

## § 6. 仁科記念財団の活動 —2000年度—

### 1. 第46回 仁科記念賞

研究題目 宇宙線反陽子の観測



受賞者 東京大学大学院理学系研究科

折戸周治教授

高エネルギー加速器研究機構低温工学センター 山本 明教授

#### 業績の概要

宇宙からは様々な粒子が宇宙線として地球にやってくる。その源は新しい天体や超新星の爆発と推測されるが、まだ完全には理解されていない。その解明は宇宙物理にとって大きな課題であるとともに、素粒子物理にも深く関係している。

宇宙線の中には、反粒子と呼ばれる粒子も混ざっている。たとえば、かつて反粒子存在の証明となった陽電子や、反水素の原子核である反陽子がある。このうち反陽子については、宇宙線中に存在することが分かってからすでに久しいが、その識別が困難なこと也有って、本研究までは未知なことが多かった。どんなエネルギーでどれだけ飛来するのか正確なデータがなかった。その起源を知る上にもスペクトルは欠かせない。宇宙に反物質天体があって、それが源になっているのか、高エネルギー陽子が星間物質と反応して生ずる二次粒子なのか、小型のブラックホールが生成源か、といった疑問を解決するには、まず正確なスペクトルの絶対値を知る必要があった。

本研究は、この課題に正攻法で取り組み、初めて確度の高い測定を行ったものである。高エネルギー物理学実験で使われている最新技術を取り入れることにより、それが可能となった。粒子と反粒子の識別のためには、粒子の質量とともにその電荷の正負を知る。

高エネルギー物理の実験では、強磁場中の粒子の飛跡から、粒子の運動量と併せ

て電荷の正負を測定する手法が広く用いられている。この研究では、同じ手段が取られたが、それに加えて超伝導技術の画期的な開発があり、実験の成功に導く測定器系が建設された。

宇宙線は地球に達すると大気上空で反応を起こし、ほとんどは吸収され地上まで届かない。特に反陽子は反応しやすく、大気外あるいはきわめて大気の薄い上空で測定しなければならない。本実験では宇宙科学研究所、米国 NASA の協力を得て、高性能気球に測定器を搭載して観測が行われた。気球の浮力は小さいため、搭載機器の総重量には厳しい制限があった。そのために、電源なしで長時間磁場を維持できる永久電流の超伝導磁石を開発した。さらに測定器自体に起因する物質量を減らすためにコイルを最大限薄くする必要があった。気球搭載のために他の測定器要素についても軽量化、堅牢性が要求され、データの記録にも工夫が必要であった。グループは世界的に優れた技術を以て、これらの開発に成功した。

データ取得は1993年以来毎年夏にカナダのリンレークを基地として行われた。飛行は天候に左右されるため、1ヶ月の準備、待機の間に1度ないし2度可能であった。滞空時間は電池や磁石の持続時間に制限されて、およそ一昼夜であり、その後測定器は地上に降下、回収された。宇宙線強度は太陽活動によって影響を受けるため、活動期、非活動期のデータを比較検討することが、測定結果の解析や宇宙線伝搬模型の考察に際して有意義であり、困難を伴う観測環境で長年繰り返し測定を続けた意味は大きい。

一連の測定を合わせて、1500を越える反陽子事象が記録され、そのエネルギー分布が初めて明らかになった。スペクトルは、2億電子ヴォルト/cから20億電子ヴォルト/cの範囲で測定されている。低い運動量では少なく、運動量とともに増大して、10億電子ヴォルト/c辺りで緩やかな山となり、さらに高い運動量では再び減少に向かうような傾向を示している。これは反陽子の起源が高エネルギー粒子反応で生じた2次粒子で、宇宙を漂った末地球に到達したものとするモデル計算の結果と概ね合致する。しかし、低い運動量の部分には、統計的に有意ではないが、モデル計算の予想に比べ幾分の超過の傾向も見られ、今後のデータ蓄積による精度向上が期待されている。こうした兆候が有意になれば、新しい反陽子源の発見につな

がる可能性もある。

この実験では反陽子よりもさらに重い反ヘリウム原子核の探索も可能で、試みられたが検出されていない。このことから、宇宙に存在するかも知れない反ヘリウムの上限値を、従来に比べてさらに精度良く定めている。

本研究は、高エネルギー物理学用測定器と、超伝導技術の新開発によって宇宙物理学における新しい研究成果を上げた。異なった研究分野間の協力が実を結んだものである。実験グループは、受賞対象の両氏のほかにも、宇宙科学研究所、神戸大学、高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所等の複数の研究機関の研究者が協力した国際共同実験であるが、その中で、折戸教授は実験発案以来終始指導的な役割を果たし、また山本教授は超伝導磁石の開発を始め、実験遂行上の中心的役割を担ってきた。

#### 発表論文

Observation of Cosmic-Ray Antiprotons at Energies below 500MeV/c

K. Yoshimura et al., Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 3792

Development towards ultra-thin superconducting solenoid magnets for high energy particle detectors

A. Yamamoto et al., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 78 (1999) 565

A superconducting solenoidal spectrometer for a balloon-borne experiment

Y. Ajima et al., Nucl. Instr. and Meth. A443 (2000) 71

Precision Measurement of Cosmic-ray Antiproton Spectrum

S. Orito et al., Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 1081

研究題目 小西アノマリーの発見

受賞者 イタリア Pisa 大学 小西憲一教授



### 業績の概要

自然界を形作る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に大きく分けることが出来る。素粒子の超対称性はボソンとフェルミオンを互いに結び付ける対称性で、素粒子の統一理論を構成する試みでもっとも重要な役割を担っている。ここ数年間にわたり超対称性を持つゲージ理論の種々の厳密解が発見され、超対称理論の力学の研究が飛躍的に発展した。これらの発展は小西憲一氏が1984年に発見したいわゆる小西アノマリーと呼ばれる関係式をその基礎にしており、小西アノマリーの重要性に関する認識が高まっている。

一般に古典的な理論が対称性を持つと電荷保存など対応する保存則が成立することが知られている。しかし場の量子論においては、古典的な保存則が量子効果のため特定の仕方で破れたことがあり、この現象を量子論的なアノマリー（異常性）と呼んでいる。特に質量が零のフェルミ場に伴ってあらわれるカイラル・アノマリーは良く知られており、その分析はインスタントン効果などゲージ場の量子論の非摂動的研究に不可欠の道具となっている。量子論におけるアノマリーの起源としては、経路積分と呼ばれるファインマンに始まる量子化法では、量子論を定義する経路積分の測度がカイラル変換に不变でないことからカイラル・アノマリーが現われることが知られている。

小西氏は超対称ゲージ理論におけるカイラル対称性の考察から、1984年に小西アノマリーと呼ばれる量子論的な関係式を導いた。小西アノマリーは強い相互作用の理論でも補正を受けることなく厳密に成り立つ関係式である。超対称ゲージ理論では量子効果のため理論の(1)超対称性が破れる場合、(2)ゲージ対称性が破れる場合、(3)カイラル対称性が破れる場合など種々の可能な相構造が現れる。小西アノマリーは個々の超対称ゲージ理論がどの相をとるかを決定し、理論の力学を非摂動的に議

論するため基本的な役割を果たす。

まず、小西アノマリーとインスタントン計算を併用することにより、ある種のゲージ理論では超対称性が実際に破れることを示すことができる。ボーズ粒子とフェルミ粒子は現実には等しい質量を持たないので自然界では超対称性はその一部分が破れていると考えられるが、これらの模型は超対称性の自発的破れを示す最も重要な場の理論の模型となっている。

また、超対称理論ではゲージ変換の位相が複素数に拡張されるために、カイラル変換はスケール変換と密接に関わっている。従って、スケール変換に関する関係式である繰り込み群の方程式とカイラル・アノマリーが超対称性で結びつく。このため、小西アノマリーを用いると繰り込み群の $\beta$ 関数を摂動の全次数にわって厳密に決定することができる。

近年サイバーグはウイッテンと共同して、インスタントン効果と理論のパラメーターに関する正則性を用いて、超対称理論の双対性に関する画期的成果を導いた。この時、小西アノマリーは双対性の基礎を支えている重要な役割を果たした。超絃理論やM理論は低エネルギーの世界においては超重力理論に帰着するが、小西アノマリーは超重力理論にも拡張することができ、この場合にも超対称性の破れに関する有用な情報を与えてくれる。

以上述べてきたように、小西アノマリーは超対称理論におけるカイラル・アノマリーに相当する普遍的かつ重要な位置を占めており、今後も超対称理論の非摂動的研究に不可欠の手段として広く応用されてゆくことは疑いない。

また、小西氏自身もこの研究を精力的に続けている。

### 発表論文

- [1] K. Konishi, "Anomalous Supersymmetry Transformation of Some Composite Operators in SQCD", Phys. Lett. 135B (1984) 439.
- [2] K. Konishi and K. Shizuya, "Functional-Integral Approach to Chiral Anomalies in Supersymmetric Gauge Theories", Nuovo Cim. 90A (1985) 111.

研究題目 フェルミ粒子動力学による原子核の研究

受賞者 京都大学大学院理学研究科 堀内 祐教授



#### 業績の概要

堀内氏は、従来の原子核の諸理論を含む包括的な動力学を構築し、中性子過剰核などの新しい構造を理解し新構造の予言したこと、原子核同士の衝突過程（重イオン反応）を広いエネルギー範囲で理解したことにより、仁科賞を受賞する事となった。

元来の、物性物理学で開発された分子動力学は、相互作用する点粒子多体系にたいする古典的理論であったが、原子核のように、核子の統計性と波動性の量子効果が強く現れる系に関しては、全く無力であった。堀内 祐氏は、他の協力者とも協力し、量子力学を取り入れた反対称化動力学（Antisymmetrized Molecular Dynamics：略称 AMD）による理論を構築した。この理論は、量子多体系の分子動力学であり、核子の波動性を、位置と運動量を広がりを持つ波束群によって表現し、フェルミ統計性を、全系の波動関数を完全に反対称化することによって組み入れる。このように構築された AMD は、量子効果の強いフェルミ多体系に対する、何らかの模型の仮定なしに、原子核を記述することができる。従来の原子核の諸理論を包括するものであり、その理論としての基本に相応して広範な領域の核構造と核反応の実験結果を再現することができるものと評価される。

構造理論においては、粒子波束のスレーター行列の重ね合わせを行い、全核子の波束パラメター（中心座標、運動量及びその幅）等は変分原理で決める。衝突問題では、時間依存変分原理でパラメターの時間発展を追うと共に、2核子衝突や波束分割によるチャンネル分岐を扱う。波束分割とは、波束の幅の時間発展を追う過程で、核表面で核外への放出できる波と、放出できず核内へ反射される波とに、波束を分割することである。これらの方法を用いることにより、AMD 理論は原子核の構造と反応を統一的に取り扱うことのできる新しい量子多体系の動力学理論となっ

たのである。この AMD 理論の特徴とその適用によって明らかになったことと新たに開拓された研究領域を簡潔に以下に述べよう。

核構造を理解する上で、これまで殻構造や、集團運動、クラスター構造、変形効果などを仮定したモデルが使われてきたが、AMD 理論では、これらを前提とすることなく、これらのモデルから導いた結果を、よく再現するものである。

AMD 理論の強力さは、近年の不安定核の実験研究における格段の大きな発展に良く対応して、広範な不安定核領域の核構造の変化を予見したことにより、良く示されている。その適用のうちもっとも重要なものは、中性子過剰の極限に到るまでの、不安定核領域で新しいタイプのクラスター構造が、発現することを、模型の仮定無しに導き出したことがある。中でも、これまで知られていなかった、アルファ粒子をコアとした分子的な構造を予言し、最近その構造が実験的に裏付けられた。AMD が原子核の全く新しい構造にたいしても、予言能力があることが示されたわけである。

核反応研究における AMD 理論が、他の理論と比べて群を抜いているのは、分子動力学の理論が、量子力学的に構成されている点にある。破碎反応の記述では、核子及び核クラスターが生成されるチャンネル分岐が不可欠である。AMD 理論では、波束分割とその結果としてのチャンネル分岐を自然に取り扱うことができる。量子力学的にこれを取り扱う理論は、現在、AMD 理論以外に存在しない。また、破碎反応の動的過程で、破碎片の核クラスターの殻効果を記述し得るのは、AMD 理論のみである。例えば、破碎片反応では、多数の $\alpha$ 粒子が生成されるが、複合核反応からの寄与以外に反応時間の短い動的な反応過程からも生成される筈であるが、この動的過程での殻効果を記述する反応理論は存在しなかった。この唯一の AMD 理論の計算結果によると動的反応過程からの $\alpha$ 粒子の生成は確かに大きい寄与があることが定量的に明らかになった。

核反応における AMD 理論の大きな成功を直接的に示すのは、広いエネルギー領域にわたって、原子核がバラバラになってしまう多重破碎反応や、生成粒子流などに関する90年代に蓄積されて来た多彩な実験結果を、見事に良く再現する事実である。他の理論では得られないこれらの実験の再現のみならず、重イオン反応機構

の解明に多くの新たな成果を挙げて来ている。例えば、核子当たり数百 MeV での重い核同士 ( $Au+Au$ ) の中心衝突過程である。全体爆発反応という反応機構で、超新星が爆発するごとに、高密度状態から低密度物質へと変化するが、その低密度物質で多くの小さなクラスターが形成されることが、明らかにされている。これは、低密度核物質でのクラスター形成を端的に示す実験事実としても重要である。