

まだ見ぬ新粒子を稀少過程で探るということ

林 青司 (日本物理学会)

良く知られているように、 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ といったレプトン・フレーバーが変化するニュートリノ振動では、仮にニュートリノの質量固有値が全て縮退しているとする(世代間の混合角がゼロでなくても)振動は起きない。それは、その場合、世代間(フレーバー間)の global な対称性(フレーバー対称性と呼ぼう)が生じ世代数が保存されるため、フレーバーが変わるような遷移は禁止されるからである。

クォークのセクターでも、例えば $s \rightarrow dZ$ といった、電荷は変化せずフレーバーが変化する“Flavor Changing Neutral Current (FCNC)”によって引き起こされる K メソンに関する $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$, $K_L \rightarrow \mu\bar{\mu}$, $K^+ \rightarrow \pi^+\nu\bar{\nu}$ といった過程が存在する。しかし、これらの現象の起きる確率は通常の弱い相互作用による過程の場合と比べて非常に小さいので、こうした FCNC に依る過程は“稀少過程 (rare process)”とも呼ばれる。

当初のクォーク模型や電弱統一理論であるワインバーグ・サラム模型においては、u,d,s の三つのクォークのみ存在するものとされていた。この場合、第二世代の s クォークは、第一世代の u, d クォークとは異なり、SU(2) doublet を組む相棒が存在しないため、ラグランジアンの中の弱い相互作用を記述する項が、フレーバー対称性を破ることになる。その帰結として、 $s \rightarrow dZ$ という FCNC 過程が tree (古典) レベルで、弱い相互作用と同程度の確率で生じてしまい実験事実と著しく矛盾するという重大な問題を、理論は抱えることになった。その解決法は意外に単純なもので、s クォークと doublet を組む相棒として、チャームクォーク c を導入する、というものであった (Glashow - Iliopoulos - Maiani, GIM)。これによりゲージ相互作用(共変微分)のセクターはフレーバー対称性を持つことになるので、FCNC 過程は tree レベルでは生じなくなるが、u と c クォークの質量の差により、理論全体としてはフレーバー対称性は破られているため、量子効果により loop レベルでは FCNC が引き起こされることになる。実際には、FCNC に関与するのはクォークの質量差そのものではなく、質量 2 乗の差 Δm^2 であるが、 Δm^2 が弱スケール M_W の 2 乗より十分小さいとすると(2 世代模型では、これは十分正当化できる近似である) FCNC の遷移振幅は近似的に $\Delta m^2/M_W^2$ に比例することになる。逆に言えば、 $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ といった FCNC 過程の実測された遷移確率を用いて、当時まだ見ぬ新粒子であった c クォークの質量を予言することが可能であった。こうして、Gaillard と Lee は c クォークの質量を正しく予言し、やがて c クォークからなるメソンが実験的に発見され(“11 月革命”)、その実測された質量も彼らの予言どおりであることが分かった。

よく知られているように、小林・益川により、K メソンのシステムにおける CP 対称性の破れを説明するためにクォーク・セクターは 3 世代に拡張され、標準模型は最終的な完成に至ったのであるが、ここでもフレーバー対称性の破れと、それに伴って生じる FCNC 過程が本質的に重要である。実際クォーク質量の間に一つでも縮退があると、CP の破れは示す物理量は全て消滅することが示される。GIM, Gaillard-Lee そして小林・益川の仕事は、いずれも素粒子理論(現象論)の鑑と言えるものであろう。量子効果を通じてのみ現れる、まだ見ぬ粒子の存在や性質を理論的に予言し、その予言が正しい事が実証されたのだから。

前置きが長くなってしまったが、私は稲見武夫氏と共に2007年度の第7回素粒子メダルを受賞させて頂いた。その対象となる、1981年に論文として発表された研究は、ワインバーグ・サラムのSU(2)×U(1)電弱統一理論の枠組みで、当時まだ未発見であったtクォーク、あるいは仮に第4世代があるとした場合のクォークやレプトンのような非常に重い(M_W より大きい質量を持つ)フェルミオンの存在を一般的に仮定し、そのFCNC過程における効果をloop計算により具体的に求め、いくつかの表式(関数)の形にまとめたものであった。

当時、私は東京大学(駒場)の博士課程(今で言えば後期課程)の院生で、大統一理論などを勉強していたが、まだ雑誌に投稿できるような研究成果は無かった。そのような時に、助手(今で言う助教)をされていた稲見さんより、重いフェルミオンのFCNC過程への寄与を計算してみないか、との御誘いを幸運にも頂戴した。研究結果はProgress of Theoretical Physicsに掲載され(原稿は、当時本郷で助手をされていた東島清氏に読んで頂いた)、私にとって初めての学術論文となり、また博士論文(の前半)を形成することが出来た。私は、稲見さんから頂戴したテーマに沿って計算しただけなので、共同受賞は申せない気もするが、個人的には、loop計算は、単なる計算と言えなくもないものの、場の理論や模型構築の基礎といった、素粒子現象論を行うのに必要な諸々の素養を養うのに大変有効であり、その後「標準模型を超える物理」を研究して行く上で大きな助けになったように思える。

上述のように、2世代模型の場合のGaillard-Leeによる先駆的な仕事が既にあり、我々も、これを言わばお手本のように思っていたが、我々の研究では M_W を超えるような質量 m_f を持つ重いフェルミオンの寄与を計算したかったので、Gaillard-Leeの計算で用いられた、 $x \equiv (m_f/M_W)^2 \ll 1$ として x の一次の項のみで近似することは行わず、全ての x の領域で正確に成り立つ表式を求めた。当時、tクォーク質量は M_W より小さいであろうとの、多少漠然とした予想(期待)がコミュニティにはあり、KEKのトリスタン実験もtクォークの生成を目指したものであったかと思う。その意味では、Gaillard-Leeの計算を単に3世代に拡張するだけで良しとするのが自然であったかも知れないが、我々はそのような方針をとらなかった。結果的には、今では良く知られているようにtクォークの質量は173 GeVで M_W より大きく、幸運にも我々の計算結果は、Kメソンのみならず、Bメソン系でのFCNC過程の遷移確率、CP対称性の破れ、といった色々な物理量の決定に用いられるようになった次第である。

我々が $x \ll 1$ とする近似を用いなかった理由は、重いフェルミオンの効果が、低エネルギーでdecoupleするのか、あるいはしないのか(non-decoupling)という理論的な興味を研究の主たる動機としていたからであった。稲見さんは「あまり実験データに引っ張られ過ぎず、自律的な理論家としての興味を大切に研究する事が肝要」といった主旨のことを言っておられたように記憶している。色々と学んだことの内の一つである。

因みに、QEDの様な、ゲージ対称性の自発的破れ(SSB)の無い理論では、Appelquist-Carazzoneによるdecoupling定理が知られており、(質量次元の高い“irrelevant operator”の前のWilson係数への)重いフェルミオンの効果は、その質量の逆べきで抑制される。しかしながら、標準模型の様なSSBのある理論では、全ての質量はHiggs場の真空期待値を起源とするので、より重い粒子はHiggs場とより強く結合する必要がある、従ってloop計算において分子に現れる湯川結合のべきの効果により、 m_f の逆べきが相殺され、正べきさえも現れ得る、つまりnon-decoupling効果が出現する、ということを期待したのである。実際の計算の結果、“箱型ダイアグラム”や $\bar{s}dZ$ というZボソンのFCNC vertexには、 x つまり m_f^2 に比例するnon-decoupling効果が現れることが判明した(QEDカレントの保存のため、光子の $\bar{s}d\gamma$ vertexにおいては、せいぜい対数のnon-decoupling効果しか現れないことも分かった)。私の理解では、他にこうした正べきのnon-decoupling効果が現れるのは、 ρ -parameter (Peskin-TakeuchiのT-parameter)くらいではなからうか。

さて我々の計算は、ゲージ不変な正しい結果を得ていることをチェックする目的で R_ξ ゲージを用いた少々面倒なものであった。異なる Feynman diagram の間で、綺麗に ξ 依存性は相殺して行ったが、最後にどうしても消えない項が残った。フェルミオンと vector-like な結合をする演算子の Wilson 係数に現れるもので、 $\bar{s}d\gamma$ FCNC vertex により生じることが期待される 4-Fermi 演算子と同じ形をしているようであったので、 $\bar{s}d\gamma$ vertex も計算して、その寄与を加えれば、 ξ 依存性は完全に消えることが予想できた。しかし、QED カレントの保存則 (CVC) の故に、この新たな演算子は、我々の興味の対象であった $K_L \rightarrow \mu\bar{\mu}$ 等の過程には寄与しないことも分かっていたので、これ幸いに $\bar{s}d\gamma$ vertex の計算はしないことにしようと思っていたのだが、稲見さんに勧められ、 R_ξ ゲージの提唱者でもある藤川和男氏（当時、東京大学・原子核研究所の助教授をされていたかと思う）の所に相談に伺うことになった。藤川さんは「アメリカでは、一つの事に取り組んだら徹底的に最後までやりつくす態度が尊重される」といった主旨のことを仰って下さった（少し記憶が曖昧で恐縮です）。そこで、完全を期すため、 $\bar{s}d\gamma$ vertex の計算（QED カレントの保存に起因して、テクニカルには $\bar{s}dZ$ vertex の計算より一段と面倒なものなので、正直なところ気は進まなかったが）を最後に行い、めでたく ξ 依存性が綺麗に消滅することを確認した。この $\bar{s}d\gamma$ vertex（いわゆるペンギン・ダイアグラムを含む）の計算結果は、その後、s, d クォークを b, s クォークに変えた $b \rightarrow s\gamma$ 等の B メソンのシステムにおける FCNC 過程の遷移確率を求める際に使われており、計算を勧めて下さった藤川さんに深く感謝している次第である。

私にとっては初めての loop 計算であったが、興味深い理論的動機に励まされ、また上述のような周囲の方々の温かいご助力により、今でも実験的に検証がなされている物理量を求めることに少しでも寄与出来たのは大変幸いなことであると思う。

以上、拙い想い出話で恐縮でしたが、散文におつきあい下さり大変ありがとうございました。