。しかし宇宙が始まって30万年たちますと、晴れ上がりということが起こります。つまり光がまっすぐ進むようになります。この時刻以後、われわれは写真を撮ることができます。ですから宇宙の一番昔を電波や光で観測するならば、この瞬間が見えます。宇宙が始まって30万年頃の宇宙が見えます。われわれは120億年たった現在という時期にしながら、宇宙開闢の瞬間も原理的には見ることができます。

実は光は見えないと言いましたが、重力の波だとか、そういうものを使うと見えます。いまから13年前、1992年にアメリカのCOBE衛星が、宇宙が始まって30万年しかたっていない頃の地図をつくりました。この人工衛星でやったわけです。これはCOBE衛星が観測した、宇宙が始まって30万年頃の宇宙の姿です。これは全天球を絵に描いた。空全体を卵

型に押し込めて絵に描いたものです。皆さんが地球を書くときに、ここに日本列島を描いて、ここにアメリカを描きます。地球とは真ん丸いものです。それを平面に書くことは難しいので、こういうふうに書きます。天球、空も同じように描くことはできます。

何が覚えてきたのか。実はわずかですが、宇宙の密度が高かったところ、低いところ、そういう凸凹が見えてきた。実際これは電波の強度ですが、宇宙の密度の凸凹に対応するものです。この凸凹を数学的に解析すると、インフレーションの予言する量子論的なゆらぎとピタッと一致したことがわかりました。COBEを観測した人が言っていることですが、これとインフレーションの予言ときわめてみごとに一致した。そういう意味でこのインフレーションの理論は観測的にも大きな支持を得ています。

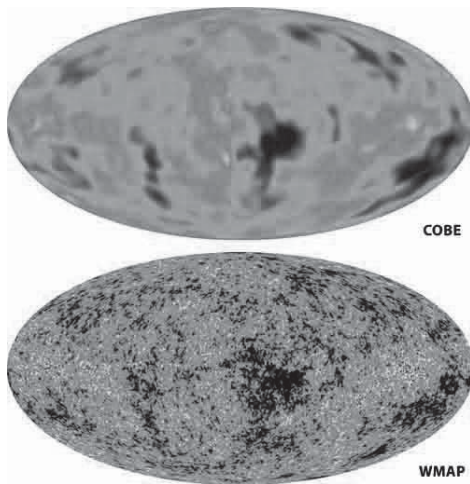


図6 COBE、WMAP衛星の描いた宇宙開闢から30万年-40万年のころの姿  
色の違いは電波の強弱を示す。このころの宇宙の凸凹の様子はインフレーション理論の予言するものと、見事な一致を示した。(©NASA)

いまの話は1992年のことでした。2003年2月、2年前にアメリカはWMAP衛星をもう一度打ち上げました。この衛星は月の軌道よりもさらに遠方に打ち上げました。30倍細かく観測ができる人工衛星です。そしてもう

一度宇宙が始まって30万年頃の地図を描きました。38万年と言っていますが、同じようなものです。上の絵がCOBE衛星の13年前のもの、これが2年前のWMAP衛星の写真です。よく似ていることがわかります。だいたいは同じです。ただ、30倍細かく写真が撮れています。30倍細かく撮れていることからこのデータをさらに詳しく解析することができ、この解析からも宇宙の年齢が $137 \pm 2$ 億年と決まったわけです。先ほどのCOBE衛星ではこれはできませんでしたが、WMAP衛星で宇宙の年齢まで決まりました。

先ほどのハッブル望遠鏡が140億年ぐらいだと言ったわけですが、これはみごとに一致しています。2億年が誤差と書いてありますが、実際5億年とか10億年ぐらい誤差があっても不思議ではありません。そういう意味できわめて理論どおりの観測結果になりました。そうするとあとはコンピュータシミュレーションを使い、銀河や星ができる。現在の宇宙を再現できるのでないか。そのような研究がたくさんなされました。

たとえばCOBE衛星の凸凹があります。宇宙が凸凹にあるような状態をコンピュータに入れ、それが重力でどう固まっていくのか、コンピュータシミュレーションで調べることができます。そうすると細かな一つひとつの星まではできませんが、銀河や銀河団の計算のシミュレーションができてきました。それを先ほどお見せした観測と比較します。これは観測ですが、現在日本のグループとか、アメリカのグループで同時に進めているスローン・デジタル・スカイ・サーベイ、宇宙の地図づくりのプロジェクトです。私たちのビッグバンセンターもこのプロジェクトの一員です。このような宇宙の中でのグレートウォールとかハチの巣の構造のような構造は、コンピュータシミュレーションでもみごとに再現できています。シミュレーションも現在の観測にみごとに一致しています。もうこうなると理論万々歳というのが現状です。

先ほど申しましたように、この凸凹は宇宙



の初期に量子ゆらぎであったものです。そのときはきわめて小さなゆらぎにしか過ぎませんでした。しかし長い宇宙の137億年の歴史の中で、これを拡大して見せました。これは量子ゆらぎを100桁のスケールで拡大したものです。インフレーションの急激な膨張とか宇宙の膨張は、宇宙の初期を観測する顕微鏡のようなものです。そういう意味で理論は大成功したわけです。

それでは宇宙論でそういう研究はもう終わったのか。当然思います。すべて観測が理論を裏付けたことになる、当然だと思います。しかし終わったというのは、学者にとっては怖いことです。自分が失業するという意味です。することがなくなってしまうのだから、失業してしまいます。そこでオックスフォード大学のジョージ・シルク先生は宇宙論の大家ですが、彼は大変うまい表現をしています。1943年、第2次世界大戦が終わりかけ、勝つことを確信したチャーチルは演説をしましたが、そのときに演説した言葉をうまく利用し、彼はこう言っています。

宇宙論は決して終わったのではない。もちろん終わり始めたのではない。しかし宇宙論の研究の始まりの段階は終わり、これから本格的宇宙論の時代となるのだ。こういうことを申しています。この宇宙論とは第2次世界大戦のことであったわけです。そういうような言葉を行っています。実際大筋は正しいことがわかったけれど、それを肉付けるような研究はこれからだと思います。

それでは本当に終わり始めたのか。何でもかんでもわかったのか。私たちは真理の探究ということでどんどん知の世界を広げていっています。しかし知の世界が丸い風船のようなものだとすると、その中身はたしかに知の世界で、どんどん球が広がってくると膨れてきます。しかし考えてみると知のフロンティアが広がっていくことは、同時にわからないことも見つかることです。科学が進歩するとわからない謎はなくなるというのは、私は嘘だと思います。常に新たな謎が生まれ

てきます。われわれは謎があることすら知らなかった。わからないということすら知らなかった。そういうことを新たにわかってきた。そういうのも大事なフロンティアです。

宇宙の場合にはどんなことが言えるかという、驚いたことに、この宇宙を構成している物質のうちのほとんどは正体不明のものだということになってきてしまった。私の体や星をつくっているような物質はたった4%です。あとは暗黒物質というのが23%、さらにわけのわからない暗黒エネルギーが73%もあることがわかってきています。暗黒物質、ダークエネルギーと何か。暗黒物質の候補の探査は実験的にも進んでいます。暗黒物質はだいたい銀河とか、その周りにまとわりついているものですが、光らないので正体がわからない物質です。

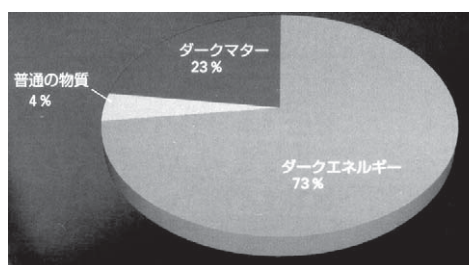


図7 宇宙の物質エネルギーの割合  
普通物質はわずか4%。

一番よく思いつきやすいのがニュートリノという素粒子です。皆さんも小柴先生のノーベル賞でご存じと思いますが、ほとんどいろいろな物質とぶつからない粒子です。このニュートリノが宇宙全体に広まっていると、ひょっとしたらこの暗黒物質を説明できるかもわからない。特に重さを持っていればです。このような研究はスーパーカミオカンデで行われました。これも1990年代の終わりですが、ニュートリノに重さがあることは確認できましたが、残念ながら2桁ぐらい軽かったです。少なくとも1桁以上重くなければ、暗黒物質を説明することはできません。ニュートリノは重さが足りません。

その他、アクシオンとかニュートラリーノ

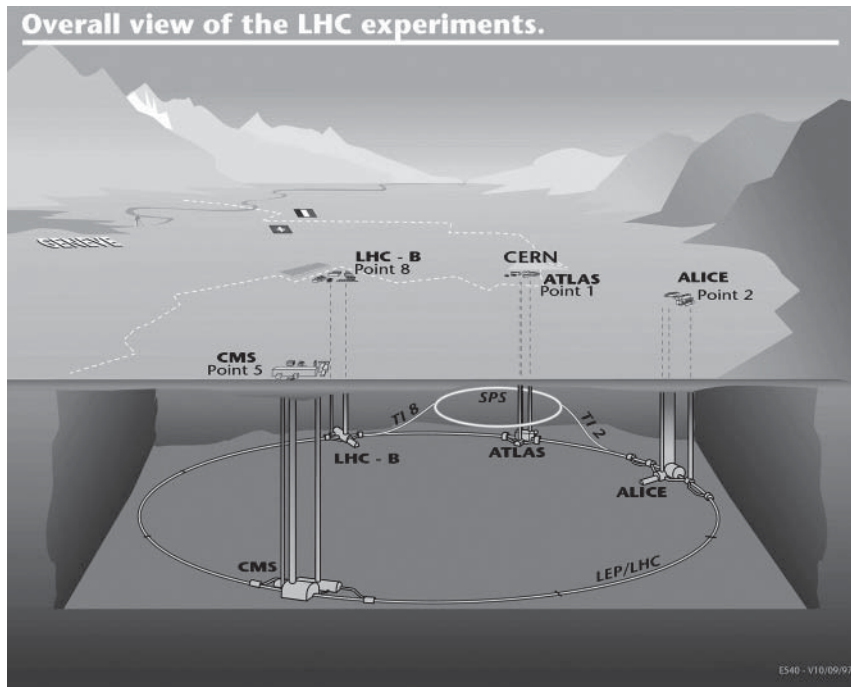


図8 ジュネーブ郊外に建設中の加速器、LHC（大型ハドロンコライダー）  
 (©CERN)

がいろいろ探査されています。これはジュネーブ郊外にある大きな加速器、大型・ハドロン・コライダーで観測できるのではないかと、現在建設が進んでいます。2007年とか2008年にこの機械は動き出すことになっています。

なお、暗黒物質といういろいろなあやしい話も考えることができます。実はわれわれの宇宙と並行してもう一つの宇宙がある。あの世界があるんだという考えです。たとえば重力を感じて天体が回っていると思いませんか。ここに何も無いのに引きつけられている。だからきっと何かあるのではないかと。このようにして私たちは暗黒物質があると思っていますが、それは実はあの世界にある。別の天体が重力を応援しているのではないかと。残念ながら私たちはあの世界にはいけません。ただ、この世界とあの世界を連絡しているのは万有引力の法則だけです。ですからこんなことがわかる。もちろん本当かどうかわからない話です。

さて、次に暗黒エネルギーの問題です。これが一番深刻な課題です。いったいその正体は何なのか。いろいろな人が理論を唱えています。ある方は第5の元素という仮説を立てています。これは言葉の遊びとしか思えませんが、ギリシャ以来ご存じのように、われわれの地上にある物質は水、空気、土、火、4種類の元素であった。天上世界はいったい何からできているのか。これは第5の元素なのだという話が中世に言われていましたが、その第5の元素ではないか。そのような議論もあります。

さて、暗黒エネルギーはどうしてわかったのでしょうか。暗黒エネルギーは宇宙全体に一樣にあるエネルギーです。どこかに固まるとか、そういうことがないエネルギーです。この暗黒エネルギーに重力が働くとか斥力になる。普通万有引力の法則は引力です。互いに引き合います。しかし真空のエネルギーとか暗黒のエネルギーは斥力、互いに押し合う力が働く。現在の宇宙がもう一度インフレーション

オンを起こしているらしいという観測が1998年にされました。アメリカの「サイエンス」という雑誌は1998年における科学全分野の中で一番重要な発見であると報じています。

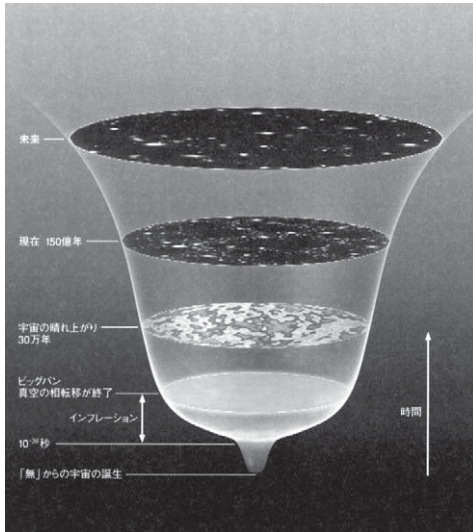


図9 第2のインフレーション  
宇宙は再び加速度的膨張を始めた。

このようにいま再び宇宙が指数関数的に膨張を始めていることから、暗黒エネルギーがあるのではないかということが言われました。第1のインフレーションは宇宙の始めに起こったわけですが、それと同じようなインフレーション、ただし宇宙の大きさが2倍になる年齢は非常に長いです。第1のときは $10^{-30}$ 秒とか、極端に小さな時間でしたが、だいたい100億年ごとに2倍になるというインフレーション、そういう膨張をしていることがわかってきています。

さて、暗黒エネルギーの正体ですが、一番素直に正体として考えられやすいのは真空のエネルギーというものです。これが存在することはカシミア効果を通じてわかっています。これはいったい何か。たとえば非常に大きな2枚の金属の板を置きます。そうするとこの金属の板は互いに引き合います。もちろん電気は帯びていません。しかし2枚の金属は互いに引き合う。これはこの金属の板で囲まれ

た空間の真空のエネルギーと、その外側の真空のエネルギーに差ができてしまうからです。外側は真空が大きいので押してしまう。そのような効果を起こします。

これはカシミアという人が何十年前前に予言したことです。ただし観測は非常に難しいので、つい最近まで本当か嘘かわかりませんでした。1997年、98年に本当ではないかと思われるような実験が行われました。2枚の金属の間と外ではエネルギーの差があるということは本当にわかってきました。そういうことで真空のエネルギーの密度の絶対値はわかりませんが、その差があることはわかったことから、存在することは確かめました。しかし正体はもちろんまだわかりません。それが真空のエネルギーだとわかったとしても、それがどんなものか、どんな真空のエネルギーかはわかっていません。

それからもう一つ、真空のエネルギーだとしてもその値がなぜ現在のような値なのかよ

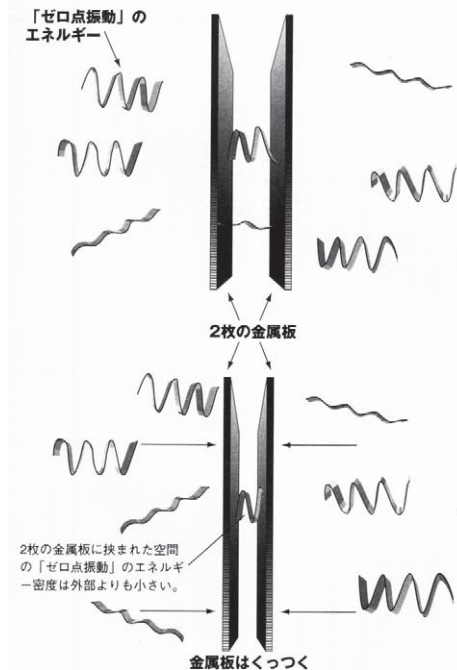


図10 カシミア効果  
金属に挟まれた空間の真空のエネルギーは小さく周りから押され、あたかも板どうしが引き合うように見える。

くわかりません。それを私たちは偶然性問題と呼びます。つまり宇宙開闢100億年ぐらいのいまの時代になぜ再び第2のインフレーションを始めたのか。これはまったくの偶然なのか。これは真空のエネルギーの値、ダークエネルギーの値自体が大きければ1億年ぐらいから始まります。いったいなぜか、これはまったくの偶然なのかという疑問です。

いろいろな考え方があると思いますが、一つは人間の原理という立場で考えることもできるのではないかと思います。人間原理とは何か。これは結構ドラスティックな大きな仮定です。この考え方では、宇宙は無限に存在し、その宇宙ごとにいろいろな物理法則、物理定数があると考えます。もちろんここでいう第2のインフレーションを起こしている真空のエネルギーも宇宙ごとに違っているという考えです。宇宙はたくさんありますが、その中でも知的生命体、人間が生まれる宇宙のみが認識されます。

そして現在の値より大きな値を持つ宇宙では、天体が生まれません。宇宙が急激に大きくなりますので、塊ができない。塊ができないと知的生命体も生まれません。田村先生のおっしゃったような惑星系とか地球はできません。そのようにある値以下の適当な真空のエネルギーを持っている宇宙のみが、知的生命体を運び込むことができる。そしてその知的生命体が認識できる宇宙は必ず適度な真空のエネルギーを持っている宇宙なのであるという考え方です。

つまり知的生命体が生まれる宇宙のような適当な真空のエネルギーを持っているもののみが認識される。ほかにもたくさんいろいろな宇宙があります。莫大な真空エネルギーを持っている宇宙もあります。しかしそこでは知的生命体が生まれません。ですから認識されない。こういう説明の仕方です。本当かどうかわかりませんが、宇宙はたくさんあるという話は、私たちも昔いたしました。またリンデという人も提案しています。

それから無から宇宙が生まれるという話を

少ししましたが、無からできる宇宙は一つである理由はありません。たぶん無限にあるのでしょうか。ですからマルチバースという考え方は前からありましたが、人間原理はそのような考え方をサポートする理論の一つではないかと思っています。

そうすると現在の宇宙に何かわけのわからない暗黒エネルギーがあり、その斥力によって宇宙は急激に膨張している。100億年ごとに宇宙は2倍、また100億年たつと2倍と大きくなっていきます。これは永遠に続くのだろうか。もし第1のインフレーションと同じように何らかの理由があって消えることがあるならば、この倍々ゲームは終わります。しかしこのままだったら宇宙は永遠に膨張を続けます。そしてわれわれの視界の中から見えている視界がだんだん大きく、早く膨張していくので、遠くにあるものは見えなくなってしまいます。遠くにあるものはある意味では光よりも早く膨張を始め、残念ながらわれわれの視界から見えなくなってしまふ。われわれの宇宙の中に人類が発展していくとしても、将来光の早さに近いようなロケットをつくることができたとしても、先祖が見ていたような世界に、あとの子孫は達することはできません。宇宙を征服するなどは夢の夢で、原理的にとても不可能であることになってしまいます。

しかしこの加速膨張が止まるならば、つまりダークエネルギーが宇宙の第1の争点と同じようになくなるならば、何か一つカタンと落ちることがあれば、もちろん再び宇宙の膨張は減速する可能性もあります。減速するならば将来ビッグクランチといって収縮してしまう可能性ももちろんあります。もちろんそのような場合はわれわれ人類、将来の知的な人類は宇宙の無限の世界に羽ばたくことも原理的には可能です。しかしいまのところ残念ながらこれに答えるような物理学の法則は、私どもは持っていません。まったくの謎であると言わざるを得ません。

このように宇宙は理論とみごとに一致しま

した。万々歳という世界です。しかし暗黒物質とかダークエネルギーとか、大きな謎が生まれてきました。私たちは現在宇宙をかたちづくっている物質の96%の正体をまったく知りません。これで宇宙がわかったとは、とても言えたものではない。この暗黒エネルギーの問題は、ちょうど19世紀末の物理学の状況と同じではないかという気がしています。19世紀の終わり、アインシュタインが出る寸前ですが、このときに驚いたことに、物理学は終わったのではないかと言われていました。現在の量子論も相対論もできていないのに、なぜ皆さんが物理学は終わったと思ったのか。

実はニュートン力学の体系があまりにもきれいにまとまりました。解析力学という関係で力学系はきわめてきれいに記述できるようになりました。熱力学とって、いろいろな分子や原子の運動になるものですが、その熱力学も数学的にきわめてみごとに定式化されました。ニュートン力学と熱力学の二つによってこの世界はすべて完全に理解できるのではないか。もう原理的にはわかったのだ。あとは単に細かなことを調べるだけだという時代になっていました。

しかしそのときに何かわからない、二つの暗雲がある。ロード・ケルビンは大物理学者ですが、それがあると彼は認識しました。つまり一般相対論に関係したエーテルというものがまだ見つかっていない。それから黒体放射の発散という、溶鉱炉で出てくる光の問題

です。それは量子論の発見の理由になったわけですが、この二つの暗雲が残っている。この正体がどうもよくわからない。物理学は非常にきれいで、全部をみごとに説明できる。しかしこの二つだけは何か妙な雲があるということ、ケルビンは指摘していました。

そういうことでいうと現在のダークエネルギーと暗黒物質、暗黒物質はもうちょっと軽いかもわかりませんが、暗黒エネルギーの問題は結構物理学の根底にかかわるような大きな問題ではないかと、私は思っています。

最後はこのスライドで終わりたいと思います。私たち宇宙論の研究を進めている者はなぜ宇宙論の研究を進めているかということですが、やはりわれわれが住んでいる宇宙はどんなものなのか。私たちはその宇宙の中でどういう存在なのか。そういうことを知りたいからです。これは有名なポール・ゴーギャンの絵です。ご存じの方も多いと思いますが、この絵のタイトルは、「我ら、いずこより来たりしや。我ら、何者なりや。我ら、いずこに去らんとするや」ゴーギャンの晩年の作品です。現在私たち宇宙論の研究者は大変あつかましい話ですが、この人類の歴史が始まった頃から問い続けられた宇宙の開闢の話、宇宙の中における人間の位置の話、そのようなものを科学的に答えることができるような時代になったと自負しています。

この宇宙論の研究の中でわかってきたことですが、世界を認識できる能力を持っている



図11 ポール・ゴーギャンの晩年の作品「われら何処より来りしや」、「われら何者なるや」、「われら何処に去らんとするや」(ボストン美術館)

人間という存在、宇宙の中ではいろいろな天体があります。いろいろなおもしろい現象もたくさんあります。しかし宇宙の歴史の中で自分がいったい何ものであるかということを知っている存在である人間は、実にすばらしい存在ではないかと思っています。もちろん人間だけではないかも知れません。何らかの知的生命体という意味ですが、宇宙の中でこのように存在であることができていることは、人間としても大変うれしい。偉大な存在ではないかと思っています。

聞き苦しい講演になりましたが、ご清聴ありがとうございました。