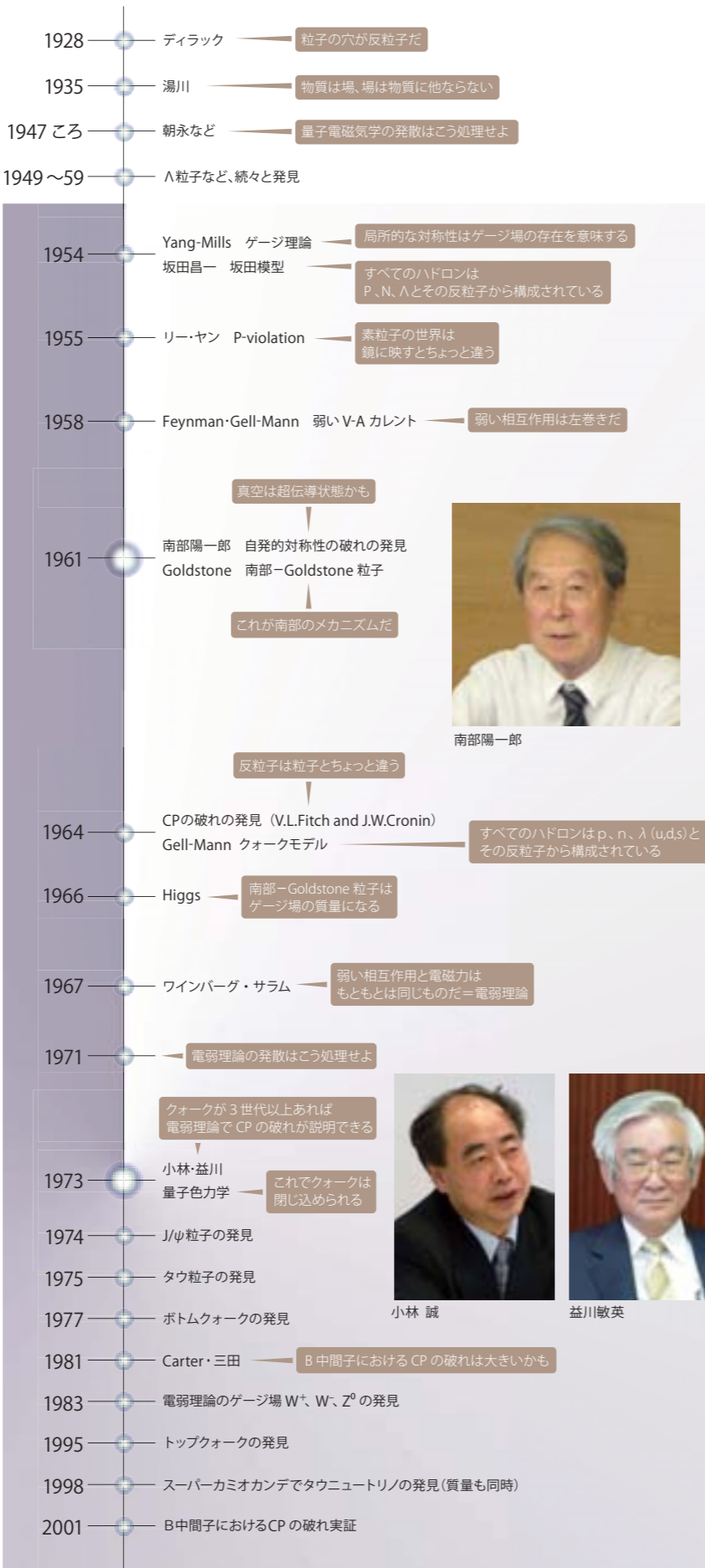


年表で見る 標準理論の進歩



南部陽一郎



小林 誠



益川敏英

(通称E研)の教授になりました。着任してみると、連続と続く物理学研究の伝統に力づけられましたが、とてつもない民主主義には大変苦労しました。両氏が自分たちの考えを貫き、オリジナリティーの高い研究が開花した風土がありました。そこで、かつて主流の側から小林・益川理論を眺めていた経験も踏まえて、学生たちには、「主流ばかり追っている、何も新しいことは出てこない。ノーベル賞なんか取れないし、群れをなして崖を落ちてしまうこともある」と諭しています。

中間子の湯川秀樹先生、くりこみ理論の朝永振一郎先生、ニュートリノの小柴昌俊先生……。フレーバー素粒子物理学では日本がメッカであり、すでに世界的な仕事をいくつも積み重ねていますが、さらに発展させていくための努力が必要だと思っています。同時に、今回の受賞をきっかけとして、こうした歴史を継いでいく若い人々を育てることに、私たちがもっと力を注がなくてはいけないとの意を新たにしました。講演などの機会を通じて発信し続けて、若い人の科学リテラシーを涵養していくことは大切だと思います。

スーパー KEKB にとってもまたとない追い風になることを期待しています。KEKBによって達成されたルミノシティは、10の34乗 $\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ でしたが、スーパー B では一気に37乗くらいに上げる必要があるというのが、私の持論です。数百億円もの血税を投入して次をめざしていくのであれば、一気に1000倍くらいの、文字通り桁違いのインパクトをめざすべきだと思います。KEKBも当時達成されていた31乗から一気に34乗まで達成できたのですから、日本の技術と加速器研究者の創造力をもってすれば、決して夢物語ではないと思います。CP対称性の破れはもはやバックグラウンドであり、これからは、超対称性であったり、まったく新しい素粒子であったりと、何か突拍子もないものが出てくることを期待しています。

(2008年10月28日、東京で収録)
(談/構成 塚崎朝子)

小林・益川理論は どのようにして生まれたのか

【話し手】

小林 誠

総合研究大学院大学名誉教授/
高エネルギー加速器研究機構名誉教授

【聞き手】

辻 篤子

朝日新聞社論説委員

*この記事は『総研大ジャーナル』2号(2002秋)
特集「世界最強の加速器 KEKB の挑戦」から再録したものです。

小林・益川理論は標準理論の申し子であった。名古屋大学の坂田グループに代表される自由な雰囲気の中で、アイデアをじっくり育てられたのがよかった、と小林氏。理論誕生の物語を、理論が検証された翌2002年にお聞きした。

パラドックスのおもしろさに引かれて

——物理学をめざされたのは?

小林 名古屋大学教授だった坂田昌一先生が提唱したいわゆる坂田模型*1のことを新聞などで読んだのが、中学校、高校のころ。地元でこんなことがあるんだと、漠然としたあこがれのようなものを持ち、名古屋大学の理学部に入りました。決まっていた科学少年ではありませんでしたが。教養では、数学がおもしろかったけれど、3年のとき、やるなら現実的なことをやりたいと物理を選びました。原理的なことに興味

あり、勝手なことをいろいろ考えて、それが自然でテストされる、というのがおもしろかった。量子力学とか相対論のパラドックスを何とかして理解したいという思いがありました。パラドックスのようなものがあると、がぜんおもしろくなってくる。

——素粒子の研究を始めたのは?

小林 修士課程に進んでからです。1967年ころ、64年に提唱されたクォーク模型はすでにできあがったものになっていて、実体を持ったものかどうか論争的でした。標準理論のように場の理論としてのダイナミクスの記述が完全にできる前の準備段階。

小林 誠 (こばやし・まこと)
名古屋大学で理学博士号を取得して京都大学へ。そこで1973年、益川敏英・同大学助手(現在は京都大学名誉教授)と共同で、CP対称性の破れを説明する「小林・益川理論」を発表した。79年から高エネルギー物理学研究所(現・高エネルギー加速器研究機構)。2003年同機構・素粒子原子核研究所長。06年から同機構名誉教授。07年、日本学術振興会理事。08年、総合研究大学院大学名誉教授。

その中で、名古屋の伝統かもしれないけど、坂田模型からクォーク模型といった模型の立場で、動力学的な問題がどう理解できるか、グループでやっていました。

——そのころの坂田先生は?

小林 僕が修士のときは、学部長だったか、忙しくて、週1回のセミナーに顔を出すくらい。僕自身は一言二言話す程度で、直接指導を受けたとは言えないけれど、研究室全体の雰囲気としては影響がありました。名古屋の素粒子の理論は、大学院生も独立した研究者というのがスローガンで、教室会議のメンバーになれば教室運営でも

*1 坂田模型

1954年、坂田昌一によって提唱され、名古屋グループが築いたハドロンの複合モデル。新型の加速器シンクロトロンによって新しいハドロンが続々と発見されたことから、その奥にある構造を研究した。「すべてのハドロンは陽子、中性子、ラムダ(Λ)粒子とその反粒子から構成されている」とした。これによる新し

いハドロンの予言にも成功する。1959年には群論による整理も行われ、クォークモデルの先駆的役割を果たした。

*2 1960年代の素粒子論とS行列

1960年代の素粒子研究は、新粒子の大量発見に続く混乱の時代であった。主流であったのはS(散乱)行列の理論と呼ばれるものだ。素粒子現象をブラッ

クボックスとみて、素粒子現象の入力(始状態)と出力(終状態)の関係をつけるのがS行列である。「実際に何が起きているか」を問わず、「観測されるもの同士を関連づける」もの。クォークの動力学を中心とする標準理論が広く信じられるようになったのは、1974年の11月革命以後のことです。それまでは実験的根拠のない「形而上学」だと思われていた傾向が強い。

1票を持てる。修士論文があれば、博士課程に入ったあたりから、教室の中の立場は対等。そういう意味ではかなり学生の意識は高く、先生に指導を受けるというより、共同研究者でした。

アイデアが醸成された時代

——益川先生との出会いは？

小林 益川さんは5年上で、僕が学生するとき、大学院生でした。名古屋では、大学院生に学生の演習を任せ、問題を出すところからやらせる。益川さんが演習にやってきたのが、最初の出会いです。印象は、とにかく声がかい人。大学院に入ってから、助手だった益川さんをリーダーに、博士課程の大学院生2人とでちょっとしたグループを組んで論文を書き始めた。名古屋には、自然発生的にできたこんなグループがいくつかありました。益川さんは僕が博士課程1年か2年のころ、京都へ移りましたが、そのあと論文と一緒に続けて書いていました。

——研究をめぐる雰囲気は？

小林 70年以降は素粒子理論が体系立って、蓄積がものをいう、つまり、基本的なことをどれだけ勉強しているか、知識がものをいうようになりました。60年代は、素粒子はある意味でめちゃくちゃ。^{*2} 積み重ねが意味をなさない。新しい仕事をするという意味では若者と年寄りの差がなかった。ほかの分野からは、まともな研究者とは思われていなかった。やくざなものだと。目の前の現象だけつかまえて勝手なことをいってられるんですから。僕たちもずいぶんディスカッションしました。知らないことでも知ったかぶりして話したり、知ったかぶりしている

のを突っ込んでいじめてはおもしろがったり。それで鍛えられました。トレーニングの場として非常によかった。

大学院の後半、スタンフォードの電子散乱の実験からクォークが実体として存在することがわかってきました。そのころ、宇宙線の実験をやっていた日本のグループが寿命の短い粒子を見つけ、その正体をめぐって議論になりました。広島大の小川修三さんは、第4の粒子が見つかったのではないかと解釈し、質量がこのくらいならどう見えるか、日本のいくつかの理論グループが研究を始めました。僕も仲間と一緒に、そう解釈する仕事を大学院の残りの2、3年やりました。京都でも、益川さんや牧さん（牧二郎：京都大学名誉教授、元同大学基礎物理学研究所長）たちがやっていました。

——当時は、どこでだれが何をやっているか、どの程度わかっていたのですか。

小林 論文のプレプリントがポピュラーになりました。航空便だと高いから少しだけで、あとは船便。どうがんばっても数週間の遅れは出る。ある程度情報は伝わるが、今に比べれば、隔離されていた。国内では研究会は盛んで、日本中、どこにどんな学生がいて、どんな研究をしているか、何ヶ月かのスケールではよく知っていました。会って話を聞くのが、いい情報交換でした。でも、隔離されているメリットもあった、つまり独自の考えが育つ時間があったという気がします。それぞれのグループの個性が出たり、独自のアイデアが育ったり。もちろん、それ以前はもっと隔離されていたわけですが。標準模型ができる前段階でも、それほどポピュラーではなかったアイデアが、長い時間じっくり続けることで育っていった。隔離されていたことの効用かもしれません。

益川助手との運命的な再会

——京都へ移られたのは、益川先生がおられたからですか。

小林 いえ、オーバードクター問題^{*3}が大変な時代で、その年たまたま、京都大学に職があった。京都で益川さんと何か一緒にやろうじゃないかといって最初にやったのがCPの仕事です。クォークが実在のものとして確立するのは、標準模型が成立してから、というか、 J/ψ ^{*4}粒子が74年に発見されて以降ですが、基本的な実体があるとして、どういう相互作用をしていけば、全体が理解できるのか。そんなことを考えていたところへ、ワインバーグ・サラム模型^{*5}と呼ばれるものが出てきて、弱い相互作用も、くりこみ可能なゲージ場の理論で説明できそうだということになった。そこでゲージ理論の立場で弱い相互作用や相互作用全体を理解しようとなると、CPの面倒もみなければならぬ。CPの破れ^{*6}は64年に発見され、確認の実験がいろいろ現れていたところで、フェイクではないらしいとなっていたけれど、まともな理論はそれまではなかった。CPの問題をゲージ理論の枠組みの中で考えていくと、クォークが4個では足りないということになった。基本的な枠組みができれば、あとはロジックを詰めていくだけ。2、3ヵ月で論文を仕上げました。

——同じようなことを考えていた人はいたんでしょうか。

小林 弱い相互作用と電磁力、CPの破れをゲージ理論の立場でどう理解するかという問題設定をした論文は2、3あった。しかし、局所的にこうすればCPが破れる、というように、現象論として取り上げるものばかりで、全体のモデルとして考えるものはな

かったように思う。3年くらい後に、第3世代のタウ粒子が発見されたのを前提にして、6個のクォークでCPが破れるという、われわれの論文のことを知らずに書いた論文も出てきました。

——その時点で全体像を描こうというのは少数派だったのですか？

小林 それはよくわかりません。直前にチャーム（第4のクォーク）とおぼしきものの発見があって、われわれは、モデルという観点から弱い相互作用を考えていた。その延長上にあつたともいえます。ゲージ理論の立場でどう理解しようかと考えれば、自然の流れでした。変化の大きいときは、ちょっとしたバックグラウンドの違い、また、どういう環境で何をやってきたか、そうしたちよつとしたことが、やり方に影響すると思います。

——坂田さんの影響も？

小林 そういう議論を名古屋で長くしてきた蓄積は確かにあります。坂田スクールというか、坂田先生のような模型の考えとか、全体像を描こうという流れもあった。坂田模型のときは、そういう考え自体が新しかったわけですが。研究室でも、大きいことを考えようという雰囲気、直接ペーパーにならないようなところでも、そういう議論をしようという雰囲気がありました。

——それは、名古屋ならではの？

小林 独自のものを育てるには、ある程度の規模と、エネルギーが必要です。そういうものが当時の名古屋にあったかなという気がします。坂田的なアプローチと西欧的なアプローチとの対立があり、そのためにエネルギーを蓄えたということがあったかもしれません。坂田的な、実体的なアプローチに対し、西欧では、素粒子の内部構造という考えを排し、場の理論さえも否定して、



辻篤子（つじ・あつこ）
朝日新聞社科学部、科学朝日編集部、アエラ発行室、アメリカ総局などを経て、2002年4月企画報道部次長。現在は論説委員。1989年、マサチューセッツ工科大学ナイト科学ジャーナリズムフェロー。

直接的に測れる量であるS行列（散乱振幅）のみの関係として理論を構築しようとするやり方が流行っていましたから。

——ワインバーグ・サラム模型が出て、皆がいつせいに同じことをやり始めたというわけではないのですか。

小林 標準模型の立ち上がりの時期で、それぞれヒストリーをひきずっているから、皆ばらばらのことをやった。例えば、計算方法に関する論文だと思ってぱつと計算にとびつ

く人もいたし、われわれのように全体像を描きたいと、モデルを考える人もいて、ばらばら。まだまだユニフォームではない状況でした。

——益川先生との役割分担は？

小林 役割分担するほどの内容ではないんです。まず、基本的な枠組み、つまり、当時考えられていたクォーク4個ではだめだということをはっきりさせた。その後は、こういうものを付け加えていくことが可能か、2人でアイデアを出して、いくつかのサンプル

*3 オーバードクター問題

1970年ころ、理論物理学、とくに素粒子理論で博士号を取得しながら就職できない人が増え、問題となった。当時は就職がないのがわかっていながら理論物理学を研究するのは本人の勝手で、むしろ優秀な学生が高尚な問題ばかりに興味を持つという傾向が非難された。しかし、1990年以降の大学院重点化にともない、博士課程が増強され、大量の博士が供給さ

れるようになり、同じ問題がすべての分野で構造的・大規模に起きている（ポストドク問題）。対談で小林先生が強調しているように、研究者が専門的になって、総合的な判断ができなくなっている傾向が強く、それがポストドク問題の原因のひとつとなっている。総研大では分野横断的な総合教育を行っているが、さらに強化する方針である。

*4 J/ψ (ジェイ・プサイ) 粒子

1974年 Brookhaven National LaboratoryとStanford Linear Accelerator Center (SLAC)で同時に発見された新粒子。強い相互作用をするにもかかわらず寿命が長く、第4のクォークcとその反粒子の束縛状態であると結論された。これによってクォークの実在が広く信じられるようになった。これは「11月革命」と呼ばれている。

*5 ワインバーグ・サラム模型

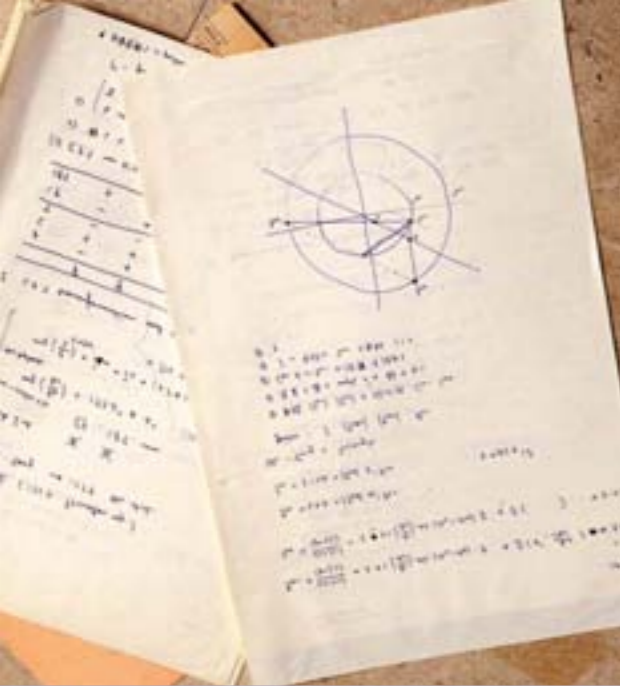
1967年、ワインバーグとサラムによって提唱された電磁相互作用と弱い相互作用の統一理論（電弱相互作用）。南部陽一郎による自発的対称性の破れ、Yang-Millsによるゲージ理論、Feynman・Gell-MannによるV-A相互作用などを統一し、くりこみ可能なモデルとなった。83年に電弱理論で予言されたゲージ場 W^+ 、 W^- 、 Z^0 が発見され、確定的となった。

*6 CP対称性

「C」とはCharge Conjunction（荷電共役）反転のことで、電荷が逆になる粒子と反粒子を入れ替えることを意味する。また、「P」はParity（空間反転）のことで、鏡に映した世界を意味する。1956年、弱い相互作用で起きる現象で、空間反転すると粒子と反粒子に違いがあるものが実験によって示された（P対称性の破れ）。そして64年、K中間子（ K^0 ）が崩壊する現象で、粒子と反粒子の違いが発見された（CP対称性の破れ）。

*7 タウ（ τ ）粒子

1975年、米国スタンフォード線形加速器センター（SLAC）で発見された第3世代のレプトン。電子（第1世代）、ミュー粒子（第2世代）に続く。これに対応するタウニュートリノは1998年にスーパーカミオカンデで発見された。



小林氏の学生時代のノート

をつくった。その1つが、クォーク6個でした。
——理論物理では共同の成果が多いようですが、共同研究のメリットは？

小林 ディスカッションすることで問題がクリアにできる。われわれの時代以降は大部分が共著の論文です。ほんとうに1人でやるのは、ユニークな個性というか、あるいは共同研究が苦手というのか。共同研究といっても、先生が学生にテーマを与えという関係のこともあるし、対等のこともある。益川さんとは、最初は先生と学生。途中からはどうでしょうか。益川さんがどう思っているかは知りませんが。名古屋の雰囲気の中で、口のきき方は対等でした。

——相性がいいのですか？

小林 よくわかりません。一緒にやったのは、なんとなく。考え方は違うし、激論したこともあります。益川さんは、独特の話し方をするので、初めての人は話していることがわかりません。一つのセンテンスに条件から結論まで、すべてをこめようとする。しゃべるのも難しい。書く物も難しい。英語は書かない。数学が得意なので、その面ではいつも頼っていました。

論文への確信と完成度への反省

——論文の手応えはどうでしたか？

小林 知られている4番目の粒子だけでは

だめだというのは、非常に強い結論だったから、ちゃんとやらなければいけないという気はありました。そして、そういう感覚がやっているうちに確かめられていくわけですから、ねらい通りだなと。その時点では、5、6番目の粒子はなく、1つのスペキュレーションでしかなかったんですが、自分たちとしてはちょっとおもしろい論文だとは思っていました。

——反響は？

小林 否定的ではないけど、反響もあまりありませんでした。おもしろいといってくれる人はいましたが、もっとも、反響がないのは普通です。論文は山ほど出る。よほど未解決の問題を解いたとか、すごい結論を出したというのでない限り、普通は、ああそうですか、と言う感じ。われわれとしては、何か新しいものがあるというのは、強いステートメントだという気はありました。75年にタウ粒子*7が見つかり、6個の可能性が出てきて、思い出してくれた人もいたようです。

——2年遅ければ予言にはならなかったし、一方では、予言がすぐに実証された、絶妙のタイミングでした。

小林 ラッキーというか、偶然というか。珍しい。こんなタイムスケールで見つかるなんて、本当に偶然ですね。もっとも、見つけた人たちは、われわれの論文のことなんて知らない。予言してもなくても、見つかったということです。予言がなくてもすんだとい

えば、そういうことになる。

——益川先生との共同研究はその後どうなったのですか？

小林 CPの論文が、京都での最初で最後の共同論文になりました。その後は、それぞれが学生と一緒に仕事をするようになった。益川さんは当時、ちょっと数学的な問題に凝っていて、それにどんどん突っ込んでいった。僕はそれにはちょっとつきあえないなど。標準模型の軽粒子について、宇宙論からどんな制限ができるかとか、いろいろなことに手を出していました。

——より物理的な方向と、より数学的な方向へ、その後分かれていくお二人の関心がうまくクロスした、最後の機会だったように見えます。

小林 ほんとうは、きちんと計算するところまでやるべきでした。その辺はわれわれの弱点というか、ま、これでいいやと思って、ほかのことに気をとられてしまった。もっとしつこくやるべきだったかもしれません。

——たとえば？

小林 欧州共同原子核研究機構(CERN)のグループが、われわれの論文に基づいて定量的に議論して、76年ごろ、計算方法という意味ではスタンダードになった論文を發表しました。その計算によって、実験とあっているかどうかを調べる。われわれにも腕力があれば、そこまでやるべきだったかもしれないと思います。

——計算は好きではない？

小林 面倒くさくなるといやなんです。簡単な議論で何か新しい結論が出るというところがおもしろい。技術がなかったからかもしなかった、と思います。

——独創的な仕事ができるのは20～30代の若いときといわれます。先生方もまさにその年代でしたが、やはり若かったからでしょうか。

小林 というより、時代のファクターの方が大きいような気がします。たまたま標準模型が完成する時期で、変化が激しく、経験や蓄積があまり意味を持たない。若い人も必死に勉強すれば対等にやれる。むしろ集

中できることの方が大切です。その意味では、年をとって、雑用が増えてくると、変化についていきにくくなるかもしれません。

——今は時代がずいぶん違いますね。

小林 60～70年代は、非常に激しく変化している時代で、やることはいっぱいあった。それぞれがいろいろなことをやっていた。たまたま、われわれは、やっていたことが当たったということです。今はある意味で枠組みが決まりすぎていて、皆が同じ方向に動いてしまう。その中でそれぞれのアイデアはあるが、大きくいえば、同じ方向。世界中が同じフェーズで同じ方向を向いているという傾向がある。コミュニケーションの問題もあるし、枠組みが非常に整理されたがゆえに、非常にユニフォームになっているという感じがあります。でも、重要な問題にみんなまでアタックしているわけだから、進み方が速いともいえる。そのかわり、困難に行き当たったときに、別の枝から新しい局面に対応できるような芽が出てこない。そういう危惧はあります。

実験で検証できない理論を確かめるには？

——CPの破れがBファクトリーで検証できるようになって、感慨は？

小林 B中間子でCPの検証実験ができるという話は、以前から、そのメカニズムに対する理論的興味は持っていましたが、現実の実験としては、K中間子の方が中心的な話題で、Bの方は半信半疑。Bファクトリーの準備には最初から関わっていましたが、新しい加速器の計画がスタートするかどうか、最後まで確信がないままでやってきました。そういう議論の陰に隠れて、自分のモデルの検証という思いはありませんでした。あまりに時間がたちすぎていて、自分の問題という感じはないんです。

——結果は予想通り？

小林 CPは、標準模型で残った、最後に検証すべき項目です。本当は、ずれていた方がニュースになるというか、インパクトは大きい。その方がおもしろいという感じはありますが、標準模型の期待通りになるのがペー

ス。どういう数字が出てくるか、最初は大変興奮しました。予想通りで落胆するというのも変ですが、当たり前の答えではつまらないという思いもあって、複雑な気持ちでした。

——実験で検証するのが難しい時代、理論のこれからの展開は？

小林 見つかった新現象が理論と合わず、いろいろ検討して、再度実験で試す。70年代は、かろうじてそれが可能だった時代でした。その後は、トップクォークが重すぎて見つからないとなると、実験と理論の間のやりとりは、ほとんど見られなくなってしまふ。エネルギーが届かないとどうしようもないので。80年代はそういう時代になった。90年代にトップが見つかったけれど、あらゆる傍証で質量まで予言して、ちょうどそこに出てきたので、理論へのインパクトはほとんどなかった。実験からのインプットがないのは、確かにきつ状況です。

90年代以降、理論は、それ自身の論理にしたがって、実験のインプットがないまますごい勢いで変わっています。それを進歩といえるかどうかは別として。標準模型より先の理論を構築しているわけですが、こういう実験をすればこういうふうに見えるはず、というのはどんどんたまるけれど、そんな実験はすぐには実現しない。幸か不幸か、いろんなバージョンが考えられるから、ある意味でタネはつきない。そういう中でどれだけアイデアのあるシナリオが書けるか。自然科学ですから、自然によって正しい方向を出していく、そうしたフィードバックがもっと短い周期であればいいんですが。理論は自分の内在する論理だけで動いているので、あるとき、現実からとんでもない方向に離れているといわれても、戻りがたいかもしれません。でも、不思議なもので、内在する論理で進んだものが、結構真実であることが多い。そこがおもしろいところでもあります。

将来の研究者像

——科学を取り巻く状況もずいぶん変わりました。今、学生だったとしたら、何をなさいますか？

小林 たぶん、皆と同じことをやるでしょうね。そのときそのときに話題になっていることをやらないと生き残っていけないという面もあるので。話題になっている問題には、それなりの理由があって、そのとき話題になっている。それを無視して、まったく独自のものがつくれるかという、それは難しいのではないか。それに抵抗して自分で何かやろうとしてつぶれてしまう例も多い。

——科学がどんどん細分化していくなか、個々の研究者もまた、狭い専門領域にとらわれがちだともいわれます。

小林 研究者は非常に専門家的になって、ほかの分野については素人と同じです。でも、学問がそれだけではだめ。総合化するとか、つなぐようなプロ、総合的な判断をするような学問分野が育つ必要がある。政府の政策決定でも、細かい専門知識ではなくて、バランスのとれた、ベーシックな科学的な判断ができることが大切です。そういう判断ができない役人が重要なことを決めるのでは困ります。今の大学はそういう人を育てるようになっていません。意識的にそういう教育をしなければならぬ。だいたい、文科、理科という分け方もやめなきゃいけない。文科系は科学音痴でも当然、となるとこの問題は解決しません。科学史も米国などに比べて少ないし、科学哲学も、もっともっと、現実の科学に基づいているいろいろ問題を考える必要がある。

——今の関心は？

小林 標準模型の先の問題として、ヒッグス場との相互作用や質量を支配するメカニズムで、なんとかアイデアを見つけられないか、やっています。戦略があるわけではないけれど。われわれの理論に関連しても、クォークはなぜ3世代なのか。われわれは3以上だといっただけですが、これもどこかで答えられなければならない。超弦理論や量子重力の枠組みの中で、議論はないわけではないが、まだ答えはありません。量子重力として最終的な答えが出てくるのではないかという期待はある。わからないことはいっぱいある。やることもいっぱいある。ただ、手がかりがない、というところでしょうか。