
素粒子の素粒子 “クォーク” をさぐる

1983年12月10日

東京大学教養学部において

西 川 哲 治

はじめに

物質が原子でできていることは、すでに18世紀にわかっていましたが、今世紀の初めに、電子が原子の中に存在することがわかり、そしてその電子は、元素のうちで一番軽い水素の原子よりも1,800分の1も質量が小さいマイナスの電気を持ったものであることがわかりました。したがって、原子はもともと atom という、ギリシャ語の τέμνω (切る) に否定詞 α をつけ、もうこれ以上細かくならぬものというところに語源があったわけですが、この原子も構造を持っていると考えられるようになりました。そして、その中心に核があって、その周りを電子が回っているという有

名な長岡・ラザフォード・ボーアの模型と呼ばれる原子模型が生まれたわけであります。

この原子模型は、量子力学を生み、新しい物理学の体系を生み、いろいろな意味で物理学に革命をもたらす原動力になりました。

原子の大きさは1億分の1cmほどであり、原子核はプラスの電荷を持ち、電子はマイナスの電荷を持っていて、その電気力で結合している。これはちょうど万有引力で太陽系ができているのと同じであると説明されてきました。

ところが1930年代になりますと、その原子核——これは原子の1万分の1以下の直径でありますから、1兆分の1cm程度の大きさ

であります——の構造がさらに研究の対象となり、原子核が陽子と中性子という2種類の粒子からできていて、それらを核力と呼ばれる力が結びつけているということがわかりました。核力は、電子を原子の中に結びつけている電気力とはまったく違った種類の、それまで知られていなかった力と考えられ、その力の本性を湯川先生は、陽子や中性子などのいわゆる核子が中間子という未知の粒子を互いに交換する力であるとして説明されました。物質の質量は大部分がこの原子核にあるのでありますから、原子核は基本的な物質構成要素であります。電子、陽子、中性子や湯川先生の中間子、それと光の量子である光子などは、基本的、要素的な粒子であるというのでそれらを湯川先生その他の方が「素粒子」と名付けられたわけであります。こうして素粒子物理学が誕生しました。

今世紀後半になりますと、さらに素粒子の構造が研究の対象となり、陽子とか中性子とかが詳しく調べられ、それがクォークという、もっと基本的な粒子からできていると、今日では考えられるに至ったのであります。クォーク模型が最初に出されたのは1963年でありましたが、1970年代からクォークの物理学が物

理学の主流を占めるようになってまいりました。

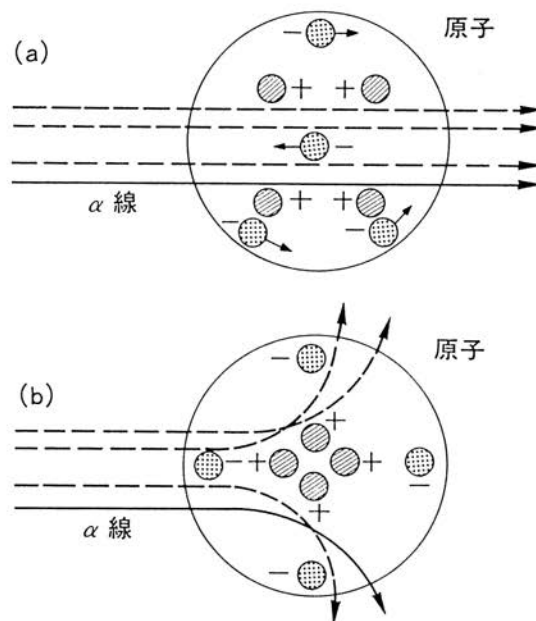
素粒子は10兆分の1cmぐらいの大きさであり、クォークはその中であって今のところはまだ点のようにみられています。そのクォークを結びつけて陽子とか中性子とかあるいは中間子をつくる力は、後でお話いたしますところの色の力、実は核力と本質的には同じであります。そういうものであると考えられています。それで1990年代に向かって、さらには21世紀に向かって、何が起こるかという、そのクォークが一体本当に最終的な粒子であるかどうかを含めて、クォーク物理学が最先端に立っており、電子からエレクトロニクスが生まれ、核力から原子力、核融合などが生まれたように、素粒子が新しくまた人類の文化にいろいろ貢献するものと考えられます。

加速器とは

それでは、そのような物質の奥の構造を探るにはどうするかと申しますと、これは皆さん高等学校の教科書にあって御存じのことと思いますが、最初にいわゆるトムソンの原子模型があり、長岡先生の原子模型が出て、果たしてどちらが正しいかというようなときに、決

め手として、何かを外から当てて、それが反応する仕方を見て内部を探るわけでありませう。そして、原子核のような小さなものになりますと、非常に大きなエネルギーで結びつけられていますのでそれ相応の高いエネルギーの粒子または光を当てなければならないわけです。それで原子に果たして核があるかどうかを知るためにラザフォードが自分の実験に使ったのは、天然の放射線のアルファ線でありました。図1で上のはいわゆるトムソンの模型と呼ばれるものであって、プラスの電荷が原子の大きさ一杯に広がっていて、マイナスの電荷の電子がその中を泳いでいる。果物に例えればイチゴのようなもので、そういうものに外からアルファ線を当てると、突き抜けるであろう。それに対して、もし中心に核があつて、果物に例えれば梅か桃のようなものであれば、当てられた放射線は曲げられて、散乱の様子から内部の構造がわかる。ラザフォードはこのようにして原子核の存在を確かめたわけでありませう。

1927年になりまして、英国王立協会の年会の講演でラザフォードは、このように天然の放射線を用いて物質の構造を調べたのに対して、非常に高い電圧を得ることができるよう



α線によって原子の構造を調べる。

図1 原子核の存在を確かめたラザフォードの実験の原理図

になり、また、よい真空が得られるようになってきた——それがその年の英国の王立協会の賞を受けたクリーリッジの研究であったわけではありますが——その研究にちなんで、これを使えば人工的に例えば電子とか陽子とかのような電荷を持った粒子を高いエネルギーにまで加速することができるであろう；そうすると、天然の放射線ではなくて人工の放射線をいくらでもつくることができるであろう；

それらを使って物質の構造を探れば、天然の放射線よりもっと高いエネルギーの粒子でもっと奥深いところまで探ることができるようになるであろう；その他のそういう新しい“加速器”の進歩によっていろいろな応用が可能になろう、というようなことを述べました。こうして初めて「(粒子)加速器」というアイデアが生まれたわけであります。人工的に粒子を加速するにはどうしたらよいか。ここに図2は重力によって物体を加速する場合の話であります、それをたとえに使うこ

とにします。まず、非常に高い直流電圧をつくることができれば、その電圧によって、例えばマイナスの電荷を持つ電子や、プラスの電荷をもつ陽子を加速することができる。これは、いわば崖から飛び降りるようなもので、一足飛びに加速する。これがコッククロフト・ウォルトンらラザフォードの弟子たちが最初に人工的に原子核を壊す実験に用いた加速器の原理であります。しかし、こういう高い電圧を一遍につくることは大変難しいことで、放電が起きたり、いろいろ厄介なことが

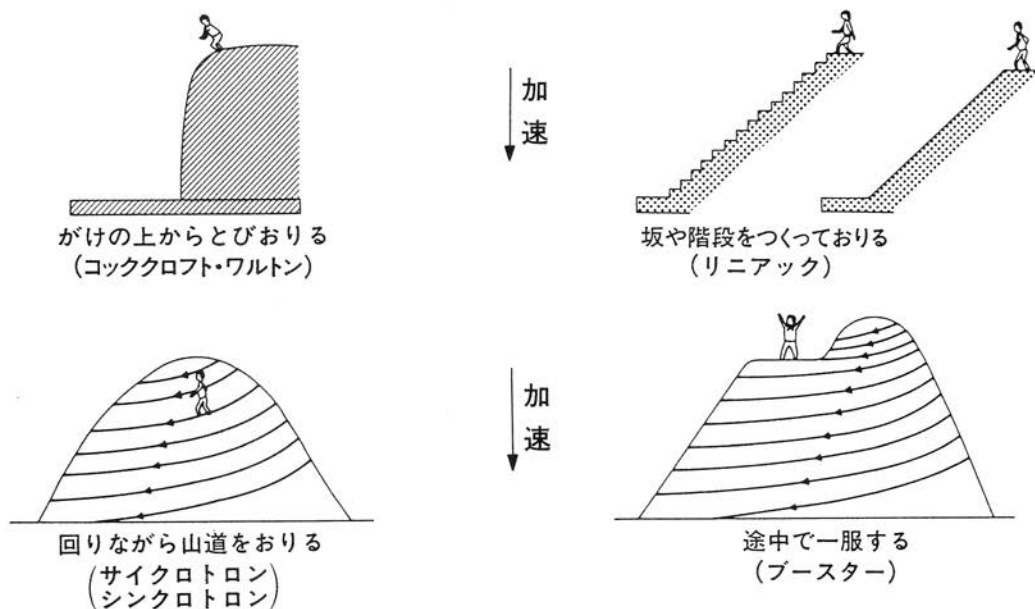


図2 各種の粒子加速器の原理を重力場での加速にたとえると……。

起こりますので、せいぜい1,000万電子ボルト程度——それでも天然の放射線よりは10倍ぐらい高いエネルギーですが——にとどまるわけであります。

それでは、一遍に加速できないならどうするか。それには坂道や階段をつくって、高い所から下に坂道を転がしてやるとか、階段をトントンと転がしてやる。そういう考えで、高周波の電場を使って、一回一回の加速はそんなに小さくなくても、それをうまく利用して粒子を加速するのが、リニアックあるいは線型加速器と呼ばれているもので、粒子をまっすぐに加速するものであります。

さらにそのころアメリカのカリフォルニア大学では、これに対して、磁場を併せて使う方法を考えました。リニアックの長所はまっすぐに加速するので、加速粒子の出し入れがやりやすいが、長い距離が必要であります。それに対して磁場をつくって使いますと、粒子はいわゆるローレンツ力を受けて回転軌道を描きます。ちょうどぐるぐる回りながら山道を下りてくのと一緒であります。これがサイクロトロンやシンクロトロンと呼ばれる、磁場を併用してぐるぐる回して加速するものでありまして、戦中から戦後にかけて急

速に進歩したものであります。そしてその変形したものもありまして、例えば一遍に加速することができなければ途中で一服するか、途中にためてやって2段階に加速する。ストレージ、蓄積をする。そしてもっと高いエネ

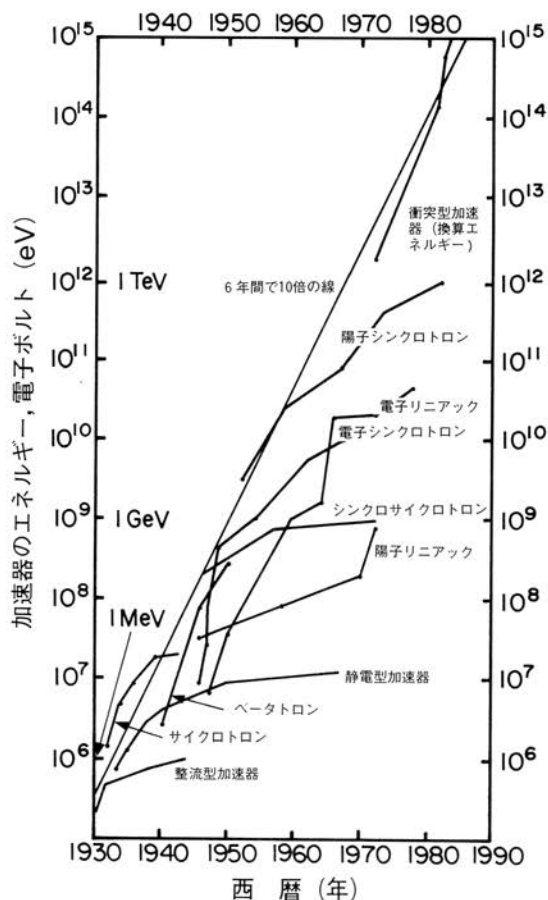


図3 種々の加速器の到達エネルギーと年代

ルギーまで加速する（ブースター方式）というようにいろいろなやり方が考えられるわけであります。そのような加速器の進歩のおかげで、物質を奥の奥まで探る研究ができるようになりました。

そこで、縦軸に加速器で到達できるエネルギーを電子ボルトの単位（1電子ボルトは電子を1ボルトで加速したときのエネルギー）でとり、横軸に年をとってみますと、人類が到達できるエネルギーが6年間に10倍ぐらいの線でどんどん上がってきたわけであります（図3）。

加速器の発展

最初はコッククロフト・ウォルトン型のよう
な整流型加速器で、次にサイクロトロンとかベータトロンというもの、さらにリニアックが進歩し、シンクロサイクロトロン、シンクロトロンなどが進歩し、今日では衝突型加速器というようなものでどんどん高いエネルギー、1兆電子ボルトを超えるようなエネルギーに到達できるようになってきております。

図4の写真はローレンスが1931年に——サイクロトロンのアイディアそのものはもう

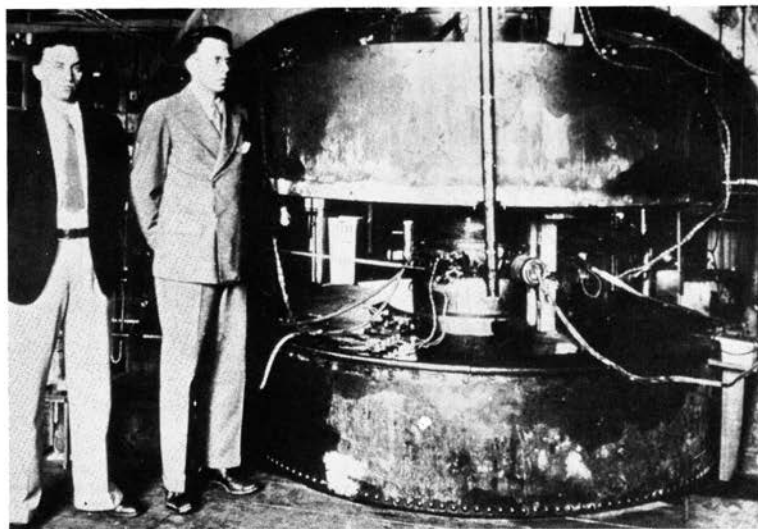


図4 1931年ローレンスらが最初に作った本格的サイクロトロン

よっと古いのですけれども——最初にカリフォルニア大学のバークレー分校——今日ではローレンス・バークレー研究所というのが出来ておりますが——でリビングストン(写真で左側, ローレンスは右側)と協力して作ったサイクロトロンであります。最初のもは直径60cm, 人間の身体ぐらいのものでありました。今から半世紀ほど前になります。

その年は、日本では理化学研究所の中に仁科研究室が出来た年で、昭和6年に当たります。仁科先生が外国から帰って来られて、日本でもサイクロトロンを作ろうというので始

められて、完成したのが昭和11年か12年ごろだったと思います(図5)。ほとんど同じ大きさのものでした。お気づきになった方もあろうかと思いますが、電磁石の格好が非常によく似ている。それには理由がありまして、実はこの電磁石は原ノ町に無線電信所がありまして、そこで無線の発信に使われていたパウルゼンアーク用の電磁石だったものです。それを仁科先生が長岡先生に相談して、貰って来られて利用された。その電磁石は実はアメリカから輸入したもので、それと同じ用途の同じ型のものが、カリフォルニアのパロアル

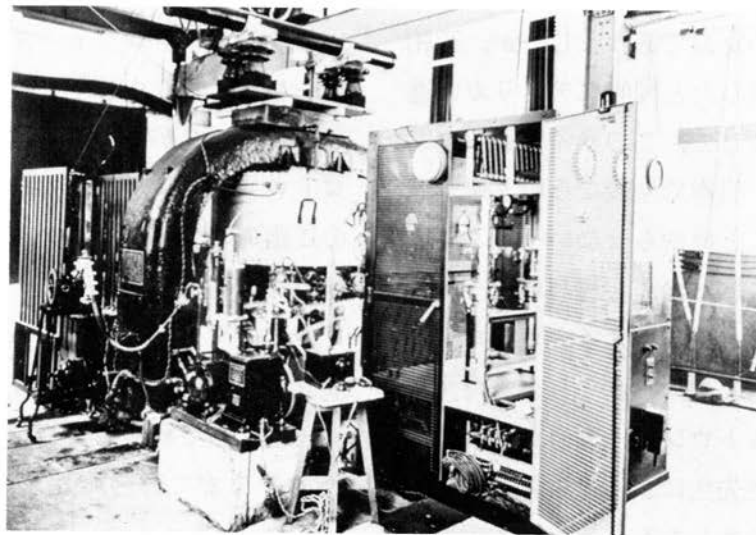


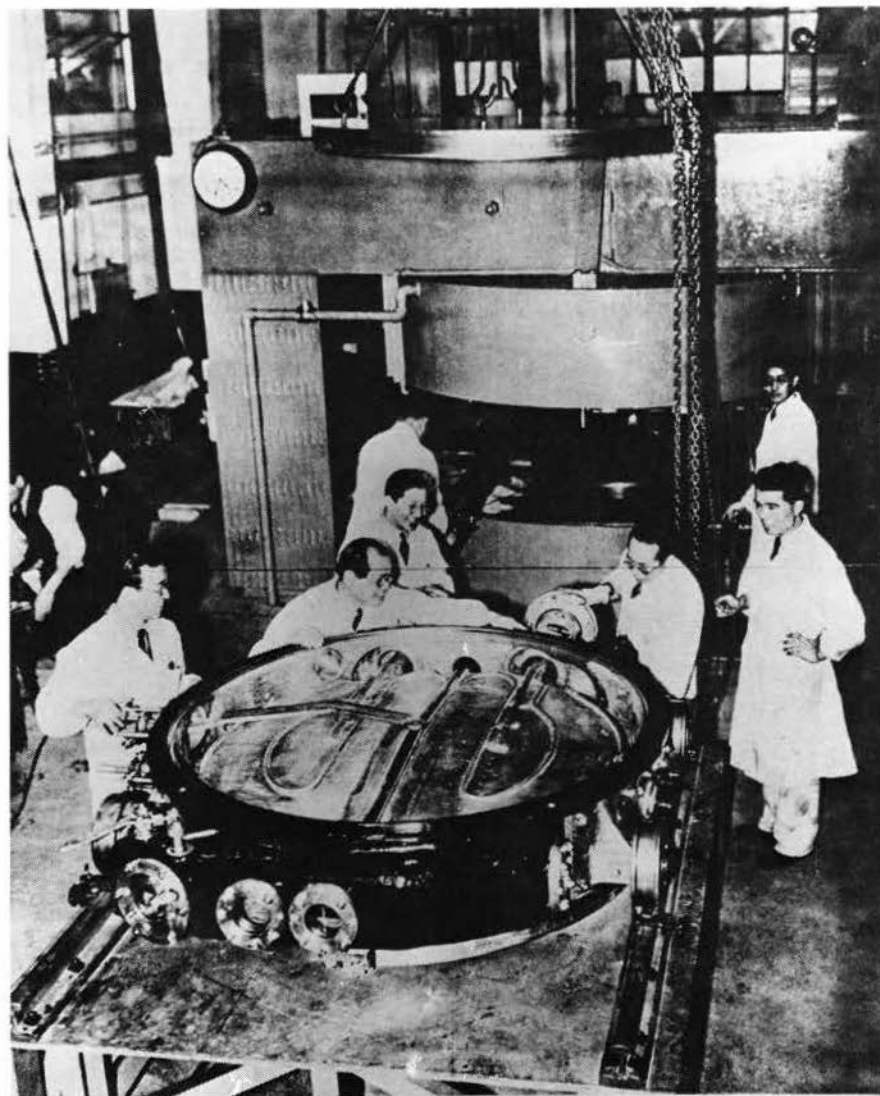
図5 理研仁科研究室で作られた日本最初のサイクロトロン

トにもあった。それをローレンスが使って最初のサイクロトロンを作ったものでありますから、いわば兄弟のようなものであったわけで、よく似た形をしています。

仁科先生はその後さらに約2倍の直径を持つサイクロトロンを作ることに着手されました。図6の写真の中央に写っておられるのが仁科先生であります。このサイクロトロンは、最終的には昭和18年ごろに完成したものではないかと思います。当時としては世界最高級のサイクロトロンで、最高のエネルギー2千万電子ボルトぐらいでありました。

その当時の日本は原子核の研究においても世界の最先端にいたのでありましたが、昭和20年、日本が敗戦したと同時にアメリカの進駐軍がやってきて、このサイクロトロンを破壊しました。日本で今後こういう原子核の研究のようなことはやらせない——これは原子兵器の研究に結びつくと思われた——ということになって、理研のサイクロトロンは破壊されて東京湾に沈められてしまった。同じようなサイクロトロンが、理研から大阪大学に行かれた菊池先生によって大阪大学で作られたものがありましたが、それは大阪湾に沈められてしまいました。その年は私どもが

大学に入った年でありまして、物理学科に入りましたが原子核の実験的研究は当分できないのだと言われた時代に大学を卒業いたしました。しかし講和条約が結ばれて、昭和30年になりまして菊池先生などのご発議により、何としても日本でも原子核の研究を再開できるようにしようというので、東京大学に原子核研究所という共同利用研究所をつくるのが菊池先生、熊谷先生などのご尽力で実現いたしました。朝永先生もその研究所の創設のためにお骨折りくださいました。東京大学原子核研究所ができるまでは、私などは東大では原子核の実験ではなくて物性の研究、いわゆるマイクロウェーブの分光学の研究などをやっておりました。そこで覚えた技術などを利用しながら日本で最初に作ったシンクロトロンの写真が図7であります。熊谷先生のご指導のもとに作ったもので、これは直径10mの、陽子ではなく電子のシンクロトロンで、サイクロトロンと違って電磁石をドーナツ型に並べることにより電磁石の重さをうんと軽くして経費を安くして作りました。これでどこまでいったかといいますと、10億eVというエネルギーまで電子を加速しました。これは昭和36年に完成しました。



世界一の原子核実験室 理研サイクロトロン（重総二百数十ト）の取り付け

図6 理研60インチサイクロトロン（昭和18年完成）

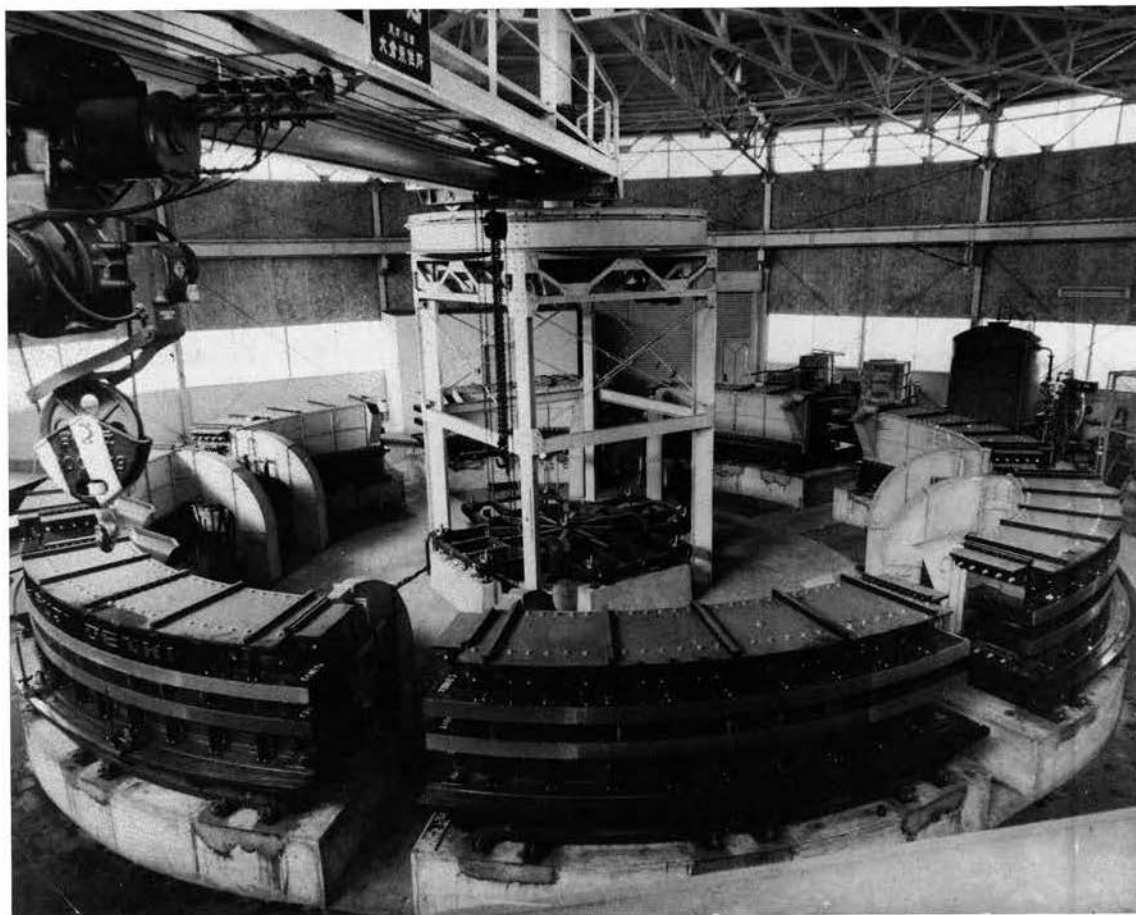


図7 昭和36年完成当時の東大原子核研究所の電子シンクロトロン

そこで湯川先生が理論的に予言された π 中間子を人工的に発生させて、原子核乾板で写しました(図8)。 π 中間子は寿命の1億分の1秒で崩壊して μ 粒子に壊れ、さらに100

万分の1秒で電子とニュートリノに壊れる。この写真は日本で初めて人工的に作った π 中間子の写真であります。湯川先生の予言されたものは、戦後まもなく宇宙線の中や外国

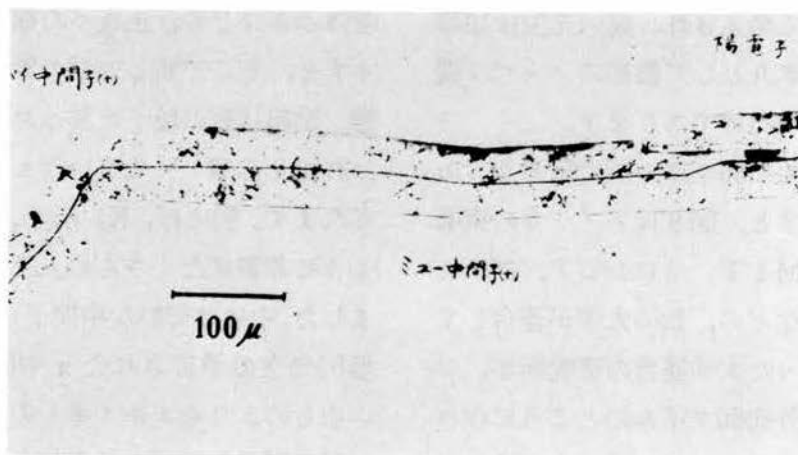


図8 核研電子シンクロトロンを用いて日本で初めて人工的に発生させた π 中間子とその崩壊の写真

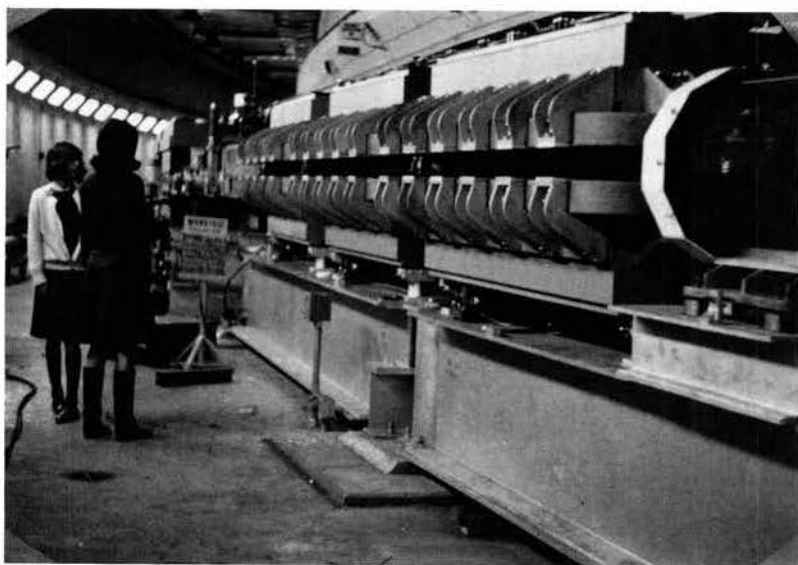


図9 米国ブルックヘブン国立研究所で昭和36年完成した 30 GeV 陽子シンクロトロン

の加速器によって発見され、湯川先生は1949年(昭和24年)日本人として最初のノーベル賞をお貰いになったわけであります。

そこで、その昭和36年に外国ではどうであったかといいますと、図9はアメリカの東部のハーバード、MIT、コロンビア、プリンストン、エールなどの、12の大学が連合して昭和22年につくった大学連合の研究所が、ニューヨークの郊外約60マイルのところに作った陽子のシンクロトロンで、陽子を加速して250~300億eVまで加速する、直径約300mのシンクロトロンで、すでにできていました。陽子の大型加速器はヨーロッパにもでき、ソ連にもできて、それらを用いて原子核の研究から素粒子の研究に移ってきました。これらの加速器の完成によりまして、素粒子というのは、湯川先生が予言された中間子や、中性子、陽子、電子、というようなよくわかった粒子だけでなく、実に多種多様な粒子が存在することがわかってきて、人工的に加速器で次々に作られた素粒子の総数は今日では150個を超えています。

素粒子物理の展開

こういうように、加速器を使った実験で、加速した陽子を実験室にある

液体水素などの、止まった標的に当ててやりますと、そこで新しい型の素粒子——共鳴状態、励起状態の粒子と言った方がよいのかもしれませんが——そういうものがたくさん作られます。例えば、 K , η , ρ , ω , ψ , というように非常にたくさんの人工中間子が作られました。中には奇妙な中間子と言われるもの、湯川先生の予言された π 中間子と呼ばれているものよりもエネルギーのやや高いところに K 中間子と呼ばれる奇妙な性質を持つ中間子の存在することもわかってきました。

こうして、素粒子は実に多種多様であることがわかりました。そして、素粒子の性質も次第に詳しくわかってまいりました(表1)。素粒子は大きさが10兆分の1cmくらいで、この大きさもアメリカのスタンフォード大学で作られた加速器で確かめられ、有限の大きさをもっている。大きさゼロの点ではない。重さは非常にバラエティーがあり、0から100億eVぐらいまでの素粒子が見つかっております。1eVは 10^{-33} g(グラム)に相当しますから100億eVといっても非常に小さいのですけれども、予想もできなかった多種多様なものがある。そして電荷は素電荷 1.6×10^{-19} クーロンの整数倍であります。寿命は大体 10^{-23}

表1 素粒子の基本的性質

1. 大 き さ	$\leq 10^{-13}$ cm
2. 質 量 [$E=mc^2$]	$0 \sim 10^{11}$ 電子ボルト (eV) $1 \text{ eV} \longleftrightarrow 1.78 \times 10^{-33}$ グラム
3. 電 荷	$\pm ne$ (n : 整数) $e = 1.60 \times 10^{-19}$ クーロン
4. 寿 命	$\leq 10^{-23}$ 秒
5. 種 類	レプトン: 電子, μ 粒子, ニュートリノ, …… (軽粒子) ハ ド ン $\left\{ \begin{array}{l} \text{バリオン: 陽子, 中性子, 超核子, ……} \\ \text{(重粒子)} \\ \text{メ ソ ン: } \pi \text{ 中間子, K 中間子, } \rho \text{ 中間子, ……} \\ \text{(中間子)} \end{array} \right.$ ゲージ粒子: 光子, グルオン, 重力子, ウィーク・ボゾン, ……

秒よりも長いもので、それより短いと見つけにくいのかもしれません。 10^{-23} 秒というのは大体素粒子の大きさを光の速度で通過する時間です。そして、150種以上ある素粒子も、それらの個々の性質によって分類されるようになりました。まず、大きく分けてレプトンとハドロンに分類されます。レプトン中には、電子とか π 中間子が壊れてできる μ 粒子、さらに、ニュートリノという質量はほとんどゼロ、電荷もゼロだがスピンという自転の要素をもつ粒子が属します。ハドロンと呼ばれるものは、陽子や中間子のような核子のほかに、超核子、特に「奇妙さ」と呼ばれる西島・ゲル

マンが導入した性質をもつ粒子を含むバリオンと称するものと、湯川先生の予言された中間子に対して奇妙な中間子である K 中間子なども含むメソン(広義の中間子)とに大別されます。メソンとバリオンとがまとめてハドロンと呼ばれております。このハドロンには種類が多く、百何十種もあるわけですが、そのほかにゲージ粒子というものがあります。

レプトンとかバリオンとかは自転の角運動量(スピン)が $1/2$ とか $3/2$ とか整数プラス $1/2$ の値をとりますが、メソンとゲージ粒子ではその値が $0, 1, 2, \dots$ というような整数であります。ゲージ粒子は主として力の粒子、

例えば電子とか原子に電気力が働くときに交換される光子，それから重力の量子である重力子，それと最近新粒子発見で新聞をにぎわしたウィークボゾンなどに分類されます。ところで，数が一番多いハドロンについて，縦に質量をとり，横に電荷をとりますときれいなスペクトルが得られます(図10)。 π ， K ， η ， ρ ， K^* などの中間子や核子の仲間である中性子，陽子，核子の励起状態である N^* ，奇妙な核子 Λ ， Σ ， Ξ ， Ω 粒子，そういうようなものがある種の規則性をもって現れてくる。縦軸は質量であります，質量に光速の二乗をかけるとアインシュタインの関係によってエネルギーになります。一方，粒子は波の性質を持っています。振動数 ν にプランクの定数 h をかけるとエネルギーになる。したがってこういう質量のスペクトルをとることは，光の場合に振動数のスペクトルをとるということに対応しています。そこでこのような周期的なきれいな形をとったスペクトルが得られるということは，ちょうど原子が内部に構造を持っていていろいろなスペクトルを現すのと同様に，素粒子が内部に構造を持っていて，このようなスペクトルを現すのではあるまいかと考えられたわけです。また，原子に

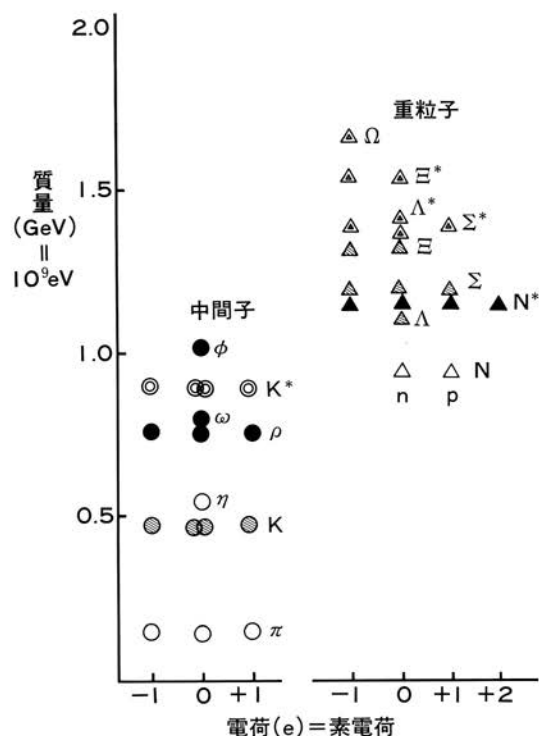


図10 主な素粒子(ハドロン)の質量スペクトル

周期律があるのと同様に，素粒子にも周期律があることがわかってきました。非常にたくさんの素粒子が現れたとき，一時は，素粒子の世界は混沌の世界である，物理学は原子物理学で終わった，素粒子になったらメチャクチャで，複雑怪奇で手におえない，と言われたこともありました。しかし，素粒子の性質を加速器でよく調べて分類していきますと，

それぞれの素粒子の持っている性質について、原子の周期律表のようなものが作られ、きれいに分類が体系づけられることがわかってきたのです(表2)。原子の場合の周期律表で族に対応するものは、例えば核子族N(陽子とか中性子が属する族)であるとか、 Λ 粒子族、 Σ 粒子族、 Ξ 粒子族、 Ω 粒子族、また、核子の励起状態に相当するような Δ 粒子族が、第1周期、第2周期、第3周期、第4周期、第5周期、第6周期というふうに周期的に現れてくる。この表に書かれたものは質量でありまして、高い周期のものほど重くなってくる。そうして素粒子の分類が非常にきれいにできるということがわかってまいりました。

表2 素粒子(バリオン)の周期律表の一例
(核子族, 質量MeV)

族 周期	N	Λ	Σ	Ξ	Ω	Δ
1	939	1,115	1,193	1,317	1,672	1,232
2	1,535	1,405	1,670	1,820		1,620
3	1,520	1,520	1,750	2,030 ?		1,700
4	1,680	1,820	1,915			1,905
5	2,190	2,100				2,200 ?
6	2,220					2,300 ?

そうなりますと、ちょうど原子に周期律があるのは、原子核が陽子と中性子の組み合わせの数、その周りを回る電子の数の違いによって、アルカリ金属ができたり、アルカリ土金属ができたりするのと同じように、N族、 Λ 族、 Σ 族などができたりするのは、素粒子が内部構造を持つからではないかということが、すでにお話したいろいろなことと関連して、考えられるようになってきたわけでありませう。

クォークの模型

そこで、図10のスペクトルのようなものを見ると、素粒子は分類によって、非常にきれいに三角形の対称性をもつことがおわかりになると思います。図11で、横軸に電荷をとり、縦軸に超電荷といって先ほどから申しておる奇妙さというものを超電荷という量にかきかえて分類してみますと、正六角形に核子族、 Λ 族、 Σ 、 Ξ 族が分類されることがわかってきました。同じような六角形は中間子でも作ることができます。例えば、図12は中間子で作ったもので、同じように π 中間子、 η 中間子、奇妙さをもつK中間子、こういうようなものが電荷と超電荷で正六角形を形づくっています。あるいは、正六角形ではありませんが、

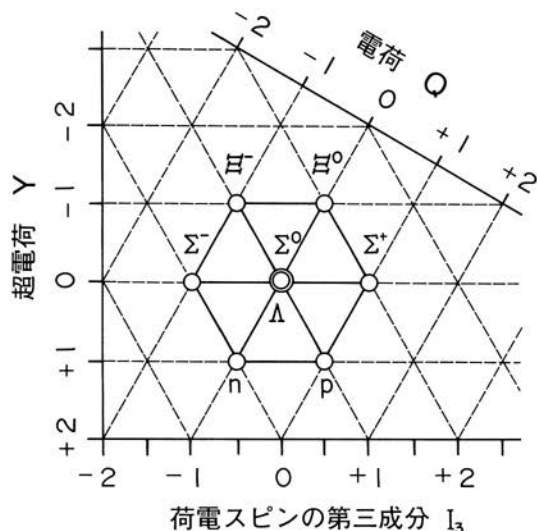


図11 クォーク模型のもととなった核子の仲間の分類

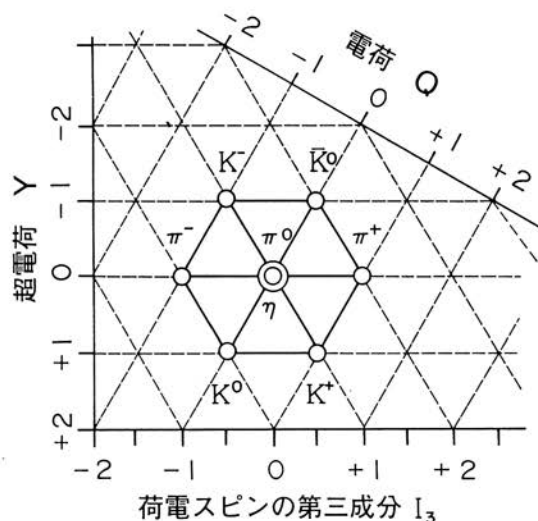


図12 図11に対応する中間子の分類

正三角形の各頂点におかれて分類される、先ほど Δ と書いた N^* , Σ 粒子の励起状態で Y^* などというようなものの分類もわかってまいりました(図13)。

そこで、素粒子がもっと基本の粒子からできているとするならば、このような図表でそれぞれの三角形の重心にある三つの基本粒子があって、それらのもののいろいろな結合によって、例えば正六角形とか正三角形とかの頂点にある現実に我々が観測している素粒子ができていいるのではあるまいかという考えが

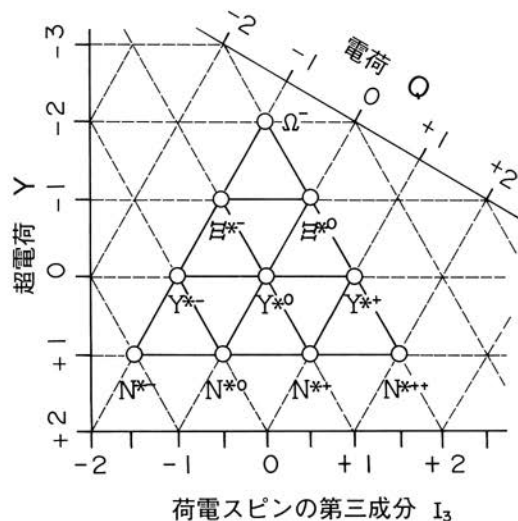


図13 図11,12と同じ方法によるスピン 3/2 のバリオンの分類

出てきました。これが1963年ごろでアメリカではゲルマンが、ヨーロッパではツヴィイクが、ほとんど独立に同じような考えを出しました。こういう素粒子を作っている基本粒子であると考えられるものをゲルマンはクォークと名付けました。ゲルマンはなぜクォークと名付けたかと申しますと、それには次のような由来があります。ワグナーの楽劇の第一作にトリスタンとイゾルデという、ヨーロッパに古くから伝わる叙事詩からとった楽劇があります。トリスタンとイゾルデの悲恋の物語りですが、それにちなんで英国の有名な小説家であるジェームス・ジョイスの作ったソネットの中でトリスタンをたたえる、こういう一節があります。アイルランドの美しい王妃イゾルデが、マルケ大王に嫁ぐとき、その護衛の騎士としてトリスタンが選ばれ、一緒に暗い波止場から船出しようとするとき、不思議な鳥が、クォーク、クォーク、クォークと3回啼いたというのです。これを3種類の不思議な粒子に付ける名にふさわしいとしてゲルマンはクォークという名を選んだのでした。

クォークというものは、たいへん奇妙なものであります。なぜかと言いますと、いわゆ

る素電荷 e に対して $-1/3 e$ という電荷をとるもの、 $+2/3 e$ という電荷を持つものがあるということになります。さきに、素粒子の電荷はすべて素電荷 e の整数倍であると申しましたが、クォークがあるとすると、半ばな電荷を持つ粒子が存在しなければならないということになります。そういう半ばな電荷を持つものが自然界に存在して、それが結びついて多種多様な素粒子ができていくということになります。

宇宙線を用いた クォーク探し

それでは、本当にクォークと呼ばれるような素粒子が自然界に存在するものだろうか。当然実験物理学者たちはすぐ探し始めました。まず、当時存在する最高エネルギーの加速器、さきに述べたブルックヘブン国立研究所のシンクロトロンなどで探そうと行われましたが見つかりませんでした。また、今までに見つけられていない粒子を探するとき、よく使われるのは宇宙線であって、例えば、陽電子や湯川先生の間接子も初めは宇宙線の中で見つかりました。宇宙線の中に半ばな電荷を持った粒子が存在しないだろうかということをブルックヘブン国立研究所で、実は先ほど示したシンクロトロンの一

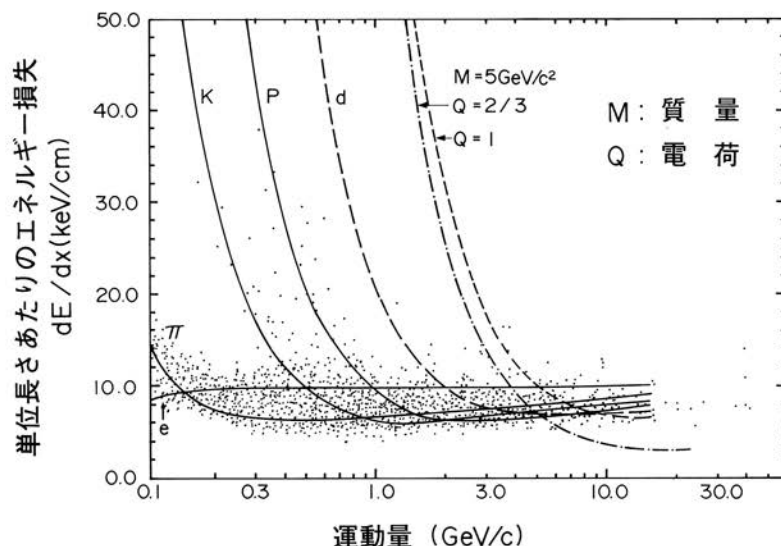


図14 荷電粒子の物質との相互作用による単位長さ当たりのエネルギー損失の粒子エネルギーとの関係

つ前の代のコスモトロンというのをシャットダウンして、その片隅で、早速クォーク探しを始めました。どうやって半ばな電荷の粒子を宇宙線の中で探すかという、こういう原理を使います。縦軸に物質中を粒子が通る時の単位長さ当たりの物質との相互作用で失うエネルギー損失をとり、例えば電子、K中間子、陽子、重陽子について、それぞれ曲線を描きますと、エネルギーが低いところでは、運動量が増すに従って単位長さあたりのエネルギー損失は減りますが、あるところに来る

と——光の速度近くになると——エネルギー損失はほぼ一定値になります(図14)。電荷の二乗に比例するある一定値に近くなります。もしクォークのような電荷 $1/3 e$ の粒子があればこの値が $1/9$ のエネルギー損失となり、もしそれが $2/3 e$ という電荷を持っていると $4/9$ のエネルギー損失になる。したがって、もし $2/3 e$ という粒子が宇宙線中に存在するとすれば、それは物質中を通るときに失うエネルギーが電荷 e の粒子の失うエネルギーの $4/9$ 、つまりほぼ半分ぐらいになる。そこでこ

うというような粒子はないかと探せばよい。この図ではある実験で得られた結果の点をたくさん示してありますが、御覧のようにそういうものの存在を見つけるのはたいへん難しいのです。

実際にどうやって探すかという、例えば、プラスチックシンチレーターと呼ばれるものの中を電荷を持つ粒子が通ると蛍光を発する。その蛍光の量が普通の電子や μ 粒子の通過によって起こる蛍光の $4/9$ になるかどうか、出てくる光の量を上の方につけた光電増倍管を使って、電気信号に変えて調べようというのです。

図15はブルックヘブン研究所の実験装置で、私は1964年から1966年までブルックヘブンに招かれていたのですが、その帰る直前の状況で、ブルックヘブンとエール大学の人たちが主となってやった実験で、日本へ帰る少し前に組み立てが終わって実験を始めました。そして、宇宙線の中に半ばな電荷を持った粒子が見つかったらしいといううわさが研究所内に飛び、実際にそれらしいデータを見してきました。しかし、そこで考えたのですが、どうも宇宙線の実験というのは、相当にジックリ構えてよく丁寧に実験しないといけな



図15 ブルックヘブンで最初に行われた宇宙線中のクォークを探す実験装置

い。天然に降ってくる宇宙線の量は非常に少ないので、統計誤差のために間違った結果を出すことがしばしばある。もっと精度のよい実験をやらねばいけないのではないかと思います。そこで東大に帰ってから大学院の優秀な学生さんたちと一緒に本本当に宇宙線中のクォークの存在を積極的に調べようということで、東大理学部物理教室の図書室の横にある天井の高い、将来書庫にする予定だがまだ使っていない部屋を借りました。そこにシンチレーターを12段重ねて並べ、それぞれのシンチレーターを $1/3 e$ のクォークが通ったときは $1/9$ のパルス、 $2/3 e$ のクォークが通ったときは $4/9$ のパルス、というよ

うな光のパルスが同時に12段のシンチレータで観測されるはずと考えて、そのような高さ2m ぐらいのブルックヘブンの2 倍の大きさの装置を作って実験を始めました。一番上には放電箱(Streamer Chamber)をつけ、通った粒子のトラック(飛跡)も見ようと考えたわけであります。(図16, 図17)。この装置

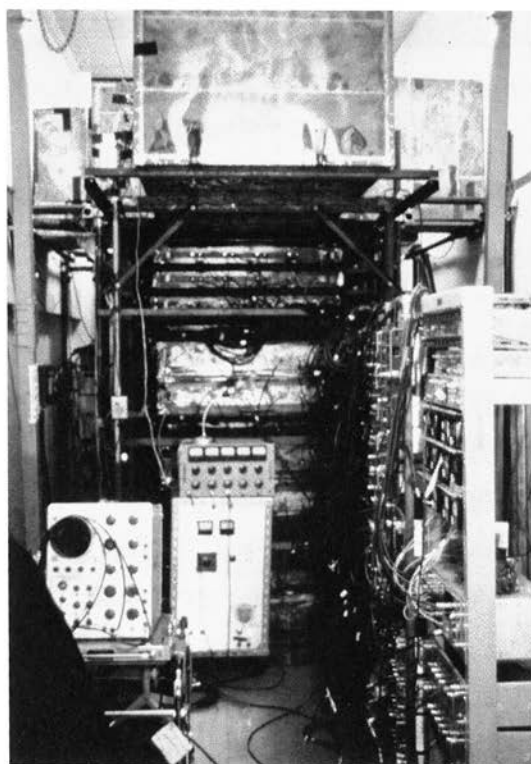
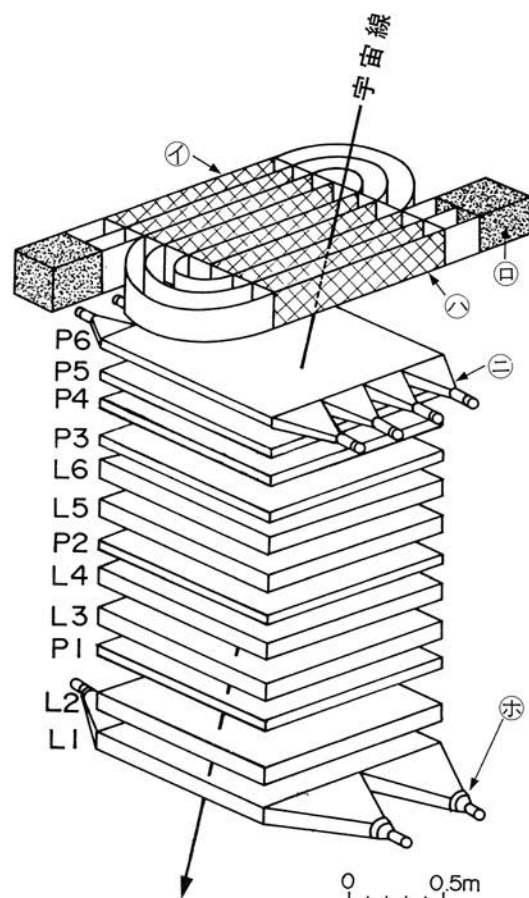


図16 東大理学部で行った宇宙線中のクォークを探す実験装置



① ストリーマー放電箱, ㊦ マルクス高圧電源, ㊤ メッシュ電極, ㊥ 2 インチ光電子増倍管 (各プラスチックシンチレータに 8 個), ㊦ 5 インチ光電子増倍管 (各液体シンチレータに 4 個)

図17 図16の写真の装置の説明図

を、例えば μ 粒子が通ると、12のシンチレーターできれいに揃ったほとんど同じ高さのパルスがコインシデンスして同時に観測されます。12のうち、六つは液体、六つはプラスチックのシンチレーターを使いました。そして、この場合のパルスの $1/9$ か $4/9$ ぐらいの高さのパルスがこれと同じように揃った形でとれるかどうか、宇宙線の中にクォークがあるかどうかの決め手になるわけです。

もちろん、受け入れるパルスの高さにはある幅を持たせておいて、12段全部を通して、しかも大体 $4/9 \pm 20\%$ または $1/9 \pm 30\%$ に入るものをとりました。ときどき粒子が12段全部通るという現象が現れるのですが、しかし先ほどの μ 粒子とは違って、パルスの形がそれぞれのシンチレーターによってバラバラであり、放電箱で見ますと何本か変なトラックがあることがわかりました(図18)。これは1個の粒子が一遍に12のシンチレーターを通ったのではなく、何個かの粒子なり、シャワーが来て、それがたまたまクォークのような信号を与えた、そしてその原因はおそらくバックグラウンドの γ 線であろうと考えたわけでありまして。もう少し詳しい話をしますと、この実験では、一番上にあるプラスチックカ

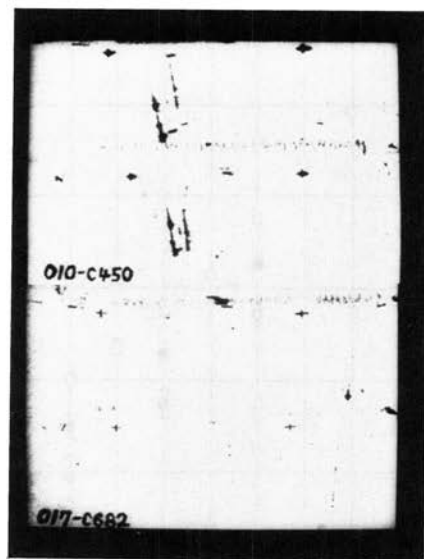
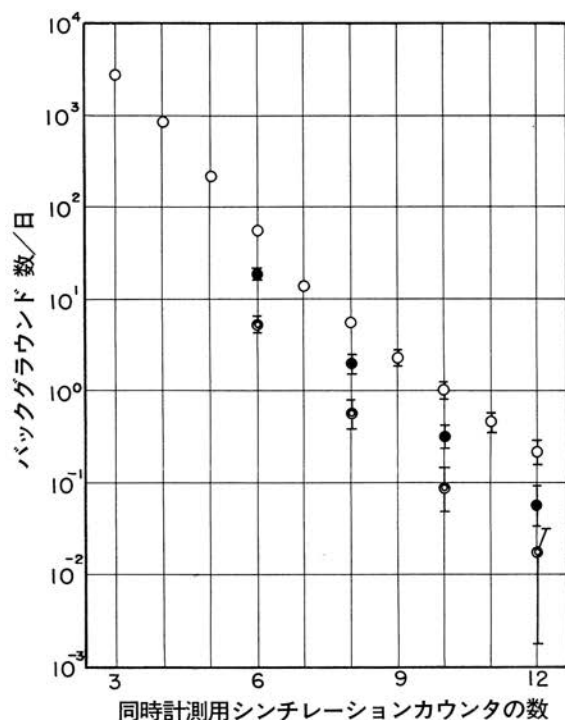


図18 図16,17の装置の放電箱にうつったクォークらしいバックグラウンド粒子の飛跡

ウンターと一番下にあるプラスチックカウンターから来たそれぞれの信号の時間差(走行時間)も調べました。

実験の結果は図19, 図20のようであります。これは半年ぐらいやった測定ですが、クォークらしい粒子(バックグラウンド)が現れる頻度を縦軸にとり、横軸にシンチレーターの台数をとってみました。するとシンチレーターの台数を増やすほど、クォークらしい粒子の数が減ってきます。黒丸が $2/3$, 白丸が $1/3$ のクォークらしい現象の頻度を示しています。



○与えられた数以上のシンチレーションカウンタのパルス高がクォーク状現象の条件を満たしたバックグラウンド数

●同時にストリーマ放電箱に荷電粒子のトラックが観測された場合 (○の30~36%)

◎ストリーマ放電箱のトラックから1個の荷電粒子が全カウンタを通過したと判断される場合 (○の8~10%)

図19 クォークらしいバックグラウンドの観測される頻度と積み重ねたシンチレーターの数の関係

また、第1のシンチレーターを通った時刻と最後のシンチレーターを通った時刻との測定

された時間差は、 μ 粒子が通った場合はきれいな統計分布を示しますが、クォークらしいと思われた25の場合、まったくバラバラになります。なかには、時間的に逆になっている場合もあります。そして時間の二乗の分布をとってみると、 μ 粒子の場合とはまったく分布の仕方が違う。そこでクォークは宇宙線の中には見つからないという結論を出した。そのころ、ブルックヘブンの実験も精度が上って、我々と同じような結論になりました。

ところが、我々の実験が終わって論文を出したところ、オーストラリアのマックスカーという人が論文を発表しました。それは泡箱の写真解析でした。よく知られている霧箱という荷電粒子を見つける時に用いられるものでは、過飽和の状態の気体の中を荷電粒子が通ると霧ができるので粒子のトラック(飛跡)を見ることができます。磁場をかけて曲がり具合から粒子の性質を調べるのです。泡箱というのは液体を過熱状態で詰めておいた容器を膨張させると泡ができる。その泡が荷電粒子が通った道筋に現れるわけです。マックスカーの考えは、我々がやったような実験ではクォークは見つからないであろう。なぜなら、クォークは非常に重いので宇宙線の大き

飛行時間による判定

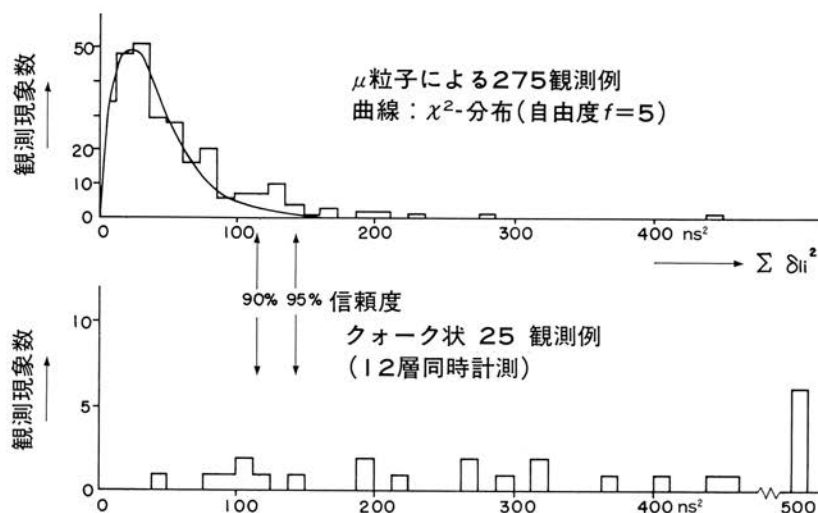
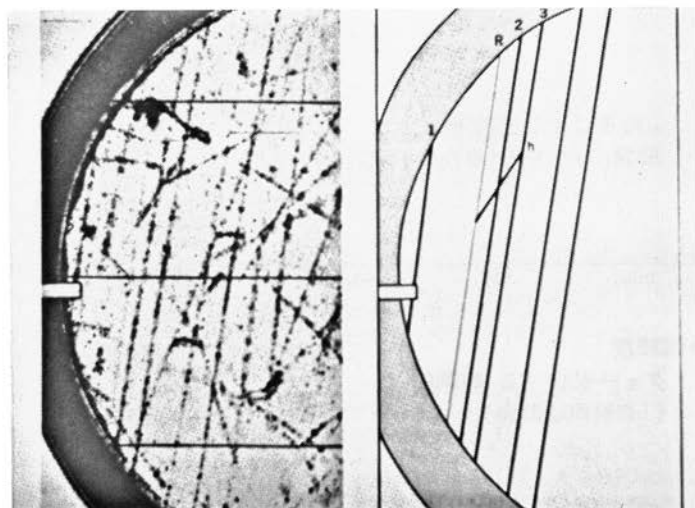


図20 クォークらしいバックグラウンドを起こす粒子の走行時間の分布と μ 粒子が通ったときの走行時間分布の比較

なシャワーのコア（芯）の中にしか存在しないであろう。こういうものが来れば我々の装置では観測できない。そこで泡箱を使ってシャワーのコアの写真を調べてみました。そうしますと、図21の右手の方に、いかにも $2/3 e$ のものらしいトラックがある、という発表があります。これを見て我々は、それならどうしたらよいかと考えました。そして今までは、上下にシンチレーターを並べて実験していたが、今度は水平に並べて、地表に沿って飛んで来る宇宙線を見るようにしました。地表に

平行に飛んで来る宇宙線の中の重い粒子は、空気中をやって来る間にどんどん電荷の二乗に比例してエネルギーを失ってしまう。ところがクォークは $2/3 e$ か $1/3 e$ の電荷を持っているので、その二乗は $4/9 e^2$ か $1/9 e^2$ なので、エネルギーをあまり失わない。したがってシャワーの中の普通の粒子はほとんどが吸収されてしまつてクォークだけが生き残つてやって来るのではあるまいか——そう考えてシンチレーターを水平に並べて実験してみました(図22)。水平に飛んで来る宇宙線の中に



← 図21 泡箱を用いて観測されたシャワーのコア中心のクォークらしい飛跡

↓ 図22 水平方向から来る宇宙線中にクォークらしい現象を探した実験装置

クォークがあるのではないかというのを調べた我々の実験は、どうしてもマッカスカーの実験が正しいと考えられるようにはなりませんでした。東京大学だけでなく、大阪市立大学の方々も実験され、ことに山の頂上で実験されましたが、この実験でも否定的な結果しか得られませんでした。我々の実験が今までのところ宇宙線中のクォーク探しの実験では、クォークの存在し得るリミットの値が一番小さいし、ほかの研究も、全部否定的な結果を示しています。そして、今日ではマッカスカーのデータを信用している人は誰もいないであろうと思われます。表3 a, b には宇宙線中にクォークを探した実験とその結果をま

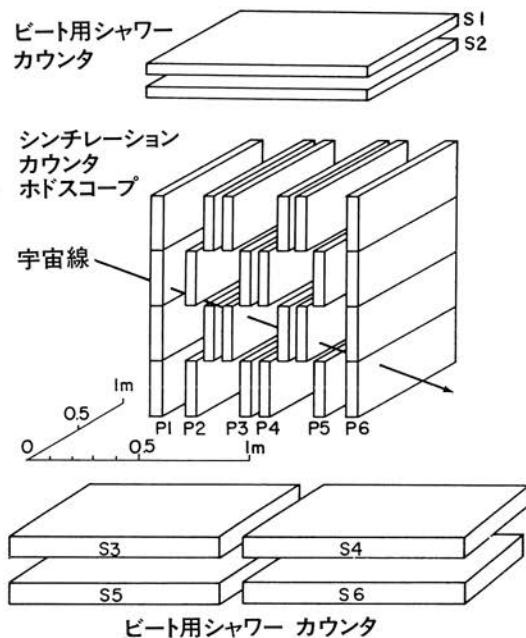


表3 宇宙線中にクォークを探した実験。bは特にシャワーに注目した実験

a. 宇宙線中のクォーク束の上限 (各種の実験結果)

実験グループ	年	海 抜	クォーク束 (上限値) ($\geq 90\%$ 信頼度) [$\phi \times 10^{-10} (\text{cm}^2 \cdot \text{sterad sec})^{-1}$]		
			$\pm e/3$	$\pm 2e/3$	$\pm 4e/3$
Yale-BNL	1967	海 面		20	
	1968	海 面		1.2	1.3
Tokyo	1969	海 面	0.5	7.5	
Osaka	1968	海 面	1.3		
	1971	5,500m	0.57		
Arizona	1972	2,750m	0.83	0.96	4.1
Case	1972	海 面		2.2	
London	1967	-6,000m		1.4	
M. I. T	1968	-300m	0.66	0.88	

b. 空気シャワー中または (および) 大天頂角に対して探した宇宙線中のクォーク探し

研究グループ	年	検 出 器 (天 頂 角)	クォーク束 (90%信頼度) [$\phi \times 10^{-10} (\text{cm}^2 \cdot \text{sterad sec})^{-1}$]	
			$\pm e/3$	$\pm 2e/3$
Sydney	1969	1.2m 霧箱		2.4
Tokyo	1974	シンチレーター・ホドスコープ ($45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)	< 2.3	
Livermore	1974	11×44cm 霧箱	< 0.8	< 0.2
Durham	1975	ネオン・フラッシュチューブ・ホドスコープ	< 0.80	
SLAC	1982	シンチレーター・ホドスコープ ($45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)	< 8.5 ($0.6 \leq \beta \leq 1.0$)	< 7.6 ($0.1 \leq \beta \leq 1.0$)
			< 7.3 ($0.1 \leq \beta \leq 0.6$)	

とめてあります。

加速器によるク ォーク探し

次に加速器による実験について述べます。ブルックヘブンの300m 陽子シンクロトロンに次いでソ連のモスクワ郊外

のセルプコフには直径700m の陽子シンクロトロンがつくられましたが、これでも見つかりませんでした。

さらに図23は1972年に完成したアメリカのシカゴ郊外 40 マイルにあるフェルミ国立加



図23 米国フェルミ加速器研究所の直径 2 km の陽子シンクロトロン

速器研究所の直径 2 km の加速器で、現在 4,000 億 eV まで陽子を加速、最近では超伝導電磁石を使って 7,500 億 eV まで加速していますが、これによっても見つかっていません。ジュネーブに西欧12カ国が共同出資してつくったヨーロッパ合同原子核研究所(CERN)という研究所があり、最近新聞をにぎわした統一理論の予言した新粒子(ウィークボゾン)を発見した加速器があります。これは初め直径 2.2 km の陽子シンクロトロンでしたが、これを改造して陽子と反陽子を逆向きに回す方法に成功し、新粒子を見つけたのですが、その前に単体のクォーク探しもやったがやはり見つかりませんでした。ちょっと話が横道にそれますが、図24の記念切手は CERN に1976年に直径 2.2 km の陽子加速器が完成したときにフランス政府が発行したものです。CERN が一番最初に作ったのは、上の方の大きい円で、右下の小さい円がブルックヘブンの加速器とほぼ同じ大きさ(ちょっと小さい)のシンクロトロンです。その次に直径 2.2 km のものを作った。CERN は初めブルックヘブンよりちょっと小さかったため損をしたというので、今度はアメリカのものより10%大きいリングを作りました。これを作るには



図24 ヨーロッパ合同原子核研究所 (CERN) の直径 2.2 km 陽子シンクロトロンが完成した記念に発行された記念切手

スイスの国内では敷地が得られないというので、フランスが特別にこの加速器のために土地を提供した。そこでこの加速器が完成した時に、フランス政府が記念切手を出したわけです。

以上述べたことをまとめて図にしますと、図25のようです。

ここでは宇宙線にクォークが来ている可能性を調べた実験やいろいろな加速器で調べた結果を、横軸にクォークの質量をとり、生成の有効断面積を cm^2 で表したりミットを縦軸にとったグラフです。いろいろな実験で探しても見つからないので、クォークの生成す

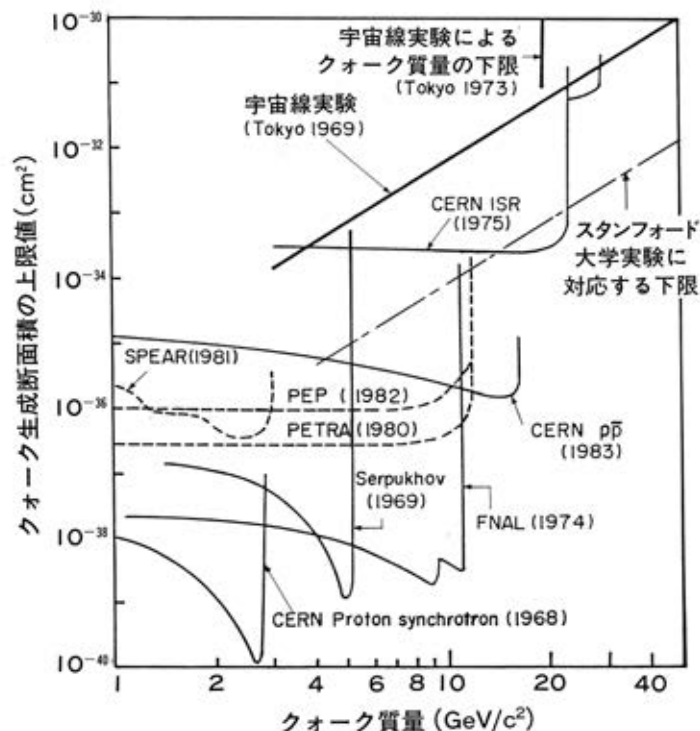


図25 宇宙線や加速器による実験から与えられた単体クォークの生成断面積の上限とクォークの質量との関係

る確率はこのグラフのいろいろな曲線のどれよりも下であると考えられます。

私どもの研究所、高エネルギー物理学研究所ができたのは、1971年アメリカのフェルミ研究所ができたのと同じ年でありますが、1976年に日本で最初の陽子シンクロトロンが完成しました。これは直径 108 m です。この日本の加速器ではクォーク探しはやらなかったのですが、それはエネルギー的にすでに外

国で調べが済んでいたからであります。

しかし、我々はまたこれを用いて、クォークのいろいろな結合状態について今日でも研究を続けています。

今までクォークは三つで、陽子、中性子ができる；クォークと反クォークで中間子ができる、と考えられてきましたが、それに対してクォークが四つ、五つ、六つとかで結合した状態が存在するのではないかというので、

そのようなものを探す実験などが行われています。

物質中のクォーク探し

あります。

皆さんはおそらく高等学校の教科書で見られたに違いないミリカンの油滴の実験というものがあります。ミリカンは油のしずくに電荷を与えて、電圧を加え、電場と重力が働いて

ところで、宇宙線と加速器を用いるほかにも、クォークを探す可能性が

落下したり上昇したりするのを測って、電荷が素電荷の整数倍の変化を示すことを示しました。その論文の中でミリカンはたった一つ、こういうことを書いています。“実は自分はこの実験をやっている間にただ一例だけであるが、実際の素電荷より30%ほど電荷が小さいと思われる粒子を見た。ただし、これは繰り返して確かめることはできなかった。何かの間違いであると思ってこの論文に載せる結果からは除いた” こういうことをある論文に書

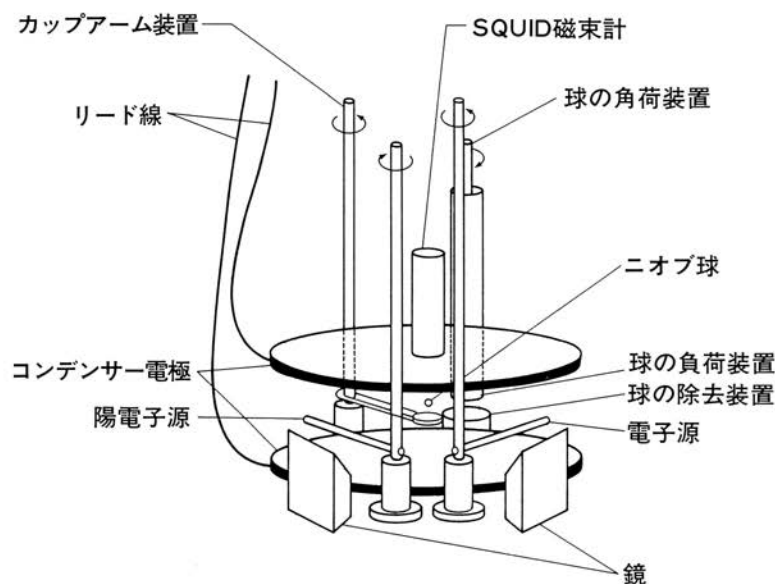


図26 スタンフォード大のフェアバンクのグループが作った超伝導磁気浮上を用いて、物質（ニオブ）中の半ばな電荷を探した実験

いています。仮にミリカンが見たのがクォークだとしますと、ミリカンの見た量は $10^{-7}g$ という非常にわずかな量であるので、その中にそれほど半ばな電荷があるとすると、加速器や宇宙線の中で見つからなかったのはおかしいという気がします。

しかし、また、ミリカンより精度のよい同じような実験をやってみれば、本当にクォークが見つかるかもしれない。図26はスタンフォード大学のフェアバンクがやった実験で超伝導で磁場をつくり、ちょうど磁気浮上列車と同じような考えで、下の方が磁場が強くなるようにしておきます。そこに超伝導体のニオブの球をいわゆるマイスナー効果をつくって浮かすのです。そして、これに振動する電場を加えられるように電極が置かれています。電荷を与えるためには、電子とか陽電子とかの線源(β 線源)を用います。磁気浮上したニオブ球が、振動する電場によって電氣的に振動する振幅から、ニオブ球の持つ電荷を調べるわけです。こういう実験は非常に細かい注意がいるものですが、それをやって、何回か実験を繰り返しました。20近くの球を使いましたが、ほとんどがもとは荷電ゼロのところにあります。しかし、3, 6, 9, 13番とい

う球が、電荷の中和をやろうとしても、どうしてもゼロにはならず、 $1/3 e$ のところにでくる(図27)。こういう実験データを発表しました。これが今回までに唯一の、もしかすると半ばな電荷 $1/3 e$ の存在を本当に見つけたのかもしれないと言われている実験であります。

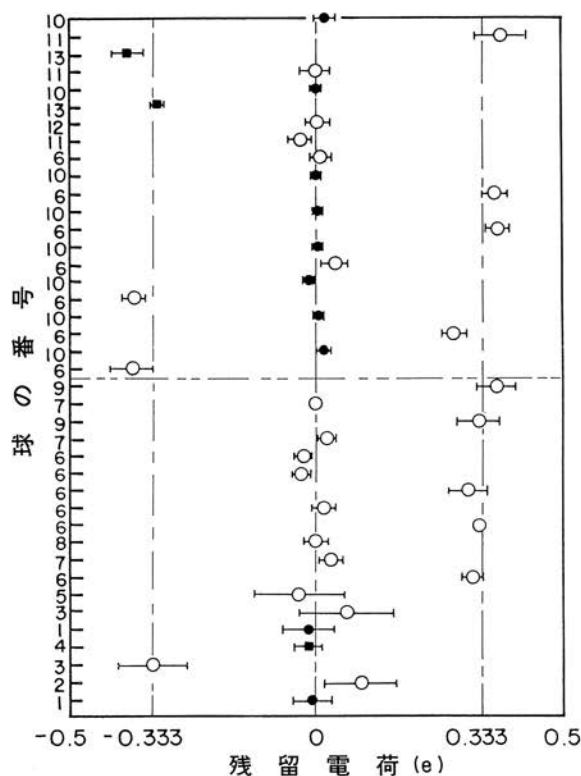


図27 図26の実験装置を用いて探した半ばな電荷の実験結果

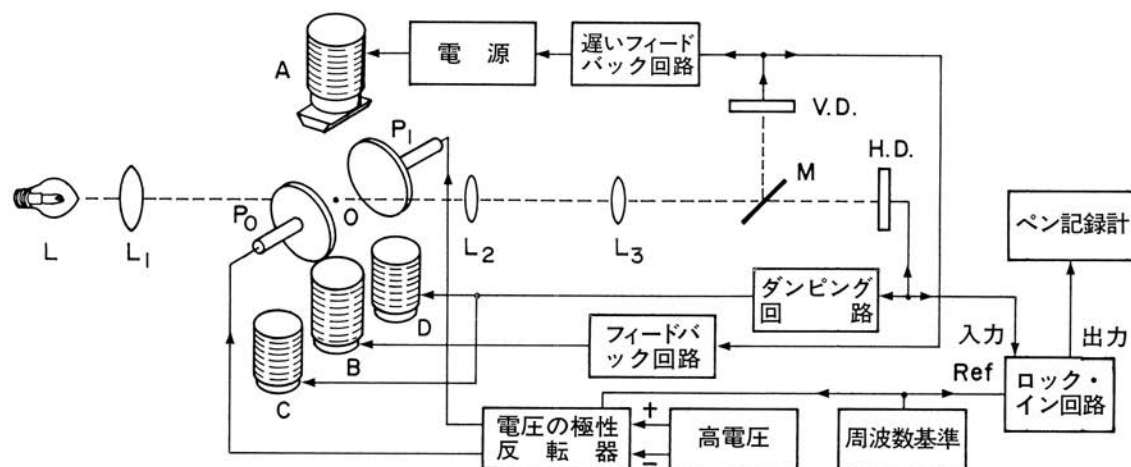


図28 ゼノアのグループが強磁性磁気浮上を用いて、物質中の半ばな電荷を探した実験

同じような実験は実は鉄の球について、超伝導ではなくて、強磁性を用いて電磁石で磁気浮上させてやったものがあります。イタリアのゼノアのグループの人たちがやった実験です。しかしこの実験ではクォークらしいものは見つかりませんでした(図28)。この実験ではもっと統計精度の高い結果を出していますが見つからなかった。ただ、この実験とさきに述べた実験とは違う点があります。この実験では電場と磁場が垂直であり、さきに述べた実験では電場と磁場が平行です。垂直であると、電場を振動させるとき、振動電場のために鉄の球が磁気モーメントを持ち、

それが磁場の勾配のためにドリフト運動をする、そのための誤差が邪魔をしたという説もあります。これは1981～2年のころの段階で、この二つのグループは盛んに議論を交わしていますが、最近では新たに磁場と電場とを平行にして本当にそういうものがあるだろうかという研究をやっているグループが、ほかにサンフランシスコやヴァージニア等にもあります。いずれにしても、いわゆるミリカンの実験あるいは磁気浮上の実験でどのくらいのことをやっているかと申しますと、今日ここに一つだけ頑張っているのはスタンフォードの実験グループで、これによると核子当た

表4 物質中にクォークを探した種々の実験の例とその結果。
a はミリカンタイプの実験, b はそれ以外の方法。

a. 安定物質中のクォーク探し (ミリカンの方法, 浮上実験)

研究グループ	年	方 法	物 質	クォーク数/核子
Millikan	1910	ミリカン	水	$<10^{-13}$
Michigan	1969	超伝導浮上	Nb	$<10^{-19}$
Genova	1970	反磁性浮上	グラファイト	$<5 \times 10^{-19}$
San Francisco	1980	ミリカン	Hg (自然)	$<2.8 \times 10^{-20}$
Stanford	1981	超伝導浮上	Nb	$<2.1 \times 10^{-20}$
Genova	1981	強磁性浮上	鉄	$<1.3 \times 10^{-21}$
Virginia	1983	動的磁気浮上	鉄	$<6.9 \times 10^{-21}$
San Francisco	1983	ミリカン	水	$<9.8 \times 10^{-20}$

b. 安定物質中のクォーク探し (浮上法以外の実験)

研究グループ	年	方 法	物 質	クォーク数/核子
Argonne	1966	質量分析器, 電気計	隕 石	$<10^{-17}$
			海 水	$<5 \times 10^{-27}$
Michigan	1968	光学分光計	海水等	$<10^{-18}$
Illinois	1969	電子鏡, 固体検出器	岩石等	$\leq 10^{-24}$
Argonne	1976	電子増倍器	月の土	$<2 \times 10^{-22}$
Argonne	1978	ヒーター, 加速器, シリコン検出器	Nb, W, Fe	$<10^{-22}$
Rochester	1978	バンデグラーフ, 質量分析器	W	$<5 \times 10^{-15}$
Ohio	1979	バンデグラーフ, 質量分析器	He	$<6.4 \times 10^{-16}$

り 10^{20} 個に1個の程度ということになります。また、それよりも小さいというゼノアや

ヴァージニア, サンフランシスコの実験データがあり、今のところどうともいえません。

もしかするとスタンフォードでは本当に見つけたのかもしれませんが、他にもいろいろの方法の実験があり、結局それらは、どれもこれも、半ばな電荷を見つけてはいません。(表 4 a, b)。

なぜクォークは
単体で見つから
ないか (QCD)

素粒子、特にハドロン
がクォークから成っていることは、素粒子に関する他の実験とは非常によ

く合うので、そこでクォークは実際存在するのだろうということは今日では疑いもないことですが、しかし単体としては決して外に出て来ないという実験事実、それが実はクォークの間に働く力の性質なのだという考え方がそのうちに出てきました。これが QCD: Quantum Chromodynamics というものがあります。量子電気力学 QED: Quantum Electrodynamics に対して QCD といいま

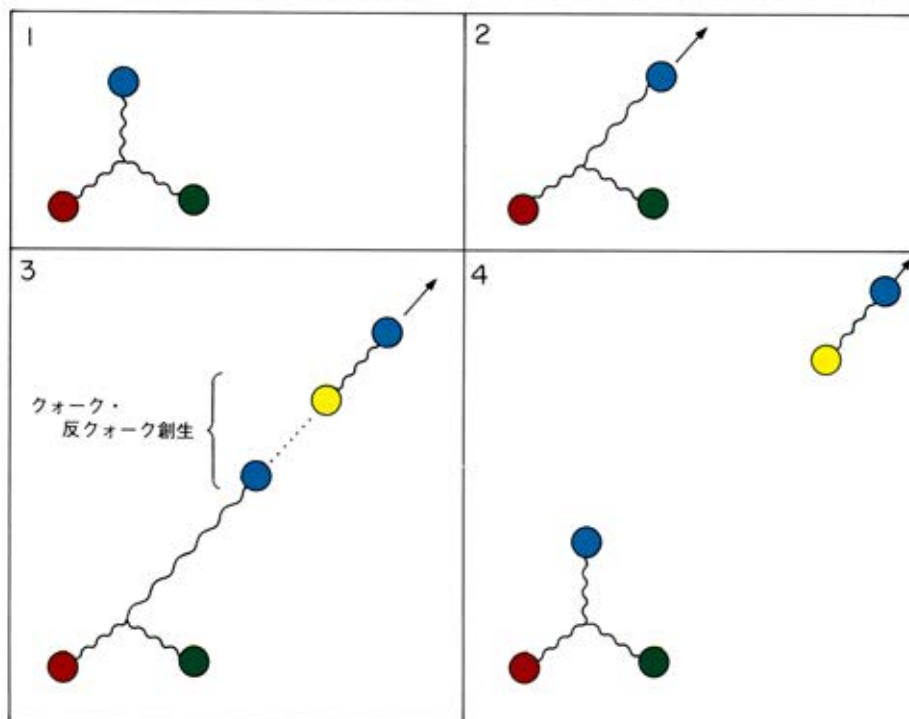


図29 クォーク間に働く色の力と QCD の考え方

す。

なぜかと言うとまず、例えば陽子はクォーク三つからできています。このことは、電荷なら＋と－と2種類あって結びついている、磁石ならS極とN極が対になっているのに対して、いわば三原色が打ち消し合って白色になるように、クォークは三つの色をもっていると考えられています。そして、赤、緑、青これが三原色ですが、それがいつも中和して、白色を与えるようになっているために、単体のクォークは見つからないのではないか。このようなクォークの間に働く力は色の力と呼ばれ、例えば陽子の中のクォークを引き離そうとすると、紐が伸びるように引っ張られる。その紐が切れるときには、中間子が飛び出す。ところが中間子はクォークと反クォークの対からできている。そこでちょうど磁石を切るとN極とS極が現れるように、取り出そうとしたクォークの色と反色を持つクォークが現れて、それが中間子を作る。中間子は青のクォークならその反色黄のクォーク、赤のクォークならその反色空色のような色のクォーク、緑なら反色バラ色のものと結びついて作られているわけで、中間子が一つの核子から離れて他の核子に移る場合を考え

ると、それは中間子を交換して核子と核子が結びつくという湯川先生の理論に相当することになる。結局、色の力というものをそのように考えることで、素粒子はクォークからできているし、クォークは単体では取り出せないと説明されるのです(図29)。

また、自然界には四つの力があります。それらの力の場合は、重力の場合なら重力子、電磁相互作用なら光子、強い相互作用なら中間子を場の量子としています。このように強い相互作用に対応するものは、中間子であるが、色の力という意味で言えば、グルオンというクォークの間の色の力を媒介する粒子があって、例えば色を白色化させるように働いていると考えられるわけです。

以上がQCDの考えで、これが最近では非常にうまく理論的に体系づけられてきて、QCDによって予言されるいろいろな計算が例えば中間子の質量スペクトルをみごとに説明したり、素粒子の世界に起こっている反応や現象によく一致する説明を与えることができることがわかってきました。

クォークは3種類か (小林・益川理論と実験)

ところがここでもう一つ問題が起こりました。今までクォークは3種類あるといい、3種類のクォークが三つの色をもっているというように、3という数字がよくでてきたのですが、実はクォークの種類は3種だけではない。3種類と思っていたのはエネルギーが10億電子ボルト(1 GeV)ぐらいまでは正しいが、もっと高いエネルギーのところでは、別のクォーク

が作っていると思われる中間子があることがわかったのです。これは J/ψ 粒子と呼ばれています。先ほど述べたブルックヘブンの加速器がまず見つけた粒子で、スタンフォードでもほとんど同時に見つけました。それからもう少しエネルギーの高い方へいくとウプシロンと呼ばれている中間子があります。今年仁科賞を貰われた山内泰二さんらのグループがフェルミ研究所の2 kmの加速器を使って10 GeV ぐらいのところに見出した5番

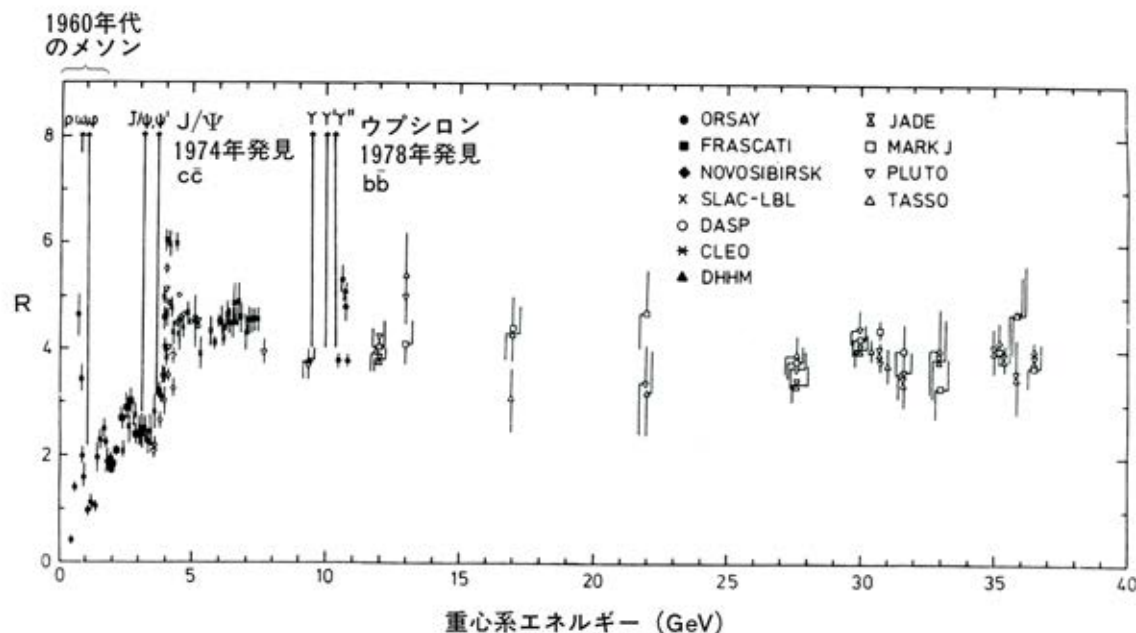


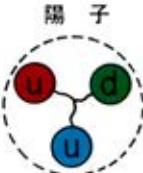
図30 加速器の実験で見つかった中間子のピークとその重心系エネルギー (質量)



図31 5番目のクォークと反クォークから成ると考えられるウブシロン粒子を発見したフェルミ研究所の実験装置

目のクォークで結びついた中間子と考えられています。私たちの研究所の小林誠 助教授などは、さらにもっと先にもう一つあるのではないかと理論的に予言していますが、今のところはまだはっきり見つかってはいません(図30)。図31は山内さんらのグループのや

られた実験の写真です。この実験は、フェルミ研究所の直径2 kmの陽子のビームを外に取り出して、それをペリリウムにぶつけ、そこから発生する μ 粒子の対(μ_+ と μ_- のペア)をとらえて、その質量の和をとってスペクトルをとる。すると、ウプシロンの粒子の崩

クォークの種類			ハドロン
香	t. トップ top	   $+\frac{2}{3}$	
	b. ボトム bottom	   $-\frac{1}{3}$	
	c. チャーム charm	   $+\frac{2}{3}$	
	s. ストレンジ strange	   $-\frac{1}{3}$	
	d. ダウン down	   $-\frac{1}{3}$	
	u. アップ up	   $+\frac{2}{3}$	
色			

クォークの種類とハドロン
(トップのみ未発見)

図32 小林・益川理論が予言する6種類のクォーク。それぞれ3色の色荷を持つ。

壊に相当するピークが出てきた。これはフェルミ研究所の所長レーダーマンが、リーダーとなってやった実験ですが、山内さんはその中で実質的な指導をされたのです。

クォークは初めは三つと考えられました。アップ(up)は $+2/3$ の電荷をもつ。これが陽子に相当するようなもの。 $-1/3$ が二つある。ダウン(down)とストレンジ(strange)。ダウンは中性子に相当し、ストレンジは奇妙な粒子を作るもの。この三つがゲルマンのクォークと呼ばれたものです。次にチャーム(charm)、ボトム(bottom)による中間子が見つかった。チャームによる J/ψ は1974年、ボトムによるウプシロンは1978年です。すでに述べたように、我が国の私どもの研究所の小林誠助教授と京大基研の益川教授が立てた小林・益川の理論というのがあって、それが今日のクォークの標準的な理論と言われています。それによると五つということはないはずで六つなければならない。それをチャーム、ボトムに対してトップ(top)と名付けられています。トップクォークが本当にあるかどうかそこで、次の問題になるわけでありす(図32)。

クォークには「色」が3色あって、種類は6

種類、アップ、ダウン、ストレンジ、チャーム、ボトム、トップとあるというのですが、このような種類の方は「香り」(flavour)と名付けられ、香りが六つ、色が3色、そして陽子は(uud)、 π 中間子は(u $\bar{d}$)というようにできているというわけですが、果たしてトップがあるだろうかということは今日また別の意味でのクォーク探しの問題になっています。

衝突型加速器の 進歩

これはどうしても加速器のエネルギーをもっと上げてみないとわかりません。ところがエネルギーを上げるには、今までの方法でやっているは大変能率が悪くなります。というのはアインシュタインの相対性原理によると、粒子はどんなに加速しても、光の速度より速くはならないからです。その代わり、質量がものすごく重くなるので、その粒子を止まっている粒子に当てるということは、たとえて言えば、ものすごいスピードで走ってきたダンプカーが高速道路に止まっている石ころをはね飛ばすのと同じで、確かに石ころは飛ばされるが、ダンプカーはほとんどショックを受けず、運動エネルギーは全体のごく一部しか減らない。加速器の場合で言えば、加速されたエネルギーはごく一部し

か反応に使われずに、そのまま飛んでいってしまっ、ほとんど無駄使いになってしまいます。

それではどうしたらよいかというと、例えば二つのリングを作ってそれぞれのリングを何回か互いに交差するようにしておく。片方を右回り、もう一方を左回り、ほとんど光速のスピードで粒子を走らせてやります。そして、ほとんど光速度に近い、非常に重い粒子

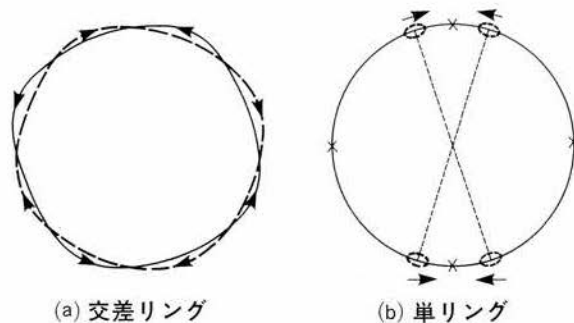


図33 衝突型加速器の原理図

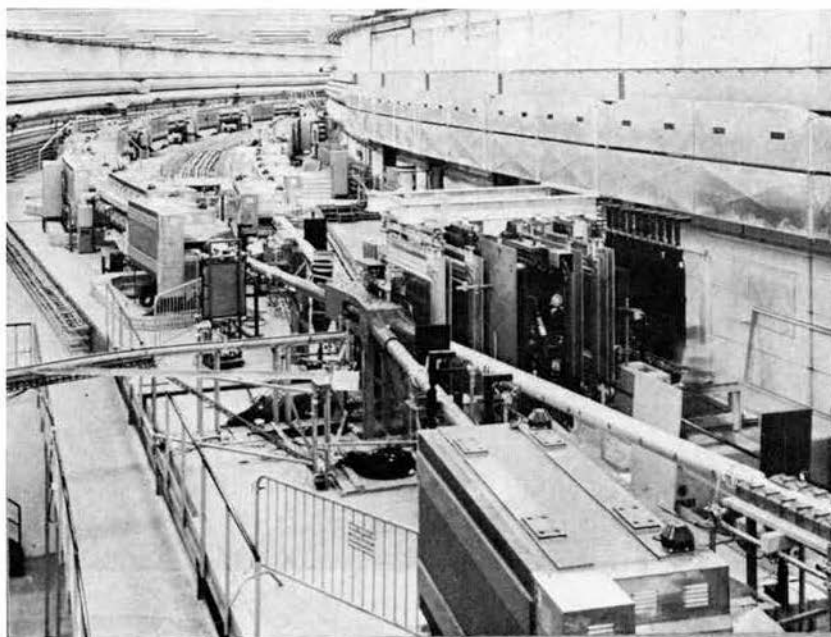


図34 CERN の陽子・陽子衝突リング (ISR)。最近さらに大きな電子・陽電子衝突型 (LEP) の建設のためシャット・ダウンされた。



図35 スタンフォードリニアックセンター (SLAC) の全長 3 km のリニアックとその先端につけた電子・陽電子衝突リング (PEP)。右下に見える小さいリングは SPEAR。

同士が交差点で衝突するわけです。そうするとダンプカー同士の衝突のように、完全に止まり、止まるばかりでなく莫大な質量を全部反応のエネルギーに変えることができます。そうして効率よく反応エネルギーを高くすることができます。衝突のさせ方には二通りあって、図33の(a)は陽子と陽子のような場合

です。電子と陽電子，陽子と反陽子の場合はいっと簡単で、一つのリングでよいのです。電子と陽電子の場合，多数の粒子群をかためておいて，電荷が反対であるので，同じ磁場の中を逆向きに回すことができます。そこでそれぞれ二つの塊りの粒子群を回してやると，(b)図のように4カ所で衝突させること

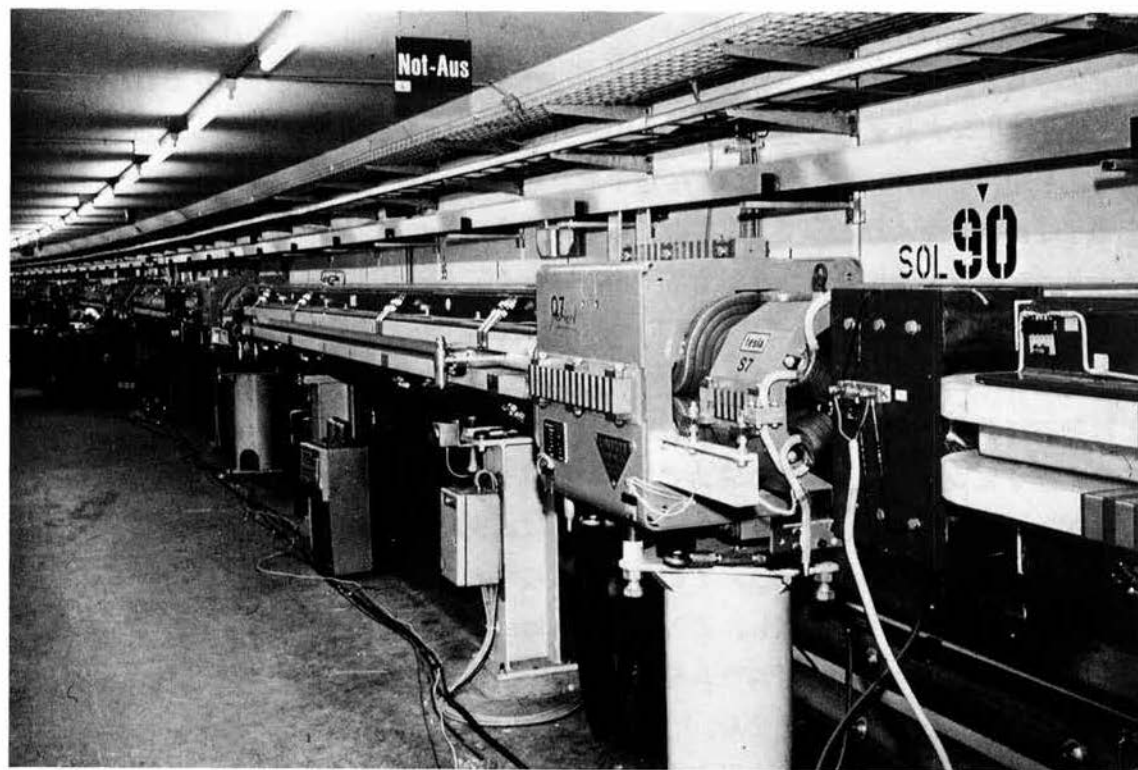


図36 ハンブルグの DESY 研究所の電子・陽電子衝突型加速器 PETRA のトンネル内の写真

ができるわけです。これが衝突ビーム加速器であり、非常に効率のよい高エネルギーの実験ができます。

図34はヨーロッパの合同原子核研究所にある陽子と陽子の衝突型加速器です。二つのリングがあります。実はこの機械は近くシャット・ダウンすることになりました。最近まで、一番エネルギーの高いところのデータを与えてきました。

図35の写真は、スタンフォード大学にある全長3kmのリニアックで電子のビームを引っぱり出して、その先に作ったリングで電子と陽電子を衝突させようとしています。

このリニアックの途中にはもう一つやや小型の電子・陽電子衝突型加速器(SPEAR)が早くに作られ、上述のように、ブルックヘブンとは独立にチャームクォークの結合した中間子の状態を見つけました。その成功でさらに直径700mの電子・陽電子衝突型の加速器PEP (Positron Electron Project) を作ってすでに実験を行い、クォーク探し、ことにトップ・クォークの結合状態トポニウムを探しましたが、まだ発見されていません。

西ドイツ・ハンブルグの DESY 研究所でも同じような実験をしています(図36)。直径750

m の PETRA という電子・陽電子衝突型加速器では世界で一番大きなもので、エネルギーは200億 eV までいっていますが、まだトポニウムも単独のクォークも見つかっていません。ここには東大理学部の小柴教授のグループも実験に参加してきました。

日本の計画, トリスタン

実は自然はトップレスであるのかもしれませんが、しかし、私どもの研

究所の理論グループの中では PETRA や PEP ではトポニウムは見つからないのが当然で、もう一回り大きいエネルギーのところで多分トップクォークによる結合状態が見つかるであろうと予言しております。

そこで私どもの研究所は、最初に作ったのが陽子シンクロトロンですが、これが完成後の1978年から1982年へかけて、全長400mの電子リニアックを作りました。実はこれは今は、別のリングをこの先につけて、応用研究に使っています。しかしまたここに直径1kmの電子・陽電子衝突型加速器を作る計画を進めています。1981年から建設を始めており、到達エネルギーは300億 eV、重心系で600億 eV になります(図37)。果たしてトポニウムが見つかるかどうか大問題ですが、せつか

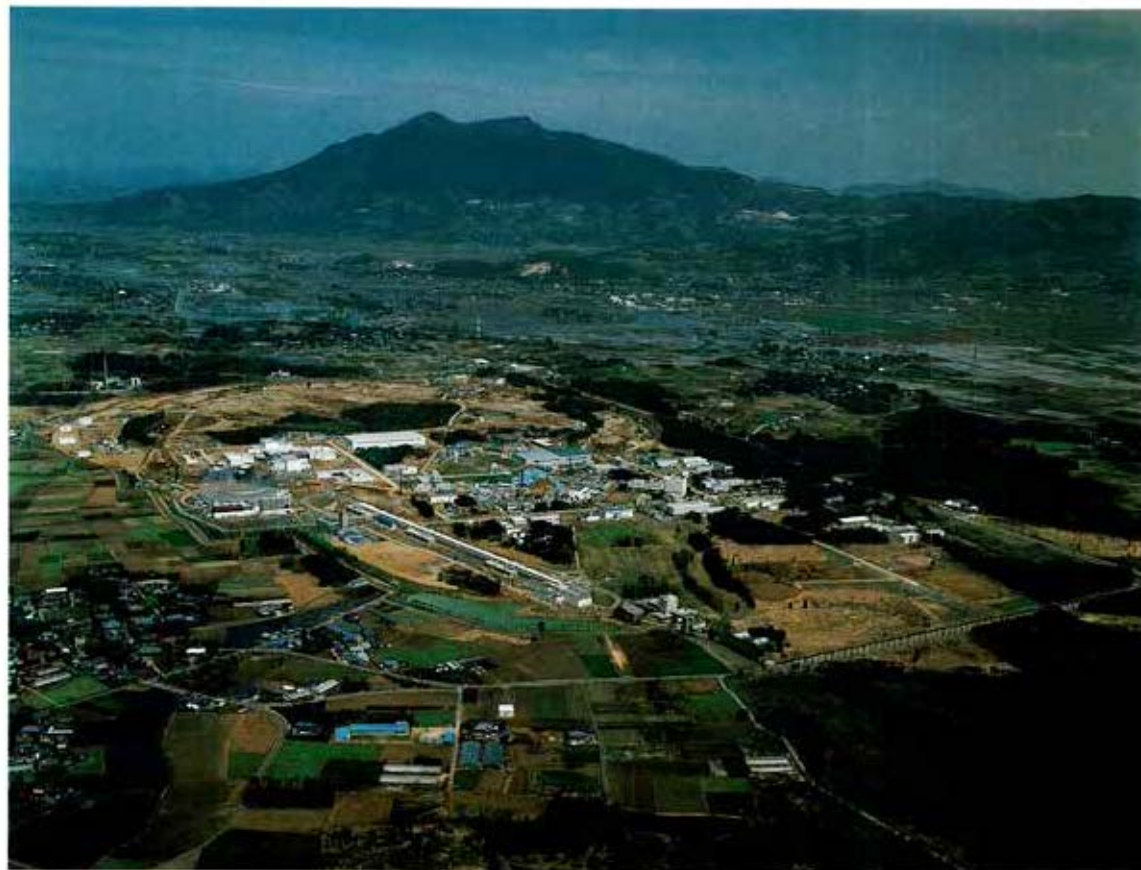


図37 日本の高エネルギー物理学研究所（KEK）の全景

く日本の理論グループがその質量まで予言しているのです、できれば我が国で見つけたいと思っています。

図37の写真は研究所の全景。青いのがシンクロトロン。左手に見えるのがリニアックで、

まず直径 120 m の小さいリングに電子と陽電子をためこみ、直径 1 km のリングに入れて加速して 4 か所で衝突させようという計画です。四つの実験室があり、南西のが「富士」の実験室、東北は「筑波」の実験室、西北は「日

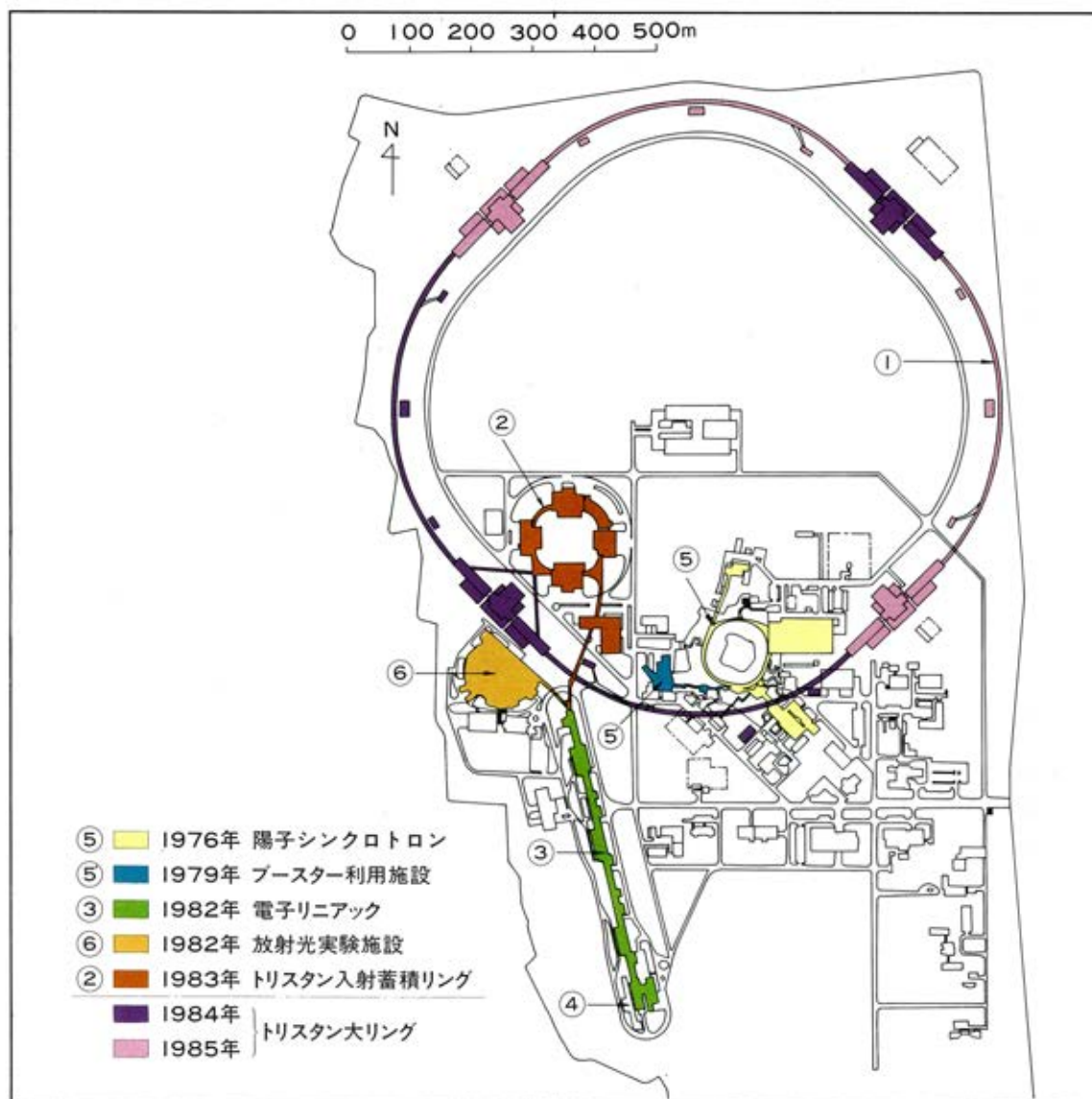


図38 KEKの加速器その他の配置図

光」の実験室, そしてもう一つが「大穂」の実験室と呼ばれています(図38)。今, その中の二つは日本の大学チームが二つに分かれて実験の計画を進めています。第三の「大穂」の実験室ではアメリカの東部のロチェスター大学な

どが主になって, 中国や韓国や日本の研究者の加わった, 国際的な研究グループが実験を行う予定です。

この計画はトリスタン計画(Transposable Ring Intersecting Storage Accelerators in



図39 KEK のトリスタン計画の最近の建設状況

Nippon の略)と呼ばれ、図39はその最近の建設状況を示しています。

この写真に写っている白い比較的小さなリングの加速器(蓄積リング)はすでにでき上がっています。まず、リニアックで電子と陽電子を光の速度の99.999999%まで加速して、この蓄積リングに入れる。これは1983年11月19日に完成しました(起工式は2年前11月20日)。すでにビームが走り、蓄積を始めており

ます。ここで7 GeV まで電子と陽電子の塊りを加速して、大リングに入れます。大きなリングの電磁石もどんどん建設中であり、磁場の測定をしております。加速器全体のコントロール室も完成し、大リングは地下11mのトンネル内に設置されます。特に四つの実験室は地下14mまで掘り下げて作られ、そのうちの二つ(富士と筑波)はすでにほとんど完成しています。