



IPMU Interview

ジェローム・フリードマン教授 に聞く

聞き手・萩原 薫

芸術から科学へ：16歳で変わった興味

萩原 今日の講演はいろいろ示唆に富んでいて、楽しませていただきました。ありがとうございます。経歴書によれば1930年のお生まれで、子供の頃は美術と音楽に興味をお持ちだったそうですね。

フリードマン ええ、主として美術でした。バイオリンも習っていましたが、バイオリンと絵画のどちらを取るか決めなければなりません。大恐慌の最中で、私の両親は両方習わせる余裕はなかったのです。私は絵の方を選んだのですが、そのうちもっと家計が悪化して絵を習うのも止めざるを得ませんでした。子供の時は随分長い時間絵を描いていたもので、大人になったら多分画家になるだろうと本気で考えていました。ですから私は美術課程のある高校に進み、毎日3時間も絵を描いていました。

萩原 3時間もですか？

ジェローム（ジェリー）I.フリードマンさんはマサチューセッツ工科大学（MIT）の特別荣誉教授で、リチャード（ディック）E.テイラー、ヘンリー W. ケンドール両氏と共に「素粒子物理学におけるクォーク模型の発展に本質的に重要な、陽子及び中性子の内部構造に関する先駆的研究」により1990年のノーベル物理学賞を受賞しました。1956年にシカゴ大学から Ph.D. の学位を取得。1960年に MIT の物理学科教員となり、1967年に教授。

フリードマン 数学は代数と幾何の科目を最小限取っただけで、三角関数は全くやりませんでした。物理は1科目だけ取りましたがひどい成績で、先生がプリンゼンパーナーで袖を焦がしたことしか覚えていません。順調に美術家への道をめざし、結構では良かったです。美術で全米の賞をとり、高校を卒業したときは、地域でベストの美術学校であるシカゴ美術館附属美術大学に行く奨学金を約束されました。

萩原 その美術館は知っています。シカゴのランドマークですね。

フリードマン そうです。私は美術家への道を歩んでいたのですが、その奨学金はもらわずにシカゴ大学に行こうと決めたのです。高校3年の終わりに興味の対象が変わり始めました。

萩原 高校3年という15歳か16歳ですか？

フリードマン ええ、16歳位です。シカゴ科学産業博物館を訪れた結果、そうなったのです。あの博物館、知ってるでしょう。

萩原 勿論です。もうひとつのシカゴのランドマークですね。

フリードマン そこでアインシュタインの書いた小さな本を買いました。私は彼が偉大な科学者だということと、彼が予言した、物差しが縮んだり時計が遅くなったというものすごく面白いことをいろいろ聞いていたのです。私はこれが本当に面白くなり、なぜそうなるのか真剣に理解したい

と思いました。それで夏中かけてこの本を読み通しました。

萩原 私も同じくらいの年の頃、アインシュタインとインフェルトが書いた本を読んだことを覚えています。

フリードマン その本と私の読んだ本はとてもよく似ています。代数を知っていればローレンツ変換を導くことはできます。私はそれはできたのですが、本当に理解したわけではありません。本質的に重要なことは、全ての慣性系で光の速度が不変であるということ、それは非常に深遠な問題だからです。何の予備知識もないティーンエイジャーの私には全く理解できないことでした。それで私はその問題や同じような問題を勉強してみたいと思いました。美術の奨学金をもらったのにシカゴ大学を選んだのですから、ちょっと厚かましかったですね。

萩原 なるほど、それで美術学校の奨学金を辞退してシカゴ大学に行くことにしたのですね。

フリードマン そうです。

萩原 大学に入るのは簡単でしたか？

フリードマン ええ、私は勉強は良くできたので、入学は全く簡単でした。受けた授業は全部とても良い成績で、その結果シカゴ大学で学ぶ学費は全額奨学金をもらいました。私は一銭も払わずに全教育を受けたのですよ。

萩原 それはすごいですね。

フリードマン 両親が経済的に困窮していたので、それが私が大学に進める唯一の道でした。

萩原 分かりました。シカゴ大学に行ったときにはフェルミが教授でいることをすでに知っていましたか？

フリードマン 知ってましたとも。

萩原 なるほど、とても有名だったのですね。

フリードマン シカゴでフェルミ先生を知らない者はいませんでした。私には遠くの大学に行く余裕などありませんでしたから、とても幸運だと感じていました。私は自宅に住んで大学までは市電を利用しましたが、家はシカゴの西側だったので長い時間かけて毎日通学しました。最初の2年間はグレート・ブックス課程で、西欧文明の古典を読む一連の講義を取りました。

萩原 西欧文明ですか？ つまりそれが一般教育課程の2年間だったのですね。

フェルミとともに過ごしたシカゴ大学の日々

フリードマン そう、その通りです。その後物理学科に進んだのですが、初めはとても難しかったです。フェルミは物理に進みたい学生はほとんど制限無しに受け入れて良いという考えでした。私が物理学科に進めたのはそのおかげですが、数学の勉強は大急ぎで追いつかなければなりません。試験はとても難しく、落第点を取る割合がかなり高かったのです。私は最初苦労しました。最初取った物理の科目は105、106、107だったことを覚えています。MITでは2年かけるところをシカゴでは1年で終えたのです。しかも毎週金曜日にとても難しい試験がありました。

萩原 毎週金曜日に試験ですか。

フリードマン 毎週です。100点満点で平均点は20から30点でした。私もとても低い点の時があり、物理を選んだのは正しい選択だったか思い悩んだ時期がありました。125人ほどがこの科目を取っ

萩原 薫さんは高エネルギー加速器研究機構 (KEK)・素粒子原子核研究所教授でIPMUの上級科学研究員を兼ねる素粒子理論の研究者です。



て、修了したのは35人程度でした。

萩原 たった35人ですか。

フリードマン 大部分はやめてしまったのですが、やめさせられたわけではありません。毎週金曜日に試験を受けて、ほとんどいつも半分以下しかできなかったのですよ。皆良くてできる学生でしたが、ただ続けることができなかったのです。

萩原 試験問題はフェルミが作ったのですか？

フリードマン いいえ違います。その科目を教えた人が最初の講義で「君たちの大部分は物理学者になれるほど良い頭はしてないよ」と言いました。私にとって救いだったのは、試験の成績が悪くても「自分は何も知らないのだから良い点を取れるはずがない」と思えたことです。私は何とか追いついて全ての試験をパスすることができました。それで物理学科に残って勉強を続けられました。2年後に資格試験と呼ばれる長時間の試験があり、3年終わったところで基本試験と呼ばれる博士課程に進むための資格認定試験が3日間、毎日6時間行われました。どちらの試験も受けた者の約半分は落ちました。残るのは1/4程のとても狭い門でしたが、大いに楽しめる博士課程でした。シカゴ大学の物理教室は非常に活気のあるところだったので、世界中の最高の物理学者が訪問し、講演しました。私たちは講演を聴き、何人もの偉大な物理学者に会いました。パウリやハイゼンベルグやファインマンも訪れました。当時、とても若かったゲルマンがシカゴで教えていました。勿論、フェルミもです。私は大胆にも、「自分は物理学科で一番の学生ではないかもしれないが、

一番の教授のもとで研究したい」と考えて、フェルミに会いに行き、彼の下で研究できないかと尋ねました。私は、「では、この科目やあの科目のできはどうだったかね」とか、「基本試験の成績は?」とか聞かれるのではないかと思います。「いいですよ」と言っただけでした。私にはとても信じられません。私にはとても信じられませんでした。宝くじを引き当てたようなものでした。残念なことにフェルミは私が博士論文を書いている間に亡くなりましたが、それまで私は彼のために一生懸命働きました。彼はすごい人で、彼が物理の問題について考え、目の前で解いてみせたり説明してくれるのを見ることはなんとも素晴らしいことでした。フェルミは優れた人であるとともに実に親切な良い人でした。それに加えて、物理学科には素晴らしい博士課程の学生たちがいました。その一人の藤井忠男さんとは仲の良い友人同士でした。その頃、小柴さんはシカゴ大学の若い博士研究員で、マルセル・シャインの宇宙線グループで働いていました。小柴さんとは良く会って語り合ったものです。

萩原 南部さんとは会われましたか？

フリードマン 会いましたよ。私が学生の時、南部さんは若手の助教授でした。その時でさえとても高かった評判が、どんどん上がり続ける一方でした。信じたいほど才能に恵まれた理論家ですから、南部さんがノーベル賞を受賞した時、私は大喜びしました。彼がなし遂げた素晴らしき仕事で最高の賞に輝いたわけですから。私は南部さんの講義を受講したことはありませんでしたが、講演は何度も聞きましたし、話をしたこともあります。彼はと

てもきさくな人ですが、また実に控えめな人です。ですから、南部さんと話をするにはこちらから近づいていかななくてはなりません。私はそうしましたし、そうすると彼はいつでもとても親しく接してくれました。フェルミは飛び抜けて優れた教授陣を集めたのです。その物理学科の学生だったことは最高に素晴らしい経験でした。

萩原 ええ、想像がつかます。

フリードマン 私は実に信じがたいほど運が良かったと思います。

萩原 次の質問に移りたいのですが、経歴を見ると博士論文は原子核乾板を使った実験で陽子の偏極を測定されたそうですね。

フリードマン その通りです。

萩原 テーマは散乱陽子の偏極を利用して陽子が弾性散乱されたか非弾性散乱されたかを調べようというものでした。そのテーマはフェルミに与えられたのですか？

フリードマン そうです。当時、炭素標的で散乱された陽子の偏極度が高いことが知られていました。

萩原 なるほど。

フリードマン しかし、高い偏極度を与えるのは炭素核の分解過程なのか、励起過程なのか、弾性散乱なのかは分かっています。フェルミは知っていたのですが、彼が既にこの過程を計算していたことを私は知りませんでした。私の出す結果に影響を与えたくないので黙っていたのです。彼の計算は弾性散乱で非常に高い偏極度が得られることを示していました。フェルミは常にスピンの効果に大きな関心を持っていました。実は、原子核の殻模型解明への基本的な鍵であるLS結合のアイデアをマリア・メイヤーはフェルミから得たのです。彼はLS結合がこの偏極を引き起こすかもしれない

と考えました。そして、ポテンシャルの実数部と虚数部、それにLS結合を取り入れた計算を行い、弾性散乱で非常に高い偏極度を得ました。実験結果が全て揃ったとき、彼の計算と見事に一致していることが分かりました。

萩原 そうだったのですか。

フリードマン 私は照射した原子核乾板を顕微鏡でスキャンしました。300メートルの飛跡を調べたのですが、顕微鏡の視野はたった150ミクロンでした。これがどんなことか想像できると思いますが、私の進み方は実に遅かったのです。測定の中で途中で途方に暮れることが起きました。セグレがカウンターを使って同じ実験を行い、その結果がフェルミの計算の正しさを確認してしまったのです。私は出し抜かれてしまい、1年半を無駄にしたと思いました。それで、フェルミに会いに行きましたが、彼はとても親切にこう言ってくれました。「気にすることはない、君は非弾性散乱も調べられて、弾性散乱と比較できるのだから、両方の測定結果を発表できるのだよ。」実際、私はそうしたのです。その結果私はPh.D.の学位を得ることができたのですが、残念なことに学位論文を完成させた時には既にフェルミは亡くなっていたのです。彼の死は実に悲劇的でした。1954年でしたが、彼は一夏ヨーロッパに滞りました。その間に進行の早い胃がんに冒されたのです。春にはとても健康そうに見えました。秋にシカゴに戻ってきた時に、ホールの中を歩いているところが遠くから見えました。よく見ると、それがフェルミとはとても信じられないほどやせ衰えていました。私は彼に手を振り、彼も手を振り返してからオフィスに入って行きました。次の日、彼は試験開腹のためシカゴ大学のピ

リングス病院に入院し、手術不能なことが分かりました。そして、死を迎えるため自宅に戻ったのです。しかし、彼の人柄を分かち得たため、この話をしたいと思います。フェルミの入院中、ハーバート・アンダーソンとインド人の偉大な理論家、チャンドラセカールが試験開腹後初めて面会に行ったのです。それはとても気まずい状況でした。死を宣告されたばかりの人に会って何を言いますか？ 彼らは病室に入り、明らかに言葉に詰まっていた。フェルミは気がついてこう言ったのです。「チャンドラ、私は死んだら象に生まれ変わるのかね？」

萩原 象ですか？

フリードマン そうです。皆はじけるように笑いました。これで堅さがほぐれて素晴らしい会話が交わされました。明らかにフェルミは彼らの気持ちを気遣い、死の床にあるにもかかわらず冗談を言ってその場を和ませたのです。これこそ本当の人間らしい人間というものです。

萩原 まさにそうですね。フェルミのとて素晴らしい話を聞かせていただき、ありがとうございます。では、話題を次に進めたいと思いますが、Ph.D.の学位取得後、シカゴで研究してからMITに移られたのですか？

電子散乱の研究を始める

フリードマン いや、最初はスタンフォードに行きました。MITの前です。高エネルギー物理学研究所でホッフスタッターの下で3年間研究しました。

萩原 そこで電子散乱の研究を始めたのですか？

フリードマン ええ、そこで電子散乱を学びました。そこに移ったことは私にとってとても運の良い

ことでした。というのも、私はずっと原子核乾板をやってきたのですが、学位論文を終える頃までにはもう滅びつつある技術になっていたのです。私は泡箱はやりたくないと決めました。もう画像はたくさんあったのです。十分すぎるほど見てきたので、見飽きてしまったのです。そこで私はエレクトロニクスによる測定を習得したいと思ったのです。

萩原 原子核乾板から始めて、カウンターに進んだのですか？

フリードマン ええ、そういうわけでホッフスタッターのグループに電子散乱の職を得ました。そこでは色々やりましたが、私が一番良く覚えている実験はドレル・シュバルツの結果を用いて行った測定で、その後の私の思考に役立ったものです。彼らの計算は、電子による重水素原子核の分解反応で、全ての非弾性終状態について足し合わせると重水素核の交換力についての情報を得ることができることを示しました。私は面白い結果だと思いました。全非弾性終状態を調べると基底状態について情報が得られるというアイデアに非常に魅力を感じたのです。

萩原 なるほど。包含反応の測定について初めて知ったのがそれだったのですか？

フリードマン そうなのです。どうやって輻射補正を行うかを学びましたが、非常に複雑であることを知りました。電子散乱では2種類の輻射補正があります。電子は散乱の前に光子を放出できますが、この場合、ビームエネルギーより低いエネルギーで散乱することになり、補正の計算には測定していない断面積を使わなければなりません。散乱後にも光子は放出されますが、その補正は比較的簡単です。しかし、散乱前の光子放出の補正には低

いエネルギーでの断面積について知る必要があります。こうして次々にさらに低いエネルギーでの情報が必要になってきます。

萩原 ええ、全くその通りです。

フリードマン これは問題で、どうやってやるのか学ばなければなりません。もう一つこの測定で学んだのは、終状態について足し合わせるにより分かることがあるかもしれないということです。私たちがSLACで非弾性包含反応の測定をすることに決めた時、既に私は重水素実験を経験済みで、「陽子に関して何が分かるかはっきりしないが、面白いことになるかもしれない」と考えました。重水素核の電子分解実験は私にとって非常に意味のあるものだったのです。では、私は重水素の核子間の交換力を発見できたのかというと、答えはノーです。なぜそうなったのか、お話ししましょう。私は実験結果を吟味して、ドレルとシュバルツが彼らの計算で無視した項がいくつかあることに気がつきました。それでシドニー・ドレルに会いに行き、そのことを話しました。彼は「その通りです。その項をチェックしなければ..」と言ったので、私は机に向かってこれら、いわゆるゲージ項の影響の計算に6ヶ月を費やしました。私はゲージ項を計算に取り入れたのですが、分かったことは明確な結論が得られないということでした。それでもゲージ項が重要であり、取り入れなければならぬことは示せたので、私はその結果を公表しました。交換力についての新しい情報は得られませんでした。二つのことを学んだのは収穫でした。輻射補正について学び、「和則」について学びました。

萩原 良く分かります。あなたの非常に重要な研究に直接的に関係していたのですか。それから

MITに行かれたのですか？ ケンブリッジ電子加速器(CEA)に。**フリードマン** ええ、CEAです。当時、ヘンリー・ケンドールと私は同僚で、一緒にグループを率いていました。私たちは陽子による電子散乱実験をCEAで実施したかったのですが、それは許されませんでした。他の誰かが長期間スペクトロメーターを使っていたのです。

萩原 なるほど、あなたがSLACに行ったのはそういう訳でしたか。

MITで教えながら3000マイル離れたSLACで実験する方法を見出す

フリードマン そうなのです。陽子を調べたかったらどこか別の所に行くより他ありませんでした。そこでヘンリーと私はSLACに行こうと決めたのですが、とても難しいことでした。どうやったからMITで教えながら3000マイルも離れた場所で研究できますか？ それはとんでもなく馬鹿げた思いつきでした。

萩原 どうやってうまくやれたのですか？

フリードマン 当時MITの物理学部の主任に素晴らしい人がいました。名前はビル・バックナーといいます。彼にはいつまでも感謝しています。ヘンリーと私は彼に会いに行ったのですが、私たちはどうすれば良いのか困惑していました。とにかく、私たちがSLACで研究するにはどうすれば良いのか、彼に聞いてみようと思ったのです。答えは間違いなくノーで、CEAで働き続ける方が良いと言われるだろうと思っていました。私たちは彼にどのような研究をやりたいのか話しました。そうしたら、彼は「簡単なことだ。こうすれば良い。」と言ったのです。私たちはとても驚きました。どん

な手品を使ってこの問題を解決できたと思いますか？彼はヘンリーと私にこう言ったのです。「二人で一つの科目を教えるのさ。二人とも給料をもらって、ヘンリーが2週間向こうに行きジェリーがその間教える、次にジェリーが2週間向こうに行きヘンリーが教えればいい。」私たちはそうしました。何年もの間、私がカリフォルニアに2週間滞在している間彼が授業をし、次に私が帰って授業している間彼がカリフォルニアに行くということを継続し、私たちは現地に実験グループを作り上げました。実のところ、アメリカでは私たちが本拠地の大学から1000マイル以上離れた場所で研究した最初のグループだったと思います。初めて遠方のユーザーグループを確立したのです。

萩原 いや、それはとても大変ですね。

フリードマン 確かにコロンビア大学からは研究のためブルックヘブン国立研究所に行ったものですが、それは比較的近距离で、3000マイルとは話が違います。

萩原 ええ、全く違いますね。

フリードマン 私たちはグループを作り上げました。博士研究員と大学院生をSLACに移し、いつの間にか影響力をもつ存在になっていました。スペクトロメーターシステムの建設に参加し、実験を準備し、実施したのです。実に良い時代でした。

萩原 では、あなたの深部非弾性散乱実験についてお聞きしたいと思います。最初、陽子の形状因子を弾性散乱で測定して、勿論非常に短距離まで形状因子を測定できましたが、何も面白いことはなかったと言われていましたね。

フリードマン 実際、形状因子の測定からは何も新しいことが得られませんでした。それで止める

ことに決めました。精度を上げて測る意味が無かったのです。

萩原 そこで非弾性散乱の測定を提案しました。

フリードマン そうです。

萩原 当時、あなたがその測定で何かを発見するとは全く誰も信じなかったと仰いましたね。しかし、あなたは多分何らかの描像をもってはいたはずでは？

フリードマン もっていましたとも。ヘンリーやディックや他の人たちの動機は知りませんが、私には重水素核の実験が動機になっていました。

萩原 そうですか。

フリードマン そこから始まったのですよ。

萩原 多分、陽子を作っている力について何らかの知見を得ようとしたのではないですか。

フリードマン 重水素核の実験からの類推で言えば、励起状態について足し合わせれば基底状態についての情報が得られるかもしれないので、まあ何かは得られると思われました。

萩原 なるほど、それは確かに重要でしたね。

フリードマン それが教訓だったわけです。何を発見することになるか、勿論知りませんでした。私たちがクォークを探していたわけではないのは明らかで、ヘンリーは違う動機をもってはいたかもしれませんが。ヘンリーの動機が何だったのか分かりません。多分彼は話してくれたのですが、もはや私には思い出せません。ディックが言ったことも思い出せないのです。しかし、自分自身のことについては覚えていることをお話できます。プログラム委員会は私たちがその方向に進むことを余り歓迎しませんでした。私たちが約束したことは非弾性励起状態、つまり共鳴状態の測定でした。勿論、共鳴状態は連続状態

と重なり合っている訳ですから、共鳴状態を測定すれば当然連続状態も測定されます。

萩原 失礼ですが、プログラム委員会はあなたたちが共鳴状態を測定することに意義があると考えて実験を採択したのですか？

フリードマン そうなのです。彼らは連続状態の測定だけでは満足しませんでした。

萩原 併せてということですか。

フリードマン ええ、併せてです。実際、両方測定しました。しかし、共鳴状態については測定結果は公表しませんでした。

萩原 公表しなかったのですか。プログラム委員会に対する返礼ですね。

フリードマン そういうわけではなくて、非弾性散乱が非常に興味深く重要となったので共鳴状態の結果を論文にまとめる時間をとれなくなったのです。なぜ連続状態のスペクトルが非常に面白いことを見出したのか、お話ししましょう。私は数人の理論家を訪れて連続状態の測定で何が期待されるか予言してもらえないかと尋ねました。でも誰も興味を示さなかったのです。ごみのようなものと考えたのですね。結局のところ、連続状態にはあらゆる過程が含まれているので、どうやってそれを全部取り入れるのか？誰も計算しようとはしませんでした。

萩原 ビヨルケンには聞きましたか？

フリードマン ビヨルケンは断面積を全く計算しませんでした。彼は和則を計算したのです。

萩原 なるほど。

フリードマン ビヨルケンは恐らくディックとヘンリーとは話していたと思います。私はビヨルケンがやっていたことをはっきりとは知りませんが、私がやったことはお話できます。フェルミが複雑な現象を近似するのを目の当たりにし

た後ですから、私はまずは非常に簡単なモデルで計算してみようと自分に言い聞かせました。私の簡単なモデルを説明すれば実はそれほど不合理ではないことが分かってもらえると思います。電子の散乱では仮想光子を考えますよね。

萩原 はい。

フリードマン 包含過程を考えると、それは仮想光子に対する全断面積です。従って、まず第一に現れるのは光子のエネルギーでの光子・陽子衝突全断面積です。しかし、仮想光子であるために補正が入るはずで、ファインマンダイアグラムを見てみると、パーテックスの補正がありますが、それは Q^2 の関数です。その Q^2 の関数の具体的な形は分かりませんが、 Q^2 は次元をもつため、 Q^2 だけの関数ではあり得ず、他の何かが必要です。無次元の数にするためには Q^2 に長さの2乗を掛けなければならないので、このことからある長さを導入すべきことが分かります。

萩原 陽子のサイズですね？

フリードマン まさにその通りです。

萩原 それは形状因子の実験から知ったのですね。

フリードマン そうです。形状因子は陽子のサイズを含んでいません。実際、最も効率的なのは単に陽子の形状因子を導入することです。陽子のサイズを最も良く反映していますから。こうして陽子の形状因子で補正された光子・陽子衝突全断面積から包含反応断面積を計算することにより、私たちが期待する結果のテンプレート（ひな型）を用意しました。次に輻射補正を考慮して実際測定される量をシミュレートしました。さて、測定を開始したところ、ある時点でこの計算より5倍も大きい測定値が得られたのです。

萩原 まだ Q^2 が余り大きくない時ですね。

陽子内部の点状構造を発見

フリードマン 私たちは、まあいいだろう、と思いました。このような粗い計算では5倍の違いは驚くにはあたらなことです。しかし、その後10倍、100倍、1000倍、10000倍とどんどん違いが大きくなり、何か新しい物理があることに気がついたのです。

萩原 講演のスライドで見せてくれたのがその測定器ですか？ レール上を移動させることにより小角度の測定から始めて徐々に角度を大きくしたのですか？

フリードマン ええ、その通りです。講演は一般向けということなので、測定した分布は示さなかったのですが、構造関数は Q^2 の関数として平らに見えます。運動学的な限界があるので、少し曲がりますが。私は直ちにこれは点状の構造を意味すると思いました。もしも有限のサイズがあってそれが効いてくると4元運動量移行(Q^2)が大きくなるとともに構造関数は下がり始めます。炭素原子核による電子散乱を見ると、陽子に似たスペクトルが得られます。つまり、原子核励起状態の次に幅の広い連続状態が得られます。この連続状態が最大となる領域で運動量移行分布を見ると、平均した核子の形状因子が得られます。これは準弾性散乱と呼ばれます。基本的には同じように陽子の内部にある何か小さ

*1:ここで「全包含断面積」は通常「構造関数」と呼ばれているものを指す。

*2:この比、 $x = Q^2 / 2pq$ はビヨルケン変数と呼ばれる。 p は陽子の4元運動量、 q は電子と陽子の間で交換される仮想光子の4元運動量。 $Q^2 = -q^2$ 。

*3: pq は陽子の重心系で陽子の質量と仮想光子のエネルギーの積であるので、 x の関数である全包含断面積は Q^2 と仮想光子のエネルギーの比の関数となる。

なものによる準弾性散乱を議論できます。

萩原 炭素原子核による電子の散乱を測定すると運動量移行が非常に小さいところでは炭素原子核の大きさが重要です。それを超えると個々の陽子を測定し始めます。

フリードマン 全くその通りです。もはや原子核全体とのコヒーレントな(干渉性の)散乱ではなくなるからです。

萩原 あなたは既にそれを知っていた訳ですね。

フリードマン ええ、その通りで、非干渉性の散乱になります。非干渉領域に入ると核子の形状因子を見ることになります。勿論原子核中には中性子と陽子があるので、核子の平均的な形状因子を見る訳です。陽子についても同様に考えられて、私たちは既に陽子の中に点状のものが存在するというアイデアに達しようとしていました。ほぼ同じ頃、ヘンリーはビヨルケン・スケール則を調べていて、スケール則が成り立っているように見えました。しかし、スケール則が意味することを当時私たちが本当に理解していたとは思いません。今から振り返ってみると、スケール則が点状の振る舞いを意味することは明らかですが、当時私たちはそれを理解していませんでした。ビヨルケンの頭の中にはあったはずですが、彼が私たちとそれについて議論したかどうか、私は覚えていません。

萩原 (陽子の大きさの)他に(例えばクォークのサイズのような、何か新しい物理の長さの)スケールが存在しなければ...

フリードマン ええ、全くその通りです。

萩原 ...その場合、(全包含断面積^{*1})は運動学的なスケールの比^{*2}のみに依存します。

フリードマン その通りです。 Q^2 に対応する物理のサイズがなければ、全包含断面積は他の運動学的量(ここでは仮想光子のエネルギー)との比^{*3}の関数でなければなりません。しかし、当時私はそれを理解していませんでした。1968年までに私たちのうち数人は恐らく陽子の中に点状の構造が存在するという見解をもちました。ウイーン国際会議が近づいていた時でした。私はその会議でグループを代表して発表することになっていました。

萩原 ウイーンですか？

フリードマン ええ、出発前に私がどこまで発表することが許されるか見極めるため、グループと話し合わなければなりません。ヘンリーと私と他に数人は陽子の中に点状の構造が有り得るかもしれないというアイデアを言及したかったのですが、グループの他のメンバーはそんな解釈は余りに異様だと言って反対しました。グループで投票した結果、私たちは負けました。

萩原 なんと、負けたのですか！

フリードマン 私の発表では点状の構造の可能性については一言も触れませんでした。単に Q^2 依存性の図を見せただけです。パノフスキーが関連セッションの全体講演をしましたが、彼が私たちの実験結果について話したのはたった二つの文章で、陽子の中の点状構造の可能性を示唆するものでした。彼はそれ以上何も言わず、誰もほとんど注意を払いませんでした。それは水に石を落としたようなもので、ちょっと波紋が生じるけれどすぐ何事もなかったように静まります。当時の常識から余りにもかけ離れていたためです。なぜならまず第一にそれは場の理論を意味したのですが、当時強い相互作用には場の理論は有効ではないと考え

られていました。優勢だった理論は全てのハドロンを基本的な粒子と考えるNuclear Democracyであり、誰も点状構造の可能性について話したがりませんでした。しかし私たちはその可能性について研究を続けたのです。そしてカラン-グロスの和則を使って、核子中に構成要素が存在するならばそのスピンは1/2であることを見出しました。次にもう一つの和則を使い、ニュートリノと核子の非弾性散乱と組み合わせることで、これらの構成要素はクォークの分数電荷をもつことを示しました。それで終わりでした。何年かかかりましたが、実にエキサイティングな時でした。私は存分に楽しませてもらいました。長くなりましたが、これがあなたの短い質問に対する答です。

萩原 実に何とも面白いお話を聞かせていただき、ありがとうございます。私が大学院に入学したのはあなたの研究が完結した後のことでした。

フリードマン 大学院はどこでした？

萩原 東京都立大学でしたが、 J/ψ が発見された1974年のことです。

フリードマン そうでしたか。

萩原 その当時でも、少なくとも私のいた小規模な大学では、場の理論は全く人気がありませんでした。

フリードマン 実際、全然人気がありませんでした。

萩原 実は私の先生(小林徹郎教授)はパイ中間子・核子散乱の物理のレジュエ現象論を研究していましたが、 J/ψ が発見された後は私に、自分のやっている研究を勉強するのではなく、代わりにSLACから来るプレプリントを全部読むように言われました。

フリードマン 賢明な方でした

ね。

萩原 はい、本当に。そういう風に大学院での勉強を始めたわけで、来る日も来る日も論文を読んでいた。当時読んだのはビヨルケン、ファインマン、グラシヨー、等々が書いた論文で、とても勉強になりました。

フリードマン 素粒子理論は実に急速に変わりつつあり、ほぼその頃完全な標準模型が影響力をもち始めました。

萩原 そうですね。そうなのは全てあなたの研究や多くの理論家たちの研究の成果に基づいていることですね。さて、他に伺うことは... 一番重要なことは既にお聞きしましたが、後二つ質問させて下さい。

フリードマン どうぞ。

萩原 ちょっと意地悪な質問かもしれませんが。

フリードマン いいですよ。

高エネルギー物理学は今や全てが国際的

萩原 では、最初の質問です。1970年代に私が勉強をしていた頃、ほとんどの高エネルギー物理学の実験結果はアメリカで得られていましたが、1982年、私はマディソンで博士研究員でしたが、WとZがCERNで発見されました。今や最も高いエネルギーでの実験成果はほとんどヨーロッパで得られています。アメリカでの高エネルギー物理学の将来像というものはあるのでしょうか。あなたのご意見をお聞かせいただけませんか？

フリードマン 一般的に高エネルギー物理学全体が変わってしまったと思います。今や全世界的なものとなり、あらゆる実験施設は多国間で共有されるものとなるでしょう。CERNはその好例であり、10年後、15年後に一つの国でもてるものは何か、予想するの

は難しいと思います。財政破綻や財政赤字の観点から、近い将来新しい実験施設の建設は困難になるのではないのでしょうか。各国がそういう状況を切り抜けた時、以前そうでしたから今度も切り抜けることでしょうか、次の巨大実験施設がどこに建設されるかは分かりません。しかし、どこに建設されようともそれは多国間で共有されるものとなるでしょう。日本で建設しようとしているスーパーBファクトリーはナショナルプロジェクトですが、それはその規模がまだ一国で賄える程度であるためです。とは言え、日本はスーパーBファクトリーへの国際的な参加を望んでいるはずであり、それは間違いなく実現すると思います。

萩原 ええ、勿論です。

フリードマン しかし、ILCやCLICの規模の計画になると、TeV領域に入り、数10億ドルが必要になります。それは多国間の共同事業になり、どこに作るかよりも国際的に参加できるものとするのが重要となります。ある国がこの分野の研究を行うかどうかは、その国が多国間の共同事業に参加を望むか否かにかかってくると思います。テバトロン機の運転終了後、アメリカは巨大加速器をもたなくなりましたが、1000人を優に超える多数の米国研究者がCERNで研究するので、相当な勢力と言えます。

萩原 あなたはマサチューセッツとカリフォルニアの間を往き来しましたが、その拡大版という訳ですね。

フリードマン 今ではずっと楽に連絡しあえるので、あの頃と比べるとずっとましになりました。今やどんなに離れていても本当のミーティングができますが、当時はできませんでした。しかも、常時ミーティングしています。ほんの

少し移動するだけで済みます。いずれ、人は移動せず、実験に参加している研究者は自分の家から参加するようになるでしょう。

萩原 実験室がどこにあるとも問題無いわけですね。

フリードマン そうなのです。素晴らしいことです。常に変わっているし、時代が進むにつれさらに変わります。

萩原 想像がつかます。ところで、日本の高エネルギー物理学について何かコメントはありますか？日本ではどちらかと言えばフレーバー物理に努力を集中しています。日本の高エネルギーコミュニティはBファクトリーやニュートリノ実験のようなフレーバー物理の実験で非常に成功を収めてきました。

フリードマン その分野は重要で、日本は非常にレベルの高い物理学者を輩出してきました。私は学生時代から日本人の物理学者と交流してきました。既に言いましたが、藤井忠忠さんとは一緒に大学院に行き、またシカゴ大学で南部さんや小柴さんとも知り合いました。

萩原 はい、そのお話は伺いました。

フリードマン 藤井さんは私の同級生でしたが、素晴らしい男であり、とても有能な物理学者でした。小柴さんの業績をご覧なさい。南部さんは私たちの時代の最も偉大な理論家の一人です。日本には極めて重要な業績を上げた物理学者がたくさんいます。Bファクトリーも一連のニュートリノ実験も大きな成果を上げました。スーパーBファクトリーもJ-PARCでの実験計画も同じく大きな成果を上げると思います。日本では注意深く思慮に富んだやり方で物事を行い、また進んで困難なことに挑戦し、成功させます。

萩原 同感です。私も驚かされました。

日米両国の指導的政治家へのメッセージ

フリードマン Belleと神岡実験は非常に印象的で、美しい結果を得ました。日本は極めて良くやってきたし、研究に対する投資を持続する限り今後も成功してゆくでしょう。素粒子物理学の直接的応用の方策は見つかっていませんが、その実験技術の副産物は国民に経済的利益をもたらします。素粒子物理学で利用される新しい技術を学んだ学生は経済に大きな利益をもたらす技術革新を引き起こすでしょう。そのことはあなたの方が日本の指導的政治家にメッセージとして伝えるべきです。米国人はアメリカで同じことをしなければなりません。私たちは同じ問題を抱えているのです。予算が厳しくなり経済的問題が深刻化するにつれ、主として直ちに経済的利益を生み出すプロジェクトに資金を使う傾向が出てきます。しかし、基礎科学に対する投資をやめればより多くのものを失うこととなります。日本政府が日本の科学に十分な支援を与え続けるならば、素晴らしい成果が上がり続けることでしょう。

萩原 よく分かります。今のが最後の質問でしたが、他に仰りたいことはありますか？

フリードマン いえ、十分にお話しました。

萩原 では、どうもありがとうございました。

フリードマン いえ、どういたしまして。とても興味深いインタビューでした。しばらく考えていなかったことを考えさせてくれましたので。ありがとうございました。