

南部陽一郎先生のノーベル賞受賞



南部陽一郎先生。理学系研究科には毎年のようにお見えいただき、集中講義や数多くの講演を通じて私たちに大きな感銘を与え続けてくださっています。写真は、2005年11月22日、第1回21世紀COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム(於小柴ホール)で来日された時のもの。

南部陽一郎先生の略歴

1921年	東京府東京市生まれ	現在、シカゴ大学名誉教授、大阪市立大学名誉教授、大阪大学名誉教授・
1942年	東京帝国大学理学部物理学 学科卒業	立大学名誉教授、大阪大学名誉教授・ 招聘教授、フェルミ国立加速器研究
1942年から1949年	まで東京大学 理学部物理学科にて研究員など	所名誉教授、日本学士院客員会員 (米国籍)、米国科学アカデミー会員。
1949年	東京大学理学部物理学科 助手	ダニー・ハイネマン賞(1970年)、 ロバート・オッペンハイマー賞
1949年	大阪市立大学助教授	(1977年)、文化勲章(1978年)、
1950年	大阪市立大学教授	アメリカ国家科学賞(1983年)、
1952年	理学博士(東京大学)	マックス・プランク・メダル(ドイツ、
1952年	プリンストン高等研究所	1985年)、ディラック賞(1986年)、
1956年	シカゴ大学助教授	ウルフ賞物理学賞(イスラエル、
1958年	シカゴ大学教授	1994年)など、数多くの賞を受賞
1991年	シカゴ大学名誉教授	している。

南部陽一郎先生のノーベル賞受賞をお祝いして

理学系研究科・理学部長 山本 正幸
(生物化学専攻 教授)

南部陽一郎先生(米シカゴ大名誉教授・大阪市立大名誉教授)が、小林誠氏、益川敏英氏とともに2008年度のノーベル物理学賞を受賞されたことは、私たち理学の基礎研究に携わるもの一同にとってまことに勇気づけられる快挙であり、心からお祝い申し上げます。とりわけ南部先生は本学理学部の卒業生であり、小柴特別栄誉教授のノーベル賞受賞から6年を経て、理学系研究科・理学部に新たな慶事がもたらされました。

南部先生は1942年に理学部物理学科を卒業された後、理学部の研究嘱託、研究員を経て、1949年には物理学科の助手を短期間お務めになりました。その後大阪市立大学の助教授・教授を経て、1952年に渡米され、米国を拠点に研究を続けておられます。これまで理学部・理学系研究科にはたびたびお見えいただき、最近も集中講義や数多くの講演を通じて、私たちに大きな感銘を与えてくださいました。先生は1952年に本学で博士の

学位を取得されており、理学部を研究生活の原点とお考えくださっているとすればこれに勝る喜びはありません。

南部先生は素粒子の質量の起源、超伝導現象など、さまざまな物理現象に共通する「自発的対称性の破れの発見」を中心として、東洋的な深い思索性に満ちた研究成果を重ねられ、広い領域に影響を与え続けてこられました。南部先生のご研究に触発された多くの分野で、すでに多数のノーベル賞が誕生したと聞きおよびます。今回直接の受賞対象となったお仕事から40余年を経て、先生のご業績は現代の物理学研究にますますその深い指導性を発揮しているとのことであり、まさにノーベル賞の中のノーベル賞であると申し上げてよいでしょう。ご受賞を衷心よりお慶び申し上げます。ご健勝でますますご活躍下さることを祈念いたします。

南部陽一郎先生のノーベル賞受賞によせて

物理学専攻長 大塚 孝治(物理学専攻 教授)

南部陽一郎先生は東大物理学科の

ご卒業で、卒業後も物理学教室に助手などとして在籍されていました。私ども物理学教室の大先輩にあたる方で、このたびのご受賞を物理学専攻を代表して心からお祝い申し上げ、また、私どもへの激励とさせていただきたいと存じます。

ここでは、「自発的対称性の破れ」とはどういうことか、考えてみましょう。真空中にグニャグニャした物体があったとします。真空は四方八方どこも同等ですから、この物体は球形になるのが基本と考えられます。いっぽう、この物体を構成する要素どうしの間に働く力によっては、外部から何も力を加えなくても、球形ではなく、自発的にアメリカンフットボールのように楕円形になることがあります。楕円は球とは違って、ある特定の方向を向いています。元々はすべての方向が同等だったのに、特定の方向が意味をもってしまいます。これを自発的対称性の破れといいます。陽子と中性子が集ってできる原子核がその一例で、自発的対称性の破れの結果、楕円に変形することがあります。いっぽうでは、破れた対称性を回復しようと、細長い原子核は回転を始めます。回転に

SSBの一般的性質	Examples
Dynamical degeneracy of the ground state ← symmetry	<ul style="list-style-type: none"> • Superconductivity (SC) s wave d wave (high T_c)
Continuous symmetry → continuous degeneracy	<ul style="list-style-type: none"> • Superfluid ^3He p wave $j = 0$ (B phase), $j = 2$ (A phase)
Degrees of freedom $N \rightarrow \infty$ (thermodynamic limit) → Superselection rule → NG (Nambu-Goldstone) modes, $\omega_{\text{NG}} \sim 1/\lambda$ (restoration of lost symmetry)	<ul style="list-style-type: none"> • P-P and N-N pairing in nuclei s wave • Interacting boson model (IBM) ? • QCD-hadron chiral dynamics • Weinberg-Salam electroweak theory
No. of NG modes = No. of broken symmetry operations (with exceptions) $N = G/H$	<ul style="list-style-type: none"> • Flavor dynamics (Higgs mechanism) ? • Color SC ?

■ 図1：2005年11月に来日された時に南部先生が用いられたプレゼンテーションの一部

よりいろいろな方向を向くので、空間の対称性が回復するのです。結晶の格子振動も、同様な例です。このような回転や振動は、量子力学では新しい粒子の発生と見ることができ、それを「南部・ゴールドストーンボソン」とよびます。ここに挙げた以外にも、いろいろなものが当てはまります。3次元空間ではなく、もっと抽象的な空間も同じように扱え、自発的対称性の破れは多くの異なる現象を表す共通の言葉です。先生はそれを素粒子の質量の起源の解明にも当てはめました。

先生が2005年に物理学教室で行った談話会でのスライドから2枚を紹介しましょう(図1)。1枚では「SSB(自発的対称性の破れ)の一般的性質」とあり、特定の場合によらない一般的な性質が示されています。もう1枚には、自発的対称性の破れの発現の一例である超伝導現象が、金属でのものから素粒子のヒッグス機構まで、いかに多くの物理システムで起きているかが示されています。

このように、南部先生の業績は量子論の普遍的、原理的な性質に関わるもので、これまでノーベル賞が授与されてきたさまざまな業績の礎になるものといえます。先生の実際のご業績や現在の最先端の研究との関わりについて、この特別記事でいくつか紹介されています。

自発的対称性の破れと素粒子物理学

柳田 勉(物理学専攻 教授)

自発的対称性の破れはわれわれの日常生活の中にも見られる現象のひとつである。たとえば、ここに丸いテーブルがあると考える。テーブルの表面にはその面に垂直な方向に一律な重力がかかっているとす。そのテーブルの中心に1本の細長い棒を垂直に立てておく。この考えているテーブルの表面での力学系は、テーブルの回転に対する対称性をもち、何も特別な方向はない。しかし、この棒が立っている状態は安定な状態ではない。時間がたつとその棒は倒れてしまう。棒が倒れた状態では特別な方向が発生し、もはや上記の回転対称性は破れている。このように、力学の基本方程式は対称性をもつのに、そこに生じた基底状態の対称性が破れる現象を、自発的対称性の破れという。

南部先生はこの対称性の破れが素粒子の世界でも起きていると考えた。素粒子物理学は場の量子論で記述されるので、スカラー場 $H(x)$ を用いて説明しよう。この $H(x)$ は複素数の場で、そのポテンシャルが $V = -m^2|H|^2 + k|H|^4$ で与えられるとする。このポテンシャルは明らかに H の位相変換 $H \rightarrow H e^{i\alpha}$ のもとで不変である。さてこの系の基底状態(真空)を考え

てみる。もし $m = 0$ なら、このポテンシャルはU字形で、その極小点として真空は $H=0$ である。位相 α を変えても0は0のままだから、この真空では位相変換の対称性が保たれる。いっぽう m が0でないと、ポテンシャルはW字形となり、その極小点は $|H|^2 = m^2/(2k)$ で与えられる(およその形状は本特集記事の横山教授の記事を参照)。われわれの住む真空は1つなので、ここでは H の位相は1つに定められており、 H の位相を変えると(たとえば $H \rightarrow -H$)、こんどは H が0でないため、別の真空になってしまう。ちょうど上記の例で倒れた棒の方向が決まってしまうように、この真空では位相変換の対称性が破れているのである。

興味深いことに、この真空のもとでは位相方向の自由度が質量0のスカラー場として現れる(南部・ゴールドストーンボゾン; 理学のキーワード第1回)。南部先生はこの場をパイ中間子と考えた。現在ではこの南部先生の考えは正しいと認められている。南部先生の考えはその後、電弱統一理論(「弱い力」と「電磁力」を統一した素粒子理論)を構築するさいの基礎的考えになった。また現在、われわれは素粒子の標準理論を越える新たな理論の構築を考えているが、上記の南部先生の考えを基にして研究を進展させている。南部理論の画期的なのは、真空には

場が詰まっっていて、そのために対称性が破れて見えると考えたことにある。それまでは真空には何もないと考えてきた。このように南部理論は、真空に対する概念の変更をもたらした。現在、この真空にある H 場に相当する粒子を見つける LHC (Large Hadron Collider) 実験が始まろうとしている。その H 粒子 (ヒッグス粒子; 理学のキーワード第 6 回) が発見されれば、素粒子の標準理論が確立すると同時に、南部理論の歴史的価値がさらに確認されるだろう。

超伝導の BCS 理論と南部理論のつながり

青木 秀夫 (物理学専攻 教授)

「対称性の自発的破れ」。

何という基本的かつ美しい概念だろうか。これがまさに南部先生の素粒子論におけるノーベル賞受賞理由である。これほど簡にして要を得た受賞理由は珍しいのではないだろうか。対称性の自発的破れという概念それ自身は、昔から知られており、典型的には、強磁性体に対して、ハイゼンベルク (W. K. Heisenberg) がスピン回転対称性の自発的破れを 1920 年代に論じた。これに対し、超伝導が 20 世紀初頭に発見されて以来、その機構は約半世紀にわたる謎だったが、1957 年にバーディーン (J. Bardeen) らによる BCS 理論 (理学のキーワード第 15 回「高温超伝導」参照) が出て、電子 2 個のペアのボース凝縮と

いう描像を与えた。ここで自発的に破れているのは、ボース凝縮体を記述する波動関数の、位相の任意性 (ゲージ対称性; 上田教授の記事を参照) である。これにともない、BCS 基底状態からの励起は質量 (エネルギー・ギャップ) をもつことになる。南部理論の偉大なところは、このようなゲージ対称性破れの描像が、一般のゲージ場理論としての素粒子論に適用できる、というアイデア (Swedish Academy の言葉では、bold assumption) を、BCS の数年後にして構築したことといえる。基底状態は素粒子理論では「真空」に対応するので、「真空が超伝導状態なら素粒子が質量をもつ」と表現される。いわば、ゲージ対称性破れが、ローカル・スタンダード (超伝導) からグローバル・スタンダード (場の理論) になった。

もちろん、エネルギー・ギャップが粒子の質量という対応は同じとしても、素粒子論に適用する際には、さまざまに違いがある。当時はクォーク理論が登場する以前なので、ゲージではない対称性の破れが考えられた。対称性の破れた状態をもたらす粒子間相互作用は、BCS 理論ではフォノンというボソンが媒介するのに対し、核子間の相互作用は、湯川理論によるパイ中間子が媒介するが、南部理論は、対称性の破れという視点からの新たな分野を発展させたことになる。その後、素粒子のワインバーグ・サラム理論 (柳田教授の記事では「電弱統一理論」) が出たが、これも超伝導をモデルにしている部分がある。さらに、対称性の破れた状態からの励起には、南部・ゴールドストーンにより見出された定理が成り立つ (理学のキーワード第 1 回を参照)。超伝導体は完全反磁性という特殊な性質をもっているが、これは電子の凝縮体が、アンダーソン (P. W. Anderson) ・ヒッグス (P. W. Higgs) が考えた「粒子に質量を与える場」の役を果たして、光子が質量を獲得した (理学のキーワード第 6 回「ヒッグス粒子」参照)、と見ることもでき、

いろいろ現代的な問題と直結する (詳細は、ノーベル財団ホームページや図 2 を参照)。

ひとつ思い出されるのは、南部先生ご自身が「科学」という雑誌 (1990) で、何か新しい物理現象解明にあたって物理学者の思考形態は 3 つに分類できると言われていることである: すなわち「湯川モード」(原理を変えるのではなく、たとえば新粒子の導入を検討)、「アインシュタイン・モード」(原理を変えるべきかどうかを検討)、「ディラック・モード」(可能な原理の中で美しい理論を選択)。南部理論はいわばディラック・モードが自然に適用されたといえないだろうか。今後この流れに沿ったさらなる発展が期待される。

目で見える対称性の破れ

上田 正仁 (物理学専攻 教授)

物理法則の中で、「原子やクォークなどの素粒子の性質がわかればすべての物理がわかる」という還元主義的な見方が通用しない (粒子数が減少すると消滅する) のものが 2 つある。それは、大数の法則に支配される統計力学の法則と、南部陽一郎博士のノーベル物理学賞の対象となった「自発的対称性の破れ」である。物理学には、エネルギーの保存則や運動量の保存則などさまざまな保存則が存在するが、それらが成り立つ背後には、時間や空間の原点をどこに選んでもよいという対称性が潜んでいる。このような時空の対称性のほかに、自然現象の時間発展を記述する基礎法則もさまざまな力学的対称性を有している。しかし、不思議なことに、対称な時空と対称な物理法則から生み出される自然現象はしばしばもとの対称性を自発的に破る。たとえば磁石では、それを構成する原子のスピンの方向がそろい、磁化が空間のあるひとつの方向を向いて空間の等方性を破る。液体が固体になると、原子は空

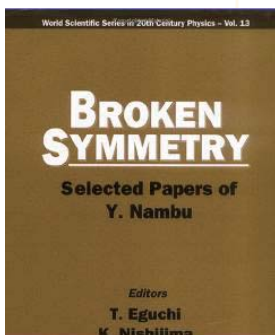


図 2: 南部先生の論文集「対称性の破れ」の表紙

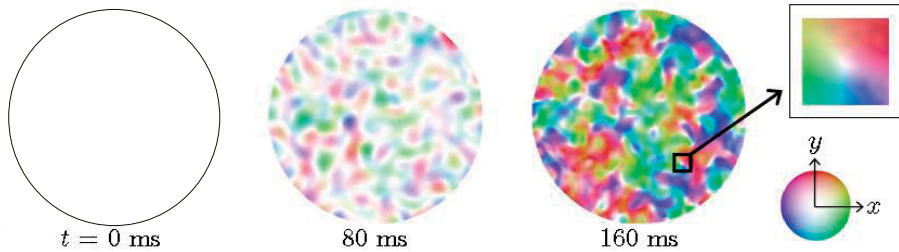


図3：ボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) における対称性の破れ。BEC を構成する原子のスピンの方向が時間の経過とともにそろっていく様子を示している。色が各点での磁化の方向、濃淡がその強さを表しており、真っ白の状態から色が出現するというのが対称性の破れである。四角で拡大している部分が「スピン渦」で、渦の周りを一周すると、磁化の方位が 360° 変化しているために中心部分の磁化は方向が決まらない特異点となっている(斎藤弘樹博士、川口由紀博士提供)。

間の並進対称性を破り、離散的な格子点上に周期的に並ぶ。

南部博士は、このように自然界でしばしば見られる対称性の破れが、場の理論の真空(基底状態)というもっとも基本的なレベルで起こっている、という大胆なアイデアを提唱した。この考え方は、超伝導や超流動現象を理解する上でも本質的である。ここでは破れている対称性が、「いろいろな場所でのマクロな量子系の位相(ゲージ)がそろおう」という抽象的な概念であるため、直感的な理解を困難なものにしてきた。マクロな量子系の波動関数の位相は通常は、位置や時刻によりばらばらでゲージ対称性が保たれている。しかし、ひとたびボース・アインシュタイン凝縮(BEC)が起こると、巨大な数の粒子が位相を共有し、異なった点間の相対的な位相差が決まり(これをゲージ対称性が破れるという)、超電導現象のようなマクロに「見える」量子現象が出現する。

1995年に原子気体のBECが実現されたことにより、マクロな量子状態間の相転移を自在に制御できるようになり、その結果、この現象を視覚的にとらえることが可能になった。図3は、ある基底状態から別な基底状態へとBECが相転移(物理学のキーワード第9回「相転移」参照)するダイナミックスのシミュレーションを明示したものである。位相がランダムな対称な初期状態が自発的に対称性を破り、その結果、量子化された渦が発生してい

ることがわかる。この現象は、実験でも観測されており、無の状態からビックバンによって生じたとされる宇宙の構造形成(横山教授の記事を参照)との類似性も指摘されている。

CP対称性の破れの起源の解明

相原 博昭(物理学専攻 教授)

電子には陽電子、陽子には反陽子というように、すべての粒子には電気的性質が逆でそれ以外の性質がほとんど同一な「反粒子」が存在する。電気を帯びていないエネルギーから始まった原始宇宙には、粒子と反粒子が同数ずつあったはずである。しかし、誕生から約137億年たった現在の宇宙は、粒子だけからできており、反粒子でできた反宇宙は存在しない。宇宙の進化の過程で、反粒子は消滅したことになる。すべての物理法則が粒子と反粒子の入れ替え(CP変換)で不変(CP対称)であるならば、宇宙の進化を説明できない。つまり、CP対称性は破れていなければならない。

素粒子に働く4種の力のうちのひとつ「弱い力」がわずかにCP対称性を破ることは1964年発見されていた。弱い力は、粒子がより軽い複数の粒子に崩壊する原因となる力であり、宇宙の進化に不可欠な力である。

なぜ、弱い力だけがCP対称性を破るのか謎であったが、1973年に小林誠と益川敏英は、陽子や中性子を構成する素粒子クォークは2種でひとつの世代をつくり、2種類 \times 3世代=6種類のクォークが存在すればCP対称性が破れるとする理論を発表した。素粒子研究者のほとんどが、クォークは、実在の素粒子ではなく単なる数学的モデルで、しかも3種類あれば十分であると思っていた頃の話である。

その後、高エネルギー加速器を使った実験によって、クォークは実在し、しかも6種類あることが明らかになった。6種類目のクォークが発見されたのは1995年である。小林・益川理論のエッセンスは、3世代のクォークがあって初めてCP対称性が破れるという点にあるから、第3世代に属するクォークからなる粒子B中間子を使って、予言どおりCP対称性が破れるかどうかを測れば検証できる。高エネルギー加速器研究機構(KEK)の実験グループは、B中間子ファクトリー加速器を使って2001年夏、小林・益川の予想が正しいことを示す実験結果を得ることに成功し、クォークのCP対称性の破れの起源の解明に終止符を打った(図4)。現在、小林・益川理論は、南部の示したゲージ対称性の自発的破れのメカニズムときわめて整合性がとれた形で、素粒子理論の骨格をなしている。自然のもつ対称性には深淵な意味がある。が、対称性の破れには、さらに深淵で根源的な意味があるのである。

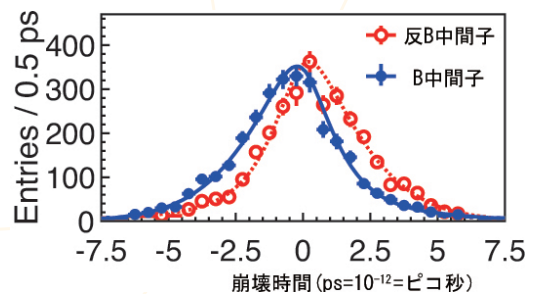


図4：小林・益川理論の正しさを証明した実験データ：KEKのBファクトリーを使って得られたB中間子と反B中間子の崩壊時間の分布で、対生成した相手粒子の崩壊時刻を時刻の原点にとっている。二つの分布の違いがCP対称性の破れを意味しており、違いの大きさが小林・益川理論に基づく予想と一致した。

南部陽一郎博士の業績の宇宙論へのインパクト

横山 順一（ビッグバン宇宙国際研究センター 教授）

南部博士の受賞対象は「対称性の自発的破れ」の提案であるが、これは宇宙論にとっても、大きな意味をもっている。そのことを紹介したいと思う。

このアイデアを一目で理解するため、ワインの瓶の底を覗いてみよう。ワインは清酒ほど精製されていないので、注ぐときに澱が舞い上がらないように、底の中心が盛り上がっている。瓶は円い筒型だから360度どの方向から見ても同じ形に見える。つまり、回転対称性をもっている。さて、ワインの空瓶にパチンコ玉を落としてみよう。もし図5Aのように底の中心にびたりと命中してそこに止まったとしたら、どの方向から見てもパチンコ玉は同じ場所に見える。しかし、実際には、底の中心は盛り上がっていて不安定なので、図5Bのように端に落ちるはずである。こうしてパチンコ玉が瓶の隅に落ちた後、瓶の周りを回ってみると、パチンコ玉が右に見えたり、奥に見えたりすること

になる。図5Aではどこから見ても同じように見えるのに、図5Bは違う。これが対称性（ここでは回転対称性）の破れた状態である。パチンコ玉を真ん中にそっと置こうと思っても勝手に滑り落ちてしまうので、対称性の自発的破れと言うのである。図5Aの状態よりも図5Bの状態の方がパチンコ玉の位置エネルギーが低く、より安定なので、ワインの瓶の中ではこのようなことが起こるのである。

今日の宇宙論の研究によると、宇宙の始まりには、図5Aのようにパチンコ玉がワインの底の真ん中にあり、高いエネルギーをもっていたような状態がしばらく続いていたことが指摘されている。宇宙の膨張率はエネルギー密度の平方根に比例するので、このようにエネルギー

の嵩上げされた状態が続くと、宇宙は急膨張し、加速的に大きくなる。この急膨張のお陰でわれわれが暮らすような一様・等方な大きな宇宙ができた。これが本研究所物理学専攻・ビッグバン宇宙国際研究センターの佐藤勝彦教授らの提案したインフレーション宇宙論である（理学のキーワード第9回「相転移」も参照）。素粒子物理の場の量子論の言葉では、ここでいうパチンコ玉とは宇宙の各点で一様な値をもつスカラー場の値であり、ワインの瓶とはそのポテンシャルである（その数学的な形の一例は、本特集記事の柳田教授の記事を参照）。私たちの宇宙をつくったワインの瓶がどのような形をしていたのか、現在、観測と理論の両面から活発に研究が続けられている。

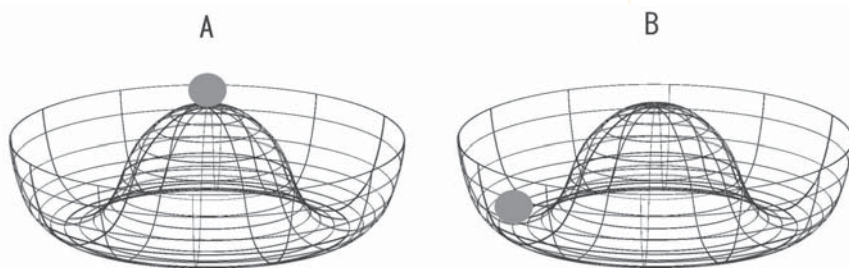


図5：対称性の自発的破れを表すモデル。Aは対称性（この場合回転対称性）を保っているが、不安定である。Bは対称性の破れた状態。宇宙論への応用では、この立体はスカラー場のポテンシャルエネルギー、パチンコ玉の位置はスカラー場の値を表す。

南部博士のノーベル賞受賞を記念した臨時談話会

広報誌編集委員会

南部陽一郎博士のノーベル物理学賞受賞が決まったのが2008年10月7日（火）の夜。その直後より物理学専攻の教授陣は緊急講演会の開催に向けて動き始めた。そして翌週の17日（金）、17時より小柴ホールにおいて物理学教室臨時談話会「対称性の破れとは何か？ - 南部陽一郎博士のノーベル賞受賞業績と今後の展望 -」は開催された。

南部先生は本学理学部物理学科のご卒業で、1949年には同物理学科で助手を務めた、理学系研究科とはゆかりの深い方である。その南部先生のノーベル賞受賞は理学系研究科にとってたいへん喜ばしいことであり、受賞もないこの時期に談話会を開いて、今回の受賞理由である「対称性の自発的破れ」について、幅広い分野の学生や教職員を対象にわかりやすく解説し、その業績と今後の展望について考える機会をもつこととなった。

南部先生ご自身を招聘し、お話を聞くことは、南部先生がご多忙なため今回かなわなかったが、物理学専攻の柳田勉教授による「対称性の破れと現代物理学」、

同じく物理学専攻の上田正仁教授による「マクロな量子現象における対称性の破れ」の講演は、質疑応答を含め1時間ずつ行われ、おおいに盛り上がりみせた。大学院生や学部学生をはじめとする多くの人々で小柴ホールは満席となり、立ち見が出ただけでなく、ホワイエのモニター席も50名ほどの人でいっぱいになり、会場は熱気に包まれた。訪れた報道関係者も5社を数えた。

講演のあとには参加者からの熱心な質問が相次ぎ、終了時間を超過する勢いであったが、司会役を務めた大塚専攻長のたくみな進行により、19時を少しすぎたころ、会は盛況のうちに幕を降ろした。