
[原著論文]

科学的な自然観の変遷について

吉村 高男

山陽小野田市立山口東京理科大学 共通教育センター

On the Transition of Scientific Views of Nature

Takao YOSHIMURA

Center for Liberal Arts and Sciences, Tokyo University of Science, Yamaguchi

Abstract

The transition of scientific views of the universe and particle physics is discussed in this paper, mainly based on the recent progress of sciences. We know that the origin of the universe is connected with elementary particle physics, as high energy physics. The Cosmic Microwave Background (CMB), 3K radiation is considered as the relic of Inflation and Big-Bang of the universe. We can get valuable data of cosmic parameters from CMB. Quantum fluctuations in the microscopic Inflationary region had magnified exponentially to cosmic size and have become the seeds for the growth of structure in the universe. The Planck 2013 results indicate 68% dark energy, 27% dark matter, and 5% ordinary matter as mass-energy components of the universe.

Keywords : Scientific view of nature, Stratum of nature, Origin of the universe, Quantum fluctuation, Cosmic microwave background

キーワード : 科学的な自然観, 自然の階層性, 宇宙の始まり, 量子揺らぎ, 宇宙背景放射

I. はじめに

人類がこの地球上の各地において、太古の昔から抱いてきた自然観や宇宙観は、それぞれの地域における風土や神話、宗教的な文化等によって様々なものが存在している。日本には、自然のあらゆる現象に神の存在を認める多神論的な世界観が存在していた。

科学的な考え方が本格的に人類に芽生えたのは、16世紀から17世紀にかけてである。ガリレオは、天（太陽系）の世界の運動については、望遠鏡を使った観測をもとに「天文対話（1632年発刊）」¹⁾で地動説を支持した。地上の世界の運動については、斜面の実験等を通して、物体の重さに依存しない等加速度運動の法則を明確にして、それらを「新科学対話（1638年発刊）」²⁾でまとめた。ここで注意すべきことは、ガリレオ段階では天の世界と地上の世界は全く異なる法則が成り立つ世界で、両者は分離されていたということである。

しかしながら、ニュートンの出現により、運動の法則と万有引力の概念が導入されたことで、惑星の運動である天の世界の運動と、自由落下運動等の地上の世界における運動の両者が、自然に一つの運動方程式で繋がりと、まさに天の世界と地の世界の統一が果たされたわけである。それは、機械論的自然観をイメージできる近代科学の始まりであった。

ところが、原子や原子核等のミクロ的な世界の運動や物理現象を、ニュートン力学やマックスウェルの古典電磁気学では説明することができず、それらの物理学を超える量子力学の出現で、原子スペクトルをはじめ、様々なミクロ的な運動に起因する現象を合理的に説明できるようになった。前世紀初頭の現代物理学の誕生である。量子力学的自然像の明確化は、様々な分野において新たな観点から、私達に豊かな量子力学的自然観・物質観を提供している。

一方、マクロ的な存在である宇宙全体を表現することについても、ニュートン力学では議論することができず、時空構造を本質的に捉えるアインシュタインの一般相対性理論の出現で、はじめて宇宙構造や宇宙モデルについて議論することが可能になった。さらに、原子核物理学の進展は、相対性理論も考慮することで、様々な星の一生について議論することを可能にして、天体物理学の幕開けに繋がった。

究極のミクロ的な世界を追究している素粒子物理学は、現在、新たな段階の高エネルギー物理学を探索しており、このことは必然的に、今から約138億年前に

始まった、超高エネルギー・超高密度状態の宇宙の始まりに限りなく近づいていることになる。この世に存在する多様な物質の階層性は様々な進化の中における歴史的産物である。空間的存在である物質の階層性を奥深く掘り進むことにより、その起源・歴史性が見えてきていることは、まさに驚異的で豊かな、今日における科学的な自然観と言える。

II. 宇宙観の変遷

この宇宙について考える際に、地球を中心に考える天動説は、私達がこの地球上にいるわけであるから、現象論的に天の世界の運動を捉える際には、ある意味、自然な成り行きであったとも言える。ただ、現実には地球が動いているわけであるから、そこから他の惑星の動きを捉え、記述するためには巧妙なモデルを必要とする。つまり、不自然な周転円や離心円といったものを導入せざるを得なくなる。それらを総合的に紀元140年頃にプトレマイオスがまとめた書物が「アルmagest」である³⁾。

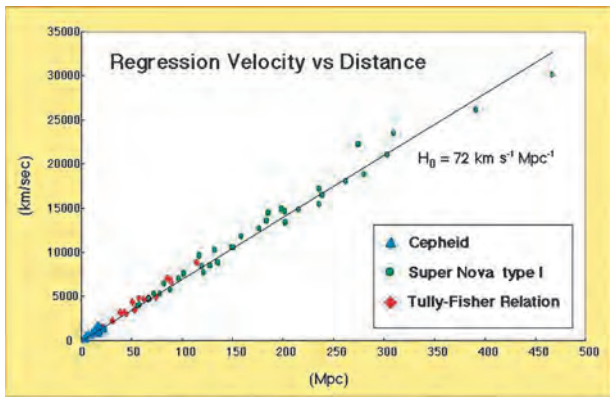
それに対して、宇宙は数学的にもっと簡単で美しい運動をしているはずだとして、コペルニクスは太陽を中心にして、その周りを地球等の惑星が回っているとすると、より合理的な説明が可能になることを示した。地動説の主張である。

ガリレオは望遠鏡による天体観測を行い、木星の周りの4つの衛星の発見や、金星の満ち欠けや大きさの変化の観測をもとに地動説を強く支持した⁴⁾。ケプラーは、惑星の軌道は楕円軌道で、惑星の面積速度は一定であることや、惑星の公転周期の2乗が軌道長半径の3乗に比例すること（ケプラーの3法則）を発見した。ニュートンはケプラーの法則を説明するために、運動の法則と万有引力の法則を導いた。ニュートンはそれらを「プリンキピア（1687年発刊）」でまとめた⁵⁾。ここで、注意しなければならないことは、この段階における天体の運動というのは、いわゆる太陽系の運動であるということである。

宇宙全体の時空構造について議論することが可能になったのは、1916年に、アインシュタインの一般相対性理論が発表されてからである⁶⁾。時空の歪みを物質の存在と結びつけるという物理学の幾何学化がなされたからである。その場の理論は非線形方程式で、その解を見つけることは大変な作業であったが、様々な条件のもとで様々な宇宙モデルを決める解が発見された。中でも、フリードマンによって求められた宇宙膨

張を示す解は、現在の宇宙の姿を示す標準的なモデルとして採用されている。

1929年には、ハッブルが、銀河の後退速度の大きさはその銀河までの距離に比例しているという、いわゆるハッブルの法則を発見した(図1)。図1については、横軸が銀河までの距離(Mpc: 3.26×10^6 光年)を、縦軸がその後退速度の大きさ(km/s)を示している。



データ出典: Freedman, W. L. et al (2001) Astrophysical Journal, 553, 47-72

図1 ハッブルの法則

銀河までの距離を d (Mpc)、後退速度の大きさを V (km/s) とすると、ハッブルの法則は次のように書ける。

$$V = H d \tag{1}$$

ここで、比例定数の H はハッブル定数と呼ばれる。図1 (2001年) のデータでは、 $H = 72$ ($\text{kms}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$) であるが、最近のデータでは $H = 67$ ($\text{kms}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$) である。

ここで、(1) 式は、非常に大切なことを示している。後退速度が一定であれば、 d/V だけ時間を遡れば、宇宙全体が一点に集まることになる。即ち、宇宙には始まりがあったことになる。その値 d/V は、宇宙年齢の目安になる。これを t_H と書いて、ハッブル年齢という。この値は次に示すように、ハッブル定数の逆数になる。

$$t_H = d/V = d/H d = 1/H \tag{2}$$

$H = 72$ ($\text{kms}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$) を使うとハッブル年齢は136億年になる。後述するが、宇宙背景放射の観測をもとにした最近の PLANCK 衛星によるデータでは、宇宙年齢は138億年であり、ハッブル年齢が宇宙年齢の目安として考えられることが分かる。

さらに、1965年にペンジアスとウィルソンは、図2に示すホーンアンテナで全天から降り注いでいる3K (2.725K) 放射のプランク分布を示すマイクロ波を観測した。これこそ、宇宙の最初に起こったビッグバンの名残と考えることができる。

DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND

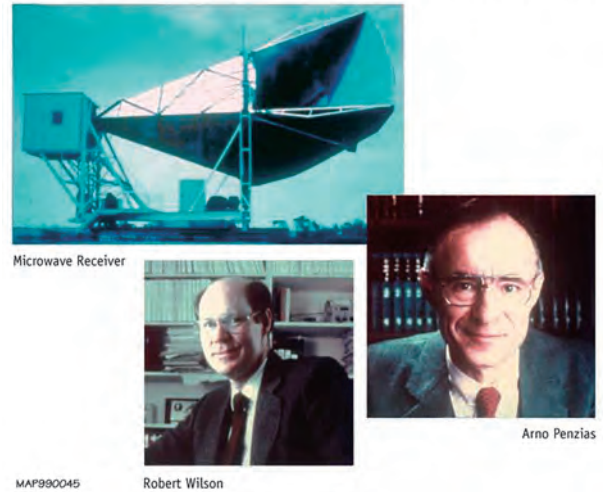


図2 ホーンアンテナと発見者の2人 (NASA HP "The CMB" より引用)

この3K放射のスペクトルを宇宙背景放射と呼び、黒体放射のプランク分布をスペクトルが示すということは、宇宙の始まりは熱平衡状態にあったことが分かる。図3に宇宙背景放射のスペクトル図を示す。

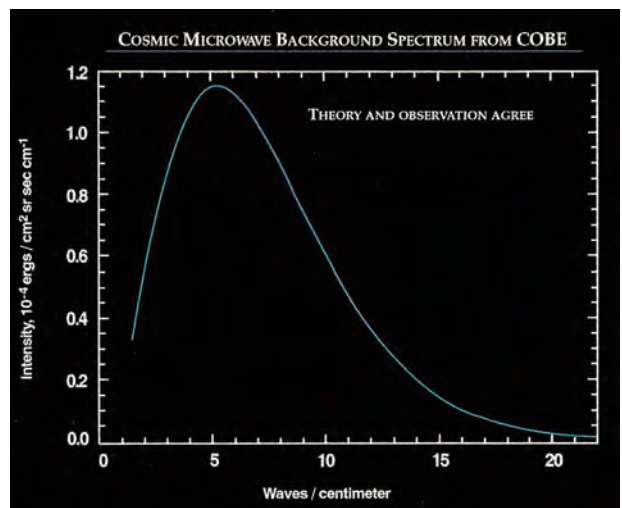


図3 宇宙背景放射スペクトル (By Wikipedia)

後の章で述べるが、この宇宙はビッグバンの前に、指数関数的な急膨張のインフレーションから始まり、その時の潜熱で熱くなった超高温状態でビッグバンが起きたとされている。4次元の時空間がマクロ的に成

長し、宇宙膨張する中で素粒子のクォークやレプトン、力を媒介するゲージ粒子であるグルーオンや光子などが姿を現し、それらがプラズマ状態の中で飛び回っていた。温度が下がるにつれ、水素の原子核となる陽子やヘリウムなど軽元素の原子核が形成される。さらに、3000K くらいの温度になると、それらの原子核と電子が結合して原子になる。プラズマの中では自由に走れなかった光子は、中性化した原子の中では自由に飛び交うことができるようになる。このように、透明になった状態を「宇宙の晴れ上がり」と表現する。宇宙誕生後38万年後のことである。現在、観測されている宇宙背景放射は、この時の光が3K まで冷えた状態で観測されているわけである。

宇宙誕生後、数億年もすると、宇宙の始めに創られた軽元素の水素、ヘリウム等が、後述する暗黒物質の助けも借りて、重力の作用で凝縮し、最初の恒星（ファースト・スター）が核融合を始め、輝き出す。最も安定な鉄までの元素が、核融合の舞台となる星の中心部で創られ、比較的質量の大きな星の一生の最期に訪れる超新星爆発の中で、さらに鉄より重い、超ウラン元素までの元素が一気に形成され、それらが宇宙空間に放たれる。それらが再び凝縮され、星ができる。銀河系の大規模構造ができると同時に、太陽系のような惑星系も恒星の周囲にできる。そのようなことを何回も繰り返し、やがて、太陽系の地球のように生命が発生できる条件が整った惑星上で生命の誕生・進化が起こる。よって、私達の体をつくっている元素の多くは、いつかどこかの星で輝いていた星の中で形成されたものであるといえる。まさに、この宇宙は輪廻転生を繰り返しながら、進化していると言える（図4、5）。

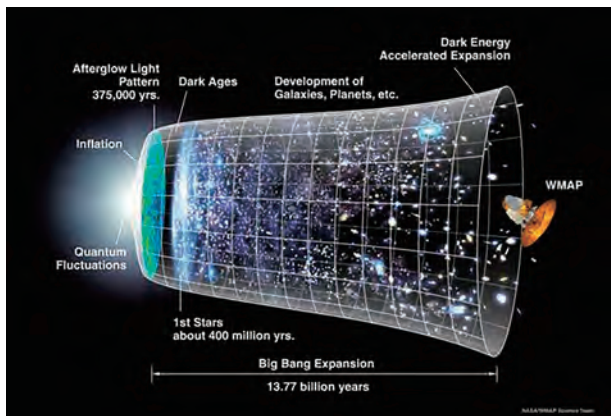


図4 宇宙進化の標準モデル
(NASA HP "WMAP" より引用)

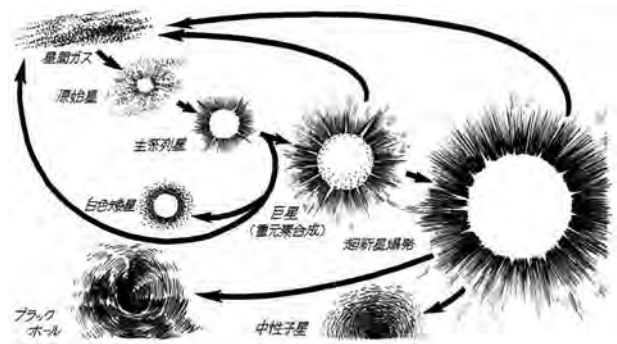


図5 星の一生と輪廻転生
～私達の体は星の残骸できている！～

Ⅲ. 物質観の変遷

今まで人類が得てきた物質観は、自然界に存在する物質の階層性（図6）を明確にするために、要素還元主義的、即ちアトミズムに則り、諸階層の構造と法則性を追究する中で、発展してきたものと言える。



図6 物質の階層性（例：生物圏）

ギリシア時代には、エンペドクレスによる4元素説の提唱や、デモクリトスによる古代原子論の提唱があった。19世紀に入り、ドルトンの原子説の提唱やアボガドロによる分子説の提唱があり、物質の化学反応の理解が進み、近代化学が発展した。

J.J. トムソンは1897年に電子の存在を確認し、20世紀初頭の原子物理学の進展に貢献した。ハイゼンベルグとシュレーディンガーは量子力学（非相対論的）を構築し、古典物理学では解決できなかった様々な問題点や矛盾を合理的に解決することができた。原子核の周囲をクーロン力で運動する電子の振る舞いが定量的に計算することが可能になったわけである。原子物理

学の登場である⁷⁾。

日本の湯川秀樹は1935年に、原子核の安定性の根拠を求め、陽子や中性子といった核子を結びつける強い力を媒介する中間子といった新しい素粒子を導入し、宇宙線の中にその予言された中間子が発見された。原子核物理学の登場である⁸⁾。

その後、宇宙線の中や素粒子加速器の中で行われた様々な実験で、多くの新しい素粒子が発見され、陽子、中性子といった、それまで素粒子と考えられていたものが、より基本的な素粒子であるクォークから形成されていることが分かった。クォーク理論については1964年にゲルマンによって提唱された⁹⁾。

素粒子の基本的な相互作用には、強い力、弱い力、電磁気力、重力の4種類が有り、素粒子の種類は、電子やニュートリノなどのレプトン（軽粒子）、陽子や中性子に代表されるバリオン（重粒子）、湯川が予言した π 粒子などに代表されるメソン（中間子）、相互作用を媒介するゲージ粒子などに分類される。バリオンとメソンを総称してハドロンと呼ぶ。ハドロンはさらに基本粒子である6種類のクォークから構成されている。レプトンも6種類有り、クォークとレプトンはいずれも3世代の対で構成され、両者に美しい対称性が成立している。これらに対応した反粒子も存在している。バリオンは3つのクォークから、メソンは2つの正・反クォークから構成されている。このようにして、現在は、基本粒子となるクォークとレプトン、力を媒介するゲージ粒子、質量をもたらすヒッグス粒子を標準的な素粒子と考えている。ヒッグス粒子は1964年にヒッグスによって予言されていたが、2012年、CERNの素粒子加速器LHC（図7）で発見された。よって、重力を含まない素粒子の標準模型（図8）を構成する素粒子はすべて確認できたことになり、その基本的な考え方は正しいことが確認された。

しかしながら、ヒッグス粒子は1種類ではなく、ニュートリノに質量があること、重力が入っていない

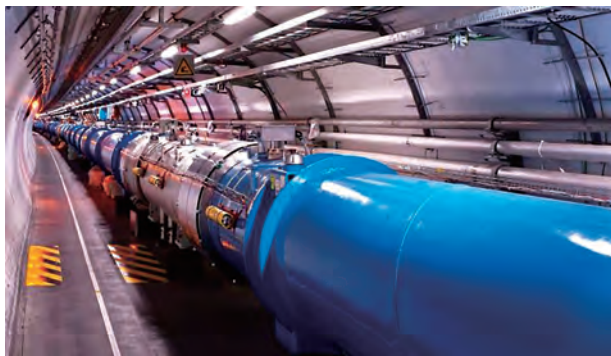


図7 素粒子加速器（CERNのLHC）

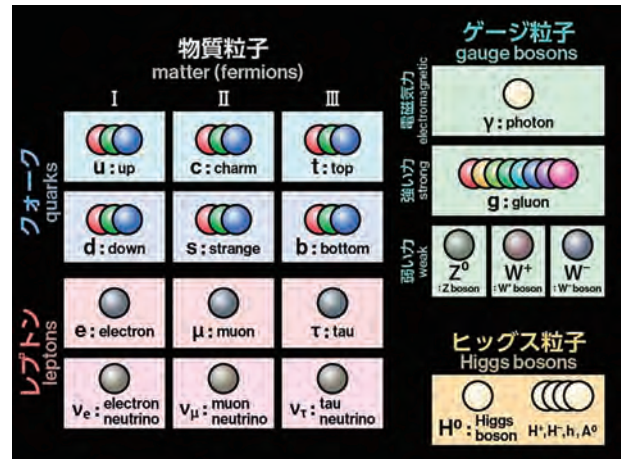


図8 素粒子の標準模型（重力を含まず）

ことなど、難問は山積している。現在、標準模型を超える挑戦が世界中で続いている。

素粒子加速器を使って、素粒子を高エネルギーにして、素粒子同士を衝突させることは、必然的に、宇宙初期における高エネルギー状態の中で、物質が生じた現象に近づいているということになる。つまり、物質の奥深い階層における物理法則が、宇宙の始まりにおける物理法則と同じ関係で結びついていると考えられる。図9に示した宇宙初期における真空の相転移と相互作用の分岐図を通して、素粒子加速器の内部で相同的に素粒子の諸階層が生成される現場として繋がっていることが理解できる。

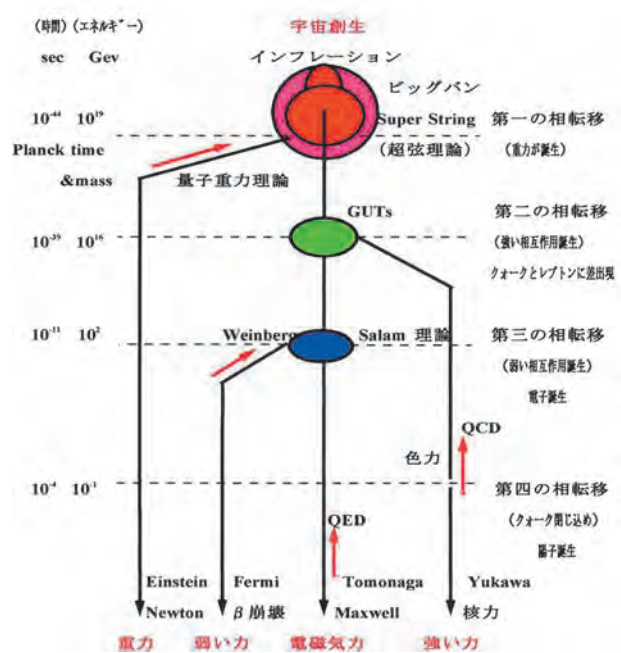


図9 真空の相転移と相互作用の分岐
～上向き矢印が研究の方向で、逆が宇宙進化の方向～

このように、ミクロの素粒子物理学の研究とマクロの宇宙物理学における宇宙の始まりの研究が繋がってくるのが興味深い。それを象徴的に示しているのが、図10に示したウロボロスの蛇の図である。この図については、素粒子物理学者のグラシヨーが 10^{28} cmの宇宙のスケールと 10^{-33} cmの素粒子的スケールの世界が同一の物理学で繋がることを直観的に示したものである。

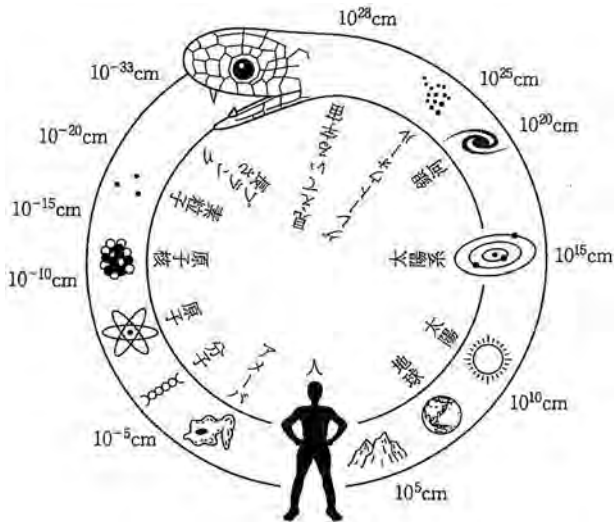


図10 ウロボロスの蛇 (By S.L. Glashow)
～素粒子と宇宙が繋がる面白さ～

ところで、今まで述べてきた物質の世界は、素粒子の標準模型に則った話で、私達が慣れ親しんでいる物質を構成しているものである。最近話題になっている暗黒物質（ダークマター）、暗黒エネルギー（ダークエネルギー）までを考えると、私達がよく知っている物質の全宇宙エネルギーに占める割合は5%に過ぎず、その他の95%は、実体がよく分かっていない暗黒物質と暗黒エネルギーであることが分かってきた。

暗黒物質は、もともとは、1930年代に、ツビッキーが銀河団中の銀河の軌道速度における欠損質量を説明するために導入したものである¹⁰⁾。光学的に観測できる質量だけでは質量が全く不足するため、光らない暗黒の物質が銀河団の中に必要であることを示した。1970年代には、図11に銀河 M33の例で示しているように、ルビンが様々な銀河回転の観測から、光り輝く星々の質量だけでは、銀河外縁部の回転速度を説明することはできず、光学的に観測できる物質の約10倍の質量が必要になることを導き、その未知なる物質を暗黒物質と呼んだ¹¹⁾。

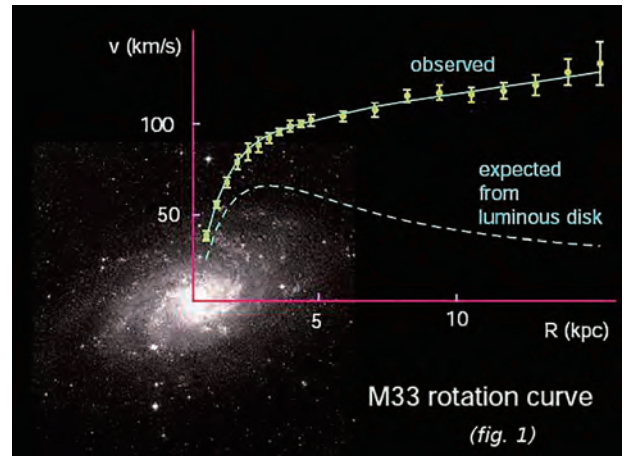
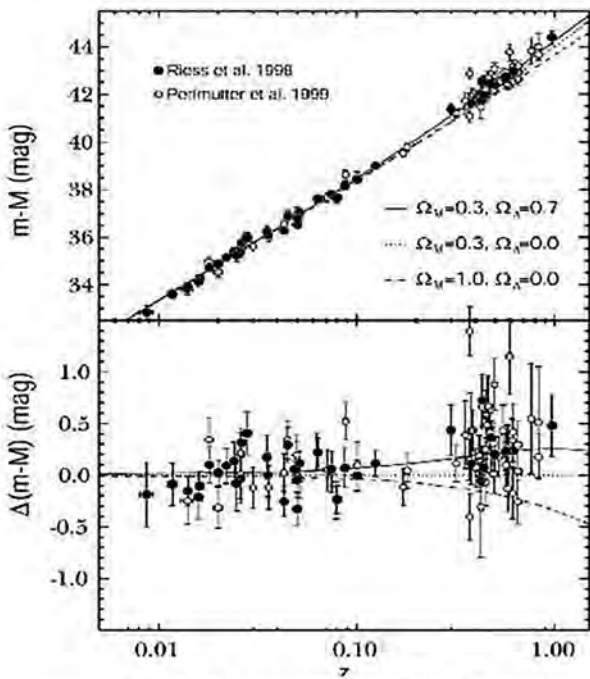


図11 暗黒物質が存在する間接的証拠
(Wikimedia Commons より引用)

一方、暗黒エネルギーについては、1998年から1999年にかけて、パールムッターとシュミットの研究グループが独立に、明るさがよくわかっている Ia 型超新星を様々な銀河の中に見いだして、ハッブルの法則から推定される距離で見える超新星の明るさと、実際に見える明るさを比較したところ、より暗く見える Ia 型超新星が規則的に見いだされたことから、宇宙が約60億年前から加速膨張に転じていることが明確になった。つまり、宇宙斥力を生み出す暗黒エネルギーがこの宇宙に満ちていることが明らかになったわけである¹²⁻¹⁴⁾。その理由は全く分かっていないが、全宇宙エネルギーに対する割合については、暗黒物質を含む物質エネルギーを約3割、暗黒エネルギーを約7割とした場合の理論曲線に観測データがうまく乗っていることが明確になった（図12）。この割合については、後述する宇宙背景放射の温度揺らぎの分析でも求めることができ、最近の PLANCK 衛星によるデータでは、図13に示しているように、暗黒エネルギーの割合は約68%である。



The Hubble diagram for High-Z SN Ia. Here we have plotted the residual of the distances relative to a flat Universe with $\Omega_M = 0.3$.

図12 暗黒エネルギーの存在
(By Perlmutter et al. ¹²⁻¹⁴)

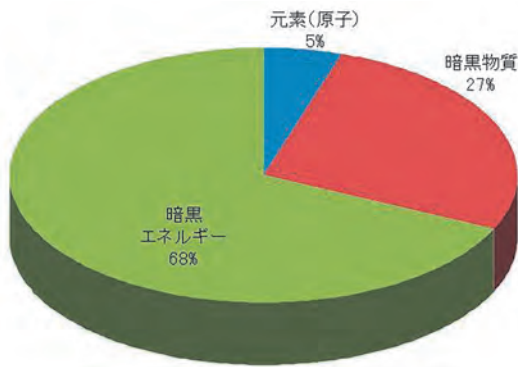


図13 暗黒物質と暗黒エネルギー

IV. 宇宙の始まり

すでに述べてきたように、素粒子加速器のエネルギーを上げることにより、宇宙の始まりに限りなく近づくことができる。しかしながら、素粒子加速器のエネルギーについては当然限界がある。現在の最高水準の素粒子加速器は CERN の LHC で、TeV (10^3GeV) 領域である。図 9 にも示されているように、それは電弱相互作用の領域で、強い相互作用と融合する 10^{16}GeV の領域までは、この地球上でスケールアップしても到達できないレベルである。4つの力が融合す

るビッグバン領域まで、人類の力で到達することは不可能である。即ち、インフレーション・ビッグバンは、この宇宙で起こった、エネルギー的に唯一で最大の壮大なドラマであったと言える。

よって、その始まりを知るためには、この宇宙に残る、壮大なドラマの痕跡や名残を求めて、マイクロ波による宇宙背景放射、原始ニュートリノ、原始重力波等に関する観測を行う以外に方法はない。

すでに述べてきたように、宇宙の始まり当初の高エネルギー状態の高温では、創成された素粒子(クォーク、電子等)がプラズマ状態で、光も直進をすることができなかった。宇宙誕生後38万年経て3000Kに温度が下がると、電子と陽子が結合して水素原子ができるなど中性化が起こり、光も直進できるようになった。その時の光が宇宙膨張で波長が伸ばされ、現在、3K宇宙背景放射として宇宙空間に漂っているわけである。その宇宙背景放射の適当な2点間の温度揺らぎの差は、割合にして約10万分の1の揺らぎで、熱的には、ほぼ平衡状態にあり一様・等方である。さらに、宇宙空間の曲率は限りなく0に近く、平坦である。これらのことを合理的に説明できる理論が、宇宙の始めに急激な膨張のインフレーションがあったとするものである。宇宙誕生後 10^{-38} 秒後から 10^{-36} 秒後くらいの瞬間に、指数関数的な膨張が生じたとすることで、現在の宇宙の平坦性が自然に説明できる。同時に、一般的には因果関係が成立しない宇宙の全領域が一様・等方的に熱平衡状態にあることも合理的に理解できる。

さらに、宇宙背景放射における温度揺らぎの起源は、宇宙が超マイクロな状態から始まるため、量子論的な不確定性原理から生じた量子揺らぎである。この量子揺らぎがインフレーションのため、マクロ的スケールに引き延ばされ、それが宇宙の温度揺らぎと物質の密度揺らぎに繋がり、現在の姿のような宇宙構造ができたわけである。

ところで、日常的なマクロ現象の中においても、熱的揺らぎや乱れが新たな構造形成やパターン形成に繋がることが多い。気象現象における雲の発生やベナールの対流、さらに、化学現象のペロウソフ・ジャボチンスキー反応等に見られる時間的振動のパターン形成にその一端を見ることができる。

一方、インフレーションは、インフラトン場というスカラー場が真空の相転移を促したと考えられており、その時生じた原始重力波の量子揺らぎによる宇宙背景放射の特徴的な偏光(Bモード)や、温度揺らぎのスペクトル等を詳しく観測することで、インフレーション

ション理論を決めるパラメーターが決定できる。インフラトン場の揺らぎの波長と振幅の大きさの相関関係を表す「スペクトル指数」 n_s と、インフラトン場（スカラー場）の量子揺らぎの大きさと重力場（テンソル場）の量子揺らぎの大きさの比である「テンソル・スカラー比」 r の2つについては、最近の観測で、 n_s は0.96程度、 r は0.1以下と考えられている。そのことから、今まで提案された多くのインフレーション・モデルは棄却され、適合する新たなモデルの模索が続いている。

最近の宇宙背景放射の観測は、地球周辺の宇宙空間で安定軌道になるラグランジュ点に打ち上げられた科学衛星 COBE (1989年)、WMAP (2001年)、PLANCK (2009年) によって得られた。角度の分解能はそれぞれ7度、12分、5分で、急速に精度を上げている。ここでは、PLANCK 衛星で得られた宇宙背景放射の温度揺らぎ (図14) を球面調和関数で展開した係数を組み合わせて計算した二点相関関数を多重極モーメントによるパワースペクトルで示す (図15)。

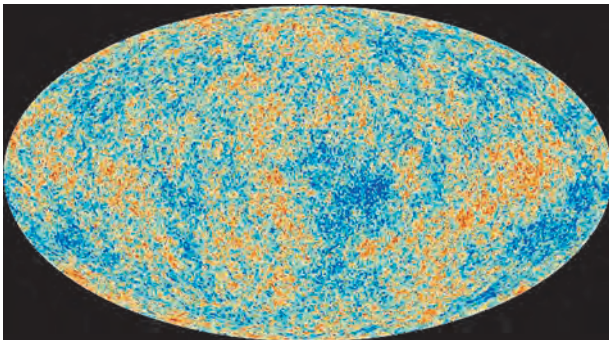


図14 宇宙背景放射 (CMB) の温度揺らぎ¹⁵⁾

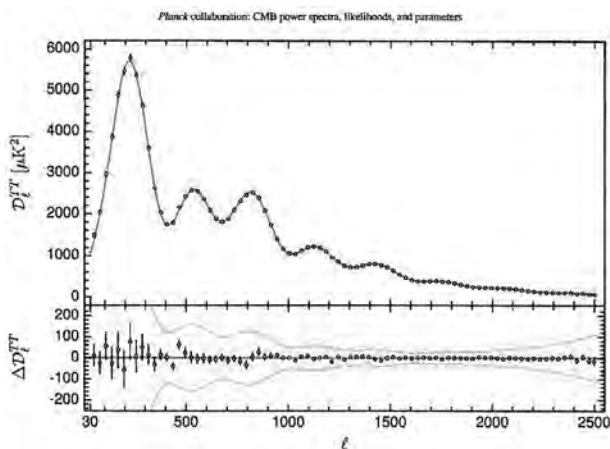


図15 CMB の温度揺らぎのパワースペクトル¹⁶⁾

図15のパワースペクトルの形は、宇宙空間の曲率、ハッブル定数、バリオン数・暗黒物質・暗黒エネルギーの割合など、様々な宇宙論パラメーターの情報を私達に教えてくれる。図13で、すでに示したように、私達がよく知っている元素も全宇宙エネルギーの5%に過ぎず、残りの95%については、全く分かっていない暗黒物質 (27% : 銀河形成等に寄与) や暗黒エネルギー (68% : 宇宙の加速膨張に寄与) であることも明確になった。さらに、宇宙にこのように物質があること、即ち、バリオン数生成についても未解決問題の一つである。

ところで、私達の宇宙が今後どのようなようになるかは、宇宙斥力として働く暗黒エネルギーの存在が重要である。それが重力より勝ると加速膨張が続き、やがて他の力にも打ち勝つまでになると、すべてが引き裂かれてしまう。逆に、重力の方が勝ってくると、やがて宇宙は収縮することになる。しかし、現在の宇宙はどちらつかずの微妙なところにあり、何とも言えない。

さらに、私達の宇宙はインフレーションが終わると同時に、ビッグバンが起り、絶妙のバランスの中で私達のような生命も誕生したわけであるが、大局的に考えた場合にはインフレーションは終わる理由がなく、様々な場所で、多くの宇宙が生まれても不思議ではない。まさに「多重宇宙 (マルチバース)」を考えても良いわけである。しかも、それぞれの宇宙が違った物理法則を持っていることも考えられる。私達の宇宙は、たまたま私達のような生命を持った人間が生まれる絶妙の環境に恵まれ、私達が存在し、この宇宙を認識できるという新たな「人間原理」が復活している。

V. おわりに

いろいろ述べてきたが、私達が今日見ている宇宙の姿の起源は、極微の量子揺らぎから始まり、インフレーションでそれが引き延ばされ、マクロ的な密度揺らぎに繋がり、それらが星や銀河形成に結びつき、究極的に、私達のような生命発生に至っているということが出来る。

本稿では、最近の物理科学の進展と物理学的な自然像を踏まえた科学的な自然観について述べてきた。物質の階層性については、追及を深めれば深めるほど、様々な階層が見えてくるし、クォークレベルに入っていくと、真空自体が主役になる。素粒子には決まった質量のパターンがあるが、質量を得る際に重要なメカ

ニズムであるヒッグス場が対称性を破る本当の理由や、ヒッグス場のポテンシャルの形等については、本質的なことは全く分かっていない。

宇宙の始まりにおいては、インフレーションを引き起こすインフラトン場も正体不明である。暗黒エネルギーとどこかで繋がりが有りそうだが、今のところ全く不明である。素粒子と宇宙、全体と部分、見えるものと見えないもの、様々なものがどこかで繋がっていることは間違いないが、究極的な本質は今のところ見えていない。これからが大いに楽しみである^{17, 18)}。

参考文献

- 1) ガリレオ・ガリレイ著「天文対話」岩波文庫（翻訳版）
- 2) ガリレオ・ガリレイ著「新科学対話」岩波文庫（翻訳版）
- 3) プトレマイオス著「アルマゲスト」恒星社厚生閣（翻訳版）
- 4) ガリレオ・ガリレイ著「星界の報告」岩波文庫（翻訳版）
- 5) アイザック・ニュートン著「自然哲学の数学的諸原理（プリンキピア）」中央公論社（翻訳版）
- 6) アインシュタイン著「一般相対性理論」共立出版（翻訳版）
- 7) シュレーディンガー著「波動力学論文集」共立出版（翻訳版）
- 8) H. Yukawa ; On the Interaction of Elementary Particles I, *Proc. Phys.-Math. Soc, Japan* 17, 48-57, 1934
- 9) M. Gell-Mann ;The Symmetry Group of Vector and Axial Vector Currents, *Physics*, 1, 63-75, 1964
- 10) F. Zwicky; On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae, *Astrophysical Journal* 86, 217, 1937
- 11) V. Rubin, W. K. Ford; Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions, *Astrophysical Journal* 159, 379, 1970
- 12) Perlmutter et al.; Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae, *arXiv: astro-ph / 9812133v1*, 1-33, 8 Dec 1998
- 13) Perlmutter et al.; Cosmology from Type Ia Supernovae, *arXiv: astro-ph / 912473v1*, 1-9, 30 Dec 1998
- 14) Perlmutter et al.; Constraining Dark Energy with SNe Ia and Large-Scale Structure, *arXiv: astro-ph / 9901052v2*, 1-5, 15 Jan 1999
- 15) Planck Collaboration; Planck 2013 Results I, Overview of Products and Scientific Results, *Astronomy Astrophysics* 571, A1, 2014
- 16) Planck Collaboration; Planck 2013 Results XV, CMB Power Spectra and Likelihood, *Astronomy Astrophysics* 571, A15, 2014
- 17) 吉村高男；時空次元数の連続化について，山口福祉文化大学研究紀要8, 61-70, 2014
- 18) 吉村高男；次元について，至誠館大学研究紀要1, 49-61, 2015