

ISSN 2433-2631

オンラインジャーナル

言論の研究と教育

VOLUME 7 2024

(研究論文)

空間に凝縮したヒッグス場の抵抗が地球の公転運動を停止させないのはなぜか？—相対性理論とヒッグス粒子— 野中善政 1

『言論の研究と教育』規定 36

アジア・言論研究会

2024年11月15日発行

編集・発行 アジア・言論研究会

空間に凝縮したヒッグス場の抵抗が地球の公転運動を

停止させないのはなぜか？—相対性理論とヒッグス粒子—

Why does the resistance of the Higgs field degenerated in space not stop the Earth's orbital motion? - Theory of Relativity and the Higgs Particle -

野中 善政 (宮崎大学名誉教授)

【要 約】

素粒子の静止質量を生み出すヒッグス場の働きを説明するマット・ストラスラー氏の比喩^{[1],[2]}の整合性について検討した。前記の比喩は、振りの振動数が振動エネルギーに比例しないため、素粒子の質量が多様である理由を説明できない難点があることを指摘した。また前記の比喩は振りの共鳴振動を導入して「ヒッグス場の抵抗」を排除したが、電子場の波動を説明できても地球のような巨視的物体の慣性運動を説明することに成功していない。

前記の比喩のもう一つの難点は、マイケルソン・モーリーの実験(1887年)で否定された「エーテル」と、「ヒッグス場」の違いを明確に説明していないことである。アインシュタインが相対性原理を提示したことで「エーテル」の必要性は消滅したが、CERNの実験でその存在が検証された物理的実体であるヒッグス場が絶対基準系になり得ないのはどのような理由によるのか、説明していない。

本論考では、前記の比喩が退けた「ヒッグス場の抵抗」の概念を相対性理論と初期量子論によって再解釈し、直観的「粒子の運動」を基礎に、自由粒子^{<1>}に質量を付与するヒッグス場の働きについて一般向けの解説を試みた。その結果、ヒッグス場の「抵抗・水あめ論」にはその比喩として一定の合理性があること、またヒッグス場の抵抗により静止質量を得た自由粒子はヒッグス場に対して事実上静止しており、それゆえヒッグス場の抵抗は「慣性の法則^{<2>}」を破綻させるには至らないという、やや意外な結論に至った。

なぜ地球の公転運動がヒッグス場の抵抗を受けて停止しないのか、という疑問への回答の鍵は相対性理論にある；ヒッグス場が時空に一様に凝縮しているとすれば、地球、太陽に設定した慣性系^{<2>}(時空) K_E , K_S に凝縮した2つのヒッグス場 H_E , H_S の違いは時空の2つの断面、すなわちヒッグス場の2つの断面の違いに過ぎない。 H_E , H_S はそれぞれ K_E , K_S とほぼ同等^{<3>}である。 K_E が K_S に対して公転する(正確には等速度運動ではない)のは H_E が K_S に対して公転するのと同様であり、 K_E と H_S ($\sim K_S$) の衝突は起こらない。なぜなら K_E , K_S は時空にとられた2つの断面だからである。

註<1> 本論考では静止質量ゼロの光速で走る素粒子を自由粒子と呼ぶことにする。

註<2> 慣性の法則はガリレオやニュートンにより発見された。ニュートンの運動の第1法則は、「物体が全く力を受けていなければ、その物体は静止しているか、等速度で運動しているか、いずれかである」というものである。慣性の法則が成り立つ基準系を慣性系と言う。

註<3> CERNの実験(後述)で検証されたように、仮に光速に近い速度に加速された2つの惑星が衝突すればこの同等性は破綻する。この場合、惑星は消滅し、ヒッグス場からヒッグス粒子が生まれる。

はじめに

[本論考の意図]

宇宙の成り立ちや物質の起源に興味を抱く中・高校生、科学好きの一般人を読者に想定し、書かれている。ただし、数多の一般読者を想定した一般の啓蒙書(例えば講談社「Blue Backs」)では数式の使用はご法度とされているが、本論考では中高生なら理解可能と推測される代数式が多用されていることを予めおことわりする。

本論考のテーマは2012年にCERNの加速器実験でその実在が実証された「ヒッグス場」あるいは「ヒッグス粒子」が、われわれの現実世界と実際どのように関わるのか、どのように理解すべきか、ということである。ただし筆者自身は素粒子論の専門家では全くないので内容に初歩的な誤りが含まれる可能性を否定できないことを予めお断りせざるを得ない。

他方、科学の最先端の問題についての素人の論考は少なくとも専門分野の門外漢である一般社会人がそれぞれの立場でどのような点に関心を寄せ、どのような点でつまづいているか、その実例を示せる点では一定の価値があり、それなりに有意義であろう。本論考には多少、筆者のオリジナルな内容も含まれており、一読に値すると思われるが、一方で時間を無断にさせる懸念も大いにあり、是非、一読の上、本論考に対する批判、賛否について筆者にお寄せいただくことを読者に期待したい。

[CERNの発見に対する一般社会の関心]

「ヒッグス場」あるいは「ヒッグス粒子」の実在を検証した2012年のCERNの加速器実験^{[3],[4]}は20世紀半ばから国際的な研究が進められてきた素粒子論に一区切りをつけ、その「標準理論」を完成させた業績として科学界において大いに評価された。またメディアの報道を通してCERNの発見が特に物質の質量の起源を明らかにし、宇宙の起源や物質の成り立ちに関する理解を深めたという点が強調され、一般社会の関心を集めた。

大栗博司氏の著書「強い力と弱い力」^[3](幻冬舎2013年刊)の冒頭に「2012年素粒子物理学の歴史的瞬間」という見出しで、ヒッグス粒子発見の発見がもたらした物理学者たちの興奮状態が紹介されている。また「宇宙と物質の起源」^[4], p.273(講談社「Blue Backs」2024年刊「高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所」編)には

「・・・2012年に世界で初めてヒッグス粒子が観測されました。科学界に与えた衝撃は大きく、その翌年にはヒッグス粒子の提唱者であるヒッグス博士たちがノーベル物理学賞を受賞しました。科学の功績がこれほど短期で認められるのは異例のことです。追記しておく、このノーベル賞の受賞理由には・・・と実験的な発見にも言及していることにご注目ください。ノーベル賞の受賞理由に実験グループ名への言及があったのは初めてのことです。」と、全世界の約4000人の研究者が関わった、超電導技術等が駆使された巨大施設による実験の人類史的意義が紹介されている。

[本論考のテーマ]

ヒッグス場あるいはヒッグス粒子は、われわれの宇宙の成り立ちに深く関わっているが、その重要性について最も興味を引く解説は物質の普遍的属性である質量の起源に関わるというものである。今やその実在は実験事実となったが、われわれの五感では一切感知し得ないし、幽霊と区別がつかない抽象的思考の産物に映る。しかしその理解はわれわれが正しい世界観を形成する上で必要であり、物理学者が実験と数式の補助により習得した概念に可能な限り本質を失わない「比喩」を通して到達できることを期待し、次のような視点で論じる；

- ・ これまでどのような「比喩」を以て説明されてきたのか、また新たにどのようなアイデアが提案されているか、それらの「比喩」は十分整合性をもち、矛盾を含まないか
- ・ ストラスラー・メタファー^{[1],[2]}（後述）の長所と難点について
- ・ ヒッグス場の存在と慣性の法則の無矛盾性—特殊相対性理論^{<4>}に依拠した説明について

議論の中で様々な術語が登場するため、それらの解説を兼ね、ニュートンの重力の法則からヒッグス場の発見に至る科学史について最初に概説する。

註<4> 以降、「相対論」と略記する。

1. 重力の発見からヒッグス場の発見まで

1-1 われわれの宇宙は何からできているか？

われわれの身体を含め、身の周りにある物質は全て118種類の原子あるいは元素（水素ヘリウム炭素窒素酸素鉄ウランなど）で構成されている（天然に存在する原子は94種類）。原子は3種類の粒子（陽子・中性子・電子）で構成されていると見なされる。なぜなら各粒子の静止質量の合計が原子の質量にほぼ等しいことが確かめられるからである（質量保存則）。さらに陽子・中性子はそれぞれ3つの「クォーク」と呼ばれる素粒子で

構成されている。結局、電子とクォークが物質の最小単位（素粒子）ということになるが、世界はそれほど単純ではなく、もう一種類、電氣的に中性な「ニュートリノ」と呼ばれる素粒子が存在し、原子核反応で重要な役割を果たす。例えば福島原発事故で大量に放出された放射性セシウム 137 は電子 (+1) と「反」ニュートリノ (-1) を放出し（マイナスの電気を帯びた放射線は歴史的には「ベータ線」と呼ばれた）バリウム 137 に崩壊する。

ここで単に「ニュートリノ」ではなく、「反」ニュートリノ」と記したのは現在のところ経験的に「電子とニュートリノの総数は時間的に不変である」と認めざるを得ないので電子と「反」電子（陽電子）をそれぞれ+1個、-1個と数え、またニュートリノと反ニュートリノをそれぞれ+1個、-1個と数えることで原子の放射性崩壊における生成粒子数の合計ゼロと解釈するためである。

ニュートリノの質量はいまだ不確定だが、その推定上限値は電子質量の約 100 万分の 1 と極めて小さく、今世紀初頭までニュートリノの静止質量をゼロと想定する素粒子理論が採用されていた。ニュートリノの静止質量がゼロのとき、ニュートリノの運動速度は光速に等しくなる[(7)式]。

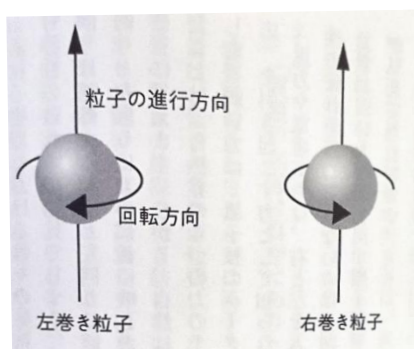


図1 素粒子のスピン⁶の向き。スピンとは素粒子がもつ自転しているかのような性質。素粒子の進行方向に向かって時計回りに回転する素粒子は右巻き粒子、反時計回りは左巻き粒子。—講談社 Blue Backs「宇宙と物質の起源」p.136 から転載—

原子核（陽子+中性子）を中心に電子が公転する原子構造を研究する中で、電子が質量・電荷という属性を備えるだけでなく、「スピン」⁶という属性を備えていることが明らかになった。電子のスピンは原子中の電子を太陽の周囲を公転する地球に例えたとき、地球の「自転運動」に例えられる。地球の自転軸は現在、公転軌道面に対して約+64.5° 傾いているが、いろいろな偶然的要因が働いた結果、たまたまその値になっているのであり（これにより適度の季節変動が生じる）、自転軸の向きは本来-90° ~+90° の間の任意の値を採ることができるはずである。実際、他の惑星の自転軸の傾きは様々である。

ところが電子のスピンの場合、不思議と言えば不思議だが、電子の公転軌道面に対して±90° の方向しかとれない（「観測」したとき±90° のいずれかになる）。一般に原子に束

縛されていない金属中の電子については電子の運動方向を基準にする。電子の運動方向とスピン軸が一致するとき「右巻き」、逆になるとき「左巻き」と呼ばれる (図 1)。クォークやニュートリノも電子と同様に「スピン」という属性を備えており、理論的には電子と同様に右巻き、左巻きの 2 タイプがあってもよいことになる。

しかし前述のベータ線の観測結果から質量がゼロか極めて小さい、右巻きタイプの反ニュートリノしか観測されないことが明らかになった (ニュートリノを「左巻き」とする)。

この事実は次のように解釈される；

ニュートリノの静止質量をゼロ (運動速度=光速) としたとき、静止質量をもつ電子とは異なり、ニュートリノは右巻きあるいは左巻きのいずれかに限定されるが、観測結果は後者であることを示した。ニュートリノの静止質量が非ゼロ (運動速度<光速) のとき、より光速に近い速度で走る観測者に対するニュートリノの相対速度がマイナスとなってニュートリノが観測者に接近するので「左巻き」・「右巻き」状態は観測者の移動速度により交替する。他方、ニュートリノの静止質量がゼロ (運動速度=光速) のときは、「左巻き」と「右巻き」の交替が起こらず常に区別される。すなわち「右巻きニュートリノ」と「左巻きニュートリノ」を別個の素粒子と解釈しても矛盾はないということである。

1-2 物質と並ぶ世界を構成する要素—光

[光と宇宙]

われわれの世界を構成する要素はいわゆる物質だけではない。聖書の創世記の天地創造に「1 はじめに神は天と地とを創造された。2 地は形なくむなしくやみが淵のおもてにあり神の霊が水のおもてをおおっていた。3 神は「光あれ」と言われた。すると光があった。4 神はその光を見て、よしとされた。神はその光と闇とを分けられた。」とあるように「光」がこの世界の重要な構成要素であることを人類は太古から認識していた。人類は古代から太陽の運行により昼夜の交替がもたらされる仕組みを洞察し、太陽光や燃焼による発光を観察して夜間の照明や熱エネルギーとして利用し、また太陽光の直進性を利用して幾何学を宇宙規模に発展させ、地球一周の長さ地球・月間距離と地球・太陽間距離の比率などを推定することに成功した。

光の本性についての人類の考察はなかなか進展しなかったが、17 世紀末にオランダのホイヘンスが「光の波動説」を提唱し、そのすぐ後にイギリスのニュートンが「光の粒子説」を提唱した。そして 1865 年にイギリスのマックスウェルは光が「電磁波」であることを理論的に導き、光速 $c(\cong 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s})$ を電磁波の伝播速度と解釈できることを証明した。

しかしながら当時はまだ時間や空間という概念が深く理解されていなかったため、改めて考えなおすと電磁波の伝播速度が、いかなる基準系に対する速度なのか、問題になった。

当時提案されたアイデアは未知の媒質「エーテル」が宇宙空間を満たしていると仮定した上で、電磁波を「エーテル」を伝わる「横波」と解釈するものであった。通常の媒質なら「縦波」も存在するので音波を想像すればそれ自体奇妙である。「エーテル」はある意味で現代素粒子論に導入された「ヒッグス場」に似ている。

もし「エーテル」が太陽系空間を満たし、太陽に対して静止しているとすると地球の公転速度 u は「エーテル」に対する速度と解される。地球の公転方向に伝わる光の本来の速度を「エーテル」を伝わる電磁波の伝播速度 c とすると地球上の観測者に対する光の速度は $c-u$ となる。他方、地球の公転軌道に対して垂直な方向—太陽方向または反対方向—に伝わる光の速度は地球の公転運動の影響を受けないため、本来の速度 c と一致するはずである。つまり地球上の観測者が測定する光速は光の進行方向によって異なることが予想される。しかしこの予想は1887年のマイケルソン・モーリーの実験により否定され、測定される光速は光の伝わる方向によらず常に本来の速度 c と一致することが明らかになった。

[光速の絶対性—相対性理論]

上記のパラドクスをどのように解決するか、物理学上の重要なテーマになったが、1905年にアインシュタインがパラドクスを解消する最有力理論—現在では「相対性理論」と呼ばれる—を発表した。相対論は次の2つの原理に立脚している；

- (R1) 互いに等速度で移動する全ての基準系（慣性系^{<2>}）[時空：時間 x^0 ・空間(x^1, x^2, x^3)]は物理的に対等であり、全ての物理法則は全ての慣性系に対して同等な形式で記述される（相対性原理）。
- (R2) 物体間の各種相互作用の最大伝播速度は光速 c と一致する。全ての慣性系に対して光速 c は一定値をとる（光速の絶対性）。

もし相対性理論を認め、発想を転換して実験事実を原理として採用すれば、マイケルソン・モーリーの実験を改めて解釈する必要はなくなり、「エーテル」も不要となる。

相対論^{<4>}から時間・空間について何が言えるだろうか？ この場合の自明な法則：「全ての慣性系に対して光速は一定値をとる」を例に説明する。とりあえず光が電磁波であるとして波面が座標軸 x^1 に垂直な平面波について「光速不変の法則」を式で表すと

$$[\text{光の波面の進行距離 } x^1] = [\text{光速 } c] \times [\text{時間 } t] = x^0 \quad (1)$$

となり、この関係がどの慣性系に対しても成立することから、例えば慣性系(x^0, x^1, x^2, x^3)に対して、座標軸 x^1 の正方向に速度 u で移動する慣性系を(x'^0, x'^1, x'^2, x'^3)とすると

$$[\text{光の波面の進行距離 } x'^1] = [\text{光速 } c] \times [\text{時間 } t'] = x'^0 \quad (2)$$

となる。一つの事象について「空間座標(=位置)と時間座標(=時刻)がともに相対的である」と見なすのがポイントである。つまり同一の光の波面の動きが、ある慣性系では時空座標 (x^0, x^1) 、他の慣性系では時空座標 (x'^0, x'^1) により記述されることになる。2つの時空座標の最も簡単な関係として

$$x^0 - x^1 = x'^0 - x'^1 = 0 \quad (3)$$

が想定されるが、光は一般に3次元空間を伝わるので、(3)式は一般的ではない。そこで空間距離 l の2乗： $l^2 = (x^1)^2 + (x^2)^2 + (x^3)^2$ を採用し、特に光の波面が座標軸 x^1 の正方向に伝わる場合の関係として

$$s^2 = (x^0)^2 - (x^1)^2 = (x'^0)^2 - (x'^1)^2 = 0, \quad (x^2 = x'^2, \quad x^3 = x'^3) \quad (4)$$

を採用する。この式を解くと2つの時空座標 (x^0, x^1) と (x'^0, x'^1) の関係が導かれる。対応： $(x^0, x^1) \rightarrow (x'^0, x'^1)$ を「ローレンツ変換」と言い、次のように書ける；

$$x'^0 = \frac{x^0 - \beta x^1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x'^1 = \frac{x^1 - \beta x^0}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \left(\beta = \frac{u}{c} \right) \quad (5)$$

2つの時空座標の関係は直交軸座標 (x^0, x^1) と斜交軸座標 (x'^0, x'^1) の対応として時空図により視覚的に明瞭な形で表現される(後述, 図7)。時空図において光の経路(世界線)は $\pm 45^\circ$ の傾きの直線群に対応する。

[光量子仮説と光子]

19世紀後半から20世紀初頭にかけて産業革命が起こり、溶鋳炉の温度を精密に制御するため、溶鋳炉内部の光のスペクトルの研究が行われた。1900年にドイツのマックス・プランクは実測と正確に一致する「スペクトル曲線」を温度の関数として理論的に導いたが、その際、溶鋳炉の壁が射出または吸収する光のエネルギーが「エネルギー量子」 $\varepsilon = h\nu$ (プランク定数： h 周波数： ν)の整数倍であるという「仮定」を採用せざるを得なかった。

アインシュタインは相対論を発表した2005年に光電効果を説明するためにプランクの「エネルギー量子」の解釈を変更して「光は波動であるとともに粒子である」とする「光量子説」を発表し、光量子のエネルギー E と運動量 P が

$$E = h\nu = \frac{ch}{\lambda} \quad P = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (6)$$

により与えられることを提案した(プランク定数： h 、光速： c 、光の周波数： ν 、光の波長： λ)。この光量子(light quantum)は現在では単に「光子(photon)」と呼ばれ、電荷をもつ基本粒子—例えば電子・陽子の間の相互作用(電磁力)を担う素粒子と解釈されている。電子・陽子が(仮想)光子をキャッチ・ボールして電磁力が働き、原子が構成される[図9(a)]。原子から放たれた(実)光子、例えば太陽光の光子は光速で飛行するので静止質量はゼロと見なされる。

[静止質量ゼロと光速の関係]

なぜ粒子の静止質量と光速が結びつくのだろうか？ 前述の相対論に基づき一般に速度 u で運動する粒子のエネルギー E は次のようになる；

$$E = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} \quad (7)$$

したがって粒子の速度 u がゼロであれば、すなわち粒子が静止していれば、 $E = m_e c^2$ となり、これが粒子の静止エネルギーである。ただし静止質量 m_e がゼロでないとき、粒子の速度 u が光速 c に近づく $[(u/c) \rightarrow 1]$ と (7) 式の分母がゼロに近づく粒子のエネルギーは無限大になるが、それはあり得ないので、光速で飛行する粒子の「静止質量」はゼロと考えざるを得ない。それでは一般に光速で飛行する粒子のエネルギーはどうなるだろうか？ (7) 式は使えないが、(6)式が参考になる。光速で飛行する素粒子は現宇宙では光子以外^{<5>}には考えづらく、2015年に始めて検出された重力波が「光速で伝播する」という実験事実から、電磁波に光子が対応し、重力波に「重力子」が対応するという意味で理論的に考えられるのみである。しかしながら、この宇宙が始まったとき、全ての素粒子が光速で飛行していたとする仮説がヒッグス場（ヒッグス粒子）導入の背景にある。

註<5> 前世紀にはニュートリノの静止質量はゼロと考えられていた。またクォーク間の強い力を担うグルーオンは役割的に光子と同じグループに属し、静止質量はゼロとされているが、核子（陽子・中性子）の中に閉じ込められている。

1-3 物質粒子、光子とヒッグス粒子はどう違うのか

電子、ニュートリノ、クォークなど広義の物質粒子のスピンの^{<6>}が $1/2$ なのに対し、電磁相互作用を担う光子のスピンは 1 、また右巻き・左巻き粒子のどちらも結合するヒッグス粒子のスピンは 0 とされている。スピンの半奇数 ($1/2, 3/2, \dots$) か、整数 ($0, 1, 2, \dots$) かによって（前者をフェルミ粒子、後者をボース粒子と呼ぶ）、粒子の集団的振る舞いに決定的な差が生じる。ボース粒子は臨界温度以下で最低エネルギー状態に落ち込んで真空中に凝縮し、固体の超電導状態に準えられる状態をつくる。ヒッグス粒子のスピンのゼロは真空のスピンのゼロは矛盾しない。それに対してフェルミ粒子群はそれが物質を構成することから想像できるように最低エネルギー状態に落ち込んで真空中に凝縮できない（エネルギーが同じ粒子はスピンの反対向きの2個に限られる）。ただしクォークの場合はそれに作用する「強い力」によってクォーク・反クォークが対をなしてスピンのゼロの複合粒子^[5]を形成するので凝縮可能である。

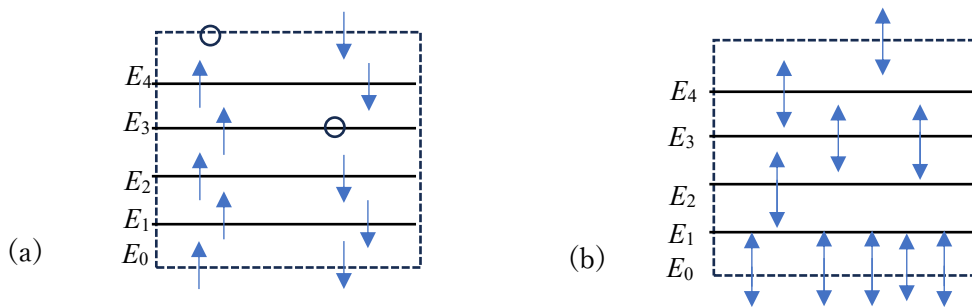


図2 体積 L^3 の量子力学的に閉じた空間域(例えば原子)におけるフェルミ粒子とボース粒子の状態. 個々の粒子は全エネルギー状態(E_0, E_1, E_2, \dots)をとり得るとする. エネルギー差: $E_n - E_{n-1} (n = 1, 2, \dots)$ は L に逆比例する. (a)フェルミ粒子の場合, 各エネルギー状態(E_0, E_1, E_2, \dots)を占める粒子はスピンの逆方向に向いた2個の粒子に限られる. (b)ボース粒子の場合, 2個以上複数の粒子が同一エネルギー状態 $E_n (n = 0, 1, 2, \dots)$ を占めることができる. 臨界温度以下では全粒子が最低エネルギー状態 E_0 に落ち込み凝縮する.

註<6> スピンは角運動量 (=回転半径×運動量)と同じ次元 ([エネルギー]×[時間])をもつ物理量であり, 通常 $\hbar = h/2\pi$ の倍数で表す ($1/2 \rightarrow \hbar/2$).

1-4 なぜ素粒子は質量をもつのか?

16~17世紀にガリレオが登場するまで人類は物体の「質量」と「重さ」の区別ができなかった. ニュートンは不思議に感じながらも「質量」と「重さ」の関係を考察し, 「重力の法則」と「運動の法則」にまとめた. 重力の法則によれば2つの物体に作用する重力はそれぞれの質量の積に比例する. 他方, 運動の第2法則によれば物体に働く力は物体の慣性力 (=質量×加速度)に一致するが, 2つの法則から導かれる質量が一致する必然性はない. しかしアインシュタインは「重力質量」と「慣性質量」の等価性を原理として「一般相対論」を構築した.

素粒子論で扱う質量は「慣性質量」である. なぜなら重力が電磁気力などに比べ, 極めて微弱な力であるため, 2つの素粒子に働く重力を測定して素粒子の質量を割り出すことは事実上不可能だからである.

われわれは物体が一定の「重さ」ないしは「質量」を備えているのは当然と感じる. 物体(物質)が原子によって構成され, 原子が素粒子によって構成されることは既に述べた. 素粒子の集合体である物質(岩石, 鉱物, 有機物)が「質量」をもつならば, 素粒子が「質量」をもつと推理するのは自然である.

20世紀に入り, 物質の微細構造を分析する技術が進歩し, 物質を構成する原子の数 N に原子の質量 m を掛けた値が物質の質量 M にほぼ一致することが確かめられた ($M = Nm$). 太陽が惑星に及ぼす重力から太陽の質量を求め, 太陽を構成する陽子の数を計算することもできる.

[宇宙誕生時の素粒子の静止質量をゼロとする根拠]

それでは改めてなぜ宇宙が始まったときヒッグス粒子を含む全ての素粒子は光速で運動し、静止質量がゼロであったと想定する必要性が生じたのだろうか？ 上で述べたように放射性元素のベータ崩壊の観測から「左巻き」ニュートリノしか存在しないことが明らかになったからである。その結果「左巻き」電子と「右巻き」電子も本来別種の素粒子ということになり、それぞれ時空を光速で飛行するのが本来の状態ということになった。

[真空の相変化による質量獲得]

宇宙誕生後急速な膨張によって宇宙の温度が下がると水蒸気が凝結して水滴になるように素粒子の「凝縮」が始まる。水滴の形成の場合、水蒸気分子間の電気力が関わっているが、素粒子の場合も素粒子間の力（相互作用）が凝縮に関与する。例えばクォークには「電磁気力」「弱い力」「強い力」という3種類の力⁷が作用するが、特に「強い力」によって「クォーク・反クォーク」が対をつくる状態で真空中に凝縮する^[5]。

こうなると光速で飛行するクォーク（右巻き）は凝縮したクォーク対に衝突して消滅するとともにクォーク（左巻き）を叩き出し、さらに生成したクォーク（左巻き）は再びクォーク対に衝突してクォーク（右巻き）を叩き出す。こうして次々と衝突が繰り返され全体として自由クォークは空間をジグザグに進むことになるため、平均速度が光速以下となり、クォークが静止質量を獲得したように見える。

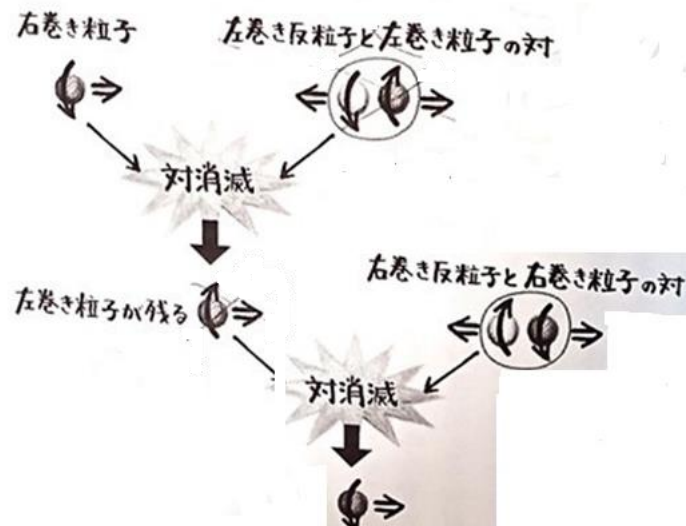


図3 右巻き粒子が真空中を走ると真空中に埋まった粒子・反粒子対にぶつかって左巻きに変わる。その左巻き粒子もまた粒子・反粒子対にぶつかって右巻きに変わる。こうして真空中で右巻きと左巻きが繰り返す、現れることになる。右巻きと左巻きを区別していたカイラル対称性は粒子・反粒子対が埋まった真空のために壊れ、粒子が質量をもつ。—講談社 Blue Backs「質量はどのように生まれるのか」p.191 から転載—

註<7> 強い力はクォーク間にのみ作用し、電子・ニュートリノには働かない。弱い力はクォーク、電子、ニュートリノの左巻き粒子に働き、右巻き粒子には働かない。電磁気力はニュートリノ以外の電荷をもつ粒子に働く。

1-5 ヒッグス場導入の必然性

以上のシナリオで電子の静止質量を説明しようとするのがヒッグス場（ヒッグス粒子）導入の動機になっている<6>。電子やニュートリノにはクォークのように「強い力」が働かないのでクォーク・反クォーク対の役割をする別の素粒子が必要とされた。このヒッグス粒子（場）は左巻き粒子と右巻き粒子を結合させる性質をもつ。しかしヒッグス粒子がどのようなメカニズムで空間に凝縮し、質量を獲得するのかという根源的問題が生じる。

イギリスのピーター・ヒッグスは1964年に次のようなモデルを提案した；ヒッグス粒子は「自己相互作用」により最小エネルギー状態に落ち込み質量 m_H を獲得する。

$$m_H = v\sqrt{2\lambda} \quad (8)$$

ここで λ はヒッグス場の結合定数 $v/\sqrt{2}$ はヒッグス場の強さの真空期待値である[後述, (13)式]。ヒッグス粒子が空間に凝縮し $v > 0$ となるには、そのスピンの向きがゼロでなければならない。凝縮したヒッグス粒子（ヒッグス場）は電子やクォークの運動に対する抵抗として働き、それらに質量を付与する[後述, (19)式]。

しかしこのような物理学者のある意味、恣意的な仮定を果たして自然が許しているのか、大きな謎であったが、2012年にCERNの大型加速器実験により、ヒッグス粒子の存在が確認された。

上記のようなヒッグス粒子が真空中に凝縮したとすれば右巻き電子がヒッグス粒子に衝突して跳ね返されると左巻き電子になる（図3）。なぜならスピンの向きは変わらずに運動方向が逆転するからである。「場の量子論」では右巻き電子が消滅し、新たに左巻き電子が発生したと解釈する。ただし注意しなければならないことは、左巻き粒子が右巻きに変わると素粒子に働く3種類の力のうち「弱い力」が働かなくなるので、場合によっては右巻き粒子が電氣的に中性なヒッグス場を通り抜けてしまう可能性があることである（クォークに働く「強い力」はもともと電子には働かない）。ところがヒッグス粒子（場）は右巻き粒子とも結合する。こうして図7に示したようにヒッグス場による左右の壁の間を自由電子<1>が反射・往復することになり、もともと光速で飛行していた電子の平均速度が光速以下となり、電子が静止質量を獲得したように見える。

註<6> 大栗博司氏は著書「強い力と弱い力」（幻冬舎2013年刊）で次のように述べている；

『そもそも、素粒子論の研究者たちは、「素粒子の質量の起源を説明しよう」という問題意識で標準模型を考え出したわけではありません。ヒッグス場を導入したのは、弱い力の三つの謎を解くためです。・・・ヒッグス粒子が「質量の起源である」という解説は、標準模型の形が整ってから何年も経っ

てから、この理論を一般の人々のために創作されたものようです。・・・「水あめ論」のような例え話が出てきてしまうのも、そもそもヒッグス場の仕組みを含む標準模型ですら理解できていない「素粒子の質量の起源」を、無理やり説明しようとするからでしょう。』

2. 重力場中の振り子振動とヒッグス場—ストラスラー・メタファー

2-1 ヒッグス場が素粒子に質量を与える本当の仕組み

本論考のテーマに重なる記事が今年 2024 年 9 月 14 日にインターネット・サイト Gigazine.net に『ヒッグス場が素粒子に質量を与える「本当の仕組み」とは?』というタイトルで掲載された^{[1],[2]}。著者自身がかねがね関心をもっていた問題であり、その記事の指摘に興味をもったことが本論考をまとめる動機になっている。

記事には筆者と共有する問題意識とともに、そもそもヒッグス場あるいはヒッグス粒子とは何か、一定示唆されており、その解説を兼ねて記事の内容を以下に引用する；

『2012 年に大型ハドロン衝突型加速器でヒッグス粒子が発見されヒッグス場の存在が証明されて以来、物理学者らはヒッグス場が物体に質量を与える仕組みを説明するために水あめやスープ群衆など身近にあるさまざまな物を使った例え話をしてきました。ハーバード大学物理学部の准教授であるマット・ストラスラー氏が楽器の弦の振動による「音楽」の方がこうした例え話よりも正確だと提案しています。

ヒッグス場が粒子に質量を与えるメカニズムの説明として The New York Times のコラムは「雪」を使っており「ヒッグス場は一面の雪原のようなもので雪をかきわけて歩く人とスキー板ですべる人雪原の上を飛ぶ鳥とでは雪から受ける抵抗が違うが、この抵抗が質量の由来」と解説されています。

しかしこうした説明の多くは物理学者が大学 1 年生に教えるさまざまな理論と矛盾しているとストラスラー氏は指摘します。例えばヒッグス場が抗力を発揮して質量を生み出すというのはニュートンの運動の第 1 法則と第 2 法則に矛盾しており、もしこれが本当なら宇宙に広く存在するヒッグス場の影響で地球はとっくに減速して太陽の中に落ちていきます。—中略—

話をヒッグス場に戻すと質量は水あめのような物質で素粒子が減速して生じるのではなく「ヒッグス場が強くなればなるほど素粒子は高い周波数で振動しその分だけ質量が増大する」ということになります。そのためヒッグス場は他の場の共鳴周波数を高める「宇宙硬化剤」のようなものだと考えることもできます。

ヒッグス場が別の場の周波数を変えることで質量を与える仕組みをストラスラー氏は振り子に例えています。重力場がない空間の場合振り子は宙に浮かびますが、重力場が存在すると振り子は真下に垂れ下がって左右に揺れるようになります。

この振り子が右に振れると重力によって左に戻ります。また逆も同様です。この復元効果は重力場が強くなればなるほど強くなり、振り子の共鳴周波数も高くなります。同じようにヒッグス場は他の基本場に復元効果を生み出し、その振動を変えます。この振動が粒子の質量となるわけです。』

以下では素粒子の静止質量を生み出すヒッグス場の役割を、振り子に作用する重力場に例えるマット・ストラスラー氏の比喩を SMHF (Strassler's Metaphor explaining Higgs Field) と呼ぶ。

まず記事の内容を正確に理解するためには、「ヒッグス場が粒子に質量を与えるメカニズム」という文には、「宇宙誕生時に物質を構成する素粒子やヒッグス粒子など全ての素粒子が静止質量ゼロのまま光速で運動していた」とする前提があることに注意しなければならないだろう。実はこのような状態をイメージするのは難しくない。§ 1-2 [光量子仮説と光子] で述べた溶鉱炉内の光の状態と考えればよいだろう。

宇宙誕生後の急激膨張による温度の低下とともに宇宙誕生から約 100 億分の 1 秒後に光速で飛び回っていたヒッグス粒子が最初に質量を獲得して宇宙空間に凝縮し、その抵抗によって物質粒子や光子に類する相互作用を担う粒子が光速以下に減速され、静止質量を獲得したという考え方が紹介されている。

このように言わば物理学者に都合のいい、素粒子論の難点を克服する粒子^{<8>}が果たして実在するのか、20 世紀半ば以降の物理学の難題であったが、2012 年に CERN の実験で検証されたことは上述の通りである。

註<8> ヒッグス場が素粒子論に導入された第一の動機は、電子・クォークなどのフェルミ粒子の静止質量を説明する目的よりも、むしろベータ崩壊に関わる「弱い力」と「電磁力」の到達距離の差を説明することにあつたとされている。

2-2 ヒッグス場の比喩が満たすべき条件

質量の起源—ヒッグス場の抵抗説について大栗氏は次のように記している。

『・・・こうしてヒッグス粒子発見の報道で例え話としてよく使われたのが「水あめ論」でした。もともとは質量のなかった電子やクォークに空間をぎっしりと満たしているヒッグス粒子が水あめのようにまとわりついてそこを通過しようとする粒子の運動を妨げる。こうして粒子は「動きにくさ」＝「質量を与えられる」という説明です。しかしこの説明は間違っています。』

大栗氏は水あめ論を間違いとする理由が「質量の効果」と「抵抗の効果」を混同していることにあると述べている。ニュートンの運動の第 2 法則は真空中の粒子の運動を変化させようとする場合、加速・減速に関わらず ($a < 0$ または $a > 0$)、質量 m の大きい粒子ほどより大きな力 F が必要であることを述べている ($|F| = m|a|$)。水あめ論では運動する粒

子に作用する抵抗力 $|F|$ が大きいほど粒子の減速 $|a|$ が大きい ($|F| = k|a|$) という点では質量 m は抵抗係数 k に例えられるが、水あめの中を移動する粒子はエネルギーを失って静止し、それ以上何も起こらない。他方、ヒッグス場を通り抜ける粒子がエネルギーを失い静止することはないので水あめは適切な「比喩」になっていないと大栗氏は述べている。まとめるとヒッグス粒子を説明する適切な「比喩」は以下の条件を満たす必要がある；

もともと光速で運動していた質量ゼロの素粒子（自由粒子と呼ぶ）が宇宙誕生後、宇宙空間に凝縮したヒッグス場との相互作用により静止質量を獲得する；

- (C1) ヒッグス場との結合（とりあえず「抵抗」と言う）が強い素粒子ほど大きな静止質量を獲得する。
- (C2) 素粒子の静止質量はヒッグス場の大きさに比例する。
- (C3) 静止質量を獲得した素粒子はヒッグス場の中を光速以下の速度 $u < c$ で運動し、新たにヒッグス場の抵抗を受けない—ニュートンの運動の第1法則—慣性の法則が成立すること。

2-3 ストラスラー・メタファー (SMHF) の合理性

§ 2-1 で紹介したように SMHF はヒッグス場を一群の振り子に作用する仮想的な重力場に例えることを提案している。素粒子の種類と同数の振り子（紐の長さがそれぞれ異なる）が1セットを構成し、無数のセットが等間隔で並列しているものとする。また、例えば宇宙船などを利用して仮想的な重力場をオン・オフできるものとする。重力場をオフにした状態が宇宙誕生時の状態に相当し、全ての振り子は宇宙船の中で宙に浮いたままで振動しない。この状態は全ての素粒子の静止質量が宇宙誕生時にゼロであったことに相当する。「重力場」がオンになった状態は宇宙誕生から100億分の1秒後にヒッグス粒子が質量を獲得し、宇宙空間に凝縮した状態に相当する。

重力場の作用により、個々の振り子は紐の長さ l に応じた周期 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ で振動し（SMHFは「場」に応答する素粒子の「共鳴周波数」に見立てる）、紐の長さ l が長いほど、また重力加速度 g が小さいほど周期 T が長く、周波数 ($\nu = 1/T$) が大きい。振り子の等価質量比 $\Delta m/m$ は次のようになる；

$$\frac{\Delta m}{m} = \eta \frac{V^2}{2c^2} = \eta \frac{2\pi^2 l^2 \nu^2}{c^2} = \frac{\eta l g}{2c^2} = f g, \quad \eta = 2(1 - \cos \theta_0) \approx \theta_0^2. \quad (9)$$

ここで c は光速、 m は振り子の重りの質量、 $V = 2\pi l/T$ 、 θ_0 は振れ角である。 $f = \eta l/2c^2$ を素粒子とヒッグス場の結合定数、重力加速度 g をヒッグス場の大きさに見立てれば SMHF は適切な「比喩」の第1・2条件 C1・C2 を満たしているように見える。ただし明白な難点があり、それについては後述する。

[拡張された SMHF と電子の量子的波動]

次に第3条件 C3 についてはどうだろうか？ 振りが速度 u で重力場を水平に移動しても重力場から抵抗を受けないという証明は「トートロジー」である。なぜなら重力場をそのように設定したからである。これについて Gigazine.net の記事では特に説明されていないが、SMHF の拡張として次のようなやや技巧的な模型が推測される；

質量を獲得した素粒子がヒッグス場（通常のイメージでは真空）を一定速度 u で移動する状況は、振りの振動を伝える細い棒で連結され、等間隔に並んだ振りの共振により模擬できるだろう。ただし重力場がオンになる時刻ゼロに水平に並んだ振りが振れ角 θ_0 で交互に左右に振れ切れた状態で静止しているように調整される必要がある（図4）。この場合、隣接する振りの距離を $\lambda/2$ とすると、一群の振りの共振により構成される波動の波長は λ ということになり、波動の伝播速度 u と周期 $T (= 1/\nu)$ 、波長 λ の関係は次式のようになる；

$$u = \lambda\nu, \quad \nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{\mu}} \frac{g}{c}, \quad (\mu = \Delta m / \theta_0^2 m). \quad (10)$$

(10)式によれば、重力場 g が一定の下で有効質量比 μ を共通とする共振振子群の波動が伝播速度 u をもつとした場合、振りの周波数 ν は有効質量比の平方根 $\sqrt{\mu}$ に逆比例し、波長 λ はそれに比例する。SMHF はヒッグス場の大きさ、もしくは結合定数の増加がヒッグス場と共鳴する素粒子の周波数と静止質量の増加をもたらすという図式を提案している。しかし実際には振りの周波数 ν と有効質量比 μ （静止質量に相当する）の関係はそれとは逆になる。この原因は単純であり、重力場一振りの結合定数 $f = \eta l / 2c^2$ の増加が有効質量比 μ の増加をもたらすと同時に周波数 ν の減少をもたらすことにある。

他方、真空中を速度 u で移動する電子の量子力学的波動（波動関数）の周波数 ν 、波長 λ の関係は次式のようになる；

$$u = \lambda\nu, \quad P = \frac{h\nu}{c} = \frac{m_e u}{\sqrt{1 - (u/c)^2}}. \quad (11)$$

ここで m_e は電子の静止質量、 h はプランク定数である。(11)式において $u \rightarrow c$ のとき $\nu \rightarrow \infty$ となり、 $u \rightarrow 0$ のとき $\nu \rightarrow 0$ 及び $\lambda \rightarrow \lambda_e = h/m_e c$ となる。 λ_e はコンプトン波長と呼ばれている。 u が一定に保たれる場合、波長 λ と周波数 ν は電子に固有の値をとり、それぞれ電子の質量 m_e に逆比例、比例する形になっており、波長・周波数の質量依存性において(10)式と(11)式は相反する関係になっている。

(10)式が古典力学^{<9>}に基づいて振りの有効質量比 μ を振りの長さ l や重力場 g に帰着させているのに対し、(11)式が量子力学と相対論に基づいている点に注意しなければならない。仮に電子の質量 m_e がヒッグス場の大きさ ν に比例するとすれば ($m_e \propto \nu$)、 $\nu \rightarrow 0$ ($m_e \rightarrow 0$) のとき、 $u \rightarrow c$ 及び $\nu \rightarrow 0$ でなければならない。ヒッグス場が消失すれば、電子は光速で運動し、静止質量がゼロとなることから、自由電子とヒッグス場の相互作用が電子の静止質量の起源であることが示唆される。(9)式は振りが重力場の「抗力」でなく重

力場との「共鳴」により質量を獲得することを意味する。その意味では(10)式は(11)式の比喩と見なせる。

(10)式と(11)式には古典的波動と量子的波動の違いを超えてある共通性がある；一般に波長が可変で振動数 ν が波長 λ に反比例し、伝播速度 u が波長に依存せず、一定に保たれるとき、正弦波からずれた波形^{<11>}（波束）も速度 u で並進移動するので波束の移動を粒子の並進運動に見立てることができる。

(10)式、(11)式における波長・周波数の質量依存性の違いに目をつぶれば、重力場中の振り子の共振波動の伝播—拡張された SMHF は素粒子がヒッグス場の抵抗により静止質量を獲得するとともにヒッグス場の抵抗を何ら受けることなく移動できる—「慣性の法則」が棄損されないことを説明する「比喩」として採用できるだろう。

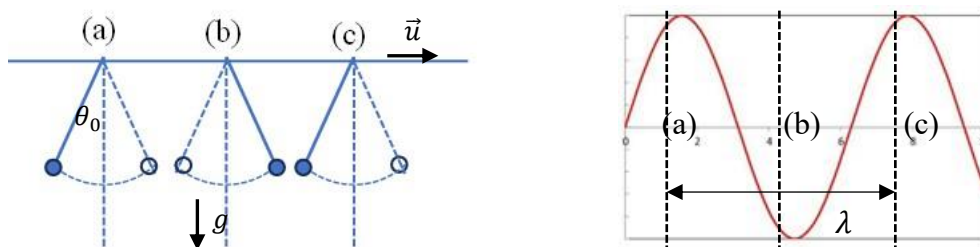


図4 共振波動を構成する振り子(a), (b), (c)・・・の初期配置. 相対論を考慮し、振り子の振動面を波動の伝播方向 \vec{u} に垂直とする。電子などのフェルミ粒子の波動関数に縦波・横波の区別はない。振れ角 θ_0 が振り子ごとに異なる^{<11>}ように初期設定されたとき、波形が正弦波からずれ、波束が形成される。

註<9> 古典力学は量子力学以前の力学を指し、ニュートンが「プリンキピア」という著作で定式化した。天体や地上の物体の運動を正確に予測できる。しかし原子内の電子の運動など微視的現象を解析するには量子力学を適用しなければならない。古典力学は3つの物理基礎定数（重力定数 G 、光速 c 、プランク定数 h ）の内、 G 、 c を含み、量子（重）力学は (G) 、 c 、 h を含む。

註<10> $\Delta m/m = (\theta_0 V)^2 / 2c^2$ を等価質量比、 $\mu [= \Delta m / (\theta_0^2 \cdot m)]$ を有効質量比と呼ぶことにする。 $\theta_0 V$ を振り子の最大速度とする。

註<11> 振れ角 θ_0 が振り子(a), (b), (c)・・・により異なる場合を想定する。

2-4 ストラスラー・メタファー（SMHF）の長所と難点

もともと質量ゼロの素粒子がヒッグス場の「抵抗」により静止質量を獲得する仕組みを説明する SMHF は条件 C1, C3 を満たし成功しているように見える。ヒッグス場の「抵抗」という誤解を招きやすい用語が避けられ「重力場」「共鳴周波数」「波動」「粒子」といった古典物理学のより正統的概念が導入されている。しかし、他方で、やや難解な用語により、読者を煙に巻いてしまう恐れがないとは言えない。

運動する粒子に働く媒質中の抵抗（摩擦）による減速により「質量」を説明する矛盾（摩擦による減速の場合、粒子はエネルギーを失い停止する）を回避できる点でとりあえず有用な比喩と言えるだろう。しかし SMHF はヒッグス場の「抵抗」により素粒子が獲得する質量を重力場の中の振り子の共鳴振動に例えることで古典力学の「慣性の法則」と矛盾する「例え話」をとりあえず払拭できたが、整合性の観点から、いくつかの問題を含んでいる。Gigazine.net の記事は次のように述べている；

『質量は水あめのような物質で素粒子が減速して生じるのではなく「ヒッグス場が強くなればなるほど素粒子は高い周波数で振動しその分だけ質量が増大する」ということになります。そのためヒッグス場は他の場の共鳴周波数を高める「宇宙硬化剤」のようなものだと考えることもできます。』

上記の記事でヒッグス場を重力場に、素粒子を振り子に読み替えると「重力場が強くなればなるほど振り子は高い周波数で振動し、その分だけ静止質量が増大する」となる。振り子の長さ l を固定し、重力場の強さ g のみを可変とすれば条件 C2 が満たされ、SMHF はヒッグス場の比喩として成立する。しかしやや詳細に検討すると(9)式、(10)式が示すように上記の記事の前段は成立するが、後段は成立しない。重力場の振り子の周波数 ν が紐の長さの平方根 \sqrt{l} に逆比例し、他方振り子の全エネルギーが紐の長さ l に比例するため、結果として周波数の増大によって、素粒子の静止質量に相当する振り子の有効質量比 μ が減少するからである。

まとめると、「重力場」と「振り子」の結合定数 $f \propto \eta l$ が増加したとき、振り子の周波数 ν が増加し、かつ振り子の有効質量比 μ が増加することを条件 C1 は要求するが、周波数 ν は逆に減少するので SMHF は明らかに条件 C1 を満たさない。他方、結合定数 $f \propto \eta l$ を一定としたとき、重力場 g の増加に対して有効質量比 μ が増加するという特性において条件 C2 は満たされている。さらに SMHF は、重力場の中で共振する一群の振り子を導入することで、条件 C3 を満たすこともできるが、(10)式が古典力学的波動であるのに対し、(11)式は量子力学的波動であり、粒子の並進運動と波動伝播の対応関係について解釈が必ずしも明快でなく、比喩として説得力に若干欠けるのは否めない。

2-5 ストラスラー・メタファー（SMHF）と慣性の法則

SMHF について Gigazine.net の記事（英文）に次のような記述がある；

“By suggesting that the Higgs field creates mass by exerting drag, they violate both Newton’s first and second laws of motion. Among other disasters, this drag would long ago have caused the Earth to spiral into the Sun. Moreover, if the Higgs field were really a substance, it would provide a point of comparison against which we could measure our absolute motion, violating both Galileo’s and Einstein’s principles of relativity.”

『ヒッグス場が抗力を働かせることによって質量を生成することを示唆することにより、彼ら（物理学者）はニュートンの運動の第1法則と第2法則の両方に違反しています。それが事実なら最大の災害となり得ますが、この抗力はずっと前に地球が回転しながら太陽に落ち込む原因となっていたでしょう。さらに、もしヒッグス場が本当に物質であるならば、それは私たちが絶対運動を測定するための基準系を提供し、ガリレオとアインシュタインの相対論の両方に違反します。』

上記の記事を査読するにあたり、『ヒッグス場が本当に物質であるなら・・・』という記述は一見明快なようで誤解を招きやすいと思われるので読者に注意を促したい。

「物質」が地球のような岩石・鉱物あるいはその集合体を意味するなら、確かにヒッグス場（ヒッグス粒子）は物質ではないが、電子や陽子がヒッグス場との相互作用の結果として現実に存在するという意味において、ヒッグス場は幽霊ではなく、紛れもなく物理的実体であり、まるで不可解なものを受けとめるべきではない。日常の物理的環境のエネルギー・スケールにおいては、質量をもつ電子や陽子、物質粒子とヒッグス場の相互作用<12>が極めて小さいため、物質粒子がヒッグス場を素通りするよう見えるに過ぎない。筆者としては「ヒッグス場」を以上のように理解した上で、改めて記事を次のように解釈する；

『物理学者がしばしば持ち出す例え話—「光速で運動する物質粒子がヒッグス場に衝突して減速され、静止質量を獲得する」—は、あたかもヒッグス場が物質の一種であり、ヒッグス場が全ての物質粒子の運動に対する基準系となり得るかのような印象を与える。その場合、物質粒子間の相互作用は相殺されるので、全粒子の重心の運動はヒッグス場の抗力によって、いずれヒッグス場に対して停止する<13>こと、地球を含む全ての物体のヒッグス場に対する相対速度がゼロになること、すなわち「慣性の法則」が破綻することを示唆する。』

SMHFは、「ヒッグス場の抵抗」という概念から導かれる明白な矛盾を解消するべく、ヒッグス場と素粒子の相互作用の比喩として重力場に置かれた振り子の共鳴振動を提案している。またやや技巧的であるが、筆者が§2-3（図4）で提案した拡張SMHFでは、等間隔に配置された共振する振り子群—重力場に重なるもう1つの「場」に準えられる—が形成する波動により、質量をもつ粒子のヒッグス場中の並進運動を例示することができる。実際、SMHFはヒッグス粒子もしくはヒッグス場中の粒子の運動を「場」に生じた波紋に準えており、Gigazine.netの記事に次のように紹介されている；

『・・・この話で重要なのは、「場」と「粒子」と「共鳴周波数」です。まず場と粒子ですが、現行の素粒子物理学の有力な枠組みである場の量子論では、宇宙は電磁場や重力場などの場で満たされていると論じられており、ヒッグス場もそのひとつです。それぞれの場

には対応する粒子があり、場を水面に例えると電磁場の波紋は光子、電子場の波紋は電子、ヒッグス場の波紋はヒッグス粒子となります。』

[SMHF の 3 つの難点]

拡張 SMHF では、振りの共鳴振動の原動力である重力場が同時に振子群の波動の原動力であり、その伝播が重力場に妨げられることはない。もし粒子の並進運動と波動伝播の対応を認めれば、「慣性の法則」が成り立つことは自明である。しかし他方で、波動伝播と粒子の並進運動の同一視はプランク定数が支配する微視的スケールの量子現象を除き、受け入れがたい。地球の公転運動を電子の波動のように見立てるのは飛躍であり、結局、読者を煙に巻いてしまうことになりかねない。

前述のように、SMHF の第 1 の難点は、静止質量をもつ素粒子の集合体である地球が再びヒッグス場との共鳴状態に陥らない理由、すなわち慣性の法則が破綻しない理由を古典的粒子像に基づいて明快に説明していないことである。

次に振りが重力場に対して相対速度 u をもつ場合、例えば振りの固定点を水平のレールに沿って移動させたとき、素粒子とヒッグス場の相互作用の比喩としてどういう問題が生じるか確認することも必要である。ただし相対論を考慮して問題を単純化するため、振りの振動面は移動方向に垂直とする。重力場 g を一様として、ガリレオの「相対論」を適用すれば、静止観測者にとって振りの周波数等に何も変化は生じない。他方、アインシュタインの「相対論」を適用すると、静止観測者から見た振りの周波数は $\nu \propto \sqrt{1 - (u/c)^2}$ のように減少し、その結果(9)式により質量 m 、 Δm は

$$m \propto 1/\sqrt{1 - (u/c)^2}, \Delta m \propto \sqrt{1 - (u/c)^2} \quad (12)$$

のように、変化するため、質量 m 、 Δm の u 依存性が真逆になること、これが SMHF の第 2 の難点である。 $\Delta m(u = 0)$ を静止質量と見なすためには速度 u の増加とともに $\Delta m(u)$ は増大しなければならない。

他方、振りの並進方向の加速度はゼロであり、並進運動が重力場によって妨げられる原因は一切存在しない。ガリレオの相対論の範囲では、重力場は振りに質量を付与する原因となるが、並進運動には何ら関与せず、したがって SMHF はヒッグス場と静止質量をもつ素粒子の等速度運動の関係を説明していると理解されるが、言うまでもなく、この「証明」は振りの並進運動を妨げないように重力場を設定したことの帰結であり、トートロジーに他ならない。

SMHF の第 3 の難点は、相対論を検証したマイケルソン・モーリーの実験 (1887 年) で否定された「エーテル」と「ヒッグス場」の違いを明確に説明できないことにある。この実験以前に地球は「エーテル」の中を公転していると考えられていたが、そのような基準系は存在しないことが明らかになり、時間・空間を定義し直すことで「エーテル」の必要性は消滅した。他方、CERN の実験でその存在が検証された正真正銘の物理的実体である

ヒッグス場が絶対基準系になり得ないのはどのような理由によるのか、明快に説明されていない。

註<12> CERNの加速器実験では、ヒッグス粒子を検出するために、互いに逆向きに走る陽子群を光速の99.999999%まで加速^[4]して衝突させる必要があった。

註<13> §3-2, §3-5で詳しく論じるが、「ヒッグス場に対して全ての物質粒子が静止する」という見方は必ずしも誤りではない。質量をもつ物質粒子がヒッグス場に対して静止しているという見方は妥当であり、それゆえ「慣性の法則」は破綻しない。

3. ヒッグス場が慣性の法則を破綻させない理由—相対論に基づいて—

SMHFは光速で運動する自由粒子が静止質量を獲得する仕組みを説明する従来の比喻「ヒッグス場の抵抗」を回避するため、重力場における振り子の「共鳴振動」を導入した。しかしSMHFは静止質量をもつ粒子のヒッグス場における等速度運動を説明する上で、いくつか難点を抱えていることを第2章で指摘した。

もちろん、これらの問題については「場の量子論」という正解が用意されているが、それを持ち出せば比喻を手段として一般向けの解説をするという目的は達成されない。

SMHFは「重力場、共鳴振動、共振、波動、波紋」という諸概念の上に魅惑的なヒッグス場の比喻を提案したが、あくまで一般社会人の興味をかき立てる「例え話」とどまり、その実用性は考慮外である。

本論考ではSMHFが退けた「ヒッグス場の抵抗」という概念を相対論と初期量子論によって再解釈し、実用的で直観に訴える「粒子の運動」を基本とした「ヒッグス場の解説」を試みる。

最初に、相対論と初期量子論を用いれば、「ヒッグス場の抵抗」と「静止質量・慣性の法則」の矛盾が解消されるという見通しを述べ、ヒッグス場その他用語の具体的内容について以下の各節の議論を通して概説することにする。

3-1 静止質量・慣性の法則とヒッグス場

[静止質量と水あめ論]

相対論では互いに等速で運動する観測者を対等とする相対性原理を採用し、かつ物質粒子の運動速度の上限を光速 c として、観測者間の時間・空間の関係が導かれた。素粒子の標準理論では電子は素粒子、陽子はクォークの複合粒子とされている。どちらも「静止質量」をもつ点では変わらないが、他方、光(光子)は光速で飛行するがゆえにその静止質量はゼロとされる。物質の起源を宇宙論的に考えると全ての素粒子はもともと(宇宙初期に)光速で飛び回っていたとするのが自然である^{<14>}。相対論では光速で走る列車に乗って

光速で走っても達する速度は光速である。よって何か特別扱いされることはなく光速で飛行する全ての素粒子の静止質量は対等にゼロのままである。

スピン1/2をもつ電子が一定の静止質量をもつのは、ヒッグス粒子(スピン0)が宇宙温度の低下に伴って宇宙空間に凝縮し、ヒッグス粒子が静止質量を獲得したため、電子はヒッグス粒子に衝突してスムーズに移動できなくなり、平均の運動速度が光速以下になったからと、一般向けの「水あめ論」と称される説明がなされてきた。§2-2で述べたように「水あめ論」に対しては、ヒッグス氏も含め^{<16>}、否定的意見が多いが、実は、ヒッグス場の「抵抗」を素粒子の質量の起源とする考え方は基本的には「妥当である」というのが、以下の主張である。

[静止した電子、地球とヒッグス場]

全ての観測者と慣性系(時空)は対等であるとする相対性原理R1 (§1-2[光速の絶対性—相対性理論])の観点から議論を進める。

静止質量をもつ電子を基準にした慣性系(時空)を考えることができる。電子が静止質量をもつことで状況が激変することが想像される。定義により電子の慣性系(時空)において電子は静止状態にある。ただし量子力学の不確定性原理により、電子の位置を特定することはできない。この場合、電子を粒子としてイメージするよりも波動—電子場としてイメージする方が適切である。そしてヒッグス場がその時空に凝縮していることになる。SMHFによれば電子場の波紋が電子であり、電子の静止状態は電子場の波紋がヒッグス場に定在している状態を意味する。以上の推論は地球に対して当てはまるだろうか。

地球はそれぞれ静止質量をもつ電子・陽子・中性子の集合体であると見なして差し支えないだろう。電子と陽子の質量比は約1/2000、中性子と陽子の質量比は約1.0014なので、地球と陽子の質量比；約 3.57×10^{51} が地球を構成する粒子数になる。この膨大な数の慣性系(時空)を用意することは経済的ではない。地球の重心を定め、重心に固定した慣性系(時空)を採用する。相対性原理により、その時空に凝縮したヒッグス場 H_E が存在する。地球を構成する膨大な数の粒子がそのヒッグス場 H_E に対して相対速度 u をもち、ヒッグス場 H_E に衝突するようになる。しかし個々の電子の正体である、光速で走る自由電子はヒッグス場 H_E をジグザグに進み^{<15>}、その平均速度が相対速度 u と一致する。その分粒子の質量エネルギーが増加するが $(mc^2 \propto 1/\sqrt{1-(u/c)^2})$ 、各自由粒子はヒッグス場 H_E に対し事実上静止していることになる。したがって地球全体もヒッグス場 H_E に対し、事実上静止状態にあると考えてよい。

[ヒッグス場は地球の公転運動を妨げない]

太陽の周りを公転する地球は太陽系空間に凝縮したヒッグス場 H_S に衝突して、いずれ静止するのではないかという疑問が生じる。しかし相対性原理を採用する限り、そういうことは起こらない。最も簡単な証明は次の通りである；

上述のように地球に固定した空間に凝縮したヒッグス場と地球の間の相対速度は事実上ゼロであり、したがって地球とヒッグス場の衝突は起こらず、ヒッグス場の抵抗がゼロになることは自明である。相対論では互いに等速で移動する全ての慣性系は対等であり、太陽系空間に凝縮した H_S 場と地球空間に固定した H_E 場は相対論的に同等である。なぜならヒッグス場は時空（宇宙空間）に一様に広がっており、 H_S 場と H_E 場の違いは時空にたまたま設定したヒッグス場の2つの断面の違いに過ぎないからである（図10）。地球の公転運動が H_E 場の抵抗を受けないのであれば H_S 場についても同様である。したがってガリレオ・ニュートンの「慣性の法則」が破綻することはない。

註<14> 基本法則レベルでの左右の非対称性—「パリティの破れ」が1957年に発見された。右巻き・左巻き粒子の区別を可能とするには、粒子は静止質量ゼロで常に光速で運動しなければならない。

註<15> 陽子・中性子の静止質量はそれぞれを構成する3つのクォークの静止質量の合計と大きな差がある。その原因は、陽子・中性子の比較的大きな静止質量が、クォーク・反クォーク対が凝縮した真空におけるクォークの生成・消滅による質量生成、クォーク、グルーオンの運動エネルギーにより生み出されていることにある^[5]。

註<16> 次のような逸話が紹介されている^[3]；『ヒッグス自身も「水あめ」の説明には違和感を抱いているようで、こんな発言をしたこともあります。「私は水あめによる説明を持ち出されるのが本当にいやです。水あめの効果ではエネルギーが失われますが、[ヒッグス場による効果は] そうではありません。』

3-2 電子の静止質量の起源—ヒッグス場と結合定数

[自由電子の時空図]

以下図7の時空図を中心に議論を進める。光速 c で移動する静止質量ゼロの自由電子が時空 (x^0, x^1) に凝縮したヒッグス場による2つの対壁（距離 d ）による反射を繰り返したときの往復運動の時間平均をとると、電子の平均運動量はゼロであり、電子は時空 (x^0, x^1) に静止し、静止質量 m_e （距離 d に反比例する）を獲得したかのように見える。距離 d 、質量 m_e は電子とヒッグス場の結合定数 f_e により決まる ($f_e \propto 1/d \propto m_e$)。結合定数 f_e が小さいとき、電子はヒッグス場の抵抗が小さいので光速のまま相対的に長い距離を進み、質量は小さくなる。標準理論では $m_e = f_e \langle \phi \rangle$ と与えられる。ここで $\langle \phi \rangle$ はヒッグス場の真空期待値 $v/\sqrt{2}$ である。

[ヒッグス場とエネルギー密度]

ヒッグス場は自己相互作用により凝縮するという特別の性質をもつ。相互作用ポテンシャル・エネルギー； $V(\phi)$ が(13)式で与えられる。 $V(\phi)$ が最小になる配置 ϕ —「真空」状態

を実現する「力」がヒッグス場を支配するが、自己相互作用場では力自体、「場」が生み出す力である。係数 μ , λ が $V(\phi)$ の形を決める。

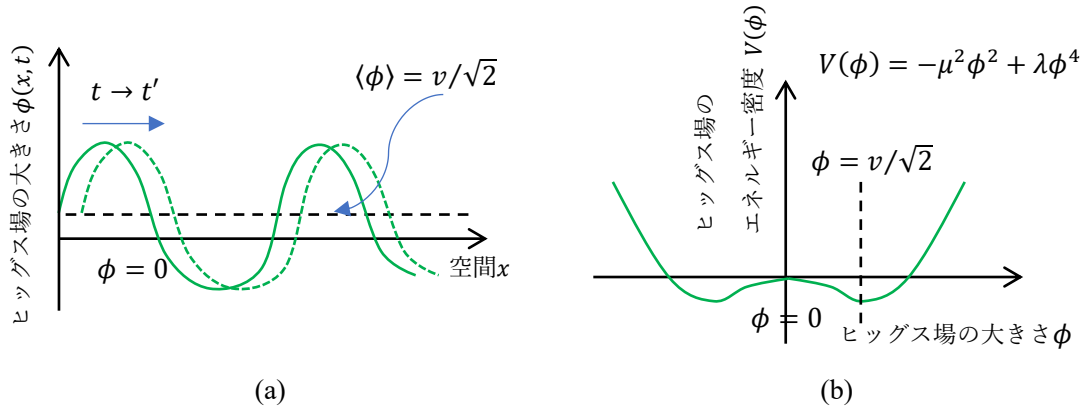


図5ヒッグス場の大きさ ϕ (波動関数)とエネルギー密度。

図 5(a)；ヒッグス場 ϕ の波動。素粒子の標準理論では、 ϕ は本来、複素数2成分(ϕ^+ , ϕ^0)で表示されるべきものであるが、ヒッグス場の「自発的対称性の破れ」を採り入れ、この図では実数1成分に簡略化している。ヒッグス場とヒッグス粒子の対応は電磁場と光子の対応に準ずる。素粒子の標準理論では、ヒッグス場の真空期待値 $\langle \phi \rangle$ は宇宙創生時にはゼロであったが、急速膨張・冷却後の現宇宙では空間的に一様な値 $v/\sqrt{2} > 0$ に落ち着き ($v \equiv \sqrt{\mu^2/\lambda}$)、その結果ヒッグス場の抵抗により、各粒子が静止質量を獲得するものとされている。

図 5(b)；ヒッグス場の運動エネルギーを無視したときヒッグス場 ϕ のエネルギー密度 V が

$$V(\phi) = -\mu^2\phi^2 + \lambda\phi^4 \quad (13)$$

により与えられるものとする。 λ, μ を定数とした場合ヒッグス場のエネルギー密度 V は $\phi = v/\sqrt{2}$ に対して極小値をとり、ヒッグス場はエネルギー最小状態 $V = -\lambda v^4/4$ に落ち着く。ただし $\mu^2 < 0$ のとき、エネルギー最小状態は $\langle \phi \rangle = 0$ に限られ、各粒子がヒッグス場から受ける抵抗が消失する。

[凝縮したヒッグス粒子の密度と寿命]

場の量子論では $c = \hbar = 1$ とおく自然単位系を採用する (c ；光速， $\hbar = h/2\pi$ ；プランク定数 2π)。自然単位系では長さ L 時間 T 質量 M はともにエネルギー E ，もしくは逆数 E^{-1} の次元をとり $L \rightarrow E^{-1}$ $T \rightarrow E^{-1}$ $M \rightarrow E$ である。またヒッグス場の大きさ(波動関数の振幅) ϕ はエネルギー E の次元をとる。電子を1ボルトの電圧で加速したときのエネルギー1eV(電子ボルト)をエネルギーの基本単位とする。CERNで測定されたヒッグス粒子の質量 m_H は約125.5GeV(1GeV = 10^9 eV)である [(8)式]。量子論では波動関数 ϕ の絶対値の2乗 $|\phi|^2$ は粒子の「存在確率密度」を与えると解釈される。この場合「確率密度」の次元は E^2 となるが、

量子場の粒子の「存在確率密度」は時間 T 内に空間体積 L^3 に存在する粒子の個数と解釈され、「確率密度」の単位は $TL^{-3} \rightarrow E^2 \rightarrow [\phi]^2$ となるので矛盾しない。空間エネルギー密度は $E/L^3 \rightarrow E^4 \rightarrow [\phi]^4$ となるが(13)式において係数 μ を質量 M の単位をもつ定数結合定数 λ を、次元を持たない数値とすれば空間エネルギー密度を表す(13)式と矛盾しない。エネルギーの時空間密度は $ET/L^3 = [\phi]^3$ と表され、これは粒子の存在確率密度 $[\phi]^2 = T/L^3$ に粒子の質量エネルギー E を乗じたものに等しいはずである。以上により時間 T 、体積 L^3 内に存在するヒッグス粒子の個数 n 、ヒッグス粒子の質量 m_H とヒッグス場の大きさの期待値 $\langle\phi\rangle$ の関係は

$$n \cdot m_H \langle\phi\rangle^2 = \langle\phi\rangle^3 \rightarrow n = \frac{\langle\phi\rangle}{m_H} \quad (14)$$

となり、CERNの測定値： $\langle\phi\rangle = 246.0 \text{ GeV}$ 、 $m_H = 125.5 \text{ GeV}$ により、 $n = 1.96$ が得られる。ヒッグス粒子の質量 m_H を長さスケール L に置き換え、 $T = L/c$ により時間スケールを求めると凝縮したヒッグス粒子の空間密度と寿命が求められる。

$$L = \frac{\lambda_H}{2\pi} = 1.572 \times 10^{-3} \text{ fm} \quad (1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}), \quad T = L/c = 5.245 \times 10^{-27} \text{ s} \quad (15)$$

ここで λ_H はヒッグス粒子のコンプトン波長である。原子核サイズ（1~7 fm）の約1000分の1の距離を1辺とする立方体の中に約2個のヒッグス粒子が存在することを意味し、原子核の陽子・中性子を構成するクォークはヒッグス場の影響を受ける。CERNの実験で観測されたヒッグス粒子（主に光子2個に崩壊する）の寿命は約 10^{-22} s であり凝縮したヒッグス粒子の寿命 T の約10万倍である。この違いをもたらす最大の要因は「時間の遅れ」に関する相対論的効果；

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} \quad (16)$$

にあるだろう。ここで τ_0 、 τ はそれぞれ静止した粒子、速度 u で運動する粒子の寿命である。CERNの実験で観測された励起されたヒッグス粒子は加速器の中で光速に近い速度 u （ $1 - u/c \approx 10^{-9}$ ）をもつ陽子同士の衝突から生じるため、一時的に光速に近い速度をもつことになる。

[ヒッグス場による自由電子の閉じ込め]

ヒッグス場の抵抗による電子の静止質量 m_e と、ヒッグス場による2つの対壁の距離 d の関係について量子力学の不確定原理に基づいて考察する。不確定性原理とは、光子や電子が粒子的特性と波動的特性を備えている矛盾を解消するため、古典的な粒子概念に制限を課す量子力学の原理である。古典的な粒子概念とは次のようなものである；様々な物理現象の背後にあるのは物体を構成する粒子の運動であり、時空における粒子の位置と運動量・エネルギーは同時に正確に指定できる。しかし、古典的粒子概念に基づく光子や電子の波動的特性を説明できないことから、同時に指定できる粒子の位置と運動量（あるい

は時刻とエネルギー)の「精度」を制限する。指定もしくは観測し得る電子の位置の幅を Δx , 運動量の幅を ΔP として

$$\Delta x \Delta P \geq h \quad (17)$$

とする (h はプランクの定数)。これにより電子の位置を正確に特定しようとする ($\Delta x \rightarrow 0$) 電子の運動量は全く不確定になる ($\Delta P \rightarrow \infty$)。

図7に示すように静止質量ゼロの自由電子がヒッグス場の抵抗を受けて実効的に区間： $0 \leq x^1 \leq d$ に閉じ込められたとき、 $\Delta x = d$ であることから

$$\Delta P \geq \frac{h}{d} \quad \Delta E = \Delta m \cdot c^2 = c \Delta P \geq \frac{ch}{d} \quad d \geq \frac{h}{c \Delta m} \quad (18)$$

となり、ここで Δm として電子の静止質量 $m_e = 9.10938 \times 10^{-31} \text{kg}$ を採用すると $d \geq 2.42631 \times 10^{-12} \text{m}$ という値が得られる。この値は電子による「コンプトン散乱」ともなう光 (γ 線)の波長変化 $\Delta \lambda$ が顕著になる ($\Delta \lambda / \lambda \sim 1$) ときの波長—「コンプトン波長 λ_e 」を表す。光電子の相互作用に注目した場合、光の波長が「コンプトン波長」よりずっと長いとき ($\lambda \gg \lambda_e$) は電子による電磁波 (X線) の散乱という描像 (トムソン散乱) が成立するのに対し、短いときは「光子と電子の非弾性衝突」という描像 (コンプトン散乱) が成立し、この場合2粒子衝突の「エネルギー・運動量保存則」が成立する。

[ヒッグス場と素粒子の結合定数]

素粒子の標準理論では電子の静止質量 m_e は自由電子が時空間に凝縮したヒッグス場から受ける「抵抗」の大きさに比例すると解釈されている；

$$m_e = \frac{f_e v}{\sqrt{2}} \left(\frac{v}{\sqrt{2}}; \text{ヒッグス場の大きさの真空期待値} \right) \quad (19)$$

(19)式はヒッグス場の大きさ $v/\sqrt{2}$ とは独立にヒッグス粒子の他の素粒子への崩壊率の測定に基づいて標準理論から推定される結合定数と各素粒子の質量との関係から検証されている (図6)。仮にヒッグス粒子が何種類かあれば図6の直線が枝分れしてもいいはずだが各素粒子の結合定数と質量の比例関係が1本の直線に載ることは自然が標準理論のシナリオを選択していることを示しているとされる。

この場合、質量 m_e は「右巻き」あるいは「左巻き」電子の光速運動に対するヒッグス場の抵抗により生じたものであり、電子の「慣性質量」と見なせる。またヒッグス場の抵抗は今のところ「電磁気力 (電荷)」、 $\text{「弱い力 (弱荷)」、$ 「強い力 (カラー荷)」のいずれとも異なる「第4の力 (ヒッグス荷)」によるものと考えざるを得ない。

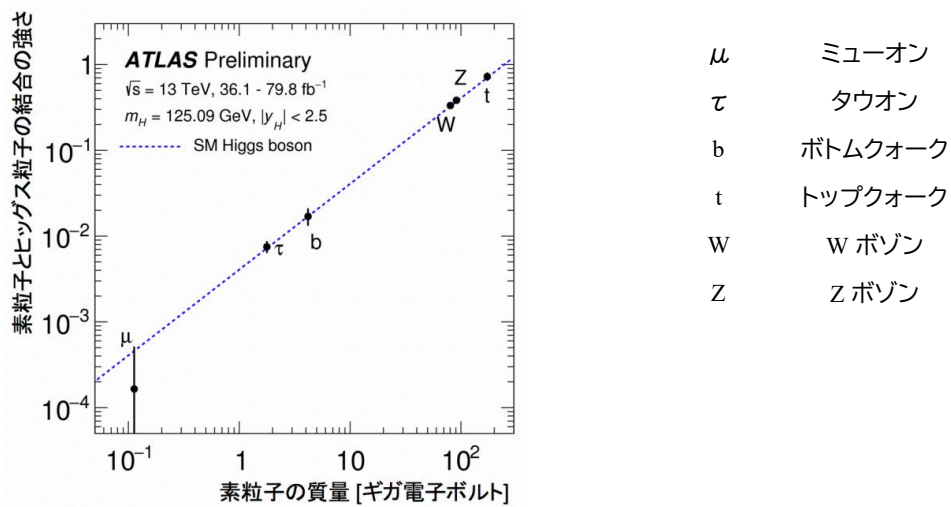


図6 観測されたいろいろな素粒子とヒッグス粒子の結合の強さ(縦軸)とそれぞれの素粒子の質量(横軸). 横軸の単位は GeV(10 億電子ボルト). (https://www2.kek.jp/ja/newsroom/attic/20180828press_atlas.pdf, p.8 から転載)

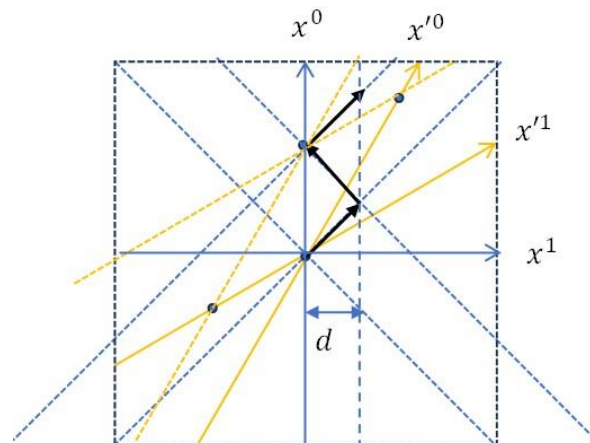


図7 ヒッグス場と自由電子(光速, 静止質量ゼロ)の衝突. 互いに等速運動する2つの時空の座標 (x^0, x^1) , (x'^0, x'^1) ; 横軸, 縦軸はそれぞれ空間座標軸 x^1 , 時間座標軸 x^0 に対応する. 時空 (x^0, x^1) に対して時空 (x'^0, x'^1) は速度 u で右側 (x^1 軸正方向) に移動するものとする. 移動する時空 (x'^0, x'^1) は黄色の斜交軸で表されている. ヒッグス場がどちらの時空に凝縮したと仮定しても「ローレンツ変換」により結ばれるので結論は同じになる(自由電子とヒッグス場の衝突の時刻と位置が異なるだけで衝突回数は変わらない). 仮にヒッグス場が静止時空 (x^0, x^1) に凝縮したとして光速 c で移動する静止質量ゼロの自由電子がヒッグス場の抵抗により空間座標 $x^1 = 0, x^1 = d$ の間で反射を繰り返すとする. 質量ゼロの電子の軌跡を黒い短線の矢印 \rightarrow で表しヒッグス粒子と電子の衝突の時空座標を \bullet で示す. 自由電子はヒッグス場による左右の壁で反

射を繰り返すが、常に2つの壁の間に留まるので、平均すると時空 (x^0, x^1) に対して静止し、静止質量 m_e を獲得したように見える。移動する時空 (x'^0, x'^1) (黄色の斜交軸で表示)において同一の電子を観測した場合、電子は座標軸 x^1 の負方向に速度 u で移動し同時に静止質量 m_e を備えているように見える。

この場合電子のエネルギー E は(24)式[後述]により、 $E = m_e c^2 / \sqrt{1 - (u/c)^2}$ となり、静止エネルギー $m_e c^2$ より大きくなる。

3-3 自由電子と質点

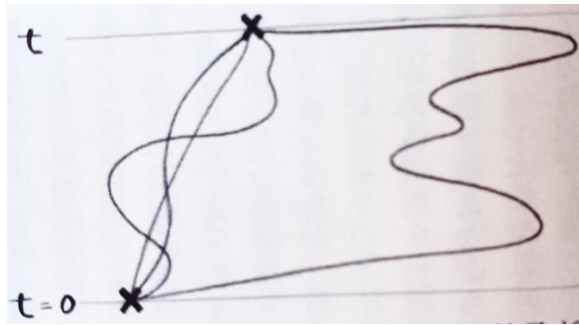


図8 量子力学の原理を表現するファインマンの方法。

「時刻ゼロにある場所にいた粒子が時刻 t にまたある別の場所に到着する行き方にはいろいろある。まっすぐに最短距離を通ることもあれば少し寄り道をしながら進むこともあるだろう。その気になればずっと向こうまで行って戻ってくることもできる。とにかくありとあらゆる通り方を考えて、それぞれについて作用 S を作り対応する位相 e^{iS} を足せというのが経路積分のルールだ。」

(講談社 Blue Backs「質量はどのように生まれるのか」p.231 から転載)

ニュートンの力学において質点 (point mass, material point) は質量が1点に集中した仮想粒子を意味する。太陽系惑星の軌道は、太陽と惑星それぞれが質点と見なされ (地球・太陽の質量比: 3.00×10^{-6})、経過時間と地球・太陽間に働く重力によって生じた加速度から惑星の速度が求められ、そして惑星の位置が決定されるという手順で決定される。

原子内電子の運動もこのシナリオに沿って解析される。原子核と電子それぞれが質点と見なされ (電子・陽子の質量比: 5.45×10^{-4})、原子核と電子間に働く電気力が想定され、電子の運動が決定される。ただし原子内電子の運動は「電子は粒子であるとともに波動である」とする「量子力学の原理」が採用されるため、ニュートン力学的な「軌道」の概念が意味を失う。「量子力学の原理」の表現方法にはいくつかあるが、依然、粒子軌道が登場するという意味で直観的な表現はファインマンの経路積分の方法である (図5)；

仮に粒子が平面内 (x, y) を移動するとして時刻ゼロで原点: $(0,0)$ にいた粒子が時刻 t で位置: (x, y) にいる「確率」を問題とする場合、量子力学的には2点を結ぶあらゆる経路が可能であるとして各経路に位相 S と振幅 e^{iS} を割り振り、これらの全ての振幅の和 (積分) が

位置： (x, y) における粒子の振幅であるとする（振幅の絶対値の2乗が粒子の存在確率になる）。位相 S には経路上での質点間（原子核と電子）の相互作用が反映される。

「量子力学の原理」を適用して原子内電子の運動を解析する場合、ファインマンの経路積分の方法によれば、電子・陽子それぞれを「質点」と見なして「クーロンの法則」に従う質点間の電気力を想定し、位相 S を計算する必要がある。

3-4 微細構造定数と原子模型

陽子はクォークから成る複合粒子である。陽子の質量の起源は電子のそれより複雑であり、質量の大部分は静止質量をもつクォーク q 、クォーク・反クォーク対 $q\bar{q}$ 、グルーオン g の相互作用から生じるエネルギーによる^[7]。自由クォークはクォーク対 $q\bar{q}$ との衝突（図3）、またはヒッグス場の抵抗により静止質量を獲得する。質量を獲得したクォークや電子、また陽子もそれぞれコンプトン波長の広がりをもつ。ファインマンの経路積分で想定されるように、なぜそれらを質点して扱えるのか、一考を要する。

ヒッグス場と電子の結合の強さは図6に示されているように電子の静止質量 m_e とそれに対応するコンプトン波長 $\lambda_e (= h/m_e c)$ が代表していることを述べた（§3-2[ヒッグス場による自由電子の閉じ込め]）。

電子のコンプトン波長 λ_e は陽子のコンプトン波長 λ_p の約2000倍であり、ボーア半径 a_0 （水素原子の代表的大きさ）の約20分の1に及ぶ。したがってヒッグス場の「抵抗」のみからは電子を質点と見なす根拠を直接引き出せない。この場合、電子はとりあえずコンプトン波長 λ_e に相当する広がりをもつ実体ということになる。しかし上で述べたように原子内電子の運動を量子力学的に扱うとき、原子核と電子それぞれを質点と見なすのが「ファインマンの方法」であり、電子を原子核以上の大きさをもつ実体として扱うのは理論上、また実測上も適切ではない。

電子の半径 r_e が有限なのか、それとも限りなくゼロに近いのか、その答えはそれを調べる手段に依存する。原子内の電子に働く主要な力が電気力であることから、電子の大きさを決める手段としては電気力を伝える光子（X線 γ 線）を電子に照射し、電子の散乱断面積 σ_e を測る方法が適切である。電子にX線を照射するトムソン散乱（光子と電子の弾性衝突）の断面積 σ_e は

$$\sigma_e = \frac{8\pi}{3} r_e^2, \quad r_e = \frac{\alpha \lambda_e}{2\pi} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2}, \quad \alpha = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h c} \quad (20)$$

となる（電子に γ 線を照射するコンプトン散乱についても非弾性衝突効果を除き類似の結果が得られる）。ここで ϵ_0 は真空誘電率 e は電子の電荷である。 r_e は電子の大きさの一つの目安となる古典電子半径であり電子の静電エネルギー： $e^2/4\pi\epsilon_0 r_e$ と電子の静止質量エネルギー： $m_e c^2$ がこの距離で等しくなり、 $r_e = 2.8179 \times 10^{-15} m$ という値をとる。この古典電子半径 r_e はオーダー的に陽子のコンプトン波長 λ_p に匹敵する。また $\alpha = 2\pi r_e / \lambda_e =$

1/137.03 であり、 α は微細構造定数と呼ばれ、荷電粒子の電気力による結合の強さの尺度として用いられる。ボーア半径 a_0 、微細構造定数 α 、電子・陽子のコンプトン波長 λ_e 、古典電子半径 r_e は

$$a_0 = \frac{1}{\alpha} \frac{\lambda_e}{2\pi} = \frac{r_e}{\alpha^2} \sim \frac{\lambda_p}{\alpha^2}, \quad r_e \sim \lambda_p \sim \left(\frac{1}{137}\right)^2 a_0 \quad (21)$$

と関係づけられる。したがって、電気力を通して電子・陽子を質点のように扱い、2質点間の電気力を想定する原子模型を構成する根拠が導かれる。

3-5 ローレンツ変換と慣性の法則

時空座標の変換関係(4)式は運動量 P とエネルギー E の変換に読み換えられる。

$$\left(\frac{E}{c}\right)^2 - P^2 = \left(\frac{E'}{c}\right)^2 - P'^2 = (m_e c)^2 \quad (22)$$

慣性系（時空） K において静止している粒子のエネルギー運動量 E, P を

$$E = m_e c^2, \quad P = 0 \quad (23)$$

とすると時空 K に対して x^1 軸正方向に速度 u で移動する時空 K' に対する粒子のエネルギー運動量を E', P' は以下のように求められる。まず $P' = -m_e c \beta / \sqrt{1 - \beta^2}$ と置き $\beta(u)$ を事後的に決定する。(22)式, (23)式により

$$E'^2 = E^2 + \frac{m_e^2 c^4 \beta^2}{1 - \beta^2} = (m_e c^2)^2 \left\{ 1 + \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \right\} = \frac{(m_e c^2)^2}{1 - \beta^2}, \quad E' = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (24)$$

$u \rightarrow 0$ のとき $\beta(u) \rightarrow 0$ ($E' \rightarrow E = m_e c^2$, $P' \rightarrow 0$), $u \rightarrow c$ のとき $\beta(u) \rightarrow 1$ ($E' \rightarrow cP'$)でなければならないので、 $\beta = u/c$ である。

[ヒッグス場を運動する電子の運動量とエネルギー]

自由電子とヒッグス場の各衝突の時空座標は2つの時空（図7）で異なるが、各時空における電子の平均運動は以下ようになる；

静止質量 m_e の電子は時空 $K:(x^0, x^1)$ において静止状態にあるとする。速度 u で右側に移動する時空 $K':(x'^0, x'^1)$ に対し、その電子は速度 u で左側に移動することになる。この場合、各時空における電子のエネルギー E 運動量 P は

$$(x^0, x^1) : \quad E = m_e c^2, \quad P = 0 \quad (25)$$

$$(x'^0, x'^1) : \quad E' = m_e c^2 / \sqrt{1 - (u/c)^2}, \quad P' = -m_e u / \sqrt{1 - (u/c)^2}.$$

となる。すなわち時空 $K:(x^0, x^1)$ において電子は静止状態 ($P = 0$) にあり時空 $K':(x'^0, x'^1)$ において電子は速度 u で左側に移動する ($P' < 0$)。

時空 $K:(x^0, x^1)$ において静止状態にある電子 \mathcal{E} が時空 K に凝縮したヒッグス場 H の抵抗を新たに受けることはない。なぜなら電子 \mathcal{E} はヒッグス場の抵抗により静止状態にあると仮定したからである。その状況が図7の時空図に表現されている。同様に時空 K に対し、速度

u で右側に移動する時空 $K':(x'^0, x'^1)$ に静止した電子 \mathcal{E}' が時空 K に凝縮したヒッグス場 H' の抵抗を新たに受けることはない。その状況が図9(b)の時空図に表現されている。H, H'は時空もしくはヒッグス場の2つの断面に過ぎない。したがってヒッグス場の時空への凝縮により「慣性の法則」が破綻することはない。

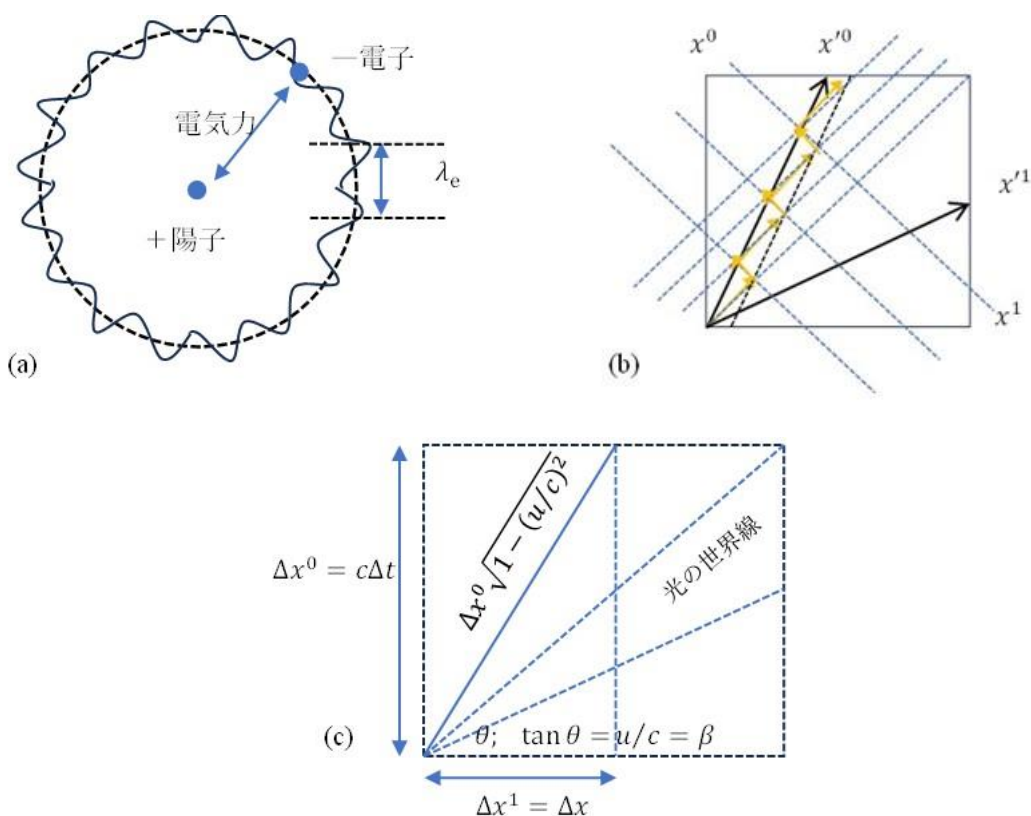


図9 ヒッグス場の抵抗を受ける自由電子の原子内での運動及びその時空図。

- (a) 電子はヒッグス場を光速で前後にジグザグ運動しながら平均速度 $u < c$ で原子核(陽子)を中心に周回する。ジグザグ運動の空間スケールは電子のコンプトン波長 λ_e と一致する。
- (b) 静止時空 (x^0, x^1) に対して電子の平均速度 u で x^1 軸正方向に移動する時空を (x'^0, x'^1) とする。 $\pm 45^\circ$ の破線はヒッグス場を光速で進む電子の軌跡を表す。ジグザグ運動で反射するとき右巻き電子と左巻き電子が交替する。
- (c) (b)の拡大図。光の世界線が傾き $+45^\circ$ の破線で表されている。自由電子の量子力学的な波動は時空図の実線に沿って時空を伝播する。電子は静止系の時間で Δt 毎にヒッグス場の壁(実線に平行、傾き $90^\circ - \theta$)により反射されながらヒッグス場をジグザグに進む。

図9(b)の時空図からさらに重要な情報が得られる。図9(b)は自由電子がヒッグス場の抵抗によりヒッグス場を光速でジグザグに進み、結果として、平均速度 $u < c$ でヒッグ

ス場を進む状況を時空図に示している。静止質量をもち、静止電子系の固有時間を Δt とすると、速度 u で運動する電子系の固有時間 $\Delta\tau$ は

$$\Delta\tau = \Delta t\sqrt{1-\beta^2}, \quad \left(\beta = \frac{u}{c}\right) \quad (26)$$

となる。したがって光速でヒッグス場をジグザグに進む電子の運動[図9(b)]を、電子の量子力学的な波動として解釈する；

空間 x^1 方向への波動の進行距離 Δx は、時間軸 x^0 に沿っての経過時間 $c\Delta t$ より位相が遅れ、 $\Delta x = \beta(c\Delta t) = u\Delta t$ となる[図9(c)]。平均速度 u の増加にともなう固有時間 $\Delta\tau$ の短縮により、電子波の周波数が増加する($\nu \propto 1/\Delta\tau$)。これらを考慮すると、(6)式は

$$P = \frac{h\nu}{c} = \frac{\beta(h\nu_e/c)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\beta(h/\lambda_e)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\beta m_e c}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad \left(v_e = \frac{m_e c^2}{h}\right) \quad (27)$$

と書き直せる。 $\beta \rightarrow 1$ のとき、 $\nu \rightarrow \infty, P \rightarrow \infty$ ； $\beta \rightarrow 0$ のとき、 $\nu \rightarrow 0, P \rightarrow 0$ となる。

(27)式は量子力学的な電子の波動の周波数 ν について、 $\nu = \beta v_e / \sqrt{1-\beta^2}$ と解釈できることを意味する。特に $\beta \rightarrow 1$ のとき、 $\nu \rightarrow v_e / \sqrt{2(1-\beta)}$ となることに注意されたい。 v_e は光速でヒッグス場をジグザグに進む質量ゼロの自由電子（平均速度ゼロ）の単位時間当たりの衝突頻度を表し、 ν は平均速度 $u > 0$ のときの衝突頻度を表す。自由電子のジグザグ運動によって静止質量 m_e が生じ、 $\lambda_e = h/m_e c = c/v_0$ の関係が成立する。平均速度 u の増加とともに自由電子とヒッグス場の衝突頻度が増加し、質量エネルギーが増大する。

4. まとめ

われわれの宇宙が物質と光で構成されていることは日常の観察を通して誰もがあまり無理なく納得できるが、宇宙誕生時に全ての物質粒子が光のように振る舞っていたとする想像はつい最近まで神話の世界であり続けた。しかしこの想像は「溶鉱炉の熱放射」と「ベータ崩壊」の研究から始まった現代素粒子論の帰結となっており、2012年のCERNの実験により「ヒッグス場（粒子）」の存在が検証され、ひとまず素粒子の標準理論が完成されたとされている。

ヒッグス場（粒子）は光速で飛行する自由粒子に静止質量を付与することで初期宇宙と現宇宙を繋げていることになる。本論者は物理学者が数式と実験を積み上げて到達した「ヒッグス場（粒子）」の概念をどのような比喩で理解すべきか、次のような観点で論じた。

- ・ これまでどのような「比喩」を以て説明されてきたのか、また新たにどのようなアイデアが提案されているか、それらの「比喩」は十分整合性をもち矛盾を含まないのか。
- ・ ストラスラー・メタファー（後述）の長所と難点について

- ・ ヒッグス場の存在と慣性の法則の無矛盾性—相対性理論に依拠した説明について

物理学者が従来ヒッグス場（粒子）を一般向けに説明するとき、従来どのような比喩が用いられてきたかが紹介されているが、キーワードは「ヒッグス場の抵抗」である。その中で正確さを問題にしなければ、最も分かりやすい比喩は「水あめ論」である。しかし粘性抵抗を主役とした場合、ヒッグス場の本質について誤解を招くとの批判があった。

SMHF は「ヒッグス場の抵抗」を避け、素粒子とヒッグス場の共鳴という代替ヴィジョンを採用し、重力場における振り子の共鳴振動という比喩を提案している。この場合、振り子の運動エネルギー（等価質量比 $\Delta m/m$ ）は重力場 g 及び重力場—振り子の結合定数 $f = \eta l/2c^2$ の積に比例する [(9)式]。したがって「場」と「粒子」の共鳴を通して自由粒子に静止質量が付与されるというヴィジョンを打ち出した点で SMHF は成功している。しかしやや詳細に見ると振動数 ν が重力場との結合定数 f の増加により減少する^{<17>} ($\nu \propto 1/\sqrt{f}$) こと、また振動数 ν が素粒子の静止質量に相当する有効質量比 μ と比例関係にない [(10)式] という点は、「ヒッグス場が硬化剤となり素粒子の固有の周波数と静止質量の増加をもたらす」という SMHF のヴィジョンと一致せず、素粒子の質量が多様である理由を説明できない難点がある。

SMHF が「ヒッグス場の抵抗」を退けた目的は、静止質量を獲得した自由粒子のヒッグス場中の等速度運動を説明することにあり、共振波動 [(10)式, 図 4] がその代替比喩に当たる。

(10)式と(11)式には古典的波動と量子的波動の違いを超えた共通性がある；一般に波長が可変であり、振動数 ν が波長 λ に反比例し、伝播速度 u が波長に依存せず一定に保たれるとき、正弦波からずれた波形（波束）も速度 u で並行移動するので「波束」の移動を粒子の並進運動に見立てることができる。

SMHF のもう一つの難点は、マイケルソン・モーリーの実験（1887 年）で否定された「エーテル」と、「ヒッグス場」の違いを明確に説明していないことにある。この実験以前に地球は「エーテル」の中を公転していると考えられていた。アインシュタインが相対性原理を提示したことで「エーテル」の必要性は消滅したが、CERN の実験でその存在が検証された正真正銘の物理的実体であるヒッグス場が絶対基準系になり得ないのはどのような理由によるのか、説明していない。

本論考では SMHF が退けた「ヒッグス場の抵抗」という概念を相対論と初期量子論によって再解釈し、直観的な「粒子の運動」を基本としてヒッグス場の解説を試みた。その結果、「ヒッグス場—水あめ論」にも一定の合理性があり、ヒッグス場の抵抗により静止質量を得た自由粒子はヒッグス場に対して事実上静止しており、それゆえヒッグス場の抵抗は「慣性の法則」を破綻させるには至らない、という説明があり得るとの結論を得た（第 3 章[ヒッグス場は地球の公転運動を妨げない]）。

なぜ地球の公転運動がヒッグス場の抵抗を受けて停止しないかという疑問への回答の鍵は相対性理論にある；ヒッグス場が時空に一樣に凝縮しているとすれば，地球，太陽に設定した慣性系（時空） K_E ， K_S に凝縮したヒッグス場 H_E ， H_S の違いは時空の2つの断面すなわちヒッグス場の2つの断面の違いに過ぎない．前提により H_E ， H_S は K_E ， K_S とほぼ同等である^{<3>}． K_E が K_S に対して公転している（したがって正確には等速度運動ではない）とすれば， H_E も K_S に対して公転し， K_E が H_S （ $\sim K_S$ ）に衝突し，何らかの攪乱を与えることはない．なぜなら K_E ， K_S は時空にとられた2つの断面に過ぎないからである（図10）．

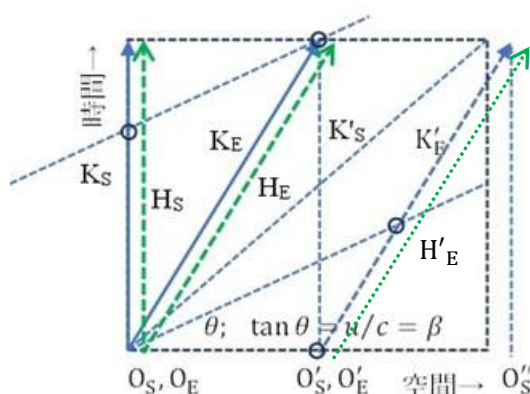


図10 ヒッグス場と太陽・地球系の相対運動の時空図．時刻ゼロに (O_E, O'_E) ， (O_S, O'_S, O'_S) は地球の公転軌道上にあり，それぞれ地球，太陽に対して静止している(太陽と3方向の恒星を結ぶ直線と地球公転軌道の交点とする)． $K_S \cdot K_E$ (青実線)はそれぞれ太陽・地球系の時間軸である．地球 O_E は公転軌道上を O_S から O'_S に向かって速度 u で移動する．ヒッグス場の2つの断面 H_S ， H_E (緑破線)はそれぞれ K_S ， K_E に平行であり，それぞれ2つの慣性系に対して静止している．

K_E は太陽系における地球の世界線である．地球 O_E は世界線 K_E ， H_E に沿って進み O_S から O'_S に到達するが，その間に O'_E は世界線 K'_E ， H'_E に沿って進み O'_S から O'_S に到達する．地球系はヒッグス場に対し常に静止したままで全ヒッグス場を走査する．地球の慣性運動がヒッグス場によって妨げられないことを意味する．

地球系時間軸 K_E ， K'_E を基準にすると太陽系時間軸 K_S ， K'_S は速度 u で空間軸負方向に移動する太陽の世界線を表し，太陽系と地球系は完全に相対的であり，2つの慣性系の並行移動は時空座標 O の関係に何も影響を与えない．時空，そしてヒッグス場が一体であることを意味する．

註<17> 古典力学の適用対象となる流体や弦の振動では振動エネルギーと周波数は一般に独立量で，周波数 ν の増加が振動エネルギー（有効質量比 μ ）の増加に結びつかず，量子現象と本質的に異なる．

引用文献

- [1] “ヒッグス場が素粒子に質量を与える「本当の仕組み」とは?”, Sep. 2024,
[https://gigazine.net/news/20240914-higgs-field-gives-mass/?fbclid=.](https://gigazine.net/news/20240914-higgs-field-gives-mass/?fbclid=)
- [2] Strassler, Matt; "How the Higgs Field (Actually) Gives Mass to Elementary Particles", Sep. 2024,
<https://www.quantamagazine.org/how-the-higgs-field-actually-gives-mass-to-elementary-particles-20240903/>
- [3]大栗博司; “強い力と弱いとカーヒッグス粒子が宇宙にかけた魔法を解く”, 幻冬舎新書, 292, Jan. 2023.
- [4]高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所; “宇宙と物質の起源—「見えない世界」を理解する”, 講談社「ブルーバックス」 B-2256, Mar. 2024.
- [5]橋本省二; “質量はどのように生まれるのか—素粒子物理最大のミステリーに迫る”, 講談社「ブルーバックス」 B-1680, Apr. 2010.
- [6]東京大学, KEK; “ヒッグス粒子とボトムクォークの結合, ついに初観測物質の質量起源の解明—LHC の ATLAS 実験などの成果を CERN がプレスリリース”, Aug. 2018,
https://www2.kek.jp/ja/newsroom/attic/20180828press_atlas.pdf.
- [7]兵頭哲雄, “12 カイラル対称性の自発的破れ”, 講義ノート, 2019,
https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~tetsuo.hyodo/class/2019/NP/NP_note14.pdf

[Summary]

We examined the consistency of Matt Strassler's metaphor, which explains the function of the Higgs field that generates the rest mass of elementary particles. We pointed out that the metaphor has a difficulty in explaining the diversity of masses of elementary particles because the frequency of the pendulum is not proportional to the vibrational energy. In addition, the metaphor eliminates the "resistance of the Higgs field" by introducing the resonant vibration of the pendulum, but although it can be used as a metaphor for the wave motion of the electron field, it does not succeed in explaining the inertial motion of macroscopic objects such as the Earth.

Another difficulty with the metaphor is that it does not clearly explain the difference between the "ether," which was denied by the Michelson-Morley experiment (1887), and the "Higgs field." The need for "ether" disappeared when Einstein presented the principle of relativity, but the metaphor does not explain why the Higgs field, a physical entity whose existence was verified by the CERN experiment, cannot be an absolute reference system.

In this paper, I reinterpret the concept of "Higgs field resistance" that the metaphor rejects using the theory of relativity and early quantum mechanics, and attempt to provide a general explanation of the Higgs field's function of giving mass to free particles^{<1>} based on the intuitive "motion of particles." As a result, I have come to the somewhat unexpected conclusion that the "resistance/syrup theory" of the Higgs field has a certain degree of rationality as a metaphor, and that a free particle

that has gained rest mass due to the resistance of the Higgs field is effectively stationary relative to the Higgs field, and therefore the resistance of the Higgs field does not violate the "law of inertia."^{<2>}

The key to answering the question of why the Earth's orbital motion does not stop due to the resistance of the Higgs field lies in the theory of relativity; If the Higgs field is uniformly condensed in space-time, the difference between the Higgs fields H_E and H_S condensed in the inertial frames (space-time) K_E and K_S set on the Earth and the Sun is simply the difference between two cross sections of space-time, that is, two cross sections of the Higgs field. H_E and H_S are roughly equivalent to K_E and K_S ^{<3>}, respectively. K_E revolves around K_S (not exactly with a uniform velocity) in the same way that H_E revolves around K_S , and there is no collision between K_E and H_S ($\sim K_S$). This is because K_E and K_S are two cross sections of space-time.

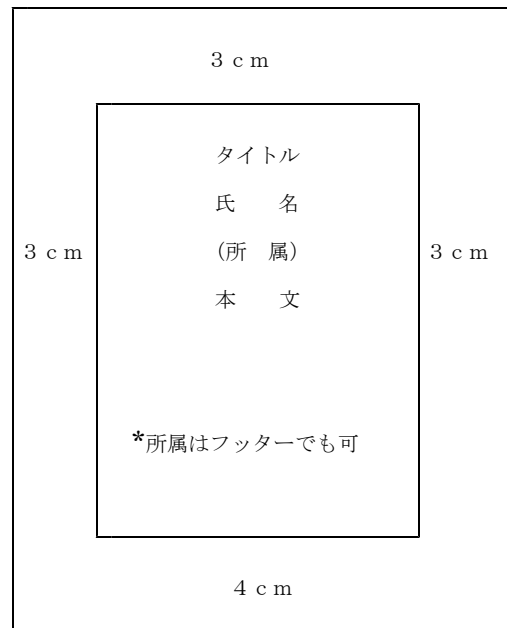
Note <1> In this paper, elementary particles with zero rest mass that travel at the speed of light are called free particles.

Note <2> The law of inertia was discovered by Galileo and Newton. Newton's first law of motion states that "if an object is not subjected to any forces, it is either at rest or moving at a constant speed." A reference frame in which the law of inertia applies is called an inertial frame.

Note <3> As verified by the CERN experiment (described below), this equivalence breaks down if two planets accelerated to speeds close to the speed of light collide. In this case, the planets are extinguished and Higgs particles are created from the Higgs field.

『言論の研究と教育』投稿規定

1. 本誌は、年一回～二回の発行を基本とする。
2. 投稿は原則として会員に限る。
3. 原稿の内容は、言論研究（会則参照）と関連があるものに限る。
4. 原稿の採否は編集委員が審査し、決定する。また、審査段階で修正を依頼することがある。
5. 使用言語は日本語または英語とし、横書きとする。
6. 原稿は完全原稿とし、未発表論文（口頭発表を除く）に限る。
7. 原稿の長さは図・表を含めA4判サイズで20枚を越えないことを基本とする。
8. 原稿の左右・上下の余白は以下に示した例に従うこととする。日本語の原稿は40字×40行を基本とする。英語の原稿はダブルスペース、または1.5スペースで40行を基本とする。原稿の1ページ目は、タイトル、氏名、所属をこの順に記し、それに本文を続けることとする。頁ナンバーは、原稿の裏に鉛筆で記すこと。ワードによる電子媒体で投稿する場合は頁ナンバーの記載は不要。



原稿は随時受け付けるが、次号（Vol.8）の締め切りは2025年6月末日とする。
送付先（送信先）はアジア・言論研究会事務局まで。