

マルチバース

宇宙論入門

私たちはなぜへこの宇宙にいるのか

野村泰紀

我々が**全宇宙**だと思っていたものは、

無数にある

「**宇宙**たち」の

ひとつにすぎない!

カリフォルニア大学バークレー校
教授にして理論物理学センター長を
務める気鋭が描く

**宇宙論の
最前線**

マルチバース宇宙論入門

私たちはなぜこの宇宙にいるのか

野村泰紀

星海社

112



SEIKAISHA
SHINSHO

古代の昔から人間は空を見上げ、また水平の彼方を眺め、この世界はどこまで続いているのか、目に見えるものの先には何があるのか思いを巡らせてきた。実際、古代エジプトからインド、ギリシャに至るまで、様々な「宇宙論」が考えられ、それらに基づいた神話や哲学が発展してきた。にもかかわらず、現代の宇宙論につながる「観測に基づいた系統的な世界観の構築」が始まったのは、かなり最近、ここ400年あまりのことである。それを考えると、我々が現在手にしている宇宙観の壮大さは驚きである。

我々は、宇宙が高温・高密度のほぼ一様なビッグ・バンと呼ばれる状態から、膨張と冷却を通して現在の姿になったことを知っている。その過程でわずか10万分の1程度の初期の揺らぎが、重力によって増幅され、銀河、星等の構造、ひいては惑星へとなったことを知っている。さらにはその初期の揺らぎは、ビッグ・バン以前のインフレーションと呼ばれる、我々の宇宙が誕生して 10^{36} 秒後くらいまでの時期に、量子力学的効果（素粒子の世

界では、粒子は一つの場所に存在せず同時に様々な場所に確率的に存在するという効果)によって生じたということ、かなりの確信をもって述べることができる。(10³⁰とは0.0...01と書いた時にゼロが30個並ぶ数。例えば10¹は0.1、10²は0.01。)これらの驚くべき知見は、主に20世紀に入って起こった爆発的な物理学の発展によってもたらされたものである。そしてそれは、アルベルト・アインシュタインをはじめとする多くの科学者の長年にわたる仕事の結果として得られたものである。

しかし、本書で紹介したいのは、この20世紀の成功をさらに超える最新の「宇宙」論である。ここで宇宙という単語をカッコの中に入れたのには理由がある。この最新の描像によれば、我々が全宇宙だと思っていたものは無数にある「宇宙たち」の一つにすぎず、それら多くの宇宙においては素粒子の種類、性質およびそれを支配する法則、さらには空間の次元に至るまで多くのことが我々の宇宙とは異なっている。また我々の宇宙の寿命は無限ではなく、通常我々が考えるスケールよりはるかに長いものの、有限の時間で全く別の宇宙に「崩壊」すると予言される。

この(ユニバースに対して)「マルチバース」と呼ばれる世界像は、20世紀末の宇宙膨張の詳細な観測と、最新の理論物理学の発展の自然な帰結として導かれるものであり、また

近年科学者の間で急速に受け入れられつつある描像でもある。実際最近の同僚科学者の反応は、私が10年程前にある国際会議でマルチバース理論について発表した際、議長に「哲学についての発表をありがとう」と揶揄やぶされたことを考えると（本来哲学とはそれ自体重要なものであるはずなのだがこの議長はその言葉をこのように使った）、隔世の感がある。

本書の目標は、このまだ一般にはなじみの薄いかもしいないマルチバース宇宙論の核心部分を読者に紹介することである。ただ、一つ強調したいのはこの理論はまだ発展途上だということである。そのため、理論の細かい部分は今後の進展次第ではまだ変わることが十分あり得る。さらには、私自身はその可能性は少ないと考えているが、マルチバースという考え自体をひっくり返すような理論的または観測的な展開があるかもしれない。これは、科学の理論の宿命である。科学では、もし旧来の理論に反する新たな事実が出てきた場合、我々はその理論を新たな事実に即するよう修正するか、または場合によっては理論自体を破棄しなければならぬ。科学は、理論の構成過程等における個人的信念を別すれば、最終的には信じる信じないの世界ではないのである。

そのため科学、特に基礎科学の世界では、ある科学者が一生をかけて研究してきたテーマが、その人物の死の間際で全く意味のないものであったと判明するということが起こり

得る。そしてそれはその科学者の取り組んだテーマが革新的なものであればある程起り得る。しかし、このようにリスクのある研究が行われたい限りは、本当に価値のある研究は生まれ得ない。よって科学の発展にとって大事なものは、そのような「潜在的に全く無価値なもの」を受容する風土であると言うことができると思う。このことは、新規事業などに関してはよく言われることであるが、科学でも同じである。この「科学の社会学」については、また別の機会にどこかで書いてみたいと思っている。

さて、続く第1章からは、いよいよマルチバース理論を解説していこうと思うが、宇宙の始まりやその外側を議論するためには、まず我々が宇宙と呼んでいるものは何かを理解しなくてはならない。そこで第1章では我々の宇宙について現在かなり確かなこととして分かっていること——主に（ダークマター、ダークエネルギーを含む）ビッグ・バン宇宙論——を解説する。

第2章では、我々の宇宙があまりにも「よくできすぎている」ことを問題として提起する。我々の宇宙を記述する素粒子の標準模型は、生命、星、銀河等を含むあらゆる複雑な構造が許されるように極めて巧妙に作られているようにみえる。これは「神」のなせる業わざ

であろうか？ それとも、この事実にも何か科学的な説明をつけることが可能なのだろうか？

第3章では、前章で提起された問題を解く最も有力な理論としてマルチバース宇宙論を紹介する。ここでは、この理論が1998年に実際に観測された宇宙の加速的膨張（2011年にノーベル物理学賞）を10年以上前に予言していたこと、マルチバース宇宙論は実は自然界の基本理論として最も有望と思われる超弦理論ちようげんや、一般相対性理論の予言であるインフレーション現象等の自然な帰結であること、を解説する。さらにはマルチバース宇宙論の示唆する我々の宇宙の将来についても議論する。マルチバース理論の基本的描像はこの章で与えられる。

第4章は少し趣向を変えて、我々の宇宙を超えるような壮大な世界を扱う理論というのは、本当に科学理論と言えるのだろうかという疑問を考える。この章では、マルチバース描像に至る論理は完全に伝統的な科学の手法の上にあること、直観を超える世界を軽々に科学の外であると結論することの危険性、一見原理的に検証不可能であると思われるマルチバース理論が実はそうではないこと（例えば、理論が観測で棄却されることもあり得ること）などを議論する。科学とは何であるかを深く考える章としたい。

最終章である第5章では、マルチバース理論とその周辺にまつわる最近の発展を紹介する。特に、ブラックホールの物理との関係から示唆される、空間・時間という概念は相対的な（二次的な）ものでしかない、等の理論物理学の研究の最前線を概観する。ここで触れられる内容は最新のものであるがゆえに、例えば十年後から見たら正確でなかったり（部分的に）間違っていたりする可能性も十分にある。それでも、研究と同じく本書でもリスクを取ってみたいと思う。もし読者が、ここで紹介される議論等から科学の発展の現場におけるスリルを少しでも感じてくれれば幸いである。また、まだよく理解されていない多くの謎についてもこの章で議論する予定である。

本書で紹介される内容は、必ずしも簡単なものではないかもしれないが、できるだけ過度の捨象はせず基本的な概念は丁寧に説明したいと思う。私自身の感覚では、現在は人類の長い宇宙の探求の歴史のなかでも特に面白い時期にあると思う。そしてこのような時代に理論物理学者として（400年前のように火炙りになる心配もせず！）それに携わることができるのは、幸せな限りである。もちろん、我々が日々このような探求に携われるのは、必ずしも職業科学者でない一般の方々の興味、理解、応援があつてこそである。もし本書

がそれらの方々と最新の知的興奮を共有し、それによって少しでも日々の支援への恩返しとなることがあれば、これに勝る喜びはない。

目次

まえがき 3

第1章 「宇宙」って何? 15

我々の宇宙とは? 16

膨張する宇宙 18

若い宇宙は見えている! 22

より初期の宇宙 (ビッグ・バン宇宙) 26

謎の物質ダークマター 31

物質が反物質より多い宇宙へ 34

ビッグ・バン宇宙に残された謎 38

ビッグ・バン以前の宇宙（インフレーション宇宙） 42

我々の住む宇宙の全貌 48

第2章 よくできすぎた宇宙 55

素粒子の不思議な構造 56

基本的構造にはあまりにも恣意的だ 60

真空のエネルギーと宇宙の加速的膨張 65

大いなる謎 69

第3章 「マルチバース」——無数の異なる宇宙たち 73

ワインバーグの洞察 74

超弦理論と量子重力の問題 81

余剰次元が沢山の種類の宇宙を予言する！ 86

永久インフレーションと無数に生成される宇宙 93

ユニバースからマルチバースへ 97

泡宇宙なのに無限に大きい？ 101

マルチバースと新たな時空の描像 106

我々の宇宙の将来 115

第4章 **これは科学？** —— 観測との関係 119

よくある誤解 120

「人間原理」について 123

マルチバースと科学の方法論 127

マルチバースと観測 130

第5章 さらなる発展 —— 時空の概念を超えて
141

永久インフレーションと無限大
142

量子力学の不思議な世界
148

エヴェレットの多世界
152

ブラックホールの量子力学
157

量子的マルチバース
166

観測的な探索
172

さらに先へ
176

あとがき
180

参考文献
185

第1章 「宇宙」って何？

我々の宇宙とは？

宇宙の「果て」はどうなっているのだろうか？ その「外側」には何があるのか？ 宇宙はどのようにして生まれたのか？ その生まれる「前」には何があったのか？ 多くの人が一度はこのようなことを考えたことがあると思う。

ただし、これらの質問に答えるためには、まず「宇宙」とは何か、空間、時間とは何かを理解しなければならぬ。例えば、もし宇宙に何らかの「果て」があったとして、その「外側」も含めて宇宙と呼ぶことにしたら、言葉の定義からして宇宙には「それ以外」のものはないことになる。同じように、「外側」や「前」という言葉が意味を成すには、それ以前に空間や時間という概念がはっきり定義されていなければならない。

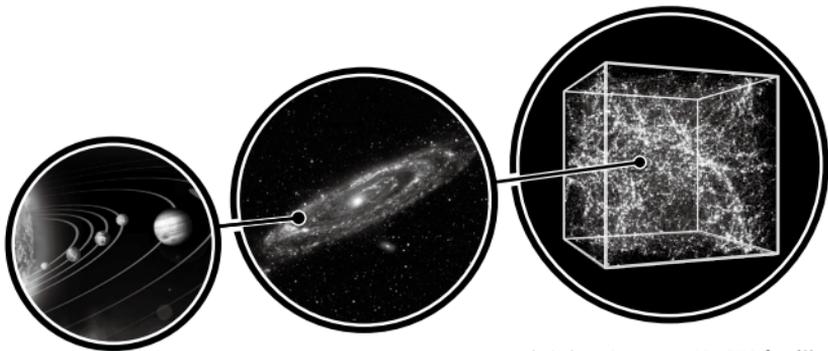
もちろん、我々の日常生活においてはこれらの概念は当たりまえのものだが、我々は宇宙誕生の瞬間等の「極限」の状況を考えるのである。そしてそのような状況では、空間や時間といった概念が我々の日常の直観からずれてくることは大いにあり得ることである。

では、現在我々が（時に漠然と）宇宙と呼んでいるものは、より厳密には何を指すのであろうか？ 我々はコペルニクス、ガリレイの時代から、自らの暮らす大地が太陽系にある

数ある惑星の内の一つの表面にすぎないことを知っている。そして、その中心にある太陽も銀河系にある無数の（数百億個程度の）恒星の内の一つにすぎない。（最新の観測は、これらの恒星の多くも我々の太陽同様惑星を持っていることを示唆している。）

さらには、我々の銀河系も数多く存在する銀河系の中の一つにすぎないことも20世紀初頭には明らかになる。このようにどんどん大きなスケールで見えていくと、我々の周りの世界は観測的に（粗っぽく言って）ほぼ一様であることが現在分かっている（図1）。そしてこの一様な領域は全て「標準模型」と呼ばれる素粒子の理論（正確には、それをダークマター、ダークエネルギーと呼ばれるものを含め拡張したもの）で正確に記述されることも分かっている。この領域が、我々が宇宙と呼ぶものである。

具体的には、我々の宇宙は三つの空間次元（ x, y, z ）を持ち、その上には六種類のクォーク、六種類のレプトン、ヒッグス粒子と呼ばれる素粒子たちが住んでいる。（我々のよく知る電子は、



大きなスケールでは、ほぼ一様

図1

レプトンの内の一つである。また、陽子や中性子は、それぞれ三つのクォークによって作られた複合粒子である。)これらの素粒子は、(重力に加えて)電磁気力、弱い力、強い力と呼ばれる力によって相互作用を及ぼしており、その質量および相互作用の強度などは宇宙のどこに行っても同じである。

より正確には、まだ我々がその正体をよく知らないダークマターと呼ばれる粒子も存在していることが分かっているが、その性質も宇宙のどこに行っても同じと考えられている。(ダークマターの存在は、その及ぼす重力の効果から存在が示されているが、その効果は場所によらず一定であるように見える。)我々の知っている核物理、原子・分子等の化学、生命などは全てこの構造の結果として生じるものである。

膨張する宇宙

さて、この我々が宇宙と呼ぶものはどのようにして生まれ、どこまで広がっているのだろうか? 20世紀の科学の最大の発見の一つは、我々の宇宙はずっと同じ状態で存在しているわけではなく、膨張を続けているということを見つけたことである。

この理解に至る過程は、科学というものがどのように発展するのを見る上で非常に興

味深い。話はアインシュタインが重力を時空の幾何学として記述する一般相対性理論を1916年に完成させたところから始まる。この理論はニュートンの重力理論を相対性の原理と矛盾しないよう拡張したもので、物理学の歴史上でも最も美しい理論の一つである。(理論は、後に非常に高い精度でその正確さが確かめられることになる。また2016年に遂に直接検出された重力波も一般相対性理論の重要な予言の一つである。)

アインシュタインは理論の発表から一年も経たず、それを宇宙全体に適用してみた。そこで得たのは、宇宙は膨張するか収縮するかのどちらかではないという答えであった。そして、当時の常識では、宇宙というのは「常にそのままでそこにあるもの」でなければならなかった。(現在の我々からすると、当時の状況を本当の意味で推察するのは難しいが、想像はできる。多くの人々はたった400年程前まで地球が宇宙の中心にあると信じて疑わなかったのだし、数千年前まではこの大地が球形であるなど思いもしなかったのだ。)

この答えは、アインシュタインの天才を以てしても受け入れることができなかつた。彼は彼の得た美しい理論を修正し、膨張も収縮もしない定常な宇宙が得られるよう試みた。それは一見うまくいったように見えたが、理論には余分な構造が付け足され、また得られた定常な宇宙も非常に不安定なものであった。(たとえて言うると、もし鉛筆が完全に垂直であ

れば、芯を下にしても支えなしで机の上にならずと立っていられると主張するようなものであった。) この状態は1929年に劇的に解決される。アメリカの天文学者、エドウィン・ハッブルが宇宙膨張の証拠を見つけたのである。アインシュタインは彼の試みた理論の修正を、人生最大の過ちであったと語ったと言われる。(これは理論物理学者としては非常によくわかる。自分の発見した、しかも自他共に認める非常に美しい方程式を信じ切ることができず、常識に合うように変更した結果、のちに元の理論が予言する革新的な結果の方が真実であると判明したのである。非常に悔しかったであろう。)

実際にハッブルが見つけたのは、(ほぼ)全ての銀河は地球から遠ざかっており、またそのスピードは遠くにある銀河ほど速いということである。これはまさに宇宙が膨張していることを意味する。例えば風船の上にはぼ一様に点を書き、風船を膨らませたとしよう。もし、我々がこの点の中の一つに住んでいるとすると、全ての点は我々から遠ざかっているように見え、また遠くの点ほど速く遠ざかっているように見える。(ここでは点を銀河になぞらえ、風船の表面を宇宙になぞらえた。)

ここで宇宙が膨張しているとはどういうことかを、もう少し正確に記述しておこう。宇

宇宙が膨らんでいると言うと、読者は初め小さかった宇宙が大きくなっていくというイメージを持つかもしれない。(実際、先の風船の例では風船の表面積は大きくなっている。)しかし、これはそうとは限らない。図2に示すように、膨張宇宙の「大きさ」は最初から無限であり得るのである。すなわち、宇宙が膨張しているとは、宇宙の異なる点の間の距離(例えば銀河間の距離)が一様に大きくなっていく現象のことであり、それは必ずしも宇宙全体のサイズが有限であり、それが時間と共に大きくなっていくということではない。この点はよく誤解されているので、注意が必要である。

いずれにしても、もし宇宙が膨張を続けているのであれば、初期の宇宙はその内容物をもっとぎゅうぎゅうに詰まった高密度の状態であったはずである。そして、エネルギーがそのように高密度に詰まっているということは、高温であることを意味する。すなわち宇宙は高温・高密度の「ビッグ・バン」から始

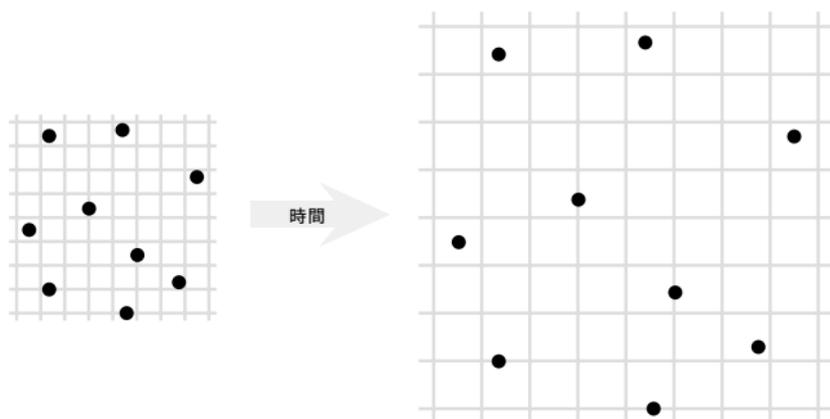


図2

まったはずであり、現在の「ほぼスカスカ」な宇宙はこの状態から膨張を通して得られたものだということになる。

若い宇宙は見えている！

では、このビッグ・バン宇宙論は観測的にはどの程度確かめられているのだろうか？ 実際は、年齢がまだ約40万歳、温度が30000度程度だった頃の初期の宇宙は「直接見えている」のである。（ちなみに現在の宇宙の年齢は約138億歳、温度は絶対温度にして2・7度、摂氏マイナス270度程度。）

このことを理解するには、光の速さが有限（秒速約30万キロメートル）であることに注意すればよい。今、10000光年（光が10000年かかって進む距離）の彼方にある星を見たとしても。（例えば、オリオン座の星ベテルギウスまでの距離は約500光年。）それは、我々が今見ている光はその星を10000年前に出発したということの意味する。すなわち、我々はその星の10000年前の姿を見ているのである。だから、もしさらに遠くの銀河、例えば1億光年の彼方にある銀河を観測すれば、我々は宇宙の1億年前の姿を見ることができるのである。

このようにより遠くを見ていったとすれば、一体何が見えるのだろうか？ ビッグ・バン宇宙論によれば、初期の宇宙は高温高密度で光り輝いていたはずである。であれば、星々や銀河よりさらに遠くの背景はピカピカに光り輝いているはずである。なのに、夜空は暗い。なぜ夜空は輝いていないのだろうか？

実は、輝いているのである！ ただし宇宙が膨張しているため、我々に届く光はドップラー効果によりその波長が間延びして、可視光の範囲を超えているのである。ドップラー効果とは、我々から遠ざかって（もしくは近づいてきて）いる物体から発せられた波の波長が、長く（短く）なる現象のことである。（遠ざかっていく救急車のサイレンが間延びして低く聞こえるのは、この現象の代表的な例の一つである。）そして光も波とみなせるため、この現象によって遠ざかっていくものから発せられた場合その波長は長くなり、初期宇宙からの光はちょうど電波領域になっているのである。つまり、電波で見れば実際夜空はピカピカに光り輝いているのである（図3）。

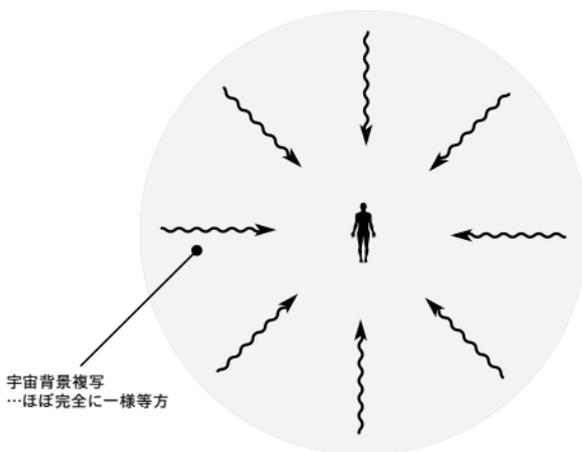


図3

この初期宇宙から来る宇宙背景輻射ふくしゃと呼ばれる電波は、ペンジアスとウィルソンにより1964年に偶然発見された。二人は超高感度のアンテナの研究中、説明のつかない電波ノイズに出会った。彼らも初めは地表からの雑音等を疑ったのだが、いくらこれらの雑音を除去していても問題の電波は残った。しかもこの電波は、全ての方向から一様に来ているように見えた。この電波シグナルこそが、まさにビッグ・バンからの名残りの光だったのである。

ペンジアスとウィルソンの二人はこの業績により、1978年のノーベル物理学賞を受賞することになる。また、後の詳細な解析により、この宇宙背景輻射は宇宙の温度が3000程度、その年齢が現在の宇宙年齢の約35000分の1程の頃に発せられたことが分かる。この「若い時代の宇宙」を我々は直接見ることができるのである。

先に宇宙は大きなスケールではほぼ一様に見えると言ったが、この一様性は初期の宇宙ではより著しいものであった。実際、宇宙背景輻射はどの方向からもほぼ同じように我々に届いている。これはそれが発せられた時代の宇宙がほぼ完全に一様であったことを意味している。

現在我々は、詳細な観測により、この時代の宇宙がたった10万分の1程度の密度揺らぎしかない完全に一様なスूपのような状態であったことを知っている。(この揺らぎの観測により、マザーとスムートが2006年のノーベル物理学賞を受賞した。) よく考えると、これは驚くべきことである。例えばポタージュスूपをイメージしてみよう。いくらかきまぜてもその密度を10万分の1の精度で一様にするなどできないであろう。宇宙はそれ程完全に一様だったのである。

この一様な宇宙は、膨張を続けながら現在の宇宙へと至る。その過程で、わずかに(ほんの10万分の1程の!) 密度の高い領域は重力により、より多くの物質を引きつけ、より高い密度になっていく。そしてそれに従って、密度の低い領域の密度はより低くなっていく。この重力による不安定性の結果が、我々の知る銀河団、銀河、恒星なのである。

実際現在の我々は、衛星の観測等によりこの時代の全天の詳細な地図を持っている。そしてこの10万分の1程度の密度揺らぎしかない初期条件からコンピュータでシミュレーションすることにより、ほぼ現在の宇宙を再現することができるのである(図4)! (このシミュレーションがうまくいくためには、ダークマター、

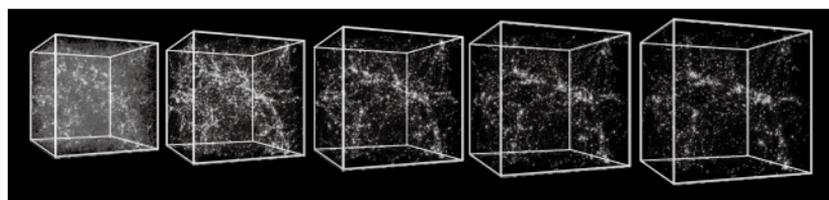


図4

ダークエネルギーの存在を考慮に入れることが必要であり、これはダークマター、ダークエネルギーが実際に存在することの証拠の一つとなっている。ダークマター、ダークエネルギーについては、また後程。我々の住む銀河系、太陽、地球、そして我々自身すらも、このたった10万分の1の初期の密度揺らぎの帰結なのである。

より初期の宇宙（ビッグ・バン宇宙）

宇宙背景輻射が発せられた時代より前の宇宙は、電磁波である光、電波等を使って直接見ることはできない。40万歳より以前の宇宙の密度は高すぎて、電磁波が遮られてしまうのである。つまり、宇宙背景輻射が発せられたところは「光（電波）の壁」となってしまう。そして、それより先を見ることができない（図3）。もしこれより先を「直接」見ようとすれば、より透過力の高いニュートリノ（レプトンの一種）や重力波などを使わなければならぬが、これらの技術はまだ確立していない。では、我々はこれより前の宇宙については何も知り得ないのであるだろうか？

そんなことはない。我々は、ビッグ・バンさえ「予言」した一般相対性理論を持っている。その方程式を時間を逆に解いていくことにより、より初期の宇宙はどうなっていたの

かを知ることができる。またそのようなより高温高密の世界で何が起こったかは、素粒子の標準模型を使えば調べることができるのである。

それによれば、宇宙で（陽子そのものである水素以外の）原子核が合成されたのは、宇宙の年齢が約1分から10分くらいまでの間であることが分かる。それ以前の宇宙には原子核というものは存在せず（ということはもちろん原子も存在せず）、陽子、中性子、電子（及びニュートリノ、光子）が飛び回っているだけのプラズマ状態であった。

（そのような宇宙の年齢をどのように決めるのかというと、一般相対性理論の方程式を時間を逆に解いて、異なる2点間の距離が「ほぼゼロ」になるまでの時間を計算すれば良い。ここで重要なのは、距離が正確にゼロになるまでの時間を求める必要はなく、十分小さくなるまでの時間を求めればよいという点である。なぜなら、それで宇宙年齢に関する誤差は十分に無視できるほど小さくなるからである。つまり、宇宙年齢を導くのに宇宙の本当の最初の瞬間を知る必要はない。）

さて、この（水素以外の）原子核が初めて作られた「ビッグ・バン原子核合成」は計算で詳細にシミュレートすることができる。特に、この時に作られた重水素、三重水素、及びヘリウム、リチウム、ベリリウムとその同位体の宇宙全体に存在する質量の比は精密に計算でき、それは観測とよく一致している。つまり、我々は宇宙が誕生して約1分以降の歴史

史は、かなり詳細に知っているのである。

(ちなみに、我々自身を構成する炭素、窒素、酸素、及び金属等を含むより重い元素は、ビッグ・バン原子核合成ではほとんど作られない。これらは、より後の時代に恒星が誕生した後、その内部の核反応により作られたものである。その証拠に、初期の第一世代と呼ばれる恒星にはこれらの元素はほとんど含まれていない。我々の太陽は、これら第一世代の恒星がその寿命を爆発により終えた後、吹き飛んだガスを元に今から50億年程前に誕生した第二世代、もしくは第三世代の星である。これが地球を含む太陽系の惑星にこれらの重い元素が含まれる理由である。つまり、我々の体は大昔の星の残骸でできているのである！)

ビッグ・バン原子核合成以前の宇宙の歴史に関しては、主にまだ理論の領域である。ただし、この時期に何が起こったかの概要は分かっている(図5)。まず、温度が約1兆度以上、年齢にして1マイクロ秒(10⁻⁶秒)以前の宇宙には、陽子、中性子、及び(湯川秀樹ゆかわひできにより最初に導入された)核力を媒介するパイ中間子などはまだ存在せず、その構成要素であるクォークが飛び交う世界であった。

そして、さらに年齢が10⁻¹²秒程(温度にして数百兆度程)より前には、電磁気力と弱い力

は電弱相互作用として「統一」された状態にあり、またクォークとレプトンの質量はゼロであった。つまり宇宙が膨張して冷えるにつれ、年齢が10⁻¹²秒程の時期に電磁気力と弱い力は我々を知るように全く異なる力として分かれ、また電子を含む素粒子（クォーク、レプトン）は初めて質量を持ったのである。これはビッグス場と呼ばれる空間に満ちている「もの」が凝縮することによって起こった。（我々が真空と呼んでいる状態でも様々な場と呼ばれるものが存在しているというのは、20世紀の素粒子物理学により得られた大きな知見の一つである。場の力学を記述する理論は「場の量子論」と呼ばれており、現代物理学を学ぶ大学院生の必修とも言える分野になっている。）

このように我々がはるか初期の宇宙について知ることができるのは、素粒子物理学により非常に高温、高エネルギーの状態で何が起こるかを計算することができからである。これらの物理は20世紀半ばから後半にかけて構築され、その正しさは線

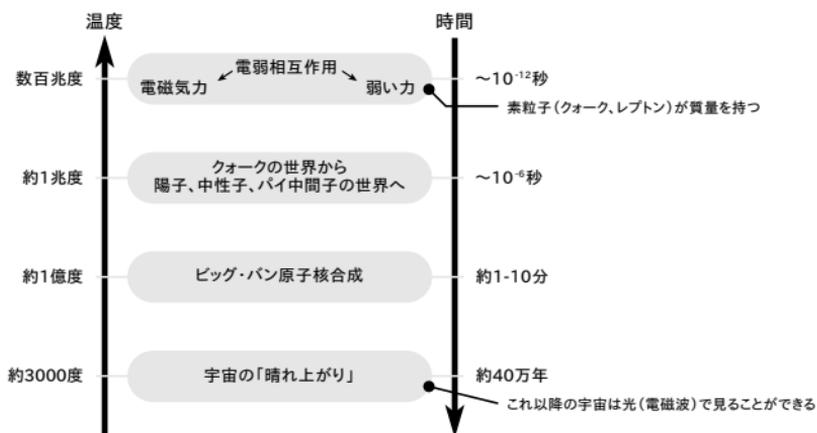


図 5

り返し実験で確かめられてきた。(標準模型の一部を成す) 電弱統一の理論はグラシヨウ、ワインバーグ、サラム等によって完成され、3人はこの業績により1979年のノーベル物理学賞を受賞している。

またその重要な構成要素であるヒッグス場の理論は1964年、ブラウト、アングレル、ヒッグス等により提唱された。これらの理論の正しさは、理論の様々な予言が実験とよく一致することから既にほぼ疑いなきものとなっていたが、2012年にヨーロッパにある大型ハドロン衝突型加速器(LHC)において、その決定的な帰結であるヒッグス粒子が発見されるに至り最終的に確認された。(これにより、その時まで亡くなっていたブラウトを除く、アングレルとヒッグスの二人は2013年のノーベル物理学賞を受賞した。)

これらの理論と実験との一致の精度は数千分の一を超え、電磁気力の部分に至っては最高10桁以上一致している。これがどのくらい驚異的なことかイメージするために、世の中に完全な円があったとしてその円周と直径を測定してみたでしょう。その比が理論値 $3.1415926535\dots$ と10桁以上一致しているのを確認するのがどれ程大変なことか想像できるであろう。現実的には3桁の一致でさえ成功と言えるのではないだろうか。

謎の物質ダークマター

このようにしてどこまで宇宙の「熱史」を遡れるのかについては、まだ完全に分かってはいない。ただ多くの科学者は（様々な理由により）相当初期の状態、例えば温度にして 10^{21} 度以上、年齢にして 10^{55} 秒以前、くらいまでは遡れるのではないかと考えている。（ 10^{21} は1の後にゼロが21個並んだ数。）そしてこのような超初期の宇宙では、二つの大きな出来事が起こったと考えられている。

一つは現存するダークマターの量が、この時期の歴史で決まったであろうということである。ダークマターとは、その存在が宇宙論的観測から強く示唆されるものの、素粒子の標準模型には含まれていない未知の粒子である。このダークマターの証拠は多岐にわたっており、その存在はもはや疑いのないものであるが、そのいくつかは以下のようなものである。

まず第一には、観測される星やガスの量を全て足しても、必要な重力作用から導かれる銀河系の質量に全く足りないことが挙げられる。これは、我々の知っているクォークやレプトンなどの素粒子以外の「見えない質量」が我々の銀河系に満ちていることを示してい

る。同様の結果は、他の銀河についても当てはまり、これは銀河というものがほぼダークマターからできており、我々の知っている粒子はそのほんの一部でしかないということの意味している。

先に宇宙背景輻射の時代の10万分の1程度の密度揺らぎから、現在の我々の宇宙がシミュレーションできると言った。これも、ダークマターの存在を考慮に入れて初めて現在の観測と合うのである。また、ビッグ・バン原子核合成のところで計算による様々な元素の宇宙における質量比が観測と合っていると行ったが、これもダークマターの存在を考慮に入れた場合にのみ他の観測との整合性がとれる。

ここで重要なのは、これらの異なる考察から示唆されるダークマターの量が、全て一致しているということである。それによると、宇宙に存在する全物質のおよそ5分の4がダークマターであり、我々の知っている粒子は5分の1程度（より正確には約19%）に過ぎない。さらには近年、現在の宇宙に存在するエネルギーのほとんどは物質ですらないということも分かってきたが、このダークエネルギーと呼ばれるエネルギーのことはまた後程取り上げる。ここでは、[図6](#)に現在の宇宙の全エネルギーの内訳を示しておくことにする。

いずれにしても、現在のダークマターの量は初期宇宙の歴史の結果として決まったと考えられる。有力な考えの一つは、初期の宇宙ではダークマターも標準模型の素粒子と共に熱的な平衡状態^{へいこう}にあり、それが宇宙が膨張して冷えるに従ってダークマターが我々の物質から切り離されて現在に至るといふ説である。この説がもつともらしいのは、ダークマ

ターの質量や相互作用の強さがビッグス場の凝縮のスケールと同程度であるとする、現在のダークマターの量が計算により再現できるという点である。(ダークマターの性質が、ビッグス場の凝縮のスケールと関係しているかもしれないと考える理論的根拠はいくつか存在する。少なくとも、標準模型ではこのスケールが理論に存在する唯一の基本的スケールである。)

もしこの考えが正しければ、ダークマターは我々の知っている素粒子と非常に弱いものの相互作用をするはずであり、その強度は陽子同士の間の相互作用より約20桁小さい程度と見積もることができる。これを使ってダークマターを直接検出する試みは、筆者が在籍するカリフォルニア大学バークレ

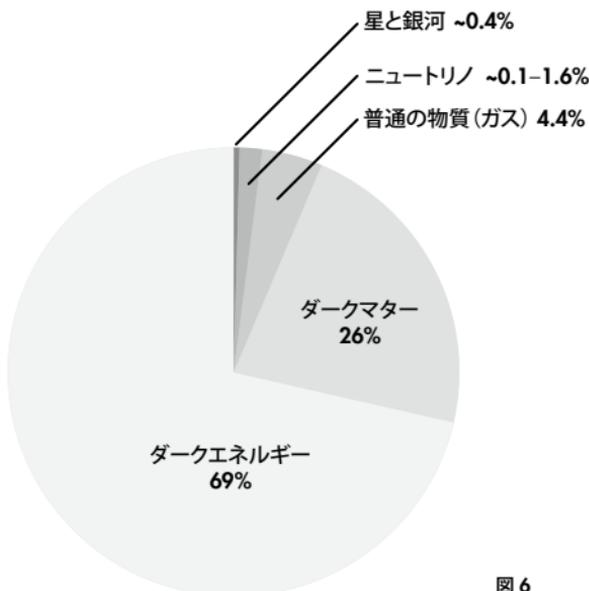


図6

ー校の同僚や日本のチームも含めて世界中の研究者がしのぎを削っており、近い将来にも「ダークマターについて直接検出」のニュースが聞けるかもしれない。(これらの実験は宇宙線の影響を避けるため、炭鉱などの地下深くで行われる。日本チームの実験XMASSは、岐阜県神岡鉱山の地下1000mの実験施設で行われている。)

物質が反物質より多い宇宙へ

初期の超高温高密度の宇宙で起こったもう一つの重要な出来事は、現在我々が見ているような物質が反物質に比べて優勢の世界が作られたことである。反物質とは、全ての粒子に対して存在する、質量が同じでそれ以外の性質が正反対の粒子のことである。例えば、電荷-1を持つ電子に対しては、質量が全く同じ(約 $9.109 \times 10^{-31} \text{kg}$)で電荷+1を持つ「反電子」(通常、陽電子と呼ばれる)が存在する。同様に陽子、中性子を含む全ての粒子に反粒子が存在する。

(陽電子を最初に予言したのはポール・ディラックで1933年にノーベル物理学賞、それを実際に発見したのはカール・アンダーソンで1936年にノーベル物理学賞、最初に反陽子を実験的に見つけたのはセグレとチェンバレンで1959年にノーベル物理学賞をそれぞれ受賞した。現

在では、反物質は特殊相対性理論と量子力学を統一した「場の量子論」の一般的な予言として理解されている。なお光の粒子である光子のように、電荷等の性質を持たない粒子に関しては反物質が元の物質そのものであり得る。実際、光子の反粒子は光子自身である。)

これらの反物質は、ある意味「マイナス」の物質のようなものである。例えば、反物質が対応する物質と出会うと、対消滅たいしょうめつという現象を起こして共に消えてしまう。この際、元の物質と反物質の質量は有名なアインシュタインの $E=mc^2$ の式で与えられる量の、大量のエネルギーに変換される。また空間のある領域に大きなエネルギーを集中させれば、そこから物質と反物質をペアで生み出す(対生成する)ことができる。

不思議なのは、このように物質と反物質は対称な性質を持つているように見えるのに、我々の宇宙には主に物質ばかりが存在し、反物質はほとんどないように見えることである。もし宇宙初期に物質と反物質が同じ量存在したならば、そこからいくら対消滅や対生成を繰り返したところで物質と反物質の量は同じままのはずである。実際、後にも述べるように宇宙超初期の物質と反物質の量は同じであったと考えられる。であれば、現在我々が見る物質優勢の世界は宇宙の進化の過程で形作られたはずである。どのようにしてだろうか？

この問いに関する一般的は答えは、ロシアの科学者アンドレイ・サハロフによって1967年に与えられた。(彼は旧ソビエト連邦で水素爆弾開発に携わり「ソ連水爆の父」と呼ばれたが、後年は圧政に抵抗する活動、人権運動などに尽力し、1975年にノーベル平和賞を受賞した。)サハロフは、粒子と反粒子の質量、寿命などは場の量子論の帰結として同じであるものの、その相互作用の詳細については完全に同じとは限らないということに注目した。

例えば、粒子 X が二つの Y 粒子もしくは二つの Z 粒子に確率的に崩壊でき、また同様に X の反粒子 \bar{X} も二つの \bar{Y} 、二つの \bar{Z} に崩壊できるとしよう。この時、 $X \rightarrow YY$ と $X \rightarrow ZZ$ の二つの過程が起こる強さの和は(X と \bar{X} の寿命が同じであることから) $X \rightarrow YY$ と $X \rightarrow ZZ$ の起こる強さの和と等しい。しかしこれは必ずしも $X \rightarrow YY$ とその反粒子版である $\bar{X} \rightarrow \bar{Y}\bar{Y}$ が等しいことを意味しない。サハロフは、このことを使えば物質数と反物質数が同じ宇宙から出発して、物質数優勢な宇宙へと導けることを示した。(ここで考えたような物質と反物質の相互作用の非対称性を、専門用語でCPが破れているという。標準模型におけるCPの破れの研究に関しては、日本の小林誠こばやし まことと益川敏英ますかみ ひろひこが2008年のノーベル物理学賞を受賞している。)この「物質数の生成」は、基本的には以下のようにして起こったと考えられる。まず宇宙の超初期の超高温高密度の時代には、物質と反物質は同じ量だけ存在していた。しかし、

先に述べたCPの破れの効果（粒子と反粒子の相互作用が完全に対称ではない効果）により、宇宙進化の過程で二つの量の間にほんのわずかな差が生じた。（観測から逆算すると、この違いは約の $\times 10^{10}$ 程度であったことが分かる。つまり、物質の量が1000000000000000あったとすると反物質は9999999999999994程度あったことになる。）そしてさらに宇宙が冷える過程で、これらの物質と反物質はそのわずかな違いの分を残して全て対消滅してしまい、物質のみの宇宙が残ったのである（図7）。

この物質数生成の機構がより詳細にどのようなものであったかについては、いくつかの説がある。いくつかある最も有望な候補の中の一つは、日本の福来正孝ふくきたまさとかと柳田勉やなぎだ つとむにより提唱されたレプトジェネシスと呼ばれる機構で、これは宇宙の物質数と素粒子であるニュートリノの質量とが関係しているという非常に興味深い理論である。そのため、この理論は将来の詳細なニュ

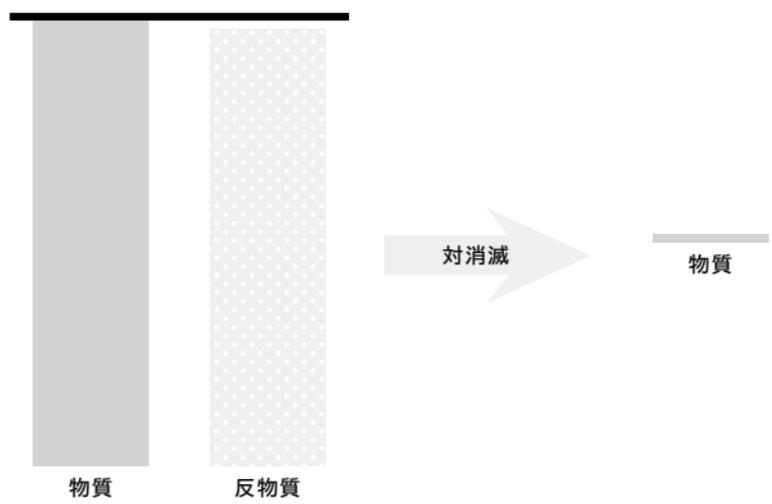


図7

トトリノの観測によってその妥当性を検証することができると考えられている。

また、いくつかの物質数生成の模型は、二つの量の違いが宇宙初期の相転移（水が水蒸気になるなど、その性質が劇的に変化する過程のこと）に付随して起きることを予言している。このような模型は、将来の重力波の観測が宇宙初期の相転移を探る可能性を秘めていることから、それを通じて観測的に探索することができるとも思われる。（重力波はアインシュタインによる1916の予言から100年を経て、2016年に遂に直接観測された。この業績は恐らく2017年のノーベル物理学賞を受賞するだろう。）

ビッグ・バン宇宙に残された謎

ここまで見てきたのがビッグ・バン宇宙論と呼ばれるものの概要である。この描像は、20世紀後半にダークエネルギーが発見されたことや、ダークマターの正体や物質数生成の詳細がまだ分かっていないこと等はあるが、おおむね約半世紀前までに確立したものである。そしてその後の宇宙論的観測、素粒子論的実験は（ここで紹介しなかったものも含めて）全てこの描像を支持するものであった。

現在では、もはやビッグ・バン宇宙論の基本的描像はほぼ疑いのないものである。それ

によれば、我々の宇宙はその初期にはほぼ完全に一樣な超高温高密の世界であった。そして我々やその周りの世界を構成する物質は、反物質との対消滅を逃れたわずかな「残りカス」であり、また銀河、星、生命等を含むその全ての構造はたった10万分の1の初期の密度揺らぎから生じた「さざ波」のようなものにすぎないのである。

ビッグ・バン宇宙論の成功、およびそれが我々の世界観に与えた影響は著しいものであるが、それによって宇宙の謎の全てが解けたわけではない。特に、ビッグ・バン宇宙論は初期の宇宙がほぼ一樣だったものの、10万分の1程度の密度揺らぎが存在していたことを明らかにした。もし、この密度揺らぎが存在しなかったならば、銀河、星等を含む現在の宇宙の全ての構造は存在し得なかった。これらの構造は初期の揺らぎが重力により増幅されてできたということを思い出してみよう。もし初期の状態が「完全に」一樣であったなら、このような構造形成は起こり得ない。なぜなら何も増幅するものがないからである。すなわち、密度が一樣でなかったことは宇宙が現在の形を取るうえで極めて重要なことであったと言える。しかし、どうせ一樣でないならなぜ全く一樣でない宇宙にならず、「ほぼ一樣な」宇宙になったのだろうか？ ここには何かビッグ・バン宇宙論で捉え切れてい

ないメカニズムが働いているように思われる。

他にもビッグ・バン宇宙論で説明できない現象の一つとして、宇宙が極めて平坦であることが挙げられる。宇宙が平坦であるとは、宇宙の異なる3点を最短の線で結ぶ三角形を作ったとき、その内角の和がちょうど180度になる性質のことである。我々は小学校で三角形の内角の和は180度であることを学ぶ。しかし、実はこの性質は自明のことではないのである。

例えば、2次元の面を考えたとしよう。もし面が平面であれば、このようにして作った三角形の内角の和は確かに180度になる。しかしもし面が球面であれば、に示すように異なる3点の間を最短の線で結んでできた三角形の内角の和は180度よりも大きくなる。このような空間（この場合、面）を、正の曲率を持っていると言う。

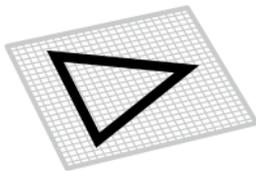
これを宇宙に当てはめると、もし宇宙空間が次元が一つ大きくなった球面のようなものであれば（具体的には、その体積が有限であり、どちらの方向に真っ直ぐ進んで行っても元の場所に戻ってくるような性質を持つていれば）、3点を最短の線で結んで作った三角形の内角の和は180度より大きくなるはずである。そして、この180度からのずれは、から分かるように三角形が大きい程大きくなるはずである。（これと同様に、三角形の内

角の和が180度より小さくなる空間、すなわち負の曲率を持った空間というのも考えられる。宇宙の曲率についてはまた後程議論する。）

現在の観測によれば宇宙は非常に平坦、つまりその曲率は極めて小さいことが分かっている。なぜ宇宙は「(球面のような) 正の曲率を持つもの」や「負の曲率を持つもの」ではなく、そのちょうど中間の「曲率ゼロ(か極めてそれに近い値)」を持つものなのだろうか？

ビッグ・バン宇宙論はこれに答えることができない。それどころか、ビッグ・バン宇宙は問題を「より悪く」するとも言える。なぜならビッグ・バン以降の宇宙では、曲率の効果は時間と共により顕著になっていくことが示せるからである。つまり、初期の宇宙は「極端に平坦」でなければならぬ。例えば、初期の宇宙において考えられる限りの大きさの三角形を描いたとすると、現在の観測と矛盾しないためにはその内角の和の180度からのずれは1度より数十桁も小さくなければならない。

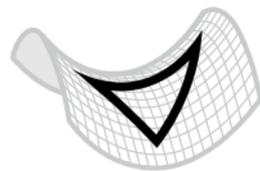
(ちなみに、一様性と平坦性は一見似ているように見えるかもしれない



平坦
(曲率ゼロ)



正の曲率



負の曲率

図 8

が、独立な性質である。これは球面を考えてみれば分かる。この2次元空間は完全に一樣だが、正の曲率を持っている。）

宇宙の持つこれらの性質は何か深遠な事実を示唆しているように思われる。それは一体何なのだろうか？

ビッグ・バン以前の宇宙（インフレーション宇宙）

1980年、アラン・グース（現マサチューセッツ工科大学）は、これらの謎を解く鍵としてインフレーション理論を提唱した。（それ以前やほぼ同時期にも、旧ソ連やヨーロッパのグループをはじめとする複数の科学者がこの理論のアイデアを部分的に含む理論を発表している。日本の佐藤勝彦さとうかつひこもその一人である。）

この理論によれば、宇宙は高温高密度のビッグ・バンの時代に突入する前に、信じられない程急激な（「指数関数的な」）膨張を引き起こしたとされる。このように急激な膨張は、宇宙をほぼ完全に平坦かつ一様にしてしまう。（この時の温度はゼロ。）やがてこの急膨張の時代は、それを引き起こす原因となった場のエネルギーが熱エネルギーに変換されることにより、よって終わりを迎える。そしてこの熱エネルギーは宇宙を高温高密度に加熱することになり、

ビッグ・バン宇宙へとつながっていくのである。

インフレーションによる急膨張が起こった時期は正確には分かっていないが、宇宙誕生より 10^{38} 秒から 10^{36} 秒くらいの間だったと考えられている。このインフレーションによる爆発的宇宙膨張は、通常のビッグ・バン宇宙の膨張とは質的に異なるものである。ビッグ・バン宇宙では、宇宙の2点間の距離は宇宙年齢の「べき乗」で大きくなっていく。つまりある宇宙年齢——例えば1秒——で測った2点間の距離が100倍まで伸びるためには、宇宙年齢が数百秒になるまで待たなければならない。同様に、元の距離が1万倍まで伸びるためには、数万秒——すなわち数時間——程かかる。

それに対して、インフレーションでの宇宙膨張は「指数関数的」である。つまり、宇宙の2点間の距離は単位時間（この場合インフレーションが始まった時の宇宙年齢）の間に倍増していくのである。例えば、もしインフレーションが宇宙年齢1秒に始まったとしよう。（実際はもっと前だが。）その場合、2点間の距離は1秒後には約2倍、そのまた1秒後には4倍、そしてそのまた1秒後には初めのサイズの8倍になるのである。これは元の距離が1万倍まで伸びるのに約13秒しか要しないことを意味する。

この指数関数的な「倍々ゲーム」がどれほど凄まじいかを実感するために、厚さ0.1mmの紙を折っていくことを考えよう。1回折ると厚さは0.2mm、2回折ると0.4mm、3回折ると0.8mmとなっていくとして、何回折れば富士山の高さを超えるであろうか？ 答えは、たった26回である。

実際のインフレーションでは、宇宙の距離のスケールはインフレーション開始時の宇宙年齢程度の時間で倍になる。これは、もしインフレーションが宇宙誕生から 10^{-36} 秒程度で始まったなら、原子核の大きさ程度の領域（原子核のサイズは原子の10万分の1くらい）が現在の観測できる宇宙全体の大きさ（約138億光年内の空間）に広がるまで 10^{-36} 秒程しか掛からなかったことを意味する。インフレーションがもっと後、宇宙年齢 10^{-32} 秒程度で始まったとしても、原子核の大きさ程度の領域が現在我々が認識できる全宇宙の大きさにまで広がるのに要した時間はたった 10^{-32} 秒程である。

このような急激な膨張は、現在我々が見ている宇宙がインフレーションの時代やそれ以前には極微の領域にすぎなかったことを意味している。つまり我々は宇宙全体のほんの一部しか見ていないことになる。（ちなみに、この制約は原理的なものである。宇宙が誕生してから138億年しか経っていないのだから、138億光年より遠くを見ることは原理的に不可能で

ある。)

このように小さな領域しか見ていなければ、宇宙全体が曲がっていたとしても（つまり曲率を持っていたとしても）それを認識することは難しい。すなわち、宇宙は平坦に見えることになる。（これは、我々が周りの大地を見渡しても、地球が球状であることを認識することができないのと同じである。）同様に、そのような小さな領域は宇宙全体の構造がどうであれほぼ一様に見えるであろう。（例えば、ピカソの絵画の1ミリ四方の領域だけを拡大して見ていることを想像してほしい。）

このインフレーション理論には極めて重要な帰結が存在する。先にインフレーションによる急激な宇宙膨張は観測可能な宇宙を平坦かつ一様にすると述べたが、実はこれには重要な「補正」が存在する。それは量子力学の効果によって生じる。

量子力学とは、主に極微の世界（例えば素粒子の世界）を記述するのに使われる理論のことと、我々の直観とは反する様々な現象を予言する。（これは量子力学が極微の世界にのみ当てはまる理論であるということではない。現在、我々は量子力学は自然界の普遍的な理論であると信じている。ただ、対象となるシステムが大きくなると量子論的な効果が小さくなり、近似的

に我々のよく知る古典力学、この場合アインシュタインの一般相対性理論で十分だというだけである。すなわち対象が十分大きな場合には、量子力学の予言は古典力学のものと一致する。現在認識可能な全宇宙はインフレーション期には極微の領域だったのだから、量子力学的な効果が必要になってくるのである。

量子力学を特徴づける性質のなかで重要なものの一つに、粒子は一般に一つの場所に存在することなく、同時に様々な場所に確率的に存在するということが挙げられる。例えば、よく水素原子を構成する電子は中心にある陽子の周りをまわっているという記述をされることがあるが、これは本当は正しくない。この電子（水素原子を構成する電子は一つである）は、陽子の周り 10^{10} 程度程度の領域に「確率的に」広がって存在しているのである。（同様に陽子も中心の一点に存在するわけではないが、その広がり電子のそれに比べて小さいのでここでは無視する。）

量子力学によると、ある時間に電子がこの領域中のどこどこに存在しているという記述は全く意味がない——それは原理的に決定不可能である。ただ水素原子中の電子を観測した場合、 10^{10} mの領域のどこかには存在する。そして電子を実際どこで観測するかの確率分布は量子力学の方程式によって完全に決定されるのである。（残念ながら量子力学の完全な

解説は本書の範囲を超えるが、もう少しだけ詳しい記述、特に量子論的な多世界に関する解説はまた第5章でする。）

実はこの量子力学による非決定論的な効果は、粒子の位置に関してだけでなくより一般に当てはまる効果である。特に、インフレーションを引き起こしている場に対しても例外ではなく、その値はある程度の確率的な広がりを持つ。これはインフレーションを起こす場のエネルギーを各点で測った場合、その値は場所によって確率的に変動するということを意味する。（この確率分布は量子力学により正確に計算できる。）そして、この変動はインフレーションが終わった後には、場所による熱エネルギー（すなわち温度、密度）の変動に交換される。つまり、インフレーション後に始まるビッグ・バン宇宙はほぼ一様であるものの、量子力学の効果を考慮に入れるとその温度、密度は僅かに変動していなければならぬのである。そしてこれこそが宇宙背景輻射で見つかった初期宇宙の密度揺らぎの起源なのである。

1992年にマザー（NASA、アメリカ航空宇宙局）、スミート（カリフォルニア大学バークレー校）等のチームがCOBEと呼ばれる人工衛星を使って初めて宇宙背景輻射の揺ら

ぎを発見して以来、その観測精度は飛躍的に上昇してきた。2001年にはWMAP衛星（NASA及びプリンストン大学）、2009年にはPLANCK衛星（ESA、欧州宇宙機関）が打ち上げられ、現在の我々は宇宙背景放射の全天の詳細な地図を持っている（図9）。この地図を詳細に分析し、インフレーション理論の予言と比較した結果が図10である。

この図は大まかに言うと、異なる2点の間で宇宙背景放射がどれだけ揺らいでいるかを示したもので、横軸は2点間の距離（地球から見た時の角度でどれだけ離れているか）、縦軸は揺らぎの大きさを示している。点で示された観測結果（点に付随した縦棒は観測の誤差）と実線で表されたインフレーション理論の予言の一致は驚異的である。（実際にはインフレーション理論の予言にはいくつかのパラメータが存在するが、それを考慮に入れたとしても観測と理論の一致は驚くべきものである。）もちろんこの一致は超初期宇宙で起こったこととしてインフレーション以外の可能性を完全に排除するものではないが、多くの科学者はビッグ・バン宇宙以前にインフレーションが起こったということはほぼ間違いないと考えている。

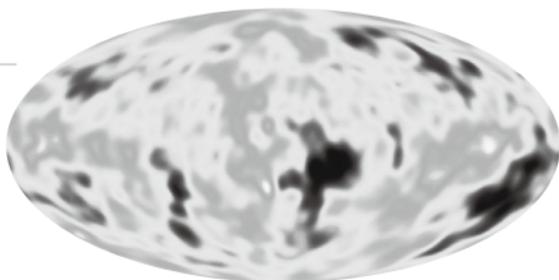
我々の住む宇宙の全貌

これが現在我々が宇宙に関してかなりの確信を持つて言えることの概要である。宇宙は

1992



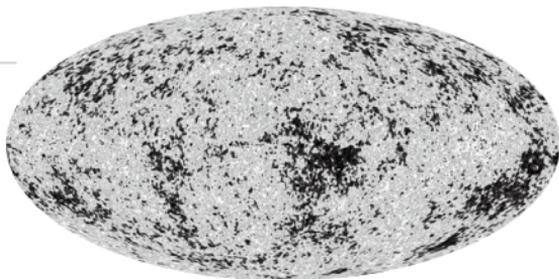
COBE



2001



WMAP



2009



PLANCK

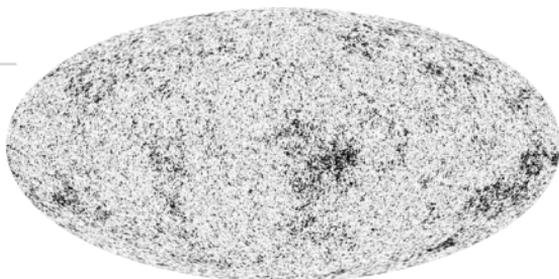


图 9

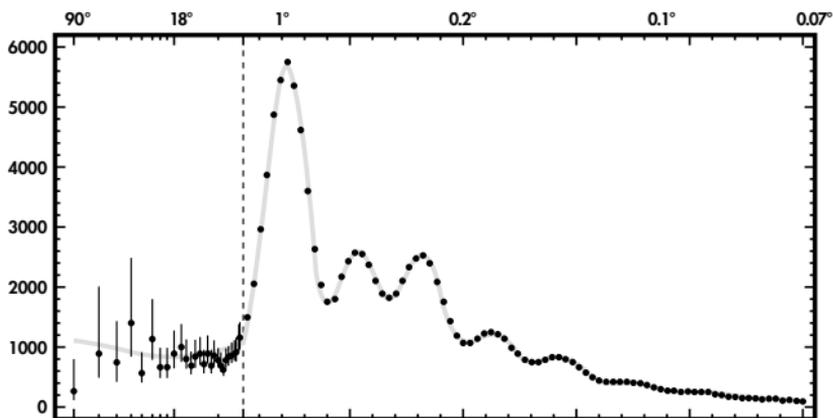


图 10

誕生後 10^{38} 秒から 10^{36} 秒くらいの間にインフレーションと呼ばれる急激な膨張を経験し、その後その膨張に関与したエネルギーが熱エネルギーに変換されることによって高温高密度ビッグ・バン宇宙へと転換した。そのビッグ・バン宇宙は（インフレーション期の膨張に比べればはるかにまろやかであるものの）更なる膨張によって冷えてゆき、現在の摂氏マイナス270程度度の宇宙になったのである（図11）。

この描像によれば銀河団、銀河、恒星、惑星、さらにはその上の生命まで、現在我々が見る宇宙の全ての構造の起源はインフレーション期の量子力学的揺らぎであった。この僅かな揺らぎが後の宇宙で重力により増幅され、現在見る世界が形作られたのである。さらに、我々が知る物質は宇宙に存在する（ダークマターを含めた）全物質の一部でしかなく、さらにそれは反物質との大量の対消滅を逃れたほんの僅かな残りカスでしかない。我々は宇宙にとって何と取るに足らない存在なのだろうか！

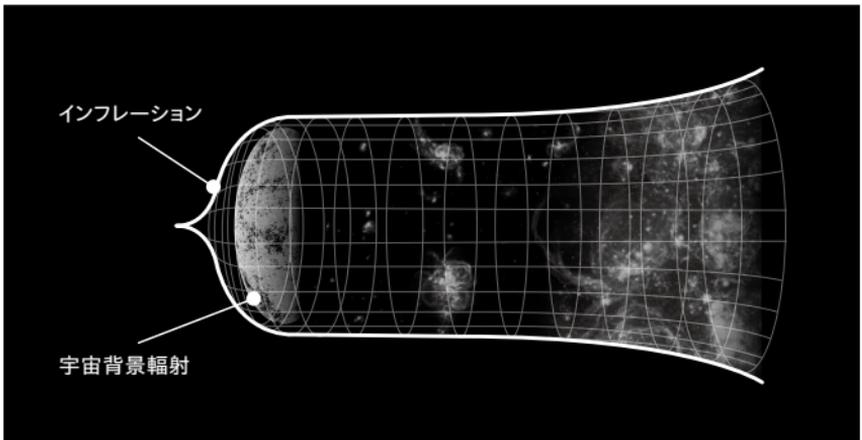


図 11

この宇宙の歴史を図11よりは少し科学者っぽい絵で描くことを考えてみよう。物理学者はよく時間と空間を一緒にした「時空間」を描くことがある。その場合、時間方向を縦に空間方向を横に取り、光の進む経路が45度になるように描くのが一般的である。（このような図はペンローズ図と呼ばれており、物事の因果関係を明白にするので便利である。例えば、ある一点で起こった出来事が影響を及ぼし得る領域は、あらゆるシグナルの速さが光速を超えられないことからその点の上方、左上45度と右上45度の間の領域に限られる。同様に、その一点に影響を与え得る領域は下方、左下45度と右下45度の間の領域のみである。）これに従って今まで見てきた宇宙の歴史を単純に時空間にしようとする、図12のようになるであろう。

しかしこの一見問題なさそうな図は、最新の理論によれば決定的に間違っているかもしれないのである。実際、これから見

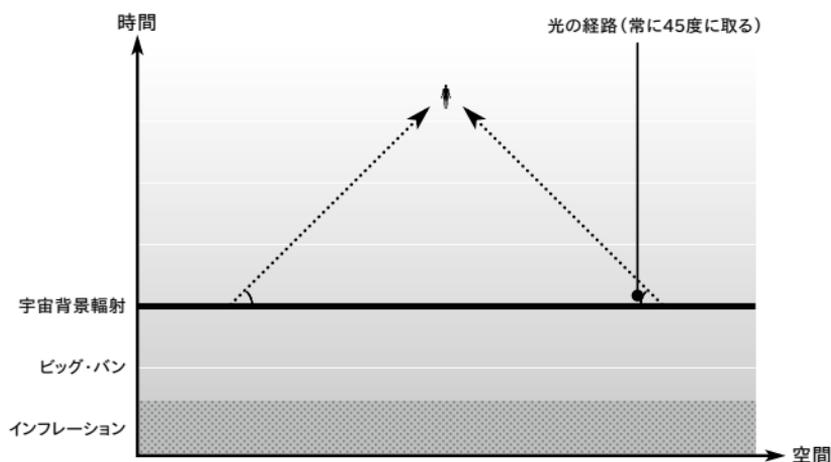


図 12

ていくマルチバース理論は図12に示されるのとは全く違う描像を我々に提示することになる。これは、この章で見てきた(図11にまとめられるような)我々の宇宙に関する理解が間違っているということではない。問題があるのは、図11から図12への過程である。

このことは歴史上起こった以下のような出来事と似ているかもしれない(図13)。人類が初めて地球が丸いと認識した時、それが平面でなく球形であることに気付いたまでは良かったが、それを宇宙の中心に持ってきたのは間違いであった。また、16、17世紀に学説の中心が天動説から地動説へと動いた時、太陽を中心とする惑星系の描像は正しく得られたが、他の星々を太陽と同列なものではなく背景のように考えたのは間違いであった。過去100年あまりの我々の宇宙に関する認識も、宇宙が静的ではなく動的であることは正しく見抜いたが(図11)、それが絶対的な時間ゼロに始まり絶対的な空間方向に無限に広がって

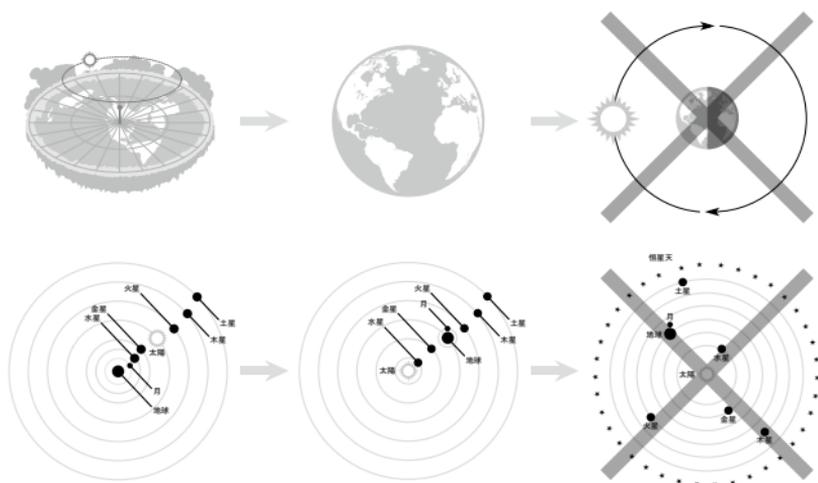
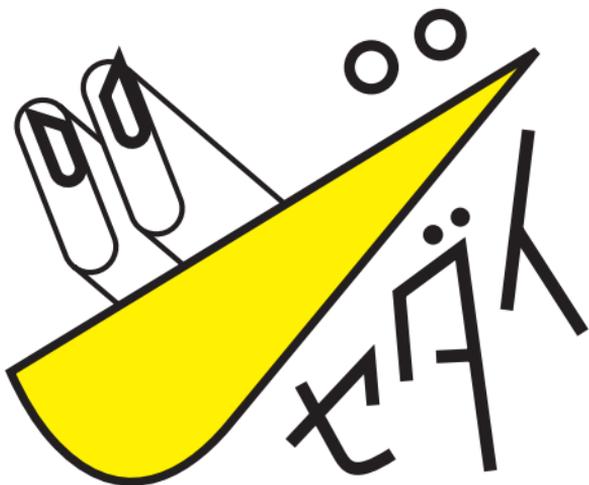


図 13

いるという描像(図12)と結びつけられたとすると、それは正しくないのである。

以下の章では、最新の理論物理学が提示する図12に代わる描像に迫っていくことになる。もちろんそのような描像に達するためには、何かヒントが必要である。それにはまず我々の知る宇宙の仕組みを深く考察していくことが必要になるのである。

君は、



何と闘うか？

<http://ji-sedai.jp/>

「ジセダイ」は、20代以下の若者に向けた、**行動機会提案サイト**です。読む→考える→行動する。このサイクルを、困難な時代にあっても前向きに自分の人生を切り開いていこうとする次世代の人間に向けて提供し続けます。

メインコンテンツ

ジセダイイベント

著者に会える、同世代と話せるイベントを毎月開催中！ 行動機会提案サイトの真骨頂です！

ジセダイ総研

若手専門家による、事実に基いた、論点の明確な読み物を。「議論の始点」を供給するシンクタンク設立！

星海社新書試し読み

既刊・新刊を含む、すべての星海社新書が試し読み可能！

マーカー部分をクリックして、「ジセダイ」をチェック!!!

行動せよ!!!