

場の旧及び新理論

アインシュタイン著
石原純訳

空間の実在性

物理学がニュートンの開拓した路を進んで来た間に、物理的実在に関する次の概念はしっかりと保存されていた。即ち、物体は実在であって、之が受ける変化は単に我々が空間中で連動と考えるようなものだけであると云うこと、連動、空間及び時間は実在の形式であると云うこと。空間の物理的実在性を拒否する企画はどれも惰性法則の面前で潰されてしまう。なぜなら加速度が実在的であるとせられる以上、物体が加速せられる舞台として見なされる空間も亦実在的でなければならないからである。

力に関するニュートンの思想

ニュートンはこの事を完全な明敏さで見做して、そのために空間を「絶対的」と名づけた。彼の理論的体系のなかには、独立の実在性を構成する第三の要素があった。即ち質点の間にはたらく力であって、それは質点の位置だけ関係すると考えられた。質点間の^{これら}之等の力は無条件で質点それ自身に伴うものであり、そして不変の法則に従って空間的に分布されていると見做されたのであった。

重さある物体と電気

19世紀の物理学は物体の二種類が存在すると考えた。即ち重さある物体と電気とである。重さある物質の粒子は互いにニュートンの法則に従う万有引力で作用するし、電氣的物質の粒子はクーロンの力、即ち距離の二乗に逆比例する力で作用すると考えられた。重さある粒子と電氣的粒子との間に作用する力の性質に関しては一定の見解が何も存しなかった。

空間とニュートンの光粒子

単なる空間は物理的変化や過程を荷なう者としては許容されなかった。それは単に物質現象の劇が演ぜられる舞台であったと云ってもよかろう。だからニュートンは光が真空中で伝播すると云う事実を論ずるために光もやはり特殊な力で重さある物体と作用し合うような質点から出来ていると云う仮説をつくった。この意味でニュートンの見解は物質の他の形式の粒子とはよほど異った性質をもっていたのは確かであるが、ともかく物質粒子の第三の型を含んでいた。光粒子は実際に形成されたり消滅したりすることの可能性をもっていた、且つ十八世紀に於てさえも、既に光が真空中を一定の速度で進むことが実験から明らかに知られていた。この事実は云うまでもなくニュートンの理論的体系には適合しないものである。なぜ地球上で光粒子は勝手な速さで空間中を動くことができないかが疑われるからである。

光の波動論と空間に対するその関係

それ故、ニュートンの権威ある且つ論理的の知能で築き上げられた、この理論的体系が光の理論によってまさしく投げ棄てられねばならなかったことは驚くを要しない。この光の理論と云うのは、ホイゲンス - ヤング - フレネルによって持ち来された波動論であって、干渉及び廻折の事実が頑固に執着していた物理学者の上に之を強要したのであった、随分たくさん現象がこの理論を用いるお蔭で計算されるようになったり、細微な点まで予想されたりしたことは、物理学者を喜ばせ、彪大な学術的な書物をも充たさせるようになった。識者でさえも、そこにはこの理論が永遠なる神の立像のなかに罅隙をつくっていたことには気付かなかったのも、何も驚くことはない。だが、実際にこの理論は、どんな実在も空間に於ける粒子の運動として思考され得るものであると云う見解を覆したのであった。何と云っても光波は真空空間の波動状態以外の何ものでもなかった。従って空間は物理的出来事に対する単なる舞台としての受動的の役目を失ってしまった。でも、エーテルの仮説はその罅隙を彌縫して眼立たないようにしたのである。

エーテルと空間との同一性

エーテルはすべてのものを貫通し、空間全体を充たすものとして発明されたわけで、物質の新らしい種類であると見做された。だがこのために空間それ自身が生命づけられたのだと云うことは、まるで見落されていた。併しこの関係は、エーテルが何処でも取り除けられないような物質の一種類であると考えられたことからして、既に明瞭なのである。つまりそれは或る程度まで空間それ自身と同一なのであって、必然的に空間と共に与えられた何ものかである。かようにして光は、云わば、空間それ自身によって行われる一つの力学的過程であると見られるようになった。場の理論は、最初はニュートン物理学から正当な嬰兒として生れたようにごまかされていたものの、それは実は私生児としてあらわれたのであった。

場に関するファラディの卓見

この変化を十分に達見するには、非常な独創力を要し、その眼光が鋭く紙背にまで徹し、徒らに公式に迷わされないものでなければならなかった。ファラディはこの恵まれ精神の持ち主であった。彼の直覚は先ず遠距離に直接に作用する力の思想に反感を抱き、之がすべての簡単な観察にも背くように見えることを疑問とした。若し一つの帯電体が第二の物体を牽引し又は反発するならば、之は彼に於ては第一から第二の物体に及ぼす直接作用によって起されるのでなしに、中間的作用を経てゆくものであった。第一の物は之を取り囲む空間を感子状態に持ち来すのであって、この状態自身ももっと離れた空間の部分にまで拡がり、或る空間時間的法則に従って伝播するのである。空間のこの状態が「電気場」と呼ばれた。第二の物体は第一のものの場に在るために力を受けるのであり、又逆に第一は第二のものの場にあると云う理由で力を受ける。「場」と云うのは、遠距離作用の思想を不必要にするような一つの概念的装置に外ならない。ファラディは尚お大胆にも、適当な事情のもとでは場が之を生ずる物体から自分だけ離れて、自由の場として空間を通して飛び去ることもできると考えたのであった。これが光についての彼の解釈であった。

電磁気と光との間の橋梁

その後マックスウェルは驚くべき公式群を発見した。今日我々にはそれはずっと簡単に見えるが、ともかくその揚句、電磁気の理論と光の理論との間の橋梁が

架せられ、光は速く振動する電磁場から成り立っているとせられた。

空間の物理的状態自身が最後の实在である

ヘルツが19世紀の第80年代に電磁波の存在を確め、之と光との同一性をその驚くべき実験によって示してから後は、物理学に於ける偉大な知的革命が漸次完成されて来た。空間それ自身の物理的状態こそは最後の物理的实在であったのだと云う思想に、民衆は徐々に慣らされて行った。殊にローレンツが彼の透徹した理論的研究のなかで、重さある物体の内部に於てさえも電磁場は物質の状態として見らるべきものではなく、本質的に真空空間の状態として見られねばならないこと、そしてそのなかに物質的なる原子がまばらに分布していると考えなければならぬことを示したのは、大いに与^{あず}かって力がある。

二元論に対する不満足とその解決

世紀が変わってから物理学者は、根本的な物理的实在の二種類、即ち一方では場、他方では物質的粒子、を許容する理論の二元主義に対して不満足を感じ始めた。そこで物質的粒子を場に於ける構造組織、即ち場が物質に集中した場処としてあらわそうとする企画の起ったのは、極めて当然である。場の理論を基礎として粒子をかようにあらわすことができさえすれば、それはともかくも大成功であったにちがいないが、然し科学上^{しか}どんなに努力してもそれは成就しなかった。そればかりではなく、この二元主義は今日では10年前に於ける有様よりも、ずっと尖鋭になり、且つよほど煩雑になっていると云わなければならない。この事實は量子論に於ける発展と非常な勢いで連結されている。そこでは連続体の理論(場の理論)と要素的構成並びに過程を全く不連続的に解釈しようとする理論とが何れも至上権を握ろうとして戦っている。

場の理論の改良

我々はこちらでは分子論に関する問題を論じようとはしない。ただ今世紀間に場の理論の上になされた改良を述べるだけにしよう。

それはすべて、相対性理論から起るのであるが、この理論は最近の6ヶ月間に発展の第三期に入った。我々は簡単に^{これら}之等の三期間に属する主要な見解と、場の

理論への関係とを調べよう。

第一期の相対性理論

第一期即ち特殊相対性理論の根源は主として電磁場に関するマックスウェルの理論に帰せられる。之と次の実験的事実、即ち「絶対静止」と名づけられるような状態を物理的に運動と区別することとはできないと云う事実とを結合して、空間及び時間に関する新しい理論が起ったのであった。能く知られている通りに、この理論は空間的に離れた二つの出来事の同時性の概念の絶対的性質を捨ててしまった。或る哲学者たちが今でも尚お贅沢な誇りをもって絶望的な勇敢さで之を拒否していることもよく知られているが、それはこの単純な理論に反抗する空虚な言葉に過ぎない。

相対性理論の本質的使命

他方で、特殊相対性理論がその両親たるマックスウェルの電磁場の理論に向って捧げた奉仕は、比較的認められていない。当時までは、マックスウェルの方程式によって電気及び磁気の二様の場の中に密接な因果的關係のあることは示されてはいたが、それでもこの二つの型の場は別々に存在すると認められていた。ところが特殊相対性理論は、この因果的關係がその二様の型の本質的な同一性に相応するものであるのを示した。実際に、空間の同じ状態でも一つの坐標系では純粹の磁気の場に見え、之と相対的に運動する他の坐標系では同時に電気場としてあらわれる。又その逆も同様である。異なった概念間の同一性をあらわすこのような関係こそ、相対性理論の特徴なのであって、このお蔭で場の理論の独立な仮説や概念の数も減じ、その論理的な自己包容を高めるのである。例えば特殊理論は亦惰性的質量及びエネルギーなる概念の根本的同一性をも示した。之はすべて一般的に知られていることであるが、ここでは只、理論の全発展を左右する一元的傾向を強調するために記したのである。

第二期の相対性理論

我々は今、相対性理論の発展の第二期、謂わゆる一般相対性理論に転じよう。この理論もやはり、当時までは満足な解釈を得なかつたところの次の実験的事実か

ら出発している。即ち惰性的及び重力的質量の相等しいこと、云い換えれば、ガリレイ及びニュートン時代から知られていたように、地球の重力の場ではすべての物体が等しい加速度で落ちると云う事実である。この理論は特殊理論を基礎として用い、同時に之を変更している。物理学的に特権づけられる運動状態は全然存在しないと云う認識、——即ち単に速度ばかりでなく、加速度も亦絶対的意味をもたないと云うこと——が理論の出発点を形づくる。その上でそれは空間及び時間概念について、特殊理論に含まれていたよりも、もっとずっと深奥な変更を余儀なくする。なぜなら、特殊理論は空間及び時間を見えない四次元の連続体に融合させるように我々を強要したとは云っても、まだ連続体のユークリッド的性質はこの理論では根本的にはその儘で残されていた。けれども一般相対性理論では、我々の空間時間連続体のユークリッド的性質は捨てられてしまって、之に謂わゆるリーマン空間の性質が与えられねばならなかったからである。之等の術語が何を意味するかを理解させようとする前に、我々はこの理論が何を成し遂げたかを想い起そう。

一般相対性理論の功績

それは万有引力の精確な場の理論を成就し、之を連続体の計量的性質と完全に決定的な関係に持ち来した。万有引力の理論はその時まではニュートン以上に何の進歩も示さなかったが、それはかようにしてファラデーの場の概念のなかに必然的方法で、つまり場の法則の選択に於て少しの曖昧さも任意さもなしに、持ち来されたのであった。同時に万有引力と惰性とは本質的な同一性のものに融合してしまつた。この理論の証明が近年万有引力の場に於ける光線の屈曲の測定や、二連星の分光学的研究によってなされたことは、よく知られている。

相対性理論の方法論的特質

一般相対性理論や、更に進んではこの理論の新しい第三期たる一元的の場の理論を他の物理学的理論と特に区別する特質は、形式的推理の程度、僅小な経験的基礎、理論的構成に於ける大胆さ、最後に自然法則の神秘の一様性並びに之の推理的知能への適応性に対する根本的信頼である。この特色が実在論や実証論に傾く物理学者には却って弱点と見えるのであるが、併し推理的な数学的の心に対し

ては取り分けて魅惑的であり、寧ろ心酔的でさえもある。マイエルソンは知識の理論に関する彼の輝かしい研究のなかで、丁度相対性理論学者の知能状態と、デカルトのそれや、若しくはヘーゲルのそれとの比較を引いているが、そこには必ずしも物理学者が解するような非難が暗示されているのではない。併し何れにしても、終局に於ては経験が唯一の正当な批判である。

理論の缺点

ところでこの際に理論の缺点について一事を云っておきたい。科学的知識に於ける進歩が持ち来す結果から見ると、一方で理論の根本的仮説と、他方で直接に観測された事実との間の距離や罅隙を大きくするような犠牲を払わなくては、形式的単純性を増すわけにゆかない。理論はどうしてもだんだんに帰納的方法から演繹的方法に移ってゆくように余儀なくされる。何んな科学的理論に対しても下されなければならない最も大切な命令、——即ちそれが事実と適合するということが、——だけはいつも残存するであろう。

課せられた問題

今や我々は、一般相対性理論並びに新らしい一元的の場の理論にまで導いたところの数学的組織に於て用いられた方法の主意を読者に提供する困難な仕事に到達する。

一般の問題は斯うである。四次元連続体に帰せられ得る最も簡単な形式的組織はどんなものであるか、又之等の組織を支配すると考えることのできる最も簡単な法則は何であるか。その上で我々は之等の形式的組織のなかに物理的の場の数学的表現を探し、且つこの組織を支配する簡単な法則のなかに物理学の場の法則——既に以前の研究から或る近似さに於て知られている——を探し出すのである。

坐標概念の説明

この関係に於て用いられる概念は、空間及び時間の四次元的連続体に於けると同様に、二次元的連続体（表面）に於て丁度云いあらわすことができる。一片の紙にミリメートルの方罫が引かれていると想像せよ。紙面を二次元的であると私が云うとするならば、それは何を意味しているのであるか。若し任意の点Pを紙

上に印しづけるならば、その位置は二つの数を用いて決定することができる。例えば最下の左の隅から出発して指標を右の方に動かし、P点を通る鉛直線の下端まで到達させる。之を行う間に x 本の鉛直（ミリメートル）線の下端を通り過ぎたと想像する。次にP点に達するまでに指標が y 本の水平線を通過して動くとする。P点はそこで x, y なる数（坐標）によって曖昧なしに記述される。罫を引いたミリメートル紙の代りに、引き伸ばされ又は歪められた紙片を用いたとしても、やはり同様の決定を行うことはできるであろう。けれどもこの場合には線はもはや水平でもなければ、鉛直でもなく、尚おまた直線^なでさえもないであろう。そうすれば、同じ点^{もちろん}が勿論異った数に所属するようになるであろうが、それでも二つの数（ガウス坐標）によって一点を決定する可能性はやはり残存する。その外、若しP及びQがお互いに接近している二点であるなら、それらの坐標は極^{ごく}僅^{わずか}しか異なっていない。一つの点がこの様にして二つの数で記述せられるときに、我々は二次元連続体（表面）と云う言葉を用いるのである。

リーマン計量法

そこで二つの隣った点P, Qを表面の上に考え、之と少し離れて他の一对の点P', Q'を考える。PQなる距離がP'Q'なる距離と等しいと云うのはどんな意味をもつであろうか。この言いあらわしがはっきりした意味をもつのは、我々が小さな物^{ものさし}指をもって一方の一对の点から他方の一对の点まで持ち^{はこ}搬んでゆき、それで測った結果がどんな物^{ものさし}指を選んでもそれには無関係に決まる場合に限ることである。そう云う場合にはPQ, P'Q'なる距離の大いさを比較することができる。連続体がこう云う種類のものであるとすれば、我々はそれが計量法をもっていると名づける。勿^{もちろん}論二点PQの距離は坐標の差 (dx, dy) に関係しなければならない。けれども之がどんな風に関係しているかと云う形式は先天的には知られていない。この形式が

$$ds^2 = g_{11}dx^2 + g_{12}dxdy + g_{21}dydx + g_{22}dy^2$$

と云うようなものであるなら、之を名づけてリーマン計量法と云う。

リーマン空間とユークリッド空間との関係

この式が

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \quad (\text{ピタゴラスの定理})$$

なる形を取るような坐標を特別に選ぶことができるならば、そのときに連続体はユークリッド的（平面）なのである。つまりユークリッド連続体はリーマン連続体の特殊な場合であることは明瞭である。又逆にリーマン連続体は無限に小さい範囲では、それがユークリッド的になるが、有限の範囲になるとそうゆかないようなものである。 g_{11} , g_{12} , g_{21} , g_{22} などの量は表面の計量的性質即ち計量的の場をあらわすものである。

万有引力の場の計量的関係

経験的に知られた空間の性質、殊に光の伝播の法則を用いて、空間時間連続体がリーマン計量法をもつことを示すことができる。それに属する g_{11} などの量は単に連続体の計量法を決定するばかりでなく、亦万有引力の場をも決定する。万有引力の場を支配する法則は次の問題への解答のなかに見出だされるのであった。即ち計量法 (g_{11} など) が従うべき数学的法則のうちで最も簡単なものはどんなものであるかと云う問題である。しかもこの解答から発見された万有引力の場の法則は、ニュートンの法則よりも一層精確であることが証明された。以上極ざつと述べた処のものは、私が一般相対性理論の「推理的」方法と云って話したような意味での一般的思想を与えたいつもりでもくろんだに過ぎない。

電磁気の場をいかにして導き入れるか

この理論が計量法と万有引力とを一緒にあらわすことのできたのは結構なことにちがいないので、若しも世界が単に万有引力の場をもつだけで、電磁気の場がそこに存しなかったならば、完全にも満足的なものであったろう。ところが後者と云えども、マックスウェルの電磁場の方程式を採用して之を適当に変更すれば、やはり一般相対性理論のなかに包容することのできるのは事実であるが、併しそれでは万有引力のように空間時間連続体の組織的性質としてあらわれるのでなく、論理的に独立の組織としてあらわれることになる。二つの型の場はこの理論に於て因果的に連結されはするが、併し尚お同一性にまで融合するわけにゆかな

い。けれども、真空が一つの本質的に異った種類の状態をもつと云うことは、どうしても思考し難い。この様に見えるのは単に物理的連続体が完全にリーマン計量法によって記述されないと云う理由に基づくのであると疑う方が自然である。

新らしい一元的の場の理論

新らしい一元的の場の理論はこの缺陷を取り除いて、場の二つの型を空間時間連続体に於ける空間的組織の一つの包括的の型の表示としてあらわすものである。新理論への刺戟は、リーマン空間組織とユークリッド空間組織との中間に一つの組織が存在し、それが形式的関係に於ては前者よりも豊富であるが、後者よりも貧弱であると云うことの発見から起ったのであった。二次元のリーマン空間を鶏卵の表面の形で考えてみよう。この表面は我々の（十分精確な）ユークリッド空間のなかに包圍されたものであるから、それはリーマン計量法をもっている。実際に、表面上の二つの隣接点 (PQ), (P'Q') の距離と云うことも完全に決まった意味をもっている。同様に、卵の表面の離れた部分に二対の隣接点 (PQ), (P'Q') を取るならば、PQ なる距離が P'Q' なる距離に等しいと云うことについても一定の意味をもっている。併し他方で、PQ なる方向を P'Q' なる方向と比較することはできない。特別に P'Q' を PQ に平行に引けと命令しても、それは無意味である。之に相応する二次元のユークリッド幾何学に於ては、即ち平面のユークリッド幾何学に於ては、方向を比較することが出来るし、且つ平行性の関係は互いにどんなに遠く離れた平面の範囲にある線の間にも成立することができる（遠隔平行性）。この点ではユークリッド連続体はリーマン連続体よりも関係に於て豊富である。

一つの数学的発見

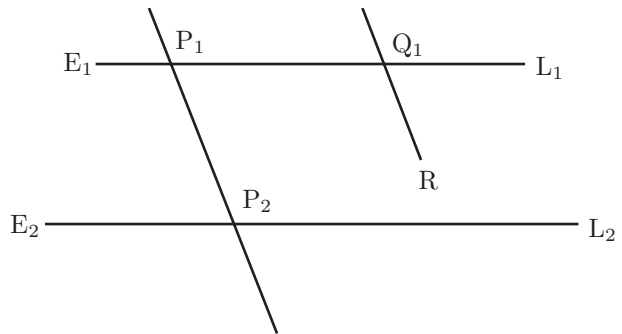
新らしい一元的の場の理論は次の数学的発見に基づくものである。

リーマン計量法を有し、且つ遠隔平行性を有して、しかもユークリッド連続体とは異なる一つの連続体が存在する。

かような連続体がユークリッド連続体といかに異なるかは、例えば三次元空間の場合に容易に示される。

新らしい連続体の性質

第一にかような連続体では、互いに平行な要素をもつ線がある。我々はそれらを「直線」と名づけよう。ユークリッドの場合と同様に、二つの平行直線と云うことも一定の意味をもつ。そこで二つのそう云う平行線 E_1L_1 及び E_2L_2 を選び、各の上に P_1 , P_2 なる点を印すとする。



E_1L_1 の上にもう一つの点 Q_1 を取る。若し我々が Q_1 を通って直線を直線 P_1P_2 に平行に引くならば、ユークリッド幾何学ではこの線は直線 E_2L_2 を切るであろう。ところがここに用いた幾何学では Q_1R なる線と E_2L_2 なる線とは一般には互いに交わらない。この点では今用いた幾何学はリーマン幾何学の特殊化であるばかりでなく、亦ユークリッド幾何学の一般化である。私の意見では、我々の空間時間連続体がここに述べた種類の組織をもつと云うのである。

正しい場の法則はどうして得られたか

正しい場の法則に導くべき解決を与えてくれる数学的問題は、私の見る処では、次のように形式立てられねばならない。即ち、この種類の連続体が従うことのできる最も簡単な且つ最も自然的な条件は何であるかと云うことである。

この疑問に対する解答を私は新らしい論文で与えようとしたのであったが、それが万有引力と電磁気力とに対する一元的の場の法則を示すものである。

-
- ・『世界大思想全集』第48巻（春秋社，1930年12月）所収。
 - ・底本は縦組みであるが，数式を考慮して横組みにした。
 - ・旧漢字は新漢字に、旧かな使いは新かな使いに変更したが，一部旧漢字のままにしたところもある。
 - ・PDF化には $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X} 2_{\epsilon}$ でタイプセッティングを行い、`dvipdfmx`を使用した。

- ・科学の古典文献の電子図書館「科学図書館」

<http://www.cam.hi-ho.ne.jp/munehiro/sciencelib.html>

- ・「科学図書館」に新しく収録した文献の案内，その他「科学図書館」に関する意見などは，

「科学図書館掲示板」

<http://6325.teacup.com/munehiroumeda/bbs>

を御覧いただくか，書き込みください。