

## 創作ノート タキオン幻想 THE ILLUSION OF TACHYON (B)

黒月樹人 KINOHITO KULOTSUKI

下記の文章は、ウェブページの英文を、思考言語コアを利用して翻訳したものである。このような処理の過程を全て記載すると煩雑になるので、このページにおいては、結果としての、日本語への翻訳文のみを収録した。

### 資料 B 「Tachyon – Wikipedia, the free encyclopedia」

#### タキオン

タキオンは（ギリシャ語の ταχυόνιον, takhyónion からきていて、その語源は ταχυς, takhýs で、すなわち、(速度や動作が)速い、(速度が)速い) 超光速の速度で伝わる、ある仮想の粒子のことである。タキオンの考えが最初に主張されたのはドイツの物理学者アーノルド・ゾンマーフェルト (Arnold Sommerfeld) によるところが大きい。それらの研究に対しての理論的な骨組みを構築したのは、George Sudarshan, Oleksa-Myron Bilaniuk[1][2], Vijay Deshpande[2], Gerald Feinberg[3] である（彼らは 1960 年に、その用語を最初に生み出した）。タキオンの分野は、ボソンの弦理論のような、多様な内容の中に、理論的に現れてきた。特殊相対性理論の体系によれば、タキオンは、空間様の四元運動量と、虚数の固有時間を伴う、ひとつの粒子である。タキオンはエネルギー運動量のグラフの、空間様の部分であることを余儀なくされている。そのようなわけで、それは、光速以下に速度を落とすことができない。仮にタキオンは、これまでの考えに従って、集中した粒子群であるとしても、特殊相対性理論における基本的な因果律に従うものであり、多くの空想科学作品で書かれてきたような、光よりも速く情報を伝えることは認められていない[3]。

今日、量子力学分野での理論の骨子で、タキオンは、系の不安定状態を特徴づけるものとして、よく理解されており、タキオン凝縮を用いて取り扱われているもので、本当に光より速い粒子としてより、むしろ、そのような不安定さがタキオン場によって描写されている。現代において広く受け入れられている、粒子の概念の理解によれば、タキオン粒子群は存在として取り扱われるには、あまりに不安定なものである[4]。その理論により、タキオンによる、光より速い情報伝達と、因果性の破綻は、双方の基盤で不可能なものであり、それらは (タキオン凝縮による)[4] 最初の場所で存在しないし、仮にそれらが (フェインバーグの解析により[3]) 存在するとしても、(これもまたフェインバーグの解析によって[3]) それらは情報を伝達することが出来ないだろう。タキオン粒子の存在に対する理論的な論争があるにもかかわらず、実験的な探索は、それらの存在に対する仮定を調べて、行われてきて着ているが、タキオン粒子が存在するかないかということの、どちらについても、実験的な証拠は、見つかっていない。[5]

## 目次

- 1 基本的な特性
- 2 現代の解釈
  - 2.1 量子力学分野の理論
    - 2.1.1 因果性
    - 2.1.2 凝縮
- 3 弦理論でのタキオン
- 4 空想上のタキオン
- 5 関連項目
- 6 参照
- 7 外部リンク

### 基本的な特性

特殊相対性理論の力学的な観点から述べると、タキオンは空間様の四元運動量をもった粒子ということになる。それらの力学を取り扱うための、アプローチのやり方には、内容が同じ、2つのものがある。

- 光より遅い、正式な粒子（ブラディオン”bradyons”）に適用されるものと同じ公式の全てが、タキオンにも適用されることを、要求すること。特に、エネルギーと運動量の関係、つまり、

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$$

ここで  $p$  はブラディオンの相対論的運動量で、 $m$  は、依然保たれている、その静止質量であり、次に記す、粒子の総エネルギーに対する式を用いて、それに沿って書いたものである。

$$E = mc^2 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

これは、（ブラディオンもしくはタキオンの）ある粒子の総エネルギーが、静止質量（「静止質量とエネルギー」）からの寄与と、物体の動きからの寄与、つまり運動エネルギーとを、含んでいるということを意味するように解釈されている。しかしながら、エネルギー方程式は、 $v$  が  $c$  より大きいとき、虚数の分母をもつことになるが、これは平方根の内部が負になるためである。総エネルギーが実数でなければならないから、分子もまた虚数でないとおかしい。すなわち、静止質量  $m$  が虚数でなければならないのであるが、これは、純虚数を、それとは別の純虚数で割ったものが、実数になるからである。

- 質量に対して簡単な代入を行うと、実数の質量をもつタキオンについて記述する、同じ内容の、異なる方法が生まれる。質量を  $m = i^*z$ （ここで  $i^2 = -1$  とする）と定義し、私たちは、次のように読むための、アインシュタインのエネルギーと運動量の関係を得る。

$$E^2 + z^2c^4 = p^2c^2$$

この試みにより、エネルギー式は、次のようになる。

$$E = zc^2 / (v^2/c^2 - 1)^{1/2}$$

そして、私たちは、虚数の質量の必要性を避けることになり、複素数値の質量がどのような物理的意味を持つのかということ、正確に解釈する問題を回避することになる。もちろん、タキオンではない粒子を用いた相互作用に対して、 $z$  を  $m$  へと置き換える場合を除く。

双方の試みは数学的に等価なもので、同じ物理的な結果をもっている。一つの奇妙な効果は、通常の粒子とは似ていなくて、タキオンの速度は、そのエネルギーが減るにつれて、増大するということである。(通常のブラディオンの物体に対して、 $E$  は速度と共に増大し、光の速度である  $c$  に、 $v$  が近づくにつれて、任意に大きくなる。) このようなわけで、まさに、ブラディオンが光速度の壁を破ることを禁じられているように、タキオンもまた、 $c$  以下へと速度を落とすことは禁じられており、これは、その壁に上からでも下からでも近づくことは、無限大のエネルギーが必要になるからである。

タキオンを量子化すると、タキオンはフェルミ-ディラック統計に従う、スピンをもたない粒子となるが、これは、タキオンがスカラーのフェルミオンであるということ、このことは、通常の粒子に対しては許されていない組み合わせということになる。[3] それらはまた、対として生成され、消滅される。

そのような粒子の存在は、現代物理学に、好奇心をそそる問題を引き起こすことになる。例えば、電磁気放射の形式化を行うときに、タキオンは中性でなければならないか、あるいは、電荷を持っているべきかとうことに対して、当然こうだと仮定する理由が無いのであるから、タキオンが電荷をもつと仮定すると、電荷をもったタキオンは、通常の電荷された粒子が、媒体中で光の局所的な速度を超えると、そのようにするように、チェレンコフ放射でエネルギーを失わなければならない。電荷をもったタキオンが真空中を伝わるということは、それゆえ、一定値の妥当な時間の加速を経験し、そして、必要のため、その世界線は時空間で双曲線の形をつくる。しかしながら、私たちが見てきたように、タキオンのエネルギーが減ると、その速度が増大し、それゆえ、形成された単独の双曲線は、(同じ大きさで、逆の記号の) 反対の向きの運動量をもつ、反対に電荷された、2つのタキオンから成るものであるが、この2つのタキオンは、空間の同じ点において、同時に無限の速度に達したとき、互いに消滅しあう。(無限の速度において、2つのタキオンは、それぞれエネルギーをもたないが、反対向きの、有限値の運動量をもっており、それで、それらの相互の消滅において、破られる保存則が無いということになる。消滅の時間は公正に依存したものとなる。) 電氣的に中性のタキオンですら、重力的なチェレンコフ放射の過程で、エネルギーを失うと期待されているだろうが、これは、それが重力質量をもっているからであり、そのようなわけで、上に述べたように、それが旅をするにつれて、速度

が増加することになる。

## 現代的な解釈

### 量子力学分野の理論

#### 因果性

因果性の特性は、理論粒子物理学の基本的な原理である。タキオンは、仮に存在するとして、因果性を破綻させはしないだろう。たとえ仮に、タキオンが、通常の(時間様の)物質と相互作用したとしても、因果性は破綻されないだろう。仮に粒子が情報を、それ自身の過去へと送ることができて、いわゆる、因果の輪と呼ばれるものを形成し、祖父のパラドックスとしての、論理的なパラドックスを導いたとしても、タキオンはフェインバーグの再解釈原理 (**Feinberg reinterpretation principle**) によって、因果性の破綻から守られている。この原理は、負エネルギーのタキオンが、因果性を破ろうとして、過去へと送り返されるということは、正エネルギーのタキオンが、未来へ向かって旅をすることへと、常に再解釈されうるということを、述べている。これはなぜかということ、観測者たちは、タキオンの放射と吸収を区別することができないからである。タキオンに対して、放射のプロセスと、吸収のプロセスが区別できないというのは、タキオンの世界線の、時間的な方向を変える、光速度以下の、関連する構造の変化というものが、常に存在するからであり、そのようなことは、ブラディオンや光子に対しては真実ではない。未来からタキオンを探すという試みは、(因果性を破綻させることであるが) 同じタキオンを実際に生み出して、未来へと送ることである。(そのことが原因となって) タキオンを探す人は、あらゆる可能な探索モデルにおいて、タキオンを取り上げているように見えるだろうが、実際、タキオンの「探索者」は、同時にタキオンを放射しているのである。任意のタキオン「探索者」に関して、再解釈原理の効果は、任意の、やってくるタキオンのメッセージが、タキオンの背景ノイズに対して、失われるだろということであり、それは、思いのままにコントロールできない放射の、どうしても付随するものである。反対の、直観による結果は、仮に存在するとして、タキオンが、エネルギーと運動量を伝えることが、普通にできるが、コミュニケーションのために使われることはできないということである。かくして、因果性の保存のため、ノビコフの自己一貫性原理 (**Novikof self-consistency principle**) という、ある量子力学場理論の形式に、頼る必要がなくなった。

考えを巡らせる他の方法には、平行宇宙というものが含まれている。人は、あるシナリオを想像することができて、そのシナリオにおいては、エネルギーや情報が過去へと送られ、それが原因となって、歴史が2つの異なった道筋へと分岐して、その一つにおいては、事象が、変えられた情報に反映し、そして、一つにおいては、事象が、そうはならないというものである。一般相対性理論においては、相対的に離れた観測者に対して、光速より速く伝わる粒子が存在する時空を構成することが可能である。一つの例は **Alcubierre** 計量であり、他には、通過可能ワームホール群 (**traversable wormholes**) というものがある。

しかしながら、上記の意味の中には、局所的に光速度を上回るものとしての、タキオンは存在していない。

## 凝縮

量子場理論 (quantum field theory) では、タキオンは場の量子であり、この場は通常ひとつのスカラール場 (scalar field) であるが、タキオンの質量の平方は負値であり、同時対称性の破れ (Spontaneous symmetry breaking) を記述することがある。そのような場の存在は、真空の場の不安定さをほのめかしており、その真空場は、その位置エネルギーの極小よりはむしろ、極大のところであり、丘の頂上にあるボールに、よく似ている。ある非常に小さな衝撃が、それは量子の変動のために、通常起こりうるものであるが、指数的に増大する振幅を伴って、場を回して下げるように、導くだろうが、それがタキオン凝縮 (tachyon condensation) を生み出すのだろう。タキオン場は一度、ポテンシャルの最小へ至り、その量子群は、もはやタキオンではなく、むしろ、ヒッグス・ボソン (Higgs boson) として、質量の平方が正の値をもつものであるということを、認識することが重要である。技巧的には、平方された質量は、効果的なポテンシャル (effective potential) の、一次微分がゼロである点における、二次微分である。それゆえ、タキオン場に対して、二次微分は負値であり、このことは、その効果的なポテンシャルが極小ではなく、むしろ極大におけるものであるということを意味している。そのようなわけで、この状況は安定したものではなく、そして、そのような場は、他の点へと、ころがり回って下がるだろうが、極小でのみ止まることになり、そこで、その量子は、負値ではない平方された質量を持つから、それは、もはや、タキオンの場ではない。なぜなら、タキオンの平方された質量は負値であり、それは形式的に虚数の質量をもつからである。これは一般的な規則の、特別な場合であり、そこでは、不安定な質量粒子群は、複素数の質量を持つものとして、形式的に記述され、その複素数の実数部分は、通常の意味での、それらの質量であり、そして、虚数部分は、自然なユニット (natural units) における衰退率 (decay rate) である。しかしながら、量子場理論では、粒子 (ある、ひとつの粒子の状態) は、常に一定の状態として、おおまかに定義されるが、これはすなわち、ハミルトニアン固有値のことである。不安定な粒子とは、時間経過のもとで、近似的にのみ定常値である状態のことであるが、しかしながら、それは、観測されるに十分なくらい永く、存在するものである。このことは、それが複素数の質量をもつものとして形式的に記述されたとき、質量の実数部分は、その虚数部分よりも大きなものに違いないということを、意味している。もし仮に、双方の部分が、同じ大きさのものであったとしたら、このことは、粒子というより、むしろ、散乱過程において現れる、ひとつの共振 (a resonance) と考えられるが、なぜかという、それは、散乱過程とは独立に測定されるだけの、十分な永さだけ存在することがないからである。タキオンの場合は、質量の虚数部分は、実数部分に対して、無限にと行ってよいほど大きいので、それに対して寄与できる、粒子の概念が無いということになる。タキオン量子場にとって

さえ、空間的に離れた点における、場の作用素は、それでも可換であり(あるいは、非可換であり)、かくして、因果性は保たれるのである。このようなわけで、情報は決して光より速く動いたりはしないことになる。タキオン場に対する例は、同時対称の破れ(spontaneous symmetry breaking) の、全ての場合である。凝縮物質の物理学での、特筆すべき例は強磁性(Ferromagnetism) であり、粒子物理学において、最もよく知られた例は、標準モデル(standard model) におけるヒッグス機構(Higgs mechanism) である。

### 弦理論におけるタキオン

弦理論においてタキオンは、量子場理論におけるものと同じ解釈をもっている。しかしながら、弦理論は、少なくとも理論上は、タキオン場の物理を記述するだけでなく、そのような場の出現を予測している。

タキオン場は弦理論の多くのバージョンに、あきれかえるほど取り上げられている。一般に弦理論は、私たちが見ているものが、電子、光子、重力子などなどといった「粒子」が実際は、根底に存在している、同じ弦の、異なった振動状態であるということを、主張している。粒子の質量は、弦が見せている、その振動から生み出されうるものであり、おおまかに言えば、その質量は、弦が奏でる「音符」に依存しているのである。タキオンはしばしば、許された弦状態のスペクトルの中に現れるが、この意味において、ある状態では平方された質量が負値であり、かくして、虚数の質量となる。仮にタキオンが、開かれた弦(open string) の振動モードとして現れたとすると、弦がくっついているとされる、根底に存在する D ブレイン(D-brane) の不安定さを、このことが示していることになる。その系は、それから、閉じられた弦(closed strings) の状態、かつ、あるいは、安定した D ブレインへと衰退するだろう。仮にタキオンが、閉じられた弦の振動モードであるとする、このことは、時空そのものにおける不安定さを示している。一般に、この系がどのようなものに衰退するかということは、知られていない。しかしながら、仮に閉じられた弦のタキオンが、時空の、ひとつの特異点のあたりで、局所化されていたとすると、衰退過程の結末は、しばしば、解として求められた特異点をもつのである。

以下の項についての翻訳は略す。

- 4 空想上のタキオン
- 5 関連項目
- 6 参照
- 7 外部リンク

これらの詳細については、下記 URL を参照してほしい。

<http://en.wikipedia.org/wiki/Tachyon>