

§ 7. 仁科記念財団の活動

—1999年度—

1. 仁科記念賞

研究題目 超対称標準理論における電弱対称性の量子的破れ

受賞者 九州大学理学部 井上研三 教授

近畿大学九州工学部 角藤 亮 教授

業績の概要

素粒子物理学の課題は自然界の基本粒子とその間に働く力の性質を明らかにすることにある。現在自然界には、電磁的な力、核力、弱い力、重力の4つの力が存在することが知られている。これらの4つの力は大きく異なる強さや性質を持ち通常それぞれ別々の理論で議論される。しかし現在の素粒子論では、日常的なエネルギー・スケールでは異なって見えるこれらの力も、よりエネルギーの高い現象や微視的スケールの世界ではその違いが次第になくなり、より対称性の高い基本的な理論で統一的に理解されるようになると考える。

こうした統一理論の考え方の最も成功した例は、電磁的な力と弱い力を統一する電弱統一模型（ワインバーグ・サラム理論）である。陽子の1000倍程度のエネルギー領域（TeV領域と呼ばれる）以上では電磁的な力と弱い力は別々に取り扱うことが出来なくなり、二つの力は密接不可分なものとして一つの統一的な理論で記述される。ワインバーグ・サラム理論は1970—80年代を通じてその正しさが実験的に確立された。

一方、陽子、中性子らを結び付けて原子核を形作る核力（強い相互作用）は、量子色力学（QCD）と呼ばれる理論で正しく記述されると考えられており、ワインバーグ・サラム理論と QCD をあわせて素粒子の標準理論と呼んでいる。

ワインバーグ・サラム理論や QCD の成功が明らかになってきた1980年代始めころから、更にこの二つの理論を統一する大統一理論（Grand Unified Theory）の頭文

字をとって GUT と呼ばれる）の試みが活発に研究されるようになった。

この時重要なのが超対称性の考え方である。QCD と電弱理論の統一は陽子の質量の10の16乗（1億の1億倍）程度のエネルギー・スケール（GUT スケール）で起きると考えられる。一方電弱理論の統一は陽子の1000倍程度のエネルギー・スケールで起きる。このため大統一理論は非常に大きさの異なる二つのエネルギー・スケールを内包する。このように大きさの異なるエネルギー・スケールが理論の中に安定して存在するためには超対称性が必要なことが知られている。

自然界の素粒子は整数スピンを持つボソンと半整数スピンを持つフェルミオンとに大きく分けられる。超対称性はスピンの異なるボソンとフェルミオンとを入れかえる対称性で、時空の性質や重力理論とも密接に関係している。超対称を持つ統一理論（超対称標準理論とも呼ばれる）は最も有望視されている理論であり、超対称統一理論の予言をテストすることが現在の高エネルギー実験の主要な課題となっている。

井上、角藤両氏は超対称標準理論の研究で重要な成果を上げた。即ち GUT スケールで超対称重力理論から示唆される超対称性の普遍的な破れを仮定し、これを繰り込み群を用いて低いエネルギー領域に外挿してくると、丁度 TeV 領域の付近で電弱対称性の破れを引き起こすことが可能のこと。すなわち TeV 領域より低いエネルギー領域で電弱理論の統一が崩れて電磁気の力と弱い力に分離することを示した。このメカニズムは電弱対称性の輻射補正による破れ（Radiative Breaking of Electro- Weak Symmetry）と呼ばれ、現在超対称統一理論の基本的なメカニズムとして広く用いられている。

また、井上、角藤両氏は TeV 付近で電弱対称性が破れるためにはトップ・クォークの質量が60–180 GeV 程度の大きな値でなければならないことを初めて指摘した。数年前、米国フェルミ研究所で発見されたトップ・クォークの質量は174 GeV であり、井上・角藤氏の予言を裏付けるものと言える。両氏の研究の独創性と先見性は高く評価される。

受賞論文

"Aspects of Grand Unified Models with Softly Broken Supersymmetry",

K. Inoue, A. Kakuto, H. Komatsu and S. Takeshita, Prog. Theor. Phys. 68 (1982) 927-946.

研究題目 大気ニュートリノ異常の発見

受賞者 東京大学宇宙線研究所 梶田隆章 教授

業績の概要

ニュートリノは、素粒子と呼ばれるクオークとレプトンの中でも弱い相互作用(それに重力相互作用)しかないという意味で特殊である。このため、ニュートリノは超新星の爆発時に中心部分の情報を外部にもたらすこともできる。事実、宇宙線研究所神岡地下観測所に設置されたカミオカンデと呼ばれる大量の純水を用いた粒子検出器が、超新星1987Aからのニュートリノを検出し、超新星や宇宙物理学に関する大きな知見をもたらしたことは周知のことであり、当時のカミオカンデの主要メンバーである小柴昌俊、戸塚洋二、須田英博の3氏に1987年の仁科記念賞が贈られた。

ニュートリノはこのほかにも太陽の内部を探るよいプローブと考えられており、事実太陽ニュートリノの欠損問題として知られる重要な未解決の問題を提起している。カミオカンデおよびそれをより強力にしたスーパーカミオカンデは、この太陽ニュートリノに関してもこれまでの検出器に比して格段に良いデータを提供し、大きな貢献をしてきた。

さて、地球の大気には宇宙線とよばれるエネルギーの高い粒子(主に陽子)が降り注いでおり、これら宇宙線と大気上層部の原子核との衝突により、パイ中間子(湯川中間子)およびK中間子等が生成されている。たとえば、マイナスの電荷を持つパイ中間子は、

一パイ中間子 → μ 粒子 + 反 μ ニュートリノへ、

できた μ 粒子はさらに、

μ 粒子 → μ ニュートリノ + 電子 + 反電子ニュートリノ

という崩壊をする。この崩壊様式からわかるように、1個のパイ中間子が崩壊したときには、2個の μ ニュートリノ(反 μ ニュートリノも含める)と1個の電子ニュートリノ(反電子ニュートリノも含める)が生成される。これらのニュートリノは一般に大気ニュートリノと呼ばれている。カミオカンデおよびスーパーカミオカンデ装置は、 μ ニュートリノと電子ニュートリノを区別することができる。

梶田博士は、カミオカンデによる陽子崩壊の探索実験から研究生活に入り、引き続き現在も神岡におけるスーパーカミオカンデを使った陽子崩壊探索実験および大気ニュートリノの観測に従事している。大気ニュートリノは陽子崩壊探索実験のノイズ源でもあり、そのためにも、大気ニュートリノを詳しく調べる必要がある。梶田博士は、まずカミオカンデを用いて、他の研究者と共にその中心となって、特に最も基本的な観測量であるところの μ ニュートリノと電子ニュートリノの反応数の比を観測と解析により導いた。驚いたことにこの比は2にならず、1.2に近かった。また、この比の天頂角分布を求めたところ、地球の反対側から(地面の下から)飛来する μ ニュートリノが地面の上からくるものよりも少ないという兆候を得た。残念ながら、カミオカンデ装置は大気ニュートリノの精密観測には小さすぎ、これら2種類の観測結果は、万人の認めることとはならなかった。

1996年4月、カミオカンデの10倍以上の大きさと格段に良い性能を持つ5万トン水チエレンコフ装置、スーパーカミオカンデが宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設に完成し、太陽ニュートリノと大気ニュートリノの精密観測、それに陽子崩壊の探索実験に入った。

梶田博士は、スーパーカミオカンデ装置建設に際し、装置にとって重要な光電子増倍管取り付け工事の責任者として予定通りの建設完了に本質的な役割を演じた。

また、観測開始後は、大気ニュートリノ観測グループの解析責任者として、日米研究者をとりまとめ、迅速に解析結果を出すという困難な役割を担ってきた。スーパーカミオカンデ装置は、カミオカンデよりはるかに向上した μ ニュートリノと電子ニュートリノの識別能を有し、かつ大気ニュートリノ観測数ではカミオカンデの20倍以上という圧倒的な性能を有している。大気ニュートリノの観測数は最初の1年でカミオカンデの全観測数を越え、2年次にはカミオカンデの3倍以上の観測数

を得た。その結果、 μ ニュートリノ対電子ニュートリノ比はやはり 2 よりずっと小さいことが確実となった。また、天頂角分布も観測数の多さから詳しいデータが得られ、 μ ニュートリノ対電子ニュートリノ比の異常だけでなく、地球の反対側から来る μ ニュートリノが上から来るニュートリノにくらべて約半分近くに減っていることを確認することができた。以上がいわゆる「大気ニュートリノ異常の発見」の経緯であり、この発見に果たした梶田博士の役割は非常に大きく、その功績は高く評価される。

なお、最近のアメリカおよびイタリアにおける大気ニュートリノ実験でも、スーパーカミオカンデの結果を支持するデータが得られている。

さらに、大気ニュートリノ異常の原因を調べる作業はスーパーカミオカンデ共同研究グループにより精力的に行われている。ニュートリノが有限の質量を持ち、 μ ニュートリノが運動している間にタウニュートリノと呼ばれる 3 番目のニュートリノ等に「振動」的変身をするというニュートリノ振動という現象が考えられている。最近の報告によれば、大気ニュートリノ異常の原因是、このニュートリノ振動によって引き起こされていることがほぼ確実である。

この結果は、ニュートリノの質量を 0 とした素粒子の標準模型に変更を迫っているとともに、素粒子物理学のみならず、宇宙物理学にも多大なインパクトを与えている。

参考文献：

梶田隆章：「パリティ」1999年4月号、4ページ。

E. カーンズ、梶田隆章、戸塚洋二：「日経サイエンス」1999年10月号。

研究題目 超伝導素子を用いたコヒーレント 2 準位系の観測と制御

受賞者 日本電気株式会社基礎研究所主任 中村 泰信 氏

業績の概要

中村泰信氏は、最新の微細加工技術を用いて単一電子超伝導素子を作製し、巨視的量子状態からなる 2 準位系を人工的に作りだし、その量子コヒーレンスの存在を

実験的に明らかにするとともに、それを外部から加える電圧で人工的にコントロールすることに世界で初めて成功した。具体的な業績は以下のとおりである。

超伝導体は二つの電子からなる電子対が凝縮した巨視的量子状態にあり、一つの巨視的な波動関数で記述される。そのため、二つの超伝導体を薄い絶縁体を挟んで接触すると、それぞれの波動関数の位相差により超伝導トンネル電流が流れる。一方、超伝導体を微小にすると、電子の電荷に伴う帶電エネルギーのために超伝導体の電子数は一定に保たれるようになり、電子数が 1 電子対（電子 2 個）だけ変化するとエネルギーの大きな跳びが現れる。

このような微小な超伝導体の箱を薄い絶縁体を挟んで大きな超伝導体と組み合わせることにより、微小な超伝導体に含まれる全電子数が 1 電子対（電子 2 個）分だけ異なる 2 準位系を作ることができる。この系は実際には電子数が 10 の 8 乗個と巨視的であるにも関わらず、量子力学に従いトンネル効果により互いに移り変わる 2 準位系と見なすことができる。量子力学によれば 2 準位系の状態は二つの準位の重ね合わせで表され、特にそのエネルギーが等しい場合には、状態が結合状態と反結合状態の二つに分裂する。また、ある時間に片方の準位にあった状態は、その後二つの準位の間を周期的に量子振動する。

中村泰信氏は、微小超伝導素子を用いて巨視的な量子 2 準位系を実際に作製し、2 準位間の時間的な量子振動を観測し制御するとともに、結合状態と反結合状態間のエネルギー差を直接観測することに成功した。これまでに、巨視的な量子状態の間のトンネル効果やコヒーレンスについて世界中で研究が行われてきたが、摩擦など巨視的な系特有の散逸効果のために量子コヒーレンスを実現することが難しかった。中村泰信氏の仕事により、巨視量子現象のコヒーレンスと散逸効果の研究が、これから大きく進歩することが期待される。また、この仕事は、半導体集積回路に使用されているトランジスタ程度の大きさの固体の構造で量子 2 準位系を実際に作製し、状態の読み込みと制御を電気的に行うことを初めて可能にしたので、量子計算を実現するための量子ビットの実現へ向けての第一歩としても評価できる。