

教養教育としての知識 3 —宇宙の始まりの研究—

Knowledge of Liberal Arts Education

— Research on the beginning of the universe and the future of space development

松本治彦

Haruhiko Matsumoto

附属地域研究所

宇部フロンティア大学附属地域研究所年報 Vol.8 No.1

2018

要旨；自然科学の分野で社会教養として知っておくべき知識について、調査する研究を実施している。その第3弾として「宇宙の始まりに関する研究の進捗状況」について調べた。その結果、「新聞に記載されている内容」の範囲で、次のような研究成果は知っておくべきであることが分かった。

宇宙を観測する方法は、ガリレオ・ガリレイが始めた望遠鏡による方法が今でも、基本的には継承されている。その方法は、望遠鏡、ニュートリノ検出器、重力検出器、加速器（実験による方法）などである。

宇宙観は、星占いの時代から始まり、自然哲学、キリスト教の浸透、ルネサンス、そして現在へと変化している。

宇宙マイクロ波背景放射の発見により、宇宙の年齢は有効数字4桁（137億2千万年）まで精密に推定できる。

現在（2018年11月時点）、超ひも理論やブレーン宇宙論が議論されているが、近い将来には、ホーキング博士の最後の論文に書いてあるように、私たちの住んでいる宇宙とは別の宇宙がある証拠が見つかる可能性がある。

1. はじめに

科学の特徴は「書き換えられる」です。科学では、これまで正しいとされていたことが、どんどん書き換わっていきます。科学の世界の価値のある内容は、知識なり情報なりの「結果」ではなく、それらをいかにして得たかという「過程」のほうです。結果は書き換えられても、過程はそうではない。そこで得られた「考え方」や「やり方」は、無駄にならない。それらを踏まえて再び考えることで、新たな「考え方」や「やり方」に発展させることができる。科学においては、結果よりも過程のほうが魅力的で貴重である。そして、そのような過程（考え方）は、宇宙に限らず、様々なことを考えるときにも活用できる。

宇宙の始まりに関する研究も、古代よりどんどん書き換えられています。

2. 古代から現在までの宇宙観

古代の宇宙論を反映するのが星占いです。星占いが現代の私たちの考えや行動にまで影響を与えている点は興味がわきます。

古代人の宇宙観には1つの特徴があります。その特徴は、各地域の地理的・風土的な特色を強く反映していることです。当時は、宇宙を自分たちの生活や運命に影響を与える存在としていました。中世ではキリスト教の普及により、宇宙は神が住む理想の世界、地球は宇宙の中心にあると信じていました。ルネサンスの時代になり、地動説が復活、科学の力により太陽系、銀河系、銀河宇宙の姿を次々に明らかにしました。20世紀に入ると、宇宙は小さな火の玉の状態から始まり、100億年以上の時間、膨張し続けていることがわかって来ました。そして21世紀に入ると、暗黒物質、暗黒エネルギーが支配する宇宙、さらに

10 次元空間の中を漂う膜宇宙であるとの仮説も生まれてきました。

以下に、ギリシャ時代の宇宙観から現代の宇宙観について、まとめてみます。

2-1 ギリシャ時代の宇宙観；

「天も地も球」の見方は古代ギリシャの「自然哲学」から生まれた発想です。「創世神話」には、ヘブライ人（古代ユダヤ人）の神話が出てきます。そこでは、神はまず天地を創造し、「光あれ」と唱えて光と闇を分け、海と陸地を作り、太陽と月を作り、最後に1組の人間を作ったとあります。マヤ、アステカ、インカなどの古代アメリカ文明に伝わる神話も同様なものです。さらに、イザナギとイザナミが日本の国土を生んだという私たちの国の「国生み」神話も、このタイプです。

ギリシャ神話では、最初に生まれたのは混沌「カオス」です。カオスから大地（ガイア）と地下世界、そして愛（エロス）が生まれ、さらにカオスから闇と夜が生まれたとあります。

しかし、ギリシャ人は神話が狭い世界観に基づいていることに気づきました。どの神話も疑わしい。究極の真実を追求するために、人間の頭で理解できる合理的な発想から生まれたのが「自然哲学」です。

ギリシャ人と関係の深いイオニア人のタレスが、全ては「水」からできていると考えました。その弟子アナクシマンドロスは大地の形を円盤と考えました。さらに、「大地は丸い球の形をしている」と考えたのが数学者ピタゴラス（ピタゴラスの定理で有名）です。数学は宇宙の真理や秩序を表すものであると考えたのです。万物の源は「数」、数だけは永久に不滅の存在、そこから球が最も完全で美しい立体だと考えたのです。

それから2000年後に、ケプラーやニュートンにより、物体の運動は簡単な数式で表せることが発見されました。数こそが宇宙の真理、秩序であるというピタゴラスの考え方の正しいことが証明されたのです。

紀元前530年ごろに、ギリシャの三大哲学者であるソクラテス、プラトンおよびアリストテレスが現れました。ソクラテスは人間の魂の問題、プラトンは天文学と宇宙論、地球天球説そしてアリストテレスは現代の世界、自然界を研究しました。アリストテレスは哲学、倫理学、論理学、天文学、気象学、動植物学などの多数の分野で業績をあげ、「万学の祖」と呼ばれました。

ギリシャは紀元前338年、マケドニア王国に敗れ、その息子でアリストテレスが家庭教師であったアレキサンダー大王は、エジプト、ペルシャ、さらにはインダス川を超えて東へ遠征することで、ギリシャの思想が東西に伝わったのです。これが東西融合文化「ヘレニズム」文化です。大王の死後、マケドニア、シリア、エジプトに分割され、エジプトの王となったプトレマイオス1世もアリストテレスの教え子です。ヘレニズムの科学は理論よりも実験や観測を重視しており、このころに現れたアリストタルコスは「古代のコペルニクス」と呼ばれ、コペルニクスより1800年も前に地動説を考えていました。

紀元前 27 年にローマ帝国が誕生しました。ローマの人々は建築・土木など実用的な科学や技術を重視し、日常生活の役に立たない哲学や宇宙論を軽視しました。天文学は正確な暦を作るための道具となり、ギリシャの合理的な宇宙観は、長く埋もれることになりました。

2-2 ルネサンスと宇宙観

1000 年以上続いた「中世」のヨーロッパはキリスト教が人々の生活と思想を支配していました。人々は教会の教える宇宙観、つまり地球が宇宙の中心にあり、他のすべての天体は地球の周りを回っているという天動説を信じていました。

一方、7 世紀にマホメット（ムハンマド）によるイスラム教の布教の結果、イスラム共同体（イスラム国家）は、わずか 100 年で西はスペインイベリア半島から東はインド北西部まで広がりました。そしてイスラム世界で受け継がれた古代ギリシャの学問が再びヨーロッパにもどってきたのです。これが 12 世紀のルネサンスです。16 世紀に入るとコペルニクス、ブラエによる精密な天体観測が行われました。1596 年にケプラーは「宇宙の神秘」の中で「惑星の軌道は美しい円ではなく、潰れた楕円である」などと発表しました。さらにコペルニクス、ガリレオ、ニュートンが地動説や無限の宇宙論など新しい科学的宇宙観を示しました。特に、ニュートンは「天と地の法則を統一した」点で重要な業績を残しています。ニュートンは万有引力（重力）を使って、宇宙の星も地上の物体も、同じ運動法則で動いていることを説明しました。

2-3 20 世紀の宇宙観。

天文学の分野の 1 つに「宇宙論」という、宇宙の空間的な広がりと時間的な広がりを解き明かす学問があります。そこでは「宇宙はいつどのように始まったのか」「宇宙の中にある様々な物質はどうやって生まれたのか」「宇宙全体の構造はどうなっているのか」などを議論しました。その結果、太陽系は銀河系という星の大集団の一部、銀河系の内部には太陽のよう恒星が 2000 億個あること、こうした星の集団が見えているだけで 1000 億個ぐらいいあることがわかってきました。さらに、宇宙は今から約 137 億年前に、原子よりもはるかに小さいミクロの「卵」の状態で生まれたこと、その超ミクロ宇宙は急膨張し、一瞬にして何十桁も大きくなって、私たちの目に見える大きさになりました。しかし、宇宙誕生の瞬間やその「前」の様子はよくわかっていません。

アインシュタインは相対性理論を使って、光速度不変の原理を導き出しました。また、ハッブルは観測によって宇宙が膨張していることを発見しました。さらに宇宙マイクロ波背景放射の発見により、宇宙の始まりから現在までの様子が、詳しくわかってきました。

3. 基本知識

3-1. 観測方法

1) 望遠鏡

望遠鏡が発明された 17 世紀初めに、イタリアの科学者ガリレオは、口径数 cm の自作の望遠鏡で木星の衛星を発見しました。それ以来 400 年間に、望遠鏡は巨大化し、はるか彼方の「宇宙の始まりの証拠」を探るために観測を続けています。

光学赤外線望遠鏡は、ガリレオの望遠鏡と同様のタイプで、可視光を中心とする波長域を観測します。その一つで国立天文台のすばる望遠鏡（主鏡の直径 8.2m）は、129 億光年離れた銀河の発見など様々な成果をあげています。また日米とカナダがハワイに建設した TMT は、主鏡直径が 30m もある巨大なものです。欧州は、直径 42m 級の次世代望遠鏡（E-ELT）を計画しています。ここでの最大の狙いは、宇宙最古の銀河の観測です。それは、130 億年以上前の光であり、約 137 億年前と推定される宇宙誕生の時期に近いからです。

ハッブル宇宙望遠鏡は、大気の影響を受けない宇宙で、鮮明な天体画像を撮り続けてきました。その後継機ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡は、主鏡直径がハッブルの 2.7 倍、地球から 150 万 km 離れた公転軌道を回り、太陽や地球の光にじゃまされない状態で、深宇宙を精密に観測しています。

電波望遠鏡は光を出さないガス雲のような天体も観測できます。南米チリ北部の標高 5640m に日本などが建設した大型電波望遠鏡「アルマ」（正式名称はアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計（Atacama Large Millimeter/submillimeter Array）が、観測を行っています。これまでに 175 光年先の恒星を取り巻く円盤状の塵を捉え、131 億光年離れた銀河にある酸素を見つけるなどの成果を上げている。アルマの解像度は「東京から約 500 km 離れた大阪にある 1 円玉が見えるぐらい」です。次世代は千キロ離れた 1 円玉を識別できます。巨大電波望遠鏡「SKA」の構想も動き出しています。欧米や中国、インドなどが協力し、2000~3000 台のアンテナを使って 130 億光年以上離れた宇宙を探り、星が誕生する前の「宇宙暗黒時代」の電波をとらえるのが目的です。

宇宙線望遠鏡（国際宇宙ステーション）は、高エネルギー領域の電子を高精度で捉えることに成功しました。今後は、エネルギーの観測範囲をさらにひろげ、宇宙の謎である暗黒物質の解明を目指しています。

X 線望遠鏡（天文衛星）は、遠くにあるブラックホールや超新星などが出す X 線を観測する衛星です。星や銀河の中でエネルギーが集まる場所を調べたり、元素の種類を調べたりできる利点があります。

X 線は、数百万度から数億度の超高温の電離気体（プラズマ）や、高速で走る粒子から放射されます。

下記にガンマ線望遠鏡の記事を掲載します。

日経 2017.5.22 宇宙の謎、ガンマ線で迫る、日本など、望遠鏡 100 基超で観測、暗黒物質の正体解明

暗黒物質やブラックホールの謎の解明をめざし、大型望遠鏡で宇宙から飛来する「ガンマ線」を調べる日本や欧州などの国際共同チームによる観測が来春始まる。アフリカの島

と南米の高地に 100 基超のガンマ線望遠鏡を国際協力で建設する「CTA 計画」の 1 号機で、日本主導で建設している。暗黒物質の正体に迫ることができれば、ノーベル賞級の成果となる。

2) ニュートリノ検出器 (カミオカンデからハイパーカミオカンデ)

岐阜県飛騨市の地下 650m にあるカミオカンデ (小柴先生のノーベル賞)、スーパーカミオカンデ (梶田先生のノーベル賞) は、ニュートリノを通じて宇宙を観測する最高性能の望遠鏡です。現在、ハイパーカミオカンデを建設中で直径 74m、高さ約 60m と 26 階建てのビルに相当し、規模はスーパーカミオカンデの 5 倍以上です。

ニュートリノはどんな物質もほぼ通り抜けますが、まれに水の中の電子とぶつかって弱い光を出すことがあります。宇宙誕生はニュートリノの影響で物質と反物質のバランスが崩れて物質だけが残ったとの説明が有力なのです。

茨城県東海村の実験施設「J-PARC ジェイパーク」で「物質と反物質のニュートリノを作り、295 km離れたハイパーカミオカンデへ発射し、地中を通り抜ける間にニュートリノが変化する量が物質と反物質で違うことを確かめる。

アイスキューブ (南極点の近くに作られたニュートリノ観測施設) は、南極点近くにあるニュートリノ観測施設です。厚さ約 2800m の氷の層に掘った 86 本の穴に、計 5160 個の光センサーを埋め込んでいる。宇宙から飛来したニュートリノと、凍った水の分子とがごくまれに反応する際に出る微弱な光を、光センサーが検出する。

3) 重力波検出器

LIGO (ライゴ)、KAGRA (かぐら)、VIRGO (バーゴ) はいずれも「重力波」を観測するための望遠鏡です。

以下に、重力波観測の記事を掲載します。

日経 2017.7.30 重力波宇宙で観測計画、欧州宇宙機関、3 衛星で巨大望遠鏡

宇宙空間に正三角形を描くように配置した 3 基の衛星を使い、超巨大ブラックホールや連星が放つ重力波を捉える欧州宇宙機関 (ESA) の重力波望遠鏡「LISA (リサ)」が実現に向けて動き出した。ESA が 6 月に計画を承認、2034 年打ち上げを目指す。地上にある米国の「LIGO (ライゴ)」や日本の「かぐら」といった望遠鏡では観測できない微弱な重力波をキャッチできる。光や電波で見えない天体の姿を重力波で描き出し、天文学の可能性を大きく広げそうだ。ESA のチームは「宇宙に対する理解を根本から変えるだろう。138 億年前のビッグバンの残響を捉えられるかもしれない」としている。重力波は、物体が動くと空間のゆがみが周りに伝わる現象。石を投げいれると水面に波が広がっていく様子と似ている。・・・(中略)・・・LISA は、互いに 250 万キロ離れた 3 基の衛星がレーザー光をやりとりし、重力波によるわずかな空間のゆがみを検出する仕組みだ。宇宙に巨大なアンテナを浮かべるイメージで、どんな天体が重力波を発したかや、宇宙のどの方向から到達し

たかを推定できる。

日経 2017.10.20 星の合体、長年の謎解く、中性子星で重力波初観測、光・電磁波で分析可能に、金の起源も解明

欧米などの国際研究グループが 16 日、中性子星と呼ばれる重い星同士が合体した時に発生する重力波を初めて観測したと発表した。今年のノーベル物理学賞の受賞テーマにもなった重力波だが、これまで観測されたのは、ブラックホールの合体で生じたものだけだ。中性子星なら重力波以外に望遠鏡などを使った多角的な観測が可能で、金など重い物質の起源をはじめ、様々な宇宙の謎を解く入口になると期待される。

4) 加速器 (実験による方法)

CERN (セルン) の巨大円形加速器「LHC」では、ボトムクォークの質量 (重さ) がヒッグス粒子で生じていることを確認しました。これまではトップクォークとタウ粒子の質量がヒッグス粒子が起源だとわかっていました。今回の発見は物質の質量の起源が、ヒッグス粒子であることを裏付ける重要な成果です。

この加速器は周長約 27 km で、地下 100m の場所にある。この加速器に接続する検出器は「アトラス」と「CMS」です。検出器の中で粒子と粒子を衝突させて、その反応を分析します。アトラスでは世界 38 か国から 137 機関の科学者 3000 人が参加しています。総コストは 9000 億円、日本から 138 億 5000 万円を拠出しています。検出器を使った実験では、ヒッグス粒子はもちろん、暗黒物質の有力候補である超対称性粒子も探索しています。

「スーパーKEKB (ケックビー)」については、以下に関連記事を掲載します。

日経 2018.4.26 電子と陽電子、衝突実験、高エネルギー研、新型加速器で

高エネルギー加速器研究機構は 26 日、新型加速器「スーパーKEKB (ケックビー)」による実験で、電子と陽電子をほぼ光速まで加速し、初めて正面衝突させた。電子と陽電子を衝突させると宇宙誕生間もない状況を再現でき、今後、実験が本格化する。宇宙創世期に起きた物質誕生の謎の解明につながるとされており、ノーベル賞級の発見も期待されている。宇宙誕生直後には物質と、電気的な性質が逆の反物質が同数ずつ存在したと考えられているが、現在の宇宙に反物質は見つかっていない。電子は物質、陽電子は反物質を構成している。

新型加速器は 3 月下旬に本格稼働。電子と陽電子の最初の衝突は、稼働直後の大きな節目と位置づけられている。地下 11m に設置した 1 周約 3 km の円形の真空パイプの中で、電子と陽電子を逆方向に周回させてぶつけ、一部が B 中間子と反 B 中間子という素粒子に変わるのを新たに検出器で観測する。2019 年に本格的な観測を始める予定だ。500 億個の B 中間子・反 B 中間子を調べ、宇宙や物質を説明する素粒子物理学の標準理論では説明がつかない現象を探索する。

3-2. 素粒子

素粒子とは、この世の中のすべての物質が持っている最小単位で「素の粒子」で、英訳すると「エレメンタリー・パーティクル」と言う。宇宙を形作っている、基本的なパーツで物質を細かく見た時、これ以上細かく分けられない最小単位となるものです。現在、17種類が見つっています。

素粒子物理学の世界では、「素粒子が存在する兆候をとらえた」というためには、その確率が99.9%以上であることが必要です。また、「新粒子を発見した」とするためには、99.9999%以上まで、その確率を上げることが必要です。

例えば、ヒッグス粒子の発見には、LHCによって加速された粒子を高エネルギーで衝突させ、生成される粒子や現象を見るために設計された粒子検出器は二つ「アトラス」と「CMS」を使った。同様の実験を2つのグループが行っている理由は、1つの測定結果だけでは科学的には信用されないからです。ダブルチェックすることが必要なのです。アトラスから生み出されるデータは1年間で約3200テラバイト、このデータをCD-Rにコピーして積み上げると、7km、活字の本に書き込むと30億冊。

物質の基本的なものは現在、クォークとされていますが、だれもこれを単独で取り出すことに成功していません。しかし、この存在を仮定すると、発見された（確率的な数値に基づいているが）たくさんの素粒子の存在理由や、個々の素粒子の性質、それらの相互作用の仕方など、確立された物理学の基本理念を損なうことなく説明でき。

1) 素粒子とクォーク

かつて電子、光子、陽子、中性子、中間子などは、物質の基本単位で素粒子と呼ばれていました。素粒子は大きく分けてレプトン（軽粒子）とハドロン（重粒子）に分類されます。20世紀に入って素粒子は発見され続け、半世紀でその数は数百に達しました。そこで、さらに基本となる粒子の発見を求めることになりました。現在、強い力を及ぼしあう素粒子（ハドロン）はクォークという基本粒子からできていると考えられています。レプトンの1つであるニュートリノの存在を観測によって実証したのが小柴昌俊東大名誉教授です。レプトンは6種類が見つっています。

2) クォークの種類

クォークには質量の異なる6種類、up、down、strange、charm、bottom、top、これらのクォークにはさらにそれぞれ3種類あり、赤、青、緑のカラーで区別します。また、すべてのクォークには反粒子である反クォーク（電荷が反対で質量は同じ）があります。なお、カラーは補色となります。

3) 4つの力

4つの力から多様な物質が生まれました。重力、強い力、弱い力および電気力（電磁力）です

重力；

私たちは、地球の表面にへばりついて生きています。こん身の力を込めてジャンプしても、自分の身長をあまり大きく超えることはできません。高い山に登ると空気の密度が低くなり、酸欠となって高山病にかかります。これは、空気が地球の中心に向かって引き付けられ、上空の方が薄くなるためです。私たちが手にした石やボールを離すと下方に落ちます。質量のある物質はどんなものでも、地球の中心に向かって引っ張られる作用が生じますが、これは地球の重力によるものです。この重力は地球に独特のものではなく、質量をもつ物どうしの中に必ず働く“万有引力”と呼ばれる作用の一つです。

「重力」は 2 つの物体の質量の積に比例するため、小さな質量の物質の間ではあまり影響力は持たないが、質量が大きくなるほど物質の生成に強い影響力を持つようになる。原子の密度の揺らぎ（凹凸）が生まれ、密度が少し高い部分では、「重力」が大きいため、まわりの原子を集めるようになる。質量が大きくなると、「重力」はますます強くなって、さらにたくさんの原子を集めることができるようになる。それらの原子は自らの「重力」によって収縮し、銀河が誕生する。

電磁力；

重力と同じように私たちが身近に感じる力は電磁的な力です。これらは電氣的なものと同様に磁氣的なものもあるが、電流を導線に流せば、その周囲に磁気的作用を生じることから、両者は本来密接に関わりあっている。重力の作用と違うところは、電気力、磁気力ともに、いつも引き合う力が生じるわけではなく、反発し合う力も生じる点です。電気力についてみると、電荷には正と負の二種類があり、異種の電荷の場合には引力が、同種の電荷の場合には斥力が生じる。磁気力の場合には、南北二つの異なった磁極があり、同種の磁極間には斥力が、異種の磁極間には引力が働きます。

弱い力；

陽子と中性子が多数で作る重い原子核の中には、不安定なものがあるが、それらは放射性崩壊といわれる反応を起こして別の原子核に変わっていきます。中性子の数が多すぎて不安定となった原子核は、中性子を陽子に変えて安定となります。その際、電子と反電子ニュートリノを放射します。これがベータ崩壊と呼ばれる現象です。逆に、陽子の数が多すぎて不安定な原子核は、陽子が中性子に変換されて安定となります。このとき、陽電子とニュートリノを放射します。これは逆ベータ崩壊と呼ばれる現象です。このように、電子か陽電子を放射して原子核の構造を変えるときに働く力が、弱い力と呼ばれる作用です。

強い力；

電磁気力の 100 倍ほどの大きさを持っている。クォークを結びつけて陽子や中性子を作るグルーオン（にかわ粒子の意味）の働き。また、陽子どうしに働く電氣的な斥力に打ち勝って中性子と共に原子核を作る π 中間子の働き。

強い力の由来；

原子の中心にある原子核は陽子と中性子（陽子と中性子をあわせて核子とよぶ）からつくられます。例えば、ウラン 235 は 92 個の陽子と 143 個の中性子からなっています。とこ

るで、この分野での最大の謎は、原子核では陽子や中性子がどのような力で結びついているかでした。陽子どうしの電氣的斥力（斥力とは、2つの物体に働く力で、相互の距離を遠ざけるように働く力です）に逆らってそれらを結びつけているので、電磁気力よりも強くなければならないのです。そこでそれは強い力と呼ばれるようになったのです。この強い力の正体を暴いたのが、湯川秀樹博士です。プラスの電気を持った原子核とマイナスの電気の電子が引き合っていると同様に、核子も未知の素粒子によって結びついているに違いないと考えたのです（1934年）。計算によると、その素粒子の質量は、電子と核子の中間であることがわかりました。1947年、予言通りの素粒子が発見され、湯川理論は世界の注目を浴びることになりました。

3-3 質量と重さ

質量の大きい物体は動かすににくい。一方で、質量の大きい物体は重力に強く引かれる性質がある。リンゴとスイカが同時に落ちるのは、この二つの性質がちょうどプラスマイナスゼロで相殺されているからです。精密な実験では、10兆分の1の精度で「質量」と「重さ」が一致しています。この一致する理由をニュートンは説明していません（自然はこうなっていると、答えた）。アインシュタインは「落下中は重力が消え、力が働かない」ことを仮定して、この一致性を説明しました。また、力は質量と加速度の積に等しく、質量はエネルギーが集中している状態だと示しています。式で表すと以下のようになります。

$$E = m c^2 \text{ (エネルギー} = \text{質量} \times \text{(光の速度)}^2 \text{)}$$

重さは、物質そのものが持つ量でなく、場合で変わる。万有引力により引っ張られる度合いが重さです。

なお、ヒッグス粒子は、ヒッグス場で素粒子が質量を得る（正しくは、質量を得たような状態になる）ということです。したがって、あらゆる物質の質量は、まだ未解決です。エネルギーの起源は今のところ説明ができない。ヒッグス粒子が与える質量は、たったの2%です。

3-4 宇宙マイクロ波背景放射

宇宙の年齢の推定値は、2006年ごろには大幅に改善されました。WMAP衛星を使って、宇宙マイクロ波背景放射が高い精度で観測されたおかげで、ビッグバンから経過した時間を精密に測定できるようになったのです。今日では、宇宙の年齢は、有効数字4桁までわかっています。宇宙は、137億2千万歳なのです。

宇宙誕生30万年後に、電子は陽子に捕まって自由に動けなくなり、光子は宇宙の中を直進できるようになりました。このことを「宇宙の晴れ上がり」と呼んでいます。光子が直進することで、宇宙の見通しが良くなったというイメージです。

この時代の光子は、実は現在観測することができます。これが宇宙マイクロ波背景放射（宇宙の全方向から飛んでくる、マイクロ波の波長を持った電波のこと）で、宇宙創成時

代の光子を見ることができます。生まれてから間もない高温の宇宙で発せられた光の残照です。宇宙マイクロ波背景放射が観測されたことは、ビッグバンが現実起こったことを示しています。

宇宙マイクロ波背景放射はどこでも全く同じ強さといっていますが、じつはほんのわずかだけ強さにムラがあります。このムラの様子を調べ、ムラのできる宇宙の条件を検討し、宇宙のはじまりや宇宙の歴史について多くの知見が得られたのです。宇宙の年齢が 137 億歳（2008 年 3 月時点での最新の数値は 137.3 億歳±1.2 億歳）、これは宇宙マイクロ波背景放射のムラの様子などから推定しています。15 年ほど前には宇宙の年齢は 100 億歳から 200 億歳の間くらいと大雑把でした。このムラの様子はインフレーション理論が予想していたものとぴったり一致することも判明、つまり宇宙マイクロ波背景放射のムラは宇宙が生まれてすぐに急膨張を遂げたというインフレーション理論の正しさを証明しています。

3-5. 暗黒物質と暗黒エネルギー

宇宙で最初の爆発の勢いはいずれ衰え、万有引力によって宇宙は収縮するかもしれないと 2000 年ごろまでは、多くの科学者が考えていました。しかし、詳細な観測から宇宙の膨張の勢いはむしろ加速していることがわかったのです。宇宙には万有引力に対して、ナゾの斥力（反発力）が働いている。科学者は斥力の源を「ダークエネルギー」と呼んでいます。正体不明のエネルギーという意味です。

宇宙で物体どうしを遠ざけて、空間を広げている力はなんなのか？実は宇宙に存在する物質は、現在のところ 4%しか正体がわかっていません。その 4%が標準理論で予言された 17 種類の素粒子です。残りの 96%は未知の存在です。その残り 96%の内訳は、23%の「暗黒物質（ダークマター）」と 73%の「暗黒エネルギー（ダークエネルギー）」です。この暗黒エネルギーが、正体はわからないが、宇宙空間を広げているのではないかと、と言われて

います。

2003 年、NASA は「宇宙の 96%は正体不明の物質とエネルギーからできている」と調査結果を発表、2008 年には「95%（わかっているのは 4.6%で私たちの体や星などを構成し、ごく見慣れたごく普通の物質）が正体不明」と最新数値を公表しました。これは宇宙論の最新理論から予想されていたことで、NASA の宇宙探査機による宇宙の観測からそれが確認されました。

3-6. 相対性理論と量子論

今から 100 年前、アルバート・アインシュタインの一般相対性理論が生まれ、宇宙を支配する時空（時間と空間）と重力の新たな姿が明らかになった。同じころ微小な世界で量子力学の研究が始まりました。これら 2 本柱で現代物理学は宇宙誕生などの謎に迫っています。今後は 2 つを統合した究極の「量子重力理論」を作ることが最大の課題となっています。

ミクロの世界を取り扱う量子論と、果てしない宇宙空間について取り扱う相対性理論、一見相反する両者が融合したときに見えるのは、宇宙誕生の瞬間の様子です。

量子論によると、真空はまったくの無ではなく、有と無の間をゆらいでいて、そこからエネルギーを取り出すことができる。そうしたエネルギーが宇宙を一瞬にして倍々ゲームのように急膨張させたと考えています。

相対性理論は、時間や空間が相対的なものであることを明らかにした理論です。絶対時間や絶対空間は「他の何ものとも無関係に存在するもの」、その反対は「他のものと同様、変化しながら存在する」となる。時間や空間は永遠不変のものではなく、状況に応じて伸び縮みするのです。それを明らかにしたのが相対性理論です。

1905年に発表されたのが「特殊相対性理論」、1915年から16年にかけて発表されたのが「一般相対性理論」です。

重力とは曲がった空間の中を物体が運動することなのだとしています。物質が存在するとその周囲の空間は曲がる。そしてその曲がった空間の中で物質の状態を見てみると、二つの物質がお互いに引き合っ近づいたり、軽い物質が重い物質に引かれて落ちていくような運動が起きる。つまり重力とは空間の曲りが引き起こしている力です。モノがあれば空間は必ず曲がっているのです。

物質は、必ず質量を持っている。「質量とエネルギーは同じものだ」、物質がエネルギーとしたら、そのエネルギーが周囲に何らかの影響を及ぼすことも想像できる。その影響のことを空間の曲りとしています。

GPS衛星は高度2万kmの上空を猛スピードで周回している。GPS衛星には電波の発信時刻を知らせるための精密な時計が積んであるが、この時計には相対性理論に基づく補正が施されている。まず、GPS衛星の時計には特殊相対性理論が明らかにした「動いている時計はゆっくりと進む」という作用が働く。そのために地球上におかれた時計に比べてわずかにゆっくりと進む。一方、一般相対性理論によると「重力を受けた時計はゆっくりと進む」ことになる。地球の重力の影響は、地上よりも上空のほうが小さいため、上空にあるGPS衛星の時計は地上の時計に比べてわずかに早く進む。

結局、運動による影響と重力による影響の両方が合わさった結果、GPS衛星の時計は地上の時計よりもわずかに早く進む。これを補正するためにGPS衛星の時計は地上の時計よりも毎秒100億分の4.45秒ゆっくりと進む設計になっている。地上の対象物の位置を数十メートル単位できちんと割り出すためには、こうしたごくわずかな時間補正が必要になる。ブラックホールは時間さえ止める？

ミクロの世界では、未来はただ一つには決まらない。例えば今ここにいる電子が1秒後にどこにいるかは、確率的にしか予測できない。自然は絶対的なルールに従って整然と動くものではなく、もっと曖昧にいい加減にふるまう存在です。

3-7. 重力波

光の速さは有限なので、地球からの距離が遠いほど届くまでに時間がかかる。つまり、宇宙では、遠くを見れば見るほど「過去」を見ていることになる。だとすれば、理論上は137億年前の「宇宙の始まり」も見えるはず。しかし、どんなに望遠鏡の性能を上げて、あるところから先は見ることができない。宇宙は誕生後40万年までは超高温のプラズマ状態。そこでは、電気を帯びた電子が自由に飛び回っている。すると、光はそれに反応してしまい、まっすぐに進むことができない（私たちが目で光を見ることができるのは、空間が電氣的に中性で、光を邪魔しないから）。137億年前の宇宙がプラズマ状態にあったということは、いわば分厚い雲が宇宙を包んでいるようなもの、その先の様子は光をキャッチする通常の望遠鏡では見ることができない。ただし、それが「見える」ようになる可能性がないわけではない。その手段が重力波。光は「プラズマの雲」に邪魔されてしまうが、重力波は伝わる。重力波は何物にも遮られない。実際に、プラズマ状態以前にできた重力波を重力波望遠鏡でキャッチして、宇宙が誕生した頃の様子を観測する計画がある。この重力波は、アインシュタインがその存在を予言している。しかし、宇宙の始まりという極限状態で起きた現象の理解には、アインシュタイン理論も破綻、それをきちんと物理的に説明するには、この理論を乗り越える新しい理論が必要である。

下記に、関連記事を掲載します。

重力波初観測、2016.2.12日経（米チーム）

カリフォルニア工科大学、マサチューセッツ工科大学が中心となってワシントン州とロイジアナ州の2か所に「LIGO（ライゴ）」と呼ぶ1辺4kmの巨大なL字型の観測施設を建設。重力波が地上に届くと空間がゆがみ、L字の中心から両端までの距離にわずかなズレが生じる。このズレを精密に測定し、昨年9月14日、重力波が届いたことを確認した。今から13億年前に、太陽の29倍以上の重さのある2つのブラックホールの合体した時に発生した重力波と見られる。研究チームは2002年から観測を試みていたが、成功せず、装置の感度を10倍に高め、昨年から新たに観測を開始していた。

4. 今、わかってること

過去20年間に、宇宙論や素粒子論、重力に関する研究は飛躍的に進歩しています。宇宙の始まりだけでなく、宇宙の未来についても、驚くべきことが明らかになっています。1917年の時点では、科学者は「宇宙は永遠に不変、その宇宙は、天の川銀河だけで、周囲は何もない暗黒の空間が広がっている」と考えていました。

4-1 宇宙の年齢と広がり

私たちの宇宙の膨張は、約137億2千万年前に起こった高温高密度のビックバンから始まっています。観測可能な宇宙は、ざっと4千億もの銀河がある。また、宇宙の膨張は加速しており、アインシュタインの制限速度（光の速度）も、空間そのものにはあてはまらないことがわかっています。

宇宙のサイズは、年齢が 1 秒の時から今日までに、1 兆倍ほど大きくなっています。

1980 年代には、インフレーション理論や無からの宇宙創造論が提案されました。宇宙の始まりについての理論的な研究が進み、1990 年代になると、今度は観測に基づく研究へと主体が移っていきました。

4-2 仮想粒子

天文学の分野では最近、行われた宇宙マイクロ波背景放射の観測で、理論的予測と十万分の 1 の程度のレベルで比較できるようになりました。さらに、ディラック方程式を使って予測された仮想粒子の存在から原子の物理量を計算し、観測結果と比較してみると、10 億分の 1 という驚くべき精度で、一致しています。

つまり、仮想粒子は必ず存在しているということです。

仮想粒子は、私たちの質量の大部分と、宇宙の中で目に見えるものすべての質量を生み出しています。1970 年代には、物質についての知識が基本的なレベルで大きく進展しました。クォーク同士の相互作用を正確に記述する理論が見いだされました。物質のほとんどは陽子と中性子からできているが、その陽子と中性子はクォークからできています。現在では、陽子の内部の様子はかなり解明されています。陽子の内部には 3 個のクォークがあるが、それ以外にも様々なものが存在しています。特に、クォーク間に働く強い力を伝える粒子と場を反映した仮想粒子が、たえず生まれたり、消えたりしています。仮想粒子が自発的に生じたり消えたりしながら、場は陽子の内部でお互い同士やクォークと相互作用しています。

仮想粒子が空っぽの空間に及ぼすエネルギーの推定値としては有限な値が得られます。しかし、こうして得られた推定値は暗黒物質も含めて、宇宙に存在することがわかっている物質全てのエネルギーよりも、なんと 10^{120} 倍も大きい。

4-3 「無」

以前は「無」とは、物質が何も存在しない空っぽの空間のことであると考えられていました。しかし、過去 100 年の間に得られた知識から、空っぽの空間とは、それまで（自然の仕組みがまだそれほどわかっていなかった頃に）考えられていたような、汚れなき「無」とはかけ離れたものであることが明らかになってきました（量子的真空）。

宇宙は対称的な状態で始まり、その状態では物質は存在しない。つまり宇宙は真空だった。第二の状態が存在して、そこには物質が存在する。その第二の状態は、わずかに対称性が低い、エネルギーも低い。やがて対称性の低い相が小さな領域として現れ、急速に成長した。その相転移に伴い放出されたエネルギーが、粒子となった。これがビッグバンです。「なぜ何もないのではなく、何かが存在するのか」という問いに対する答えは、「何もない」状態は不安定だから、ということになる。

4-4 超ひも理論、ブレーン宇宙論、多宇宙

2008年にノーベル物理学賞を受賞した南部先生は、いろいろな新しいアイデアを次々に出してくる物理学者でした。その一つが超ひも理論で、南部先生と後藤先生が1970年に別々に出した「ひも理論」の提案からスタートしています。

ここ10年ほどの宇宙研究で注目されているのは「ブレーン宇宙論」、宇宙は10次元空間という説です。最新の理論では、物質の究極の基本要素は小さな「粒」ではなく「ひも」状、この理論が「超ひも理論」です。一つのひもが様々な方向に振動することで、現在知られている数十種類の素粒子に変化する。そのためには、10通りの振動の方向、つまり10次元の空間が必要になるという理論です。現在、私たちが3つの次元しか認識できないのは、7つの次元が小さく縮んでいるからとしています。ブレーン（膜）が「ひも」の先端にくっついている。素粒子物理学者は、超ひも理論をかなり有力な理論だとみています。3次元しかない私たちの宇宙は、薄っぺらな膜のようなものとしています。ビックバンは3次元のブレーン同士が衝突することで始まったとしています。宇宙は膨張と収縮を繰り返しており、宇宙に始まりはない。宇宙はやはり永遠の存在である。これが正しければ、暗黒物質や暗黒エネルギーが存在しなくてもよい。

宇宙観の変遷を知ることはフロンティア、つまり未知との境界の変遷を知ることである。宇宙の歴史は私たち人間観の歴史にもなっている。

5. まとめ

ホーキングの最後の論文では、私たちの宇宙とは別の宇宙が複数あり、その証拠を観測で捉えられるかもしれないという内容となっています。近い将来、私たちの宇宙観は劇的に変化しそうです。

以下に、関連の記事を掲載します。

日経 2018.5.20 新粒子？物理の定説揺らす、違う崩壊パターン議論的

現在の物理学の基本となる理論では説明が難しい実験結果がLHCで得られた、議論的になっている。未知の素粒子が存在する兆候だとする見方がある一方で、まだデータが少なく、もっと実験を重ねてから判断すべきだという慎重な意見もある。日本も新鋭の加速器を使って検証する実験を始める予定。

この実験はセルンのLHCで進められている。オックスフォード大学カイ・ウィルキンソン教授は「これまで物理学者が目にしたことのない、そしておそらく想像もできなかった素粒子や力の影響などを、私たちは目撃しているのかもしれない」と成果を解説する。

LHCは山手線に匹敵する1周27kmの真空の管を地下に設置し、陽子がほぼ光の速さで回っている。時計回りと反時計回りの陽子が正面衝突し、その際に飛び出してくる様々な粒子を観測する仕組み。観測装置は4か所あるが、注目の結果は「LHC b」で得られた。LHC bは衝突で出てくる「B中間子」という粒子の変化を詳しく追跡できるよう設計されている。湯川が予言した中間子は素粒子ではないが、原子核の中で様々な働きをしている。

その後、種類の違う仲間が多数見つかり、B 中間子もその一つ。出現しても、すぐに壊れてより軽い別の粒子に変わる。壊れ方に様々なパターンがあり、各パターンがどれほどの頻度で起きるかは、素粒子物理学の基本的な枠組みである「標準理論」で計算できる。ウィルキンソン教授によると、標準理論が示す B 中間子の壊れ方とは違う、興味深い現象がいくつか見つかった。

この現象が本当に起きているのか、実験に付きまとう誤差の範囲に収まるのか、まだ確定していない。それでもこの実験結果を受けて、まだ見つかっていない素粒子出現の可能性を指摘する論文が出た。標準理論に続く、次の理論の研究から導かれている「レプトクォーク」と「Z プライム粒子」が候補にあがっている。1960 年代後半から枠組みが整えられてきた標準理論は、物質を構成する素粒子 12 種類と力を伝える素粒子 4 種類、質量を与える素粒子 1 種類の計 17 種類の素粒子の存在を示し、最後まで残ったヒッグス粒子は 2012 年にみつき、正しさは立証された。しかし、標準理論は完全ではない。そもそも重力を対象外にして組み立てられた。また、これまでの宇宙観測から、光では検出できない正体不明の「暗黒物質」の存在が突きつけられているが、これは標準理論の中に含まれていない。同様に宇宙は加速的に膨張し正体不明のエネルギー「暗黒エネルギー」があると考えられているが、標準理論はこの存在も説明できない。

物理学者はほころびの多い標準理論の枠組みを保ちながら、これら未解決の問題もうまく説明できる「ポスト標準理論」の体系を築く必要があると考えている。LHC b はその手がかりを示す、重要な実験場でもある。レプトクォークや Z プライム粒子の検証は、もう少しかかりそうだ。新粒子を探し求める研究では、少ない実験データから有望視する憶測が流れて、後の期待がしばむ事態がたびたび繰り返されてきた。

日本の素粒子物理学の研究者は LHC b 実験の動向に刺激を受けている。高エネルギー加速器研究機構は 18 年春、新鋭加速器「スーパーKEKB」を稼働させた。前身の KEKB 加速器の性能を大幅に高め、膨大な衝突実験をこなせ、B 中間子の崩壊現象を詳しく観測できる。KEKB 加速器の実験は標準理論の重要な柱である「小林・益川理論」を検証し、小林誠、益川敏英博士に 2008 年のノーベル物理学賞をもたらした。KEKB のスタッフは LHC b を追撃する結果を出そうと意気を高めている。

日経 2018.5.4 故ホーキング氏の論文、科学誌に発表、別の宇宙、証拠に言及

スティーブン・ホーキング博士が 3 月に死去する前に書き上げていた論文が 2 日、海外の科学誌に発表された。論文は我々の宇宙とは別の宇宙が複数あり、その証拠を観測で捉えられるかもしれないという内容。共著者のベルギー大学教授は、宇宙から届く電波や、星の合体などが出る重力波の観測によって論文の内容が検証できるとみている。

これまでの学説は、138 億年前にビックバンで生まれた宇宙が急激に膨らみ、一部が枝分かれして、無数の宇宙を作ったとする。ホーキング博士はこの学説には不満だったという。博士が在籍していた英ケンブリッジ大学によると、生前の博士は新しい論文について「存

在するだろう宇宙の数（無数ではなく）はもっと少ないと示すことができる」と話していた。別の宇宙が存在する証拠を観測し、検証することが現実味を帯びてきたという。親交のあった佐藤勝彦東大名誉教授は「踏み込んだ形で自分の仮説を発展させた、最後まで博士らしい大胆な発想だ。この議論を深めていくところを見たかった」と話した。

日経 2018.4.22 ホーキング氏、超人の視点、量子力学で宇宙を捉える

ホーキングは、宇宙が「無」から始まるとする斬新な理論を提唱し、強い重力であらゆるものを飲み込むブラックホールがやがて「蒸発」して消えることを明らかにした。物理学の巨人、アインシュタインの再来といわれたホーキング博士は、宇宙について何を語ってきたのだろうか。

博士の名を世界にとどろく最初の業績は、1965年に書いたケンブリッジ大学での博士論文に始まる初期宇宙の研究だ。アインシュタインの一般相対性理論を基に、宇宙のはじまりには無限大の密度を持つ「特異点」が出現することを証明した。佐藤勝彦は「特異点では物理法則が破たんする。そこから宇宙が始まったとの結論は、本来歓迎されない。だが、かれは特異点の出現が避けられないと厳密に証明してしまった」と解説する。

この結論は、宇宙が138億年前に超高温・高密度の状態から爆発的に始まったという「ビッグバン宇宙論」と符合した。「神による創造の瞬間があったはずだ」とする、ローマ・カトリック教会も歓迎していたという。

最大の業績は74年に発表した「ブラックホールの蒸発」の研究だ。ブラックホールは他の天体と同様にエネルギーを放射し、最後は蒸発し消えてしまう可能性があることを証明した。強力な重力により光さえ外に漏れ出ないというブラックホールへの見方を大きく変えた。ホーキング博士はこの研究で、ミクロの世界を扱う量子力学の考え方を採り入れた。

量子力学によると、ブラックホールの表面近くでは真空から粒子と反粒子がペアで発生するとともに、再結合して消滅している。その片方が強い重力でブラックホール内に落ち込み、もう片方が外に飛び出す可能性がある。長い時間をかけてブラックホールは質量を減らし、最後は爆発して消滅する。こんな仮説を示し、多くの研究者は、その説を正しいと受け止めている。

この研究は「ブラックホールの情報パラドックス」という一大論争につながる。ブラックホールが蒸発してなくなるとすると、最初に星が持っていた情報はどうなるのかという疑問だ。ホーキング博士は当初、情報は破壊されると考えたが、後に改めた。しかし情報の保存のされ方についてはまだ結論がでていない。

最初に話題を呼んだ、特異点から宇宙が始まる理論は、「ホーキング自身が新しい枠組みを考え出し書き換えた」。83年に米物理学者、ハートル博士と共同で提案した「無境界仮説」という宇宙のはじまりに関するシナリオがそれだ。「虚時間」という数学的な技法を用いて、空間と時間がまるで球面の様に境界や端はないと考えた。特異点も宇宙のはじまりにはなかったとした。

この仮説でも量子力学を応用した。宇宙の最初は「無」から粒子が生まれては消える「揺らいだ」状態だったと考えられる。そのなかで宇宙の生まれる確率を虚時間を使って計算し理論を組み立てた。相性の悪い一般相対性理論と量子力学の組み合わせを試みたところがホーキング博士の真骨頂だ。この2つを完全に融合すれば、宇宙のすべてを説明する「万物理論」に近づくと期待がある。白水名大教授は「ホーキング博士は両理論の融合に部分的だが成功した先駆者だった」と評価している。万物理論につながるアイデアとして80年代以降、素粒子がミクロの「ひも」でできているとする「超弦理論」や、それを発展させた「膜宇宙論」が登場した。これらの理論から、宇宙は我々が住む1つだけでなく多様な宇宙があると予測されている。ホーキング博士もこうした宇宙論を支持していた。

亡くなる10日前に更新された博士最後の論文は「多元宇宙」を扱っている。宇宙の真の姿を探ろうとする熱意は最期まで衰えなかった。機知に富んだ性格も評判を高めた。

参考文献

- 1) 大栗博司、重力とは何か、幻冬舎新書、2012.
- 2) 多田将、すごい宇宙講義、イースト・プレス、2013.
- 3) 竹内薫、ヒッグス粒子と宇宙創成、日本経済新聞社、2012.
- 4) 佐藤勝彦、眠れなくなる宇宙のはなし、宝島社、2014.
- 5) 佐藤勝彦、相対性理論を楽しむ本、PHP文庫、2015.