

— Ion Microscope Photograph —

“原子を直接目でみる顕微鏡写真”

(本文 18 ページ参照)

この見事な写真を撮影されたミュラー教授は、今年9月、「格子欠陥に関する国際会議」で来日されます。本号のこの写真は特に教授の御好意で提供していただきました。

原子論の発展

中学校・高等学校の理科教員のための講演

1959年6月22日理化学研究所講堂において

朝永振一郎

はじめに
ここに話しいたしますこと

とは、大体理科がご専門の皆様方のご存じのことばかりではないかと思
います。しかし、知っていることをもういっ
ぺん聞くというのもまんざら悪いことでもな
かろうと思しますので、皆様には少し程度が
低すぎるかも知れないお話をいたします。実
はこの間、高等学校の教科書を書きましたら、
程度が高すぎるということで少しひっかり
ましたので、ここではむしろ低すぎる方がよ
かろうと、そういうわけでございます。

原子論の発展という題を選びましたのは、
近頃原子力の利用と関係して原子ということ
ばが日常語になってまいりましたが、この原
子についての考え方、すなわち原子論がどう
いう経過をたどって発達してきたか、これが
物理学ばかりでなく、一般に自然科学の分野
で、どのように展開してきたかを振り返って
みるのが大切ではなかろうかと、そう考え
たからでございます。

原子論の発展の歴史的な跡をたどります
と、自然科学の方法のひとつのよい典型がみ
られると思いますので、ひとつの case history
と申しますか、そういう観点から非常に興味
があると思うのであります。つまり、実験と
理論とが互いに補いあって発展してゆくとい
う、そういう経過が、この歴史をたどること
によって非常によくわかります。

さて理論と申しまして、はじめは仮説と
いう段階があります。それから更に仮説が種
種の実験によって基礎づけられ、やがて仮説
の域を脱して、それが真理といえますか、自
然の実際の構造をあらわしているということ
が次第にはっきりして来る、その経過をこの
原子論発展の歴史の中に見てゆこうという
のであります。

原子論のおこり
原子論のおこりは非常に古
く、皆様もご承知のよう
に、すでにギリシャの哲学者は紀元前400年
ないし500年頃から、物質が原子からできて

いるという考え方をしていたのであります。しかしこれは勿論、自然科学ではないので、むしろ哲学の命題として、哲学のひとつの学派の考え方でありました。これは哲学上の学説でありますから勿論反対の学説もあったわけでありまして。ところが次第に自然科学の方法——つまり単に哲学者が頭の中で考えているのではなくて、自然を実際に観察する、あるいは場合によっては人工的に自然をいろいろ条件づけて、実験に訴えてたしかめてゆくという方法がとられるようになってきたのであります。自然科学の、実験に訴えてゆくという方法がとられるようになりましたのは、大正文芸復興の頃からだといわれています。もっとも、より古い時代からそういうことを唱えた人もありますが、それが自然科学という形で芽生えてきたのは 13 世紀頃からであるといつてよいと思います。しかしながらこの自然科学も、はじめのうちは、まだ原子——物質が原子的な構造をもっているかどうかということ——はむしろ中心の問題ではなくてもっと直接目に見えるような現象、例えば天体の動き方であるとか、あるいは光の性質等が中心になっていました。例えば力学の分野では、コペルニクス、ガリレイ、ケプラー、

ニュートン、といった代表的な自然科学者の名前がしられており、そして 17 世紀のニュートンの時代には早くも、天体の運動および地上での物体の運動を総括した、一般的な自然法則が体系づけられたのであります。しかしながら、物質が原子的な構造をもつかどうかということは、その時代でもある種の学説として唱えられたことはあります。けれども実際に実験を基礎にした本当の意味での自然科学的な学説としては、まだそれほどはっきりした形をとっていなかったのであります。

化学の発達と 元素の発見

ところがその後 18 世紀になり、化学が非常に発達してまいりました。そして化学者の方から原子論が唱えられるようになってきました。化学といつてもご存じのようにはじめは怪しげな、いわゆる錬金術で、鉛のような安いものから黄金をつくろうという大へん欲の深い動機から発達してきたものです。もっとも今では鉛も案外安くはないらしく、よく鉛のパイプなどを泥棒がもってゆきます。先だって東大で鉛の容器ごとウランも一しょに泥棒にもっていかれちゃった。あれはむしろ入れ物の鉛の方が欲しくてとっていったのだらうと思うのですが——金より

は安い。しかしこういう欲の深い試みがごとく失敗いたしまして、その結果わかったことが、すなわち元素の考え方でありました。

物質は化合物と元素に分かれていて、物質がいろいろ変化するように見えるのは、結局、元素が化合したり化合物が分解したりするためであるということがはっきりしてきたわけでありました。種々の元素が発見され、しかもこれらが化合したり化合物から分解して得られたりするときのいくつかの定量的な法則がはっきり確立されてまいりました。例えば定比例の法則とか、あるいは倍数比例の法則というような法則が見つかってまいりました。

定比例の法則

皆様方は理科の先生でいらっしゃるから定比例の法則とはどういうものか説明する必要はないかと存じますが、話の順序上ちょっといたします。元素が化合する場合に、勝手な割合では決して化合しない、いつも一定の割合で化合が起こる。しかもガスの場合では、体積にして非常に簡単な比例関係、例えば酸素と水素が化合して水になる場合には、酸素1と水素2という割合で化合する。もし混ぜ合わせの割合を1:2.3としておくと水素について

コンマ3の半端があり、そのコンマ3という半端分だけは化合できずに残ってしまう。これが定比例の法則であります。こういう事実を説明するために、化学者のほうから原子論がひとつの仮説として出されたのであります。つまり、いまの例でみられる1:2のような、一定でしかも簡単な割合で化学反応が起こるのは、これらの物質がすべてそれぞれある最小の単位から成り立っているからであると仮定して考えると、非常にうまく説明できる。そういう意味で、仮説としての原子論が唱えられるようになったのであります。

原子論、つまりそういう最小の単位から物質が構成さ

仮説の段階

れているという考えをつかうと定比例の法則が理解し易くなるわけを、ひとつのたとえで申し上げます。もし皆さんがダンスパーティーを開こうとすれば、男の量1と女の量1の割合でないとうまくダンスパーティーが成立いたしません。男子100人と女子100人を集めるとちょうど過不足なく踊れるのですが、例えば男子100人に女子130人となりますと、女子の30人はどうしても余ってしまってパートナーがない。まあ、壁の花というんですか、部屋の隅っこに腰かけてぼんやりし

ていなくてはならない。これはつまり男性も女性もそれ以上分けられない最小の単位であるからなのでありまして、例えば、ちょっと失礼ではありますが女性の方は最小の単位ではないとすれば、余った 30 人の女性をもっと細かく分けまして 100 等分すれば、それは適当にくっつけられるわけです。ちょうどパンにジャムをつけるときですね、パン 100 切れでジャムパンをつくろうというときに、ジャムが多すぎても少なすぎてもできます。多すぎれば余った分をべたべたつけばよいし、足りなければあちこちから少しづつつけずって。つまりジャムが最小不可分の単位からできていないから、そういう勝手なことができるのであります。定比例の法則にたちかえって、酸素が最小不可分の酸素の原子からできており、水素も最小不可分の水素の原子からできていて、酸素原子 1 つに水素原子 2 つという組み方で、3 つひと組みになるようなダンスパーティーを開いて、そして水ができるのだと考えれば、これは非常に簡単明瞭に理解できるわけでありまして。しかしながらこれは物質が原子からできているという証拠としてはまだ不十分であります。一応すべての証拠が揃うまえに、これこれのようになっていると

いうふうに仮りに考える段階が、仮説の段階なのでありまして、定比例の法則からだけで原子論、すなわち物質の原子的構造を結論したばあいは、これがまだ仮説にすぎないとみなさなくてははいけないわけです。

仮説を裏づけるた
くさんの証拠探し

しかしその仮説から、もしそうであるなら他のどうという点で、どうい

う実験事実、どうい現象が現われてくるであろうかということ逆を理論的に導き、そしてそれを実験に結びつける。つまり始めの段階では帰納であります、帰納からひとつの仮説をたて、今度はその仮説から演繹的に現象を探しだし、それを実験でしらべます。そしてそれが合わなかったら結局その仮説は間違いだということになりますし、それが合えば仮説は大分確からしくなるといいます。そういう証拠をだんだん、たくさん揃えていって、証拠が非常にたくさん並べられますと、これが仮説ではなくて真実であるというふうに考えていくわけでありまして。これはたとえばなにか犯罪が行なわれて、犯人をさがすという時に、まず刑事がカンであいつは怪しいという目星をつけて、その男がもし犯人であったらと仮定して、こういう事をしていて、そ

の時にどこにいたであろう、誰と会ったであろうなどと、いろいろ証拠を集めてくる。そしてそれが途中で白になることもありましょう。けれども、いよいよ証拠が揃うと黒だときまる。そんなやり方で自然科学も進歩していくものです。

原子論はまず化学者の方から仮説として提唱され、その仮説にもとづいて多くの現象をみていくと、今度はその仮説にしたがった考え方をした方が非常に都合のよい現象が他にもあるということが次第にわかってまいりました。

その著しい例が、結晶であります。結晶のばあい

結晶では、ご承知のように、ある種の鉱物が一定の決まった形をとり、決して勝手気ままな形にならないという、よく知られている現象がみられるのであります。これも物質が最小の単位からできていると考えると、非常に都合がよいわけであります。先に、ジャムを例にとりましたが、ジャムのようなものは、どんな形でも、勝手にとれるわけであります。ところが物質が何か最小の単位からできているとすれば、それが集まって、積み重ってできた大きな物体では、ある特別な形をとるであろうことが

考えられるのであります。最小の単位がない連続体であるとすれば、一定の形が現われるのが当然というわけにはまいりません。そういう決まった形しかとらないというのが、非常に理解しにくいということになるわけあります。そこから次に結晶が実際そういう最小単位からできているものであるかどうかをたしかめる段階にうつります。つまり、物理学者は、仮説として結晶がそういう構造をもっているとするとうどうい現象が起こるであろうかということを考えて、その実験をやり、それを確かめる行き方をするわけあります。

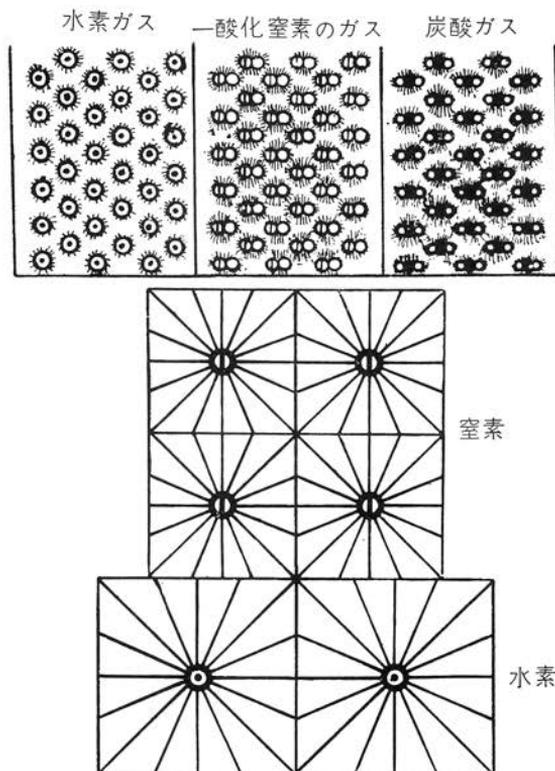
この辺から幻灯に入ります
そして今日まで
が、これからのお話のプログラムをちょっと申し上げますと、まず、これこれのような事実から原子の存在というのが、だんだんに仮説の域を脱して真理である、真実であると考えられるようになったということ。その次にこの原子の内部構造はどうなっているか、——原子は最小不可分の単位であると申しましたが、やはり内部に構造があるということがだんだんにわかってきた。つまり中心に、原子核というプラスの電気をもった粒子があり、マイナスの電気をも

った電子がそのまわりを廻っているというような構造をもっていることがわかってきた。それから更に原子核の中に構造があるということがわかってきて、ついに原子力の発見にまで到達したということ、これからスライドをごらんに入れながらお話ししたいと存じます。



ドルトンの原子
記号と最近の分
子模型

第1図にごらんに入れますのは、ドルトンの本にありますが原子の記号であります。先ほど原子論は化学者によって唱えられたと申しましたが、18世紀の終りごろから19世紀の初めにかけて、イギリスのドルトンという化学者が、化学の中に原子論を持ち込んだ、そのときつけた記号であります。丸の中に点があって蛇の目のようなのは、水素の原子をあらわします。丸の中に棒がひいてありますのは窒素です。ただの丸は酸素、そして丸がぬりつぶしてあるのが炭素。これらのまわりにたくさんの線がのびているのは原子のまわりになにかある種の雰囲気があるという、今の言葉で、力の場と

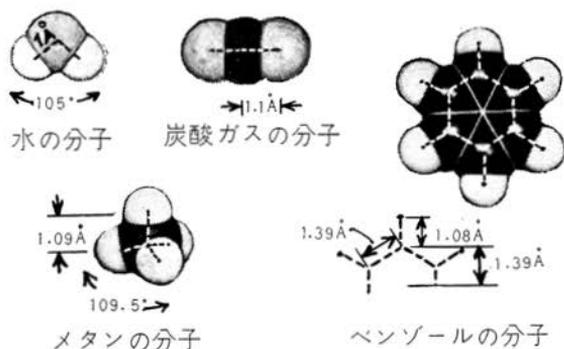


第1図 ドルトンの考えた原子記号の例

でも申すものです。ドルトンは水素原子に蛇の目のような模様がついていると主張したのではなくて、単に記号です。今なら H とかくのに相当する。炭酸ガス(二酸化炭素)はご承知のように、炭素1と酸素2の割合で化合してできます。それをこういうふう(右上)に考えました。真中に炭素があってその両脇に酸素がくっついている。これが炭酸ガスの

分子であると考え。つまり炭酸ガスの最小の単位であります。水素ガス（左上）は今の考えとはちょっと違います。今の考えでは、これらが2つくっついた水素の分子がガスの単位になっています。これはドルトンの本にあるのですが、もっと新しい近頃の本にある絵をひとつごらんに入れませう。

第2図で上段中央が炭酸ガスの分子。今の知識でわかっているのは、炭酸ガスの分子はやはりドルトンの本にありますように真中に炭素の原子があって、両脇に酸素原子が2つくっついている。これが今の知識なのですが、今の知識では、こういうふうにくっついているという以外に、寸法もわかっています。中心から中心までの距離が1億分の1.1 cm ということがわかっています。その左の水はやはりこれと似て酸素1個と水素2個がくっついておりますけれど、水の場合は一直線上に並ばず、三角形になっている。その角度が105度。右端はベンゼン。ベンゼンは炭素が6つ、正六角形に並んでおりまして、そこに6つの水素がくっついている。ここでは、原子をこういう球、ピンポン球かたまつきの球のように書いてありますが、実は勿論もっと境界のボヤけたものでありまし



第2図 最近の分子模型

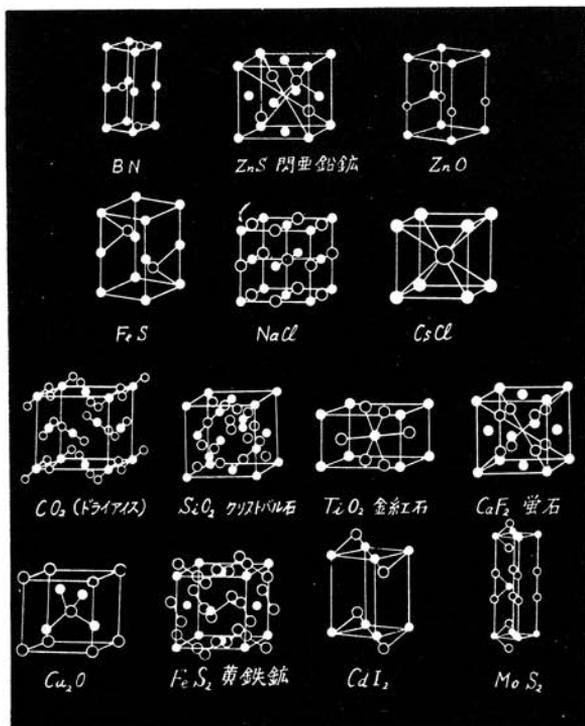
黒い部分は炭素原子、白い部分は水素原子、灰色の部分は酸素原子をあらわしている。今日では分子を組みたてている原子の中心間距離ばかりでなく、中心と中心を結ぶ方向の間の角度もわかっている。1 Å は 1 cm の1億分の1。

て、これを少しピントをぼかして写してみると、本当らしくなる。左下はメタンです。炭素が真中であって、水素が4つくっついている。炭素と水素の中心間の寸法が1億分の1.09 cm。そういうことがわかっています。

先ほど結晶は原子が規則正しく積み重なったものだと言いましたが、つぎのスライドでは豆細工のように表わしてあります。

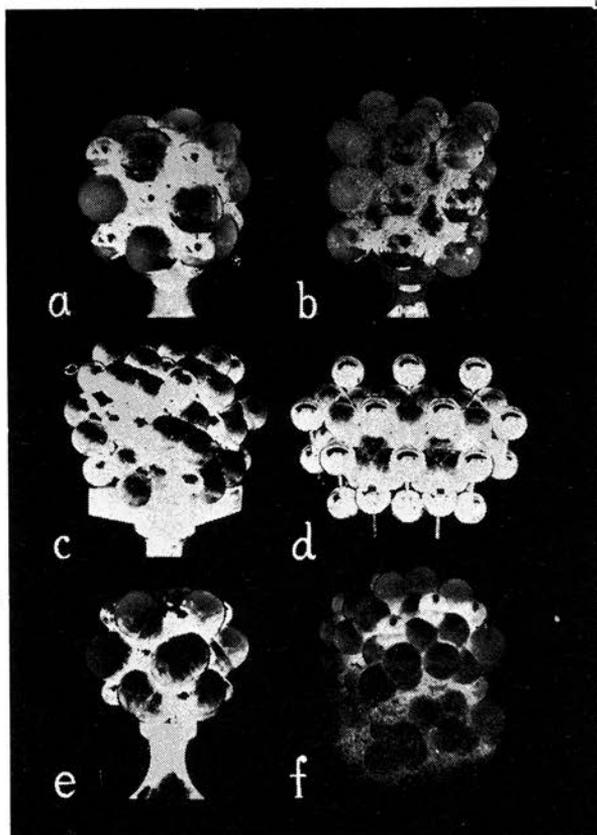
結晶の模型

第3図で、二段目中央にありますのは食塩の結晶で、ナトリウムと塩素が代わりばんこに並んでいる。これが積み重って、食塩は立方体に結晶



← 第3図 いろいろな結晶単位の模型 I (格子型)

丸印はそれぞれ原子あるいはイオンをあらわしている。これらの粒子が規則的に並んで図のような結晶単位をつくり、これがさらによりかえされて結晶が構成される。たとえば 1g の食塩 (図の2段目中央 NaCl) の立方体結晶を考えると、黒丸 (塩素イオン)、白丸 (ナトリウムイオン) がそれぞれ2千万個以上縦、横、高さの方向に交互に並んでいることになる。



→ 第4図 結晶単位の模型 II

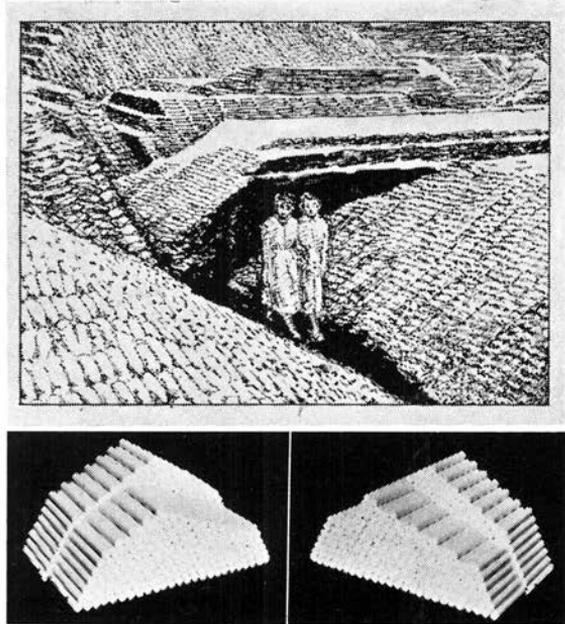
格子型より実際に近い模型である。それぞれの下部にあるのは支えの台であって球の群がり結晶の単位をあらわす。

a は食塩 b は塩化セシウム c は方解石
d は霏石 e は黄鉄鉱 f は硬石膏

するわけです。その他いろいろ複雑な鉱物がございます。第3図では豆細工のように割合すきまだけであります。実はまえの分子の絵と同じようにもっとぎっしりつまったもので、次のスライドの絵の方が実際に近いのです。

第4図はたまを積んで作った模型ですが、aが食塩です。塩素とナトリウムがこういうふうにびっしりつまっている。たがいちがいにつまっている。そのほかいろいろ複雑な結晶がございます。こういう最小の単位のあるものが積み重なると、規則正しい形になるということをしめす面白い写真を次にひとつご覧に入れましょう。

第5図が結晶の説明になるのです。ここに2人美人がおりますが、これは別に今の話とは関係ないので、ただこれは原子の世界ではないということを表わしている。ここに2つの結晶のようなものがありますが、これは実はビールのビンが積んである。ビール会社の裏にビールのビンが積んであるところですが、こういうきれいな“結晶”が出来ていません。これは例えば泥をつんだり、先ほどのジャムをつんだって、こんな規則正しい恰好はできません。そういうわけで、結晶が原子論の

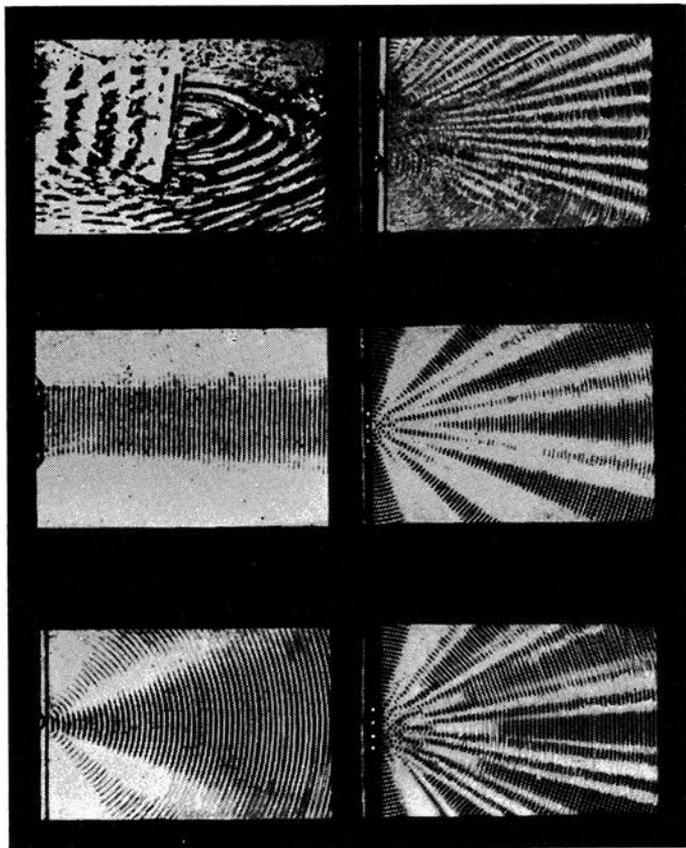


第5図 ビールびんの山(下図写真のようにチョークを積んでも、簡単にデモンストレーションができる)

ひとつの有力な根拠になるわけでありませう。しかしながら、これは仮説でありまから、実際にこうなっているとすれば、では一体どういう現象が起きるかということを考え、つまり演繹的に考えて、次に実験的に実証するということが必要になってまいります。それは皆さんご承知のラウエの研究であります。

波の干渉と規則的な模様

ラウエの研究の説明などここでなくてもお判りだと思っております。つまり波の



第6図 水の波の干渉の模様

左上は水の波の実物写真。

左中は穴が広いときにほぼ直進することを示す。

(左上のように1つの穴から円形の波がでている写真
を穴の広さにわたってずらして重ねたもの)

左下は穴がせまい場合。

右はせまい穴が2つ、3つ、4つの場合。

干渉をつかった実験です。第6図は普通の水の波ですが、左側に板があって穴があいています。その穴から円形の波がでてくる。右上のように穴が2つありますと両方から円形の波がでて、干渉が起こる、その下は穴が3つある場合です。それから4つの場合。左上は穴がひとつの場合でこれは干渉が起こらない。穴が2つ以上あると波の干渉が起こりまして、ある方向に非常に強い波がくる。白く一様に光っている方向には波がこない。つまり波が干渉で弱めあって消えてしまったところです。白と黒で細かい縞になっているところが波の残っている部分で、水の高低によって明暗の縞に見えるのです。あとで電波の干渉をごらんに入れますが*——ごらんに入るといっても電波は見えないので、この2つの穴から電波を出しまして、そこへアンテナを持ってずっと歩きますと、音がしたり、しなかったりする。

* 講演のあとで、電波の干渉のデモンストレーションがおこなわれた。

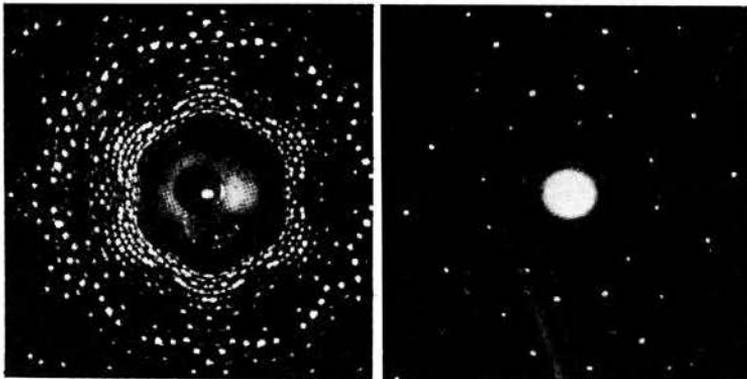
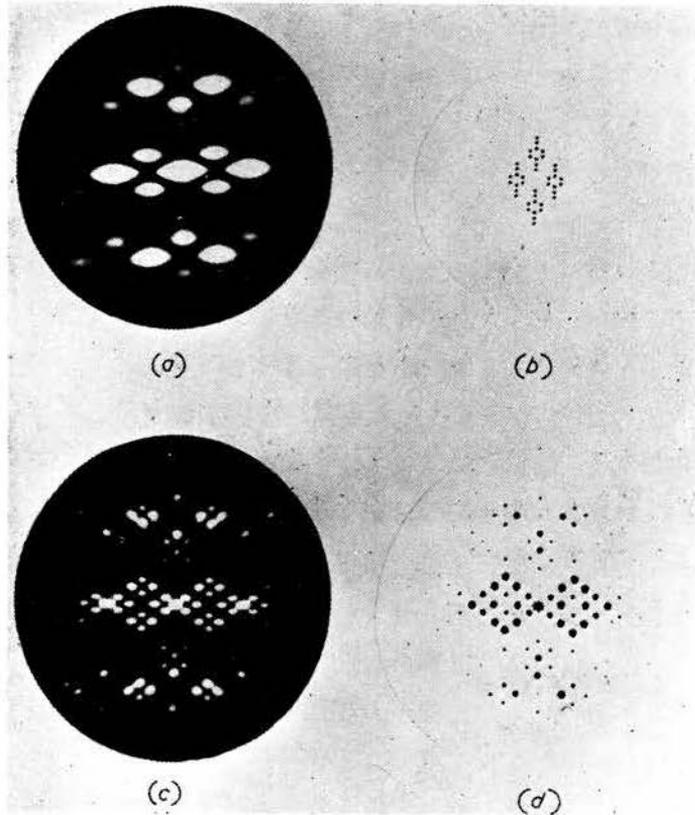
第7図 規則的な模様と光の干渉 →

(b) は透明な板にかかれた模様（模様単位4つ）。

(c) は (b) に光をあててできた干渉図（ブラッグの多孔式ピンホールカメラをつかってうつしたものとる）。

(a) は (b) の模様単位1つについてとった干渉図。

(d) は理論的に求めてえがいたもの。



← 第8図 ラウエのX線干渉

左はカリ霞石の結晶。右は鉄。結晶に特定な方向からX線をあてると、結晶格子に従ってX線の干渉がおこり、強めあったところは斑点状に分布して写真にうつる。そして対称性のある見事な図ができる。この規則性は結晶内の原子の規則的配列によるものである。

縞の模様が出てくるわけです。これを光の波でやりますと、写真の乾板をおけば、波のくるところ、こないところが交互にできて、模様がでるわけです。第7図が光の干渉の写真であります。

これはガラスの板の上に模様をかきまして——規則正しくくり返す模様でないといけないのですが——それに光を通しますと、そのうしろにこういうふうな明暗の模様ができる、そういう例であります。勿論ガラス板にかく模様がちがえば、この干渉の模様がちがうわけです。逆に干渉の模様からもとの模様を推定することもできます。

ラウエのX線干渉 による結晶研究

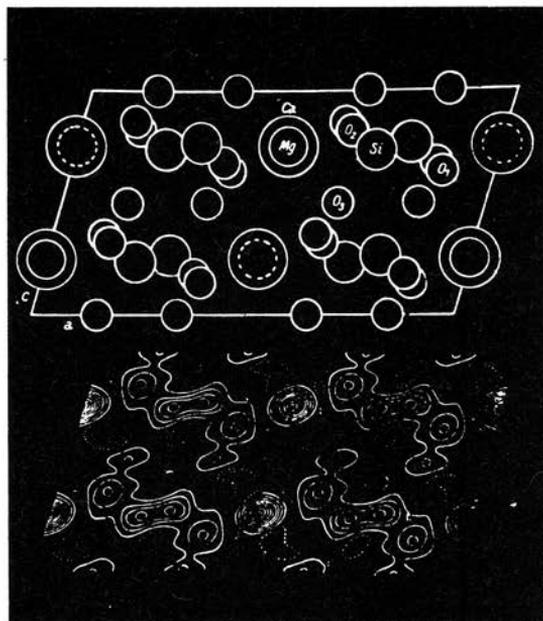
結晶が、もしほんとうに原子が規則正しく積み重なったものであるとすれば、適当な波をつかって、それを実証することができるであろう、ということ考えたのがラウエであります。ここで適当な波と申しましたのは、つまりX線であります。原子の積み重なった模様というのは非常に細かいですから、したがって波長の短い波を使わなくてはいけないので、X線を使ったわけです。次に結晶を通してその背後で写真をとったX線の干渉の模様——ラウエがそういう演繹的

な考え方で実験した結果を次にごらんに入れます。

第8図がそれです。こういうきれいな模様が実際にでてまいりました。この干渉の模様から逆に、結晶の構造を推定することができるわけです。次にこういう方法で結晶構造をしらべた結果をごらんに入れます。

X線の干渉模様から 結晶内の原子の位置
や電子密度がわかる

第9図は透輝石という石です。そのラウエの干渉の模様から、こ



第9図 透輝石 $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$ の結晶内での原子配列と電子密度 (上は原子配列, 下は電子の等密度線)

いう構造をもっていることがわかる。まずマグネシウムがあって、そのうしろにカルシウムがあり、酸素2つ、シリコン2つ、酸素2つ、さらに酸素2つ、とこれが繰返す。ラウエのX線の斑点からは、原子の並び方だけでなく、原子のある場所における電子の密度がわかるのであります。この下の雲形の絵は同じ鉱物であります、電子の密度を等密度線であらわしたもので、非常に密になっている部分は、カルシウムとマグネシウムが2つまうしろに重なっている結果、電子が非常にたくさんあるように見えるわけです。

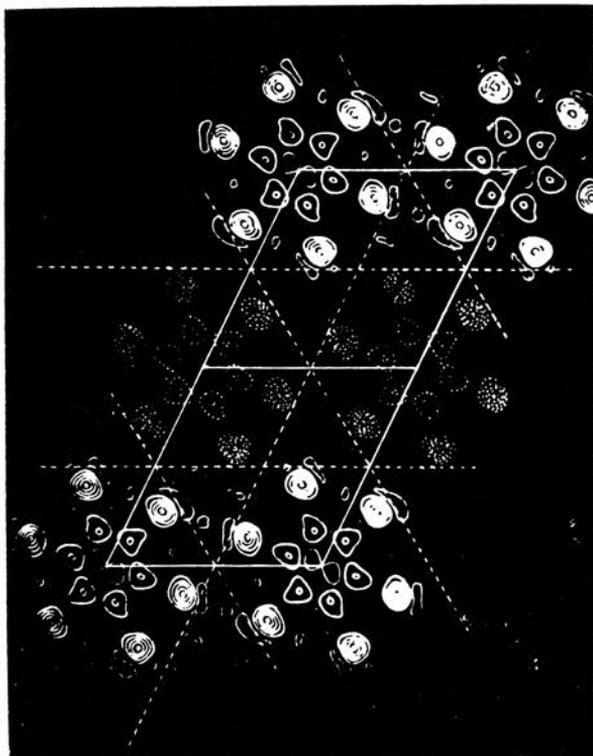
ベンゼンの構造 先ほどベンゼンが6角にはたしかに6角
 になっている
 になっている
 ンゼンそのものではないの
 ですが、ベンゼンの水素をすっかり塩素でおきかえた六塩化ベンゼンというもの、これは結晶いたしますので、その結晶構造をしらべましたところ、第10図のように、実際6角になっている。等密度線が二重にまいているのが炭素です。幾重にも強く巻いているのが塩素。塩素の方が炭素より原子番号が大きいので、従って電子の密度が大きいわけです。第11図は、これをひとつだけ大きくいたしまして、実際亀甲形の構造をごらんに入れたわけです。

入れたわけです。

こういう実験をやり、実際に6角に並んでいるということ、それから距離がどれだけあるということ、さらに密度——電子の密度がどれだけであるかということがこの実験でわかるわけであります。

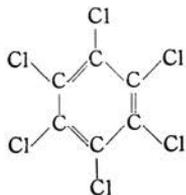
ベンゼンの構造 ベンゼンが6角になっている
 は化学者ケクレ
 によってすでに
 推定されていた
 ということ、こういう
 実験をやる前に、すでに化
 学者、有機化学の元祖とい

われるケクレという人が唱えていたのでありますが、どういう推論でベンゼンの構造を推定したかと申しますと、どうせ化学者のやる仕事ですから、結局、薬をまぜる、化合させるとか、分解するというような実験、研究をやったわけでした、およそこういう幾何学的な空間的なものとは縁のない実験であります。それにもかかわらず、このように6角に並んでいるということを推定したことは、私共、化学者の推理の力がいかに大きなものと感心するのでございます。物理学者はもう少し頭が悪くて、第8図のような写真ができ、写真から第11図のようなものを作るまでは、なかなか、そのような推論はだせないのです。ところでケクレはどうしたかと申します



第 11 図 ヘキサクロルベンゼン (六塩化ベンゼン) →
1 分子の電子密度

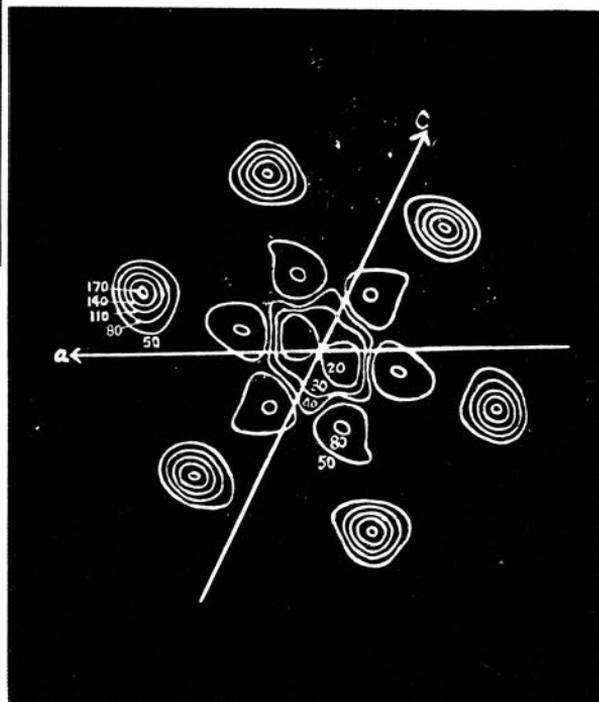
これは第 10 図の一部を拡大したもので数字は電子密度の程度をあらわす。



左の構造式と見くらべるとまことにおもしろい。

← 第 10 図 ヘキサクロルベンゼン (六塩化ベンゼン)
 C_6Cl_6 の電子密度

等密度線が二重にまわっているところは塩素原子，幾重にもまわっているところは炭素原子のあることを意味する。塩素も炭素も 1 分子内でほぼ正六角形に並んでいることがわかる。しかもそれらの分子相互がさらに規則的な並び方をしている。

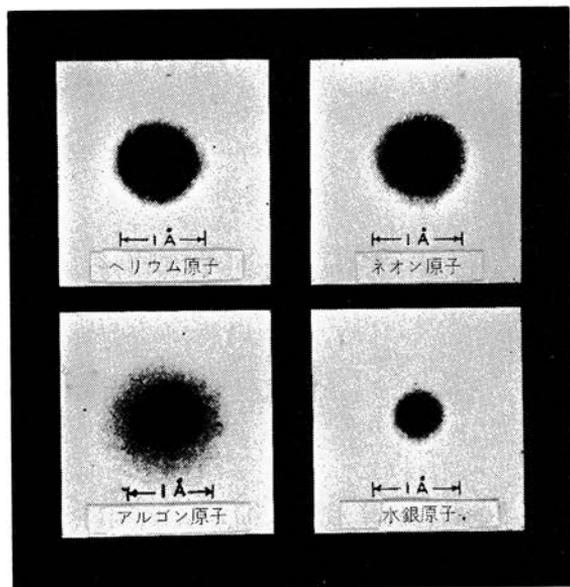


と、ベンゼンをまず分析して炭素 6, 水素 6 ということを知りました。そのあとどうしてこういう 6 角という結論を出したかといえますと、ベンゼン分子の 6 つの水素をいろいろ他の元素と置換いたします。そこでたとえば塩素と入れかわる反応をやらせると 6 つの水素がみんな 6 つとも同じ性質をもっている。特にどの水素が離れ易いとか、他のもので置き換えられ易いとか、そういう性質がなく、6 つとも全部同じ性質をもっていることがわかりました。そうしますと、それを説明するのに 6 つの炭素がぐるっと輪になるように並んでいると都合がよいことになります。例えば、これが一直線に 6 つ並んでいたとしますと、端の水素とまんなかの水素とでは、当然性質が違ふであります。物事に端がありますと、端とまんなかの性質が違ふのは、これは自然であります。この講堂も前と後に端がありますが、大分性質がちがひまして、後の方は離れ易い、いやになったら、そっと離れればよろしい(笑声)。前の方はちよっとそういうわけにまいりません。ですから物事に端がありますと、そういう性質のちがひがどうしてもでてくる。そういうわけで、ベンゼンには端がないはずである。端が

ないとすればぐるっとまるくなっている。6 つのものがまるく並べば 6 角になる。こういうふうな推理をへて結論を出した。それを逆に今度は、そうであれば、こうなるはずだというふうに考えて新しい証拠を出す。そうして実際 X 線の研究により、原子というものが、かなり実在するものらしくなり、単に定比例の法則の時代に考えておりましたようなものでなくて、空間的な配置までがはっきりわかってきたわけであります。そればかりか、その大きさまで、だんだんにわかってまいりまして、結晶だけでなくガス等におきましても、その原子の大きさ、およびその原子の中の電子の密度分布の様子が実験的にわかるようになりました。

第 12 図が代表的ないくつかの原子の中の電子の密度分布をあらわしたもので、これは直接写真にとったものではありません。X 線の散乱の実験から逆に理論的に密度分布がこうなっているということを追いかけて、それを、濃淡にあらわしたもので、

上左からヘリウム、ネオン、下左からアルゴン、水銀。矢印間の大きさが 1 億分の 1 cm、つまり 1 \AA (オングストローム)。こういうふ



第12図 原子内の電子密度

うにぼやけたものであります。しかしこれらの実験は、いずれもまだまだ間接的でありまして、X線のラウエのスポット、ラウエの模様というものは決して、そのままで結晶の中の並び方のかげがうつつているわけではないのです。あのラウエの模様から結晶の中の並び方を出しますには、大変な計算が必要であります。理論と計算が必要であります。ですからもっと直接に原子を見る方法はなかろうか？ ちょっと考えますと、電子顕微鏡というのが発達いたしまして、見られるかもしれな

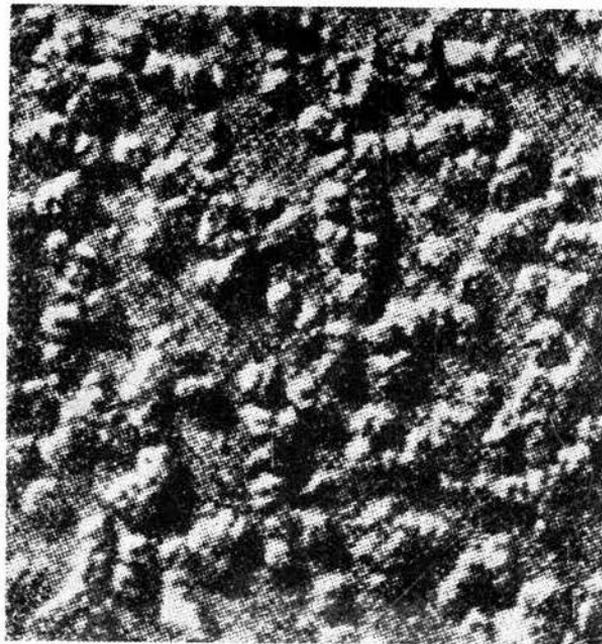
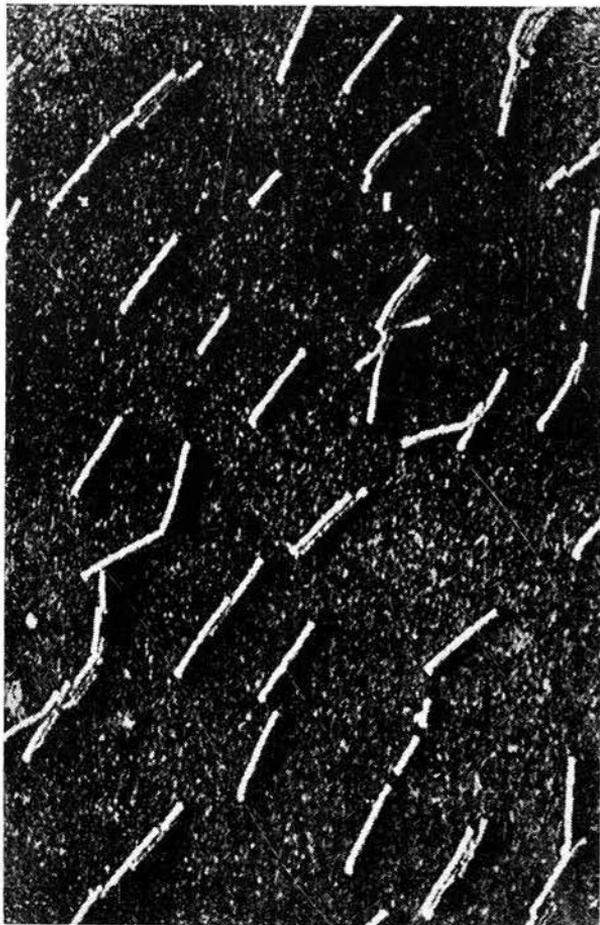
いというわけですが、なかなかそこまではいっておりません。ただ分子の特別に大きいもの、つまり蛋白質の分子のように非常に大きな分子は電子顕微鏡で見ることが出来ます。

巨大な分子なら 第13図がそうですが、非
電子顕微鏡で直 常に汚い写真でネズミのフ
接見える ンみたいなのがあります

が、これがヘモシアニンという蛋白質の分子です。これは電子顕微鏡の技術がまだあんまり発達していないころの写真でありまして、もっとあとになりますと、こういう蛋白質の分子をとる方法は非常に進歩しました。

第14図はもっと新しいきれいな写真ですが、これは蛋白質と申しまして、タバコのモザイク病のウィルスです。これは一種の蛋白質です。こういう恰好をしている。しかしながらこれは非常に大きな分子でありまして、普通の分子はこんなのより、はるかに小さいので、とても電子顕微鏡ではうつらない。ところが戦時中か、戦争ちょっと前でありましたか、ドイツのミュラーという人が非常に簡単な原理で、ある意味では原子を眼で見られるような顕微鏡を発明いたしました。その原理をごらんにいれます。

第13図 ヘモシアニン(蛋白質の一種)の分子の電子
鏡顕頭写真 ×43,000



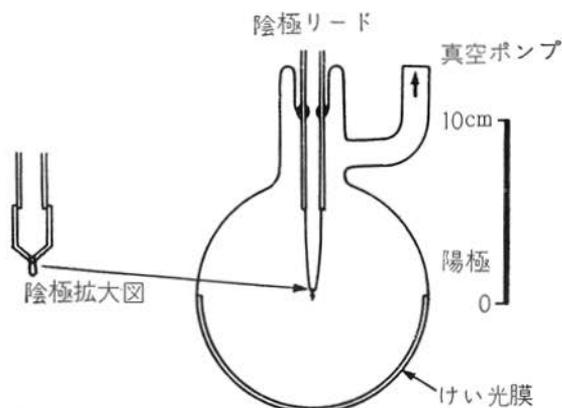
← 第14図 タバコモザイクウィルスの電子顕微鏡写真
×35,000 幅 15 m μ , 長さ 約 300 m μ

ウィルスはいずれも内部は遺伝に關与する核酸という物質であり、それを包むように外側に蛋白質の殻をもっている。ある意味ではこのひとつひとつが巨大分子であるともいえる。

ミュラーの冷陰極放射電子顕微鏡では、ある意味で直接原子を眼で見られる

この原理は非常に簡単
 として、第 15 図のよ
 うなガラスのフラスコ
 をつかいます。右上矢

印のところは真空ポンプにつないでおき、中は真空にしておきます。陰極の先端の真中に金属の針が入っており、この針の頭が非常に細くみがいてあります。フラスコの底側半分の内面に螢光膜が張ってあります。右側に 10 cm のスケールが書いてありますが、フラスコの直径は 10 cm 余り。針の頭の曲率半径が大体 10 万分の 1 cm 位です。そして針を陰極にして、フラスコの下面を陽極にし、数千ボルトの電圧をかけます。そうしますと針から電子がひっぱり出されて陽極にむかってとび出して来ます。勿論これは真空中ですからとび出した電子は直進します。もしこの針の頭が原子構造を持っておりますと、つまり原子からできておきますと、そこから出る電子も、その原子構造に従ってムラがある、そして陽極にその濃淡のムラができるはずで、それがうつるだろうというわけです。その倍率は、針の曲率半径とこのフラスコの半径との比になる。これは非常に簡単な話です。勿論技術的にはなかなか難しいと思



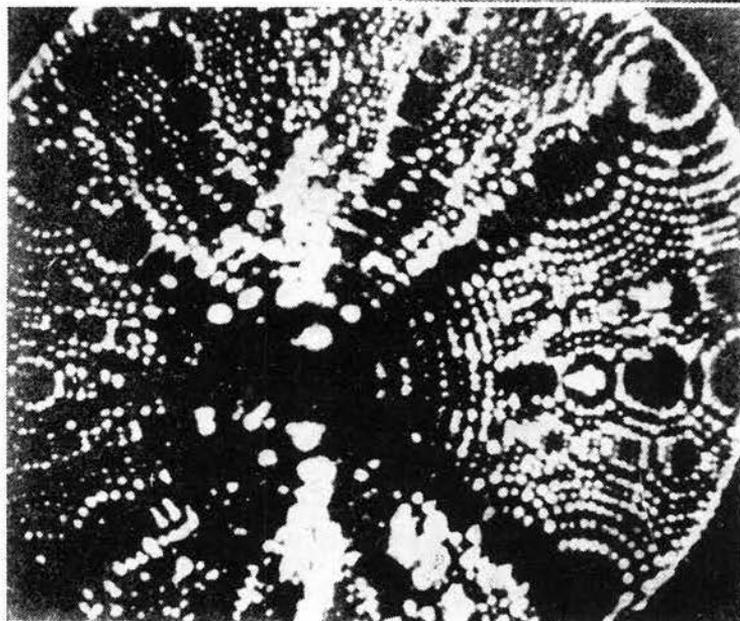
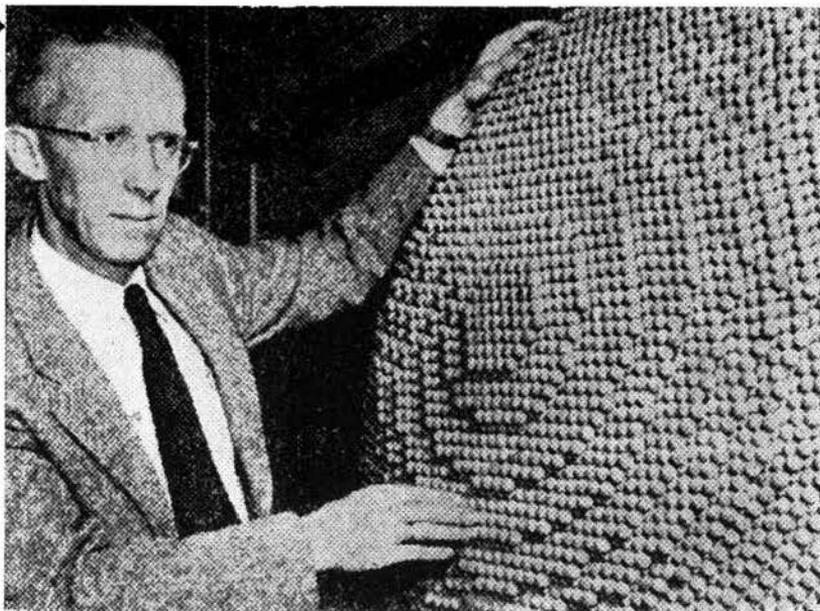
第 15 図 ミュラーの冷陰極放射電子顕微鏡

ますが、こういう簡単な原理の顕微鏡をミュラーが考えたのです。そしてこの針の頭が、一体、原子からできているかどうかをみようというわけです。

第 16 図は、ミュラーという先生ですが、こゝに持っているのは針の頭の模型であります。針の頭は、モリブデンがよく使われますが、結晶していて、それをまるく磨くところいうふうになるだろうというのです。これは勿論模型でありまして——模型というとは大体実物より小さいのですがこの模型は実物より大きい——この表面のひとつひとつの球つまり原子からそれぞれ電子がとび出してまわりますと、まわりの螢光膜に、かげがうつる。この針の頭の曲率半径と螢光膜の張られ

第16図 ミュラー教授と金属の
針の頭の模型

よく磨かれた針の先端にはこの
ように原子——模型の小球——が
規則的に並んでいると考えられ
る。



第17図 金属(モリブデン)の針
の頭の影法師

ミュラーの冷陰極放射電子顕微鏡では、
陰極の針の先端の原子配列に従って、こ
のように規則的な原子の影法師を蛍光膜
上に直接見られる。この模様は金属の種
類などにより多少違ってくる。

うど高い空を飛行機が飛ぶと、あとに飛行機雲ができるように、こういう電気をもった粒子が霧箱の蒸気中を飛ぶと、その飛んだあとに雲が出来るという事実を利用しております。

第 18 図で下の一直線のものは α 粒子の走った道です。上の短かく曲がっているのは陰極線つまりエレクトロン——電子——の飛んだ道で、電子は目方が軽いためにこういうふうに、途中でふらふらと曲がるわけですが、 α 線の方は、原子核で重いものですから、はっきり一直線に走ります。

右のは宇宙線の中の、やはり電子ですが非常にスピードが大きいものですから、このように曲らないで真直に走ります。

ラザフォードは原子核をこわして人工的に元素を変えられることを発見した

第 19 図もひとつの代表的なものです。下の方から α 線がとび出しきていている写真です。

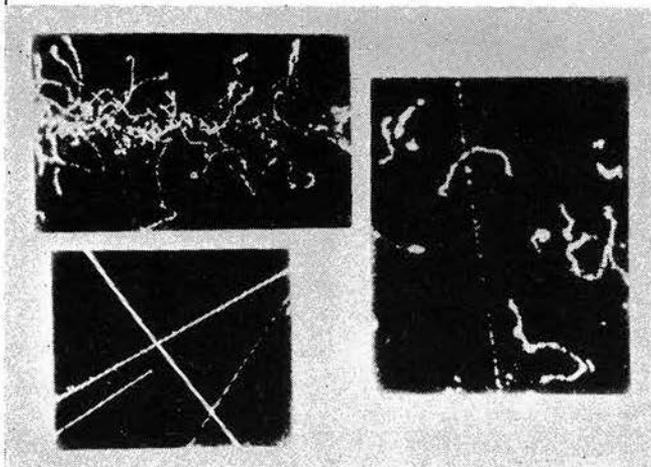
右の写真は特に有名なもので、途中で妙な二又に分れているのは α 線がここで窒素の原子核に衝突して、それをこわし、水素と酸素に変えたためです。ラザフォードのとった有名な写真です。こういう実験で、原子核をこわすとこのように元素が変わる、ということが

わかったわけです。こういうふうには原子の外空間に、とび出してきた粒子は直接眼に見えなくても、その飛んだ道をしらべることができるわけではありますが、それでは原子の中でそれらが、どういうふうに動いているかということになりますと、こういう実験では見られないので、ただ理論的な推論からある種の結論が出ております。

第 20 図はしょっちゅう出てくる図で、ご存じと思うのですが、上は水素の原子

で、真中に原子核がありまして、外側に電子がぐるぐる廻っている。中段左がヘリウムです。ヘリウムは 2 個の電子がまわっている。その右リチウムは真中にヘリウムに似たものがあって、その外を大きく太陽系におけるほうき星のように 3 番目の電子が廻っています。下左がネオン、下右はナトリウムです。この一番外側の電子の軌道の大きさがいわゆる原子の大きさといわれます。先に 1 億分の 1 cm と申しましたのは、この軌道の大きさであります。原子はこのような太陽系に似た構造をもっていて、核と電子の大きさはどの位かと申しますと、それぞれ更に原子全体の大きさの 10 万分の 1 程度の大きさだという

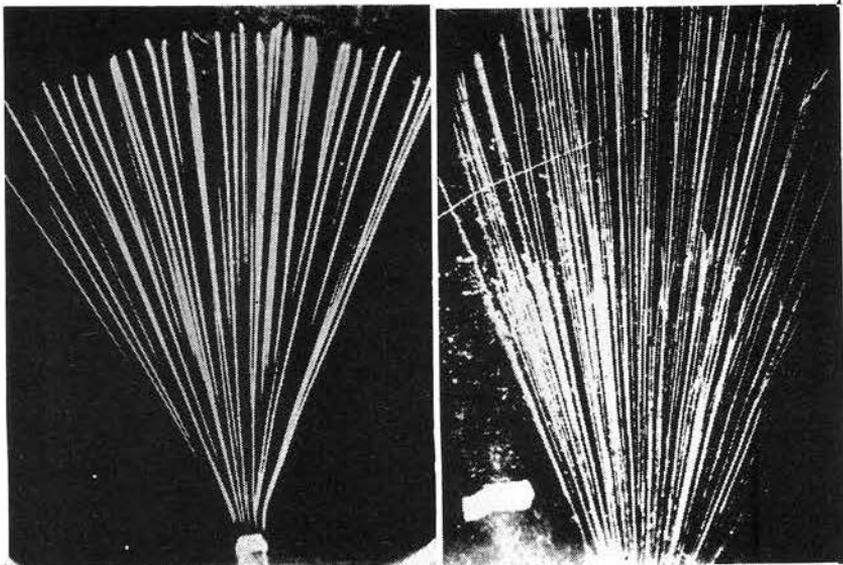
第18図 霧箱写真でとらえた荷電粒子の飛跡

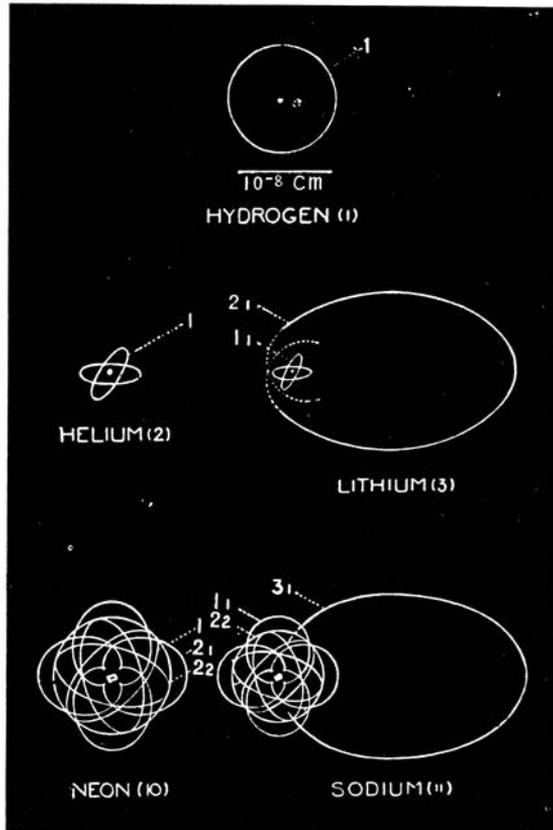


左上は β 線——これは電子の流れであり軽いのでふらふらしている。左下は α 線——飛跡は直線的にはっきりしている。右の写真のまっすぐな飛跡は宇宙線中の β 線——これは速度がきわめて大きいので一直線状に走っている。

第19図 α 線の飛跡 →

線源（放射性物質）からでた α 線は霧箱中を直進する。左の写真の下部に小さく見えているのが線源。右の写真は α 線が窒素の原子核をこわしているところで、横向きの細い線はその際とび出した水素の原子核（陽子）の飛跡。





第20図 原子の電子軌道

数字は軌道の番号，括弧内の数字は電子の合計数（原子番号と同じ）をあらわす。

ことが判っております。

原子の中はスキマだらけで大部分は真空である
ここで気がつくことは、原子とは実にスキマだらけなものだということです。

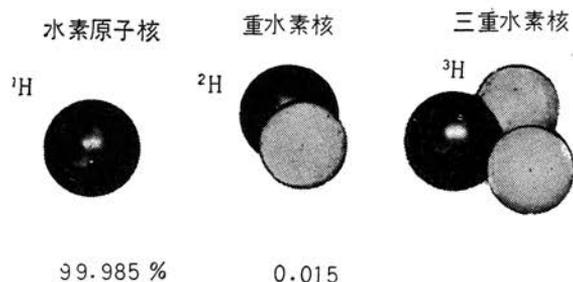
原子全体が1億分の1cmであります。

すけれど、核と、核のまわりを廻っておりまして電子の大きさは、そのまた10万分の1で、あとは全部なんにもない、スキマあるいは真空であります。どれ位スキマがあるかということを知っていただくために、原子全体を後樂園の野球場位の大きさと仮定しますと、真中のピッチャーのいるところに核があるわけですが、それが大体バチンコのたま程度です。まわりの1塁、2塁、3塁それから外野の方にこういう電子に相当するものがあるとしますと、それが大体小豆の粒ぐらい。あとは全部地面でなにもない。この話をしますとよくいわれるのですが……、われわれのからだも同じように原子からできているのですから、殆んど全部がスキマ、真空であります。われわれのからだも、例えば力道山の如くがっちりした人でもやっぱり大部分は真空である。それからクレオパトラのような美人も大部分は真空である。そういうことをいいますと「色即是空」っていうのはそのことか（笑声）。まあ大体そういうもので、ビールの泡よりももっと実質のないもの、われわれの身体と限らずすべてのものがそうなのです。

原子核の中には 次に電子についていえば、
陽子と中性子が ヘリウムの中の電子も水素
つまっている の中の電子もナトリウムの
中の電子も皆同じで、別にちがいはなく、た
だ数が違うだけです。ところが核はそれぞれ
違っておりますので、核には実にたくさんの
種類があります。そこで次の問題は核にたく
さんの違った種類があるのは核がなにかもっ
と簡単な粒子からできているのではなかろう
かということです。そういうことが問題にな
ってきて、その研究が 30 年 位前から非常に
さかんになってまいりました。結局わかりま
したことは、核は陽子という陽電気をもった
粒子と、それから中性子という電気をもた
ない中性の粒子との、2 種類の粒子からでき
ている。いろいろ違った核があるのは、陽子と
中性子の数が、いろいろ違うからだとい
うことです。一番簡単なのは水素の原子核
ですが、普通の水素の原子核は陽子そのも
のです。それから二重水素、これは重水素とも
いわれ、陽子と中性子が 1 個ずつくっつ
ている。三重水素というのは陽子 1 個に
中性子 2 個くっついている。

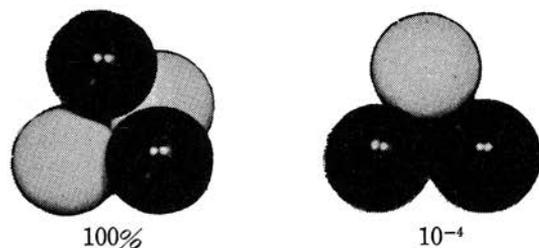
第 21 図は勿論ドルトンの本にあります絵
と同じ程度の絵でありまして、こういうふう

水素の同位元素



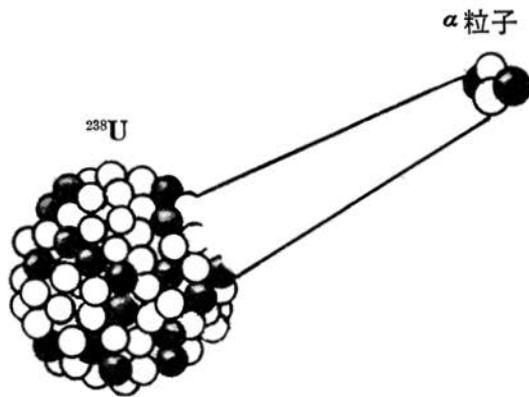
第 21 図 水素の原子核
(黒は陽子、白は中性子をあらわす)

ヘリウムの同位元素



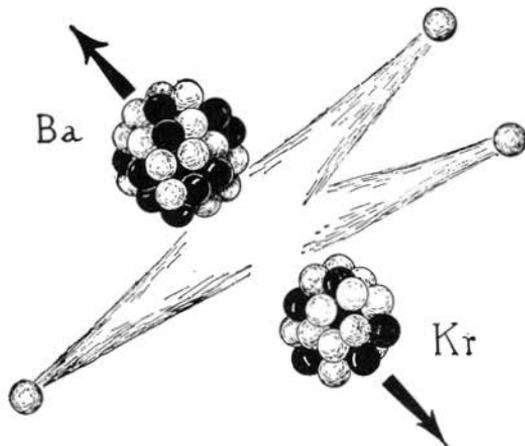
第 22 図 ヘリウムの原子核
(黒は陽子、白は中性子をあらわす)

に本当に 3 角形にくっついているかというの
は意味がないので、ただ数だけが意味のある
ものです。水素には三種ありますが、陽子が
1 個であるというのが水素の特徴でありま
す。自然界に存在する水素の 99.985% は (第
21 図左) で、0.015% が (同図中央) です。そ



第23図 ふつうのウラン(ウラン238)の原子核

非常に不安定で α 粒子(陽子2個と中性子2個のかたまり)を放射しやすい。この流れが α 線である。

第24図 ウラン235の原子核(^{235}U)の分裂

中性子1個が ^{235}U にあたると分裂して、たとえばここではバリウムとクリプトンの原子核に大きく割れ中性子も3個とび出す。

の右の三重水素 ^3H というのは天然には存在いたしません、原子炉の中でつくることが出来ます。

第22図はヘリウム。ヘリウムは陽子2個というのが特徴であります。普通のヘリウムは陽子2個に中性子2個がくっついております。非常に微量ですけれど、中性子が1個たりない軽いヘリウムというべきものがございます。

あとリチウム以下ずっとあるわけですが、一足とびにウランまでまいりますと、ウランの原子核は全体で238個の塊りです(第23図)。陽子は92個で、のこり146個が中性子です。このような大集団になりますと、不安定で、時々ヘリウムの原子核がポロリととび出して来る。これが α 線といわれている放射線です。

ウラン235に中性子をあてると分裂して莫大な原子エネルギーを出す

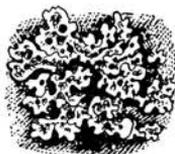
ウランの中には238でなく235個からできているのもありまして、これが原子力に関して、非常に重要なものです。235の方は非常に変わった性質をもっておりまして、外から中性子がぶつかりますと、それが真二つに割れます。

第24図はそれが割れたところですが、も

ともとこれ全部くっついていたのが、ウラン 235 でありまして、そこに粒子が1個外からやってきますと、こういうふうに分れます。これはバリウムとクリプトンに分れた図です。これがものすごい勢いで両方にとび出す。このエネルギーが非常に大きく、これを利用するというのがウラン原子爆弾あるいは原子炉の原理なのであります。非常に大きなエネルギーと申しましたけれども、ウランの原子核がひとつだけ、パッとこわれましても、これは大したエネルギーではないのであります。しかしひとつかたまりのウランが全部こういうことをおこしますと、これは大変なエネルギーになるわけです。あたかも次のたとえに似ています。鉄砲の弾は1秒間に1000mも飛ぶ。だからものすごいエネルギーだと申しますけれども、実は大したエネルギーではないので、1発の鉄砲の弾に紐をつけて列車をひっぱらせるわけにはまいりません。だがひとつかたまりの、例えば機関車ぐらいの量の鉄砲の弾を全部ぶっ放すと、これは大したエネルギーになるであります。それと同じで、弾も1発では大したことはないようにウランも1個では大したことはない。ウランの原子核が割れてエネルギーを出す現象は、先

ほど申しましたように、中性子をウラン 235 にぶっつけなくてはいけない。ところでひとつかたまりのウランと申しますと、角砂糖位の体積で大体原子の数が1億の3乗くらいあります。従つてそれをこわすのは、1億の3乗位の中性子をあてなくてはいけない。そんな中性子をつくることは大変で、そうとすればウランは使いみちがないわけです。ところが、第23図のようにウランが割れるとき、中性子が3つ位とび出してることがわかったのであります。ただ割れるだけでなく中性子が3つ位出てくる。そうなりますと話が違つて、始め1発の中性子がウランをこわすと、ウランが割れると同時に3つ中性子が出てきます。その3つがまたつぎにウランをこわすと $3 \times 3 = 9$ 、9つの中性子ができる。それらがまたつづいてこわしますと $3 \times 9 = 27$ 、それらがさらにやりますと 81、それらがまたやりますと 243、それらがまたやりますと 729、それらがまたまたやりますと 2000 位。そういうことが続きますとたちまち1億の3乗位はあつというまにできてしまう。勿論3つで出た中で全部がうまくゆくとはいえないので無駄になるのがあるかもしれませんが、それにしても、原因が結果になって、その結果が

また原因になる、いわゆる連鎖反応でネズミ算的に中性子がふえてきて、そしてひとかたまりのウランが全部こわれる。そうしますと非常に大きなエネルギーが出てくる。これがウランを使う原子エネルギーの原理であります。こういうふうにしてウランがこわれると必ずしもクリプトン、バリウムと限らない、いわゆる死の灰といわれるいろいろな元素がでますが、これらが実際両方にバツととび出すということはまだ仮説だといわれるかも知れないのですが、それを次にもう少し眼に見えるようにしてごらんに入れます。

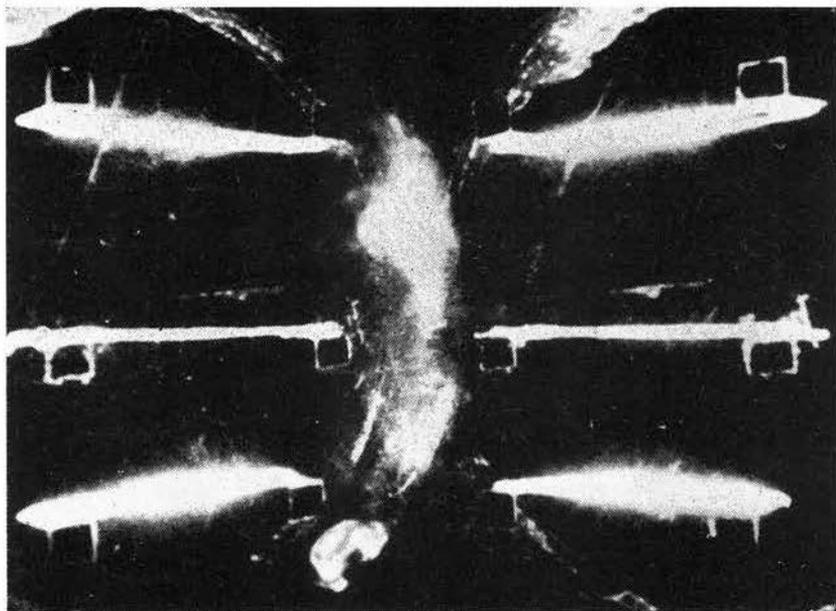


ウランの分裂は霧箱実験や写真乾板の方法で実際に見られる 第 25 図は前にお話したウィルソンの霧箱でうつした写真です。霧箱の中にウランの板が入っておりまして、中性子を外から入れてやりますと、ウランの原子が真二つに割れて、二分された核が両方にとび出してくる。写真が二つあるのは、一対で立体写真になっているのです。このような写真がとれております。

それからこういうウィルソンの霧箱でなしに、もっと簡単な方法があり、それは写真の感光膜のエマルジョンの中を α 粒子や一般に原子核、あるいは場合によっては電子でもよいのですが、電気をもった粒子が走りますと、その道に沿って、臭化銀が分解して銀があらわれてくる。それを適当に現像しますと、荷電粒子の道すじに沿って銀の粒が図のように並んで見えます。

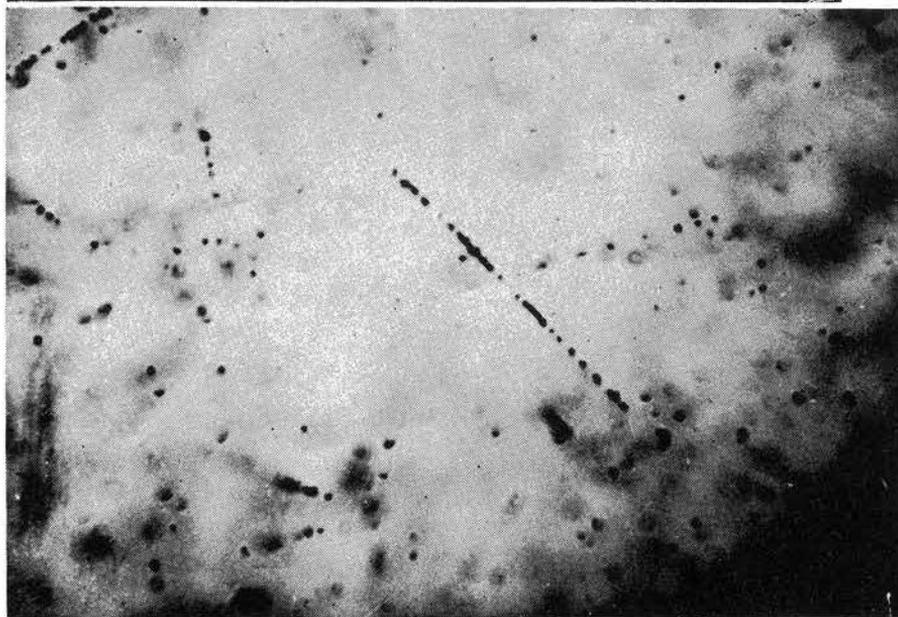
第 26 図はエマルジョンの中にウランの化合物をしみこませ、それに中性子をあてて、分裂を起こさせて（一番長い線の中央部）両方へかけらが飛び出したところです。これは原子力研究所でとった写真です。これらの証拠から今まで申してきました反応は、もう疑いのないことになります。

融合反応と分裂反応 最後に、近頃よく核融合反応ということがいわれますので、そのお話をちょっといたします。普通の化学反応にもやはり分裂反応と融合反応がありまして、いわゆる化学的エネルギーの利用も、複雑な化合物が分解する時に出るエネルギーを使うのと、簡単なものがより複雑な分子に化合する時に出るエネルギーを使うのと両方あります。例えばダ



第25図 ウラン 235 の核分裂
の霧箱写真

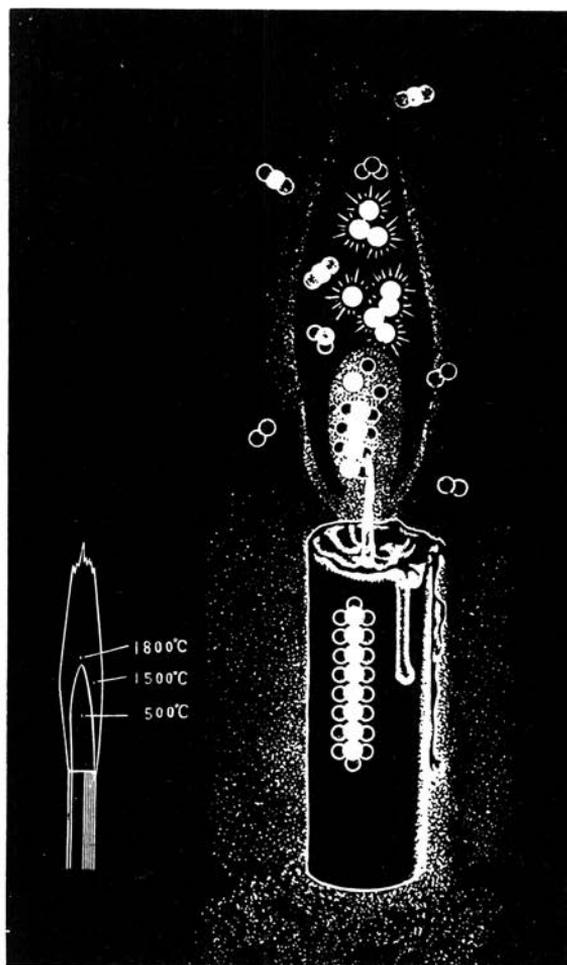
これは一対で立体写真になっている。ウランをちりばめた膜が3枚入れてあり（白い太い線）、外から中性子を入れると分裂がおこって生成物がまったく反対側に飛ぶ。（左上または右上の細い斜めの白線はその飛跡で、ウランの膜をはさんで両側に一直線をえがいている）



第26図 エマルジョン中
でとらえたウラ
ン 235 の核分裂

ウランをしませたエマルジョン中に中性子が入る。一番長い線の中央部で分裂がおこり、そこから対称的に反対方向に破片がとび散ったところ。

イナマイトが爆発するなどは、その前者で、ダイナマイトの複雑な分子がばらばらにこわれる時にでるエネルギーを使う。それから炭が燃えるなどは後者で、炭素が酸素と化合して炭酸ガスになる時にでるエネルギーを使うわけです。第 27 図はロウソクの燃えているところですが、ロウソクの内部に書かれたなんだか気味の悪いゲジゲジみたいなものは、ロウの分子で一応炎の中でばらばらになりまして炭素と水素にわかれます。外にある酸素の分子がここに入ってきてまして、水素とくっついて水ができる。さきに申しました三角形をした水の分子ができます。それから炭素とくっついて炭酸ガスが出来る。この時エネルギーがでますから、それを利用するわけです。ただこの融合反応の時には分裂反応と違いまして、ある温度以上の温度でないと、反応が起こりださないで、燃焼の場合には反応を続ける炎の中の最高温度が大体 1800 度か 1500 度位であります。分裂反応は別に温度をあげる必要はないのです。ウランの場合には、中性子のショックであるような破裂が起こる。ダイナマイトも同様で必ずしも熱くしてやらないでもショックで爆発する。ロウソクのばあいは普通の化学反応による融合反応なので

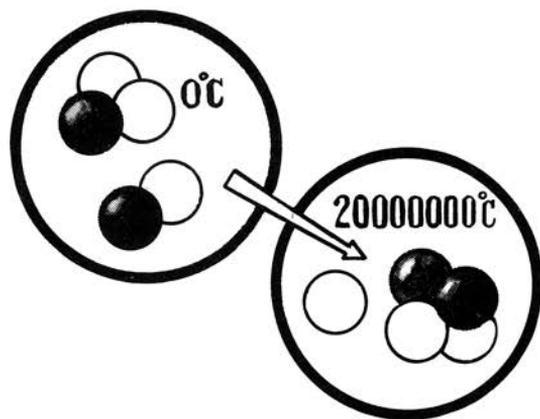


第 27 図 ロウソクの燃焼

ロウソク内の分子模型はロウの分子（炭素と水素の化合物）をあらわしており、これは蒸気になって炎中に入って各原子に分解した後空気の酸素分子と融合（化合）して水および二酸化炭素の分子になる。これは一種の融合反応で、継続には絶えず高温が必要。

すが、次に原子核の変換による融合反応で一番低い温度でやれますのは、第 28 図に書いてあります二重水素と三重水素、これが組み合わせが変わり、ヘリウムと中性子になる反応です。ここでヘリウムができるときに非常に大きなエネルギーがでてまいります。その時必要な温度がどの位かと申しますと、図に書かれてあるように、大体 2000 万度です。このごろの計算で少し数字が変わったようですが、大体こんな程度です。

原子核融合反応で 二重水素と三重水素をまはべらぼうな高温 ぜておき、2000 万度にあ
度が必要である げますと、このような反応が起こる。この反応が起これば、あとはエネルギーが出てきますから、それが熱になって、この温度が持続される。しかしこういう反応を実現させますときに問題になりますのは、まず 2000 万度という高い温度をどうしてつくるかということです。もうひとつの問題は、入れものをどうするかです。この 2000 万度の温度をだしますのには、ひとつの方法は原子爆弾です。ウランの爆弾が爆発しますときに、非常に高い温度が出まして、これより 1 桁上位の温度が出ます。従って、ロウソクに火をつけるのにマッチを使いますよう



第 28 図 二重水素と三重水素との原子核融合反応

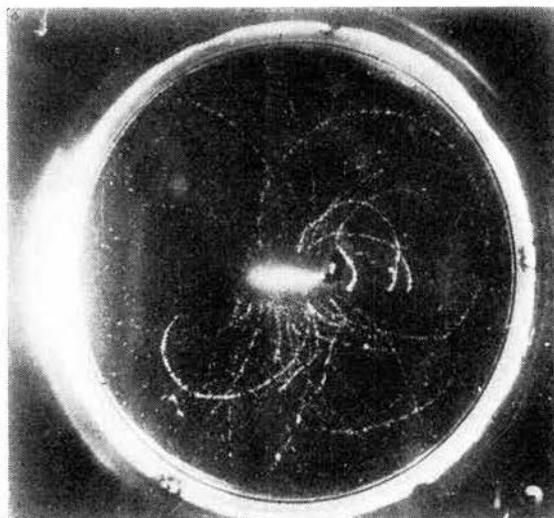
に、ウランの爆弾をこの混合物の真中で爆発させますと、これ位の温度ができて、こういう反応が起こる。これが水素爆弾の原理であります。ところで、爆弾ならそれでいいのですが、平和利用をする場合には、原子爆弾でマッチの代わりをさせるわけにはまいりません。ちょうどロウソクに火をつけるのにダイナマイトで火をつけたら、大変なことになると同じように、ウラン爆弾を平和利用に使うわけにはゆきません。それがひとつの問題。それから、こういう高温の反応が起こる時のカマドです。入れ物をどうするか、つまり 2 つの問題が解決されなくてはならないので、いまいろいろ研究されているわけがあります。原理的には、温度の方は、電氣的

に非常にたくさんの電流をいちどきに流しますと、相当な温度まで上がることがわかっております。しかしまだ1桁足りない。現在のところまだ100万度程度しかありませんが、とにかく相当な温度がでる。その次は入れ物はどうするかという問題。

原子核融合反応を
起こさせる原理

第29図は入れ物の写真
ではなく、原理を説明し
ただけなのですが、先ほ

どのウィルソンの霧箱の中に電子が走っており、飛跡がくるっとまわっております。それは、磁界がかけられて紙面に直角に磁力線が通っているからです。そうすると、電気をもったものが磁界の中を走るときにはくると廻る、あの左手の法則で、このように曲がります。結局、磁界がなければ、真直にずっと飛んで壁にぶつかってしまうのですが、磁界があるために、こういうふうに曲がる。この現象を利用いたしまして、原子核の融合反応をやらせようとするわけです。原子核は電気をもっておりますから、磁界をかけますと、空間のある場所にそれを限定することができます。これはほんの原理だけの話です。実際はなかなか難しい。この磁界の形をどうするかというような、いろいろ難しい問題



第29図 磁界内での電子の飛跡

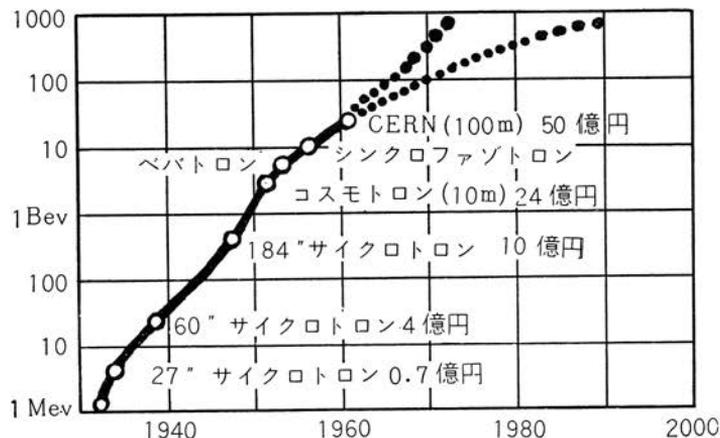
電子に限らず荷電粒子、したがって原子核も、磁界内では曲げられるので、直線状に走り去ることなく、ある範囲のところに限定して運動させることができるはずである。

がありますが、原理は以上のものであります。

研究に必要な
加速器とは

これでごく最近のところまで到達いたしました。紀元前400年から20世紀半ばの今日にいたる2000年をこえるお話を一応終ったこととなります。最後に、このような研究をやるのに、一体どういう機械がいるかというお話を少し。詳しいことはぬきにいたしまして、それがどれ位大げさなものかということをお話いたします。

第 30 図で横軸に書きましたのが年代であります。1940 年, 1960 年, 1980 年, 2000 年というようにとり, ○印は加速器です。ご承知でしょうが, こういう原子核の研究をやりますには, 非常に猛烈なスピードで走っている粒子を原子核にぶつけて, それをこわしたり, その他いろいろのことをするわけです。昔はラジウムからでる α 粒子などを使って研究いたしました。例えば, 先ほどおめにかけた霧箱の中で α 粒子が窒素にぶつかって酸素と水素に枝わかれている写真もその頃とられたものです。しかしああいふ α 線だけ使ったのでは面白くないので, もっと違った



第 30 図 加速器の歴史 (どんどん大きくなる)

横軸は年代, 縦軸はエネルギー, 寸法のインチは直径, m は半径の大きさ

種々の粒子をもっともっと高いエネルギーに加速して研究することが必要です。このための装置を加速器と申します。この加速器は年年大きなものが作られています。第 30 図はその様子を示したものです。図では加速エネルギーを縦にとります。MeV (ミリオンエレクトロンボルト) とか BeV (ビリオンエレクトロンボルト) とか書いてありますが, これは, 1 MeV では百万, 1 BeV では十億ボルトの電位差の所で電子を走らせた時と同じエネルギーという意味です。図で一番低いところが 1 MeV すなわち百万エレクトロンボルトで, 原子核をこわすには大体この辺から上

のエネルギーでないと面白いことはできない。1932 年にローレンスがはじめてサイクロトロンという装置, 非常に小さなサイクロトロンを作りました。これが始まりになっております。この前にも勿論いろいろ加速装置がありましたが, この辺から書いておきます。次の年にローレンスが 27 インチまでの大きさの, それから 1938 年に 60 インチのサイクロトロンができました。ここでエネルギー

は2,3千万ボルトですが、年がたつとだんだん大きな機械が作られまして、100万、1000万、1億、10億、数十億エレクトロンボルトになりました。それはコスモトロンというものです。次はベバトロンで、それからシンクロフアズトロン、これはソビエトにあって、いま動いている一番大きなものです。そして次がジュネーブにあるヨーロッパのいろいろな国が共同して作っている原子核研究所で、いまつくっている機械です。ここまできますと数百億エレクトロンボルトになります。さて、大きさは27インチ、60インチ、184インチと、これは直径です。ここからメートル法を採用してコスモトロンは半径10m、このCERNとかいたのはヨーロッパの共同研究所の装置ですが、これが何と半径100mあります。それから値段をついでに申しますと、7千万円、4億円、10億円、24億円、そして50億円です。いかにお金がかかるかということがおわかりかと思えます。

研究にはお
金がかかる

この間原子力産業会議で講演をたのまれました、……あそこは財界人がおおぜい

おりますから、少しお金をせびろうというので、いかに金のかかるものかということをご

らんに入れたのですが、……いまここで皆様方にごらんに入れても、直接どうということとはございませんけれども(笑声)、生徒の中にはいろいろお金持のお子さんもいらっしゃるでしょうから、100mのような、50億円というような、いかに巨大な機械を使って研究しているかということを知っておいただきたい。これは原子炉とは別であります。これでは電気も起こらないし、なにもならないのですが、とにかく純粹に研究用の機械であります。いま日本にどれ位のがあるかと申しますと、さきほどごらんになったのはこれ(27")でしょう*。多分ごらんになったと思いますが、非常に可愛らしいものです。仁科先生もこれと同じものをつくられて、昔理研にも、これ(27")とこれ(60")と二つ戦前にあったんですが、両方ともこわされまして……。小さいほうだけは、戦後もうひとつ作った。それから60"これよりちょっと大きいのを田無の原子核研究所で戦後作っております。いまもう少し大きいのを作りかけておりますが、とにかくこの程度です。1950年代でこの程度ですから、20年遅れてしまった。さて図の右上は点線で書いてありますが、将来どう

* この講演の前に理研の施設の見学がおこなわれた。

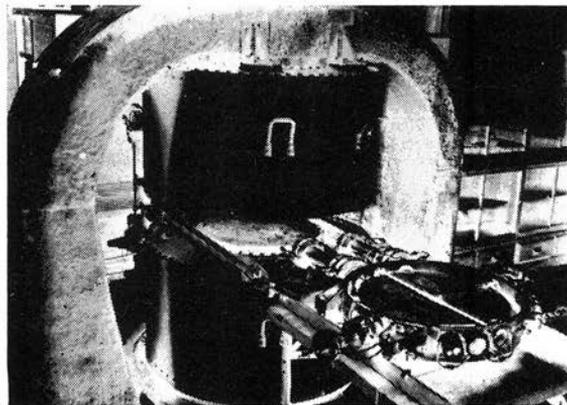
なるかということちょっと考えてみたものです。こういうふう将来大きくなるかどうか分かりませんが、しかし過去を見ますと、大ざっぱに言って10年間に1桁上がって、10mのが100mになっております。1970年になりますと、1キロ、1980年で10キロ、1990年で100キロ、次は1000キロ、2010年ごろにきますと地球の大きさぐらい、地球をはみ出してしまふわけです(笑声)。地球をはみ出した機械というと皆様お笑いになるのですが、実はこのごろは地球をはみ出した、ある意味では地球をはみ出したような機械を使っている物理学者が日本にもおります。と申しますのはご承知かと思いますが、宇宙線という粒子が地球の外から降ってまいりまして、そのエネルギーは大体1BeV 辺から上です。

宇宙線の粒子には この辺から上のエネルギー非常に高エネルギーのものがある 一の粒子が地球の外から降ってまいります。これを宇宙線といい、英語で cosmic rays というのですが、コスモトロン(Cosmotron)という名前がそこからでていて、宇宙線に相当するようなエネルギーの粒子を作る機械ということでそう名づけたのです。宇宙線は幸いに、

日本にも降ってまいりまして、しかもただで降ってまいります(笑声)。ですから宇宙線を使ってのいろいろな研究は日本でも盛んに行なわれております。勿論降ってくるのはただですけれども、それをつかまえているいろいろ実験するには、やはり費用がいります。ですけれどもこういう加速装置を作るよりは安い。大体これでお話を終りにしてもいいのですが、少し時間があるようですから、次にいくつか、もう少し写真をごらんに入れます。

第31図はさっき多分ご紹介した可愛らしいサイクロトロン。

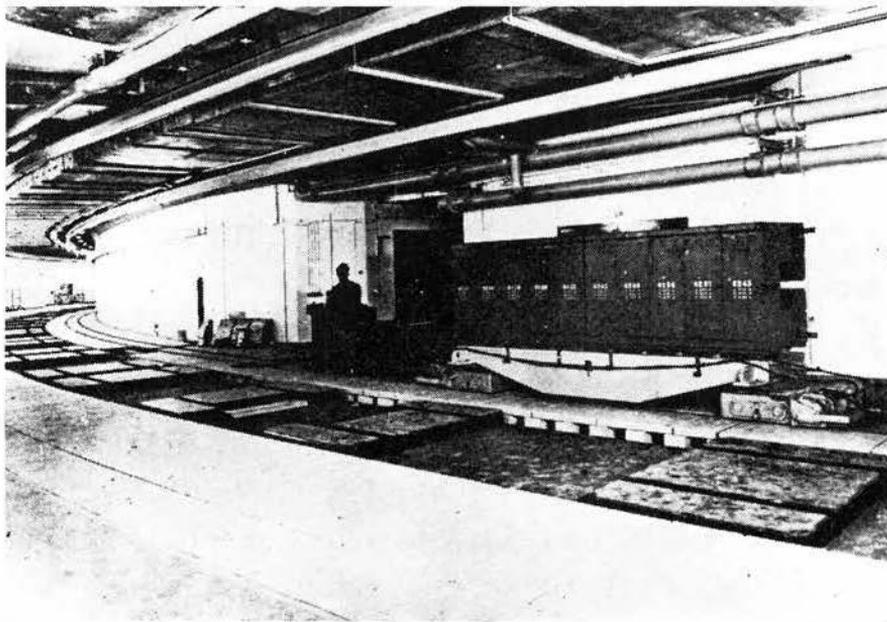
前方の台にのっている円板状のものがご本体です。上下2つの黒い円筒型のものが磁石、右側に戸棚がありますので、大体大きさがお判りかと思ひます。こ



第31図 理研のサイクロトンの主要部

第32図 ヨーロッパの共同研究所の外景

この美しい円形広場（講演では天然色スライドが用いられたので実にきれいであった）の地下全体が加速器になっている。



第33図 上の写真の地下室（加速器）の一部

何しろ直径 200 m という巨大な加速器であるから地下とはいえまことに見事なもの。

れが 27 インチという一番小さいものです。それから一足とびにスイスにあるヨーロッパの共同研究所のをごらんに入れます。

第 32 図はその外景です。まだ完成していないのですが、どこに機械があるかちょっとおわかりにならないでしょう。この円形の広場全体の地下が機械です。なにせ直径 200m というのですから、うちの中に入っていないので、こういう原っぱがありまして、ここにぐるっと廻っている白いものが見える。この下に機械があります。右手前から地下道に通じ、この大きい円形の範囲がずっと地下室になっております。地上に円形に並んだこの白いものはその空気ぬきみたいなものですね。地下に入りました理由は、いろいろあると思うのですが、放射線がでてくる、そのしゃへいの意味もありますが、こういう機械は非常に精密度を要求するので、10 分の 1mm の精度が必要だといひます。200m も直径のある大きなもので、10 分の 1mm の精度。これは温度の変化、それから振動等があつては困るという意味もあつて地下におさまっている。それでこゝに入口があつて中に入って見た写真を第 33 図でごらんに入れます。

とにかく地下ですから暗いのですが、割合

よく見えます。ここに蛍光灯がずらりとついておりますが、ぐるりと廻つて、ちょうど地下鉄のプラットホームみたいな感じですよ。磁石がずっと並んで、そして真空にしたパイプが来て、その中をぐるぐる廻しながら粒子を加速するのです。

次は、先ほど申しましたように 1 BeV の辺から上のエネルギーのものは宇宙線だということですよ。宇宙線はある意味では地球の外へはみ出した機械を使っているわけですが——宇宙線はどこから来るかわからないが、何か宇宙のどこかで、こういう機械に似たような機構があつて、そんな大きなエネルギーのものが降ってくるだろう、とそういうわけですよ。

ある意味では地球からはみ出した機械を使っているというのはそのことなんです、その宇宙線の研究の写真をちょっとごらんに入れます。

第 34 図がそうです。これは
宇宙線観測所

は乗鞍にあります宇宙線観測所の写真であります。とにかく高い所へ行って研究するほど、いろいろ面白い現象があります。つまり空気の中を走ってくる間に、いかに猛烈なエネルギーといひましてもだんだん消耗して、下の方ではあんまり面白い現

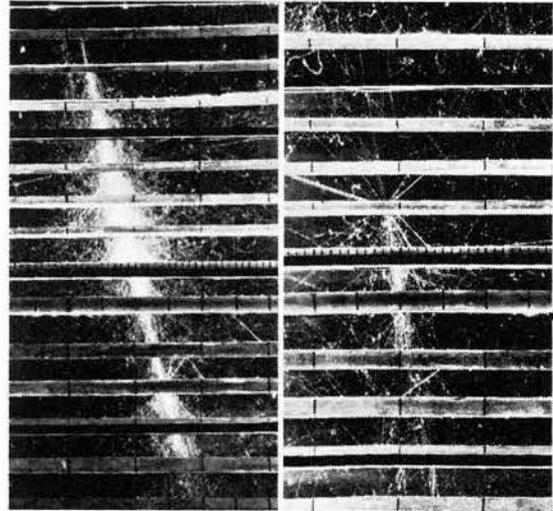
象がつかまらない。それで乗鞍山の上のよう
なところで研究をするわけです。宇宙線がど
の位の猛烈なエネルギーをもっているかとい
うことがよくわかる写真を次にごらんに入れ
ます。



第34図 乗鞍にある宇宙線観測所(冬)

宇宙線のはたらき
の様子は霧箱や写
真乾板でとられる
第35図は霧箱の中に鉛
の板を何枚も入れてあり
ます。上から宇宙線の物
すごく大きなエネルギーの粒子がきますと、
この中でいろいろなことをやって、物すごく
たくさんの粒子になって、しかし結局だんだ
ん消耗してまいります。ここにある例(左)
は、原子核をこわしてばらばらにしてしま
うような、何か大爆発を起している。それか
らずっと通りぬけた粒子がありますが(右)、こ
れは中間子です。貫徹能力の非常に強いのは

中間子です。他の大部分は、電子です。この、
ちょうどシャワーのようにたくさん電子を作
って、時には爆発的に原子核をぶっこわす、
そして中間子のようなものもたくさんでき
る現象はシャワーと申します。こういう現象
は、霧箱で見つかるわけです。しかし山の上
ではまだ低すぎまして、だんだん面白くな
ってきますので、高い所へ行こうとして風



第35図 宇宙線のシャワー(霧箱写真)

横に鉛の板が何枚も入れてある霧箱の中に上か
ら入ってきた宇宙線は、途中で新しいいくつか
の粒子に変換され、できたものが次々に急速に
変換されて数を増すが、やがて次第にエネルギー
を失って衰えていく。

右の写真の上部で宇宙線が4枚(実際はもっと
多い)の鉛板を貫徹して5枚目のところでシャ
ワーをつくっているのがわかる。

船をとばす。

研究は高空
へ高空へと

第 36 図はロケット。これは
ロックーンというもので
すが、風船にロケットをぶ



第 36 図 ロックーンを上げる

らさげて、ある所までいってロケットを発射
させるといふ、非常に凝った考え方なです
が、こういう所へ原子核の測定装置を入れて

飛ばすわけです。このロックーンの実験は、
あんまりうまくゆかなかったようですが、風
船をとばした実験はかなりいろいろなデータ
を日本で集めております。ただ風船や、こ
ういうものを積みます装置はウィルソンの霧箱
のような重いものは積めないのですが、幸い
にして写真のエマルジョンが霧箱の代わりを
するというわけでありました。エマルジョン
をつみまして、そして高い所へ飛ばす。その
エマルジョンの中に写った写真をひとつごら
んに入れましょう。

第 37 図がそうですが、左
宇宙線は新粒子
下から何か粒子がやって来
発見の泉である

まして、中央付近で3つに
なったのです。そしてまたずっといって、右
端でまたなにか変わったことをやった。そし
て左上でおしまいになっている。これをいろ
いろ研究した結果、中央付近で3つに分かれ
たところから右上端のところまでが湯川先生
の予言されました中間子、いわゆる π 中間子
というもの、そこから左上のおしまいになる
までは、 π 中間子が変わってできた μ 中間子と
いうものだ判った。左下から入ってくるの
は、その時分まで知られていなかった粒子な
ので、それは3つの中間子に変わっている。

これで新しく粒子が発見されたわけです。こういうふうな宇宙線の研究で多数の新しい粒子がみつかってまいりました。

第1表が今までにみつかった粒子の一覧表です。一番昔から知られているのは電子と陽子、この二つはよく知られています。それから中性子、この辺まではよく知られていたのですが、宇宙線の中でみつかった粒子は、例えば陽電子というもの——普通の電子はマイナスの電気をもっていますが、これはプラスの電気をもっている——これが宇宙線の中で始めて見つかった。それから μ 中間子、 π 中間子、こういう粒子は湯川さんが理論的に予言したのですが、実際みつかったのは宇宙線の中です。陽子は昔から知られていたが、反陽子は宇宙線の中ではなくて、むしろ先ほどの大きな加速器で——コスモトロンのもう一つ上にありましたベバトロンでみつかった。中性子、これは実験室でみつかった。下方にありますハイペロンとかいてありますもの、こういう粒子が、写真の乾板をつけて高い所へ風船をとばして見つかりました。こういうわけで宇宙線というのは、発見の泉みたいなものです。

いまこんなにたくさんの粒子がでてしまい

ましたので、これが物理学者の頭痛の種なのです。昔は元素の数が90数種あった、しかしそれらの構造がわかって結局電子と陽子と



第37図 写真乾板でとらえた宇宙線中の中間子の飛跡
曲がったり枝分かれしているところでは崩壊して次の
粒子に変換する。1 μ は千分の1mm.

中性子とそれだけにまとめて簡単になったと思っただけ。思っただけならこんなにな

第1表 素粒子の一覧表

| 記号 | 名称 | 質量 | | 崩壊の型 | 平均寿命 |
|-------------|--------------|----------------|--------|---------------------------------------------|------------------------------------------|
| | | 電子質量を 単位とする | Mev | | |
| γ^0 | 光子 | 0 | 0 | 安定 | ∞ |
| ν^0 | ニュートリノ | <0.0005 | <250ev | 安定 | ∞ |
| e^- | 負電子 | 1 | 0.51 | 安定 | ∞ |
| e^+ | 陽電子 | 1 | 0.51 | e^- の反対粒子 | |
| μ^+ | ミュー中間子 | 207 | 105.6 | $e^+ + 2\nu^0$ | $2.2 \times 10^{-6} \text{sec}$ |
| μ^- | ミュー中間子 | 207 | 105.6 | $e^- - 2\nu^0$ | " |
| π^+ | 正の π 中間子 | 273 | 140 | $\mu^+ + \nu^0$ | $2.5 \times 10^{-8} \text{sec}$ |
| π^- | 負の π 中間子 | 273 | 140 | $\mu^- + \nu^0$ | " |
| π^0 | 中性 π 中間子 | 265 | 135 | $\gamma^0 + \gamma^0$ | $1.5 \times 10^{-16} \text{sec}$ |
| τ^+ | K 中間子 | 966 | 493 | $\pi^+ + 2\pi^0$ $\pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ | $1.27 \times 10^{-8} \text{sec}$ |
| τ^- | | 966 | 493 | $\pi^- + 2\pi^0$ $\pi^- + \pi^- + \pi^+$ | " |
| θ^0 | | 965 | 493 | $\pi^+ + \pi^-$ $2\pi^0$ | $1.3 \times 10^{-10} \text{sec}$ |
| p^+ | 陽子 | 1836 | 938 | 安定 | ∞ |
| p^- | 反陽子 | 1836 | 938 | p^+ の反対粒子 | |
| n^0 | 中性子 | 1838 | 940 | $p^+ + e^- + \nu^0$ | $1.11 \times 10^3 \text{sec}$ (12.8分) |
| Λ^0 | ハイペロン | 2181 | 1114.7 | $p^+ + \pi^-$ | $3.7 \times 10^{-10} \text{sec}$ |
| Σ^+ | | 2327 | 1189 | $p^+ + \pi^0$ | $\sim 3.4 \times 10^{-11} \text{sec}$ |
| Σ^- | | 2327 | 1189 | $n^0 + \pi^+$ | $\geq 3.4 \times 10^{-11} \text{sec}$ |
| Ξ^- | | 2586 | 1321 | $\Lambda^0 + \pi^-$ | $1 \times 10^{-10} \text{sec}$ |

た、ぞろりといろいろなものがでて来た。これをどういうふうにとまとめたらいいか、この先おそらくもっとなにか簡単なものにとま

るのだらうとは考えられるんですが、まだいまのところわかっておりません。

先ほど写真で、下の方から3つに分かれたと申しましたが、これです。この粒子、K中間子で普通の中間子よりやや重い。こういう粒子は皆非常に不安定で、ある時間たつと他のものになってしまう。ここにその寿命が書いてあります。

これでごく最近のところまでこぎつきましたので、私の話は終わりますが、このあと、先ほど波の干渉の絵をごらんに入れましたが、あれを電波で実験してごらんに入れましょう。その装置が、ここにございます。それからあそこにくいくつか分子の模型が並べてございます。それからウィルソンの霧箱がここにございますが、これは余り大勢だと見えませんので後で適当にグループになって見ていただきたいと思います。