
“素粒子”は粒子か？

1985年4月26日

東北大学理学部において

南部 陽一郎

武田 仁科記念財団と東北大理学部の共催で講演会を開かせていただきます。仁科記念財団では、この数年いろいろな大学と協力し自然科学の分野の講演をなさっておられますけども、今年、東北大学でやらないかという話を受けまして喜んで引き受けさせていただいたわけです。理学部では、私どもサイエンスセミナーというものを数年やっておりますが、ちょうどそれにうまい具合に仁科財団のお力をお借りして、共催という形で、今年第一回の講演会を開かせていただくことにいたしました。すべて仁科記念財団のお世話になっているわけですが、財団の理事長の久保先生と、常務理事の玉木先生が今日

お見えでございます。まず、仁科記念財団理事長の久保亮五先生を御紹介申し上げます。

久保 ただいま御紹介をいただきました、久保でございます。しばらく前から仁科記念財団の理事長をいたしております。仁科記念財団では、その事業として毎年数回仁科記念講演会をいたしておりますが、その一環として、大学と共同で地方講演会を行っております。最近では名古屋、広島、神戸等で催しましたが、今回は東北大学の理学部との共催として、この記念講演会を開くことになりました。この記念講演会を地方で行なうことの主旨の一つは、仁科記念財団というものを皆様に知っていただくということもございませう

で、ごく簡単に仁科記念財団について御説明したいと思います。仁科記念財団は今から 30 年前に仁科芳雄博士の偉大な業績を記念し、博士の御遺志を継いで原子物理学の基礎的研究とその応用にわたってその発展を援助するという目的をもって設立されたものであります。仁科先生の名は皆様御存知と思いますが、どういう方であったか、簡単に申し上げます。仁科先生は東大の電気工学科を御卒業になってから、理化学研究所にお入りになり 1921 年にヨーロッパに行かれまして、1923 年から 28 年までコペンハーゲンのボーア教授のもとで当時勃興して参りました量子物理学の研究をなさいました。仁科先生がコペンハーゲンにおられた時の仕事で有名なものの一つは、クラインー仁科の公式です。これはディラックの相対論的量子力学に基づいたガンマ線の電子による散乱に関する理論であります。日本にお帰りになりましてからは、理化学研究所にあって、原子核や宇宙線の実験的研究をはじめられ、理論、実験の両面にわたって幾多の若い俊秀を育てられました。故朝永振一郎博士もその一人です。先生のこのような活動はまさに、日本の近代物理学の生みの親、と申してよいものでした。

不幸な戦争によって日本の科学も破滅的な打撃を受けましたが、先生は日本の再建のために、それこそ寝食を忘れ、昼夜を分たず大変な努力を傾けられました。残念なことに、その努力の結果をごらんになることなく、1951 年病を得て急逝されました。

次に仁科記念財団がどんなことをやっているか、簡単に御紹介致します。その一つは原子科学の分野における優れた業績を顕彰して仁科記念賞を毎年何人かの方に差し上げることであります。また、研究奨励事業としては小規模の国際集会に対する援助、若い研究者を海外における共同研究のために派遣すること、それから、海外から学者を招き、日本の研究者と交流を促進するというようなことを致しております。本年夏には、ファインマン教授を、また、来年春には、生物物理学者でケンブリッジにおられるクルーグ氏をお招きしております。

さて、本日の講演をお願いしました、南部陽一郎教授につきましては、みなさんは御承知だとは思いますが、簡単に御紹介しておきます。南部教授は 1921 年東京のお生まれですが、本籍は、福井県と伺っています。昭和 17 年に東京帝国大学の理学部の物理学科を御卒

業になりましたが、その当時は戦争中でありましたから、すぐ軍務につかれ、戦争が終わりましてから、大学におもどりになりました。当時、同じ部屋の仲間であったことも私の一つの思い出です。大阪市立大学が設立されたとき、助教授としてそこに移られ、次いで教授になられ、1952年に、アメリカのプリンストンの高等研究所の研究員として渡米されました。1956年にシカゴ大学に移られ、今日に至っておられます。

南部教授はもう40年に近い研究活動がありになるわけですが、理論物理学のほとんどあらゆる分野において、非常にすぐれた業績をあげておられます。言うまでもなく、素粒子物理学において指導的な立場にあって、今までも多数の仕事をなさいましたが、特に、対称性の自発的な破れという概念を打ち出されたことは有名です。これは、それ以後、素粒子論の発展において、鍵とも言える重要な役割をしたものであります。そういう数々の優れた業績によりましてアメリカ国内でもいろいろな賞を受けておられます。ハイネマン賞、オッペンハイマー賞、それから1982年にはNational Medal of Science、これはアメリカ大統領がさずける賞でございますが、そ

ういう賞を受けておられます。また、現在は、国籍はアメリカ市民ですが、1978年には日本の文化勲章を受けておられます。また、日本学士院の外国人会員であります。アメリカに渡られてからも、日本の研究者との密接な協力をつづけ、日本の物理学の発展に対して非常に大きな影響を与えてされました。最近、日本にこられる機会が多いことは私どもにとっても喜ばしいことであります。今回は、一月ばかりの御滞在の由ですが、無理をお願いいたしまして、今日のこの講演をしていただく事になりました。

それでは、南部教授のお話をお願いします。
(拍手)

御紹介いただきましてありがとうございます。仙台を訪問するのはこれで2度目です。最初は7年程前でしたが、やはり春のいい時期でした。今回も非常にいい時期で、ちょうど桜の花が満開で、東京に比べると大分遅れているようですが、幸いな時にここに来たと思います。ここにおられる方々はおそらくほとんどサイエンス関係の方だと思いますが、必ずしも物理を専攻している方ばかりではな

いでしょう。それで今日の話はあまり専門的にわたらずに、もっと低いレベルというのですか、なるべくわかり易く素粒子物理学に関する現状を御紹介したいと思います。

時どき皆さんも新聞でごらんになるでしょうが、例えば新しい素粒子が発見された、新しい理論ができたという話があると思います。我々のような専門家になりますと、たいてい、その内容はすでに知っているわけですが、新聞を読んでいるとこれは間違っているとか、これはいいかげんな事を書いてあるとか、あてにならないとか、そういうニュースがかなりあるわけです。新聞で報道された粒子、新しい素粒子なんていうのも、数ヶ月たつと、あれは間違っていた、嘘だったと、いつの間にかたち消えになることもかなりあります。もちろんそういう時には、新聞にはそういう取り消しの記事は出ないわけですから、皆さんはそういう事は御存知ないことでしょう。今日話すことは、実は私は理論物理学者でして、実験物理学には直接たずさわっているわけではないので、主に素粒子の理論についての話ということになります。特にごく最近、つまり今年にいたるまでの現状というものを、これからお話したい

と思います。しかし、これはさっきの新聞の記事とある意味では似ているんですけども、確立された理論ではない、つまり出鱈目言っているんじゃないんですけれども、あるいは数ヶ月たつと、だめだったといわれるような可能性のある、非常にほやほやのできたての理論がどんなものであるかということをお話したいと思います。ですからこれをそのまま本当の永遠の真理だと受けとらないで、気軽に聞いていただきたいと思います。つまり、私がお話したいのは、研究者というのは、どんな議論をして、どんないろんな紆余曲折をへて、理論を進めていくのか、何故そういうことをやっているのか、そういう研究者としての裏側を少しわかっていただければ幸いです。

そもそもそれでは素粒子物理学とは何かということですが、これは皆さん、もちろんだいたい事はご存知だと思います。素粒子物理学というのは、一つには、物質の究極の構成要素は何かという事を調べるのが目的であります。それから、その究極粒子の間にどんな力が働いているか——物理学の言葉で言えば、相互作用と言うのですが——、つまりどういう力学に従うかを追求すること、そうし

て、そういう力学の法則を非常に精密な数学的な形で表わすとどういう方程式になるか。例えば、ニュートンの方程式とかアインシュタインの方程式とか、まあいろいろあるわけです。それから、量子力学の方程式。そういうものを見いだすことであります。

それから、もちろん、実験的な検証をしないと確立されないものでありますが、どういう方法でそれを検証するか。このためのほとんど唯一の方法と言われているものは、大加速器、すなわちサイクロトロンとかを使う方法であります。1930年にローレンスというアメリカの物理学者がサイクロトロンの原理を発見しました。つまり粒子を加速してだんだんエネルギーを大きくして、それを何か標的にぶつける、そうしたらどういう反応がおきるか、これが簡単に言ってサイクロトロンを用いて素粒子を調べる方法であります。エネルギーをだんだん上げれば上げるほど、新しい反応が出てくる。そうして、今まで素粒子だと思われていた、あるいは分解できないと思われた粒子が、実はもっと小さい粒子に分解できる、そういうことがだんだんわかってきました。

その事情が、今まで約五十年間、繰り返さ

れているわけです。現在に至ってもそのサイクロトロンを使う。大加速器の名前は変わりますが——サイクロトロンからシンクロトロンと名前は変わりましたが——原理的には別にならなくて道具を使って実験する。根本的な方法はぜんぜん変わりはないわけです。今後も、それ以外の方法はちょっと考えられないので当分続くと思いますが、だんだんとエネルギーが上がってきますと、必要なサイクロトロンもだんだん大きくならざるを得ない。エネルギーに比例してサイクロトロンの規模が上がってくるわけです。どれくらいエネルギーの規模が上がったかといいますと、だいたい初めにローレンスが発明したサイクロトロンは1メートルくらいの大きさで、そのエネルギーはだいたい百万電子ボルト程度でした。百万電子ボルトというのは、素電荷 e を持った電子とか陽子を百万ボルトの電圧のもとで加速するときを得られるエネルギーでありまして、原子核をこわすために必要なエネルギーというのはだいたいその程度です。ですから、それでもって原子核をこわして、中に何があるかということを調べることができたわけです。それ以後加速器はだんだんと大きくなり、それからまた多少技術

が改善されてきて効率がよくなったわけですが、どれだけふえたかと言うと、現在では過去五十年間にだいたい 100 万倍のエネルギーになりました。これは、グラフに書きますと、非常にきれいな指数関数、ねずみ算的な増加になります。ですから、もしこの傾向が続けば、将来どれくらいのエネルギーになるだろうかということも計算できるわけですが、実際にはそれに伴ってその大きさもだんだん小さくなってはならない。現在働いている一番大きなエネルギーの加速器はスイスのジュネーブにあるヨーロッパ連合研究機関 CERN にある加速器で、だいたい今言いました百万電子ボルトの 100 万倍くらいのエネルギー、そしてそれくらいのエネルギーを持った粒子をお互いに正面衝突させるわけですが、陽子と反陽子とを正面衝突させると、今までできなかった新しい反応が生まれてくる。理論によって予期されたものが、2、3 年前に予期どおりに出てきたということで、物理学者のルピアとそれからパンダベルグという特別な技術を開発した人が、ノーベル賞をもらっております。その次の段階として、今、たとえばアメリカでその次の世代の 10 年ぐらい先にできるような加速器の計画が、ま

あ、計画だけですけれども進んでおります。CERN の今までの加速器は直径が 1 キロメートルとか 2 キロメートルぐらいの大きさの丸い輪ですけれども、新しいものは半径が 30 キロメートルとか 50 キロメートルとか、ひとまわりすると 100 キロメートルという大きな輪になります。そういうものが今現在計画されているわけです。もちろん、費用も大きさに比例して増えるわけですから、実際にそれが実現するかどうかということは、もちろんまだはっきりとは言えないんですけれども、少なくとも、次から次へとどんどんエネルギーを上げて、そういった加速器を作るということを皆努力している。なぜかと言うと、さっきも言いましたようにエネルギーを上げれば、今まで作られなかった、質量で言えば重い粒子——アインシュタインの原理に従うと質量というのはエネルギーの一種ですから——が作られる可能性がある。けれども、実は過去 10 年程前から事情が少し変わってきて、理論の方がとてつもなく発達してしまって、今素粒子の理論家が考えている、調べている、議論していることと言いますと、だいたい今実験可能なエネルギーの百万倍のまた百万倍のエネルギーのところを今理論家が

議論しています。これはもちろん、架空の理論であるにすぎないと言ってしまえばそれまでですが、もちろんそれには根拠があることで、それを真剣に研究しているわけです。ですから、それを加速器でもって実験的に検証することは到底及びもつかないわけです。今、指数関数的に年と共に加速器のエネルギーが上がっていると言いましたけれども、その増加の程度をそのまま将来にあてはめてみしても、それでも 100 年先にならないとそういうエネルギーには到達しない。しかも、その時にできる加速器の大きさと言うのは、だいたい一光年ぐらいの大きさになる。だから、到底そういう意味では、加速器に代わる何か特別画期的な手段がなければ、とても実現の望みのないことです。では、画期的な手段はあるかと言いますと、実はないわけではないので、それは過去十年間にだんだんと進んできた考えであります、いわゆる宇宙全体を実験室と考えて、それで検証する。つまり、今日の話は宇宙論には触れませんが、宇宙論と素粒子論というのは密接な関係がありまして、御存知のように大体 200 億年ほど前にビッグバン、大爆発がおこって、小さな、非常に小さな点のような宇宙が爆発して

膨張を始めている。ですから、その膨張のはじめには非常な高いエネルギー密度、非常に高温の状態から出発して、それが膨張するにつれて、段々と温度が下ってきてある温度に達する。その温度によって、いわゆる化学反応とかいろいろな反応、つまり可能な反応が変わってくるわけです。それに伴って、いろいろな元素ができるとか、いろいろな宇宙論的な議論がなされて非常な成果をおさめているわけですが、どういう素粒子がはじめあったかということによって、宇宙の歴史も変わってしまう。ですから、こういう粒子があればこうなったはずだと、そういう間接的な議論をして、それで検証しよう、それが一つの——まあ止むを得ないからでもあります——方法になっております。それから、素粒子物理というのは、物質の究極の構成要素をさぐる、求める、探求、追求するわけですが、理論家の研究者の立場では、いったいどういう方法で、どういう着眼点をもって研究を進めているかということが非常に重要になります。ここで私が言いたいことは、理論の方では、素粒子物理学の創始者は湯川秀樹だと思います。ご存知のように、湯川さんは中間子論というものを始められたわけです。

が、その中間子論というのは、新しい粒子を仮定して核力——原子核の構成粒子間の力——を説明することに成功したばかりでなく、その考え方自体が新しいものであります。今までなかった考え方であるという意味で素粒子理論に貢献され、その考え方を今まで理論家が踏襲して、それでずっと成功をつづけてきたと言えると思います。以後、湯川さんのみならず、湯川さんの協力者であった坂田昌一博士——御存知だと思いますが——が特にその方法論というものを強調されまして、それが我々のような年代の日本の物理学者の間に非常な影響を与えたわけです。外国でも段々と、その考え方が踏襲されて、それが現在まで成功を収めているということが言えると思います。どうということかと言いますと、結局、湯川さんがやられたことは、新しい力、新しい現象を説明するためには、それに必要な粒子、それに伴う粒子があるとして、その粒子を導入し、その存在を仮定して、それで現象を説明しようという、簡単に言ったらそういうことだと思います。これは、それ以前の物理学の進み方とは多少違ってまして、それ以前では、素粒子というものはだいたいもう決まっている、だいたいもうわかったもの

である、例えば陽子や電子だけであってそれ以外はないと考える。ですからなるべくただ都合のために導入する、新しい粒子を仮定するというようなことは避けようという傾向があったと思います。なぜかと言いますと、実際に我々の世界で知られている粒子というのは非常に限られています。我々が知っているのは、陽子と中性子と電子とニュートリノ、それから、もちろん光の粒子——光量子——であります。それ以外にはない。それにも係わらず、湯川さんは大胆に中間子という物を仮定された。なぜ矛盾が起きないかと言いますと、中間子は仮定したけれども、その中間子は安定なものではなく、すぐ壊れてしまい、我々の知っている粒子が作られる。だから、現在の観測と何も矛盾がないと言えます。これは非常に一面では奇妙な事で、何か物質の究極の構成要素でありながら、実はそれが不安定で他の物に壊れていくという事は、何か矛盾するように思われるんですけども、これは、事実は事実としてそうなってるんだから認めざるを得ないわけです。

結局、素粒子物理学というのは今までお話

したようなものであるということを一応頭に入れておいていただきたいと思います。それでは、素粒子とは何か?という問題に移ります。これも皆さん御承知だと思いますが、簡単に言って、素粒子というのは物質の究極の構成要素なんです。実は、構成要素といっても、次から次へと構成要素、究極要素が実は究極のものでなくて、それが実はもっと小さなもので作られているということになりますので、時代と共に、素粒子という概念が変わってきました。例えば、昔は分子は幾つかの原子が結合したものであると考えていた。ところが原子にもう少しエネルギーを与えれば分解されて電子が飛び出す。そして原子の真中にいわゆる原子核というものがあるという事がわかります。その原子核は何かと言いますと、また大きなエネルギーをそれに与えれば原子核がばらばらに壊れて、その中から陽子とか中性子が飛び出してくる。そこまでは皆さん御承知だと思います。湯川さんは、その原子核の中にある陽子とか中性子とかを結びつけている力は、実は中間子という粒子で媒介されると仮定されたわけですが、もちろんその中間子はもっと高いエネルギーの現象では実際に作られる。陽子同士をぶつけると、

陽子の中から中間子が放出される。例えば電子を電磁場の中で加速すると、電磁波が放射される、それと同じような理由で中間子が放射される。中間子は出てくるけども、すぐ壊れてしまうからあまり長く走らないわけです。そこまではいいんですけども、湯川さんの時代には——湯川さんはおそらくこう考えたと思われます——核力のもとになる新しい粒子が中間子であり、中間子は素粒子である。その素粒子がすでに発見された。ですからこれで物理は終わりだ。核力はもうそれで原理的に理解できるのですから、陽子と中性子と中間子、それから電子とニュートリノというわけのわからないもの——原子核の β 崩壊の中に出てきますが——それだけで世の中は片付いてしまったと考えておられたんじゃないかと思います。実は、しかしそうはならず、中間子は一種類だと思っていたのが実は次から次へと新しい種類の中間子、いろんな質量を持った違った中間子が出て来ました。エネルギーを上げる毎に次から次へと新しい粒子が飛び出して来る。それらは皆不安定で、次から次へとすぐ壊れてしまうわけですが、湯川さんの予期とは反して、実はどうも中間子なるもの自体がまた構造を持ってい

る。それから、陽子とか中性子というのは原子核の中の構成要素でしたけれども、それ以外にそれに似たものがだんだんと作られるようになりました。ですから、もはや陽子、中性子、中間子は実は素粒子ではなくて、何か分子とか原子のような内部構造を持った複合状態であるというふうに考えられるようになったわけです。それでは、中間子とか陽子、中性子を作っているものは何かと言いますと、それは皆さんよくお聞きのクォークという仮説的な粒子であります。陽子、中性子は、実は3個のクォークが集まったもので、ですから何かヘリウム3原子核に似たような構造を持っている。それから、中間子というのは、クォークと反クォークという2種類の粒子が結合したものであるというふうに考えられています。ただ、今までと違ったことは、いくらエネルギーを上げて、核子を——陽子、中性子を核子と言うんですが——分解してクォークを一個ずつ取り出すことはできないという奇妙な性質を持っているようです。このために、クォークは仮説上の存在に過ぎない、何も実質的な意味がないと考える人がもちろん初めはたくさんいたと思います。けれども、現在ではおそらくそう信じている人はない、

つまりクォークは実在するものであると一般に素粒子物理学者は信じていると思います。ですから、今までとは非常に事情が違ってきましたけれども、すでにもう理論があって、なぜクォークを絶対に取り出せないかということの説明することもできると一般に考えられています。その詳しいことは今日はお話しませんが、クォークというのは仮説上の存在でなく、実際に1個1個取り出しては見れないけれども、実在するものだ和我々は信じているわけです。それでは、現在どういう粒子があるかと言いますと、核子とか中間子は、もう素粒子ではないんですが、その核子、中間子はクォークから成り立っている。クォークには色々な種類があるわけで、一般にクォーク族と呼ばれるいくつかのクォークが存在する。それから電子——これは構造がないと今のところは考えられています——とニュートリノの両者が存在する。電子に類するものは1個だけではなくて、それに似たしかも質量の高い不安定な電子のようなものがあります——ミューオンというのが代表的なものです——。そういうものを集めてレプトン族というふうに分類されている。レプトン族とクォーク族とを一緒にして、基本粒子と

呼んでいます。これが、本当に基本かどうかということは、それはまた問題でして、将来、基本でなくなるかもしれないのですけれども、今のところは基本粒子と考える。私の考えでは、おそらくこの基本粒子にはこの先その構造が見えてくるということは当分ないだろうと考えております。ここに書きましたように(図1参照)その基本粒子のレプトン・クォークを一緒にして、これらを第一世代の粒子と呼んでいるんですが、電子とニュートリノ、この二つがレプトン族で、それから u 、 d 2種類のクォークがあります。これは陽子と中性子に似たような意味での2種類です。もう少し詳しく言いますと、実はこの2種類のクォークにそれぞれ三つの色を持った違った状態があるということになっておりますが、それはここでは省略しておきます。ところが、実際はそれだけじゃなく、第二世代として、もう一つ、これと同じようなグループがあるという事もわかっています。第一世代と第二世代の違いはただ重さが違うというだけです。第二世代の s というのは Strange、 c は Charm という言葉の頭文字をとったわけですが、質量が重い s 、 c クォークが存在する。それから μ ニュートリノ ν_μ はあまり ν_e と

素粒子とは何か?

分子

↓

原子

↓

電子 原子核

↓

核子 中間子

↓

クォーク族

レプトン族

基本粒子

第1世代 (e ν_e u d)

第2世代 (μ ν_μ s c)

第3世代 (τ ν_τ b (t))

第4世代 ?

図 1

変わりませんが、strange クォークとか charm クォークは u 、 d クォークよりはだいぶ重い。何百倍、何千倍か重いということになっております。もちろんレプトンは、実際に

取り出して調べることができるんですが、クォークの方はさっき言いましたように一つ取り出して調べることはできない。けれども少なくとも間接的な(理論的な)根拠から、こういうものが存在し、これらが集まっていろんな種類の間接子とか、いろんな新しい種類の陽子、中性子のようなものを作る——これらを一組にしてハドロンと名前をつけております——。第二世代のクォークがあるということは、新しい種類の間接子のようなものがたくさんでてきたことから存在が確認され、わかってきたわけです。

そのみならず、第三世代もすでに知られています。実際 τ というのは、 μ よりもさらに重くて μ 粒子のような性質を持っている。 ν_τ というのは、ニュートリノのような性質を持った中性の非常に軽い粒子。 t 、 b と書いたのは、トップ、ボトムの頭文字で上と下という意味ですが、 b クォークは存在がわかっている。というのは、これを含む新しい中間子が作られたからです。 t クォークはまだ実験的には確認されていない。というのは、これは非常に重くて、現在の加速器では作りにくい。新聞であるいは読まれたかもしれませんが、今、筑波の高エネルギー研究所で、電子

と陽電子(反電子)をぶつけて実験することを目的にした加速器を建設中でありまして、これができれば2、3年は少なくとも世界をリードするエネルギーになる、いや1、2年ぐらいしかないかもしれませんが(爆笑)。そのエネルギーのところで、 t クォークが作られればそれはやはり高エネルギー研の手柄ということになるんですけれども、理論屋は、いったいこれがどれくらいの重さだということには残念ながらだれも予言できないわけです。ですから、やってみなければしょうがない。じゃ、さらに世代があるか、第四世代があるか、これはもちろんあるかもしれない。理論屋は残念ながら何世代あるかということはぜんぜん予言できない。なぜそういう世代ができてくるかもわからない。なぜ違った質量をもっているか、その理由もわからない。残念ながら今の理論は非常に無力でありまして、そういう予言はできないんですけれども、さっき言いましたように、これより百万倍の百万倍の高いエネルギーのところで通用する理論ができると称しているわけです。ですから、すぐはそういう理論は現実には使えない。

今度は素粒子間にどういう力が働くかということですが、四つの力、四つの基本的な力

があります。図2に書いたヘリウムの原子核を見ますと、まわりにeと書いたのが電子で、まん中にNと書いたのが原子核でその中に陽子と中性子が2個ずつはいつている。右側に書いたのは月のつもりなんです、e、Nと月の間に万有引力が働いています。これをGと書いていますが、それが一つの力。それか

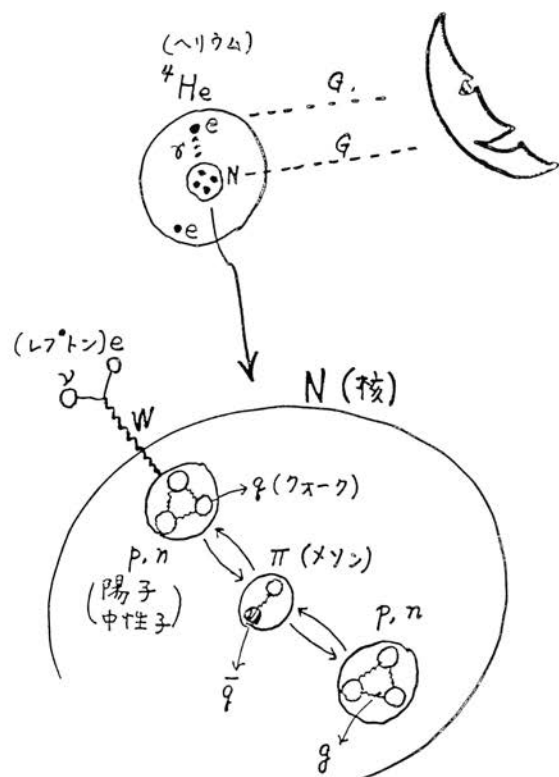


図 2

ら原子核と電子はそれぞれ電荷を持っています、その電荷によって作られる力——いわゆる電磁氣的な力——が働いて、そのために、電子と原子核が結合している。これが2番目の力です。eN間の点線がおなじみの γ 線ですが、これが電磁氣的な力を媒介する。それからこの原子核をさらに拡大してみますと、この中に陽子、あるいは中性子はいっている。二つずつある。その中をもう一度見ますとクォークが3個はいっている。これらクォークを結合している力というのは新しく仮定されている強い力——これについてはこれからお話しますが——と考えられる。これが、3番目の力です。それから、ここに π と書いたのは湯川さんの中間子のつもりですが、 π メソンと呼ばれているもので、これは実は、クォークと反クォークが結合してできている。これも同じ強い力で結合している。そして、この二つの核子の間を結びつける核力は何によるかという、実はこれは基本的な力とは全然違ったもので、実は基本的でない力、つまり、この核子という分子のようなものをお互いにやりとりしてそのために生ずる力です。化学を勉強された方は、例えば水素結合というこ

とを御存知かもしれませんが、二つの分子間に水素原子をやりとりしてその結果として結合を生ずる、それに似たような性質のものであるというのが現在の考え方です。ですから、湯川さんの中間子で媒介されるものは、残念ながらもう根本的な力でなくて、実は二次的な力にすぎない。

最後に4番目の力ですがこれはいわゆるベータ崩壊をひきおこす相互作用です。力と言いますと、何か2粒子間を引っばるようなものと考えますが、一般に相互作用は何か反応を起こすために何かで媒介されるものです。さっき言いました π メソンを交換すると核力を生じる。同じ意味で、W という仮説的な粒子を媒介として電子と核子が相互作用する。核子がWを放出してそれが電子とニュートリノになる。そういう過程がいわゆる β 崩壊の過程であります。こういう中間の仮想的な粒子を媒介として反応が起こるというのは最近の考え方でありまして、実際さっき言いましたCERN研究所で数年前にこのWが実際に作られ確認されたわけであります。これは、ちょうど昔、湯川さんが仮定した π メソンが実際に実験室で作られて、 π メソンの存在が確認されたと同じ意味で、Wも存在

が確認されたということになっています。

四つの基本的力ですが、この四つの力は違った性質をもっていまして、図3に書きましたように、よく知られている重力や電磁力は御承知のニュートンの法則、クーロンの法則、すなわち、逆二乗の法則に従う。これらはニュートン、マックスウェルの方程式の中にでてくる力の法則です。一方、強い力、クォーク同士をくっつける力は全然違った性質で、距離によらない力、つまり引力であってしかもいくら離れていても力の強さは変わらない。例えば、我々が地球の上に住んでいますと、重力を受けていますが、重力は高い所に登っても変わらないと、我々は、普通の高さ

4つの力とは？ (相互作用)

重力	} 逆二乗則 ($1/R^2$)	Newton-Einstein (ニュートン-アインシュタイン)
電磁力		Maxwell (マックスウェル)
強い力	距離によらぬ	
弱い力	湯川型 (e^{-MR})	
	W, Z ボソン = 弱い中間子	

図 3

の範囲では考える。実際は、遠くへ行けばだんだん弱くなるわけですが、もしこれがいつまでたっても、本当に変わらないということになりますと、どんなに強い力で物を上へ投げあげても絶対に地球外に逃げてしまうことはない。いつかはもとへもどってくるわけです。それと同じような性質を強い力が持っているために、クォーク二つをいくら離そうとしても、いつかはもとへもどってしまう。そのためどうしても二つのクォークをひきはなすことはできないと言うのが現在の理論の考えであります。それから W で媒介される弱い力はこれまでの力とは違った性質を持っている。いわゆる湯川型という力で、これは遠くまで届かない指数関数的に弱くなってしまいう力です。ですから本当に非常に近い範囲のところでしか働かない力です。 Z 粒子は W と同じような性質を持っている粒子で、ただ W は荷電があり Z は荷電がないという違いですが、これらはたとえて言えば弱い相互作用の湯川中間子と考えてもよいと思います。核力でなく弱い力、弱い相互作用を媒介するための粒子であります。

これで今知られている四つの力については終わりですが、これまで述べましたように、これらの四つの力が非常に違った性質を持っており、互いに何も関係がないように思われる点が非常に何か不可解であります。けれども実はこれらが統一できる。統一的に解釈できるという可能性が十数年前から突然出て来ました。その統一するという意味はこれからお話しますが、一つは図 4 に書きましたようなゲージ場という概念であります。ゲージ場

大統一の理論 (3つの力の統一)

1) ゲージ場の概念

2) ゲージ場の量子力学

真空は媒質である、空虚ではない

3) エネルギーによる性質の変化

1	クォーク、レプトンのレベル
100	W, Z (弱い中間子) のレベル
10 ¹⁵	大統一が実現されるエネルギーのレベル
10 ¹⁹	プランク質量 (重力も統一される?)

図 4

というのは簡単に言えば、例えばマクスウェルの方程式に従うような場で逆二乗の法則に従う力であり、しかも力の強さは、その粒子が持っている電荷に比例する。それから同じくゲージ場の例ですが、アインシュタインあるいはニュートンの法則に基づく重力場で、これもやはり逆二乗の法則に従う。重力場の強さを決めるものは物質の質量あるいはアインシュタインの原理に従えば質量でなくてエネルギーですけれども、とにかくエネルギーが重力場を作る。そして、電荷について保存則があり、電荷の総量が変わることがないということが知られていると同様にエネルギーについてもエネルギーの保存則があってエネルギーの総量が変わることもない。こういう特別の性質をもった力を簡単に言ってゲージ場と言うのであります。ですからゲージ場というのはマクスウェルの理論を一般的に拡張した概念であると考えてよろしい。四つの力が全部そうであればそれは非常に理論としてはすっきりして、世界は非常に美しい世界であるということが言えるんですけれども、実はさっき言いましたように、四つの力のうち二つだけ、重力と電磁場は、こういう性質を持っているけれども、残りの二つは全然違っ

た性質を持っている。では、それが何故であろうか？ その理由が説明できなければ統一的な解釈が成り立たないわけです。ところが幸いにして、最近その理由を説明する可能性が出て来た。そのために全部を統一して考える統一場の理論というものが非常に有力な有望な理論として考えられるようになったわけです。

では、どういうふうに説明するかと言うと、これは量子力学、量子論を使わないと言えないことなのですが、ここで非常に簡単に言いますと、我々が考えている真空、世界はその真空の中に、いろんな我々の知っている物質があるわけですが、そう簡単なものでなくて、量子力学で言いますとこの真空というのは実は何もない空、本当の空ではなく、一種の媒質のようなものである。固体のようなものである。固体というのは、ご承知のようにその中にたくさんの電子がはいっていたり原子がはいっていたりするわけですが、例えば透明体の中を光が通ったとしてもほとんど真空の場合と変わらない。少し違うのは、屈折率があってその屈折率のために普通の媒質と違うけれども、それ以外にはあまり違いが見えない。もちろん、非常に高いエネルギー

のもの、何か粒子を媒質中に送れば、その媒質中にある原子の内部を破壊して、原子の中の物質(電子)を飛び出させることができます。低いエネルギーでは、例えば電磁波を送っても、普通の真空の状態とあまり変わらない。それに似た意味で我々の知っている宇宙の真空というのは、実は本当の真空でなく媒質であるというふうに考えられます。これは、詳しいことは言いませんが、相対論的量子力学の中から出てくる自然的な結論であります。そうしますと、媒質というのはいろんな性質を持っていて、何もない真空と違うわけですからいろんなことが起こってよろしい。例えば、イオン化されたガスの中に正の荷電粒子を送ってみますと、そのまわりに負の電荷が(電子が)むらがってきて吸いよせられ、そして正の電荷を消すように働く。ですから、正の電荷を中へ入れても、実はそのまわりに負の電荷が誘導されて、遠くから見るとその電荷が遮蔽されて見えなくなる。それに似たことが起こりうる。遠くへ行きますと電荷が見えなくなるから、クーロン場でなくなっていわゆる湯川型の力になる。それがさっき言いました弱い力が湯川型であるということの根本的な原因であると解釈される。そういう

ふうな理論を作って、実際の弱い相互作用を説明することが現在成功をおさめているわけです。実際に W ボソンというものもこのようにして出てくる新しい粒子でありまして、これは物性論の立場で言えば、プラズマのプラズモンというのがありますが、それとほとんど同じような性質をもったものと考えてよろしい。

それから強い力というのは、いつまでたっても弱くならないから、完全に二つのクォークを引きはなすことは永久にできないと言いましたが、では、そういうことが何故おきるかといいますと、これはやはり量子論的なゲージ場の理論から出てくるもので、これも十数年前に理論的に発見された現象であります。さっきの遮蔽現象とはちょうど逆の反遮蔽の状態というようなもので、つまりある電荷のようなものをあるところにおくと、そのまわりに同じ電荷が誘起される。逆の電荷だったら、これを遮蔽して外から見ると中性に近くなるわけですが、逆の具合に誘起される。そのために、遠くへ行ってみれば見るほど、雪だるまのようにそのまわりにたくさん同じ電荷がたまってきて、遠くへ行けば行くほど

外から見る電荷はだんだん大きくなる。したがって、クーロン場の力に比べて反対にだんだんだんだん遠くへ行くほど強くなりうる。そのあり方は状況によってももちろん違うわけですが、ちょうどいつまでたっても力が弱くならないように見かけの電荷がふえている。そういう性質を持ったゲージ場が強い力をつかさどるゲージ場だと考えられる。

それだけではなくて、強い力はだんだんと電荷が遠くへ行けば大きくなるが逆に近距離に近づけば力は弱くなる、見かけの電荷みたいなものが小さくなる。したがって遠い所で強いと思った力は近いところによってみるとそう強くない。それから遠いところで何も無いと思っていた力でも非常に近い距離に行くと(例えば弱い力のようなものでも)やはりクーロン場に近い形になる。それから、電磁場のようなものはもともと強い力と比べて弱いんですけども、この性質を調べてみると、不完全な遮蔽ですから、ある程度電荷は遮蔽されるけれども完全に遮蔽されない。ですから、結局だんだんだんだん近い距離に持っていくと、遮蔽する雲の中に芯があってだんだん芯が見えてくる。その芯の電荷がだんだんだんだん大きくなっていく。ですから、クー

ロン力といわれるものを非常に近い距離で見れば、その電荷の量は実は今まで我々の知っている電荷よりは大きくなる。そういう可能性が理論的に出てきます。したがって一般に弱い力は近づきつづければ比較的強くなる。遠いところで強い力は、近くへ寄ればだんだんと弱くなる。両方で歩み寄る可能性が出て来た。そのために、うんと近い距離に持ってきますと、今まで考えられた四つの力、いや三つの力(重力は今別として)は、実はちょうど同じくらいの強さのものであって、同じ逆二乗の法則に従うものであるということが帰結されます。したがって非常に近いところで見れば、四つの力は実は同じ性質を持っているという可能性が生まれたわけです。

量子力学によりますと、いわゆる不確定性原理というものがあまして、非常に高いエネルギーで反応した時には非常に近い距離での様子がわかるというわけですから、非常に高いエネルギーで粒子の反応を見れば力の大一統が成り立っているかということが検証されるわけです。それでは、どれくらいのエネルギーまで高いエネルギーで反応実験をしたらその三つの力が同じ性質を持っているということがわかるかと言いますと、これは残念

ながらとてつもないエネルギーまであげなければならない。なぜかと言いますと、力の強さがだんだん変わると言いましたけれども、その変わり方が非常にゆるやかで対数的なゆるやかさを持っているからです。ですから非常に高いエネルギーのレベルまでエネルギーをあげねばならぬという問題が生じます。

今、我々が知っているクォークとかレプトンの質量とかエネルギーは、だいたい我々の知っている原子核の静止質量とか原子の静止質量の程度ですから、これはだいたい程度として1のオーダーのエネルギーとしましょう。それから、弱い力で生まれてくる“弱い中間子”のようなものは、この1の程度のエネルギーに比べて大体100倍ぐらい、あるいは千倍ぐらいのエネルギーのものであります。今CERNで作られている大加速器、あるいは将来アメリカでできるかもしれない大加速器というものは、たかだかこの百倍とか千倍とかの程度のエネルギーしか到達できないわけです。ところが、前述の三つの力が同等になるようなエネルギーというのは、オーダーとして 10^{15} 程度の高いエネルギーでないといけないのです。この1と比べてですね。これがさっき言いました現在理論屋が議論している

エネルギーの大きさで、実験でやるためには百年またなければならない大きさです。それから、もう一つ先に行きますと、それよりさらに一万倍くらい高いところにプランク質量という一つのエネルギースケールがありまして、これはプランクの定数とか重力の定数とかいろんな定数を組み合わせて自然に出てくる量であります。ここまでくると、重力も量子論的に考えなくてはならない。現在のところでは、これが終局的に最も大きな質量のスケールである、エネルギーのスケールであると考えられています。いずれにしても、二つ完全に違ったスケールの質量がでてきます(1と 10^{15})。

こんな問題がでてくるのは、理論屋が自分で作り上げたんだから、理論が悪いんだといえばそうかも知れませんが、とにかくそういう問題が起きた。今、現在、いろんなクォークの質量が違う。それから、 10^3 辺りのエネルギーでも新しいいろんな粒子があるかも知れませんが、それらがどんなものであるかということを、精密に予言することは残念ながらできない。けれども前述のような荒っ

ばい議論をすると、いろいろなエネルギーでどんな事が起こりそうだということは理論屋としては議論しやすい。どういう問題が、では将来残るかと言いますと、四つ位残ります(図5参照)。

未解決の難問題

- 1) 大きな^{エネルギー}スケールの差は何に由来するのか
- 2) クォーク・レプトンの質量の不規則性は何に由来するのか
- 3) 重力場の量子論は作れるか
- 4) 4つの力の統一

図 5

第1番目は、さっき言いました大きなエネルギーのスケールの差が出てしまう、 10^{15} 程度違うような二つのスケールが出て来てしまった。もちろん、その間にまた、中間的なスケールが沢山あるかも知れない、私も実際は中間的スケールがあると思いますけれども、極端な理論屋は、この二つしかないと主張している。1と 10^{15} の中間のエネルギーの所は何も新しい現象はない。大砂漠であると。砂

漠という名前が付いていますけれども、私には砂漠が存在するとは実は信じ難いんです。けれどもそういう主張をする人が多い。で、とにかくこんなに沢山違ったスケールの質量、エネルギーがなぜ出て来たかということとはまずわからない。それから2番目は、これももうすでにお話しましたが、クォークとかレプトンとかの質量というのは非常に不規則であって規則性があるなどとはどうしても言えないような状態であります。ですから、理論的に、例えば水素原子のエネルギー準位がちゃんとバルマーの公式とか、あるいは、シュレーディンガーの方程式から出て来たのとは全然違って、今までのところ、こういう不規則性が、不規則な質量がなぜ出るかということについては根本的な理解は皆無であります。これが2番目の問題。それから3番目の問題は、これはまあ実験に直接は関係ないかも知れませんが、理論としては無視出来ない問題として、重力場の量子論が作れるかどうかということです。それ以外の三つの力については、量子論が、量子力学が作られておりまして、そのためにいろんな予言とか計算が可能になったわけですが、重力場に関しては、今のところ、概念的にどうやって重力場の量

子力学を作るかという以外に、実際にとにかく何か計算を進めても答が無限大になってしまふ。これは、朝永、シュインガーなどが始めたいわゆるくりこみの原理を使っても救えない困難であります。ですから、これはどうしても矛盾というか、今のところ解決がつかない。それから4番目の問題は、さっき言いました大統一と言いましても、三つの力しか統一的にとらえていない。強い力、弱い力、電磁場これだけは、だいたい大統一の起こすエネルギーの辺りでは同じ性質をもっているんで統一できるんですけども、重力場だけはまだ相当性質が違っていて、それを残りの三つと統一的に把握するにはどうしたらいいかということはわからないというのがごく最近までの課題でありました。

現在でも、もちろん、これらの問題は残っているのです。特に、この1と2はいまだに解けない問題です。けれども、実は、ごく最近、去年あたりから理論が非常に進歩しまして、この残りの二つはあるいは解決が可能になったんじゃないかという状態になってきました。ですから、これから、その話を最後にお話しようと思います。

今までの理論屋がやってきた詰め方と大分

方法が違って——今までは少なくとも実験的な手がかりというのを絶えず注意して、実験的な検証へ進む。それから、実験的に解らないものを何か理論的に解こうという考えで進んでいたんですが——ここで話すものは一応実験と無関係に、ただ抽象的な原理というのを設定して——非常に美しい、あるいは魅力のある抽象的な原理を設定して——それが実際に自然界に何か役に立つか、実際に自然界にそれが適用されているかどうかということを調べる。ただ内部的な矛盾がないということだけを根拠にして、当面の実験的な事実を説明するということを一応断念して議論を進める。そういうことが過去10年ほどだんだん始まっております。一つの原因は、もちろん、さっき言いましたように実験のエネルギーがなかなか上がらないこと、実験してもなかなか解析が難しくて、理論と対決させることが技術上非常に難しいということなどもいろいろあるんですけども、それと同時にいろんな新しい原理を編み出したわけです。その原理はもともとはちゃんと根拠があって、なんか実験的なヒントから出発したわけですけども、その原理が一旦作られた後は、実験と対決するということを一応断念して、

それだけをただ追求するということになってきました。それでは、この新しい抽象的な原理は何かということ、ここで3種類全然違ったものですが簡単にご紹介します。(図6参照)

新しい抽象的な原理

- 1) Kaluza-Kleinの理論
(カルザ-クライン)
- 2) ひもの理論 (string)
- 3) 超対称性 (supersymmetry)

図 6

一つは、カルザ・クラインの理論で、これは全然新しくはないんで、実はアインシュタインの相対論、重力場の理論が出た、60年程前すでにもう考えられた。カルザとクラインという人がその頃出した考え方であります。それから2番目のヒモの理論というのは、前にクォーク間の力は距離に依らない力であると言いましたがそれを説明するために考えられた。例えば普通のヒモだったら伸ばすのだんだん張力が強くなるんでしょうけれども、特別のヒモの場合、例えばクモの糸のよ

うにいくら伸ばしても次から次へとクモは糸を出しますから伸ばしても張力はいつまでも変わらないと考えていい。そういうものだと考えれば、クォーク間の結合は理解できる。もう少し根本的な立場から、さっきの強い力がそういう性質を持つんだということまで現在わかっているわけですが、少なくともヒモのモデルでも一応強い力は計算できる、理解できる。ですが、実はヒモの理論といいましたのは、そういう初めの由来を一応忘れて、粒子が元でなくてヒモがもともとあらゆる粒子の元であると、そういう全然新しい仮定をもとに進める議論であります。

それから、第3番目は、超対称性理論です。これは数学的に非常におもしろいんですけども、また一面、非常に説明が困難なので、これはただ名前を書くだけで内容の紹介はやめておきます。まあ、簡単に言ってフェルミ統計に従う粒子とボーズ統計に従う粒子の統一理論。つまり、基本粒子というのはフェルミ型の粒子で、ボーズ型の粒子というのは四つの力を媒介する粒子ですが、それらを統一しようというたくらみでもって考えられたものであります。必ずしもこれは、現実には適用出来ないということになっております。

さてカルザ・クラインの理論というのは、これは説明をしませんでしたが、何かと言いますと、我々が住んでいる宇宙は我々の常識では空間が3次元、時間が1次元で、4次元であるというのが、我々物理でいつでも習うことなのでしょうけれども、実はそうではなくてもっと高い次元の世界の中に入っているんだという考え方があります。これはなんかとてつもないように思うんですけども、ちゃんとそれには理由がある。まあ二つ理由があるんですが、一つは、電磁場を重力場のように、アインシュタインがやったように、幾何学的な構造、曲率というものになぞらえて生ずると考える。曲率がある、空間が曲がっているから重力が生ずるように、空間が曲がっているから電磁場も生ずる。そういうことをやりたいから始めたことで、その曲がっているというのは、普通の空間で曲がっているのではなくて、余分の他の次元のところで曲がっている。そういう空間を考えたわけです。それから、いろんな粒子には質量があるわけですが、質量というのは、実は、何か高い次元での振動数のようなもので、その意味で質量を幾何学的に理解する。それから電磁場を(ゲージ場を)幾何学的に理解する。この二つの動機から

考えられたものであります。それでは、実際にはそれはどういう事を意味するのかと言いますと…。図7に示すように、例えばトンネルがありその中に新幹線が通っている。トンネルの方向は実際は1次元ですけども、これを想像をたくましくして、実は1次元ではなくて4次元に広がっていると考える、またトンネルに垂直な方向は2次元ですが非常に大きな次元であると考え。この垂直な横の次元、これは、非常にせまい。このような構造が実際の世界の構造だと考えるわけです。

Kaluza-Kleinの理論

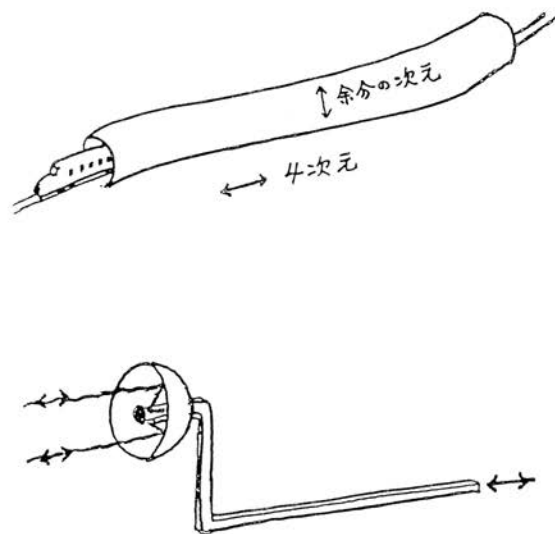


図 7

この幅が非常にせまいので実際は身動きが出来ない。だから、粒子が横方向へ動くことは考えられない。ですから実質的に見て世界は4次元であるという考え方です。それに似た現象として、例えばレーダーの導波管なんか考えたんですけれども、この中を電波を通す。この時に電波は、管の方向しかだいたい進行できないんですけれども、もちろん波ですから、横方向にも振動がある。そのため管から出てきた波の振動数は、縦方向の振動数の自乗と横方向の振動数の自乗の和の平方根になっているわけです。この横の振動数はゼロにはなり得ない。ですから、この電磁波は何か質量を持ったように振舞い、横方向の振動の振動数に相当するものは何か質量として考えられる。そういうような現象が電磁気を習った方には理解できるだろうと思います。それと似たような事情で、実際の世界は、横方向に余分の次元を持っていて、この次元が実際の粒子の見掛け上の質量、つまり、我々の世界での質量を与えているんだと、それがカルザ・クラインの考え方です。

それから簡単に言ってヒモ模型は、はじめは、クォークの間の力を理解しようとして考えられたものでして、中間子(メソン)はクォ

ークと反クォークから成り立っておりその間がヒモで結ばれている。この糸が、ぐるぐると角運動量をもってまわるとすると、遠心力とヒモの張力とが釣り合って適当なところでバランスをとる。そうしますと角運動量と糸の持っているエネルギー、その間の関係が出て来て、それを見ますと、ちょうど中間子やそのいろんな励起状態のスペクトルがピタリと実験と合うという機構であります。うまい説明であります。

それから、陽子のようなものは、3個のクォークがあり、それらが三つの同じようなヒモで結ばれている。こういうのが簡単に言ってハドロンのヒモ模型である(図8)。そのヒモというのは実は、数学的なヒモではなくて、強い力の力線が、中を通っているんだというのがゲージ場の考えであります。ここでヒモの理論といいましたのは、そういう立場を忘れて、ヒモ自身があらゆる物質の素材であるという立場であります。ヒモの理論の量子論を作ってみますと——ヒモが、物質の素材であって、粒子が物質の素材でないという立場で——いろんな角運動量を持ったヒモの状態があるわけですが、その違った状態が各々違った角運動量、スピンを持ち、違った

ひも模型

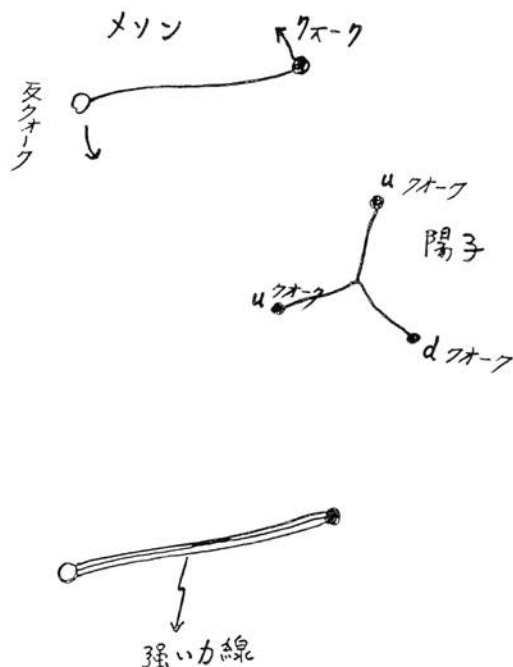


図 8

質量を持つ普通の素粒子として考えられるという立場であります。ですからヒモさえあればあらゆる粒子が現実には作れる。

ただし、ヒモの量子論をやっていると、普通の4次元の世界でヒモが振動したんでは矛盾のない理論が作れない。26次元という架空の次元の中でヒモが運動している時に初め

て矛盾のない理論が作れるということが大分前に発見されました。ですから、カルザ・クラインの理論と自然に結びつくわけです。そのみならず、26次元に行きますと、このヒモの振動数、いろんなモードの中に、ちょうどスピン2を持って質量がゼロという粒子が自然に出てくることがわかっています。スピンが2で質量がゼロの状態というのは、とりもなおさず重力の量子であります。ですから、重力がその中に含まれるという可能性が急に出てきたわけです。実は、これだけではあらゆる粒子が出るはずがない。というのは、この中からフェルミ統計に従う粒子を作ることはとうてい不可能ですから、何かフェルミ統計に従うスピンのようなものをこのヒモの上に乗せなくてははいけない。そのためには、超対称性という原理を使って、スピン(フェルミ粒子の自由度)をヒモの上に乗せるということが、必要になるわけです。で、そういうものを入れますと、さっき26次元で初めて矛盾のない理論が作れるといいましたが、実はそうじゃなくて、今度は10次元の世界で矛盾のない理論が作れるということがわかりました。

これらは10年以上前からわかっているこ

とであります、それだけではたいした説得力がないわけです。そこで最後にこの三つの原理をうまい具合に組み合わせた非常にうまい組み合わせが、ある意味では偶然ですが、10年間少数の人がとにかくやっきになっていろんな可能性を探した結果として突然出てきた。それが、私の最後の話の内容です。

これはスーパースtringの理論と呼ばれているものですが、これまで言いましたように物質の素材は何かと言いますとこれはヒモである。ヒモのいろんなモード、運動状態は、いろんなエネルギーを持ち、あるいはいろんな角運動量スピンを持つ。各々のそういう状態が我々に知られているあらゆる基本粒子とそれからゲージ場の量子であるという考えです。ですから、重力場の重力子も入っているし、電磁場のいわゆるフォトン(光子)も入っている。それからレプトンやクォークはフェルミ粒子として入っている。そういう粒子が全部出てくる。必要なものは全部そろっているというのがこの理論であります。ただし、ヒモの性質を勝手にしたんでは、やはりいろんな矛盾が出る。例えば計算ができない。つまり、エネルギー等を計算するとすべての量が発散してしまっていて無限大になって計算がで

きなくなるとか、あるいはいろんな不変性が壊れるとかが起こる。うまい具合に適当な組み合わせをとると、そういう問題が全部消えてしまう。その可能性で今のところ知られているのは、たった一つか二つの特別な組み合わせしかないということがわかっています。

それがどういうものかと言いますと、一つの可能性は、図9に示すようにヒモは閉じたヒモであって、そして初めの世界は26次元の世界であったとします。この中にヒモが動いている。この26次元が、長い世界と短い世界に一応分かれる。なぜ分かれるかということについては、残念ながらその説明はまだついていないんですけど、例えばそうなったとする。そうすると中間段階として、26次元の世界は10次元の大きな次元と16次元の小さい次元に分解される。ですから、その大きな世界の10次元で見れば、16次元の小さい次元がその上にのっている。実は、さっき言いましたように我々の4次元の世界では多次元の世界が実際見えないけれども、ただ我々の世界の粒子が違った質量を持っているとか、違った量子数をもっているという形で多次元がわかると同じように、10次元の世界で動いているヒモは、そのヒモの上に16方向の小さ

Superstring の理論 1984-85
(スーパーストリングの)

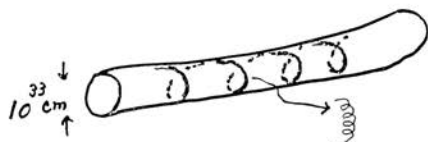
物質の素材: ヒモ



はじめの世界の次元: 26

中間過程の世界: $26 = 10 (\text{大}) + 16 (\text{小})$

実際の世界: $10 = 4 (\text{大}) + 6 (\text{小})$



4つの力と基本粒子 (クォーク、レプトン)
がヒモの振動状態として表される!

図 9

な自由度がのっていると仮定します。詳しいことはやめますけれども、このヒモの振動の波が右まわりに行く場合と左まわりに行く場合と一応区別する可能性がある。まあ非常に技巧をろうした考え方ですが、そういう波をつくります。そうしますと、すべての計算が矛盾なく、重力場も含めて矛盾のない量子論ができる可能性がでてきました。

まだこれでも 16、10 次元の大きな次元ですけれども、これは実際の次元ではない。この 10 次元が最後の段階でまた同じ様な現象を示して、四つの大きな次元と六つの小さい次元に分かれる。そういう事を仮定する。そうしますとカルザ・クラインの考え方ですがヒモは実は 6 次元の方向に巻きつきながら 4 次元の方向に伸びているヒモと考えられます。さて、これから出てくる御利益は何かといいますと、我々の知っている基本粒子と考えられているクォーク、レプトン、あらゆる種類の粒子は、全部、こういうヒモの違った振動のモードであると考えてよろしい。それから、四つの力を媒介する粒子もヒモの違ったモードであると考えることができる。というのが、ごく最近にシュワルツとグロス、二つのグループがあり、アメリカのカリフォルニア工科大学の若い人とプリンストン大学の若い人ですが、彼らが主導者となって最近に発展させた理論であります。ですから、私の今日の講演の題目というのは、素粒子は粒子かというんですけれども、こういう立場ですと、素粒子というのは実は粒子ではない。初めに粒子があったのではなくて、初めにヒモがあって、ヒモのいろんな運動状態が我々の世界では違

った粒子として見えているということになります。まだこれだけでは、現実の世界とは直接結びつかない。というのは、ここで議論しているヒモは以前に言ったプランク質量とかいうものすごい高いエネルギーの所でこういうことが起こっているんで、ヒモの幅、カルザ・クラインの理論のこの横の次元の大きさというのは、だいたいプランクの長さ、これはさっき述べたかも知れませんが、 10^{-33} cmの大きさで、とうてい実験にかかる大きさではない。けれども、概念的には、これで閉じた理論を作っている。したがって、一応、重力場の量子論も含めて何でも説明ができると、彼らは主張しているわけです。残念ながら、さっき述べました二つの未解決の問題、一つは、このプランクの質量に比べて、ものすごく小さな現在の我々の世界の質量のスケールが何故でてくるかということに満足な答えはまだでないし、それから、この世界でいろんなクォーク、レプトンがあって、それらの質量が非常に不規則であるということの説明もまだ残念ながらついていない。残念ながら、今、加速器を用いて研究している実験物理屋さんとは、ちゃんと話をして、それでお互いに助け合うということとはできないん

ですけれども、しかし、今後どうなるかわからない。あるいは、そういうところまでいくかもしれない。あるいは、この理論もやはりだんだん破綻が生じて、実際とは無関係の数学的なただ可能性だけの世界になってしまうかもしれない。

もしうまくいけば、ただ私がそう信じているとは言わないんですけれども、こういう理論の急先鋒の人が主張していることは、もしこれが正しいければ、これで物理学は終わりである。終わりという意味は次のようなことです。マクスウェルの方程式ができればもう電磁気はこれで終わりである、あとは方程式を解くだけだ。もちろん解くのはたいへんなことでありまして、いまだに皆一生懸命解こうとして努力しているわけです。それから、これは、パウリが言ったことですから、パウリは、自分は物性論の創始者であると自認している。なぜかといいますと、物質が安定だというのは、つまり固体が安定だというのは、パウリの原理に従って電子雲に安定性があるからというわけです。ですから、パウリは物性論の創始者であり、物性論は、パウリ以後はもう物理じゃない。なぜかという、もうシュレディンガーの方程式とハミルトニ

アンがわかっているから、あとは解くだけだ。もちろんそれで済むはずはないんで、そうでなかったら、今までこんなにたくさん物理の先生が一生懸命固体論をつついているはずはないわけです。しかし、パウリは、ある意味では、そういうことを言っている。そうしますと、もし同じような意味で現在の状態を言おうとすれば、もし今のスーパーストリングの理論が成功すれば、素粒子論は、素粒子物理学は、これでおしまいだと言ってもいいわけです。あとは、この複雑な方程式を解くだけだと。ですけれども、私は実はそういうことはおそろくないだろうと思います。ですから、まあ、皆さん、物理学をやられる方もこれでがっかりはされないで、これからまだ素粒子論に大いに将来があるというつもりで、勉強していただきたいと思います。これで私の講演を終わります。

(拍手)

武田 どうもありがとうございます。どなたか質問なさいますか。少し時間をとってございます。

質問者① さっきヒモの理論とか言われま

したが、ヒモは結ばれたりきれたりするのでしょうか。

南部 そうです。さっき話しましたが、実際そのとおりでして、そのために、ヒモの間の相互作用が起こる。それが非常に重大な問題なんでして、さっき言わなかったのは私が悪かったんですけれども、実は初めにこのヒモの理論が出た動機は、ハドロン(中間子とか核子)の間の反応は——散乱だとか、そういうものは——どうして起こるかということの説明のためなんです。つまり、メゾンはヒモのようなものである。もう一つメゾンがやってきて、それとぶつかると、これが一時つながって、それからまた切れて、分かれる。それをメゾンの散乱と考えている。ヒモの理論っていうのは、興味のあるいろんな物理現象を説明する理論として役立ったわけです。ですから、何か相互作用がなくちゃならん。ヒモの理論に二つの種類があって、今のところ候補者が二つある。一つは今のメゾンのように開いたヒモである。それが切れたり、つながったり、あるいは、自分でつながって輪になることも考えるわけですね。量子力学で言えば、たえずそういうことが起こりうると考えられている。それから、はじめっ

から、閉じたヒモだけをやっておる場合——実は実際の世界と対応するためには、プリンググループが作った閉じたヒモの理論というのが有望なんで、そっちの方が、もっと興味があるんですけども——その時は、いつでも閉じたヒモで、それが切れて、開くことはない。二つのヒモがぶつかって、それがまた一つの大きなヒモになる。輪になる。それがまた分かれる。そういうことは考えているんです。そういうことを考えないと、実際に量子力学が使えない。

質問者② 開いたヒモと 閉じたヒモというのは、数学的に言うと位相が違うわけですね。

南部 そうです。

質問者② そういう位相も、物理と関係あるんですか。

南部 そうです。構造が違うわけです。閉じたヒモでは、例えば、右まわりの波が存在して、それが左まわりの波に変わることはない。開いたヒモですと、波が端にあたってはねかえってくるので右まわりの波が左まわりの波に変わるわけです。だから、左右両方が混ざってしまうわけですね。ま、例えば、そういう違いが出てくる。

質問者② そういったヒモの議論というのは、昔ギリシャ時代に原子論みたいな考えがありましたが、そんなヒモの考え方もあったのですか。

南部 それは、おもしろい質問ですね。だれか御存知の方あったら教えて下さい。(笑) 私の知っているのは、デモクリトスの原子論的な考えしかないです。その意味では、おそらくなかったと思います。知りません。それは、あるかもしれない。あるいはギリシャでなくても中国になんかあったかもしれない。

それから、まあ、余談ですけども、いったい1次元のヒモがあるなら、なぜ今度は、2次元の膜のようなものがあって悪いかと、だんだん高次元のものを考えてもいいという考えもあって。すでに考えている人もたくさんいるんですけども、そこまでいくと、数学的に手におえなくなる。具合の悪いことが沢山でてきて、ヒモまでは、点の粒子からヒモまでは、少なくとも拡張できるけども、それから先は、できない、おそらくできないだろうと考えられています。

質問者③ ヒモの理論というのは、ヒモそのものの研究はあるのですか。

南部 ヒモそのものは何かということです

か。それも当然出る質問です。それからまた、将来そういうことを考える人が出てくると思っています。これは過去の例ですが、例えば、ハドロンの中を通っているヒモというのは、実は、数学的なヒモでなくて、幅のあるヒモで、それはただ強い力の力線が通っているものだ。物性論をやっている方は、ご存知かと思いますが、超電導体の中に磁場をかけると、いわゆる、アプリコソフの磁束というのが出ることがあります。超電導体と電磁場とは、例えば、水と油のようなもので混じらないわけですから、分かれてしまう。ですから、普通の場合ですと、極があればそこから磁場が広がるわけですが、そういう風に超電導体の中を磁場が通るわけにいかない。いわゆるマイスナー効果というのがあります。そのために、磁場を通そうとすると、層が分かれてしまって、ただ細い管の中を磁束が通っている、つまり、外から、超電導体が何か圧力を加えて磁束をしぼってしまう。今のこの強い力を作っているヒモのようなものは、そういうものであると考えられるわけです。ですから、それを、そのまま使えば、26次元か10次元の世界で、何か新しいやっぱりゲージ場みたいなものがあって、それが

その空間の性質に依って、ヒモみたいになったんだと考えてもいいかもしれません。そうすると、それはやってみなければわからないですが、今までうまくいっていた困難が、また現われるんじゃないかという可能性がある。それからもう一つは、もっと抽象的な数学的な立場として、ヒモをもっと拡張された概念から理解するのが妥当じゃないかと思えます。それから、もう一つの考え方は、ヒモというのはただ便宜的に導入されたもので、我々が求めているのは、それから出てくる現在の世界の結果であって、ヒモというのは途中の仮定として導入された概念であるかもしれない。ここで、ちょっと余談ですけど、冗談みたいなことを言いますが、これはゲルマンがクォークの論文を書いた時にその脚注としてたしか書いたと思うんですけども、シカゴ大学に実験屋で有名なテレグディという、ハンガリヤ出身の先生がおりました。で、そのテレグディ夫人っていうのは、非常に料理の得意な方です。その奥さんから習った話らしいんですけども、キジの肉を料理すると、それは非常に油が少ないんですね。だから、なかなかうまく料理できない。そのために、まず、子牛のキレを持ってきて、キジの

肉の間にはさんで、サンドウィッチのようにする。そうしてそれを料理すると、油がうつってキジの肉がうまくできるけれども、できたあとは、子牛の肉は捨ててしまう。そうすると、香りがキジにうつる。ですから、ゲルマンが言っているのは、これはクォークに関して言ったんだろうと思うんですけども、便宜上ある概念を持ってきて、そのエッセンスだけをとって、そして元のからは忘れてしまう、そういう可能性も考えられる。ですから、ヒモというのは、その時持ってきたキジの……キジじゃなくて、子牛のようなもので、そこから出て来たこの結論だけをとってきて、それを採用する。そういう可能性も考えられないこともない。では、一体、その最後の理論というのが、エッセンスだけをとった理論というのが、どういうものになるかということとは、まだわかっていませんけれども、そういう可能性もあるかもしれないと思います。

質問者④ 四つの力が統一できる可能性があると言われましたけれども、最初の部分で重力の量子論がまだできていないとも言われました。四つの力を統一する理論には、重力の量子論がなくてもできるんですか。それと

も、今最後に話されたことは、重力の量子化ということの内容と思ってよいのですか。

南部 それはですね、まだ重力の量子論が完全に解決しているといっているわけじゃないんでして、ここで言っているのは、ただ平坦な空間の近くでの重力場については、とにかく量子論ができたかもしれないということです。つまり、摂動論で計算できるような重力の量子論はできたということです。ただし、もっと深遠な問題で、曲がった空間の量子論、それから、もっと深刻な問題として宇宙の量子論はどういうものであるか、宇宙の波動関数は何であるか、そういう問題があります。それから、宇宙が一つだけならば、宇宙に対して実験することはできないわけです。我々はその中の一部ですから、いわゆる観測の理論とは何を意味するか、沢山宇宙を持ってきて、それをいちいち実験してみて、それで確率を決めることは原理的に難しいわけですね。ですから、そういう問題をどうしようかということとは、依然として残るわけです。そういう意味で、量子力学の解釈とかあるいは重力の量子論のそもそもの解釈は何であるかというのは、依然として解けない。だから物理学が終わったとは言えないと思いま

す。

質問者⑤ ヒモの運動状態というのは、無限にあるわけですが、それでは、我々は、無限個の粒子を見ることになるわけですか。

南部 それは非常にいい質問ですね。これも話をしなかったんですけども、今、ヒモを考えますと、ハドロンの物理を習った方は御存知だと思いますが、とにかくたくさん励起状態があって、エネルギーがいくらでも上がっていく。スピンを大きくすれば、それに伴って固有状態のエネルギーは際限なく上がっていくわけです。それと同じ事情で、今のヒモの理論を解きますと、重い状態はいくらでも出てくる。ただし、単位は実はプランク質量の単位なんです。ですから、今、ここで考えている我々の基本粒子とかゲージ場というのは、その中で質量がゼロの粒子の分だけをとっている。それ以外にものすごい重いものが無限に続いているけど、それは、今のところ観測にかからないと、そういう考え方です。ちょうど質量がゼロになる状態というのは、トポロジーとかなんかの議論をしますと、何個生ずるか、どういう性質を持つかということが、実際に計算をしないで、議論が

できます。ここで質量がゼロというのはプランク質量のスケールでもってゼロであるということで、このクォークは重くてこちらは軽いなんていうのは全部無視してしまって、皆ゼロと考えてやる。細かい、小さいスケールでの質量の差を出すことは、今のところまだどうしていいかはっきりわかっていないけれども、少なくとも、非常に軽い、質量がゼロと考えてもいいような粒子がいくつあるかということは、その曲がった空間のトポロジーを決めると決まってきます。そのみならず、世代がいくつもあるといいましたが、何世代あるかということも、多次元空間のトポロジーを決めると決まってしまうということがわかっています。これは暫定的な結果ですが、これも、世代の数は、この理論によりますと、大体4の倍数であるということがわかっています。これが確定的でないというのは、いろんな解のとり方があって、その中に数学者、物理屋が知っている多様体の性質を持つ解の例がいくつもあるんですが、それに対しては世代の数は4の倍数であるということは言えるということなんです。もしこれが本当だとすれば、それは一つの予言になるわけで、少なくとも4世代はある。あるいは8世代かも

知れないし、20 世代かも知れない。もし世代が 4 でなくて、5 であったり、あるいは 3 であって、しかもそういう解はこの理論から出てこないとすれば、この理論はダメになるし、もし 4 であったとすれば、ある意味では、これは、この理論の支持になると考えてもいいと思います。しかし、これは、現在知られている解に対しては、世代の数は 4 の倍数であるけれども、他の例がないとはまだ断言できない状態です。

武田 何かご質問ございますか。

質問者⑥ えーと、あのクォークをさらに構成する粒子みたいな理論が、マオン、リソとかいう形で出て来ているんですが、ああいふものと、いまのヒモの関係は……。

南部 これは、今のところ相容れないですね。そういう立場とは全然相容れない。それは、全然違った立場の考えと思います。

質問者⑥ で、そっちの方の理論は、今の理論と比べて、可能性は低いとお考えですか。

南部 ただね、もちろんその、その次のレベルがどこででるかの問題でして、それは、もちろん実験的には、もっと興味のある問題でしてね。例えば、次の世代の——世代っていうんですか——加速器のエネルギーで、新

しい実験が出てきて、その時にクォークの構造が見えてくるかどうか、そういう問題があるわけですね。で、もしクォークの構造が見えるというようになったらば、もちろん、こういう理論はダメになることは確かですね。それを実験的に、チェックする方法自体が非常に難しいわけですが、クォークに構造をどうやって見るかということは、まあ、分析が非常に難しい。それから、もう一つの立場としては、構造がそういう、次のエネルギーのレベルじゃなくて、本当にプランクの質量までいって初めて出るんだと、そういう考え方もある。そうしますと、まあ、もちろん直接にチェックの方法ってのは、この理論と同じように難しくなる。ですから、ある意味では、たとえばヒモが何でできているかという問題と似てくるかもしれないですね。

武田 何か最後の質問ございませんか。

質問者⑦ さっき、現在の実験室ではできないので、宇宙を実験室にするとおっしゃいましたけれども、その話は具体的にどういうことですか。

南部 宇宙実験室ですか。これも、まあ、今、お話しなかったんですけども、それは間接実験です。今のところ、本当に直接実験

による、何か間接的な証拠じゃなくてですね、理論の検証方法が、私の知っている限り、はっきりしたものは二つある。それは、もう御存知と思いますが、一つは、陽子、プロトンが崩壊するかどうかを見ることです。これは、さっきの大統一の理論をみますと、クォークとかレプトンとか、はじめは一見違った性質のものは、実は同じものになってしまうわけですね。原理的には区別がつかない。そうすると、初めクォークと思っていたものが実は、レプトンに変わるかもしれない。ということは、我々を作っている物質が実は、いつの間になくなってしまっていて、残るものは、電子とニュートリノだけになると、そういう世界になるかも知れない。それは前から、例えば、この東北大におられた吉村さんが、始められた理論ですが、大統一の理論の一部として、なされたものですが、それを、今、各国でその検証をやるうとして努力が続いております。その decay は、あまり早く終わってしまったんでは、とうてい我々は存在しないわけですから問題にならないんですが、理論で言いますとなるべく長く寿命を持たせたい。大統一の理論ってのを uses と、大体 10^{30} 年以上くらいの寿命になる。ご存知のように宇宙の

年齢は、まあ 10^9 か 10^{10} 年ですか、せいぜいそれくらいですから、それと比べては、もう話にならない長寿命なんですけど、実験的にそれを検証することはできる。つまり 10^{30} 個のプロトンを集めてくれば、1 年の内に一つは崩壊するわけです。ですから、非常に大きな何千トンというタンクの中に水を入れて、その中でたまたまプロトンが一つ壊れれば、それが壊れて例えば π メソンとか電子とかが出て、必ず電子は出さなくちゃいかんわけですが、それでちょうど初めのエネルギーに相当するような、エネルギーを持った反応が起これば、それは陽子崩壊の一つの証拠として考えることができる。ただ、他にいろんな、それにまぎらわしい現象が沢山ありまして、例えば宇宙線が降ってきて、ニュートリノがやってきて、それに似たような反応をタンクの中で起こすと、それを区別するのが非常に難しいのが一番の問題ですけれども、世界中でそういう実験が各所でやられております。日本では例えば、神岡鉱山で、東大の小柴教授がやっておられるプロトン実験で、これが非常に有望視されているんですけども、残念ながらプロトンが崩壊したという確証はまだない。それが一つ。もし、プロトンの崩壊が

確認されれば、これは大統一の理論を、裏付ける非常に強い証拠になる。したがってそうすれば、その次の理論の段階であるスーパースtringにも、非常に間接的にはあるかもしれないけれども、サポートになるわけです。それから、もう一つの実験的な方法というのは、いわゆる単磁極、モノポールを見つけるということです。これは、これも御承知かもしれませんが、モノポールというのは、単位磁荷を持つ粒子です。電子とか、普通の粒子は皆、電荷を持っているわけですが、磁荷というのは、この世には存在しない。つまり磁石の北極、南極はありますけれども、いつでも対をなして現われて、北極だけが取り出せるというような例はないわけです。ですが、そういうものを、もしあると仮定すれば、マクスウェルの方程式は磁荷と電荷について、電場と磁場について対称性があるから、非常にきれいな理論であると、これはディラックが、1930年頃ですか、ですから60年ちかくも前に提唱したもので、ディラックはその時、こんなにきれいな理論を自然が採用しないはずはないと、そう断言したんですけれども、大統一の理論ができますと、ディラックのように頭からそういうものを仮定し

ないでも、実は必然的にゲージ場の理論から出てくるということがわかってきました。ですから、マグネティックモノポールの理論を、例えば、きらってでもですね、ゲージ場の理論を仮定すれば、いやでもおうでも、そういうものが存在しなくちゃならんことになります。で、しかも、その理論から出てくる磁荷は、非常に大きい質量を持ったもので、さっきの大統一理論に出てくる質量と同程度の質量を持っている重い粒子だということになります。そういうものはいまだに、見つかっていない。これを普通のものの重さに比べてみますと、磁荷というのは、1個の素粒子でだいたいバクテリアの重さぐらいですね、生物体の。それくらいの重さを持っているわけです。それを検証する方法というのは、原理的には非常に簡単で、導体のループがある。その中を通れば、普通のファラデーの法則によって、その中に電流を誘起するわけで、すぐわかるわけです。数年前にスタンフォードのカブレラという人が、そういう実験をして、たまたま、一つそういうものが通ったと、輪の中を通ったという報告をして、大さわざ、大センセーションを巻き起こしたことがあるんですけれども、それから、カブレラは、そ

の装置を改良して、ずっと実験を続け、それからシカゴ大学でも、それをもっと改良した、もっと大きな装置を作って、実験をしていますけど、残念ながら、その第一回以後は、何にもそういう証拠がない。宇宙の中にモノポールが、1個存在して、たまたま、それがカブレラの装置の中を通ったとすればいいわけですが、それでも(笑)、今のところ、残念ながら、モノポールの存在は実験的には確認されていない。もし、それが確認されれば、それはさっき言いましたように大統一理論、ゲージ場の理論の必然的結果として出るわけですから、これは非常に意味がある。これは、ちょうど、例えて言えば、アインシュタインの方程式を作った時に、ま、あれは、ニュートンの方程式の拡張だったんですが、ブラック・ホールの解ってのが、その帰結として生まれたわけですがね、シュワルツシルドの解ってのが。これは、アインシュタインの方程式を仮定すれば、どうしても受け入れなくちゃならない解である。幸いにして、ブラックホールが、完全に確認されたかどうかは知りませんが、最近はどうかに存在するということは人が信じ始めているわけです。で、それと同じように、たまたま、モノポールが見つかれ

ば、大統一理論、こういう理論の確認になる。残念ながら、今のところ二つしか、私は直接の方法は知らないんですが。二つとも、まだ実験的には確認の域には到っていない、という状態であります。

武田 残念ですけども、質問の時間を打ち切らせていただきます。それで、最後に、仁科記念財団の常務理事をなさっている玉木先生から閉会の辞をお願いします。

玉木 ありがとうございます。私は現在こういう種類の話はまるで縁が遠くなっておりますが、お話のなかに出てきた磁気モノポールの話とかクライン・カルーザの話、そういう話はずいぶん古くからの話です。ポーアさんのところで仁科先生が勉強しておられた時にすでにポーアさんが書かれた「相補性原理」の論文の一番おわりのところでクライン・カルーザの話にふれてあります。そんなわけで、今日のお話は、大体こんなような話じゃないかなということは、わかったような気もしたんです。たいへん抽象的な話ではあるけれども、数学的な理論を十分にきわめると直観的なイメージを作ることができるようになる、そんなふうに私は感じます。

クラインさんは、仁科さんと一緒に仕事を

したかたで、前に日本に来られたことがあります。仁科先生が亡くなられてから後の事です。そのとき話をされたのは、「物理学における大きな数と小さな数」とかいう題で、講演の前に、早目に講義室に来られてあらかじめ黒板に書いておくところは、1937年のボーアさんの講演と同じ流儀でした。その黒板に式を書くのを手伝わされたのを、おぼえております。

南部さんのお話をうかがって、たいへん抽象的な話でも、それを聞いたものに直観的にわかるようにもっていく話しぶりに感心いたしました。数学をつかって——このごろは、

それもまにあわなくて、コンピュータをつかって、何か出す。結果は出るが実際なにをやっているかよくわからない。そういうようなことにならないようにしたい。みなさん、そういう点でお互いに大いにディスカッションで助けあっていきたいと思います。

仁科記念財団のことは、もうはじめに久保さんがお話しになったので、私はこれで終わらせていただきます。

ありがとうございました。

武田 もう一度、南部先生に拍手をお願いします。
(拍手)

仁科記念財団 出版物リスト

1. 朝永振一郎：「原子論の発展」中学・高校の理科教員のための講演
(NKZ. No. 1 ; 1962 年, 抜刷再版 1980 年)
2. 青野雄一郎：「太陽と電離層」中学・高校の理科教員のための講演
(NKZ. No. 2 ; 1963 年)
3. 朝永振一郎：「放射能の話」
(NKZ. No. 3 ; 1963 年)
4. 菅 義夫：「電子冷凍の理論と応用」
(NKZ. No. 4 ; 1964 年)
5. 小田 稔：「宇宙の考古学」
(NKZ. No. 5 ; 1964 年)
6. 鳩山 道夫：「エレクトロニクス時代とトランジスタ」
(NKZ. No. 6 ; 1965 年)
7. 湯川 秀樹：「仁科先生と朝永さんと私」
朝永振一郎：「量子電気力学の発展」
(NKZ. No. 7 ; 1966 年, 抜刷再版 1980 年)
8. ウェルナー・ハイゼンベルク：「現代科学における抽象化」
平田 森三：「割れ目の話」(NKZ. No. 8 ; 1968 年)
9. 後藤 英一：「電子計算機の得手と不得手」(1969 年)
10. 湯川 秀樹：「物理学者群像」
湯川 秀樹・朝永振一郎：対談 (1972 年)
11. 小田 稔：「X 線星とブラックホール」(1977 年)
12. 朝永振一郎：「宇宙観の変遷」(1980 年)
13. J. Schwinger : “Two Shakers of Physics” (1980 年)

14. 戸田 盛和：「自然現象と非線形数理」
朝永振一郎：「仁科先生と私」(1981 年)
15. 長谷川博一：「宇宙塵と惑星の誕生」(1982 年)
16. 中嶋 貞雄：「極低温の世界」
朝永振一郎：「原子核物理の思い出」(1982 年)
17. G. Hevesy-Y. Nishina, Correspondence 1928~1949 (1983 年)
18. 本庶 佑：「動く遺伝子」(1983 年)
19. Chien-Shiung Wu：“The Discovery of the Parity Violation in Weak Interactions and Its Recent Developments” (1984 年)
20. Y. Nishina's Correspondence with N. Bohr and Copenhagengers 1928~1949 (1984 年)
21. Y. Nishina's Letters to N. Bohr, G. Hevesy and Others 1923~1928 (1985 年)
22. Freeman J. Dyson：“Origins of Life” (1985 年)
23. Richard P. Feynman：“The Computing Machines in the Future” (1985 年)
24. Ben R. Mottelson：“Niels Bohr and the Development of Concepts in Nuclear Physics” (1985 年)
25. 西川 哲治：「素粒子の素粒子 “クォーク” をさぐる」(1986 年)