

論文内容の要旨

論文題目：

Flavored Electric Dipole Moments in Supersymmetric Standard Models
(超対称標準模型におけるフレーバーの破れを起源とした電気双極子能率)

氏名 長井 稔

CP 不変性は最も基本的な対称性の一つであり、素粒子標準模型の成立過程においても重要な役割を与えた。CP の破れは中性 K 中間子の崩壊過程により発見されたが、その発見が契機となって CP の破れを CKM 行列で説明することが考えられ、標準模型の三代目が予言される事となった。これは加速器実験での三代目の粒子の発見より先んじるもので、フレーバーの物理の重要性を示す一つの例となっている。現在のところ、 B ファクトリーにおいて盛んに B 中間子の CP を破る崩壊過程が調べられているが、それは全て CKM 行列による CP の破れの描像を支持するものであり、三代構造を持つ標準模型が確立された。しかし、これは新しい物理を探すという観点からすると、新しい物理の兆候を探るのが非常に難しい状況になっていると言える。

しかしそれでもなお、何らかの CP の破れが高エネルギーにあることが期待されている。というのも、われわれの宇宙のバリオンと反バリオンの非対称性を説明するには、インフレーション後にその非対称性を作る必要があり、そのための条件の一つとして CP の破れが必須となるからである。

従って新しい物理があったときに、その CP の破れを如何に探ることができるかが問題となり、そのときに電気双極子能率 (EDM) が非常に役に立つことになる。粒子の EDM は、電場をかけた際にスピンの相互作用によってどれだけエネルギーが変化するかで定義される物理量であり、空間反転 P、並びに時間反転 T の対称性を破る量である。これは CPT 対称性の成り立つ場の理論では、P および CP を破る項で表される。標準模型においても CP を破る位相が CKM 行列に存在するため有限の EDM が生じうる。しかしその寄与は非常に小さくなることが知られており、現在の観測からの制限を大幅に下回るものとなる。一方で、新しい物理に CP の破れがあった場合では、一般には大きな EDM が予言されてしまう。従って EDM の観測は新しい物理にある CP の破れを探るよい道具となるのである。

理論的な観点からは、新しい物理が TeV スケールに現れると期待されている。標準模型にはヒッグスの質量の軽さを保証する機構はなく、標準模型が高いカットオフスケールまで適用できるとしたら、ヒッグスの質量とカットオフスケールとの階層性が問題となる。従って標準模型は TeV スケール以下を説明する有効理論であり、それにつながる理論が TeV スケールにあると考えられている。そうした新しい物理として最も期待されるものとして、超対称標準模型が挙げられる。超対称標準模型ではボゾンとフェルミオンを入れ替える超対称性により、フェルミオンのカイラル対称性がボゾンにも引き継がれ、ボゾンが二次で発散をする大きな質量補正を受けないことが保証される。また標準模型を最小に拡張した最小超対称標準模型 (MSSM) では、高エネルギースケールで 3 つのゲージ結合定数が一致する。このことは、超対称性模型では階層性の問題が無いため高いカットオフスケールを取れる事と相成り、超対称性大統一模型 (SUSY GUT) の枠組みが非常に好ましい状況となっている。

そこで、こうした超対称性模型、特に MSSM における CP を破る位相がどのような状況にあるのかが問題となる。MSSM においては CP を破る位相はフレーバーを保存する量とフレーバーを破る項の両方に現れる。前者にはゲージノの質量項やヒッグスの二点結合や三点結合が含まれるが、超対称性粒子が 1 TeV 以下の質量を持つとしたら、EDM 実験からの制限を回避するためにはこれらの CP を破る位相は非常に小さくしなければならない事が知られている。このことは、これらの項の位相を抑制する機構が存在する必要がある事を意味し、超対称性模型の模型構築の際に回避しなければならない問題の 1 つとなっている。一方、フレーバーを破る項、つまりスクォークやスレプトンの質量行列の非対角項はフレーバーを破る過程の観測量にかかると同時に、やはり EDM から制限を受ける事となる。

私の論文では、この超対称性模型のフレーバーを破る項を如何にして EDM を用いて探ることができるかを主眼において、フレーバーの破れから生じる EDM の詳細な計算を行った。この目的のため、最初に MSSM に現れる CP を破る位相を基底の変換で不変となるような

不変量を用いて表すことで関係する位相の分類を行った。これにより、関係する位相がどのように EDM に効いてくるのかを見通しよく議論することが可能となった。更に私は 1 ループダイアグラムで効いてくる 1 次の寄与だけでなく、更に高次のループの寄与を系統的に取り入れる事に成功した。

これらの高次の寄与は先行研究においては無視されてきたが、特にダウンクォークの EDM において、実際は 1 次の寄与を容易に上回る事ができる程の大きな寄与となることがわかった。最終的に EDM に効いてくるダイアグラムは、1 次の寄与から存在するグルイーノの寄与に加えて、電荷を持ったヒッグシーノとヒッグス粒子の 3 種であり、これらの寄与の MSSM のパラメータに対する依存性をまとめた。

最後に、具体的なモデルとしてニュートリノを導入した超対称性大統一モデルを具体例として、それぞれの寄与がどのように影響しあうかを議論した。このときに例として取り上げた高エネルギーで超対称性を破るモデルにおいては、グルイーノと電荷を持つヒッグスの寄与は常に加算しあう関係にあるが、電荷を持つヒッグシーノの寄与はその質量項の符号の正負によって、加算される場合と大きなキャンセルが現れる場合とがある事を示した。