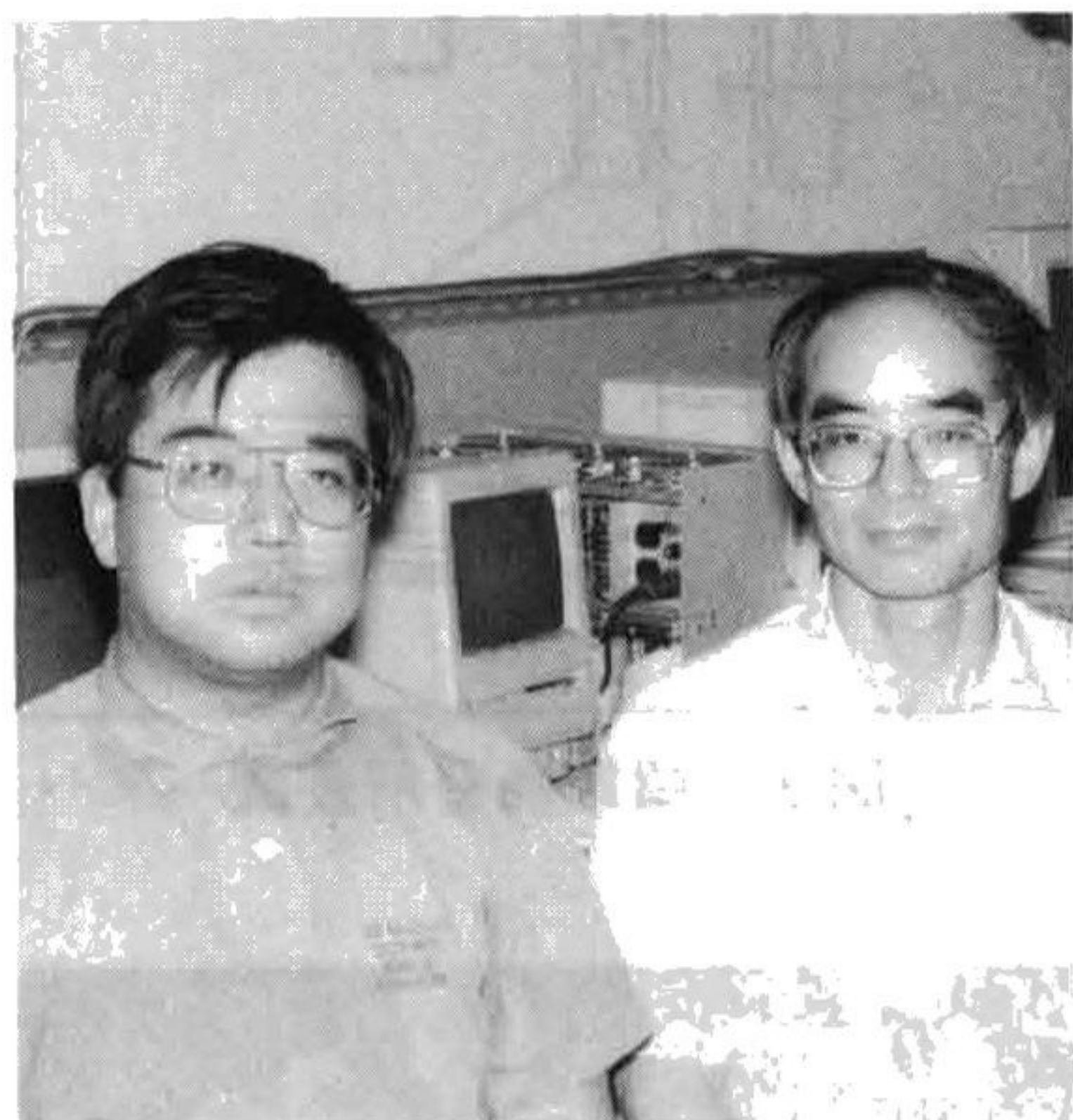




# 自然の神秘・素粒子の姿を極める

—— 渡辺・谷森研究室～物理学科 ——



(右) 渡辺 靖志 教授  
(左) 谷森 達 助教授

素粒子物理学は、物質の究極の姿を解明し、同時に宇宙のはじまりを探究するという超ミクロと超マクロの局面を追求する学問であり、理論と実験とが密接に影響を及ぼし合って発展している。日本では、理論面では、湯川や朝永に代表されるように、世界のトップレベルを誇るのに対して、実験面では大きく立ち遅れ

ていた。それが、トリスタンの実験や、神岡実験などで一気に世界に追いついたそうである。今回は、東工大にもつい最近作られたという、素粒子実験の研究室、渡辺・谷森研を訪れて、渡辺教授にお話をうかがった。



## 素粒子を探して——理論と実験

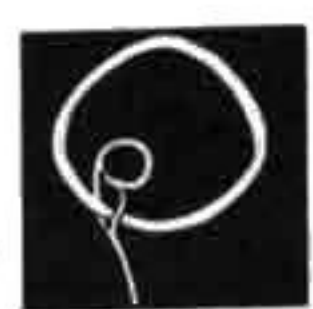
素粒子とは、物質を構成する基本的な粒子という意味である。現代物理学において素粒子は、物質を構成するレプトン（電子、ミュー粒子、ニュートリノなど）とハドロン（陽子、パイ中間子、K中間子など）及びその間の相互作用を取り持つゲージボゾン（ $Z^0$ 粒子、 $W^\pm$ 粒子、光子など）の三種類に大別される。素粒子の大部分はハドロンでありハドロンはより基本的な粒子クォークから構成されていると言う。素粒子はそれぞれ固有の質量・電荷・スピン・磁気能率・寿命等を持っていて、生成されたり消滅・崩壊したりするという著しい性質を持つ。

素粒子論としては、1960年代後半に、ベータ崩壊等を引き起こす弱い相互作用と、電磁相互作用とを統一する理論が提唱された。さらに、強い相互作用（核力等）を記述する理論も作られ、重力を除く3つの力、すなわち強・電磁・弱相互作用を記述する「標準理論」が確立されるに至った。この標準理論は、1983年に発見された弱い相互作用を媒介する $W$ 及び $Z$ ボゾンの質量などを予言し

たのをはじめ、おびただしい数の実験事実を、全てうまく説明してしまう。しかし、任意のパラメータの数が多すぎるなど理論的にも不十分な点が多い。そこでその3つの力を統一した大統一理論、そして重力をも含む超弦理論などが提唱され、現在盛んに研究されている。

しかし、理論で研究されているエネルギー領域は宇宙のごく初期にしか実現されず、現在の段階で、人工的に作りだすことが可能なエネルギーの領域を遙かに超えている。唯一、後述の陽子崩壊の実験など加速器を用いない大型実験によって、そのエネルギー領域のほんの一部の探索が可能である。従って素粒子実験も過去10年間に大きく2つの潮流に分かれた。1つは、従来の流れに沿ってますます大型の加速器を建設し、次のエネルギー領域に標準理論の不十分な点を解明しようとする方向である。そしてもう1つは、加速器に依らない実験装置を建設し、性能をさらに向上させて直接現代理論の検証を行おうとする方向である。





# 加速器で高エネルギー入射ビームを作り出す

まずは加速器を用いる方法を簡単に説明する。素粒子の構造を調べるには、エネルギーの大きな（波長の短い）粒子の入射ビームが必要になる。量子論では運動量  $P$  をもつ粒子は波長  $\lambda = h/P$ （ $h$ ：プランク定数）で表される波の性質を持つが、より波長の短いビームを作るためには加速器を用いなければならない。加速器は、かつては静止している陽子等に加速された粒子をぶつけるものが主流であったが、1970年代初め頃からは電子と陽電子、または陽子と陽子（反陽子）を加速し、正面衝突させることでより効率的に高エネルギーを得る衝突型のものが次々と建設されていった。

加速可能な粒子というのは、安定な荷電粒子でなければならず、素粒子では、わずかに電子（ $e^-$ ）、陽電子（ $e^+$ ）、陽子（ $p$ ）、反陽子（ $\bar{p}$ ）の4種類に限られる。そして互いに衝

突させて意味のある粒子の組み合わせは、電子と陽電子、電子と陽子、及び陽子と陽子（反陽子）の3種類しかない。従って、高エネルギー加速器は、やや特殊な電子と陽子の衝突装置を除くと、陽子加速器と電子加速器に大別され、またそれらは形によって、円形加速器と線形加速器に分類される。図1に、一般的な電子・陽電子、及び陽子・陽子（反陽子）の衝突加速器について、その到達エネルギーの増加にみる発展を示す。これによると、その到達エネルギーは、10年毎に約10倍増加している。また、常に陽子・陽子（反陽子）の方が電子・陽電子のものより10倍ほど高いことが分かるが、観測できるエネルギー領域は同じである。これは、電子・陽電子は基本粒子同士が衝突しあうのに対し、陽子・陽子（反陽子）の場合はそれを構成するより低エネルギーのクォークやグルーオ

ン同士の衝突になってしまうからである。図1の、現在の延長線上に、エネルギーフロンティアをさらに推し進めるべく、陽子・陽子では米国のSSCやヨーロッパのLHC、電子・陽電子では日本のJLC等が次期加速器計画として既に建設が始められたり、または真剣に開発が進められている。

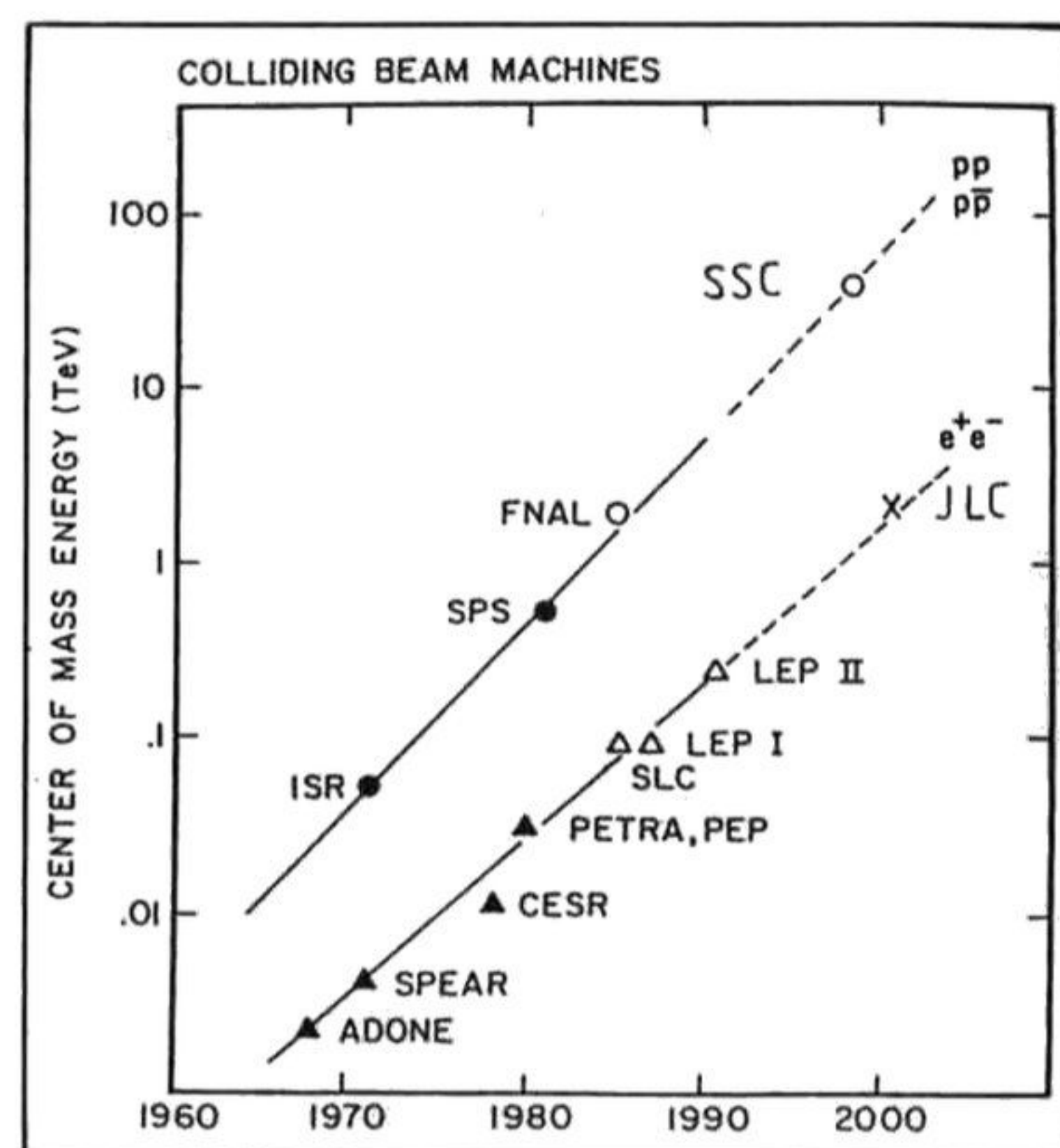
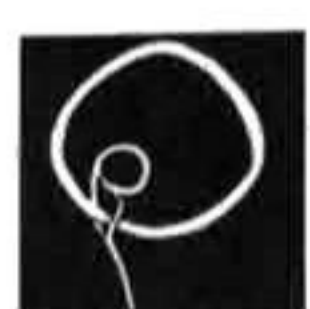


図1 衝突型粒子加速器の発展



## トリスタン加速器——高エネルギーの実現

加速器実験において、渡辺・谷森研は文部省所管の全国共同機関である高エネルギー物理学研究所でのトリスタン加速器を用いた実験に参加されている。トリスタン加速器は、筑波研究学園都市の北端に位置する研究所の敷地いっぱいに設置された周長約3kmの加速器リングである。これは、1986年に完成し、300億電子ボルト以上の電子・陽電子の正面衝突という、世界でもトップクラスの高エネルギーを実現できる加速器である。渡辺教授は、「実験家は実験で得られた事象を解析し、信頼できる実験データを提供するのは勿論、幸運を見逃さず新事象の発見などを常に心がけることが大切です。またそれに伴って、より良い実験データを創り出すための実験技術の開発や、測定器の建設も重要な任務となりま

す。さらに、常に新しいアイデアで自然に問いかけ、新しい知見を引き出すための実験方法や解析方法を考え出すのも実験家の責務であり、同時に喜びでもあります。」とっておられた。教授自身トリスタンでの実

験装置の建設にたずさわったそうである。図2に示すようにトリスタン加速器は、電子線形加速器、陽電子発生用電子線形加速器、入射蓄積リング及び電子リングの4つの加速器から構成されており、電子・陽電子

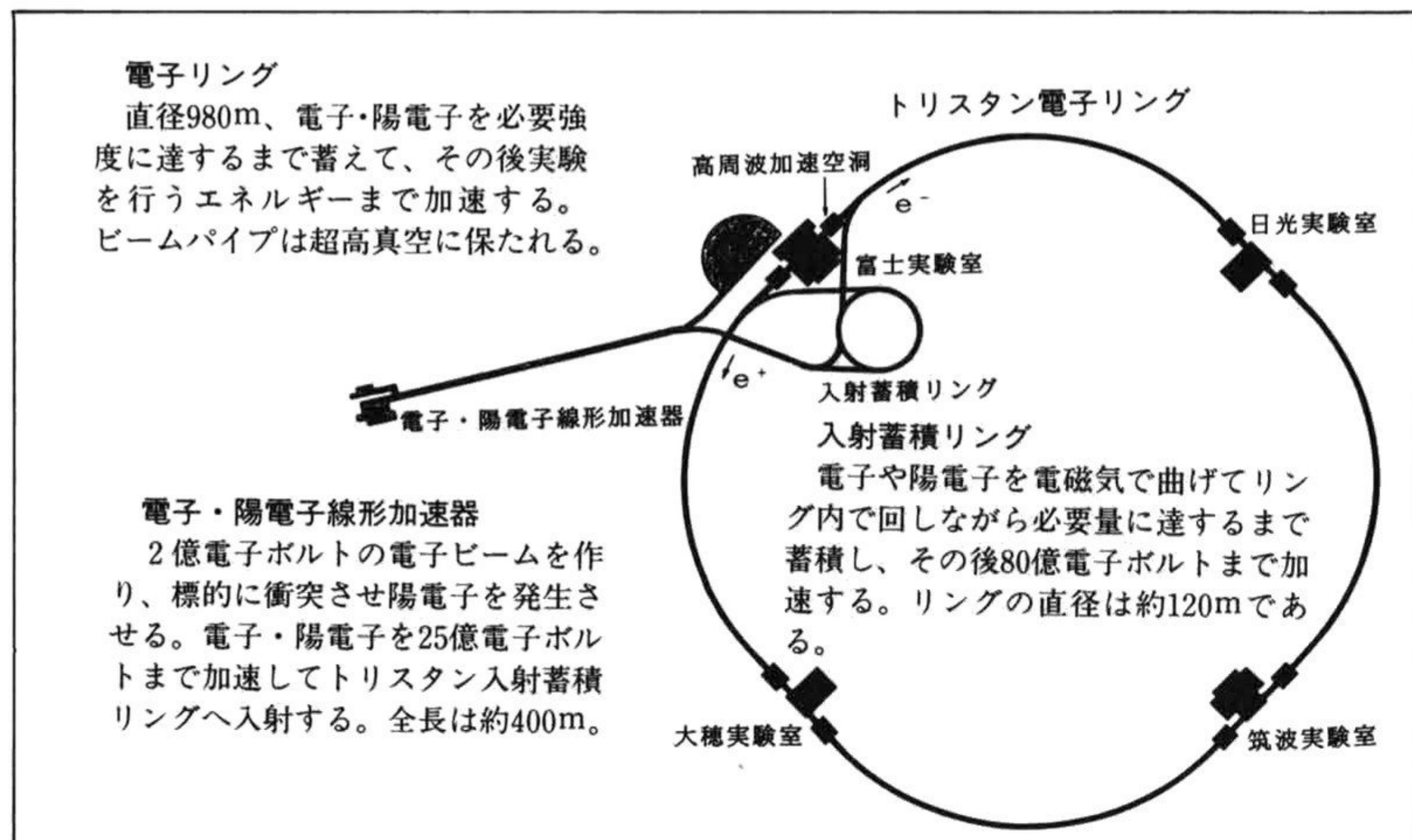


図2 トリスタン加速器



の加速、衝突のために超伝導磁石や加速管を駆使している点が特徴である。そしてリング上に4つの測定実験室が設置されている。

この電子リングには、偏向電磁石

と収束用電磁石が用いられ、その磁石の総重量は約5000 tに達する。互いに反対方向に回っている電子と陽電子は、4つの実験室の中央で正面衝突して素粒子反応を起こし、そこ

に新しい粒子と反粒子の対等が生成される。この新しい粒子の対はさらに核子、中間子、ミュー粒子、光子などのより軽い粒子に崩壊し四散する。この情報を調べる検出器は、極微の粒子が物質中に残す飛跡を電気的な信号として素早く取り出すように工夫されている。図3は、筑波実験室のトパーズ測定器によって検出された、電子・陽電子衝突によるクォーク対生成反応であり、この反応では多数のハドロン粒子が検出される。そして、荷電粒子のエネルギー損失率から電子、陽電子、ミュー粒子、パイ中間子、K中間子などの粒子を識別することができる。

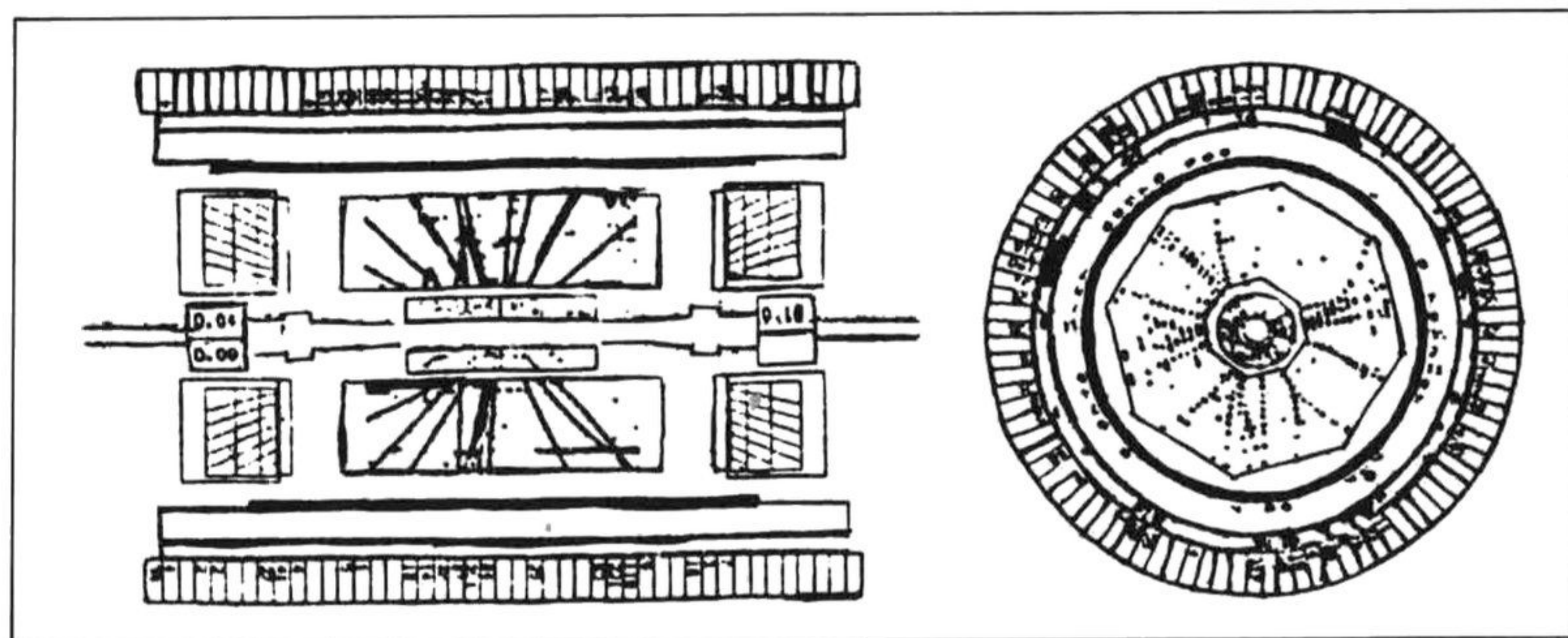


図3 電子陽電子衝突によるクォーク対生成反応(トパーズ測定器)

## ニュートリノの観測——神岡地下実験

素粒子実験のもう一つの大きな流れが加速器を使わない実験である。もともとは大統一理論検証のための実験装置であったが、測定技術を活用して、例えば、宇宙から飛来するニュートリノという素粒子の観測等も、重要なテーマのひとつとなっている。ニュートリノは物質との相互作用がきわめて小さいので、星間ダストなどの厚い物質を通り抜けて地球まで届き、光では見えない天体の観測を可能にするほか、光では得られない新しい情報を与えてくれる。

渡辺・谷森研は実験施設として、東京大学宇宙線研究所神岡地下観測

所を利用されている。この神岡地下実験所は、もともと大統一理論の予言「陽子崩壊」を観測するために建設された。素粒子間に働く力のうち重力以外の全ての力を統一するために提唱された大統一理論では、物質を作る陽子は自然に崩壊すると予言しているが、神岡実験では陽子が崩壊したときに生成される荷電粒子が水中を高速で走るときに発生する青白いチェレンコフ光という光を検出することによって陽子崩壊を観測しようとするのである。渡辺教授はその昔東大の助手であった頃、この実験の創始者、東大の小柴教授とこの

アイデアを練り、この実験を提唱したそうである。

この実験の結果、陽子崩壊自身は検出されず、陽子の寿命は約 $10^{32}$ 年以上という結果が得られた。宇宙の年齢が約 $1.5 \times 10^{10}$ 年というからとてつもなく長生きである。その後、この実験は装置を改良して、超新星爆発の際に放出されるニュートリノや、太陽から届くニュートリノの観測を行えるようになった。ニュートリノの観測により、光では観測不可能な星の中心部の直接的な研究が可能になり、またニュートリノ自体の性質も明らかになると期待されている。

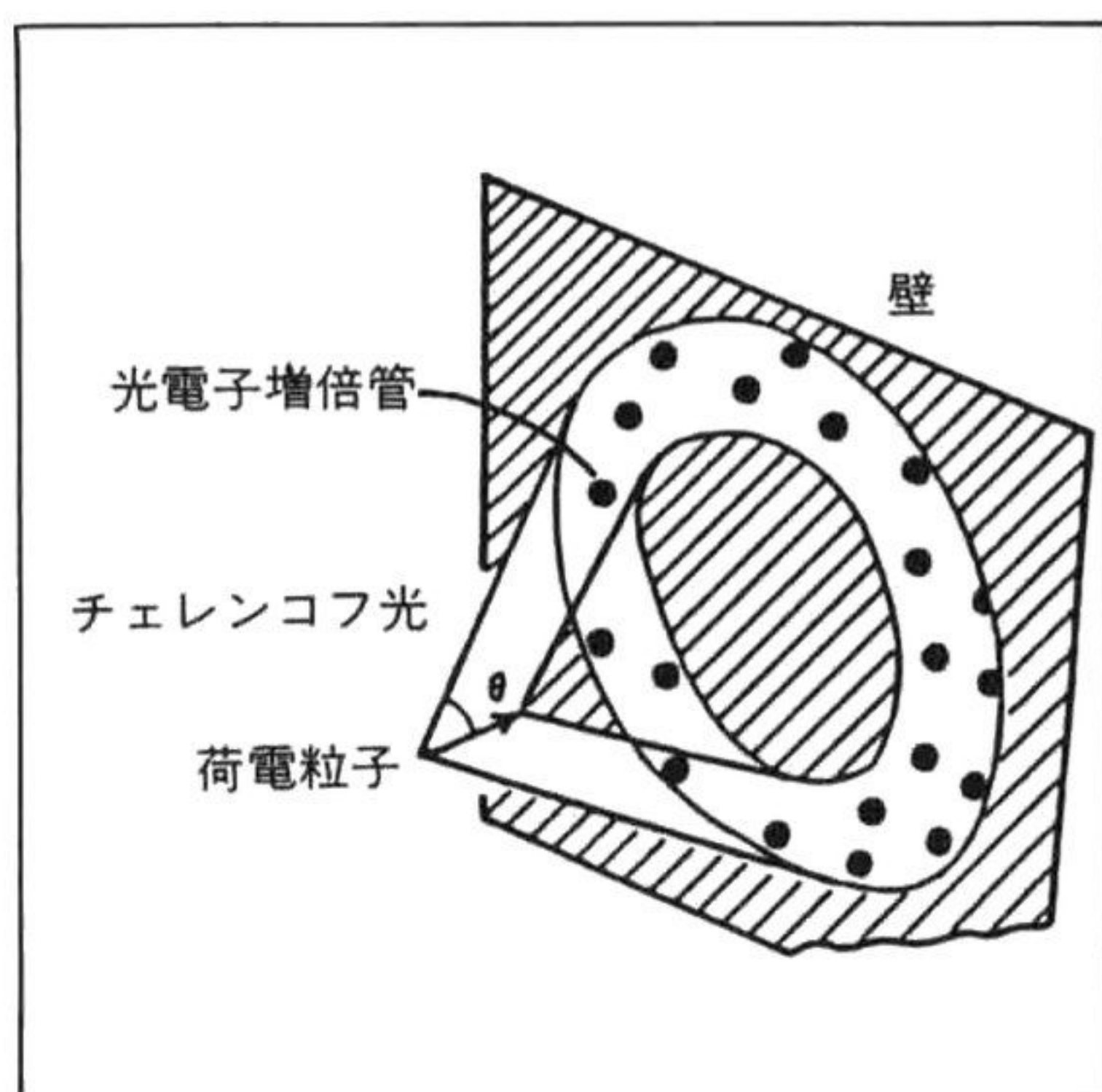


図4 水中のチェレンコフ光と壁にうつったチェレンコフ環

## チェレンコフ光が実験の基本原理

実験の基本原理である、チェレンコフ光についてももう少し説明を加える。特殊相対性理論によると、いかなる粒子も真空中の光の速度を超えることはできない。しかし屈折率が1より大きい媒質中では、光の伝播速度は真空中のそれに比べて屈折率分の1におちるため、この中では媒質中の光の速度より荷電粒子の速度が大きくなるということがあり得る

わけである。この時ちょうど超音波に対して音の衝撃波が発生するのと同様に、光の場合も光の衝撃波が生じる。これがチェレンコフ光と呼ばれるものである。

このチェレンコフ光は荷電粒子の速度のみに依存して発生し、その進行方向に一定の角度で円錐上に放出される。従って図4に見るように、チェレンコフ光が壁に当たるとドーナツ状の光の輪（チェレンコフ環）が現れる。



ナッツ状の光の輪ができるので、光の強さからは荷電粒子のエネルギーを、ドーナツの輪の形や光の到達時間からは荷電粒子の位置や進行方向を決定できる。この微弱なチェレンコフ光の輪を検出するため、測定器は大きな水槽の内面に多数の光電子増倍管（光センサー）を取り付けた構造になっている（図5）。この微弱な信号を、効率よく処理し精度良く測定するためのハイテクの粋を集めた高速電子回路を設計し、建設することなどは、谷森助教授が大きく

貢献してきたとのことである。

神岡地下実験所は岐阜県神岡鉱山の地下1000mの深さの所にあるのだがこれは、観測の邪魔になる宇宙線（バックグラウンド）を避けるためである。観測装置は直径15.6m、高さ16mの水槽に純水3000tを満たして高速荷電粒子が水中で発するチェレンコフ光を捕らえ観測する。このための水槽内壁の光電子増倍管（直径約50cm）は約1000個で1平方メートルにつき1個配置されている。

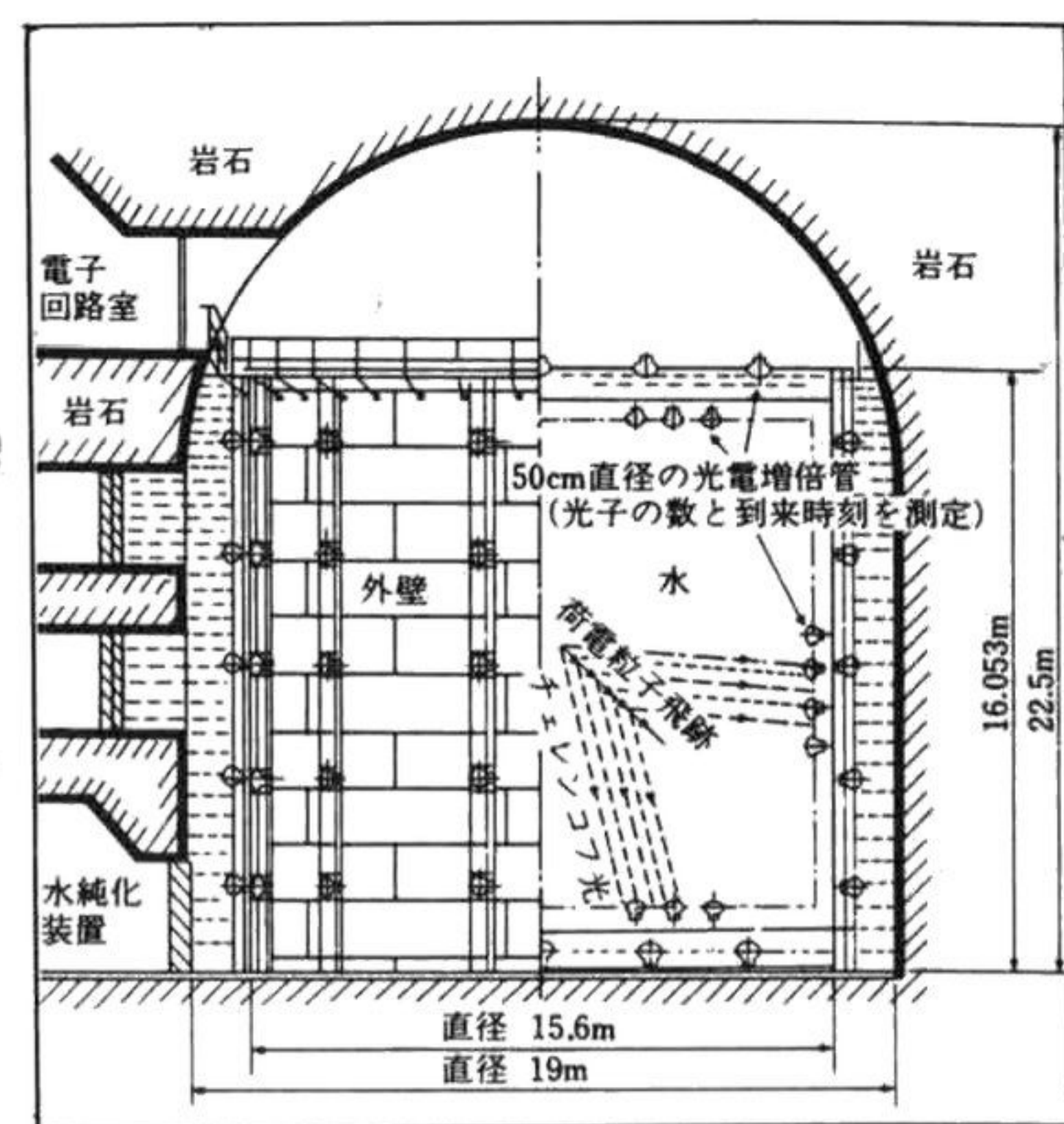


図5 神岡観測所の構造

## ニュートリノ検出——次はスーパー神岡計画

1987年2月23日、神岡実験所では約15万光年離れた大マゼラン星雲で発生した超新星爆発によるニュートリノを11事象検出した。これは世界で初めてのことでニュートリノ天文学の誕生を告げる画期的な出来事であった。この超新星爆発は、太陽の約20倍の質量をもった星によるもので、その際太陽が約45億年間に放出する全エネルギーの1000倍程度のエネルギーが約10秒間に大量のニュートリノとして放出されたことが確認された。さらに、この観測により、ニュートリノが質量を持つとすれば約20電子ボルト以下であることも明らかになった。そのほか太陽ニュートリ

ノの観測に成功し、20年来問題になっている「太陽ニュートリノパズル」（観測値が理論値の1/3～1/2しかない）が本当であること、季節変化はなさそうであることなど重要な事実を明らかにした。

以上のように世界をリードする神岡実験であるが、現在の規模では限界があるとされている。そこで、水チェレンコフの精密実験を日本の素粒子実験の一つの指針として推し進めてゆくためにも、感度にして約50倍、精度面では、現在の2倍の光を集める、5万トン大型水チェレンコフ観測装置を建設する「スーパー神岡」計画が進んでいる。「スーパー神

岡」はその感度と精度の向上からより低いエネルギーのニュートリノまで数多く検出することが可能になる。従って、例えば次の超新星爆発が我々の銀河の中心で起きたとすると、その時に記録されるニュートリノの事象例は約4000個にのぼり、超新星の方向も2度以内の精度でわかる計算になる。この他にも、「スーパー神岡」は宇宙大爆発のごく初期にできた重い新粒子を探す研究にも貢献するはずである。またこのスーパー神岡地下実験装置は現在建設が始まったところであり1996年に完成する予定である。この実験の開始は世界の研究者に待ち望まれている。

## アンテナをいっぱい張って

渡辺・谷森研では、素粒子実験として加速器を駆使したものと、加速器を使わない実験（例えば宇宙から来る素粒子の観測）とを2本柱として、研究機関のプロジェクトに参加することで幅広い角度からの研究を続けている。その傍ら粒子検出器の性能向上、新しい測定原理の追求、そして、小規模ながらチャレンジングな実験を推進して行きたいとのことであった。その小規模な実験の一つとして、富士五湖の一つ本栖湖に

天体ニュートリノを観測するための装置（小規模と言っても30m×30m×30m）を建設中とのことで、渡辺教授自身、研究室の学生と一緒に湖に行き、実験装置建設の土方仕事をなさっている最中だそうだ。渡辺教授にとって素粒子実験とは一つの知的身体的挑戦であり、又その実験は常にバックグラウンドとの戦いでもあるそうだ。「これからも、大型プロジェクトに参加して定常的な成果を挙げながら、アンテナを一杯に張り、

無い知恵を絞って面白い実験を考え出し、実験させて、自然の神秘に少しでも近づいて行くのに貢献したい。」と、湖で日焼けなされたお顔に楽しげな笑みを浮かべながら渡辺教授が熱っぽく語られたのが印象的であった。

（板生）