

ベータ崩壊における諸発見 と標準理論への道，序論



随筆

森田 正人*

自然現象を理解するにはいくつかの流儀がある。もっとも素朴で且つ基本的な取り組み方として次のような方法がある。自然現象は究極のところ、自然界に存在する物質の最小単位である素粒子（現在ではクォークを含む）の種類を確認し、素粒子間の相互作用を解明することによって、理解できるという考えである。素粒子があっても相互作用がなければ素粒子の存在は確認できないし、素粒子がなければ相互作用もないので、2者を分離しては話が進まない。

さてこの相互作用は現在まで4種が知られている。強さの順に言って、強い相互作用，電磁相互作用，弱い相互作用，重力の相互作用である。私はこの相互作用，中でも弱い相互作用を大学の学部の時より追求し、大阪大学を定年退職してからもまだ調べ続けるつもりでいる。そしてこれらの研究は、ベータ崩壊の諸現象を調査することによって進められてきた。ベータ崩壊とはいろんな種類の反応過程の総称であるが、大まかに云うと、放射能を持った原子核が、ベータ線を放出する現象である。そしてこのような現象を引き起す力が、弱い相互作用である。

弱い相互作用は、現在ではクォーク流と軽粒子流が質量の大きなWボゾンに仲介されるという描像で、他の弱過程を含めて理解されており、また電磁相互作用と統一的に理解され標準理論と称されている。このような考えに到達するまでに行われた研究の道筋を、諸発見の順を

追って紹介してみたい。現在の視点から顧みると、これらの諸発見は必ずしもスムーズに論理的な展開に沿って見つかってきてはいない。始めの問題が先に検証されていれば、次の問題は自然に明白になるはずであったろうが、実験上は後者が解決したあとで、その衝撃によって始めの分までわかってしまったこともある。しかしここでは敢えて年代を追って記述することにしよう。その理由の第一は、私自身がこの分野の研究に余りにも密着しており、この分野の研究の世界的動向を決定した人々に混じって研究を続けてきたことにある。例えば、あとで統一理論の発見者となった人達の1人であるWeinberg博士は、コロンビア大学で同時期に同じ教室で研究中であり、私を含むコロンビア大学グループの弱い相互作用に関する研究結果は、大かれ少なかれ彼の研究にもいくばくかの影響をもたらしていたことは間違いない。

さて私が原子核のベータ崩壊の研究にとりかかったのは、東京大学後期学生（旧制度3年で、大学の最終年次）の頃であった。当時日本の素粒子論研究は、湯川先生の間子論、朝永先生の量子電磁力学と隆盛を極めていた。数多くの先輩の後を追って研究を始めたばかりの私達には、主要な研究テーマは出つくしており、これらの先輩と競争したのでは追越し難いという気持が強かった。一方ベータ崩壊の問題は、湯川先生の間子論の論文にも少し触れられているが、米国において戦時中未公開だった原子核実験データの公開などもあって、新しい展開が何となく予期されていた。

当時はベータ崩壊の相互作用として、Fermiの提案した4種のフェルミ粒子の直接結合である4フェルミオン相互作用が用いられていた。これは核内の中性子が陽子に変わり、その瞬間に

「ベータ崩壊における諸発見と標準理論への道，序論」は、大阪大学理学部大講堂において行われた最終講義の前半である。

* 森田 正人 (Masato MORITA), 大阪大学名誉教授, 城西大学理学部教授, 理学博士, 日本物理学会大阪支部長を4期, アーネスト・ケプトン・アダムス物理学賞, 東レ科学技術賞を受賞, 原子核理論素粒子論

新らしく電子と反ニュートリノが生成され核内に放出されることに対応し、4種の場（あるいは波動関数）の4元スピノルを、相対論的不変に結合させたものである。Fermiは電磁相互作用に範をとって、ベクトル型の結合を考えた。その後相対論のわく内で、スカラー(S)、ベクトル(V)、テンソル(T)、アクシアルベクトル(A)、ギスカラー(P)と一般化し更にその一次結合を考えるようになった。そしてこれを如何にして制限するかということが中心課題であった。また場の微分形式を含むような結合形式や、湯川型間接結合の可能性も討論されていた。

これらの研究と並行して、東大では群論の学習が盛んだった。山内恭彦先生の講義やゼミなどの御指導もあり、学生の頃から群論を何とか物理に応用した仕事をしたいと考えていた。素粒子研究には、教養学部より中村誠太郎先生が配置替でおいでになっており、また東京文理大の宮島龍興先生が併任として私達のゼミを担当されていた。そのころPhys. Rev.にときたま現われる論文に、放射線の角度相関があり、またPhysicaには整列核からのガンマ線角分布があった。角度相関とは、放射線の原子核が、連続して2個の放射線を出すとき、同時計測するのであるが放出方向間の角度によって計測数が増減することを言う。これに対し角分布は整列した原子核のスピンの方向を基準の軸にとって、この軸に対する放出方向の角度によって、放射線の計測数が増減することである。まだこの分野は全く確立しておらず、ごく少数の簡単な理論と実験の論文が出始めた頃である。当時のNaI検出器や簡単なマルチ・チャンネル分析器の出現に関係している。核反応でも、角分布に関する実験と理論が出始めた。

私は同級の山田勝美君と共同で、放射線の角度分布の研究を始めることになった。(また一方私達は故菊田(大村)充君と核力におけるハード・コアの研究を続けていた。核子2体および3体系の研究より、核力のハード・コアの半径を世界で初めて決定した。またこれを用いた私達の ${}^3\text{He}$ 核の波動関数は、 ${}^3\text{He}$ 原子のラム・シフトに対する原子核の影響を考慮するとき、コ

ロンビア大学の実験結果を正しく再現するが、一方Feshbach達の核波動関数はこの実験と矛盾することが後日証明されることになる。)宮島先生はFalkoffとUhlenbeckの論文を示し、アメリカの大学生は卒論にこれ位のことはやるとお話になった。実は博士論文だったのだが、本気にした私と山田君は、ベータ線とガンマ線の角度相関に関する、かなり一般的な論文を書くことができ、東大を卒業した1952年春の学会で報告し、すぐあと理論物理の学会誌Progress of Theoretical Physicsに印刷された。これらの理論では幾何学的量として、Clebsch-Gordan係数とその代数的諸関係を繁用したが、まだRacah代数を用いなかったのので、その後の研究において採用し、次々と完成度を高めて行くことになった。

私は更に、ベータ崩壊の折に同時に放出される粒子とニュートリノの角度相関の理論を創り、第1禁止遷移の場合の公式を作成し、1953年に発表した。

ベータ崩壊の理論においては、ガンマ崩壊の場合に比べると種々の核行列要素が混在して現われる。このことは、レプトン系(電子とニュートリノ)の固有角運動量と軌道角運動量の合成として核行列要素の階数が決定されており、合成の仕方や階数によって、異なる種類の要素が現われるためである。核行列要素の大きさは、原理的には核の波動関数が与えられれば決まってしまうはずである。しかし現実には波動関数がよくわからないので、不可能なことが多い。しかしもしWigner型の時間反転に対する不変性を核力に対して仮定すると、核行列要素の比は実数になることを、1952年山田君と私とで証明した。

これと同様に、弱い相互作用の結合定数(以前に述べたS, V, T, A, Pのそれぞれの強さを結合定数といい、 C_S などと添字をつけて区別する)は時間反転に対する不変性を仮定すると実数と考えてよい。Wigner型はオペレータをTと書く。これに対しPauliは粒子・反粒子変換(C)と時間反転の積(CTまたはTC)に対する不変性を要請し、フェルミ粒子の場の反可換性を導いた。

そこでこの両者の違い、T不変かCT不変かの区別が何らかの物理量測定で可能ではないかと考えた。当時これらの対称性について3部作の長い論文をRev. Mod. Phys.に出されたアメリカのS. Watanabe教授に手紙を出してみると、先生はTでもCTでも不変であるべきだと答えられた。この立場は当時の物理学者にはほぼ100%採用されていたのは確かである。

それにも拘らず、私はまだ充分納得出来なかった。というのは私達のグループは当時の電子・ニュートリノ角度相関、禁止遷移のベータ線スペクトルなどの研究から、スカラー、テンソル、ギスカラーの一次結合の相互作用にはほぼ内定していた。そうすると少なくともCの関与する変換については不変ではなさそうである、ということが頭の中にあったのである。(現在ではSTPでなくVAであるが、上記の議論は同様に成り立つ。)

私は時間反転T不変を破る物理量を探した。それは結合定数の虚数部分が現れる量である。これはすぐ見つけた。電子・ニュートリノ角度相関係数は、通常結合定数の実数部分によるのであるが、一般に結合定数を複素数にすると、虚数部分も残る。そしてこの項は主要項に比べて電子エネルギー依存性も異なるので、実験的にも分離できる。パリティ非保存の発見後の言葉で言えば、Tの破れおよびCの破れの項である。そして空間反転P不変の項である。この理論と実験の提案はProg. Theor. Phys.10 (1953) 364に発表されている。当時は電子・ニュートリノそのものの実測が困難であり、更にもう一步進んだエネルギー依存性までは実験的にはとても出来なかった。(1956年LeeとYangはパリティ非保存の論文を書いたが、この項がない。Yangに聞いたら忘れたということであった。私のコメントによって、この大論文のErrataがあとで発表されている。私の論文はパリティ保存のわく内であったが、パリティ非保存にしても本質的には同じ量である。しかしLeeのすすめもあって、1957年Phys. Rev.にもう一度、パリティ非保存の形式で公式を発表した。)実測可能な時間反転のテスト、整列核のベータ・ガンマ角度相関については後述す

る。

今までに述べた研究は、主としてベータ崩壊における弱い相互作用のタイプの決定を行うことにあった。しかし時間反転の問題と共に、空間反転(P)や粒子・反粒子変換についての関心が次第に励起されてくることになる。世界最大の加速器による諸発見の影響のもとに研究を進めていたLee, Yangその他の米国の研究者に比べ、殆んどその影響がなかった日本在住の私では全く異なった動機ではあるが、類似した形で展開されていたベータ崩壊の理論について述べてみたい。1955年10月のある日、日本物理学会誌を整理しているうちに偶然、Kammerlingh Onnes研究所のGorterの講演論文を発見した。戦後日本ではじめての理論物理学国際会議が京都で行われ、これに出席したGorterがそのあとまだ中之島にあった大阪大学を訪れた際、Nuclear Alignmentと題し講演した(1953年9月24日)。これを永宮健夫先生が訳され、日本物理学会誌9 (1954) 160-163に出版されたものである。

その中でGorterは「通常ガンマ線あるいはベータ線の強度は逆方向において等しいとされている。これは残念なことで、一体本当にそうなのか、それとも理論物理学者がいつも真と仮定しているだけなのか、私にはよく分らないが、多分ガンマ放射の場合は本当だろう。ベータ線の場合については私は疑問を抱いている。」と述べている。そこで私は学会誌の整理を止め、私の角分布公式をみた。この式は放射線の角分布特性を示すパラメータ $b_{L}^{(n)}$ がわかれば、整列核からの放射線の角分布がすぐ書き下せる形に作られている。アルファ線、ガンマ線の場合、このパラメータは簡単な式となるが、ベータ線のパラメータは多数の核行列要素、相互作用の強さ(結合定数)、および電子のエネルギーに依存する複雑な形をしているが、幸いにもこれ以前に求めていた。私は念のために重力の量子(Graviton)についても、角分布公式を求めており、これはそのとき以来ファイリング・キャビネットの中にしまっている。さてベータ線の場合のパラメータは、ルジャンドル多項式の n が必ず偶数となり、角分布は対称となっていた。

角分布の一般式は第 L 禁止遷移（但し、 $L=0$ は許容遷移とする）の場合、ごく小さい高次補正項を無視すれば、整列核スピ軸に対するベータ線の放出方向を角度 θ であらわしたときの角分布関数 $\cos^{2n} \theta$ のべきで展開されるが、最高 $n=L$ であることがわかった。（高次補正項は $n=L+1$ まで可能であり、このことは更に 20 年、30 年の後に再び研究され、核子流の誘導項効果の検出のため、大きな研究精華をもたらすことになった。）この式は小林理学研究所報告 6（1956）69-77 に発表されている。私は Gorter がなぜ「ベータ線角分布は対称であるかどうかわからない」と言ったのだろうか、何か根拠があるのではないかと思ひ、その旨永宮先生にお手紙を出し、且つ私の計算では対称になったとお報せした。全く未知の大学院生に対し永宮先生は丁寧な御返事を下さったことを覚えている。そのときのお手紙は、10 数回の転居の間に紛失し大変残念に思っている。

この時代にはまた異種フェルミ粒子間の固有なパリティの相違について調べていた。4 フェルミオン相互作用として、一ヶ所だけ余分にディラック行列 γ_5 を入れることも可能である。固有ローレンツ変換に対しては、通常形の項も γ_5 が入ったものもどちらも不変であるが、共存させると、空間反転不変でなくなるので、一方を捨てなければならないこともわかっていた。共存させると、私のベータ線角分布式には $\cos \theta$ の奇数べきが生じてくるが、そこまでは陽に表わしていない。タウ粒子とシータ粒子のことは日本でも知られていたが、充分の衝撃をもって国内を飛び交っていたような記憶がない。（この点はもっと年代の上の人達には私と異なった印象をもってられるかも知れない。）私自身は Pauli と Lüders の定理（1954, 5）は、この時点でまだ知らなかったが、もし知っていたら、時間反転のことに結びつけたであろう。しかし、何れアメリカに行く予定だったので、小林理研に載せた公式は、アメリカに行き出版するつもりであり、プライオリティをとっておくだけに、出しておいた。実際この式はあとで大変役にたつ重要な出発点となった。

1956 年 9 月下旬米国のシアトルにおいて理

論物理の全分野に関する国際会議が開催された。1953 年京都会議のおかえしという意味もあり、日本からは 10 数名が招待された。私はその 3 月に博士になったばかりだったが、若手を一人ということで幸いにも一行に加えて戴いた。ここで初めて Lee および Yang と会うことができた。彼等は、質量と寿命が等しいタウ粒子とシータ粒子が、一方は 3 個のパイ中間子に他方は 2 個のパイ中間子に崩壊する現象を深く研究し、弱い相互作用を通しての崩壊ではパリティが保存しない可能性があること、空間反転不変性が破れるので、偏極核の放出するベータ線は非対称角分布するのを測定するよう提案していること、また Wu 達が実験を準備中であることを知った。私は Yang に 1 と γ_5 の項を共存させたのではないかと聞くと、そうだという答が返ってきた。アメリカでは既に Lee と Yang の論文のプレプリントが出まわっており注目を集めていたが、私はまだみていなかった。

この会議が終ると私はニューヨークのコロンビア大学に向った。その頃東大にはコロンビア大から C. Townes 教授がフルブライトの交換教授で滞在しており、ベータ崩壊なら Wu 女史の所がよいとすすめられたので、第一回の仁科財団海外派遣研究員として一年間の予定で滞在するためであった。9 月 30 日に Wu 女史に挨拶を終え、宿舎の John Jay Hall というキャンパス内の学生寮に泊ることになった。3 日間のうちに、パリティ非保存の場合のベータ崩壊の許容遷移について、ベータ線の角分布の一般式を作った。

この式によると、遷移の際核スピンの変化がないときは効果が小さく、核スピンの 1 だけ変化すると効果が大きい。例えば ^{60}Co はベータ崩壊すると核スピンの 5 から 4 になるので、効果がよく見えるし、 ^{24}Na では 4 から 4 に遷移するので、効果は殆んどみえない。Wu 達の実験は ^{60}Co で行われていたが、他の研究所では ^{24}Na の実験もあったそうである。私の理論式はコロンビア大学に留めおかれたので、勝負はみえていたといえる。ちなみに Fermi 行列と Gamow-Teller 行列まで入れた私の公式は、Wu et al. の Phys. Rev. に出した ^{58}Co の実

験の論文の中に印刷されている。共著者として加わらないかという話は、Wu女史から1度あったが、当時の私は全く日本流に少し遠慮し、理論をやったが実験をしていないのでと言ったので、共著となっていない。少しアメリカ生活に慣れてしまっただけからは、全く残念な事をしてしまったと悔んでいる。Wu達の偏極した ^{60}Co の放出したベータ線角分布は非対称で、パリティ非保存の初めての実験的証明となった(1957年1月)。これを境に理論、実験共に数多くの論文が発表され、私の角分布の公式も多くの人達によっていろんな形で再発見や拡張されることになった。

さて電子・ニュートリノ角度相関については1950年代初期から実験が行われたが、 ^6He の場合ブルックヘブンでの結果はテンソルと出た。しかし1958年から9年にかけてのイリノイでのAllen達は特別のスペクトロメータを開発し、テンソルではなくアクシアルベクトルであることを実験の上で証明した。また ^{35}A によってベクトルが必要なことも示した。

このような大事な結論が最初にあやまって発表されたのは、ニュートリノがみえないからである。その放出方向は、核の反跳を測り、運動量保存則を用いて逆算する。それ故もっと異なった方法でニュートリノの放出方向を確かめることが望ましい。

これはガンマ線の共鳴現象(Nuclear Fluorescence Resonance, NFRと略記)を通じて観測される。NFRとは、核が放出したガンマ線を、同種の核が吸収して励起する現象をいう。放出のとき原子核は反跳をうけるのでガンマ線は励起エネルギーより少し小さいエネルギーになってしまうし、吸収のときは標的核は反跳をうけるので励起エネルギーより少し大きなエネルギーをもったガンマ線しか吸収できない。これらのエネルギー損失 $0.1\sim 1\text{ eV}$ を補うことは通常大変難しい。しかし、放出ガンマ線に先行するベータ崩壊が起る場合には、電子やニュートリノが放出されているので、励起状態にある核が反跳をうけており、走りながらその方向に放出されるガンマ線は余分のエネルギーを持つので、同じ標的核は吸収励起可能となる。

ちなみにNFRを起すには他にも数多くの試みがある。運動エネルギーや熱エネルギーを追加する方法は古くから試みられたが成功していない。MössbauerはNFRをやっておりその関係で、私の提案した先行する放射線の反跳によるドブラー・シフトに関し手紙をもらったことがある。彼はその後、反跳が起らない場合を探しあて、有名なMössbauer効果を発見した。

NFRの最初の成功は1958年Goldhaber, Grodzins, Sunyarの実験で、 ^{152}Eu のK電子捕獲に引きつづいて起るガンマ線を ^{152}Sm に共鳴吸収し、再放出されたガンマ線のヘリシティ(縦偏極の度合)を測定し、ニュートリノは左巻(運動量とスピンの反平行)であると発表した。軌道電子捕獲を引き起す相互作用は、陽電子放出のベータ崩壊のそれと同様であるので、陽電子と一緒に放出されるニュートリノも左巻である。

ここで通常の陰電子放出のときに伴う反ニュートリノは、しかるべき対称性を仮定すれば例えば右巻と言ってもよい。しかし対称性を疑ってかかっている時代には、仮定なしに直接検証したい。そのための物理量を考えた。私は電子と反ニュートリノによる核の反跳を利用し、電子とFRNを起すべきガンマ線の角度相関、その偏極度、電子エネルギー依存性などを考慮した33種の可能な物理量を理論的に求め発表した。この提案によって、 ^{23}Ne の場合の実験がバーミンガムにおいて、また ^{24}Na の場合の実験がドブナに於て成功した。結果は、反ニュートリノは右巻であることがわかった。これとニュートリノは左巻であることを組合せると、CP不変(粒子・反粒子変換と空間反転の積についての不変性が成り立っていることを示している。逆にいえばこれを最初から仮定することによって、一方から他方が導かれることは明らかであろう。

CP不変はまたT(時間反転)不変を意味しているが、その破れの度合は、私の理論に基いて、偏極核のベータ・ガンマ角度相関からテストできる。この実験はワシントン市の国立度量衡局研究所において、パリティ非保存の実験で低温を担当したAmbler達によって1958年に

行われ、ベータ崩壊ではT不変であることがわかった。その後精度のよい実験が、偏極中性子のベータ線角分布により示されている。しかし素粒子の分野では、中性K中間子の崩壊において約0.2%のCPの破れがCronin達によって発見されている(1964)。

その後ベクトルとアクシアルベクトルの相互作用を理論的に導く方法が、いくつかのグループで提案された。更にベクトル流の保存、同じ内容だがベクトル結合定数の普遍性、を基にして、電磁相互作用と弱い相互作用を統一的に理解しようとする画期的な理論が、Weinberg,

Glashow, Salamによって発表された。ベータ崩壊の研究は、これらの理論の発展と並行して、ベクトル流の保存の精度のよい決定、荷電空間内における対称性、アクシアルベクトル流の部分的保存とミュー粒子捕獲などに進行していったが、紙面もつきたので、他の機会にゆずりたい。

尚本稿に述べた研究結果は大学以来の友人、研究室の同僚および学生諸君の絶間ない協力によって続けられたものであり、衷心より感謝したい。

