

宇宙論物語

— S・W・ホーキング著『時の小史』への招待 —

立木教夫

目 次

- 一、はじめに
- 二、宇宙を解説する人
- 三、現代宇宙論
 - (一) 「古典相」
 - ① 宇宙の起源
 - ② ブラックホール
 - (二) 「量子相」
 - ① ブラックホール
- 四、現代宇宙論と人間
 - 五、現代宇宙論と神
 - 六、むすび
- (三) 物理学の統一
 - ① ワインバーグ-サラムの理論
 - ② 大統一理論
 - ③ 完全な統一理論

一、はじめに

イギリスの宇宙物理学者、スティーヴン・W・ホーキング (Stephen W. Hawking, 1942-) が素晴らしい宇宙論の啓蒙書を著した。タイトルは、『時の小史——ビッグバンからブラックホールまで』 (A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes) である。内容は、理論物理学の観点から、宇宙の歴史 (つまり時間

の歴史)と宇宙像を描き出したものである。

『時の小史』の興味深いところは、理論物理学的宇宙像を描き出すだけでなく、それを踏まえた上で、「宇宙における人間の位置」や「宇宙の創成と神の関与」などといった問題にまで、議論を展開していることである。從来、「宇宙における人間の位置」や「宇宙の創成と神の関与」などの問題は、哲学や神学の領域で論じられてきたが、科学が「すべて」を包含する宇宙を対象とするに及んで、これらの問題に対しても、科学の立場から取り組むことが可能となってきたのである。

本稿では、ホーキングの理論的貢献に注目し、彼の研究を通して現代宇宙論の最前線の問題をとらえようとした。第二節では、ホーキングの人となりを紹介する。第三節では、ホーキングの理論的貢献が最も顕著に現れた問題、即ち、「ブラックホール」(『時の小史』の第六・七章)、「宇宙の起源」(第八章)、それに「物理学の統一」(第一〇章)といった問題を取り上げ、我々の宇宙像がどのように描き出されるかを見ていく。この議論を踏まえた上で、第四節では、「宇宙における人間の位置」を問う「人間原理」(anthropic principle)の問題を考察し、第五節では、「宇宙の創成と神の関与」の問題を考察する。

ところで、『時の小史』の内容を紹介しておこう。

- 第一章 我々の宇宙像
- 第二章 空間と時間
- 第三章 膨張する宇宙
- 第四章 不確定性原理
- 第五章 素粒子と自然界の力

- 第六章 ブラックホール
- 第七章 ブラックホールはそれほど黒くない
- 第八章 宇宙の起源と運命
- 第九章 時の矢
- 第一〇章 物理学の統一
- 第一章 結論

全体の内容は、大きく三部に分けることができる。第一部は、第一章から第五章までで、現代宇宙論との関係において、古典論と量子論の歴史が論じられている。第二部は、第六章から第九章までで、ホーキング自身の研究と関連させながら現代宇宙論のフロンティアが論じられている。第三部は、第一〇章と第一章で、物理学の将来が展望されている。

ホーキングが宇宙論の啓蒙書を書こうと決心したのは、一九八二年にハーバード大学のロウブ・レクチャーを担当したことである。著述の理由は、数多くの宇宙論関係の啓蒙書が出版されているにもかかわらず、「一つとして、私を、宇宙論と量子論を結合した研究へと引込んでいった問題と取り組んだものがなかったから」だという。

啓蒙書を書こうといふホーキングの決心が、『時の小史』として結実し、我々の手元に届くまでに、約七年間も時間が費やされた。これほどの時間がかかった理由は、ホーキングが抱えている不治の病によるものであるが、彼の生命を燃焼し、彼の問題意識・疑問・研究成果のすべてを注ぎ込んで書かれた『時の小史』は、興味深い知的冒険の書に仕上げられたのである。

ルハ」で、『時の小史』にみられる特色を、いくつか指摘しておくれんじよ。

第一に、すぐ気付くことは、一人称で語られている部分が多い」とである。つまり、ホーキング自身が、現代の宇宙物理学の研究を常にリードしてきた研究者であるため、彼自身の研究を語ることが、即ち、宇宙物理学が展開してきたフロンティアを語ることになるのである。

第二は、理論物理学の本であるのに数式が使われていないことである。数式を一つ用いれば読者は半減するとのアドバイスに従い——AINシユタインの $E=mc^2$ だけは例外として——一切数式を用いずに、多く具体例や比喩を用いながら、高度に抽象的な内容を紹介している。「これは、病によるハンディキャップのため、常に思索を中心として理論物理学の研究に携わってきた、ホーキングの推論の秘密を垣間見せてくれることとなつた。

第三に、ホーキングが科学の立場から、宇宙と人間と神の問題に取り組んでいることである。自然科学は、キリスト教の神学の構造をそのままもつてているといわれるが、方法を異にする科学の立場から、「宇宙における人間の位置」について、また「宇宙の創成と神の関与」について、どのような議論が可能なのであろうか。また、ホーキングはどのような結論を導き出しているのであろうか。

〈注〉

- (1) Stephen W. Hawking, *A Brief History of Time: From Big Bang to Black Holes*, Bantam Press, London, New York, Toronto, Sydney, Auckland, 1988, p. vi.
- (2) 村上陽一郎著『時間の科学』、岩波書店、一九八六年、四二一三頁。

「自然科学というのは、ある意味では神瞰図 (God's-

eye view) を描く」とではないか。というのは、科学は自然を眺め、それを研究対象にするが、もともと人間というのはどこから見ても実は自然を全部わかり得るはずはない存在である、何もかも見通してしまうことは不可能である。つまりわれわれはつねに人間としてどこかに視点をおいて、どこかに土台となる足場をつくって、そこから物を言うしかない存在なのである。ところが、自然科学というのは、そういう人間としての限界である足場をあたかもないかのごとく装うのである。自然科学は普遍的で客観的だとしばしば言われるが、それは、みずからの足場というものをして取り扱ってしまって、どこでもないところから自然をすべて見えるものとして扱

11. 宇宙を解説する人

ホーキングは、現在四十六歳。オックスフォード大学卒業後、ケンブリッジ大学の大学院に進み、同大学で研究を開始した。一九七四年には、史上最年少の三十一歳で、ロイヤルソサエティの会員となり、一九八〇年以来現在に至るまで、初代ベロー (Isaac Barrow, 1630-1677)、第一代ニュートンからデイラック (Paul Adrien Maurice Dirac, 1902-84) まで鉛々たる学者によって引き継がれてきた、ケンブリッジ大学数学科のルーカス記念教授職にある。

一九六三年、ホーキングが二十歳の時、ALS (筋萎縮性側索硬化症) —— 隨意筋を制御する脳と脊髄の神経

細胞が次第に崩壊していく進行性の不治の病——に犯されていることが判明し、せいやい一、二年の生命しか期待できないと医師から宣告された。そのため、一時は、自室に閉じこもり、くる日もくる日も、ワーグナーの音楽とSF小説と酒に浸るという、無気力と鬱状態を体験した。彼は、このよつた絶望体験の中につつて、「希望がゼロに近づいてこそ、人間は持っているすべてを本当に味わえる」⁽¹⁾ことを知るに至つたという。このよつた彼自身の精神的転回に加えて、両親、友人、指導教官等の励ましがあり、次第に無気力と鬱状態から脱却することができたのであつた。

ホーリングは、この間の精神的状況を、次のように回想している。

「ペンローズが特異点定理を発見したとき、僕は研究生だった。博士論文のテーマを血眼になつて探していただんだ。二年前に、ALS——普通、ルー・ゲーリック病と呼ばれている運動神経の病気——に犯されないと診断され、一、二年の命だと宣告されていたんだ。こんな状態では、博士号を取るための勉強なんて、あまり意味がないように思えた——つまり、博士号が取れるまで生きていられないと思つていたからね。しかし、二年たつても、僕はあまり悪くならなかつた。実際のところ、いろいろなことがうまくいくようになり、その上、ジェーン・ワイルド (Jane Wilde) という素晴らしい女性と婚約したんだ。しかし、結婚するためには仕事が必要で、仕事を得るために、博士号が必要ということになつたんだ。⁽²⁾」

ホーリングは、やりがいのあるテーマを見い出して研究に打ち込むと同時に、ジェーンとの出会いを得て、生める意欲を与えられたのであつた。博士号を獲得したホーリングは、一九六五年にジェーンと結婚し、二男一女と子供にも恵まれることとなつた。

その後、一九七〇年代のはじめに病気が悪化し、それ以来車椅子を離れることができなくなつた。一九八五年

には肺炎を患い、気管挿孔形成手術を受けたため、話すことが出来なくなつてしまつた。現在では、人と会話するときには、スピーチ・プラス社から寄贈されたスピーチ・シンセサイザーのキーボードを操作し、人工音声の力を借りるのであるが、運動機能を奪われた彼には、一単語を入力するのに、約六秒もの時間がかかるのである。しかし、彼は、「声を失う以前よりもよくコミュニケーションできる」と、事もなげに語つてゐる。

このよつた厳しいハンディキャップにもかかわらず、ホーリングをして宇宙論研究へと駆り立てているものは、何であるうか。それは、「宇宙の本性とは何か。宇宙における人間の位置とは何か、また、宇宙や人間は一体どこからやつてきたのか。何故、宇宙はこのよつた姿をしているのか」⁽⁴⁾といった問い、つまり、「神の心を理解する」⁽⁵⁾といった真に打ち込むに足る問いを発見したことである。

ホーリングの研究は、ガリレオ (Galileo Galilei, 1564-1642)、ニュートン (Issac Newton, 1642-1727)、アイノン・シュタイン (Albert Einstein, 1879-1955) と展開されてきた宇宙論の伝統を受け継ぐものであると同時に、これまで誰もなし得なかつた、一般相対性理論と量子論の結合という大問題に着手し、宇宙論研究に根本的転回をもたらしつつあるのである。

〈注〉

(1) Dennis Overbye, "Wizard of Time and Space," *Omni*, February, 1979, p. 104.

(2) Stephen W. Hawking, *A Brief History of Time: From Big Bang to Black Holes*, p. 49.

(3) Ibid., p. viii.
(4) Ibid., p. 171.
(5) Ibid., p. 175.

三、現代宇宙論

「」では、ホーキングの理論的貢献を手掛かりとして、現代宇宙論における最新の議論を辿りながら、我々の宇宙像を概観していくことにしたい。

(一) 「古典相」

ホーキングは自分の研究を大きく二期に分けていて。一九七三年までの研究を第一期の研究とし、これを彼の宇宙論研究の「古典相」(classical phase)——つまり、古典理論である一般相対性理論を研究していた時期——と呼び、一九七四年以降今日までの研究を第二期の研究とし、これを彼の宇宙論研究の「量子相」(quantum phase)——つまり、一般相対性理論と量子力学の結合に着手した時期——と呼んでいる。

ホーキングは、ブラックホールの特異点を宇宙の起源の問題に適用してビッグバン特異点の存在を証明した研究の後、一九七〇年代はブラックホールの研究に集中し、一九八〇年代に入つてから、再び、宇宙の起源の問題に取り組むこととなつたのである。「古典相」から「量子相」への展開は、ブラックホールの研究を媒介として実現した。ここでは、まずははじめに、宇宙の起源に関する「古典相」における研究から見ていくことにしよう。

① 宇宙の起源

ホーキングの研究生活は、宇宙のはじまりに関する問題意識——つまり、時間と空間にはじまりはあるのか否かという問題意識——から出発した。何故、彼がそのような問題意識を抱くに至つたのかを理解するために、彼

が研究を開始した当時の宇宙論研究の状況を見ておく必要がある。

現代宇宙論は、一九一五年にアインシュタインが一般相対性理論を発表したことによってスタートしたといつてよいであろう。一九一七年には、アインシュタインは一般相対性理論を宇宙全体に適用し、宇宙の構造を解明しようとした。アインシュタインは彼の信ずる一様な静止宇宙を得るために、宇宙原理——宇宙は一様かつ等方的であるという仮定——の仮定のもとに、宇宙定数を含む宇宙項を導入して方程式を解いた。ここに一般相対論的宇宙論が誕生したのである。現在では、アインシュタインの宇宙モデルは、小さなゆらぎに対しても不安定であることが判明している。

一九二二年には、ロシアのフリードマン(Alexander Friedmann)が、アインシュタインとは別の仮定のもとにアインシュタインの方程式を解いた。フリードマンの場合、宇宙原理を仮定したが、宇宙項は導入しなかった。このようにして得られた解の特徴は、時間とともに宇宙の構造が変化することにある。つまり、運動エネルギーと重力エネルギーの総和である宇宙のエネルギーの符号によって、開いた宇宙、平坦な宇宙、閉じた宇宙の三つが得られたのである。それぞれの解は、異なる宇宙の終末を描き出すが、いずれが正しいかは、宇宙の全物質量が不明なため、現在に至つても依然として判明していない。

一九二九年に、ハッブル(Edwin Hubble)は、銀河の空間分布と運動状態に関する観測的研究を通して、遠方の銀河のスペクトル線が赤方偏移をしていること、しかもその偏移の大きさが、銀河までの距離に比例していることを発見した。このようにして、宇宙が膨張しつつあることが判明し、宇宙のはじめにビッグバンが存在したことなどが示唆されたのである。この発見により、宇宙の起源という問題が、はじめて科学の対象となつたのである。一九四八年には、ボンジ(Herman Bondi)、ゴールド(Thomas Gold)、ホイル(Fred Hoyle)による定常

宇宙論——宇宙には、はじまりなどなかつたし、終わりもないという理論——と、ガモフ (George Gamow) による熱いビッグバン宇宙論が、相次いで提唱された。ある時期には、定常宇宙論の方が熱いビッグバン宇宙論よりも優勢であったが、一九六五年に、ベル・テレフォン研究所のペンジアス (Arno Penzias) とウイルソン (Robert Wilson) によって、二・七Kの宇宙のバックグラウンド輻射が発見され、これが初期宇宙の熱いビッグバンの名残であることが確認されるに至つて、ビッグバン宇宙論の正しさが認められることとなつた。

一九八九年の現時点から振り返つてみると、科学史的に重要な発見をこのように整理し、連闇を明確にすることができるが、その当時においては、何等明確な見通しなど得られていなかつたのである。一九六〇年代にホーキングが研究を開始した当初、初期宇宙のモデルとして、「フリードマン・モデルをはじめにとらえていた人間はいなかつた」し、大半の人々は、宇宙に「本当のはじまりなどないと考えていた」のであつた⁽¹⁾。

一九六六年から六七年にかけて、ホーキングは宇宙のはじまりの問題を考察し、時間を逆戻りすることによってビッグバン特異点と呼ばれる曲率無限大の一点に至ることを証明した。つまり、宇宙にははじまりがあつたことを明らかにしたのである。

この証明は、次のようにして行われた。すなわちまず、ペンローズの「重力で自己崩壊を起こした星は、領域的に閉じ込められ、この領域の表面積は最終的にはゼロにまで収縮する」⁽²⁾というブラックホールに関する特異点定理から、「時間を反転してやれば、崩壊は膨張になる」⁽³⁾との洞察を得、「一般相対性理論が正しく、宇宙に我々が観測しているだけの物質が存在するなら、ビッグバン特異点が存在したはずである」⁽⁴⁾というビッグバンに関する特異点定理を証明したのであつた。この成果は、一九七〇年に、ペンローズとホーキングの連名論文として発表された。

今日では、彼らが証明した特異点定理は、広く受け容れられており、宇宙はビッグバン特異点からスタートしたものと、世界の科学者のほぼ全員が確信するに至つてゐる。しかし、当のホーキングは、古典理論である一般相対性理論によつて得た特異点定理をすでに乗り越えている。古典相での研究成果である特異点定理に依然として固執している研究者たちに向かつて、何と、「実際は、宇宙の始まりにおいてビッグバン特異点は存在しなかつた」と説いてゐるのである。

古典理論である一般相対性理論によるなら、宇宙の歴史は、「熱いビッグバン・モデル」として描かれる。熱いビッグバン・モデルは、観測事実をうまく説明できるが、いくつか重要な疑問が未解決のまま残されていることも確かである。

ホーキングは、次のような問題点が存在することを指摘している。⁽⁶⁾

- (1) 何故、初期宇宙は熱かつたのか。
- (2) 何故、宇宙は、大域的にみるなら、これほど一様 (uniform) なのか。何故、どの点からも、またどの方向も、同じに見えるのか。殊に、何故、別の方角を見ても、マイクロ波のバックグラウンド輻射の温度が、これほど一様なのか。
- (3) 何故、宇宙はこのような臨界膨張率 (critical rate of expansion) で膨張しはじめたのだろう。もし、ビッグバンから一秒後の膨張率が、 10^{-17} ほど小さくとも、現在の大きさに到達する以前に収縮し崩壊していたであろう。
- (4) 宇宙が、大域的にこれほど一様であり均一 (homogenous) であるという事実にもかかわらず、銀河などの局所的な不均一性が存在する。これは、初期宇宙に存在していた密度のほんのちょっとしたゆらぎから出

てきたものと考えられているが、この密度のゆらぎの起源は、何にあるのだろうか。

このような問題点に対し、熱いビッグバン・モデルはうまく答えられない。これに対する新たな取り組みは、一九八〇年代に入つてからの「量子相」において行われることになる。この後、一九七〇年代を通じて、ホーキングはブラックホールの問題に集中していくことになる。

② ブラックホール

ホーキングは、ブラックホールと宇宙の起源の問題を一体のものとしてとらえていたが、一九七〇年代は、ブラックホールの研究に集中している。

ホーキングは、どのよくなきつかけで、ブラックホールに興味を持つようになつたのであろうか。彼は、『ホーキングの宇宙』の著者ジョン・ボズローの質問に対し、「素粒子を結びつけている強い核力と、ずっと弱い重力を統合しうることが僕にとって初めてあきらかになつたのが、ブラックホールの中だつたんだよ。それにもちろん、⁽⁷⁾ ブラックホールにはそれ自体、その謎や人間の心に与えるイメージに、ある種、人を魅きつけるものがあるけどね」と答えている。

ブラックホールという言葉は、一九六九年にホイーラー（John Wheeler）が作ったものであるが、このような星については、すでに十八世紀に活躍したフランスの数学学者、ラップル（Marquis de Laplace）によって予想されていた。しかし、現代宇宙論の問題としてブラックホールが注目されたのは、アインシュタインの一般相対性理論が宇宙に適用されて後のことである。

アインシュタインが一般相対性理論を発表した翌年の一九一七年には、シュバルツシルト（Karl Schwarzs-

child）が、ブラックホールを表すシュバルツシルト解を発見した。

一九三〇年には、インドのチャンドラセカール（Subrahmanyan Chandrasekhar）が、星が燃料を使い果たした後、どの位の大きさであれば自分自身の重力に耐えられるのかを考察し、太陽の一・五倍以上の質量であれば、自分自身の重力に耐えられず、一点にまで崩壊してしまつことを示した。

一九三九年には、オッペンハイマー（Robert Oppenheimer）が星の重力崩壊を論じた。

このような理論的研究は一九六〇年代に入るまで、注目されるることはなかつたが、一九六三年にクエーサーが発見され、一九六八年に中性子星が発見されるに及んで、ブラックホールの存在が真剣に議論されるようになつた。このようなブラックホールに関する議論を常にリードしたのがホーキングである。

ついで、ホーキングのブラックホール研究を、辿つておくことにしよう。

一九六五年から七〇年にかけて、ホーキングはベンローズと共にで、「一般相対性理論によるなら、ブラックホール内部に、無限大の密度と曲率をもつ特異点が存在すること」を証明⁽⁸⁾し、一九七一年には、「定常的に回転するブラックホールには対称軸が存在すること」を証明⁽⁹⁾した。また、一九七一年には、ブラックホールは、「物質や放射線を取り込んだり、あるいは他のブラックホールと合体すること」によって、事象の地平面（ブラックホールの境界）が拡大する⁽¹⁰⁾ということを発見し、カーター（Brandon Carter）およびバーディーン（Jim Bardeen）と共に連名論文にまとめて発表した。ホーキングらは、この論文で、バッケンスタイン（Jacob Bekenstein）の仮説——「事象の地平面の面積は、ブラックホールのエントロピーの目安となる」との主張——の困難性を指摘したのである。ところが、後に、まったく思いがけない方向から、バッケンスタインの仮説の基本的妥当性を、ホーキング自身が証明することになるのである。この証明については、「量子相」で触れるとしている。

「古典相」の研究成果は、一九七三年に発行された『時空の大規模構造』(The Large Scale Structure of Space-time, Cambridge, 1973)としてまとめられている。ホーキングは、『時の小史』の読者に向かって、「本書を読まれて、更に深く知りたいと思われる読者がおられたとしても、『時空の大規模構造』はお勧めしません。」これは高度に専門的で、読んでもまったく面白くありません」とアドバイスを送っている。

(二) 「量子相」

① ブラックホール

ホーキングの「量子相」における、ブラックホールの研究を見ていくにしよう。

一九七三年にモスクワを訪れたホーキングは、ゼルドヴィッチ (Yakov Zeldovich) やスタロビンスキイ (Alexander Starobinsky) らとの議論を通して、「量子力学の不確定性原理から、回転するブラックホールは粒子を作り出し、それを放出する」との可能性を理解した。ホーキングは自分で計算を行い、「驚き、かつ悩んでしまった」という。つまり、「ブラックホールは、あたかも熱い物体のように、粒子と放射を放出している」との結果が得られたからである。ブラックホールからは光さえも脱出できないと考えられていたにもかかわらず、粒子や放射が出ているというのである。この信じがたい結果を、ホーキングは量子論を取り入れることによって、見事に説明し、「ブラックホールからは、熱力学の第二法則がきちんと成立するような割合で、粒子が放出されている」とを証明したのであった。ホーキングはこの説明においてはじめて、一般相対性理論に量子論的考察を導入し、成功を収めたのであった。また、このメカニズムの解明を通して、ベッケンスタインの仮説の基本的妥当性をも証明することになったのである。

では、ブラックホールは一体、どのようにして光っているのであろうか。

「ブラックホールの事象の地平面の内側からは、何物も脱出できない」ということなのに、どうして粒子や放射が出てくるのだろうか。量子力学が与えてくれる答えは、次のようである。つまり、粒子はブラック・ホール内部から放出されてくるのではなく、事象の地平面のすぐ外側に存在する『空虚』な空間からやつてくるのである。我々は、このことを次のように理解できるだろう。つまり、我々が『空虚』と考えている空間は、完全に空虚ではないということである。なぜかというと、完全に空虚であれば、重力場や電磁場といった場も完全にゼロでなくてはならないからである。ところが、これらの場の値と時間的変化率とは、ちょうど粒子の位置と速度のように、不確定性原理に従つており、一方の量をより正確に知ろうとすれば、他方の量はより不正確になってしまうのである。このようなわけで、空虚な空間においても、場をゼロにすることは不可能である。それは、場の値と変化率を、共にゼロにしなくてはならないからである。場の値には、最小限の不確定性、つまり量子的ゆらぎが存在する。このゆらぎは、光子やグラヴィトンのペアが対創生し、別れ、再結合し、消滅している姿としてとらえることができる。これらの粒子は、ちょうど太陽からの重力を担っている粒子のように、ヴァーチュアル粒子であるため、リアル粒子のように探知器で直接観測することはできない。しかし、例えば、原子のエネルギー軌道における小さな変動のような間接的影響は観測可能である。そしてそれは、驚くほど正確に理論的予測と一致しているのである。不確定性原理は、例えば、電子やクオーターのような物質粒子にも、同様のヴァーチュアルなペアーが存在すると予測している。この場合は、正粒子と反粒子のペアーになる（光子やグラヴィトンの反粒子は正粒子と同じである）。

無からエネルギーを作り出すことは出来ないので、正粒子／反粒子のペアーのうち、一方は正のエネルギー

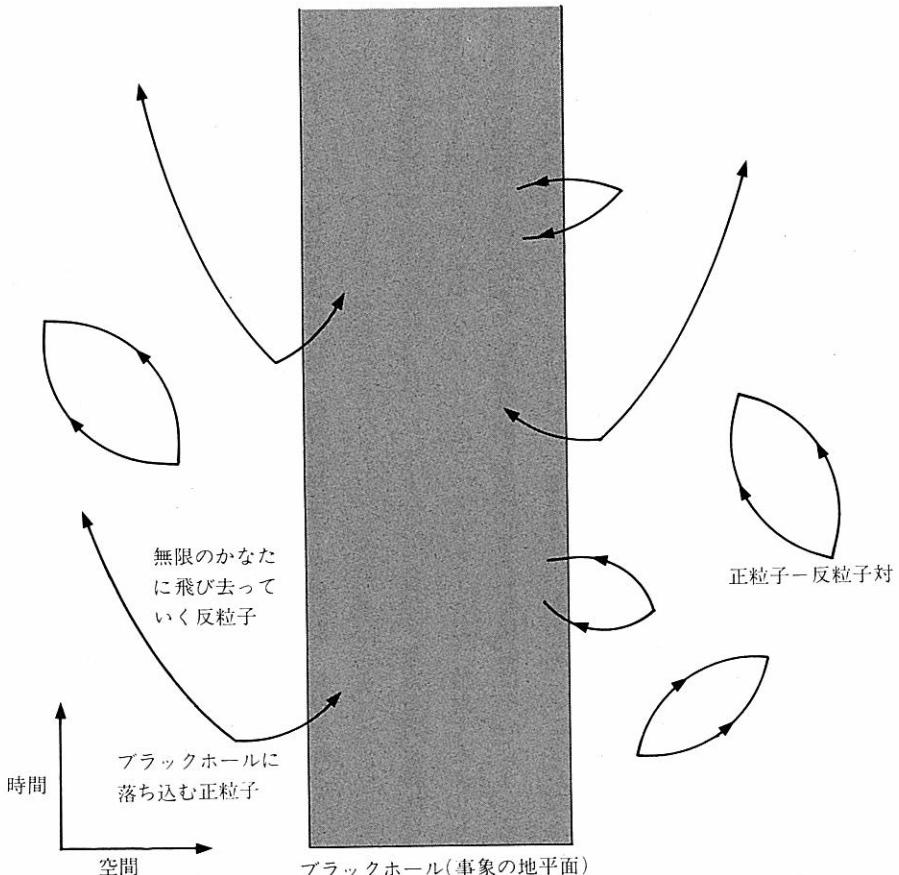


図1.(S. W. Hawking,
*A Brief History of
Time*, p. 107)

ーを持ち、他方は負のエネルギーを持つことになる。負のエネルギーを持つ粒子は短命なヴァーチュアル粒子になるよう運命づけられている。というのは、通常の状態では、リアル粒子が常に正のエネルギーを持っているからである。ヴァーチュアル粒子はパートナーの粒子を見つけて、それと対消滅しなくてはならない。ところが、巨大な質量の近くにあるリアル粒子は、遠くに離れているときよりも、エネルギーが低い。というのは、重力の引力に逆らってその粒子を遠くにもつしていくためには、エネルギーが必要であるからである。普通の状況では、リアル粒子のエネルギーは依然として正であるが、ブラックホールの内部では、重力場が非常に強く、リアル粒子でさえ負のエネルギーを持つことになる。それ故、ブラックホールでは、負のエネルギーを持ったヴァーチュアル粒子がブラックホールに落ち込んで、リアル正粒子あるいはリアル反粒子になることができる。この場合には、もはやパートナーと合一して消滅する必要はない。見捨てられたパートナーもブラックホールに落ち込んでくるかもしれない。あるいは、ブラックホール近傍から、正のエネルギーを持つたりアル粒子あるいはリアル反粒子として、飛び出てくるかもしれない[図1参照]。遠方の観測者には、ブラックホールから放射されているように見えるのである。ブラックホールが小さければ、負のエネルギーを持つ粒子が飛び込んでからリアル粒子になるまでに走らなくてはならない距離が短く、それ故、ブラックホールからの放射率も高くなり、見かけの温度も高くなる。

外に向かって飛び出していく放射の正のエネルギーは、ブラックホールの中に飛び込んでいく粒子の負のエネルギーとバランスがとれている。アインシュタインの式 $E=mc^2$ (E はエネルギー、 m は質量、 c は光の速度である) によれば、エネルギーは質量に比例している。ブラックホールに流れ込む負のエネルギーは、ブラックホールの質量を減少させることになる。ブラックホールの質量が減少するにつれ、事象の地平面は

縮小する。しかし、このブラックホールのエントロピーの減少は、放出される放射のエントロピーでお釣りがくるほど埋めあわされているので、熱力学の第一法則は決して破れてはいないのである⁽¹⁷⁾。

ホーキングは更に議論を進め、ブラックホールの爆発や消滅を論じた。

「ブラックホールの質量が小さければ小さいほど、温度は高いのである。それ故、ブラックホールが質量を失うに従つて、その温度は高くなり、より速やかに質量が減少することになる。ブラックホールの質量が極端に小さくなつたとき、どのようなことになるのかは、あまりよく分かつていない。しかし、最も合理的と思われる推定としては、何百万個の水爆の爆発に相当するような、爆発が起ころのではないかと考えられる。

太陽の数倍の質量を持つブラックホールは、一千万分の一Kで、宇宙空間を満たしている約二・七Kのマイクロ波の輻射よりも低い。それ故、そのようなブラックホールは、放射するよりも吸収するほうが多い。もし、宇宙が永久に膨張し続けるなら、宇宙空間を満たしている輻射はそのようなブラックホールの温度よりも低くなり、その時点で、ブラックホールは再び質量を失い始めることになるだろう。しかし、あまりにも低温のため、完全に蒸発するには、 10^{66} ⁽¹⁸⁾年程かかることになる。これは 10^{10} 年という宇宙の年命よりもはるかに長い時間である。」

ホーキングがラザフォード・アップルトン研究所で、はじめてブラックホールからの放射について発表したときには、議長のテーラー（John G. Taylor）から「全くのナンセンス」と断定され、皆から疑いの目で見られた。しかし、現在では、一般相対性理論と量子力学が正しいとする限り、ホーキングの予測に至らなくてはならないとの結論が承認されている。そして、ブラックホールからの放射には、「ホーキング放射」という名が付けられて

いるのである。

ホーキングが解き明かしたブラックホールのダイナミックスは、ビッグバン直後の宇宙に起きた、素粒子の創造や相互作用を考えるうえで、重要な手掛かりを与えることとなつたのである。

② 宇宙の起源

熱いビッグバン・モデルは、明確に進化する宇宙像を確立したが、先に指摘しておいたような、様々な困難な問題を抱えていた。一九八〇年代に入つて、熱いビッグバン・モデルでは説明できない一様性や平坦性といった現在の宇宙の観測的特徴を導けるようなモデルが提示された。それはインフレーション・モデルというものである。

このモデルは、初期宇宙がカオス的な状態からスタートし、非常に急速な膨張を経過したとするガス（Alan Guth）の「インフレーション・モデル」はじめ、リンデ（Andrei Linde）などびにスタイルハート（Paul Steinhardt）・アルブレヒト（Andreas Albrecht）が独立に提示した「新インフレーション・モデル」へと書き換えられ、更に、それらのよい点を残した上でリンデが新たに提示した「カオス的インフレーション・モデル」へと展開してきた。ホーキングは、カオス的インフレーション・モデルに至つて、ほぼ満足のいくものが得られたとしている。

まず、インフレーション・モデルと新インフレーション・モデルの特徴を見ておくことにしよう。

ホーキングは、この間の理論的展開に、直接的な形で貢献している。

「アラン・ガスの理論では、ちょうど、非常に冷たい水の中で氷の結晶が出現してくるように、突然、相

転移が起ると考えられていた。この考え方というのは、対称性の破れた新たな相の『泡』が、ちょうど、沸騰している湯の中に生まれてくる蒸気の泡のように、すでに古い相の中に形成されていたとするものである。泡は拡大し、他の泡と結合し、宇宙全体が新たな相に転移するまで、続くと考えられていた。私と他の数名の研究者が、ここにおける問題点を指摘した。つまり、宇宙はあまりにも急速に膨張しているため、泡が光速度で成長したとしても、お互いに離れていき、結合できないのではないか、ということであつた。ある領域では、まだ諸力間の対称性が破れていないままということになり、宇宙は一樣でない状態に止どまることになるのではないだろうか。このような宇宙モデルは、我々が観測している宇宙に対応しないのである。

一九八一年十月、私は、重力の量子論の国際会議に出席するため、モスクワを訪れた。会議の後、私はスタンバーグ宇宙研究所でセミナーを行い、インフレーション・モデルとその問題点について論じた。聴衆の中に、モスクワのレベデフ研究所からきた若いロシア人で、アンドレイ・リンデという研究者がいた。彼は、泡が結合しないという問題は、我々の宇宙の領域がすっぽりと入ってしまうくらい大きな泡を考えれば、回避できると指摘した。これがうまくいくためには、対称性が保たれた状態から対称性が破れた状態への移行が、泡の中で非常にゆっくり進行していかなくてはならないのであるが、大統一理論によれば、これは可能であつた。⁽²⁰⁾

ホーキングは、リンデのゆっくりと進行する対称性の破れという考え方は大変よかつたが、「泡」の考えはよくなかつたとしている。というのは、「泡」の大きさが、当時の宇宙よりも大きくなってしまうからである。このリンドの考えは、問題点を残しながらも、ガスが提示した「泡」の形成による速い対称性の破れに基づくインフレーション・モデルを書き改めることとなり、新インフレーション・モデルと呼ばれることとなつた。リンデとは

独立に、この考え方到達したスタイルハートとアルブレヒトも、新インフレーション理論の発見者に名を連ねている。

現在では、この新インフレーション・モデルはすでに、カオス的インフレーション・モデルという、更によりモデルに書き換えられている。

この間の変遷について、ホーキングは次のように述べている。

「この新インフレーション・モデルは、何故、宇宙が現在のようになつたのかを、うまく説明してくれる。ところが、私やその他数人の人々が示したところによると、もともとのインフレーション・モデルでは、バツクグラウンド輻射の温度が、観測値から大きく外れてしまう。また、新インフレーション・モデルでも、宇宙のごく初期に、そこで要請されているような相転移が存在したのかどうか、疑わしくなってきた。科学理論としての新インフレーション・モデルはすでに葬り去られてしまった、というのが、私の個人的見解である。しかし、多くの研究者は、この理論の死亡を耳にしていないようで、依然、この理論が生きているかのごとく、論文を発表し続けている。一九八三年に、リンデによつて、カオス的インフレーション・モデルと呼ばれる更により理論が発表された。この理論には、相転移や過冷却は存在しない。そのかわり、スピノの場が導入されている。初期宇宙にあつては、量子的ゆらぎのため、いくつかの領域では、このスピノの場の値が非常に大きくなつたはずである。このような領域のエネルギーは、宇宙定数のように振舞つたはずである。場のエネルギーは、反重力的效果を持つたはずであり、その領域をインフレーションナリーな形で膨張させたであろう。膨張するに従つて、場のエネルギーはゆっくりと減少し、インフレーションナリーな膨張は、熱いビッグバン・モデルの膨張に変化する。このような領域の一つが、現在、我々が観測している宇

宙となつたものと思われる。このモデルは、以前のインフレーション・モデルのよいところをすべて取り入れていながら、怪しげな相転移などには依存していない。しかも、マイクロ波のバックグラウンド輻射のゆらぎについて、観測値とよく合う妥当な値を出すことができる。⁽²¹⁾

ホーキングは、宇宙の初期条件とカオス的インフレーション・モデルの関係について、次のような指摘を行つている。

「このカオス的インフレーション・モデルに関する研究は、現在の宇宙の状態が、数多くの異なる初期状態から生起し得たことを示している。これは、重要である。というのは、我々が住んでいる宇宙について、その初期状態の選択を注意深く行う必要はなかつたということになるからである。⁽²²⁾

ただし、カオス的インフレーション・モデルは、「現在の宇宙の状態が、数多くの異なる初期条件から生起し得る」ことを示したのではあるが、どのような状態からでも現在の宇宙の状態に到達し得ることを示したわけではない。つまり、「カオス的インフレーション・モデルでさえ、何故、初期条件が、現在の宇宙とは大いに異なる宇宙をもたらすようなものでなかつたかは、教えてくれない」⁽²⁴⁾ のであつて、依然として、初期条件にまつわる困難性は残つてゐるのである。

ホーキングは、宇宙のごく初期のことを論じようとするなら、一般相対性理論に量子論を導入した量子論的重力理論を用いなくてはならないと指摘している。量子論を導入すると、特異点の存在は許されなくなり、あらゆるところで科学の法則が成立することになる。ホーキングは、「古典相」において、ペンローズとともに発見した特異点定理に言及し、「特異点定理の真の意味は、重力場が非常に強くなると、重力の量子論的効果が重要な出てくる」ということである⁽²⁵⁾ と解釈し、もはや古典論である一般相対性理論は、宇宙の正確な記述を行うものでは

ないことが明らかになつたとしている。

ホーキングは、重力の量子論を開拓するに当たつて、ファインマン (Richard Feynman) の「歴史の和」(sum over histories) という考え方を取り入れた。「歴史の和」を計算する技術的問題から、「実時間」(real time) ではなく「虚時間」(imaginary time) が導入される。「虚時間」を導入した四次元時空は、ユーリッド的時空と呼ばれている。ホーキングは、「このような時空を備えた宇宙の研究を通して、すでにいくつかの結論を得ている。その中でも殊に重要なのは、「時空は、境界を持たないが有限である」という結論である。⁽²⁶⁾

「実時」空に基礎が置かれた重力の古典理論では、宇宙の振舞いに関して、たつた二つの可能性しかなかつた。つまり、宇宙は無限の時間にわたって存在してきたのか、あるいは、有限の過去において特異点から出発したのか、このいずれかであった。他方、重力の量子論では、第三の可能性が現出してくる。つまり、ユーリッド的時空を用いていたため、この時空では、時間の方向と空間の方向は同等となり、有限の広がりを持ちながら、境界や端点を形成する特異点を持たないことが可能となる。時空はちょうど地球の表面のようである。ただし、次元の数はもう一つ多いのであるが。地球の表面は広がりにおいて有限であるが、境界や端点を有していない。(中略) 重力の量子論は新たな可能性を開いて見せた。ここでは、時空の境界は存在しない。それ故、境界における振舞いを決定する必要は全くない。科学の法則が破綻してしまつようないえる。宇宙は完全に自己充足的 (self-contained) であり、外部からのいかなる影響も存在しなかつたのである。創造されることもなければ、破壊されることもない。ただひたすらに存在する (BE) のである。⁽²⁷⁾

(三)

物理学の統一

今日、自然界には重力、強い核力、弱い核力、電磁気力という四種類の力が存在しているとされる——ホーキング

量子論的考察に虚時間導入したとき、「宇宙は有限、無境界、無特異点である」⁽²⁸⁾という宇宙像が得られたが、我々が生きている実時間に戻ると、依然として、特異点が現れてくる。いずれの宇宙像が正しいのであろうか。

この点に関して、ホーキングは次のような見解を示している。

「このことは、いわゆる虚時間が本当は実時間であり、実時間と呼んできたものは、我々の想像による虚構でしかないことを示唆しているのかもしれない。実時間においては、宇宙は特異点からはじまり、特異点で終わる。この特異点は時空に境界を作り、そこでは科学の法則は成立しないのである。しかし、虚時間においては、特異点も境界も存在しない。それ故、我々が虚時間と呼ぶもののはうが、より基本的なのかもしれない。そして、我々が実と呼ぶものは、宇宙はこのようであると我々が考えているものを記述するために作り出した、思考の産物に過ぎないのかもしれない。しかし、第一章で私が展開した議論によれば、科学理論とは、我々の観測を記述するために作った数学的モデルにすぎない。それ故、どちらが本当の『実』時間であり『虚』時間なのかと問うことは、無意味なことである。どちらがより有益な記述法なのかということこそ、問題なのである。」⁽²⁹⁾

このように述べた後、ホーキングは、無境界条件によるなら、現在の我々の宇宙に到達し得る確率が高くなることを指摘している。

「どのような宇宙の特性が同時に生じやすいかを見つけるために、無境界の仮説とともに、歴史の和を用いることができる。例えば、宇宙が、現在の密度を持つていて、あらゆる方向に、ほぼ同等の膨張率で膨張する確率を計算することができる。これまでに検討されたモデル——単純化されたモデル——では、この確率は高くなることがわかっている。つまり、無境界条件によるなら、宇宙の現在の膨張率がどの方向に

対しても同じということは、非常にあり得ることだという結論が得られる。これは、どの方向にもほぼ同等の強度を持つ、マイクロ波のバックグラウンド輻射の観測事実とも一致している。もし、宇宙がある一方に急速に膨張していれば、その方向の輻射は余分の赤方偏移によって減少してしまうことになる。

無境界条件に基づくこれ以上の予測は、現在、研究中である。殊に興味深い問題は、初期宇宙における均一密度からのずれが、どの位の大きさであったかということである。このずれがあつたからこそ、まずはじめに銀河が形成され、次に星が生まれ、そして最後に我々人間が出現してきたのである。不確定性原理によれば、初期宇宙の完全な均一性はあり得ない。というのは、粒子の位置や速度に、いくらかの不確定性あるいはゆらぎがあつたはずだからである。無境界条件を用いるなら、不確定性原理によつて許容される最小限の非均一性をもつて、宇宙がスタートしたはずだということが分かる。宇宙は、インフレーション・モデルにあるように、急速に膨張する時期を経過したにちがいない。この時期、はじめにあつた非均一性は増幅され、我々が現在観測しているような構造をもたらすこととなつたものと考えられる。膨張する宇宙の中で、場所ごとにわずかづつ物質の密度が違うため、密度の高いところでは重力により膨張がおさえられ、収縮が始まつたものと思われる。これが、銀河、星、そして我々のような生命体の形成を導いてきたのである。このようにして、我々が宇宙に見ているすべての複雑な構造は、宇宙の無境界条件——量子力学の不確定性原理とともに——によつて、説明されることになるであろう。」⁽³⁰⁾

ングは、この分類はあくまでも人為的な分類であるとしている。素粒子物理学の進歩により、力は「力を担う粒子」(force-carrying particles)の相互作用としてとらえられるようになつた。それぞれの力を担う粒子は次のものである。

重力を担う粒子は、スピン2で質量0のグラヴィトンである。

強い核力を担う粒子は、グルーオンであり、陽子や中性子の中でクオーカクを結び付けている。

弱い核力を担う粒子は、 100GeV ($=10^{12}\text{eV}$) の質量を持つ W^+ 、 W^- 、 Z^0 と呼ばれるベクトル・ボゾンであり、放射能と関係し原子核崩壊を引き起す。

電磁気力を担う粒子は、スピン1で質量0のフォトンである。

現在では、これら四つの力を担う粒子は、すべて初期宇宙においては統一されていたという見方が示されている。

すでに四つの力のうち、電磁気力と弱い核力については、一九六七年、ワインバーグ (Steven Weinberg) とサラム (Abdus Salam) によって統一理論——「ワインバーグ-サラムの理論」——が提示され、実験的に理論が実証された。現在、これら二つの力と強い核力を統一する「大統一理論」(grand unified theory; GUT) の実証が問題となつており、世界中の研究者が、実験的確証の発見をめぐって凌ぎを削つていている。更に、「完全な統一理論」が構想されており、大統一理論が取り込めなかつた重力も含めて、四つの力をすべてを統一しようという理論である。

ホーキングは、一般相対性理論と量子論を結合した量子論的重力理論の研究から、四つの力を統一した「完全な統一理論」の出現は、それほど遠い将来のことではないと予言している。

「」や「ワインバーグ-サラムの理論」、「大統一理論」、「完全な統一理論」を順に辿りながら、初期宇宙の研究と力の統一理論がどのように関連しているのかを、見てみたい。

① ワインバーグ-サラムの理論

ビッグバンから、 10^{-10} 秒後、宇宙がまだ太陽系ほどの大きさのとき、電磁気力と弱い核力が分離した。ワインバーグ-サラムの理論は、これら二つの力を統一する理論である。

ホーキングは巧みな比喩をもつて、力の統一という考え方を次のように説明している。

「ワインバーグ-サラムの理論は、自発的な対称性の破れ (spontaneous symmetry breaking) を明らかにした。つまり、エネルギーが低い状態では全く別の粒子に見えていたものが、実は状態が異なるだけで、すべて同じタイプの粒子であることが明らかにされたのである。エネルギーが高ければ、これらの粒子はすべて同様に振舞う。これは、ルーレットの輪の部分を回転しているルーレット・ボールの振舞いに似ている。エネルギーが高いとき(輪が速く回転している場合)、ボールの振舞いは基本的に一つしかない——つまり、輪のところをぐるぐると回転するしかない。しかし、輪の速度が落ちてくると、ボールのエネルギーが減少し、最終的には、ボールは三十七個のスロットのどこかに落ちる。別の言い方をするなら、低いエネルギーでは、ボールは三十七個の異なつた状態で存在するのである。もし、何等かの理由で、低いエネルギーでしかボールの観測ができないとしたら、三十七個の異なつたボールがあると思うであろう。

ワインバーグ-サラムの理論では、エネルギーが 100GeV よりもずっと高い場合には、この粒子間の対称性は破られる。トンとは、同様に振舞う。しかし、粒子のエネルギーがより低い場合には、この粒子間の対称性は破られる。

W^+ 、 W^- 、 Z^0 は大きな質量を獲得し、これらが担う力は非常に短い範囲にしか到達しなくなる。ワインバーグとサラムが理論を提示したとき、それを信じた人はほとんどいなかった。また粒子の加速器は、 W^+ 、 W^- 、 Z^0 といった粒子を生み出すに必要な 100GeV に到達するほど、強力ではなかつた。しかし、それから十年ほどの間に、この理論が低いエネルギーで予測したことがらが、実験とぴたりと一致したことにより、一九七九年に、サラムとワインバーグはノーベル物理学賞を授与されたのであつた。このとき、電磁気力と弱い核力について、同様の統一理論を示唆していたハーバードのグラショウ (Sheldon Glashow) もノーベル物理学賞を授与されている。⁽³¹⁾

一九八二年と八三年に、カルロ・ルビアが率いるチームが、CERNの陽子-反陽子衝突型加速器を用いて、 100GeV 以上のエネルギーで、電磁気力と弱い核力を統一した特性を持つ W 粒子と Z 粒子を作り出した。

② 大統一理論

宇宙では、ビッグバンから 10^{-36}s の時点、つまり、宇宙の大きさが 10^{-25}m センチメートル程度であったとき、強い核力と、電磁気力と弱い核力を統一した力は、更に統一されていたと考えられている。

ワインバーグ-サラムの理論の成功は、統一理論における基本的考え方の正しさを確認することとなり、この路線での展開に拍車をかけた。

「電磁気力と弱い核力の統一の成功は、これらと強い核力を統一しようという試みへと発展した。これは大統一理論と呼ばれている。この名前には誇張がある。大統一理論は大がつくほど大きくはないし、また、これは重力を含めていないのだから、完全な統一がなされるわけでもないのである。また、それは本当に完

全な理論でもないのである。その理由は、いくつかのパラメータを含んでいて、そのパラメータの値は理論から予測することができます、実験と合うように選ばなくてはならないからである。それにもかかわらず、これは完全な統一理論への一段階であると思われる。大統一理論の基本的考え方は、次のようにある。すでに触れたように、強い核力はエネルギーの高いところでは、弱くなる。他方、漸近的自由性(asymptotic freedom)——クオーレやグルーが、エネルギーが高くなるにつれ、次第に自由粒子のように振舞うようになること——を示さない電磁気力や弱い核力は、エネルギーの高いところでは、より強くなる。大統一エネルギーと呼ばれる非常に高いエネルギーにおいては、これら三つの力が皆同じ強さを持つようになり、一つの力の別の側面として統一されるのではないだろうか。また大統一理論によれば、この高いエネルギーにおいては、電子やクオーレなどのスピン½の物質粒子が本質的に同一となり、統一がもう一つ達成されると予想している。

大統一エネルギーはよく分かっていない。しかし、それは少なくとも 10^{15}GeV 位なくてはならないであろう。現在の世代の粒子加速器では、粒子を約 10^2GeV 程度のエネルギーで、衝突させられる。また、 10^3GeV まで引き上げることの出来る加速器が計画されている。しかし、大統一エネルギーにまで、粒子を加速出来る器械は、太陽系ほどの大きさのものではなくてはならないのである。⁽³²⁾

このようなわけで、大統一理論を加速器で証明することは不可能である。しかし、当初ワインバーグ-サラムの理論が証明されたときのように、低いエネルギー・レベルで大統一理論の影響を確認し得るような現象が探求され、実験が行われている。このような影響のうち、最も興味深いものは、陽子が電子などの軽い粒子へと自然崩壊するという予測である。このような予測が可能な理由は、大統一エネルギーでは、クオーレと陽電子の間に本

質的相違がなくなるからである。陽子の中の三つのクォークは、普通、陽電子に変化するだけのエネルギーを持つてないが、不確定性原理から、ごく稀に、この変化をとげるものがあるとみられている。一個のクォークが崩壊に十分なエネルギーを得る確率は、 10^{-30} 年と非常に小さい。 10^{30} 年という年数は、ビッグバン以来の宇宙の年令—— 10^{10} 年——よりもはるかに長いのである。このようなことから、陽子の自然崩壊の確率は実験的には検証し得ないと思う人もいるであろう。ところが、多数の陽子を含む多量の物質を観察することによって、崩壊をつかまえる確率をあげることができるのである。もし、 10^{31} 個の陽子を一年間観察したら、少なくとも一個以上、陽子の崩壊を観測し得ると期待できるのである。このような実験はすでにいくつか行われているが、まだ、陽子あるいは中性子の崩壊の証拠は得られていない。⁽³³⁾

③ 完全な統一理論

宇宙の初期においては、 10^{-44} 秒の時点——プランクの壁と呼ばれ、これ以前のことは現在の理論では分からぬ——で、完全に統一されていた力から、重力が分かれてきたと考えられている。この時点での宇宙の大きさは 10^{-34} cm 程度であり、陽子の中に納まってしまう位の大きさであった。

この段階における宇宙を記述するためには、重力の量子化が必要となる。本質的に古典論である一般相対性理論と量子論を統合しようという試みは非常に困難であった。しかし、ついに一九七六年に至り、「超重力理論」(supergravity theory)が提示され、一九八四年には、それを乗り越える理論として、「弦理論」(string theory)が注目され、更に新たな改良が加えられたシユワルツ (John Schwartz) とグリーン (Mike Green) の「超弦理論」(superstring theory)、更に、グロス (D. Gross) らの「ヘテロティックな弦理論」(heterotic string theory)

が提示されるに至って、大いに展望が開けてきた。

「超弦理論」や「ヘテロティックな弦理論」は、カルーザ・クラインの多次元空間理論、ボース粒子（整数スピニン）とフェルミ粒子（半整数スピニン）の間の対称性を議論する超対称性の理論、それに弦理論を基本概念として取り入れた理論である。

ホーキングはこの間の理論的変遷をたどり、それぞれの理論の得失を述べているので、それを要約してみよう。⁽³⁴⁾

長い間、一般相対性理論と量子力学の結合は信じがたいとされてきたが、ついに一九七二年に至り、詳細な計算によって確認され、その四年後には、「超重力」(supergravity)と呼ばれる解の可能性が示唆された。ここにおける考え方は、重力を担うスピニン 2 のグラヴィトンと呼ばれる粒子と、スピニン $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、0 の他の新粒子と組み合わせるのである。すると、これら組み合わされた粒子はすべて、同一の「超粒子」(superparticle) の別々の側面と見なすことができるのである。このようにして、スピニン $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{3}{2}$ のヴァーチュアルな正粒子／反粒子のペアーや、スピニン 0、1、2 の力を担う粒子とを統一するのである。スピニン $\frac{1}{2}$ のヴァーチュアルな正粒子／反粒子のペアーや、負のエネルギーを持つはずであるから、スピニン 2、1、0 のヴァーチュアルな正粒子／反粒子のペアーや持つ正のエネルギーとキャンセルすることになるであろう。これにより、考えられる多くの無限をキャンセルできるはずであると考えられた。しかし、この路線での理論化は、あらゆる既知の粒子を扱えないことが判明し、行き詰まってしまったのである。

一九八四年に至り、突如、弦理論が見直されることとなつた。すでに十年も前に、強い核力を説明するためのモデルとして提出され、その後葬られてしまつた理論が、今度は宇宙を説明する理論として蘇つたのである。その直接のきっかけは、弦理論によるとアノマリーや無限を一举に排除できることが示されたことにある。

弦理論における基本的要素は、空間の一点を占める粒子ではなく、長さという次元のみを持つ、無限に細い弦である。弦には端点を持つもの（開いた弦）と、端点が閉じたループを形成しているもの（閉じた弦）がある。粒子は、各瞬間に、空間の一点を占めているが故に、その歴史は、時・空における世界線（world-line）であらわされるが、弦は、各瞬間に、空間の線を占めているが故に、その歴史は、時・空における世界面（world-sheet）という一次元の面であらわされる。開いた弦の世界面は、たんざくのような形になり、閉じた弦の世界面は、円形の切り口を持ったチューブの形になる。

弦理論では、これまで粒子と思われていたものは、弦を伝播する波動としてとらえられる。開いた弦の最低レベルの振動はフォトンに対応し、閉じた弦の最低レベルの振動はグラヴィトンに対応している。ある粒子が他の粒子を一個吸収したり放出したりする現象は、弦の連結や分割に相当するのである。

多くの研究者が弦理論の研究に着手した結果、新たな改良が加えられ、「ヘテロティックな弦理論」と呼ばれる理論が生まれた。これによれば、我々が観測しているようなタイプの粒子を説明できるように思われる。しかし、ここにも問題が残っている。つまり、弦理論で出てきた無限は、ヘテロティックな弦理論では、すべてキャンセルしてしまうと考えられているが、まだ確かではないこと、そしてより大きな問題は、この理論がコンシンステンスになるためには、時・空が十次元、あるいは二十六次元にならなければならないということである。もしこれらの余分な次元が本当に存在するのなら、何故、我々はそれに気付かないのだろうか。何故、我々は空間の三次元と、時間の一次元しか見ないのであろうか。現在、その理由は、余分な次元は空間の中に非常に小さな形で—— 10^{-30} インチ——巻き込まれているからだと示唆されている。つまり、あまり小さく巻き込まれているため、我々は気が付かないのだというのである。では、何故、ある次元だけが小さなボールのように巻き込まれているのだろう

うか。つまり、何故、時間の一次元と空間の三次元だけが、平らに引き伸ばされ、他の次元はきつく巻き込まれたままになっているのであろうか。

弦理論においては、時・空の次元数の外にもまだ、弦の上の波動と特定のタイプの粒子とをどのように関係づけたらよいかといふことも分かつておらず、今すぐこれを、物理学の統一理論として喝采をもって迎えるわけにはいかないのである。

しかし、重力場をも含めてあらゆる場と粒子を完全に統一しようという弦理論を考察したホーキングは、「完全な統一理論が発見できる見通しは、ずっと明るくなってきた」とも、「究極的な自然法則の探求は終わりに近付いている」とも述べている。そしてその理由を、「宇宙がよくわかつてきたから」だとしているのである。

しかし、これは一体どういうことなのであろうか。これはつまり、より高いエネルギーをもつた素粒子を衝突させることにより、より基本的な物質構造が探求できるとして進展してきた素粒子物理学の従来の路線では、歩み続けることができないということを意味しているのである。現在でも、クォークや電子よりも、更に基本的な構造があるかも知れないと考えている研究者がいることは確かである。しかし、ホーキングは、「この『入れ子』（boxes within boxes）構造に対し、重力が限界を設定することになると思われる」として、次のようにならべて論じているのである。

「プランク・エネルギー (10^{19}GeV) よりも高いエネルギーをもつた粒子が得られれば、その質量は非常に凝縮されているので、孤立した小さなプランク・ホールを形成することになるはずである。これまで洗練の度合いを高めてきた理論は、エネルギーがより高くなれば、限界にぶち当たることになる。そして、宇宙の究極的な理論といふものが出てくるはずである。もちろん、プランク・エネルギーは、現在我々が実験的に

作り出せるエネルギー (10^{46}GeV) とは比べものにならないほど高い。」のギャップを、近い将来、粒子加速器で埋められるとは思えない。ところが、宇宙の非常に初期の段階では、「」のやうな高いエネルギーが満ちていたに違いないのである。初期宇宙の研究と、数学的コンシスティンシーの要請から、我々のうちの人かが生きてくる間に、完全な統一理論が得られる確率は高いと思う。⁽³⁸⁾

<注>

- (1) John Boslough, *Stephen W. Hawking's Universe*, William Morrow and Company Inc., New York, 1985.
- (2) ハーマン・ボズロー著、鈴木圭子訳、『ホーキングの宇宙』、地人書館、一九八六年、六〇頁。
- (3) Stephen W. Hawking, *A Brief History of Time: From Big Bang to Black Holes*, p. 49.
- (4) Ibid., p. 49.
- (5) Ibid., p. 50.
- (6) Ibid., pp. 121-2.
- (7) ハーマン・ボズロー、前掲書、七四頁。
- (8) Stephen W. Hawking, ibid., p. 88.
- (9) Ibid., p. 92.
- (10) Ibid., p. 102.

- (11) Ibid., p. 103.
- (12) Ibid., p. vii.
- (13) Ibid., p. 13.
- (14) Ibid., p. 105.
- (15) Ibid., p. 105.
- (16) Ibid., pp. 105-7.
- (17) Ibid., p. 105.
- (18) Ibid., pp. 107-8.
- (19) Ibid., p. 112.
- (20) Ibid., p. 130.
- (21) Ibid., p. 132.
- (22) Ibid., p. 132.
- (23) Ibid., p. 132.
- (24) Ibid., p. 133.

- (25) Ibid., p. 133.
- (26) Ibid., p. 136.
- (27) Ibid., pp. 135-6.
- (28) Ibid., p. 139.
- (29) Ibid., p. 139.
- (30) Ibid., pp. 139-40.
- (31) Ibid., pp. 71-2.
- (32) Ibid., p. 74.
- (33) Ibid., pp. 75-6.
- (34) Ibid., pp. 157-65.
- (35) Ibid., p. 156.
- (36) Ibid., p. 156.
- (37) Ibid., p. 156.
- (38) Ibid., p. 167.

四、現代宇宙論と人間

ホーキングは、宇宙論の物理学的議論を踏まえつつ、「宇宙における人間の位置」、ならびに「宇宙の創成と神の関与」の問題を論じてゐる。本節では、「人間原理」(anthropic principle)との関連において、宇宙における知的生命体——地球の人間だけでなく他の知的生命体の可能性も考慮していく——の出現の問題が、いかにして論じられているかを見てみたいことにしたい。神の問題は、次節でとりあげる。

ホーキングは、自然法則を記述する基礎方程式に出てくる基本定数は、「任意とさうよりなんらかの意味で非常に注意深く選ばれたもの」のように見えるとした上で、次のような具体的な例をあげている。

「例えば、もし中性子-陽子の質量差が電子の約一倍でなかつたとしたら、元素を構成し、化学や生物学の基礎となつている 10^0 種あまりの安定な核種は存在しなかつたであろう。同様に、もし陽子の重力質量がかなり違つていたとしたら、これら核種が内部で生産されたような星は形成されなかつたであらうし、また宇宙の初期段階の膨張が実際そうであつたよりも若干小さいか、もしくは大きかつたとする、宇宙は「」

ような星が進化をたどる前に崩壊してしまったか、または膨張が速すぎて重力収縮による星の形成が行われなかつたかのいずれかであると思われる。⁽²⁾

あるいはまた、次のようにも指摘しているのである。

「驚くべきことに、これら基本定数の値が、生命体の出現を可能にするよう、極めて微妙に調整されているのである。例えば、電子の電荷がほんのわずか違っていても、星は、水素やヘリウムを燃やすことは出来ないし、爆発することもできなかつたのである。もちろん、SF作家の夢想をもはるかに超えた、別の知的生命体が生まれていた可能性はあるかもしれない。例えば、太陽のような星の光を必要とせず、超新星爆発によって作られた重元素も必要としないような知的生命体である。このような可能性があるとしても、知的生命体の発達が許されるための基本定数の選択可能幅は、ごくわずかであつたことは明らかである。⁽³⁾

基本定数の値が現在の値であることは、宇宙における知的生命体の出現にとって重大な関係があるので、「これらの初期条件やパラメーターに対する制約を一つの原理の位置にまで昇格させて考える人さえある」と述べている。この原理が、「人間原理」と呼ばれる原理である。ホーキングも、条件付きながら、「人間原理」に対しても賛成の立場を表明している。

ホーキングは、この「人間原理」を、次のように定式化している。「我々は宇宙をこのように見ている、その理由は、我々が存在するからである⁽⁵⁾」、あるいは、「我々は宇宙をこのように見ている、その理由は、もし宇宙がこのような姿でなかつたなら、我々がここにいて観測をしているなどということはあり得なかつたであろうから⁽⁶⁾」。

ホーキングは、このように定式化した「人間原理」を、更に、「強い人間原理」と「弱い人間原理」の二つに分

けている。

まず、「弱い人間原理」であるが、これは、「知的生命体の発達に必要な条件は、空間的・時間的に膨大な（あるいは無限な）一個の宇宙にあって、時間的・空間的に限定された領域でのみ満足される⁽⁷⁾」とするものである。我々のような知的生命体の出現にとって、宇宙全体が緊密な関係を有しているとはせず、せいぜい銀河系の範囲でその関係を考察するに止どめているのである。

このような「弱い人間原理」の立場では、知的生命体の出現に一〇〇億年もの時間がかかつた理由を、次のように説明している。

「まず第一に、初期の世代の星が形成されなければならなかつた。それらがもともと存在していた水素やヘリウムの一部を、我々を構成している炭素や酸素へと変換した。これらの星が超新星爆発を起こし、その残骸が次の世代の星や惑星の材料となつた。我々の太陽系は、約五〇億年前に、このようにして作られたのである。地球が出来てから、はじめの一〇から二〇億年の間は、複雑なものが形成されるには熱すぎた。残りの三〇億年の間に、ゆっくりとした生物的進化が起こつた。最も単純な生命体から進化し、ビッグバンがどれほど以前に起こつたかを測定し得る人間の出現をもたらしたのである。⁽⁸⁾

我々人間のような知的生命体の出現が、ビッグバン以降、約一〇〇億年後のことであり、一〇〇万年後でもなければ、一兆年後でもなかつたということは、單なる偶然ではなく、基本定数の値によって微妙に調整されているのである。

ホーキングは、このような「弱い人間原理」の妥当性や有用性に対し、異を唱える人はほとんどいないだろうとしている。

しかし、この考え方を更に押し進め、「強い人間原理」というものを提唱している人たちもいる。では、「強い人間原理」とは、どのようなものであろうか。これは、初期条件を異にした宇宙あるいは領域について、「基本定数のうちいくつか、あるいはすべてが、宇宙ごとに、あるいは一つの宇宙の中の領域ごとに、異なる」として、宇宙のアンサンブルを想定し、我々の宇宙は、無数のアンサンブルの中から知的生命体を生み出すことに成功した宇宙なのだと解釈するのである。そして、宇宙は我々のような知的生命体を生み出すために存在しているのだと主張するのである。

「強い人間原理」によるなら、多くの異なる宇宙が存在する、あるいは一つの宇宙の中に多くの異なる領域が存在するとした上で、それぞれの宇宙あるいは領域は、それぞれの初期配置と、それぞれの科学法則を持つていると想定されている。そのような宇宙の大半は、複雑な生命体を発達させるための適切な条件を有していなかつたであろう。我々の宇宙と似たごく少数の宇宙においてのみ、知的生命体が発達し、「何故、宇宙は、我々が見ているような姿をしているのだろうか」と問うているのである。その答えは簡単である。もし、このような宇宙でなかつたら、我々はここに存在し得ないからである。⁽¹⁰⁾

しかし、ホーキングは、観測された宇宙の状態の説明として「強い人間原理」を持ち出すには、問題があるとして、次の二点を批判している。

「第一に、いかなる意味において、これらの異なる宇宙がすべて存在するといえるのか。もし、各宇宙が本当に分離しているのであれば、他の宇宙で生じたことは、我々の宇宙に何等観測可能な影響を及ぼすことはできないはずである。それ故、我々は思考の経済の原理に基づき、理論からそのような宇宙を削除すべきである。また、もし各宇宙が、単に一つの宇宙の別々の領域であるというなら、各領域で物理法則は同じで

なくてはならない。その理由は、もしそうでなければ、一つの領域から別の領域へと、連続的に移動することができないからである。この場合、領域間の相異は、初期配置の違いだけであり、「強い人間原理」は「弱い人間原理」へと還元されることになる。

次に、「強い人間原理」に対する第一の反論は、科学の歴史の全体的潮流に逆らっているということである。我々は、プラテマイオスの天動説およびそれ以前の説からはじめて、コペルニクスおよびガリレオの地動説を経て、現代の宇宙論へと進んできた。現代の宇宙論では、地球は、約¹²10個もある観測可能な銀河の一つであるごく普通の渦巻き状銀河の外縁に位置した太陽と呼ばれる平均的な星の周囲を回っている、中位の惑星ということになった。しかし、「強い人間原理」は、これほど広大な宇宙が、すべて我々のために存在するなど主張するのである。これはとても信じ難い。確かに我々の太陽系は、我々が存在するための前提条件である。また、この議論を、重元素を作り出した前の世代の星を考慮して、我々の銀河系まで拡大することは許されるかも知れない。しかし、他の銀河や宇宙そのものにまで、大規模な一様性と等方性を要求する必要性はないようと思える。⁽¹¹⁾

このようにホーキングは、「弱い人間原理」は認めるが、「強い人間原理」に対しても批判的である。更に「人間原理」全体に対しても、「この人間原理は、いろいろな物理パラメーターがとる値の間に認められる注目すべき多くの数値的関係にある種の説明を与えてくれるが、それは十分に満足できるものではない」という発言に窺えるごとく、これを究極的説明とは認めない立場に立っていることは明らかである。

彼は、「人間原理」を導くに至ったパラメーターの特徴、つまり、人間を生み出す上で基本定数がかくも微妙に調整されていたという特徴を、「完全な統一理論」を構築することによって解決していくことをしているのである。

〈注〉

- (1) ジョン・ボズロー、『ホーキングの宇宙』、一五八—九頁。
- (2) 同前、一五九頁。
- (3) Stephen W. Hawking, *A Brief History of Time: From Big Bang to Black Holes*, p. 125.
- (4) ハム・ボズロー、前掲書、一五九頁。
- (5) Stephen W. Hawking, *ibid.*, p. 124.
- (6) *Ibid.*, p. 183.
- (7) *Ibid.*, p. 124.
- (8) *Ibid.*, p. 124.
- (9) *Ibid.*, p. 125.
- (10) *Ibid.*, pp. 124-5.
- (11) *Ibid.*, p. 126.
- (12) ハム・ボズロー、前掲書、一六〇頁。

五、現代宇宙論と神

古今東西、宇宙論は、常に形而上学の問題と関係してきた。ホーキングは、『時の小史』において、様々な宇宙論の歴史的発見と関係させながら、この問題を論じている。この問題は、このようにキリスト教の伝統をもつ西洋では、創造の神 (God) と宇宙 (cosmos) との関係として、議論されてきた。そりや、西洋世界において、古代から現代に至る経過の中で、神と宇宙の関係がどのように議論され、現在、どのような地点にまで到達したのかを、辿ってみることにしよう。

まず、プレマイオスの宇宙モデルからはじめよ。キリスト教会は、この宇宙モデルは聖書の記述と一致しているとして承認したのであるが、その理由は、最も外側の天球——恒星天——の更に外側に、「天国と地獄のための十分な空間が残されているから」であった。このにはすでに、宇宙が、空間的に閉じていているのか開いている

のか、という議論へと導かれる萌芽を読み取ることができる。

また、ユダヤ教・キリスト教・イスラム教の伝統では、宇宙は、有限の過去のある時からスタートしたと考えていた。そして、宇宙のスタートをめぐる議論の中から、スタートを創造主の行為として説明するものが登場してきた。これは、宇宙の起源論であり、その問題意識はそのまま現代の宇宙論にまで、引き継がれてきている。

一九二九年、ハッブルの観測により、宇宙が膨張している事実が発見された。宇宙の起源論は、この発見によりはじめて科学の対象となつたのである。神はいつでも好きなときに宇宙を造ることが出来たとするそれまでの考え方が改められ、「神は、ビッグバンの瞬間に宇宙を造った、また、その瞬間よりももと後であつたとしても、ビッグバンが存在した」とく見えるよう、宇宙を造った」という考え方になつた。このビッグバンによる宇宙像は、「神を排除しはしないが、神がいつ創造の仕事をしたのかについては、限定を加えることとなつた」である。

一九五一年、ローマ法王ピウス十二世は、「ビッグバン・モデルは聖書と一致している」と正式に宣言したのである。法王は、法王庁科学アカデミーへの法王告諭の中で、

「事実、現代の科学は、数百万世紀をひとまたぎにせりと振り返り、(神が)元始に発せられた『光あれ』の証人となる」とに成功した。この元始のその瞬間、物質といつしょに、光と輻射の海が、無から爆発して、

化学元素の粒子は割れて数百万の銀河を成したのだ」

とした後、更に続けて次のように述べていてる。

「科学は、宇宙進化の方向とコースをたどってきた。そして、宇宙の進化が仮借なく向かっている目標をひと目ちらりと見ることができたばかりでなく、宇宙のはじまりは一〇〇億—一〇〇億年前だということを

つきとめもした。かくして、物理的証拠の特徴である決定性でもって、宇宙の偶然性を確認し、また、宇宙が創造主の手から生じた時代に関する根拠ある結論を確認した。よって、天地創造は時間の中で起こった。

ゆえに、創造主は存在する。⁽⁵⁾ 神は存在する。

神の意志次第で、宇宙はいつでもスタートさせることができたはずだという確信——世界に対する神の介入の自由——が、ビッグバン・モデルの登場により、ビッグバンの時点からスタートしたと書き改められても、人々は依然として、「神は万能なのだから、自分の望む通りにスタートさせることができたはずである」と論じ、宇宙の初期条件の選択における自由を主張した。

一般相対性理論で議論する場合には、ペンローズとホーキングが証明したビッグバン特異点に関する特異点定理があり、宇宙の初期状態そのものの解明は不可能となってしまう。しかし、「もし、時間のはじまりの直後まで、熱いビックバン・モデルが正しく成立するなら、宇宙の初期状態は、非常に注意深く選択されなくてはならなかつたということになる。我々人間のような存在を生み出そうとする意図を持った神の行為と考える以外、何故、宇宙はこのような形でスタートしたのかを説明することは、困難となるであろう」と述べている。このように、古典論で議論する限り、宇宙のスタート時点には迫れないでのあるから、初期条件そのものについては論じようがない。それ故、初期条件の選択においては、神の関与の余地が残されていたことになる。

しかしホーキングは、一般相対性理論に量子論を導入することによって、古典理論では迫ることの出来なかつた、宇宙論のスタート時点の問題に考察を加えた。

「量子力学と一般相対性理論を結合すると、以前には現出してこなかつた、新たな可能性が生まれてくるようと思われる。空間と時間が一緒になつて、有限でしかも特異点や境界を持たない、四次元空間を形成す

るのである。次元の数は多いが、ちょうど、地球の表面のようなものである。この考えによれば、宇宙に関する多くの観測事実、例えば、大きなスケールにおける一様性や、小さなスケールにおける同質性からのずれ——銀河や星や人間など——を、説明できるようと思われる。また、我々が観測している時の矢さえも説明できるのである」

と、新たな展開の可能性を語つた後、神の問題に議論を進め、

「しかし、もし宇宙が、特異点や境界を持たず、完全に自己完結しており、統一理論によつて完全に記述されるということであれば、創造主としての神の役割にはかり知れない影響を与えることになる。かつてアインシュタインは、『宇宙の建設にあたつて、神はどれほどの選択可能性を持つていたのであろうか』と問つたが、もし、無境界仮説が正しいなら、神は、初期状態の選択において、全く自由を有していなかつたといふことになる。もちろん、神は、宇宙の法則の選択においては、依然として自由を有していたはずであるが、しかしこれは、本当の意味での選択とはいえない。例えば、ヘテロテイックな弦理論のような完全な統一理論——自己矛盾を含まず、宇宙の法則を探求したり神の性質を問う人間の存在可能性を許容するようない理論——は、一つか、もしくはほんの数個しかなかつたであろう。⁽⁸⁾

このようにホーキングは、初期条件については選択の余地がなかつたであろうことを述べている。更にまた、無境界仮説が正しいとするなら、宇宙には「はじまりはなかつた」⁽⁹⁾ということ、つまり、「創造の瞬間はなかつた」⁽¹⁰⁾という結論が導かれてくるのである。

理論物理学から問題提起を受けて、神学はどのように応答するのであろうか。一九八一年、ヴァチカンは、「科学の専門家を招いて宇宙論に関する助言を得ようと決心した」⁽¹¹⁾。このとき、ホーキングは、時・空は有限であつた

が境界は存在しなかつたといつ可能性を論じたのである。その発表は高度に数学的であつたため、誰一人として——ホーキング自身も含めて——、この無境界仮説がもたらすであろう含意まで洞察し得る人物はいなかつた。この会議の終わりに、ローマ法王、ジョン・ポール二世は、「ビッグバン以降の宇宙の進化を研究することはよいが、ビッグバンそのものは研究すべきではない」というのは、それは創造の瞬間であつて、神の御業であるから⁽¹²⁾と、ヴァチカンの立場を明確にした。ホーキングは、ローマ法王が彼の発表内容を理解していなくてよかつたと述べている。ホーキングの発表は、「宇宙にははじめはなかつた、つまり、創造の瞬間はなかつた」という結論であつたからである。そして、ビッグバンが存在しなかつたといふことは、神の介入の余地のなかつたということなのである。

このようにホーキングは、宇宙には創造の瞬間はなく、それ故、神の関与の余地もなかつたと述べたのであるが、神は存在しないと言つてゐるのではない。ホーキングは、宇宙論の研究を通して真正面から神の問題と取り組み、「神の心を知る」ことに最大の関心を置いているのである。

では彼は、どのようにして、我々が神の心を知ることができるようになると考えているのであろうか。それは、完全な統一理論の出現によつて、一たび、物理学の統一が達成されることになれば、その基本的な考え方はある人々に理解され、誰もが、「何故、人間、そして宇宙が存在するのか」という議論に参加できるようになる。そして、我々が、「もし、」の問い合わせに対する答えを見いだすことができるなら、それは究極的な意味における人間理性の勝利となるであろう——というのは、そこにおいてはじめて、我々は神の心を知ることになるだろうからである⁽¹⁶⁾と、しているのである。

ホーキングは、人間の知性に対するのよさな信頼を語る⁽¹⁷⁾によつて、『時の小史』を結んでいる。

〈注〉

- (1) Stephen W. Hawking, *A Brief History of Time: From Big Bang to Black Holes*, p. 3.
- (2) Ibid., p. 9.
- (3) Ibid., p. 47.
- (4) Ibid., p. 47.
- (5) ジョン・A・オキー「新しい宇宙論が神学に与えた衝撃」、ロバート・ジャストロウ著・趙慶哲訳『だれが宇宙を創ったのか』、講談社ブルーバックス、一九八六年。
- (6) Stephen W. Hawking, p. 11.
- (7) Ibid., p. 127.
- (8) Ibid., pp. 173-4.
- (9) Ibid., p. 116.
- (10) Ibid., p. 116.
- (11) Ibid., p. 116.
- (12) Ibid., p. 116.
- (13) Ibid., p. 116.
- (14) Ibid., p. 175.
- (15) Ibid., p. 175.
- (16) Ibid., p. 175.
- (17) Ibid., p. 175.

六、むすび

今や、物理学は宇宙の歴史学となつたのである。実時間における記述によるなら、我々の宇宙は、約一五〇億～一〇〇億年前にビッグバンによつて創成されたことが判明している。時空の膨張が引き起⁽¹⁸⁾され、その膨張過程の中や、あらゆる素粒子から、原子、星、銀河、超銀河まで、「すべて」が生み出されてきたのである。そして、この「すべて」の中には、我々人間のような知的生命体も含まれている。この知的生命体は、今や、自己を生み出した宇宙を対象として、その起源ならびに将来について考察を行い、宇宙像を描き出すとともに、「宇宙に

おける人間の位置」を探求し、「宇宙の創成に対する神の関与」の問題を論じている。

現在、「宇宙における人間の位置」については、科学の成果を踏まえた上で、「人間原理」の立場から活発な議論が展開されており、人間存在をめぐる興味深い議論が行われている。また、「宇宙の創成に対する神の関与」の問題については、量子論的宇宙論において虚時間による記述が提示されており、これによると神の関与の余地はなかつたとの結論が導き出されることになる。この結論は、あくまでも現在の段階での結論であつて、科学の進歩とともに書き換えられる可能性を有している。しかし、科学の立場から提示されたこのような知見は、必ずや様々な領域に、重大な影響を及ぼすことになるであろう。

「宇宙における人間の位置」からは、人間存在に内在する意味や価値の問題が新たに問いかれるようになるであろうし、また、「宇宙の創成に対する神の関与」からは、新たな神学的議論が展開されるようになるであろう。科学技術の目覚ましい進歩を可能にした還元主義の手法を人間存在に対する考察にまで及ぼし、人間といえども単なる物質に過ぎないという人間論が一時横行した。しかし、今や、宇宙論的考察を通して、我々の宇宙における人間の出現が、いかに奇跡的な出来事であつたかが明らかにされつつある。我々は、このような知識を踏まえた上で、我々の時代にふさわしい人間観を構築していく必要があるのである。

ホーキングの『時の小史』は、まさにいのよくな究極的議論へと、我々を導いてくれる傑作である。

参考文献

- (1) Stephen W. Hawking, *A Brief History of Time: From Big Bang to Black Holes*, Bantam Press, London, New York, Toronto, Sydney, Auckland, 1988.

西洋世界には、科学の世界で真に創造的な仕事をしてゐた研究者が、全力をあげて非専門家にも理解できる啓蒙書を著すところ伝統がある。ホーキングの『時の小史』は、そのような啓蒙書の中でも、抜群の書の一つである。

『時の小史』を読んで、筆者はすぐにアインシュタインとインフエルトが著した、『物理学はいかにして創られたか』(Albert Einstein & Leopold Infeld, *The Evolution of Physics: From Early Concepts to Relativity and Quanta*, 1938, Simon & Schuster. 日本語訳は、岩波新書にある)を思い出した。アインシュタインとインフエルトは、この本を書く過程で、どのようにすれば明快な説明ができるかと、議論に議論を重ねたのである。現代物理学を推進してきたアインシュタインが、一九三八年に真剣勝負で書き上げた『物理学はいかにして創られたか』は、当時の物理学の最前線を分かりやすく紹介したものであった。多くの人々がこの本を通して物理学に興味を持ち、また理解を深めていった。

身体的ハンディキャップを乗り越え、執筆に六年の歳月を費やしたホーキングの『時の小史』も、真剣勝負で書き上げられた啓蒙書である。『時の小史』は、まさに彼の命を削つて世に送り出された知の結晶であり、将来、永く人々の間で読み継がれていくことになるであろう名著である。

すでにイギリスやアメリカでは、発売と同時に、この種の本としては異例の売れ行きを示し、また、プラジルでも翻訳が出版され、現在、すごい人気を呼んでいるとのことである。日本語訳も、近いうちに出版されるものと思うが、できることなら著者ホーキングの語り口が直に伝わってくる原書にチャレンジされることを勧める。内容は高度であるが、論旨は明快である。

* 本稿の第一校校正中に日本語訳が出版された。林一訳、『ホーキング、宇宙を語る——ピックパンからブラックホール

めで——』、早川書房である。

- (2) John Boslough, *Stephen W. Hawking's Universe*, William Morrow and Company Inc., New York, 1985.
シムハ・ボズロー著・鈴木圭子訳、『ホーキングの宇宙』、地人書館、一九八六年。
サイエンス・ライターである著者が、ホーキングにインタビューを試みながら書かあげたもので、非常に分かりやすくホーキングの理論のポイントを紹介している。

- (3) 「宇宙の設計図に神の意図を読む男」、『ニューズウイーク』「まサイエンスは」、TBGのトリタニカ、一九八八年。

イハタカノー記事を中止するが、ホーキングの人となりを簡潔にあらわす。

- (4) Michio Kaku & Jennifer Trainer, *Beyond Einstein: The Cosmic Quest for the Theory of the Universe*, The Sterling Lord Agency, Inc., New York, 1987. 久志本克訳『アイハーアタマノヤ超え』、講談社ブルーバックス、一九八八年。

ホーキングの『時の小史』に紹介されてゐる「弦理論」について、更に知りたい人々には、この本が役立つやうである。

- (5) Steven Weinberg, *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*, Basic Books Inc., New York, 1977. 小尾信彌訳『宇宙創成はるの三分間』、タツヤハヌ社、一九七七年。

ホーキングが、「非常に良い啓蒙書」の代表として、一冊だけ名前をあげた本。内容は手堅く、じっくりと腰を落ち着けて読まなくてはならない。ペンジアスとウイルソンの一・七Kバックグラウンド輻射発見の章などは、科学史の観点からみて、非常に興味深い内容が含まれてゐる。

- (6) Richard P. Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton University Press, New Jersey, 1985. 篠江常好・大貫昌子訳『光と物質のふしづな理論——私の量子電磁力学——』、岩波書店、一九八七年。

ホーキングは、重力の量子論を構築する際に、ファインマンの「歴史の和」——つまり「経路積分」——という考え方を採用しているが、この「歴史の和」について更に深く知りたいところには、この本を勧めたい。南部陽一郎著『クォーク——素粒子物理学の最前線——』、講談社ブルーバックス、一九八六年。

(7) ホーキングは、『時の小史』において、素粒子物理学の知識を用いながら議論を展開していく。そこで、素粒子物理学の知識を体系的に学んでおきたいという人には、多少手ごわいかもしれないが、この本を勧める。

- (8) 内山龍夫著『物理学はどこまで進んだか——相対論からゲージ論へ——』、岩波書店、一九八三年。

『時の小史』には、ゲージ理論という言葉は登場してこないが、この理論に基づく考え方は用いられている。統一理論の基礎理論として、現在、注目を浴びているゲージ理論を、その建設にあたって決定的な役割を果たした著者が、分かりやすく解説したものである。

- (9) Jamal N. Islam, *The Ultimate Fate of the Universe*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983. 林一訳『宇宙の未来はどうなるか』、岩波書店、一九八四年。

宇宙の起源に関する書物は相当出版されているが、宇宙の未来について一貫した科学的な筋書きをもつた書物はほとんどないところである。このイスラムの著作は、現代宇宙論を踏まえた上で、「開いた宇宙」と「閉じた宇宙」の「究極的運命」を描き出した傑作である。

- (10) 佐藤文隆・松田卓也著『相対論的宇宙論——ブラックホール・宇宙・超宇宙——』、講談社ブルーバックス、

一九七四年。

筆者がこの本を読んだのは、十一年前の一九七八年のことであるが、そのとき受けた印象の新鮮さと強烈さは、いまだよく覚えている。佐藤文隆教授が、「この本は解説本ではありますが私たちが研究してきたことの研究レポートでもあります」と述べているように、その内容は、非常に手堅いものであった。

- (11) 松田卓也著『これからのお宇宙論——宇宙・ブラックホール・知性——』、講談社ブルーバックス、一九八三年。

先の『相対論的宇宙論』の著者が、その後の約十年間にわたる宇宙論研究の進歩を取り入れて、書き下ろした啓蒙書である。「素粒子論的宇宙論」、「ブラックホール」、「人間原理」など、ホーキングの『時の小史』を読む上でも大いに参考になる。

- (12) 松田卓也・二間瀬敏史著『ビッグバンからブラックホールへ』、岩波書店、一九八四年。

これは、素晴らしい啓蒙書である。内容は、多くの事柄を扱いながら、一つ一つに十分なスペースを割き、丁寧に展開している。随所にワクワクするような話題が盛られていて、読者を飽きさせない。図や写真が、ふんだんに収録されており、楽しい本に仕上げられている。

- (13) 吉村太彦著『宇宙創成と素粒子』、岩波書店、一九八五年。

これは啓蒙書というよりは、専門書といったほうがよいであろう。初步的な啓蒙書の議論では満足できず、きちんととした展開を追つていきたいという読者にはお薦めである。

- (14) 佐藤文隆編『宇宙論と統一理論の展開』、岩波書店、一九八七年。

これは啓蒙書ではない。最近の宇宙論の発展をしっかりと学びたいという読者にとっては、便利な論文集で

ある。

* 最後に、一九八八年、世界一周の研究旅行の途上、英国にてホーキング著『時の小史』を購入し、筆者に下さった上、本稿の執筆を勧めて下さった永安幸正早稲田大学教授に、心から感謝の意を表したい。また、本稿執筆の際、草稿段階で、高巣モラロジー研究所研究員、ならびに大野正英同研究生から、貴重なコメントを頂戴した。記してここに謝意を表したい。