

宇宙はいかに生まれたか

— 現代の創世紀 —

Birth of the Universe

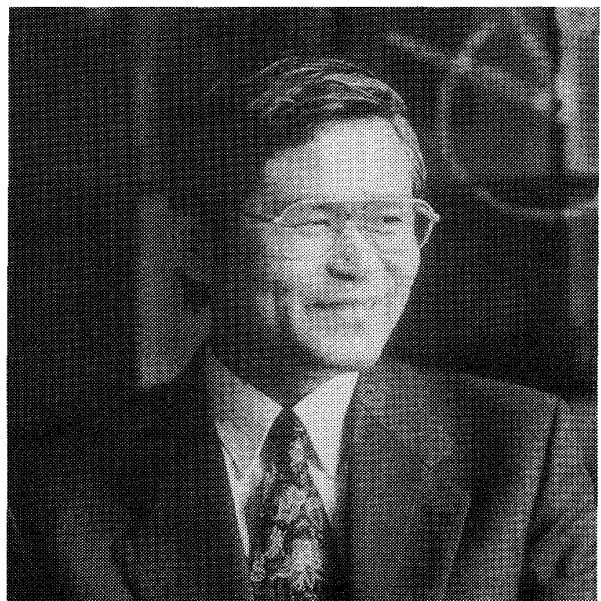
— the Scientific Genesis —

佐藤 勝彦

札幌学院大学の皆様、札幌市民の皆様、ただ今ご紹介にあずかりました東京大学の佐藤でございます。このたびはこの10周年記念の講演会に呼んでいただきまして大変嬉しく思っております。私ちょっと今風邪をひいておりますのでちょっと声が聴きにくいと思いますが、努力して明快に話したいと思っていますので、ご清聴のほど宜しく願いいたします。それでは、時間も限られておりますので、早速本論に入らせていただきたいと思います。

今日皆様にお話するテーマは、私達のこの住んでいる宇宙はどのように生まれてきたのか、いわば「科学で紐解く現代の創世紀」のお話をしたいと思っております。そういうことで順番としましては、まずイントロダクション、インフレーション理論、インフレーション理論を観測的に証明する研究も進んでおりますので観測の現状を説明し、まとめをして終わりたいと思います。

さてイントロダクションですけれども、私達が今この住んでいる世界が一体どんなものなのだろうかと、これはまあ人類の歴史が始まった頃からずっと問い続けられてきた疑問ではなかったかと思えます。皆さんも小さい子供の時に、もしくは本当に赤ちゃんの時で



佐藤 勝彦 氏

もそうだと思うのですけれども、お母さんと一緒に居て隣の部屋は一体どうなっているのだろうか、やはり興味があつたのだと思います。一生懸命這って隣の部屋を見てみたい、大きくなれば隣の町はどうなっているのだろうか、私などは子供の頃は自転車に乗るのが好きでしたから自転車で近隣の町や村へ探検にいったものです。「遠くへ行けばその世界はどうなっているのだろうか」、この疑問の究極が宇宙の果て、宇宙の構造の研究です。

同じ様に、私達の住んでいるこの世界は昔どうなっていたのか、人類はどのような起源を持っているのだろうか？ 生命は一体どのように生まれたのか、地球はどのようにして

SATO Katsuhiko 1945 年生まれ 1968 年京都大学理学部物理学科卒
現在 東京大学大学院理学系研究科教授 理学系研究科ビッグバン宇宙国際研究センター長

生まれたのか、それらすべてを含む宇宙には、始まりがあったのだろうか、始まりがあるなら終わりもあるのだろうか、それとも宇宙は永遠の過去から未来永劫続くものなのだろうか？　そういうことを皆さんもお考えになると思います。たぶん人類の歴史が始まった頃から我々は世界の始まりということについて問い続けてきたと思います。

ここにちょっと皆様にお見せしているのは、アイスランドのサガ（物語）「イェーダ」です。ご存知のとおりアイスランドという国は、北極圏に非常に近い大西洋の北にあります。アイスランドはわずか人口 20 万程度の国なのですが、スカンジナビア 5 カ国の 1 カ国です。デンマークやノルウェーやスウェーデンなどの国々と共にスカンジナビアの 1 カ国です。彼らが話している言葉は古代デンマーク語とも言われています。ほとんど 10 年くらい前になりましたけれども、アイスランド大

学に呼んでいただきまして講義をさせていただきました。それから帰る時に私の知り合いがこの本を私にプレゼントしてくれたのです。実は、このイェーダというサガの中には宇宙創生の話しが書いてあったのです。ひとつ読んでみてはということにいただいたわけでございます。読んでみますと次のようになります。

「時の始まった時には何も無かった。砂も海もまだ冷たい波もなかった、地は見当たらず上に空も無く、大きな口を開けた裂け目はあったがどこにも草木は無かった。」いかにも何も無いということ表現するためにも、民族の香がするような言い方です。ただ論理的に言うとも何も無いところに、どうして裂け目があるのかなとちょっと考えたりもします。このような世界の始まりの神話は、もちろん私達の国、日本にもありますし、世界の至るところであるわけです。

その中でもたぶん最も論理的なのは、キリスト教の聖書の創世記だと思われます。皆さんもご存知のとおり聖書によりますと、神様が「光あれ」と言うと光があったというように世界は始まりました。今から皆さんにご紹介する現在の科学者が信じている宇宙創生の物語、ビッグバン理論は基本的には光の世界として宇宙が始まったことになります。今日、ご紹介する私の理論は宇宙がなぜ火の玉として始まったのかを説明する理論ですけれども、まさにビッグバン宇宙は光あれということで始まっています。聖書では創世後 1 週間かけて神様が世界の構造を創造していく物語になっています。

さて我々科学者がこの世界の始まりとか広がりについて議論できるようになりましたのは決して大昔ではありません。それはもう今世紀になってからのことです。20 世紀の初めになってからです。皆さんもこの写真が誰の写真であるかはご存知だと思います。有名なアインシュタインの写真であります。もちろん

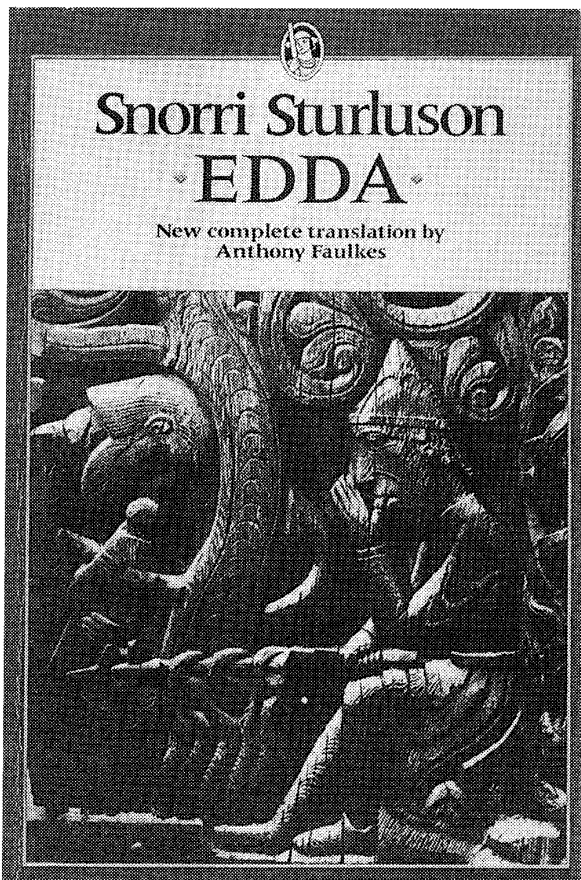


図1 アイスランドのサガ イェーダの表紙

19世紀までにも私達は世界を記述する理論としてニュートンの力学とかそういうようなきれいな体系を持っていました。しかし、時間や空間を扱う物理学というのはそれまで無かったのです。皆さん高等学校でニュートン力学を勉強されたと思いますけれども、そこで議論されていることは、物質の運動変化を、与えられた時間や空間枠組みの中でどのように変化していくのかを調べるというものでした。アインシュタイン以前では、それが物理学だったわけです。時間や空間がどういうものなのかということは物理学では何一つ答えることができなかった課題でした。

たとえばカントが時間とか空間は先験的なものであるという言い方をしていますけれども、先験的というのはある意味では質問するなということに近いことだと思います。つまり何かはわからないのだけれども、時間や空間というのは与えられていて、その中で物がどう変化するのか、それを学問するのが物理学であると、そういうふうと考えられていたと思います。ところがこのアインシュタインの相対性理論はそうではありません。確固とした時間や空間という土俵の中で物が動くと思っていたのだけれども、実は時間や空間という土俵そのものが、我々が踏みつけばへこむようなものであるということを、彼ははっきりと示したわけです。

つまり物質とかエネルギーがある所に集中しますと、そこでの時間の進み方が変わったり空間が曲がったりするということが起こるということをアインシュタインがはっきりと示したわけです。初めて時間や空間を物理学として議論すること、研究することができるようになったということです。我々が住んでいるこの世界の枠組み、時間や空間が、物質によって変わってしまうのだという事がわかってきたわけです。アインシュタインの理論をもって初めて我々は、世界の始まりとか宇宙の果てとかを議論することが可能になっ

たわけです。時間と空間をあわせて時空と呼びますけれども、時空の物理学が初めて誕生し、時空の物理学では時空と物質の運動とが不可分一体のものとなっていること、時空と物質の不可分な一体性をこのアインシュタインが示したのです。

アインシュタインの一般相対性理論は1916年に完成しましたがけれども、そこから初めて我々は、宇宙論、つまり、時間や空間の始まりや果てを初めて議論できるようになりました。

その後、ここでは詳しく申しませんが、物理学を支えているもう一本の柱、量子論、ミクロの世界を支配している根本的法則が作り上げられます。これと組み合わせることで、私達は現在宇宙の創生の物語を創ることができるようになってきています。

結論から皆さんにまずお話ししたいと思います。現在、科学者はこのように考えています。私達の住んでいる宇宙は、“無”の状態からポッと生まれてきた。その生まれてきた宇宙は非常に小さなミクロの宇宙です。私達は陽子や中性子という素粒子を知っていますが、その素粒子よりも小さな時空です。それがインフレーションと呼ばれる急激な膨張によってマクロな何億光年という宇宙らしい宇宙に成長したのです。ただ単に大きくなるだけではありません。単に体積が大きくなるだけでしたら物質が薄くなってしまいますから、その空間は空っぽになってしまいます。ところが実はこの中にエネルギーを満ち溢れさせることが、インフレーションはできます。この最後の瞬間に宇宙は、少し難しい言葉になりますが、真空の相転移という現象が起こりまして、真空のエネルギーによってこの世界にエネルギー、熱のエネルギーを満たすことができるようになります。現在この我々の宇宙は多様な光や物質に満たされていますけれども、その物質の起源は、実は今申し上げました真空の相転移によって生まれたエネル

ギーなのです。そのようにして私達の住んでいる火の玉宇宙が生まれます。以後その火の玉の宇宙は、膨張する中でしだいにインフレーションで作られた素粒子のガスが固まりながら、物質がだんだん進化していきます。ガスが固まることによって、銀河や銀河内の星や私達の太陽や地球が形成され、そしてその上に我々が生まれてくるという、壮大な進化が続くことになるわけです。しかもこのインフレーション理論は、銀河や星などの現在の宇宙構造の“種”を仕込んだことになっています。インフレーションの時代に仕込まれましたでこぼこが種となって、以後銀河や星が生まれてきたという物語になっておりますので、インフレーションは、この世界がなぜこんなに宇宙として大きいのか、なぜ膨張しているのか、どうしてこの世界にこんな豊かな構造ができたのか、それらを全て説明するという理論になっております。

さて、それではまず簡単にビッグバン理論の復習をしまして、それから創生論の話に行きたいと思います。

今からもう 70 年以上も前のことになりますけれども、アメリカの天文学者エドウィン・ハッブルが私達の住んでいるこの世界、宇宙は広がっていているのだということを発見いたしました。ここに風船があります。この風船の表面が私達の住んでいる世界だと思ってください。でも風船の表面は二次元の世界です。表面というのは東経何度北緯何度というように二つの数字を与えれば場所が指定できますので、それは二次元の世界です。現実には我々が住んでいる世界は縦横高さで三つの方向がありますから、本当はこういう表面では表現しきれないのですが、絵に描けませんので一つ次元を下げて描いていると思っていただければわかると思います。この風船の上に何か 1 円玉か何かのコインをべたべたと貼りつけてあります。これに息を吹き込んで膨らませますとこのように大きくなるわけ

です。では、ここにあるコインは一体何を表しているのかと申しますと、この 1 つ 1 つが銀河を表しています。

銀河、これは皆さんがご存知のとおり私達は、銀河系、つまり天の川銀河という、ひとつの銀河に住んでおります。私達の天の川銀河は、大きさを言うとだいたい光で十万年くらいかかるような円盤状にお星様が分布しているような天体です。私達の天の川銀河の中で、銀河系の中心から私達の住んでいる太陽系までは、荒っぽく言って光で 3 万年くらいかかる距離になろうかと思えます。この銀河系の中には、2 千億個の星があると考えられております。したがって、大きなスケールで宇宙を見ますと、このような銀河が無数、果てしなく広がっていている世界、これが、我々が知っている大宇宙です。現在我々が観測的に知っている銀河の数は、千億個とか何千億個です。本当はそれ以上たくさん、見えていないところにあるはずですが、我々が知っている範囲だけでも銀河の数は、丁度私達の天の川銀河の星の数かそれ以上あると思っていただければと良いかと思えます。

ハッブルは、この大宇宙の基本単位である銀河と銀河の間の距離がだんだんだんだん広がっていているという事を天文学的な観測から示したのです。考えて見ますと、皆さんがたとえば A という銀河に住んでいたとしましょう。B という銀河を観測しますと、自分から遠ざかっているように見えます。C という銀河は更に速い速度で私達から遠ざかっているように見えます。つまり皆さんが宇宙を見ますと自分から、あまりにも銀河が自分から遠ざかっているように見えます。もう自分が宇宙中の嫌われ者のように見える。そういうふうに観測ができるのです。そういう事をハッブルが観測から発見したのです。

ところがこのように宇宙が膨張するという事は、実は理論的に計算で既に示されておりました。先程お話にあったアインシュタインの

相対性理論の式をロシアのフリードマンという方が計算する事で、宇宙は実際膨張しているのだということを示していたわけです。それは1922年の事です。ですから理論物理学の素晴らしさと言いましょくか、数学的な答えとして宇宙が膨張しているということはこういう天文学的な発見がされるほぼ7、8年前には既にわかっていたことなのです。

では、私達の宇宙はどのような速さで今膨張しているのかということになります。残念ながらハッブルの測定した測定値は、1929年というまだテクノロジーが十分でないころでしたから、膨張していること自身は正しかったのですが、その数値は非常に大きな誤差がありました。10年程前にアメリカのNASAが有名なハッブル宇宙望遠鏡を打ち上げました。まさにハッブルという名前が付いているとおり、この宇宙望遠鏡の一番大きな目的は、私達のこの住んでいる宇宙の膨張の速さを測定することです。膨張の速さがわかれば逆算して私達の宇宙の大きさが1点であったころの時刻を求めることができる、つまり我々の世界の年齢を求めてみようというのが大きなプロジェクトになっているわけです。この場にはたくさん女性の方もおられますけれども、実はこのハッブル望遠鏡で宇宙の膨張の速さを決めて宇宙の年齢を決めてやろうというプロジェクトのリーダーは、ウェンディー・フリードマンさんという女性の方です。育児もしながらこれだけ大きなプロジェクトのヘッドをやっているわけです。昨年の6月に彼女らのグループは、ハッブル望遠鏡を長い時間占有して観測しているわけですが、その結果として宇宙の膨張の速さとか宇宙の年齢について1つの結論を出しました。

かつて私達はこの世界の年齢はだいたい150億年ぐらいではなかろうかと思っておりましたけれども、彼女等の最新のデータから見ますと、宇宙の年齢は110億年から140億

年ぐらい、130億年ぐらいというのが1つの数値として出てきております。勿論これはなかなか難しい観測ですので、いくらかは数値が変わる可能性もあると思いますけれども、150億年よりは短いかもというのが現在の観測の結果です。

さて、ともかくも今申し上げましたように、今私達の宇宙は風船のように広がっています。130億年の昔にはほとんど1点ということになりますと、では宇宙は一体どのように始まったのだろうかという事を当然皆さんは考えられると思います。その事を非常に詳しく最初に考えた人は、このジョージ・ガモフという人です。この方は相対性理論も知っていましたし、ハッブルの発見ももちろん知っていました。なぜ宇宙は始まったのか、ということしか彼は考えなかったのですけれども、彼はこういう観点で宇宙の始まりを考えます。

私達が住んでいるこの世界は、実は宇宙全体を見ますと、物質のほとんどは水素のガスなのです。一番簡単な原子である水素がほとんどです。あとヘリウムがかなりありますけれども、炭素や酸素とかそういう我々に馴染みのものは実は数%以下の量しかありません。このことから実は宇宙はどうも火の玉で始まったのではないだろうかと最初に言ったのがこのガモフなのです。なぜかといいますと、宇宙の初期はあらゆる物質が1点に集まったぐらいですから、物凄い密度の高い世界だったわけです。皆さんご存知のとおり原子は原子核で作られています。原子核が真ん中にあるわけです。宇宙の初期に行きますとこの原子核同士ですら合体してしまうような高密度になってしまうわけです。ですから宇宙全体が1つの原子核として世界が始まったという事になってしまいます。宇宙が1つの原子核です。それをゆっくりと膨張させるとどういうことが起こるのか。実はそこで起こることは陽子や中性子といった素粒子はかたま

り、グループを作って分かれていきます。鉄だとか重い元素にグループを作る方が、そういう仲良しクラブを作る方が安定ですので、宇宙は本当はもう鉄だとか重い元素ばかりになってしまうはずなのです。おかしいじゃないか。なぜ水素ガスばかり残っているのか。これをよく考えると、宇宙は物凄い火の玉だったかどうか。そうすれば陽子や中性子がグループを作ろうと思っても、温度が高いとそれぞれ陽子や中性子が激しく運動しますので、それぞれ、グループなど作らないでみんなバラバラになっていくようになります。そういうことからガモフは我々の住んでいる世界はどうも火の玉で始まったらしいということ考えたわけです。

では、それで宇宙は火の玉で始まったらしいということはわかったのですが、私達がやはり興味があることは、それではなぜ私達の住んでいる宇宙は火の玉として生まれたのか。そもそもなぜ宇宙は創生されたのか。こういうようなことを我々としては問いたいわけです。ところがアインシュタインの相対性理論だけを使って宇宙の始まり、これはいつ始まったのかは計算でももちろん出せるわけですが、宇宙創生の瞬間は数学的な特異点というところから始まっています。時空の特異点というのは何かと申しますと、そこから情報が入ってきたり、または情報が勝手に出て行くような、空間の中の1つの非常に困った点から世界が始まったことを意味しております。私達、物理学者は、全てを物理学の法則のもとに自己完結的に説明をしたいのですが、こういうような特異点があるということは、科学的にいえないことが入ってしまうということを、意味してしまいます。ですからアインシュタインの相対性理論だけを使った理論では、あたかもですが神様の最初の一撃があつて、それはもう我々の物理学では語れないのですが、そういうところから世界は始まったことになります。物理学者としまして

は神のみぞ知るということを減らすのが物理学者の役割だと思っておりますので、特異点が無いような、自己完結的にこの世界の始まりからすべてを記述したいという希望がありますが、それは残念ながらアインシュタインの理論だけではできないということになっていきます。それを答えることができるのが量子宇宙論とか量子重力理論、かと思います。

さて、今からお話するような宇宙創生論は、世界の非常にたくさんの宇宙物理学者が共同して作り上げたシナリオですけれども、こういう成果を世界の多くの人に伝えるという意味で非常に大きく寄与したのがケンブリッジ大学のスティーブン・ホーキングであります。彼はいろいろなところで紹介されておりますとおり、オックスフォード大学を卒業してケンブリッジ大学の大学院に入りました。そのころから ALS という怖い病気にかかりまし

量子論的宇宙の創生からインフレーションを経て火の玉宇宙となる

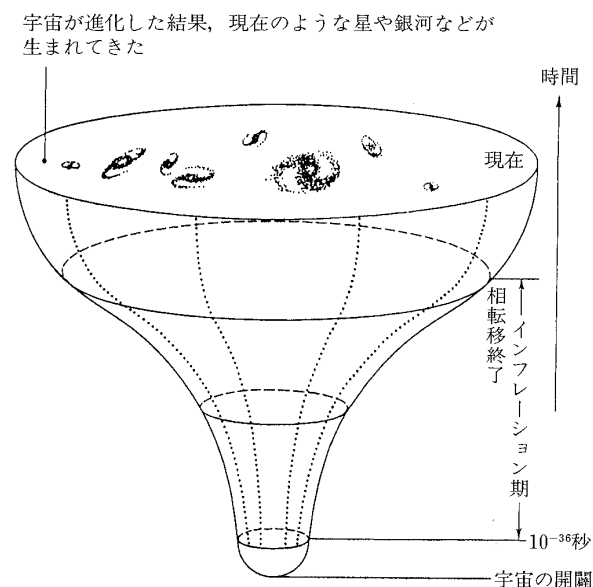


図2 現在の宇宙創生進化のパラダイム
無から生まれた宇宙は直ちにインフレーションと呼ばれる急激な膨張を起こした。インフレーションの終わるとき、真空のエネルギーの解放によって宇宙は熱い火の玉となる。またインフレーション中に仕込まれた物質密度の揺らぎは次第に成長し、銀河団、銀河、星となった。

た。筋肉がだんだん萎縮していった、だいたいは発病から3年くらいで亡くなられるという怖い病気です。彼の場合は幸いなことに病気の進行が非常に緩やかだったので、現在彼は57歳になりましたけれども、まだまだお元気です。ただ、やはりゆっくりと病気は進行していますので、現在は車いすに乗って、声も出すこともできません。液晶ディスプレイの上で作文をして、あるボタンを押すと車いすの後ろにある音声合成装置で声を出すというようなシステムで人と会話をしているわけです。ホーキングの話も後でご紹介したいと思います。

さて、それではどのようにして私達は世界の始まりや宇宙の始まりについて研究することができるようになったのかということについて話したいと思います。私共がそういう研究をできるようになったのは、実は素粒子の世界の物理学が進んだからです。先程申し上げましたように宇宙はあらゆる物的存在、全てを含んだ存在です。物質としては世界で一番大きな構造です。その起源を説明するためには、物質としては一番ミクロな極限である素粒子の世界がわからないと、わからないということになります。その理由はある意味では単純です。私達のこの住んでいる世界は宇宙の初期に遡れば火の玉になりますが、そこは温度が高いために全てが細かく分解されてしまいます。だから宇宙の初期は素粒子のガスなのです。つまり巨大な蛇の頭のような宇宙を説明するためには、一番反対の極限である素粒子の世界がわからないと解らないという、ある種の弁証法的なことをわかりやすく説明したのがこの絵です。蛇が自分の尻尾を噛んでいる絵はヨーロッパではウロボロスの図として有名ですが、こういう絵を使ってなぜこの宇宙の研究が可能になったかを説明するのが今の図です。

さて、それではいったいどのような素粒子の理論が進むことによってこの世界の認識と

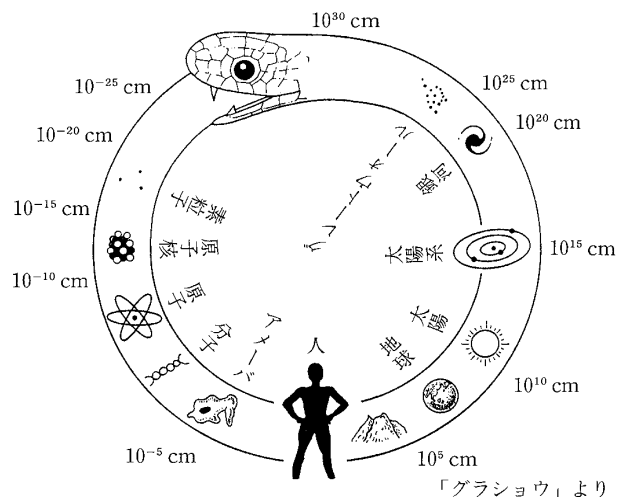


図3 ウロボロスの図 物質的にもっとも大きな構造である宇宙の起源を説明するためには、逆にもっとも小さな世界である素粒子の世界が理解できなければならない。

いうのが可能になってきたのでしょうか。それをまずお話ししたいと思います。それを一言で申しますと、力の統一理論という理論が進んだから私達が宇宙の始まりとかそういうことを研究できるようになったわけです。実はこの力の統一理論はアインシュタインが晩年プリンストンの共同研究所で研究をしておりましたので、アインシュタインの夢とも言われています。つまりアインシュタインが一生懸命考えたのだけれども夢に終わったという理論でございます。

私達の住んでいるこの世界を研究する方程式だとかそういうものはどういうものなのかと申しますと、それは4つの力という物理学の法則を組み合わせることによって、現在宇宙の森羅万象を全て計算で出せるというのが現在の物理学の立場です。もっともこの法則を越えたところで何か起こっていない保証はありません。しかし現在、この世界を計算するためにはこの4つの力を計算することで森羅万象全てわかることになります。

さて4つまできれいに法則をまとめることができるのなら、これを全部まとめて1つに統一できないのかと考えたのです。それを統一理論と申します。今もって実は完全な統

一理論はありませんが、1970年代、この統一理論の研究が非常に進みました。私達はその統一理論を使って、決してそれは完成した理論ではありませんが、それを使って宇宙の進化を考えました。これはその統一理論ができたと思って私達が1970年代の終わり頃に描いた図なのですが、その統一理論というのが本当だとするとこういうことが解るのだということが示してあります。

上の方は世界の始まり、宇宙の始まりです。物凄く温度の高い世界です。この世界の始まりのころには、実はこの世界を動かしている力は一種類しかなかった。それが宇宙の温度が下がるに従って物理学の法則、「重力の法則」というのが生まれてくる。しばらくすると「色の力」と書いてありますが強い力というが生まれてくる。そして最後に「電気力」と「弱い力」と呼ばれている力が枝分かれに

なっていくというのが、こういう統一理論の中から考えるようになったわけです。これを見ますと皆さんは、あたかも生物の進化と同じ様に見えるかと思えます。ここでちょっと遊びですけども対応を見ますとこういうことになるのではないかと思います。だいたいこのまっすぐ降りてくる電磁気力を自分だと思いたくなるのが人間です。それからご存知のとおり人類に一番近い地点で分岐したのがチンパンジーです。弱い力に対応してみたということです。そしてその前に対応しているのがゴリラです。ちょうど強い力に対応しますのでなかなか対応が宜しいかと思えます。それから一番最初に枝分かれしたのはニュートンの重力ですけども、重力というのは今もって魅惑的な面白い性質を持った力です。森の哲人と言われているオランウータンに対応するのはなかなか良いのじゃないか

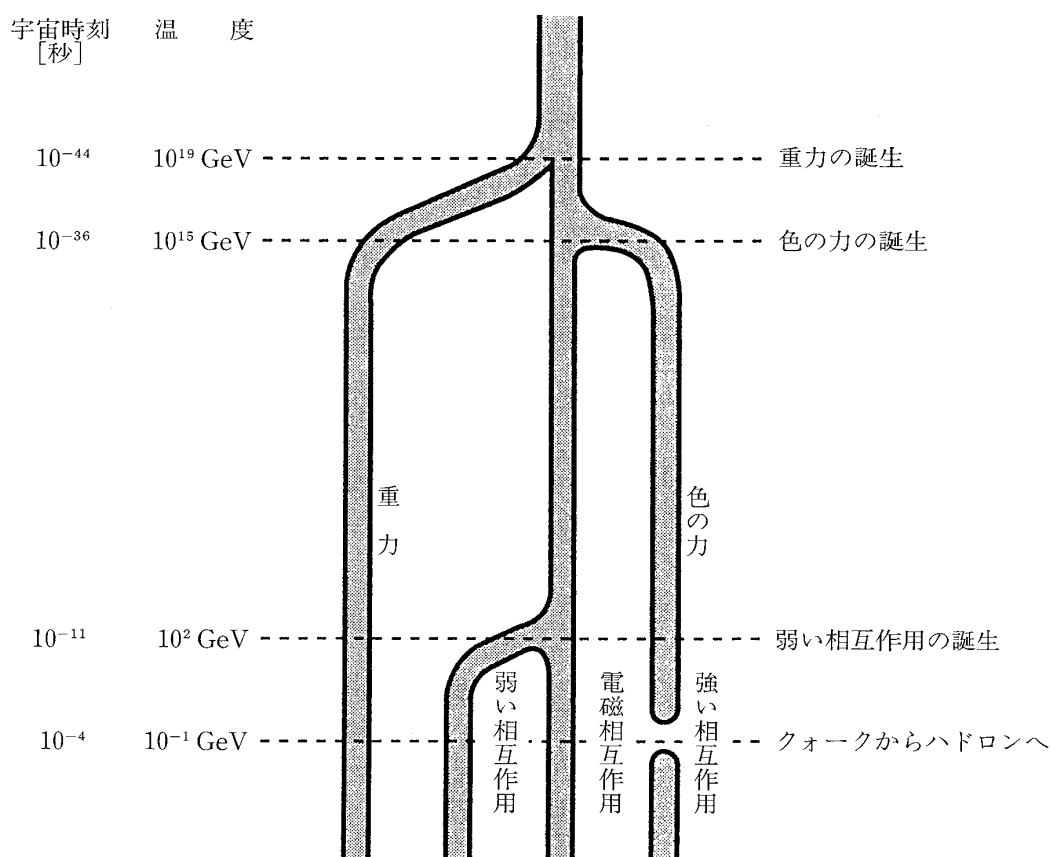


図4 力の統一理論が予想する宇宙での力の進化図。物理学の基本的な力の法則も、あたかも生物の進化のように、真空の相転移によって枝分かれする。

と思います。

さて、それではなぜこの力というのが生物のように進化するのだろうか、なぜ枝分かれを起こすのかということになりますが、これは統一理論の考え方に従いますと、これまたなかなか理解し難い言葉をお話することになりますが、実は力が枝分かれするのは“真空の相転移”ということが起こるからなのです。真空、からっぽ、真空の相転移です。しかし皆さんが知っている真空とはずいぶん違うんじゃないかと突っ込む人もおられるのではないかと思います。皆さんがお考えになる真空は何か箱があったとすると、その中から空気を抜いてしまった状態です。そうするとこの中に空っぽの空間ができます。それが真空だろうと皆さんはおっしゃるだろうと思います。確かにそのとおりなのですが、決してこの空気を完全に抜いたからといって、ここにあるものを可能なだけ抜いたとしても、実は決して空っぽにならないんだということを現在の物理学は語っています。これは量子論というミクロの世界を支配している法則に従うのならば、どんなにこの空間からエネルギーを抜いたとしても実は完全に抜くことはできません。そこには必ず、たとえば電子と電子の反物質である陽電子がペアで生まれる。まあ男と女がいきなり空っぽからポツと生まれ、また合体して消えてしまう。そういうゆらぎが常に伴ってくる。どんなにエネルギーを抜こうとしてもこれ以上エネルギーを抜くことができない一番エネルギーの低い底の状態が真空というものです。量子論に従いますと真空も揺らいでいるわけですが、その一番低い状態が真空で、決してそれは空っぽの空間ではありません。物理的な実際の実体なわけです。真空とは実体です。決して空っぽなのではありません。ですからこういうものがある種の性質を変え、それを相転移という言葉で呼ぶわけです。水が氷になったりという現象で物理学では相転移という言葉を使

いますが、真空だって相転移を起こすのです。そういう考え方から実は先程の力の進化論ということが出てくるわけです。

ではその力が枝分かれを起こす時にどんなことが起こるのかと申しますと、実はその真空が持っていたエネルギーによって、それにかかる重力を計算してやりますと、宇宙が急激に大きくなるということを計算で出すことができます。つまり、アインシュタインの相対性理論という方程式と今申し上げました統一理論の式、この2つの式を、数学で言えば連立微分方程式として解く、そういう作業をするということです。相対性理論と統一理論の式を一緒に結婚させてやると、どういうことが出てくるかということになるのかと言いますと、力というものが枝分かれするそのころに、真空のエネルギーが満ち溢れた宇宙が実現します。その真空のエネルギーにはある意味で重力が反重力として働きます。互いに押し合います。空間を押し合うようなことになります。そのためにある微小な時間が経つたびに宇宙の大きさが2倍になります。また同じだけの時間が経つと宇宙の大きさが2倍になります。倍々ゲームでこの宇宙というのが急激に大きくなるという事が計算の上で出てきます。皆さんもこの倍々ゲームというのが恐ろしいということはお存知だと思えます。私もよくこういう時にこんな例でよく説明します。お年の方も居られますけれども、たとえばお年寄りの方がお孫さんが居られて、お孫さんが、「おじいちゃんお小遣い頂戴、おじいちゃん今日僕お小遣い1円で良いんだよ、明日2倍にしてにして2円頂戴、次の日は2円の2倍の4円頂戴、おじいちゃん1ヶ月これでお小遣いくれたら僕もう一生お小遣いをねだらないよ」といっておじいさんが安心して、ああ良いよ、といったらこれはどうなるか皆さんわかりますよね。30日経ったころには2の30乗という数字になりますけれども、だいたいまあ2、3億円になると思

ますけれども、こういう倍々ゲームの恐ろしさというのはそういうものです。わずか 30 回やるだけでこれだけの数字になります。

ですから宇宙の場合も同じなのです。非常に微小なものから非常に巨大な大きな数値を出そうと思うと、こういう倍々ゲーム的な方程式で答えが出てくるような解を出さなければできないです。まさにインフレーションはそうになっておりまして、倍々ゲームが百回だの千回だのと繰り返される、そういうような理論になっております。

ただ単に世界の大きさを広く大きくしただけでは何の意味もありません。最初にも申し上げましたように、大きくするだけでしたら中の密度が下がってしまいますから、空っぽになってしまいます。ほとんど何も無くなってしまう。ところが、真空のエネルギーというのは実に不思議な性質を持っています。宇宙の大きさがたとえば百倍になったとしましょう。しかしその中に入っている真空のエネルギーの密度というのは、普遍で変わらないのです。一定のままなのです。ということはどういうことを意味するのかといいますと、体積が百倍になりますと真空のエネルギーの合計した量も百倍になります。だから宇宙の体積が 1 兆倍になるとすると、その中の真空のエネルギーが 1 兆倍になるのです。そして最後にインフレーションの終わる瞬間に、その真空のエネルギーが熱のエネルギーに変化します。物質のエネルギーに変わります。ですから世界を大きくするだけではなくて、その中に物質とエネルギーを満ち溢れさせることができるということが言えます。こういう話をしていると物理学をご存知の方は、「先生、エネルギー保存則って知っているのですか」と言う人がおられるかも知りません。実際、この方程式を解きましたアインシュタインの相対性理論、統一理論の式、どちらもきちんとエネルギー保存則を満たす方程式を解いて、今言った話ができたというこ

となのです。

では、いったいトリックは何かということになります。それをこういうふうに解釈することができるのではないかと思います。実は宇宙中にインフレーション、急激な膨張を起こしている時代には、負の重力のエネルギーというものが生まれてきていると思えばいいかと思います。それでも重力のエネルギー、皆さんも高等学校でポテンシャルエネルギーというものを計算したことがあると思いますが、2つの粒子が近付いて行くに従って重力の理論ではポテンシャルエネルギーはどんどんマイナスのエネルギーで深くなっていくのです。それと同じようなことで、実はインフレーションはある意味では膨張なのですけれども、落下なのです。落ちてくることです。重力的には落下してくるということです。実は巨大な負のエネルギーを全体に隠して、物質としては正のエネルギーを作り上げていることになります。こういうのが実はインフレーションの考え方です。更にインフレーションの面白いところは、このインフレーション中にあった、我々は量子論的なゆらぎと申しますけれども、ある種のでこぼこが生まれるのですが、そのでこぼこがそっくりだんだん時間が経つに従って、成長していくことによって銀河や宇宙が生まれてきたと考えております。ですから、インフレーションというのは空間を形成するだけではない、エネルギーを作るだけでもない、その物質の現在の構造の種までも仕込むことができるということになっているわけです。

このインフレーション理論は、さらにいろいろ面白いことも予言いたします。実は私達がこのインフレーションと言われる考え方を提唱して 1 年程、こういうふうに、面白いものを描きました。それはインフレーションを起こしている宇宙、最初の宇宙をお母さんに見たてました。この世界の中でエネルギーがとくに高いところ、真空のエネルギーが高い

ところというのがございますと、そこは先に急激な膨張を、この急激な膨張のことを実際インフレーションと言いますが、起こしますので先に子供の宇宙というのができるので、お母さんの宇宙とはなんかへその緒で繋がっていますが、これはワーム・ホール、虫穴という構造で繋がっています。子供の宇宙などでも真空のエネルギーがでこぼこしておりますと凸の部分がやはりこう出てきまして孫の宇宙というのが生まれてきます。同じようにして曾孫も玄孫も生まれてきますので、まあ無限に宇宙が生まれる。インフレーション理論というのは必然的にこういうことが起こるのだと82年に発表いたしました。

親宇宙から子宇宙、孫宇宙へと無限に宇宙がつくられる。

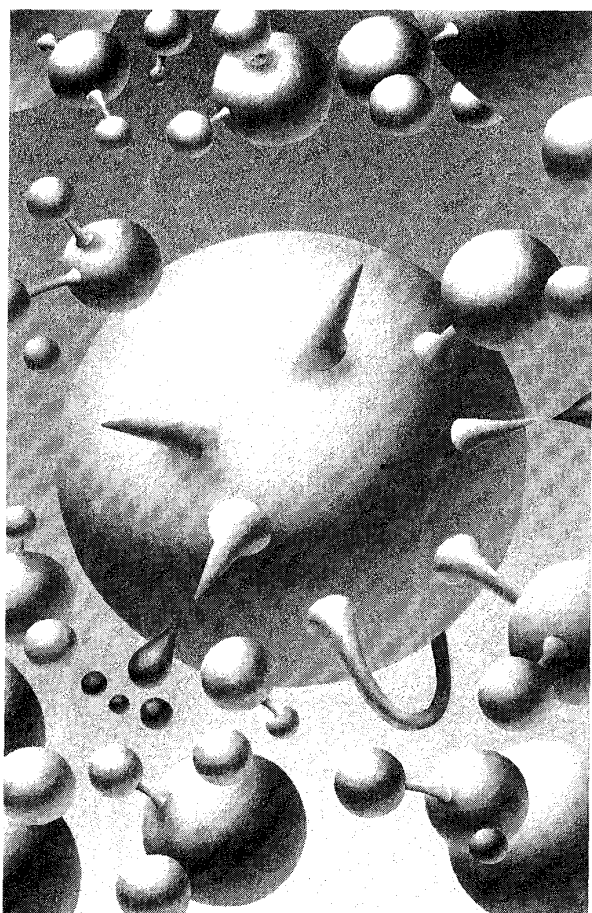


図5 宇宙の多重発生。インフレーションは大きなスケールでは宇宙が多量に創生されることを予言する。

現在、宇宙は1つだという考えではなくて、宇宙は無限にあるという考え方、英語でマルチバースということが言われるようになってきました。これはつい最近だと思います。「ユニ」というのは1つということですが、そうではなく「マルチバース」というふうに言われています。私はこれをどう翻訳すべきか考えましたけれども、いくらか仏教用語みたいになってしまいますが、「無量宇宙」と訳すのが良いのではないかと今は思っております。つまりインフレーション理論は単にひとつの世界の起源を説明するだけではなく、たぶんこのうちの1つがどれかが私達の住んでいる宇宙ですけれども、まあ無限に宇宙がつくられているということも預言しています。

ついでにちょっとお母さんと子供を繋いでいるへその緒の話をして。これは実はワーム・ホールという構造です。皆さんは、ブラックホールなどという話を聞いたことあると思いますが、空間が歪んであるところまで行くともう逃げ出せないところがあるわけです。実は逃げ出せないところの下側を切って捨てて、上と同じものをコピーしてくっ付けてやるとこういうトンネルができます。今申し上げましたのは、実はこのトンネルの上を立たせたような構造です。このベースになったところがお母さん宇宙で、ここが子供の宇宙です。こういう答えが、実は宇宙初期で使われていることを私達は計算で示すことができます。これをもって私達は宇宙が無限に作られているということが出来ます。残念ながらいったん子供の宇宙ができてしまいますと、以後因果の関係は切れてしまいますので因果関係が無くなってしまいます。またへその緒は実はいつまでもくっ付いている保証はないのです。蒸発ということが起こりまして、へその緒は切れてしまうと私達は思っております。

インフレーション理論とは何だったのか。
私がこの理論を考えた時は、天文学的な困難

を解決し、力の統一理論と宇宙論の間に当時生じていた矛盾を解くことを目的として理論を考えたのですが、今振り返ってみますと、インフレーションというのはいったい何だったのかと考えますと、まさにビッグバン宇宙をつくる理論だったのです。素粒子のような小さい宇宙を、非常に大きな宇宙に広げることができる。エネルギーを生み出すこともできます。世界の構造の種も仕込むことができます。また無限に宇宙をつくることもできたのです。そういうことで小さな種さえあれば、お母さんが実際あれば無限に宇宙をつくることができるようになります。

しかしこれをもって完全な宇宙創生のモデルができたといえれば皆さん不満になるかと思えます。それはなぜかという、種があるからです。お母さん宇宙だとか、小さな量子宇宙が無いと、このインフレーションも働かないわけです。これは私達も当然考えましたし、何か1個でも種を仕込まないと宇宙は生まれません。実はこれに対して非常に良い表現をした人がいました。それはロシア生まれのアレキサンダー・ビレンゲンです。彼は非常に明快にこういうふうに答えました。Creation of Universe from nothing. 非常に堂々と書いたところが立派だと思います。

つまり宇宙自身、最初の存在を説明しようと思ったとき、皆さんどうすれば説明できると思いますか？ もしその存在を説明するのに別の存在を持って説明したとします。お母さん宇宙はどこから生まれてきたのか？ はい、おばあさん宇宙から生まれました。おばあさん宇宙はどこから生まれてきましたか？ ひいおばあさんから生まれました。これを無限に繰り返しても起源の問題を説明できるわけではありません。生物の起源の場合、化学物質からいつ生命が生まれてきたのかわかりませんが、何か前に存在しても生命の起源の説明になります。物的存在を全て、時間や空間を含む全ての存在としての宇宙をいか

につくるかといいますと、その答えはやはり「無」しかないのです。やはり無から有を作るより仕方がないのです。そんなことがサイエンスになるのかと皆さん思われるかも知れませんが、実はそれは一般相対性理論と量子論を組み合わせることで可能になるのだというのが、ビレンゲンの主張です。重力理論と書いてあるのは相対性理論、時空の物理学です。それをミクロの世界を支配している量子論と組み合わせると、こういうものが出てくるのだというのを示したのです。

非常に簡単に言えば、量子論の世界ではトンネル効果という効果があります。これはどういう効果かといいますと、これはかなり荒っぽいたとえになりますけれども、たとえばここに富士山という山があったとしましょう。富士山の太平洋側から、静岡県側からこの山に野球のボールでもぶつけたとしましょう。ボールは跳ね返ってしまうかと皆さん思うかも知れませんが、ミクロの世界を支配している量子論の考え方になりますと、この

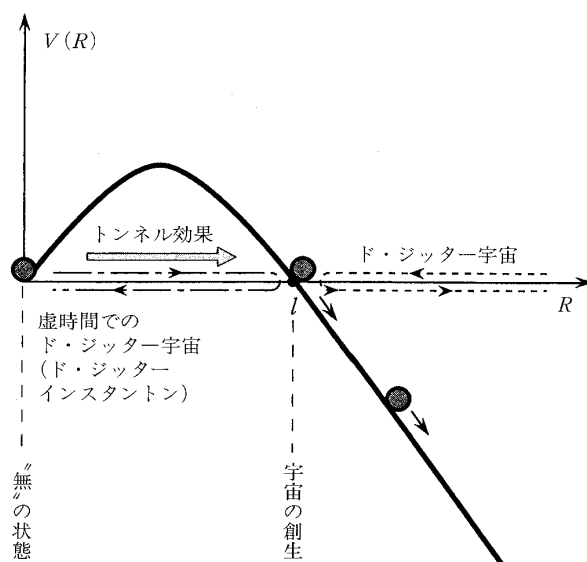


図6 トンネル効果による宇宙創生。時間も空間も存在しない「無」の状態からトンネル効果で生まれた。トンネルを通過中の時間は虚数の時間である。生まれた宇宙は直ちにインフレーションを起こしマクロな巨大な宇宙へと進化して行く。

ボールは山梨県側、富士山の山梨県側にポッと自分でトンネルを掘ってこちらに出てくる確率があります。これは勿論たとえ話でして、現実に一億回やったって1兆回やったってこんなこと起こりません。確率は0ではありませんが現実には起こりません。

実際これが起こっているのはミクロの世界です。たとえばこのボールは電子、この山は実は電子を跳ね返すような電場だと思えばいいのです。江崎ダイオードの発明でノーベル賞を受賞した江崎先生のアイデアは、トンネル効果を利用したものです。ビレンゲンの言っていたことはこういうことなのです。こちらで距離だと思っていた横軸を宇宙の大きさだと思ってください。トンネル効果ということを通じて宇宙はポッと生まれてくる。生まれてきた宇宙は富士山の裾野に沿って急激に落下します。ということは宇宙の大きさが急激に大きくなります。これは実はインフレーションに対応することになります。ここに取り上げました話は先程のホーキングなども後で議論しております。実は量子宇宙がトンネルの中をくぐっている時の時間は皆さんの腕時計では計れない虚数の時間で進んでおります。そしてトンネルを出たところから実際の皆さんの腕時計で計れる時計が始まります。このように世界が始まったことをホーキングも議論しています。このように虚数の時間で宇宙が創生されるとすると「果て」、つまり特異点を無くすることが可能になります。虚数の時間で始まるとすれば宇宙の始まりはもはや特異点ではなく、自己完結な創生論ができあがります。しかしこの量子宇宙創生論はまだ未完の理論です。量子論とアインシュタインの相対性理論を上手く結婚させるという量子重力理論は、きちんとした理論としては存在しません。しかし私は量子宇宙論は本質を捉えた理論だと思っています。

さて、最後の話に入りたいと思います。もしここで私の話を終わりますと多くの皆さん

は理論物理学者が楽しい物語をつくったのだなど、キリスト教の聖書に書いてあるのと同じよう実証性のない神話をつくったのだなど思われるかも知りません。今から申し上げたいこと事は、そうではなく我々の理論は実証できるサイエンスであるということです。サイエンスということは、提案した理論モデルが観測実験によって、実証もしくは否定することができるということです。140億年前の宇宙創生の瞬間を、現在から観測して確かめることができるということを言いたいと思います。宇宙では遠くを見るということは過去を見ることです。230万光年のかなたにあるアンドロメダ銀河を観測することは、実は230万年まえのアンドロメダ銀河を見ることです。ですから現在という時刻にしながら誕生の瞬間だって原理的には観測することができるのです。今から8年程前になりましたか、アメリカの人工衛星、COBEは宇宙開闢からわずか30万年しか経っていない時刻の宇宙を観測しました。この衛星がどのような観測をしたかと申しますと、この宇宙全体をマイクロ波の電波で観測したのです。卵のような図が書いてありますが、この丸い天球全てをこの卵型に押しこめて書いてあるのです。そこに見えてきたものは宇宙のこぼこ、ゆらぎなのです。このでこぼこの大きさは全くインフレーション理論の予言と一致していたことが、この観測でわかったのです。衛星のチームの代表者スムートは、記者会見で「この観測によって、ほとんどの人々はインフレーション理論が正しいということを信じるようになるであろう。」と言っております。

この様に現在インフレーションの理論は、観測的にも大きく支持を得るようになってきているかと思います。近年のハイテクノロジーの進歩はすさまじいものです。

数年まえ、ハッブル宇宙望遠鏡は、極めて遠方の写真を撮りました。そこには生まれた

ての銀河かも知れない天体がたくさん写っていたのです。これの天体は29等星の暗さなのです。29等星というと皆さんピンと来ないと思うのですが、天文学者はよくこんなふうに説明します。

1969年にアポロ11号が月面に降りました。アームストロング船長が月面に降り立ったのですが、もしアームストロング船長がそこで煙草を吸ったとします。煙草は吸うとボーッとちょっと明るくなります。月面でボーッと輝くあのたばこを地球から見たときの暗さがこの29等星です。

COBE衛星の観測はインフレーション理論を強く支持するものでしたが、しかしインフレーションの起きている瞬間を見たわけではまだありません。先程のアメリカのコービー衛星は宇宙が生まれて30万年しか経っていないころの写真を撮ったのですが、実は重力の波を使いますと、宇宙が生まれたころの宇宙の姿も見ることができます。重力の波というのは空間が歪んでくる波です。日本を含む世界の国々で重力波で宇宙を観測する研究が進められています。それができるとすぐ

にビッグバンの瞬間までは見えるわけではありませんが、21世紀中に創生の瞬間が見えてくるに違いないと思います。

それからもう1つ大事なことは、やはりミクロの世界の極限である素粒子の世界に関しても研究を進める必要があります。インフレーション理論は、力の統一理論によってつくられているわけですが、いままって統一理論は未完です。素粒子を正面衝突させることでエネルギーの高い、宇宙の創生の瞬間に迫ろうという計画もすすんでいます。21世紀には素晴らしい観測実験が進んでくるとは思いますが、そういうことを担うのは皆さんのようなここにおられる若い方です。

今、宇宙論の研究は理論から観測の時代へと変わってきました。観測が進むにつれ新たな謎、矛盾も生じています。しかし新たな謎が生まれることは、たいへんうれしいことです。それを解くことによって、より深い真理に達することができるからです。21世紀の新たなパラダイムはそれをとくことで、生まれてくるでしょう。

どうもご清聴ありがとうございました。

佐藤講演に対するコメントと質疑

司会：佐藤先生、どうもありがとうございました。

ここでいくつかご質問あればが受けたいと思います。お名前と所属もおっしゃっていただければと思います。

石橋：南区真駒内から参りました、石橋と申します。カトリック教会に所属しております。タイトルに「現代の創世紀」という副題がつけられておりますけれども、宇宙は無から創

造されたという非常に意味深長と思われるお話がありました。現代でなくて普通の創世記、いわゆる旧約聖書の宇宙クリエーションで、「始めに神、天地を創り給え」という文言があります。その際に神という言葉が出てくるのですが、「現代の創世紀」においては、無がいわゆる宗教でいう神とイコールになるような感じがいたしますけれども、宗教と科学の関係についてどのようにお考えですか。

佐藤：なかなか難しい質問でございますが、私達物理学者が科学として宇宙の始まりとかを考えるためには、地上の実験、観測で確かめられた法則を使って研究を進めるということが、根本であると思います。私達が無といっているのは、言葉で言うと時間も空間も物質も無い状態を、私達は無といいます。けれども量子論で考えますと、時間も空間も物質も無いといっても、そこには必ず「ゆらぎ」というものが存在しますので、そういう意味では無の状態というのは決して無ではないわけです。決して何も無い状態が無ではないわけです。言っていることが何かと申しますと、先程の真空の理論と同じでして、これ以上時間も空間も物質も無い、一番何も無い状態というのが無であって、それは1つの実体なのです。存在している実体なのです。残念ながら私達は、なぜ無の状態が存在するのか、答えることは出来ません。それを神様が創ったと宗教の方がおっしゃっても、別にそれは何も問題はありません。しかし、私達が語れることはそこまでです。それ以上先にかかると、残念ながらサイエンスとは異なります。地上の実験、観測で確かめられた法則を極限まで使って議論するのが我々の役割だと思っています。それ以上のことは申し上げられません。しかも科学の理論でいくら進めたとはいえ、直接宇宙の創生を今もって見ることもできていないわけですから、私達はそれが完全な理論とも思ってはいません。パラダイムだとか創世記などという言い方をしているのは、このような理由からです。

中野：北海道新聞の7月22日に、「最後の基本粒子タウニュートリノの検出を正式発表」という記事が載っていました。名古屋大学と他の大学が一緒にやったとのことですが、その点をちょっと説明していただきたいと思います。

佐藤：はい、タウニュートリノの発見は、大

変信頼性のたかい良い実験だと思います。私達のこの世界を作っている物質は、クォークという物質とレプトンです。これまでタウニュートリノだけが、実験からはっきりと存在するということが証明できていなかったわけです。それが名古屋大学のグループの研究で、実験的に確かめられたわけです。ただ、私達はこれまでいろいろな実験、理論研究の結果から、タウニュートリノは存在するのは当たり前だと、この15、6年間ずっと信じ続けてきましたので、実は大きくショックを受けるとかそういうことではございません。確かに我々が十何年間信じていたことが確かめられたということで、新たな謎が生じたということではございません。

泉：光デバイスの開発をしています。時空が拡大していくインフレーション理論の絵がありましたが、空間の広がり方を衛星状に描いてもいいような気がするのです。あれは1次相転移と2次相転移の関係上で、あのような形で描かれたのでしょうか。

また、相対論と量子論の統一理論がないというのは、それは特殊相対論とではなく一般相対論との統一がなされていないという意味でしょうか。

佐藤：最初の絵ですけれども、あれは視覚的にわかり易いように一つの輪が、私達の3次元の空間だと思っていただくようにして描かれたものです。これが倍々に大きくなりながら繋がっていることを示しています。真空の相転移が起こる前の過冷却の時代が実はインフレーションの時代になります。相転移が終わり真空のエネルギーが解放されれば、インフレーションは終わりです。それから2番目の質問ですけれども、統一できていないのは量子論と一般相対性理論の統一です。特殊相対性理論と量子論との統一は、これはもう1930年代に既にされています。

司会：どうもありがとうございました。