

## 素粒子物理学の100年

### ●はじめに

私が渡米してから47年という月日が経ちました。もう半生以上をアメリカで過ごしています。私は大正生まれですが、私の周囲では、祖父祖母など明治または明治以前生まれの人たちが一番古い世代でした。ですから私の心の中には、昭和人は私や明治人より若い世代がだという観念がありました。現在明治生まれの人もたまにはいらっしますが、私の周囲では私が一番古い大正人ということになります。

昭和にも戦前と戦後の区別があります。私は戦前と戦中に成人した世代ですが、われわれの世代以降の人たちに戦前と戦後が如何に違うかという話をしてもなかなか分かってくれません。目に見える物質的な違いよりも、もの考え方といったような目に見えない違いの方が私にはずっと大きいと思われれます。恐らく徳川時代と明治時代の違いも同様だったのではないのでしょうか。

そこで私は、これからお話をすることをすべての世代の方々にわかってもらえるように努力せねばなりません。

私は戦時中に大學を二年半で繰り上げ卒業し、三年間軍隊に入りました。しかし幸いにも戦地に赴くことはなく、一年間工兵隊で訓練を受けたあと、陸軍の研究所でレーダーの研究に携わりました。最後に勤めた宝塚付近の研究所では、大阪大學などの教授がたが研究に参加されていました。そのおかげで、一流の大學教授の方々に直接接触し、実際問題をいっしょに考え、実地試験などにも参加したのは貴重な経験でした。私は軍服を着ていたので、教授の方たちは私を“南部中尉殿”と呼びました。照れくさかったのですが、彼ら先生たちと私の関係は実に快いものでした。アメリカでも原子力研究に携わった若い人たちは世界一流の学者たちと研究をともにすることで刺激され、有能な人々が育ってきました。そう言う意味で私は非常に運がよかったと思っています。

サイエンティストはいつでも前向きの姿勢で楽道家です。先のことしか考えません。特に若いときには、過去の業績は一度知ったらもう興味をもちません。ところが、年を重ねていくうちに先輩たちの偉大な部分に気づきはじめ、過去を振り返ることの重要性をも悟るようになります。そこで今日は過去を振り返りつつお話をしようとおもいます。

### ●昔の日本は外国に対してどのような観念を持っていたのか

世界は2000年を迎えました。年号の切れ目はさした意味がないかもしれませんが、物理学にとっては、100年前の1900年は大きな切れ目でした。それを説明するとともに、私の体験に触れながら、学者とはどんな人間で、どんな見方をし、どんな研究をしているのかについてお話しましょう。

たとえば現在では、アインシュタイン、ハイゼンベルグ、ディラック、パウリ、フェルミ、湯川、朝永、坂田など過去の大物理学者たちに直接接触した人間はもうあまりないでしょう。ですから私の体験を後輩に伝えることも私の義務であると思っています。

まず、日本が世界の学会にどんな役割をはたして来たのか、明治維新、つまり全世紀の後半まで遡って見ましょう。その頃の日本は、外国に対してどんな観念をもち、また外国は日本に対してどんな観念を抱いていたのでしょうか。

私が学生の頃、高木貞<sup>ト</sup>という先生がいらっしました。日本が生んだ大数学者の一人で、第一次世界大戦

のころに整数論に関する有名な仕事をされました。私の通っていた東京大学では、毎年12月25日、ニュートンの誕生日に「ニュートン祭」を開きます。そこに先生をお招きし、お話をしていただいた時のことです。

先生は19世紀の終りにドイツの有名な数学者ヒルベルトのもとで学ばれました。ある日、町の人が先生の専門を聞いて“サルでも数学をやるのか”と言ったそうです。日本人はまだそういう風に見られていたのかと、先生は驚かれたそうです。

物理学者の長岡半太郎先生は、日本の物理学を築いた人の一人で、専門は原子物理、地球物理、磁気、光学、物理数学など広い範囲にわたっています。発表された論文や記事の数は800にものぼります。一生涯を通じて毎月一つは書かれていたことになります。

これは有名な話ですが、彼は大学に入る前、日本人にサイエンスを研究する能力があるかに疑問をもっていました。それで彼は一年休学して中国の歴史などを調べ、その結果東洋人にも才能があることを確かめて物理学を学ぶことにしたそうです。その長岡先生が外国に留学されたとき、“ヨーロッパ人がなんだ、こっちの方がもっと立派な仕事をしてやるぞ”と言う気概をもって勉強されたようです。これは森鷗外や夏目漱石などの文人がヨーロッパに留学したときの姿勢にも通じています。

最近、テレビの「徳川慶信」などを見て、明治時代の人たちの意味ごみの凄さを感じることがあります。だから過去を振り返ることは決して意義のないことではないと痛感しています。

#### ●素粒子物理学は20世紀の物理

では、素粒子物理学がなぜ20世紀(1900年頃)に始まったといわれるのかという具体的な話をいたしましょう。17世紀頃に生まれたいわゆる古典物理学は、現在の自然科学の基礎を築きました。古典物理学はまず、われわれが日常見ているあらゆる天体、物体の運動や重力をつかさどる、いわゆるニュートンの法則から始まりました。19世紀に入って、電磁気に関する新しい物理学の分野が発展し、電磁気現象の法則はマクスウェルによって完成されました。つづいて物質の熱や温度の性質を記述する熱力学も生まれました。これらの法則は現在でも日常のすべての問題に使われて何の支障もありません。これらがすべて完成した前世紀の末頃に一般の物理学者の間では「もう物理学がなすべきことは終わった」という観念が生まれたようです。

アメリカのノーベル賞受賞者第一号アルバート・マイケルソンは、19世紀の後半、光の速度が、運動している観測者から見ても変わらないことを発見した人として有名ですが、彼いわく“物理学の本質はすべてわかってしまった。だから今後は、測定をより精密にし、精度の桁数を上げることが主な目的だ。”と。確かにだんだん精度を上げて行くと、どこか計算に合わないところがでてくるかもしれません。それを追求してゆくと、新しい事実が見出されることがあります。たとえば、空気中の窒素の重量を精密に測定した結果、その中にアルゴンという新しい元素が発見されたのは有名な話です。

しかし一方では、まったく予期しなかった新しい現象が突然現れることもあります。そのような例が矢継ぎ早に出てきたのがちょうど20世紀の初めでした。

20世紀の初頭は、素粒子物理学や相対論のいわば夜明けでした。全く思いがけないことが次々に出てきました。ミクロの世界の物理法則である量子力学もそこから生まれました。それが100年の間に進歩のあげく、素粒子物理は今ほもはや完成間近だという予感がされています。不明な点は残っているものの、現在、素粒子に関しては、われわれが実験・観測し得るものを記述する理論はほとんど完成したという状態にあります。

では物理学は終わったのかというと、私は絶対にそうだとは思いません。19世紀から20世紀に入ったときのようなことは起こらないにしても、そこで21世紀に向けて何が期待できるでしょうか。それについてはあとでお話することにしめよう。

### ●19世紀後半の進歩の波に乗った日本

20世紀は、素粒子物理学の世紀であり、日本の学者が世界の舞台で徐々に本質的な貢献ができるようになった時代でした。ではそのような事情はどのようにした発展したのでしょうか。そのあらましをまずお話しめよう。(付表1)

日本には、社会構造がガラリと変わるという3つの大きな革命の時期がありました。「革命」という言葉は、私の学生時代にはうっかり言うと警察に捕まる危険がありましため、本日は敢えて使わせていただきます。

まず、ヨーロッパではルネッサンスが15世紀頃から始まり、徐々に近代化が行われめました。日本では17世紀に徳川家康のような偉大な政治家が出て、安定した社会構造を作り上げめました。鎖国ではあるものの、西洋の影響を徐々に受け始めたときでもあります。医学、天文、数学などの分野に篤志家が生まれ、独自の研究をして進歩を見せていました。そうした下積みのおかげで、明治維新という外国からの脅威があつたときでも、すぐ目覚めて対抗できる準備ができていたのです。それから4分の3世紀あと、太平洋戦争によって社会構造がまたガラリと変わり、まだ残っていた封建的要素がなくなりました。

1. ここで私が第1に主張したいのは、19世紀の日本には近代の自然科学を受け入れるある程度の準備ができていたということです。実際西洋に比べてそれほど立ち遅れていたわけではなかったということです。つまり幸いにして日本は19世紀後半、科学の大きな進歩の波にうまく乗り込むことができたのです。

すでに申しめしたように、17世紀にニュートンが力学を創りあげ、それに伴って天文学が発達しました。電磁力学、光学は19世紀になって完成しました。数学はニュートンとライプニッツを元祖とする微積分から物理学に不可欠な道具として発達しました。これらの学問はいまでも続いています。しかし素粒子物理学はやつと今世紀になって発達したものです。

2. 次に第2の主張です。

物理学と技術とは密接に関係しています。技術が進むと物理学の研究も進歩し、逆に、物理学が進むとそこから新しいアイデアが出てそれが新しい技術を生みます。つまりお互いに助け合つて進んできたわけです。

数学と物理も同じ関係にあります。ニュートン以来物理学は数学の進歩を促し、両方が手を取り合つて大きな進歩を成し遂げめました。偉大な数学者はまた物理学にも偉大な貢献をめしました。

日本では、徳川時代に和算が生まれめました。関孝和のような有能な数学者が多数出て、それなりに進歩めしましたが、残念なことには知的遊戯に終つて科学技術と何も結びつかなかつた点が致命的欠陥でした。

明治時代の日本のような後進国が外国に追いつくためには、科学技術を国策として推し進めざるを得ません。19世紀のヨーロッパでもドイツがまさしくそれに近い状態でした。イギリスなど、産業革命が早く始めた先進国では自然に科学が発達めしましたが、ドイツはそれに追いつくために国策として科学技術の振興をやらざるを得ませんでした。これは日本がヨーロッパの科学技術を一生懸命に取り入れようとした時期と同じ頃です。そしてそれが量子物理学の発展に大いに貢献する結果になりました。

## ●現在に分かっている宇宙の現象

ここで話題を転換して現在に戻ります。今の物理学で宇宙についてどれだけのことが分かっているのでしょうか。

物理学は物理現象を数量的に記述しようとします。細かい数値を測定によって決めることは大事な役目です。測定が精密になれば答えが小数点何桁まで正しい、という風に桁数が多くなる。しかし物理にはもう一つ大事な反面があります。それは現象のおおざっぱなスケールを知るということです。自然界には、宇宙全体のスケールから素粒子のスケールまでさまざまなスケールの現象があります。たとえば宇宙の大きさが全く分かっていないとき、ただ大きいという代わりに、日常の現象に比べてどの程度の大きさと具体的な質問をせねばなりません。そのために先ず知るべきことは、桁数でいくらかということです。細かい数字は気にしない。物理学者はこれを order of magnitude、または単に「オーダー」呼んでいます。即ち桁数には2つの違った意味がある、1つの現象の精密な記述と、異なった現象たちのおおざっぱな大きさの関係と。前者では、何桁まで正しいのか、後者では何桁違うかが問題です。今日のお話で使うのはもっぱら第2の意味の桁数で、何桁も違うときには、1桁ぐらいの違いは問題にしないオーダーの議論です。まずオーダーがわかったら、次に観測数値をだんだん精密にして行くのが物理学者の仕事なのですが、1桁精度を上げるためには時間も努力もそれに比例して上がると思ってよろしい。

自然界のあらゆる現象のスケールをcmで表すと、一番大きいものから一番小さいのまで60桁の間にひろがっています。その中にはたくさんの階層があります。つまり特定のスケールのところで特定の現象がおきているのです。(付表2)

一番大きいスケールは宇宙の大きさと、 $10^{27}$ cm、即ち27桁と覚えていただければ結構です。そこから10桁下がって見ましょう。 $10^{17}$ cm は1光年、これは一番近い星までの距離です。それからまた10桁下がった  $10^7$ cm、つまり100km になると、われわれの感覚でも理解できる大きさです。そしてもう10桁下の  $10^{-3}$ cm というスケールは60桁のちょうど真中で、細胞などで代表される生命現象の場だといってよいでしょう。

原子など、いわゆるミクロの世界はそれから5桁下がった  $10^{-8}$ cm から始まり、素粒子と量子力学の世界に入ります。20世の初めにこの原子の世界がわかってきました。100年後の現在分かっているのはこれからさらに8桁下がった  $10^{-16}$ cm までです。しかし理論的にはまだまだ小さい領域が考えられ、もっとも小さいプランクの長さと呼ばれるものは  $10^{-33}$ cm です。

量子の世界では現象の大きさとそのエネルギーとが反比例する関係にあるので、小さい領域には大きなエネルギーの現象、すなわち重い質量の素粒子が登場することを意味します。素粒子の研究にますます大きなエネルギーの加速器を必要とするのはそのためです。しかしそれにはますます大きな規模、費用、時間や人的資源が必要とします。ではまだ17桁先のプランクの領域に到達するのはいつのことでしょうか？ 仮に今までの調子で行けたとしても、まだ1-2世紀先ということになります。

現在物理学の世界には4種類の基本的な力が知られています。マクロの世界で一番重要な力は重力、すなわちニュートンの万有引力です。原子の世界に入ると電磁気の力が重要になります。より小さな原子核の世界では強い力と呼ばれるものが圧倒的になります。4番目に弱い力というものがある、これは放射能などの現象を引き起こし、物質を不安定にする不思議な代物です。

## ●素粒子の階層

次に素粒子の世界の階層性を見てみましょう。(付表3)

水の分子は水素と酸素が電磁氣的な力で結合してできます。水素や酸素原子一つ一つをみると、その中心に原子核があり、その周囲をいくつかの電子が回っています。電子と原子核も電磁力で結ばれています。芯の原子核は原子の大きさに比べると6桁も小さいもので、その中には核子と呼ばれるものがすし詰りのように入っています。核子にはプロトン(陽子)とニュートロン(中性子)の二種類があり、それらを結合する力は核力と呼ばれます。原子に比べて6桁も小さい距離に核子を押し込めるためには、核力は電磁力に比べて6桁も強いエネルギーを持つものです。この力は核子同志がメソンと一般に呼ばれるいろいろな粒子をやりとりして生まれるものです。メソンは湯川博士がはじめて予言された新しい種類の粒子です。

今度はプロトンやニュートロンの一つ一つをみると、中にクォークというものが3つ入っており、それが前に述べた「強い力」で結ばれています。メソンもまたクォークと反クォークとが「強い力」で結合したものです。強い力の量子はグルーオン(つまり糊子)と呼ばれていますが、これは電磁力の量子が光子と呼ばれるのに相当します。

核子に陽子と中性子の二種類があるのは、クォークに二人の兄弟があつて、それらの異なった組み合わせで構成されているからです。これに対して、実は電子の方も、放射能などで放出されるニュートリノと呼ばれる非常に軽い中性粒子と兄弟関係にあります。さらにこれらの兄弟たちも3つの違った家族(世代ということもある)に属するものがあります。日常の物質を作っているものは第一家族の粒子たちだけで、他の家族のものはずっと重く、わざわざ作らない限り見かけられません。これらは不安定で第一家族の粒子たちにすぐこわれてしまうからです。このような現象は放射能などと同じ種類のもので、「弱い力」によって引き起こされます。弱い力の量子は2種類あつて、W-ボソン、Z-ボソンと呼ばれています。

これが現在知られている素粒子の世界の全貌で、それをつかさどる法則は標準理論という名で知られていません。

#### ●過去の研究者たちの功績

ここで私の主題に入つて、過去にどんなことが起こつたかについてお話いたします。(付表4-7)をご覧ください。100年と申しましたが、それを理解するため、また日本との関係を見るためには19世紀のことから説明する必要があります。

イギリスの偉大な学者ファラデーは1831年、つまり徳川の末期に電磁氣の基本法則を確立しました。

間もなくフランスのダゲールが写真術を発明しました。写真が日常生活のみならず、科学技術にどれほど重要であるかは皆様もご承知のとおりです。

またドイツのガイスラーによって、高い性能のポンプで高い真空を作ることができるようになりました。大學で物理を勉強した方は御承知でしょうが、真空は電子やイオンなどを作つて物質の構造を調べるのに不可欠なものです。

それから何万ボルトという高い電圧をつくることも可能になりました。

ドイツのブンゼンは、化学実験には必ず必要なブンゼン・バーナーで知られています。熱は出ても色のでないガスの炎を作ることは1つの大革命でした。炭を燃やすと赤い色の光がでます。そのスペクトルを調べようとしても、背景のガスに色があつてははっきり分析できません。ブンゼンのおかげで、いろいろな元素のスペクトルを観測し、その性質を調べることができるようになったわけです。

この頃ペリーが来航し、15年後に明治維新が始まります。

維新の翌年、明治2年(1869)には、まだ後進国だったロシアで、メンデレエフが元素の「周期律」を発見しました。

明治6年(1873)にイギリスのマクスウェルは、電磁理論の基礎になる電磁気の「マクスウェル方程式」を完成しました。これは力学におけるニュートンの方程式に相当するもので、彼の理論によって、光が電磁気現象の1つであることが予言されました。

次に、物体の熱的性質をつかさどる熱力学が生まれました。物体を熱すると光が出て、その色や強さが温度によってどう変わるのかという、光の熱力学もドイツのシュテファン、ボルツマンなどによって進められました。この方面の進歩が主にドイツで発達したのは、後進国だったドイツが産業を発展させるためにこういう研究に力を入れたからです。やがて光の熱力学に大きな破綻がみつかり、これが量子論へのきっかけとなります。

明治20年(1887)のマイケルソンの実験によって「光速度の不変」が発見されました。これは20世紀に入ってアインシュタインの相対論の基礎になります。

翌年にはドイツのヘルツが電磁波を発見し、マクスウェル理論の正しいことが証明されました。

明治25年(1892)には、オランダのローレンツが電磁気の単位、「電子」という概念を導入し、電流は電子の流れだという「電磁気の電子モデル」の仮説を打ち立てました。

そして日清戦争の最中だった明治28年(1895)にはイタリアにマルコーニが「無線電信」を発明し、同年、ドイツのレントゲンが「X線」を発見しました。これも物理の実験にとって革命的なことでした。高温や高電圧かける代わりに、X線を照射して一定のエネルギーの電子を打ち出すことが可能になり、急速に研究が進歩しました。

このあたりまでは、すべて古典物理学、すなわち力学と電磁気学と熱力学とだけでおよそ説明ができる現象でした。そしてこれ以上物理学は何もすることはしないのではないかとおもわれていた矢先1890年代から、思いがけないことが次々にでてきたのです。

明治29年(1896)、「放射能」という現象がフランスのベクレルによって突然発見されました。これは写真乾板による偶然の発見でした。

明治30年(1897)には、イギリスのトムソンという学者が「電子」という粒子が実際にあることを確認しました。つまり真空管の陰極からでる放射線が粒子であることがわかりました。これが素粒子第1号です。およそ100年あまり前のことです。

同年、ドイツのブラウンがテレビなどの映像管「ブラウン管」を発明しました。

明治32年(1899)には、原子は実際にどんな構造をもっているか、すなわち原子の中にはどのようなものが入っているかという「原子モデル」をトムソンが考え出しました。

さらに同年、ローレンツが相対論の基礎になる「ローレンツ変換」の理論を立てました。

このように思いがけないことが矢継ぎ早にでてきて、20世紀の初めまで続くこととなります。

1900年(明治33年)は量子論が誕生した年です、ドイツのプランクが「光量子」という仮説を立てました。古典力学に基づいた熱力学では、物体を熱したときに出る光のスペクトルを説明することができなかったので、切羽詰まって考案されたものですが、それは光が単なる波ではなく、そのエネルギーには最小単位のかたまりがあるという仮説でした。

明治35年(1903)、イギリスに留学していた長岡半太郎が「原子の土星モデル」というものを発表しました。原子の中央に原子核があって、そのまわりを土星の輪のように電子が回っているという仮説でした。

明治38年(1905)、アインシュタインの有名な相対論、すなわち時間と物指のスケールが運動状態によって変化する事、光は粒子であるという「光粒子の仮説」など、革命的な理論を次々に発表しました。これはちょうど日露戦争が終ったころです。

明治 44 年(1911)にはイギリスの大実験家ラザフォードが原子には「原子核」があることを発見し、その大きさのオーダーを決めました。

大正2年(1913)、デンマークのボーアは「原子構造の量子論」を提唱して、電子がどんな風に核の周り運動し、光のスペクトルを発生するかを説明しました。これによって、いろいろな元素の化学的性質が説明できるようになったのです。

大正 5 年(1913)、アインシュタインは宇宙論の基礎になった有名な「重力場の理論」を提唱し、数年かけて完成しました。

その後、光が波と粒子の性質をもっているように、電子のような粒子にも波のような性質があるという仮説をフランスのドブロイが立て、間もなくそれが立証されました。いわゆる「波動と粒子の二重性」というものは普遍的であることがわかりました。日本の菊池正士博士もこれに貢献した一人です。

大正 14 年(1925)には、オランダのウーレンベックとハウスマットが、原子のスペクトルの性質を説明するために、電子は単なる点ではなく、コマのように角運動量をもっているという仮説を発表しました。

同じ年、ドイツのハイゼンベルクとオーストリアのシュレーディンガーが「量子力学」を発見しました。量子力学は素粒子の世界をつかさどる根本法則で、マクロの世界におけるニュートン力学やマクスウェル電磁力学の方程式に代わるものです。これ以後、原子の物理学はあっという間に完成しました。

昭和の時代は素粒子物理学の時代です。原子核の構造が明らかになり、たくさんの新粒子たち、即ち陽電子、陽子、中性子、メソンなどがぞくぞくと発見されてきて、現在に到っています。

昭和 3 年(1928)相対論的な電子の波動方程式をイギリスのディラックがまるで手品のように創りだしました。電子は電荷のみならず、スピンという性質が自動的にでてきます。仁科芳雄博士がボーアのところに留学中、スウェーデンのクラインと共同で発表した、有名なクライン・仁科の公式はディラック方程式を電子と光の散乱に応用したものです。

昭和5年(1930)から、いわゆる高エネルギー物理学が始まります。というのは、まずアメリカのローレンスがサイクロトロンという加速器を発明し、高いエネルギーでの実験を可能にしたからです。現在のシンクロトロンにいたるまで根本原理は同じですが、反応のエネルギーは 10 年に 1 桁上がるという、いわゆるリビングストンの経験則に従って高くなっています。

昭和 7 年(1932)にはイギリスのチャドウィックが原子核の中に中性子を発見しました。これによっていろいろな原子核は 2 種類の核子、即ち陽子と中性子から成っていることが判明しました。

つづいてアメリカのアンダーソンが宇宙線の中にディラック方程式が予言していた陽電子の存在を発見しました。物質粒子に対して、その反粒子というものも存在します。陽電子は最初の反粒子です。

昭和 9 年(1934)放射能の量子論がイタリアのフェルミによって与えられました。弱い相互作用の理論の始まりです。

昭和 10 年(1935)湯川博士の中間子仮説ができました。核力の量子力学の始まりであるとともに、これが素粒子研究方法の新機軸となったことは後でお話します。

昭和 12(1937)年アメリカのアンダーソンとネダマイヤーによってミューオン( $\mu$ )という新しい素粒子が宇宙線の中に発見されました。最初は湯川の予言した粒子だと思われていましたが、これではいろいろ矛盾があり、やがて電子の兄弟であることがやがて判明しました。ミューオンは第 2 家族の基本粒子のはしりでした。

昭和 13 年(1938)、ドイツのハーンとシュトラスマンが核分裂の存在を発見しました。御承知のように、これが原子力時代の始まりとなりました。この年はたまたまヨーロッパでは世界大戦の暗雲が立ちこめていた時で、ハイゼンベルグの下に留学していた朝永は急いで帰国せねばなりませんでした。一方、この発見が報道されると、世界中の物理学者はすぐ原子力と原子爆弾の可能性に気がつきました。アメリカのコロンビア大学に亡命したばかりのフェルミは、12 月に到着したポーアから核分裂のニュースを聞くと、即座にその追試をやりました。翌年 4 月にはアメリカ物理学会で既にたくさんの学者の発表が出たのですが、その年に第二次世界戦が始まり、原子力の研究は秘密状態に入ってしまった。後に日本でも、仁科博士のグループが理化学研究所で原子力研究に取りかかることになったわけです。

このように、1930 年代は経済的大恐慌も加わり、世界中が暗黒時代でしたが、不思議なことに原子核物理学が大きな発展をし、また日本の物理学者たちが世界の舞台に登場してきた時代です。

昭和 16 年(1941)太平洋戦争が始まったあと、昭和 17 年(1942)のは坂田博士の2中間子論が出ました。即ちさきに述べた湯川中間子と宇宙線の中のミューオンとは別物だという解釈です。

昭和 18 年(1943)朝永博士は「超多時間理論」という考えを発表しました。素粒子の性質を相対論的な量子力学で取り扱うと答が無限大になることがあります。戦時中から朝永はこの理論を発展させ始め、これによって無限大の問題をうまく処理できることを示しました。しかし彼の仕事は戦時下の世界には伝わりませんでした。

世界大戦が終わった後、昭和 22 年(1947)イギリスのパウエルは宇宙線に曝した写真フィルムの中で湯川中間子、現在パイオン( $\pi$ )、またはパイ・メソンと呼ばれている粒子が作られ、これが直ちにミューオンに崩壊することを見出しました。感度の高い乳剤の開発の賜物でした。

同じ年、アメリカのラムは、戦時中のレーダー技術の進歩を応用して、いわゆるラム・シフトと呼ばれるものを発見しました。これは水素原子のスペクトル線の異常な「ずれ」のことで、今までの理論では説明できなかったことなのですが、アメリカのシュウィンガーとファインマンは朝永理論と同じ考えをそれぞれ独立に展開してこれを見事に説明し、いわゆる量子電磁力学(QED, quantum electrodynamics)を完成しました。それを可能にした無限大の困難の解決法は「繰り込み理論」と呼ばれ、すべての素粒子理論に通用する根本原理の 1 つになっています。

昭和 23 年(1948)頃から続々と新しい素粒子が宇宙線や大加速器によって発見されはじめました。ストレンジ粒子と呼ばれた粒子族を皮切りとして、いろいろなメソンや核子の兄弟など、いわゆるハドロンたちが次から次へと登場し、ハドロン物理の黄金時代が始まります。新しい粒子たちが現れると、先ずそれらの間に何か規則性を見出す努力がなされます。中野・西島とゲルマンがストレンジ粒子に関する法則を発見し、それが発展して、アメリカのゲルマン、イスラエルのネーマン、日本の池田・小川・大貫のグループ、山口などの人たちによってSU(3)の対称性という規則性が確立しました。また粒子の数がどんどん増えてくると、これらハドロン自身が何かの複合体ではないかという疑問も生じます。この考えに従ってフェルミ・ヤン、続いて坂田の複合モデルが提唱され、昭和38年(1963)アメリカのゲルマンとツワイクとによる、「クオーク」という仮想的な基本粒子の導入によって現在の標準理論に到る道を開きました。

これから先はあまりに事件が多いので、いちいち羅列することを避け、その代わりこれらの発展を支えてきた素



粒子論の指導原理ともいうべきものを紹介したいと思います。

それは次のように要約できます。

1. 対称性の原理——>ゲージ場
2. 対称性の自発的破れ
3. 繰り込み可能性

自然に対称性があるという観念はギリシャ時代に遡る古いものです。円や正多角形が対称だとういことは、数学的には中心の周りに回転しても形が変わらないという風に定義されます。近代物理学における対称性の役割はもっと積極的なもので、これも実は1世紀ほど前に始まりました。ご存知のように、結晶にいろいろな規則的な構造がありますが、それが結晶の電磁気的な性質にも反映されることが示されます。また、空間には等方性、等質性などの対称性が考えられます。相対論が出てからは、光の速度が座標系によらないという、時間空間の対称性も認識されました。マクスウェルの電磁気方程式が時空の対称性を表現していることが、実は相対論の出発点だったのです。

これらが先例になって、素粒子の世界の基本法則を探るときに、いろんな粒子に間の対称性または類似性を数学的に表現することが1つの常套手段になりました。対称性は粒子間の力の性質にも当然反映されるべきです。そこで再びマクスウェルの方程式を手本にして、ゲージ場の一般論が出来上がりました。

しかし実際の自然現象には理想的な対称性はあまり見当たりません。ここで2番目の対称性の自発的な破れという概念が救いに出ます。これは自然の雷同性ともいうべきもので、丸いテーブルを囲んだ宴会の席上で、右と左のナイフ・フォークのセットが同じなのでどちらを取るべきか迷っているとき、誰かが右のものをとると皆がそれに倣はざるを得なくなり、左右の対称が破れるのに似た現象です。大きな結晶が一定の結晶構造を持っているのもそのためです。

3番目の繰り込み可能性というのは、わかりやすく説明しにくいものですが、いろんな理論を考えると、上に紹介した朝永たちの処方に従って何でも計算できるようなものでなければならない、という条件で可能性を絞ることで、後で述べる素粒子の標準理論はこれらの3つの指導原理を満たすもので、1960-1970年代に完成されました。

#### ● 物理学はいくつかの段階を経て発展する

私の世代は、湯川、坂田、朝永博士など、日本の大物理学者の業績に刺激され、彼らの主張や考え方から多分の影響を受けました。ここで湯川、坂田博士たちの協力者であった武谷三男博士の「3段階論」を紹介しましょう。私は今でも彼の言葉が有益だとおもっているので、よく学会などで引用します。

“物理学の進歩は3つの段階を経る。それらを次々にたどって、またもとと同じ段階に戻り、これを何度も繰り替えるものである。そして素粒子物理学に特にこれがあてはまる。”

この言葉が重要なのは、われわれが研究者として今どの段階にあり、次の段階ではどうなるだろうかをいつも意識して、将来を予測していなければならないと、いうことを教えてくれるからです。つまりわれわれは、目先のことだけにとらわれず、大きな視野をもつことが必要なのです。

3つの段階とはつぎのようなものです。

何か予期しない新しい現象が見つかったとします。研究者の先ずなすべきことは、その現象の性質を調べ、その

中に何か規則性という手がかりを見出すことです。これが第 1 段階です。しかし規則性を見出して、公式を作っただけではだめです。実際にその公式が何を意味するかを調べなければなりません。つまり背後に何かのモノ、実体があって、そのモノの性質の反映として規則性がでてくるのではないかということを考えなければなりません。たとえば、任意の 2 つの物質、AとBが化合してCという物質になるとき、Cの重さはAとBの重さの和になることを発見し。さらにこれらの重さの比がいつも整数の比になっていることが判明したとします。これは何を意味するのでしょうか。

これを考えるのが第 2 の段階、すなわちモデルを作る段階です。今の場合は、すべての物質が何か保存されるモノの単位、即ち素粒子(現在の知識では陽子と中性子)から立っていることを示唆します。(しかしこの法則は厳密ではない。いわばオーダーの議論です。観測をもっと精密にすると、食い違いが見えてくる。あとで述べるように、これがまた新しい現象になるわけです。)

昔の中国の天文学では、日食や月食の観測をし公式を作って、それらが起きる日時を予言するという点では非常に進んでいましたが、その公式が何から出てくるかという意識がありませんでした。つまりモデル構成という意識がなかったためにそれ以上進歩しなかったのです。

しかしモデルだけでは本当の物理にはなりません。それを記述するための精密な数学的理論がなければなりません、たとえばニュートン力学のような。数学的理論が発明されれば1段落ですが、さらにどの現象を持ってきても、この理論を適用すれば正しい答えが出ることを確かめねばなりません。そしていつも間違いがなければ、初めて理論が正しいと物理学者は確信するようになります。

これが第 3 の段階で、物理が終わったという態度が出始めるのはこのときです。ところが実際には自然はそう簡単なものではありません。実験の精度を上げて行くうちに、理論との食い違いが現れたり、新しい実験をすると、今までの理論では説明できないまったく新しい現象が見つかったりします。そうなると、また振り出しに戻って、次のサイクルでもう一度3つの段階を繰り返さねばなりません。

これが武谷博士の主張ですが、実際今世紀の素粒子物理の発展を振り返ると、まさにわれわれが経験してきた事実でもあります。坂田博士は、“このことを意識しない学者はだめだ。人よりも先んじようと思えば、そういう心構えをもつことが重要である”と強調され、実際にそれを実践して大きな成果を上げられました。最近、ニュートリノ物理の発展などに伴って彼の業績は世界的に再認識されてきました。

#### ●理論家としての3つの研究方法

今度は私自信の観察するところを述べさせていただきます。

これは理論家だけに当てはまるものですが、物理学者にも人によって 3 つの異なった研究方法または態度が見られるということです。これを私は3つのモードと呼びました。

その1つは「アインシュタイン型」です。“ある現象を説明しようとする際、自然はこうゆう原理に従う筈だ”という仮定に基づいて理論を創って行く立場です。いわば上から下へ(top down)の立場です。アインシュタインの重力理論はまさにその例です。“一般に空間は曲がっていてもよい。曲がった面の上ではボールがまっすぐに走らないのと同様に、天体の周りの空間が曲がっているから重力があるように見えるのだ”と彼は考えて重力理論を打ち立てました。

第 2 のモードは「湯川型」という考え方です。一口でいえば、“新しい現象の背後には、深い理由は別にして、何

か新しい場や粒子がある”という作業仮定 (working hypothesis) から出発する立場です。下から上へ (bottom up) の立場ともいえます。

ヨーロッパの科学の伝統には“不必要な仮定をその都度勝手に導入すべきではない”という、もっともな態度があります。原子核が発見されたとき、原子核を結合している力は何かという問題が生じました。そこで、当時のヨーロッパの学者たちには、“あらゆる物質は、既に知られた電子、陽子、中性子から成り立っている。これ上の粒子を仮定するよりも、むしろ新しい現象は新しい理論、恐らく量子力学に代わるもの、で説明すべきだ”という先入観がありました。原子の構造の場合、新しい量子力学が必要だったのですから、無理もないかも知れません。

湯川博士は逆に、“すでに完成された量子力学をそのまま受け入れ、その帰結をあくまで追求する”という立場を取りました。すると、核力のような新しい力の場には新しいが量子が付随していなければならないこととなります。すなわち彼は核力を説明するために、中間子、すなわち現在のパイ ( $\pi$ ) メソンの存在を仮定しました。

その後 50 年間の素粒子物理学の発展で、湯川が予想したよりもはるかに多くの新粒子の存在が判明しました。湯川の考え方は今では理論家の常識となっていることですが、当時は革新的なアイデアでした。その意味で、湯川博士は現在の素粒子理論の生みの親といっても過言ではありません。

もっとも、素粒子論の初期にこの考え方を実践したのは実は湯川だけではありません。彼以前にパウリがニュートリノの存在を仮定しています。放射能の現象で出てくる電子のエネルギーの分布を説明するために、“なにか検知できない中性粒子もいっしょに出ると仮定すれば理解できる”と主張しました。

湯川理論がでた後で、彼の仮説に相当すると思われる粒子が宇宙線の中で発見されましたが、だんだん調べて行くと、理論に合わないことが出てきました。多くの学者が理論を改造してこれを説明しようとしたのですが、坂田昌一博士は湯川博士のメソン以外に新しい粒子 (現在のミュー ( $\mu$ ) 粒子) があるという「2中間子仮説」によって問題を見事に解決しました。素粒子の数を成るべく増やしたくないという態度はなかなか抜けないものです。

3 つ目のモードは「ディラック型」です。「天降り型」ともいえます。イギリスのディラックは数学的、独創的な天才で、量子力学の初期に、電子のディラック方程式というものを手品のように創ったことでよく知られています。彼はまた単磁極 (モノポール) という粒子の存在を予言しました。彼いわく、“電子は正の電気、陽子は負の電気をもっている。これに対して磁気に関しては、磁石がいつも北極と南極の対をなしているように、正か負だけの磁気をもっている粒子は知られていない。しかしマクスウェルの理論を拡張して、磁気をもった粒子も存在することにすれば、電気と磁気の対称性が保たれた美しい理論になる。だから自然がこれを採用しない筈はない。”ディラック理論の40年後、モノポールの存在は場の量子論の自然な帰結であることがわかりましたが、まだ実証はされていません。

ディラック・モードは、“数学的に美しい理論は真である”という立場です。その典型的な例は「超対称性」理論や「スーパーstring」理論でしょう。いろいろな素粒子の間に超対称があるという、実験的な証拠は何もありませんが、数学的に美しい理論はどこかに真理があるという希望をもって理論家はこれを追及しています。現在はまさにディラック・モードの全盛期といえます。

## ● 素粒子の標準理論

それでは、最初に素粒子が発見されてから 100 年後の今日、われわれはどれだけのことを知っているのでしょうか

か。これをもう一度要約しなおしてみましょう。(付表3)

われわれの知識のすべてはいわゆる素粒子の「標準模型」というもので総括されます。

素粒子の現象では、いろいろな基本物質粒子があって、それらの間に力、つまり相互作用が働いています。基本的な相互作用には4種類、強さの順で、強い力、電磁力、弱い力、重力があります。まえに申しましたように、強い力はクォークの間に働いて原子核の成分である陽子や中性子を作るものです。電磁力は電荷をもつ粒子の間に働き、特に電子とさまざまな原子核とを結合していろいろな元素の原子をつくります。弱い力は放射能、つまり中性子が陽子に変換するなど、比較的緩やかな現象を起こします。重力はすべての粒子の間に働くが、他の力に比べてひじょうに弱いので素粒子の世界では問題にしなくてもよいものです。

4つの基本相互作用は、それぞれ異なった力の場によって異なった現象を引き起こしますが、その反面に、みな「ゲージ場」と呼ばれる共通の性質をもっています。ゲージ場は、電磁場を一般化した概念で、その特徴は、2つの粒子の間に働く力が粒子特有の“荷電”の積に比例し、距離の二乗に逆比例することです。そして荷電は保存される、すなわち粒子の間で荷電の受け渡しはあっても、総和は変わりません。1つのゲージ場に特有の荷電は、たとえば強い力の場合には「色」と呼ばれているものです。(もちろん光の色とは何も関係はありません。)

電磁力は、媒質の中では電媒定数、遮蔽などによって性質が変わります。超伝導体という特殊な媒質もあります。真空とみなされている空間も、場の量子論によれば実は1種の媒質で、その中では対称性が自発的に破れ、実際の力は電磁場とは異なった振る舞いをするかも知れません。

実際、電磁力と弱い力が、電弱場という1つの統一場から導かれることがわかりました。これがワイバーク・サラムの電弱理論といわれるものです。それによれば、空間はヒッグズ場というものが詰まった超伝導体のような媒質だを考えられ、そのために弱い力を媒介するゲージ場の量子は、光子とは違ったW,Zという、質量を持った粒子になります。ヒッグズ粒子という名前をお聞きになったかもしれません。これはヒッグズ場自身の量子のことです。

「標準模型」あるいは「標準理論」とは、この電弱理論に強い力のゲージ場の力学(QCD, quantum chromodynamics)を付け加えたものです。QCDによれば、強い力は電磁力とは異なる逆遮蔽という独特な性質を示し、クォークたちを結ぶ“ひも”のような役目をします。そのためにクォークはハドロンの中に永久に閉じ込められ、これを弾きだして観測することができないと信じられています。ともかく、標準理論によって現在観測されているすべての現象をうまく記述できることが、長い間の実験のによって実証されてきました。武谷博士の説によれば、最後の第3段階に相当するといつてよいでしょう。

標準模型によれば、4つの力の場と、いくつかの基本粒子とが存在します。基本粒子はいわゆる物質の成分となる粒子で、3つの家族(また世代)があります。1家族のメンバーは8人、それぞれ強い力の電荷、即ち色、と普通の電磁的電荷との違いによって区別されます。これらはどの家族でも同じです。したがって基本粒子の総数は24人となりますが、それらの質量は全部まちまちです。なぜそうなのかは、将来に残された大きな謎の一つです。

強い力を持つものはクォーク、持たないものはレプトンです。強い力の荷電、すなわち色、には3種類、電磁的電荷には2種類あるので、1家族のクォークには $3 \times 2 = 6$ 種類、レプトンには2種類あることとなります。また違った電荷をもつ2つのメンバーの間には弱い力も働いて、それによって互いに移り変わることができます。

このように、基本粒子には3家族があるのですが、われわれ普通の物質の成分は第1家族だけです。他の家族はより重く不安定で、加速器によって作られても、弱い相互作用のために第1家族に崩壊してしまいます。

非常に不思議なことですが、基本粒子は基本という名がついていても、実は一般に不安定で長持ちしない、一時的なものなのです。宇宙はもともとこのような性質をもったものではないだろうか、宇宙にはパーマナントなものはないのだろうか、という考えが自然に生まれます。たとえば次に述べる大統一理論によれば、われわれ物質の背骨ともいべき第1家族の陽子ですら、いつかは陽電子などに崩壊してしまう可能性が考えられています。

#### ●素粒子物理が21世紀に期待するもの

「標準模型」は見事な成功を収めました。理論の中にある粒子は既にほとんど見つかりました。ただヒッグズ粒子はまだ見つかっていませんが、観測された現象は意外と言ってよいほどうまく説明できます。そのほか、まだ完全に測定されていないものはニュートリノの質量です。日本にカミオカンデ(kamiokande)という大きな地下施設がありますが、世界をリードしてニュートリノの質量に関する重要なデータを出しています。

ではニュートリノの質量が決定され、ヒッグズ粒子も見つかったとしたら、素粒子物理学はどうなるでしょうか。武谷理論を待つまでもなく、理論的には次のサイクルがあることが既に予想されています。なぜなら標準理論の中では、電磁気力と弱い力は統一されたが、強い力はまだ別物です。電弱統一が成功した以上、3つの力が当然統一されるべきではないでしょうか。3つの力の統一理論は大統一理論と呼ばれています。まだいろいろな候補者があるだけですが、大統一理論の考えによれば、3つのゲージ場が違った性質を持つのはエネルギーの比較的低い現象においてであって、大統一のエネルギーと呼ばれる非常に高いエネルギーの現象では、違いがなくなるものとされます。#第1表のところで申しましたように、この大統一のエネルギーというのは、現在の加速器で作られるエネルギーよりもはるかに高いもので、これを間接的に確かめる方法が見出されない限り、その検証は今のところ夢にすぎません。

標準理論には入っていないが、まだ自然界には重力が残っています。4つの力も統一できるでしょうか。これを解決しようとするのが「スーパー・ストリング理論」(超弦理論)と呼ばれているものです。強い力の現象を説明しようとした「ストリング理論」から発展したもので、いろいろな素粒子は、物質粒子も力の量子も、点ではなく、ひものような実体の異なった振動モードだと考える理論です。即ち、4つの力ばかりでなく、すべての実在するものが統一的に理解されるという理想的な理論だといえます。しかし残念ながら、スーパー・ストリング理論はまだ実際の世界を記述する標準理論と自然につながるものではありません。スーパー・ストリング理論を完成させるために21世紀に期待するものは、何か新しい理論的および実験的なヒントではないかと私は考えております。

極微の世界と反対の極大の世界、即ち宇宙物理も近年実験的にも理論的にも素晴らしい発展をみせています。ちょうど素粒子論の1950-60年代のような活気があります。また極微の世界の構造が宇宙の歴史や構造にも反映されることが判明しました。すべての力と物質と、それらの存在の場である時空自身をも含めた統一的な記述を実現し、60桁にわたる宇宙のスケールをカバーすることは単なる夢ではなくなりました。

これが実現すれば、21世紀は「統一物理学の世紀」ということになるでしょう。

どうもありがとうございました。

2000年7月

——武谷三男博士(1911-2000)の追憶に捧げる——