

2. 5. 2 量子電磁力学 (quantum electrodynamics, QED)

量子力学では、アインシュタイン＝ド・ブロイの関係に示されるように、粒子に波動性を組み込み量子化する粒子の量子化理論が確立した。

一方、電磁気学では、電場と磁場を統合した電磁場という「場」を取り扱うため、古典的な電磁気学に対して「場の量子化」が必要とされた。

空間を量子化し、電子と光子の現象を新たな解釈で説明する場の量子力学は「量子電磁力学 QED」あるいは量子電気力学と呼ばれる。

ディラックが、粒子の生成消滅演算子という概念を導入し、電磁場の量子化を行い (1927 年)、ディラックの海の空孔理論を提唱、実際に反粒子である陽電子が発見されて、現実の現象を説明することが明らかとなった。

その後、ファインマンやエンリコ・フェルミらは、ディラックの理論の解釈の見直しを行い、相対論的な場の量子論を導くことに成功した。これは量子電磁気学と呼ばれ、電子と陽電子を対称に扱うことができるため、ディラックが提唱した真空の負のエネルギー (ディラックの海) という概念は必要とされなくなった。量子電磁気学はフェルミによって定式化された (1932 年)。

しかし、ロバート・オッペンハイマー (1904~1967 年、米国) と湯川秀樹 (1907~1981 年、日本) によって、量子電磁力学には、物理学の法則としては致命的な数学的問題があることが指摘された。量子電磁力学には、無限大の発散や因果律の破れなど、物理学にとって重大な問題が含まれていることが分かり、物理学は混乱した。

たとえば、ある量子が2つの点の間を移動する時、確率的には、あらゆる経路の可能性がある。量子力学は、不確定性原理によって、経路を確定することはできないため、量子の運動を記述する時には、全ての可能性を全て足し合わせなければならない。経路の数は無限にあるため、ふたつの点があつても、様々な経路があり、たとえば、月まで周回してくるという経路であっても確率的にはゼロではない。このような計算を行うと数学的には、無限大に発散してしまい、現実を正しく表現することができない。

電磁波やマイクロ波の研究が進み、様々な実験結果がそれまでの理論では説明できなくなり、量子電磁力学が必要となったが、数学的な課題を解決するための新たな理論や手法が必要となった。朝永振一郎 (1906~1979 年、日本) は、「超多時間理論」(1943 年) の中で「繰り込みの記述形式 (renormalization)」を確立し、この問題を解決、量子電磁力学の基礎を築くことに成功した。繰り込みは、有限個

の発散項 (counter term) で無限個の無限大を除去するという数学的手法である。

朝永は湯川の中学時代の先輩であるが、湯川が飛び級したため高校、大学では同期となり、朝永、湯川と4年後輩の坂田昌一の3名が、当時の日本の素粒子研究を牽引した。湯川が指摘した量子電磁力学における重大な問題は、朝永によって解決された。

朝永らが示した「繰り込み操作」ができることを「繰り込み可能」と呼ぶ。全ての事象が、繰り込み可能とはならないが、量子電磁力学は、繰り込み可能な理論であり、重大な課題が克服された。その後、場の量子論においては、朝永が提唱した繰り込みとゲージを用いることが理論構築の基本的手法となった。量子電磁力学における発散の問題は、朝永から数年後、ジュリアン・シュウィンガー (1918~ 1994年、米国) が、朝永と類似の形式で解決、さらにファインマンが「経路積分法」(path integral formulation) という手法を用いて解決した(1948年)。朝永の研究は第二次世界大戦中、日本が国際的に孤立した研究環境の中で行われたため、量子電磁力学における評価は戦後になった。

「場」(field) とは、物理学における非常に重要な概念で、「時空を表わす物理量」である。

真空とは「物質がない状態」を表わすが、場は存在しており、よく知られる場には、電場と磁場(あわせて電磁場)や重力場がある。たとえば、電子のような電荷を持つ粒子が運動する時、電荷の移動に伴う電磁作用は他の粒子に影響を及ぼすが、その作用が相手の粒子に伝わる速度は有限であって光の速度を越えない。したがって、その間に運動量やエネルギーが保存される「場」が必要となり、電磁「場」はエネルギーと運動量を保有しているということになる。

場の理論は、「古典的場」と「場の量子論」に分けられ、ファラデーの電磁場とアインシュタインの重力場(一般相対性理論)は古典的場である。場を量子化した「量子電磁気学」(弱い相互作用と電磁力が統一された電弱理論の範囲)と「量子色力学」(強い相互作用の範囲)が、場の量子論(QFT)に含まれる。

「場」は、時空変換における振る舞いによって4種類に分けられる。①「スカラー場」は、空間の1点に1つの値が与えられる。温度場や液体の圧力場、ヒッグス場(粒子)などがスカラー場である。温度は空間における分子の運動から定義されるが、空間の各点において温度という1次元の値スカラーを持つ②「ベクトル場」は、空間的な広がりの中でベクトル量の分布を持つ。電場、磁場、ニュートンの重力場などがある。③「テンソル場」は、空間の各点がテンソルで与えられる。結晶の応力テンソル場、一般相対論的重力場がある。固体物理学や結晶科学において重要な概念となる④「スピノル場」は、複素ベクトル空間の成分であるスピノルで記述される場である。フェルミオンはスピノル場で記述され、たと

えば電子の相対論的量子状態の記述に用いられる。

様々な「場」を具体的にイメージすることは難しいように思われるが、スカラー場の勾配からは力場のようなベクトル場が表わされることがよく知られている。たとえば、力 F （力場、ベクトル場）が、 $F = -\nabla\psi$ と示されるとき、 ψ は、「ポテンシャル」と呼ばれる。重力、電磁力、温度、湿度、気圧などのポテンシャルの勾配、「ポテンシャル場」は、身近なところに非常に多い。

量子電磁力学は、4名の著名な研究者、朝永振一郎、リチャード・P・ファインマン、ジュリアン・シュウィンガー、フリーマン・ダイソン（1923年～、英国、米国）によって確立された。彼らは共同で研究を行ったのではなく、独自に同じ結論を導いており、朝永、ファインマン、シュウィンガーの3名に同じノーベル物理学賞が授与された（1965年）。

ダイソンは、他の3人と同様、量子電磁力学の発展に多大な功績があり、朝永やシュウィンガーの繰り込みとファインマンの経路積分が数学的に等価であることも証明している。しかし同一業績に関してノーベル物理学賞の定員は3名であり、ダイソンはノーベル賞を受賞しなかった。ダイソンは、人々があっと驚くようなアイデアを連発することで知られ、非常に多くのSF小説（空想科学小説）やSF映画が、ダイソンのアイデアの影響を受けていると言われる。

なお、粒子の反応を図説する「ファインマン・ダイアグラム」がよく知られているが、これは、もともと、ファインマンが、場の量子論（量子電磁力学）の反応過程を記述するために考案したものである。物理学の専門家はこのような分かりやすい図解法を好まなかったが、ダイソンはこれを数式化して普及させることに貢献、ファインマン・ダイアグラムは、量子電磁気学に限らずほとんどの粒子の反応過程の記述に用いられるようになった。

2. 5. 3 量子色力学 (quantum chromodynamics、QCD)

量子色力学 (りょうしいろりきがく) は、「強い相互作用」を記述する場の量子論である。

日本語で「力学」とされている英語にはいくつかあって、mechanics (力学)、dynamics (力学)、kinematics (機械の運動力学) と statics (釣り合いの静力学) などがある。

mechanics と dynamics の厳密な使い分けのルールや理由ははっきりとしないが、mechanics は、構造や仕組みのような意味合いが強く、dynamics は粒子の衝突や相互作用のような意味合いが強い。量子力学は mechanics であり、量子電磁力学 QED と量子色力学 QCD は dynamics である。量子電磁力学は、場の量子論であり電磁力や弱い相互作用の記述を行い、量子色力学は強い相互作用の量子論である。

量子論が発展する同じ時期に、空気中や鉱物中から新たな元素が発見され、周期表の空欄が埋められていった。分子や原子の構造が調べられ、原子核、電子、陽子、中性子、反物質の発見などがあり、物質やエネルギーの研究が進んだ。しかし、物質のことが詳しく分かるようになると、また多くの疑問が生まれ、その中には、核力 (相互作用) の謎もあった。

磁石や電荷のプラスとマイナスが引き合い、プラスとプラス、マイナスとマイナスが反発することは古くから知られていた。しかし、原子の中のマイナス電荷を持つ電子がプラスの電荷を持つ原子核に引き寄せられて落下しない。また、原子核の中にあるプラスの電荷を持つ陽子同士は反発してばらばらになっていない。原子の構造が明らかになってきた当初、これらの理由は、うまく説明されていなかった。

前期量子力学の時代に、ボーア模型とド・ブロイが提唱した物質波によって波としての電子が説明され、電子が原子核に落下し原子が潰れてしまわない理由が示された。電子を原子核の周りをまわる荷電粒子と考えると電子は原子核の中に墜落してしまうが、波である電子は原子核のまわりにとどまることができる。

しかし、プラスの電荷を持つ陽子と電荷を持たない中性子が、非常に狭い空間で結びついて構成される原子核については、その理由が説明されていなかった。

湯川秀樹 (1907~1981 年、日本) は、原子核の中で陽子と中性子が未知の物質を交換することによって核力 (強い力) が生じているとする中間子論を提唱 (1934 年)、翌年「素粒子の相互作用について」という論文を発表し、中間子の存在を予言した。

質量を持つ未知の粒子は「湯川粒子」と呼ばれ、湯川によって、「力」とは、粒子の交換（ゲージ粒子）によって生じるものであるという概念が示された。

中間子論を発表した時、湯川は、京都帝大と大阪帝大の講師の兼務から、大阪帝大の助教授になったばかりの28歳、日中戦争のさなかで、日本人の研究が評価されない時期であった。その後、アインシュタインなどと交流するようになり、その研究が評価されるようになり、1938年には博士号を取得した。

セシル・パウエル（1903～1969年、イングランド）が、宇宙線の中からパイ中間子を発見（1947年）、湯川の理論の正しさが証明され、日本人初のノーベル物理学賞を受賞した（1949年）。パウエルもノーベル物理学賞を受賞した（1950年）

その後の研究から、湯川が予言した中間子は、核力そのものではないことが分かったが、中間子は2つのクォーク（クォークと反クォーク）からなり、クォークはグルーオンという素粒子の交換で強く結びついており、核力の源もグルーオンであることが量子色力学の発展によって分かった。

強い相互作用は、湯川の相互作用とも言われ、非常に近い距離（ 10^{-15}m ）に働く力である。

湯川の、「力は粒子（ゲージ粒子）の交換によって生じる」という考えは、非常に重要な概念となり、強い相互作用だけではなく、自然界の力は全て、粒子の交換によって説明されるようになった。

自然界を支配している力は、わずか4種類しかないことが分かっている。解明されている4つの力（相互作用）の概要を表に示す。

表には、重力相互作用を1とする力の相対的な強さ、影響が及ぼされる到達距離、力が交換される時のゲージ粒子を示す。

なお、距離の 10^{-15}m は、かつてはyukawa（ユカワ）あるいはfermiと呼ばれたが、現在は固有の名称ではなく単にメートルに接頭語をつけて、fm フェムトメートルと呼ばれるため、日本人の名前がついた単位が残っていない。竜巻の等級の藤田スケールFや、化学工学の吸収に関する無次元数・八田数Haなど日本人に由来するスケールがないわけではないが、ニュートンやジュールのような単位の名称には、残念ながら日本人の名前が残っていない。

4つの力の詳細な研究は今も続いているが、重力子（グラビトン）は、検出

表 2-5-4 4つの力の比較

相互作用	強さの比	到達距離	粒子
重力	10^0	無限大	重力子
電磁力	10^{36}	無限大	光子 γ
弱い相互作用	10^{33}	10^{-13}m	ウィークボソンW
強い相互作用	10^{38}	10^{-17}m	グルーオンg

が難しく、未だに発見に至っておらず仮説上の素粒子（ゲージ粒子）である。

表に示すように、重力はその力が非常に小さい。弱い相互作用とは10進数で33桁、電磁力とは36桁も異なる。たとえば、クリップのような小さな鉄片を引き寄せるのに、電磁力であればわずか数グラムの永久磁石の持つ磁力で可能であるが、重力で引き寄せるには、地球ほどの大きさの質量が必要である。この重力だけが極端に小さい理由は、物理学における未解決問題のひとつ「階層性問題」とされている。

「電磁力」は非常に広い範囲で確認できる力で、光や熱を感じたり、物が動いたりする現象は、全て光子の交換によって行われている。原子核と電子を結びつける力、化学反応、化学平衡など周囲にあるほとんどの力が電磁力によるものである。

弱い相互作用（weak interaction）は、弱い「相互作用」ではなく、ひとつの言葉「弱い相互作用」である。電磁力より3桁小さいためこの名称があるが、重力より33桁も強い力である。核子の崩壊に関係しており、中性子が崩壊して陽子と電子ニュートリノになる β 崩壊などがある。到達距離が極めて短い。Iyukawaの距離以下で働くためその範囲は、原子核内部に限られる。

強い相互作用（strong interaction）も、強い「相互作用」ではなく「強い相互作用」である。

弱い相互作用よりもさらに短い距離に働く強い力である。他の力は距離が離れるにしたがって弱くなるが、強い相互作用は距離が離れる方が強くなるため単独で取り出すことは不可能である。直接観察することができないにも関わらず、素粒子物理学の様々な実験の過程で強い相互作用の性質が解明されている。

強い相互作用を取り扱うために、エンリコ・フェルミ（1901～1954年、イタリア、米国）と楊振寧（1922年～、米国、ヤンチェンニン）がヤン・フェルミ模型を提唱（1949年）、坂田昌一（1911～1970年、日本）が坂田模型を発表した（1955年）。

南部陽一郎（1921～2015年、日本、米国）らがクォークの自由度としてカラーチャージの研究を進め、マレー・ゲルマン（1929年～、米国）がクォークモデルを発表（1964年）、この量子数をカラー（色荷、colour charge）と命名したため、強い相互作用を表わす量子力学は、量子色力学と呼ばれる（1969年）。

ここでは量子数をカラーと呼んでいるが、量子に色があるとか、これが色のもとになっているという訳ではなく、そのように呼ぶと説明がしやすいためこのような名前がつけられている。「電荷」「磁荷」「色荷（しきか）」は、チャージ（荷量）である。電荷は、電気の理由になっているため、何となく分かっている気になるが、

分かっているのは電気の性質や電流であって、「電荷」という量子の持つチャージが理解できるというものではない。「色荷」も同様であるが、電荷→電気のような現れ方をしないため、より理解が難しい。「クォークの閉じ込め」という現象で理解される。

素粒子であるクォークは、色荷を持ち、光の三原色に対応する。原色を混ぜて色がなくなる（白色になる）時、「クォークの閉じ込め」現象が起こる。クォークからなる複合粒子は「ハドロン」であり、3個のクォークからなる「バリオン」は3原色で白色になった時に組み合わせが成立する。もうひとつのハドロンである「メソン（中間子）」は2つのクォークからなるので2色で白色となる組み合わせは補色関係になる。色荷の補色は反物質に割り当てられ、メソンはクォークと反クォークによって閉じ込めが起こる。

最もよく知られるバリオンは陽子と中性子であり、これから原子核が作られ、原子や分子が作られるから、クォークの閉じ込めが行われない状態では、具体的な物質は形成されないということになる。宇宙創世記、宇宙の温度が極めて高温でクォークがばらばらに飛び交っていた時代には、物質はまだ存在できない。その後、温度が下がり、熱による運動よりもクォークの間に働く強い相互作用の方が勝るようになった時、クォークの閉じ込めが起こり、陽子や中性子が作られ、原子核が作られ、やがて電子を捕捉、原子が作られた。

量子色力学が確立し、強い相互作用によってクォークが閉じ込められバリオン（陽子、中性子）が作られ、陽子と中性子は同じく強い相互作用で原子核の中に閉じ込められるという機構が示された。

強い相互作用を媒介する素粒子（ゲージ粒子）グルーオンは、8色の色荷を持つ。グルーオンは、ハドロンの中でクォークを結びつけ、原子核の中で核子を結びつけ、グルーオンどうしにも相互作用がある、その名のとおり糊のような性質を持ち、非常に強い相互作用は、引き離すことが難しい。

電磁力、たとえば電荷による引力や斥力は距離が離れると弱くなるため、原子から電子を引き離すと電子は束縛から離れて自由電子となり、原子は中性でなくなりイオンになる。しかし、グルーオンにかかる力は距離が離れても変わらないため、結びついているクォークを引き離そうとするとエネルギーが増大し、そのエネルギーから対生成するクォークと引き離されたクォークが結びついて、また無色化（閉じ込め）が起こるため、クォークは容易に引き離すことができない。

加速器による衝突実験では、非常に高いエネルギーを利用することによって、クォークを引き離すことができ、分離されたクォークが観測されると同時に多くの無色の物質（バリオン）が検出されている。

現在の素粒子の「標準模型（Standard Model, SM）」は、強い相互作用を取り扱

う量子色力学によってほぼ確立されたが、やはり最新の理論には、ほころびが現れるため、その修正は今も続いている。たとえば、標準模型では、「素粒子は質量を持ってない」が、実際の素粒子クォークやレプトン（電子やニュートリノ）は、質量を持っている。ピーター・ヒッグス（1929年～、英国）は、南部陽一郎の「対称性の自発的破れ」をベースに「電弱理論における対称性の破れ」を提唱、素粒子が質量を持つようになった起源「ヒッグス機構」を発表した（1964年）。ヒッグス機構を証明するヒッグス粒子は欧州合同原子核研究機構（CERN、セルン）によって発見され（2012年）、CERNのチームを率いたフランソワ・アングレール（1932年～、ベルギー）とヒッグスはノーベル物理学賞を受賞した（2013年）。強い相互作用の実験的研究には、巨大な設備が必要である。

2.5.4 量子化学（quantum chemistry）

量子論の中心をなす量子力学は、シュレーディンガー方程式、ディラック方程式、量子電磁力学、量子色力学へと発展していったが、一方で、量子論の成果を化学の問題に適用し、原子と電子の振る舞い、分子構造、物性や反応を理論的に説明づける学問分野、「量子化学」が現れた。シュレーディンガー方程式が発表された翌年、ヴァルター・ハイトラー（1904～1981年、ドイツ）とフリッツ・ロンドン（1900～1954年、ドイツ、米国）は、量子力学の記述を水素分子へ適用し、共有結合を説明することに成功した。

ロンドンは、量子化学の先駆的研究で知られており、ロンドン分散力（London dispersion force）を発見、分子間力が働かないはずのアルゴンやヘリウムのような中性原子間にも量子論的な電気双極子間の引力が生じ、分子間力はゼロではないということを示した。「分散 dispersion」という言葉からは、分散系や、ばらばらに分散するというイメージが湧くが「分散力 dispersion force」は分子間に働く引力である。ロンドン分散力は、他の分子間力に比べて、大きくはないため、極性分子ではほとんど目立つことがないが、窒素やメタンのような無極性分子では、主な引力となり、ヘリウムのような希ガスの単原子分子では、唯一の引力となる（万有引力は30桁も小さいので無視）。アルゴンやヘリウムのような希ガスの液化は、ロンドン力の存在によってはじめて説明ができる。

ロンドンは、量子化学を創始したことで知られるが、米国に渡ってからは低温科



図 2-5-3-フリッツ・ロンドン（1900～1954年） Wikipedia

学に貢献、超流動の研究でも知られるようになった。

低温物理学の研究者である弟のハインツ・ロンドン（1907～1970年、ドイツ、英国）と共同で超伝導のマイスナー効果に解釈を与えるロンドン方程式を発表（1935年）、ロンドンの名前は、量子化学だけでなく低温工学の分野でもよく知られており、米低温学会では、低温物理学の優秀な研究に対してフリッツ・ロンドン賞が贈られている。弟のハインツ・ロンドンは、超低温の冷却装置である ^3He - ^4He 希釈冷凍法を発明した（1951年）ことで知られる。これは、液体ヘリウムの同位体間の物性の違い（ ^3He 、ヘリウム3は物質の性質、 ^4He 、ヘリウム4は波の性質を強く持つ）を利用して極低温を作り出す特殊な冷凍機である。

量子化学の問題を解くということは、シュレーディンガー方程式の解、ハミルトニアン固有値と波動関数を得ることである。量子化学は、ディラック方程式のような「場の量子力学」とは異なり、粒子を非相対論的に取り扱う古典的量子論であるため、現象としても数学としても、一見簡単そうに見えるが、実際の化学の問題は、化学物質(分子)を扱うため、物理学の問題のような単純さがなく、非常に複雑であり、化学の問題、すなわち原子の分子軌道をそのままの形式で計算することは非常に難しい。そのため、ハートリー=フォック近似（1930年、ウラジミール・フォック）のような1電子近似法や半経験的方法が提案され、実用的な量子化学が発展してきた。

量子化学の先駆者のひとり、ライナス・ポーリング（1901～1994年、米国）は、ハイトラーとロンドンが水素分子で確立した「ハイトラー・ロンドン理論」を多原子系に拡張して、「原子価結合法」（valence bond theory、VB法）と呼ばれる手法を提唱した。

VB法では、分子の軌道電子は、ある1つの原子の原子軌道に局在化していると考え、化学結合を各原子の原子軌道に属する電子の相互作用によって説明する。ポーリングは共有結合が量子力学的「共鳴」（resonance）に基づくという共鳴理論を提唱（1928年）、混成軌道の概念を導入（1930年）して、VB法を確立した。

20世紀を代表する科学者が選ばれる時、物理学はアインシュタイン、化学ではポーリングと言われるほどポーリングは化学の世界で数々の業績を残しており、ノーベル化学賞（1954年）とノーベル平和賞（1962年）を受賞している。

量子化学のもうひとつの解法は、分子軌道法（Molecular Orbital Method、MO法）であり、フリードリヒ・フント（1896～1997年、ドイツ）、ジョン・レナード=ジョーンズ（1894～1954年、イングランド）らによって開発された。MO法では、分子は分子軌道を持ち、既知の原子軌道の重ね合わせによって分子軌道波動関数が

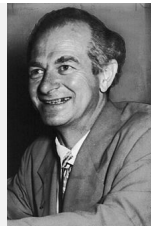


図 2-5-4 ライナス・ポーリング（1901～1994年）Wikipedia

表わされると考え、分子中の電子が原子核や他の電子の影響を受けて分子全体を動きまわるとして構造を決定する。MO法には、シュレーディンガー方程式を解く時の近似方法によっていくつかの種類がある。

計算によって理論化学の問題を取り扱う計算化学 (computational chemistry) は、レナード=ジョーンズによって創始されたが、近年、コンピュータの処理能力が向上したため、電子の多体効果を直接的に扱う方法も取り入れられるようになってきている。レナード=ジョーンズは、2つの原子間の相互作用ポテンシャルエネルギーを表すモデル「レナード=ジョーンズ・ポテンシャル」がよく知られている。詳細な物性値が得られていないガスを取り扱う時などに、既存のデータからレナード=ジョーンズ・ポテンシャルを求めることがよく行われ、ガスの物性を取り扱う現場や教科書では比較的好く目にする名前である。

計算化学の主な手法には、分子軌道法 (MO法)、経験的分子軌道法、半径経験的分子軌道法、分子動力学法 (MD法、原子軌道の考え方を分子に適用、化学や生物のモデリングに利用)、モンテカルロ法 (MC法、元は中性子の運動解析用のモデルであり乱数を用いる)、分子力学法 (MM法、原子間ポテンシャルを表す式を導き分子力場を計算する)、密度汎関数法 (DFT法、物理量を空間的に変化する電子密度の汎関数で表現す) 等がある。

ロンドンカによって希ガスの液化が説明されたが、ここでもう一度、気体の液化について整理をしておく。

理想気体は液化しないが、実際の気体は液体になる。理想気体では分子と分子の間には相互作用がないと考えるので、気体は低密度 (低圧力) で高温になるほど理想気体に近づく。しかし、圧力が高く密度が大きくなると、分子間の距離が縮まり、分子間の相互作用が無視できなくなる。低温になれば分子間の引力が無視できなくなり、より高圧になれば、分子間の斥力が無視できなくなり、実在気体は理想気体から大きく外れた挙動を示し、ある条件で分子間力によって液体になる。原子と原子が結びついて分子を構成する主な化学結合には、イオン結合、共有結合、金属結合があり、分子と分子の間に働く力には、静電相互作用、水素結合、ファンデルワールス力がある。気体の液化に関わる力は、ファンデルワールス力であり、その起源には次の3つの機構がある。

- ①双極子 (dipole) と双極子の相互作用
- ②双極子と誘起双極子 (induced dipole force) との間の相互作用
- ③ロンドン分散力

①双極子と双極子の相互作用

電気双極子は、分子内に発生する電氣的な偏りであり、電気双極子による相互作用によって分子間力が生じる。イオン化していない分子は、全体としては電氣的に中性であるが、分極して双極子モーメントを持つものがある（極性分子）。

双極子相互作用の力は化合物の水素結合より一桁ほど小さい。

②双極子と誘起双極子との間の相互作用

無極性分子であっても近くに極性分子があれば、誘起双極子が生じ、分子間力が生じる。

③ロンドン分散力

ロンドン分散力は、フリッツ・ロンドンが、分子間力に量子化学的取扱いを取り入れて見出したものである（1927年）。電子の挙動は、量子力学に基づいて記述されるが、電子は量子であり、その分布は確率的であるから、一時的な電子分布の偏向が生じる。この分極が「ロンドン分散力」と呼ばれる力を生じさせ、液化の時は引力として働く。分散という言葉からは、データがばらつく数学の「分散（variance）」のイメージが伴うが、ロンドン分散力（dispersion force）は、分子間に働く力であり、「分散力」という用語は、分極率の分散特性から来ており、量子力学的に動的に生じる誘起双極子間の力をロンドン分散力あるいは単にロンドン力と呼ぶ。

誘起双極子が他の分子によって引き起こされるのに対してロンドン分散力は自発的に生じ、全ての分子の間に分散力が働くが、他の分子間力が大きい場合は目立たず、窒素のような無極性分子では、主要な分子間力となる。また、クーロン力は距離の2乗に反比例するが、ロンドン力は距離の7乗に反比例（ポテンシャルが距離の6乗に反比例）するため、非常に近距離で働く。アルゴンやヘリウムのような希ガスであれば他の2つの相互作用は全く生じないため、ロンドン力が唯一の分子間力である。したがって、もし量子力学的なこの力がなければ、窒素は非常に液化しにくい気体となり、アルゴンやヘリウムは、いくら圧縮し低温にしても液化しない永久気体になってしまう。1920年代までは、無極性分子に働く力の起源が分からず、一時は重力（万有引力）説まで現われたが、フリッツ・ロンドンによって量子力学的に説明された。二分子間のロンドン力は非常に小さいが、多く集まると気体の液化だけではなく、有機物の結晶や生体組織の集合体などの構成にも寄与する重要な力となる。

2. 6 アインシュタインの一般相対性理論 (Allgemeine Relativitätstheorie, 1915-1916年)

アインシュタインは、光速度が不変であるという原理に基づき、時空の方が変化すると考えて特殊相対性理論を導いたが、10年後、特殊相対性理論の制約（重力が無視できる条件）をはずし、重力のある系を取り扱う新しい重力理論である「一般相対性理論」を完成させた。

ニュートンの万有引力の法則は、質量が引力を生むという現象を記述したが、その理由までは説明していなかったのに対して、一般相対性理論では、エネルギーや質量の存在が時空間を歪ませることによって重力が発生すると説明した。フックとニュートンが先取権を争った万有引力の法則は200年ぶりに書き換えられた。

1905年の特殊相対性理論と1915年の一般相対性理論が発表された時、これを評価できたのは一部の学者だけであり、一般の人がその存在を広く知ったのは、アーサー・エディントン(1882~1944年、イングランド)が皆既日食時に観測した重力場によって光が曲がる現象(1919年)である。

エディントンは、太陽が光を放つ理由が、水素-ヘリウムの核融合反応であること初めて提唱した物理学者・天文学者であり、相対性理論を英語圏に普及させることに尽力した。太陽によって背後の恒星のからくる光が特殊相対性理論と一般相対性理論によって「曲がる」ことを計算、日食時にこれを観測して相対性理論の正しさを実証した。

一般相対性理論は、リーマン幾何学を基礎的な幾何学とし、複雑な数学からなるため、特殊相対性理論よりも難解である。リーマン幾何学では、平行線が交わり、直径に円周率をかけたものは円周には等しくなく、三角形の内角の和も 2π にはならない。非ユークリッド空間である。

発表後は、アインシュタイン方程式(重力場の方程式)の解法が物理学の大きなテーマとなり、フリードマン宇宙やルメートル宇宙などの解が示され、ビッグバン宇宙論につながった。

しかしアインシュタインの発表からちょうど100年がたった2015年でも、課題が残っており、重力波(時空のゆらぎが光速で伝播する現象)の直接観測は達成されておらず、2016年になって米国のLeigo装置(ライゴ)が宇宙重力波の検出に初めて成功したという報告がなされた。今もなお、30ほどの研究機関で、宇宙重力波検出の挑戦が続けられている。

2. 6. 1 一般相対性理論の利用例

アインシュタインの理論（特殊相対性理論と一般相対性理論）は、特殊な分野にしか関係がないように思われるかも知れない。

たとえば、取り扱う系の速度が光速に比べて十分に小さい時は、ガリレイ変換とローレンツ変換の結果は、ほとんど等しいので、ガリレイ変換を使っても何の問題もない。通常のカスの取扱いや機器の設計には、特殊相対性理論は必要ない。

また、地球上の運動であれば、地球の重力加速度の平均値を用い、必要に応じて、月や太陽の潮汐力やコリオリ力を考慮すればよいので、一般相対性理論までを必要としていない。

しかしアインシュタインの相対性理論は、様々な科学の基本になっており、電磁波の取り扱いには、特殊相対論的な場の量子論が必要である。また、地球から少し離れると重力の影響が小さくなるため、一般相対性理論の考察も必要となる。

ふたつの相対論が、身近な日常の生活の中で利用されている例が GPS の時間である。GPS (Global Positioning System、全地球測位システム) では、二つの相対性理論に基づく時間の計算が行われている。

GPS は、米国が軍事用に打ち上げた人工衛星 (NAVSTAR、ナブスター衛星) を利用して地上の受信者が自身の位置を測定する衛星測位システムである。ナブスター衛星は、通称 GPS 衛星とも呼ばれている。

GPS 衛星 (米軍) が発信する情報には、軍用のものと民間用のものがあり、様々な機械に GPS 受信機が内蔵され、科学技術分野をはじめ、民生用にも盛んに利用されている。一般生活に欠かせない存在となっている。衛星測位システムは、広範に利用され、社会インフラとしても重要になってきているため、米国 (GPS) 以外にも EU (ガリレオ、民間の全地球航法衛星システム)、中国 (北斗衛星導航系統)、ロシア (GLOANASS、旧ソ連)、日本 (QZSS、準天頂衛星システム) など多くの衛星測位システムが運用あるいは計画されている。米国のシステム GPS は、衛星を用いた測位システムのうちのひとつであるが、最も古くから稼働し世界中で利用されているため、GPS という言葉が、一般名詞のように普及し、日本の地域航法衛星システム「みちびき」などは「日本版 GPS」と呼ばれる。

GPS 衛星は、静止衛星ではなく、高度 20200km ($2 \times 10^7\text{m}$) を 1 日に 2 周周回する人工衛星 (群) であり、ここから発信される信号をスマートフォンなどの受信器が受信して自分の位置を計算し、測位が行われる。

この時、重要なのは、これらの慣性系で光速が一定であるということと、発信時刻の正確性である。衛星の速度が速いため特殊相対性理論による「同時性の不一致」があるということ、地球から離れているため、衛星と地上の重力の違いによる

一般相対性理論による時間の遅れ・進みの影響があるため、二つの理論を用いた計算と補正が必要となっている。

受信者は、信号の発信時刻と受信時刻と光の速度から衛星までの距離を測定し、複数の信号をもとに自位置を計算する。電波は光速で進み、幾何学的な計算では、3つの衛星の信号があれば連立方程式の解として座標（3次元の位置情報）が得られるが、受信機側の時計の精度は信頼できないため、これを使わず、通常は4つめの信号を加えて演算が行われる。

したがって、位置の計測のためには同時に4つのGPS衛星が上空に見えなければならないが、現在は、地球上のどこからでも6つの衛星が視界に入るようになっており、米軍が管理する衛星コンステレーション（星座の意）は、4機が1群となり、それぞれが6つの軌道面を周回、合計で24機である。高精度化や故障時の予備機を考慮し、1978年打ち上げの1機目から、2015年までに31機体制が構築されている。

衛星からの信号は、双方向ではなく一方通行であり、全ての計算は受信機側で行われるが、測位に必要な正確な時計は、GPS衛星に搭載されている原子時計が基準となっている。

ここで使用される時刻は、地球の標準時とは異なる「天体歴」であり、二つの相対性理論に基づく厳密な補正が行われる。

人工衛星は、地球に対して比較的高速で運動しているため特殊相対性理論に基づいて、地球よりも時間の進み方が遅くなっている。（軌道速度は4km/sほど、光速度の0.0013%）

一方、周回軌道が、地球から離れているため地球の重力による影響が小さくなるため、一般相対性理論に基づいて時間が速く進んでいる。衛星の方が時間の進みが速いというよりは、地球表面では、地球の重力によって時間の進みが遅くなっている。

人工衛星時間の特殊相対性理論による遅れと一般相対性理論による進みを合わせると、人工衛星では、1日に約38.6 μ 秒も地球より時間が速く進む。これは、無視できないほど大きな値であり、この時間に光や電波は11kmも進むので、補正をしなければ大きなずれを生じることになる。もし1年間何も補正しなければ0.014秒もずれ、この間に光が進む距離は4000kmとなる。

相対性理論に基づいた時間の補正によってGPSは実用的な精度が得られており、軍用の高精度信号では誤差1cm程度の精度、民生用の高い精度の信号では、受信機の単独測位では、誤差10m、位置が既知の地上基地局との連携で誤差数mとされている。

現在の民間利用は、船舶用位置情報システム、地殻変動観測、生物生態調査、力

ーナビゲーションシステム、携帯電話・スマートフォン位置情報、距離測定器、防犯、ゲーム、スポーツ（登山）などに様々なところに広がっている。

位置情報だけでなくその時計の正確性も利用されており、地震計の時刻情報システム、ネットワークの高精度時刻サーバー構築、GPS 時計内蔵の計測器などがある。

ただし、航空機の場合は、航空機自体が高速移動しているためドップラー効果や時間のずれがあること、衛星の電波を見失った場合の安全性の確保などから、航空機が搭載する自前の慣性航法装置や地上航法支援施設利用等の従来からの航法が中心となっているため、GPS や静止衛星を用いた補強システムは今後の課題となっている。

100 年前に、特殊相対性理論によって、世界には絶対時間や絶対空間は存在しないという事実が明らかになり、離れた場所では、同時性の不一致があり、観測者によって時間が異なることが明らかにされ、その理論は電磁場など身近なところでも利用されるようになった。一般相対性理論では、エネルギーや重力によって時空がゆがむことが明らかとなり、宇宙の謎の解明や、GPS のような日常生活に密着した機械にも用いられるようになった。

相対性理論は、空想科学の世界の話ではない。

2. 6. 2 時間の階層 (タイム・スケール)

空間や物質の階層を表わす「長さ」は、およそ 10^{27} m から 10^{-35} m の間にあり、その中に、ガスの分子やガスの化学、様々な工学や産業が含まれていることを示した。

ヒトの目や耳やその他の感覚で読みとれる自然はごくわずかであるから、異なる階層を観測するために、様々な観測技術が開発されてきた。ヒトの目にはみえないガスの分子を見分けてガスが分析され、さらに原子核や素粒子などの小さな階層を調べることが可能になっている。宇宙のような大きな階層を調べるための技術も発達してきている。

一方、20世紀以降、時間と空間は絶対的なものではなく、時間と空間を合わせた時空が科学の研究対象となった。アインシュタインの特殊相対性理論の幾何学となったミンコフスキー空間が、現在のわれわれが取り扱うことができるただひとつの時空である。

ヘルマン・ミンコフスキーは、時間と空間を別に取り扱うというのは、古い概念であって、これからは対等なものであると論じた (1906年)。しかし、空間と時間を合わせた4つの次元のうち、時間は他の次元と全く同じ性質のものではない。少なくとも人間にはそのように見え、マクロスコピックな世界では、空間の移動ができるが、自由な時間の移動ができない。他の次元は前後に移動ができるが、時間の次元に関してはこのような移動ができないように見える。

われわれの前には、一方向に飛ぶ「時間の矢」(arrow of time)があり、「熱力学時間の矢」というものがあり、「エントロピー増大の法則」、「熱力学の第二法則」といった法則に縛られているようである。

ガスの分子やそれ以上に大きな階層では、時間を逆行することができないという事実がある。

お湯と水を混ぜてぬるま湯を作ることはできるが、ぬるま湯は、お湯と水には分かれぬ。酸素と窒素は時間がたてば「自然に」混ざるが、空気はいくら待っても「自然に」分離しない。工業的に空気が分離できるのは、低エントロピー資源(エネルギー)を投入しているからであって、混合ガス(エントロピーが大きい空気)から純ガス(エントロピーが小さい窒素、酸素)への変換は、時間を逆行させている訳ではない。もう少し具体的に示すと、圧縮空気を作るという行為によって、その後の熱交換、膨張、蒸留などの熱力学的操作が行われて、空気が分離される。空気の圧縮にエネルギーが投入され、その結果分離が可能となる。空気に含まれる窒素と酸素とアルゴンの物性の違いを利用し、エントロピーを減少させるためのエネルギーを投入することによって、人為的に分離ができる。

一方、お湯と水は、温度が異なる同じ物質であるため、ぬるま湯を元のお湯と水に戻す手段がない。空気を混ぜる前の状態に戻せるのは空気を構成する酸素分子や窒素分子の物性を利用できるからであって、お湯と水は同じ水分子なので、利用できるものがない。現在の状態から、混ぜる前のお湯の温度と水の温度や量を知る方法はなく、時間を巻き戻すこと方法もない。

一方、20世紀以降の物理学は、時空を絶対的なものとしなない「相対論」とミクロスコピックな世界を記述する「量子力学」から成り立っており、相対論と量子の世界では、われわれの世界とは時空の見え方が異なり、時間の流れ方が異なっている。

ミクロスコピックな反応や「場」の概念（電場や磁場、真空）では、量子は時空を越える。粒子と反粒子は進む時間が逆と考えることができる。量子がトンネル効果で障壁を飛び越える現象は、不確定性原理で説明することもできるが、量子が自身の未来からエネルギーを借りてきて、障壁を乗り越えてから返済したと考えることもできる。

しかし、もっと大きな階層では、時間は、全て過去から未来に流れているようにしか見えない。エネルギー保存則やエントロピー増大の法則のような熱力学の法則は、証明ができない経験則であるが、これらの法則は破れていない。

ここまで、メソスコピック、マクロスコピック、ミクロスコピックという長さの階層からガスの物理をみてきたが、ここからは、時間軸を巻き戻して、宇宙の歴史（物質や元素の起源）、太陽系と地球の歴史、地球の大気と空気の歴史、タイム・ラインをながめてみたい。

長さの階層は、時間の階層・タイムスケールである。長さ 10^{27} m（観測可能な宇宙の大きさ）は、138 億年（宇宙の年齢）の時間でもある。

2. 6. 3 宇宙 138 億年の歴史

「現在」、宇宙の年齢は 138 億年である。時間は空間と同じように絶対的なものではないから、現在というのは、地球上のわれわれが、ほとんど差がなく共有している「今」である。地球から最も遠くて古い星の光は、観測者であるわれわれから見て光速で移動しているため、光の中の時間は、少しも動いていないが、地球から、138 億年の時を隔てて届いている。地球から見える天空の星は、宇宙 138 億年の記録を示しているということである。

地球上で古い地質や考古学、歴史学の記録をたどるのは容易ではない。失われた記録から歴史を明らかにすることは、わずか 100 年くらいであっても難しいことがある。しかし、宇宙は光の速度に比べて極めて大きく、星の光は非常にゆっくりと時間をかけて地球に届くため、宇宙の考古学の方が証拠が失われにくい。地球の方向からしか観測できないという制約はあるが、宇宙、エネルギー、物質の起源が様々な観測や理論から明らかにされてきている。

2. 6. 3. 1 科学的宇宙論 (宇宙物理学 astrophysics)

空気も水も初めから存在したものではなく、どこかで作られたものである。物質の起源をたどる探索の答えは宇宙にある。宇宙を知ることが人間を知ることであり、古来より、人間の立ち位置を研究する「宇宙論 (cosmology)」の多くが、宗教、哲学あるいは神話として伝えられてきた。しかし近代になって、宇宙論は科学となった。

文部科学省では、「国民が科学技術に関する知識を適切に捉えて柔軟に活用できること」を目的にして『一家に1枚』シリーズというポスターを作成・配布しており、このなかに「宇宙図」という1枚があり、宇宙の時空を2次元の紙の上で解説している。

『一家に1枚』シリーズは、大人から子供まで、部屋に貼っておきたくなるもの、基礎的・普遍的な科学知識、身近な物や事象で親しみをもてるもの、といったコンセプトで作られており、11枚のポスターに最新の科学技術の成果がまとめられている。さすがに、ガスの化学・科学のような特殊な分野の情報はないが、「元素周期表」、「鉱物」、「太陽」、「天体望遠鏡 400 年」のような基本的な分野から「くすり」、「たんぱく質」、「磁場と超伝導」、「プラズママップ」、「光マップ」、「ヒトゲノムマップ」といった人々の関心を集める分野について、最新の科学が明らかにしてきた成果が図解されている。欧州に比べると科学リテラシーが低いと思わ

れる日本社会を啓蒙するためのシリーズといえる。

「一家に1枚宇宙図 2013」(Diagram of our universe) 第3版には、宇宙(時空)と物質の起源・歴史が示されている。「宇宙はどのように生まれたのか?」「人間の材料はどこから来たのか?」といった課題が1枚のポスターにぎっしりと凝縮されている。最新の宇宙論が反映されているが、文部科学省が監修しているため、特別な学説というのではなく、広く認められている定説に基づいて描かれている。しかし、宇宙や物質の研究は、ここ20~30年で格段の進歩を遂げており、少し古い教育を受けた世代が、このポスターを眺めると、最近の科学の進歩に驚くかも知れない。今の子供たちが受ける教育と半世紀前の宇宙を比べるとその姿は大きく異なっている。

古代から続く天文学(astronomy)は、ルネッサンス時代の科学革命と力学の進歩、観測機器の発明によって大きく進歩し、人々の宇宙観は大きく変わった。欧州の宇宙観は、2世紀以降、天動説(地球中心説)が長く優勢であったが、コペルニクスが古代ギリシアの宇宙観再発見、1800年の時を経て・地動説(太陽中心説)が復活した。

15世紀から17世紀まで、欧州は大航海時代となっていた。陸地が見えない大海を航海する船にとって自分の位置を知ることは、極めて重要なことである。羅針盤の発明と星図が大航海を可能とした。しかし当時の星図は、正確さが十分ではなく、正確な星図が必要とされた。特に大きな課題は、常に位置がずれる惑星の動きであった。また一方で、1500年間使われてきた暦「ユリウス暦」の暦の季節と実際の季節がずれてきたことも大きな問題であり、春分の日がずれるということが宗教上(キリスト教)の課題となっていた。

正確な星図を得ること、どのような改暦を行うかということが、15世紀の天文学者たちの解決すべき重要な課題となっていたが、星の動きを予測し、1年間という時間を決めるための天文学の基本である天動説(原理)には、ほころびが現れていた。

15世紀から16世紀にかけて、ニコラウス・コペルニクス(1473~1543年、ポーランド)は、古代ギリシアの地動説を研究した。科学者(天文学者、数学者、医者、経済学者)であり、カトリック司祭、知事でもあったコペルニクスは、正確ではない1年の長さを正しく算出しようと考えた。

現在、地球の温暖化のシミュレーションが行われているが、同じ条件で測定された観測記録はわずかであり、何と言っても正確な温度計が発明されてから時間がたっていないので、過去の数百年や数万年の気候を精密に観測(推算)し、未来を予測することは簡単ではない。コペルニクスの時代も1年の長さを正確に求め

ようとする、数十年から数百年にわたって太陽の位置を観測し続けなければならず、暦の研究は簡単ではなかった。しかし、コペルニクスは、地球が太陽の周りを「公転」するものと考え、短期間で1年の長さを求める方法を発見した。

コペルニクスは、地球だけではなく太陽の周りを公転する他の惑星の観測方法についても科学的記述を行い、「天体の回転について」を著し（1543年、コペルニクスが亡くなる直前に出版された）、古代にあった太陽中心説（地動説）を復活させようとした。

それから40年後、ローマ教皇グレゴリウス13世によって改暦が行われ、ユリウス暦はグレゴリオ暦に変わった（1582年）。ユリウス暦の1年は、365.25日であったが、グレゴリオ暦の1年は、コペルニクスが計算した値365.2425日が用いられた。現在の平均太陽年は365.2422日である。実際の1年は、少しずつ短くなっており、コペルニクスの計算は、驚くべき精度を持っていた。

ユリウス暦（ガイウス・ユリウス・カエサルが制定）は、紀元前45年に制定されたことを考えると、これも非常に高い精度を持っていたことが分かるが、それでも128年に1日ずつ季節がずれるため1600年間も使っているうちに誤差が累積して大きなずれが生じた。新たなグレゴリオ暦では、暦が1日ずれるのに3221年かかるようになったため、当分の間、改暦を考える必要はなくなった。

現行、世界各国で用いられている太陽暦は、このグレゴリオ暦であり、平年を1年365日、400年間に97回の閏年を設けて1年366日とするようになった。グレゴリオ暦は、1582年のイタリア、スペインに続いて徐々にその他の国にも広まり、18世紀にはドイツや英国も採用、19世紀後半には、日本や韓国、20世紀になって、中国、ギリシアも採用するようになった。現在は、非常に広範な国が同じ暦を採用するようになっている。ただし、宗教的な理由から、現在もユリウス暦やその他の暦、旧暦を使用する地域・団体もあり、世界の全てが同じ暦を使っている訳ではない。なお、日本で用いられる干支や元号は、紀年法と呼ばれる年の記録方法であって、暦法（天体の動きによって決められる暦）とは関係ない。

コペルニクスによって正しい1年の長さが計算されたが、その基本となっている太陽中心説（地動説）が採用された訳ではなかった。コペルニクスの太陽中心説は、科学史における大きな出来事であったが、『天体の回転について』は、後のガリレオ・ガリレイに対する宗教裁判の時に、ローマ教皇庁から閲覧が禁止された（1616年）。

コペルニクスの地動説は、現代の言葉で言えば「科学的」であったが、様々な反論に対して十分な説明をすることはできなかつたこともあり、学界を大きく変えることはできなかつた。たとえば、動く地球の上で人々はそれを感じることで

きず、空を飛ぶ鳥は地球に置き去りにされないこと、地球が太陽に落下しないこと、年周視差（地球が動くことによって星の見える位置が変わる）が見出されないことなどが説明できなかった。

16世紀から17世紀にかけて、ガリレオ・ガリレイ（1564～1642年、イタリア）は、発明されたばかりの望遠鏡を用いて天体観測を行った。それまでの天文学は、肉眼による天体の観測が行われていたが、望遠鏡によって様々な発見がなされていった。

ガリレオ・ガリレイは、地動説を提唱した。カトリック教会の教義には、地球中心説も太陽中心説もなかったが、ガリレオは、聖書の解釈権を有している教会との間でもめることになり、宗教裁判にかけられ（1616年と1633年）、地動説の撤回を迫られた。カトリック教会は、宇宙の中心が太陽であることを問題とはしなかったが、地球が動いていることを問題だとした（太陽中心説は問題ないが地動説は認めない）。ガリレオ裁判以降、地動説は異端とされ、ガリレオ・ガリレイの著書「天文対話」は禁書とされ、コペルニクス説は、（教会を恐れて）公の場では支持されなくなった。

ティコ・ブラーエ（1546～1601年、デンマーク）が膨大な天体の観測データを集め、修正天動説を唱えた。ブラーエは、望遠鏡ではなく肉眼による観測で莫大な量の天体のデータを集めた天文学の権威である。超新星を発見し（1572年）、月よりも遠くの星は不変であるというそれまでの天動説の考えを覆した。ブラーエは、コペルニクスの地動説は惑星の複雑な動きを説明できるが、地球が動いているのであれば見出せるはずの恒星の視差が見つからないとして、地球が太陽のまわりを回っているという地動説を信じなかった。そこで、惑星と太陽は地球のまわりを回り、恒星は太陽のまわりを回るという新たなそして複雑な天動説を唱えた。

ブラーエの時代における重要な事実は、星の年周視差が見つからなかった



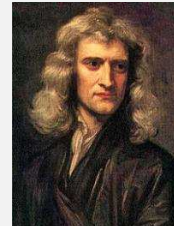
ニコラウス・コペルニクス (1473～1543年)



ガリレオ・ガリレイ (1564～1642年)



ヨハネス・ケプラー (1571～1630年)



アイザック・ニュートン (1642～1727年)

図 2-6-1-地動説の人々 Wikipedia

ことである。地球が動いているのであれば、星の方角が変わって見えはすであるが、それがどうしても観測されなかったのである。当時は、宇宙はもっと小さく、年周視差が測定できないほど遠くに星があるとは考えられていなかったため、当時の測定技術の精度では、地球が動いているという証拠が見つからなかったのである。

現在、地球から最も近い恒星までの距離は4万光年とされており、この場合の年周視差は角度で5000分の1度である。これは1km先の0.36mmのずれを検出することに相当する。もっと遠くにある他の星ではこれよりも視差はずっと小さい。当時の観測技術や肉眼による観察では、年周視差を検出することは不可能である。年周視差がないことが、地球が太陽のまわりを回っていないことを示していた。これは現代の科学にも通じることであるが、見つからないということと、実際がないということは別の問題であった。

ブラーエの助手であったヨハネス・ケプラー（1571～1630年、神聖ローマ帝国ヴァイル・デア・シュタット）は、ブラーエの観測データをもとにケプラーの法則（1619年）を導き、地動説を説明した。ケプラーは、最も簡潔に宇宙を記述するのは、地動説であると考えて研究を行った。しかし、ケプラーは数学者であり、それまでの多くの学者と同様に天体の軌道は数学的に美しい円運動であるということにこだわったため、最初は、観測結果を説明することができなかった。

ケプラーは、最終的には、惑星の動きを楕円運動とすることによって、観測結果の説明に成功、地動説を科学的に完成させた。太陽をひとつの焦点とする楕円運動は、数学者にとっては、円ほど美しくはなかったが、惑星の動きを複雑に表わす天動説に比べると、はるかに単純であり、地球をはじめ惑星の動きを正確に表わすことができた。

ケプラーの第1法則：惑星は、太陽をひとつの焦点とする楕円軌道上を動く（楕円軌道の法則、1609年）。第2法則：惑星と太陽とを結ぶ線分が単位時間に描く面積は一定である（面積速度一定の法則、1609年）。第3法則：惑星の公転周期の2乗は、軌道の長半径の3乗に比例する（調和の法則、1619年）。

この時、ケプラーは太陽と惑星との間に働く力を磁力のようなものと考えていたが、アイザック・ニュートン（1642～1727年、イングランド）は、ニュートンの運動の法則とケプラーの法則から、その力が万有引力であるとして「万有引力の法則」を導いた（1665年）。万有引力の法則は、アインシュタインの一般相対性理論（1915年）が著されるまで、250年間修正されることがなかった。

ケプラーの法則と万有引力の法則は、日本の中学校の理科にもある非常によく知られる法則である。しかし、ケプラーの法則が提出された頃は、まだ宗教裁判な

どの弾圧や迫害がある時代である。コペルニクスやガリレオ・ガリレイの地動説よりさらに進んだケプラーの地動説もすぐに広まることはなかった。しかし、ケプラーがケプラーの法則を用いて計算したルドルフ表（1627年）と呼ばれる天文表は、極めて精度が高く、多くの天文学者が使用するようになり、次第に地動説が定着していった。惑星が太陽の周りを楕円軌道で動くという17世紀初頭の地動説は、140年後、18世紀末に日本にも伝わった。

長く観測ができなかった恒星の年周視差が、フリードリヒ・ヴィルヘルム・ベッセル（1784～1846年、プロイセン王国）によって初めて観測されたのは、ケプラーの法則から200年も後のことである（1838年）。

欧州における科学革命は、4人の学者、ニコラウス・コペルニクス、ガリレオ・ガリレイ、ヨハネス・ケプラー、アイザック・ニュートンによってなされたが、彼らが探求した宇宙や天文学は、けっして遠くのことではなく、力学や暦、一般の生活など身近なことにも非常に密接に関係していた。また、彼らは、天文学だけに関心があった訳ではなく、その他にも数々の業績が知られており、コペルニクスは貨幣製造の方法を提唱、「悪貨は良貨を駆逐する」ことを発見（後のグreshamの法則）、ケプラーは雪の結晶や光の逆2乗の法則の発見、数学におけるケプラー多面体を発見、球充填問題提起などがある。ガリレオ・ガリレイは、数式を用いた運動の研究を行い、落下の法則の発見やガリレイ変換の発明、振り子時計や比例コンパスの発明などがある。ニュートンは、微分積分法、万有引力の法則、古典力学の確立など数学と物理学における業績が知られる。

科学革命の成果、ケプラーの法則やニュートン力学から、地球は宇宙の中心ではないということが明らかとなり科学は大きく進歩したが、その後の研究によって、太陽もまた宇宙の中心ではないことが分かり、やがて天動説だけでなく太陽中心説も正解ではないという時代がやって来る。ニュートンの時代には、引力や斥力の「理由」までは考えず、宇宙の成り立ちも、その過去も調べたり未来を予測したりすることはなく、ありのままを認めるだけであった。地球や惑星の運動は研究されたが、そこに星がある理由や物質がどのようにして作られたのかまでは議論されず、「宇宙論」は科学の範囲とはされていなかったのである。しかし、20世紀から21世紀にかけて、高度な観測技術が発達、天文学や地質学における多くの新発見、高エネルギーの実験技術の向上、計算機の能力向上などによって「宇宙論」は、本格的な科学になった。

天体の観測の手法には、昔からある光学望遠鏡による光学天文学だけではなく、電波天文学、赤外線天文学、紫外線天文学、X線天文学、ガンマ線天文学などが生み出されている。

日本では、ニュートリノ天文学に利用されたカミオカンデ（現在はカムランド）、

スーパーカミオカンデや XMASS（エックスマス）、ハイパーカミオカンデ計画など、新たな観測機器による宇宙の謎解明の挑戦が行われている。

XMASS では、ダークマターの正体を調べるための検出用のシンチレータ（発光物質）として大量の液体キセノンを使用している。その製造、超高純度精製、検出器を格納する特殊な容器の製作などに産業ガスメーカーの技術が利用されている。

2. 6. 3. 2 ビッグバン宇宙論 (Big Bang)

アインシュタインは、一般相対性理論を導いた時、宇宙には、はじめも終わりもなく、膨張も収縮もしない「永遠不変」のものであると考えていた（信じていた）。アインシュタインは、特殊相対性理論を導いた時、絶対空間と絶対時間の概念を放棄、時空を科学の対象とし、それまでの科学の常識を大きく変えた。一般相対性理論では、質量やエネルギーが時空を歪ませるということまで示した。しかし、そのアインシュタインでさえ、宇宙は永遠のものと固く信じていたのである。

アレクサンドル・フリードマン（1888～1925年、ソ連）は、一般相対性理論のアインシュタイン方程式の解からフリードマン方程式を導き、膨張宇宙を定式化した（膨張宇宙モデル、1922年）。

フリードマンは、宇宙は永遠不変のものではないと主張し、空間そのものが大きくなるという普通の人には想像もできないような宇宙の描像を示した。

キリスト教の司祭であり天文学者でもあるジョルジュ・ルメートル（1894～1966年、ベルギー）が、一般相対性理論と銀河の観測結果から「宇宙は爆発から始まった」とするモデル（原始的原子の仮説）を提唱した（1927年）。

ルメートルは宗教家と科学者の両方の立場を持ちながら宇宙論を研究、フリードマンに続いて膨張宇宙論を提唱し、宇宙の年齢を100億年～200億年と見積もった。これは最新の研究結果とよく一致している。

エドウィン・ハッブル（1889年～1953年、米国）が、宇宙が膨張していることを発見、遠くの銀河ほど速く遠ざかるという「ハッブルの法則」を発見した（1929年）。

宇宙が膨張しているということは、空間そのものが「増えている」ということであり、昔の宇宙はもっと小さく、宇宙には始まりがあったということになる。これは歴史を変える大発見であったが、宇宙は永遠であるという固定観念が強かった20世紀初頭では、容易には受け入れられることがなく、科学界と宗教界における大きな論争となった。

フリードマンやルメートルが解いた一般相対性理論の方程式を導いたアインシュタインでさえ、宇宙に始まりがあったという考えは馬鹿げていると発言し、フレッド・ホイル（1915～2001年、英国）やトーマス・ゴールド（1920～2004年、オーストリア）が「定常宇宙論」（steady state cosmology）を展開した。

ホイルは著名な英国の天文学者で SF 作家としても知られ、ゴールドは、生物物理学、天文物理学者であり、米国では珍しい石油の無機起源説でも知られる有名人である。彼らは、「膨張宇宙論は科学ではない」と考え、フリードマンやルメートルらの理論に敬意を払わず、ルメートルの「宇宙の卵が爆発して始まった」という発言に対して、これは科学ではなく信仰であると発言、ホイルは、膨張宇宙論を、皮肉って「ビッグバン=大ぼら」理論と呼んだ。

フリードマンのレニングラード大学時代の教え子であるジョージ・ガモフ（1904～1968年、ロシア帝国領オデッサ、米国）は、フリードマン宇宙論を支持し、膨張宇宙論を提唱した。ガモフとホイルの間で論争が行われたが、その時にホイルが使ったビッグバンという言葉がガモフが好んで使ったため、フリードマン宇宙論は「ビッグバン宇宙論」と呼ばれるようになった。

やがて、理論や観測が進み、定常宇宙論よりもビッグバン理論の方が優勢となったため、このビッグバンという英語は、大ぼらふきではなく、宇宙の始まり「火の玉宇宙」を意味するように変わっていった。宇宙の始まりは、極微でありビッグではなく、またバンという爆発でもないため、ビッグバンに代わる新しい名前が募集されたこともあったが、これ以上の名前は見つからなかったようである。

アインシュタインは、ルメートルの理論を数学的には支持していたが、定常宇宙論から抜け出ることができず、膨張宇宙



アレクサンドル・フリードマン（1888～1925年）



ジョルジュ・ルメートル（1894～1966年）



ジョージ・ガモフ（1904～1968年）



フレッド・ホイル
定常宇宙論者
（1915～2001年）

図 2-6-2 膨張宇宙論の人々
ホイルは膨張宇宙論に反対したビッグバンの名付け親、写真は Wikipedia 他

論には不支持の立場をとっていた。しかし、やがて考えを改め、観測事実を認め、ルメートルの考えを支持するようになり、自らの一般相対性理論の修正に悩み始めることになる。

ガモフは、ルメートルの理論を支持し、ハッブルの法則を科学として真剣に取り組み、ビッグバン宇宙論を展開し、「宇宙マイクロ波背景放射 (cosmic microwave background radiation、CMB)」の存在を予言した (1948 年)。

CMB とは、ビッグバンの残光が、空間の膨張とともに宇宙全体に広がり、波長が伸びてマイクロ波として残るというもので、ガモフがこれを予言して 16 年後、アンテナの研究を行っていた米国ベル研究所のアーノ・ペンジアス (1933 年～、米国) とロバート・W・ウィルソン (1936 年～、米国) によって発見された (1964 年)。

地球上の全方向から、ほぼ等方的に観測されたマイクロ波のノイズは、天の川銀河からの放射よりも強く、当初は、地上の何かのノイズと思われたが、その後、ガモフが予言した CMB であることが判明した。現在は、テレビ放送がデジタル化されてしまったが、昔のアナログ放送テレビであれば、画面のノイズの中には受信機のアンテナがとらえたビッグバンの残光＝宇宙マイクロ波が混じっている。われわれの宇宙はこの CMB に満たされている。

ハッブルが示したように空間が膨張しても、その中にある物質 (星や人間) が膨張する訳ではない。しかし、最初に宇宙を満たしていた光は、空間がどんどん引き伸ばされてしまったためマイクロ波になってしまったという観測事実がペンジアスらによって得られたのである。

ビッグバン宇宙論をめぐっては、その後も様々な議論があったが、CMB の発見からさらに 14 年後、ペンジアスとウィルソンにノーベル物理学賞が授与され (1978 年)、世界は、ビッグバン宇宙論を認める時代となり、ビッグバンが「標準的宇宙論モデル」を構成するようになった。それまでの定常宇宙論は、劣勢となり、非標準的宇宙論のひとつとなった。

ベネディクト・カンバーバッチ主演、英国 BBC 放送制作のドラマ「ホーキング」は、若き日の天オスティーブ・ホーキングを描いたものであるが、定常宇宙論を主張するフレッド・ホイール教授と学生ホーキングの大学の教室でのやり取りに加えて、ノーベル賞を受賞する直前のペンジアス／ウィルソンに対するメディアのインタビューが興味深い。CMB 発見の重大性をまだ認識していないインタビューは、偶然に発見した宇宙のノイズに、何故ノーベル物理学賞の価値があるのかまるで理解できておらず、この世紀の大発見に対してペンジアスがその重要性を説明していく。新たな学説が認められ定説になる時、ノーベル賞の影響は非常

に大きい。CMB の発見もノーベル賞受賞によって広く知られることになったが、ビッグバン宇宙論の中心を担い、CMB の存在を予言していたガモフは、すでに他界していたため、受賞することはなかった。

なお、同じ1978年には、ピョートル・カピッツァ（1894～1984年、ソ連）もノーベル物理学賞（『低温物理学における基礎的発見および諸発見』）を受賞して、カピッツァは、低温物理学が専門であり超電導などの研究が評価されて受賞したが、膨張タービンを用いた気体の液化装置の基礎を築き現在の空気分離装置の基礎を築いたことでもよく知られる。気体の膨張機には、レシプロ方式と膨張タービン方式があるが、現在の深冷空気分離装置のほとんどは、カピッツァが発明、1940年代に普及させた膨張タービンプロセスである。

1948年のCMBの予言、1964年のCMBの発見、1978年のノーベル物理学賞によってビッグバン宇宙論は広く認められることになった。400年前のケプラーの法則をきっかけに、世界は地動説から天動説に変わったが、定常宇宙から膨張宇宙へのパラダイム・シフトはこの1978年のノーベル賞で決定的となった。科学ではない、おおぼらふきと言われ、ホイールによってビッグバンと名付けられた膨張宇宙論は、ハッブルの法則の発見、宇宙空間を満たすCMBの発見、ノーベル物理学賞によって科学の主流となった。

それまで多くの人々、宗教家や科学者が、宇宙は永遠に変わらないと思っていたが、宇宙には始まりがあったという事実は、世界に大きな衝撃を与えた。20世紀初頭の量子論と相対論が、多くの科学の課題を解決していったが、20世紀後半になってもまた、世界の常識を変えるリセットが必要になった。パラダイム・シフトは終わらない。

時空間のはじまり、時間とは何か、空間とは何か、エネルギーとは何か、銀河や太陽系の起源、地球やわれわれ自身を作っている元素の起源、宇宙の未来や終焉、など、実に様々な科学のテーマが浮かび上がった。

2. 6. 3. 3 インフレーション宇宙論

宇宙は膨張しているので、過去をたどると、はじめは、無限大の質量、無限小の空間という「特異点」にいきつく。特異点では、物理学が破綻するため、多くの物理学者を悩ませることになった。また、ガモフのビッグバン宇宙論だけでは、はじめの特異点だけでなく、他にもうまく説明できない問題があることが分かっている。

そのうちのひとつに「平坦性問題」(flatness problem)がある。今の宇宙は、非常に平坦で、ほんの少しでもどちらかにずれていたとしたら、さらに急激に膨張してバラバラになって消えていたか、あるいは重力で収縮して消滅(ビッグクラッシュ)していたはずであり、宇宙はこんなに長くは、存在していなかったという疑問である。

3次元空間の平坦性と言われても、普段は考えることがないので想像することが難しい。そこで、比較的理解しやすい2次元平面の平坦性を考えてみる。

もし、われわれが地球表面しか分からない(知らない)2次元の生物だとしても、その平面が平坦であるかどうかを調べる方法がある。地球上に描いたどんな三角形でも、精密に測定すれば、内角の和が180度よりも大きいことに気付く。たとえば、赤道上を1/4周進み、直角に曲がって北極点まで真北に線を引き、そこから90度の角度で真南に進むと元の位置に戻り、直角が3つある内角の和が270度の三角形が描ける。2次元のまま、地球から離れることなく、地球が平坦ではない球形であることを知ることができる。どんな三角形であっても内角の和がちょうど180度であれば、平坦であることが分かり、逆に180度以下であれば、曲率が球面とは逆であることが分かる。

宇宙の時空の曲率が正か負のいずれであるかは、ハッブル定数の詳細な測定から宇宙のエネルギー密度を求めて行われる。宇宙の幾何学(曲率)は、宇宙の全エネルギー密度によって決まり、曲率ゼロの全く平坦な宇宙のエネルギー密度を「臨界密度」と呼ぶ($10^{-29}\text{g/cm}^3=10^{-26}\text{kg/m}^3$)。もし宇宙が正の曲率を持つのなら閉じた宇宙となり、いずれ収縮する。負の曲率を持つのなら開いた宇宙となり膨張を続ける。しかし、精密な観測の結果、宇宙の時空の平坦性は極めて平坦に近いことが分かっている。

しかし、このような条件となるには、はじめのエネルギーを決める精度は極めて高いものが要求される。現在の宇宙の密度は、臨界密度に対する比がかなり1に近いと観測されており、これが成り立つためには、宇宙が始まったときのエネルギーの密度の対臨界密度比は 10^{-15} の精度で1に等しくなければならないという。そうでなければ、今のような平坦な宇宙はなかったとされ、「何故、今の宇宙はこんな

にうまく平坦にできているのか)、あまりにも低い確率によって存在しているのか、ビッグバン理論では説明できないという。

ビッグバン理論では解決できない、特異点や平坦性といった問題を理論的に解決しようとする試みがある。ひとつは「人間原理」と呼ばれるもので、あまりにもよくできている宇宙の構造を説明する時に「宇宙が人間に適しているのは、そうでなければ人間は宇宙を観測し得ないから」という論理を用いるものである。自然科学へのアプローチのひとつとも考えられるが、科学なのか科学でないのかよく分からない。ホーキングは強い人間原理と弱い人間原理があり、自分自身は弱い人間原理を信じていると書いている。

「宇宙は一様かつ等方であり宇宙には特別な場所は存在しない」とする「宇宙原理」の考えもある。宇宙原理に基づく有力な理論にインフレーション（超急膨張）理論がある。1981年に佐藤勝彦（1945年～、現在自然科学研究機構機構長）とアラソ・グース（1947年～、米国、当時コーネル大）が、ほぼ同時にインフレーション理論を提唱し、その後、アンドレイ・リンデ（1948年～、ロシア、米国）や村山斉（1964年～、現リニアコライダー・コラボレーション副ディレクター）など、多くの研究者がインフレーション理論の研究を進めている。

現在の宇宙を巻き戻していくとビッグバンにいきつすが、ビッグバンの前に何があったのかを考える時、観測できないものがあり、数学や物理学を駆使した理論的な研究となる。

現在、広く支持されているインフレーション宇宙論は、未解決の問題はあるものの、神話や宗教物語ではなく、様々な観測結果と理論から導かれる科学的宇宙論である。文部科学省の「宇宙図 2013」にもインフレーション理論、ビッグバン理論に基づいた最新の成果が反映されている。

現在、広く認められているシナリオは次のようなものである。

- ①量子力学的ゆらぎとトンネル効果によって「無からの宇宙創世」の確率はゼロではないという計算が成り立ち、宇宙は「無のゆらぎ」から始まる。
- ②生まれた時の宇宙は、今とは次元が異なり（数学的には10次元）、余剰次元は急速にコンパクト化し、4次元時空が残り、時間と空間が生まれた。折りたたまれた残りの次元を探すための研究がCERNで行われている。
- ③無 $\sim 10^{-43}$ 秒（プランク時間）の間の宇宙（プランク時代）は不安定であり、対称性の破れが進み、インフレーションが起こった。インフレーションとは、微小な領域の中に存在した量子ゆらぎが、宇宙サイズにまで引き伸ばされる急速膨張（指数関数的な膨張）であり、その大きさの変化は、ウィルスが一瞬のう

ちに銀河の大きさに広がるほど（100桁くらいの膨張）と表現されている。

インフレーション中に存在した量子ゆらぎは、引き延ばされ、宇宙は完全に均質とはならず、銀河や星が生まれることになる。なおプランク時間よりも小さな時間は存在せず、長さの階層にゼロがないように、宇宙のタイムラインにもゼロ時間がない。

- ④ 10^{-36} ～ 10^{-38} 秒の間にエネルギーの高い真空から低い真空に相転移（真空の相転移）が起こり、インフレーションが終了する。空間のエネルギーは、数多くの対生成と対消滅を繰り返しており、エネルギーが低い状態や準安定状態を「真の真空」、エネルギーが高い状態を「偽の真空」と呼ぶ。偽の真空が真の真空に変わるような大きなエネルギーの変化を真空の相転移と呼び、真空の相転移によって生まれたエネルギーが熱エネルギーとなって宇宙のビッグバンが起こった。ビッグバンの後は、最初のインフレーションと比べると桁違いにゆっくりであるが、ビッグバン膨張によって宇宙の膨張が続く。

- ⑤ 10^{-6} 秒後には、超高温・超高密度の宇宙は、 5×10^{12} Kにまで温度が低下、エネルギーから物質が生まれる。空間には、素粒子（クォークや電子）が現れ、「クォーク・グルーオンプラズマ（QGP）」と呼ばれる素粒子がスープのように混ざった状態になる。

宇宙の温度が下がったといっても、人間が作り出した最高の温度は、米国ブルックヘブン国立研究所の重イオン衝突型加速器で達成された 4×10^{12} Kである（理化学研究所、KEK、2010年）。ビッグバン直後の温度はかなり高い。

- ⑥ 10^{-4} 秒後、宇宙の温度は 10^{10} Kにまで下がり、グルーオンがクォークを捕獲、中性子、陽子、中間子などが生まれる。この時、物質と反物質が同じ量だけ生まれていれば、宇宙に物質は残らなかったはずであるが、対称性の破れをもたらす相転移が起こった。宇宙において物質は反物質よりもはるかに多い。この「CP対称性の破れ」は、小林・益川理論（1973年）によって理論的に説明されている。物質は10億個に1個の割合で反物質よりも多かったため、宇宙には物質だけが残った。

- ⑦180秒後、宇宙の温度は 10^9 Kまで低下、陽子や中性子が原子核を形成、水素プラズマとなる。宇宙が始まって3分後、物質の92%は水素原子核、8%がヘリウム原子核であった。

- ⑧38万年（ 1.2×10^{13} 秒）後、温度は 3×10^3 Kまで低下。原子核は電子を捕獲、原子が作られる。宇宙が始まって38万年後に初めて原子が生まれたが、その時に存在した元素は、水素とヘリウムだけである。

それまで電子の海に閉じ込められていた光子は動けるようになり、宇宙に光が生まれる。これを、「宇宙の晴れ上がり」と呼び、これ以降、放たれた光は宇

宙空間に広がり、観測が可能となる。この時の光が「ビッグバンの残光」と呼ばれるものであり、現在はこの時の光がCMBとして観測されている。

宇宙が始まって最初の38万年間は、光は閉じ込められていたため、これ以前の時代の宇宙は、光や電磁波による観測ができない。

- ⑨宇宙を支配している4つの「力」は、元々は同じもので、宇宙の温度が下がるにつれて分岐してきたが、「重力」が分かれたのは 10^{-44} 秒後である。重力波は、電子の海に閉じ込められることはないため、これを観測できれば、晴れ上がりよりも前の宇宙創世期の痕跡が見つかると言われている。

しかし、重力波の検出は非常に難しく、世界各地で重力波望遠鏡を用いた重力波観測の挑戦が続けられている。米国では、LIGO検出器が宇宙重力波の検出に成功したと報告(2016年)、日本では、東京大学宇宙線研究所のLCGT(通称KAGRA)が宇宙の重力波を捉える挑戦を行っている。KAGRAは、宇宙から来る重力波による空間の伸び縮みを温度20Kの環境で測定するレーザー干渉計であり神岡の実験場に建設されている。(2017年本格稼働予定)。

- ⑩4億年(1.26×10^{15} 秒)後、温度は3Kに下がり、最初の星が誕生する。ここまでの時間には星が存在しないため、天文学者からは観測できる星がない「暗黒時代」と呼ばれる。

初期の星は、巨大で寿命が短く、超新星爆発によって様々な元素を合成して宇宙空間にばら撒いていた。その後、銀河が生まれ、宇宙の大規模構造ができ、現在は、始まりから138億年たっている。

2.6.3.4 CMBのその後の観測

宇宙が晴れ上がった時、全方位への光の放射が起こったが、空間は膨張を続けているため、その時の光の波長は、空間とともに延び続けており、宇宙を満たしているその光はマイクロ波(宇宙マイクロ波背景放射CMB)になっている。

現在、そのスペクトルは、2.725Kの黒体放射と一致している。

ペンジアスらの発見以降、詳細な観測が世界で続けられている。

マイクロ波は、空気中の水分に吸収されるため、地上での観測は容易ではない。宇宙全体がわずか3Kの電子レンジの中にあるようなもので、地球の空気に大量に含まれる水蒸気の下ではCMBの詳細な観測は難しい。アンデス山脈や南極など高地や局地での観測が行われているが、やはり空気のないところでの観測が望ましい。そこで、米航空宇宙局(NASA)は、宇宙論専用の観測衛星COBE(Cosmic Background Explore、コービー、宇宙背景放射探査機)とWMAP(ダブリューマップ)を宇宙空間に打ち上げ、詳細な測定を行った。

COBE は、赤外線天文衛星 IRAS が搭載する液体ヘリウム（測定器の冷却用）が尽きて運用停止になったのを受けて、1989 年に後継機として打ち上げられた天文衛星である。

商用人工衛星や地球観測衛星が数多く打ち上げられているが、COBE は、宇宙論的観測を目的とした初めての人工衛星である。人工衛星は莫大な費用がかかるが、NASA は、宇宙背景放射の研究は検討に値するものであるとして COBE を製作し運用した。

COBE は、宇宙背景放射を精度よく測定するために、軌道、姿勢制御、太陽・地球シールドなど様々な特殊機能を持つ専用機である。高度 900km で地球を周回、3 種類の実験装置を搭載して宇宙を探索した。宇宙背景には、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）、宇宙赤外線背景放射（CIRB）、宇宙 X 線背景放射（CXB）、宇宙ニュートリノ背景（CNB）があるが、COBE は特にマイクロ波と赤外線の測定に特化した探査機である。

COBE は、予算や技術上の制約によりヘリウムの再液化装置を持たず、使いきりの液体ヘリウム供給システムを用いたため、稼働は液体ヘリウムが尽きるまでの 4 年間とされたが、数々の科学的成果をあげた。

宇宙は、微小な体積から等方的に膨張したため、CMB も極めて等方性が高い。地球だけでなく宇宙の全てが、はじめはひとつの点から広がったため、どこで測定してもどの方向でも同じである。COBE の最大の目的は CMB の等方性を確認することである。

しかし、宇宙のはじまりの大きさは、量子の大きさであるため、

量子力学的不確定性によって宇宙にはわずかなゆらぎに起因する非等方性がある。COBE のもうひとつの目的は、その小さな非等方性を測定して「宇宙の地図」を作ることでもあった。COBE は CMB の等方性から宇宙の始まりを証明し、なおかつ、そのわずかな非等方性を測定することで地図を作るというミッションを与えられていた。

COBE は 10 万分の 1 ケルビンのゆらぎを検出し、全天の非等方性マップを作成、宇宙が均質ではなく星や銀河が存在する理由を示し、そのニュースは世界を驚かせた。

ニューヨークタイムスは COBE の成果を 1 面で取り上げ、COBE 搭載の非等方性

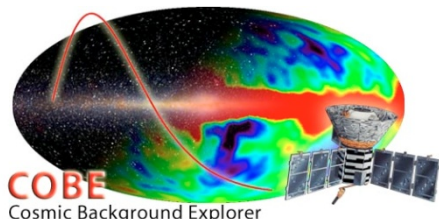


図 2-6-3-COBE 計画のロゴマーク (Wikipedia)
観測機 COBE と CMB のスペクトル、宇宙の地図が
デザインされている

観測装置のチームリーダーは「この発見によって人々はインフレーション理論が正しいことを信じるようになるだろう」と語った（1992年）。

CMBが約3ケルビンであるため、これを3K放射、あるいは3K宇宙と呼ぶことがあるが、これは、分子が存在する時の運動エネルギーに相当する「温度」とは意味が異なり、宇宙が晴れ上がった時の放射が空間の膨張によって3Kの均質な空間となっているということを意味している。

等方性の中に見出されるわずかなゆらぎが銀河、太陽や惑星などであり、物質が集まっている場所では、この均質性が失われており、太陽や地球やその周辺は、3Kではない。

COBEは、この他にも赤外線観測によって初期銀河を発見、惑星間塵の観測、太陽系内の観測なども行い、積載する650リットルの冷却用液体ヘリウムを使い切って任務を完了した。ガス屋の感覚からすると、冷凍機、ヘリウム再液化装置を搭載すれば、かなり長期間、液体ヘリウムの供給ができミッションを継続できると思うが、COBEでは機械の故障による計画の中断を避けるために安全策をとったようである。ハッブル宇宙望遠鏡は、スペースシャトルによって、機械的故障の修理や調整作業、メンテナンスが行われたが、COBEの場合は打ち上げ時に搭載した液体ヘリウムが消費されるまでの稼働とされた。（観測は約4年間行われた）

COBEの後継としてWMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe: ウィルキンソン・マイクロ波異方性探査機、ダブリューマップ)が2001年に打ち上げられた。

COBEは地球のまわりを周回する人工衛星(artificial satellites)であったが、WMAPは太陽と地球が作るラグランジュ点(2つの天体がつくる重力と遠心力の釣り合い点)にあり、地球と同じ周期で太陽の周りを公転し、地球から遠く離れることがない軌道を周回する人工惑星(interplanetary spaceflight)である。WMAPは太陽と地球を結ぶ線上、地球よりも遠い点にあり、地球と同じ周期で太陽を周回し、太陽、地球、月の影響を受けにくい位置から全天の観測を行った。

COBEは、宇宙の等方性を確認することが主な任務であったが、WMAPは、その名前Anisotropy(異方性)が示すように、宇宙の等方性の中にある極めて微小な異方性を見出すことが主目的であり、当時の最先端の科学技術を用いて製作された。1991年製のCOBEの重量は2.3トン、2001年製のWMAPの重量は0.8トンである。

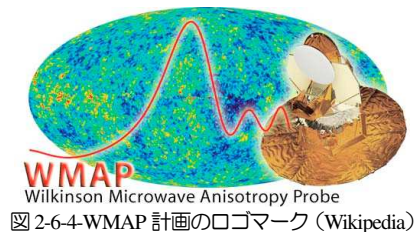


図 2-6-4 WMAP 計画のロゴマーク (Wikipedia)

WMAP は、小さな系統誤差と高い解像度をもつ 5 種類の観測システムを搭載、COBE よりも長い 9 年間のミッションで、数々の宇宙論パラメータを非常に高い精度で測定することに成功した。WMAP によって宇宙の年齢 (137.2 ± 1.2 億年)、観測可能な宇宙の大きさ (780 億光年以上)、インフレーション宇宙論との観測結果の一致、などが得られた。WMAP 以降、「宇宙の歴史 137 億年」と題した出版物が増えた。

WMAP が描き出した宇宙の姿は、驚くべきもので、宇宙の組成は、バリオン $4.4 \pm 0.4\%$ 、ダークマター (未知の暗黒物質) $23 \pm 4\%$ 、ダークエネルギー (未知の暗黒エネルギーまたは宇宙定数) $73 \pm 4\%$ である。バリオンは、ハドロンのうち 3 つのクォークからなる複合粒子、たとえば陽子や中性子などであるから、この結果は、宇宙を構成する「物質」の量がわずか 4% しかないということを示している。残り 96% は、未知のエネルギーと物質であるという数字が明らかにされた。

ダークマター (暗黒物質) は、現在の観測技術ではとらえられない物質であるが、これだけの量が存在しないと銀河などの宇宙の大規模構造が説明できないというものである。銀河の運動を説明するために導入された「質量は持つが観測できない仮説上の物質」である。われわれが知っている物質とは、わずかにしか相互作用をしないため非常に発見が難しいと考えられている。

ダークエネルギー (暗黒エネルギー) は、引力だけではつぶれてしまう宇宙を膨らませている斥力であり、空間 (真空) のエネルギーである。空間を膨張させる斥力の起源であるが、これも正体が分かっていないためにダークエネルギーと呼ばれる。

アインシュタインは、宇宙が引力でつぶれてしまわないように一般相対性理論の重力方程式に宇宙定数の項を導入したが、ハッブルなどによって、宇宙の膨張が確認された時には、宇宙定数を大失敗と考えて削除してしまった。しかし、現在、アインシュタインが削除した宇宙定数の考え方は、ダークエネルギーとして復活しつつある。

最新の探査機は、プランク衛星 (Planck、欧州宇宙機関 ESA、2009~2013 年) である。マックス・プランクに因んで命名され、プランク衛星と呼ばれることが多いが、軌道は WMAP と同じ惑星軌道であり人工惑星である。

COBE と WMAP は全天の観測を行ったが、プランク衛星は、広い視野よりも高感度・高精度の測定を優先し、宇宙の年齢、大きさ、温度、組成などのより詳細なデータを得ることを目的とした。2012年に搭載していた液体ヘリウムが枯渇し、一部の計測が継続されたミッションも2013年には終了した。



図 2-6-5-Planck (JAXA)

2013年に発表された最新データは、WMAPよりもさらに高精度となり、宇宙の年齢は 137.96 ± 0.58 億年、温度は 2.725K 、組成は、バリオン 4.81% 、ダークマター 25.7% 、ダークエネルギーが $69.3 \pm 1.9\%$ 、ハッブル定数は $67.15 \pm 1.2(\text{km/s})/\text{Mpc}$ などとなっている。Mpc は mega parsec メガパーセク (約 326 万光年の距離) であり、この観測値は、地球から 1Mpc の距離にある天体がハッブルの法則によって遠ざかる速度が、毎秒 67.15km という意味である。

プランク衛星の観測結果から、2013年以降、宇宙の年齢は 137 億年から 138 億年に訂正された。出版物の表題から発行年代が分かる。

現在は観測衛星、探査機の運用は終了しているが、気球や電波望遠鏡による地上からの CMB の観測実験が続けられている。

これまで、米国や欧州が中心になって CMB の観測が行われてきたが、日本の研究機関でも研究が進められている。

KEK は、高エネルギーの研究機関であるが、チリ・アタカマ高地での POLARBEAR 実験を推進、インフレーション理論の検証を行うことを目的として宇宙マイクロ波背景放射偏光の精密測定を計画している。

現在計画中の LiteBIRD は、インフレーション期 (宇宙誕生約 10^{-38} 秒後) に生成された原始重力波の探索を行う衛星であり、CMB 偏光の全天精密観測を行ってインフレーションモデルの検証を目指している。(JAXA、KEK、天文台、大学など)

日本の「すばる望遠鏡 (国立天文台ハワイ観測所)」では、超広視野主焦点カメラを用いてダークマターの分布を探索しており、これによってダークエネルギーの研究を行っている。

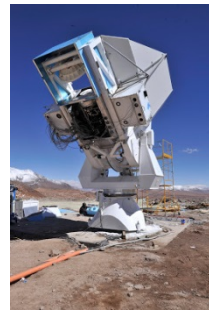


図 2-6-6-KEK の PolarBear (KEK POLARBEAR グループブログ)

2. 6. 3. 5 力の統一理論

図に NASA が公表している宇宙のタイムラインを示す。探査機 WMAP などの研究成果を分かりやすく図にしたものが種々公開されており、NASA の白地図に日本語の解説を加えた。

4次元の宇宙を2次元の図にしているため、横軸は時間、図の左側から右に向かって宇宙のタイムラインとなっており、膨張する宇宙の図は、各断面が、その時の3次元の空間の様子を表している。宇宙の歴史が138億年であるのに対して、初めのできごとは、 10^{44} ~ 10^{11} 秒の時間に起こっているため、横軸は比例スケールになっていない。

宇宙開闢後、極めて短い時間に分かれた4つの力の分岐の様子を図の下に示している。物理学は、「より簡潔に多くのことを説明しようとする学問」であり、できるだけ理論は少ない方がよい。理論の統一は、簡潔になるというだけでなく、科学技術を大きく進歩させる。古くは、マクスウェルによって電気力と磁力が統一され、現在ではひとつの電磁力として理解されている。場も電場と磁場が統一された「電磁場」として取り扱われるようになっており理論の統一には数々のメリットもある。

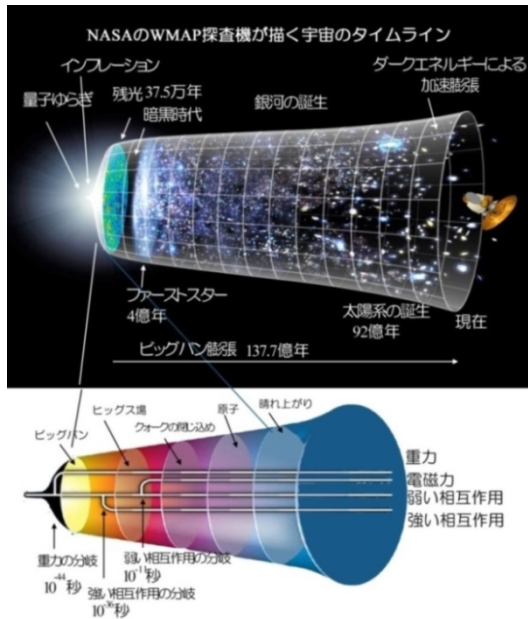


図 2-6-7-宇宙のタイムラインと力の分岐

宇宙には、これを支配する多くの種類の力があるように見えるが、これをできるだけ統一的に理解しようという研究が長く続けられている。

20世紀になって、自然界には4つの力があると理解されるようになった。様々な種類の力が存在するように思われるが、「力=相互作用」を突き詰めて考えていくと基本的には4つにまとめられる。(→「2.3.3.8 量子色力学」)

原子核の崩壊などに関わる「弱い相互作用」と極めて近い距離にしか働かない核力などの「強い相互作用」は、感じ取ることができないため、日常生活では「電磁力」と「重力」の二つしか実感できない。重力も、実際は、地球の重力以外には感じることはできないため、身近な現象のほとんどのが、電磁力(光子の交換による相互作用)を起源として説明することができる。

図に示すように、4つの力は、もともとひとつの同じ力であったものが、宇宙が膨張して、温度が低下する(エネルギーが小さくなる)につれて分岐したものである。力を統一する理論の確立が進められており、宇宙が始まったときの極めて大きなエネルギーの状態を再現する高エネルギー領域の研究が行われている。

4つの力のうち、すでに、弱い相互作用と電磁力の2つの力は、ステューヴン・ワインバーグ(1933年～、米国)、アブドゥス・サラム(1926～1996年、英領インド、パキスタン)、シェルドン・グラショー(1932年～、米国)の3人によって統一さ

れ、ワインバーグ＝サラム理論(電弱統一理論)として完成した(1961年)。電弱理論を統一した3人にはノーベル物理学賞が授与された(1979年)。

したがって、4つの力は統一によって理論的には3つの力(強い力、電弱力、重力)になっているが、一般的な理解としては、現在も4つの力として説明されるのが普通である。電場と磁場の統合(電磁場)は比較的理解が容易であるが、弱い相互作用と電磁力を統合した電弱力を理解するのは簡単ではない。

極端に大きさが異なる重力を除く3つの力を統一しようというのが大統一理論(grand unification theory, GUT)である。シェルドン・グラショーらが、ゲージ理論を用いて全ての力を統一する大統一理論を提唱(1974年)し、多くの研究が行われているが、完成には至っていない。

日本のカミオカンデは、いくつかの大統一理論の候補が予想する陽子崩壊の観測を目的として建設された(1983年)が、陽子崩壊は観測されなかったため、超対

表 2-6-1 4つの力

相互作用	強さの比	到達距離
重力	10^0	無限大
電磁力	10^{36}	無限大
弱い相互作用	10^{33}	10^{-15}m
強い相互作用	10^{38}	10^{-17}m

称性の概念を取り入れた新たな大統一理論が検討されるようになった。

カミオカンデは、本来は、陽子崩壊観測装置であり、大統一理論の研究のための装置であるから、当初の目的は果たしていないが、陽子崩壊の観測のために他の粒子の影響をできるだけ排除するよう設計されており、それが偶然、超新星爆発による宇宙ニュートリノをとらえることとなり、ニュートリノ天文学の観測装置として、その存在が広く知られるようになった。

カミオカンデの次世代機スーパーカミオカンデでは、陽子崩壊とニュートリノ観測の両方を目的として、大気ニュートリノ振動の観測に成功したが、陽子崩壊は観測されていない。現在、ハイパーカミオカンデが計画されている（2025年稼働予定）。