

科学図書館ブックレット

# 相対性理論

アインシュタイン著  
石原純 訳

科学図書館





(1911年1月16日チューリッヒの自然科学会席上の講義)

「相対性理論」と名づけられる理論が倚りかかっている大黒柱は謂わゆる相対性原理です。私は先ず相対性原理とは何であるかを明らかにしておこうと思います。私たちは二人の物理学者を考えて見ましょう。この二人の物理学者はどんな物理器械をも用意しています。そして各々一つの実験室をもっています。一人の物理学者の実験室はどこか普通の場所にあるとし、もう一人の実験室は一定の方向に一樣な速さで動く汽車の箱のなかにあるとします。相対性原理は次のことを主張するのです。若しこの二人の物理学者が彼等の凡ての器械を用いて、一人は静止せる実験室のなかで、もう一人は汽車のなかで、すべての自然法則を研究するならば、汽車が動揺せず<sup>い</sup>に走る限り、彼等は全く同じ自然法則を見出すであります。幾らか抽象的に斯う云うことも出来ます。自然法則は相対性原理によれば基準体系の併移運動に関しませぬ。

私達は今この相対性原理が旧来の力学でどんな役目をもっていたかを見ましょう。旧来の力学は第一にガリレイの原理の上に安坐しています。此の原理に従えば、或る物体は他の物体の作用を受けない限り、直線的な一樣な運動にあります。若し此の法則が上に云うた実験室の一方に対して成り立つならば、それは亦第二に対しても成り立ちます。私達はそのことを直接に直観から取り出すことが出来ます。私達はそれを併し亦ニュートン力学の方程式からも引き出すことが出来るのです。私達はその方程式をもとの基準体系に対して一樣に動いているものへ転換させればよいのです。

私はここで実験室と云っていますが、数理的物理学では事柄を一定の実験室に関係させる代りに坐標系に関係させるのが普通です。このように或る何かに関係させるという場合に本質的なのは次の事柄です。

私達が一点の位置に就いて何か云おうとするときには、いつも私達は  
この点と或る他の物体系の一点との合致を示し与えます。若し私が例  
えば自分を此の質点であるとして取り、そうして、私はこの部屋のなかの  
この場所に居ると云いますなら、私は自分を空間的の関係でこの部屋  
の或る点と合致させたのです。或は私はこの合致を云いあらわしたの  
です。数理的物理学では之を云い表わすのに、三つの数、即ち謂わゆる  
坐標によりて、場所を示そうとした点が坐標系と称えられる剛体体  
系のどの点と合致するかを云い表わします。

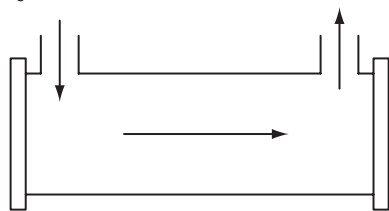
これは相対性原理に就て最も一般的のものであったのでしょうか。若  
し私達が、18世紀若しくは19世紀前半の物理学者に、此の原理を疑  
うかどうかを尋ねたとしましたなら、彼はきっと此の質問を断然否定  
したに違いありません。その当時は各の自然現象をすべて旧来の力学  
の方則に帰せしめられることが確かであるとして居ましたから、それ  
を疑う理由をちっとも持っていなかったのです。私はここで、物理学  
者が経験によってどうしてこの原理に矛盾する物理学的論理を立てる  
ようになったかを説明しようと思います。そのために私達は光学及び  
電気力学の発展を、それらが前世紀に於て、漸次是認せられた限りに  
於て、相対性原理の立場から簡単に考察して見なければなりません。

光は丁度音波のように干渉や廻折を示します。ですから私達は光を  
一の波動として若しくは一般に或る媒質の週期的に変化する状態とし  
て見做さなくてはならないように感じさせられます。この媒質をエー  
テルと名づけました。斯様な媒質の存在は近頃までは物理学者に絶対  
に確かであるように見えました。次に述べる理論はエーテル仮説と  
は相容れないものですが、併し暫く私達はこれに依ることにしましょ  
う。私達は今この媒質に関してどんな考え方が発展されて来たか、又  
このエーテルを仮定する物理学的理論を導き入れたためにどんな問題  
が起ったかを見ようと思います。私達は既に、光がこの媒質の振動か

ら成ると考えたこと、即ちこの媒質は光及び熱の振動の伝播を引き受けていると考えた事を述べました。静止物体の光学的現象だけを取り扱っている間は、光が此の媒質の運動を起すと云う外に、その別の運動を問題にするには及ばなかったのです。単にこの媒質はそこで見ている物体と同様に——光が起す筈であった振動を取り除けば——静止の状態に或ると仮定されました。

運動物体の光学的現象、並に——それと関聯して——運動物体の電磁氣的性質を考察するようになったときに、私達はその觀察する物理学的体系のなかで、物体に種々の速度を与えたならばエーテルはどうかと云う問題に向わなければなりません。エーテルは物体と一緒に動くのでしょうか。即ち各の場所でエーテルはそこにある物質と同じ様に動くのでしょうか。又は然うではないのでしょうか。最も簡単な仮定はエーテルがどこでも物質と全く同じ様に動くと云うことです。第二の可能な仮定は、これもやはりかなりな簡単さを示すものですが、斯うです。即ちエーテルは物体の運動に全然与からないと云うのです。それから又中間の場合も可能でありましょう。この中間の場合と云うのは、エーテルが或る度まで物質と無關係に空間内に動くのです。私達は今、この問題の解答を得るためにどうということが試みられたかを見ようと思います。最初に得られた重要な説明はフランスの物理学者フィゾーの行った大切の意味のある実験から来ています。此の実験は次の問題から起されました。

図に示した管はその前後をガラス板で閉じてあり、両端の接続管から管を通じて軸の方向に液体を流すことが出来るようにしてあります。管を流れる液体の速度はやはり軸の方向に管を通る光線の伝播速度に、ど



第 1 図

う影響するでしょうか。エーテルが管を流れる物質と一緒に動くことが本当であるなら、次のように考えられます。静止した水のなかで光の進む速さが  $V$  であるとし、つまり  $V$  は水に対する光の速度であると、又  $v$  が管に対する水の速度であるとしますと、私達は斯う云わなくてはなりません。水に対する光の速度は、若しエーテルが水に固着しているなら水が動いていても又は動かずにいても、それには関せずいつも同じであります。それですから管に対する光の伝播速度は液体が動いている場合には、これが静止している場合よりも、 $v$  大きいと予期されます。フィゾーの実験では、二つの干渉し得る光線束が上述のように管を通りました。液体の運動速度が干渉の縞の処置に及ぼす影響からして、水の運動速度  $v$  が静止管に対する光の伝播速度にどれ程な影響を及ぼしたかを計算することが出来ました。フィゾーは、管に対する光速が液体の運動のために  $v$  だけ増されずに、却って唯その分数  $n$  を液体の屈折率としますと  $v(1 - \frac{1}{n})$  だけしか増さないことを見出しました。此の屈折率が殆ど 1 に等しく、即ち光が液体のなかで殆ど真空に於けると同じ速さで進むとしますと、液体の運動は殆ど影響をもちません。この事から、光が水に対していつも同じ速度で進むと云う考え方は、経験と一致しないと結論しなければなりませんでした。

次に簡単な仮説は、エーテルが物質の運動に少しも与からないと云うことでした。此の仮説に基づいては、光学的現象が物質の運動によってどう影響されるかを、そう簡単に導き出すわけにはゆきません。併しローレンツは 1890 年代の中頃に、全く動かないエーテルの仮定に基づく一つの理論を立てることに成功しました。彼の理論は運動体の光学及び電気学の殆ど凡ての知られた現象を、その中に亦今述べたフィゾーの実験をも含めて、全く正しく与えます。私がすぐここで注意したいのは、ローレンツのと根本的に異った理論で、しかも簡単な

判り易い仮定に基づき、そして同じことを為し遂げるようなものは、決して立てられなかったと云うことです。それですから、この範囲では静止エーテルの理論を、経験の全部と一致する唯一のものとして承け容れなければならなかったのです。

私達はこの静止エーテルの理論を相対性原理の立場から観察しましょう。外力を受けない質点が或る体系に関して一様に動いているならば、そう云う凡ての体系を私達は非加速的のものとして云い表わします。そうしますと、相対性原理は斯う主張するのです。自然法則はすべての非加速的体系に関しては同一であると。静止エーテルに関するローレンツの根本仮説は他方に、あらゆる可能な非加速的運動体系のうちで、一定の運動状態のもの、即ちこの光の媒質に対して静止せる体系を特別に徴しづけます。それですから、たとえ此の考えに従っても、哲学上の意味での或る絶対運動が存在するとは云うことは出来ませんけれども、——何故ならそれは全然見限られたことで、私達は唯物体の相対的な位置変化を考えることが出来るだけですけれども、——併し私達が今一つの運動状態、即ちエーテルに対する静止を特別に扱ったと云うことで、物理学的の意味で一つの絶対運動が形づくられます。私達はエーテルに関して静止する各の物体をどうか絶対静止のものとして云うことが出来ます。エーテルに対して静止せる基準系はあらゆるその他の加速しない基準系に対して特別のものとせられます。此の意味でローレンツの静止エーテルの根本観念は相対性原理に適いません。静止エーテルの根本観念は次の一般的考察に導きます。一つの基準系  $K$  がエーテルに対して静止しており、もう一つの他の基準系  $K'$  はエーテルに対して一様に動いているとします。エーテルに関する  $K'$  の相対運動は  $K'$  に対して成り立つところの自然法則に或る影響を及ぼすと云うことが期待せられるわけです。つまり  $K'$  に関する自然法則は  $K'$  のエーテル内に於ける運動のために  $K$  に関する法則

とは異っている事が期待せられるのでした。その上に又地球は私達の実験室と共に一年全体の間この光の媒質に対して静止していることは出来ないで、それは即ち  $K'$  なる基準系の役目をする筈はずで或ると云わなければなりません。従って此の運動の影響が私達の実験室おに於ける実験にあらわれるような何等かの現象が見出されることを仮定しなければならぬのでした。私達の物理的空間は、これ之を地球上に在るとする限り、この相對運動のために方向によって異った性質をもつと信はずずべき筈はずでした。けれども何等この様な事を実証することはどんな場合にも決して成功しませんでした。

ところで此のエーテルに対してはおもしろく思われませんでした。フィゾーの実験はエーテルが物質と一緒に動かないことを云いあらわします。即ち光の媒質の物質に対する運動があるわけです。けれども、この相對運動を確立しようとする凡ての実験は否定的の結果を与えました。つまりそこにはお互に矛盾する様に見える二つの結果があります。そしてこの不愉快な乖離かいりを解放することが出来なかったことは、物理学者にとりて非常に痛ましい事でした。私達は、どんなにしても取り除けを見出すことの出来なかった相對性原理を、どうかしてローレンツの理論と一致させることは出来ないであろうかと云うことを考究しなければならぬのでした。今それへ入り込む前に私たちは静止エーテルのローレンツ理論から最も本質的な部分を抜き出して見ましょう。静止エーテルが存在すると云うことは物理学的に何を意味しているのでしょうか。此の仮説の最も大切な内容は次のように云いあらわすことが出来ます。それはここに一つの基準体系（ローレンツの理論で「エーテルに対して静止せる体系」と名づけられる）が存在おのおのして、それに関しては真空中の各の光線が普遍的な速度  $c$  をもって伝播でんぱすると云うことです。そしてこれは光を発する物体が静止していても又は動いていても、それに無関係に成立つと云う事です。此の



主張を私達は光速一定の原理と名づけましょう。そこで上に述べた問題は亦<sup>また</sup>次の様な形式にすることも出来ます。取り除けなしに満足されるように見える相対性原理を此の光速一定の原理と結合させることは出来ないでありましょうか。次のように、ちょっと考えると、先<sup>ま</sup>ずこれが否定されます。基準体系  $K$  に対して各光線が速度  $c$  で進むとしますと、これは  $K$  に対して運動している基準系  $K'$  に対してはやはり成り立ちません。即ち  $K'$  が光線の進む方向に速度  $v$  で動いているならば普通の見方では  $K'$  に対する光線の速度は  $c-v$  に等しいとおかれるはず<sup>はず</sup>です。つまり  $K'$  に対する光の伝播<sup>でんぱ</sup>の法則は  $K$  に対する速度と異なることになり、相対性原理が損われます。これは恐ろしいディレンマです。ところが能く考えると自然は此のディレンマには全く負い目をもってはいないので、寧ろ<sup>むし</sup>このディレンマは私達<sup>また</sup>がその考察のなかに、従って亦私の今述べたもののなかに、黙って勝手に仮定をつくっていたことから起るのです。私達は事がらを矛盾なしに且つ簡単に考えるようにするために、それを取り去ってしまわなくてはなりません。

私はこの勝手な仮定<sup>すなわ</sup>、即ち私達の物理学的思考の根本に横わっているものを説明して見ようと思います。この勝手な仮定のうちの第一の且つ最も大切なものは時間概念に関するものであって、私はどこに斯の勝手さが存立するかを述べて見ましょう。それをうまく行<sup>や</sup>るために、私は先<sup>ま</sup>ず空間について論じ、その上で時間<sup>これ</sup>を之と平行に置こうと思います。若し私達が空間に於ける一点の位置<sup>お</sup>、即ち或る坐標系に対する一点の位置を云い表わそうと思うならば私達は<sup>よ</sup>その直交坐標  $x, y, z$  を与えます。此の坐標の意味は次の如くです。能く知られた規則に従って坐標面に垂直線を立て、一つの与えられた単位物指<sup>ものさし</sup>が此の垂直線上に幾回運ばれたかをごらん下さい。此の回数を数えた結果が坐標です。坐標で空間を指定するのはそれ故一定の操作の結果です。私が指示する坐標は従って全く一定の物理的意味をもっています。私達は一

定の与えられた点が実際に指示された坐標をもつかどうかを試験することが出来ます。

この関係は時間ではどうなるでしょうか。そこでは私達はそれ程うまく行かないのを見るでしょう。従来私達はいつも斯う云うて満足していました。時間は出来事の独立変数であると、斯様な定義では誰れもそれに基づいて事実上存在する出来事の時間値を測ることは出来ません。ですから私達は、その定義に基づいて時間測定が可能であるように、時間を定義するように行って見なければなりません。私達は或る坐標系  $K$  の原点に一つの時計（例えばゼンマイ時計）をおくとしましょう。この時計で直接に此の点並びにその極近所に起っている出来事を時間的に値いづけられることが出来ます。 $K$  の他の点で起る出来事は併し此の時計で直接に時を定めるわけにはゆきません。 $K$  の原点には時計の傍にいる観測者が光線に依ってその出来事の報知を受けとる時刻をしるすとしますと、この時刻は出来事自身の時ではなくて、出来事から時計に達するまでの光線の伝播時間だけ出来事の時刻から遅れているのです。若し私達が  $K$  系に対するその方向の光の伝播速度を知っているとすれば、出来事の時刻はその時計で定めることが出来るのでしょう。けれども光の伝播速度の測定は私達の取り扱っている時間決定の問題がすでに解かれたときのみ可能なのです。即ち一定の方向に於ける光の速度を測るためには、光線の伝わる二点  $A$  及び  $B$  の間の距離と、その外  $A$  に於て光を送り出した時刻並びに  $B$  に於て光の到着した時刻とを測らなければならなかつたでしょう。つまり諸処での時間測定が必要であるわけですが、それは私達の求める時間の定義が既に与えられた時にのみ実行し得るのでしょう。併し一つの速度特に光の速度を測ることが、任意の指定なしには原理的に不可能であると云うならば、私達は光の伝播速度に関して尚お任意な指定をなしてもよいのです。そこで私達は真空中の光の伝播速度は一点  $A$

から一点 B へゆく途中で B から A への光線の<sup>でんぱ</sup>伝播速度と同じ大きさであると定めます。この指定のお蔭で私達は  $K$  系に対し種々の点に静止して<sup>なら</sup>列べられた同じ性質の時計を実際に合わせる事が出来るようになります。例えば<sup>たと</sup>二点 A と B とに或る時計を次のことが成り立つように<sup>おい</sup>合わせましょう。A に於て時刻  $t$  (A の時計で測って) に一つの光線を B に向けて送り、それが時刻  $t + a$  (B の時計で計って) に B に到着するものとしますと、逆に時刻  $t$  (B の時計で測って) B から A の方へ送られた光線は時刻  $t + a$  (A の時計で測って) に A に来なければなりません。これが  $K$  系に配置されたすべての時計を合わせるための規定なのです。<sup>も</sup>若し私達がこの規定を満足させたなら、それで私達は実測物理学者の立場から一つの時間決定を求め得たのです。或る出来事の時刻は<sup>すなわ</sup>即ち<sup>かよう</sup>斯様に与えられた規定に従って<sup>すなわ</sup>合わされた時計のうちで、その出来事の場処にあるものの示す時に等しいのです。

ところで、私達はそれによって特に目立った何ものを得たのであろうかと云う疑問が起るでしょう。何故なればそのすべては自明の事がらのように聞えるからです。目立った事柄と云うのは、全く決った意味の時間指示に達するための此の規定が全く一定の坐標系  $K$  に対して静止する時の一体系に関係していると云うことにあります。私達は単に一つの時を得たのではなくて、坐標系  $K$  に関した時、<sup>すなわ</sup>即ち  $K$  に対して静止して<sup>なら</sup>列べられた時計を含めて坐標系  $K$  に関した時を得たのです。私達は勿論、 $K$  に対して一様に動いているような第二坐標系  $K'$  をもつならば、全く同じことをこれに関して行うことが出来ます。<sup>この</sup>此坐標系  $K'$  に対しても一つの時計体系をその空間に配置し、それらをすべて  $K'$  と一緒に動いているようにしますと、私達は<sup>すなわ</sup>この  $K'$  に関して静止している時計を全く上に与えた規定に従って合わせる事が出来ます。そうした上で私達は  $K'$  系に<sup>また</sup>関しても亦一つの時を得ます。ところが<sup>こ</sup>アプリオリには<sup>も</sup>まるで斯う云われません。若し二つの出来

事が基準系  $K$ ——私はそれで時計を含めた坐標系を意味させます——に関して同時刻で或るなら、同じ出来事は基準系  $K'$  に関する<sup>また</sup>も亦同時刻的であると。つまり時間は一の絶対な<sup>すなわ</sup>、即ち基準系の運動状態に無関係な意味をもっているとは云われません。それは私達の運動学に含まれていた一つの任意さなのです。

ここにやはり従来の運動学に於<sup>おい</sup>て任意的であった第二の事情があらわれます。私達は一つの物体の形、例えば一つの棒の長さ<sup>つ</sup>に就て話しますが、その長さが幾<sup>いく</sup>らであるかを、精密に知っている<sup>た</sup>と信じています。そしてそれが、私達の現象を<sup>し</sup>るしている基準系に関して運動している場合<sup>またそ</sup>にも亦然<sup>しか</sup>うです。併し<sup>これ</sup>少しく考えて見ますと、その事は私達が之<sup>これ</sup>を本能的に想っている程、決してそんなに簡単な概念ではないことが判ります。一つの棒がその長い方向に基準系に対して動いてるとしましょう。此の棒はどれだけ長いかと尋ねて見ましょう。此の間<sup>ただ</sup>は唯<sup>すなわ</sup>次の意をもち得るだけです。即ち棒がどれ程長いかを知るために私達はどんな実験を行わなければならないかということです。私達は或<sup>ものさし</sup>る物指をもった一人の人間を取りて、之<sup>これ</sup>を衝き動かし、棒と同じ速度をもたせます。然うすればこの人は棒に対して静止して居ますから、彼の物指<sup>ものさし</sup>を繰返して棒と並べて、丁度<sup>なら</sup>実際に静止体の長さ<sup>ちょうど</sup>を測ると同じ様にして、その長さを見出すことが出来ます。そこに彼は全く一定の数を得、そして彼が此の棒の長さ<sup>い</sup>を測ったと云うことを或る権利をもって言明することが出来ます。

併しながら若し棒と一緒に動いていないで、すべて或る基準系に静止しているような観測者のみがあるとしたならば、私達は次の様にすることが出来ます。私達は動いている棒の軌道に沿うて非常にたくさんの時計を配置し、その各<sup>おのおの</sup>に観測者が付き添うておきます。時計は上に与えられた手段に従って光の信号で合わされ、その全体で基準系に属する時間を示すようにします。これらの観測者は  $K$  系に関し

て棒の前後両端が或る一定の与えられた時刻  $t$  に存在する二つの場処を見出します。即ち棒の前後両端がそこを通過するとき時刻  $t$  を示すような二つの時計を見出すと云っても同じことです。斯うして求められた二つの場処（若しくは時計）のお互の距離は基準系  $K$  に対して静止せる或る物指を結合線の上に繰り返して列べて測る事が出来ます。この二段の処置の結果を私達は動いている棒の長さとして正当に云いあらわすことが出来るのです。けれども此の二つの取扱いが必然的に同じ結果に到達するとは限りません。言葉を換えて云えば、一つの物体の幾何学的の容量は、<sup>これ</sup>之が見出される基準系の運動状態に必ずしも無関係ではありません。

若し私達がこの二つの任意の仮定をしないならば、私達は最早や次の初等的の問題をも解くことがすぐには出来ないのです。即ち一つの出来事の坐標  $x, y, z$  及び時刻  $t$  が  $K$  系に関して与えられているとき、 $K$  系に対して既知の一樣な併移運動に或るような他の系  $K'$  に関する同じ出来事の空間時間坐標  $x, y, z, t$  を求めると云う事です。つまり従来此の問題の簡単な解を得たのは、私達が今任意的と云った仮定をしていたのに依ることが判ります。

どう云う風にして私達は再び運動学を立てなおしたらよいのでしょうか。そこにおのずから次の答が生じます。丁度私達に以前痛ましい困難を与えていた事情が私達を踏み歩み得る道に導きます。勿論今述べた任意的の仮定を取り除いてもっと多くの余地を取得した上です。つまり経験が、私達を強要した二つの外見的には結合し得られないような基礎法則、即ち相対性原理と光速度一定の原理とが丁度空間時間転換の問題の一定の解に導くことが判ります。そこで私達は通常 of 思想と一部分甚だしく矛盾するような結果に到着します。之に導くところの数学的考察は、<sup>これ</sup>甚はなほだ簡単ですが、ここではそれに立ち入りますまい。

$x, y, z, t$  並びに  $x', y', z', t'$  が両基準系  $K$  及び  $K'$  に関する空間及び時間坐標で或るならば、基礎とした両原理は

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2$$

$$\text{及び } x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2$$

なる二つの方程式各が他のものを帰結するように変換方程式を作らなくてはならないことを要求します。ここには説明しない理由からして変換方程式は一次的でなければなりませんから、これで変換法則が決定されることが少しく研究すれば判ります。(例えば Jahrb. d. Radioakt. und. Elektronik 4. (1907), 418 参照)

寧ろ私は、この様にしてその外の仮定なしに全く論理的に進めて達せられる最も主要な帰結に立ち入ることにしましょう。

まず最初は純粋に運動学的のものです。私達は坐標と時間とを一定の方法で物理学的に定義しましたから、空間的並に時間的の量の間のどんな関係も或る全く一定の物理的内容をもつてありましょう。まず次のことが出ます。若し私達が考察の基礎となした坐標系  $K$  に関して一様に動いているところの一つの固体をもつならば、この物体は、それがこの体系に関して静止の状態でもっているような形に対してその運動方向に一定の割合に縮まって見えます。私達が物体の運動速度を  $v$  で、光の速度を  $c$  であらわすならば、各の運動方向に測られた長さは、物体の動かない状態で  $l$  に等しいものが、運動を共にしない観測者に関しては運動のために

$$l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

なる大きさに短縮されます。

若し物体が静止状態で球形であるなら、それを一定の方向に動かす場合に、之は扁平な楕円体の形を取ります。若し速度が光速に達するならば、物体は一平面にひしゃげてしまいます。しかし共に動いている観測者から判断すれば、物体は前と同じくその球形を保っている

でしょう。他方で此の物体と共に動いている観測者には運動を共にしないすべての対象は全く同様に相対運動の方向に縮まって見えるのです。この結果は奇妙さを示していますが、併し運動物体の形と云うものは、実際上述のことによれば、唯時間決定の助けによって始めて見出されるものであって、甚だ複雑な意味をもっていますから、それを考慮すれば肯かれるわけです。

この「運動物体の形」なる概念が直接に明らかな内容をもっていると云う感じは、抑も私達が日常の経験では単に光速度に対し實際上無限に小さいような運動速度のみを見るのに慣れていることを思い合わせると、それから得られるでしょう。

次にこの理論の第二の純粋に運動学的の帰結であって、もっと目立った事柄は斯うです。或る基準系  $K$  に対して静止して配置されており、之の時間を指示することの出来る一つの時計が与えられていると考えましょう。そうしますと、若しこの時計が基準系に関して一様な運動におかれるならば、 $K$  系から判断して進みが遅れるようになり、此の時計の時間指示が 1 だけ進む間に体系  $K$  の時計は  $K$  に関して

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

だけの時間を経過するようになることと云うことが証明出来ます。つまり動いている時計は、それが  $K$  に関して静止の状態になるときよりも遅く進むのです。運動状態に於ける時計の進む速さは、この時計の指針の位置を、 $K$  に対して静止して居り且つ  $K$  に関しての時間を測るような時計のうちで丁度今考へ取った運動時計がその傍を通り過ぎるようなものの指針位置といつも比較して見出されると考えなければなりません。若し私達が時計を光速度で動かすことが出来たとしたならば——充分に力を加えるなら私達は時計を殆ど光速度で動かすことが

出来たでもありましょう——時計の指針は、 $K$  から判断して、無限に遅く進むでしょう。

若し次のことが実現されたと考えるなら、事柄は最もおかしくなります。この時計に非常に大きい速度（殆ど  $c$  に等しいような）を与え、之を一様な運動を続けて飛ばせ、それが遠い距離を飛んだ後で反対の方向に衝撃を与えて旧と出発した場処へ再び戻るようにします。そうすれば、この時計の指針の位置はその全旅行の間に殆ど変りはしなかったのですが、之に反してその間出発の場処に静止状態に残された全く同じ構造の時計はその指針の位置をすっかり変えてしまっていると云うことになります。之に附言しなければならないことは、私達がすべての物理的出来事の簡単な一代表として導き入れたこの時計に対して成り立つところのものは亦どんなその外の性質のそれ自身完閉した物理学的体系に対しても成り立つと云うことです。例えば私達が或る生物を箱に入れて上に時計のなしたと同様な往復運動をさせますと、此の生物は任意に長く旅行した後でどれ程も変わらずにその最初の場処に戻って来ることが出来たでもありましょう。ところがまるで同じ生物が旧との場処に止まっているならば、既に久しい前に新たな子孫に代らせたにちががありません。運動している生物にはこの旅行の長い時間は、その運動が殆ど光速で行われたとすれば、唯一瞬時にすぎないのです。これは経験が私達を強要して私達の基礎におかした原理の否定し難い一つの帰結なのです。

ところで物理学に対する相対性理論の意味に就いてもう一言しよう。此の理論の要求する処は、或る任意の速度に対して成立する自然法則の数学的表式は、この法則をあらゆる式のなかに転換式によりて新しい空間時間坐標を引き入れてもその形を変えないと云うことです。それによりて可能性の多様さは著しく制限せられます。静止せる若しくは遅く動いている物体に対して法則が知られているなら、それから簡



単な転換によりて任意に速く動いている物体に対する法則を導き出す事が出来ます。斯様<sup>かよう</sup>にして例えば速い陰極線<sup>たど</sup>に対する運動法則を出すことが出来ます。その場合にニュートンの式は任意に速く動く質点には成り立たないで、之<sup>これ</sup>は稍複雑<sup>やや</sup>の構造の運動方程式で置き換えられなくてはならないことが判ります。陰極線の屈曲に関してこの法則は全く満足的に経験と一致することが示されました。

相対性理論の物理学的に最も大切な結論のうちで次のことが記されなくてはなりません。私達は前に、動いている時計が相対性理論に従えば静止している同じ時計よりも遅く進むことを見ました。私達が之<sup>これ</sup>を懐中時計で実験して確証しようとする事は多分いつまでも見込のないことでありましょう。何故なら私達が斯様<sup>かよう</sup>なものに与え得る速度は光速度に対して無視せられる程小さいもので或るからです。けれども自然は私達に全く時計の性質をもち且つ非常に速く動かされ得るような物を提供します。これはスペクトル線を送り出す原子であって、私達はこれに電気の場合によって数千キロメートルの速度を与えることが出来ます。(カナル線)理論によれば、之<sup>これら</sup>等の原子の振動数はその運動によって、丁度<sup>ちようど</sup>動いている時計に対して導き出されるのと全く同様の方法で、影響されて見えることが期待せられます。この実験は大きな困難に出遇いはしますが、それでも私達は、この方法で将来の十年間のうちには相対性理論の重要な確証<sup>も</sup>若しくは反駁を得ることを望むことが出来るでしょう。

理論は更に、物体の惰性的質量がそのエネルギー内容に関係すると云う大切な結果に導きます。但し之<sup>ただ</sup>は甚た僅かの程度であって、直接に之<sup>これ</sup>を証明することは全く望みないことです。しかし物体のエネルギーが  $E$  だけ増せば、惰性的質量は  $\frac{E}{c^2}$  だけ増します。この法則によって質量保存の法則は倒壊されたので、云い換えればエネルギー保存の法則と唯一のものに融合したのです。この結果はかなり著しく響

くかも知れませんが、併し<sup>しか</sup>相対性理論なしにも亦<sup>また</sup>或る特殊の場合には経験的に知られた事実からして、惰性的質量がエネルギー内容と共に増すことを確実に結論することは出来ます。

もう一言この理論が主として、悼<sup>いた</sup>ましくも余りに早く逝いた数学者ミンコウスキーによって得たところの甚<sup>はなは</sup>だ興味或る数学的補助に就て述べましょう。相対性理論の変換方程式は、それが

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$$

なる式を不変量としてもつように作られています。時間  $t$  の代りに虚数的変数  $ct\sqrt{-1} = \tau$  を時間変数として導き入れますと、此の不変量は

$$x^2 + y^2 + z^2 + \tau^2$$

なる形を取ります。この際空間的坐標並びに時間坐標は同じ役目をなします。この空間及び時間坐標の形式的等値性を相対性理論に於て更<sup>おい</sup>に押し進めますと、此の理論の甚<sup>はなは</sup>だ見易<sup>みやす</sup>い説明に達し、その応用をより容易<sup>たやす</sup>くするのは、物理的出来事は或る四次元間に於て云い表わされ、又出来事の空間的關係はこの四次元空間<sup>お</sup>に於ける幾何学的法則としてあらわれます。

- 
- 「相対性理論」(『世界大思想全集』第48巻, 春秋社, 1930年12月第九刷) 所収。

- 旧字・旧仮名遣いは、新字・新仮名遣いにあらためた。

- 読みやすさのために振り仮名を付加した。

- 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/scilib.html>

- 「科学図書館」に新しく収録した文献の案内 「科学図書館掲示板」

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