

2015 年ノーベル物理学賞「ニュートリノ振動」に寄せて

藤井寛治会員

(1) 原子像に伴う困難を解決するために予言されたニュートリノ

20世紀のはじめ1910年頃、ラザフォード（英、1871-1937）と弟子のガイガーたちの行った実験に基づいて、構造をもつ原子の描像がつくられました。原子の中心に、広がり非常に小さいながら原子の質量のほとんどを担う重い原子核があり、そこに電荷 e (電子の電荷のおおきさ)の整数倍 Z の電荷 Ze が集中しており、その核の周りに Z 個の電子が分布して原子全体として電氣的に中性になっているという原子像です。適当数の陽子（プロトン p ）と電子が、原子の質量数（整数 A ）と電荷に応じて、 Z と A の比がほぼ $1:2$ の実験値になるように結合系としての原子核をつくるということになります。（当時から百年ほど前に、多くの元素の原子量が水素原子のほぼ N 整数倍であることが知られており、水素原子が万物を構成する「原物質」であるという考え ---- プラウトの仮説 ---- がだされています。）

このような核モデル --- 陽子・電子核モデル --- は、原子核の構成要素としての中性子（ニュートロン n ）が発見されるより20年ほど前に、物質の基本的な構造について可能な理解を得ようとして到達のものでした。原子が電子を放出して別の原子に変わる「ベータ崩壊」と呼ばれる現象は、親原子核内に構成要素として存在していた電子が放出されて娘原子核になると考えられたことになります

このように考えると、原子内部でほとんど静止している重い原子核から放出された電子のエネルギー分布は、エネルギー・運動量の保存則により親核ごとにきまった値（つまり線スペクトル）になるはずですが、しかし実験では連続分布が確認されたのです（1927年）。

1920年代に、原子・分子や原子核に適用される理論としての量子力学の枠組みがつけられます。そのなかで指導的な役割を果たしたN. ボーア（デンマーク、1885-1962）は、ベータ崩壊のような原子核に起源をもつ過程において、エネルギー保存則がなんらかの平均的な意味においてのみ成立している、という考えを提唱しました。師のこのような考えに対してW. パウリ（1900-1958）は、ベータ崩壊では電子と共に中性の軽い粒子が放出されるならば、この保存則を破ることなく電子のエネルギー分布が連続になり、さらにそのエネルギーの最大値がそれぞれの親核に応じてきまることを自然に理解できると指摘しました。この中性の粒子 ---- ニュートリノ（中性微子とも呼ばれる） ---- に求められる性質は、陽子の質量の0.01倍をこえないくらいに軽く、また観測を逃れるほどに物質中の透過性が強いことです。

そうすると、このニュートリノも電子と同様に親核を構成する要素に加えて、陽子・電子・ニュートリノ核モデルをとることになります。当時、陽子や電子がおおきさ $1/2$ のスピン --- プランク定数を単位にした、固有の角運動量のおおきさ --- を持つことが実験から判ってきました。そうすると陽子・電子核モデルでは、核の荷電数 Z が偶か奇に対応して核のスピンが整数か半整数になるはずですが、しかし、実験では核の質量数 A の偶・奇に核スピンの整数・反整数が対応すること

が示されました。

スピン $1/2$ の軽いニュートリノを核の構成要素とすることによって、陽子・電子核モデルの上述の二つの困難を解消できるというパウリの考えは、友人や関係者あての手紙（1930年）という形でしか書き残すことをしませんでした。

（2） ニュートリノに関する考えをなぜ学術誌に発表しなかったか

ニュートリノ仮説によって、陽子・電子核モデルがもつ二つの困難は解消されますが、第三の困難 ---- 電子のような軽い粒子を 10^{-14} のマイナス 1 乗メートルよりちいさな核内に閉じ込めることが可能か ---- は解消されません。、ニュートリノは電荷をもたずに中性のため 電磁的な力も働かないので、陽子・電子・ニュートリノ核モデルでは、問題はさらに 深刻なものになったともいえるでしょう。

パウリは、物理に関する新しい着想や仕事に対する厳しい批判で知られており、この第三の困難を抱えた核モデルを学術誌に発表しなかったのは、自身に対しても厳しかったことを示すものと思われる。

（3） 原子核の構成要素としての中性子（ニュートロン）の発見 --- 陽子・中性子核模型

チャドウィック（英、1891-1974）は、放射性元素から放出されるアルファ線を軽い元素に当てると、透過力の強い中性の粒子 --- 陽子の質量（電子の質量の 1840 倍くらい）よりわずかに電子質量の $5/2$ 倍ほどおおい --- が放出されることを発見しました（1932年）。この報告をうけるとすぐ、T.D.イワネンコ（露、1904生れ）と W. ハイゼンベルグ（独、1901年生れ）が独立に、この中性子を陽子とともに核の構成要素とする核モデルを提唱しました。中性子のスピンのおおきさを陽子と同じく $1/2$ とすれば、核のスピンが整数、半整数に対応して質量数 A が 偶数、奇数になるという明快な規則が単純に導かれて実験事実を理解できることになりました。

チャドウィックは1935年に、「中性子の発見」によりノーベル物理学賞を受けました。これは、イワネンコ - ハイゼンベルグの原子核像が承認されたことを意味していました。ハイゼンベルグは、1920年代における量子力学の形成期に、行列力学と呼ばれる量子力学の理論形式をつくるうえで中心的な役割を果たし、1932年にノーベル賞をすでに受けてます。パウリは、一つの電子状態には1個しか電子が入れないという「排他律」を発見し定式化もしましたが、遅れて1945年に、この「パウリの原理の発見」に対してノーベル賞を受けます。彼は、ハイゼンベルグと協力して、相対論を枠組みに入れた「場の量子論」を一般的に展開しました（1929）。陽子とか電子のような粒子に対応した場の量が、それぞれの粒子を消したり作ったりする役目を持つという、それまでになかった理論がえられることになります。

（4） 陽子・中性子原子核モデルの承認に伴う新たな課題

中性子を含む新しい原子核モデル承認するとき、次のふたつの基本問題が提起されることになります。

I. 原子核の構成要素ではない電子が、原子核のベータ崩壊において放出されるのは何故か。

さらにその電子が連続的なエネルギー分布をするのを どう理解するか。

II. いくつかの陽子と中性子を結びつけて、拡がり 10^{-14} m を越えないくらいの領域に、多様な安定した原子核をつくる力 --- 核力 --- の本質は何か。

(5) フェルミのベータ崩壊の理論 ---- ニュートリノは存在しなければならない

フェルミ (伊、1901-1954) は、場の量子論を適用したベータ崩壊の理論を提出します (独裁政権を避けて米国へ亡命する 4 年前の 1934 年)。陽子、中性子、電子、ニュートリノの間に

中性子 \rightarrow 陽子 + 電子 + ニュートリノ,

のような基本相互転化の過程 (相互作用 と呼ぶ) が存在すると仮定。ここでパウリの考えたニュートリノが、電子よりかなり小さい質量を持って存在しなければならない粒子 (電荷を持たない) として登場します。この理論により、フェルミ相互作用 (と呼ばれる相互転化のエネルギー) が存在すること、したがってそこに登場するニュートリノの存在は、実験で必ず肯定的に確かめられるものとみなされるようになりました。

(6) 原子炉とニュートリノ

このベータ崩壊の量子論の展開の後、フェルミは、中性子を用いて元素の人工的な転換の実験研究を行い、1938 年にノーベル物理学賞を受けました。この年に米国に亡命し、原子核分裂の連鎖反応を研究し、原子炉の建設やその後の原爆開発への参加へとつながってゆきました。この原子炉が、ニュートリノの検出を可能にしてくれましたのです (1955 年)。原子炉では核分裂により、中性子の数が過剰な原子核がつくられ、上記の基本過程によるベータ崩壊により多数のニュートリノが発生します。このニュートリノがフェルミの相互作用から生じなければならない反応 $\text{ニュートリノ} + \text{中性子} \rightarrow \text{陽子} + \text{電子}$ を引き起こし、観測されやすい荷電粒子が生じるため、期待される性質を持ったニュートリノの関与を確かめることができたのです。

(7) 核力の本質はなにか？

課題 II について 場の理論に基づいた回答を、湯川秀樹 (1907-1981) が与えました (第 1 論文は 1935 年)。電荷をもつ粒子の周りに生じる電磁場の量子を光子 (photon) と呼びますが、電荷をもつ粒子の間に働く力は、この光子を交換することによって導かれます。(二つの荷電粒子が静止していれば、クーロン力が導かれます。) これと同様にフェルミの相互作用が、陽子と中性子の間に電子とニュートリノの対を交換する過程を引き起こし、核力への寄与がえられます (タム、独立にイワネンコ (ソ連)、1934 年)。しかしベータ崩壊は緩やかな過程----いまでは弱い相互作用と言われている----であるため、この交換力は非常に弱く、核力として好ましい性質をもちません。直ちに湯川は、核子 (原子核を構成する陽子・中性子の総称) の間に交換されて適切な核力を与える新たな粒子 (現在 π と呼ばれる) が電子の 200~300 倍くらいの質量をもって存在し、中性子のベータ崩壊も媒介する、という理論を出したのです; 核力とベータ崩壊の基本過程は

中性子 --> 陽子+パイ (-電荷)、 パイ (-) +陽子 --> 中性子

核力

パイ (-) --> 電子+反ニュートリノ

ベータ崩壊

陽子 --> 中性子+パイ (+)、 パイ (+) +中性子 --> 陽子

核力

パイ (+) --> 陽電子+ニュートリノ

ベータ崩壊

地球外から降り注ぐ宇宙線を地表付近で観測して、1936年にC.D.アンダーソン(米)たちが、湯川理論で期待される質量を持つ荷電粒子を発見しました(鉛板入り霧箱に生じる飛跡の観測)。しかし この粒子の性質を調べると、湯川粒子とは異なる性質を持つことが判りました : 地下をふくむ地表付近で観測された問題の荷電粒子は物質をよく貫通し、原子核をつくる核力を媒介する湯川粒子がもつべき性質とは異なるということです。(また 湯川理論に従った湯川粒子の寿命の評価に比べて実験からの評価は10の2乗以上おおい。)

これをどのように理解するか。 戦時体制下におかれた研究者たちは、自由な研究と交流が阻まれ、原子のレベルからさらに進んだ物質構造の探求は著しく困難な条件におかれました。 そのような状況の下で、湯川粒子に関わる上記の課題について基本的な解決の方途----二中間子論と呼ばれる---が提出されました(1942年)。

二中間子論とは ---- 「地表近くで宇宙線中に確認された荷電粒子(質量が電子の約200倍)は湯川粒子とは密接な関係をもつが異なる」という観点からこの問題を考察するものです。 なかでも坂田・井上が次のような基本的に正しい理解を与えました。

地球の外から高エネルギーの陽子などの宇宙線(1次宇宙線と呼ぶ)が成層圏に突入し、窒素や酸素とはげしく衝突し原子核が壊されると、核力をつくる湯川粒子パイが振り落されて原子核外に放出される。これらのパイ粒子は地球に向かってすこし走ると

パイ (-) --> ミュウ (-) + 反ニュートリノ (ミュウ)、

パイ (+) --> 反ミュウ (+) + ニュートリノ (ミュウ)

のように崩壊する。 このミュウ は、電子の約200倍の質量を持つ以外は電子と同様にスピン1/2で核力のような強い相互作用に関与せず、電磁相互作用を受けながら長距離を走り、弱い相互作用によって壊れる; ミュウ(-) --> 電子(-) + 反ニュートリノ (電子) + ニュートリノ (ミュウ)
(反ミューも同様)。

大戦後、ブリストル1大学(英)の宇宙線実験グループが、パイとミュウとの関係を示す飛跡を見出し、二中間子論が実験で確認されました。 1942年の坂田・井上論文において、電子とミュウに伴うニュートリノ----以下でそれぞれを、電子ニュートリノ、ミュウニュートリノ と呼ぶ----を正しく区

別しています。（それらを同じものとする実験的根拠に欠けると考えたからでしょうか。論文の焦点からずれたところでの先見性を持った選択でした。）

ニュートリノの存在の確認 ---- 米国で建設された原子炉で、ウランの核分裂で生じた不安定な原子核がベータ崩壊すると、それに伴って生じるニュートリノまたは反ニュートリノが周りの物質と反応して電子または陽電子が放出される、という理論で期待されている過程が確認されました(1953年)。

原子炉でのニュートリノは電子ニュートリノですがエネルギーが低いので、原子核との衝突でミュー粒子生じるかどうかは確認されません。

ニュートリノは1種類ではない ---- 大戦後に米国を中心につぎつぎとエネルギーを高めた加速器が建設され、人工的につくられたパイの崩壊で生じたミュウニュートリノ、反ミュウニュートリノを核子に衝突させる実験が、1960年代にできるようになりました。実験結果は、終状態に電子、陽電子は現れずミュウ、反ミュウだけでした。これは、ニュートリノには電子の仲間とミュウの仲間と2種類存在して、それぞれの仲間の数が相互作用の過程で変わらない--- ただし、反粒子の数は -1 とする---ことを示しています。

大戦後の宇宙線実験での探索で、核子やパイより質量の大きいいくつかの粒子の存在が確認されました。それらの性質は、上記のような高エネルギー加速器実験により詳しく調べられ、またさらに数多くの質量レベルも確認されました。

(8) 「粒子」の基本模型とニュートリノ

大戦後に宇宙線実験による探索で、核子や湯川粒子パイより質量の大きい粒子がいくつか存在することが確認されました。上記のような高エネルギー加速器による実験を通じて、これら新粒子の性質が調べられ、新しい量子数 strangeness S を持つ粒子の世界があることが判ってきました。これらの新粒子は、核力と同程度の強い相互作用によってつくられ、ベータ崩壊と同じ強さの弱い相互作用によって $S = 0$ の粒子たちに崩壊します(中野、西島、ゲル・マン、1953年； S の変化についての規則を発見)。

これらの新粒子や既知の核子 { 陽子、中性子 } および湯川粒子パイは強・弱の両相互作用に関与し、まとめてハドロンの族と呼ばれます。(いうまでもなく、電荷をもつ粒子は、強弱両相互作用の中間の強さの電磁相互作用にも関与します。) これに対して電子、ミュウ、ニュートリノたち、レプトン族とよばれる粒子は、強い相互作用には関与しません。

坂田は、原子論の観点から、豊かなハドロンの族を基本的な粒子(およびそれらの反粒子)の複合系としてとらえるというハドロンの複合模型を提唱しました(1955年)。この模型に基づく注目すべき理論展開が、小川・大貫・池田によってなされました(1959年)。基本粒子とみなされる陽子・中性子および(質量がこれらに近くて $S=-1$ を持つ)ラムダ粒子が強い相互作用には同等に関与するとして、群論に基づく「完全対称理論」を展開し、高エネルギー加速器実験で続々と見出されていた短寿命のハドロンの質量レベルを含めて、ハドロンの統一的整理が可能であることを初めて示したのです。スピン 0 と 1 のボゾン達については、すぐ後で実験で確かめられたものをふくめて、 $SU(3)$ 群の規約表現によるきれいな分類がえられました。他方で、核子とその励起状態を含むスピン $1/2$, $3/2$ のフェルミオンについては、不自然な分類になりました。

そのため、いくつかの基本粒子模型が提唱されました。それらの中で現在承認されているのは、ゲル・マンの提唱したクォーク模型です(1961年)。クォークは坂田の基本粒子 p, n, Λ に対応したもので記号 u, d, s と書かれ、スピン $1/2$, $S = 0, 0, -1$ をもち、フェルミ統計にしたがうことは同じですが、既知の粒子からの常識とは離れた性質を持ちます； u, d, s の核子数は 1 ではなくて $1/3$ であり 電荷は $2/3, -1/3, -1/3$ (陽子の電荷単位で)。さらにクォークは、独立なくカラーと呼ばれる三つの自由度 --- 比喩として3原色---を持ち、この自由度に応じたゲージ場 --- カラー SU(3)の非可換ゲージ場 --- が存在し、カラーを持つクォークを結びつける膠 (glue)の役目を果たす。カラーの singlet --- いわば白色の --- 粒子が実験で観測されるという理論、量子色力学 (quantum chromodynamics ,略称 QCD) が提唱されたのです。(ゲル・マンは、「素粒子の分類と相互作用に関する発見と研究」により、1969年 ノーベル物理学賞を受賞。)

ハドロンの基本粒子とレプトン族との対応 ---新粒子たちが発見され崩壊過程が調べられると、ハドロンもレプトンも、ほぼ共通の強さでさまざまな弱い相互作用に関与することが判ってきました (小川 たち)。さらに弱い相互作用において、関与する 坂田模型の基本粒子 p, n, Λ 偶数個をレプトン{ニュートリノ、電子、ミュー}でおきかえると、観測される弱い相互作用が存在するという対応関係があることが、大久保・マルシャック達 (米国) により指摘されました (1959年)。

(7) で述べたように、2種類のニュートリノの存在が確認された (1962年) ので、電荷 $2/3$ を持つ第4のクォーク を含めて新たな対応関係

電子ニュートリノ、電子、ミューニュートリノ、ミュー <---> u, d, c, s を設定することが自然な変更と考えられました。この c 粒子は、あらたな量子数としてチャーム数 $C=+1$ を持ちます。

この第4のクォークとみなされる粒子が宇宙線実験で1例見つかりました (丹生 (名大)、1971年)。加速器実験による確認は、電子・陽電子の正面衝突の実験で、 c 粒子と反 c の結合系による鋭いピークが観測されることによってなされました (1976年、ノーベル物理学賞)。

弱—電磁統一理論 の展開 -----

現在、(電子ニュートリノ、電子)、(u, d) を第一世代； (ミューニュートリノ、ミュー)、(c, s) を第二世代の基本粒子と呼んでいます。これらの基本粒子の存在を前提として、電磁相互作用と弱い相互作用を統一する SU(2) X U(1)理論が出されました (Weinberg, Salam、1967-1968年、原型理論として Glashow、1961年)。この理論では、各世代の2個の基本粒子が、SU(2) 2重項の左巻き成分と SU(2) 1重項2個の右巻き成分に分けられ、時空間の各点でこの SU(2), U(1)の変換を受けても理論の記述は変わらないという局所ゲージ不変性の要求から出発します。そのとき、SU(2) 2重項の Higgs 粒子 (スピン ゼロ) を導入し、その電荷をもたない成分がゼロでない真空期待値をもつ、すなわち、対称性の自発的破れが生じる、とします。すると、

SU(2) x U(1)変換で不変な形につくられた全ラグランジアンにおいて、基本粒子の質量項が基本粒子と Higgs 場との SU(2) x U(1)ゲージ不変であった湯川相互作用項からえられ、また同様に対称性を持つ Higgs 場の項から4つのゲージ場（スピン1）の質量項がでできます。これらスピン1の場の適当な線形結合をつくると、弱い相互作用を媒介する大きな質量を持つ W（電荷 +1）とその反粒子（電荷-1）、および 電磁場（質量 0、電荷 0）と、電荷を変えない弱い相互作用を媒介し W 同様に大質量の Z（電荷 ゼロ）が存在することになります。

W、Z の質量や基本粒子との相互作用の強さを示す結合定数などの理論に登場するパラメータ達と 既知のパラメータたち --- フェルミ相互作用の強さ、電子の電荷 (i.e. 電磁相互作用の強さ) ---、との関係がこの統一理論で与えられます。

1979 年のノーベル物理学賞は、「Z 粒子の媒介する相互作用の予言、電磁・弱両相互作用の統一理論への寄与」により、Glashow, Weinberg, Salam に送られました。質量が予言された W と Z の実験での確認は、さらに高エネルギーの粒子・反粒子型加速器の建設（欧州 CERN）によりなされました（1983 年。ノーベル賞が 1984 年）。

（9）弱・電磁相互作用の統一理論からの予言 ---- 基本粒子の世代は 3 以上（小林・益川、19730 年）：

電磁相互作用のみをふくむ場の理論 --- 量子電磁力学 --- は、朝永たちが示したように、考察に現れる無限大を処理できるくりこみ可能な理論ですが、基本粒子の間のフェルミ相互作用を基本相互作用として含む理論はそうではありません。それに対し、ゲージ理論において対称性の自発的破れをふくむ理論は繰り込み可能であることが示されました ('tHooft, 1971 年)。これは Weinberg たちの弱・電磁統一理論の持つ好ましい性質です。小林・益川は、この理論を適用する基本粒子としての クォーク、レプトンそれぞれを、それまでに確認された 2 世代までとすると、世代を変える弱い相互作用が 荷電共役変換 C と空間反転 P の積の変換 CP のもとで不変な理論になることを指摘しました。これは、CP の破れをもたらす位相因子を、関係している粒子の場の量の再定義により消すことができるためです。

こうして 小林・益川は、実験で確かめられている弱い相互作用での CP 不変性の破れをこの統一理論にふくめるためには、基本粒子が 3 世代以上 存在しなければならないと主張することになります。この第 3 世代の基本粒子について

クォーク を { top t, bottom b }、電荷 $2/3$ 、 $-1/3$ ；

レプトン を { タウニュートリノ、タウ }、電荷 0、-1、

と書きますが、これらは（W、Z ボゾンもいれて）2000 年のタウニュートリノの確認（Stanford 線形加速器 センター）を最後に 前世期末までに存在が確認されました。基本粒子に質量を与える基本的考え --- 対称性の自発的破れ --- をだした南部とともに小林・益川は、2008 年ノーベル賞を受けました。

[Note] 基本粒子の質量を（<Particle Data Group (PDG)>をみて）大まかな値を書くと次のようになります。比較のため他のものも加え、慣習にしたがい、静止エネルギーを与えます。

エネルギーの単位 MeV = eV x 10 の 6 乗倍；これが 9 乗倍のとき 単位 GeV .：

湯川中間子パイ(+ π -)/0, 140/135MeV ; 陽子 939MeV ; S = + π - 1、スピン K (+ π -)/0 494/498MeV ;

レプトン達--- 電子 0.5MeV, ミュウ 106MeV, タウ 1777MeV,
(ニュートリノ達について 質量に関係した量の大きさは、電子質量に比べてかなり小さいが、まだよく判っていない ;

クォーク達--- (電子、陽子のように単独に観測されるものでないので、定義が問題) ,

s 95MeV (u, d については これより小) , c 1.28GeV , b 4.5GeV , t 173GeV ; W 80.4 GeV, Z 91.2 GeV。

CP の破れとは ? :

P というのは空間座標の向きを換える (つまり右手系から左手系に移る) 変換を意味します (P は parity からきた記号) 。C は粒子を反粒子に、反粒子を粒子に換える変換で、当初 電荷をもつ電子を逆符号の電荷をもつ反電子 (陽電子と呼ぶ) に変換する charge-conjugation と呼ばれていたために この記号が使われています。

また記号 T を時間反転 time-reversal の変換 (時間を逆進させることはできないので、粒子の運動量やスピンの向きを換える) とします。ニュートリノの存在を予言したパウリについて前述しましたが、場の相対論的量子論を展開する過程で彼は、C, P, T の同時変換の下で理論が不変であるという <CPT 定理> を見つけました。 CP の破れが存在するとすれば、それは T 不変性が成立しないことを意味することになります。

1950 年代の後半に、原子核やミュウ粒子が電子・ニュートリノを伴って崩壊する弱い相互作用が P 不変でないことが確認されました (Lee, Yang, 1957 年、ノーベル賞) 。そのあと P 不変の代わりに CP 不変という考え (Landau) が提唱されました。しかし、中性粒子 K ゼロ (d・反s のスピン 0 の結合系) が崩壊する量子数 S の変化 1 の弱い相互作用で、CP の破れがあることが観測されました。(その後、s に代わって第 2 世代のもうひとつのクォーク c をふくむ D ゼロ粒子や、第 3 世代の b をふくむ B ゼロ粒子について、弱い崩壊過程での CP の破れの豊富なモードが観測され詳しく調べられています。

CP の破れと宇宙における物質優勢 :

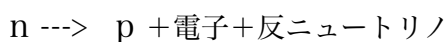
量子場の理論では、不確定関係で許される範囲で真空も絶えず粒子・反粒子の生成・消滅が生じているという像がつけられます。 ビッグバンによって粒子・反粒子が実際に生じる条件ができた宇宙において、物質と反物質の割合が当初には 1 対 1 であった高温状態から冷えていく過程で、この比が CP の破れのためにづれて、物質だけの世界が実現したと考えられています。

これを前提とすると、弱・電磁統一理論は C P の破れをふくむものでなければなりません。これが 小林・益川の理論の出発点です。

(10) 大統一理論での陽子崩壊

弱・電磁相互作用の統一理論の基本的な正しさが確立する過程において、強い相互作用も含む統一理論についての考察が始まりました。 超高エネルギー領域では $SU(3) \times U(1)$ を部分群としてふくむ高い対称性、例えば $SU(5)$, が成立して力が統一され、宇宙が冷えるにしたがい対称性の（自発的）破れをともなって Weinberg-Salam の弱・電磁統一理論が成立しかつ $SU(3)$ の力学理論 QCD の支配する世界になるという考えです。

クォークとレプトンを 同一レベルとして高い対称性から出発するので、クォーク数とレプトン数の別々の保存が成立しない過程の痕跡が冷えた現在の宇宙で存在することになります。その典型例として、クォーク {uud} の結合系である陽子 p が 陽電子と中性パイに自然崩壊するという予言が導かれました。このような過程による陽子の寿命を評価すると、 10^{30} 乗年くらいになりました。この寿命は、陽子が壊れる単位時間あたりの確率の逆数です。中性子 n についても対応した崩壊過程があることになりますが、中性子の質量は陽子（質量 $938.27 \cdots \text{MeV}$ ）より $1.29 \cdots \text{MeV}$ ほど大きく、通常の弱い相互作用（W ボゾンが媒介する）によって、エネルギー保存則を満たす自然崩壊（ベータ崩壊）



が生じます。 PDG によれば中性子の寿命の実験値は、 880.3 ± 1.1 秒。これに対応した陽子のベータ崩壊はエネルギーの保存則をみたら 自然崩壊としては生じません。

したがって上で述べたような陽子の崩壊過程を確かめることが、大統一理論を検証する鍵であることになります。 140 億年くらいといわれるわれわれの宇宙の年齢に比べて 10^{20} 乗も長い年数の寿命を実験で確認するには、親の陽子を多数用意した観測装置が必要になります。この考えに沿って、1980年代に入ると、陽子崩壊の観測実験が世界で数か所において行われるようになりました。

陽子崩壊の観測をめざしたカミオカンデの建設 -----

日本では小柴昌俊を中心にカミオカンデが 1983年夏から観測を始めます。 この呼び名は、岐阜県神岡町； 陽子、中性子の総称 Nucleon（核子）； Decay(崩壊) をつないだものです。

鉱山の坑道を利用して地表から 1000 メートルにつくられた空間に、直径約 16 メートル、高さ約 16 メートルの鉄製水槽を設置し、不純物を除いた 3000 トンの水を入れる； この水の周囲に巨大な光検出器としての光電子増倍管多数をつめて配置する。このようにして、陽子崩壊を通じて生じる配置を持つ光を観測して、陽子崩壊の確認が期待されましたが、この崩壊過程の観測はできませんでした。

（純水量を約 20 倍増やし、それに応じて大光電子増倍管の数も飛躍的に増やしたスーパーカミオカンデが、カミオカンデに隣接して建設され、1996 年春から活動が始まりましたが、陽子崩壊の確認に

到っていません。)

カミオカンデによる太陽ニュートリノと超新星ニュートリノの観測 ----

太陽からのエネルギーの発生は、中心部での弱い相互作用が関わる融合反応

陽子 + 陽子 --> 重水素核 + 陽電子 + 電子ニュートリノ

から出発して一連の核融合反応が続くとされています。このニュートリノはほとんど相互作用せずに太陽外へ光に近い速さで放出され、その一部が地球に降ってきます。この<太陽ニュートリノ>は、太陽中心部でのエネルギー生成について直接の情報をになっている電子ニュートリノです。小柴の提案により、太陽ニュートリノも観測できるようにカミオカンデを改造し、1989年に観測結果「太陽ニュートリノの数が、標準太陽モデルに基づいた理論値の値の約1/2」を得ることになりました。

1960年代後半から、米国Brookhaven国立研究所のデヴィスたちが、それまでの小規模実験で観測できなかった太陽ニュートリノを、観測に使う塩素化合物600トンに大型化して実験を続け、そのニュートリノ数が標準太陽モデルに基づく理論値の約1/3であるという結果を得ました。この実験では、塩素化合物中の塩素原子核に太陽ニュートリノが衝突し核の中の中性子が陽子と電子になります。これは原子について、電子ニュートリノ+塩素-->電子+アルゴン の反応です。この反応を通じて太陽ニュートリノの数を決めるというのは、非常に難しい実験ですが、20年近くを経てその結果の基本的な正しさを改造カミオカンデによって確認したことになります。こうしてデヴィスの提起した「太陽ニュートリノ問題」はその原因が太陽モデルにあるのか、それともニュートリノの側にある問題なのかが問われることになります。答えは後者で、以下(11)で説明します。

改造カミオカンデが再稼働へ向けて動き始めたころ、超新星爆発に伴うニュートリノを観測(1987年2月)；これを解析して爆発エネルギーが理論値と合うことが確認されました。

こうして、ニュートリノを用いることにより、光---一般的には電波---を用いた観測では到達できない領域の情報をえることができる<ニュートリノ天文台>が実現することになったといえるでしょう。このような業績により、デヴィスと共に小柴は、2002年ノーベル物理学賞を受けることになりました。

(11) ニュートリノ振動

小林・益川の指摘 ---- 弱い相互作用に関与するクォーク達が定まった質量を持つクォーク3種以上の一次結合(重ね合わせとも呼ぶ)があることが、CPの破れを含む弱・電磁相互作用の統一理論の成立のために必要である ---- に沿って、世代数3について小林・益川の一次式が与えられたことは前述したとおりです。それに対応してレプトンについても、各世代のニュートリノ場が異なる質量をもつニュートリノ場の重ね合わせで表されます。電子ニュートリノがいま太陽中心での融合反応でつくられ、太陽表面へ走るとき、初めの重ね合わせが時間とともにずれてきて、電子ニュートリノの各成分のおおきさが時間的に変わりその数が減ったり増えたりを繰り返す<ニュートリノ振動>が期待されることになります。

(10) で述べた <太陽ニュートリノ問題> は、エネルギーを生み出す太陽モデルの変更ではなく電子ニュートリノの振動として自然に理解されることになります。

大気中を飛び交うニュートリノ達 --- 地球外からの高エネルギー宇宙線が大気と衝突して発生したパイ(+/-)がミュウニュートリノとミュウに壊れ、このミュウがミュウニュートリノと電子と電子ニュートリノに壊れる ---- について、カミオカンデのデータを詳しく調べると、電子ニュートリノ 反応で確認された電子の数はほぼ想定値になるが、ミュウニュートリノ反応で生成されたミュウは約6割しかないことが確認されました(1988年) ; これを理解する可能な解は、ミュウニュートリノとタウニュートリノの間のニュートリノ振動により、ミュウニュートリノの半数近くがタウニュートリノに変身することです。しかしこれを確認するためのタウニュートリノの観測は、カミオカンデでは困難でした。

引き続いて、エネルギーの高い大気ニュートリノについて、カミオカンデの上方からと下方からくるミュウニュートリノの数を調べたところ、下方から飛来する数が減っていることが判りました(1994年)。これは、より長距離を飛行してきた下方からのニュートリノがニュートリノ振動の効果を受けた結果であるとみることができます。しかし、数日で一度程度の観測数では、ニュートリノ振動の詳細を知るには程遠い状況でした。陽子崩壊の発見という前述した目的加えて、ニュートリノ振動の確認を目ざして、水槽に5万トンの純水を用意したスーパーカミオカンデが建設されました。1998年のニュートリノ国際会議において、2年前から始まった実験の結果が報告され、ニュートリノ振動に関するカミオカンデ実験からの想定が正しいことが確認されることになりました。

宇宙線に頼らない大スケール実験 ; K2K 実験 ----

ニュートリノ振動の存在が認められると、この振動の形がどのようなものかを定めることが求められます。そのために、飛来するニュートリノを、宇宙線に頼らずに加速器で制御の及ぶものにすると好都合です。それが K2K 実験実験です。

最初の K は筑波にある高エネルギー研究所(略称 KEK) ; 最後の K は神岡 ; 2 は to を意味します。KEKで加速陽子を用いて発生したパイ(+/-)が数百m走るうちにミュウとミュウニュートリノに壊れます。このニュートリノが中央アルプスの地下深くを経て250 km離れたスーパーカミオカンデに達し、ミュウニュートリノの数の減少が確認され、ニュートリノ振動の詳細を実験で決めていけることが示されました(1999年-2004年)。

同様な加速器実験 : 1) MINOS(米国, フェルミ研究所)、加速器から735 kmの高山地下。2005年から観測。ニュートリノのエネルギーによる振動の変化を確認。
2) <OPERA 実験>, 欧州 CERN(国際共同研究所)の加速器から730 kmに観測器(イタリア、グランサッソ研究所地下実験施設)。2008年-2012年の観測。ミュウニュートリノのタウニュートリノへの振動による遷移を確認。

ニュートリノ振動という、物質の新しい運動形態の確認について主導的役割を果たした日本の実験グループに対し、2015年のノーベル物理学賞が贈られました。大型光電子増倍管の開発・製作により、ニュートリノに関する観測条件をつくった浜松の企業の役割の重要性はおおく指摘されています。

観測実験のスケールの拡大は、国境を越えた研究者の協力を必要とし、さまざまな共同をもたらしています。このようにして、ニュートリノ達の性質 --- 質量をふくめて振動現象に関わるパラメータ達、物質との相互作用の詳細、など --- の実験研究がすすめられるでしょう。それと併せて、ニュートリノの特徴ある性質が、宇宙の構造と歴史をさらに解明するうえで欠かせない役割を担うであろうと期待されます。