

時空の量子化と重力場

課題番号 15540261

平成15年度～平成18年度科学研究補助金
(基盤研究 (C)) 研究成果報告書

平成19年5月

研究代表者 湯川 哲之

総合研究大学院大学 葉山高等研究センター教授

研究組織

研究代表者 湯川哲之（総合研究大学院大学・葉山高等研究センター・教授）

研究協力者 洞田慎一（総合研究大学院大学・葉山高等研究センター・上級研究員）

研究協力者 濱田賢二（高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助手、
総合研究大学院大学・素粒子原子核専攻・助手）

交付決定額（配分額）

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成15年度	2,200,000	0	2,200,000
平成16年度	500,000	0	500,000
平成17年度	500,000	0	500,000
平成18年度	500,000	0	500,000
総計	3,700,000	0	3,700,000

研究発表

学会誌等

- [1] 湯川哲之；自然法則の起原,日本物理学会誌61 (2006) 539.
- [2] S.Horata, H.S.Egawa, and T.Yukawa: Grand-Canonical Simulation of 4D Simplicial Quantum Gravity; Nucl.Phys.B (Proc. Suppl.) 119 (2003) 921-923.
- [3] K.Hamada, and T.Yukawa: Cosmic Microwave Background Anisotropies Reveal Quantized Gravity, Mod.Phys.Lett. A20 (2005) 509-518.
- [4] K.Hamada, S.Horata, and T.Yukawa: Space-time Evolution and CMB Anisotropies from Quantum Gravity, Phys.Rev. D74 (2006) 123502-1~15.
- [5] S.Horata, and T.Yukawa: Discrete Space Formulation of Quantum Gravity on $R^d \times S^1$; J. of Phys. (Conf.Ser.) 33 (2006) 321-329.
- [6] S.Horata, and T.Yukawa; Making a Universe, to be published in JPSJ vol.76.

出版物

- [1] K.Hamada, S.Horata, and T.Yukawa: Background Free Quantum Gravity and Cosmology; in Focus on Quantum Gravity Research (Ed D.C.Moore) Chapt.1. (Nova Science Publishers, Inc.N.Y. 2006)

口頭発表

- [1] 湯川哲之; Quantum Gravity from CMB Anisotropies,基研研究会「場の量子論の基礎的諸問題と応用」2003年12月24日 - 26日
- [2] T.Yukawa; CMB anisotropies Reveal Quantized Gravity, Sapporo Winter School in Niseko '04, Jan.8-12, 2004, Niseko, Hokkaido
- [3] S.Horata; Anisotropies of the Primordial Cosmic Background Curvature, GR17 July19-23, 2004 Dublin
- [4] K.Hamada; Do we see quantized gravity in CMB anisotropies? GR17 July19-23, 2004 Dublin
- [5] T.Yukawa; Evolution of simplicial universe COSMO05, Bonn Aug. 28-Sept.1, 2005
- [6] K.Hamada; Inflation and Primordial Spectrum from Background Free Quantum Gravity, COSMO05, Bonn Aug. 28-Sept.1, 2005
- [7] S.Horata, Discrete Space Formulation of Quantum Geometry on R^*S^d (d-1) , QG05 Cala Gonone, Sardinia, Italy,Sept.12-16, 2005.
- [8] T.Yukawa, Birth and Evolution of Simplicial Universe, Miami2005 Dec.14-19, 2005.
- [9] K. Hamada; Primordial Spectrum from Background Free Quantum Gravity, Miami2005 Dec.14-19, 2005
- [10] T.Yukawa; CMB Anisotropies from Quantum Gravity, Meeting on Standard model and Beyond, Academia sinica (Taipei) May 20, 2006.
- [11] S.Horata; Numerical model of the CMB anisotropies -Simplicial quantum gravity-, Joint meeting of Pacific Region Particle Physics Communities Hawaii, Oct.29-Nov.3, 2006.
- [12] K.Hamada; Space-time Evolution and CMB Anisotropies from Quantum Gravity, Joint meeting of Pacific Region Particle Physics Communities Hawaii, Oct.29-Nov.3, 2006
- [13] T.Yukawa; Evolution of Simplicial Universe, International Symposium on Stochastic Models and Discrete Geometry, ISM (Tokyo) Feb.26-28,2007. .
- [14] T.Yukawa; Evolution of Simplicial Universe, KEK理論研究会 3月12 - 15, 2007

今までの研究とこれから

量子重力と宇宙

本研究の最終目標は、4次元空間の量子化により、我々が観測する宇宙と物質を、発生と進化という自然史の視点で記述する事である。空間を量子化することには、主に、次の2つの内容が含まれる。第一は、物質間に働く引力の量子化、すなわち量子重力理論を作ることである。第二は、時空や物質の生成・消滅と発展を記述する量子宇宙論を作ることである。量子重力理論は、万有引力の量子論的媒体である重力子がつかさどる力学を取り扱う。一方、量子宇宙論は、空間の膨張に伴い分化する時間座標と空間座標の4次元空間への埋め込みと、座標系の決定により誘導される物質の運動法則を記述する。具体的には、私たちが過去十数年に亘る研究により積み上げてきた数値的な空間の量子化技術を基礎にして、計算機上で、時空および物質の発生と成長を記述する方法を確立し、それを、観測に基づく宇宙進化の描像と照らし合わせる。さらに、空間内への座標系の埋め込みに伴い現れた物理法則の進化が、われわれの宇宙で観測されている法則に収束するためのシナリオを探索する。

計算機を用いた重力の量子化は、通常、閉じた空間を3角形分割し、格子配位の組み合わせ自由度を統計熱力学的に分析する事によりなされる。この方法は、真空が定常状態である場合には正当化されるが、定常でない空間の非一様な発展を研究するには、開いた空間でも適用できるように方法を変更する必要がある。開いた空間は、適当な境界条件の下で自発的に膨張する。時間軸が現れる起原は、この膨張が契機となっていると私たちは考えている。4次元体積は、3次元宇宙空間の体積を時間軸方向に積分したものと考えたとき、その積分変数として‘宇宙時間’が定められる。このように定義された宇宙時間により、宇宙初期の指數的膨張（インフレーション）や、引き続き起ると考えられている級数的膨張（ビッグバン）の出現が期待される。また、空間に埋め込まれた座標系により宇宙初期の曲率と物質密度の相関が定量化され、それとCOBEやWMAP [1]、SDSS [2]、2dFGRS [3]などで観測された温度や天体分布密度揺らぎの大角度相関と比較分析できる。宇宙誕生時の、いまだ時空の座標系が定まっていない時期には、力学法則は存在しえない。力学法則は空間の成長とともに自発的に現れたと考えるなら、現在、素粒子の標準モデルとして観測されている場に至る力学の進化は、歴史的現象として記述されることになり、その過程を計算機実験により検証することも可能である。

本研究は、先ず、空間の量子化を開いたトポロジーで行うための理論的および計算機実験的方法を確立する。次に、それを宇宙の発生と成長に適用する事により、観測の結果と比較する。今後、研究の展開に応じて、空間中に物質場を導入し、力

学法則の自発的な発生と進化についての基礎的な知識を得ることを考える。私たちの方法は、空間を量子化することの2つの内容、すなわち、量子重力理論と量子宇宙論を同じ枠組みで統一的に取り扱う。この方法により、量子重力の研究において、初めて、理論と観測を直接比較する事ができる。さらに、本研究は、量子化を非定常な空間で行う方法や、力学の発生と進化を取り扱うなど、今までの理論物理学の研究方法にはなかった試みである。数値的な空間量子化の方法と宇宙論への応用に対する成功は、統一的な量子重力理論を完成させる大きな原動力となる。また、宇宙進化のシミュレーションによる初期宇宙の境界条件や宇宙論的パラメータの決定は、宇宙論における現象論的な標準モデルに対する重要な制限となり、より正確な宇宙モデルの構築に大きく影響することが期待できる。さらに、非定常な空間における場の量子化と、座標系の埋め込みに伴う物質の力学法則の発現は、時間とは何かの問題に1つの解答を与える。このような、力学法則の自発的誘導や進化についての考え方は、物理学研究の方法論に対する新しいパラダイムを提起する [4]。

宇宙背景輻射や天体分布の全天観測で得たデータに基づく宇宙論的パラメータの決定は、宇宙進化のシナリオの現象論的理解に多大な影響を与える一方で、宇宙初期の状態について、より根本的な理解に向けたいくつかの基本的な問題点を明示する結果を招いた。宇宙論的パラメータには、初期揺らぎスペクトルに対する仮定、インフレーション的膨張の原因とビッグバンのエネルギー源に対する仮定、出所不明なダーク・エネルギーの存在など、観測データを再現するがために与えた仮定がある。これらの仮定は宇宙の初期条件、すなわち宇宙発生過程の不確かさに起因する。本研究は空間発生の過程を量子重力・量子宇宙の統一的理解から導く研究である。

重力を量子化する試み

一般相対性理論を摂動論的に量子化することが不可能なことは、繰り込みの不可能性が原因と考えられている。この困難を回避する理論として、超弦理論が有望視され、多くの研究者の関心を集めて来た。しかしながら、超弦理論では無限個の真空が可能であり、理論自体が真空を決定することはできないことが、ランドスケープ問題として知られている [5]。一方、Hawking [6] やVilenkin [7] 達が考えた量子宇宙論は、宇宙を量子力学的に生成する事を考える。そこでは、重力場の量子化は考えないから発散の問題はあらわには出てこない。しかし、一般座標変換不変性に由来するさまざまな補助条件を厳密に解くことはできていない。この問題を扱う理論として、近年、ループ量子重力理論 [8] が提案されているが、これさえも補助条件の問題をすべて解決するまでには至っていない。いずれにしろ、これらの理論は、重力場の量子化と量子宇宙論を統一的に取り扱っていない。唯一、統一的な取り扱いが可能な理論として、コンフォーマル重力を基礎とした量子重力理論 [9] が提案

され、繰り込み可能性、空間特異点解消の可能性、インフレーションの自発的発生などいくつかの好ましい性質を持つことが示されている。しかし、この理論が持つ高階微分項が引き起こすユニタリティーの破れをどう解決するかはいまだ明らかではない。本研究が採用する数値的な重力場の量子化の方法は、空間が閉じたトポロジーでは、コンフォーマル重力理論の結果を再現する。この量子化技術を、開いたトポロジーを持つ空間に適用できるように改善する事により、非定常な系についても量子化を統一的に記述する。我々が採用するファイマン経路積分法による量子化は、通常時間軸を虚数軸にウィック回転し時空の計量をユークリッド的に取り、球またはトーラスのような閉じたトポロジーを持つ空間で統計熱力学の手法を用いて実行される。これが可能な理由は真空が定常的であり、その熱力学的対応として平衡状態が存在することが基本的である。しかしながら空間が開いたトポロジーを持つ場合、真空は非定常であり、それに対応する統計平衡状態がないため閉じた空間のときに用いられた量子化の方法は採用できない。本研究は、そのような非定常にある真空での量子化を提案している。この方法では、すべての可能な状態の集合により構成された統計的分配関数の時間的推移を考える。

通常、基礎物理学においては、自然現象の背後に、それを支配する基本的法則が存在すると考え、対称性や保存則を指導原理にした簡潔でユニバーサルな力学法則の存在を期待する場合が多い。その背後には自然法則の簡潔性や対称性に対する信仰のようなものがあるように思える。しかし、一度物理法則が定まれば1つの例外も許されない。一方、生物現象や、社会現象、心理現象などには基本法則はなく、統計的な確率の高さにより法則と認められている。この場合、ほとんどの法則は例外の存在から免れ得ない。同様に、われわれが宇宙の進化を考えると、宇宙ができる前から法則があったとは考えがたい。むしろ時空の出現とともにすべての可能な状態の中で、最も確率の高い状態として顕著さを増し、空間の際限ない膨張とともに、例外の極端に少ない物理法則に進化していったと考える。本研究で採用する方法は、物理法則の進化論的解釈に立つものであり、物理学における新しいパラダイムを提起する。

私たちの過去の研究

本研究課題に関係する重力を数値的に量子化する研究は、平成8年最初の科学研究補助金を受ける約3年前から開始した。その時は、いくつかの数値的な方法を比較検討し、その中からDT法を選び、その方法の基本的なアルゴリズムの検討と、FORTRANによる2次元空間のプログラム作成を行い、計算を実行した。平成8-10年度、基盤研究(C)「重力場および弦模型を数値的に量子化する研究」により次の研究を行った [10]。予備研究を基礎にして2,3,および4次元量子重力と弦理論に関

係したプログラムの開発を、C言語を使って完成した。それを使い、計算機シミュレーションと、さまざまな観測量の測定と分析を行った。主な成果としては、i) 2次元重力におけるスケーリング則をループ分布の測定により確認し、理論予想と比較し肯定的結論を得た。ii) 2次元面の複素構造を面抵抗の測定により決定する理論を作り計算機で実行した。セントラル・チャージが1を越えると面が不安定になるという理論予想を確認した。iii) スtring・サセプティビリティの測定には有限サイズ効果が大きい事を示し、再計算の必要性を説いた。計算のために、有限サイズ効果の少ないシミュレーション法(グランドカノニカル法)を開発し、それを用いて再計算を行い、理論予想との良い一致を見た。さらに、iv) 高次元空間(3, 4次元)でのスケーリング則を2次元の場合と同様の方法で測定し、スケーリングの性質には次元に依らない類似性のあることを見出した。この期間の研究を要約すると、われわれの研究は、世界的な流行から5年ほど遅れて出発したが、2次元重力については、先行者が結論としていた数値結果と理論との不一致の存在や、誤差に隠れたあやふやな結果を、新しいアルゴリズムや測定方法で再計算し、ことごとく理論と一致することを確認した。また、超弦理論を数値的に量子化する方法について新たな発見があったほか、高次元重力についても展開が期待できるデータを取り出す準備が出来た。

引き続き、平成11-14年度には基盤研究(C)「重力場および超弦模型の数値的量子化」により以下の研究を進めた[11]。すでに研究のために使用していた自作のクラスター計算機を、学長リーダーシップ経費の補助により重力シミュレーションを実行するための専用機に改造し、高精度が要求される4次元計算を可能とした。当時、世界的な研究の動向は、4次元純重力の相転移のオーダーが1次である事が明らかになり、数値的に量子化するシナリオが信頼を失いつつあったが、私たちは、重力と複数のゲージ場やスカラー場を結合した系で空間の相図を求め、ポリマー相と萎縮相以外に第3番目の相があることを見出し、萎縮相から新しく発見した相への転移のオーダーが2次である事を確認した。さらに、最大124個のスカラー場と3個のゲージ場を重力と結合させた系のString・サセプティビリティの測定から異常次元を引き出した結果4次元コンフォーマル理論による予想とのよい一致を得た。超弦理論のシミュレーションに関しては、超対称性を保つ格子作用関数を求め計算機上にのせた。フェルミオン積分に対する困難性から実行は小さな空間に限られたが、分配関数を有限に保つには少なくとも1つ以上のフェルミオンの必要な事が示された。残念ながら10次元空間でのフェルミオン積分の実行が困難なため完全な超弦模型のシミュレーションは未完である。この期間の研究を要約すると、4次元重力で、多くの研究者があきらめていた数値計算による量子化は、ゲージ場を加えることで実行可能なことを示し、それがコンフォーマル重力理論を支持することを明らかに

した。このような結果が得られた要因は、計算機パワーの向上と、グランドカノニカル法という新しいプログラムの開発により高精度の計算が可能になったことにある。

私たちの研究の現在と未来

今期の研究は以下のようなものであった。計算機能力が、速さにして約7倍、メモリにして約4倍に改善され、プログラムの改良に伴って、体積がほぼ1桁大きい4-単体約600K個の計算を可能にした。改善した計算機システムにより4次元重力のシミュレーションをカノニカル法およびグランドカノニカル法を用いて精密な測定を行い、4次元において得られていたわれわれの結果を再確認するとともに、コンフォーマル理論との精度の高い一致を見た [12]。平成16年度には、予定していた時空のコンパクト化に関する試行計算を進めようと準備していた時点で、研究方針の変更が避けられない重要な状況の変化が起きた。すなわち、WMAPによる宇宙背景放射の非等方性に関する精密なデータとその解析の発表である。イベント・ホライズンをはるかに超える大角度相関の存在は、宇宙がまだ量子力学的な対象であった初期の揺らぎの名残が、その後のインフレーション的膨張のため、力学的混合を受けることなく保存されているからと理解した [13] [14]。これが事実なら、その相関は、われわれの4次元シミュレーションでも測定できるに違いないと考え、急遽、研究のテーマを角度相関の測定に切り替え、測定方法の検討とプログラムの作成に取り掛かった。宇宙背景放射測定プログラムは、大きく2つの部分から構成されている。1つは4次元空間から3次元境界が作る宇宙を取り出し、その中に2次元最終散乱面 (LSS) を作る部分と、もう1つは面抵抗の測定からLSSに座標系を与え、2点相関を測定する部分である。複素構造の取り出しによる座標系の決定は過去の経験で方法は分かっているが、4次元空間内にLSSを穿つ方法は新たな作業が必要である。単純に、測地線を基準にして定めた半径を持つ球面を切り出すと、面はトポロジーを変えてしまう。いかにしてトポロジーを変えず切り出すか、その解決が問題となった。

4次元時空内に、LSSを穿つアルゴリズムを検討していて、重要な知見を得た。このアルゴリズムは、4次元球面内の1つの4-単体を起点にして、それに接する4単体を順番に剥き取っていくが、この裏プロセス、すなわち1つの4-単体を種にして、単体を順序良く貼り付けてゆくことにより、3次元球面を境界宇宙とする、開いたトポロジーを持つ4次元空間を作ることが出来る。異常な形の宇宙を避けるために、単体を一方的に付け足し膨張させるだけではなく、取り外す収縮も確率的に混ぜながらゆっくり成長させることで最も確率の高い宇宙が作れることも分かった。これはわれわれが開発したグランドカノニカル・モンテカルロ法により実行できる。また、LSSを作る時も、この裏プロセスにより、あまり特異的でない面が切り出せ

る。この方法の発見によりコンパクト空間での量子重力シミュレーションを一旦休止し、境界を持つ空間のシミュレーションに転換し、空間の幾何学的の相関と観測とを比較する研究に取り組むこととした。これまで、定常的な空間で、統計熱力学的な性質を測定することにより空間を量子化する研究を進めてきたが、その結果の正しさは、実験が存在しない状況で、理論的予想と比較するか、それがなければ結果の物理的妥当さというあいまいな基準に頼ることもあった。しかし、新しい方針は、観測事実との対照を目指すものであり、量子重力を形而上学から自然科学に転換できる千載一遇の機会であると考えた。

本研究の最大の意義は、従来、定常的な真空での量子化の場合に限定して採用されていた、閉じた空間での真空の構築とその統計熱力学的分析の手法を発展させ、非定常的な‘真空’で量子力学的な、系の時間的发展が扱えるアルゴリズムを見出したことにある。本研究の成否は、新しく見つけたアルゴリズムが、果たして宇宙の生成を正しく記述できるかどうかにある。先ずアルゴリズムの正しさを確かめるために、量子化のプログラムを変更する作業とその試行計算を行った。2次元シミュレーションは、行列模型や、境界を持つリュービル場の理論などの理論的予想と比較ができる状況にあるため、プログラムの検定に適している。系の大域的な性質をきめる宇宙定数や境界宇宙定数の臨界値の測定では、行列模型の予想を再現する事が確かめられた。その結果は、平成17年8月ボン（ドイツ連邦）で開かれたCOSMO05、および同9月カラ・ゴノーネ（イタリア共和国）で開かれたQG05において口頭発表した [15]。さらに、2次元のアルゴリズムを拡張し、3および4次元のプログラムを作り、試験的なシミュレーションを行った。その結果、高次元においても2次元で見られたインフレーション的膨張が起こる事を観測した。

本研究は、計算機アルゴリズムとともに、計算機自体の性能にも大きく依存してきた。私たちが現在所有する計算機は、10年以上にわたり使用してきた5CPUからなるクラスター計算機と、平成14年に科研費の経費で購入した5CPUのクラスター、あわせて計10CPUのクラスター計算機である。このシステムは2次元の計算では2-単体（三角形）が10M個の空間を作る事ができる。4次元では、物質場を結合させない場合、計算速度を問題としないなら、最大500K個の4-単体の配位の空間まで作れている。4次元のシミュレーションには、もちろんこれより格段性能のよい計算機が必要であるが、現有の計算機でも試行実験は可能である。本研究の成果は最近の論文を第一報 [16] として、今後引き続き新しい論文の出版を用意している。

参考文献

- [1] C.L.Bennett et.al.; ApJS,148 (2003) 1-134.
- [2] M.Tegmark et.al.,; Cosmological parameters from SDSS an WMAP, astro-ph/0310723
- [3] S.Cole et.al.; The 2dF Galaxy Redshift Survey:Power-spectrum analysis of the final dataset and cosmological implications, astro-ph/0501174
- [4] 湯川哲之; 自然法則の起原,日本物理学会誌61 (2006) 539.
- [5] L.Susskind, The anthropic landscape of string theory, hep-th/0302219
- [6] J.B.Hartle and S.W.Hawking, Phys.Rev.D28 (1983) 2848.
- [7] A.Vilenkin,Phys.Rev.D33 (1986) 3560.
- [8] C.Rovelli,Loop Quantum Gravity,Living Rev.Relativity 1 (1998) 1.
- [9] K.Hamada, S.Horata, and T.Yukawa: Background Free Quantum Gravity and Cosmology; in Focus on Quantum Gravity Research (Ed D.C.Moore) Chapt.1. (Nova Science Publishers, Inc.N.Y. 2006)
- [10] 湯川哲之;「重力場および弦模型を数値的に量子化する研究」平成8-10年度科学研究費補助金、研究成果報告書。(平成11年4月)
- [11] 湯川哲之;「重力場および超弦模型の数値的量子化」平成11-14年度科学研究費補助金、研究成果報告書。(平成15年6月)
- [12] S.Horata, H.S.Egawa, and T.Yukawa: Grand-Canonical Simulation of 4D Simplicial Quantum Gravity; Nucl.Phys.B (Proc. Suppl.) 119 (2003) 921-923.
- [13] K.Hamada, and T.Yukawa: Cosmic Microwave Background Anisotropies Reveal Quantized Gravity, Mod.Phys.Lett. A20 (2005) 509-518.
- [14] K.Hamada, S.Horata, and T.Yukawa: Space-time Evolution and CMB Anisotropies from Quantum Gravity, Phys.Rev. D74 (2006) 123502-1~15.
- [15] S.Horata, and T.Yukawa: Discrete Space Formulation of Quantum Gravity on $R^d \times S^1$; J. of Phys. (Conf.Ser.) 33 (2006) 321-329.
- [16] S.Horata, and T.Yukawa; Making a Universe, to be published in JPSJ vol.76.

(参考資料について)

以下に、研究発表のリストのうち学会誌等 [1] - [6]、出版物 [1]、および口頭発表 [6] のパワーポイントファイルを添付した。

自然法則の起原

湯川 哲之 (総合研究大学院大学・葉山高等研究センター e-mail: yukawa@soken.ac.jp)

物理学者が他分野の科学者に対して少しでも優越感を抱く理由があるとすれば、それは、物理法則こそこの世界の物質のあり方を定める根源的な規則だと自覚していることにある。事実、多くの物理法則の中でも、より基本的と考えられるニュートンの力学法則、マックスウェルの電磁気法則、アインシュタインの一般相対論、そしてシュレーディンガーの波動方程式などの単純な数学的表現の奥に広がる膨大な自然界は、この法則が発見されてからかなりの時を経た今も、これらが導く物質世界に未知の可能性を求めて、多くの研究者や技術者がひきつけられ探索していることから、学問的はいうに及ばず社会的な重要性が計り知れる。これらの物理法則の正しさは、十分長い試練に耐えたせい、それがなぜ正しいのか、その起原や、成立理由について疑問を持たれることはあまりない。それは、あたかも、キリスト教信者が神の存在理由を問わないことと似ている。高名な物理学者が、ある法則の確かさの判断理由に「真理は単純明快であるべき」を基とすると、アインシュタインが量子力学に対する不信を「神はさいころを振らない」と表したとか、素粒子論が好んで対称性や不変性を理論構築の基礎に据えることなど、物理学者が探る法則のかなたに、神格化された‘自然’が垣間見える。

物理学の法則に比べると、生物界や社会の法則は個性的である。これらの法則は、その対象に内在する性質とそれを取り囲む環境が互いに影響を及ぼし合った結果として自発的に現れたと考えられている。生物界の進化論や遺伝法則などや、あまたの経済学の法則は、それが予言する能力というより現在の存在を比較的矛盾なく理解できるという事実により肯定される。したがって、少しの例外や、時間や場所の違いなどにより法則の解釈が変わることも許された。ただし、近年の傾向として、観測だけを頼りにしてきたこのよ

うな法則を、実験的手段を導入することにより、物理法則のように、より普遍性のある法則に仕上げる努力がなされるようになってきている。

実は、物理法則も、歴史的には、物に内在する性質の自発的顕在化として、捉えられていた時代があった。山や木に、川に、海に靈魂が宿り、その意志が活動を支配するという考えや、それから少し進んで、水、火、土、空気など身の回りに偏在する物質を元素と考え、または基本的な物質として原子の存在を仮想し、それらに内在する力が合わさって物質の運動に反映されると思弁的に考えられていた。古代ギリシャを代表として、各地各時代にあった様々な法則が、より適応性のある自然法則としてまとめられ、それが物理法則のような普遍法則にまで凝縮されたのは、宗教や経済などの社会変化による歴史的要因だけではなく、自然現象の背後には論理性があると考えた人間(科学者)が現れたためであろう。この法則進化の歴史から単純に将来を予想すると、いつの日か、すべての実在物とその運動は、1つの法則から演繹されるべきとの考えに至る。事実、理論物理学では TOE (Theory of Everything) と銘打つ理論、すなわち超弦理論、が現れ研究者の関心を呼んでいる。その理論によれば、自然界は10次元空間内を飛び回る太さが 10^{-32} cm 程度の特殊な紐で構成されている、と言われている。この紐の持つ運動が、われわれの住む空間と物質を構成する素粒子およびその間の作用のすべてを決めるという理論である。なぜ紐なのか、紐はどのようにして生まれたのか、どのようにして検証できるのか、など超弦理論を根源的とさせているこのような疑問は研究が進むにつれて解決されていこうが、まだ法則の起原を考える時期には至っていない。

それでは、自然法則の起原はどのようなものだろうか。自然のあり方について、最終的な責任を神に押し付ける

立場をとらないとするなら、つまるところ始原要素(物質)の内在的性質に頼るしかない。このような考え方は、古代ギリシャに立ち戻るまでもなく、現代科学の多くの分野でごく自然に取り入れられている。たとえば、生命の起原を考えるならその始まりを化学進化、すなわち生命体の始原物質(核酸、アミノ酸、脂質)の自然合成プロセスが始めとなり、始原物質相互および環境の働きにより複雑で機能的な構造を獲得していったと考える。意識の進化を問題にするならニューロンの物理的性質が基本となる。各々、数千に枝分かれした何億ものニューロンが作るネットワークが脳である。このようなことを言うと、何と単純な還元論者とさげすまれるかもしれない。もちろんどのようにしてアミノ酸や核酸から、直接生命を導くか分かっていないし、分かったとしてもそれが一足飛びに起こることではないことは誰でも予想できる。しかし、生命は、まさにこのような物質から、ある環境の下で、タンパク質や RNA/DNA の合成に進んだことは間違いないことであり、その原初の設計図は分子の電子状態に内在したものでありえない。意識についてもニューロンの性質がネットワークの構築に基本的であることは疑いもなく、ネットワークの特殊性が意識の起原である。

要素が持つ性質の積み重ねから全体的な法則を求めるという考え方が物理法則においても広く認められる典型的な例は、経路積分による量子力学の定式化であろう。リチャード・ファインマンの提案によるこの方法では、ある状態から別の状態への遷移はこの2つの状態を結ぶすべての経路の重ね合わせにより決定される。古典力学で実現される経路は、重ね合わせが最も協同的に行われる経路として浮かび上がってくる。対象の力学が十分解析的に明らかにされていなくとも要素の集合とそれらの結合のルールさえ決まれば、基本的にはすべての可能な重ね合わせにより量子化が行われる。この方法は、一般性を持ったため、特に摂動論的な計算ができないような系、たとえばクォークの場の理論によるハドロンの性質

の研究などをコンピュータで非摂動的に行うときその力を発揮していることは周知の事実である。

この考え方は、物理法則の起原に取り組み際に適している。物理法則といえどもその存在の起原を考えるなら、それは、時間と空間の起原、すなわち宇宙の起原においてほかには考えられない。これはとりもなおさず、一般相対論と量子論の融合を目的とする量子重力理論がもたらすべき法則である。場の理論の専門家によれば、アインシュタイン理論と量子場の理論は相容れないところがありその調和的融合は不可能とされている。そこで、そのような完成した理論の単純な融合を出発点とはせず、時空と物質の要素とその組み合わせ方を仮定し経路積分と似た作法で重ね合わせ、その要素が内在的に

持つ性質から時空を作ることを考える。たとえば、2次元世界では、空間の要素を正三角形とし、その張り合わせ方を、数学的に十分厳密に定義できる空間(PL多様体)とし、可能なすべての面の重ね合わせを実行すれば、その集合は、すでに場の理論として解析的に研究されている2次元量子重力を再現することが知られている。4次元理論の時空要素として正10面体を単位ブロックとし、さらに、必要に応じて各頂点・辺上にそれぞれ定義されたスカラー場・ベクトル場や、三角形面上に置いたフェルミオン場を始原物質として導入する。時空間は経路積分の精神にのっとり、すべての可能なブロックの組み合わせ方と物質場の状態を重ね合わせる。求まった空間は、基本的にはどこかに存在してもおかしくない量子

空間であるが、それがわれわれの宇宙と一致するかどうかは始原物質の選択による。また、作られた空間が微分の定義できる滑らかなものか、差分しか定義できない格子状の空間か、行列でしか表せない非可換空間なのか、いったいわれわれが知っている数学的形式で表現されるのかどうかは想像の域を出ないが、少なくとも計算機による有限時空の量子重力の構築は、実現可能である。計算機による法則の起原で、正しい計算がなされていることの必須条件は、すべての可能な組み合わせを選ぶ際に用いた乱数の性質にかかっている。

ひょっとして究極的な力学法則の向こうにあるのは、完全な対称性ではなく、完璧な乱雑さかもしれない。

(2006年4月12日原稿受付)