

# 時間のない物理学について 1

## —物理学の辺縁—

蔵 琢 也<sup>1</sup> 蔵 研 也

**Abstract (概要)** 現在、実験と整合しているとして確立しているかに見える物理学の様々な計算法や概念は数学的に厳密ではなく、その理論の辺縁では様々な矛盾があり、かつ多くの謎の実験結果がある。本論文では、その中で中西のアノマリーと、ニュートリノのタキオン値の問題に限って取り上げる。さらにこのような問題は因果律と密接に関連していることを指摘し、時間を最初から仮定しない物理の方針を示す。

### 1. 物理学の辺縁

自然科学は数学とは異なり、いかに美しい理論でも、あるいは常識的な理論でも現実と合わなければ捨てられなければならない。たとえばケプラー法則に従って惑星の運航する軌道は楕円であるが、ケプラーが最初に想定したプラトン立体に外接する円よりも美しくない。しかしそちらのほうが自然を正確に記述し、正しかったのである。

現実問題に大成功を収めた量子力学の計算は数学的に正当化できないものが多いことは、数学寄りの数理物理学者の大多数が認めるところである。たとえば、荒井 (1997) は「物理の文献に書かれている非自明な数学的主張でその導出が厳密でないものは、発見法的議論あるいは推論とみなされるべきものであり、それをそのまま真理として受け入れるわけにはいかない。(p. 264)」さらに、「4次元時空において、素粒子の相互作用を記述する相対論的量子場のモデルの数学的な存在は証明されていない。特殊相対性理論と量子力学の統合という理念は、現実的な4次元時空においては、まだ実現されていないのである。(p. 266)」(下線部は著者らによる)

一般的に、物理学者とその解説者は、「一般相対性理論と量子力学」の統合が現在の課題であり、「特殊相対性理論と量子力学」の統合は、遠いディラックらの昔にできたとしているが、実は厳密に数学的な意味では完成していない。とりわけ、4次元(空間3+時間1)以上の相互作用のある場の理論の存在は知られていないし、5次元(空間4+時間1)では存在が否定されている(総説、江沢&新井, 1988; 伊藤, 2000; 荒木, 2001)。

---

1) 淑徳大学総合福祉学部 260-8701 千葉市中央区大巖寺町200

証明できているのは3次元（空間2 + 時間1）以下の場合のトイモデルのみなのである。このような問題意識の違いは重要である。物理学者は（たとえエドワード・ウィッテンであっても）厳密な意味での数学を重視していないようだ。

もっとも物理学は数学と異なり実証科学なので、極端な状況では純粋数学の論証として正しくない又は辻褄があわない計算でも、実験値と合えば「有効理論」として正しい。この意味するところは、場の量子論は常識的な場面での計算では現実の数値と合う計算法が分かっているが、極限の状況では矛盾が出る可能性があることを意味している。

現在、物理学の辺縁では放置されている莫大なアノマリー（論理的・実験的な異常）があるのだが、本論文では長さの制約から、理論的な中西のゴーストと、実験におけるニュートリノの質量測定の問題に絞って取り上げる。場の量子論におけるゴーストとは観測確率が負の状態であり、またタキオンとは超光速粒子のことであり、両方とも真空の安定性と因果律に問題をきたすので観察しえないとされている。

## 2. 中西の BS ゴーストと量子電磁力学

量子電磁力学は現代物理学の最も精密な理論であり、電子の異常磁気モーメントでは8桁以上の精度を誇ると称される（総説は〔仁尾, 2007〕等）。しかしながら、上手く行っているのはポテンシャルを一定として近似して良い単純な場合である。例えば電子が、約二千倍重い陽子の周りにいる場合、電子が陽子の位置変動へ与える影響は重要ではなく、固定した陽子の周りを電子が回るとして計算してもよい。だが、相互作用が無視できなくなると、直ぐに束縛系の量子化の問題が起こる。数理物理学者である中西裏はこの束縛系の量子化の手法であるベーテ・サルピーター方程式を研究して、ゴーストの発生が避けられないことを発見した（Nakanish, 1965, 1969）。ゴーストは存在確率が負である粒子であり、これはボルの確率解釈に矛盾する。中西（2004）の解説「場の量子論における時間」から引用しよう。

最後の（人間原理）以外の（ ）は著者らによる補足と要約であり、下線は著者らによる。

（束縛しあう二つの粒子の間で）交換される粒子  $c$  もスカラーとし、その質量を  $\mu$  とする。（方程式（5.2）を示した後） $\mu = 0$  の場合は（5.2）の解が正確に求まるので、その状況を具体的に調べることができる。それは水素原子に対するシュレディンガー方程式の相対論的拡張とみなすことができる。（中略）1965年筆者は、 $\kappa$  が奇数の解はゴーストに対応するものであることを発見した。（中略）ゴーストが現れると量子論の確率解釈は破綻する。（中略）筆者はさらにゴーストの存在には群論的な根拠があり、梯子近似の特殊性に基づく例外的な現象ではなく、一般的に不可避であることを証明した。（中略）しかしながら、このような事態が生ずることはむしろ自然なこ

となのである。構成粒子 a と b のスピンは 0 であっても、その束縛状態 B のスピンは  
 いくらかでも大きな値をとり得る。(中略、素粒子のスピンは 2 以下でしか上手く行か  
 ないことを述べて) このようにわれわれはお化けと隣り合わせに住んでいるのであ  
 って、量子論の確率解釈が可能なもの、結合定数などの値の微妙なバランスのせいなの  
 かもしれないのである (人間原理)。(p. 35)

電磁相互作用では交換される粒子 c は光子で質量  $\mu$  は 0 である。下線部の部分で中西は、  
 完成したとされる量子電磁力学でさえ各種パラメーターを人為的に微調整しないと、ゴ  
 ーストの発生を阻止できない不自然性を述べているのである。最後の「人間原理」という中  
 西の言葉も意味深長である。人間原理と言うのは宇宙が人間のような知的な観測者を発生  
 させるような世界でしか、物理学が発達しないので、そうなるように宇宙の各種パラメ  
 ーターが調節されているという考えである。つまり中西は、可能な宇宙が多数あって、ほと  
 んどすべてがゴーストで満ちているが、うまく調節された世界でのみゴーストが発生せず、  
 人間が存在するというのである。

そもそも、この解説自体が時間軸を虚数に回転させるウィック回転などの物理学で常識  
 になっている計算が、数学的に部分的にしか正当化できないことを指摘して (Nakanishi,  
 1988)、常用することを批判しているものであり、それは中西のベテ・サルピーター方  
 程式の総説 (Nakanishi, 1969, p. 21) でも警告されているものである。そして中西の著作  
 (1981, 1992) をよく読めば、一貫して中間の計算のみに出てくる仮想粒子の実在性「ゴ  
 ースト・リブ」を主張してきたことが分かる。

さらに Nakanishi (1969) から引用しよう。

"One might ask why abnormal solutions are not observed in the hydrogen atom.  
 The reason is of course attributed to the smallness of the fine structure constant. In  
 the relativistic ladder models, no abnormal solutions appear if  $g^2/4\pi < \pi$  where  $g$   
 denotes the coupling constant." (p. 46)

"The vector-coupling,  $\mu=0$ , equal-mass case is realized in the quantum electrodynamics.  
 As is physically expected, near  $s=4$  we have a discrete set of solutions for the  
 fermion-antifermion system, which corresponds to positronium, but not for the  
 fermion-fermion system." (p. 65)

つまり、水素原子では微細構造定数が小さいおかげでゴーストは見えず、また当時から  
 現在まで詳細に実験がされているポジトロニウム (電子・反電子系) のような等質量  
 のフェルミオン・反フェルミオンの系では (計算の相殺が起こって、通常の) 電磁量子力

学が実現されるが、その他のフェルミオン・フェルミオンの系ではそうではないと言うのである。さらに、

"the B-S ghosts are caused by the manifest relativistic covariance of the theory, but not related to any pathological features at small distances. It is therefore quite plausible that the B-S ghosts appear even in any new field theory (involving a fundamental length, say) as long as the manifest relativistic covariance of the theory is retained. The existence of the B-S ghosts of course contradicts an axiom of the quantum field theory. For example, therefore, we can no longer prove the positive definiteness of the Lehmann's spectral function for the one-particle modified propagator. Furthermore, the unitarity of the  $S$ -matrix is not obvious." (p. 51)

要約すると、相対論的な理論の取り扱いではゴーストは必然であり、レーマンのスペクトル関数の正值確定はもはや証明されず、 $S$ 行列のユニタリー性も自明でなくて、量子電磁力学の公理に矛盾していると述べている。

これは量子電磁力学に疑念を投げかける否定的な結果であり、中西は実験的な証拠もないので、これを余り宣伝しなかった（註1）。結果「中西のアノマリー」は場の量子論やゲージ理論の大成功の影に隠れて長く無視されることになった。だが中西のアノマリーは現実には存在しないのだろうか。

2010年、水素原子の電子をミュオンに代えて陽子の周りを回らせることで、陽子の半径を測る実験の結果が公表された。それは、量子電磁力学からの計算とは想定外の4%もの違いがあるものであった（Pohl et al, 2010）。この実験は陽子の直径の精密測定を目指したものであるが、2桁目からずれていたのである。この違いについて、Pohlらはリュードベリー定数か量子電磁力学を原因として疑っている。

ミュオンは電子とほぼ同じ性質をもつが、質量だけが約200倍重い。ミュオンほど重くなると、ミュオン・陽子系では束縛系の量子論を使わなければならない。中西の結論からすれば、この系はゴーストの宝庫の宝庫の宝庫である。それに対してリュードベリー定数は多くの普通の原子を用いた数々の実験によって精度よく決まっています変更の余地は少ない。もちろん、この実験が単なる失敗実験であった可能性もあるが、少なくとも中西のゴーストの顕在化の影響である可能性を疑っても良い。

量子系のユニタリー発展、タキオンの非存在、エネルギー保存則などは同じ概念ではないが、一般的に言って様々な規則を通じて関連している。どれかが破れていると派生的に他の要素も影響を受けるのである。蔵&蔵（2002, 2004）において、これらを破る可能性を示唆する多くの文献を収集したのだが、さらに一つ加えておく。

Kidambi & Widom（1999）は、固体中の電磁伝達が超光速で因果律を破っているよう

に見える現象を検討している。古典的にはこれらは理解不能であり、これらの現象を記載した論文では、通常は因果律を破らないように様々な理由を付けられて解釈されている。しかし彼らの結論は「*this model does indeed violate Einstein causality!*」(p128; 斜体は原文のまま) というもので、恣意的に付けられた条件を外すとアインシュタイン因果律を破るというものである。さらにこの論文は古典的に取り扱っているが、仮に量子力学的な取り扱いを行っても、アインシュタイン因果律やぶるのかもしれないと述べている(註2)。

19世紀末には基本的に完成し、よく知られているはずの古典電磁気学でも様々なアノマリーがあり、放置されている。とりわけ相互作用項があればすっきり解けず、ネーターの定理などが正確に適用できるかも実は不明なのである。この論文は、それが成り立たないことを示す反例なのであろう。

### 3. ニュートリノ質量のタキオン値

ニュートリノは弱い相互作用に関する粒子であり、基礎的な素粒子の中で電子族やクォークと異なる多くの変った性質を持っている。質量は存在しても極めて軽い。左手系しか発見されていない。ディラック粒子ではなく、マヨラナ粒子であると予想されている。ニュートリノは世代混合を起こす弱い相互作用の鍵の一つと見なされているため、多くの実験が行われてきた。その中に、ニュートリノを生成した残りの粒子のエネルギー運動量を測って、ニュートリノの(静止)質量を直接求める実験群がある。以下がその結果である(引用文献一覧は註3を参照せよ)。

表1

ニュートリノの種類	質量の2乗と誤差	研究
ミュー	$-0.14 \pm 0.20 \text{ (MeV)}^2$	Anderhub et al. (1982)
ミュー	$-0.163 \pm 0.080 \text{ (MeV)}^2$	Abela et al. (1984)
ミュー	$-0.079 \pm 0.072 \text{ (MeV)}^2$	Jeckelman et al. (1986)
ミュー	$-0.144 \pm 0.029 \text{ (MeV)}^2$	Ch. Bronnimann et al. (1992)
電子	$966 \pm 50 \text{ (eV)}^2$	Boris et al. (1987)
電子	$-147 \pm 48 \pm 41 \text{ (eV)}^2$	Robertson et al. (1991)
電子	$-65 \pm 85 \pm 65 \text{ (eV)}^2$	Kawakami et al. (1991)
電子	$-24 \pm 48 \pm 61 \text{ (eV)}^2$	Holzschuh et al. (1992)
電子	$-39 \pm 34 \pm 15 \text{ (eV)}^2$	Weinheimer et al. (1993)
電子	$-22 \pm 4.8 \text{ (eV)}^2$	Belesev et al. (1995)
電子	$-130 \pm 20 \text{ (eV)}^2$	Stoeffl & Decman, (1995)
電子	$-3.7 \pm 5.5 \pm 2.1 \text{ (eV)}^2$	Weinheimer, (1999)
電子	$-1.9 \pm 3.4 \pm 2.2 \text{ (eV)}^2$	Lovashev et al. (1999)
電子	$-0.6 \pm 2.2 \pm 2.1 \text{ (eV)}^2$	Kraus et al. (2005)

これらは、正確には反ニュートリノの静止質量の推定だが、反ニュートリノとニュートリノは等しい（マヨラナ粒子）か、異なっても質量は大差がないと考えられている。電子よりミュオンが重いので、電子ニュートリノに比べてミュオン・ニュートリノは重いと考えられている。確かに上の表を見ると、静止質量の二乗はミュオン・ニュートリノが $-0.14 \text{ (MeV)}^2$ ぐらいで、電子ニュートリノはばらつきがあるが $-20 \text{ (eV)}^2$ とすれば、100倍弱の重さの違いがある。

しかし上の表を見て驚愕すべきなのは、静止質量を $m_\nu$ とすると、Boris et al. (1987)を除いて $m_\nu^2$ は、おおむね負になっていることである。静止質量 $m$ が虚数になるわけだからそのまま解釈すると、ニュートリノが「タキオン」だったということになる。これは理論的にあり得ないと思うのは当然だろう。

しかし、上の表の Bronnimann et al. (1992) の論文ではミュオン・ニュートリノで $5\sigma$ （標準誤差の5倍）、Stoeffl & Decman (1995) の実験では電子ニュートリノで $6\sigma$ 以上の有意差で負の値を示している。このためかどうかは断定できないが、Bronnimann et al. (1992) の実験は大規模で多くの人数を使ったにもかかわらず、有力な雑誌には出なかった（少なくとも我々は見つけられなかった）。そして Stoeffl & Decman (1995) の論文は、アメリカ物理学会の発表（W. Stoeffl, Bull. Am. Phys. Soc. 37, 925. [1992]）の論文化と推測されるが、出版に3年もかかったのである。その上、Stoeffl & Decman (1995) の論文では、題名にも論文内にも、ニュートリノの質量の二乗が負であることはありえないので、どこかに「アノマリー構造」(anomalous structure) があるという自分自身の研究結果を否定する言い訳が書いてある。

しかし、この論文にはその「異常な構造」とはなんなのだろうかについては明言していない。代わりに "However, all the recent results obtained negative values for the best fit value of  $m_\nu^2$ . This suggests the possibility of an additional systematic error in these measurements or some physics that is not described by beta decay theory." (p. 3237)、そして、"This is in contrast to the molecular physics solution where the discrepancy would suggest changing the basic physics by several percent." (p. 3240) と分かりにくくて、慎重に持って回った言い方をしている。この実験は、ローレンス・リバモア研究所で、 $^{83}\text{Kr}$ を補正に使った反電子ニュートリノの測定値である。

独立の実験としてロス・アラモス国立研究所の自由トリチュームを使ったやりかたを検討してみよう。Knapp et al. (1984) に示されている研究計画では、この実験ではトリチュームを使い電子ニュートリノの質量を $<10\text{eV}$ の精度で測定できるとしている。そして、稼働した結果は上の表にある $-147 \pm 48 \pm 41 \text{ (eV)}^2$  [Robertson et al., Phys. Rev. Lett. 67 (1991) 957.] であり、概ね計画通りの誤差の範囲に収まっているが、それは自乗値が負の値であった（註4）。

Weinheimer ら (1999) の論文では、わざわざ第二節の題名を "Problem of  $m_\nu^2 < 0$ " とし、過去のニュートリノ質量の自乗が軒並み負になる困難を論じている。最期に "The

origin of such a monoenergetic line is not clear within standard physics." (下線部は著者らによる) と、標準的な物理学では説明不能であることを認めている。この論文は、それ以前のものより電子ニュートリノ質量がもっとも 0 に近い論文だが、全体的にあらゆる努力とあらゆる理屈を付けて、二乗質量を正にしようと苦闘した論文に見える。例えば  $\beta$  崩壊に半年を周期とする変動が認められるという「トロイツカ・アノマリー (Troitsk anomaly)」も採用して補正している (註 5)。

これらの実験はどれも、ニュートリノ以外の運動量とエネルギーを計った残差による結果である。概ねタキオンになってしまううえ、ニュートリノ混合角を計れないなどの理由で、この系列の実験はまったく信用されなくなり、この系列の実験もされなくなった。

附記すると、これらの論文ではニュートリノがタキオンであると高らかに宣言した論文は全くない。質量の二乗が 0 より大きい確率は、何々 (例えば 0.01 とか、0.00001) 以下で棄却されると正直に書いた論文さえない。代わって、ほとんどが「質量が 5 eV 以上である確率は何々で棄却される」のように書いてある。これらの理由も明らかで、そのようなことを書くと雑誌に載せてくれないからだ。

最後の論文 Krausl et al, (2005) は他の実験から少し時間が空いており、質量のタキオンの具合も小さくなって、論文の名も "Final Results from phase II of the Mainz Neutrino Mass Search in Tritium  $\beta$  Decay" である。要約の中の、電子ニュートリノの質量が 95% で 2.3 eV より小さいという結果が、現在の物理学では都合よく引用され、流通している。

これらの実験結果を虚心坦懐に見ると、ニュートリノがタキオンになる。タキオンは超光速伝達する粒子の名前の総称で、特殊相対性理論と合わせると因果律を破ったり真空が不安定になったりする「困難」がある。だから、タキオンが出る理論は失敗理論とされる。同様に、これらの実験結果は多くの予算と人員を割いたにもかかわらず、無視されてきた。自然科学の建前は「実験や観察に忠実であるべき」であるはずなのだが、実際はそうではないのである。

2011年にニュートリノの速度が光速を超えたとい名古屋大学と CERN の「Opera 実験」の発表があった (Opera Collaboration, 2011)。物理学には多くの「失敗実験」があるが、ほとんど全ては原因不明であり、放置される。しかし今回は事が大きいので、様々な角度から検討された結果、光ファイバーの接続の緩みが時間推定をずらして誤ってタキオン値を出した原因と推定されている (Opera Collaboration, 2012)。この誤認の推測は説得力がある。

これは Ehrlich (1999) の結末に似ている。彼は電子ニュートリノがタキオンであれば、4.5PeV以上の高速中性子が陽子に逆崩壊する現象が起これと考え、過去の幾つかの観察結果がそれを示唆していると指摘したが、より詳しい観察では、なぜかその有力候補の宇宙線源自体が消えたのである。

これらの実験結果には多くの謎が残るが、仮にニュートリノがタキオンであったとしても、我々を構成するバリオンとの相互作用が極めて小さいので、これだけでは現実世界で大きな因果律の破れをもたらすことはない。

#### 4. タキオンはチェレンコフ放射できるのか

もし、仮にニュートリノが超光速だとしよう。すると Cohen & Glashow (2011) は、超光速ニュートリノは「チェレンコフ放射」(これは電磁波の放射に使うのが普通だが、この論文では彼らに習って他粒子の放出にも使う)によって電子と反電子を大量に放出して急速にエネルギーを失い、ほとんど全てが12.5 GeV 程度まで減速すると計算した。一方、Opera 実験で観測されたニュートリノのエネルギーのレベルは10 GeV-50 GeV 程度、平均17 GeV である。ニュートリノ元は730キロ離れた加速器で加速された400 GeV の陽子なので、途中でエネルギーを失っている可能性はあり得るが、それでも12.5 GeV を超える粒子があるのは矛盾だということである。Cohen & Glashow (2011) の結論は単純明快だが、大きな問題点がある。

その前に、Cohen & Glashow は、この論文の計算においてニュートリノがタキオンだとの仮定を明言していないことを指摘しておきたい。Cohen & Glashow は VSR (Very special relativity) を研究しており、これは弱い相互作用に限ってローレンツ対称性の一部を捨てるというモデルである。その結果、(トロイツカ・アノマリーのような)空間の異方性が存在してニュートリノの最高速度などの性質が変わってもいいのである。彼らの論文の一つは "A Lorentz-Violating Origin of Neutrino Mass?" (Cohen & Glashow, 2006) であり、ローレンツ変換の破れがニュートリノ質量の微細な質量の由来である可能性を論じたものである(註6)。Cohen & Glashow が Opera 実験の発表のあと、直に計算できたのは、これを研究していたおかげであろう。

さて、通常のチェレンコフ放射には媒質が必要であり、これが事実上の静止系を指定している。そしてチェレンコフ放射は荷電粒子が媒質内での「光速」を超えているときに起こる。そして媒質の決める静止系に対して減速して、荷電粒子の持っていた運動量が媒質に転移するのである。真空では転移する先がないことを注意しよう。

ところで荷電タキオンはどうだろうか。タキオンのエネルギー-基底状態は速度無限大でエネルギーは0かつ固有運動量だけ存在する状態である。そしてタキオンでは慣性系を適当に選べば必ずこの速度無限大の基底状態で記述できる。当然、この状態ではエネルギーは0なので、真空におけるチェレンコフ放射など起こらない。ところが、そうでない慣性系を取ると Cohen & Glashow (2011) のように放射するという「計算」がありえる。Cohen & Glashow (2011) では、あきらかに通過してきた地球の岩盤の性質などは論じてはならず、弱い相互作用の量子力学しか使っていない。

タキオンの弾性反射(次節参照)は、慣性系の取り方によっては過去に反射する場合が少なくなくて、もともと因果律と相性が悪いのである。慣性系の取り方を変えると、ありそうもない偶然が起こる必要がある。

Cohen & Glashow の論文にある電子と反電子を放射するという場合は、最初のタキオン



が速度 $\infty$ の基底状態になる慣性系からみると、過去から反タキオン（反粒子のタキオンを反タキオンと略記する）が飛んできて衝突し、対消滅して、あとに電子と反電子が未来に飛ぶという図式になる。それもタキオンが CERN の装置で発生するのを予め知っていて測ったように飛んできて（弱い相互作用は極めて小さいにもかかわらず）ぶつかる必要がある。これは確率的に極めて稀であろう。過去から飛んできて予定調和のように衝突する反タキオンは、もとの慣性系からみれば「チェレンコフ放射」をして減速したタキオンのことである。

タキオンには、少し考えるとこのように奇妙な部分が数々でてくるので、その実在が理論物理学者の間で真剣に考慮されたことは一度もなかった。Cohen & Glashow (2011) は、この珍妙な結論をはっきり再確認した論文にすぎない。結局、タキオンが真空中で「チェレンコフ放射」するには、因果律をなんとかしなければならず、簡単に何度も放射して減速するという Cohen & Glashow (2011) の結論には同意しかねる。

## 5. タキオンの基本性質と弾性衝突

ここで、まともに論じられたことのないタキオンの性質を少し詳しく考えてみよう。

タキオンは超光速粒子の総称であり、それに対してルクシオンが光速粒子、ターディオンが光速になれない通常の粒子である（テレッキー, 1966）。それぞれ時空の四次元ベクトル空間で空間的領域、光的な「領域」（通常、数学では領域は開集合を指すが、光的な部分は内点をもたない閉集合である）、時間的領域に対応している。ローレンツ変換ではこれらの領域は不変である。つまりこれらは慣性系の取り方によって移り変わらなので、テレッキー（1966）のような一部の人々は、タキオンの実在を主張していた。通常物質たるターディオンは運動量が0に見える静止系を持ち、その時のエネルギーが静止質量（固有質量）であり、最低エネルギーに当たる。一方、タキオンはエネルギーが0に見える慣性系をもち、その時、速度は無限大だが、運動量は最小になり、それは0でない。タキオンは固有質量の代わりに固有運動量をもつ粒子なのである。

さらに時間的な領域は二つに分れるが、空間的な部分の一つであり、ローレンツ群の単位元の連結成分で移り変わる。この結果、タキオンは慣性系によって連続的に粒子から反粒子に変わって見えるのである。このときタキオンが電荷を持つと慣性系によって電荷が逆転して見えて矛盾する。また、弱い相互作用を使う Cohen & Glashow (2011) よりも簡単な議論で、直接チェレンコフ放射を起こすこともわかる。よって電荷は持てない（註7）。

スピンにも影響を与える。ターディオンとルクシオンからなる通常の系Aから出たタキオンが別の通常の系Bにおいて吸収されたとしよう。このとき、タキオンがスピンを持てば、AからBへスピンの転移する。だが、慣性系を変えれば、逆の順序にならねばならず、

スピンもエネルギーと同様に、慣性系によって正反対に見えるのである。

次に、エネルギーが0に近いタキオンと通常物質のターディオンとの弾性衝突を考えて見よう。たとえばビッグバンの時代に大量に作られたニュートリノが一度も相互作用をしないまま、光子の背景放射のように宇宙に広がり低エネルギーになって満ちているが (Fuller & Kishimoto, 2009)、ニュートリノがタキオンとした場合、宇宙にある低エネルギーの陽子と反対側から弾性衝突して、ちょうど正反対に反射したとしよう。共通重心系で考えると単なる運動量を交換して反対側に反射するだけだから、計算は簡単になる。しかし驚くことに、一方がタキオンの場合、共通重心をとるとタキオンの時間軸が逆になって、衝突地点へ向かってくるはずのタキオンが、逆に衝突地点から未来に向かって離れてゆく反粒子になる。よって、過去から来るもう一方の線が必要なのである。つまり、タキオンのターディオンとの弾性衝突は「過去に反射する」と結論できる。時間順序を普通に直すなら、過去から反タキオンが、予定調和的に衝突地点へやってきて、ターディオンと衝突して、実験で用意されたタキオンになる。実験で作られるタキオンも時間を順行しているので、実験設定の慣性系で未来の方向に行く粒子は反射したターディオンだけになる。Cohen & Glashow (2011) の考察もこの変種といえる。

## 6. いまだ完成されていない物理学

Cohen & Glashow (2011) に対する言及が長くなったが、この論文で紹介できたアノマリーはごく一部であり、物理学の辺縁は良くわかっていない。その一部は (蔵 & 蔵; 2002, 2004) で紹介した。高名な宇宙論学者ホーキングがルーカス教授職に就任したときの演説「物理に終わりが見えているか」(ホーキング, 1982) において、物理学の第一法則はもう直ぐ完成し、その第一候補は量子超重力理論であると予想していた。超重力は上手くいかなかったが、直後に超弦理論が出てきて、それが最有力候補になった。それから25年たったが、期待されたほど上手く行っていない (スモーリン, 2006; ウォイト, 2006)。

これに対して流行を追う必要のない古参の物理学者は別の方向を主張している者も少なくなかった。これには、前述の中西やグラショーも含まれる。もう一人の例をあげるなら、超対称性の先駆的な研究をした宮沢弘成は、超弦理論の代替案として湯川秀樹が行った素領域の理論のように因果律を破る等を検討せよと言っている (宮沢, 発表年不明 HP より)。このように因果律を捨てるという方向は、少数の論文で主張されるようになってきた。

たとえば、足踏み状態の素粒子理論を実験で打開すべくアメリカで計画された巨大加速器 SSC は、建設予算が議会によって1993年にまさかの逆転で否決され、少し能力の劣ったヨーロッパの CERN の LHC は、まるでスエトニウスの『ローマ皇帝伝』にある予兆のような珍妙なトラブル続きで、本格稼動が二年以上遅れた。これについて、物理学者の

Nielsen & Ninomiya (2009) は、ヒッグス粒子などの高エネルギー粒子の性質において何か我々の知らない理由があり、それが因果律に影響を及ぼして巨大加速器の建造を妨げた可能性を論じている (註8)。常識的な時間の概念を疑い、因果律に疑念を感じている物理学者は公然とはいわないだけで、少なからずいるのである。ただし、ニュートン以来の伝統であり、多くの定理や手法が確立している因果律や時間の概念をすてて、どうやって計算するのは五里霧中の状態であり、十分な代替案がないのである。

これに続く論文では、以下のような方針で一つの試論を展開することにする。

- (1) まず、世界の波動関数全体を十分に簡素で広い関数空間とする。例えば最も簡単な複素ヒルベルト空間は2次元複素ベクトル空間  $C^2$  であり、これにはスピノルが作用する。そこで、この加算無限テンソル積を考察することにする。つまり、

$$\bigotimes_{i=1}^{\infty} C^2$$

である。この一つ一つの元が「世界の波動関数」に相当する。

- (2) この空間にエントロピー類似物を定義し、時間がエントロピーの方向に巨視的に発生するとする。因果律も巨視的・副次的に発生することになる。時間の流れは内部観測者の属する元の近傍で、エントロピーの低い方向を内部観測者が過去と推定することから生じることになる。
- (3) 観測者条件、たとえば半独立性や十分な複雑性などを課して、観測可能量と演算子のエルミート性を、Everett (1957) に倣って二次的に導出する。
- (4) 観測者が、(ビッグバン地点のような) 十分に様なエントロピー極小地点近傍に存在するとして、その摂動としてどのような時空間や内部空間が導出されるかを考える。とりわけ、添え字の部分集合を考えて、スピネットワークが適応できるか考察する。
- (5) 基本的な素粒子を、有限な存在である内部観測者が世界を平板で単純に見ようとするときに、それを不可能にする避けられない障害であるホモロジー類似物と見なせるか考察する。つまり、宇宙の波動関数や時空間における、観測者には区別できない自由度で消せない歪みや皺と見なす。
- (6) 以前の論文 (蔵 & 蔵, 2002, 2004) での因果律閉回路の時の計算の不合理な部分を再考し、その宇宙全体での巨視的な効果を考察する。
- (7) 因果律が破れから、不定計量空間とゴーストを二次的に導出できるか検討する。蔵 & 蔵 (2004) では、因果矛盾の部分捨てて計算することを提案したが、それは系の仮想的自由発展のヒルベルト空間に対する拘束になり、物性物理の正孔に似ているのである。

註

(註1) 中西はトーフトに匹敵する能力の数理論物理学者であるといえるだろう。トーフトは非可換ゲージ場の繰り込み可能性を証明するという肯定的成果を得た結果、ノーベル賞を得たが、中西の結果は否定的なものであり、今のところ評価されていない。中西は、この否定的な結果の代わりに、ゴースト場を使った独自の量子重力理論を宣伝したが、ほぼ全く支持を集めなかった。

(註2) とって付けたようなこのコメントは、量子電磁力学を使えばこの矛盾はなくなるのではないかという査読者の指摘に対するものであろう。

(註3) この表および、この節の文章の多くは著者の一人(蔵琢也)が元々HPで公開していたものである。表1の引用文献は以下である。

- H.B. Anderhub et al., Phys. Lett. B 114 (1982) 76.  
R. Abela et al., Phys. Lett. B 146 (1984) 431.  
B. Jeckelman et al., Phys. Rev. Lett. 56 (1986) 1444.  
S.Boris et al., Phys. Rev. Lett., 58 (1987) 2019.  
R. Daum et al., Phys. Lett. B 265 (1991) 425.  
R.G.H. Robertson et al., Phys. Rev. Lett. 67 (1991) 957.  
H. Kawakami et al., Phys. Lett. B 256 (1991) 105.  
E. Holzschuh, M. Fritschi and W. Kundig, Phys. Lett. B 287 (1992) 381.  
Ch. Bronnimann et al., PSI Annual Report 1992, p. 29.  
Ch. Weinheimer et al., Phys. Lett. B 300 (1993) 210.  
A.I.Belevsev et al, Phys. Lett., B 350 (1995) 263.  
W. Stoeffl & Decman, Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 3237.  
(W. Stoeffl, Bull. Am. Phys. Soc. 37 (1992) 925.)  
Ch.Weinheimer, Phys. Lett., B 460 (1999) 219.  
V.M.Lovashev et al, Phys. Lett, B 460 (1999) 227.  
Ch. Kraus. Eur. Phys. J. C 40 (2005) 447.

(註4) この実験の取材と解説として、"Tritium Beta Decay and the Search for Neutrino Mass", No.25 1997 Los Alamos Science p.8,

(<http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/00326911.pdf>) もあるので参照せよ。

(註5) 「トロイツカ・アノマリー」とは、トリチウムの $\beta$ 崩壊に半年を周期とする季節性があるという現象をさす (Lovashev et al., 1999; Drobyshevski, 2005)。5月と11月

に少なく、2月や8月に多いのである。この効果は実験したロシアの研究所の名前をとって「トロイツカ・アノマリー」と呼ばれている。このような結果は気温の違いや電力事情等の原因が考えられるので、普通に無視されている。しかし年周期ではなく半年周期であり、単純な系統誤差の要因は想定しがたい。Drobyshevski (2005) はデーモン(弱い相互作用をする暗黒物質)を支持しており、デーモンがエーテル流のように地球の周りを流れているのがトロイツカ・アノマリーの原因であると主張している。しかし、ベータ崩壊は自発的なものであり、本当にデーモン流があるとしても弱い相互作用で影響を与えられるかは不明である。

(註6) グラシローは、当初から超弦理論のような巨大な内部自由度を持つゲージ群と無数の未発見粒子を仮定する理論に批判的であった。Cohen & Glashow (2006) は、既存の理論の最小の変更で、現在知られている粒子の性質を説明しようという方向である。トロイツカ・アノマリーが本当に存在するならば、弱い相互作用では空間の対称性が成り立たないことになる。その場合、VSRは真剣に検討に値する理論ということになる。このVSRは、これまで対称群を大きくして自由度を上げるのが常識であったこの分野では、逆転の発想といえる。

(註7) 荷電タキオンは真空中でチェレンコフ放射を起こすが、その衝撃面のエネルギーが無限大になるだけでなく、同じことは光速の荷電粒子でも放射が起こるのである(Bolotovskii & Ginzburg, 1972; Bolotovskii & Bykov, 1990)。このときに放出されるエネルギーが有限になる相殺条件も厳しく、等電荷が反対方向に等速で移動するというものである。光速の荷電粒子は減速できないので、エネルギーを失うことに強い制約がある。ゲージ理論では原初はルクシオン(光速粒子)しかなく、ヒッグス機構などによって質量を獲得してターディオオンになったと考えるが、対称性があつた原初の世界では、いったいどうなるのかは謎である。

(註8) フェルミ研究所のテバトロンでは、ヒッグス粒子が期待通りに見つからなかったが(フォルジャー, 2011)、その理由としてヒッグス粒子が簡単なモデルとは合わなかった可能性がある。ヒッグス場の最も簡単な場合は、タキオン場の四体相互作用項であるし、頭からターディオオンであることを想定すべきはないだろう。例えばデータの誤認とされたCDF Collaboration (2011)では運動量異常が見られるが、タキオンならエネルギーが足りずに $b\bar{b}$ へは壊れない場合もあり、ターディオオンとは異なった振る舞いをする。

引用文献

荒井朝雄『ヒルベルト空間と量子力学』東京：共立出版。(1997)

荒木不二洋「ユニタリ非同値問題と代数的な場の量子論誕生」, 数理科学, no. 4, (2001)  
pp. 33-40.

Bolotovskii B. M., & V. L. Ginzburg (1972) "The Vavilov-Cerenkov effect and the Doppler effect in the motion of sources with superluminal velocity in vacuum", *Sov. Phys. Usp.* vol.15, pp.184-192.

----- & V. P. Bykov (1990) "Radiation by charges moving faster than light", *Sov. Phys. Usp.* Vol.33, pp.477-487.

CDF Collaboration (2011) "Invariant mass distribution of jet pairs produced in association with a W boson in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV", [arXiv: hep-ex/1104.0699]

Cohen A. G. & S. L. Glashow (2006) "Lorentz-violating origin of neutrino mass?" [arXiv: hep-ph/0605036]

----- (2011) "Pair creation constrains superluminal neutrino propagation", *Phys. Rev. Lett.* vol.107, 181803 [arXiv: hep-ph/1109.6562]

Drobyshevski (2005) "Daemons, the "Troitsk anomaly" in tritium beta spectrum, and the KATRIN experiment", [arXiv: hep-ph/10502.0502056]

江沢洋, 新井朝雄『場の量子論と統計力学』東京：日本評論社 (1988)

Ehrlich, R. (1999) "Is there a 4.5 PeV neutron line in the cosmic ray spectrum?", *Phys. Rev D*, vol. 60, 073005.

Everett III, H. (1957) "'Relative State" formulation of quantum mechanics", *Rev. Mod. Phys.*, vol. 29, pp. 454-462.

フォルジャー, T. 「さよならテバトロン」日経サイエンス, Nov. (2011) pp. 78-84.

Fuller G. M. & C. T. Kishimoto (2009), "Quantum coherence of relic neutrinos", *Phys. Rev. Lett.* vol.102, 201303. [arXiv: hep-ph/0811.4370]

ホーキング, S. 「理論物理学の終りはみえているか」科学, May, (1981) pp. 280-286.

伊藤恵一「構成的場の理論の軌跡と展望」, 数理科学, no. 4, (2001) pp. 49-57.

Knapp D. A., *et al.* (1984) "The Los Alamos free atomic tritium beta decay experiment", (<http://www.fas.org/sgp/othergov/doc/lanl/lib-www/la-pubs/00261724.pdf>)

Kidambi, V. & A. Widom (1999) "Causality and electromagnetic transmissions through materials", *Phys. Lett. A*, vol.3, pp.125-131.

蔵琢也, 蔵研也「物理学の幾つかの問題について」, *Review of Economics and Information Studies*, vol. 2, (2002) pp. 470-510.

----- 「因果率の回路の計算」, *Review of Economics and Information Studies*, vol. 5, (2004) pp. 111-127.

Lovashev, V. M., *et al.* (1999) "Direct search for mass of neutrino and anomaly in the tritium beta-spectrum", *Phys. Lett. B*, vol.460, pp.227-235.

宮沢弘成「老人の見た超弦理論」 [www7.ocn.ne.jp/~miyazaw1/papers/oldboy.pdf](http://www7.ocn.ne.jp/~miyazaw1/papers/oldboy.pdf) (2012/ 4 / 1 時点)

Nakanishi, N. (1965) "Multiple poles in the scattering green's function", *Phys. Rev. B*, vol. 138, pp.1182-1192.

---- (1969), "A general survey of the theory of the Bethe-Salpeter equation", *Prog. Theor. Phys. Suppl.* no.43, pp.1-81.

中西襄『相対論的量子論』東京：講談社 (1981)

Nakanishi, N. (1988), "Review of the Wick-Cutkosky model", *Prog. Theor. Phys. Suppl.* no. 95, pp.1-24.

中西襄『場と時空』東京：日本評論社（1992）

----- 「場の量子論における時間」, 数理科学, July, (2004) pp. 30-35.

Nielsen, H. B. & M. Ninomiya (2009) "Search for effect of influence from future in Large Hadron Collider", [arxiv:abs/0707.1919]

仁尾真紀子「微細構造定数  $\alpha$  を究める－電子の異常磁気モーメント」, パリティ, vol. 22, no. 02, (2007) pp. 6-13.

Opera Collaboration (2011) "Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam", [arxiv:hep-ex/1109.4897]

Opera Collaboration, (2012) "Report from the OPERA Collaboration to the scientific committees on recent achievements concerning the neutrino velocity analysis"

Pohl,R., *et al.* (2010) "The size of the proton", *Nature*, vol.466, pp.213-216.

スモーリン, L. 『迷走する物理学』 東京：ランダムハウス講談社. (2006)

テレルツキー, ヤ・ベ, 『相対性理論のパラドックス』東京図書：東京 (1966)

ウォイト, P. 『ストリング理論は科学か』 青土社：東京 (2007) (Woit, P., 2006 "Not Even Wrong: The Failure of String Theory & the Continuing Challenge to Unify the Laws of Physics", London : Jonathan Cape)