

# 大型加速器で素粒子を探る

1987年5月16日

名古屋大学工学部 4 号館において

高エネルギー物理学研究所 菊池 健

## 物質を調べる

「物質が何からできているか」ということは、古代ギリシャの時代から人類が追求してきた謎の一つであります。物質をハンマーで叩いて細かく砕いても、色や性質が変わらないことから、物質は微粒子でできていると考えられました。これをアトムと名づけたわけです。このアトムは、いわば哲学的な概念でありまして、実証されたものではありませんでした。今日、物質を構成する原子のことをアトムと言いますが、この原子の正体が明らかになってきたのは、比較的最近のことです。原子の構造を解明するのに重要な役割を果たしたのが自然放射性元素から出てくる

放射線であります。その後、人工的に放射線を発生することのできる加速器が発明され、物質の研究に重要な貢献をしたわけです。今日では、大型の加速器が建設され、それによって発生するエネルギーの高い放射線が研究の第一線で活躍しています。このようにエネルギーの高い放射線を研究手段とする物理学の分野を高エネルギー物理学と申しますが、素粒子物理学とほとんど同義語と考えてさしつかえありません。高エネルギー物理学の目的を列挙すると次のようにまとめることができます。

物質は何からできているか

→ 物質の究極的構造の研究

自然界にはどんな力があるか

→ 相互作用の研究

自然界にはどんな法則があるか

→ 物理法則の研究

これらの研究で得られた知識がすべての自然科学の基礎となり、今日の科学や技術を生みだしてきたわけですが、これらの研究で放射線や加速器の果たしてきた役割についてお話ししたいと思います。

最初に、今世紀の初め  
1900年頃の知識

頃、物質構造や自然界の力について、われわれがどの程度知っていたかをまとめて見たいと思います。

物質構造について、当時の知識の要点をまとめると次のとおりです。

- 自然界には70～80種の元素がある。
- 元素は原子からできている。したがって、自然界には元素と同じだけの種類の原子がある。原子を表すには、H, He, C, O, ……などの記号を用いる。これらの原子のうち最も軽いのは水素原子 H であって、他の原子の質量は、H のほぼ整数倍のことが多い。
- 原子を構成している粒子は、電子と陽子

である。電子は負の素電荷、陽子は正の素電荷を持ち、陽子は電子の1,836倍の質量を持つ。

電子の存在は、放電現象や気体中を流れる電流の研究からだんだん明らかになり、原子に光をあてたときに電子が放出される現象、すなわち光電効果（1887）が発見されて、原子内に電子が存在していることが確かめられたわけです。一方、水素ガスの研究から、水素イオンそのものが、陽子であることが知られていました。これらの粒子の持つ電荷の大きさをきめたのが有名なミリカンの油滴実験（1909）で、彼の得た値は、今日の電気素量にかなり近いものです。

次に自然界の力ですが、万有引力と電磁気力の二つが存在することが知られていました。重力については、1600年代にガリレイがピサの斜塔を利用して、自然落下の実験を試みたことが有名ですが、1665年にニュートンが万有引力の理論を導入して、天体の運動を記述したことで、万有引力の法則が確立されたわけです。万有引力に比べて、電磁気力の歴史はもっと古いのです。もともと、磁気の力と電気の力は別々のものとして考えられて

いました。すでに紀元前、トルコのマグヌスの町の近くで採掘された石を糸で吊すと一定の方向を向くことが知られていました。これが今日のマグネットの語源になっています。1269年に、ペレグリヌは磁石に二つの極があること、そして異種の極は引きあい同種の極は反発することなどを発見しています。1600年代には、ギルバートが De Magnete (磁石) という本を出版しています。一方、電気についても、紀元前に摩擦による帯電現象が知られており、ギルバートの本にもそのことが記されています。彼は electric という語を初めて用いた人でもあります。電気が定量的な電気学となったのは、クーロンの法則(1785)以後であります。その頃から人工的に電気を発生する電池が発明され、電流の磁気作用に関するアンペアの法則(1820)、電磁誘導についてのファラデーの法則(1831)などが相ついで発見されたわけです。こうして、これまで別々に考えられてきた磁気の力と電気の力が関連を持って捉えられ、ついにマクスウェルによって統一的な電磁気理論が完成したわけです(1864)。したがって今日では、電気と磁気の力を合わせて電磁気力と呼んでいま

す。

## 放射線の発見

1896年頃、ベクレルとキュリー夫人は、自然放射性元素から出てくる放射線が写真乾板を感光させることを見つけました。その後、図1に示すような装置を用いて、自然放射線には三つの成分があることが示されました。磁場の中での曲がり方から、正、負の電荷を持つものと、電気を持たないものの3種ですが、正の電荷を持つ粒子を $\alpha$ 線、負の電荷を持つ粒子を $\beta$ 線、電荷のないものを $\gamma$ 線と名づ

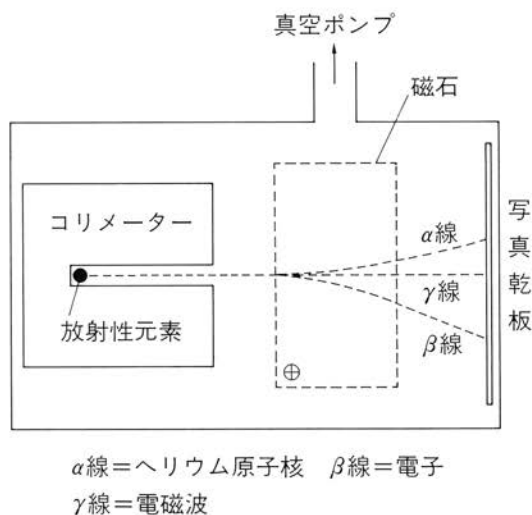
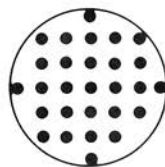


図1 放射性元素から放出される放射線の研究に用いられた装置

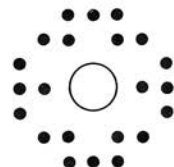
けました。その後、 $\alpha$ 線はヘリウム原子核、 $\beta$ 線は電子、 $\gamma$ 線は光子つまり光であることがわかったわけです。

### 原子モデル

さきにも述べたように、原子の中に電子が存在することは、光電効果などの現象から予想されたわけですが、原子の質量が電子に比べてはるかに重いことから、電子のほかに含まれているものは、はるかに重いものでなければならぬと考えられました。そして、その重いものが正の電気を持っていて、電子の負電荷を中和し、中性の原子を形成するものと考えたのが妥当であったわけです。この正の電気を持つ重い成分が陽子の集合であるかどうかについては必ずしも明確ではありませんでした。このようなときに、原子の構造について二つの仮説が提出されました(1904)。その一つがトムソンの模型であり、他の一つがナガオカ(長岡半太郎)の模型でありました。図2に両者の概要を示します。物質の密度と原子の密度が同じだと仮定しますと、それから原子の半径は、 $10^{-8}$  cm 程度だと推定されますが、トムソンの模型では、半径  $10^{-8}$  cm の正の電気の雲の中に、電子がちりばめられてい



トムソンの模型



ナガオカの模型

●は電子で、白い部分が正電荷の部分

図2 初期の代表的な原子模型

ると考えたわけです。原子が励起されると、電子は安定の平衡点のまわりに振動し、光を放出してもとの安定な状態にもどります。原子から光が出てくる現象についてもこうして説明できます。

一方、ナガオカの模型では、正の電荷が原子の中心に集中していると考えました。この正電気のまわりを電子が環状にとりまいていくのです。ナガオカは、このような状態が安定な力学系として存在することを理論的に示しましたが、運動している電子は光を放出してエネルギーを失うわけですから、この状態は安定ではありません。そういう点でナガオカの模型は必ずしも評判は良くなかったのです。

ラザフォードは、 $\alpha$ 線が2価のヘリウムイ

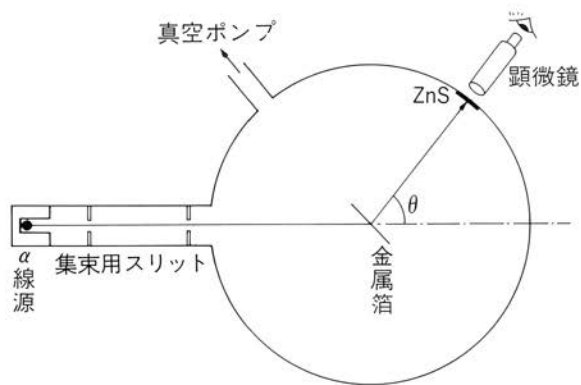


図3  $\alpha$  粒子散乱の実験装置

オンであることを確かめた人ですが、彼はこの $\alpha$ 線を用いて原子の構造を解明することを試みました。図3にその装置の概要を示します。スリットを通過した $\alpha$ 線は、薄い金属箔を通過しますが、そのとき、金属原子内の電子や正電気によって、その進路が曲げられます。しかし、 $\alpha$ 粒子は電子よりはるかに重いので、電子との相互作用で進路が曲げられることは少なく、進路が曲がるとすれば、重い正電気成分によると考えられるわけです。ですから、曲がり方の実験をすれば、正電気の分布についての知識が得られます。この実験は忍耐力を必要とします。ZnSを塗った検出器を散乱角 $\theta$ の位置に置き、 $\alpha$ 粒子が

ZnS中で発する微弱な閃光を顕微鏡でのぞきながらカウントするのです。一定時間内に起こる閃光の回数を数えることによって、 $\theta$ 方向に飛来する $\alpha$ 粒子の数がわかります。角度 $\theta$ を変えて測定し、散乱角 $\theta$ と $\alpha$ 粒子の数の関係を調べることで、荷電分布を知ろうとするものです。

この実験では、 $\alpha$ 粒子が散乱される場合に、ほとんどは $\theta$ の小さい方向に散乱されます。しかも、それは、トムソン模型であろうとナガオカ模型であろうとあまり変わらないのです。両方の模型の差が出てくるのは、 $\theta$ の大きいところ、例えば $\theta \geq 90^\circ$ のような後方です。トムソン模型では、 $\alpha$ 粒子が $90^\circ$ 以上に散乱される確率は、ほとんど0といえる程小さい値になります。それに反して、実験の結果は、 $10^{-4}$ 程度であり、原子の構造はむしろナガオカ模型に近いということになりました。ラザフォードは金属箔の厚さを変えて実験を行い、原子内にはきわめて強い電場が存在していることを確信したのであります。そして、原子の模型として、正電荷が原子の中心に集中している場合を仮定して、 $\alpha$ 粒子の散乱を計算しました。この計算は、距離の

二乗に逆比例する電気力を及ぼし合う二つの正電荷の運動の問題であり、形式的には万有引力による惑星の運動と同じになる。ただ、惑星の場合は楕円軌道になるのに対し、 $\alpha$ 線の場合には双曲線軌道になる。計算の結果は実験と良く一致することが示され、結局、正電荷を持った原子核が中心にあり、そのまわりに電子が分布している今日の原子モデル(図4)が確立したのであります。このとき導かれた散乱の理論式はラザフォードの散乱公式と呼ばれ、荷電粒子が点電荷によって散乱される場合に広く適用できるものです。計算値と実験の比較から、正電荷を持つ原子核の半径は、たかだか $10^{-12}$  cm 程度と推定されました。これは原子の半径  $10^{-8}$  cm に比べ、さらに1万分の1ということになります。

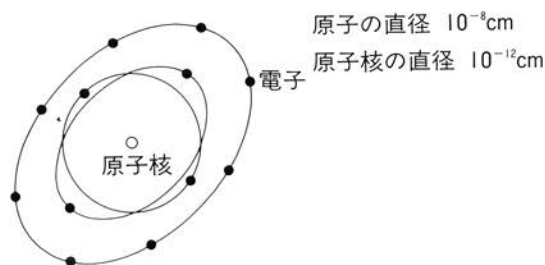


図4 今日の原子模型

## 原子核と中性子

原子の構造が解明され、その質量の大部分が、原子の中心である原子核に集中していることが知られてくると、原子核が重要な研究対象となってきました。「原子核を構成している物質は何か」ということが第一の疑問だったわけですが、原子核の質量や電荷から

「原子核は陽子と電子で構成されている。」と考えられていました。というのは、原子核の質量は水素イオン、つまり陽子、の整数倍に近いので、その整数を  $A$  とし、一方、原子番号を  $Z$  とすると、原子核は  $A$  個の陽子と、 $(A-Z)$  個の電子で構成されることになります。こうすると、原子核の質量はほぼ陽子の  $A$  倍で、電荷は  $+Ze$  となって、うまく説明できるのです。原子核の中に電子が存在するという考えは、原子核から放出される自然放射線のうち、 $\beta$ 線が電子であることから、妥当な推論でありました。

上記の考えはかなり長期にわたって信用されていたのですが、原子核のスピンの測定されるようになって、誤りであることがわかってきました。陽子と電子は、ともにスピンの

$\pm \frac{1}{2}$  ですが、これで計算すると  $^{14}\text{N}$  ( $A=14$ ,  $Z=7$ ) のスピンはどうしても、半整数になってしまいます。ところが、実験では  $^{14}\text{N}$  のスピンは 1 であることが示されたのです。これで、原子核の構成要素の問題はふり出しにもどったわけですが、これに決着をつけたのがチャドウィック (1932) でした。

1919年にラザフォードは、 $\alpha$  線を窒素ガスにあてて陽子を発生することに成功しました。これは、最初的人工的な核反応の実験であったのですが、同じような装置 (図 5) を用いて、ジョリオとキュリーはいろいろな実験を試みていました。この時には、すでにガイガー管が発明されていたのですが、パラフ

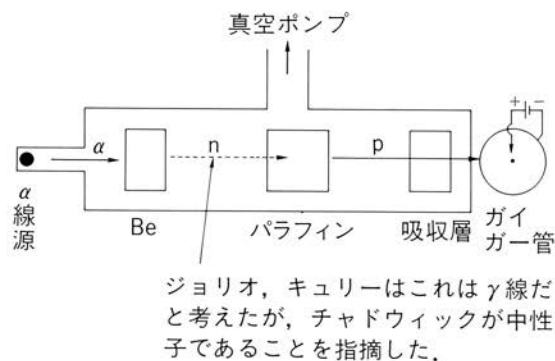
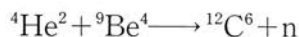


図 5 中性子の検証に用いられた実験装置

インのように水素を含んだ物質をガイガー管の前におくと、ガイガー管の計数が増加することに気づきました。やがて、これは水素を含んだ物質から陽子が放出され、それがガイガー管の計数を増すことがわかりました。ではパラフィンがない場合に、ガイガー管が感じていたもの、つまり  $\alpha$  線が Be にあたって放出していたのは何でしょうか。ジョリオ達は、Be から放出されているのは高エネルギーの  $\gamma$  線で、この  $\gamma$  線がパラフィン中の陽子をコンプトン効果の場合のようにはじき出すと考えました。ガイガー管に入ってくる陽子のエネルギーは、吸収層で測定でき、約 4.5 MeV となります。陽子コンプトン効果で反跳される陽子のエネルギーが 4.5 MeV になるためには  $\gamma$  線のエネルギーは 50 MeV 以上にもなります。

チャドウィックは、この解釈が誤っていることを指摘しました。 $\alpha$  粒子をあてた Be から放出されるのは  $\gamma$  線ではなく、これこそ長い間探し求めていた中性子だったのであります。彼によれば Be で起こっている核反応は



で、中性子  $n$  は陽子とほぼ同じ質量を持ち、電氣的に中性だと考えられたのです。当時、 $\alpha$  粒子 ( ${}^4\text{He}^2$ )、Be 核、C 核の質量がわかっていたので、アインシュタインの質量とエネルギーの関係式を用いて、中性子のエネルギーや質量が計算できたのです。そして、中性子がパラフィン中の陽子と弾性衝突をして前方にはじき出された陽子がガイガー管に入ってくると解釈すると、実験結果をうまく説明できたのです。

こうして、中性子の存在が立証されると、種々の核反応や  $\beta$  崩壊から中性子の質量をきめることができ、現在では、

「原子核は  $Z$  個の陽子と  $(A-Z)$  個の中性子で構成されている」

となっている。ここで導入した整数  $A$  は質量数と呼ばれ、原子核を構成する陽子数と中性子数の和であります。そして原子核を表すとき、 $A$  と  $Z$  を明示することになっております。

### 強い力と中間子

こうして1930年代の初めに原子核の構造が明らかになったわけですが、ここで新しい問題が起こってきました。原子核の直径は大体  $10^{-12}$

cm 程度ですから、図6に示すように狭い空間に陽子と中性子がつまっているわけです。最初に述べましたように、当時われわれが知っている自然界の力は万有引力と電磁気力でありました。陽子や中性子はきわめて軽いで、その間にはたらく万有引力は電磁気力に比べてはるかに小さいのです。中性子には電気は無く、陽子は正の電気を持っていますから、電気力によって陽子はたがいに反発するわけです。そうするとなぜ原子核が安定に存在し得るかという点が疑問になってきます。原子核が飛び散らないで、くっついていていなければならないわけです。この力は人類がそれまで知らなかったものであり、強い力または核力といいます。

1935年、湯川先生は、この強い力を説明す



● 陽子 正の電荷

○ 中性子 電荷なし

核の直径は  $10^{-12}$  cm

陽子の質量は電子の約1,840倍

図6 陽子と中性子で構成される原子核

る新しい理論、中間子論を発表しました。量子力学では、場があるときには、必ずそれにもなう粒子が存在することになっていますが、湯川先生は、強い力の場にもなう粒子として、質量が電子の200倍程度の中間子を導入されたわけです。陽子と中性子を例にとって、湯川先生の理論を説明しましょう。

図7で、まず、陽子が正電荷を持つ中間子を放出して中性子に変わり、その中間子を吸収した中性子が陽子に変わる。このような中間子のやりとりをくりかえす——つまりキャッチボールする——ことによって陽子と中性子は結合しているというわけです。

湯川先生は、電子、陽子、中性子、中間子が物質を構成する素（モト）だと考えられ、これらを素粒子と名づけられました。この中間子は、今日  $\pi$  中間子と呼ばれているもので

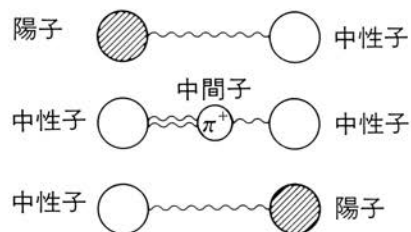


図7 核力と中間子

ですが、これを発見することがきっかけとなって、以後多くの素粒子が発見されることになりました。その点で、中間子論は現代の素粒子物理学の発端ということが出来ます。

### 弱い力と $\beta$ 崩壊

原子核が陽子と中性子で構成されているという

ことになる、原子核から放出される  $\beta$  線——つまり電子——はどこからくるかという疑問が起こってきます。これに答えたのが、フェルミの  $\beta$  崩壊の理論です。原子核を構成している中性子はそれ自身不安定な粒子で、次のように崩壊するのです。

中性子  $\rightarrow$  陽子 + 電子 + 反ニュートリノ  
現在では、自由な中性子の寿命は約 1,000 秒であることが知られていますが、原子核の内部でも、安定な原子核に比べて中性子数の多い場合、中性子が上のような過程で崩壊し、その結果、電子と反ニュートリノが核外へとび出すわけです。ここに登場するニュートリノは、中性微子ともいわれます。ニュートリノは、電荷を持たず、質量もきわめて小さい上、物質との相互作用も弱いので、検出するのが大変困難です。

$\beta$  崩壊が起こるためには、そこに何らかの

力がはたらいっている必要があり、この力を弱い力あるいは弱い相互作用といいます。電子やニュートリノの持っている力も弱い力です。さきほどの強い力を媒介する粒子が中間子であったように、弱い力を媒介する粒子も存在するはずです。弱い力を媒介する粒子は  $W^\pm$ ,  $Z^0$  と呼ばれ、1983年に発見されましたが、質量が陽子の90倍程もある重い粒子です。

### 多くの素粒子

湯川先生が予言された  $\pi$  中間子は、1947年に宇宙線中で発見され、第二次大戦終了後の1948年にはカリフォルニア大学の大型サイクロトロンで人工的に作られました。ところが宇宙

線の中には、 $\mu$  粒子——これは最初  $\pi$  中間子と間違えられた粒子で、 $\mu$  中間子といわれたこともある——や  $K$  中間子などが存在していることがわかり、一方、1950年代に大型加速器が稼動し始めて、つぎつぎと多くの素粒子が発見されました。その主なものを図8に示します。今日までに発見された素粒子は約200種にのぼりますが、それらは相互作用によって表1のように分類することができます。

このように素粒子の種類が多くなると、これらの素粒子を構成しているより基本的な粒子があるのではないかと考えられます。このような考えを最初に提出したのは、名古屋大

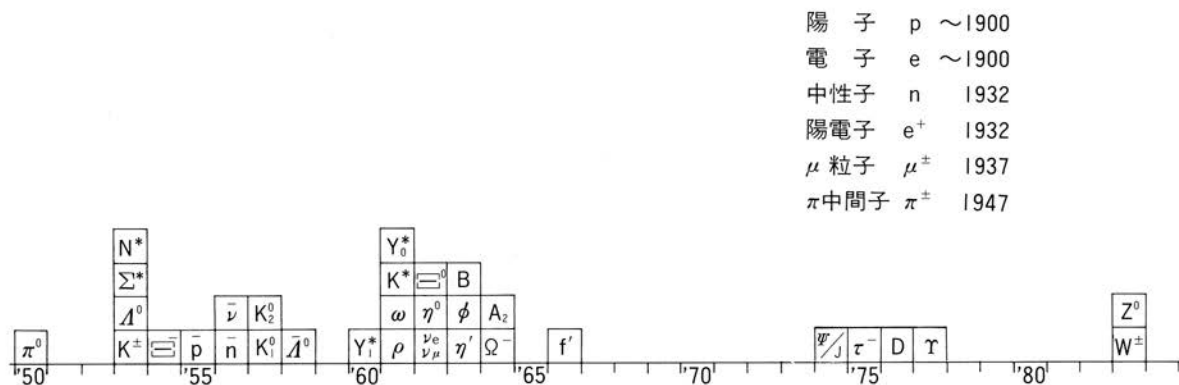


図8 主な素粒子発見の年表

表1 素粒子の分類

|                            |                    |         |
|----------------------------|--------------------|---------|
| レプトン……弱い相互作用をする粒子 5種       |                    |         |
| 電子, $\mu$ 粒子, $\tau$ 粒子    |                    |         |
| 電子ニュートリノ, $\mu$ ニュートリノ     |                    |         |
| ハドロンの……強い相互作用をする粒子 約 190 種 |                    |         |
| バリオン                       | 陽子, 中性子など          | 約 110 種 |
| メソン                        | $\pi$ , K, ……など中間子 | 約 80 種  |
| 合計 約 200 種                 |                    |         |

学におられた坂田先生であろうと思います。坂田先生は、1956年にハドロンは陽子、中性子、 $\Lambda$  粒子から構成されるという複合模型を提案されました。これが坂田模型といわれているもので、残念ながら成功しなかったのですが、その後の素粒子物理の発展に新しい局面を拓いたといえます。1964年になって、ゲルマンとツバイクが独立に、ハドロンは、電荷が  $\frac{2}{3}e$  か  $-\frac{1}{3}e$  を持つ3種の基本粒子から構成されているとの提案を行い、ゲルマンはこれらを u クォーク, d クォーク, s クォークと名づけました。u クォークは電荷  $\frac{2}{3}e$

を、d および s クォークは電荷  $-\frac{1}{3}e$  を持っています。そして、バリオンは3個のクォークで構成され、メソンはクォークと反クォークで構成されます。いくつかの例を挙げると次のとおりです。

バリオン……………3 個のクォーク

|     |             |     |         |
|-----|-------------|-----|---------|
| 陽子  | p           | uud | } ハイペロン |
| 中性子 | n           | udd |         |
| ラムダ | $\Lambda^0$ | uds |         |
| シグマ | $\Sigma^+$  | uus |         |
| グザイ | $\Xi^0$     | uss |         |
| オメガ | $\Omega^-$  | sss |         |

メソン……………クォークと反クォーク

|     |          |                      |
|-----|----------|----------------------|
| パイ  | $\pi^+$  | $u\bar{d}$           |
|     | $\pi^-$  | $d\bar{u}$           |
| ケイ  | $K^+$    | $u\bar{s}$           |
| ロー  | $\rho^0$ | $d\bar{d}, u\bar{u}$ |
| ファイ | $\phi^0$ | $s\bar{s}$           |

ここで u はアップ, d はダウン, s はストレンジの略です。ストレンジは英語で縁の無いという意味で, s クォークを含んでいる粒

子は、われわれの目の前に現れる頻度が小さい、つまりわれわれと縁がうすいのです。 $\Lambda^0$ や $\Sigma^+$ のようにsクォークを含んでいるバリオンをハイペロンといいます、含まれているsの数が多いほど、現れる頻度が小さくなります。 $\Omega^-$ のようにsを3個も含んでいる粒子は発見するのが大変困難で、最初は、数10万枚の泡箱写真フィルム中で数個発見されたのです。

### 物質を構成する クォークとレプトン

ゲルマンとツバイクによって導入された素粒子の模型、クォーク模型は、実験結果をうまく説明できることがわかりましたが、1960年代になって多くの実験結果が集積されるにつれて、クォークが3種だけでは足りないことがわかってきました。現在では、クォークは少なくとも6種類あるといわれておりますが、この考えは1973年に、名古屋大学出身の小林一益川両氏によって提出されました。一方、レプトンについても、6種類あるといわれており、結局、物質を構成する粒子は、それぞれ6種類のレプトンとクォークということになります。

表2に記入してある年は、発見された年ですが、u, d, sについては最初に導入された年になっています。小林一益川の理論が発表された翌年、1974年、米国のブルックヘブン国立研究所とスタンフォード線形加速器センターで、チャームと反チャームの結合した中間子 $c\bar{c}$ が発見され、それぞれの発見グループがJ,  $\Psi$ と名づけました。 $c\bar{c}$ は質量が3.1 GeV、つまり陽子の3倍以上になります。 $b\bar{b}$ は9.5 GeVもある重い粒子で、1977年、米国のフェルミ国立加速器研究所で発見され $\Upsilon$ (ウプシロン)と名づけられました。また $\tau$ 粒子は1975年、スタンフォード線形加速器センターで発見されましたが、質量が陽子の2倍近くもある重いレプトンです。以前にはレプトンを軽粒子と和訳したこともありますが、 $\tau$ 粒子のように重いレプトンが出現するようになって、この訳語は使われなくなっています。

この表の中で、 $\tau$ ニュートリノ $\nu_\tau$ とトップクォークtは未だ見つかっていません。tの質量は、既知の5種のクォークの質量から推定して、20~30 GeV 程度ではないかと考えられていたのですが、最近ではそれよりはる

表2 物質を構成するレプトンとクォーク

| 世代   | I                           | II                                | III                         |   | 電荷             |
|------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---|----------------|
| レプトン | 1963<br>$\nu_e$<br>電子ニュートリノ | 1963<br>$\nu_\mu$<br>$\mu$ ニュートリノ | $\nu_\tau$<br>$\tau$ ニュートリノ | ⇒ | 0              |
|      | ~1900<br>e<br>電子            | 1937<br>$\mu$<br>$\mu$ 粒子         | 1975<br>$\tau$<br>$\tau$ 粒子 |   | -1             |
| クォーク | 1964<br>u<br>アップ            | 1974<br>c<br>チャーム                 | t<br>トップ                    |   | $+\frac{2}{3}$ |
|      | 1964<br>d<br>ダウン            | 1964<br>s<br>ストレンジ                | 1977<br>b<br>ボトム            |   | $-\frac{1}{3}$ |

かに重いのではないかとわれています。また、これら6種以外の第Ⅳ世代のクォークやレプトンが存在する可能性もあります。いま建設中の大型加速器の目的の一つといえるでしょう。

### 力を媒介するゲージ粒子

さきに述べたように自然界には、万有引力や電磁気学に加えて、強い力

と弱い力、合わせて四つの力が存在することが知られています。これら四つの力の性質をまとめますと表3のようになります。これら

表3 自然界の力（相互作用）

| 力の種類 | 強さ         | 作用範囲          | ゲージ粒子                   |
|------|------------|---------------|-------------------------|
| 万有引力 | $10^{-39}$ | $\infty$      | 重力子<br>(グラビトン)          |
| 電磁気力 | $10^{-2}$  | $\infty$      | 光子(フォトン)                |
| 強い力  | 1          | $10^{-13}$ cm | グルーオン                   |
| 弱い力  | $10^{-10}$ | $10^{-13}$ cm | ウィークボゾン<br>$W^\pm, Z^0$ |

四つの力は、力の強さや作用範囲がまったく異なっていますが、一方、力の場が局所ゲ-

ジ変換に対して不変であるという共通点を持っています。また、実験的に力の強さがエネルギーによって変わることもわかってきました。そのようなことから、これら四つの力は、今それぞれ別の力に見えるけれども、もともとは一つの根源に由来していると考えようになりました。このような理論をゲージ理論といいます。それによると、四つの力の方はすべてゲージ場なのです。それで、四つの力のもととなる粒子をゲージ粒子と呼ぶようになりました。電磁場にもなう粒子が光子であることは、マクスウェル方程式を量子化して証明されています。原子核の構造が明らかになり、強い力が必要になったとき、湯川先生は、そのもとになる粒子として中間子を预言されました。しかし、その後、中間子はクォークと反クォークで構成されていることになったので、強い力のもととは、クォークとクォーク（または反クォーク）を結びつけている粒子だということになります。この粒子をグルーオンといいます。グルーオンというのは、英語で接着剤のことで、いわば「のりの粒子」という意味です。クォークもグルーオンも単独では発見されておりません。これらを単独

に取り出そうとすると、ばらばらになって、多くのハドロンに崩壊します。これをクォークジェットとかグルーオンジェットとか呼びますが、1978年にグルーオンジェットが確認されています。

弱い力を媒介するウィークボゾンについては、その質量について昔から多くの人達が計算してきました。1967年頃に、ワインバーグ、サラム、グラシウがそれぞれ、ゲージ理論の考えにもとづいて、弱い力と電磁気力を統一する理論を発表しました。そして、ウィークボゾンの質量は陽子の約90倍であることを预言しました。当時このように重い粒子を生成することのできる加速器がなく、この理論の正当性を証明するには、中性カレントとか電子の散乱における偏極とかの精密実験に頼らざるを得なかったのです。1983年に、ヨーロッパ合同原子核研究所（CERN）の大型陽子・反陽子衝突型加速器が稼動し、 $W^{\pm}$ 、 $Z^0$  というウィークボゾンを立て証し、 $W^{\pm}$  と  $Z^0$  の質量差についても理論が正しいことを示しました。したがって、電磁気力と弱い力は統一されたわけでした、統一された力のことを弱電力とか弱電相互作用といいます。

そうすると次の問題は、弱電力と強い力が統一できるかということになります。この理論を大統一理論 (GUT) といいます。この理論を実証するためには、弱電力と強い力が同じ強さになるような高いエネルギー状態を作り出す必要があるのですが、それは今の加速器では到達できないのです。この理論が正しいとすると、これまで安定な粒子だと思われていた陽子がいくつかのモードで崩壊することになります。ただし、その寿命は  $10^{32}$  年以上という長いもので、1,000トンの水の中で1年間に数個の陽子が崩壊することになります。このような陽子崩壊を観測する実験は、日本の神岡をはじめ世界の数箇所で進められていますが、まだ陽子の崩壊を見つけたという報告はでていません。

物質を構成しているクォークやレプトン、力を媒介するゲージ粒子、それぞれにまだ未解決の問題をかかえているわけですが、物質と力について一応、総括的に取り扱うことに成功しているわけで、これを標準理論と呼んでいます。

## 粒子エネルギー を表す単位

これまで述べた素粒子の実験に不可欠の道具が加速器であります。加速器の話に入る前に、一般に用いられている粒子エネルギーの単位について説明しておきましょう。

粒子のエネルギー——加速器の場合には、エネルギーといえば、ふつう運動エネルギーのこと——を表すのに「電子ボルト eV」が使われます。これは陽子や電子のように素電荷 ( $=1.602 \times 10^{-19}$  クーロン) を持つ粒子が1ボルトの電位間で得る運動エネルギーのことです。図9で、陽子を正の電極近くに置く

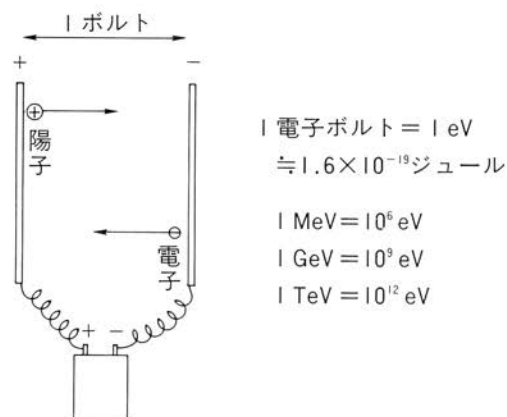


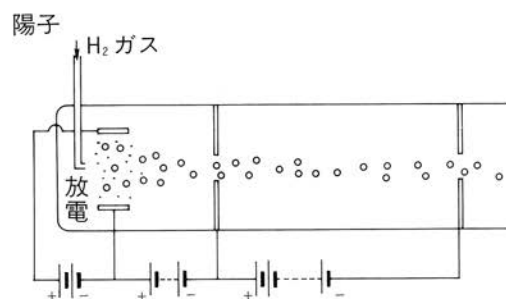
図9 粒子のエネルギーの単位

と、両極間の電場によって負の電極の方へ移動します。負の電極に到達するまで加速されるわけで、負の電極に到達したときに持っている運動エネルギーが1電子ボルトになります。1電子ボルトは、 $1.602 \times 10^{-12}$  エルグですから、大変小さいエネルギーですが、粒子1個が持つエネルギーとしては決して小さくありません。例えば、常温(=300 °K)の水素ガスで水素原子の持つ運動エネルギーは $\frac{1}{40}$  eVです。言い換えれば、1電子ボルトは温度約1万度の水素原子の運動エネルギーに相当することになります。1電子ボルトの $10^6$ 倍が1 MeV,  $10^9$ 倍が1 GeVです。

### 電場による粒子の加速

陽子，電子，イオンなどの荷電粒子を加速する装置が加速器です。加速器は1930年代の初めに発明され，原子核や素粒子の実験に不可欠の手段となりました。それまで用いられていた自然放射線に比べると，加速される粒子の種類，エネルギー，粒子強度，どれをとってもはるかに優れていました。粒子を加速するには電気の力を利用します。図9のような型の装置で，両極間の電

位差を大きくすることができれば，高いエネルギーが得られます。図9よりは，もう少し实际的な装置を図10に示します。陽子を作るには，水素ガスを放電によって電離します。電子の場合には，家庭用テレビなどでも用いられているように，熱陰極による電子銃を使用します。両方の電極間に直流高電圧を与えて，加速する装置がコッククロフト・ワルトン型やバンデグラフ型加速器です。高電圧を発生するしくみが異なるだけで，加速の原理



電子

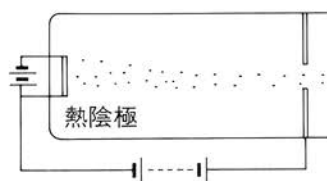


図10 直流電圧による粒子の加速

は同じです。タンデム・バンデグラフというのは、バンデグラフを2台連結したもので、2倍のエネルギーが得られます。この種の加速器のエネルギーの限界は、絶縁材料の耐電圧や地上からの高さなどできまります。

直流の電圧では、粒子が1回、極から極まで移動すれば加速が終了します。しかし、交流の電圧をうまく利用すると、くりかえし何回も加速できます。図11に直線形加速器（リニアック）の原理を示します。リニアックでは、大きな円筒の中に、中央に穴のあいた電極が並んでいます。今、この電極が、交互に正、負になるように交流の電圧を加えます。この状態で上の図のように正の極の近くに陽子を置くと、陽子は隣の負の極へ向かって移

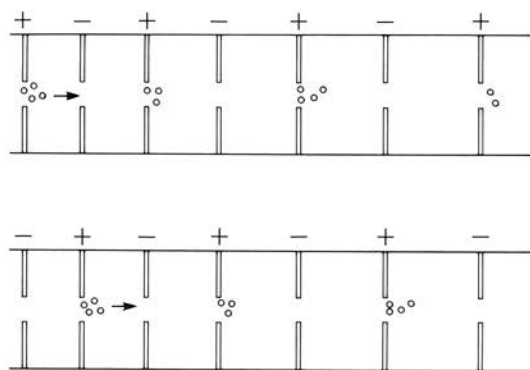


図11 交流電圧による粒子の加速（高周波加速）

動します。陽子が負の極へ移動するのに一定の時間がかかりますので、それに同期するような交流電圧を使って、下の図のように、負の極が今度は正の極になるようにしてやりますと、陽子はふたたび次の極へ向かって加速されます。このように、電極を通過するたびに陽子はくりかえし加速され、だんだんエネルギーが大きくなります。したがって、リニアックの長さを長くすれば、エネルギーの大きい粒子が得られます。現在、世界で最もエネルギーの高いものは、陽子で800 MeV（全長400 m）、電子で20 GeV（全長3 km）です。加速される粒子の速度が光速に近くなると、この例のような交流電場ではなく、交流電場を移動させて——つまり進行波を用いて——加速することができます。

### 磁場で粒子を曲げる円形加速器

図12に示すのは磁石です。磁石のN極からS極に向かって磁力線が走っていて磁場が形成されています。この磁場の中へ荷電粒子が入ってきますと、図のように進行方向が変わります。その曲がり方は円軌道ですので、非常に大きい磁石の中では、粒子は円周上をぐるぐると回ります。粒子の

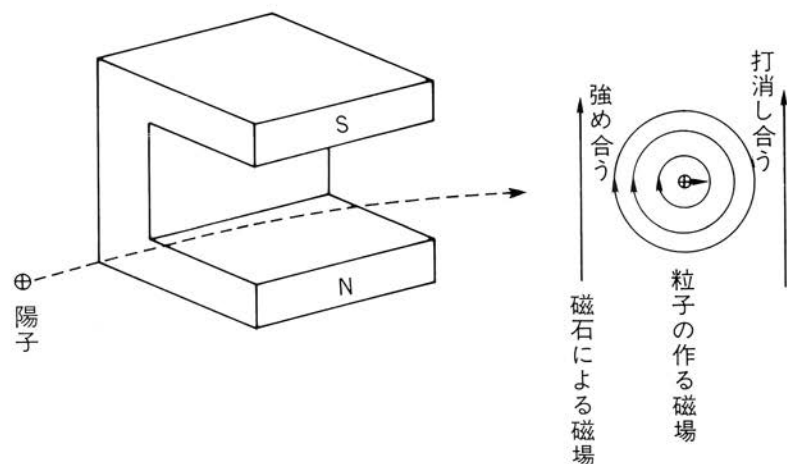


図12 磁場によって荷電粒子の軌道は曲る

エネルギーが高くなるにつれ、円の半径が大きくなります。つまり、エネルギーが高いほど、曲がり方が小さくなるわけです。

交流電圧と磁石を組み合わせると、粒子が円運動をしている間に加速するのが円形加速器です。その代表的なものがサイクロトロンとシンクロトロンです。サイクロトロンもいろいろな工夫によって、得られるエネルギーも高くなりましたが、陽子の場合で最高1 GeV程度です。それ以上のエネルギーを得るにはシンクロトロンを使います。図13にシンクロトロンの概要を示します。複数の電磁石を円周状に配置し、磁極の間を真空のパイプが通

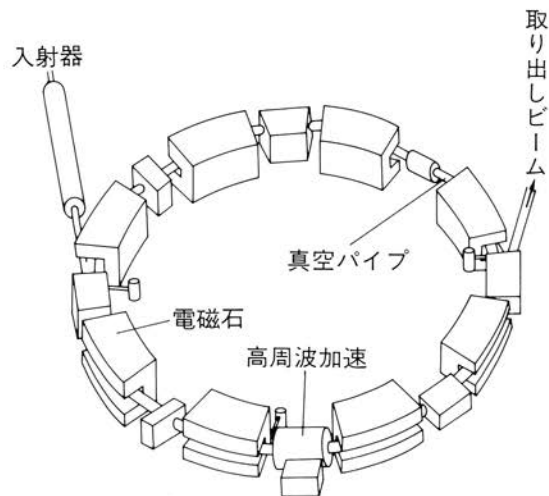


図13 シンクロトロンの概略

っています。この円のことをリング、真空パイプのことをドーナツといいます。シンクロトロンには、入射器と呼ばれる予備加速器が必要で、普通リニアックが用いられます。予備加速された粒子はリングに入射され、真空パイプの中を走ります。磁石のないところでは粒子は直進し、磁石の中では曲げられます。リングの中をぐるぐる回るだけではエネルギーは増えません。そこで、リング上の1箇所または数箇所に交流高圧を使って加速する装置（高周波加速装置）を置き、粒子がそこを通過するたびに加速されるようにします。そうすると粒子のエネルギーはだんだん高くなります。そこで

○粒子のエネルギーに合わせて、電磁石を流れる電流を大きくして磁場を強くし、粒子はつねに一定の軌道を通るようにする。

○エネルギーが高くなるにつれて、粒子の速度は速くなり、リングを一周する時間が短くなるので、それに合わせて、高周波電圧の周波数を大きくする。

このように、粒子のエネルギーに同期して磁場と加速周波数を変えることから、同期加

速器（中国では同歩加速器という）つまりシンクロトロンという名称が生まれたわけです。電磁石で得られる磁場には限度があります。したがって、高いエネルギーの粒子を得ようとするれば、リングの直径が大きくなります。ふつうの電磁石では、得られる磁場は最高2テスラ程度ですが、超伝導電磁石では5テスラ以上の磁場が得られます。したがって、超伝導電磁石を使えば同じ半径で2倍以上のエネルギーが得られます。現在、世界最大の陽子シンクロトロンは、リングの直径が2 km、超伝導電磁石を用いて900 GeVを達成しています（米国フェルミ国立加速器研究所）。ヨーロッパ合同原子核研究所で建設中の電子リング（エネルギーは50 GeV）は直径8.6 km、米国で計画中のSSC（陽子で20 TeV）は直径26 kmに達します。

衝突ビーム型加速器  
1930年代の初めに加速器が発明されてから50年

になりますが、その間に、いろいろな加速器が発明され、高いエネルギーの粒子が得られるようになりました。これまでの加速器のエネルギーの上昇の割合は、平均して6年間で10倍になっています。

こうして得られた高エネルギーの粒子（入射粒子）を標的物質中の原子核にあてて発生する反応を観測するわけですが、その際反応に有効なエネルギー（これを重心系エネルギーという）は、入射粒子のエネルギーに比例して増加するわけではありません。その理由は、

粒子は加速されると重くなる

からです。アインシュタインの相対性理論によれば、質量とエネルギーは等価であり、 $m$ なる質量はエネルギー  $mc^2$  ( $c$  は光速) に相当します。今、静止質量  $m_0$  なる粒子が速度  $v$  で走っているときの質量  $m$  は

$$\frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \quad (1)$$

で与えられ、粒子の全エネルギーは  $mc^2$  となります。いうまでもなく速度が光速に比べて充分小さいときには、

$$mc^2 \doteq \underbrace{m_0 c^2}_{\text{(質量エネルギー)}} + \underbrace{\frac{1}{2} m_0 v^2}_{\text{(運動エネルギー)}} \quad (2)$$

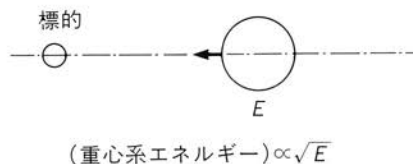
となって、高校の教科書にでてくる運動エネルギーになります。(1)式が成り立つことは、すでに1909年、ブッヘラーが自然放射線中の $\beta$ 線(電子)を使って立証しています。今、こ

こで話題にするような高エネルギー粒子の場合には、速度が光速に近いので、質量  $m$  は非常に大きくなります。例えば陽子の質量は約 0.94 GeV ですから、エネルギー 10 GeV の陽子の場合には、 $m/m_0 = 10.94/0.94 \doteq 12$  となります。このように重い陽子が静止している陽子にぶつかるのは、ちょうど、ダンプカーが軽自動車に衝突するようなもので、軽自動車ははねとばされても、ダンプカーの速さはそれほどおとろえないでつつ走ることになります。言い換えれば、入射した粒子の持っていたエネルギーが反応に有効に使われないのです。ぶつける標的が静止しているものを固定標的と呼びますが、固定標的の実験では、入射粒子のエネルギーを  $E$  とすると、

$$\text{反応に有効なエネルギー} \propto \sqrt{E} \\ \text{(重心系エネルギー)}$$

となります。すなわち、100倍大きい加速器を作って、粒子のエネルギーを100倍に上げて、有効なエネルギーは10倍しか上がらないということになります。そこで考案されたのが、衝突ビームの方法です。これは、図14に示すように、粒子を反対方向に加速して正面衝突させるやり方です。いわば、ダンプカー

## 固定標的の実験



## 衝突ビームの実験

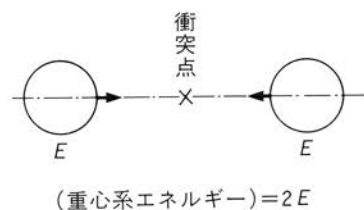


図14

同士を衝突させるわけで、この場合には、

$$\begin{aligned} &\text{反応に有効なエネルギー} = 2E \\ &(\text{重心系エネルギー}) \end{aligned}$$

となります。このような加速器を衝突ビーム型加速器または衝突型加速器といいます。

衝突ビーム型加速器の原理はきわめて単純で理解し易いものですが、現実の加速器で実現する場合には、さまざまな技術的問題を解決することが必要でした。実際に衝突ビーム型加速器が高エネルギー加速器の主流になってきたのは、ここ10年くらいです。粒子を反対方向に加速して衝突を行う衝突リングに

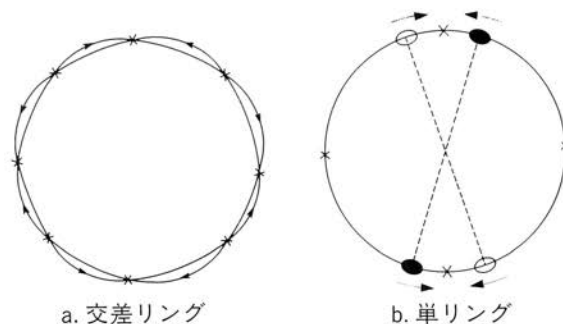


図15 衝突ビーム型加速器

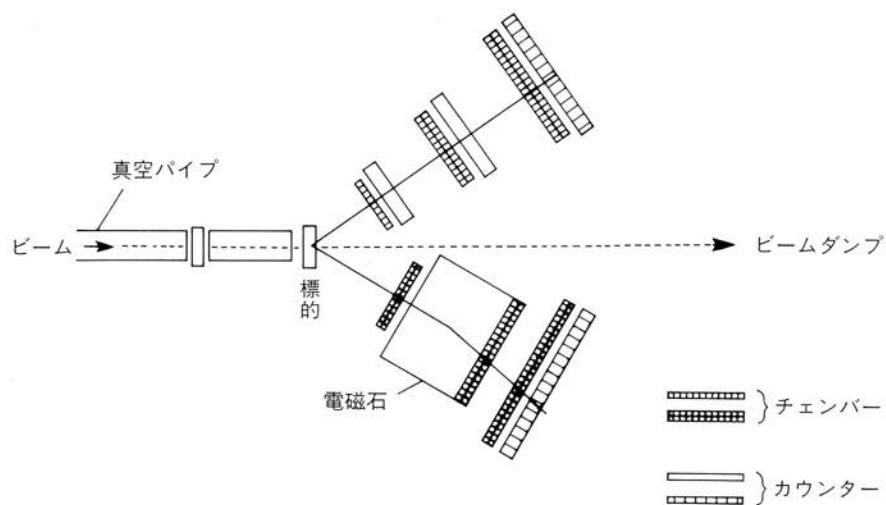
は、図15に示すように2種類あります。一般的には、a図のように、二つのリングを作り、それぞれ粒子を加速して、衝突させるためには交差点を作ってやればよいわけです。ただ、粒子と反粒子の場合には、b図のように一つのリングでぶつけることができます。というのは、粒子と反粒子は一つのリングで反対方向に回ってくれるからです。表4は世界の衝突型加速器の一覧です。この中で、ISR, UNK, HERA, LHC, SSCは、上記の交差リング型ですが、それ以外はすべて単リング型です。

加速器が衝突型になりますと実験の方法も変わります。固定標的の実験では、反応で生成される粒子の大部分が前方に放出されます。したがって、粒子を測定する電磁石、チ

表 4 世界の衝突型加速器

| 加 速 器<br>略 称  | 研 究 機 関<br>(国 名)               | 粒 子                      | エネルギー<br>〔GeV+GeV〕                    | リ ン グ<br>直径〔m〕 | 完 成 年 |
|---------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|----------------|-------|
| CESR          | コーネル大学<br>(米国)                 | $e^+ e^-$                | 8 + 8                                 | 250            | 1979  |
| PEP           | スタンフォード大学<br>線形加速器センター<br>(米国) | $e^+ e^-$                | 18 + 18                               | 700            | 1980  |
| PETRA         | 電子シンクロトロン<br>研究所 (西独)          | $e^+ e^-$                | 23 + 23                               | 734            | 1979  |
| TRISTAN       | 高エネルギー物理学<br>研究所 (日本)          | $e^+ e^-$                | 30 + 30                               | 960            | 1986  |
| LEP           | ヨーロッパ合同原子<br>核研究所 (スイス)        | $e^+ e^-$                | I . 50 + 50<br>II . 100 + 100         | 8,486          | 1989  |
| SLC           | スタンフォード大学<br>線形加速器センター<br>(米国) | $e^+ e^-$                | 50 + 50                               | 930            | 1987  |
| ISR           | ヨーロッパ合同原子<br>核研究所 (スイス)        | $p p$                    | 28 + 28                               | 300            | 1971  |
| TEVA-<br>TRON | フェルミ国立加速器<br>研究所 (米国)          | $\bar{p} p$              | 1,000 + 1,000                         | 2,000          | 1985  |
| SppS          | ヨーロッパ合同原子<br>核研究所 (スイス)        | $\bar{p} p$              | 450 + 450                             | 2,200          | 1983  |
| UNK           | 高エネルギー物理学<br>研究所 (ソ連)          | $p p$<br>$p p$           | I . 400 + 3,000<br>II . 3,000 + 3,000 | 6,615          | 1990  |
| HERA          | 電子シンクロトロン<br>研究所 (西独)          | $e^- p$                  | 30 + 800                              | 2,018          | 1990  |
| SSC           | 未定<br>(米国)                     | $p p$<br>$\bar{p} p$     | 20,000 + 20,000                       | 26,400         | 1996  |
| LHC           | ヨーロッパ合同原子<br>核研究所 (スイス)        | $\bar{p} p$<br>( $p p$ ) | (7,000~9,000) +<br>(7,000~9,000)      | 8,486          | ?     |

# 固定標的の場合



# 衝突ビームの場合

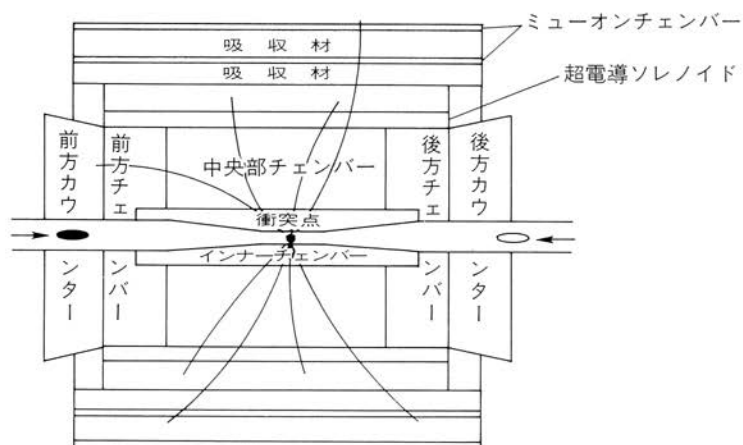


図16 素粒子実験の測定器

エンバー、カウンターなどが前方に配置されます。これに対して、衝突ビームの実験では、生成された粒子が衝突点を中心にして四方八方へ出てきます。これらの粒子の飛跡、運動量、エネルギーなどを測定するため、測定器は衝突点を取りまいて配置されます。一般的に衝突点に近い中心部には飛跡を測るチェンバーがあり、その外側に磁場を作るソレノイドやカウンター類があります。さらにエネルギーの高い粒子や、透過力の大きいレプトンを測定するためのチェンバーが一番外側にとりつけられるのがふつうです。高エネルギー実験に用いられる測定装置は、エネルギーが高くなると大型になります。固定標的の実験で測定器が標的から下流の方へ数 10 m にわたって配置されるのは珍しくありませんし、衝突ビームの実験では測定器の総重量が数 1,000 トンになります。

### 電子・陽電子衝突型加速器 トリスタン

高エネルギー物理学の実験研究の分野で、日本は欧米先進諸国におくれをとっていたのですが、昭和46年、筑波に高エネルギー物理学研究所が設立され、世界に追いつく努力が始まりま

した。最初に建設されたのは 12 GeV 陽子シンクロトロンで、続いて 2.5 GeV 電子リニアックと放射光発生用リングが建設されました。昭和56年から、5年計画で、30 GeV 電子・陽電子衝突型加速器を建設し、予定どおり、昨年11月19日、起工式からちょうど5年で完成しました。

トリスタンの概要を図17に示します。トリスタンの加速器は、三つの加速器

2.5 GeV 電子、陽電子リニアック  
(全長 400 m)

8 GeV 入射蓄積リング  
(直径 120 m)

30 GeV 電子・陽電子衝突リング  
(主リングともいう、  
直径 960 m)

で構成されています。このほか、陽電子を発生するために 200 MeV の電子リニアックが使われています。加速器本体はすべて地下トンネル内に置かれています。

実際に加速するときには、陽電子から始めます。200 MeV の電子を重金属標的にあてますと、電子は制動放射によって  $\gamma$  線を放出し、その  $\gamma$  線は電子・陽電子のペアを生成し



トリスタン主リング  
電磁石の中央に銀色に見えるのが粒子が走っている真空パイプ

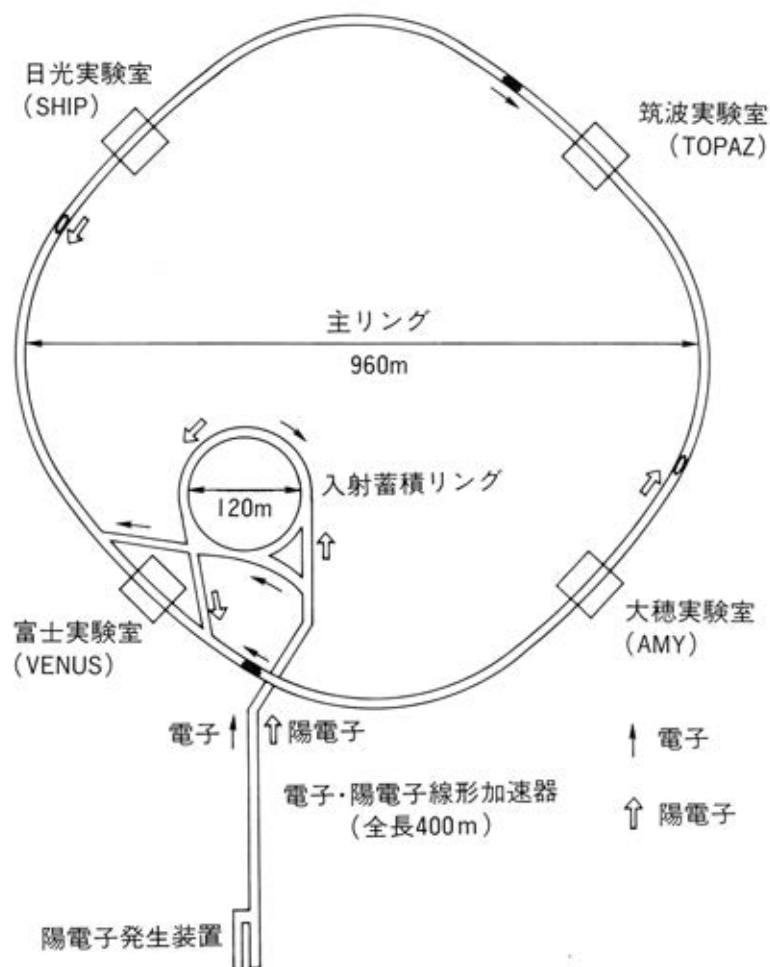


図17 トリスタンの概念図

ます。これらの陽電子のうち、前方に出てくるものでエネルギーの揃ったものを集めて、リニアックで加速します。最初の電子に対し

て、加速に使える陽電子が発生する割合は、約700分の1程度です。リニアックで加速された陽電子は、入射蓄積リングの中で上から見

て、反時計まわりに加速するのですが、まず最初は、リニアックからの陽電子を蓄積して小さいかたまり（パンチという）を作ります。このパンチの中に、 $10^{11} \sim 10^{12}$  個の陽電子を蓄積するのに数分かかります。このパンチができると、入射蓄積リングで 8 GeV 程度に加速してから、主リングへ入射します。主リングの中でも、陽電子のパンチは反時計方向に回ります。同じ手法をくりかえして、もう一つ陽電子パンチを作り、最初に入っているパンチの対角線上に入れてやります。これで、陽電子の入射が終了するわけです。今度は同じようにして、電子のパンチを作りますが、こちらの方は、入射蓄積リングと主リングの中で時計方向に回ります。電子のパンチも二つ主リングに入射しますが、そのとき、タイミングをうまくとれば、主リング上の 4 箇所ですべて電子と陽電子のパンチが会うことになります。電子と陽電子のパンチがそれぞれ二つつつ入ったところで、主リングでの加速が始まります。エネルギーが低いときに、電子と陽電子のパンチが接近しますと、引力によってパンチが広がったり、不安定になったりしますので、加速の途中では、あまり接近しな

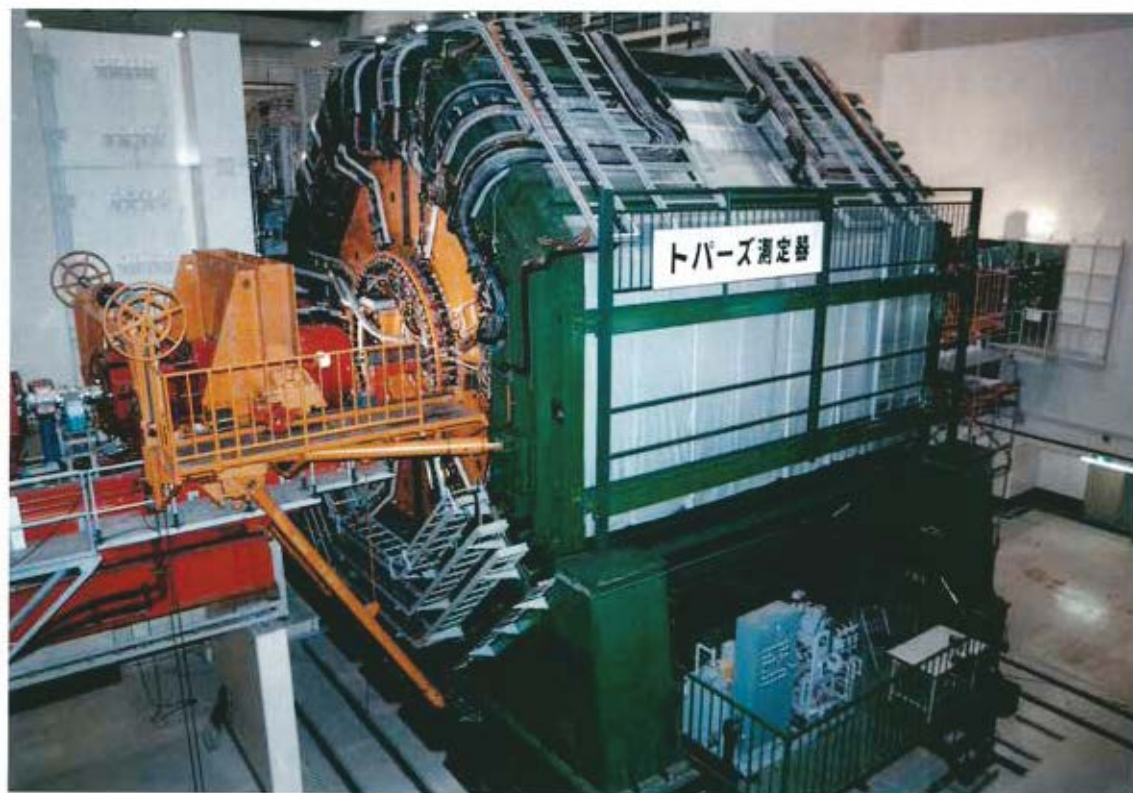
いように軌道をずらせておきます。

衝突点は主リング上に 4 箇所あり、実験室には主リング中心から見たときの方角によって、富士、日光、筑波、大穂という名前がついています。実験室に入る測定器にも、それぞれ VENUS, SHIP, TOPAZ, AMY という名称がついています。これらのうち、VENUS と TOPAZ はいわばフル装備の大型測定器で、日本の大学や高エネルギー研の連合チームのものです。AMY はこれらに比べると少し小型の測定器ですが、米国、中国、韓国、日本から成る国際連合チームのものです。SHIP は、プラスチック検出器を用いて磁気単極子を探す小型の実験で、米国と日本の協同研究に用いられます。いずれの測定器も順調に働いており、この 5 月から始まる本格実験に期待がかけられています。

トリスタンは、昨年 12 月から今年 2 月にかけて、加速器の性能向上をかねてテスト実験を行いました。衝突型加速器の性能を表す重要なパラメーターは、ビームのエネルギーとルミノシティです。ビームのルミノシティは、パンチが交差するときに、電子と陽電子が衝突する頻度を与える量で、両方のパンチの粒



トリスタンの入射器として用いられている 2.5 GeV 電子・陽電子リニアック  
(全長 400 m)



衝突ビーム実験の測定器の例  
トリスタン筑波実験室に設置されている TOPAZ 測定器

子密度と交差する回数でまします。トリスタンの場合には、バンチはビームの進行方向に長い棒状(長さ数 cm)をしており、その断面の大きさは鉛筆の芯程度です。このバンチの中に、 $10^{11}$  個の粒子が入っていると相当密度が高いように思われますが、実は希薄気体なのです。例えば 1 気圧の気体ですと、同じ体積の中には、 $10^{17}$  個程度の分子がつまっています。それと比べると、100 万分の 1 の密度であるわけです。トリスタン主リングの全周は 3 km ですが、電子、陽電子バンチはほとんど光速(毎秒 30 万 km)で走っていますので、毎秒 10 万回周回することになります。バンチが二つずつありますと、毎秒 20 万回の交差が起こるわけです。それでも、電子と陽電子が衝突して消滅し、クォークと反クォークの対が生成される反応——いわゆるハドロン生成反応——が起こる頻度は、設計値どおりのルミノシティになった場合でも、1 日に数 10 回程度です。ルミノシティの単位は、ふつう  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  で表され、これに衝突断面積(単位は  $\text{cm}^2$ )を乗ざると、毎秒あたり衝突の起こる頻度が得られます。トリスタンのルミノシティの設計値は、最大  $10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  で、こ

のエネルギー領域でハドロン生成反応の断面積は大体 150 pb (ピコバーン =  $10^{-36} \text{cm}^2$ ) くらいですから、

$$(\text{ルミノシティ}) \times (\text{ハドロン生成断面積})$$

$$= 1.5 \times 10^{31} \times 10^{-34} \text{s}^{-1} = 1.5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$$

となって、計算上は、1 日に 120 回となりますが、ビームの寿命は数時間ですから、平均ルミノシティは、最大値の数分の 1 になります。また、ビームの入射、蓄積、加速などに必要な時間を差し引くと、実験データをとる時間は 1 日 24 時間にはならないのです。トリスタン加速器の性能は急速に向上しており、2 月には、ルミノシティも  $10^{30} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  程度まで向上しています。本格実験は 5 月からですが、新しいクォークやレプトンの発見、このエネルギー領域における Z ボゾンの影響、クォーク間にはたらく力についての研究などで成果が期待されます。

### 1990 年代の加速器

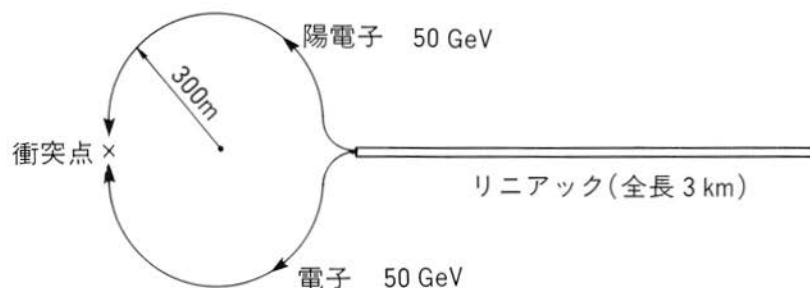
加速器がだんだん巨大化していますが、今後はどうなるのでしょうか。すでに建設中の大型加速器もいくつかあります。陽子・反陽子衝突型の加速器では、1983

年にヨーロッパ合同原子核研究所のスーパーシンクロトロン  $S_{\bar{p}p}S$  が、ウィークボズンを発見して話題となりましたが、1986年からは、米国のテバトロンが動き出して新しい結果が出るのが待たれています。この種のハドロン衝突型加速器としては、次世代の加速器としてエネルギー 20 TeV の SSC が計画さ

れています。これは米国で1996年頃完成を目指している直径 26 km の超大型加速器で、来年末までには敷地がきめられる予定です。

一方、電子・陽電子衝突型加速器では、エネルギー 50 GeV の SLC と LEP の建設が進んでいます。SLC は米国スタンフォードにある加速器で、図18に示すように、全長 3 km

SLC(米国スタンフォード大学)



将来の線形衝突器

エネルギー 300 GeV 以上

全長 10 km 以上



図18 電子・陽電子衝突型加速器の例

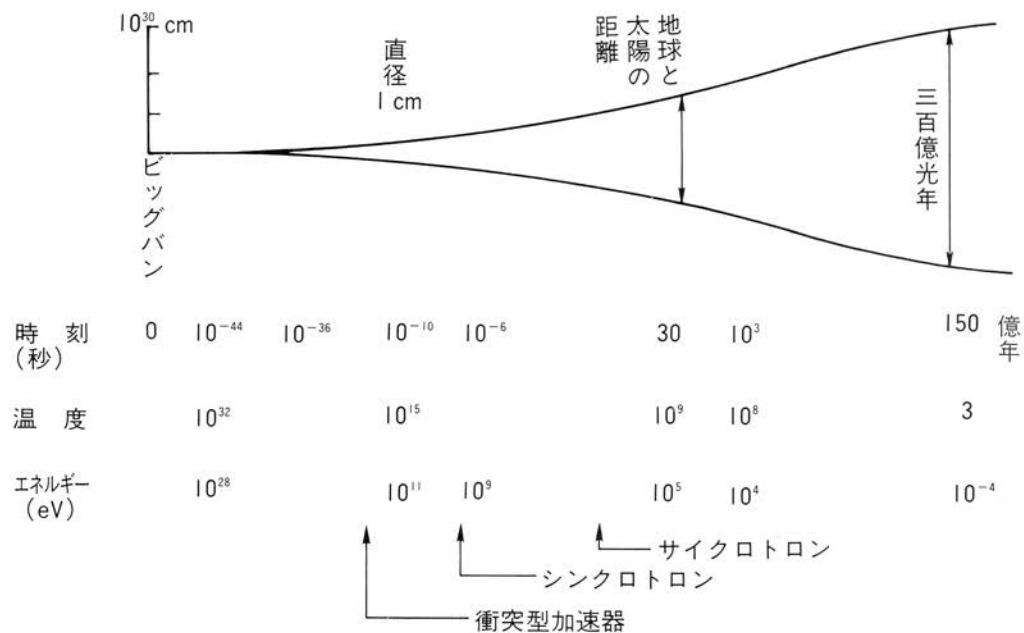
のリニアックで加速された電子と陽電子を交差させるものです。この場合には、一つのバンチは1回だけしか交差しないので、バンチがぐるぐる回っている加速器に比べてルミノシティが低い欠点があります。この加速器はすでにテスト運転に入っていますが、まだ衝突現象を確認していないようです。ヨーロッパの LEP (Large Electron Positron または Large Electron Project の略) は、1989年頃完成目標で建設が進んでいます。この加速器は直径が8.5 km もありますが、エネルギーはトリスタンの2倍程度です。電子の円形加速器では、電子の軌道が磁場中で曲げられるときの放射損失が大きいのでエネルギーを高くすることは容易ではありません。同じ軌道半径では、放射によるエネルギー損失はエネルギーの4乗に比例します。したがって放射損失を抑えるためには、軌道半径を大きくする以外に方法が無いのです。そういう点で、将来の電子・陽電子衝突型加速器は、円形加速器でなく、図18のような線形衝突器になると考えられています。次世代の加速器として望まれるのは、エネルギー 300 GeV 以上といわれていますから、今の技術では、全長が

30 km 程度になってしまいます。また、バンチが一度しか交差しませんから、ルミノシティを大きくするためにも数々の新技術が必要です。これらの諸問題を解決すれば、線形衝突型加速器が実現するでしょう。

これらのほかに、特殊な加速器として建設中の HERA があります。これは電子と陽子を衝突させるもので、かつてトリスタンもこれを目指したことがありました。これも1990年代の活躍が期待される加速器の一つです。

高エネルギー物理学  
宇宙の進化

は、物質の究極を解明する学問ですが、それは宇宙の進化や物質の形成と深い関係があります。宇宙はビッグバンと称する大爆発によって始まり、今日まで150億年経ったと考えられています。その間宇宙はほとんど光速で膨張しつづけたので、宇宙の半径は約150億光年になるわけです。宇宙の初期は、高温で高密度の状態であり、その中でクォーク、レプトンなどの物質が作られていったと考えられます (図19)。高エネルギー加速器を用いて実現できる状態は、このような宇宙初期の高温状態を局所的に実現したものになっています。言い換えれば、われ



物質      クォーク・スープ      電子・陽電子      ハドロン      核      銀河      地球

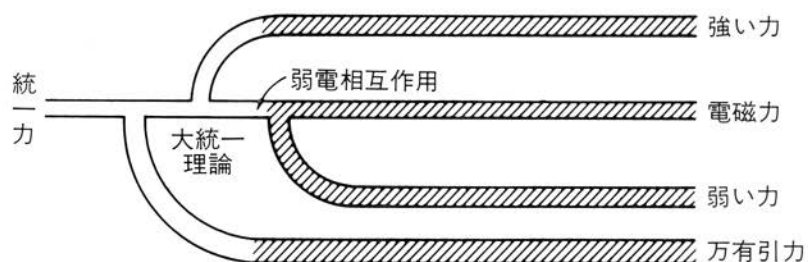


図19 宇宙の形成と高エネルギー物理

われは加速器を使って宇宙の歴史をさかのぼっているわけです。トリスタンのような衝突型加速器で到達できるのは、宇宙の直径が1 cmであった頃、ビッグバンのあと100億分の1秒を経た時点になります。したがって、この時点での物質や力の様子を調べることができるわけです。

現在、自然界には四つの力がありますが、これらはもともと一つであったと考えられて

います。すでにお話したように、弱い力と電磁気力は統一されることが示されていますが、さらに強い力や万有引力の統一へと研究者は力を注いでいます。これらが統一できることを示す実験は今のところ加速器ではできないので、加速器を用いない実験すなわち非加速器実験は今後いっそう重要になると思われます。

(終)