tachyon 粒子の測定について

1995 年度入学　0081　東 武大

平成 10 年 9月 21 日

1　実験の目的

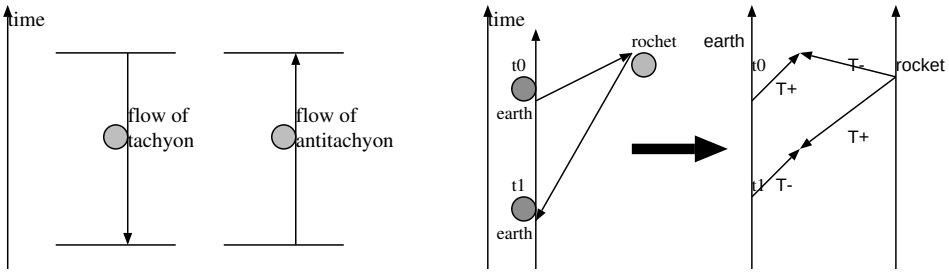
この実験の目的は、光よりも速い粒子である tachyon の存在を調べることにある。相対性理論では光より速い物体の存在を否定するものである。しかし、現在のところ、1967 年に G.Feinberg による論文によって、tachyon の理論的正当化に関する議論はなされており、これは従来の物理の枠組の中で tachyon の存在が許されることを主張するものである。また、実験的にも多くの物理学者が tachyon の存在を確認するための試みを行なっているが、これについては現在何ら肯定的な結果を人類が手にすることはできていない。ここまでで、私たちは実験的に tachyon を観察する方法を検討してきた。

2　理論面での tachyon の正当化

2.1　因果律との矛盾の解消

tachyon は時間に逆行して運動するため、粒子の吸収が、放出に先行するという矛盾をはらんでいる。この点を解消するために、「再解釈原理」によって tachyon の運動を解釈する。つまり、「負のエネルギーの tachyon の時間の逆行」という現象は、「正のエネルギーの anti-tachyon 時間の順行」として再解釈できる。こうすることで、tachyon の持つ因果律の破れを回避でき、なおかつ相対論の主張するところの「時間が進行する方向に走る負のエネルギーの粒子は存在しない」という点にも抵触しなくなる。つまり、tachyon は未来から過去に通信をする手段たりえず、まったくノーマルな現象として正当化できる。

下図の右は、ロケットに tachyon を送り、それを地球に送り返すことで過去に粒子を送れるのではないかという主張であった。しかし、これも再解釈原理によれば、地球上、ロケットからの双方が tachyon と anti-tachyon を 1 回ずつ放出した現象とみなせる。



These two phenomena are regarded
as eqivalent according to this theory.

2.2　tachyon の物理量ついて

tachyon を扱う上で問題になるもう一つの事柄は、運動量とエネルギーが従来の表式では虚数になるという点である。この問題を避けるために、tachyon は虚数の質量を持つ粒子であると考える。つまり、μを固有質量として、計測可能な物理量であるエネルギーと運動量を実数として取り扱う。

$$m = i\mu, \quad E = \frac{\mu c^2}{\sqrt{\frac{v^2}{c^2} - 1}}, \quad |p| = \frac{\mu v}{\sqrt{\frac{v^2}{c^2} - 1}} \tag{1}$$

このことを用いると、tachyon の運動方程式は、通常の相対論の運動方程式に代入することで、

$$-\frac{\mu}{(\frac{v^2}{c^2}-1)^{\frac{3}{2}}}\frac{d^2x}{dt^2}=F \tag{2}$$

となり、これはエネルギーを失えば失うほど無限大の速度に加速することを表している。質量は虚数であるが、tachyon については 重さ」という概念に意味はなく、測定可能量である、運動量とエネルギーの分散関係を表すパラメーターであると捉えることができる。

2.3 虚数質量のスカラー場について

従来の場の理論の考え方では tachyon は不安定な粒子であるとされている。Klein Gordon 方程式

$$(\nabla^2-\frac{\partial^2}{\partial t^2}+\mu^2)\phi=0 \tag{3}$$

の解は次式を満たす。

$$\phi_{\pm,k}=\frac{\exp(\pm i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}-\omega t))}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}}\quad where\ \omega=\sqrt{k^2-\mu^2} \tag{4}$$

そこで 、 $|k|<\mu$であるように k をとれば、上式の解は時間的に減衰し、従って tachyon は不安定な粒子であるとされている。この状態を解消するために、kの範囲を $|k|\geq\mu$に限定すると、完全性条件は次式で置き換えられる。

$$\sum_{|k|\geq\mu}=\phi^*_{+,k}(\mathbf{x},t=0)\phi^*_{+,k}(\mathbf{x}',t=0)=\delta(x-x')+\frac{\mu|x-x'|\cos(\mu|x-x'|)-\sin(\mu|x-x'|)}{|x-x'|^3 2\pi^2} \tag{5}$$

2.4 相互作用しない tachyon の場の理論について

tachyon の場の理論を考える上で、生成、消滅演算子をそれぞれ $a(k)$、$a^\dagger(k)$ とするとき、

$$\phi(x,t)=\int\frac{d^3k}{\sqrt{2\omega_k}(2\pi)^{\frac{3}{2}}}\exp(i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}-\omega t))a(k)+\int\frac{d^3k}{\sqrt{2\omega_k}(2\pi)^{\frac{3}{2}}}\exp(-i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}-\omega t))a^\dagger(k) \tag{6}$$

である。場の理論の Lorentz 不変性を見るためには、ローレンツ変換 $x'=lx+a$ に対するユニタリー変換

$$L(l,a)\phi(x)L^{-1}(l.a)=\phi(lx+a) \tag{7}$$

を考えれば良い。$k_0=\sqrt{k^2-\mu^2}$として、生成消滅演算子について

$$La(k)L^{-1}=\begin{cases}\sqrt{\frac{k'_0}{k_0}}a(k') & \text{if } \frac{k'_0}{k_0}>0\\ \sqrt{-\frac{k'_0}{k_0}}a^\dagger(-k') & \text{if } \frac{k'_0}{k_0}>0\end{cases} \tag{8}$$

である。(ここで $k'_\mu=l_{\mu\nu}k_\nu$) よって、反交換関係

$$a(k)a^\dagger(k')+a\dagger(k')a(k)=\delta^3(k-k')\ ,a(k)a(k')+a(k')a(k)=0,\ (k_0,k'_0\neq 0) \tag{9}$$

が Lorentz 変換 L について不変である。よって、**tachyon は spin を持たないが、fermion であるといえる。**また、tachyon の生成消滅演算子の考察によって、**tachyon の真空状態と粒子数は Lorentz 不変な量ではない** [1] ことが分かる。このことは、再解釈原理で、ある系から tachyon を出す現象が、別の系では、tachyon を吸収する現象であることの説明となっている。

3 tachyon の観測方法について

ここでは、空から降ってくる宇宙線の速度をじかに測定することで、速度が 3.0×10^8 以上の粒子が存在するかどうかを観察する。高度約 20km の上空では、宇宙線が大気中の原子核と衝突することで、荷電 tachyon が生成されると予測されている。その反応は、次式のように表されている。

[1] G.Feinberg, Phys.Rev. 159,1089(1967)

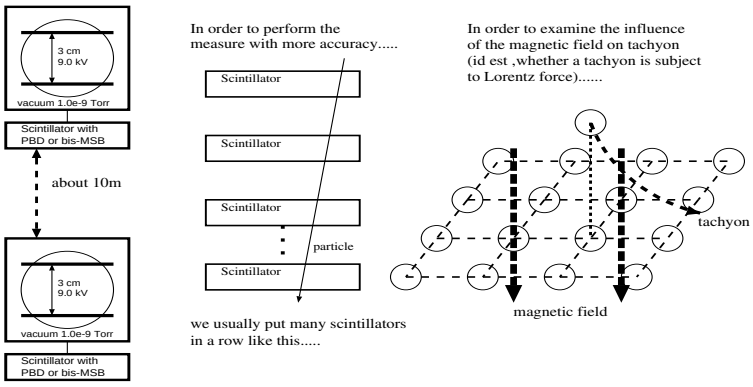
- (photon)+(nuclei)=(charged tachyon)+(other particles)
- (photon)+(nuclei)=(tachyon)+(anti-tachyon)+(other particles)

これを、以下のような装置で検出する。2 つのシンチレーターを学校の 5 階と運動場とに設置して[2]、それぞれの直前でエネルギーを得て走っている途中で Cerenkov 光を発光できるように電圧 9.0kV をかける。そうすれば、全エネルギーを吐き出すまでに $S = \frac{2\hbar^2 c^2}{Z^2 e^2 E_f} = 1.315 \times 10^{-3}_{cm}$ だけの距離を走ることになる。これによって、もし速度が c をこえるものがあるならば、tachyon が存在したと考えることができる。

tachyon 以外の粒子を排除するために、ある程度の真空を引くことが必要とされる。なぜなら、Cerenkov 光の発光の臨界角は、

$$\cos\theta = \frac{1}{\beta n} \tag{10}$$

(n は屈折率) で表せられるからである。よって、屈折率を落とせば落とすほど、仮に bradyon が Cerenkov 光を出すとしても、非常に高いエネルギーのものに限定されることになる。また、もし荷電 tachyon と磁場との相互作用を見たいならば、detector をグラウンドに図のように複数個おいて、Lorentz 力の影響を見ることもできる。



4 考察

今回の実験では、宇宙線に含まれている高エネルギーの muon を検出しないようにする必要が生じている。空から降ってくる muon のエネルギーと個数の関係は、既存のデータを信用することにする。入射する muon の数は、(グラフの値)^3×(detector の面積 (cm))×(測定時間 (s))×(立体角)×(グラフの x 軸の幅 (GeV)) で与えられる。立体角の計算は下図のようにしてできる。こうして、コンピューターシミュレーション[4]で計算したところ、結果として、真空度と bradyon の入射数について以下のグラフのような結果を得た。

従って、1 年に 1 個以上の muon が入らないためには、引くべき真空度は 1412_{Torr} であることが分かる。

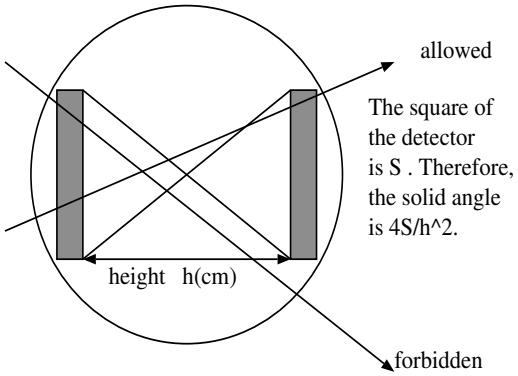
5 結論

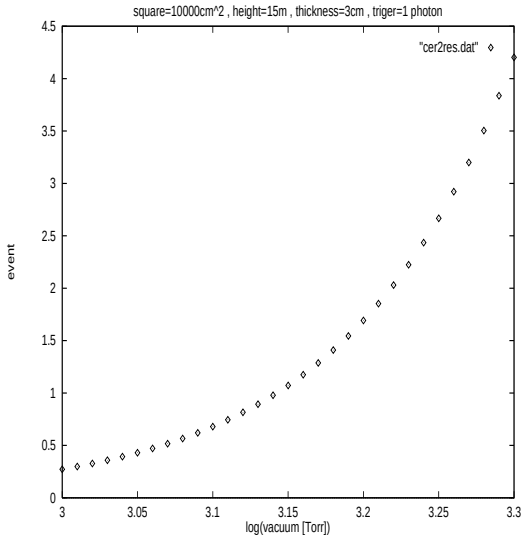
ここまで、私たちは tachyon のなかでも、特に荷電 tachyon についてのみ議論したことになる。私たちの考えた実験は結局のところまだ実行していない。しかし、tachyon が荷電粒子に限定されるかどうかは今のところ理論、実験いずれの側面からも解明されていない。電気的に中性な tachyon については、別に検出方法の提案を必要とするであろう。

[2]某日本最大のラジオ放送局の、「やさしいビジネス英語」の、荒磯芳行教授の「和文英訳コーナー」の問題文でこんな話がありました。「ある会社が 1 人の従業員を募集し、3 人の応募者を得た。一人は科学者、一人はエンジニア、一人はビジネスマンであった。彼らはそれぞれ石とひもとストップウオッチをわたされ、あるビルの高さを測定するように告げられた。科学者とエンジニアは与えられた道具を使って何とか高さを計算し、結果は 70m で誤差は ±25cm だと報告した。さて、ビジネスマンとはいうと、石もひもも持たずにビルに入り、すぐに高さはちょうど 71.5m だと報告した。どうしてそのことを知ったのか？彼は管理人にストップウオッチをあげてその代わりにビルの設計図を見せてもらうように取り引きしたのだ。結局、採用されたのはビジネスマンであった。」

[3]宇宙線から降ってくる muon の個数とエネルギーの分布については、物理学選書 5「宇宙線」P230 を参照

[4]使用したプログラムのソースは、98 年度 P1 のホームページを参照のこと。この評価では、集光率を 10%、量子効率を 20%としている。





参考文献

[1] G.Feinberg : Possibility of Faster-Than-Light Particles , *Phys.Rev.* **159**,1089(1967)

[2] Torsten Alvaeger and Michael N.Kreisler : Quest for Faster-Than-Light Particles , *Phys.Rev.* **171** , 1357(1968)

[3] 本間三郎： 「超光速粒子タキオン」, 講談社ブルーバックス, 1982.

[4] K.Kleinknecht： 「粒子計測技術」, 1984.

[5] 小田稔： 「宇宙線」, 物理学選書 5