

出版されたものは、できるだけ多くの人々に読んでもらいたいと念願しております。

§ 6. 仁科記念財団の活動 —2001年度—

1. 平成13年度 第47回 仁科記念賞

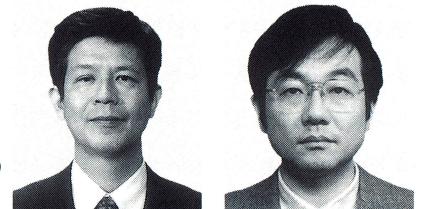
研究題目 「太陽ニュートリノの精密観測によるニュートリノ振動の発見」

受賞者 鈴木洋一郎

(東京大学宇宙線研究所教授)

中畑 雅行

(東京大学宇宙線研究所助教授)



われわれの活動を支える源泉である太陽エネルギーは元素を合成する核融合反応に由来するが、陽子を中性子に変換するその一連の過程で電子ニュートリノが生成・放出される。すなわち、ニュートリノの検出は太陽での核融合過程の直接的な証拠を与える。ニュートリノの強度は太陽の中心部での諸条件、温度などに依存し、太陽深部を探る手段でもある。「太陽ニュートリノ」を検出す最初の試みである米国グループの実験から約30年が経過しているが、ニュートリノ強度の観測値は、太陽についての「標準モデル」による計算の理論値より小さく、「太陽ニュートリノ問題」として長年の宿題となってきた。この矛盾を説明する可能性として、太陽から地球への飛来の途中で電子ニュートリノが他の種類のニュートリノに変化する「ニュートリノ振動」がある。もしこの仮説が正しいとすると、ニュートリノはゼロと異なる質量をもつことになる。このように、「太陽ニュートリノ問題」の解明は素粒子物理学と天文学にまたがる重要な基本的意義をもつ研究課題となっている。

本研究で用いた「スーパーカミオカンデ」の50,000トンの水チェレンコフ装置は

ニュートリノとの弾性散乱による反跳電子をリアルタイムで検出し、ニュートリノの到来方向を知ることができる。この特長に基づいて、太陽からのニュートリノ信号を雑音事象から明確に識別し、実験精度を著しく高めることに成功した。すなわち、太陽ニュートリノ問題の実験的検証にかかる不確かさをできるだけ少くするという地道な方法に正面から挑んで、電子ニュートリノ強度についての観測値と理論値との食い違いを定量的に確立し、その結果、電子ニュートリノがミュニユートリノあるいはタウニュートリノなどに変化する現象、ニュートリノ振動を観測事実として明らかにした。

スーパーカミオカンデの測定方法のもととなる、電子ニュートリノの弾性散乱には、電子ニュートリノ以外の、元素合成反応では生成されないニュートリノすなわちミュニユートリノやタウニュートリノも寄与できるから、スーパーカミオカンデで観測された太陽ニュートリノ強度には、これらのニュートリノが含まれていてもよい。しかし、ミュニユートリノやタウニュートリノの電子との弾性散乱の反応断面積は電子ニュートリノの場合の約0.15倍である。ミュニユートリノやタウニュートリノが太陽から飛来しているとしたら、その寄与からの事象の観測数を電子ニュートリノに比べ小さくする効果があり、理論値に対する観測値の不足を説明できる。

水チエレンコフ光を検出するスーパーカミオカンデ装置では、太陽ニュートリノの中でもホウ素 (^8B) のベータ崩壊からのニュートリノを測定の対象とする。このニュートリノはその最大値15MeVの連続エネルギースペクトルを持ち、データ解析を適用できるためのエネルギーをできるだけ下げることが実験精度を高めるために重要である。観測を開始した1996年の2年後には5 MeVまでのニュートリノの検出を可能にした。さらに、ニュートリノの絶対的な強度を確定するために、陽子加速器および中性子発生器を駆使した較正実験を開発して0.5%のエネルギー検出精度を達成し、系統誤差を抑えた精密なデータを提供した。その結果、太陽からのニュートリノ強度（5 MeV以上）は 2.32 ± 0.03 （統計誤差） $+0.08 - 0.07$ （系統誤差） $\times 10^6\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であるとの結論を得て、観測値の理論値に対する比Rが 0.459 ± 0.017 と1より有意に小さいことを確立した。これらのデータからニュートリノ振

動のパラメーターへの制限を絞りこみつつ、振動機構の解明に迫っている。反跳電子のエネルギースペクトルを測定するなど、考えられるかぎりの多様な方法による観測データを提供して、世界の諸研究グループをリードしつつ太陽ニュートリノ研究の発展方向を導いてきた。

このような背景の下で、本年6月、カナダのSNOグループが重水を使った観測装置により、重水素との反応 $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ を起こした電子ニュートリノを検出し、その強度が 1.75 ± 0.07 （統計誤差） $+0.12 - 0.11$ （系統誤差） $\times 10^6\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ （電子ニュートリノのエネルギーは6.75MeV以上で $R = 0.347 \pm 0.029$ に相当）であるとの解析結果を明らかにした。標準偏差の3倍以上の信頼度でスーパーカミオカンデによる強度より小さい。すなわち、スーパーカミオカンデとSNOの強度の差は電子ニュートリノ以外の成分が太陽から飛来していることで説明でき、スーパーカミオカンデの観測データにミュニユートリノやタウニュートリノの寄与が含まれていることがはっきりした。電子ニュートリノ以外のニュートリノの強度が推測でき、電子ニュートリノと合わせた太陽ニュートリノの全強度は太陽標準モデルからの計算値に一致している。

本研究は、このように、宇宙物理学と素粒子物理学の両分野における重要な研究成果をあげた。太陽の内部についてこれまでの科学的知見が基本的に正しいことを立証した。また、電子ニュートリノの振動が観測事実として明らかにされ、その振動機構の解明からは素粒子相互作用研究に多大な衝撃的影響がもたらされる。

実験グループは国際共同実験であり、授賞対象者の両氏のほかにも、国内外の多くの研究機関の研究者が参加しているが、鈴木教授は太陽ニュートリノ実験において終始指導的な役割を果たし、また中畑助教授は装置の開発・改良・較正の諸研究で中心的役割を担ってきた。

研究成果発表論文（代表的論文）

Solar ^8B and hep Neutrino Measurements from 1285 Days of Super-Kamiokande Data, S. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 5651.

Constraints on Neutrino Oscillations Using 1285 Days of Super-Kamiokande Solar Neutrino Data, S. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 5656.

研究題目 「B中間子におけるCP対称性の破れの発見」

受賞者 高崎史彦

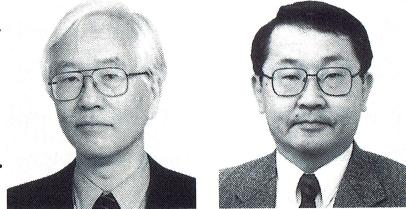
(高エネルギー加速器研究機構・

素粒子原子核研究所教授)

生出勝宣

(高エネルギー加速器研究機構・

加速器研究施設教授)



粒子と反粒子が本質的に非対称であることを意味するCP対称性の破れは、1964年に初めてK中間子の崩壊において発見され、その起源は素粒子物理学の大きな謎として研究されている。宇宙に物質のみが存在することにも関連した重要な問題である。小林・益川模型を含む標準理論による説明など、その起源としていくつかの可能性が示されている。しかし、実験ではK中間子の崩壊以外にこれまでCP非対称を示す現象は確認されていなかったため、本当の起源を探る手立てがなかった。標準理論の説明に従えば、B中間子系において大きなCP非保存が現れる可能性があることを三田一郎氏らが指摘し、B中間子のCP対称性の破れを見つけることは、実験研究の重要な課題となった。

このテーマに挑戦すべく、BファクトリーのKEKBが建設され、国際共同実験のBELLEが推進された。これとほぼ同時期に、同じ目的でアメリカSLAC研究所のBファクトリーPEP-II 加速器とBaBar実験の建設が始まって、両者の競争となつた。KEKBは予定通り1998年に完成し、初期調整の後翌1999年から本格的な実験が始まつた。

KEKBは非対称エネルギーの電子・陽電子衝突装置で、高頻度で衝突反応を引き起こすため多くの新しい試みがなされ、大量のB中間子・反B中間子対を作り出す。エネルギーはもっともB中間子対の出来やすい共鳴状態に設定されている。しきい値のすぐ近くにあるため、そこでは反応エネルギーが全てB中間子と反B中間子の対生成に使われて、両者の相互運動が起こらず、B中間子と反B中間子は同じ速さ

(およそ光速の半分)でビーム方向に飛び出す。B(反B)中間子は寿命が約1兆分の1秒強で壊れるので、平均の飛行距離は0.15ミリメートルくらいとなる。

B(反B)中間子は重いために、さまざまな崩壊過程があるが、中性のB中間子(B^0)と反B中間子(反 B^0)の場合、極めて稀にであるが、どちらからも崩壊する終状態がある。これらはCP固有状態と呼ばれ、典型的なものにJ/ψ中間子と K^0_s (または K^0_L)中間子の対がある。この場合、崩壊後の粒子を検出しただけでは、 B^0 あるいは反 B^0 どちらの中間子が壊れたものか判別できないが、もう一方が B^0 あるいは反 B^0 と判別できれば、それが壊れた瞬間に、CP固有状態に壊れた方はその反対である。 B^0 中間子と反 B^0 中間子には相互に入れ変わる現象(B^0 -反 B^0 振動と呼ばれる)があり、時間を追って交互に変化する。もしCP対称性が破れているならば、 B^0 から反 B^0 に変化する過程と反 B^0 から B^0 に変化する過程に違いが現れる。このため、識別の瞬間を基点としてCP固有状態に壊れた方の寿命を測ると、固有状態のタイプごとにB中間子でわずかな違いが生ずる可能性がある。(ただし、全ての崩壊過程を合計した全体の寿命は同じである。)

この解析に使える崩壊事例はB中間子対数万に対して1例程度しかなく、十分な統計精度を得るには大量のB中間子対を発生する必要がある。このためには高輝度衝突装置が不可欠で、KEKBでは $10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ という前例のない高輝度を目指す設計がなされ、計画どおりの建設期間で運転が開始された。また、0.1ミリメートル程度の飛行行程差を正確に計るために半導体検出器を用いた高精度の位置測定機能と、B中間子(反B中間子)崩壊を識別するための高度の粒子識別能力を持った全方位形測定器が必要であった。さらに、高頻度の衝突反応を処理できる高速データ取得、事象識別能力も欠かせなかった。BELLEグループはこれら全てを備えた汎用検出器を、やはり計画通り完成した。

データ取得開始からKEKBの輝度は急速に向上し、今年の夏までに世界最高の値である $4 \times 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に到達し、BELLE実験は3千万事象のB中間子対を記録した。このデータを用いて、CP対称性の破れを解析し、それ破れを表すパラメータに関して、明らかに対称性の破れを示す結果を得た。

この成果はPEP-IIのBaBar実験の結果とほぼ同時に発表されて、両者が得たパ

ラメータの値は幾分異なっているものの、統計的な誤差の範囲に概ね収まり、ともにCP対称性の破れを示した。これが相互検証となり、B中間子におけるCP対称性の破れが確立された。

この成果はCPの破れの研究を進める上で重要な一歩となり、素粒子研究に大きく貢献した。さらに統計精度を挙げた場合、結果が標準模型の枠に収まるかどうか、今後の展開も注目されている。

BELLE実験は十数カ国の研究者による大きな国際共同実験グループの協力で行われた作業であったが、その中で、高崎氏はBファクトリー計画が決定される前から、その重要性と実現可能性を指摘し、研究分野の中心となって準備研究をリードして、計画の実現に尽力した。計画の発足後はBELLE国際チームの中核となって、引き続き汎用測定器の設計と建設を指揮し、世界的に前例を見ないような優れた測定器を完成させた。実験開始直後から、BELLEグループは測定器の性能を完全に活かすデータ解析を迅速かつ着実に進めて、今回の成果に到達した。ここに至るまで、高崎氏は十年余に亘り一貫してBELLE実験に中心的かつ指導的な役割を果たし続けて来た。

BELLE実験がこの優れた結果を生むに当たっては、KEKB衝突装置が設計に違わず急速にその性能を向上し、十分のデータ量を確保したことが不可欠で、加速器の設計、建設、コミッショニングの成功が重要な要因であった。加速器と大きなグループが力を結集した共同作業によるものであったが、その中で、生出氏は基本的设计以来多大の貢献をした。とりわけ、生出氏の提唱した非対称エネルギーのビームを有限角度で衝突させる方式は前例のない新しいものであり、従来不可能と目されていた。生出氏はその可能性を理論的に示したうえ、KEKBの設計に際して世界で初めての試みに挑み、完成後は実際にコミッショニングを指揮して世界最高の高輝度を実現した。有限角衝突方式によってBELLE測定器への軌道放射光による被曝の軽減が図れ、測定器の設計、運転上多大の効果があった。それもBELLE実験の成功の要因であった。

KEKBにおけるBELLEの研究は、同様の目的を掲げて進められたBaBarとの激しい競争の中で行われたが、衝突装置と実験装置が、完成後短期間にほぼ完ぺきな

性能を示し、素粒子物理学の発展に寄与する今回の成果を生んだ。国際的にも非常に高く評価されている。その成果に到達する上で、高崎氏、生出氏の先見性に富んだ学問的、指導的貢献度が顕著であった。

[参考文献]

Measurement of the CP violation parameter $\sin^2\phi_1$ in B^0 meson decay

A. Abasian et al., Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 2509

Observation of large CP violation in the neutral B meson system

K. Abe et al., Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 091802

Beam-beam collision scheme for storage-ring colliders

K. Oide and K. Yokoya, Phys. Rev. A40 (1989) 315

研究題目 「超高压下における酸素および鉄の超伝導の発見」

受賞者 天谷喜一

(大阪大学大学院基礎工学研究

科教授)

清水克哉

(大阪大学大学院基礎工学研究

科助手)



天谷、清水両氏は、50ミリケルビン、200万気圧という極低温と超高压という未踏の複合極限下での物性測定技術を開発してきた。この独創的技術によって、我々に身近な酸素（O）や強磁性体の代表である鉄（Fe）について、超高压下において超伝導の存在を見出した。両氏は、上記に加えて、I, Br, Ca, Sなどについても、圧力誘起超伝導を見出し、周期律表中の多くの絶縁性あるいは強磁性を示す元素物質も、高压下では金属伝導を示すばかりでなく、「超伝導を示さぬ元素はむしろ例外的である」とことを明らかにした。

100GPa（1 GPaは約1万気圧）にいたる超高压は、たとえば地球内部構造の研

究に見られるように、室温以上の高温域における物質の構造を探るために利用されてきた。しかし、天谷、清水両氏は新しい物性探索の手段として、極低温・超高压という複合極限環境の生成技術と関連する物性測定技術を独自に開発し、酸素、鉄などの物質群における超伝導現象を発見した。この報告は、多くの物質科学研究者を驚嘆させただけでなく、広く一般にも、「身近な物質も極限環境下に置けば劇的な物性が発現する」という、自然科学の奥深さをわかりやすい形で示した点で、その功績は大である。

両氏が示した、酸素や鉄の高圧下での超伝導には、物理学的にも興味深い問題が潜んでいる。酸素は、非常に身近な物質であるが、酸素分子は実は磁性を持っている。彼らは、まず、圧力下で固化した酸素が、100GPaで分子性 (O_2 の形) を残したまま金属化し、その状態のまま冷却すると、0.6K（ケルビン）で超伝導体へと転移することを示した。酸素分子本来の持つ磁性が未だ消失していないのか、もしそうであれば、銅酸化物高温超伝導体のように、磁性の存在自体が超伝導の発現に関係しているのか、興味がもたれている。

また、鉄に関しては、強磁性と超伝導は、普通はもっとも相性の悪いものである。しかし、鉄も10GPa以上の高圧下では、強磁性を失うことが知られている。両氏は、これ以上の圧力では超伝導が見つかってもよいはずと考えて、その探索を執拗に続けた。特に、極低温に至る領域で圧力の静水圧性を確保する技術と試料の純化の改良を加えつけ、ついに今年になって超伝導の発見に至った。超伝導は、15GPaと30GPaの間で、最高2Kの転移点をもって出現した。現在はこのような転移点の圧力依存性から、従来の超伝導機構（BCS理論）とは異なる超伝導機構（たとえば、反強磁性スピン揺らぎを電子対の引力媒介とする機構など）の可能性が議論され始めている。またこの発見は、他の代表的な強磁性体であるコバルトやニッケルなど多くの磁性金属に超伝導の可能性を与えるとともに、「磁性と超伝導の競合・協調」という固体物理学の基本的で重要な問題に新しい課題を投げかけている。

以上の研究過程で、天谷氏は研究課題を提案、研究グループをリードし、実験結果の討論・総括を行った。一方、清水氏は、当初より天谷氏の共同研究者として、数々の創意工夫をもって、極限環境生成および測定技術の開発を行い、この研究を

成功に導いた。

〈代表的な論文〉

“Superconductivity in Oxygen”

K. Shimizu, K. Suhara, M. Ikumo, M.I.Eremets, and K. Amaya : Nature, 393, 767
(1998).

“Superconductivity in the Non-Magnetic State of Iron under Pressure”

K. Shimizu, T. Kimura, S. Furumoto, K. Takeda, K. Kontani, Y. Onuki, and K. Amaya : Nature, 412, 316 (2001).