

相対性理論の進展の概略

A Brief Outline of the Development of the Theory of Relativity

筆者 A. Einstein 教授

(英訳 Robert W. Lawson 博士)

一連の考え方の進展を、できるだけ簡潔な形で、なおかつ発展の連続性を完全に保ちながら俯瞰するというのは、どこか抗し難い魅力がある。私たちはそれを、相対性理論について試み、すべての進歩は、小さな、ほとんど自明な思考の積み重ねからなっていることを明らかにしたい。

発展の全貌はファラデーとマクスウェルの考えに端を発し、その影響は最後までおよぶ。すなわち、あらゆる物理過程は（遠隔作用ではなく）近接作用によるのであり、数学的に言えば、偏微分方程式で表わされる。マクスウェルはこれを、真空の変位電流の磁気効果の概念、ならびに、誘導により生じた電気力学場と静電場の性質が同一であるとの仮定に基づいて、静止物体の電磁過程に適用することに成功した。

電気力学の動く物体への拡張は、マクスウェルの大勢の後継者たちの肩にかかることとなった。H. ヘルツは、重さのある物体とよく似た物理的特性を空っぽの空間（エーテル）に与えることにより、この問題の解決を試みた。とりわけ、エーテルは重みのある物体と同じように、どの点においても決まった速度をもつにちがいない、と。静止物体のように、電磁気あるいは磁電気の誘導は、それぞれ、電気または磁気の流量変化率によって決まる。ただし、そのような変化の速度は物体と共に動く面積要素について語られているのだという条件付きで。しかし、ヘルツの理論は、流れる液体中を伝搬する光についてのフィゾーの基礎的な実験に反することとなる。マクスウェル理論の、最も明白と思われた動く物体の場合への拡張は、実験の諸結果とは矛盾してしまったのである。

この時点で、H. A. ローレンツが救いの手を差し伸べ

た。物質の原子論に絶対の信頼をおいていたローレンツは、原子を、連続的な電磁場の座とみなすことなどできないと感じた。彼は、電磁場は、連続的と思われていたエーテルの条件ではないだろうかと考えた。ローレンツは、力学的および物理学的な観点の両面から、エーテルは本質的に物質とは無関係だと考えていた。つまり、エーテルは物質の運動に関与しておらず、エーテルと物質の相互関係が想定されるのは、物質が、付着する電荷の運び手とみなされる場合だけだと考えていた。ローレンツの理論の大きな価値は、静止物体と動く物体の電気力学全体が、空っぽの空間におけるマクスウェルの方程式に帰せられるという事実にある。この理論は、方法論から見てもヘルツの理論を凌ぐだけでなく、H. A. ローレンツはまた、理論の助けを借りて見事に実験事実の説明に成功したのだ。

この理論は、根本的に重要なある一点においてのみ、不十分なように思われる。どうやら、動いている他のすべての座標系と比べて、特殊な運動状態（エーテルに対して静止状態）にある、一つの座標系だけを優先させているようなのだ。この点で、この理論は古典力学と真っ向から対立しているように思われる。古典力学では、互いに一様に動いているすべての慣性系は、同等な座標系として認められている（特殊相対性原理）。ちなみに、電気力学の領域におけるあらゆる経験（特にマイケルソンの実験）も、あらゆる慣性系が同等であるという考えを裏付けるもので、特殊相対性原理を支持している。

特殊相対性理論は、その根本的な性質のために容認できないと思われてしまう困難さのお陰で生まれた。この理論は、次の疑問に対する答えから始まる：特殊相対性

原理は、本当に、空っぽの空間におけるマクスウェルの場の理論と矛盾するのだろうか？ この疑問に対する答えは、イエスであるかのように見える。なぜならば、方程式が一つの座標系 K で成り立つとして、もし、どこから見ても容易に立証できる変換方程式と一致する新しい座標系 K' を導入すれば、マクスウェルの方程式は、新しい座標 (x', y', z', t') ではもはや成り立たなくなるからだ。

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - vt \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t \end{aligned} \right\} \text{ {ガリレオ変換}}$$

しかし、見かけに騙されてはならない。時空の物理的な重要性についてさらに綿密な分析が行なわれるにしたがって、ガリレオ変換があいまいな仮定の上に成り立っていることが明らかになったのだ。特に、何かが同時であるということは、使われた座標系の運動状態から独立して意味をもつ、と仮定されている。真空の場の方程式は、次のような変換式を使用すると、特殊相対性原理を満たすことがわかった。

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{aligned} \right\} \text{ {ローレンツ変換}}$$

この方程式で、 x, y, z は、座標系に対して静止した物差しで測った座標を表している。そして、 t は、静止状態にある、調整済みの同じ造りの時計で測った時間を示している。

ところで、特殊相対性原理が成り立つためには、物理学のあらゆる方程式が、一つの慣性系から別の慣性系への変換に際して、その恰好を変えない必要がある。その際、その変化を計算するためにローレンツ変換が利用される。数学の言葉を使うのであれば、物理法則をあらわすあらゆる方程式は、ローレンツ変換に関して共変的でなければならない。というわけで、方法面から見るかぎり、特殊相対性原理は、第二種の永久運動の不可能性に関するカルノーの原理に匹敵する。なぜならば、後者（カルノーの理論）のように、特殊相対性原理はあらゆる自然法則が満たすべき一般条件を私たちに与えてくれるからだ。

後に、H. ミンコフスキーが、この共変条件について、きわめて優美で示唆に富む表式を発見した。それは、三次元のユークリッド幾何学と物理学の時空連続体の形式的な関連をあらわにしている。

このことから、物理学の方程式での役割からすれば、物理学的な意味合いは別として、時間は空間座標と同等だといえる（実数との関係は別だが）。この観点から、物理学はいわば四次元のユークリッド幾何学、いや、もっと正確には四次元のユークリッド連続体の静力学なのである。

特殊相対性理論は、二つの主な段階を経てつくられる。一つは、時空の「計り方」をマクスウェル電気力学に合わせる作業であり、もう一つは、変更された時空の「計

り方」に他分野の物理学を合わせる作業である。初めの過程からは、同時刻の相対性、運動が測定用の物差しと時計へ与える影響、運動学の修正、そして特に、速度の新しい加法定理が出てくる。第二の過程からは、速度が大きい場合のニュートンの運動法則の修正、ならびに、慣性質量の性質についての基本的に重要な情報がもたらされる。

慣性は、物質の基本的な性質ではない。実際、より基本的な属性に遡ることのできない量ではなく、エネルギーの一つの性質にすぎないことがわかった。もし、 E というエネルギー量が、ある物体に与えられるとすれば、その物体の慣性質量は、 E/c^2 の大きさだけ増大する。ここで、 c は真空中の光速である。一方、質量 m の物体は、 mc^2 という量のエネルギーの貯蔵庫と考えられる。

やがて、自然なやり方で重力の科学を特殊相対性理論

と結びつけるのは不可能であることがわかった。これに関して、私は重力には基本的な性質があり、それが重力を電磁力と区別している事実に気づいて、驚きを隠せなかった。あらゆる物体は、重力場のなかで同じ加速度で落下する。あるいは、同じ事実の別の言い方にすぎないが、ある物体の重力質量と慣性質量は互いに数値的に等しい。この数値的な等しさから、その性質も同じであることが予想される。重力と慣性は同じものなのだろうか？ この疑問が、直接、一般相対性理論へとつながる。たとえば、地球に対して静止しているあらゆる物体に作用する遠心力を、「実在」する重力場か、そうした場の一部だとみなせば、地球は回転していない、と考えることはできないだろうか？ もし、この考えが実行できれば、本当に重力と慣性の同一性を立証できるだろう。なぜならば、回転に関与しない系から見て慣性とみなされ

三次元のユークリッド幾何学

空間の隣接した2点に対応して、尺度となる数値(距離 ds) がある。それは、次の式である。

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$$

それは、選ばれた座標系と無関係で、単位長さの物差しを使って測ることができる。

許される変換は、 ds^2 の表式を不変に保つ。すなわち、線形直交変換が許される。

そのような変換により、ユークリッド幾何学の法則は不変である。

特殊相対性理論

時空の隣接した2点(点事象)に対応して、尺度となる数値(距離 ds)がある。それは、次の式である。

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

それは、選ばれた慣性系と無関係で、単位長さの物差しと標準時計で測られる。 x_1, x_2, x_3 は、ここでは直交座標で、一方、 $x_4 = \sqrt{-1} ct$ は、時間に虚数単位と光速を掛けたもの。

許される変換は、 ds^2 の表式を不変に保つ。すなわち、 x_1, x_2, x_3, x_4 の実数性が保たれるような線形直交な置き換えが許される。そのような置き換えがローレンツ変換である。

そのような変換により、物理学の法則は不変である。

る性質が、回転に係わる系との関係では重力と解釈できるからだ。ニュートンによれば、こうした解釈は不可能である。ニュートンの法則では、遠心力の場が物質によって創られるとは考えられず、またニュートンの理論では、「コリオリ場」の型の「実在」する場は許されないからだ。しかし、もしかしたらニュートンの場の理論は、「回転」座標系を含む場に適合する、別の理論に置き換えられるのではないか？ 慣性と重力の質量が同じものだという私の信念は、心の中で、この解釈は正しいのだという、絶対的な確信の感触にまで高まった。この点について私は、次のような考えに刺激された。私たちは「みかけ」の場をよく知っているが、それは、慣性系に対して任意の運動をしている座標系において成り立つ。そのような特殊な場の助けを借りて私たちは、重力場がすべからず満たすべき法則を研究できるにちがいない。この点について、私たちは、量られる質量が、場を創る決定因数になるか、あるいは、特殊相対性理論の基本的な結果によるのであれば、エネルギー密度（テンソルの変換性をもつ量）が場をつくるという事実を考慮すべきだろう。

他方では、特殊相対性理論の計量的な結果に基づく考察から、ユークリッド計量は加速された座標系に関してはもはや妥当ではありえないという結論に至る。このことが理論の進歩を数年も滞らせたのであるが、ユークリッド計量が、小さい領域にしかあてはまらないのだということがわかって、この大いなる困難は解消された。結果として、これまで特殊相対性理論で物理学的に定義されてきた大きさ m は、一般相対性理論においても、その重要性を保ち続けることとなった。しかし、座標そのものは、もはや直接的な重要性を失い、物理学的な意味合いを持たない、時空の点を数えるだけが目的の単なる数値へと成り下がった。つまり、一般相対性理論では、座標は、表面の理論におけるガウスの座標と同じ機能を果たしている。以上に述べたことから、こうした一般的な座標では、測定できる量の m は次の形式で表示できなければならない。

$$ds^2 = \sum_{uv} g_{uv} dx_u dx_v$$

ここで、記号 g_{uv} は、時空座標の関数である。上記のことから、また、因数 g_{uv} は一方では時空の計量を決定し、他方では質点の力学的なふるまいを司る重力場を決定することがわかる。

重力法の法則は、主に次の条件から決定される：第一に、それは、座標系の選び方によらず成り立たなければならない。第二に、それは、物質のエネルギー・テンソルにより決定されなければならない。第三に、それは、二階より高い因数 g_{uv} の微分係数を含んではならず、線形でなければならない。このようにして、一つの法則が得られる。それは、ニュートンの法則と基本的には異なるものの、それから導かれた近似が後者に正確に対応しているので、その理論が、実験で明白に検証できそうな基準は、数えるほどしか存在しない。

次にあげるのが、今のところ解決が待ち望まれる、重要な疑問のいくつかである。電気と重力の場は、本当に性質が違いすぎて、両者を帰着させることのできる形式的な単位など存在しないのか？ 重力場は、物体の構成に関与しているのか、そして、原子核内の連続体は、認めるほどに非ユークリッドなのか？ 最後の疑問は、宇宙論の問題に関係している。慣性は、遠くの質量との相互作用まで追跡されるべきか？ そして、これに関連して：宇宙の空間的な広がりには有限なのか？ 私の見解がエディントンと異なるのは、まさにこの点なのだ。マッハと同様、肯定的な答えが避けがたいと私は感じているが、当面の間、何も証明されないだろう。大規模な恒星系の力学的な研究が、宇宙の広大な領域に対するニュートンの重力法則の妥当性の限界の観点から実施されるまで、最終的に、この魅惑的な疑問の数々を解決するための確固たる基盤を得ることは、おそらく不可能だろう。 ■

※(原文は1921年の*Nature* vol.106に掲載された)