

仁科記念講演

# 自然法則の対称性とその破れ

シカゴ大学名誉教授

南部 陽一郎

2009年10月

2008年ノーベル物理学賞受賞者、南部陽一郎先生は、受賞発表のはるか以前に、仁科記念財団の招聘で仁科記念講演を行うことを約束して下さいましたが、受賞発表後の諸事情のため来日が大変難しくなっていました。にもかかわらず、2009年10月26日、京都大学において仁科記念講演が次のように実現いたしましたことは、関係者一同の大きな喜びであります。先生に深く感謝の意を表したいと思います。講演内容をひろく世の中に知っていただくため、この小冊子を作りました。なお、この講演会の翌日には、南部先生のノーベル賞受賞を記念する国際シンポジウムが、京都大学基礎物理学研究所の主催で同研究所において開催されました（ポスターを参照下さい）。

2010年6月 仁科記念財団

#### 仁科記念講演会

日時 2009年10月26日 午後2時～3時30分  
場所 京都大学 百周年時計台記念館  
主催 京都大学 基礎物理学研究所  
講師 南部 陽一郎（シカゴ大学名誉教授）  
題目 自然法則の対称性とその破れ

Nishina Memorial Lecture

### **Symmetry and its Breaking in Natural Laws**

Kyoto, October 2009

© 2010 Nishina Memorial Foundation







京都大学基礎物理学研究所主催・仁科記念講演会

# 自然法則の対称性と その破れ

シカゴ大学名誉教授

## 南部 陽一郎 氏



自発的対称性の破れの理論で 2008 年度ノーベル賞を受賞された南部先生をお迎えして基礎物理学研究所が主催する市民講演会です。ノーベル賞受賞後初の南部先生の講演です。ふるってご参加下さい。

日時：2009 年 10 月 26 日 [月] 14:00 - 15:30

会場：京都大学基礎物理学研究所 湯川記念館  
パナソニック国際交流ホール

京都市左京区北白川通分町（京都大学北部キャンパス内）

仁科記念講演会ポスター



南部陽一郎先生をかこむ仁科記念講演会および記念シンポジウムの参会者

# Symposium

## “Symmetry Breaking in Particle Physics” in honor of professor Y. Nambu

October 27, 2009, Yukawa Institute, Kyoto University

### Conference Schedule

G. Jona-Lasinio (Rome) 10:00—10:50  
“Spontaneous Symmetry Breaking: Variations on A Theme”

T. Hatsuda (Tokyo) 10:50—11:40  
“Nuclear Force from Lattice Quantum Chromodynamics”

Coffee break

P. Ramond (Florida) 12:00—12:50  
“Superconformal Field Theories on the Light-Cone”

Lunch

L. Brink (Chalmers) 14:30—15:20  
“Maximal Supersymmetry, Light-Front Dynamics  
and Exceptional Symmetries ”

T. Yamazaki (Nishina foundation) 15:20—16:10  
“Nuclear Bound States of the Two Nambu-Goldstone Bosons:  
Pions and Kaons”

Coffee break

M. Yoshimura (Okayama) 16:30—17:20  
“Yet Another Symmetry Breaking to Be Discovered”



## 仁科記念講演

# 自然法則の対称性とその破れ

シカゴ大学名誉教授 南部陽一郎

ご紹介いただきありがとうございます。私はいまご紹介になられたように日本を離れてからもう五十数年になります。しかし、これまでも何回も京都に参りまして、学会で講演させていただきました。ここにまた帰ってくるのは非常に光栄です。この講堂で話したのは初めてだと思いますが、非常に懐かしく思います。

実はさきほどご紹介ありましたように、仁科記念講演はもう二十数年前、80年代ですけど、仙台で講演させていただいたことがありました。その時の話は「素粒子は粒子か」という題目でした。というのは、いわゆる紐の理論、ハドロンの紐モデルというものが、それより五年ほど前にできまして、非常に盛んになりました。やがてそれは一応廃れたけれども、それに代っていわゆるスーパーストリング、「超ひも理論」というものができたばかりの頃でしたので、私は大いにそれを宣伝するつもりで「ひも」のお話をしたのですけれども、今回はもっと古い話です。これも実は今まで何回も話してきたのですが、こういう皆さん一般の聴衆に話すのは初めてのようで、まあよろしく願います。

まず対称性の破れという題目に関して、これは私の今度のノーベル賞受賞の理由にも入っているので、その説明をもう一度いたしたいと思います。「対称性とは何か」という常識的な話から、それでは一体対称性とは物理の法則の中でどういう意味をもっているのか。それから、それが破れるっていうのはどういうことか。自発的に破れるとは何か、これに Spontaneous Symmetry Breaking という名前がつけられているので、これからはそれをいうときは SSB という略語をつかうことにします。対称性というのはいわゆる常識的な言葉でして、それが破れるっていうことは、わかったようでわからないわけですね、実はわからないようですぐわかることです。これからそれを説明したいと思います。

対称というのとは何か、例えば、あるものの右と左が対称だというですぐわかります。人間の体は大体右と左は対称にできている。いつも皆さん鏡を見て自分というイメージもっているでしょう。写っているのは実は右と左が逆になっていますね。これを自分だと思っている。しかし、別に大きな問題はおきない。左に禿があらうが右に禿があらうが大した問題は起きない、というのが対称性。また、対称というのつまり美しいものだという観念がある、つまり一種の美的感覚がある。左右、左と右バランスがとれていると人はい

う。たしかにそうです。すなわち一つの理想として完全な対称性を求める。しかし、理想というのは主観的なものであります。人によっても違うし文化によって違う。例えば、これですね。これは中国の天安門です。

こうみると非常に対称ですね。完全に左右対称になっている。ところが、この下の2重橋をみると、なにも対称がない。これが日本と中国の文化の違いの表れだと思います。(図1参照)

それで、実は私に対称性の破れという概念を、何十年も前ですけども、誰よりも早く気がついて物理の中に取り入れました。あとで考えれば当たり前の簡単なことです。しかしその時すぐ思ったのは、これは私が育った環境のせいだなと。日本人の感覚では完全な対称よりも、それを少し壊したほうを好むのではないか。だからそういう風な文化的な環境



天安門



二重橋

図1

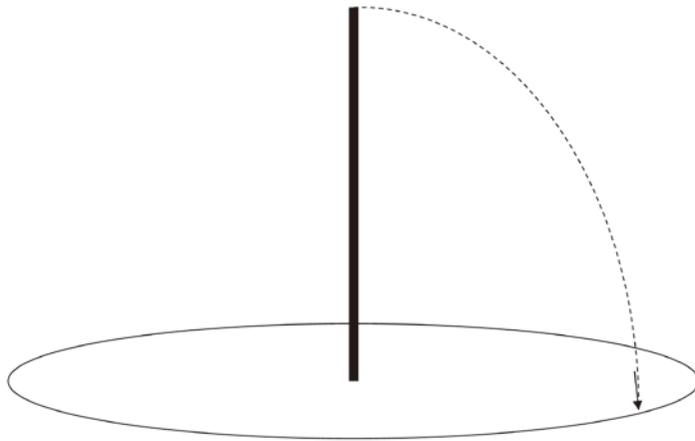


図 2

というのが、非常に研究の面でも何か役に立つということがあると思います。

では他にどういう例があるかという、これはノーベル賞の発表があったときに、今ここに来ておられるブリンク教授の説明にあった絵です。(図2参照)。このまっすぐ立った棒があると、まっすぐ立った棒はどっちから見ても同じ、つまりぐるぐる回したときにどっちからみても同じという対称性をもっている。しかし、こういう状態は不安定ですね。実際、ちょっと何かきっかけがあると、どっちかに倒れる。どこに倒れるかわからないけどどっちかに倒れる。一度倒れてしまうと、もう対称は破れてしまっている。これが自発的な対称性の破れというものの1つの例です。ひとりでの、すなわち spontaneous というのは、つまり、きっかけは何かあるいは誰かがちょっと押すわけですが、そういう偶然によって対称が破れる。倒れたほうがエネルギーが低くて安定である。これがSSBという考え方であります。

これは富士山の絵です。ごらんのように非常に対称的ですね。右と左で対称、ぐるぐる回しても同じという対称性があると、その頂上にあつた石ころを誰かがちょっと押したとすると転がり落ちる。どっちに転がるか知らないけど、ごろごろと落ちてしまう。これがいま出てきた棒の場合と似たような対称性の破れ、2次元のまわりの対称性の破れを意味している。(図3、4参照)

もうひとつ、これはいままで私が何遍も使ったことがありますけども、サラムという人が考えた絵です、丸い食卓を囲んで人が座っている。それぞれの目の前には食器とかナブ



図 3

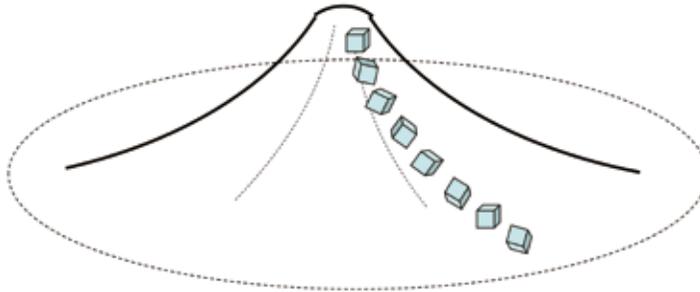


図 4

キンとかが並んでいる。でも右のナプキンが自分のものか、左のが自分のものか分からない。左右対称ですね。だけでも、だれかが左をとると、他の人はそれにならって左をとらなくちゃいけない。そうすると全部左をとって、隣の人との左右対称が破れてしまう。そういう風に対称の破れというのは一種の集団的な行動によることが多い。(図5参照)これからお話しするのはその物理的な実際の例です。

これに似たことですが。実はノーベル賞発表の朝シカゴ大学でちょっと挨拶をしたときに気がつきました。大勢の観衆が皆こちらを向いている。一般にみんなあちこち向いていても良いはずだ。どちらの方向も対称的なのに、あるときには全部がこっちを向くことが多い。なぜだろう。そのとき気がついたのは、それが1つのSSBであること。つまりどっちの方向も同じなのですが、なにかのきっかけがあると1種の集団行動でど



図5

っちかみんな向いてしまう。とっさにそれを皆さんに説明しました。

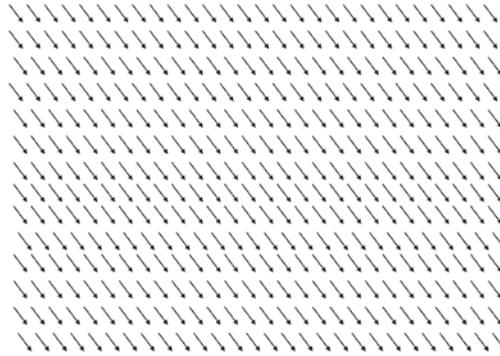
これに似た卑近な例としてよく挙げられるものにマグネット、磁石というものがあります。固体の中には原子が並んでいる。そのなかに電子が1つ1つの原子にくっついているものがあって、その1つ1つの電子にはスピンというか、なにか向きがある。コマのようにまわっているとそういう風に思ってください。どちらかを向いている。大抵の場合は向きがみんなバラバラですね。ところが、特別な物体の場合にはスピンがある方向にそろってしまいます。そうすると磁石ができて北と南のほうを向く。どちらを向いてもいいけれども何かの拍子でどちらかを向くと皆がそれにそっちの方向を向いてしまう。これが1つのSSBの典型的な例です。(図6参照)。これからお話するのもその例のほかになんがあるかというのを説明したいと思います。

実はそれだけでは、磁石がこっちを向いている、あるいは揃っているということの1つの解釈にすぎないといわれるかもしれない。物理学者はそれだけで満足してはいけない。つまり、こういうことを言うのにどれだけの意味があるか、ご利益があるかを示す必要があります。

例えばですね、世界中が1つの磁石だったとする。そうすると、全部あっち方向を向いている。それじゃ、他の方向に向いている可能性があるかどうか。そういうことを考えることがあるかないか。もともと世界はこういう風にできているものだと考えてしまうかもしれません。つまりこれが物理の法則であると思うかもしれない。どうすれば方向性はどっちでもいいと証明できるか、あるいは納得させるか。それに答えなくちゃいけない。

## SSB

大きい集合に起きやすい (付和雷同性)



磁性体

図 6

そこで例えば、皆さんこっちを向いている。実は、みな席に座っているからこっちを向いているのですけども、立っているとしたらどっちを向いていてもよいだろう。たまたま皆がこっちを向いている。しかし、誰かがちょっとよそをみると、周りの人はそれにつられてよそを向く。それがだんだん伝わっていく。これが波となって伝わってくる。よそを向くという可能性、そういう可能性があるということがこれでわかります。つまり一つの対称性があるという証明に使える。このような波には、Nambu-Goldstone の波、NG の波という名前が付いていますが、さっきいったスピンの場合にはスピンの方向がちょっと横を向くとスピンの方向がずれてきて波となって伝わり、スピンの波といわれるものになります。このような波がどんな振る舞いをするかということ、量子力学の場合には波というものには一つの量子、エネルギーの最小単位があります。そのエネルギーは何かというと、これです。このオメガ ( $\omega$ ) と書いたのはエネルギーのことで、波の速度は  $c$ 、ラムダ ( $\lambda$ ) と書いたのは波長です。波長が長くなると波のエネルギーは小さくなる。これがスピン波の場合です。同じように固体の場合、音波という固体の中を伝わる波、あとで説明しますが、それも同じように SSB の現象ですが、これらの波は波長が長いほどそのエネルギーの量子オメガが小さくなるという性質をもっています。もし波長がだんだん長くなると、その極限では磁石の場合にはスピンを一様に回すことになるわけですね。ということは、スピンの回転に対する対称性があるということ、すなわちどの方向も同等だから、全体として方向を変えるのにエネルギーがいらない。つまり、対称性があるということの証明の一つになります。これが SSB の一つの特徴です。(図 7 参照)

では固体ならば音波だといいましたが、これも一つの SSB の例として典型的なもので

## Nambu-Goldstone (NG) waves

スピンの向き SSB

→ スピン波  $\omega = c/\lambda^2$

原子の位置 SSB

→ 固体の中の音波  $\omega = c/\lambda$



図 7

す。みなさんがここに座っている。座っているのは、座席があるからですが、もし座席がなく皆が立っているとする。誰かがここに立つとその横に誰かが立つ、それにならずずっと並んでしまう。しかし、もともとはどこに立ってもいい。つまり、どこの場所に立っても実は物理法則は同じことだ。だけど、横に動こうとすると横の人を押すから、隣人はまたその隣の人を押す、だんだんとそれが波になって伝わっていく。これが NG の波というものです。ですから、固体の中では、対称性が破れる、どこにいてもいいという対称性が破れてそういうことが起きるわけです。

それで、物理法則における対称性の意義の一つとして、ここにあげたように、対称性いわゆる不変性というのは、数学的にあるオペレーションをしても法則が変わらないということです。この不変性から大事な結論として出てくるのは、物理を勉強した人は誰でも習うことですが、保存則というものです。ネーターの定理ともいわれる。エミー・ネーターという人は有名な女性数学者です。対称性があれば一つの保存則が出る。例えば、時間に対する不変性、つまり、今の法則と明日の法則が変わらないという物理法則から自然に出てくる結論は、エネルギーという量があってそれが保存される。その結論は非常に重大なことです。

つまりエネルギーを無から作り出すことができないし、それを壊すこともできない。ただ他のエネルギーをとってきて自分のほうに持ってくる。太陽からエネルギーをもってきて、それを使って我々生きている。ガソリンを使って、そのエネルギーを今度自動車に回して、自動車を運転する。だから、エネルギーの形を変えられても全体の量は変えられない。というのは、ただ、宇宙というものは今日と明日とで物理法則が変わらない、つまり一様であるということの仮定から自然に出てくることなのです。これはどうしても変える

- ・対称性＝不変性 (“global” symmetries)
- ・→ 保存則 (ネーターの定理)
- ・時間に対する不変 (今と昔で変わらない)
- ・→ エネルギーという量が保存する。
- ・場所に対する不変 (京都とシカゴで変わらない。)
- ・→ 運動量というものの保存
- ・回転に対する不変 (東の方向と北の方向は同等)
- ・→ 角運動量というものの保存



Emmy Noether  
1822–1935

図 8

ことができない。

それから、場所に対する不変性。つまり、ここにおいてもシカゴにおいても同じだと。そういうことから運動量というものが保存する。これは物理をやった人は必ず知っていると思います。それから東の方向を向いても西の方向を向いても法則は同じ格好をしている。それから角運動量というものが保存する。非常に一般的な結論です。もちろん、京都とシカゴでは少し違う。今と明日では少しちがうというのは環境が変わるからです。もし環境も一緒に明日まで持っていけば何も変わることはない。(図 8 参照)

逆にもし何か保存則があるとなれば、これは何かの不変性から出るのではないかと思われれます。ここで非常に恐縮ですが数式を出します。これを出さないと話が進まないで、一番簡単なことから始めますが、これは一つには物理屋がどういう風にものを考えるかを、考え方を理解してもらうためです。つまり保存則といわれると我々物理をやっている人はすぐにこの式が頭の中に出てくる。たとえば、鳩山という名前を聞くと、皆さん鳩山さんの写真が頭の中のでるでしょ。それと同じことです。

で、ここでこのプサイ ( $\psi$ ) というギリシャ文字があります。プサイに星がついたもの、プサイ・スターとプサイとの積になっている。これは各点での或る粒子の数を表す量です。詳しく言うと、プサイというものはある粒子を消し、プサイ・スターは粒子を作る作用をするオペレーターです。これらを掛けたものは粒子を消してまた作ることになり、粒子の数を表します。詳しいことはいえませんが、ある場所で粒子の数はこういうもので表せられます。不変性は何かという、これが保存するということは、何かの不変性から出るのではないか。ではその不変性とはなにか。プサイは複素数をかけて、プサイ・スターにその逆数をかけても積は変わらない。そういう掛ける演算に対して法則が変わらないということですね。ネーターの定理に当てはめるとこれが保存するということがわかる。つま

- ・保存則（粒子の数、電気量、etc.）→不変性
- ・  $\psi^*(\chi)\psi(\chi) = \text{粒子の数（場所 } \chi \text{ での）}$
- ・  $\psi^*\psi$  の不変性
  - 粒子の数の保存
  - $(\psi \rightarrow \exp(i\theta)\psi, \psi^* \rightarrow \exp(-i\theta)\psi^*)$

図 9

り、物理の法則の中にこういうものだけが入っていると粒子の数は保存しなくては行けないということになる。もし、保存しない時にはどうなるかはこれからお話します。（図 9 参照）

もうひとつ非常に大事なことですけども、不変性の役目としてもうひとつあります。これは局所対称性・ローカルな対称性といわれるものです。以前の例は世界中を一緒に何か回すようなものだったのですが、今いったプサイでは局所的にある数を掛けました。その数が場所によって違ってても法則が変わらない場合もあります。これがなぜ重要かという、こういう不変性を要求すると、粒子にどういう力が働くべきかということが決まってしまう。これは非常に重大なことで、この力は今では一般的な名前が付いていてゲージ場と呼ばれています。もともと電磁場の方程式がありまして、それがマクスウェルという人が発見したとか完成したのですが、それが実はこの原理にしたがっているのです。電磁場の方程式をお手本にして、それをもっと一般化したものをゲージ場、それのもとになる不変性をゲージ不変性といいます。ゲージというのは物差の意味で、物差しを場所によって違ったものを使っても法則は変わらない。これは実際に式を書いてみないと変わらないということを説明できないのですけども、そういうことを要求するとそれから出てくる粒子に働く力がどのようなものであるかということが決まる。それが電磁場である。アインシュタインの重力場もやっぱり同じような原理に従っている。つまり場所によって物差しを変えても物理の法則は、形は変わらないという要請があって、いわゆる重力の法則が出てきたわけです。そういう意味で一般にゲージ場という概念は力の法則を決める決め手となるものです。電磁場を拡張したものが、今盛んに使われている非アーベル的ゲージ場というもので、中国の有名な物理学者のヤン（楊）によるものです。それを応用して、新しい力に適用したらどうなるだろうか。実際現在の素粒子の標準理論と呼ばれているものにはそれが取り入れられて見事に成功を収めています。標準模型の中には強い力、つまり我々の知っているプロトンとかニュートロンとか、物質を作るもとになる粒子はクォークと呼ばれる粒子の結合した分子のようなものだと考えられているが、クォーク同士をむすびつけている力は色のゲージ場という名前がついていて、ヤンの非アーベル的ゲージ場の一つ

- ・局所 (local) 対称性 (ゲージ不変性)
- ・ → 力 (ゲージ場, gauge fields)
  
- ・電磁場の方程式 (J. Maxwell)
- ・ → ゲージ不変性 ゲージ場 (H. Weyl)
- ・ → 非アーベル的ゲージ場 (楊振寧, Yang)
- ・ → 素粒子の標準模型
- ・ 強い力 (色のゲージ場)
- ・ 電磁と弱い力 (Weinberg-Salam-Glashow)
- ・ SSB → W, Z 粒子

図 10

の典型的な例になっている。それから、電磁力とか弱い力、弱い力というのは強い力とは違って、放射能を起こす原因なのですけども、それらを統一して一つのゲージ場として表すということが見事に成功したのは、1960年代で、これはワインバーグ・サラム・グラシウの電弱統一理論というものですけども、そのときにSSBという考えを使って初めて成功したわけです。(図10参照) これからの話はすこし専門的なところがあるので、詳しい話をする代わりに、わたしが実際どのようにしてきたかを、一種の物語として話したいと思います。

わたしは戦争前に物理をはじめまして、湯川・朝永・坂田がいて、所謂素粒子の理論が非常に発展したときで、実験的にも大きな加速器がどんどんできまして、新しい粒子が次から次へと発見される非常に幸運な時代でした。ですから、私は湯川さんなどの名前に刺激されて物理をやることにしたんですけども、特に素粒子の勉強を始めようと思いました。しかし私が学生時代には東大では物性論とか物性物理と呼ばれる部門が盛んで、超伝導というものの話も聞いていました。これにも非常に興味をもっていたのです。超伝導というのはある特殊な物質で、例えば、水銀は最初に見つかった例ですが、非常に低温にする。マイナス270度程度にする。そうすると、突然電気抵抗がゼロになるという特殊な現象です。これはオンネスというオランダの学者が発見しました。なぜだろう。いろいろなそれを記述する理論は出てきましたが、例えば、ランダウの理論というものもありましたが、しかし本質的になぜかということが分からなかった。

わたしはいろんな物理の問題に興味をもっていました。シカゴ大学に移ってからも素粒子物理以外にそういうことも考えていたのです。ところが、突然、1957年にBCS理論というものが生まれた。生まれた場所はシカゴ大学のすぐ近くで、車で3時間くらいのところ、同じイリノイ州のイリノイ大学です。そこは昔から伝統的に物性物理が盛んなところでしたが、そのバーディーン先生とポストクのクーバーと学生のシュリーファー、この三人により所謂BCSの理論というのができた。これは大変な事件だったのです。バーデ

- ・超伝導 (1911, Onnes)
- ・マイスナー効果 (1933, Meissner)
- ・London (1935), Landau (1950)



K. Onnes

- ・BCS 理論 (1957)  
(Bardeen, Cooper, Schrieffer)
- ・電子間の引力→ Cooper ペアの発生



J. Bardeen.

図 11

イーン先生はその前にもトランジスタの発明に関与してノーベル賞をもらっていたのですが、その後のBCSの理論でもう一度ノーベル賞をもらうことになります。そういう理論があるということを知り、それが私の興味をそそりました。(図 11 参照)

超伝導現象に伴ってマイスナー効果というものがあまして、電気抵抗がゼロになるだけでなく、磁石を近くに持っていても磁束が中を通らなくなる。つまり、難しいことを言えば、超伝導物質中では磁場とか光という物に質量が出てくる。敷居が高くて、ある程度のエネルギーがないと磁石の中に入れられないということですが、こういう現象も発見されていました。

わたしはそのころちょうどシカゴ大学でポスドクになったばかりの頃でして、一所懸命素粒子のことをやっていたときに、学生のシュリーファーが私たちのところでセミナーをしてくれた。それがきっかけなのです。BCS 理論とはどういうことかと言いますと、超伝導の中には電子があつて、電子は原子にひっついてるものもあるけども、自由に動けるものもある。それが導体という金属ですけども、その特別な電子の間に引力ができて、なぜ引力ができるかという固体の中の音波をやり取りしてこれが引力となる。そのために電子はペアを組んで分子のようなものがたくさんできる。そのペアのためにそれだけエネルギーが下がり引力ができる。そのために電子が、つまり、なぜ電気抵抗があるかという、電子が流れるときには、原子にぶつかって分子を少し刺激してエネルギーをやり、そのために熱が出る。そのために電流がだんだん弱くなる。それが抵抗というものですけども、それがなくなるということは、ペアを壊すためにはある程度の決まった熱エネルギーが要るので、低温では電気抵抗が生じない。つまりエネルギーを失わない。それが

超伝導の原因なのです。

わたしは非常に感激したわけですが、その途端に私は一つ疑問を持ちはじめた。というのは、さっき云いました粒子の数というのは、式に書きましたね。ところが、彼らの理論をみてもデルタと書いた式が出てきます。これはプサイとプサイの星（スター）でなくて、プサイとプサイ、あるいはプサイ・スターとプサイ・スターの積です。このデルタはつまりペアを殺す。プサイは一つの電子を表し、もうひとつのプサイはもう一つの電子を表し、これが一つのペアになっていることを象徴している。デルタはつまりペアを殺したり作ったりする作用をもつ。そのために必要なエネルギーというのがデルタです。これはおかしいと思った。これでは電子は保存しないではないか。消す作用をするプサイが二つ並んでいから、ペアが消えてしまう。あるいは逆にペアが突然現れる。これはおかしいと思った。これではさっき言った電磁力のゲージ不変性というものには壊れているのではないか。ですから、これはインチキではないかと思った。しかし、見事なBCS理論を捨てるのは非常に惜しい。ですから、私としては非常に困ったわけで、何か救い道がないか考えたわけですね。私はほかの素粒子のことも一生懸命やっていたから、これは片手間の仕事だったので、その答えが出るまでに2年間かかりました。最後に結局到達したのがSSBという概念で、つまり、電子の数が保存しないというのは、一つのSSBとして解釈できるだろう。で、解釈できたらそれからどういうことができるかということ、さっき言ったNGの波というのがあるはずだ。NGの波というのがあれば、それが一種のSSBを証明する一つの証拠になるわけです。実際、それがああるということを示して、それがどういものか調べた。そうすると、電子のペアは電気をもっているわけで、電気をもったものはまわりにクーロン場をつくる。詳しいことはここでは説明できませんが、クーロン場とさっき言ったNGの波と一緒に合わさって、その結果としてクーロン場という物が遠くに伝わらなくて、逆2乗の法則でなくなって、質量をもった湯川型の力になるという、つまりクーロン場はゲージ場なのですが、それ自身が質量を持つてくるということに気がついた。そのために、マイスナー効果を起こして超伝導体の中には磁場が入れなくなる。ご承知のように質量はエネルギーの一種です。超伝導体の中に入れないというのは磁場の中では余計なエネルギーをもつからで、磁場に質量が生まれるという現象が起こるといことに気がついた。それから先の話になりますが、今度はこの考えを弱い力にも応用し、弱い力ももともと電磁場のようなゲージ場だったがSSBが起こったために質量を持つてきた。われわれの世界は弱い力に関しては超伝導体のようなもので、放射能を作る力は非常に短い距離にしか届かない。これがいわゆるワインバーグ・サラム・グラシヨウの電弱統一理論です。それから先に進んで、現在では所謂標準模型というもの強い力も含めたゲージ場理論です。それはこれから話します。

私がやったことは、この超伝導のアナロジーを素粒子のほうに持っていったことです。

つまり、さっき云いましたように、何かの式をみると、あ、これに似たものがこっちにもあると気がつくわけです。超伝導理論と湯川中間子理論のアナロジーということになります。湯川中間子というのは湯川さんがアイデアを出したことで、あらゆる物質を作っているプロトンとかニュートロンとか原子核をひっつけておく力というのは何かというのが全然わからない。湯川さんは新しい力の場があってそれが核子を引っ張り合っているのだということ考えた。原子核はこれくらいの大きさしかないから、これ以上届かないような短い到達距離の力であろう。すなわち、その力の場というのは質量をもった場であると、その質量は到達距離から大体わかるわけで、そうするとどれくらい重さがあるかを湯川博士は予言しましたが、実際それが第2次世界大戦の後、宇宙線の中に存在することが発見されました。いまパイメソン、パイオンという名前で行われている粒子です。湯川理論の場合ですと、プサイと書いてあるものはプロトンとかニュートロンとか所謂核子、原子核をつくるもとになる粒子のことを意味し、電子ではないのですけども、核子の質量を表すこういう式が出てきます。ここに、LとかRとかはこれを説明するには詳しいことは数学を知らないとわからないが、こういうものを作るためにはLとRがついたプサイを二つつけたいといけない。LとRというのは左利き・右利きと考えたらいいです。つまり、このプサイの中には左利きのもので右利きのものが必要です。これをみるとRというのを消してLを作る。あるいはLを消してRを作る。そういう操作を意味している。もし、左・右が別々で保存されるべきものであるなら、これはその保存則を破っている。核子に  $m$  という質量があるために生じることです。

もし、これがさっきいったBCSの理論のような意味でのSSBであったらどうなるかと考えた。そうすると今度はそれに対するNGの波というのが存在しなくては行かない。詳しいことはやめますけど、このLとRが混じらないということは、カイラリティが保存することです。カイロとは手のことですね。右手と左手。ですから、核子が質量をもったというのはカイラリティが保存してないということ。そうすると質量ができたためにNGの波もあらわれるはずだ。このNGの波というのが実は湯川さんのパイメソンと同じ性質のものであるということが分かります。これはしめた。それだけでなく、それならば、パイメソンというのは、実は放射能を持っていて、ほかの粒子に壊れます。核子の一つでニュートロン、あるいは中性子、といわれる粒子も放射能をもっているが、それらの寿命のあいだにちゃんと関係が出てくる。それが見事にうまく合う。ただどういう力についてSSBが起こったかは分からなかった。現在では、核子というのは真の素粒子ではなく、クォークという基本粒子がグルーオンというゲージ場によって結びつけられた複合体であると考えられていますが、この時代にはまだそれは知られていなかった。(図12参照)

ところでここで一つ問題があります。パイメソンがもしNGの波であるとする質量は

Cooper ペア

$$\Delta(\psi\psi + \psi^*\psi^*),$$

- ・ → 電子の数の非保存
- ・ → SSB → NG の波
- ・ → ゲージ場の質量 (プラズモン, Meissner 効果)
- ・ (→弱い力の SSB-Weinberg-Salam-Glashow)
  
- ・ → 湯川中間子理論とのアナロジー
- ・  $M(\psi_L^*\psi_R + \psi_R^*\psi_L)$
- ・ 核子の質量 → “カイラリティ” の非保存
- ・ → SSB → NG の波 → パイ - メソン

図 12

ゼロであるはずだ。またパイメソンはゲージ場のような質量をゼロにする性質をもっていない。ゲージ場というものはさきほど述べたように局所不変性からでてくるものです。だけど、実際のパイメソンは質量を持っている。これはおかしい、これをごまかしはできない。わたしは厳密な理論を作っているのだから、これを無視するわけにはいかない。私のアイデアが本当かどうかと悩みました。実はあまりに人に注目されていなかったことですが、わたしがあえてこういう論文を書いた理由は、そのときに坂田博士が言われてことを思いだしたからです。坂田博士は湯川・朝永とおなじ時代の仲間で、物理学に非常に大きな貢献をなされました。早く亡くなられました人ですが、我々にいろんなことを忠告し、物理をどうやって研究すべきかということを教えて我々に大変な影響を与えました。彼はいわゆる唯物弁証論の立場に立ってそれを物理の研究の方法論に適用し、どういう風に研究をやるべきかを盛んにくどいてきました。それを思い出しました。彼いわく、我々が現在知っている真理というのは絶対的なものではない、つまり現在知っているものは一部で、まだ隠れているものがある。だから、将来まだ隠れているものが出てくるかもしれない。ですから、メソンの質量がゼロでなくても、なにか知らない理由があるからそれでもいいではないか。それではカイラリティっていうのは、保存すると仮定しましたが、実はもともと保存していないかもしれない。ちょっとだけ保存しない、小さな質量を持っていたらどうか。例えば、核子というのは電子の2千倍の大きな質量を持っているが、もともと非常に小さい電子程度の質量があったとすればどうなるか。そうするとSSBというのはもともと破れている。もともと破れているけれどもSSBはやはり起こるだろうと。その時には核子には大きな質量ができるし、NGの波も質量をもつかもしい。計算してみるとちゃんとメソンに質量が出てきた。湯川さんが予想した程度の中間の質量が出てくるのがわかった。で、それで気を良くして私は論文を書いたわけです。(図13参照)

- ・問題1：パイ - メソンの質量  $\mu \neq 0$
- ・→カイラリティが初めから破れている！
- ・→小さな“裸”の質量  $m$ ？  
→パイ - メソンの質量 ( $M$  と  $m$  の“中間”)
- ・問題2：質量を作る力の元は？
- ・予想：未知の真理が隠れている？

図 13

ここに、昔の所謂素粒子論グループの五十年以上前のひとですけども、真ん中の三人が湯川・朝永・坂田です。私もその末席におりました。



湯川                      朝永                      坂田

それでは、現在の知識からみるとどうなるか。果たして私の予想した通りになってきた。というのは、プロトンとかニュートロンとかメソンとかは実は本当の素粒子ではなかった。その元はクォークというものがある。それから、もうひとつレプトンというのは電子とかニュートリノを含む兄弟で、こういうものが新しいメンバーが発見されていますから、二つの族に分かれているわけです。それら自身はすでに何か小さな質量をもっている。電子は電子の質量を持っている。クォークも質量をもっている。これだからSSBが起こって強い力のために核子に大きな質量が出てきて、しかもそのときのNGの波に質量がでてくることが分かってきた。

では標準理論のクォークとかレプトンとかの質量自身は一体どうなるのか。これがおな

じSSBの理論で説明しようとするのが、標準理論の中にあるヒッグズ場というものです。まだ見つかっていないので皆さんそれを発見されることを希望されているわけなのですけど。ではヒッグズ場というのはどういうものを説明しましょう。

さきに言いましたように電弱場統一理論ではSSBによって電気力と弱い力の2つが分かれる。電磁場の元になる光の粒子は質量がないけども、弱い力のもとになる場はWおよびZという名前と呼ばれ、質量をもってくる。で、ヒッグズ場というのは実際こんなものなんです。こういう風に工夫して作ったものです。つまり、ヒッグズ場というものは一つのポテンシャルを持っていて、ポテンシャルは富士山のような山になっている。山の頂上では場はゼロ、その質量もゼロだが不安定な位置なので下に転がり落ちようとする。するとヒッグズ場がゼロでなくなり、自分自身に質量をあたえる。空間の至る所にこういう山があると思ってください。そうすると、ある場所でこっち側にこういう風に落ちると、その隣もそれにつられて一緒に転がり落ちる。そういう風に全部が同じ方向に壊れてしまう。それから、ヒッグズ場はカイラリティをクォークとかレプトンの間にやり取りして、全体としては保存しているのだが、ヒッグズ場がこういうことをやったために全体のカイラリティの保存が破れて、クォークとレプトンにもその「とぼっちり」として質量が生まれる。そういうおぜん立てになっているわけなのです。それからそれが本当かどうか、ヒッグズ粒子が存在するかどうかはまだわかっていないのですが。

時間が来ましたのでまとめますと、自然法則はもともと対称であるべきであるという我々の理想がある。実際にほとんどそうになっていて、しかし世界でおこる自然現象には非対称なものが非常に多い。その主な原因、全部とはいいませんが、いわゆる大衆心理でみんなが右に向いてしまうという現象が、世界中で一緒に起こっている。というのが標準理論に使われたお膳立てです。ですからSSBという現象はあらゆるスケールで、小さいスケールでも大きなスケールでも起こっている。では、あらゆる非対称はSSBなのか、これはわからない。逆は本当かどうかわからない。

一つの重要な例をいいますと、クォークとかレプトンとかの質量は、さっき言いましたようにヒッグズ場が作るように仕掛けがしてあるけれども、その質量はどうであるべきか、ということは何にもいえない。ただ我々が知っている質量はこうこうだから、それらの質量がでるように、その中にパラメータを入れる、それだけのことなのです。なぜかということは全く分かっていない。これが本当かどうかということは理論的にはいえない。また一方、非常に重要な特別の自然対称性が非常な微量だけ破れていることが知られている。これは実際にそうなので文句はいえない。一つは例えばCPの破れということがあります。説明する時間はありませんけども、世界には我々のような粒子と、それと逆の反粒子というものが存在します。粒子と反粒子とは双子のように似ていて、ただそれらの数を数えるとき片方はプラス、片方はマイナスとして数えれば全部の数は保存されるとい

う対称性があるわけですが我々は全部粒子できていて、反粒子ではない。電子と陽電子とはその一例で、たとえば加速器のなかでこれらの双子のペアはつくれるが、できた陽電子はいつかほかの電子とぶつかってまた消えてしまう。宇宙にはじめから粒子の数が反粒子の数よりも多かったのが粒子だけが生き残ったといえます。すなわちはじめから対象性は破れていた。でもなぜか、これも一つの謎ですね。それ以外にも、例えば宇宙ができた時にどうなったかというスペキュレーションがありますが、時間がないのでやめておきます。これらは一体本当はSSBなのかそうでないのか、もともとなぜなのかということとはわからない。SSBでないほかの理由もあるのではないかな。

例えば、陽子崩壊の問題があります。さきほどの粒子反粒子の議論では、核子の数は保存されているから、我々のような核子だけでできている世界では、我々は消えて無くならない。しかしもしこの保存則がそもそも破れていたらどうなるか、と質問することは悪いわけではない。そうすると、世の中の物質はだんだんと消えて無くなって、例えばクォークがレプトンに変わってしまうかもしれない。そうことはもちろん実験で検証すべきもので、理論だけでそう言ってもなにも話にならない。物理学者の中にそういう証拠を探している人たちもおります。ですから、結論として一口でいえば、対称性と非対称性、対称性の破れという概念は、非常に有用で重要な原理なのですが、まだまだわからないことはたくさん残っている。ということだけを申してお話を終えたいと思います。どうもありがとうございました。

# 質問時間

## 質問者 1

私、分子生物学専門で、物理は中学レベルの知識っていう一般市民で、本当に情けない質問で申し訳ないですけども、聞き逃したかもしれないですけども、SSBってありますね。SSBを起こす原因にはどういうものがあるかちょっと教えていただきたいのですが。

## 南部先生

まず言いましたように、たくさんの粒子があっってお互いに影響しあう。だから、誰かが初めたらそれにならって同じことをやるということがSSBであると解釈できます。つまり、大きな広場の中でどっちを向いてもいいわけですよ。みんなばらばらによそを向いている群集ですから。だけれども、なんかの機会でだれかが向こうを向くとあんなだろうと思ってみんなそっちを向く。それにつられてみんな同じ方向を向いてしまう。

## 質問者 1

そしたら、SSBを確率論的にどういう風なメカニズムで起こるのか。

## 南部先生

それはなかなか面白いが非常に難しい問題です。ですけども。どれだけお互いに影響しあうか。お互いの影響ですね。隣の人が勝手な方向に向くか、それとも一緒に「右にならえ」をしたいかということによる。そういう違いですね。

## 質問者 2

私は広島大学理学部で物理を勉強しております。先生は東京大学において物性理論であるとか素粒子理論などさまざまな勉強をされたと思うのですが、その場で心がけておられていたことをいくらか伺いしたいと思います。

## 南部先生

私は東大で受けた教育のせいが大きいと思っています。その頃の東大では物性物理は非常に盛んだったが、素粒子物理というものは湯川グループが始めたものであったのです。世界的にね。だから東大にはまだ素粒子物理は何もなかった。それで、我々の一つの憧れ

でもあったので、先生と一緒に勉強したいと言ったときに、素粒子物理には天才でないと行くなと言われてましたね。われわれはくそっと思って、自分たちで勉強を始めたということもありましたね。

### 質問者 3

私、あのまったくこういうものには素人なのですが、今話を聞いてみますと宇宙全体というのはやはり完璧なものではなくて不完全なものだと、そういうふうに解釈されるのでないかとおもいます。この物理学の将来はどこまで自然現象を解明できるかということについて先生のお考えを伺いたいと思います。

### 南部先生

面白い質問ですね。答えはないのですが、これからどんどん人間は進歩するだろうと一般に思われています。進歩という観念自身が一つの偏見かもしれない。しかし坂田さんが言われましたけれども、今の時代の物理がどういう状態にあるか、将来はどのような風が変わっていくだろうかということをいつも意識していないとだめだ。だから、今やっていることをただ盲目的にフォローしているだけではだめだ。それは物理だけの話ではないのですけれども、今後どうなるだろうかということは、あまりそういうことを議論すると、物理でなく哲学的なスペキュレーションになってしまう恐れがありますが、もっと具体的に地道に、今物理がこういうことを問題しているが、この先はどういうことをやったらいいか、どうやっていくべきかということを意識しなくてはいけない。いま私がどうすべきか、ということと言えるわけではないのですけれども、いつもそういうことを頭において研究を進めることが大事だと私は考えます。

### 質問者 4

すみません。ちょっと勇気を振り絞ってですが、わたし左京区の永観堂と南禅寺の間の私立の高等学校で高校生に数学を教えております。先週から南部先生の講演を聞きに行くと生徒にいいましたら、先生だけずるい、うらやましいと言われてました。理科好き数学好きの中学生・高校生に何か励ましの言葉を頂ければ、生徒に伝えたいと思います。よろしくお願いします。

### 南部先生

そうですね。まあ好奇心を持つということは大事ですよ。それから、そういうものを

研究することはつまり、ものを学ぶというのが最初かと思えますけども、これは論語にある言葉ですが、「これを知る者はこれを好む者に如かず、これを好む者はこれを楽しむ者に如かず。」つまり知っているだけの人はそれが好きな人には及ばない。好きのほうが大  
事だ。しかしそれを好くだけよりも、それを楽しむ人のほうがもっと上なのですね。好奇心を持って知るとともに楽しんでもらいたいと私は思っております。