

素粒子メダル受賞の思い出

牟田泰三（広島大学名誉教授、福山大学理事、広島リカレント学院長）

第3回 (2002年度) 素粒子メダル：

QCD 理論における繰り込み処方 (MS bar scheme) の研究

対象論文:

W.A. Bardeen, A.J. Buras, D.W. Duke and T. Muta

Deep Inelastic Scattering beyond the Leading Order in Asymptotically Free Gauge Theories

Phys. Rev. Vol. D18 (1978) No.11 3998-4017

研究内容：

量子色力学の高次効果の世界最初の計算及びその結果のニュートリノ散乱実験による検証、繰り込み処方依存性の発見、MS bar スキームの提唱

本文：

1977年秋のことです。当時、京都大学基礎物理学研究所助教授だった私は、飛行機でシカゴまで行き、レンタカーを借りて Fermilab にたどり着きました。共同研究のため1年間滞在することになったのです。Fermilab 理論部の当時の主任は Chris Quigg 教授でした。彼に挨拶をして、他の所員達 (W.A.Bardeen、A.J.Buras など) とともに挨拶を交わしました。当時の所長は J.D.Bjorken でした。

Buras は当時ポストドクとして Fermilab にいたのですが、彼とは、以前にルーバン (ベルギー) の夏の学校で一緒だったこともあり、旧知の仲でした。そんなわけで、旧交を温めることになり、部屋が隣同士であったこともあり、毎日顔を合わせて話し合うようになりました。

そのころ、私がセミナーで話すことになり、当時話題となっていた dimensional regularization について話しました。すると、セミナーのあとで、Buras が「自分も今 dimensional regularization を使って摂動計算をやり直しているけど、カットオフの計算と違って慣れないんだよね。」と言ってきました。「そうだよ。でも、カットオフに比べるとすごくスマートで、何か次元を超えた気分になるよ。」と談笑しました。これがきっかけとなり、しばしば彼と摂動の高次効果について語り合うようになりました。

ある日のこと、エール大学のグループと CERN のグループが QCD (Quantum Chromodynamics. 量子色力学) の高次効果の計算を始めたらしいというニュースが飛び込んできました。当時はまだ QCD が確立したとまでは言えない状況でした。だから、QCD の予言が何処まで実験的に確認できるかどうかを調べるのは重要なことでした。その中でも、2ループ以上の効果まで計算して、QCD の場の量子論としての特性を調べることができれば、世界のトップを走ることが出来ると考えられました。

QCD には漸近的自由性があるので、近距離現象と見なすことが出来る実験データに対しては、摂動計算を適用することが出来ます。繰り込み群で改良された高次効果を調べてみたいと考えていた矢先でもあり、早速 Buras と深非弾性レプトン-ハドロン散乱に対する高次効果の計算を始めることにしました。

計算は至極順調に進み、秋も深まった頃には予定した計算のほとんどが完了しました。丁度その頃、エール大学のグループが行った計算結果が手に入ったので、我々の結果と比較してみたら、愕然としました。結果が全く合わないのです。Fermilab 二階の廊下を歩きつ戻りつしながら黒板の前で Buras と激論を交わすけど、その原因がどうしても分かりません。もう一週間は経ったでしょうか。年末も近づいてきました。

そんな二人を気遣ってくれたのか、ある朝 Bardeen が「何を騒いでるんだ。」と議論に加わってきました。そこで状況を説明すると「ふーん」と考え込んでいます。翌朝のことです。朝早くから出勤している Bardeen は「君たちの繰り込み処方は何なの？」と聞いてきました。私たちは勿論 dimensional regularization を使っているので MS-scheme (minimal subtraction-scheme) です。すなわち、時空の次元を D としたとき、発散部分を $1/(4-D)$ として抜き出します。

調べてみたら、エール大学のグループはカットオフ法で計算し、無限大を off-shell 引き算で繰り込んでいます。彼らと我々では、繰り込み処方が違っていています。しかし、どんな繰り込み処方で計算しようと、物理的結果、例えば微分断面積のような物理量、は同じ答えになるはずです。実際、これまでに、one-loop レベルで計算された例では、どんな繰り込み処方で計算しても皆答えは一致しています。だから「エール大のグループか我々のどちらかがやはり間違っているんだろうか」と思ったのですが、待てよ「摂動計算という近似法では、繰り込み処方によって答えが違っていてもいいのではないだろうか」と気がつきました。one-loop レベルで繰り込み処方に依存しなかったのは「たまたま」であって、「2-loop 以上では繰り込み処方依存が顔を出すのだ」とやっと気がついて、気分爽快となり、自分らの計算結果に確信が持てるようになりました。その頃、シカゴ大学の大学院学生 Duke も議論に加わり、コンピュータが得意だった彼は、我々の結果を実験データと比較するプログラムを作ってくれました。

タイミングよく CERN の実験グループがニュートリノと核子の深非弾性散乱実験結果

を公表しました。そこで、私たちの結果を比較しようとして、計算結果を眺めていたら、繰り込み処方として我々が採用している MS-scheme では、発散項 $1/(4-D)$ のみを取り除くので、発散項に付随して出てくる余分な項が摂動の収束性を悪くしていることに気づき、繰り込みをするときに発散項と一緒にこの余分な項も取り除く処方を導入した方がいいということに気づきました。そこで、この新しい繰り込み処方を仮に MS bar-scheme と名付けて、我々の結果と実験データとを比較することにしました。Duke はこれを一晩で仕上げてきました。その朝我々は実験結果と見事に一致するグラフを見て感動しました。

このあと我々の共同研究をプレプリントとして公表すると、実験の人たちも、理論の人たちも、参照するようになり、MS bar-scheme という言葉が、あれよあれよという間に一人歩きし始めて、定着してしまったのには驚きました。引用度数もどんどん増えて、もう 1700 を超えているようです。

1978 年夏に、私は帰国の途中で、スタンフォード加速器センターに立ち寄り、セミナートークをしました。このセミナーには沢山の人が集まり、部屋からあふれるほどでした。また、その年に東京で開かれた高エネルギー物理学国際会議でも講演することが出来ました。

写真説明:

共同研究者達（共同研究から 28 年経った 2005 年に Fermilab で再会し私のカメラで撮った写真、左から Bardeen, Buras, Duke, Muta、この 4 人の中では私が最年長なのに若く見えてしまう。日本人は損だな。）

