

A. 自然

7. 現代物理学の謎に迫る

(素粒子研究の世界)

ごあいさつ

本日は、JWTC春の特別セミナーの4回目を迎えることができました。皆さんのお祈りと、励ましに心から感謝している。お茶の水クリスチャンセンターにおける「被造物管理の神学」の特別講演は、今回をもってひとまず終わる。次回は、大野キリスト教会の新会堂において、献堂記念講演として特別な準備をしている。「神はなぜ人を造られたのか」という興味深いテーマで、創世記1章の徹底的な解明を試みるつもりである。期待していただきたい。

本日の講演は、「被造物管理の神学」の自然篇7回目になる。今日は、現代物理学の最先端の問題、素粒子の世界に迫りたい。このテーマは、科学の限界点ギリギリの話である。ひょっとすると、宗教的な香りが漂い、SF的な話ではないかと間違えるような話題も出てくる。現代物理学もここまで来たか、そんな印象をもたれるかもしれない。あまり難しく考えず、楽しみながら聞いていただくとよい。

I. 素粒子の世界の謎

現代物理学では、物質を構成する究極の最小単位を素粒子と呼ぶ。この素粒子は、長い間「粒子」と考えられてきた。ところが、最近「超ひも理論」という考えが公表された。それによると、すべての物質の根源は「ひものゆらぎ」にある。素粒子というのは、ミクロの「ひも」のことである。その「ひも」の揺らぎがそれぞれ異なるために、別々の種類の素粒子として振舞っている。

多くの物理学者たちが、この理論に賛同し始めている。もしそれが真理であるなら、極小のミクロの世界から巨大な宇宙の成り立ちまでを一貫して説明し得る最終理論に到達できる。そのことが、物理学者たちがこの「超ひも理論」に熱い視線を注いでいる理由である。

1. 究極の素粒子を求めた歴史

この世界に存在するすべての物質は、究極的には何からできているのか？ この問いは、古代ギリシャの時代から、多くの哲学者や科学者が取り組んできたテーマだった。古代ギリシャの哲学者デモクリトスは、このような物質の根源となっているものを「アトモス」と呼んだ。この語が、現在の「アトム(原子)」の語源になった。デモクリトスの提唱した「アトモス」については、長い間それ以上究明されることはなかった。単に、哲学的な概念に留まっていた。むろん、その理論が実証される術もなかった。

しかし、18世紀になるとこの問いに一つの答えが出てきた。つまり、水素や酸素などが発見され、これらが物質を構成する究極の基本粒子であろうと考えられた。そこで、「すべての元になる素である」という意味が込められ、「元素」と名づけられた。ところが、このような元素は次第に数多く発見されるようになった(現在では、自然界に安定して存在する元素だけでも100個ほどが見つかっている)。すると、それらを究極の粒子と見なすことに、疑問が投げかけられるようになった。

19世紀になると、実験観測から、さらに小さな究極の粒子を探究する活動が盛んになった。その結果、「元素」

を構成するものとして、「原子」の存在が突き止められた。そこで多くの科学者は、その「原子」の実態を究明しようと、さらに研究に研究を積み重ねていった。

1897年、イギリスの科学者ジョセフ・ジョン・トムソンは真空放電の実験を繰り返し、「電子」の存在を明らかにした。発見された「電子」は、最も軽い原子である水素原子の2,000分の1程度の重さしかなかった。つまり、原子の中に電子があると考えられるようになった。そこで、科学者たちは、原子の構造を調べるようになった。

1910年代にイギリスの物理学者アーネスト・ラザフォードが原子にアルファ線をぶつけ、「陽子」を取り出すことに成功した。この出来事により、それまで知られていなかった原子の内部構造が明らかにされた。と同時に、原子内部の粒子を観測するには「加速器(原子などの小さな粒子にエネルギーを与えて加速させる装置)」が必要であることも分かった。加速した粒子を他の粒子にぶつけるなら粒子が壊れる。その結果、粒子の中身を詳しく調べることができるわけである。実際、1930年代になると、線形加速器や円形のサイクロトロンなど、たくさんの加速器がつけられるようになった。

加速器ができたことにより、原子核の内部のようすがよく分かるようになった。と同時に加速器でも解決できない問題も生まれてきた。日本では湯川秀樹氏が、プラスの電気をもつ陽子と中性の中性子がくっついていることに疑問を抱き、その力の源について研究していた。何度かの試行錯誤の末、1934年にまだ知られていない新しい粒子が存在し、その粒子が陽子と中性子との働きをくっつけているという理論を発表した。

この粒子は、陽子や中性子と電子の間の大きさであることが分かった。それゆえ、その粒子は「中間子」と呼ばれ、その理論は「中間子論」と呼ばれた。湯川氏の予言した中間子は、とてもエネルギーが高いものだった。当時の加速器では作り出すことはできなかった。そこで、宇宙空間からやってくる高エネルギー放射線(宇宙線)に目をつけた。その宇宙線の中に湯川氏の予言した「中間子」を見つけたのは、13年後の1947年だった。このようにして、中間子論は宇宙線物理学や素粒子物理学の扉を開くきっかけになった。湯川氏はその功績が認められ、1949年に日本人初のノーベル物理学賞に輝いた。



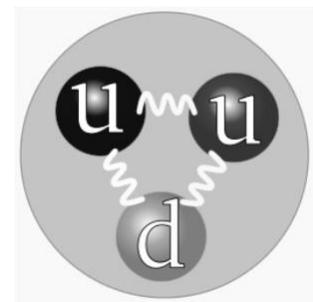
湯川秀樹

科学者たちは、1937年に「ミューオン」、1956年に「電子ニュートリノ」、1962年には「ミューニュートリノ」と、次々に素粒子を発見していった。ところで、素粒子は大きく二つに分けられる。「強い力」の影響を受け、陽子や中性子などの粒子を作る「クォーク」と、「強い力」の影響を受けない「レプトン」である。1962年までに見つかったミューオン、電子ニュートリノ、ミューニュートリノなどは、いずれもレプトンだった。クォークについては、1963年にアメリカの物理学者マレー・ゲルマンらによって「クォークモデル」が提唱された。しかし、発見はそれ以降のことになる。

クォークの発見はなぜ難しかったのか。クォークは、強い力で結合している。この強い力の働きはとても特殊なものである。10のマイナス15乗cm以下の距離では、ほとんど力が働かない。ところが、それより離れていくと、途端に大きな力が働く。例えば、2つのクォークを陽子の半径くらい離すと、クォーク間に30トンという信じられないほどの大きな力がかかる。従って、陽子や中性子などからクォークを引き離すのはとても難しい。クォークを実際に研究できるようになったのは、高エネルギー状態の粒子をつくり出す加速器が登場してからである。

クォークは、アップクォーク、ダウンクォーク、ストレンジクォークの3つが最初に発見され、アメリカの物理学者マレー・ゲルマンによって命名された。例えば、原子核を構成する陽子は、アップクォーク、アップクォーク、ダウンクォークの3つの組み合わせから成っている。一方、陽子と共に原子核を構成している中性子の方は、アップクォーク、ダウンクォーク、ダウンクォークの3つの組み合わせから成り立っている。

ところが、その後、クォークの種類は3つでは収まらず、新たに、チャームクォーク、トップクォーク、ボトムクォークの3つがあることが分かった。それだけではなく、レプトンについても、電子、ミューオン、電子ニュートリノ、ミューニュートリノに続き、タウ、タウニュートリノが発見された。さらに4つのゲージ粒子(光子、Zボソン、Wボソン、グルーオン)も発見された。その結果、16の素粒子が存在することが明らかになった。



クォーク

これらに加え、理論上は、もう一つの素粒子がなければならなかった。この最後の素粒子は、提唱者ヒッグス氏の名にちなんで「ヒッグス粒子」と名づけられた。しかし、観測上では長い間未発見だった。ところが昨年、この最後の素粒子の存在がついに突き止められた。これで予測されていた 17 個すべての素粒子が、今や実験観測によって確認されたのである。これにより、この 17 個の素粒子が、物理学の世界では「標準模型」とされている。

2. ニュートリノは質量をもつ

万物に質量を与えるヒッグス粒子が発見された。その質量も分かった。これによって、素粒子物理学の基本的枠組みの「標準モデル」で予測された素粒子 17 個全部がそろった。しかしその中には、いまだに素性がよく分からない粒子がある。「ニュートリノ」である。ニュートリノは、物質を構成する粒子の一つでありながら、物質の中を幽霊のように素通りし、その質量はゼロとされていた。

ところが 1990 年代の末、ニュートリノに質量のあることが発見された。ただその質量は極端に小さく、未だその値は定まっていない。しかもその質量は、標準モデルのヒッグス粒子だけでは説明がつかない。日常の物質を構成する電子や陽子などに比べ、我々にとってニュートリノは縁遠い存在のように見える。しかし、現在の宇宙がこのようにできているその根本には、ニュートリノの存在がある。今や、素粒子の世界だけでなく、宇宙を知るためにも、ニュートリノを知ることがキーとなりつつある。

	フェルミオン			ボソン	
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ	γ 光子	
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	g グルーオン	
	ν_e 電子ν	ν_μ ミューν	ν_τ タウν	W Wボソン	
レプトン	e 電子	μ ミューオン	τ タウ	Z Zボソン	H ヒッグス

標準模型 17 の素粒子

ニュートリノには、「電子ニュートリノ」と「ミューニュートリノ」と「タウニュートリノ」の 3 種類がある。いずれも、「強い力」の影響を受けないのでレプトンに属している。しかも、電気的には中性で「電磁気力」には反応せず、「弱い力」にしか反応しない。従って、他の粒子や物質と出会っても反応せず通り抜けてしまう。実際、この宇宙にはニュートリノが満ち溢れている。我々の体を、毎秒数百兆個ものニュートリノが通り抜けている。しかしそれを、我々が実感することはない。では、このニュートリノの実体はどのようなものなのか。

1930 年頃、オーストリア生まれのスイスの物理学者ヴォルフガング・パウリ(1900 年～1958 年)は、「ニュートリノ」の存在について予測していた。彼は、「ベータ崩壊(原子核が電子を放出して、他の種類の原子核に変わる現象)」を説明するには、どうしてもニュートリノのようなものが必要になる、との結論に達していた。ただし彼は、友人に「私はほとんどないことをした。検出不可能な粒子の存在を仮定してしまった」と話していた。ニュートリノは、粒子の観測に不可欠な装置のどのような材料をも通り抜けてしまう性質をもっている。ということは、ニュートリノの観測装置は作れないということである。パウリが検出不可能と考えたのも無理はない。

ところが、1956 年アメリカの研究グループは、原子炉の中で発生したニュートリノの存在を確認することに成功した。ニュートリノは、理論上の存在だけでなく、観測上の対象になってきたのである。

実はニュートリノは、物質の衝突や崩壊と深く関わっており、いろいろな場所で発生している。例えば、身近なところでは、地球内部でウランやトリウムが崩壊するとき、あるいは宇宙線が地球の大気にぶつかる時、などである。もう少し遠いところでは、太陽内部の核融合反応において、あるいは超新星爆発において、さらには宇宙誕生時のビッグバンなどにおいて、である。

ニュートリノが他の物質と相互作用を起こさないということは、ニュートリノは生まれたときの状態をそのままずっと保ち続けていることを意味する。ということは、もしニュートリノを捉えることができれば、そのニュートリノの分析を通じ、その発生源の状況を推測できる。もし太陽から飛来するニュートリノを観測できれば太陽内部での核融合のようすを、超新星爆発からのニュートリノであれば、超新星爆発の詳しいようすを調べることができる。

現在の宇宙にはビッグバンの時に発生したニュートリノが一様に広がっているのではないかと推測する学者が多い。宇宙マイクロ波背景放射をとらえることができたように、「宇宙ニュートリノ波背景放射」を観測することができるかもしれない。そうすれば、ビッグバン時の出来事の解明に大きく近づくことができる。宇宙誕生直後にできたニュートリノを探るといった野心的な計画は、日本では筑波大学を中心とする国際共同実験グループによって進めら

れている。もしこのような「宇宙ニュートリノ波背景放射」を観測できれば、宇宙誕生から0.1秒後の情報が得られることになる。むしろ、そのエネルギーは極度に低いので、物質との反応が起きる頻度は限りなくゼロに近い。難しい取り組みであることは言うまでもない。いずれにしてもニュートリノは、直接見ることのできない発生現場を、その一部ではあるが、知らせてくれる可能性を秘めた、とても興味深い素粒子である。

2002年、小柴昌俊氏は、「天体物理学、特にニュートリノの検出へのパイオニア的貢献」という理由で、ノーベル物理学賞を授与された。小柴氏のグループは、「力の大統一理論」から預言される「陽子崩壊現象」を観測するため、岐阜県の神岡町の神岡鉱山の地下1,000mの所に、4億円かけ「カミオカンデ」という巨大な実験装置を建設した。それは、直径15.6m、高さ16mの巨大な水槽に3,000トンもの純水を満たし、水槽の壁の部分一面に光電子増倍管という特殊なセンサーが取り付けられたものである。

この実験装置は1983年に運用が開始された。ところが、当初目論んでいた「陽子崩壊現象」を証明する結果はなかなか得られなかった。そこで小柴氏らは「ニュートリノ観測」に方向転換を図った。ニュートリノは、異色の素粒子である。原子を構成せず、化学反応にも関与しない。電気的には唯一の中性な物質粒子で、他の物質とは衝突せずに通る抜けてしまう。しかし小柴氏のグループは、たくさんの物質を通せばまれにニュートリノが反応する時があるはずだと考えた。そこで、ニュートリノが「カミオカンデ」の巨大な水槽に満たされた水の中を通過するとき、そのまれにしか起こらないニュートリノの光が起こることを期待したのである。ニュートリノ自身を捕まえることはできなくても、ニュートリノと水が反応した光をとらえることで、ニュートリノの存在を確かめようとしたのである。

1987年1月1日、「カミオカンデ」の実験装置の改良作業は完成し、太陽で発生するニュートリノ観測が始まった。すると、その直後の2月23日、大マゼラン星雲で超新星爆発が発生した。小柴氏らのグループは、超新星爆発が起きたときのデータをすぐに調べ、超新星爆発によって発生した11個のニュートリノを観測することに成功した。

ニュートリノに関するさらに詳細な観測のためには、「カミオカンデ」の能力では不十分である。そこで、1991年より5年かけ「スーパーカミオカンデ」の実験装置が建設された。直径40m、高さ42mの巨大な水槽の中に5万トンの純水を入れ、壁面の光電子増倍管も11,146本と大幅に増やし、従来のものより20倍以上の能力をもつ装置にした。この装置を利用し始めてから2年後の1998年、従来の考えを全く覆す「ニュートリノに質量がある」という研究成果が出た。ミューニュートリノがタウニュートリノに変化するという事実が確認され、その際ニュートリノの震動が見られたのである。そのような震動は、質量がなければ起こりえない。この発表に対し、その後世界中でその結果に対する追跡調査が行われた。その結果、99.99%の確立で、その観測結果の正しさが証明された。こうして、世界で初めて「ニュートリノに質量がある」ことが確認されたのである。

それまでの素粒子の標準理論は、ニュートリノには質量がないという前提で、積み上げられてきた。従って、この発表は従来の標準理論を書き換えるほどの大きな発見で、世界中の物理学者たちを驚かせた。とはいえその質量は、それまで一番軽いと見なされてきた電子の質量の100万分の1にも満たない、極めて小さなものだった。

その後、ニュートリノの微小の質量を測定しようと、さまざまな努力が積み重ねられている。最近では、広大な宇宙にその答えを求める傾向が強くなっている。検出は極めて困難ではあるが、宇宙全体であれば、10の89乗という圧倒的な数のニュートリノが存在するはずである。特に初期宇宙では、超高温・高密度の中で核反応によって水素からヘリウムができ、その副産物として大量のニュートリノが生み出されたことが想定される。

今日、暗黒物質がまず集積し、その後にその暗黒物質の重力によって銀河や銀河団が形成されていったことが分かっている。ニュートリノは、暗黒物質が集積し始めた頃は自由に飛び回っていて、暗黒物質の集積を遅らせる働きをしたと推定される。ニュートリノの質量が大きければ大きいほど、物質(普通の物質と暗黒物質の総体)の集積を妨げる効果も大きく、宇宙の大規模構造の境界をぼやけた状態にする。つまり、宇宙における物質の分布状況を測定することによって、ニュートリノの質量が推測できると考えられている。

宇宙のビッグバンの名残りである「宇宙マイクロ波背景放射」は、宇宙空間を満たす暗黒物質の重力によって、光の進路がわずかに曲がり(重力レンズ効果)、その影響で宇宙マイクロ波背景放射の放射パターンもわずかに歪む。現在の進んだ精密観測は、この歪みを非常に高精度に測定できるようになった。その結果、それをもとに

暗黒物質の詳しい分布状況を描き出せるようになった。

その分布は宇宙空間に存在する巨大なボイド(空洞)によって区切られている。もしその境界線がシャープになっていれば、ニュートリノの質量は小さい。その境界線が不明瞭であるなら、ニュートリノの質量は比較的大きいことになる。こうして、最も軽く、見つけにくい素粒子の質量測定が宇宙全体の観測から可能になるかもしれない。実に興味深い調査である。

さらにニュートリノは、3つのニュートリノの種類(フレーバーという)の間を行き来し(この現象は飛行距離によって異なるが、それを「ニュートリノ震動」と呼ぶ)、他のどの粒子よりも変身しやすい。なぜニュートリノはそれほど軽いのか。フレーバーは3種類しかないのか。もっと多くの種類が存在するのではないか。特に、第4番目の新粒子として候補に挙げられている「ステパノライルニュートリノ」は、実在するのか。なぜ、ころころ変身してしまうのか。ニュートリノの反粒子はニュートリノ自身なのか。

素粒子物理学は、このような難問を次から次へと突きつけられている。もしこれらの問題が解明されれば、素粒子物理学の統一理論に向けた道が開かれる可能性がある。そういう期待から、素粒子物理学者たちは、世界中の粒子加速器や原子炉、廃炉になった鉱山などで、さまざまな新しい実験を展開している。

「宇宙の晴れ上がり」以前の状態は、光や電波などの電磁波では観測できない。物質に邪魔されないでまっすぐ進む別のものが必要である。科学者は、そのようなものとして「ニュートリノ」と「重力波」を考えている。両方とも、理論上はその存在と活動状況についてかなりのことが構築されている。しかし、未だ観測上で確認されるには至っていない。観測技術の向上は目覚ましいものがあるので、近いうちに観測が可能になるかもしれない。

3. 重力波について

次に、重力波は、どうか。ニュートンは、すべての物体に引力が働くことを明らかにし(万有引力の法則)、この力を「重力」と呼んだ。さらにアインシュタインは、一般相対性理論を発見し、重力が「時空間のゆがみ」によって解明できることを明らかにした。彼は、この「時空間のゆがみ」は波となって空間を伝わるはずだと予言した。この理論上提唱された「波」のことを「重力波」という。一般相対性理論が正しければ、この「重力波」は必ず存在するはずである。しかし、今までのところ、実際にその存在を証明した人はいない。

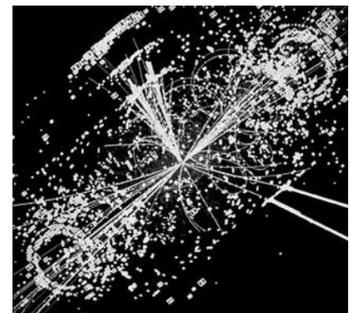
「重力」は身近にあるので、大きなものと考えられやすい。しかしそれは、我々が地球のような大きなものを相手にしながら考えているからである。本来は、極めて弱いものである。時空間のゆがみは極めて小さいものであるので、「重力波」をとらえることは極めて難しい。もし重力波を検出できるなら、人類は、この宇宙の謎解明に対し、新しい目をもつことになる。しかしそれは簡単なことではない。

重力波は、超新星爆発や中性子星連星の回転や合体などによっても発生すると考えられている。しかし、まだ実際には観測されていない。重力波は、宇宙初期にも発生している可能性がある。それは「宇宙マイクロ波背景放射」や「宇宙背景ニュートリノ」よりはるかに初期のものである。宇宙が始まってから1兆分の1の、1兆分の1の、そのまた1兆分の1という、桁外れに早い時期に発生したと考えられている。これを「宇宙背景重力波」と呼んでいる。むろん、未だ推論の段階である。この宇宙誕生の第一報を伝える重力波をとらえることができれば、誕生して間もない宇宙のようすが分かる。現在日本をはじめアメリカやヨーロッパのグループが、重力波望遠鏡の開発を進めている。

4. ヒッグス粒子について

ニュートリノにまつわる問題の解決を模索していくと、現代の素粒子物理学において到達している「17個の素粒子」理解でよいのかという、極めて根本的な問題にぶつかる。次に、この問題について紹介しよう。

ヒッグス粒子は、2012年7月23日、スイスとフランスの国境の地下に建設された大型ハドロン型衝突型加速器(LHC)という巨大加速器によって、確認された。もしヒッグス粒子が見つからなければ、標準理論である「ビッグバン理論」は台無しになり、根本から考え直さねばならなかった。裏返せば、この発見は、「ビッグバン理論」を検証したことになる。



ヒッグス粒子
シミュレーション画像

2012年7月31日、マスコミは一斉に、ヒッグス粒子の発見を報じた。これに対し、世界中の物理学者たちが喜びと安堵の声を表明した。従来の素粒子に関する「標準理論」が大筋において間違っていなかったことが、この発見によって証明されたからである。世界各国から3,000人も優秀な物理学者を動員しての大きなプロジェクトチームによる成果だった。日本からもこのチームに110名ほどの若手を中心とした研究者たちが加わっていた。

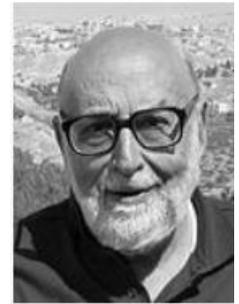
この発表の翌日のテレビやラジオの報道番組は、「ヒッグス粒子発見」の話題一色という感があった。一般の我々にとっては、この未知の素粒子の発見は大きな驚きであったが、専門家たちの間では、発表されたデータは事前の予測どおりで、驚きの声はほとんど聞かれなかった。むしろ、予想どおりの形でヒッグス粒子の痕跡が見つかったことに、安堵の声が上がった。例えば、吉田たかよし教授は、つぎのように述べている。

「世界中の物理学者が、標準模型というジグソーパズルの完成に取り組んできたのですが、17個のピースのうち、たった一つ、ヒッグス粒子だけがぽっかり空いていたんです。それが今回、寸分たがわずピッタリはまるピースが見つかり、ついに物質の根源を描くジグソーパズルが完成したため、価値ある発見だと言えるのです。」
（『世界はゆらぎでできている』、66頁）

このヒッグス粒子の発見により、この存在を1964年頃最初に理論的に予言した二人の理論物理学者ピーター・ヒッグスとフランソワ・アングレールは、2013年のノーベル物理学賞に輝いた。



ピーター・ヒッグス



フランソワ・アングレール

5. 超対称性の素粒子の存在

このヒッグス粒子の発見によって、これまで素粒子物理学者たちが提唱してきた「標準模型の理論」が正しかったことが証明された。ところが、ヒッグス粒子の発見は、この標準模型に対し、新たな問題を投げかけた。その理論に従って計算すると、宇宙の創生直後の高温化では、ヒッグス粒子は今回の観測結果の10京倍という途方もなく大きな質量をもたねばならない。これに暗黒物質の存在を加えても、十分な説明にはならない。そこで、既知の17個の素粒子には双子のパートナーのような「超対称性素粒子」が存在するのではないかと推定する理論が提起された。この理論に基づいて宇宙の創生直後におけるヒッグス粒子の質量を計算し直すと、現在分かっているヒッグス粒子の質量の10倍から100倍程度になる。この程度であれば、あり得たのではないかと、多くの物理学者は考えている。

さらに、この超対称性粒子を暗黒物質と考えると、「質量が大きいのに見えない」という性質がうまく説明できる。従って、実験を専門とする物理学者たちは、超対称性の素粒子の存在を裏づけるデータを得ようと、現在実験を繰り返している。2013年4月には、国際宇宙ステーションで観測した陽電子が暗黒物質の痕跡かもしれない、と大きく報じられた。これは、観測データが、超対称性粒子の理論に当てはまったからこそ、暗黒物質の可能性が浮上したわけである。とすると、素粒子の数は、 17×2 で、34個になる。

この34個の素粒子に加え、多くの物理学者は、重力の相互作用に関わるさらにもう一对の素粒子が存在すると想定する。これまで、「重力」とは2つのものが引き合う力であると言われてきた。しかし、物理学の世界では、2つの物質の間に力が引き合っているということは、その物質の間で素粒子がキャッチボールのようにやり取りされていることだと分かってきた。むろん我々が、普段の生活において「力を媒介する素粒子」の存在を意識することはない。ただ、この宇宙の物質や力を突き詰めていくと、結局は素粒子に行き着くことになり、重力に関わる素粒子を想定するとうまく説明が可能になるという話である。

素粒子物理学者は、その「重力」に関わる素粒子を「グラヴィトン(重力子)」と名づけた。すると、その超対称性のパートナーになる「クヴァンティノー」も存在するはずである。その結果、素粒子は、従来の34に2つを加え、全部で36個になる。こうなると、究極の素粒子というには、あまりにも多くの数になりすぎる。複雑なものには、よりシンプルで根源的な究極のものがあるはずだと考える物理学者にとって、抵抗感が大きい。このようなもやもや感を一掃したいという願望が出发点になって「超ひも理論」が提唱されるようになっていく。

II. 力の統一理論と超ひも理論

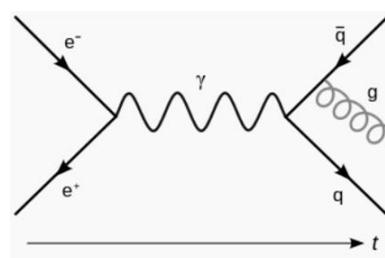
超ひも理論に行く前に、一つふれておかねばならない問題がある。「力の統一理論」という課題で、ビッグバン理論やインフレーション理論とも深い関係がある。現代物理学においては、どうしても解決しておかねばならない基本的なテーマである。現代の物理学者が最近特に注目し、協働研究が進められている分野である。

1. 力の統一理論が考えられるまで

この世界を理解するには、この世界が何からできているのかを究明しなければならない。と同時に、それぞれがどのように相互作用しあっているのかを明らかにしない限り、その全体像が分かったことにはならない。この物質と物質との間に働く相互作用を生み出しているもの、それが「力」である。

この世界に存在する物質が、どの程度であれ、加速運動できるのは、そこに力が働いているからである。我々は、「力」にはさまざまな種類があるように思っている。しかし今日の物理学では、すべての力は、基本的に「重力」、「電磁気力」、「弱い力」、「強い力」の四つに分類される、と考えている。

「重力」とは、「万有引力」として知られている。「電磁気力」とは、プラスの電荷とマイナスの電荷が引き合ったり、磁石のN極とS局が引き合ったりする力のことである。電気と磁気は同一の力の異なる面を指す。自然に生じる電気と磁気は、いたるところにある。「弱い力」とは、原子核を壊す働きをし、放射性物質が崩壊して放射線を出す力のことである。中性子が電子(ベータ粒子)と反電子(ニュートリノ)を放出して、「陽子になるような変化(ベータ崩壊)」を導く力を指す。「強い力」とは、原子核を構成している力で、3つのクォークを結びつけて陽子や中性子をつくっている力である。湯川秀樹氏が発見した「中性子と陽子とを結びつける力」を指している。



ワインバーグ＝サラム理論

1967年、アメリカの二人の物理学者スティーヴン・ワインバーグ(1933年～)とシェルドン・グラシロー(1932年～)は、これら四つの力はそれぞれ別の振る舞いをするように見えるが、もとは一つで、宇宙誕生後に枝分かれした、と提唱した。実は、パキスタンの物理学者アブドゥッ・サラム(1926年-1996年)も、それ以前に、このような考えに到達していた。この考えは、一般に「力の統一理論」と呼ばれる。別名、発見者の名にちなんで、「ワインバーグ＝サラム理論」とも呼ばれている。ワインバーグ、グラシロー、サラムの三人は、この研究により1979年にノーベル物理学賞を受賞した。

現代の物理学では、真空の空間を何も無い空っぽの空間とは考えない。エネルギー的に一番低い基底状態を「真空」と呼んでいる。つまり、真空にも物理的な実態があるということになり、真空が相転移を起こしても不思議ではない、と考える。物理学者がいう「真空の相転移」とは、宇宙の初期に温度が急激に下がったことで、真空の空間自体の性質が変わり、真空での力の伝わり方が変わる。その結果、もともと一つであった「力」が四つに分かれた、という考えである。



南部陽一郎

このことを最初に理論化したのが、南部陽一郎氏(1921年～)である。南部氏は、何か具体的な物理現象を発見したというより、極めて基礎的な物理学全体に関わる理論を構築した。先のワインバーグ＝サラム理論も、この南部氏の考えを基にして考え出されたものだったのである。この南部氏の功績は高く評価され、2008年にノーベル賞に輝いた。

2. 力が4つに枝分かれた

「力」に関して、素粒子物理学的に言えば、違った理解になる。「電磁気力」は光子をやり取りしていることである。「強い力」は「グルーオン」と呼ばれる素粒子が媒介している。「弱い力」は「Wボソン」や「Zボソン」と言われる素粒子が媒介している。「重力」に介在している素粒子は「グラヴィトン」である。ところが、このグラヴィトンは見つかっていない。発見されていない理由は、「重力」があまりに小さな力だからである。我々は、重力が小さいと言わ

れてもピンとこない。むしろ、重力こそ一番大きいのではないかと勘違いしている。これは、我々の体や地球が非常に多くの原子からできており、その引っ張り合いの力を考える結果である。もし一つ一つの原子のレベルまでさかのぼって考えると、極めて小さな力になってしまう。

現代の物理学では、この力の枝分かれについて、次のようなプロセスを想定する。まず、宇宙が誕生してから10のマイナス44乗秒後に、「重力」が他の三つの力から分かれた。続いて、10のマイナス36乗秒後になると「強い力」が分離した。さらに、10のマイナス11秒後に「電磁気力」と「弱い力」とが分かれた。つまり、宇宙の初期においては、温度が急激に下がったことにより、真空の空間自体の性質が変わった。その結果、真空での力の伝わり方も変わった。つまり、もともと一つであった「力」が四つに分かれた、と考えるわけである。このような現象を物理学者は「真空の相転移」と呼んでいる。

この現象は、温度の点から逆に考えると、次のようになる。「電磁気力」と「弱い力」は、絶対温度1,000兆K(10の16乗)の高温状態では同じような振る舞いをする。さらに高エネルギーの10の28乗Kという状態をつくると、その二つに加え「強い力」も含めた三つが同じように振舞う。もしそうだとすれば、「重力」をも含めた四つの力は、宇宙誕生直後のさらに高エネルギー状態では「一つの力」だったはずであるとの推測が成り立つ。つまり、宇宙の誕生時は一つの力だったものが、温度の低下と共に枝分かれしていった、というのである。このように四つを統一して考えるようになったことが、ビッグバン理論、インフレーション理論の背景にある。

3. 重力を統一する試み

物理学者は、電磁気力、弱い力、強い力に加え、重力を組み込んだ「大統一理論」を構築することが長年の夢だった。しかし、重力だけは他の3つに比べ極端に小さいので、いくら高温・高エネルギーの条件を設定しても、いくら微小の世界を設定しても、統一するには無理があると考えられてきた。「究極の理論(TOE)」までに、あと一步の地点にまでたどりついている。強い力、弱い力、電磁気力の三つは、「大統一理論(GUT)」によって統一された。後は、重力を残すのみである。

ところが、この一步が、物理学者にとっては途方もなく大きな一步なのである。その理由は二つある。第一の理由は、量子力学はミクロな領域をうまく説明する理論である。それに対し、重力理論は大域的な領域を扱う理論である。両者の守備範囲にはきわめて大きなギャップがある。量子力学は巨視的世界で無効になるわけではない。ただ、その本領を発揮する領域は異なる、と言ってよい。

第二のより本質的な理由は、量子力学は時間的理論であるのに対し、一般相対性理論は空間的(=幾何学的)で、本来時間を含まないことにある。このような事情から、場の量子論(ゲージ場の理論)に沿った電弱統一理論→大統一理論の延長上におけるTOEは、絶望とまではいわないまでも、極めて困難だと考えられている。

素粒子物理学者は、物質の構成要素である素粒子の究極の姿とすべての力とを統一して説明できる理論を追求する。例えば、1999年、アメリカの物理学者リサ・ランドールとラマン・サンドラムは、「ワープした余剰次元モデル」を提唱した。これは、4次元時空のプレーンの周りに第5の次元が広がっているという従来のプレーンワールド仮説に加え、第5の次元の向こう側には別の4次元時空のプレーンがあるという考えである。我々の宇宙とは別の宇宙(パラレルワールド)が存在している、というのだ。

しかも、もう一つ重要な点がある。第5の次元のプレーンは曲がっている(ワープしている)という点である。この宇宙に存在する4つの力の中で、重力だけは特殊な存在である。曲がっている第5の次元のプレーンを設定することで、なぜ重力が特殊なのかということがうまく説明できる。しかも、このモデルは、実験的な検証が可能だと彼らは述べたのである。

これまで、数多くの研究者が重力を含めた「大統一理論」の構築に挑んできた。しかし、なかなか良い説明はない。そこに登場したのが、超ひも理論である。

4. 超ひも理論とは何か

現代の物理学者の間では、「超ひも理論」のみが、現在のところ説明可能な唯一のものとして注目されている。「超ひも理論」では、これまで発見されてきた素粒子はそれぞれ別のものでなく、皆同じ「ひも」だと考える。つまり、それぞれの素粒子は、極小の同じような「ひも」から成り立っている。異なる粒子として振舞っているかのように見えるのは、そのひもの「揺らぎ方が異なっている」だけだ、というのである。ギターの一つの弦がいろいろな音を

出すように、同じひもがゆらぎの違いによって働きを変えている、そう整理したのである。

「超ひも理論」においては、素粒子の本質を「ひもそのもの」に求めているわけではない。ひもの太さや長さに関係ない。「ゆらぎ」にある。長さを持っていない「点」では「ゆらぎ」は考えにくい。従って、「ひも」というのは「揺らぎ」を与えるための仮想的な材料に過ぎず、本当はひもでさえない。揺らいでいるのは、点でも面でもなく、短いながらも「ひも」である。点と言えばゼロ次元、面と言えば2次元になる。素粒子はどちらでもなく、1次元の「線」の世界であり、揺らいでいることを問題にしているのである。この「ゆらぎ」を問題にしたところが、「超ひも理論」の真髄である。

従来、この世の物質は、究極的には粒子という点みみたいなものだと思いついてきた。しかし、究極の粒子を点と想定すると、重力を統一的に組み込めない。もし「点」ではなく、長さを持つ「線」が振動していると仮定すると、統一的な理解が可能になる。むしろ、長さがあるといっても、マイクロの世界の話であり、極限に近く短いものである。「ひもの長さ」については、異論もあるが、「プランクの長さ」とする学者が多い。プランクの長さとは、長さの最小単位で、物理学的には、 1.616×10^{-36} のマイナス 36 乗メートルということになっている。原子核を構成する陽子の大きさが10のマイナス13乗センチメートルなので、この陽子と超ひも理論の「ひも」の比は、ちょうど太陽系と陽子の大きさに匹敵する。

この「ひも」のさまざまなパターンの振動により、素粒子が生成される。なぜ粒子のように点ではなく、一次元上にひろがった「ひも」なのか。これは自由度の問題である。点だと、点それっきりなのだが、「ひも」だと同じ質量ゼロでも波うったり、形を歪めたり、回転したりと、いろいろな動きが考えられ、その振動に対応する素粒子も無限に現われると考えられる。

ただし、重力の相互作用を生み出す素粒子「グラヴィトン」だけは同じひもではあっても、別のタイプのひもであろうと、推定されている。残りの17の素粒子はすべて、一種類の、両端のあるひもできている、それぞれの揺らぎの違いが別々の振舞いをもたらす。しかし、グラヴィトンは、「輪になった別のひも」と考えられる。このように考えると、重力が極めて小さいことが無理なく説明できる。シンプルこそ真実の証だとする物理学者にとっては、大変魅力的な理論である。

ところで、「超ひも理論」の「超」は「特別小さな」という意味ではない。「超対称性」を指している。では、「超対称性」とは何か。これは「フェルミオン」と「ボソン」との間の対称性のことである。自然界のすべての粒子は、整数または半整数の「スピン」という属性(自転角運動量)をもつ。通常量子力学では、このスピン半整数の粒子を「フェルミオン(フェルミ粒子)」、スピン整数の粒子を「ボソン(ボース粒子)」と区別する。光子をはじめとする力の媒介粒子は、前者に含まれる。クォーク(陽子や中性子などを形成する基本粒子)やレプトン(基本粒子のうち、電磁相互作用と弱い相互作用しか起こさない粒子)は、後者に含まれる。

超対称性の出生以前は、フェルミオンとボソンはまったく性格が異なると考えられていた。フェルミオンとボソンの違いは、同じ種類のフェルミオンあるいはボソンが多数集まったときに、顕著に現われる。たとえば、フェルミオンである電子は、2個以上つめ込んである一つの状態にすることは許されない。これは「パウリの排他律」として知られている。これに対してボソンは、何個でもつめ込むことができる。スピンの性質が違うだけで、この2つのグループは非常に異なる振る舞いを見せるのである。

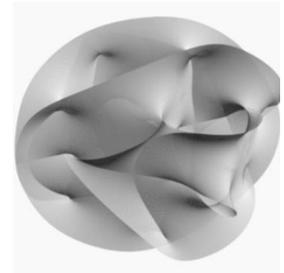
「超対称性」では、ある種のフェルミオンとボソンは、もっと高いレベルをもった粒子が、対称性の崩れのために違った現われ方をしたものにすぎない、と考える。間接的にはあるが、このような超対称性を支持する計算結果もある。

最近の研究では、超ひも理論を発展させた「ブレーンワールド(膜の世界)」が宇宙の新しい姿ではないかと提唱されている。「ブレーン」とは膜のようなものを指す。我々が認識している4次元時空(縦、横、高さの3次元に時間を加えて4次元の世界)は、一枚の膜の上に広がっている。実は、その膜の外側に第5の次元以上の次元(6つないし7つの余剰次元と呼ばれる隠れた次元)が展開されているのではないかと、いうのである。そのような余剰次元はマイクロの世界であり、小さく丸め込まれたような状態になっていると説明されている。

素粒子物理学が明らかにした17の素粒子は、1つを除いて、両端がブレーンワールドにくっついた状態で揺ら

いでいる。しかし、重力を伝達する「グラヴィトン」だけは例外である。それは輪っか状になっているため、我々が住むブレーンワールドから余剰次元に飛んでいくことができる。その結果、グラヴィトンによってブレーンワールド内に伝えられる重力は、ほんの一部だけになる。

このような説明は、数式上ではきわめてきれいに矛盾なく説明できる。そのため、多くの物理学者がかなり有力な説であると考えている。しかし、現時点では実験的には何の証拠もなく、標準理論にまでは至っていない。このような研究方法自体を批判する研究者も少なくない。



弦理論（超ひも理論）

5. 超ひも理論は10次元の世界

この「超ひも理論」は、この世界の次元を10次元と仮定している。我々は3次元空間に時間の1次元をプラスした4次元の時空に住んでいる。宇宙初期には10次元時空であったこの世界が、なぜ現在は4次元時空になっているのか（もしくはそう見えるのか）？これを説明する（しようと試みる）のが「時空のコンパクト化」という考え方である。まず円筒を思い浮かべてほしい。これが宇宙である。これを横に4分割する。4段の重箱のように。これで4次元。今度は縦にショートケーキのように6分割する。これで10次元になる。次元のコンパクト化は、円筒がどんどん細くなり、宇宙初期には存在した、6次元がプランク長さ（10のマイナス35乗メートル）にまで縮まってしまい、円筒が4分割された線になってしまった、と考えるのである。

この10次元の世界で「ひも」はいろいろな動きをする。開いたり、閉じたり、2つに分離したり、逆に1つに合体したり。つまり超ひも理論では、素粒子の多様な世界は、1つの基本的な「ひも」の異なるモードとして、統一적으로とらえられている。振動のモードは無限にあるので、対応する素粒子も無限である。そして、エネルギーのもっとも低い振動のモードに対応するのがクォークやレプトンであり、またグラビトン（重力を媒介する）や光子などの媒介粒子だという。

この「時空のコンパクト化」という理論には、問題がある。宇宙誕生のとき、時空が10次元であったという考えは別に退けなくてもよい。しかし、その10次元のうち、我々の4次元を除いた6次元がどうなったのか、ということは問題として残る。物理的空間の次元の一部をコンパクト化する、その必然性はあるのか、という問題である。

また、拡がりをもつ粒子を取り扱おうとするときには、点状の粒子に通用した研究手法は使えない。従って超ひも理論は、量子電気力学(QED)や量子色力学とはかなり趣きの違ったものにならざるをえない。さらに10次元では、一般相対性理論のリーマン幾何学とはまったく違った構造をしていると考えねばならない。この未知の幾何学を発見(発明)し、それによって超ひも理論は語られる必要がある。

さらに、もっとも根本的な問題がある。当面、理論があまりにも数学的で、物理的コンセプトがあまりはっきりしない点である。この理論には数え切れないほど多くのバージョンがある。それぞれの理論の提唱者たちには、そのうちどれが正しいか判断する手段がない。それぞれのバージョンを研究するグループ間では、お互いの中で言葉さえ通じないという状況さえ生まれている。

さらにこの理論は検証が不可能である。超ひも理論が有効性を発揮するエネルギー領域(10の19乗GeV)に到達する加速器は1,000光年の円周を必要とする。この「超ひも」が存在すると考えられる世界を検証するためには、円周1,000光年の素粒子加速器を建造しなければならない。物理学者がこの理論に惚れ込むのは、数学的な優雅さや美しさ、整合性、というものに対してである。

超ひも理論は有力ではあるが、現時点では単なる仮説の域を出ない。しかも仮説を裏付ける実験は極めて難しい。ヒッグス粒子の事実上の発見の舞台となったCERNでは、現在、超ひも理論を裏づけるデータを得るための実験も計画されている。ただし、CERNの加速器では、ヒッグス粒子の発見が限度で、素粒子の中のひも構造の検出には能力不足である。地球一周どころか、冥王星の軌道ぐらいの加速器が必要だという科学者もいる。数式をあれこれいじるだけで、空想物語をもて遊んでいるだけという批判がある一方、この理論に夢を託し、何とか実証したいと熱中している科学者もいる。これが、現在の物理学の最先端の学問状況なのである。

加速器による検証作業が難しいことは明らかである。そこで、宇宙の観測からこのことを証明できないかと考えている学者たちも少なくない。長い宇宙の歴史の中で、最もエネルギーの水準が高かったのは、ビッグバン直後である。その当時の宇宙のどこかに、「宇宙のひも」と思われる痕跡が残っているのではないかと、そう考え、それを探し出して超ひも理論を証明したいと考えている。この他、ブラックホールの周辺も極端に高いエネルギー状態にある。それゆえ、ブラックホールの観測から実証の糸口が見つかるかもしれない、と期待する科学者もいる。

このような学問的状况は、次の村山齊氏の言葉によく表れている。この項を閉じるにあたり、紹介しておこう。

宇宙論の理論としては、宇宙は膨張し続けるということになっています。この理論の前提としては、アインシュタインの重力理論がありますので、宇宙加速膨張説を否定する人たちの中にはアインシュタインの重力理論が間違っているのではないかと考える人もいます。

アインシュタインの重力理論が間違っているとすると、正しい理論はどういうものになるのでしょうか。今、注目を集めているのが超ひも理論です。超ひも理論の研究者の間では、宇宙は加速膨張するのではなく、その前提となるアインシュタインの重力理論が間違っていて膨張の加速が止まるのではないかと議論もあるのです。もしそうであれば、宇宙の未来は別の運命が待っていることになります。

その一つが泡宇宙です。宇宙の加速膨張がどんどん続いていくと、あるところで泡ができ始めます。泡の外は加速膨張している宇宙なのですが、泡の中には暗黒エネルギーは存在せず、加速膨張をしません。泡がたくさんできるとある時点を境に、泡で宇宙が埋め尽くされ、暗黒エネルギーのない宇宙になります。そうすると、加速膨張も終わります。膨張を続けても加速せずにだんだん減速していくようになると考えられています。このストーリーは、まだ本当かどうかわかりません。超ひも理論の研究からはこのような宇宙も考えられますよと提案されている段階です。」(『宇宙は本当に一つなのか』122-23 頁)

Ⅲ. 人間原理

現代の宇宙論の書物の中に、しばしば「人間原理」という言葉が登場する。人間原理とは、「今のこの宇宙は、我々人間が生存できるように物理定数が調整されている」という考えである。確かにこの宇宙は、我々人間を筆頭に、この地球上の生命体系が存在し得るように、実に巧妙にできている。もしこのような調整がなされていなかったら、我々人間をはじめ、地球上のすべての生命、地球そのもの、太陽も、銀河系も、存在し得なかったことだろう。

宇宙論の最後に、この問題について考えてみたい。

1. 「人間原理」を放棄する近代科学

古代と中世においては、科学と宗教が対立することはまづなかった。両者は、もちつ・もたれつの関係で近代まで歩んできた。近代科学以前の時代は、哲学や宗教が自然に関する研究を担ってきたが、「人間原理」などという言葉が使われることはなかった。たとえ使われなかったとしても、人間原理的な考え方は当然の前提として受け止められてきた。そのような一般的風土あるいは思潮を変えてしまうような空気は、近代科学が勃興し、天動説が揺らぎ始める頃からだった。

このような現象を端的に表す言葉として、「コペルニクスの原理」という言葉が使われる。「コペルニクスの原理」などというと、コペルニクスが「地動説」を唱えたときの科学上の根拠を指しているのではないかと、思うかもしれない。しかし、それは違う。この言葉は、そういう内容とは全く違うニュアンスの言葉として使われている。

コペルニクスは、天動説を否定し、地動説を主張した。その結果、それまで宇宙の中心と見られていた地球は、太陽の周りを回る惑星の一つになってしまった。それ以降、科学はこの地球をどんどん小さな、ごく平凡な存在へと追いやっていく。地球は太陽の八つの惑星の一つに過ぎない。その太陽は、銀河系の辺境にあるありふれた恒星の一つである。その銀河系さえ、宇宙に散らばる数千億の銀河の一つに過ぎない。

その結果、人間の位置や意味も変わってくる。天動説時代には、地球は宇宙の中心にあり、そこに住む人間は神によって創造された特別な存在だった。特権的な地位を付与された者と見なされてきた。ところが地動説は、そのような地球と人間を特別な位置から引きずり落とした。人間は他の物質と比べ、異質な存在というわけではなくなった。こういう考えをもたらした地動説を唱えたコペルニクスこそ、地球と人間をありふれた存在の一つにした張本人である。このような見方を端的に表現したのが、「コペルニクスの原理」という言葉だったのである。

むしろ、コペルニクス自身には、地動説を唱えることによって、地球及び人間の価値を低めようなどという意図は毛頭なかった。彼は、科学的な真理を探究することに自分の使命があるとは考えていた。しかし、それ以上の目論みなど一切なかった。次のコペルニクスの言葉からも、それは明らかである。

「哲学者の仕事は神が人間の理性に許したもうた範囲においてあらゆる事物について真理を探究することであるから、その思想は愚人の判断に従うべきではないと思いますけれども、正義と真理に全く反する意見は避けるべきであると信じます」(『天体の回転について』、13頁)。

それに、コペルニクスの時代には、地球が宇宙の中心であると信じられていたが、そのことは即、地球や人間を特別な存在に位置づけるものだと考えられていなかった。そうではなく、この地球は生成消滅するものである。重くて動きのない澱のような物が降り積もってできた悪い場所で、地下に行けば地獄に行き着く。一方、月より上の広がりには、「エーテル」という重くも軽くもない第五元素によってできている。それは、永遠不変で完全を表わす円運動を展開している。神に近いのはそのような天球の世界であり、地球ではない、というのが一般的な人々の見方だった。もしコペルニクスが「天動説＝地球重視・人間尊重」という考えや、「コペルニクスの原理」などという言葉を知っていたら、目を丸くして驚いたに違いない。

では、コペルニクスの偉大な科学的業績を「コペルニクスの原理」といわれるような中身に変容させたのは誰か。それは、コペルニクスから100年後、啓蒙主義の初期の時代に活躍したフランスの知識人フォントネル(1657年～1757年)とその周辺の人たちだった。フォントネルは、長い間アカデミー・フランセーズの会長を務めた、初期啓蒙主義の代表的人物だった。彼はコペルニクスの科学的な成果を普及させたいと願い、さまざまな活動を展開していた。中でも、1668年出版の『世界の複数性についての対話』という書物は、40版以上を重ね、ヨーロッパの各語に翻訳され、広く愛読された。この書物の中でフォントネルは、一人の侯爵夫人に向かって、地球や月、惑星やさまざまな恒星、そして銀河に至るまでの成り立ちについて、詳しく、分かりやすく説明する。そんな中で彼は、コペルニクスの業績について、次のように述べている。

私は、彼(コペルニクス)に感謝したいですよ。宇宙の中でも一番いい場所(宇宙の中心)に自分を据えた、あの人間の虚栄心を引き下ろしてくれたのですからね。それに私は、地球が今は数ある、ただの惑星の一つに過ぎないのを見て、嬉しく思っているのですよ。(『世界の複数性についての対話』、35頁)

彼は、「宇宙における人間の居場所は何ら特権的なものではない」とか、「この宇宙には特権的な場所はない」という考えを繰り返し述べている。このような表現が、後に「コペルニクスの原理」といわれるような言葉を生み出す背景になった。こういうことが積み重ねられることによって、「コペルニクスが地動説を唱えたので、人間や地球の尊厳を傷つけ、神を冒瀆した」という誤解が流布されるようになったのである。

コペルニクスの業績に対する似たような捉え方は、詩人ゲーテの中にも見られる。彼の次の言葉を読んでいただきたい。(『色彩論』歴史編)

あらゆる発見と信念の中で、コペルニクスの学説ほど、人間精神に多大な影響を及ぼしたものはないだろう。我々の住むこの世界(地球)が、孤立した一つの球体であることが明らかになるやいなや、宇宙の中心という絶大なる特権を放棄することになったのだから。人間の精神に対し、かくも厳しい要求を突きつけられたことは、かつてなかった。・・・

しかしこの学説は、それを認める者に対しては、それまで知られていなかった、いやそれどころか予想すらされていなかったこと、すなわち、自由にものを考え、大きな枠組みで物事をとらえるという思想的立場権利を与え、それに参加するよう誘いかけるのである。

ここでゲーテは、コペルニクスの科学的な業績を、人間の間違った特権意識を放棄させ、自由な思想の基盤を与えるものと捉えている。これこそ、「コペルニクスの原理」といわれる考え方である。それは、啓蒙主義の根底に流れているもので、当時の知識人社会に広まっていった。啓蒙主義が科学をそのように捉えれば捉えるほど、教会は科学に警戒心を持ち、反動的な行動を取り始めた。ここに、科学と宗教の分離・対立が起こってくる。以降次第に、科学は自然を対象にし、宗教は人間の内面に関わる、という棲み分けが起こってくる。

18世紀から19世紀になると、キリスト教は科学に対し対立・否定の道を選ぶ。信仰は人間の内面の世界にのみ関わると考えるようになる。啓蒙主義や近代の科学に対し、真正面からの対話を避けたのである。その結果、人間存在の意味や人間の尊厳性を、物理的な人間の居場所などには求めなくなった。人間には、宇宙を認識でき

るという事実がある。また人間精神に宿る道徳性がある。これこそが人間を人間たらしめているものである。宗教の意義はそこにある、と考えるようになった。

「コペルニクススの原理」と同じような問題が、19世紀から20世紀において、「ダーウィンの進化論」に関しても起こった。キリスト教は、ダーウィンの進化論を科学的に正当に評価しなかった。むしろ、ダーウィンの研究成果がもたらす「既存の価値観や世界観への影響」を重要視し、進化論に否定的な態度を取る道を選んでしまった。これは、コペルニクススの原理に似た問題だった。

ダーウィン自身は、自然淘汰と突然変異によって生命が進化したことを、科学的に立証しようと努力した。ところがそれは、教会の従来への考えに真っ向から挑戦するものと捉えられた。ダーウィンは、神のかたちで造られた人間の特別な地位を否定し、人間を動物と同列に置き、被造物の単なる一存在にしてしまった、それは人間と神とを冒瀆するものである、という風評が教会内に蔓延したのである。「ダーウィンの原理」などという言葉はないだろうが、そのように言っても過言ではない風潮が、教会を脅かしたのである。このような批判は、全くの的外れである。教会の伝統的な考え方が科学的なものによって破壊されてしまうことを恐れるメンタリティーは、いつの時代においても根深いものがある。

2. 不思議な今の宇宙の物理定数

コペルニクスにしても、ダーウィンにしても、科学が宗教を否定する意図があったわけではない。ただ、科学的な研究が従来への宗教的な価値観や世界観によって妨げられるようなことがあってはならない、と考えていたことは間違いない。実際教会は、科学の成果が従来への教会で教えていたことと異なる場合、科学に対し過剰反応を示した。近代科学は、神という超自然的な存在を持ち出さず、この世界を理解する道を選んだのだから、それもやむを得なかったのかもしれない。

しかし、科学者がすべての科学的な真理を追求するにあたり、神を持ち出さずに物理的現象そのものを探究するのは当然のことである。科学的研究の途中で神を持ち出すことは、科学の世界に異質な前提と論理を混入させることで、科学的な探求に混乱が生じる。科学的成果は、その時点でストップしてしまう。科学的な作業においては、宗教的なものを絡ませてはいけぬ。あくまでも科学の方法論で、徹底的に真理を追求すべきである。ただここで重要なのは、科学の限界をわきまえておくことである。科学的方法論による研究成果は、すべての疑問に答えることができるというわけではない。

科学者であればあるほど、科学的な研究の限界をよく知っている。宗教的な領域に属する問いに踏み込むことの間違いをわきまえている。しかし、すべての科学者がそういうわけではない。宇宙の謎に迫っていく過程の中で、合理的精神だけでは割り切れない現実とぶつかるのもまた、事実である。いくら科学者であっても、人間である。人間である限り、科学的な問いと同時に、宗教的な問いに対峙しなければならないことも当然である。科学的な探求において、宗教的な問題意識を持ち込むことは間違っている。同様に、世界の事象に対する宗教的な問いを全面的に拒否し、科学だけですべてを割り切ろうとするのも、高慢である。両者はできる限り厳しく区別しなければならない。しかし、どちらか一方を切り捨てたり、問いそのものをないかのように無視することはやめた方がよい。

アインシュタインは「私は、神がどのような原理にもとづいて、この世界を創造したのかを知りたい。そのほかのことは小さなことだ。私がもっと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だ」と述べている。彼はある回想録の中で、12歳の時に信仰心を失う経験をしたと語っている。さらに他の手紙の中で、「私にとって神という言葉は、人間の弱さの表れであり、その産物に他ならない」と述べてもいる。従って、アインシュタインの神概念、あるいは宗教理解や信仰心は、ユダヤ教やキリスト教、あるいは既存のいかなる宗教が説くものとも異なる。

しかし、それでも、アインシュタインの科学的な追求精神の中に、宗教的な問題意識が常にあったことは間違いない。アインシュタインによるこの言明は、特定の宗教的な意味や意図があったわけではない。従って、アインシュタインの個人的な信仰について論じることは避けた方が賢明である。しかし、彼が相対性理論を追求する過程で、学問に必然的に付随するような宗教的な問いかけについては、最も大切な事柄だとして理解していたのである。それはたぶん、理神論に近い考え方なのだと思う。彼の発言は、今日の物理学者たちが問題にしている

「人間原理」という問題意識に通じている。

二十世紀には物理学が大きく進展し、この宇宙の意外な本性が次々と明らかにされてきた。いつ、どこで、誰が測定しても、きちんとした手続きを踏みさえすれば、同じ値になる物理量のことを「物理定数」という。例えば、基本的な力の強さや、基本粒子の電化や質量の値などである。このような「物理定数」がなぜ今のような値になっているのか、この点が、多くの物理学者たちにとって、大きな関心の的になっている。村山齊氏は、宇宙の長い歴史を振り返り、次のように述べている。(『宇宙はなぜこんなにうまくできているのか』、175-177 頁)

あまり科学者が使うべき言葉ではありませんが、これは奇跡のような話です。暗黒エネルギーがほとんどありえないような値だったから人間が生まれ、その知能を振り絞って宇宙の謎を解こうとしている。まるで、そこで人間が生まれるように誰かが「火加減」を微調整しながら宇宙を作り上げたかのようにも思えます。

そんなふうに見えるのが暗黒エネルギーだけなら、真空のエネルギーを前提に計算すること自体が間違っていると考えられるでしょう。しかし実のところ、そんな奇跡を感じさせるものはほかにもたくさんあります。さまざまな物理法則を改めて見直すと、宇宙に人間が生まれるための条件がそり過ぎているように感じるのです。

単純な話、たとえば重力の強さがちょっと違うだけで、太陽と地球の距離は今とは異なるでしょう。太陽にちょっと近ければ水は水蒸気になり、ちょっと遠ければ凍ってしまいますから、そこに生命体は生まれません。

勿論、地球が存在しなかったとしても、ほかの惑星には生命が出現した可能性はあります。でも、たとえば素粒子の質量が今とは少し違ったとしたらどうでしょう。仮に、アップクォークに 10 倍の質量があったとして計算すると、陽子は中性子よりも 10%ほど重くなります。これは大きな違いで、そうなると陽子はすべて崩壊して中性子になってしまうので、原子をつくることができません。生命どころか、星をつくることもできないわけです。それ以外にも、定数をちょっと変えただけでも星も生命も生まれなくなる現象は少なくありません。電磁気力や強い力がほんの少し弱かったり強かったりするだけで、この世は全く違う様相を呈するのです。

しかし現実には、どの法則も星や人間が生まれるのに「ちょうどよく」できています。知能を持った生命体がいなければ物理法則も考えられないので、当たり前と言えは当たり前なのですが、これはやはり不思議なことでしょう。どう考えても人間が誕生しない可能性の方が高いのに、私たちはこうして存在している。偶然にしてはできすぎです。

そのため物理学者の中には、自分たちの研究している基本法則や物理定数などが、すべて「人間ができるようにつくられている」と考える人も出てきました。これを「人間原理」と言います。とても物理学の専門用語とは思えない雰囲気という言葉ですよね。むしろ、哲学書や宗教書に出てきそうな言葉です。

実際、これは科学者にとってはなかなか受け入れがたい考え方でしょう。

...

それに、もし人間原理が正しいとしたら、「ではなぜ人間が存在するようにつくられたのか？」という疑問が出てきて当然でしょう。それを説明しようと思ったら、神様を持ち出すのがいちばん手っ取り早くなってしまいます。人知を超えた超越的な存在が、人間をこしらえるためにちょうどよく宇宙の法則を定めたのだ、——というわけです。そういう考え方も十分あり得ますが、これには科学者の出番はありません。

現在の宇宙の法則には、さまざまな物理定数がある。力には、重力、強い力、電磁気力、弱い力などの 4 つがあることは既に述べた。ところがその物理定数は、まるで人類が誕生するように値が調節されているとしか思えないものである。

強い力は近距離でしか働かない力のことである。その力の及ぶ範囲では、電磁気的な力に打ち勝ち、陽子を原子核の内部に閉じ込めておくことができる。もし強い力が今より少しでも弱いとすれば、電磁気力の反発力が相対的に強くなる結果、陽子はそもそも原子核の内部に入ることはできなかつた。すると、初期宇宙の元素合成の時期に、水素原子核(陽子)よりも大きな原子核は生じない。そうなると、この宇宙は水素だけの世界で終わってしまうことになる。反対にもし強い力が今より少しでも強いと、陽子同士が速やかに結びついてしまい、水素(つまり単独の陽子)は早々に枯渇する。水素の存在しない宇宙は、今の宇宙とは似ても似つかない宇宙になったはずである。水素は、今の宇宙に存在する元素の 99%を占めているのだから。

もう少し大きなスケール、「重力」の場合を考えてみよう。もし重力が今より少しでも強いと、太陽やその他の恒星は押しつぶされ、今より小さくなる。強い重力で圧縮された中心部の核融合反応は急速に進み、星は速やかに燃え尽きてしまう。地球やその他の惑星も、今より小さなサイズになり、表面の重力は強くなる。すると我々のような生物は、自分の重さで潰れてしまう。逆にもし重力が今より弱かったなら、天体のサイズは大きくなる。すると、中心

部の核融合反応はゆっくり進み、星の寿命は延びる。そのような宇宙で、我々が出現し得たかどうかは、はなはだ疑わしい。

このように、物理定数が今と違っていたらという仮定の話は、いくらでも続けることができる。もう十分かなと思いつつも、この宇宙が本当に人間の生存のためによくできていることを確認するため、あえて、もう少し続けよう。

もし電磁気力の強さを、少しでも今と違うものに変えると、生命は生まれなくなる。強い力の値をちょっと弱くすると、星の中で元素を合成する「トリプルアルファ反応」というものが起こらなくなる。これは、3個の「ヘリウム4」の原子核が結合して「炭素12」ができる核融合反応のことである。もしこの反応が起きないと、炭素や酸素のような生命に不可欠な元素が生成されない。さらにこの強い力が働かなくなると、陽子と中性子とを原子核の内部に留めておくことができなくなる。すると、正の電荷をもつ陽子は原子核から飛び出て、バラバラに飛び散ってしまう。

このように電磁気力と強い力の値が今と少しでも違えば、炭素原子が不安定になったり、水素原子が生まれなかったり、重水素が不安定になるなど、さまざまな不都合が生じる。そうなると、この地球は、知的生命体が誕生するのに都合よい領域ではなくなる。我々人類は、よほどの条件が整わない限り、この宇宙に存在できなかったことは確かである。我々が住む宇宙は、人類を含めた生命をつくるために絶妙にデザインされている。これは、否定しよのない観測事実であって、宗教的ドグマから述べているわけではない。

もしこの宇宙が今より弱い勢いで膨張すると、膨張はすぐに止まってしまう。そういう宇宙では、生命の進化は起こらず、人類は生まれることはない。この宇宙は1,000万年後あるいは1億年後にはつぶれてしまう。一方宇宙を膨張させる力が少しでも強すぎると、膨張する速度が速すぎ、ガスが十分に固まる前に宇宙は膨張してしまう。すると、ガスは固まれない。つまり、星もできなければ、炭素も水素もつくられず、生命も人類も生まれてこない。

この宇宙は、曲率がゼロになるようにできている。これは、ほっておけば自然にそうなるわけではない。それは、非常に難しいさまざまなバランスがとられて、初めて可能になる。もし宇宙が現在のようにきわめて平坦なものであれば、人間は存在していない。人間のために絶妙に調整されているのがこの宇宙である。

我々の脳内の情報処理には、量子力学が深く関わっているという考えを「量子能理論」という。この理論の創設者として知られる宇宙物理学者、オックスフォード大学教授ロジャー・ベンローズ(1931年～)は、「神様がわれわれの住んでいる宇宙と同じような宇宙を創り出すためには、途方もなく小さな空間の中の定数が必要である」と述べている。つまり、適当に物理定数を決めても、決して今の宇宙はできない。我々が住めるような宇宙がつくられる確率は、10の10の123乗分の1だという。私には、何を根拠にそう言っているのかよく分からないが、とにかく、これはまずあり得ない、という確率であることだけは分かる。

このような考えを述べると、ある科学者たちは、測定結果は測定結果として、そのまま受け止めればよい。確かに、4つの力は、それぞれ現在の宇宙を保持していくのに極めて都合の良い物理定数の値を持っている。基本粒子の質量や電荷、その他もろもろの物理定数も同様である。だから何だというのだ。こういう物理定数だから、こういう宇宙ができた。こういう宇宙ができたから、我々が存在する。ただそれだけのことではないか。不思議でも何でもない。そんな風に反応する人々も少なくない。

しかし、科学者すべてがそういう反応をするだけではない。そういうだけでは済まされないと感じている科学者もたくさんいる。なぜこの宇宙が今のような物理定数になっているのかということについて、科学者として何とか解を出したいと考えるのも自然なことである。むしろ彼らは、神や奇跡を持ち出すわけにはいかない。彼らにとってそれは、宗教的な問いではなく、科学的な問いだからである。

3. 「人間原理」に悩む科学者たち

19世紀までの宇宙学では、「人間原理」などという言葉は使われなかった。それでも、人間原理的な宇宙理解はごく自然のこととして受け入れられてきた。しかし、20世紀に入ると、宇宙学や物理学は次第に科学的な方法論を確立し、宗教的な意識や問題をできる限り取捨して科学を営むのが王道になった。そのような流れの中であるから、人間原理などということの問題にしない科学者たちが主流を占めていた。しかし、20世紀後半には、人間原

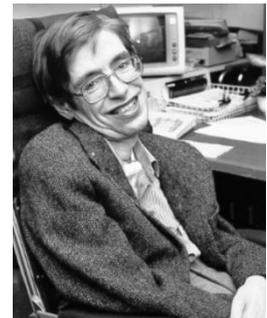
理を念頭に置き、今の宇宙の物理定数について論じる物理学者たちも次第に多くなってきた。そのような中で、4人の代表的な科学者を挙げておこう。

その第一は、イギリスの日食観測隊を率いてアインシュタインの一般相対性理論の正しさを証明し、その理論をイギリスに広く紹介した天体物理学者アーサー・エディントン(1882年～1944年)である。二番目は、二十世紀の物理学に華麗な足跡を残し、量子力学及び電磁気学の基礎づけに大きな貢献をした天才理論物理学者ポール・ディラック(1902年～1984年)、三番目は、「定常宇宙論者」だったイギリスの3人組の一人、ケンブリッジ大学で数学と宇宙学を講じていたハーマン・ボンディ(1919年～2005年)、そして四番目は、宇宙人の存在などについて多くの話題をまき散らしたイギリス王立協会会長のマーティン・リース(1942年～)である。

彼らは、「人間原理」的な問題を論じたが、常にそういう言葉を使っていたというわけではない。人間原理という言葉は初めて使ったのは、プリンストン大学の宇宙物理学者ロバート・ディッケだった。彼は、「宇宙マイクロ波背景放射」の発見者から相談を受けた人物である。当時ディッケは、星の一生に関する研究を行い、現在の宇宙に存在する元素合成のプロセスを明らかにしようとしていた。

1950年代も終わりの頃になると、二つのことが明らかになってきた。一つは、水素とヘリウム、その他わずかな軽い元素は、初期宇宙の高温高压状態の中で合成されたことである。もう一つは、もっと重い鉄などの元素や我々の体内にある重い元素は、星の中心部で構成され、星の寿命が尽きて爆発したときに宇宙空間にばらまかれたことである。

このような研究成果を踏まえたディッケは、1961年の論文の中で、次のように述べた。もし宇宙が今よりずっと昔に誕生していたとすれば、この銀河系の恒星の大半は既に燃え尽きていたことだろう。逆にもし宇宙が今より若いときに誕生した場合には、地球の核を構成している鉄や、我々生物に必要な不可欠な炭素などの元素は、いまだ存在しないことだろう。この地球上に人間が存在・生存し得るには、宇宙は歳を取りすぎていても、若すぎていてもダメだった。ちょうど今の宇宙の年齢でなければならなかった、と。



スティーヴン・ホーキング

人間原理という言葉はディッケに由来したが、人間原理という考えを物理学者たちの間に広めたのは、ケンブリッジ大学の物理学者ブランドン・カーター(1942年～)だった。ディッケが自分の考えを公表してからおよそ10年後の1970年に、カーターはプリンストン大学で開かれた国際会議において、人間原理に関する講演をした。(車椅子の物理学者)スティーヴン・ホーキングは、その異様なアイデアに注目し、論評した。ブラックホールの名づけ親だった物理学者ジョン・ホイラーは、カーターに人間原理のことをきちんと論文にまとめるべきだと進言した。そこでカーターは、1973年に「大きな数の一致と宇宙論における人間原理」と題する論文を発表した。彼は、その論文を次のような文章で始めている。

コペルニクスが与えてくれた教訓は、「われわれは宇宙の中心という、何か特権的な位置を占めているかのような、根拠のない思い込みをしてはいけない」という健全なものだった。しかし残念ながら、この教訓を過度に拡張して「我々の置かれた状況は、いかなる意味においても特権的なものではありえない」という、きわめて疑わしいドグマにしてしまう傾向が強い(そしてその拡張は、必ずしも無意識のうちに行われているわけではないのである)。(『宇宙はなぜこのような宇宙なのか』、131頁)

この論文においてカーターは、コペルニクスについて2つの点を指摘した。一つは地球を宇宙の中心から追放したこと、もう一つは人間が勝手な思い込みによって自分を特権的な位置に置いたことを追放したことである。そしてカーターは、むしろコペルニクスは正しかったけれど、反対の極端に走り、人間はいかなる意味においても特権的なものではないと考えるべきではないと警告した。

1970年ごろは、宇宙マイクロ波背景放射が発見されてから5年後のことであり、「ビッグバン理論」が天文学者や物理学者の間で急速に受け入れられつつあった時だった。カーターは、このビッグバン理論を背景に、この宇宙が人間にとって実に都合よくできているという「弱い人間原理」を明確にしたのである。

このようなカーターの「弱い人間原理」は、物理学者たちを十分に納得させることができたわけではない。むしろ、賛否両論が各方面から起こった。一番強い反対意見は、「観測選択効果」という考え方だった。それは、次のよう

なものである。

この宇宙は、人間が存在できるようにという目標のもとに形成されてきたわけではない。我々人間は、たまたま我々が生きることのできる条件の宇宙ができ上がったのでここにいるに過ぎない。例えば、宇宙の温度は、誕生直後から今に至るまでどのように変化したかが分かっている。宇宙の始まりの頃は高温のプラズマ状態だったが、遠い未来になると星が死滅し冷え切ったものになる。我々はいずれの時代にも存在し得ない。ただ、長いプロセスの中で、人間の生存条件が満たされている「今という時」にたまたま存在しているだけに過ぎない。ただ、それだけのことである。そういう見方をすれば、確かにその通りである。

なおカーターは、「弱い人間原理」からさらに一步進んで、「強い人間原理」をも主張した。

宇宙は(それゆえ宇宙の性質を決めている物理定数は)、ある時点で観測者を創造することを見込むような性質を持っていなければならない。デカルトをもじって言えば、「我思う。ゆえに世界はかくのごとく存在する」のである。(『宇宙はなぜこのような宇宙なのか』、155 頁)

ここでは、物理定数が特定の値を取るの、観測者としての人間が存在することを想定している、という。イギリスの天文学者ジョン・バーロー(1952年～)とアメリカの数理論理学者フランク・ティプラーは、1986年に有名な「人間的宇宙原理(The Anthropic Cosmological Principle)」という本を書き、カーターの「強い人間原理」に賛意を表明した。彼らは、この書物の中で人間生存にとって都合の良いさまざまな物理現象を例示し、この宇宙では必ず知的生命体が生じると主張したのである。

「強い人間原理」を主張することは、果たして科学者としての発言として妥当なことだろうか。私自身は、そこまですぐと、宗教の世界にまで踏み込み過ぎているように感じる。「強い人間原理」は、キリスト教の創造説やインテリジェント・デザイン説と区別することが難しくなる。科学者の発言としては、慎重を期すべきだと思う。

4. 「多宇宙」理論は「人間原理の問題」を解決するか

現代の宇宙物理学者のほとんどは、この宇宙の物理定数が人間の生存のために好都合な値になっている事実を認める。しかし、人間原理というような、どこか宗教的な匂いを払拭できない用語は使いたくない。そこでこの問題を、科学的な確率の論理で説明したいと考え、「多宇宙」という概念を持ち出している。

例えば、ビッグバン理論においてインフレーション論を提唱した、現代日本の代表的宇宙物理学者佐藤勝彦氏は、次のように述べている。

私自身はといえば、物理学の法則だけでこの世界のことをすべて説明できれば理想的だと考えています。人間原理という概念を物理学は安易に受け入れるべきではないというのが基本的な立場です。ただ、最近の人間原理の考え方には、科学的に認められるものが生まれてきているとも考えています。

それは、マルチバースの考え方に立った人間原理です。インフレーション理解が予言するように、宇宙が子宇宙、孫宇宙、・・・と無数に生まれているならば、それぞれの宇宙が持つ物理法則もまた無数に存在するはずで、それらの中には、人間が生存するのにちょうどよい物理法則があっても不思議ではありません。そして、私たちの宇宙がたまたま、そういう物理法則を持つ宇宙だったのだ、とする考え方です。

これには皆さんも納得できるのではないのでしょうか。この宇宙を認識する主体である私たち人間は、ほかの宇宙を認識することはできません。だから、たった一つの宇宙がたまたま人間に都合のいいよう絶妙にデザインされていることをふしぎに感じますが、実はそれは、無数にある宇宙の中で、私たちの宇宙がたまたま人間が生まれるのに都合のいい宇宙だったにすぎないというわけです。そのような宇宙だからこそ生まれた人間が、この宇宙の物理法則について認識していくと、それは人間が生まれるように都合よくできていた、これは言ってみれば当たり前のことです。そして、そのような私たちの宇宙が、たとえベンローズが言ったように10の10の123乗分の1というわずかな確率でしかつくられないとしても、宇宙が無数にあるのなら、そのうちの一つが私たちの宇宙であっても何も不思議ではありません。

このように、インフレーション理論が予言するマルチバースという宇宙像を前提にすると、人間原理についても論理的な説明が可能になってくるのです。(177-78 頁)

今日、我々が住むこの宇宙以外にも別の宇宙が存在するという考えは、物理学者の間で増えている。その結果、この宇宙を「単一宇宙(Universe)」と見なさず、「複合宇宙(Omniverse—オムニバース)」とか「多元宇宙(Multiverse—マルチバース)」と考えようとしている。例えば、アレキサンダー・ビレンケン(宇宙は「無」から生まれ

たと主張したことは既に述べた)は、宇宙は我々の宇宙に限定する必要はなく、他にいくらでも生まれてくる可能性がある」と主張している。

ここで、注意しておくことがある。この「多宇宙」は、素粒子物理学において最近脚光を浴びている「超ひも理論」で論じられている「10次元の宇宙」という話とは異なる。そこでの「10次元の宇宙」というのは、今の4次元の宇宙に並行して、別の次元を含んだ宇宙が存在していると仮定すると、力の統一理論の問題が解決するという話である。ところが、ここでいう「多宇宙」は、人間原理を確率的に説明するために仮定した話である。それは、今の宇宙と基本的に変わらない宇宙が無数に出来上がっているはずだ、という仮説である。

あるいは、アメリカのマックス・テグマーク(1967年～)もまた、我々の宇宙と同じような宇宙がビッグバンのときにたくさんできたはずだと考えている。彼の計算によれば、2の10の18乗もの数の宇宙ができたという。それらは、原理的には同じ時空にあるが、実質的には関わりをもてない場所にある(137億年の前に誕生したのだから420億光年遠ざかっている)。従ってそれは、「別の宇宙」と呼んでもいいのではないかと主張している。

ビッグバン理論において、最近ではインフレーション理論を認める学者が増えている。ある科学者たちは、そのインフレーション理論を、多宇宙を生み出す根拠に利用している。

インフレーション理論によれば、宇宙誕生後の10のマイナス35秒後から10のマイナス34秒後までの短い時間に、宇宙空間は「指数関数的」に膨張したことになる。ここで「指数関数的に膨張する」というのは、ある時間間隔で空間が2乗に膨張するということである。インフレーション理論では、この一瞬の間に、宇宙空間は最低でも10の30倍以上に膨張したと考える。それは、我々の体を構成している細胞に含まれているDNA分子の一つ一つが銀河系ほどの大きさになるぐらいの途方もない膨張になる。しかもその宇宙空間の膨張は、エネルギーを含んだままの空間である。このインフレーションにおいて宇宙が急激に膨張するとき、早くインフレーションを起こして膨張する場所とインフレーションをまだ起こしていない場所とが、小さな泡のように混在する。このような小さな泡から、多数の「子宇宙」や「孫宇宙」が生まれてくるという可能性がある。

かつては、ビッグバンの直前に、今の宇宙ができ上げるためにはインフレーションという出来事がほんの一瞬起こったはずであるという提案が、ここでは「インフレーションを起こしている空間」という話に変わってくる。そして、そこに多宇宙の誕生を想定し、我々の宇宙は無数に生じる泡宇宙の一つに過ぎない、となってくる。そしてもし宇宙がたくさんあるとすれば、物理定数の問題も、人間原理をもち出さなくても説明できる。それは、人間による「観測選択効果」の問題になってくる、と論理が展開する。

ここには、今の宇宙を説明するために仮定されたインフレーションを、人間原理を説明するために用いるという循環論法が存在する。ところが、多くの物理学者がこのような論理展開を支持している。多宇宙を実在の世界と認め、今の宇宙の物理定数を確率の問題に引き下げたいからである。観測も実験も不可能な多宇宙である。にもかかわらず、物理学者がたくさん宇宙の存在を確信できてしまうのはどうしてなのか。青木薫氏は、それは量子物理学者の実感であり、論理である。これまで、量子力学の世界はそのような論理で、数多くの問題を解決してきた、と解説する。

COBEグループによる「ゆらぎ発見」の報道に接し、物理学者の中には、改めてこう感じた人が大勢いたのではないだろうか。「これ(宇宙の誕生)が一度きりの出来事であるはずがない」と。

わたし自身、そう感じた者の一人だった。「二度あることは三度ある」と世間では言うけれど、物理学者に言わせれば、「起こりうることは必ず起こる、何度でも起こる」のである。

物理学者は、この「起こりうることは必ず起こる、何度でも起こる」という考え方を空気のように吸い込んで物理学者になっている。それはいわば、物理の世界の暗黙の了解、一種の常識なのである。しかしそれは量子的な世界での常識なので、日常的な古典物理学にもとづく常識からすると、なぜそんなことが言えるのかと不思議に思われるかもしれない。

青木氏は、この後、「これはけっこう重要なポイントなので、簡単に説明しておこう」と述べ、古典物理学の決定論の世界に対し、量子力学の世界の違いを強調する。

それに対して量子的な世界は、「禁止されていること以外は、すべて強制される」という奇妙な世界なのである。しかしすべて強制されるとは、いったいどういう意味だろう？

...

「禁止されていること以外は、すべて強制される」という量子的な世界観からすると、ビッグバンが一度でも起こったということは、ビッグバンは禁止されていないということを意味し、従って、強制される。ビッグバンの道は、賑わいはどうであれ、人が通る道だと考えられるのである。

1992年のCOBEの発表に接した時、「宇宙は何度も誕生している。おそらく宇宙はわれわれの宇宙だけではないのだ…」とわたしが感じたのは、そういうわけだったのだ。

そしてじっさい、そのころにはすでに、いくつかの多宇宙ヴィジョンが提唱されていたのである。

正直言うと、私には、今一つこの論理展開が呑み込めない。「禁止されていないことは強制される」というのであれば、これまで提案されている「いろいろな多宇宙のモデル」は皆強制されることになるのだろうか。もし、ビッグバンは一度しか起こらないと物理学者が考えるなら、それは禁止されていないことなのだろうか。そしてそれは強制されることなのだろうか？ 私も、「インフレーション+ビッグバン」という理論が、現時点で「今の宇宙を一番納得させてくれる理論」だと思う。しかし、青木氏の言明は、明らかに科学には実証が不可欠であるという道を踏み越えている。それは、宗教の世界の論理である。

私個人は、ビッグバン理論であっても、インフレーション理論であっても、多宇宙であっても、事実が本当にそういうふうにおこったと実証できるのであれば、そう信じたいと思っている。そういう風に受け入れること自体は、信仰者として全く問題はない。ただ、「ビッグバン+インフレーション」モデルを、ここまで幾重にも論理展開を重ねられると、それを土台に人間原理の問題を「観測選択効果」という問題にすり替えるため屁理屈を言っているようにしか見えない。

実際問題として、このような多宇宙の存在を我々が認識できるのだろうか。仮に多宇宙が存在するにしても、我々の宇宙とは因果関係がない以上、実験や観測によって確認できるわけではない。それは、我々とは無縁な世界の話である。もし観測ができ、認識できるのであれば、因果関係があるということになり、別の宇宙ではない。この宇宙の一部という話になる。すると、「多宇宙」にはならない。村山斉氏の「多宇宙」に関する言及を紹介しておこう。

もちろん、これは仮説の域を出ない話です。マルチバースの存在は、観測によって検証することもできません。もし観測できたら、その宇宙は私たちの宇宙の中にあることになるので矛盾してしまいます。

しかしいまのところ、まるで宇宙が人間のためにつくられているように思えることを、「神様抜き」に説明する方法は、マルチバース以外にありません。無数に生まれた宇宙の中で、この宇宙だけが人間をつくり出す条件を揃えていた。人間の生まれなかった宇宙は誰にも観測されないので、存在そのものが認識されない。したがって、そこでどんな物理法則が働いているのかも調べられません。人間を生んだこの宇宙だけが存在を認識されているのだとすれば、そこで働く法則が人間のためにできているのは当然でしょう。

そう考えると、この宇宙のことが何ともいとおしくなってきます。無数の宇宙が生まれたことに何の目的もないと思いますが、この宇宙はまさに人間のために用意されたといえるのかもしれません。あるいは、宇宙のために人間が用意されたということもできるでしょう。人間のいる宇宙がなければどんなにたくさんの宇宙が生まれただとしても、それは存在しないのと同じこと。しかし「この宇宙」に人間がいるからこそ、こうして、「それ以外の宇宙」の存在も予想してもらうことができるのです。(『宇宙はなぜこんなにうまくできているのか』、182頁)

人間原理とは、科学者が宇宙の問題を科学的方法論で突き詰めているとき、自然に起こってくる科学の領域を超えた世界でぶつかる問題である。この宇宙に何らかの目的があったのか、という問いである。それは、Howの問題からWhyの問題に踏み込んでいく。しかし、「多宇宙」というのは、確率の問題にすれば、何でもありと言い得る。しかも今のところ、それ以外には有効な道は見つかっていない。それゆえ、現代の科学者たちが、それにすがりついている、という理論に他ならない。

おわりに

ここまで来ると、キリスト者にとって、信仰の世界を持ち出さざるを得ない。聖書を開くべき時が来たと思う。イザヤ書は、神が全被造物の創造者であることを明らかにしている。神は、「天を造り出し、これを引き述べ」た方である(イザヤ 42:5)。神は、「このわたしが地を造り、その上に人間を創造した。わたしはわたしの手で天を引き延べ、その万象に命じた」と宣言している(イザヤ 45:12)。

「天を創造した方、すなわち神、地を形造り、これを仕上げた方、すなわちこれを堅く立てた方、これを茫漠としたものに創造せず、人の住みかにこれを形造った方、まことに、この主がこう仰せられる。『わたしが主である。ほかにはいない。』」(イザヤ 45:18)。

この宇宙論の講演を閉じるにあたり、最後にアインシュタインの金言を紹介させていただこう。「宇宙について最も理解しがたいのは、それが理解可能だということである。」多くの科学者が、この言葉を好んで引用している。おそらく、このアインシュタインの驚きが科学者たちの実感だからであろう。この宇宙は、人間存在のすべてを超えた、実に巨大な、実に神秘に満ちたものである。にもかかわらず科学者たちは、それを理解できると信じて、理性的・合理的に追求し、果敢に挑んできた。そして、驚くほどの成果を上げ、未知の世界を明らかにしてくれた。この事実は、宇宙の不思議さに勝るとも劣らぬものである。想像を絶する巨大な宇宙に挑み、極限を超えた微粒子の世界にまで踏み込んでいる科学者(人間)たちの能力の不可思議さに、私自身はしばしば呆然と立ち往生する。

科学者はこの宇宙をそのまま受け入れ、理解可能なものとの前提で学問的探求を進めている。このような立場は、哲学的に言えば「批判的な実在論者」ということになる。そして、このような立場を保証するのは、キリスト教神学にある。つまり、神が造られたこの宇宙を、神が「神のかたち」に造られた人間によって理解可能であるのは、当然のことなのである。むしろ、このような論理は科学の論理ではない。聖書が説く教えであり、宗教や信仰の論理である。

キリスト者は、聖書に啓示された神をそのまま受け入れる。その神による宇宙の創造という啓示をもそのまま信じる。しかも、その神は、人間を「神のかたち」に創造された。そして、その人間に、全被造物の管理を託されたことを信じている。従って、批判的な実在論の立場こそ、科学の立場であり、キリスト教神学の立場に他ならない。

宗教を持ち出すべきではない時に持ち出すのは間違っている。と同時に、持ち出すべき時に持ち出さないのも間違っている。キリスト者はしばしば前者の間違いを犯す。科学者はしばしば、後者の間違いを犯す。両方とも、愚かである。

この点については、次回の「宇宙の創造(創世記 1 章の神学的考察)」の講演において、さらに詳しくふれたいと思う。ご期待いただきたい。

参考文献

<ヒッグス粒子に関する参考文献>

レオン・レーダーマン著、高橋健次訳『神がつくった究極の素粒子』(草思社、1997年)
須藤靖著『ものの大きさ 自然の階層・宇宙の階層』(東京大学出版会、2006年)
ポール・ハルパーン著、武田正紀訳『神の素粒子』(日経NG社、2010年)
フランク・ヴィルチェック著、吉田三知世訳『物質のすべては光』(早川書房、2009年)
橋本省二著『質量はどのように生まれるのか』(講談社、2010年)
中嶋彰著『現代素粒子物語』(講談社、2012年)
フランク・クローズ著、田中敦等訳『ヒッグス粒子を追い』(ダイヤモンド社、2012年)
浅井祥仁著『ヒッグス粒子の謎』(祥伝社、2012年)
竹内薫著『ヒッグス粒子と宇宙創生』(日経プレミアシリーズ、2012年)
青野由利著『宇宙はこう考えられている』(筑摩書房、2013年)17-74頁
イアン・サンプル著、上原昌子訳『ヒッグス粒子の発見』(講談社、2013年)
大栗博司著『強い力と弱い力』(幻冬舎、2013年)

<ニュートリノに関する参考文献>

デニス・オーヴァバイ著、鳥居祥二訳『宇宙はこうして始まり、こう終わりを告げる』(白揚社、2000年)305-44、475-506頁
小柴昌俊著『ニュートリノ天体物理学入門』(講談社、2002年)
『日経サイエンス、ニュートリノ特集、2013年8月号』(日経新聞社、2013年)

<量子論に関する参考文献>

ロジャー・ベンローズ著、中村和幸訳『心は量子で語れるか』(講談社、2001年)
佐藤勝彦著『「量子論」を楽しむ本』(PHP文庫、2005年)
ロジャー・ベンローズ著、竹内薫訳『ベンローズの<量子脳理論>』(筑摩書房、2006年)
スティーヴン・ホーキング著『ホーキング、宇宙と人間を語る』(エクスマレッジ、2011年)
吉田たかよし著『元素周期表で世界はすべて読み解ける』(光文社、2012年)
吉田伸夫著『明解量子宇宙論入門』(KS物理専門書、2013年)

<素粒子に関する参考文献>

朝永振一郎著『量子力学Ⅰ』(みすず書房、1969年)
W・パウリ著、藤田純一訳『物理と認識』(講談社、1975年)
朝永振一郎著『鏡の中の物理学』(講談社、1976年)
B・デスパーニャ著、町田茂訳『量子力学における観測の理論』(岩波書店、1980年)
G・ズーカフ著、佐野正博、他訳『踊る物理学者たち』(青土社、1985年)
F・セレリ著、桜山義夫訳『量子力学論争』(共立出版、1986年)
A・I・M・レイ著、林一訳『量子論』(岩波書店、1987年)
J・M・ヤウホ著、小出昭一郎訳『量子論と認識論』(東京図書、1987年)
J・C・ポーキングホーン著、宮崎忠訳『量子力学の考え方』(講談社、1994年)
小林誠著『消えた反物質』(講談社、1997年)
S・ワインバーグ著、本間三郎訳『電子と原子核の発見』(筑摩書房、2006年)
朝永振一郎著『スピンはめぐる一成熟期の量子力学』(みすず書房、2008年)
南部陽一郎著『クォーク第2版』(講談社、2008年)
江尻宏泰著『ビックリするほど素粒子がわかる本』(2009年、ソフトバンク)
佐藤勝彦著『図解量子論がみるみるわかる本』(図書印刷、2009年)
村山斉著『宇宙は何でできているか』(幻冬舎新書、2010年)
橋本省二著『質量はどのように生まれるのか』(講談社、2010年)
佐藤勝彦著『ニュートリノと宇宙創生の謎』(実業の日本社、2012年)
吉田たかよし著『世界は「ゆらぎ」で出来ている』(光文社、2013年)

<統一理論に関する参考文献>

ミチオ・カク著、久志本克己訳『アインシュタインを超える』(講談社、1997年)
デニス・オーヴァバイ著、鳥居祥二訳『宇宙はこうして始まり、こう終わりを告げる』(白揚社、2000年)367-90頁
広瀬立成著『図解雑学—超ひも理論』(ナツメ社、2008年)80-188頁
佐藤勝彦著『宇宙「96%の謎」』(角川書店、2008年)113-34頁
村山斉著『宇宙は何でできているか』(幻冬舎新書、2010年)105-92頁
フランク・クローズ著、田中敦等訳『ヒッグス粒子を追い』(ダイヤモンド社、2012年)、25-268頁

<超ひも理論に関する参考文献>

ブライアン・グリーン著、林一等訳『エレガントな宇宙』(草思社、2002年)
広瀬立成著『超ひも理論』(PHP、2002年)
竹内薫著『超ひも理論とはなにか』(講談社、2004年)
レオナルド・サスキンド著、林田陽子訳『宇宙のランドスケープ』(日経BP社、2006年)
リサ・ランドール著、塩原通緒訳『ワープする宇宙』(NHK出版、2007年)
リサ・ランドール、若田光一著『異次元は存在する』(NHK出版、2007年)
リー・スモーリン著、松浦俊輔訳『迷走する物理学』(講談社、2007年)
白石拓著『マンガでわかる「超ひも理論」』(宝島社、2007年)
川合光著『はじめての<超ひも理論>』(講談社、2008年)
ピーター・ウォイト著、松浦俊輔訳『ストリング理論は科学か』(青土社、2008年)
広瀬立成著『図解雑学—超ひも理論』(ナツメ社、2008年)
ローレンス・M・クラウス著、斎藤隆央訳『超ひも理論を疑う』(早川書房、2008年)
夏梅誠著『超ひも理論への招待』(日経BP社、2008年)

<ディラックに関連する参考文献>

アブラハム・パイス著、藤井昭彦訳『ポール・ディラック-人業績』(筑摩書房、2012年)

<多元世界に関する参考文献>

ベルナルド・フォントネル著、赤木昭二訳『世界の複数性についての対話』(工作舎、1992年)

佐藤勝彦著『インフレーション宇宙論』(講談社、2010年)143-68頁

松原隆彦著『宇宙に外側はあるか』(光文社新書、2012年)、218-40頁

<人間原理に関する参考文献>

ロバート・ジャストロウ著、趙慶哲訳『だれが宇宙を創ったか』(講談社、1988年)

P・C・W・デイヴィス著、戸田盛和訳『宇宙はなぜあるのか』(岩波現代選書、1989年)

ジョン・レスリー、松浦俊輔訳『世界の終焉』(青土社、1998年)

ジョン・D・バロウ著、松浦俊輔訳『単純な法則に宇宙が複雑な姿を見せるわけ』(青土社、2002年)

佐治晴夫、佐藤勝彦著『宇宙はすべてを教えてくれる』(PHP、2003年)20-62頁

ジョン・D・バロウ著、松浦俊輔訳『宇宙の定数』(青土社、2005年)

ジョン・D・バロウ著、松浦俊輔訳『無限の話』(青土社、2006年)

ジョン・D・バロウ著、松浦俊輔訳『科学にわからないことがある理由』(青土社、2006年)

アレックス・ビレンケン著、林田陽子訳『多世界宇宙の探検』(日経BP社、2007年)

ポール・デイヴィス著、吉田三知世訳『幸運な宇宙』(日経BP社、2008年)

佐藤勝彦著『インフレーション宇宙論』(講談社、2010年)169-85頁

土居守・松原隆彦著『宇宙のダークエネルギー』(2011年、光文社)、98-105頁

村山斉著『宇宙はなぜこんなにうまくできているのか』(集英社、2012年)179-83頁

松原隆彦著『宇宙に外側はあるか』(光文社新書、2012年)197-217頁

青木薫著『宇宙はなぜこのような宇宙なのか』(講談社、2013年)