

■ 研究紹介

ニュートリノを使った Lorentz violation の実験

マサチューセッツ工科大学

香取 哲平

katori@mit.edu

2012年8月27日

1 はじめに

この記事は僕が研究の一環としてやっているニュートリノを使った Lorentz violation (ローレンツ対称性の破れ) の研究についての記事です。あまりなじみのない人が多いと思いますのでイントロダクションに重点を置きました。面白いと思うので最後まで読んで下さいね。

Lorentz violation はプランク領域での超高エネルギー物理学で現れると推測されています(2節)。ひとことで Lorentz violation といっても科学的であるためには理論には矛盾は許されないので Lorentz violation を正しく定義する必要があります(3節)。そのための最も一般的な枠組みが拡張標準理論こと SME (Standard-Model Extension) です。さまざまな実験結果が SME に基づいて解析されていますが、その中のいくつかの興味深い実験を4節で紹介したいと思います。特にニュートリノ振動実験はそれ自身が干渉計の役割を果たすので時空や真空の構造解明に役立つと期待されています(5節)。ニュートリノ物理にはまだまだ未解決の問題が多く残されていますが、その一つにアメリカのフェルミ国立加速器研究所(通称フェルミラボ)の MiniBooNE 実験の結果があります(6節)。この実験結果はニュートリノの質量を含む標準理論(ニュートリノ標準理論)では説明できないので新物理の兆候である可能性があり、そのような新物理の候補のひとつが Lorentz violation です。7節では MiniBooNE 実験の結果が Lorentz violation で説明できるかどうかの解析結果と考察を示します。最後にまとめと今後の展望を示したいと思います(8節)。

2 自発的ローレンツ対称性の破れ

僕は実験家なので Lorentz violation が理論的にどのように現れるのかあまり気にしませんが、自発的対称性の破れに基づくと Lorentz violation は非常に自然な現象のように感じられます。標準理論ではラグランジアンに質量項は自発的対称性の破れ(Spontaneous Symmetry Breaking, または SSB)によって説明されます(図1)[1]。高エネルギー物理学におけるこの現象を予言した南部陽一郎教授が2008年にノーベル物理学賞を受賞したので[2]、記憶に新しいかもしれません。今年(2012年)は念願のヒッグス粒子も見え

れ、まさしく理論の正しさが証明されたところです。さて、標準理論ではスカラー場はもともと完全な対称性を保っていたと考えられています(図1a)。しかしこの場が、宇宙が冷える過程でいわゆる「メキシカン・ハットポテンシャル」に移行したと仮定すると(なぜ移行したかは現代物理学の謎の一つです)、真空における場の値がゼロでない方がゼロであるときより安定します(図1b)。つまり図で示す通り全ての空間がスカラー場 ϕ で満たされた状態が真空と再定義されます。これを真空期待値と呼び標準理論におけるスカラー場の真空期待値は 246 GeV です。僕たちが真空と思っている空間はスカラー場で満たされた状態というわけです。

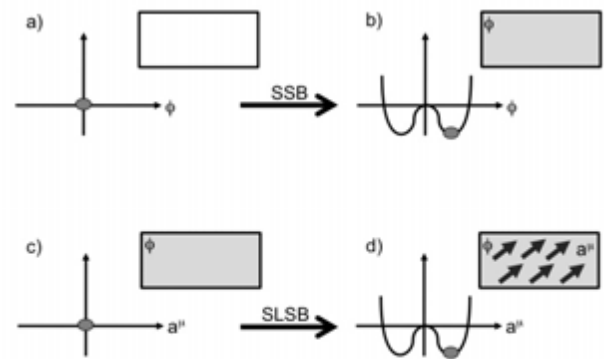


図1 自発的対称性の破れ

このアイデアを拡張したのが自発的ローレンツ対称性の破れ(Spontaneous Lorentz Symmetry Breaking, または SLSB)です[3]。超ひも理論や量子重力理論のような超高エネルギー理論はたくさんのベクトル場から成り立っており(図1c)、そのただ一つでも真空期待値を持てば真空はスカラー場ならぬベクトル場で空間が満たされるというわけです(図1d)。ちなみに実際の理論では自発的ローレンツ対称性の破れは標準理論の自発的対称性の破れより先に起こったと予想されるのでこの図は正確ではありません。またベクトル場はより一般的にはテンソル場の一種なのでベクトル場に限定する必要もありませんが、この記事では一般的に真空ベクトル場と表記します。とにかく、もしそのようなベクトル場 a^μ が真空期待値をもつとすると宇宙はベクトル場で満たされ、標準理論の粒子、電子とかニュート

リノとか, はそういった場と相互作用すると考えられます。ここで重要なのはそういった相互作用が方向に依存するという点です。地球は自転しているので, この方向依存性は相互作用の自転依存性で表されます。図 2 にこの状況を示しました[4]。仮に朝の 6 時に研究室にいき, 例えば原子の超微細構造を測ったとします¹。そして午後の 6 時に同じ観測をしたとき地球の自転により真空ベクトル場は方向を変えているので観測量に違いが現れるかもしれないというわけです。

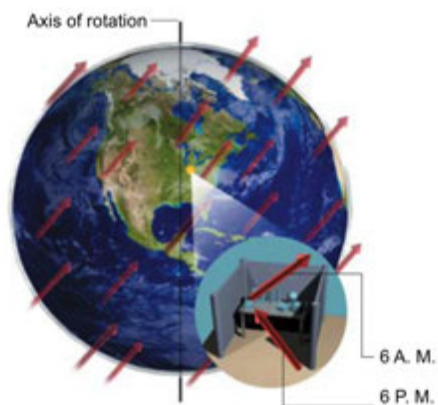


図 2 Lorentz violation と地球の自転

もし何らかの物理的観測量が 24 時間周期で変動している場合, その理由としては温度差などの環境によるエラーの可能性が考えられます。しかし本当の地球の自転依存性は恒星時間周期で表されます。これは遠方の星に対する地球の本当の自転周期で 1 日 (24 時間) よりちょっと短く 23 時間 56 分 4.1 秒です。地球の一年は 365 日ですがこの間に地球は 366 回転していることを考えると地球の回転周期は 24 時間よりちょっと短いことが納得できると思います。もし観測量が 23 時間 56 分 4.1 秒周期で変わるとすると, 地球上の環境によるエラーとは考えづらく, 非常に興味深い結果となります。つまり宇宙の指向性, Lorentz violation の決定的な証拠は地球上での物理的観測量の恒星時間依存性ということになります。

3 Lorentz violation とは何か?

この節では Lorentz violation の構造を, 式を交えず説明したいと思います。よく「Lorentz violation の研究」をしていると人に言うと「おまえアインシュタインは間違っていたって言いたいんだろ!」とか言われて(その通りです), トンデモ屋の部類に入れられそうですが(それはいやです), 科学的であるためには理論の矛盾は許されません。重要なのは, 粒子が宇宙に対して動いているとき (Particle Lorentz Transformation, もしくは粒子的ローレンツ変換) と観測者が宇宙に対して動いているとき (Observer Lorentz

Transformation, もしくは観測者のローレンツ変換) に差がでることです。この二つのローレンツ変換は真空ベクトル場が存在しない時は同じものです。図 3a に状況を示しました[1]。ある粒子が観測者 (アインシュタイン) に対して上方向に進んでいます。また宇宙は上方向を向いた真空ベクトル場で満たされていると仮定します。

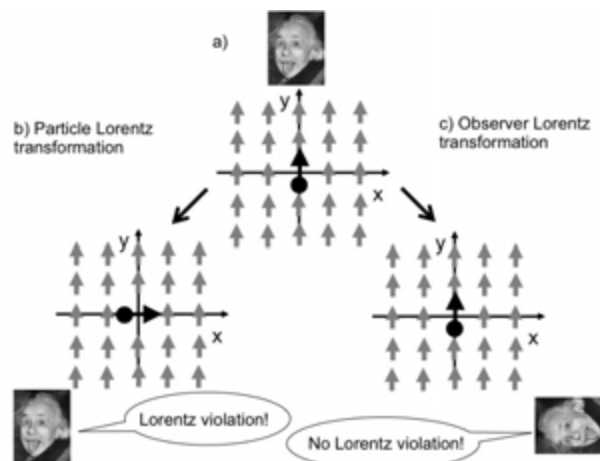


図 3 Lorentz violation を含んだローレンツ変換の構造

3.1 粒子的ローレンツ変換

もし粒子が右方向に進行方向を変えたとすると粒子の運動量ベクトルと宇宙の真空ベクトル場の関係が変わるので Lorentz violation が期待できません (図 3b)。このような状況は粒子的ローレンツ変換で表され, つまり, Lorentz violation とは正確には Particle Lorentz violation, つまり粒子的ローレンツ変換の破れということになります。

3.2 観測者のローレンツ変換

上方向に動く粒子を右方向に観測者のローレンツ変換で変えることも出来ます。つまり図 3c のようにもしアインシュタイン (観測者) が首を 90 度ひねったら粒子は観測者に対して右方向に進行するというわけです。図で示す通りこのとき粒子の運動量ベクトルと真空ベクトル場の関係は変わらないので Lorentz violation は起こりません。というのも観測者のローレンツ変換は単に座標変換に相当するからです。くだらないと思う人もいるかもしれませんがこれは重要な結果で, つまり, 粒子が右に行ったり左に行ったりするのが違って見える状況でも (Particle Lorentz violation) 座標変換はまもられるので, 一般的に Lorentz violation で予想される現象は座標系や観測者に依存しません。

3.3 CPT 対称性

CPT 対称性はローレンツ対称性と緊密な関係にあります。この記事で CPT 対称性にはあまり触れませんが, 一般的には CPT 対称性の破れ (CPT violation) があるとファインマン・プロパゲーターがローレンツ不変的でない, つまりインタラクティブな場の理論での CPT violation は Lorentz violation を引き起こすと考えられています[5]。次節で述べ

¹ 科学者は朝に弱いので午前 6 時というのはおそらく科学者の生活を知らない記者によって作られた設定です。

る SME はこの理論にかなっており CPT violation は Lorentz violation の十分条件です。ただし CPT violation は粒子の真空ベクトル場との相互作用の違いとして現れ、粒子と反粒子に違った質量をあたえることはできず、違った有効質量を与えるにとどまります。よく粒子と反粒子の質量の違いを「CPT 対称性の破れ」と言いますが、場の理論的には有効質量の差を与える以上のことは不可能であり、両者の質量が本質的に違うならそれは反粒子だと思っていたものが実は全く別の粒子で他に反粒子が存在するという事です。このグリーンバーグ教授 (O. W. Greenberg) の CPT 対称性に対する普遍的な理論に挑戦する理論が毎月のようにアーカイブに現れますが今のところ軍配はグリーンバーグ教授にあるように見られます。

4 Standard-Model Extension (SME)

Lorentz violation を体系的に研究する枠組みとして Standard-Model Extension (SME) がインディアナ大学のアラン・コステレツキー教授 (V. Alan Kostelecky) とその共同研究者によって 1997 年に提唱されました[6]。コステレツキー教授 (図 4) は非常にエネルギーのある人で、僕は大学院生時代に魅了され結果的にこの研究を始めることになりました(ただし、彼は僕の指導教官ではありません)。また僕の電磁気と重力の先生でもあり、この重力の授業を取ったせいで卒業も一年遅れました²。



図 4 コステレツキー教授とその学生たち
(Courtesy of Indiana University)

4.1 SME を使った解析

Lorentz violation は超高エネルギー理論に関連していると考えられるので目安はプランク質量の 10^{19} GeV です。そんな超高エネルギーを達成できる加速器は 100 年待っても出来ないでしょう。その一方で、GeV を自然な単位として捉えると Lorentz violation は我々のエネルギー領域では 10^{-19} GeV、もしくはそれ以下に抑制されていると解釈することもできます。こちらは届きそうなので研究のほとんど

² アメリカの大学院生は楽な生活で全員給料をもらっているの、なんだかんだいって卒業を遅らす指導教官泣かせもたまにいます。アメリカの典型的な大学院生の生活は PhD Comic を参照[7]。

は小さな Lorentz violation を探すことを目的としており SME はそのためのツールです。SME は場の理論に摂動項として真空ベクトル場との相互作用を足したものです。コステレツキー教授のグループの最初のゴールはすでに存在するデータの SME の枠組みでの解析です。通常、実験では 24 時間周期の変化をみて環境によるエラー (温度変化、その他) を見積もることがあります。しかし恒星時間周期の変化をデータでチェックすることはまずありません。つまり既存のデータに Lorentz violation が存在しているかもしれないのです。そういったわけで 1998 年から 3 年ごとに会議を開き SME を使った解析結果の発表の場を持つことになりました。ここではその会議で発表された興味深い研究をいくつか紹介したいと思います。

4.2 Lorentz violation 探索実験の例

4.2.1 希ガスレーザー

そもそも Lorentz violation は観測されていないので非常に小さいと予想されています。全科学分野でもっとも精度のよいのは原子物理です。真空ベクトル場は宇宙を満たす磁場のようにふるまうので原子時計の周期に影響を及ぼすことが期待されます。希ガスレーザーはまさにそのような観測に最適で、地上で可能な実験のうち Lorentz violation に対して最高の感度を持っており、最近の実験では 10^{-33} GeV の精度まで調べることに成功しました [8]。

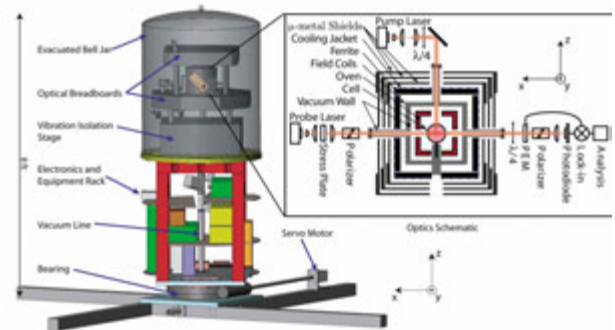


図 5 プリンストン大学グループの対希ガス磁気センサー
(Courtesy of Michael Romalis)

図 5 はその装置です。基本はカリウム主体のオプティカル・ポンプでスピン交換衝突によってヘリウムガスを偏極し、二種類のガスの観測で多くのエラーをキャンセルできる仕組みになっています。三重のミュン・メタルシールドにヘルムホルツ・コイルは当然として、空気の対流によるエラーを押さえるために装置の全てが真空ジャーの中に収まっています。しかも装置全体が回転テーブルによって回り、方向依存性のあるエラーをキャンセルするそうです。

4.2.2 g-2 実験

測定精度が最もよいのは原子物理ですが、原子、原子核、そして核子は素粒子の複雑な集合体なので素粒子によるテ

ストの方が結果を期待できると考える人もいます。同じ精密実験でも g-2 実験 (図 6) は素粒子のミューオンの歳差運動を測るので興味が持たれます。日本の J-PARC やフェルミラボで計画中の次世代 g-2 実験では既存のリミットを数倍改良することが期待できます[9]。また反ミューオンを使ったテストも可能なことが魅力です³。

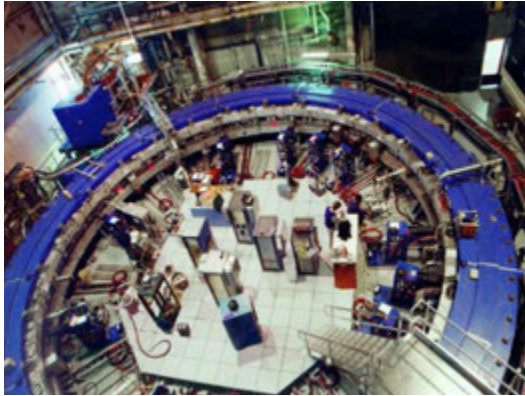


図 6 ブрукヘブン国立研究所の g-2 実験用のリング。これを軍用ヘリまで駆使してフェルミラボに持ってくるらしい。2015年データ取得開始予定。

4.2.3 メソン振動実験

真空ベクトル場と素粒子の相互作用は素粒子ごとに違っていると予想されます。つまり Lorentz violation のテストは各素粒子ごと、全世代のクォーク・レプトンで行われるべきでメソン振動は第 2・3 世代のクォークを使った貴重なテストです。Super-KEKB ではボトムクォークと真空ベクトル場の相互作用を探ることが可能で BaBar 実験のリミットを改善することが期待できます[10]。メソン振動実験は原理的には後述のニュートリノ振動実験と同じく振動実験の干渉計としての性質を使った Lorentz violation のテストです。

4.2.4 高エネルギー加速器内の粒子

真空ベクトル場は粒子の真空での速度に影響を及ぼすので、粒子の真空でのチェレンコフ放射、光子の真空での崩壊、粒子の超光速運動などが予想されます。原子物理学者がフェルミラボ (図 7) のテバトロン⁴の D0 実験の論文から読み取った値をもとにした真空チェレンコフ放射と光子崩壊の解析がフィジカル・レビュー・レターズに出版されたりもしました[11]。ペーパーなんて面白いアイデアがあればいくらでも出るというわけです。

OPERA 実験による超光速ニュートリノ観測の報告[12]には僕も大いに興味をもちましたが、速度の測定、いわゆる TOF (Time Of Flight) は後述のニュートリノ振動ほど Lorentz violation に感度はないと考えられています。

³ 現在(2012年)反ミューオンを使った g-2 実験は J-PARC とフェルミラボでは計画されておられません。



図 7 フェルミ国立加速器研究所。手前がメイン・インジェクターで奥に見えるリングがテバトロン。著者も学生時代を含め 7 年間滞在している。鹿、コヨーテなどの野生動物も豊かな上にバッファロー牧場まである。シカゴから車でおよそ 1 時間。

4.2.5 光共振器

図 8 はガチンコのマイケルソン・モーレー実験です。ベルリン大学グループはクォーツ製の光共振器を使い (左)、マイケルソン・モーレーのおよそ 1 億倍の精度で光速の方向依存性を測りました[13]。またベルリンでの実験と同時に、ウェスタン・オーストラリア大学グループは超低温サファイアクリスタルを使った同様の実験 (右、クリスタルの一つが超伝導ニオブ製のケースの中に見られる) をオーストラリアのパスで行い、今まで通常の実験でテストできなかった方向依存性を測ることに成功しました[14] (結果的に Lorentz violation は見つかりませんでした)。

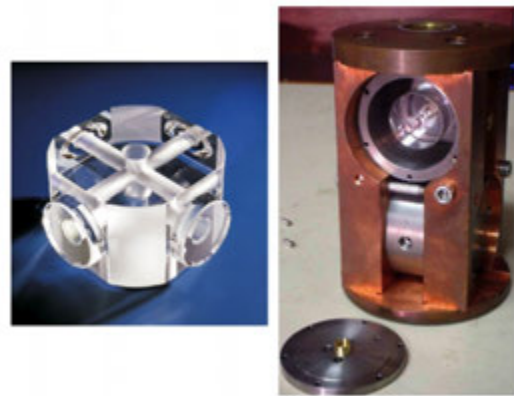


図 8 光共振器を用いたマイケルソン・モーレー実験

4.2.6 粒子と反粒子の比較実験

4 節で述べた通り CPT violation のテストそのものが Lorentz violation のテストとして意味を持ちます。この分野の雄はやはりセルンの Antiproton Decelerator を使った反陽子実験でしょう。バチカン市を爆破するにはほど遠いですが⁴、ALPHA 実験では去年 (2011 年)、反水素原子の長時間トラップに成功し、かつ、最近では初めて基底状態の反水素原子を使った遷移実験にも成功しました[15]。反水素

⁴ 本も映画も僕はまだ見ていませんが、ダン・ブラウン著、「天使と悪魔」ではセルンから盗まれたボトル (?) に入った反物質を使ってバチカン市の爆破を企てる悪者が登場するそうです。

原子の超微細構造の CPT 対称性に対する感度は現在最高の K メソンのそれ ($\sim 10^{-18}$) の 1 億倍以上です。

4.2.7 天体物理

いつの世も最高の粒子は宇宙からです。ガンマ線バーストや宇宙背景放射の光は最も長い距離を伝播するのでいくつかのタイプの Lorentz violation に対して最高の感度を示します[16]。

4.2.8 重力

真空ベクトル場は超高エネルギー理論から予想されるので重力とは特別な関係にあると期待されます。重力に関わる精密実験、等価原理の検証など、は Lorentz violation の影響を受けると予想されますが既存の実験からは特に異常は認められません。最近の解析ではノーベル賞受賞者かつアメリカのエネルギー省長官、スティーブン・チュー博士の論文なんていうのもあります[17]。

4.2.9 理論家の存在

この記事でその活躍に触れることはありませんがこの業界の半分を占める理論家の活躍を忘れてはいけません。SME の理論的正しさの検証はもちろん (因果律, 繰り込み可能性など), SME を使った各種物理の予言も理論家によるものです。7 節で紹介する短基線ニュートリノ振動実験の恒星時間依存性の式 (1) も LSND のデータ解析用にコステレットキー教授とその共同研究者に計算してもらったものです。

4.3 Lorentz violation 探索実験のまとめ

Lorentz violation は見つかっておらずどの程度のサイズなのかすら分かりません (そもそもあるかないのかだって分かりません)。今のところそれらしき兆候を示すデータもないので手探りで研究しているのが現状です。ですから今後も幅広い分野で研究を続けていくべきです。現在の高エネルギー物理は面白い研究トピックの減少に悩んでいるので, Lorentz violation をはじめ他分野から導入されたトピックの研究は今後盛んになるのではないのでしょうか。これまで解析された全分野の結果はテーブルにして 40 ページ以上に及びます[18]。個人的には, ニュートリノには未知の部分が多くとても将来的に研究価値があると思えるのでここから先はニュートリノに話をしぼっていきたいと思います。

5 ニュートリノ振動実験

日本のお家芸でもあるニュートリノ実験は Lorentz violation の研究に役立つと期待されています。その最大の理由はニュートリノ振動実験そのものが干渉計のような役割をはたし, 時空や真空の微細な構造に感度があるからです。これはまさにマイケルソン・モーレー干渉計が光速の微小な方向依存性に感度があるのと同じ理由です。図 9 にこの状況を示しました[1]。

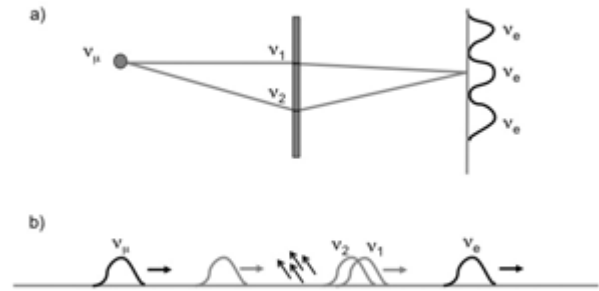


図9 ニュートリノ振動実験の干渉計としての性質

図9aはニュートリノ振動を二重スリット実験として解釈したものです。ミューオンニュートリノ, ν_μ , が光源に相当します。二つのスリットはニュートリノのハミルトニアン固有状態, ν_1 と ν_2 , に相当し, それらからなる干渉模様が電子ニュートリノ, ν_e , に相当します。通常なら ν_1 と ν_2 は質量固有状態と呼ばれるところですがここではより一般的にハミルトニアン固有状態とします。光学であれば二つのスリット, ν_1 と ν_2 , の光路差が位相の差を生み干渉模様を作ります。これをニュートリノ振動として解釈すると図9bのようになります。ニュートリノは生成と検出は弱い相互作用によるのでフレーバー固有状態です。ここではミューオンニュートリノを生成したとします。しかしフレーバー固有状態はハミルトニアン固有状態と同時固有状態ではないので波束の時間変化, つまり伝達はハミルトニアン固有状態の重ね合わせで表現されます。これは ν_μ という波束が ν_1 と ν_2 という波束の重ね合わせとして伝わるということです。ここで何らかの相互作用, 例えば真空ベクトル場との相互作用, が ν_1 と ν_2 に影響を及ぼすと群速度に差が現れ, その差が波動関数の位相の差となり結果的に検出時に違うフレーバー, 例えば電子ニュートリノ, が検出されるというわけです⁵。ここで地球の自転を考慮すると真空ベクトル場の向きが地球の自転によって向きを変えるので, 検出される電子ニュートリノの数が恒星時間の関数となります。これがニュートリノ振動による Lorentz violation の決定的な証拠となります。ニュートリノ振動実験は Lorentz violation に対して十分感度があると考えられます。例えば大気ニュートリノ振動の場合, 位相の差はおおよそ質量の二乗の差をエネルギーで割ったものです ($\Delta m_{\text{atm}}^2 / E$)。これは 1 GeV のニュートリノの場合, だいたい 10^{-21} GeV に相当し, この業界の目安の値 10^{-19} GeV より小さいのでニュートリノ振動実験は「興味深い Lorentz violation の実験」ということとなります。

以下の節では実際のニュートリノ振動のデータを使って Lorentz violation を探す解析を説明したいと思います。

⁵ 厳密には波束の群速度の差を使ってニュートリノ振動を表すことはできません[19]。

6 MiniBooNE 実験

MiniBooNE (Mini Booster Neutrino Experiment)はフェルミラボで 2002 年から 2012 年まで行われた短基線ニュートリノ振動実験です。ゴールはニュートリノ標準理論で予想されていないミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動（もしくは反ミューオンニュートリノから反電子ニュートリノへの振動）を測ることで、シグナルは検出器内の電子（または陽電子）の出現です。

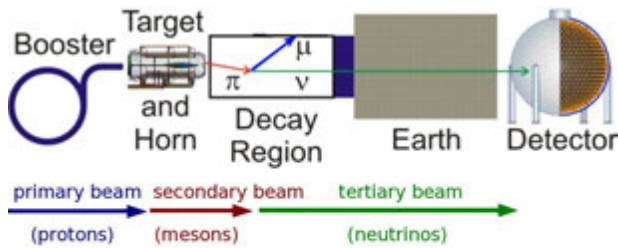


図 10 ブースター・ニュートリノ・ビームラインの概要

6.1 ブースター・ニュートリノ・ビームライン

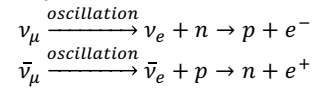
ビームラインの概要を図 10 に示します[20]。まず一次ビーム (primary beam) である 8.9 GeV の陽子がブースター (Booster) から取り出されます。1 パルスあたり約 4×10^{12} の陽子、通常 5 Hz で走っていたのでだいたい 30 kW ということとなり 2012 年 7 月現在の J-PARC のニュートリノビームラインの出力の約 6 分の 1 くらいです。これらの陽子はターゲットであるベリリウムの棒が入った電磁ホーン (magnetic focusing horn) に打ち込まれます。陽子とターゲットの衝突によってできた二次ビーム (secondary beam) のメソンは電磁ホーンの磁場で収束されます。このときニュートリノモードのときは π^+ メソンが、反ニュートリノモードのときは磁場を反転して π^- メソンが収束されます。 π^+ メソンの崩壊によってミューオンニュートリノが、 π^- メソンの崩壊によって反ミューオンニュートリノが三次ビーム (tertiary beam) として選択的に生成できる仕組みになっています。このニュートリノを約 500m 先にある検出器で見るわけです。ブースター・ニュートリノ・ビームラインの詳細はこちらを参照して下さい[21]。

6.2 MiniBooNE 検出器

MiniBooNE では球状のチェレンコフ検出器を用います。12.2m のタンクの中はミネラルオイル (アルキル基) で満たされニュートリノとの反応でできる荷電粒子のチェレンコフリングが 1280 個の 8 インチ光電子増倍管によって観測されます。水の代わりにオイルで満たされた丸い小さなスーパーカミオカンデと思って下さい。チェレンコフ光の光量とリングイメージから粒子識別と運動量を見積もります。検出器の詳細はこちらを参照して下さい[22]。

6.3 MiniBooNE ニュートリノ振動実験解析

さて、MiniBooNE でのニュートリノ振動の証拠は以下の反応でタンク内で生成される電子、または陽電子の数ということになります。



見積もった (陽) 電子の運動量から上記の反応を仮定してニュートリノのエネルギーを再構成することが可能です。ニュートリノ振動はニュートリノのエネルギーの関数なのでこれは実験上不可欠です。検出器に磁場はないので電子と陽電子を区別することはできません。またビームそのものに電子ニュートリノがバックグラウンドとして含まれているのでそれにも注意が必要です。最後に、電子、または陽電子によってできるチェレンコフ放射はガンマ線からなる放射と極似しており、あらゆる高エネルギーガンマ線 (ここでは 200 MeV 以上) の生成プロセスには注意が必要ですがそういった実験の詳細はここでは省きます。実験の詳細は以下の文献を参照して下さい[22]。素晴らしいデータ選択、そしてバックグラウンドと系統エラーの研究がなされたものと仮定して話を進めます。

6.4 MiniBooNE ニュートリノ振動実験結果

図 11 に MiniBooNE で観測された電子ニュートリノ、または反電子ニュートリノ候補事象を再構成されたニュートリノのエネルギー分布として示します[23]。上が反ニュートリノモード、下がニュートリノモードです。データとバックグラウンドの予想値がニュートリノのエネルギーの関数として表され、データには統計エラーが、バックグラウンドには系統エラーがついています。バックグラウンドはビームに混ざっている電子、もしくは反電子ニュートリノとガンマ線の misID が半分半分ですが、ビームからのバックグラウンドのエネルギー分布が平らなことに對して π^0 メソンからのガンマ線の misID は量が低エネルギー領域で増えていることに注意が必要です。

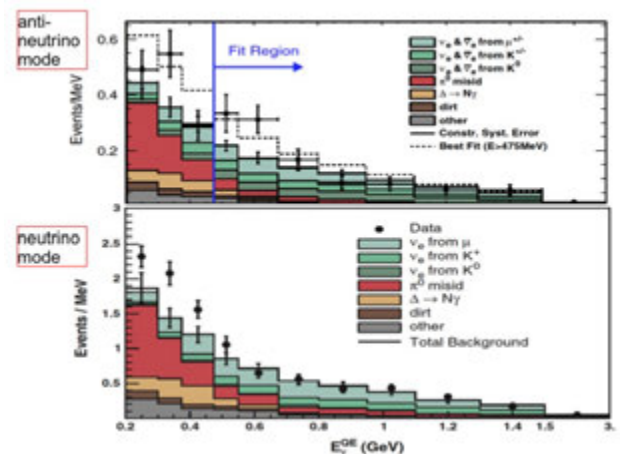


図 11 MiniBooNE ニュートリノ振動実験結果

ニュートリノモード（下）ではデータの超過が低エネルギー領域でのみ見られます。これは通常のニュートリノの質量を含んだ標準理論、ニュートリノ標準理論で予想されるニュートリノ振動では説明できず、もしこれがバックグラウンドの予想間違いとかでないのなら新物理の可能性にあります。反ニュートリノモードではデータの超過が全エネルギー領域で見られます。統計がニュートリノモードよりずっと小さいことに注意して下さい⁶。やはりこのようなデータ超過はニュートリノ標準理論では予想されないので新物理の可能性にあります。また4節で述べた通り Lorentz violation を含む理論は CPT violation を自然に含むのでニュートリノモードと反ニュートリノモードの振動で差があることにも興味もたれます。

7 Lorentz violation の解析

さて、Lorentz violation は3節で述べた通り座標系に依存しません。実験結果を比べたりするのに共通の座標系が必要です。そのための共通座標として太陽中心座標系を導入します。次に4節で述べた SME を使い、ニュートリノのラグランジアンを書き下します。次にそのラグランジアンを用いてニュートリノ振動を恒星時間の関数として記述する式を導きます。最後に MiniBooNE のデータの超過の恒星時間依存性を調べ、導かれた式を用いて Lorentz violation の可能性を議論したいと思います。

7.1 太陽中心座標系

この業界では太陽中心座標系 (Sun-centered coordinate system) を使うことにしています。図12にそれを示しました。地球の公転面を 23.4° 傾けることにより Z 軸は地球の自転軸と平行で、X 軸は秋分点の方向、そして Y 軸は右手座標系を完成するように選びます。

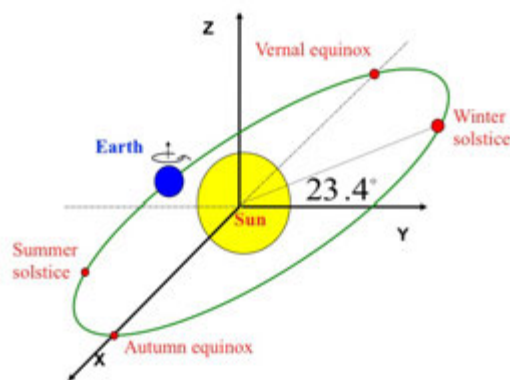


図12 太陽中心座標系

よくある質問として、どうして銀河中心座標系を使わないのか、というのがあります。確かに銀河も回転していま

⁶ MiniBooNE ではつい最近 (2012年7月)、実験の最終結果としてこの記事で述べた解析の2倍の反ニュートリノモードの結果を示しました[24]。

すが太陽系からみるとそれは一方方向に動いているだけで、速度や回転方向の変化を見る Lorentz violation の実験にはむいていません。また太陽中心座標系は真空ベクトル場を太陽系内では均一と仮定していますがそれでいいのか、という質問もあります。この仮定は案外正しく、例えば、もし真空ベクトル場が2節で述べた自発的ローレンツ対称性の破れでできたと仮定すると、それは標準理論の自発的対称性の破れより前に起こることになります。我々は遠方の星の燃焼メカニズムから弱い相互作用がそこでも正しい、つまり真空スカラー場がここと同じ、ということを知っているので真空ベクトル場も最低限そのくらいのサイズで宇宙で均一と予想されます。この真空ベクトル場の均一性が SME においてエネルギー・運動量の保存を約束します。

7.2 ニュートリノセクターの SME

SME については4節で導入しました。ニュートリノの SME は理論的に一次の項だけでも (繰り込み可能項) 100 以上のパラメータがあり[25]、このままでは何がなんだか分からない状況なので、ここではミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの短基線振動実験に限るとします。するとニュートリノ振動確率が恒星時間 T_\odot で表され (ω_\odot は恒星時間角速度で $2\pi/23$ 時間 56 分 4.1 秒, L はニュートリノの基線の長さで 521m です), 5 つの振幅 (C, A_s, A_c, B_s, B_c) が 14 の SME のパラメータで構成されます[26]。

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \left(\frac{L}{hc}\right)^2 \left[C + A_s \sin(\omega_\odot T_\odot) + A_c \cos(\omega_\odot T_\odot) + B_s \sin(2\omega_\odot T_\odot) + B_c \cos(2\omega_\odot T_\odot) \right]^2 \quad (1)$$

振幅の一つ (C -パラメータ) は恒星時間に依存しないことに注意して下さい。短基線ニュートリノ振動実験の Lorentz violation の解析とはニュートリノ振動実験の恒星時間依存性のデータからこの式をフィットし5つの振幅を探すことです。ここで C -パラメータは恒星時間に依存しないので、フィットの結果、残りの4つのパラメータが C -パラメータよりどれだけ有意かが鍵となります。

7.3 解析結果

この節では unbinned likelihood fit で得られた解析結果を説明します。式(1)を確率密度関数として、5つのパラメータを求めました。パラメータ同士の相関が強く5つのパラメータを同時にフィットするとあまりにエラーが大きいため B_s と B_c をゼロと仮定した結果も示します。これを5パラメータを使った5パラメータフィット (5 parameter fit) に対して3パラメータフィット (3 parameter fit) と呼ぶことにします。フィットはビンを作らない方法ですがこの節では任意のヒストグラムとしてデータを示しました。

7.3.1 ニュートリノモード

図13にニュートリノモードの解析結果を示します[27]。データの恒星時間分布は全エラーと共に示されています。

バックグラウンドは恒星時間によらないと仮定しているの
で平らですが(破線)これはそれほど自明ではありません。
というのもデータの取得が1年を通じて均一でない24時
間周期のエラーが恒星時間の関数(23時間56分4.1秒周期)
として現れる可能性があるからです。この解析ではビーム
の24時間周期のゆらぎが最大3%のゆらぎとしてバックグ
ラウンドに現れると見積もりましたが、データのエラーに
比べて小さいのでバックグラウンドは平らと仮定して解析
を進めます。

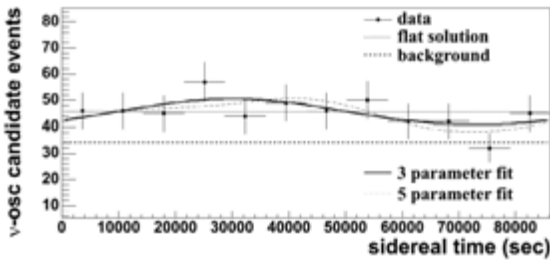


図13 ニュートリノモードの解析結果

さて、3パラメータフィットで実線が、5パラメータフィッ
トでは点破線が得られました。この2つのフィットはここ
では示していないパラメータのエラーに差があるものの、
得られるカーブは似ています。最後に点線はニュートリノ
振動が恒星時間によらないと仮定したものです。データに
あまり起伏がなくフィットで得られるカーブにもあまり起
伏がみられません。これはフィットがC-パラメータのみが
有意に大きいことを示し、つまり恒星時間依存性は非常
に弱いということです。詳しい解析の結果、この程度のデー
タの起伏は26.9%の確率でランダムに現れることが分か
り、ニュートリノモードのデータの超過は恒星時間依存性
がないと考えて問題ないという結論になりました[27]。

7.3.2 反ニュートリノモード

図14に反ニュートリノモードの解析結果を示します[27]。

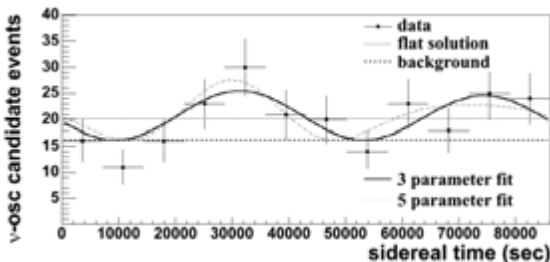


図14 反ニュートリノモードの解析結果

今度はデータにエラーは大きいですが起伏のようなもの
があります。フィットの結果もデータに恒星時間依存性を
認めるものです(実線と点破線)。詳しい解析の結果この起
伏は3%の確率でしかランダムに現れないことが分かり
ました[27]。これは低い確率ですが高エネルギー物理の常識か
らいうとたいして低いわけでもなく2σ弱といったところで
恒星時間依存性の発見というわけではありません。

7.4 解析結果のまとめ

というわけでニュートリノモード、反ニュートリノモー
ド、どちらのデータの超過からも有意な恒星時間依存性は
見つかりませんでした。この結果、各SMEパラメータにリ
ミットを求めることができました。それはだいたい 10^{-20} GeV
です[1]。この解析の前にロス・アラモス国立研究所のLSND
ニュートリノ振動実験で観測されたデータを用いて似た解
析を行いました[28]。統計的な有意さは低いものの、もし
LSNDで観測されたデータの超過をLorentz violationと仮
定すると、 10^{-19} GeVくらい必要だということが分かりまし
た[29]。つまり今回の解析結果はLSNDのデータ超過を
Lorentz violationで説明することを否定するもので、
MiniBooNEとLSNDのデータをLorentz violationを用い
て同時に説明することは難しいということが分かりました。

8 今後の展望

この記事では主にMiniBooNEのデータを用いてミューオ
ンニュートリノと電子ニュートリノに関するLorentz vio
lationの研究を示しました。結果はネガティブでこのチャ
ンネルに対するリミットが得られました。似たような研究
がフェルミラボのMINOSニュートリノ振動実験と南極の
IceCube観測所で、ミューオンニュートリノとタウニュー
トリノに関するニュートリノ振動で行われ、やはりネガティ
ブな結果が得られています[30]。まだテストされていない
のはタウニュートリノと電子ニュートリノに関する振動です。
これは出現振動実験(appearance oscillation experiment)
では難しく、消失振動実験(disappearance oscillation ex
periment)によるアプローチが妥当と思われます。最近の
フランスの原子炉反電子ニュートリノ消失振動実験の
Double Choozの解析によると、このチャンネルも恒星時間
依存性はなさそうです[31]。図15にpreliminaryな結果を示
しました。この解析は原子炉の出力の時間変化の詳細を考
慮した、MiniBooNEやLSNDのそれと比べるとかなり高度
な解析です。しかしデータに恒星時間依存性は見られず、
フィットの結果(実線)もフィット前(破線)と比べて大
して起伏があるわけではなく、7節のMiniBooNEのニュート
リノモードと同じく、C-パラメータのみが有意ということ
で、通常のニュートリノ振動と考えられます。これで、地
球上で可能なニュートリノ振動実験でLorentz violationが
観測できる可能性はかなり低くなってしまいました。

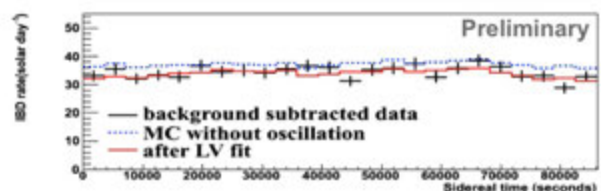


図15 2012年7月のICHEP2012で発表されたDouble Choozによる恒星時間依存性のpreliminaryな解析結果

…とは言ってもまだ可能性がないわけではありません。例えば式(1)の C -パラメーターのみが有意に大きい場合(例, MiniBooNEのニュートリノモードやDouble Chooz), ニュートリノ振動のデータは恒星時間依存性を示しませんがエネルギー依存性から Lorentz violation を探ることが可能で, 現に今我々が見ているいくつかのニュートリノ振動に関するアノマリーが Lorentz violation である可能性も完全には否定できません[32]。OPERA 実験のニュートリノの TOF も, さらにもうちょっとケーブルを差し込んだらやっぱりニュートリノの方が光より速かった! なんてことも。そして Lorentz violation に最も敏感であると考えられている超高エネルギー天体ニュートリノに関するテストはまだ全く行われていません。

4 節で述べた通り我々は Lorentz violation に関する会議を3年ごとに開いています。今回は2013年6月中旬の予定です。興味のある人はぜひインディアナブルーミントンまでお越し下さい⁷。



図16 2010年に行われた「5th meeting of CPT and Lorentz Symmetry」の集合写真。右端の腕を組んでいるのが著者。(Courtesy of Indiana University)

最後になりましたがこの記事を書く機会を与えてくれた高エネルギーニュース編集委員の皆様と, 記事の校正を手伝ってくれたシカゴ大学の奥村博士に感謝を表したいと思います⁸。

参考文献

- [1] Katori, arXiv:1206.6915.
 [2] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/nambu-lecture.html
 [3] Kostelecky and Samuel, Phys. Rev. D**39** (1989) 683.
 [4] Kostelecky, Scientific American, **93-101** (Sept. 2004).

⁷ ちなみに僕はこの記事で示した LSND と MiniBooNE と Double Chooz の解析や現象論の研究で IUPAP C11 Young Scientist Prize というのを今年 (2012 年) いただきました。人と違うことをやるのは重要なことだそうです。

⁸ この記事は僕が初めて日本語で書いた記事です。多くの専門語の訳は僕が勝手につけたものなので詳細は参考文献を参照して下さい。

- [5] Greenberg, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 231602.
 [6] Colladay and Kostelecky, Phys. Rev. D**55** (1997) 6760; D**58** (1998) 116002; Kostelecky, Phys. Rev. D**69** (2004) 105009.
 [7] <http://www.phdcomics.com/comics.php>
 [8] Brown *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 151604.
 [9] Bennett *et al.*, [Muon g-2 Collaboration], Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 091602.
 [10] Aubert *et al.* [BaBar Collaboration], Phys. Rev. Lett **100** (2008) 131802.
 [11] Hohensee *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 170402.
 [12] T. Adam *et al.* [OPERA collaboration], arXiv:1109.4897 [hep-ex].
 [13] Herrmann *et al.*, Phys. Rev. D**80** (2009) 105011.
 [14] Mueller *et al.*, Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 050401.
 [15] Amole *et al.* [ALPHA collaboration], Nature **483N7390** (2012) 439.
 [16] Kostelecky and Mewes, Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 140401; **99** (2007) 011601.
 [17] Hohensee *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 151102.
 [18] Kostelecky and Russell, arXiv:0801.0287 [hep-ph].
 [19] Giunti and Kim, Found. Phys. Lett. **14** (2007) 213.
 [20] Aguilar-Arevalo *et al.* [MiniBooNE collaboration], Phys. Rev. D**81** (2010) 092005.
 [21] Aguilar-Arevalo *et al.* [MiniBooNE collaboration], Phys. Rev. D**79** (2009) 072002.
 [22] Aguilar-Arevalo *et al.* [MiniBooNE collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A**599** (2009) 28.
 [23] Aguilar-Arevalo *et al.* [MiniBooNE collaboration], Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 101802; **105** (2010) 181801.
 [24] Aguilar-Arevalo *et al.* [MiniBooNE collaboration], arXiv:1207.4809 [hep-ex].
 [25] Kostelecky and Mewes, Phys. Rev. D**69** (2004) 016005.
 [26] Kostelecky and Mewes, Phys. Rev. D**70** (2004) 076002.
 [27] Aguilar-Arevalo *et al.* [MiniBooNE collaboration], arXiv:1109.3480 [hep-ex].
 [28] Auerbach *et al.* [LSND collaboration], Phys. Rev. D**72** (2005) 076004
 [29] Katori, arXiv:1008.0906 [hep-ex].
 [30] Adamson *et al.* [MINOS collaboration], Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 151601; **105** (2010) 151601; Abbasi *et al.* [IceCube collaboration], Phys. Rev. D**82** (2010) 112003.
 [31] Katori, to be published in ICHEP2012 proceedings.
 [32] Abazajian *et al.*, chapter III of arXiv:1204.5379 [hep-ph].