

物理学と宇宙論における最近の試み

—統一ゲージ理論と力の法則の相対化—

佐藤 文隆

今世紀初頭にはじまり三十年代までつづいた物理学の変革は、その後、天文学、化学、生物学等の諸科学に影響を与えたのみならず、半世紀を経た今日になって技術の隅々に応用され、多大な社会的影響をもたらすにいたっている。当初の予想をはるかに上まわって今日も有効性を發揮している相対論と量子論の諸原理には、まだかげりは見られない。その意味では、われわれは依然として今世紀初頭の変革につづく時代の中にあるといえるが、他面では相対論と量子論という強力な武器を手にしたことにより、想像もなかった物質界の新境地に突入したともいえる。近年における素粒子物理学の進展は、物質の存在様式とその作用について統一的描像を描きつつあるといえる。そしてまた、この描像は宇宙における物質の形成論と深くかかわりを持つに到っている。

本稿では初めにゲージ理論による相互作用の統一理論に到る物理学上の歴史を概観し、次にこの理論を構成する二つの柱であるゲージ理論と対称性の自発破れの考え方の解説を試み、最後にこれらの理論が内包している宇宙論的意味、すなわち普遍法則の特殊な発現として物質の法則を把え直す視点についてふれる。

一 基本相互作用とその統一

物質界の多様な現象にも拘らず、今日の物理学はそれらを全て四つの基本相互作用により説明されると考えている。

重力、電磁気力、弱い相互作用、強い相互作用の四つである。

重力は、地上の重力と天体の運行を支配する力とが同一のものであるとの認識のもとに、ニュートンにより見出されたものである。電磁気力は、十九世紀に入ってようやく精密科学となった静電気や電流、それに磁気の現象を統一する理論として、マックスウェルにより十九世紀後半に確立したものである。この理論は直ちに光の電磁波理論を可能とし、光と電磁気との統一理論でもあったわけである。またこのマックスウェル方程式の中に既に表現されていた時空理論として、特殊相対論をアインシュタインは一九〇五年に発見するわけである。重力と電磁気力ともに巨視的世界においても存在する力であるが、微視的世界においても他に還元できない基本的な力であると考えられている。日常的には摩擦力とか弾性力とかいうものも力と呼ばれるが、これらは全て電磁気力に還元できるものであり、基本的な力ではない。

光と物質の作用の問題は光の粒子性と原子レベルでの新しい力学を明らかにし、一九二〇年代における量子力学の完成へと導いた。一九〇〇年のプランクによる作用量子の導入に始まるこの新力学は、原子の内部構造とその光の吸収・放出の機構の研究を通じて確立されてきたものである。この力学は初め粒子の力学を念頭において定式化されたが、直ちに場の量子論を含む形式に拡張された。これはニュートン力学を流体や音波を取り扱える形式に書き変えたことに対応する多体問題としての側面を含むとともに、背後に粒子を想定しない本質的に新しい実体としての場を取り扱う量子論でもあった。このような新しい実体としての場の把握は、十九世紀におけるエーテルをめぐる混迷を経由して、一九〇五年の相対論により最終的に到達したものと見えよう。そして今日では、物質の基本的存在形態は全て場であり、粒子的把握はその近似的描像であるとみなされている。

相対論と量子論を新たに手にした物理学が原子の世界を越えて更に微視的な世界である原子核・素粒子の世界に本格的に突入するのは、一九二〇年代末から三十年代にかけてであった。放射能の現象は既に十九世紀末から知られて

いたが、その本質的説明がはじまるのはこの時期である。このレベルでは力の記述は本質的に場の量子論によるものとなり、まず電磁気力の場の量子論による記述が行われた。自然放射能や宇宙線といった自然の高エネルギー粒子を用いた研究と加速器という人工的な高エネルギー粒子の発生装置の発明により素粒子間の作用の研究が進展し、この世界の現象は原子レベルと異って電磁気力だけでは記述できないことが明白となった。そして新しい相互作用として原子核のベータ崩壊を誘引する弱い相互作用がフェルミにより加えられ、次いで陽子と中性子を原子核として結合しておく力としての強い相互作用が湯川により追加された。これら二つの力は他の二つの力と異り、巨視的長さの到達力を持たず、原子の世界よりも約十万分の一小さい世界においてのみ顕著なものとなるのである。

もともと原子の世界の現象に有効な理論として完成したものが素粒子間の新しい相互作用においても有効であるという保証はなかったわけであるが、物理学は手持ちの武器でこの世界に突入したわけである。一九二八年にはディラックが相対論的電子理論を完成し、反粒子の概念を導入した。この進展は、特殊相対論が含むローレンツ変換に対する不変性の規範が単に力学法則の満たすべき規範としてあるだけでなく、場の種類、すなわち存在すべき物質の形態をも指定する能力を持つことを実証したといえる。しかし他方では、場の量子論が多体問題としてみるなら無限個の自由度を扱うものであるため、理論のなかに存在する発散の困難に悩まされた。これはまた、相対論と量子論の基本原理に対する信頼をゆるがすものとなったのであるが、電磁相互作用の場の量子論においては、くり込み理論により一応無矛盾に取り扱う定式化が見出された。

一九五十年代に入り、それまで認識されていた素粒子以外の新粒子が次々と発見され、これら種類の増加した素粒子をより基本的な構成子の複合系とみなして分類する試みが始められた。特に、強い相互作用を行うハドロン（陽子・中性子・中間子など）はクォークと呼ばれるようになった構成子の結合系であることが種々の実験で明らかになったが、クォーク自体は決してハドロンの外に取り出せない奇妙な存在であることも明らかになってきた。ハドロン

をクォークの複合系とみなすことは、同時にハドロンのもつ属性のより基本的な属性への分解とそれらの結合則を探る試みでもあった。

ゲージ理論の考えは、一九一五年のアインシュタインの重力に関する一般相対論を電磁気学をも含む統一場理論に拡張を試みる中で、ワイルにより最初に出されたものである。この統一場理論の試みは、その後もアインシュタインやその他の人々により受けつがれたが、成功しなかった。しかし、量子力学の完成をまわって、電磁相互作用はこのゲージ理論の一種であるとの認識に達した。その後、一九五四年になってヤンとミルズがゲージ理論の拡張された形式を提出し、内山は一般相対論による重力もこのゲージ理論の一種であるとの認識に達した。しかし、弱い相互作用や強い相互作用の現象が描き出す性質とゲージ理論から導かれる相互作用の性質との間には余りに大きい差があった。最大の相違は次のことにあった。すなわち、ゲージ理論に基づく力は場の量子論の言葉でいえば質量ゼロの場が媒介するもので、力の到達距離は無限大となる。重力や電磁気力は、確かにこの性質を満たしているために、巨視的世界でも発見できたわけである。それに反し、弱い相互作用と強い相互作用は明らかに近距離においてしか働かない力であり、ゲージ理論の描き出す性質とは矛盾している。

一九五十年代に、固体物理学の分野で超電導の理論が完成した。これは電子多体系の問題であるが、基底状態（エネルギーの最低状態）が対称性の破れている状態にあれば、本来ゲージ理論で記述されている電磁相互作用があたかも質量を持つ粒子により媒介される力のように振舞うことを基礎としていた。南部、キブル、ヒッグスらは、この質量ゼロの粒子に質量を持たせる機構を素粒子の場の理論に応用した。こうして、ゲージ場が対称性の破れた真空において質量をもつ粒子の如くに振舞う機構が存在することがわかったが、そのためには真空に関する重大な概念の変更も必要であることが認識された。

こうした理論的準備があつて、一九六七年に、弱い相互作用と電磁相互作用を統一したかたちでゲージ理論が提唱

された。グラシヨウ、ワインバーグ、サラムの理論と呼ばれている。つづいて一九七三年頃になって、強い相互作用についてのゲージ理論がやはり提唱され、量子色力学と呼ばれるようになった。これらの理論は、その後多くの実験的検証をえて成功している。また、これらのゲージ理論は全てくり込み可能であって、場の量子論の発散の困難を電磁相互作用と同様に回避している。しかし、クォークのハドロンへの閉じ込めなど、まだ基本的な問題も未解決のまま残されている。

こうしたゲージ理論に基づく相互作用理論の進展は、これらの相互作用を統一する試みを現実的なものとした。弱い相互作用と電磁相互作用の統一につづいて、現在、強い相互作用との統一が大統一理論として構築されつつあり、さらにこれに重力をも加えた全ての相互作用の統一理論の試みも出発している。

表 I

巨視物体 (固体, 液体, 気体)

分子
原子原子核
ハドロン

クォーク, レプトン, ゲージボゾン

表 II

レプトン $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$...クォーク $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$...ゲージ
ボゾン 光子, 弱ボゾン
グルーオン, グラビトン

これらの相互作用の統一のためには、基本相互作用をハドロンのレベルにおいてではなく、クォーク間の相互作用として把える必要がある。ハドロン間の力は、基本的な力がハドロンという特別な構造を媒介として発現した力であ

って、決して基本的なものではないのである。歴史的には弱い相互作用も強い相互作用もハドロン間の力として認識されたものであり、クォークのレベルで扱えられた基本相互作用の性質とは著しく異っているが、相互作用の分類としては引きつづきこの名称が用いられている。最後に今日の時点でみた物質の階層的構造をまとめておくと、表Ⅰ・表Ⅱのようになる。

二 局所対称性とゲージ場

ゲージ理論という名称は、ワイルが最初に考えた長さの定規(ゲージ)に関する次のような議論に由来するが、現在ではこの意味でのゲージ理論は役割を果しておらず、定規とは関係ないものになっている。歴史的な経過でこの名称が現在も用いられているのであって、あまりこの名称にとらわれる必要はない。

以下では四次元時空を考えるから、「長さ」といえば空間的長さと同時間的長さを含めた意味である。また、空間の一点と称した場合も四次元時空の一点であり、空間のある場所における時刻の意味である。長さというのは、被測定物と定規で決めた単位長さとの比の意味である。定規の単位を二倍にすれば長さを表わす数値は半分になるように、単位の変換によって、物理量(長さのみならず、時間、空間の次元を含む量)を表わす数値は変化する。一方、物理法則とはこれら物理量間の関係を表わすものであるが、物理量の数値が変化してもこれらの量の間の関係は依然として成立するのではないかと期待される。しかも、物理法則は時空の一点におけるいくつかの量の間の関係、すなわち局所的な関係式なのだから、長さの単位の変換を各点で勝手に行っても、それらにに応じて変わった数値の間に同一の関係が維持されると期待される。こういう期待は、法則というものは本来局所的な関係の表現であり、時空の全域的な構造について言及しなくても法則は記述可能であるという思想に由来する。ゲージ理論とは、この期待を原理として物理法則に要請することをいう。

以上のワイルのゲージ理論を「長さの単位の変換」の代りに種々の変換に対する物理法則の不変性として一般化したものが、今日用いられているゲージ理論である。その一例である荷電状態の変換と電磁場との関係についてみてみる。量子力学によれば、荷電をもつ状態は複素数 ψ で与えられ、それと反対の荷電をもつ状態は ψ の複素共役である ψ^* で与えられる。 ψ はリーマン平面（複素数 $\mathbb{C} \cong \mathbb{R}^2$ ）としたときの x と y を座標軸とする二次元面（の一点で与えられ、 ψ^* は ψ に対して x 軸に関して対称な位置にある。リーマン平面の座標軸を原点のまわりに回転させれば、 ψ の値自体は変化する。これは、ちょうど長さの単位を変えると物理量の値が変わるという事情に対応する。そこでゲージ理論の要請は、時空の各点で ψ を表わすリーマン平面の座標軸を任意に変換しても ψ の入った物理法則は不変にとどまる、となる。この要請はまた、荷電状態を表わすこのリーマン平面が対称的（シンメトリック）であると表現できる。なぜなら、座標軸の方向をどの方向にとっても法則が成立するということは、このリーマン平面にはその法則の立場からみて特別な方向が存在せず。どの方向も対等であるという性質をもつという要請だからである。このように、ある性質に関する局所の変換性に対する物理法則の不変性を、その性質を表現する抽象的な表現空間の性質として把えるために、本来幾何学的なものを形容する対称性という表現が用いられるのである。

この荷電状態の表現空間は時空の各点に付随しているわけであるから、この状態はしばしば時空の各点に内部空間があるという描像で与えられる。物理法則には、ある量の時間や空間に関する微分量が含まれる。すなわち、物理量は完全に局所量ではなく、無限に接近した二点のある量の比較を含んでいる。このため、異った時空点の間での内部空間に表現された量の比較が必要となる。ところが各点で内部空間の座標軸のとり方は勝手なので、各々の内部空間での数値をそのまま比較しても意味がない。ここでどうしても、異なる点の量と同じ点に移動し、同じ内部空間の量にして数値をくらべる必要が生ずる。実はこの「移動」という操作は新しい操作であって、それを司る新しい量の導入が必要となる。この量は、数学では内部空間同士をつなぎ合わせる量という意味で接続係数といい、物理ではこ

れをゲージ場といっている。この量の役割は、各点に独立にあるとした内部空間での物理量の表現の仕方を横断的に関連づけているものといつてよい。例えば、荷電のプラス、マイナスの、異った時空点での規格化といったことである。このゲージ場は、内部空間の座標軸を交換すればそれに応じて変化するが、ゲージ場をも含む物理法則の關係式は、これら変換によつてもその成立が維持されるのである。そして、この荷電の表現空間を規格化するものとしてあるゲージ場が、電磁場にあたるのである。このように局所対称性の要請が電磁場といった物理的実体の存在を導出してくる点に、ゲージ理論の勝れた点がある。

クォークやレプトンの持つ物理的属性は荷電だけではない。それらの性質の一つにフレーバー（香）と呼んでいるものがあり、この属性を表現する内部空間をやはり考えることができる。この属性は、アイソスピンと呼ぶ二つの自由度の状態に分類される。例えばクォークとdクォークを表現する空間を考えれば、各々が複素数だから、複素数を座標とした二次元空間を考えねばならなくなる。そして、この空間の座標軸の回転に対して弱い相互作用の物理法則は不変であるため、われわれは、この内部空間は対称的であるといつてよいわけである。もう一つの例は、クォークのカラー（色）荷に関する対称性である。クォークは全て三つのカラー荷をもっている。これは、いわば電磁相互作用での電荷に対応する、強い相互作用を引きおこす属性である。この属性を表現するには、今度は複素三次元空間が必要となる。そして同様に、この内部空間での座標の変換によつて強い相互作用の法則は不変にとどまるため、このカラー表現空間は対称であると表現する。これらの不変性が局所的に成立することを要請すれば、各々の内部空間を規格化するものとして、ゲージ場の存在が導かれてくる。前のフレーバーに対応したものが弱ボゾン（正確にはこの対称性は電荷の対称性と同時に考えねばならず、弱ボゾンと電磁場〈光子〉とが同時に導かれる）、カラーに対応したものがグルーオンと呼ばれているゲージ場にあたる。

電荷、フレーバー、カラーといった属性は全て時空とは異った次元の属性であつて、時空の各点の内部空間として

考えるのにふさわしいものである。ところが、重力の場合のゲージ理論は、属性自体が時空とからんでいる点で他と異なる特徴をもっている。内部空間とはこの場合各点に付随したミンコウスキー時空となり、座標軸の回転とはローレンツ変換にあたる。そして、ゲージ場は重力場になるわけである。時空の異った点の間である量（今の場合は表現空間自体が時空であるから、ある量というのもその座標軸で表現できるもの）を比較する場合の「移動」は、幾何学で「平行移動」と呼んでいるものに対応する。したがって、言葉をかえれば、ゲージ場は内部空間でのベクトルの平行移動を記述するものだといつてよい。アインシュタインが一般相対論で行ったのは重力法則の幾何学化であったが、いま幾何学の意味を時空とは無関係な表現空間一般の幾何学に拡張するなら、ゲージ理論も一種の幾何学理論であるといえる。

かつて、数学者のクラインは「エルランゲン目録」で、幾何学とは変換群によって不変な性質を研究する学問であると定義した。例えばユークリッド幾何学は、図形を移動させたり回転させたりしても不変な性質である角度とか長さとかを扱う学問なわけである。そして、変換群というものを時空における運動群に固定せず、他の属性を表現する空間における変換群まで拡大すれば、それはゲージ理論となるのである。

以上を総括するに、重要な点は、力（相互作用）というものを媒介する場が局所対称性の要請から導かれてくるということである。このことは、力という現象は第一義的なものではなく、その背後にあるより根本的な原理を既にわれわれは認識しているということである。それは、属性の内部空間の存在とその座標の任意の変換によって法則は不変にとどまるといふゲージ理論の要請が第一義的なものになる。この大域的な絶対性を求めずに法則を定式化しようとする傾向は、近代物理学の進展の中でつねに強まってきたことである。ニュートンは絶対慣性系の存在から出発したが、アインシュタインは一般相対論により局所慣性系を基礎とする定式に変えた。この発想は、時空の大域的構造について思考を停止するのではなく、むしろ大域的構造を局所法則から演繹するかたちで導くことを意図しているの

である。それは必然的に発生論を必要とし、宇宙論となる。このように、局所性の追求は絶対性を排して相対化する傾向と一致するものである。その意味では、一般相対論で出発した局所定式化の試みが他の三つの相互作用においても実現したというのが、ゲージ理論の成功であるともいえる。かつてニュートンの絶対空間をめぐるのは、同時代のライブニッツとの論争や十九世紀末のマッハによる批判があつたが、そこでの論争も、局所性と相対性を対置するものであつたといえよう。

三 対称性による統一とその破れ

相互作用のゲージ理論が到達した地平は力に関する第一原理を明らかにしたことにあるが、そこで導入される内部空間は、各相互作用毎にばらばらな属性が並列的に列挙されたのにとどまっている。全ての相互作用をゲージ理論という同一の規範により把えることに成功したのであるから、次の目標はこれら列挙された内部空間相互の關係をつけ、一つの内部空間に統一してやることである。個々の対称空間を一部として含むより大きな内部空間に対応したゲージ理論が、全ての相互作用を含む統一理論となる。

いま小さな内部空間を合せて大きな内部空間を作るといふことの意味を、実例ではないが、次のような例で考えてみる。空間Aは、荷電状態を表現する際できてきた一次元の複素数空間とする。そして、空間Bは二次元の複素数空間とする。Aではリーマン平面の座標軸の回転に対して相互作用Aは不変、Bでは複素座標軸の回転に対して相互作用Bは不変である。いま空間A、Bを合せて複素数の三次元空間Cを作つたとする。相互作用A、Bを導くには、この空間Cの完全対称性は要求されていない。この空間Cにはある特別な方向が一つあり、その方向に垂直な二次元空間には特別な方向がない対称空間になつておればよい。このように、空間Cをもとにして相互作用AとBを導こうとするなら、空間Cは対称性が部分的に破れていなければならなくなる。

統一理論の着想は、この大きな空間Cも元来は完全対称なのだという前提から出発して、それが何らかの物理的要因によって完全対称性は破れ、部分的な対称性を満たす空間A、Bに分裂したと考える点にある。すなわち、現在われわれが実験で認識する相互作用の姿はこの破れた状態のものであるが、その背後により対称性の高い相互作用の存在を前提とするのである。空間Cがもし完全対称であれば、空間A、Bに存在した変換性に対する不変性以外にも多くの変換、すなわち座標軸の回転の自由度が存在することになる。対称性の破れた場合には、それらの変換はいわば凍結されているわけである。完全対称な空間Cでの変換に対応したゲージ場の種類は、従って、破れた空間A+Bに対応したゲージ場の種類より多いはずである。すなわち力の種類が多いのである。空間Cの対称性を破る物理的要因というのは、相互作用A、B以外の余分の力を凍結さず機構だといってよい。本来存在すべき力のあるものは現在凍結されているが、それらの存在も前提することによって、初めてわれわれは相互作用A、Bを含むより広い一種類の相互作用Cに到達できるのである。

では次に、対称性を破る物理的要因とその対称性が回復する可能性について考えてみる。対称性の破れは、真空の相転移によりおこる。ここで真空とはエネルギーが最低状態の意味であって、何も存在しないという意味での真空ではない。通常、真空についてのこれら二つの定義は一致している。なぜなら、物質場の存在は常にエネルギーを伴い、無の状態がエネルギー的にも最低となるからである。ところが、もし場が自己相互作用すれば、場が有限の値を持つ方がエネルギーが低い状態であるということがおこり得る。この場合には、その場でもって無の真空をびっしりと満たした方がエネルギー最低状態の意味での真空となる。ここで用いている真空とは、後者の意味である。

このようなエネルギー最低状態が、一般に対称性を破った状態となるのである。このような例は、固体などの物性においてしばしば見られる相転移という現象と、概念的には同一の現象である。例えば、小磁石にあたるスピンをもった電子の集団を考える。スピン間の相互作用を考察すると、スピンは整列した方がエネルギーが低い。したがって、

十分温度が低ければ、スピンの整列した状態が実現される。この場合、整列する方向は任意であり、勝手にある方向が選ばれる。温度が十分高ければ、スピンは整列させようとする相互の作用を振り切って方向を変える運動をしており、平均してどの方向にも対等に向いている。そして温度が下がると、方向を変える運動が小さくなってくるため相互に整列させようとする力が相対的に優越してきて、全体が一せいに整列することになる。このような変化を相転移と呼んでいる。一般に相転移によって対称性が破れ、秩序が発生する。スピン系の例でいえば、相転移していなければ、どの方向も対等であったものが、相転移の結果ある方向が特殊化されるため方向についての対称性が破れ、その結果としてスピンの整列したという秩序が発生したのである。この例では内部空間における対称性というよりも時空そのものの対称性の破れであったが、固体物理でも相転移の結果内部空間の対称性が破れる例がある。それは例えば超電導状態への相転移で、この場合には、電磁場をゲージ場として生み出す内部空間の対称性が破れる。

ともかく、エネルギー最低状態の意味での真空では一般に内部空間の対称性が破れ、いくつかのゲージ場による相互作用は凍結される。凍結とは完全な意味での禁止ではなく、力を媒介するゲージ場が質量を持つてしまうため、非常な高エネルギーにおいてのみその作用が顕著になるという意味である。あるいは、力の到達距離が質量が大きいと小さくなり、近距離でしかその力は働かなくなるといってもよい。高エネルギーにすると、近距離に集中して存在の確率を増してやれることである。

以上のような対称性の統一（合併）と真空の相転移という概念を組合せて試みられている相互作用の統一理論の現状は、次のようなものである。まず、弱い相互作用と電磁相互作用を含む対称性が破れて質量を持つていたものが弱ボゾン場であり、これはいわば凍結された相互作用であるが、その質量が余り大きくないため、十分実験で見える力となっているのである。次に、これら二つの相互作用に加えて強い相互作用をも統一する、より大きな内部空間を見出す試みが現在されている。これを大統一理論という。この試みではクォークとレプトンを同等のものとして扱

うため、両者の相互転化が可能になる。そして対称性の破れは、この相互転化を凍結させるかたちでおこっておれば、現実と合うことになる。勿論この凍結は完全な禁止を意味しないから、そうした相互作用の存在の検出は原理的に可能であり、実際、それは陽子の崩壊としてあらわれることが理論的に予言される。そして現在、これまで絶対安定と思われていた陽子の寿命を測定する実験が始められている。

大統一理論はまだ重力を含まないもので、全ての力の統一理論ではない。重力の対称性は他の三つの力の対称性と性格が違っていることは前にも指摘したが、そのために重力を含む統一理論には質的に新しい概念が要求されている。電荷、アイソスピン、カラーといった属性と時空の属性との統一がここでは問題となる。また、クォーク、レプトンを記述するスピノール場とゲージボソンを記述するベクトル場を統一する試みもあり、これは超重力理論と呼ばれている。また、時空の空間と内部空間を合併した超空間の考え方もある。いずれにせよ、現代の統一理論建設の観点からいうと重力は異質であり、これの統一には大統一理論までとは異なる新しい概念の導入が必要とされているのである。

四 真空の相転移と宇宙論

ゲージ理論に基づく統一理論の観点よりすれば、現在の真空は対称性を破っている真空、すなわち相転移をおこして秩序の発生している状態である。この状態は、宇宙のどの場所においても、宇宙のどの時代においても不動のものなのであろうか？ もし不動のものであるなら、破れていない状態などというのは決して現実のものではないことになる。統一の展望は、現在の状態を相対化することによってのみひらけるのである。にも拘らず、この宇宙においてはその相対化された状態しかなく、それが絶対的存在となるのでは、統一理論の検証を危くするものである。

現在まで観測されている宇宙の領域は全てについて平均的には一様であり、場所的な意味で対称性の回復している真空などというものが実現している領域はないと考えられる。しかし、われわれの宇宙は膨張宇宙であり、過去にさ

かのばれば、高温、高密の状態が存在していたことになる。このように、宇宙の過去では物質は全て高エネルギーで相互作用していたと考えられる。このことについては、いくつかの実験的検証が得られている。例えば、一九六五年に発見された絶対温度で三度の宇宙黒体輻射は、宇宙全体が一万度ぐらいの時代があったことの直接的証拠であり、また、現在のヘリウム元素の組成比は、宇宙が十億度の高温であったことの証拠となっている。理論によれば、温度は無限大より膨張により低下してきたと考えられ、十億度まですでに確かめられておれば、それ以前も理論を基礎にして外挿して考えることは非常に自然なものと考えてよい。この予想のもとに考えると、宇宙の過去では対称性の回復した真空がかつて実現していたことになる。弱い相互作用と電磁相互作用が一体となった内部空間が対称性を回復する温度は、一千万の一億倍（ 10^{15} ）度ぐらいである。また、大統一理論の対称性が回復するのは、この温度のさらに十倍ぐらいの温度（ 10^{28} ）においてである。

さてここで「回復」するといったが、宇宙の時間的経過から考えれば、対称な内部空間であったものが温度がある値まで下がると相転移をおこして、今日の破れた状態になってきたわけである。この相転移で破れる仕方は色々あったわけであるが、宇宙は自発的に、偶然性が介入してこのように破れてきたといつてよい。このような相転移により、はじめて相互作用は分化し、区別が生ずるのである。このような区別の形式は、常に対称性を破る秩序の形成と一体のものである。現状の多様性を、単一の完全対称な空間の部分的な対称性しか満たさないいくつかの部分空間に分裂することにより把えようとするのが、統一理論の試みなのである。

このように、われわれの真空は単に概念的に相対化されただけでなく、膨張宇宙論によれば、歴史的にも特殊化されたわけである。エネルギー最低の真空状態は宇宙の時間的経過とともに変化してきたものであり、さらに変化していくものかも知れないのである。そして、それに応じて相互作用の観点からみてそれまで同一であったものにも区別が生じ、相互作用の種類も分化する。一言でいうなら、物理法則は変化することになり、現在の物理法則は、現時点

という宇宙の特殊な状態に対応したものととして、相対化されるのである。

このような観点を補強する実証的証拠もいくつか現在論じられている。例えば、現在の宇宙に反物質が存在しないことの原因は、大統一理論の対称性が回復する時代まで宇宙をさかのぼれば可能となる。その他にも、銀河などの天体系の形成自体の遠因もこうした極微の世界の現象と関係しているかも知れないと考えられている。こうした考えによれば、現在観測されている百数十億光年の空間がわずか一センチ・メートルの大きさであった時代までさかのぼることになるのである。陽子の大きさなどより十桁も小さいところでの出来事が、現在における巨大な天体系を形成した原因なのかも知れないのである。極微と極大とは、過去にさかのぼると無関係ではなくなるのである。

法則の局所的定式化を一步すすめたゲージ理論は、相互作用について一つの統一的描像を与えたが、そこで想定された対称性は、逆に現在の法則の相対性をあぶりだしているといえる。そしてこの相対性は歴史的なものであり、物理法則といえども普遍的でなく、われわれの宇宙という特殊な環境を契機に発現している一形態であるとの認識を持つことの重要性を示唆しているといえる。物理学と宇宙論における最近におけるこのような試みは未だ完全に実証されたわけではないが、一つの有力な理論として展開されているものであり、それは宇宙における物質の多様性の起源論と法則の歴史性について、少なからず影響をもつものと考えられる。

(了)

(筆者 さとう・ふみたか 京都大学基礎物理学研究所〔宇宙論〕教授)

Unified Gauge Theory and Relativism on the Law of Forces

by Fumitaka Sato

Professor of Cosmology,
Research Institute for Fundamental Physics,
Kyoto University

According to the recent research on the fundamental forces among elementary particles, all the four forces, those include gravitational, electromagnetic, weak and strong interactions, are described by the same theoretical principle called gauge theory. The gauge theory is based on a local invariance of the law for transformations of the coordinates in the internal space which describe a property of particle. This theory presumes a local nature of the law without introducing any global structure over the space-time. Like the abolishment of the Newton's absolute space by the general relativity of Einstein, the attempt to describe the law only by local terms has got another success.

Unification of the four fundamental forces has been attempted through combining the internal spaces into a larger symmetric space. The law of forces which we see now is derived from this unified interaction through spontaneous symmetry breakdown in the internal space. This viewpoint reveals a relative nature of the present law.

The symmetry breakdown is caused by a transition of the physical vacuum. According to the big bang cosmology, the early stage of the universe was in an extreme high temperature. In such state, the symmetry of the internal space had been restored and the law of forces would be different from the present one. Thus, the present law of forces is a very specialized form corresponding to our symmetry-broken

vacuum rather than a universal form. We may say our law of forces as a historical outcome of the evolving universe.

Über die praktische Notwendigkeit des höchsten Guts bei Kant

von Takeshi Kitaoka

Doktorand für Philosophie an der Universität Kyoto:
z. Z. an der Univ. Bonn (BRD) als DAAD-Stipendiat.

Die eigentliche Metaphysik Kants können wir der von Kant selbst verfolgten Geschichte der Metaphysik seit Leibniz und Wolff gemäß als „drittes Stadium“ derselben Wissenschaft, mithin als „praktisch-dogmatischen Überschnitt zum Übersinnlichen“ kennzeichnen. Das ist der Versuch, in bezug auf die Gegenstände der überlieferten besonderen Metaphysik, d. h. in bezug auf Gott, Freiheit und Unsterblichkeit, reine Vernunftkenntnisse a priori und synthetisch aus einem Vernunftprinzip abzuleiten.

Dieser „Überschnitt“ fängt zunächst in der Analytik der praktischen Vernunft damit an, die Realität der transzendentalen Freiheit in den endlichen vernünftigen Wesen aus der *ratio cognoscendi* des moralischen Gesetzes zu erreichen. Indem eben dadurch die Wirklichkeit der intelligiblen Welt, d. h. der Welt der Dinge an sich, aufgeschlossen wird, wird zugleich auch der Horizont erschlossen, wo die transzendentalen Prädikationen sich in bezug auf die anderen Ideen entfalten können. Der „Überschnitt“ zu den zwei verschiedenartigen Gegenständen wird nämlich in der Dialektik der praktischen Vernunft in der