

原子時代の科学



仁科記念講演集

大日本図書

目 次

I 宇宙線の話

朝 永 振 一 郎

- | | |
|----------------|--------------------|
| はじめに〈2〉 | ガイガー・カウンターを鳴らす〈4〉 |
| 宇宙線はどこからくるか〈5〉 | 大気中におこる現象〈6〉 |
| 仁科博士の観測〈8〉 | 斜里岳における観測〈9〉 |
| 時間的变化〈20〉 | 地球の磁気の影響〈11〉 |
| 霧箱による観測〈15〉 | 新しい発展〈19〉 |
| 乗鞍の山の上で〈23〉 | 加速装置はどんどん大きくなる〈26〉 |

II 流転する宇宙

畑 中 武 夫

- | | | |
|-----------------|------------------|----------|
| はじめに〈30〉 | 宇宙の姿〈30〉 | 渦巻星雲〈33〉 |
| 電波天文学の功績〈35〉 | 銀河系のコロナ〈36〉 | |
| 星の数といろいろな星雲〈38〉 | 星の一生〈40〉 | |
| 太陽の寿命〈42〉 | 星の明るさ、温度、大きさ〈43〉 | |
| 星の種族〈45〉 | 星の進化とベーテの論文〈46〉 | |
| 星は何から生まれたか〈50〉 | 滅びゆく星〈51〉 | |
| 流転する宇宙〈52〉 | | |

III 物質の構造

菊 池 正 士

- | | |
|------------------|----------------------|
| はじめに〈58〉 | 物質のもとになるもの —素粒子—〈58〉 |
| 素粒子の性質〈60〉 | 素粒子の崩壊と発生〈61〉 |
| π 中間子の発生〈63〉 | 原子核乾板〈62〉 |
| ウィルソン霧箱〈65〉 | 反陽子とは〈66〉 |
| 原子ができるまで〈68〉 | 陽子と中性子〈68〉 |
| 同位体について〈69〉 | |
| 原子の質量測定装置〈71〉 | 原子の大きさ〈72〉 |
| 放射能〈73〉 | |
| 放射性元素の起原〈76〉 | 元素の人工変換〈77〉 |
| 元素はどうしてできたか〈79〉 | |

IV 原子核の実験

熊谷寛夫

- はじめに<84> 原子核はどのようにこわれるか<85>
 加速器の目的<87> 加速器<90> 原子と電気<92>
 電子ボルト<93> ベルト起電機<94> サイクロトロン<95>
 シンクロトロン<98> 電子線型加速器<103> 粒子検出器<104>
 写真エマルジョン<107>

V 太陽と地球との関係

萩原雄祐

- はじめに<110> 太陽は生命の親である<111>
 太陽の黒点<113> 太陽面をしらべる<117>
 太陽の外気—彩層<118> 太陽の花火—プロミネンス<120>
 太陽の最外層—コロナ<124> コロナは何でできているか<126>
 天体からの電波<128> 太陽電波<129>
 太陽面の模様とフレージャー<131> 日食外のコロナ観測<137>
 乗鞍のコロナ観測所とウルシグラム<140>
 デリンジヤー現象と磁気嵐<142> 電離層と夜光<146>
 ロケットと人工衛星<147> 宇宙線も深い関係がある<149>
 空電と超高層<150> これからの観測<150>

VI 宇宙線研究 20 年

石井千尋

- 宇宙線研究のはじめ<154> 50 年前の測定<154>
 宇宙線の発見<155> ボーテとコルヘスターの実験<156>
 まず観測器械製作から<157> コンプトン型宇宙線計<158>
 仁科型宇宙線計<159> 仁科博士の実験<160>
 歴史的な中間子写真<161> 宇宙線強度の気圧気温効果<163>
 ガイガー計数管<164> 戦後の研究<166> 研究組織の拡充<167>
 乗鞍岳の宇宙線観測所<169> その他の研究施設<172>
 国際地球観測年へ参加<175> 中間子標準計<176>
 中性子標準計<178> 大型電離箱式宇宙線計<178>
 狭角垂直成分宇宙線計<178> その他の設備<179>
 むすび<180> 宇宙線研究年表<182>

VII 放射線の生物作用とその機序 岡 小 天

- はじめに<184> 放射線の影響<185>
- いろいろな動物の致死量<185> ハツカネズミについての実験<186>
- 人間の致死量<187> 放射線の局部照射<187>
- 放射線を受けた場合の症状<188> 放射線が致死量以下の場合<189>
- 放射線は遺伝に対してどのような影響を及ぼすか<194>
- 突然変異について<194>
- 放射線の実体—放射線の種類, 化学反応, 霧箱の原理, 放射線の量, 透過力
<197>
- 放射線の化学作用—酸素・核酸・ウィルスに対する影響<203>
- 放射線の生物作用の特徴<214>

あとがき<216>

仁科記念財団の目的と事業の概要<219>

I 宇宙線の話

朝永 振一郎

東京教育大学教授

宇宙線が発見されて40年、この間その発生について、あるいはその本質、作用について多くの論議がつづいた。

わが国でも早くから故仁科博士によって研究が始められ、かがやかしい成果があげられた。

最近十年間の研究はさらにすばらしく、あまたの新粒子を発見し、極微の世界にメスを入れ、また大宇宙の神秘をひらきつつある。

宇宙線とは何か。この記念講演会でその研究の跡を顧み、さらに将来の見通しについて語ることは、原子力時代のわれわれにとってまことに意義深いこととおもう。

<昭和30年12月6日 講演>

宇宙線の話という題でしばらくお話したいと
はじめに
思います。

仁科先生は、宇宙線に非常に興味を感じておられ、また宇宙線の重要性を早くから認識しておられまして、いろいろな研究をしてこられました。実際この宇宙線というものは新しい物理学のひとつの中心でありまして、宇宙線の中でいろいろな発見がございました。そういう意味で非常に重要な現象であります。

宇宙線が発見されまして今年で大体 40 数年になります。その間いろいろな研究が行なわれておりました。この地上で、つまりこういう所です。それから地下で、地下というのは地面の下に深く入りましてそこで研究を行ったり、あるいは上空で、非常に高い所で飛行機とかあるいは風船をあげまして研究する。それから最近はロケットのようなもので、非常に上空で研究が行なわれております。

そういう研究をやっておりますうちに、いろいろな発見がありました。たとえば、湯川さんの理論で有名な中間子は宇宙線の中で発見されました。それからまだいろいろな粒子、たとえば陽電子というのが発見されました。物質を作っております重要な粒子のひとつに電子というのがある。このふつうの電子はマイナスの電気をもっておりますが、プラスの電気をもったものがある、それが陽電子です。そういうものがやはり宇宙線の中で発見されております。そういうわけで宇宙線は、新しい物理学の発見の泉のようなものでございます。

その宇宙線が約 40 数年前に見つかったわけではありますが、はじめはよくわからない現象で、非常に注目をひいたのであります。そのよくわからないと申しますのはこういうことです。たとえば、ガラスを絹の布でこすると電気がおこる。それを放っておきますと、だんだんに電気がなくなってゆきます。これはもちろん空気中の湿気のために空気が電気を伝えるためもあるの

ですが、そういう湿気の全然ない空気の中でも電気がいつのまにか逃げている、そういう現象が知られています。空気にX線のような放射線をあてますと同じような作用が非常に強くなる。そういうわけで空気がこのような性質をもっているのは、何か放射線が空気中にあるというふうに考えられてきたわけです。ところがこの放射線が何であるかということが、はじめはよくわからなかったのであります。

ふつうこの地面の中には、ラジウムその他いろいろな放射性元素がありまして、したがって地面に近いところにはそういう放射線があるものです。その放射線がさきほど申したような作用を示し、地面から離れて上空にゆきますと、はじめはだんだんと減ってくる。そういう作用が減ってまいりますのは、それがやはり、土地から出てくる放射線のためだということを示していると考えられます。ところが、さらに上空にゆきますと、逆に今度はその作用が強くなってくる。そういうわけで、そのような放射線が、何か地面から出ているほかに、上から降ってくるのだろう、ということが問題になってくる。

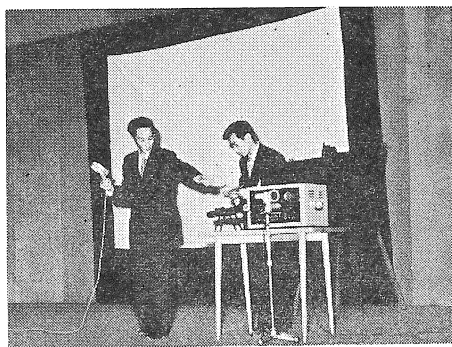
それで、はじめはそういう漠然としたことで、その放射線がいったいどういうものであるかということはわからなかった。たぶんX線、あるいはガンマ線のような電磁波の一種だろうというふうに考えられていたようであります。ところが、だんだんにそれが——電磁波はもちろんあるにはありますけれども——電気を帯びた粒子、荷電粒子だということがわかってまいりました。宇宙線がそういう電磁波だというように初め考えられていたことのなごりは、最近まで残っておりました。こんにちそういうふうに考えている学者はだれもいないのですけれども、物理学のいろいろな論文を分類してリストを作った本をみますとその中では、最近まで宇宙線は電磁波の仲間に入れられておりました。ところで、宇宙線は電気をもらった粒子だと申しましたが、つまり、ベータ線とかアルファ線とかいわれる放射線もその例なのであります。

すが、そういうものからできているということが、だんだんわかってまいりました。

そういうもののいろいろな性質、それからそういうものがどこからくるかというようなことがだんだん問題になってきて、わが国でも仁科先生が中心になって、いろいろな研究が行なわれてまいりました。それをこれから順を追ってお話してゆきたいと思います。

ガイガー・カウン ターを鳴らす

まず、この宇宙線がそういう電気をもった粒子である、放射性物質からでてくる粒子に似たものであるということについて実験をごらんに入れます(ガイガー・カウンターを示す。第1図参照)。



第 1 図

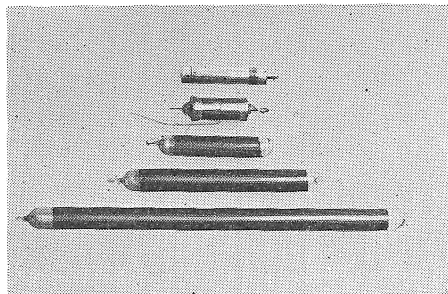
講演の実況。向かって左は講演者(朝永振一郎)、右は実験助手岡野真治氏。机の上の箱は、高圧電源・増幅・計数セット、前方においてあるガイガー・カウンターは直径 5.4 cm、長さ 78 cm のもの、この程度の大きさのカウンターでは、宇宙線の頻度は毎秒平均 7 個ぐらいになる。人体を上から見おろした断面積は約 1000 cm^2 であるから、人体をつらぬく宇宙線の頻度はこの 2.5 倍、つまり毎秒平均 18 個という勘定になる。

ここにカウンターが用意してございます。ガイガー・カウンターです。このごろ有名な、去年のビキニ事件以来有名になりましたものと同じものでございます。ここを上から荷電粒子がつきぬけますとカウンターが感じまして、つきぬけるたびに音がするようになっています。

宇宙線で、どれくらいの割合でそういう荷電粒子が降ってくるかと申しますと、いまお聞きのような、あれくらいの割合です。大体、 1 cm^2 に 1 分間に 1 個ぐらいで、カウンターの面積にもよりますが、あのくらいの大きさのカ

ウンターですと、あれくらいの回数になります（第1図の説明参照）。

ここにありますのはラジウムで、これから放射線がでておりまして、これをもってきますと非常にたくさん音がします。こういうものをもってこないで鳴っているのが宇宙線です。こういうものをポケットに入れておくと原子病になるんじゃないかとか心配になるかも知れませんが、この程度なら大丈夫だそうです。あの夜光塗料をぬった時計がありますね、どなたかお持ちの方ないですか？ 時計で夜光るやつです。ちょっと、すみませんが拝借します（時計をカウンターに近づける）。これはあまり鳴らない（爆笑）。もひとつ、



第2図

ガイガー・カウンターの事例。一番上はビクトリーン社製、ベータ線測定用カウンター。二番目は日本でロケットに積んだもの、他の3つもそれぞれ宇宙線用カウンター。

こいつは猛烈に鳴ります。まるで時計の検査ですね（爆笑）。あの時計の光るやつは、中にラジウムが入っています。宇宙線も同じような放射線ですが、宇宙線にふつう使いますのはこういう大きい計数管で、大きくなりますと相当面積が広がりますので、数が殖えてまいります。この大きさのこの管でこの程度ですから、皆さん方の体の中は相当、宇宙線がつきぬけております（第1図の説明参照）。

宇宙線はどこからくるか

そこで、宇宙線は、ああいうふうになら放射線が、ラジウムからでると同じような粒子が、降ってくる現象だということがわかります。そしてあとでお話しますが、地上、つまりこの辺で、その大部分は中間子である。その次に電子がたくさん含まれております。

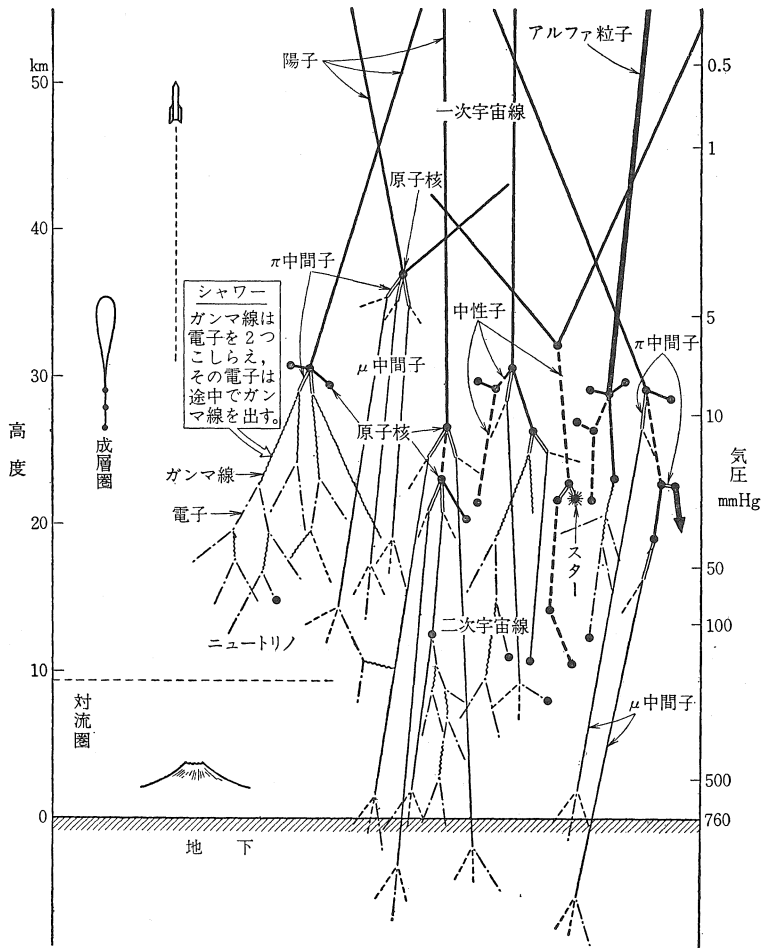
ところで、そういう粒子が、どこから降ってくるわけなんですけれど、だんだんわかってまいりましたのは、もともと地球の外からやってくるものの大部分は陽子であるということです。約80%が陽子で、残りはアルファ線、つまり、ヘリウムの原子核、それからリチウムの原子核、ベリリウムの原子核、そのほかいろいろな元素の原子核が、天から降ってきます。それが空気中に入りまして、空気の中で中間子を作ったり、あるいはそれが電子を、空気の中の酸素や窒素の原子の中から電子をとび出させたりします。（反陽子のことはあとで申します。反陽子はそんなに降ってはまいりません。）そういうことがだんだんとわかってまいりました。それで空気中にそういう天から降ってきたものが入りまして、大気の中でたぶんそれがたくさんの中間子をまずつくりまして、それからさきほど申しました陽電子やふつうの電子などをつくります。そしてまたガンマ線のような電磁波もできます。

大気中におこる現象

この空の大気の上から下まで、どういうふう
にその現象が起っているかということを想像した絵を、これから幻燈でごらんに入れます(第3図参照)。

これはその想像図でありますが、一ばん上のこの太い線は、上から降ってくる陽子とかいろいろな原子核であります。それが空気の中の酸素や窒素の原子の原子核と衝突して、それがこういうふうにもろいものをつくり出す(第3図の説明参照)。たとえば、細い波形の線で示したのはガンマ線ですが、このガンマ線はまた、電子をふたつこしらえる。その電子がまた途中でガンマ線をだします。こういう現象がかわるがわる起り、非常にたくさんプラスの電子、マイナスの電子が殖えてまいります。そのうちにまた、だんだんこれらのものが空気に吸収されて、ずっと下へゆくと再び減てまいりますが、図の下の部分をご覧になると、中間子の一部が猛烈によく物質をとおりぬけて地面の下深く入るありさまが、かかれています。

そういうことが起っている高さは、どのくらいかと申しますと、この図



第 3 図

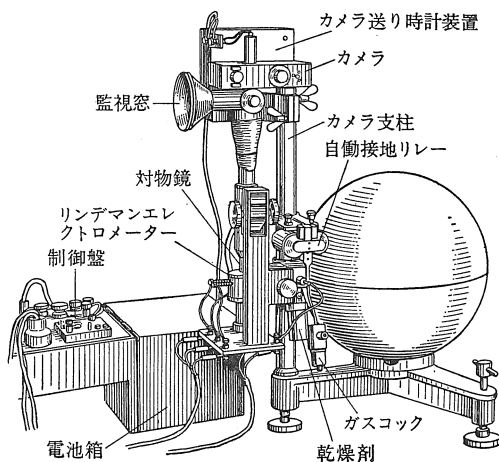
宇宙線が降ってきて、大気の中でひきおこす現象の想像図。左のほうの数字は海面からの高さをキロメートルであらわしたもの、上のほうの太い線であらわした一次宇宙線から π 中間子、 μ 中間子、電子、陽電子、ガンマ線等をつくり出す。一番左に示した例では、中性 π 中間子からガンマ線光子ができ、それから電子やガンマ線がたくさんつくられている。こういうのを電子シャワーと名づける。

では、富士山を比較のために書いてあります。それより高く20kmの辺が成層圏と呼ばれるところで、この辺の観測には風船を上げる。ロケットが50kmの辺までまいります(第3図の左上端)。

一番はじめの一次宇宙線、すなわち外からはいつてくるものを観測するのはロケットとか、あるいはこの辺では気球ですが、このようにいろいろな高さで、いろいろな事実が見つかります。こういう複雑な現象が空気の中で起っている。途中に、電子や陽電子その他がこのように1対ずつ分れて殖えていくという現象は、これをまた実際、実験室の中でもある程度観測することができます。こういうことがわかってきたのであります。

仁科博士の観測

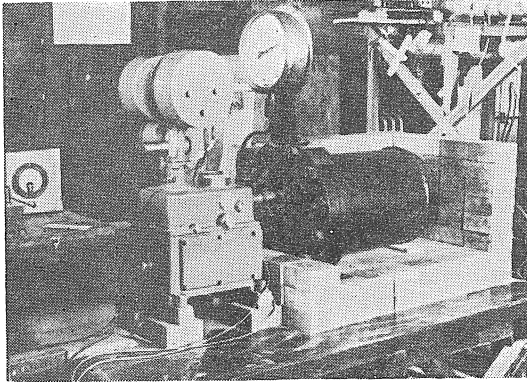
日本でも仁科先生がおられますときに、いろいろな観測を行ないました。宇宙線をはかりますのには、カウンターを使うほかに、もうひとつ宇宙線計というものをつかいます。仁科先生はこれを使って富士山に登ったり、あるいは地下に潜ったりいろいろな研究をなさいました。まずここにごらんに入れますのは、カウンターとちがった装置がどんな格好をしているかを示すものです(第4図)。これはコンプトン型の宇宙線計といわれるものであります。日本ではこの装



置を使って富士山の上で観測をしました。

第4図
コンプトン型宇宙線計。日本ではじめてつくられたもの。のちに、これを改良してもっと精度のよい仁科型宇宙線計がつくられた。

次にごらんに入れますのは、仁科先生がこれを改良されたものでありまして、仁科型といわれております(第5図)。こういう装置を使いまして、宇宙線といろいろの気象現象との関係、あるいは地磁気との関係、それから場所とどう変るかというようなことを、方々のいろいろな高さの所、いろいろな場所にこれを置きまして測定しました。



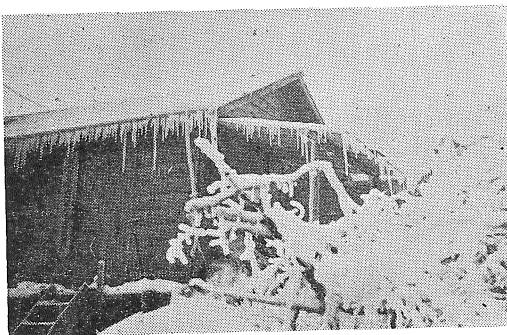
第5図

仁科型宇宙線計。
仁科先生の指導のもとに仁科研究室で設計され、理研の工作で5基同時に製作された。樺太(豊原)、東京、富士山、台湾(阿里山)、パラオの5カ所において同時観測を行なう予定であったが戦争のため実現できなかった。

さて、第一に問題になったのは、宇宙線がいったいどこからくるかということでした。

斜里岳における観測

ここでごらんに入れますのは北海道の斜里岳という山でございますが、そこに小屋を作りまして、そこへいまの装置をもちあげて測定をいたしました(第6図)。これは



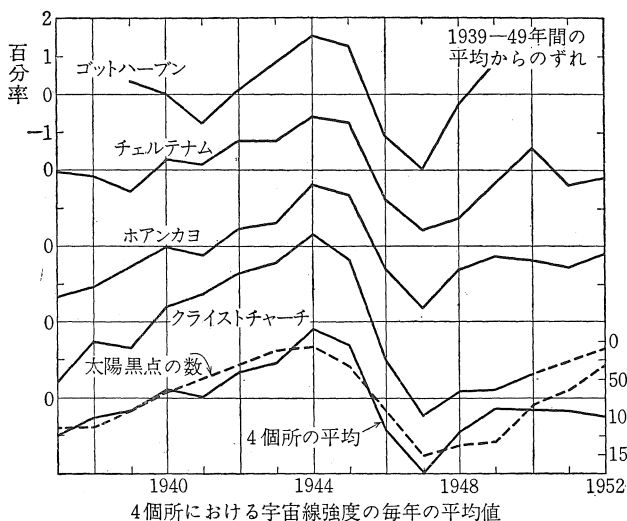
第6図

斜里岳観測小屋。
ここで仁科先生と、研究室員石井千尋、関戸弥太郎両氏が、皆既日食のさいの宇宙線強度の変化を観測した。東京での同時観測には、浅野芳広氏があたった。

どういう目的であるかと申しますと、その当時宇宙線は太陽から来るのではないかという考えがございました。宇宙線の源は太陽じゃないか、そうであるなら日食の時は、宇宙線の強さが減るにちがいない。そういうわけで、昭和11年6月に北海道で皆既日食がありましたときに、この小屋で測定が行なわれました。ところがこの測定の結果、日食で太陽の光が地球上のその場所に全然来なくなっても、宇宙線は一向に減らない。したがって宇宙線は月によって影になるようなものではないのですから宇宙線の相当の部分は（小部分は太陽から来るかもしれないけれども）太陽から来るのではなさそうだ、ということがこれでわかったわけであります。ところがいろいろ詳しくしらべてみますと、太陽ともある程度のある関係がある、太陽の黒点の数と、宇宙線の強さが、関係しているということが、わかってまいりました。

時間的变化

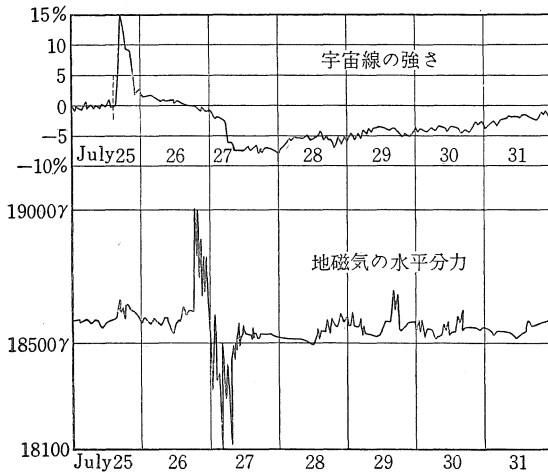
これが、毎年毎年の宇宙線の強さであります（第7図）。横に1940年、1944年、1948年、1952年となっておりますが、この曲線はいろいろな場所での宇宙線の強さ、



第7図
太陽の黒点の数と宇宙線の強さの関係、実線は上から、ゴットハーブ（グリーンランド）、チェルテナム（アメリカ）、ホアンカヨ（ペルー）、クライストチャーチ（ニュージーランド）の宇宙線強度、およびその4つを平均したものを示す。点線で示した太陽黒点数の曲線とかなりよく一致している。

この点線にありますのはこれは太陽の黒点の数であります。こういうふうにして、太陽の黒点の数とある関係がある。したがって、宇宙線のある部分は太陽からも来る。こういうことになったわけであります。

それから、太陽で爆発が起りますと地磁気が非常に変化いたします。いわゆる磁気嵐という現象がございます。それと宇宙線の強さがやはり関係しております（第8図参照）。このギザギザとなっている曲線は、上のほうのが宇



第8図

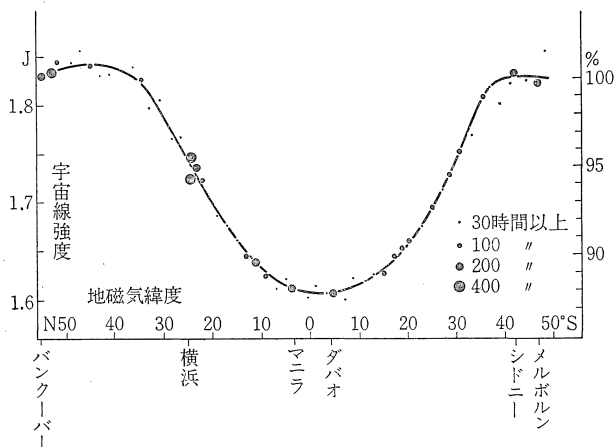
磁気嵐と宇宙線強度の関係。上が宇宙線強度、下が地磁気の水平分力。磁気嵐のときには、地磁気の強さははげしく変化するが、宇宙線強度もこれと大体並行して変化する。磁気嵐のとき宇宙線強度は減ることが多いが、まれにはこの図のように殖えることもある。

宙線の強さであります。ところどころ、宇宙線が急に殖えているというそういう変化がございますが、そのおなじ時にちょうど磁気嵐が起っておるといようなこともわかってまいりました。しかし日食の場合の観測からしましても、太陽から来るのはほんの小部分なのであります。

地球の磁気の影響

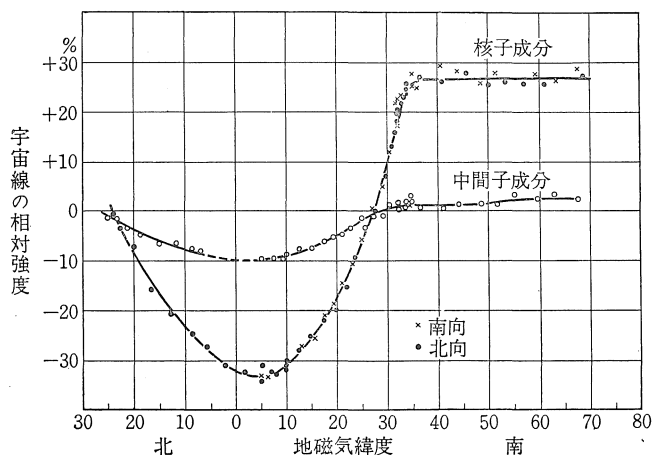
宇宙線として地球の外からどういいう粒子が入ってくるかということが次に問題になります。さきほどこれは陽子とかその他いろいろな原子核だということを申し上げましたけれども、そういうことがどうしてわかったかと申しますと——つまりはじめ入って来るものは電磁波のようなものではなく、そういう電気をもった粒子だということがどうしてわかったかと申しますと——緯度によ

て宇宙線の強さが違うのであります。これはそういう問題を確かめるために
仁科先生がさきほどごらんに入れました宇宙線計を船につまましていろいろ
な場所で強さを測りました（第9図a参照）。北野丸と平安丸という船にのせ



第9図 a

宇宙線の緯度効果。
地磁気の影響で、宇
宙線は地磁気緯度の
低いところで減って
いる。図は平安丸(北
米航路一昭13年4月
～11月)および北野
丸(豪州航路一昭12
年4月～13年3月)
にのせた宇宙線計に
よる観測値。



第9図 b

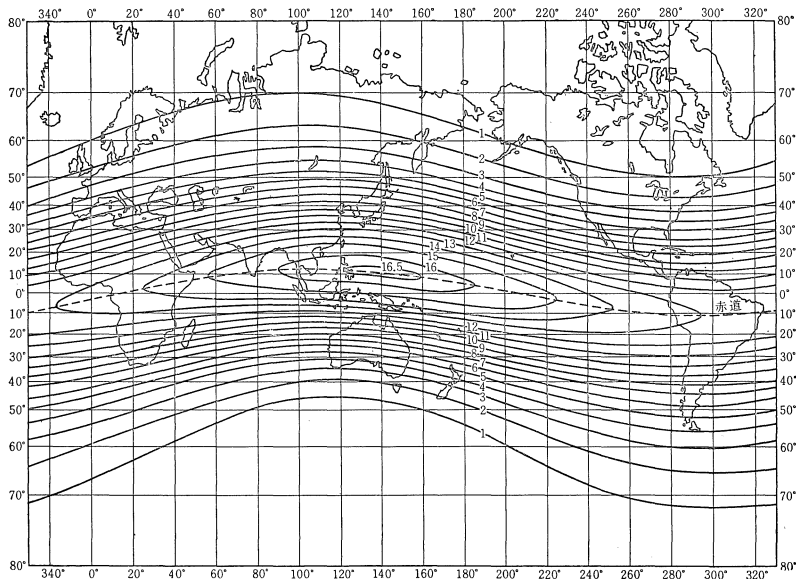
南極観測船宗谷
による観測値。

(注、講演の際に
はまだなかった。
1956～7年、科研宇
宙線研究室の小玉
正弘氏によって観
測されたもの)

まして、バンクーバー、横浜、マニラ、ダバオ、シドニー、メルボルン……
そういう場所でずーっと強さをはかってゆきますと、赤道へ行くほど宇宙線
の強さが弱い、極に近くなるとずっと強い、こうことがわかりました。

これは地磁気と宇宙線とが関係があるということでありまして、もし宇宙線のなかの、外から来る粒子が電気をもった粒子であるなら当然こういうことが予想されるのであります。

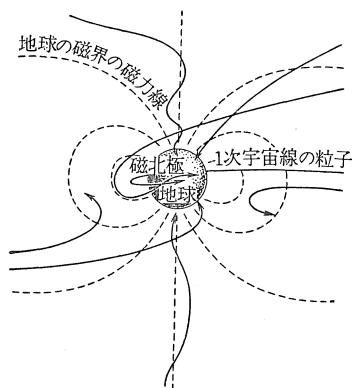
さて、こういう観測が日本のみならずいろんなところで行なわれまして、宇宙線の地図ができております(第10図参照)。強さの同じところを連ねた線をひきまして、こういう図ができておりますが、赤道のあたりは弱くて両極にいたって強くなる、というぐあいになっています。



第 10 図

宇宙線の等強度曲線。地磁気緯度の低いところでは値が小さくなっている。

さて、地球は大きな磁石のようなものでありますが、電気をもった粒子がそういう磁石のところにやってきますと、どういうことになるかという図がここにございます(第11図)。非常に複雑なうねうねと曲る道をたどります。エネルギーの非常に大きい粒子は、そういう磁石のそばに来てほとんど曲ることなく突進しますので、そういう粒子はまんべんなく地球に来るわけで



第 11 図

一次宇宙線の粒子が地球の磁場で曲げられる有様をしめす。両極では、うねうねしても地球に到達できるが、赤道近くでは、はねかえされて、エネルギーの大きいものしか到達できない。

ありますが、エネルギーの低い粒子は磁場で曲りまして、大体、極の近くに集まる、そういうことがわかっております。そういう電気をもった粒子の理論的な性質と、さきほどごろんに入れました宇宙線の強さが極の方で大きいということ、このふたつを結びつけまして、やってくる粒子は電気をもったものだということがわかってまいりました。この電気がプラスかマイナスかということも実験的にきめることができます。いままで申しましたのは緯度によって強さがちがうという現象であります。東からくるのと西からくるのと強さがちがうということから、電気の性質もプラスかマイナスかということも結論されます。結局プラスのものが大部分である。そういうことがわかってまいりました。それからまた、もっと直接たしかめるのには、ロケットを飛ばして非常に上空の、一次宇宙線がまだたくさんあるところまであげてしらべます。そのような観測で、さきほど申しましたように、陽子のほかにいろいろな元素の原子核があるということがわかったわけであります。

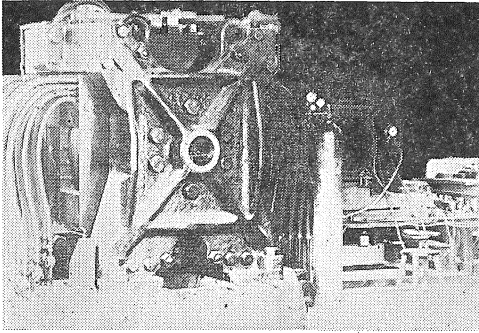
宇宙線の粒子のうち、はじめにやってくる粒子は、非常に上空でないとかまらないのですが、それがもとになって生まれてこの辺にまでやってきております粒子、先刻カウンターで音をお聞きになったあの粒子は、いわゆる霧箱という装置でみることができます。

霧箱による観測

この図がいわゆる霧箱であります (第12図)。

霧箱というのはどういう装置かと申しますと、

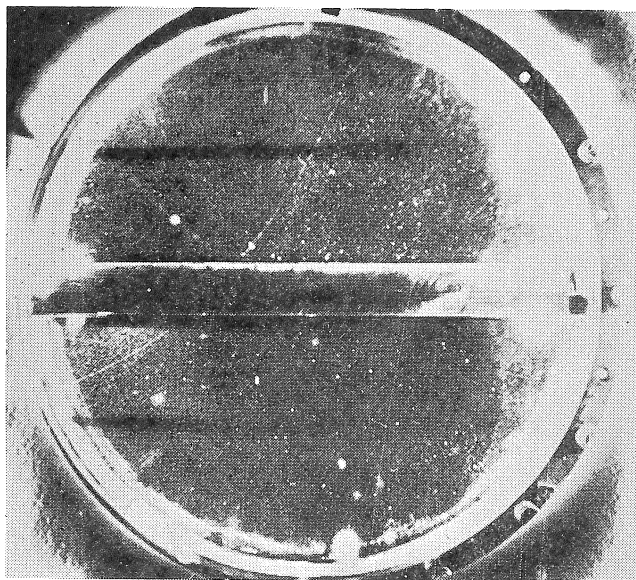
宇宙線の粒子はもちろん目に見えないのですけども、これが通ったあとの



第 12 図

理化学研究所にあった大型霧箱装置。大きな塊は電磁石で、多数の管は強い電場をつくるための電流によって発生する熱を除く冷却水を通す管。霧箱はこの電磁石の極のあいだにはいつている。写真で電磁石の右がわにのぞいている黒いまるいものがそれである。この装置は、当時は世界で一二を争う大きなものであったが、空襲で焼かれてしまった。

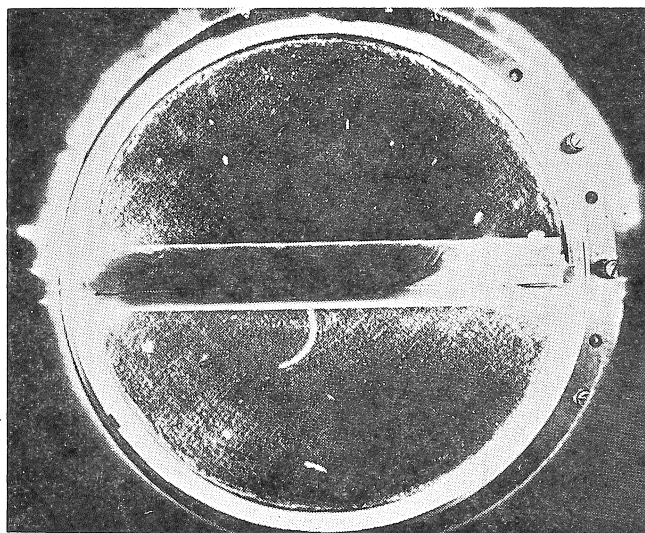
道、足跡を目に見ることができます。たとえて申しますと、近ごろよく見えます飛行機雲のようなのだとお考えになればいいと思います。つまり水蒸気で飽和した空気の中を宇宙線の粒子がとびますと、そのあとに水が凝縮しまして、つまり飛行機の飛んだ跡に雲ができるようなもので、そのあとにすーっと通った筋ができます。その筋を横から光で照らして写真にとったのがこれです。これはひとつの例であります。ここに白い筋がすーっとでています (第13図およびその説明参照)。どうしてこんなに曲るかと申しますと、これには磁場をかけてあるからです。さきほどの写真で大きな四角いのがありましたのは電磁石であります (第12図の説明参照)。磁場のなかでは電気をもった粒子は曲るというお話を申しましたが、その曲った道が見えています。この写真は、宇宙線の中に中間子があるという写真でありまして、この曲り方そのほかからこれの質量をきめることができます。その結果この粒子は電子ではない、陽子でもない、結局これは中間子だということがわかりました。この写真は日本でとりました中間子の非常に重要な写真であります。宇宙線の中に中間子があるということが、これではっきりと見えたわけですから (第13図)。



第 13 図

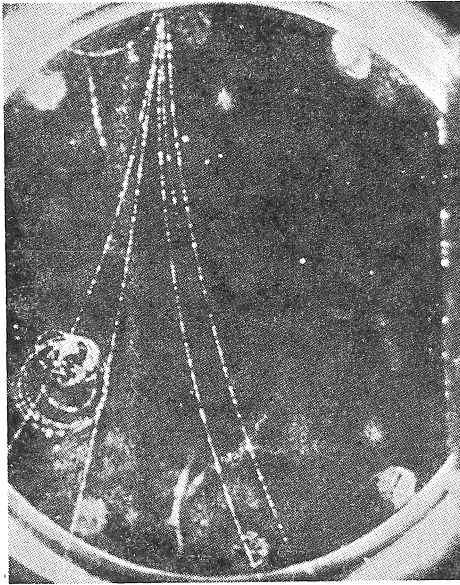
霧箱写真の例

a. 上から左下へ細いかすかな線がづらぬいているのが中間子の飛跡。磁場がかけてあるので曲っており、その曲りから運動量がわかり、飛跡の濃さから速度がわかるので、質量がきめられる。まん中に横になっているのは鉛の板であって、中間子がそれをよく通りぬけることが見られる。



第 13 図

b. 中央の鉛の板から、中間子がとびだしている。飛跡の長さからエネルギーがわかり、曲りから運動量がわかるので、質量がきめられる。

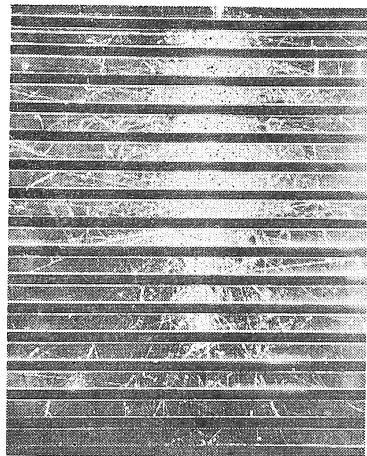


第 14 図

プラスとマイナスの電気をもった電子がでている霧箱写真。この図の上部の一点から右下へ向かっている3本が陽電子、ほかの3本が普通の電子の通った跡。電子は走りながら右へと曲っているのに反し陽電子は左へと曲っている。図の左下の小さくまわっているのは、電子によってさらに原子からたたきだされた電子（いわゆるデルタ線）。

これはさきほど、宇宙線がやってまいりますと、空中で、大気の中でプラスの電気とマイナスの電気をもった電子が1対生まれるという話をいたしました、その写真であります。ここからふたつ、みつ、右へ曲ったのと左へ曲ったのが出ております。この曲り方は電気の符号によって逆になります。これはどっちがプラスか知りませんが、一方をプラスといたしますとマイナスの方は反対に曲る(第14図の説明参照)。曲り方から電気の符号がきまるわけで、これは霧箱の上の金属からこういう陰陽電子の対がいくつか出ている例です。実は、その金属の上方から宇宙線の中の電磁波の成分——ガンマ線——が、どこからかやってきまして、陰陽電子が1対生まれ、この電子がまた途中でガンマ線を出しましてそれがまた1対を生むというぐあいにして対がいくつかできたのです。こういう現象が大気の上から下まで起ると、非常にたくさんの粒子になるのであります。

さきほど、大気の中で起っていることの想像図をごらんに入れましたが、



第 15 図

鉛板をたくさん入れてとった霧箱写真。大きなシャワーが写っている。これは第3図の想像図に示した大気中の現象の縮図をなしている。

鉛の板でいま申しましたような現象が起りまして、空気の中と同じように非常にたくさんの粒子にわれてだんだん殖え、やがてだんだん減ってくる。これがつまり大気の中で起っていること——さきほどその想像図をごらんに入れた——のいわば縮図であります。こういうふうなものが宇宙線のひきおこす現象として霧箱という装置で目に見えるようになるわけであります。

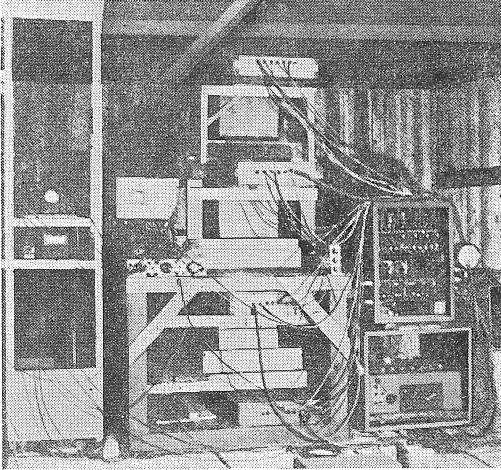
こういうふうにして宇宙線の中の電子の成分は、いま申しましたように鉛で、いったん殖えますがまもなく減ってしまいます。そして下の方ではほとんど中間子だけが残ります。中間子というのは、さきほど第13図の写真でごらんに入れましたように、鉛を平気で通りぬけて、そして貫徹力の強いものでありますので地下非常に深くまで入ってまいります。

地下の深いところで宇宙線の強さはどうなっているか、それをしらべますには、トンネルや鉱山のあなの中に宇宙線計をもってはいります。

この想像を実際に見せるのがこの写真であります（第15図）。大気というのはご存知のように非常に厚い空気の層であります。これをギューとおしつけたといたしますと、水の密度ぐらいまでおしつけたとき 10 m くらい、水銀の密度までおしつけたとき約 760 mm ということになります。ですから大気ですと非常に厚いのですけれども、鉛の密度までおしつけたと考えますとそう厚くなくなる。この写真で段になっていますのは鉛の板で、この鉛の板を入れてさきほどの霧箱で宇宙線の通っ

たとえば、トンネルのいろいろな場所では深さがいろいろ違う。それぞれの場所で宇宙線の強さを測ります。仁科先生は清水トンネルで実験なさいましたが、それは世界で一番深いところでやった宇宙線の測定であります。

これが(第16図)、そのトンネルの中の実験室の光景であります。この中にも



第 16 図

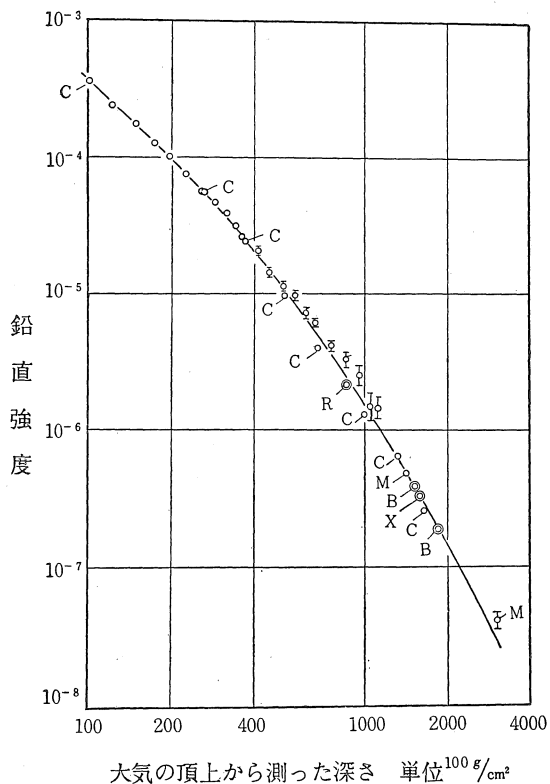
清水トンネルの中の実験室。実験室の上方の岩の厚さ1200 m. 水に換算すると3000mで、現在でも世界で最も深いところで行なわれた宇宙線の測定である。ここで、仁科先生と、研究室員石井千尋、関戸弥太郎、飯尾慎、宮崎友喜雄、増田時男等の諸氏が観測を行なった。

ぐりこんで、1939年から1945年まで長い間、研究室の人たちがいて研究しておられました。

次の図は(第17図)、深さと宇宙線の強さの関係をあらわしています。よこの目盛は大気の頂上からの深さです。たての目盛は宇宙線の強さをしめしております。これが清水トンネルの点であります(第17図の説明参照)。こういうところにいろいろな外国でやっている測定の点がありますが、こういう曲線にのってまいります。

新しい発展

こうして宇宙線につきましてある程度の概念はえられたわけではありますが、そのころ戦争になりまして、研究はわが国でも外国でもおとろえました。しかし、戦争がすんでからは、非常に新しい研究が行なわれはじめました。それで特に新しい技術としては、写真の乾板を使うということであります。さきほど申しまし



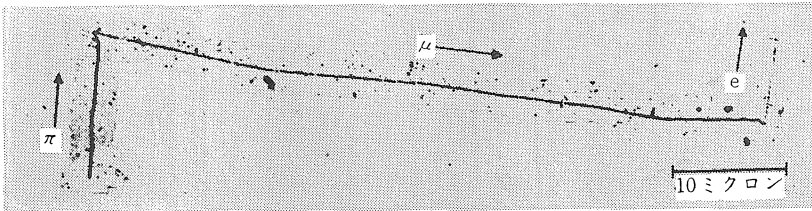
第 17 図 深さと宇宙線強度との関係。

Mは2つともが清水トンネルの測定値, C, R, B, X はそれぞれグレイ (オランダ), レーゲナー (ドイツ), パルノッチー・フォロー (ハンガリー), グライセン (アメリカ) の値. 深さは水の厚さになおした値.

たように、この霧箱という装置は飛行機雲のように宇宙線の通った足跡に雲ができる。それを写真にとるわけではありますが、もっと直接写真の乾板の中を宇宙線が通りぬけますと、その通った跡に銀の粒子が、還元されて、現像して顕微鏡でしらべるとそこに銀の粒がみられます。そういう現象が利用されるようになりました。

つまり、さきほどは水蒸気の中の水滴でありましたが (飛行機雲もやはり

水滴であります) その代わりをするものが銀の粒であります。現像の方法

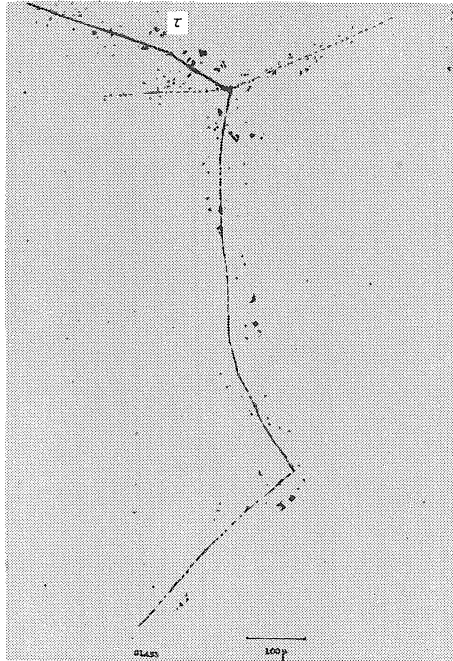


第 18 図

写真乾板中の中間子の飛跡、左の方で π 中間子がこわれて μ 中間子ができ、それが右の端でさらにこわれて電子ができています。

を適当にやりますと通った跡に粒ができる、そういう技術が発達しました。ウィルソンの霧箱のようなものは非常に重いので上空高くあげるのはなかなかできないのですが、写真の乾板は軽いので非常に高いところにあげることができます。その結果、中間子に2種類あるということがわかってまいりました。 π (パイ) 中間子とか、 μ (ミュー) 中間子とかいうものであります。

これがそうであります (第18図)。乾板の中にできました道です。さらにこの乾板を使いますとまた新しい粒子が見つかりまして、ここにありますのは



第 19 図

写真乾板中の τ 中間子の飛跡。図の上のほうで τ 中間子が3つの π 中間子にこわれている。(τ 中間子は今日ではK粒子の一種というになっている。) そして下の方でそのなかのひとつが μ 中間子になっている。

(第19図), τ (タウ) という名前の, ギリシア字の τ , つまり T に相当した名前をつけた粒子です。それがここで, 3つの中間子に分れる(第19図の説明参照)。これは π 中間子です。ここまで, この中間子が来まして, ここでそれがなくなりまして, 新しい別の種類の中間子になるという写真であります。これはもちろん, 特殊な乾板を特殊な方法で現像して, それを顕微鏡でみたものであります。この乾板の方法は非常に有力でありまして, いろいろな種類の粒子が, つまり中間子に2種類あるのみならず, いろいろなものがあることがわかりました。いま申した τ というのも中間子であります。ここにごらんに入れますのは, 宇宙線の中でみつかりましたいろいろな粒子の一覧表であります。まず, 陽電子, ふつうの電子は宇宙線でなくともありますが, 電子のうちでプラスの電気をもったのは宇宙線の中でみつかりました。それから μ 中間子, これは非常に貫徹力の強い粒子でありまして清水トンネルの

新 粒 子 一 覧 表

粒 子	記号	質 量	平均寿命	崩 壊 形 式
μ 中間子	μ^+	210	2.2×10^{-6} 秒	$\mu^+ \rightarrow e^+ + 2\nu^0$
	μ^-	210	2.2×10^{-6}	$\mu^- \rightarrow e^- + 2\nu^0$
π 中間子	π^+	276	2×10^{-8}	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu^0$
	π^-	276	2×10^{-8}	$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu^0$
	π^0	262	$< 10^{-14}$	$\pi^0 \rightarrow 2h\nu$
中 性 V_2	V_2^0	~ 800	$\sim 10^{-9}$	$V_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
τ 中間子	$\tau^\pm$	969	$\geq 10^{-9}$	$\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^+ + \pi^-$
χ 中間子	χ	~ 1100	$\sim 10^{-9}$	$\chi \rightarrow \pi + ?^0$
中 性 V	$V^\pm$	~ 1000	$\sim 10^{-9}$	$V^\pm \rightarrow ?^\pm + ?^0$
中 性 S	S	~ 1400	$\sim 10^{-9}$	$S \rightarrow \text{中間子}(\pi, \mu) + ?^0 + (?^0)$
K 中間子	K^+	~ 1300	$\geq 10^{-9}$	$K^+ \rightarrow \mu^+ + ?^0 + ?^0$
中 性 V_1	V_1^0	~ 2200	$\sim 10^{-9}$	$V_1^0 \rightarrow p^+ + \pi^-$
陽 電 子	e^+	1		安定

注 これは講演当時のもので, その後, 素粒子物理学の進歩とともに修正された。後出, 菊池正士博士の講演59ページ参照。

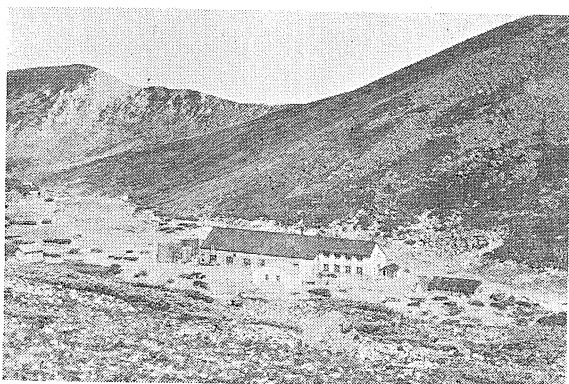
底まで入ってくるのがこれであります。それから π 中間子、これは不安定でやがて μ 中間子にこわれる。これが湯川さんの予言されました中間子です。それから中性子、これは宇宙線の中でなくてもみつかったのですが宇宙線の中にもございます。陽子、アルファ粒子、それからここにありますいろいろな粒子、 π^0 、 τ 、K、V、 V_1 、 V_2 。こんなふうにいろいろな新しい粒子がございます。それが表に示したようにいろいろな質量をもつ。質量を測りますのには、いろいろな方法がございますが、さきほど申しましたように磁場をかけて曲げてみるというのもひとつの方法です。それから、それがいろいろにこわれる。たとえば、 τ というのは先の写真にうつっておりましたように3つの π にこわれる。 π はさらに μ にこわれる。そういうふうに非常に複雑に変化しております。こういうふうにはいろいろの種類の粒子がみつかったということは物理学にとって非常に重要な出来事でありまして、ここ2、30年前までは、すべての物質は陽子と中性子と電子とからできているとそういうふうと考えられておったのでありますが、実は、もっとこんなにいろいろの粒子があるということがわかったのであります。

乗鞍の山の上で

これは、今までの写真のような殺風景な写真でなく甚だ景色のよい写真であります、これは乗鞍宇宙線観測所です。

宇宙線の実験は山の上でやったり、地下でやったりしますが、戦後日本でもそういう研究の重要性を研究者が感じまして、われわれが文部省にたのんで作ったものであります。ここにあります建物、これがそうです。この宇宙線観測所で、さきほど申しましたような霧箱をもちあげたり、カウンターをもちあげたりして研究しております。

次の写真は風船をあげる研究であります(第21図)。この夏、関東であげた風船があります、アドバルーンのように丸いものではなくて、こういうふうにショボッとしたものであります。上へあがると気圧が下がりますのでこれ

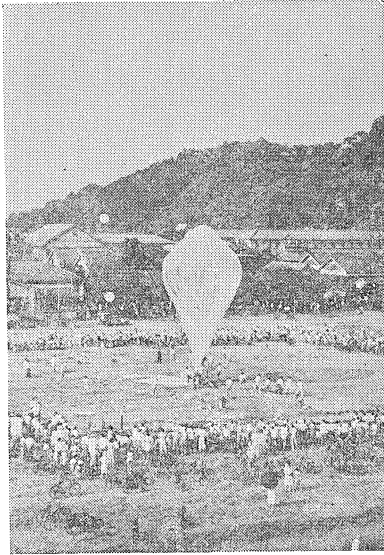


第 20 図

乗鞍観測所。上図、乗鞍岳の頂上と摩利支天岳（右手に見える。そこにコロナ観測所がある）のあいだの鞍部（海拔 2840m）にある。手前に見えるカマボコ形屋根の小屋（下図では右端）は、その後地球観測年（I G Y）で中性子観測のためにつくったもので雪が屋根につもらないようにしている。

がまるくふくれる。地面近くではまだあんなにジョンボリしている。これは残念ながら海の中に落っこってしまったものです。どうも日本という国は具合悪いことには幅がせまいものですから、海のほうにじきにおちてしまう。こういう風船をあげる研究は世界各国でも行なわれています。

次はロケット。ロケットをあげますとさきほど申し上げました一次宇宙線のたくさんある所まであがりますので、これは非常に有力な研究であります。細長いロケットのあの頭のところだけが宇宙線の方のご本尊で、あとはまあ燃料だけです。この中にカウンターを入れたりいろいろして、上空、非常に上の方の研究をやるわけであります。



第 21 図

宇宙線観測用の風船をあげているところ。ポリエチレン製で、上空で破裂しないようにじゅうぶん余裕がとってあるので、地上近くではしぼんでいる。この風船に写真乾板をのせ、その中にできた飛跡をしらべる。風船にロケットをのせて、途中からロケットを発射させることもでき、それはロックーンとよばれている。

こういう宇宙線がいったいどこから来るかということが問題になります。さきほど申し上げましたように太陽からも一部まいます。太陽から来る宇宙線も、太陽の研究そのほかには大事なことであります。ことに磁気嵐との関係などがありまして、電波通信との関係で、実際上にも非常に大事であります。それから太陽から来るのはエネルギーの非常に低い宇宙線の成分でありまして、したがってこういうものは特に南極北極にたくさん集まっています。そして今度南極探検で宇宙線の研究が行なわれますが、これはこういう種類の宇宙線を第一の問題にいたします。オーロラの原因になるのもこういうふうな太陽からくる粒子のせいであるということがわかっています。

太陽から来るのではない、もっとエネルギーの高い宇宙線はどこから来るかという問題がおこります。これはさきほど申し上げました陽子とそのほかの原子核がどこからかやってくるのでありますが、こういうものは宇宙の中にもいくらかありまして、宇宙の星と星との間は真空だと申しますが 1 cm^3

に1個ぐらいの密度でこういうものがあります。しかしそれらのうち大部分はそんなに速く走っているわけではない。この中で、非常に速く走っている粒子が宇宙線なのですが、そんな粒子ができるのは、どういうわけであるかということが、次に問題になります。

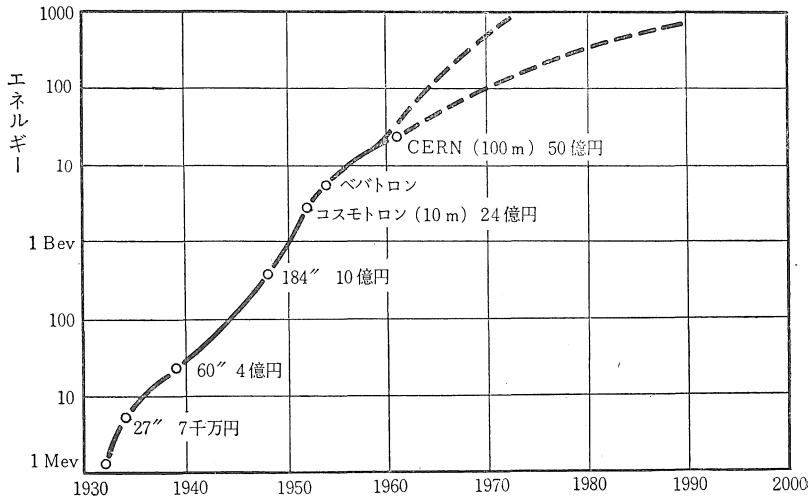
これにはいろいろな臆説がございます。加速装置、サイクロトロンとかあるいはまた、シンクロトロンなどの名をご承知かと思いますが、これらは磁場の中で荷電粒子をぐるぐるまわしながらだんだんに加速してゆく。これと似たようなしかけが宇宙の中で行なわれているのではないか、地球はひとつの大きな磁石であります。さらにもっと大きな磁石、たとえば銀河系もひとつの磁石——磁場をもっているのですが、そういうところにさきほどのような電気をもった粒子が入りこんでいるうちに加速される、そういうふうな臆説が行なわれています。そういうふうになりまして、天体の問題と非常に密接な関係があるだろうというわけであります。このように宇宙線の研究は天体の問題とも連なって非常に重要な問題になってまいりました。

加速装置はどん

どん大きくなる

いま加速装置の話が出ましたから、ついでにその話をちょっといたします。ここにありますグラフ(第22図)の横の方には年代が目盛ってあ

ります。1932年から始まっていますがこの年に、さきほど渋沢理事長の話に出ましたコッククロフト、ウォルトンの最初の加速器ができました。縦の方にはエネルギーが目盛ってあります。年代が進むにつれてエネルギーの大きな加速器ができてくる。いま動いている一番大きなのはアメリカのカリフォルニア大学にあるベバトロンという装置でして、これは1953年にできています。1960年ごろになると、100億電子ボルト程度の加速器がヨーロッパにできます。これはジュネーブのヨーロッパ原子核研究所のものです。値段を申しますと、このジュネーブのものは50億円です。コスモトロンは24億円、それより小さい184インチの機械は10億円、なかなか仁科記念財団の2千



第 22 図
加速器の発達のすう勢

万円では、どれも作れません。

この辺(第22図中程の高さ)から上が宇宙線の中にある粒子のエネルギーであります。このペバトロンあたりでは、すでに宇宙線に相当するものが実験室でつくれます。大きさのことで、ここにありますが、ここにありますのは加速器の半径で、コスモトロンは10m、それに対してジュネーブの機械は100mです。このグラフをのばしてゆきますと——これはあやふやで、台風の進路よりあやふやなのですが——西暦二千何十年になりますと、ちょうどこの辺(第22図の右上外側)に来ます。大きさにして地球の大きさの程度になってしまう。そしてエネルギーも、宇宙線のうちの大きい方のエネルギーをもった粒子に比べられるようになります。もちろん、こういう大きな加速器は、日本ではいうまでもなくおかねがないからできないんですけど、日本でなくとも地球の赤道をひとまわりする加速器は、まずなかなかできない。

そういたしますと、宇宙線の研究が非常に大事になるわけであります。さ

らに大きくなりまして、銀河系の規模の大きさの加速器を作るという話になると、これはとうていできないのですが、幸いにして畑中先生のような方がおいでになって、天文でこの間を補って下さる。こういう計算は、学者の勘定ですから、渋沢さんの2千万円の予言* ほどははっきり当るかどうかあやしいものです。

こういうふうなわけで宇宙線の研究というものは、実に規模雄大なものであるということがいえると思います。そして一方では天体につながり、他方では原子の構造につながる重要なものであります。

さきほど反陽子のお話、ご質問があったのですが、反陽子は、このペバトロン、この装置でみつかったのであります。エネルギーからいいますと当然宇宙線のなかでも反陽子がつくられているはずでありますけれども、なにぶん、宇宙線は強さにおいてこういう加速器にはかなわない。1分間にひとつぐらいしかこない。ことにこういう大きなエネルギーのものになりますと、なお少ししかやっこないのでありますから、強さにおいて、こういう加速器にはかなわないのであります。将来いろいろな方向へ研究が進みますと、反陽子のみならず、また、変った現象が必ずみつかるだろうと期待しています。これまで大変長い間かたくるしいお話、恐縮でございました。

* この講演のまえに、仁科記念財団設立発起人会を代表して亀山直人博士から募金経過報告があり、その中で亀山博士は、募金の当初財界の実状に詳しい渋沢敬三氏に募金の見とおしについて相談したところ、2千万円ぐらいなら不可能ではなからうといわれ、そのとおりになった。推測が正確なのにおどろいた、という打明け話をされた。

Ⅱ 流転する宇宙

畑 中 武 夫

東京大学教授

冬は星空の最も華やかな季節である。すばる、オリオンの星々が東天をかざり、全天一の星シリウスもやがて昇ってくる。そこで夜空をいろどる星の世界をたずね、新しい宇宙の姿をえがいてみよう。われらの太陽をはじめ、多くの星は太古から光と熱とを放射し続けている。原子の科学はこの限りないエネルギーの源を明かにした。これらの星は冷却していくといわれたが、新しい科学はむしろ熱くなると説く。ではこれらの星はどのような生涯をたどるのであろうか。広い宇宙の中には新しい星が生まれ、またその生涯をとじつつある。一たび生涯を終えた星は虚空に散り去るが、再び新しい星として生まれるという。星は輪廻を続け、宇宙は貌を変ずる。このような宇宙観、とくに流転する宇宙のすがたを平易に解説する。

<昭和30年12月6日 講演>

は じ め に

「流転する宇宙」という、少し変わった題にいたしました、今日私が申し上げたいと思いますのは、われわれが宇宙をどういうものとして認識しているかということ、それを、ただ現在あるがままの姿を申し上げるだけでなく、それが過去にどのようにして生まれたのであり、いままでどう変ってきたのか、そして将来どういう形に進化してゆくであろうか、そういう点に焦点を合わせて申し上げたいと思うのであります。ただ、時間の関係上、主として銀河系とそのなかの星のことにとどまるとは思いますが、その点はあらかじめお許し願いたいと思います。で、現在われわれが宇宙をどう見ているかということから始めて、次にその変化について話を進めたいと思います。

まず、現在の宇宙の姿であります。

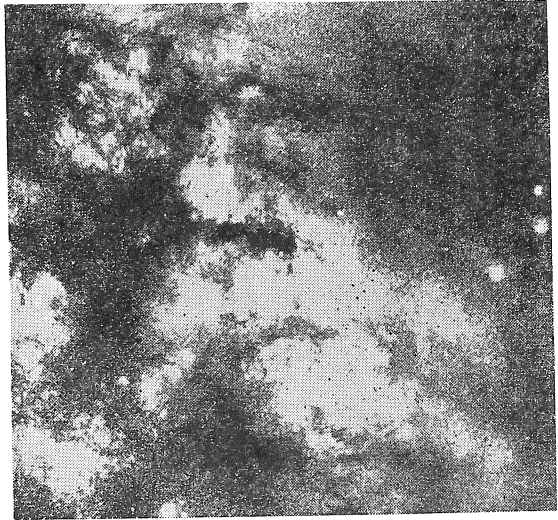
宇 宙 の 姿

ご承知のように、夜空に輝くあの星たちは、数個の惑星をのぞきますと、すべてはわれわれの太陽と同じように、光と熱を出している巨大なガスのかたまりであります。肉眼に見えます星は、地平線の上に約 2, 3 千個ありますが、望遠鏡で見ればもっとも多く、さらに望遠鏡で長い時間をかけて写真を撮りますとずっと数がふえてきます。そして天の川の写真などをごらんになりますと、星はまったく、いっぱいにつまっているように見えます。けれども空間的に考えますと、星はずいぶんスキスキになっているのであります。

かりに太陽の大きさを直径 1 mm として、半径 100 km の空間のなかにくつ星が入っているかを考えてみます。ここで星と申しますのは、火星とか金星とかいう惑星は全部のけてしまって、太陽と同じような恒星だけを問題にするわけですが、こういう恒星がいくつくらいあるのでしょうか。

半径 100 km でありますから、東京から沼津あたりまでの距離を半径にした球であります。平面的な円ではなく、空間的な球を考えますと、その中に直径 1 mm の恒星が約 50 個しかないという計算になります。

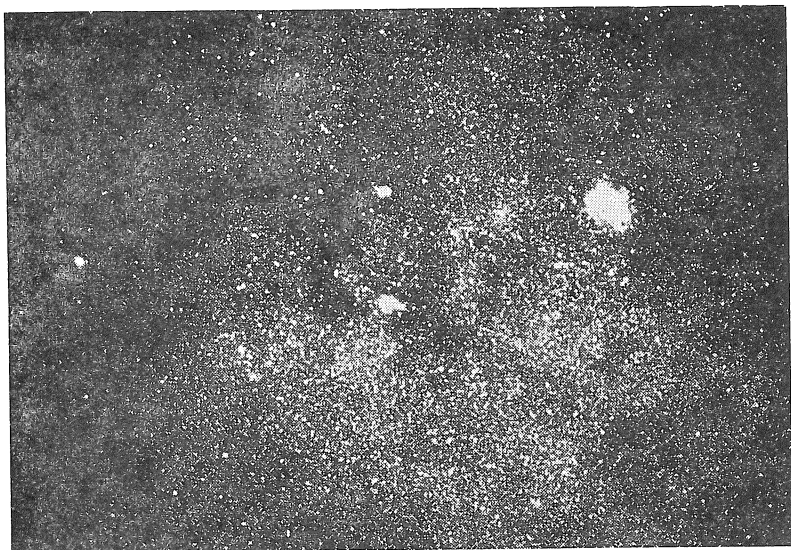
それくらい星と星との間はスキスキになっているのですが、天の川を見ますと、これまたずいぶんたくさんの星があります。この写真(第1図)は夏の夕方、南の空に見えます、射手座(いて)座の方向の天の川の写真ですが、このぼーっとしているのが、雲でもなんでもありません、これが



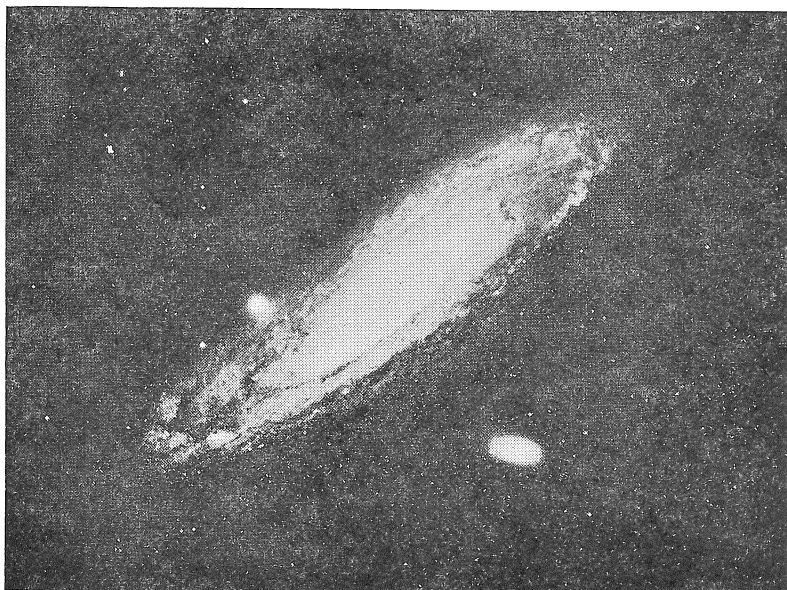
第1図 射手座の方向の天の川、ぼーっとしているのは全部星である。

全部星であります。この射手座の方向にわれわれの銀河糸の中心があるために、ことに星が多く見えるのであります。次の写真(第2図)も天の川の一部でありますが、これら2つの写真のなかにところどころ星が欠けているのは、星がないのではなく、星の手前にある星間物質の雲のために星が隠されているからであります。

さて、いくつくらいの星が集まって、われわれのこの天の川宇宙をつくっているのか、あるいは、この天の川宇宙がどんな形をしているか、であります。天の川宇宙の形はすでにご存知のように、いわば円盤のように星が集まっているのであります。しかしその本当の姿は、山に入って山を見ずとも申しましょうか、なかなかわかりませんでした。むしろ、ほかの宇宙を見て、たぶんこんなものであろうかと想像し、それから逆にわれわれの天の川宇宙の姿をよくしらべるということになったのであります。



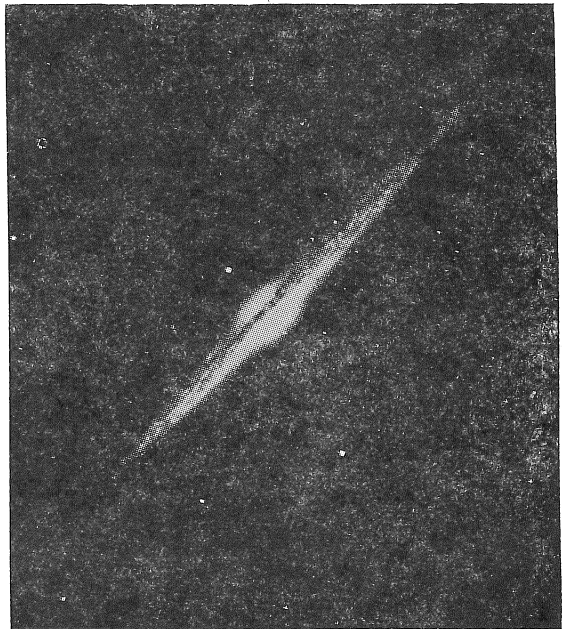
第 2 図 星が欠けているのは，暗黒物質がかくしているからである。



第 3 図 アンドロメダ星雲．われわれに一番近い宇宙．

渦 巻 星 雲

われわれの隣の宇宙はどういうものか。この写真(第3図)はアンドロメダ座という星座にあります有名な星雲でありまして、これがわれわれに一番近い宇宙、つまりわれわれの天の川宇宙と同じようであれわれに一番近い次の宇宙であります。ここまでの距離が光の速さで約200万年かかるという遠さであります。ここで特にご注意願いたいのは、渦巻の形に星が分布していることであります。中心の方は、なんとなくぼやっと光っていますが、これもやはり全部星の集まりであります。こういう他の星雲の姿を見、また、いろいろの推論から、われわれの天の川宇宙も遠くから見ればこんな形をしているのではないかということを考えるようになってきました。次の写真(第4図)は、もし、われわれの天の川宇宙を真横から見たら、おそらくこういう姿に見えるのではないだろうか、という例であります。ここでまたご注意願いたいのは、この真中がまらなくなっていることであります。ふつうよく天の川宇宙が円盤状だといひまして、かなり平べったいように思いますけれどもそうではありませんで、何かまるいものが中心にあるらしいのであります。またもうひとつご注意



第4図 天の川宇宙を真横から見たような星雲。まるいところ、平たいところおよび黒い筋がある。

願いたいのは、真横に黒い筋が入っていることであります。この黒い筋は、さきほどのアンドロメダの大星雲のときに渦巻があり、その渦巻に沿って何か黒いものがありましたが、それと同じもので、その本体は星と星との間にあるガスと、ガスから固まった小さな固体の粒のようなものであります。それらが光をさえぎりますからこういう黒い筋になって見えているわけであり

ます。

はじめの天の川の写真にところどころ黒い場所がありましたが、あれはこういう吸収物質が特に多く集まったものであります。次の写真(第5図)は、こ



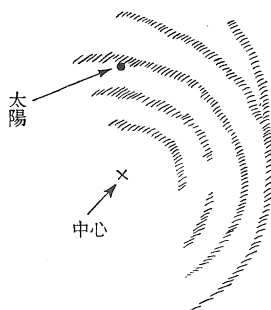
第5図 天の川宇宙を上から見たような星雲。
渦巻がある。

れまた別の星雲でありまして、上から見た天の川宇宙の姿に似ているらしく思われます。

ここにも、やはり渦巻のあることにご注意願います。ただ、この星雲にはすこしかけ離れた子供のようなものがくっついていますが、われわれの天の川宇宙にはこういうものはなさそうです。天の川宇宙の構造は、真上から見ればこのような恰好をし、ま横から見れば前の写真(第4図)のような姿をしていて、斜

めから見ればたぶんアンドロメダ星雲のような形に見えるのではないかと考えられるようになってきたのであります。

しかし、いままでにこのような形であろうと推測はしてまいりましたが、いっさい、われわれの天の川宇宙にこういう渦巻が本当にあるのかどうかということは、これは想像だけでありまして、あるらしいとは推定されていましたが、本当に掴まえてはいなかったのであります。ごく最近になりまして、われわれの天の川にも本当に腕がある。そしてその腕がわれわれから見て、どういうところにあるかということまで、わかってまいりました。右の図(第6図)をごらん下さい。この図の中央が銀河系の中心でありまして線で書きましましたのが現在までにわかった渦巻の腕の場所であります。



第6図 現在までに電波でとらえられた天の川宇宙の渦巻、中心は天の川宇宙の中心、渦巻の腕にはガスや小さい固体の粒が沿っている。

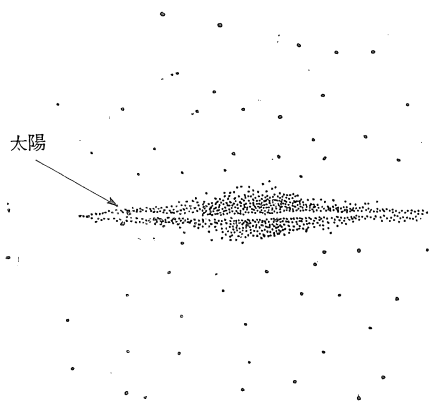
電波天文学の功績

このような渦巻の腕を求めましたのは、最近問題になっています電波天文学の功績のひとつであろうかと思ひます。前の渦巻星雲の写真でごらんのように、渦巻の腕には黒いもの、すなわちガスや小さな固体の粒が沿っているのですが、そのガスの主成分が水素であり、その水素が、波長約21 cmのマイクロ波を出しますので、そのマイクロ波をたどることによって渦巻の腕を発見したのであります。電波を使いますともうひとつの利益があります。それは、光ですと、いま申しました黒いもの、すなわち光を吸収する物質のために光がさえぎられて遠くの方が見えませんが、電波はずっと遠くまで見通せることであります。光で見てわかるのは、上の図でいひまして、太陽を中心として銀河系の中心までもとどかないくらいの長さを半径とする範囲内であります。

ですから、銀河系の中心を越えた反対側のことなどは、光では全く知るすべがありません。

幸いにも電波天文学というものが発達しまして、銀河系の中心を越えた向こうの姿まではっきりわからせてくれたわけであります。こうして、われわれの天の川宇宙にも、腕があるということがわかってきたのであります。

銀河系のコロナ



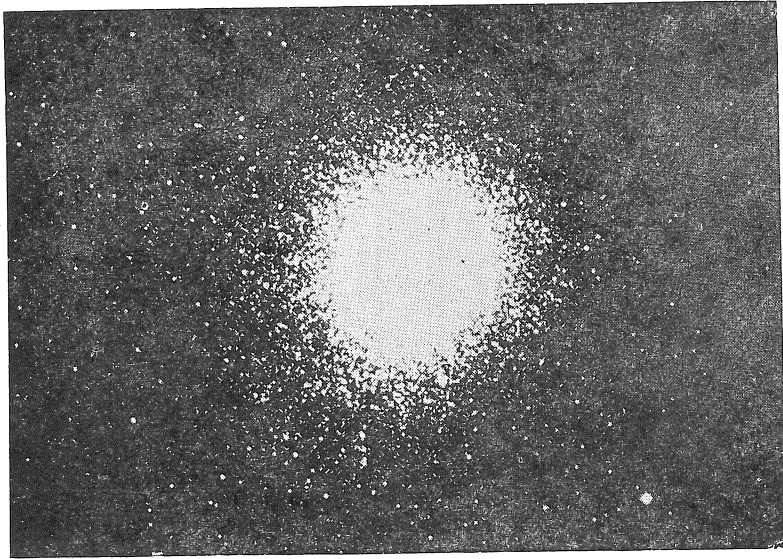
第7図 天の川宇宙を横から見た想像図。
まわりに点々とあるのは星の集団。

とか集まった集団なのであります。そしてこれらの集団が大きな天の川宇宙をとり囲んでいるように見えております。もう一度くり返しますと、一番まんなかにまるいものがある。そして大きな平べったいものがある。そしてもうひとつそのまわりに大きなまるいものがある。でありますから、天の川というものはふつう円盤のようなもの、と申しますけれども、そうではなくて、まるいものと平べったいものと、またまるいもの、いいかえますと、まるいものと平たいものとの組合せから、天の川というものは成り立っているのです。

さて、いま申しました星の集団がどういうものか、次の写真(第8図)でご

次の図(第7図)をごらん願いましょう。これはわれわれの天の川宇宙を横から見たら、たぶ

んこうだろうと思われる姿を書いたのであります。さきほどの星雲の写真には、まん中の平べったいところが写っていたのでありまして、まわりに点々と書いたものは、はっきり写っておりませんでした。この点々としたものは何かと申しますと、このひとつひとつが、星が1万個とか10万個



第8図 1~10 万個の星の集団。こういう球状星団が銀河系をまるくとりまいている。

らんに入れます。これは1万とか10万くらいの星が集まった星団でありまして、こういう星の集団が銀河系の中心に対して、ほぼ球状に分布しているのです。つまり、この星団自身が球のような形ですが、そういうものが同時に銀河系のまわりを球状にとり囲んでいるのであります。こういうように銀河系をまるくとりまいているのが球状星団だけかと申しますと、それだけではなくて、非常に稀薄ではあります、ガスがあるらしいのであります。そのガスは、銀河系の平面内のガスよりはずっと稀薄でありまして、光の観測では全くわからないのであります、電波を出していますので、それから推測されるのであります。こういうように平べったいと思っていた銀河系を包むような球があって、その中に稀薄なガスがあり、また点々と球状星団があるというのが銀河系の本当の姿であることがわかってまいりました。そして、この大きな球を銀河系のコロナと呼んでおります。コロナは太陽の

コロナと同じ意味でありまして、何か銀河系をかざる「冠」というような意味であります。

星の数といろ いろな星雲

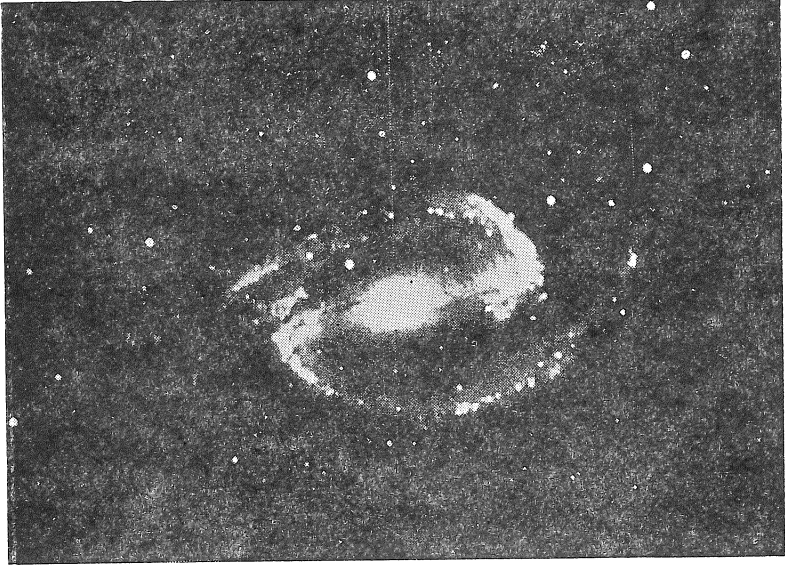
さて、この銀河系のなかに、いったい星がいくつくらいあるかと申しますと、もし星の質量が平均して太陽くらいでありますならば、星の数は約千億であります。ただ、銀河系のなかでもわれわれの近く、あるいはもっと広くって円盤状の部分、すなわち渦巻のところでは、質量の $\frac{2}{3}$ くら



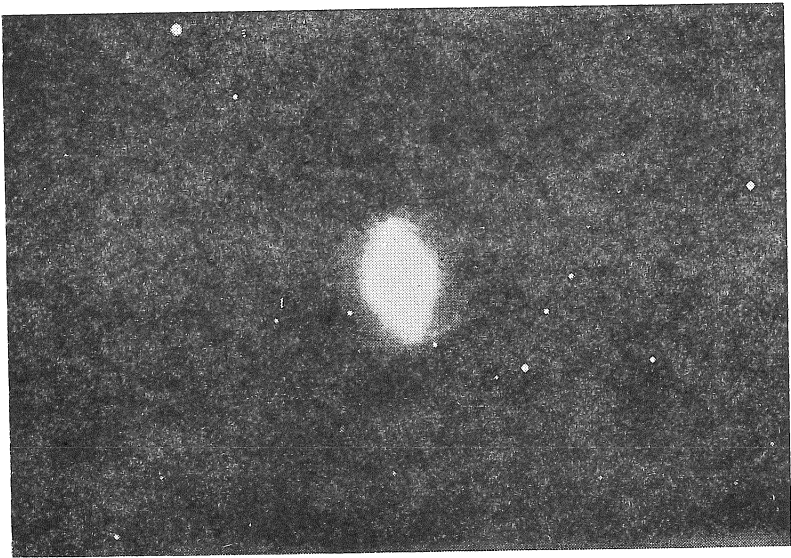
第9図 4つの星雲。変った形のものがある。

いが星の形、残り $\frac{1}{3}$ くらいが星と星との間の星間物質の形をしているといえます。ですから星間物質はなかなか大事な役目をしていることがご推察願えると思います。

銀河系が以上述べてきましたような形をしているとしまして、それでは、他の星雲にはどんな形のものがあるでしょうか。まず、左の写真(第9図)をごらん下さい。ここには4つの星雲が写っていますが、なかにはかなり形の変ったものがあることをご注意願いたいと思います。次の写真(第10図)をごらん下さい



第10図 渦巻星雲のひとつの変形。棒状の両端から渦巻が出ている。



第11図 まるい星雲。白いところは全部星が集まっている。

と、これはまた変な形をしています。何か棒のようなものの両端から渦巻が出ています。つまり、いままでのような簡単な渦巻ではなくて、渦巻のひとつの変形とも考えられます。次はまるい星雲の例であります(第11図)。この漠然と白いのは全部星が集まっているのでありまして、やはりわれわれの銀河系と対等な多くの星の集まりであります。こうしたヴェラエティのある種々の星雲が集まって、大宇宙が形成されているのであります。

けれども、なぜこんなにいろいろの種類の星雲があるのか、つまり非常に渦巻の開いたものだとか、あるいはまるい星雲だとか、そういうものが、ただ漫然と存在するのであるのか、それともお互の間に何か関係があるのか、これが大きな問題であります。私は今日はこの問題まで入ることはできないかと思いますが少なくとも銀河系の姿、すなわち、星の集まった円盤状のものと、球状星団で特徴づけられていますまるい銀河系のコロナを、どう考えるか、ということにまで話をすすめてみたいと思います。そのために、星の進化と申しますか、星の一生ということから、お話申し上げたいと思います。

星 の 一 生 星の代表として、まず太陽を考えましょう。

太陽は、われわれ地球に住むものにとっては、光と熱の根源であり、太陽がなくては生きてゆくことはできないのであります。毎日毎日あんなに熱と光を出していますならば、太陽はだんだん冷たくなっていくだろうと考えられてきました。そして地球の気候もだんだん寒くなるだろうと思われていました。けれども私は今日、太陽はすこしずつ熱くなってゆくだろう、地球の気候も暑くなるだろうと申し上げたいのであります。

どうしてこんなことがいえるのでしょうか。それにはふたつの推論の方法があります。

ひとつは、いわば理論上そういう考え方になるのであります。理論上と申しますのは、太陽はなぜ光っているのか、ということを経験的に追求しまし

た結果と、太陽の構造とを組み合わせまして、そういう理論ができたのであります。太陽を輝かせているもの、それは一口に申せば原子力であります。現在、原子力発電などとして注目を浴びております原子力は、ウランのような重いものをこわして、そのときに出るエネルギーを利用するのであります。太陽での原子力はその逆でありまして、元素のなかで一番軽い水素を融合させてヘリウムにする、そういうときに出るエネルギーを使う原子力があります。水素爆弾は、太陽で行われているこの反応を、地上に実現したものであります。しかし、きわめて瞬間的に反応を起させますので、ああいふ激しい破壊力をもっているのですが、もしゆっくりゆっくりと反応を続けさせることができますならば、これはウラン利用の原子力に代わるべき第2の原子力機関を得ることになります。この実現は決して容易だと思いませんけれども、もし実現することができましたならば、稀少な元素ウランでなく、また死の灰の心配のない原子力の平和利用の道がひらけるのであります。

とにかく、太陽は水素をヘリウムに変えながら光を出しています。もう少しくわしく申しますと、太陽の内部で、こういう原子力でエネルギーが生まれ、それが太陽の表面まで伝わってきて、太陽の表面を6000度くらいに保っているのですが、同時に太陽の内部がだんだん熱くなります。つまりエネルギーが全部出しきれなくて、内部にたまって温度が上がる。そのために、ますます原子核反応の起る速さが速くなり、したがって、また余計に熱を出す。その熱がまた少し中にたまって太陽の中を少し暖める。そういうことが重なりまして太陽がますますエネルギーを多く出すようになって、地球の気候も暑くなると考えられるのであります。でありますから、太陽は、いわば加速度的に水素を消費しているわけであります。もし、太陽が現在のような速さで水素をヘリウムに変えたとしますと、そしてかりに太陽が全部水素でできているとしますと、水素が全部なくなるのは、まず500億年から1000億年くらいであろうかと思えます。しかし、太陽が全部水素でできてい

るではありませんし、将来は加速度的に水素を消費すると思われていますので、太陽の全寿命は、たぶん 100 億年くらいと考えるのがよさそうであります。

太陽の寿命

いま申ししたのはひとつの理論的な方法ですが、これとは別に、太陽の将来を考える方法があります。それは、太陽だけを見るのではなく、あらゆる星をうまく並べて見ることであります。

かりに火星に生物が住んでいるといたしましょう。その火星人を地球につれてきて、1 時間、いや 10 分間だけ、銀座の街頭に立たせて人間を見せるとします。そして地球の人間というものが、どうして生まれ、どういう変化をし、最後にどうなるのか、これに答えよとわれわれが火星人に問題を出すとします。もし火星人が、ある 1 人の人間をつかまえて 10 分間、穴のあくほどじっと見たところで、人間がどうして生まれ、どうして生長し最後にどうなるかということは、決してわかりそうにもありません。しかし、もしこの火星人が非常に賢明でありますならば、おそらく 10 分間に銀座を通る多くの人を見て、これをある系統で並べるであろうと思います。たとえば、何となく子供っぽい顔をした人とか、大人っぽい顔をした人とか、大分年をとった人とか、そういう統計に並べる。そうしますと、若いうちは小さくて、だんだん背が伸び、最後には髪の毛が白くなるというふうに、かりに 10 分間人間を見たとしても、その統計から、何か人間の生涯というものに対して考え方がえられるように思えます。いま火星人が 10 分間銀座にきたと申しましたけれども、われわれが、いまかりに 100 年間、太陽をじっと見つめていたところで、これは火星人が 10 分間に見るものに比べてもっと短い時間しか観察したことになりません。たとえば太陽の寿命がかりに 100 億年であるとしめすと、太陽を 1000 年の間観測するとしめしても、50 年の寿命の人間を 3 分間見たことにしかならないからであります。つまり、われわれが観

測的に太陽の生涯をしらべるために取ろうとする方法は、あらゆる星をしらべて、火星の銀座見物にならって、それらのある系列に並べ、これを研究するということになるのであります。

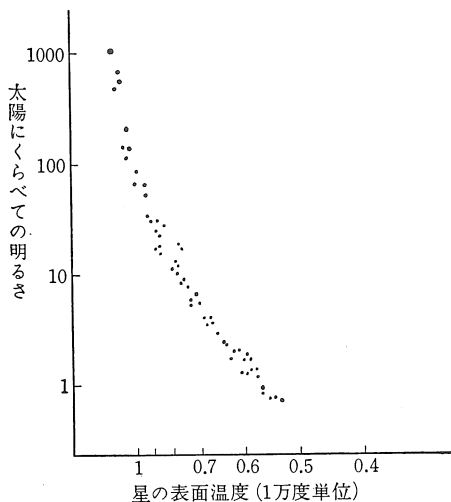
星の明るさ、
温度、大きさ

さて、夜空の星をながめると、明るい星、暗い星がいろいろありますし、またよくごらんになれば少し赤味をおびた星もあります。もち

ろん遠ければ暗く見えますし、近ければ明るく見えるのは当然でありますから、見かけだけの姿で議論を進めてはいけません。同じ距離までもってきたときの明るさにして比べなければなりません。そのための手続きの話を全部省略して、とにかくその本当の明るさがわかったものとして話を進めます。明るさだけではなく、温度も半径もわかったものと考えていただきます。

このようなものが全部わかったと考えると申しまして、なかなかそう考えていただけないかも知れませんが、たとえば前の写真にありますような球状星団は、空間的な集まりであります。われわれから見ますと、この星団の中の星は、いわば全部同じ距離にあると考えてよろしい。そういうような一群の星は、もし全部同じ距離にあると考えますと、星の明るさが全部同じ割合で割引されていますので、お互は同じ割合で暗くなっています。こういう星の集団のひとつは、秋の空に出てまいります「すばる」、すなわちプレヤデス星団であります。このすばるという名は日本語でありまして、『枕草子』に清少納言が「星はすばる」と書いてあります。これは何か外国語だと思ってわざわざスバルと発音される方がありますが、これは間違いであります。さてこの星団には何百かの星がありますが、これらの星はさきほど申しましたように、一応全部われわれから同じ距離にあると考えてよろしい。そこでこの群の中の星について火星人的統計をやってみるわけであります。

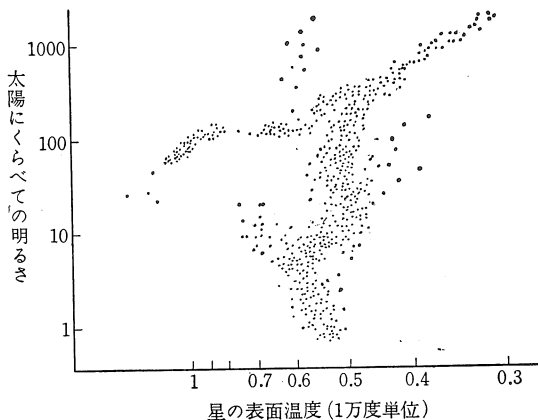
ここに(第12図)書きましたのは、人間の身長とか、体重とかというものに相当する目安を考えるわけで、縦軸に星の明るさをとり、横軸に星の表面の



第12図 「すばる」の星の明るさと表面温度との関係。点がきれいな列になっている。

温度をとっています。縦軸は、太陽と同じ明るさ、太陽の10倍、太陽の100倍、太陽の1000倍というように目盛をつけてありますし、表面の温度は4000度、5000度、6000度、10000度、というふうに書いてあります。太陽をもしここに書き入れますと、太陽は太陽だけの明るさの縦の目盛で、横は表面温度6000度でできるひとつの点であらわせるわけであります。それはともかくとして、このすばるの星

たちのこういう行列は、まことに見事というほかありません。なぜ、すばるの星たちの火星人的統計がこんなきれいな列になるのか、あるいはまた、宇



第13図 球状星団の星の明るさと表面温度との関係。「すばる」の場合とは全く違う。

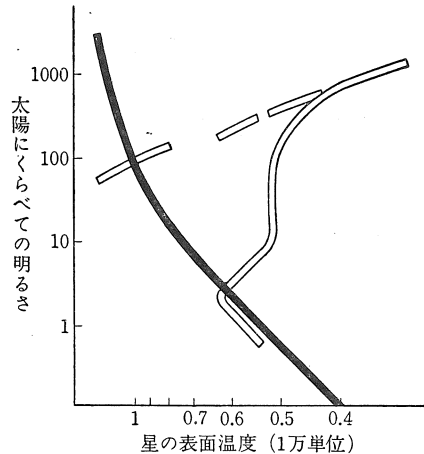
宙のどこの星をとってしらべてもこういうきれいな行列になっているのでありましようか。

左の図(第13図)は、前に写真のありました球状星団のなかの星について同じような統計をした結果であります。驚いたことには、

これがすばるとは全然違うグラフになっていることであります。

この統計と前のすばるの統計とを、模型化して比べて見ますと右の図(第14図)のようになります。

たまたま選んだふたつの星の集団で、その中の星の統計に、このような違いがあるのであります。



第14図 第12図および13図の模型化による比較。このふたつの統計図は既知のふたつの種族の代表といえる。

星の種族

いったいこういう、いわば全く違った統計があらわれたのは、どういう事情によるのでありましょうか。その前に、こういうふたつの統計が偶然選んだふたつの星の集団から出てきたのであって、もっともっといろいろの統計図があるのでしょいか。結論的に申しますならば、いま出てきたふたつの統計図はいわばわれわれの知っているふたつの種族の代表といえるのであります。あの球状星団の統計は、他の球状星団での統計の代表でありますし、もっとひろくいえば、銀河系の中で球状の分布をしたもの、つまり球状の種族の特徴であります。またさきほどのすばるの示している統計は、いわば円盤状に分布している星の示す統計と考えられるのであります。

逆に申しますならば、同じ銀河系に属している星でも、全体としての空間的な分布が平べったいか、まるいか、ということで、それらの示す統計がこのように違うということでもあります。この考えをもう少しおし進めますと、

こういうふたつの、何か異質的なものが銀河系のうちに共存している、というふうに思われてまいります。それで、これらを区別するため「種族」という名をつかい、すばるのようなもの、あるいは平べったい分布のものを第1の種族、球状星団のように球状に分布しているものを第2の種族と呼ぶことにしているのです。このように、本質的に何か違う別の人種のようなものが混然と入りまじっているのが、われわれの天の川宇宙の姿であります。しかしこれは天の川宇宙にかぎりません。他の星雲でもやはり、こういう混じり方をしているのであります。いったい、こういうふたつの種族は何を意味するのか、どうしてそれらが混じり合っているのか。こういう問題に入ってゆきたいと思います。

星の進化と ベーテの論文

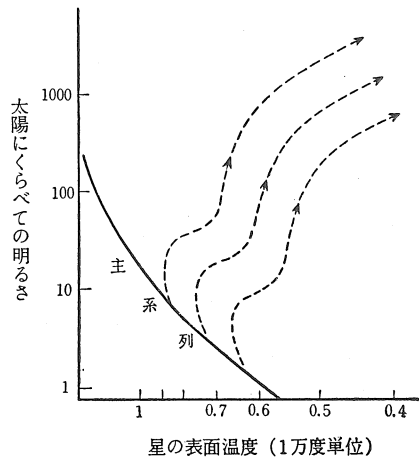
さて、太陽のエネルギーの源は原子力であると申しました。それは1939年にアメリカのベーテが発表した論文ではっきり示されたのであります。ちょうどその論文が日本にまいりましたころ、私が麻布にいます天文の教室で、この論文を紹介したのであります。そのとき、仁科先生にお願いして、わざわざ来ていただいて、先生の前で私がこの論文を紹介したことを、いまでも覚えております。そのベーテの研究が端緒となって、星の新しい進化論が発展しはじめたのでありますから、仁科先生を記念するこの講演会で、星の進化と宇宙の流転のお話をいたしますことは、私にとって光栄であり感慨もまた、ひとしお深いものがございます。

星のエネルギーの源が、水素をヘリウムに変える原子力であるということが、ベーテその他の研究で明らかにされてから、さきほどごらんに入れましたような星の統計、あるいは星の進化が、どのように説明されるようになったのでありましょか。星の中の水素が燃えてヘリウムに変えるということから、その結果としてふたつの違った星の構造を考えることができます。ひとつは星の中でもものが非常によく混じり合っている場合であります。もし

混じり合う速さが速ければ、水素から変ったヘリウムは別のところへ運ばれ、なくなった水素がすぐに他から補給されます。ですからそういう混じり合いのいい星では、はじめかりに星が全部水素でできていたとしますと、それがだんだんヘリウムの多い混合物に変ってくるのであります。つまり星の中の物質は均一ですが、成分が時間とともに変ってゆくわけでありす。しかしもしかりに、星の中でものが混じり合うことが遅ければどうなるでしょうか。

星の中で水素がヘリウムに変換されているのは、温度の高い中心部ですから、ここに変換されたヘリウムがふえるようになります。つまり燃えかすであるヘリウムという灰が星の中心部で芯のようにでき、その外側の縁のところで水素がヘリウムに変ってエネルギーを出すようになります。そこで燃えた水素がヘリウムに変わりますから、芯がふえてくる。こういうようにヘリウムでできた芯が、だんだん増大するのであります。

はじめは無反省に、星の中では、いつも物質がよく混じり合っているのであろうと考えて、そういう進化論ばかり考えていたのでありますが、それではさきほどの統計図は説明できません。一方実際の星について計算しますと、星の中の混じり合い方がたしかに遅い、という結果も出てまいりました。したがって後の方、すなわち星の中にヘリウムでできた芯が生長するという考え方が事実に近いことがわかってきました。



ここに(第15図)書きしたのは、混じり合わない場合の星がどうなるかという進化の径路であります。

第15図 星の進化の径路の図。はじめ主系列の上に並んだ量が時間とともに変化するありさまを示す。

図の上に主系列とかりに名をつけましたのは、これはさきほどの統計の図にありましたプレヤデス、すなわち「すばる」の星が並んでいた列のことであります。この進化の径路の図の意味は、星がはじめこの主系列の上にならんでいたとして、それからどうなるかという道筋を書いたのであります。この図で見ますと、星は主系列を右に離れるように進化するのでありますが、これは、星の半径が次第に大きくなるということを意味しています。

星が時間とともに変化する有様は、この図のようではありますが、変化する速さは同じではありません。星が主系列から離れるのは、星の中心にできるヘリウムの芯が、星全体の質量の 10% くらいになったときなのでありますが、それまでの時間が星によって大へん違います。主系列の左上の方にあります星は、質量は大きいのですが、それに比べて星の明るさが非常に明るいのであります。星が明るく輝いているということは、それだけ多量の水素を消費していることを意味しますから、かりに太陽の 10 倍の質量の星が 1000 倍の明るさで輝くとしみますと、ヘリウムの芯が全体の 10% になる時間は、太陽にくらべて 100 分の 1 でしかないはずです。すなわち星の変化といいますが、進化といいますが、主系列を離れて巨星のコースをたどる速さは、図の左上の方がずっと速いのであります。ですから、かりに星を主系列の上にならべたと仮定して、「用意ドン」でスタートさせるとしみますと、この進化のコースを左上のものはアッという間に走り去り、右下のものはなかなかスタートラインから離れないでまごまごしている状態にあることになります。そしてその中間ほどの星が、あるものは主系列を離れてかなり遠くへ行き、あるものはようやく離れようとしているというありさまになっているはずであります。

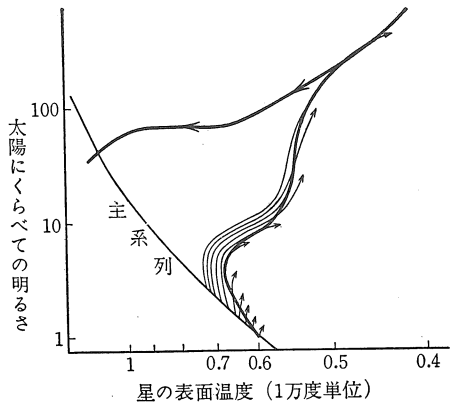
次の図(第16図)は、こういう考えから、星をスタートラインにならべておいて出発させてから、ある時間たった時の星の状態を書いたものでありますが、これがいかにも球状星団のなかの星の統計から得られました前の図に似

ていることにご注意願いたいのであります。

スタートさせてからどれくらい時間がたったと考えていいのでしょうか。計算によりますと、おそらく50億年ないし60億年たったのがこの球状星団の状態であるということになります。すなわち、球状星団の星は、いまはずいぶん妙な統計図を示していますが、50ないし60

億年前にはみんな主系列の上に、きれいに並んでいました。それが、時間がたったために、主系列の左上の方の星はもうなくなってしまい、中くらいの星が統計図の中央辺に進んできていて、右下のものはまだ昔の主系列から離れていないのだと考えられるのであります。もっと進めて申しますと、第2種族の星というのは、ずっと昔につくられ、そのまま進化したものの集まりであるといえましょう。

ところが、これと対照的な第1種族の星の統計は、どう考えればいいのでしょうか。さきほどのすばるの統計図をごらん願いますと、あの中には太陽の1000倍も明るい星があります。この星がかりに太陽の20倍の質量をもっているとしても、全寿命が太陽の50分の1にすぎません。太陽の寿命を前に申しましたように100億年としますと、この星は2億年の寿命しかないはずであります。こういう星が、現在主系列にいて輝いているということは、そういう星がずっと後で、つまり、球状星団の星が生まれた50ないし60億年という昔に比べてずっと後で、生まれたに違いありません。もしこの星が50ないし60億年昔に生まれたとしたら、今はもう星としての生涯を終っ



第16図 星を主系列の上に並べてスタートさせたときのある時間後の状態。球状星団の場合の統計とよく似ている。

ていなければならないからであります。すばるのような星団の星は、球状星団に比べて、ずっとずっと後で生まれたものだと考えなければならないのであります。

実は、すばると同類の他の星団のなかには、もっと年齢の若いものもあります。したがって第1種族の天体は、第2種族のそれにくらべて、ずっと後に生まれたものだと考えなければならないのであります。

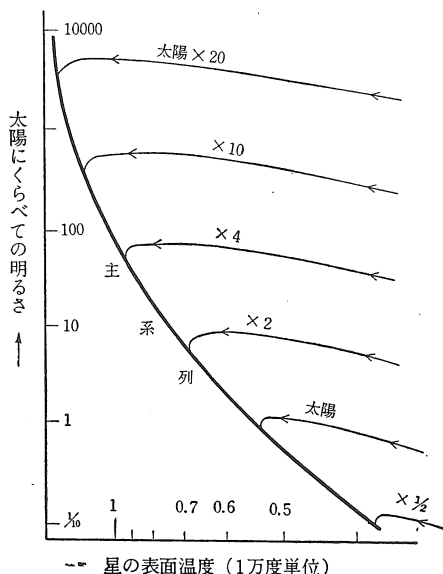
星は何から生まれたか

ではいったい、星は何から生まれるのでしょうか。星と星との間の空間は、全くの真空ではなく、ごく稀薄であります。ガスが存在します。このガスがところどころ濃厚な雲をつくっていますが、その中に、ガスから固まった小さな固体の粒のあることもわかっています。そしてさらに、こういう黒い雲が星になる母

胎だと考えているのであります。

こういう黒い雲は、それ自身の重力のために、じわじわと固まりますが、そのうちに中心部が圧力のために温度が上がってきます。そしてある温度にまで上がると、はじめて原子核反応が始まり、自ら光を放つようになります。すなわち星になるのであります。

こうして生まれる星の筋道を前と同じような図の上に書きますと、次(第17図)のようになります。星は温度も低く明るさも暗い巨大な雲から出発しますの



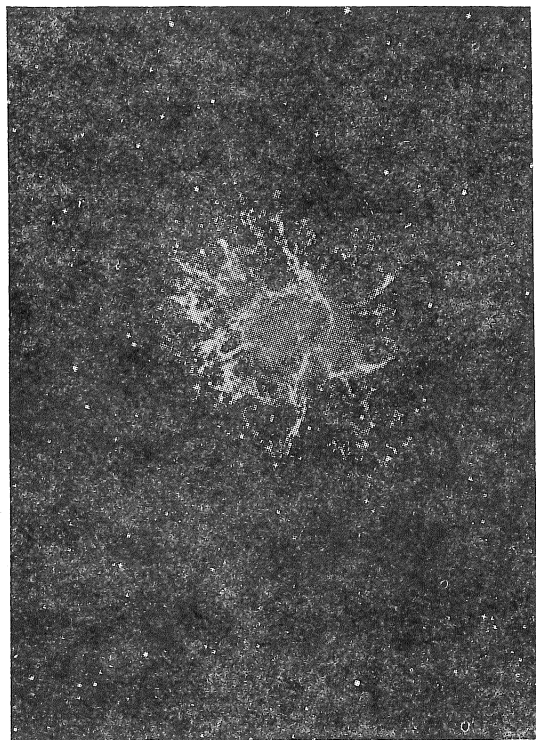
第17図 星の誕生までの径路。低温の暗い雲から出発して、収縮しつつ右下からやや斜めに左へ進み、それぞれの星の質量に応じて、主系列の左上から右下へと並ぶ。

で、図のずっと右下の方から斜め左上の方へ進んできて、ちょうど星として輝くところが、いままでに申しました主系列になるのであります。しかもこの主系列の上に入りこむ位置が、それぞれの星の質量に応じて、左上から右下へと並ぶのであります。でありますから、さきほどから主系列から出発すると申ししたのは星として名乗りをあげるときに、ちょうどこの列の上に勢揃いしますから、星としてのスタートラインと申したのであります。これは星間物質からこの主系列に入るまでにも、かなり時間がかかります。たとえば太陽くらいでしたら、たぶん1000万年はかかるでしょうが、主系列を離れるにはおそらく100億年くらいかかり、一度主系列を離れますと、ごく短い時間で残りのコースを走り去ると考えられますから、主系列というのはなかなか大きな意味をもっているのであります。

また、1000万年に比べて若い星の集団では、まだ太陽くらいの質量の星は、主系列に到達していないはずであります、非常に若い星団ではそういう例が見られるのであります。

滅びゆく星

それならば、宇宙のなかに、あるいはこの銀河系のなかに、非常に年老いた第2種族と、新しく生まれたであろう第1種族とが、なぜ共存しているのでありましょうか。しかしそれよりも前に、第2種族の星のうちの滅びたものというのは何を意味するのでありましょうか。私どもはその星の最後が、超新星と呼ばれる星の大爆発であると考えています。そのひとつの例はおうし座という星座にある「かに星雲」(第18図)であります。この星雲の場所にいまからおよそ900年前、すなわち1054年に明るく輝く星の現われたことが、わが国と中国の記録に記されていますが、その時の実光度は、太陽の数億倍であったと思われる。その後のガスの雲がこの「かに星雲」で、いまなお秒速千数百kmで膨張を続けているのでありますが、星の最後は、このような大爆発をして物質を四方にまきちらすものと思われます。まき散らされたガスは、星と星



第18図 かに星雲. 1054年に大爆発した超新星のその後のガスの雲, 今なお膨張を続けている.

電子があればもちろん陽子がありましようから, すなわちこの「かに星雲」には, 宇宙線粒子がある, あるいは宇宙線の源のひとつではないか, とすら考えられるのであります.

流転する宇宙

いままで申しましたことを, とりまとめてこう申せましょう.

宇宙のはじめはよくわかりませんが, かりに銀河系に相当する大きな球体のガスのかたまりが生まれ, この中で更に個々の星が生まれたとします. 星はおそらくは星団の形で, 集団になって生まれたてでありましよう. これがい

との間にある稀薄な物質に混じり合い, これから第2世代の星が生まれると考えられるのであります.

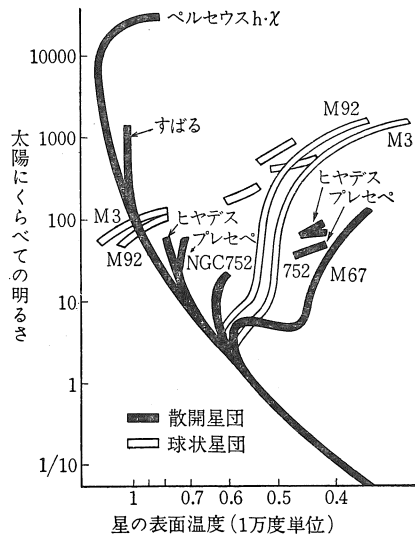
なお最近, この「かに星雲」が強い電波を出していることがわかりました. それはひとつのラジオ星といえるのでありますが, その電波の出ている原因として, この星雲のなかに, 宇宙線的なエネルギーの電子があって, その運動から出ているのだと解釈されるようになってまいりました.

まの球状星団や、銀河系の中核部の星であると考えます。これらの星が生まれたのは、今から 50 ないし 60 億年の昔であったであります。この長い年月の間に、質量の大きい、したがって明るい星はすべて姿を消してしまって、いま球状星団のなかに残っているのは、太陽よりやや重い星およびそれ以下のものばかりであります。星の進化の道筋を考えますと、その星たちのつくる統計図が、観測されたものを説明すると思われます。

第 2 種族のこれらの天体が、質量に従って次々に姿を消すありさまは、おそらく「かに星雲」で示されるような、超新星の形であろうと思われます。星の物質はこのときガスの形でふきとばされ、星と星の間を埋める稀薄な物質に混じりこみ、次の世代の星をつくる母胎になります。銀河系はそれ自身回転をしています。したがってこれらのガスは、次第に回転面に集まるようになり、そのガスから生まれた第 2 世代の星は回転面、すなわち銀河面内で生まれるようになるのであります。これが第 1 種族の星と考えられます。

第 1 種族の星は、第 2 世代でありまして、生まれる時代は区々であります。ここに (第 19 図) いくつかの第 1 種族に属する星団の星についての統計図を揃えてお目にかけます。

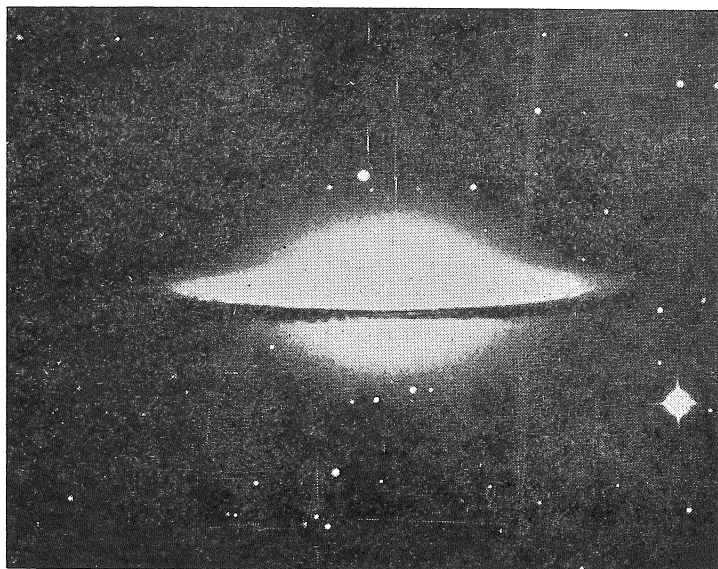
白く書いたのは球状星団、すなわち第 2 種族の星の統計で、黒いのは第 1 種族の星の集団であります、この統計図でおもしろいのは、主系列の上端が星団によってまちまちであることであります。主系列の上端が長くのびているのは、明るい星が



第 19 図 いくつかの星団の星の統計図・黒；第 1 種族，白；第 2 種族。第 1 種族の星団は次々に生まれつつある。

まだ主系列にあるということ，すなわち生まれて間もないことで，時間がたつにつれて，上端の星から主系列を離れると考えられます．したがって，この図から星団の年齢にはいろいろのものがあリ，いいかえますならば，このような星団は，次々に生まれつつあると考えざるを得ないのであります．

星は，ひとたび星の形をとりながら，いつかはその生涯を終えて星間物質に還元し，再び星となって輝きます．もし，この星が生涯の短いものであればさらに爆発して星間物質にかえります．こうして，星と星間物質は，たえず流転を続けているというのが，宇宙の実相であろうと思うのであります．



第20図 銀河系と同じような星雲をかなり横から見た写真．円盤状のところ；第1種族，中央のまるい核および周囲の点々としたもの；第2種族．

この写真(第20図)は，銀河系と同じような星雲をかなり横からみた写真であります．中央のまるい核と，周囲に点々とあるのが第2種族で，円盤のようになっているのが第1種族であります．いかにも，第1種族の星は，星雲の回転によって沈殿した物質から生まれたことが想像されるのであります．

宇宙の姿，とくに銀河系のありさまが，星のなかで起っている原子核反応とそれに伴っておこる星の進化に，いかに密接に結びついているかということが，このようなことがらをとおしてわかっていただけたら，まことに幸いです．宇宙の本質の解明は，ただ天文学だけの領域ではなく，原子核や宇宙線の秘密に，密接に関連しているのであります．

Ⅲ 物質の構造

菊池 正士

東京大学教授

物質が究極的にどういうものかということとは、昔からの問題であって、それぞれの時代に多くの学者が一生懸命に追求してきた。進めば進むほど先へ先へと問題が現われてきて今日まだ解決されていない。しかし昔からひとところをぐるぐる回っていたわけではなく、一步一步と進んでいるのだが、高く昇れば昇るほど見通しがひろくなり、未知の世界が現われてくるのである。

この講演では、今日われわれの立っている所から前後をふり返ってその展望をごく平易に解説する。

<昭和31年12月6日 講演>

今日は「物質の構造」という題でお話いたします。

は じ め に

物質の構造と申しましてもいろいろの見方があります。たとえば原子から物質ができているという見方も物質の構造ですが、私の今日お話ししたいと思いますのは、物質の一番基本的なものが何であるかという意味での物質の構造のお話をしたいと思います。

われわれが実際見たり接したりする物質は、実にいろいろな形をし、いろいろな性質をもっておりますが、そういったものがもっと基本的なものからできているだろうということは、前から皆が考えていたことであります。そういったことはずっと昔のギリシア時代からあったことであります。まず、元素という考えが出ましたのはその最初の現われだろうと思います。それからまた、原子という考えが出まして、外から見ますと連続的な物質に見えますけれどそれを分割してゆくと小さな粒からできている、つまり原子からできているという考え方もあります。そういったことを歴史的にお話するとずいぶん長くなりますけれど、今日は歴史的にお話するよりもむしろ、今日どんなふうと考えられているかということをお話してゆきたいと思います。

結局物質の一番もとになるものは何かということにつきまして、今日大体の物理学者が皆一定した考えをもっております。その一番もとに

物質のもとになるもの
の 一 素 粒 子

なるものはわれわれが普通、素粒子とっているものであります。原子などというものは素粒子と比較しますと、ずっと複雑なものです。原子をれんがで作った家にたとえるならば、そして、その家からできている都会を物質にたとえるならば、素粒子というのはそのひとつひとつの家を作っているれんがのようなものです。つまり素粒子は非常に基本的な粒子であります。そういった粒子が何種類ぐらいあるかと申しますと、現在すでにわかっているだけで約20種類はあります。その中にはすでに、皆さんおなじみの深い粒子も

ございます。たとえば電子(エレクトロン)などというのもこの素粒子のひとつであります。それからまた陽子(プロトン)とか中性子(ニュートロン)とかも、きっとお聞きになったことがあると思いますが、それも素粒子の一種類であります。しかし、そのほかに湯川さんの名とともに非常に名高い何種類かの中間子、そういったものを含めると、全部で20種類ばかりの非常に基本的な粒子があります。それを総称して素粒子といっております。

素 粒 子 一 覧 表

粒 子	スピ ン	静止質量	止 エネルギー	平均寿命	崩 壊 の 型	
		(<i>me</i>)	(<i>ev</i>)	(<i>sec</i>)		
光 子 γ	1	0	0	∞	安定	
ニュートリノ ν	$1/2$	0	0	∞	安定	
電 子 e^-	$1/2$	1	5.1×10^5	∞	安定	
e^+	$1/2$	1	5.1×10^5	∞	安定(ただし e^- と出あえば消滅)	
中 間 子	μ^-	$1/2$	206.7	1.05×10^8	2.2×10^{-6}	$e^- + \nu + \nu$
	μ^+	$1/2$	206.7	1.05×10^8	2.2×10^{-6}	$e^+ + \nu + \nu^-$
	π^0	0	264.2	1.34×10^8	$10^{-16} \sim 10^{-13}$	$\gamma + \gamma$
	π^-	0	273.2	1.39×10^8	2.6×10^{-8}	$\mu^- + \nu$
	π^+	0	273.2	1.39×10^8	2.6×10^{-8}	$\mu^+ + \nu$
K 粒 子	K_1^0	0	965	4.91×10^8	1×10^{-10}	$\pi^+ + \pi^-$, $\pi^0 + \pi^0$
	K_2^0	0	965	4.91×10^8	3×10^{-8} $\sim 10^{-6}$	$\pi^+ + e^- + \nu$, $\pi^- + e^+ + \nu$
	K^+	0	966.5	4.92×10^8	1.2×10^{-8}	$\pi^+ + \mu^- + \nu$, $\pi^- + \mu^+ + \nu$
						$\pi^+ + \pi^- + \pi^0$, $\pi^0 + \pi^0 + \pi^0$
						$\mu^+ + \nu$, $\pi^+ + \pi^0$, $\pi^+ + \pi^+ + \pi^-$
K^-	0	966.5	1.46×10^8	1.46×10^{-8}	$\pi^+ + \pi^0 + \pi^0$, $\mu^+ + \nu + \pi^0$, $e^+ + \nu + \pi^0$	
					$\mu^- + \nu$, $\pi^- + \pi^0$, $\pi^- + \pi^- + \pi^+$	
					$\pi^- + \pi^0 + \pi^0$, $\mu^- + \nu + \pi^0$, $e^- + \nu + \nu^0$	
陽 子 p^+	$1/2$	1836	9.31×10^8	∞	安定	
反 陽 子 p^-	$1/2$	1836	9.31×10^8	∞	安定(ただし p^+ と出あえば消滅)	
中 性 子 n	$1/2$	1838	9.35×10^8	7.7×10^2	$p^+ + e^- + \nu$	
超 粒 子	Λ^0	$1/2$	2182	1.11×10^9	2.7×10^{-10}	$p^+ + \pi^-$, $n + \pi^0$
	Ξ^0	$1/2$	2324	1.18×10^9	—	$\Lambda^0 + \gamma$
	Ξ^-	$1/2$	2341	1.19×10^9	1.5×10^{-10}	$n + \pi^-$
	Ξ^+	$1/2$	2325	1.18×10^9	0.7×10^{-14}	$p^+ + \pi^0$, $n + \pi^+$
	Ξ^-	$1/2$	2585	1.31×10^9	$10^{-9} \sim 10^{-10}$	$\Lambda^0 + \pi^-$

はじめに素粒子にどんな種類があるかということを表にしたものをお目にかけます(一覧表参照)。

ここにあげましたのが比較的最近に集められました素粒子の表であります。いろいろこまかいことが書いてありますが、しかし、ここではこのひとつひとつについて説明をする必要はないのでありまして、大事なことはこういった種類のたくさんの素粒子があるということでありまして、これは質量の軽い順に上から書いてありますので、一番はじめが γ 、あれは光に相当する粒子、光子(フォトン)といわれています。その次がニュートリノ。ニュートリノというのは、これは非常におもしろいもので、まだ誰もその本体をはっきりとつかんだことはない。しかし、どうしてもこれがないとすると具合が悪いというので考えられているものです。その次がいわゆる電子、 e^- と書いてあるのが電子で、次に e^+ と書いてあるのが陽電子。それから次に μ 、 π いわゆる中間子、メソン、それからもう少し重いところになりますと K 中間子というのがございます。その次に一番簡単な、水素の原子核を作っております陽子(プロトン)それからプロトンのマイナス——反陽子——。それからこれがニュートロン。そのつぎはプロトンよりももっと重い粒子、いろいろギリシア字の記号で表わされます。ここに(表の3行目)大体質量の値が書いてあります。これは電子の質量を1としたときのそれぞれの粒子の値であります。質量はエネルギーに換算されますが、これは(表の4行目)エネルギーをエレクトロンボルトという単位で表わしたときの数であります。

素粒子の性質

素粒子というのは物質の一番もとになってい
るものでありますから、非常に安定した恒久的な存在かと思われませんが、決してそうではなくて、一般には非常に不安定なものであります。不安定と申します意味は後にのべますような事情で、発生したとしても消えてなくなってしまう。なくなるというよりも崩壊してゆきます。それで表の一番右に崩壊の型ということが書いてありますが、そ

れがこの素粒子がどういうふうに崩れていくかということを示したものです。

一番はじめの光に相当する光子は安定であります。これはそれ自身では崩れません。その次のニュートリノ、これもまず安定であります。次のエレクトロンこれも安定であります。次の陽電子、これは後にお話するいわゆる反対粒子、陽電子と電子とが互に反対粒子になっております。その次の μ 中間子になりますと、これがエレクトロンとニュートリノに分解する性質をもっております。その平均寿命はわずかに 2.2×10^{-6} 秒ですから、50万分の1秒程度の非常に短い寿命しかありません。そういう短い寿命でエレクトロンとニュートリノという μ 中間子よりも軽い素粒子に変わってゆきます。同様に π 中間子も、これはまた 10^{-8} 秒ですから、 μ 中間子よりもさらに寿命が短い。そして π 中間子は μ 中間子とニュートリノにつぶれてゆく性質を持っております。中でも π 中間子の一番最後の π^0 という中性の中間子などは物質粒子にこわれないで、2つの光量子にこわれます。しかもその寿命は 10^{-15} 秒という非常に短いものです。とにかく素粒子というのは、こういう具合に非常に不安定なものであります。

素粒子の崩壊と発生

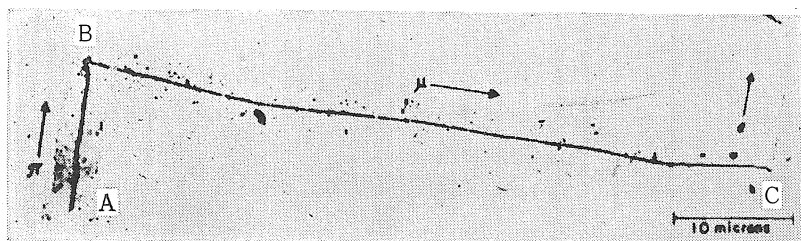
こういうように質量の重いものが質量の軽いものの方にどんどんとこわれてゆくのであります。これはこわれる方ではありますが、素粒子というのはこわれるばかりでなしにいろいろな機会に発生いたします。さきほどもちょっと申しましたが質量というのは、いつでもエネルギーに換算される。これはアインシュタインの相対性理論から出てくることでありまして、質量というのはエネルギーのひとつの相であります。素粒子がこわれるときも、たとえば π 中間子が μ 中間子にこわれれば質量が減少し、その分のエネルギーは分解したときの粒子の運動エネルギーに変わってゆくわけです。質量がどんどん運動のエネルギーに変りながら崩れてゆくわけではありますが、こんどは逆に運動のエネル

ギーをうまく使いますと、中間子が逆に発生する場合がたびたびあります。

原子核乾板

— π 中間子の崩壊—

いま π 中間子が崩れるところ、それから発生しているところを幻燈で少しお目にかけようと思います。この写真(第1図)は、いわゆる原子



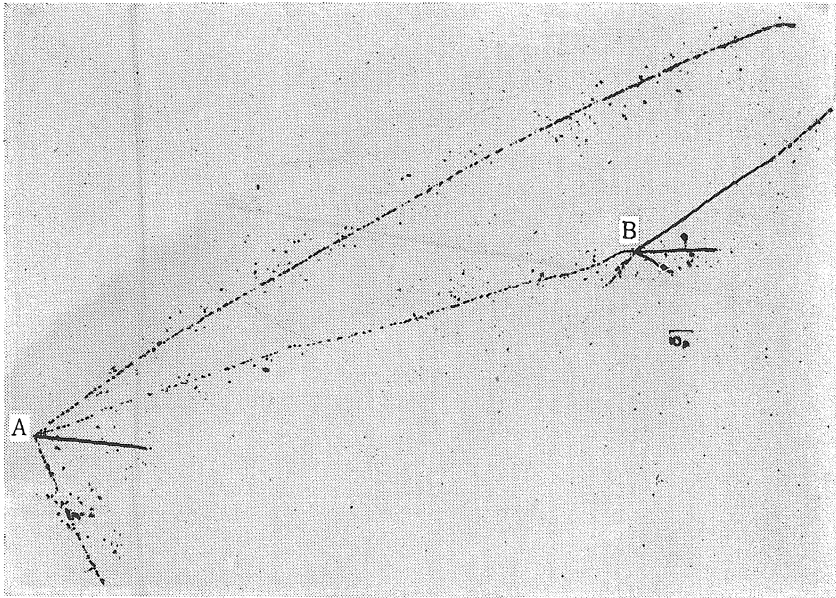
第 1 図

核乾板を気球にのせて、ずっと高い上空に上げてとった写真であります。原子核乾板というのはやはり普通の写真の乾板の一種であります。違うところは、普通のはエマルジョンと申します感光膜が、非常に薄く 5μ ぐらいなのでありますが、原子核乾板のはそれが数百 μ 、厚いになりますと千 μ 、つまり1耗ぐらいにもなります。しかも、感光度が非常によくなっておりまして、膜の中を何か粒子が通りますとそこに映像を残します。ですから、それを現像しますとその膜の中を粒子が飛んだ跡が現われてくるわけであります。ここに(AB)1本黒い線がありますが、これはある粒子が写真乾板の外の方から入って来たのであります。これがどんな質量の粒子で、どんな速さで動いているかということは、この線の太さとかいろいろなことからわかります。これがここ(B)まで来ると止まって、そこからすぐに、もうひとつ別の粒子が出ております。これ(AB)がいわゆる π 中間子でありまして、 π 中間子がここ(B)で μ 中間子とニュートリノに分裂したところであります。ニュートリノの方は電気をもっておりませんから写真の感光膜の中で映像を作리ませんので何も写りません。そこで μ 中間子だけが写っております。そして μ 中間子はまたここ(C)で止まっております。ここ(B)でできてから

ここ (C) まで飛んで来るのに百万分の1秒はかかりませんから、この間はこわれずに飛んで来ます。そしてここ (C) に止まっている間に百万分の1秒程度たちますと、こんどは μ 中間子は電子と2つのニュートリノに分れます。非常に細い線が見えておりますのが、そのことを示すのであります。

π 中間子の発生

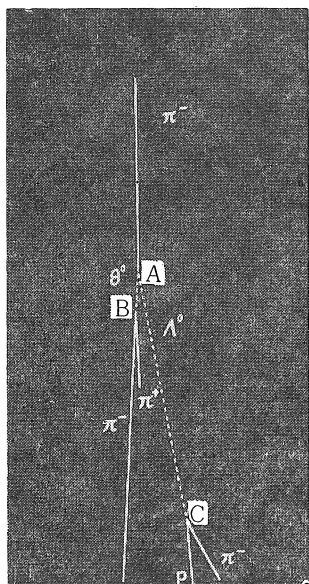
これは (第2図)、逆に π 中間子が発生するところの図であります。これはいまと同じような原子核乾板を、非常にエネルギーの高いガンマ線——ガンマ線と申しますの



第 2 図

は光やX線と同種の、非常に波長の短いもの、つまり光子として非常にエネルギーの高いものですが——、その中に乾板をちょっと入れますと、光子が原子核乾板の中をってゆく間に乾板の中にある銀や酸素の原子核にぶつかったひょうしに、ここ (A) で——これはおそらく銀の原子核に光子が当

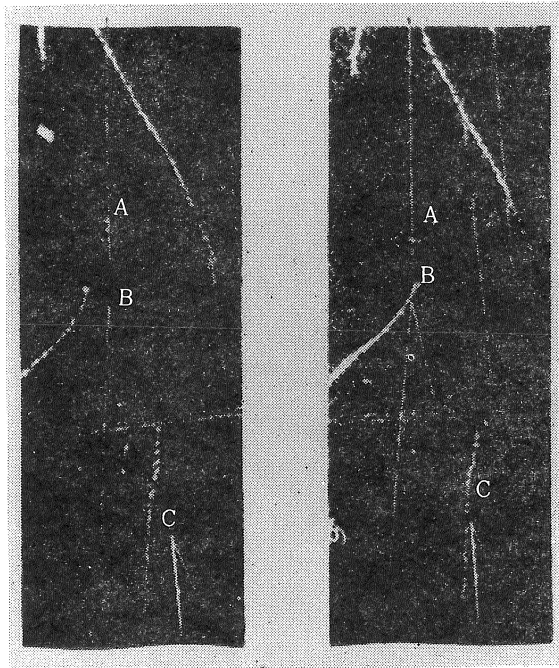
たって、銀の原子核が分裂したところだろうと思いますが——，原子核を構成しているプロトンが、爆発的に分裂しましたときの軌道であります。そのときにこういうもの（AB）がでております。これが π 中間子であります。つまり、ガンマ線のもってあります非常に高いエネルギーが質量に変わって、 π 中間子に変わったのであります。 π 中間子は非常におもしろい性質をもっておりまして、こういうふうにとび出しながら止まりますと（B），原子核にとらえられまして、その原子核をこわす。そこで、この π 中間子がエマルジョンの中で原子核につかまって、原子核を爆発させます。ここ（B）に出ておりますのは原子核を作っているプロトンのとび散ってゆくときの軌道であります。このように π 中間子は非常にエネルギーの高い現象がおきますと、光のエネルギーなり運動のエネルギーなりが質量に変わって、出現してくる場合があることを注意する必要があります。



第 3 図

これ（第3図）もまた、中間子が新しく出現するときの写真であります。次にお見せする写真（第4図）に対する説明図であります。

これはアメリカのブルックヘヴンにあります、コスモトロンという非常にエネルギーの高い加速器を使いまして作られました π^- という中間子が非常に大きな運動のエネルギーをもって飛んで来て、それがこのところ（A）で質量に変わるのであります。さっきの表に出ています超粒子、つまり陽子などよりも重い質量をもっております粒子ができます。ところが θ° 、 Λ° 両方とも電氣をもっておりませんから、ここの飛ん



第 4 図

でゆくこの間は、写真の乾板によりましても、あるいはウィルソン霧箱にし
ましても、何も見えません。そしてこれはさきほども申し上げましたよう
に、寿命が10の何十乗分の1秒という非常に短いものでありますから、非
常にわずかたちますと寿命が終ってここで π 中間子に変わる。ここ (B) でプ
ロトンと π 中間子に分れるということをやります。

ウィルソン霧箱

この写真(第4図)は、ウィルソン霧箱でとっ
た写真であります。ウィルソン霧箱というのは
ご承知だと思いますけれど、あるひとつのうつわの中に水蒸気を飽和させてお
きます。そのうつわを急激に膨張させますと断熱膨張をしまして、温度が急
激に下がりまして水蒸気の過飽和ができます。その中をさきほどのような電

気をもった粒子がとおりますと、粒子が飛んだあとに水滴ができます。それを写真にとります。ここにありますのはそれを立体写真に写したものであります（第4図参照）。真上から入ってきてここ(A)で消えておりますものが π 中間子で、ここ(A)で、この方向(A $\rightarrow$ B)と、この方向(A $\rightarrow$ C)に電気をもたない粒子が出ております。それがここ(B)とここ(C)で、さらにまた分裂している写真であります。以上のような具合でありまして、素粒子と申しますのはおもしろい性質をもっていて、できたりこわれたりするものであります。

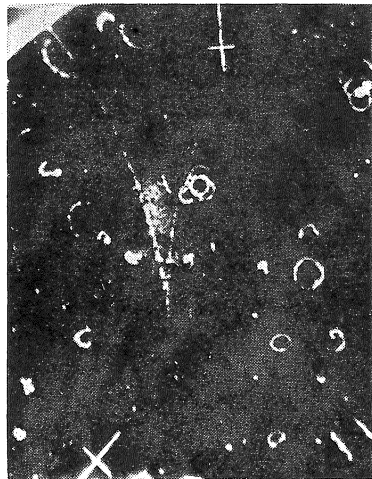
反陽子とは

ここで簡単に反対粒子のお話をしておきます。このごろ新聞などでよく反陽子という言葉が出ております。この反陽子というのをうまく使いますと、現在の原子力よりも千倍も力の強い原子力を作ることができると言われております。この反陽子というのは何か。これはじゅうぶんに説明しようといたしますと甚だむずかしいのでありますけれども、簡単に申しますと、皆さまよくご存知の電子にしましても、電気がマイナスのものとプラスのものがあ、 π 中間子にしましても μ 中間子にしましても、電気がプラスのものとマイナスのものと2通りございます。質量はみな完全に等しくなっております。これはみな、いわゆる反対粒子であります。これらの反対粒子は、その1対が結合しますと質量が完全になくなりまして、その質量が全部他のエネルギーになる。たとえば光子のエネルギーに変る、あるいはほかの運動のエネルギーに変る。つまり、そこにある質量が反対粒子と作用すると完全に消えてしまうのであります。こういうことが電子につきましては前からわかっておりまして、反対粒子である陽電子の性質もよくわかっておりましたが、陽子につきましてはそういう反対粒子があるかどうかということが長い問題であったのですけれども、最近にそれがアメリカのカリフォルニアのバークレーで発表されたというわけです。

陽子と反陽子と結合しますと、その質量が全部なくなってしまいます。電子のばあいにくらべて質量が約 2000 倍にあたるものがなくなって全部エネルギーに変わってしまいます。ですからこれは非常なエネルギーを出すことができるわけです。それがもし使えれば、原子のエネルギーの関係から言えば、ふつう原子力といわれているものの千倍ものエネルギーが出せるといわれております。しかし、それを実際に利用するとなると、まだ夢みたいな話であります。

しかし、そういう反対粒子というものがあるということは非常に面白いことであります。陽子と電子が結合してふつうの水素原子ができているのと同じように、反陽子と陽電子が結合しますと反対粒子ばかりでできた水素原子ができるというように考えますと、こっちに1つの世界があると、むこうに反対粒子ばかりでできた、力学的には全く同じ世界が可能であるということも考えられます。それに伴っていろいろな臆説がでできます。たとえば現在星雲の中で異常に強い光を放っている星がありますが、そこでは反対世界とこの世界の接触が起っているのだというふうにいる人もおりますが、これも空想としては大変おもしろいのでありますが、確実にそうであるという証拠は何もありません。

そういうような反対粒子というのは素粒子特有なおもしろいものであります。電子の場合についてその反対粒子が発生しているところの写真をちょっとお目にかけます(第5図)。これもさきほどお話しましたのと同様、ウィルソン霧箱でとった写真でありまして、ガンマ線、というのは光子であります



第 5 図

が、光子のエネルギーの高いのがウィルソン霧箱の中をとってゆきまして、光子のエネルギーが突然変りまして、いままでそこに質量のようなものの何もなかった空間から、2つの陰陽の電子が急に出現するところあります。まん中のところに、この点から出ております。このウィルソン霧箱には直角に磁場がかかっておりますからプラスに帯電したものはこっちに、マイナスに帯電したものはむこうに曲る。こういうふうにして反対粒子というのは全くの真空の空間から質量をもった2つの粒子が突然に生まれてくるのであります。

原子ができるまで

いままで申しましたような各種類の素粒子が、われわれの物質の基本をなしているわけがありますが、素粒子が素粒子のままで終ってしまうならば、この宇宙というものは何もない、ただ素粒子のガスがあるだけになってしまいます。幸いこの中に安定なものがいくつかあります。たとえば、さきほど申しましたエレクトロンとかプロトン、また中性子はまったく安定とは申せませんが、後で申しますようにちょっと変わっております。こういう安定なものがありまして、これらが互に力を作用しまして、だんだんと原子ができてくるわけがあります。

もちろん安定なものにかぎらず、素粒子の間には何か力がお互に作用いたします。そこでだんだんに結合する可能性があるわけです。その原子を作ってゆくものになるのが、陽子と中性子なのであります。

陽子と中性子

原子というのは、原子核とそのまわりを回っている電子とからできているといわれ、その原子核は、陽子と中性子とからできているといわれますが、それはちょうど、陽子と中性子という素粒子がそういう役割をするというわけなのであります。いま申しましたように陽子は安定なのでありますが、中性子は自由な状態に放置されていますと、これは不安定な粒子であります。平均寿命が約12.8分

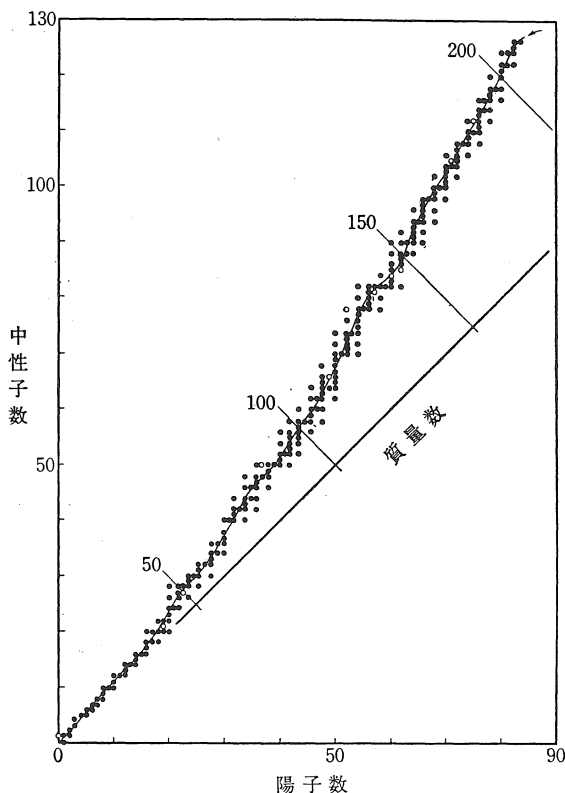
という速さで分裂して陽子と電子に変わってしまいます。ですからこういうものが結合しても安定な原子核ができないのではないかという心配もあるかも知れませんが、幸いにして中性子というのは、ひとりでいますと不安定で、12.8分という速さでこわれてゆきますけれども、陽子と結合してしまうと安定になる場合があります。それはちょっと説明しにくいのでありますが、中性子というのが大変フラフラした浮気者で、ひとりでいるとどうも身がもてないで身をもち崩してこわれてしまう。しかし陽子と結合して、浮気な人間でもうまい具合に家庭をもちまして、そっちの方に非常に結合が強いと、どうやら身がもっている。家庭はいつまでも続くという具合で、陽子と結合したものの自体は、非常に安定したものになっております。

そういうふうにして、陽子と中性子が何個ずつか結合しては原子核というもの、だんだんにできてゆくわけであります。しかし、そのときに陽子と中性子が何個ずつでも勝手に組み合わせるわけにはまいりません。安定な原子核ができてゆくためには、そこに一定の規則があります。実際に、自然に存在している安定な核について、陽子と中性子とが、どういう割合でできたものが安定であるかということを図面でお目にかけます(第6図)。これは横軸に陽子の数、縦軸に中性子の数が取っております。この丸で示しましたのが安定な原子核であります。これで見ますと、大体このなめらかな線に沿っていろいろな安定な原子核が存在することがわかります。この斜めにひいてある直線は、プロトンとニュートロンの数がちょうど等しいという線であります。実際に存在するものはこの直線より少し上にありますから、原子核というものは、大体においてプロトンとニュートロンの数は等しいけれども、ニュートロンの数の方が少しばかり多いときに安定であるということがわかります。

同位体について

なおここでつけ加えておきたいのは、同位体ということであります。同位体というのは、プ

プロトンの数は同じでも、ニュートロンの数が異なる原子核が何種類かあるということでもあります。原子核は、陽子と中性子とからできていてプラスの電気をもっておりまして、当然、マイナスの電気を引きつけます。それで原子核のまわりには電子が回っておりまして、原子は中性であります。その原子がどういう元素に属するかということは原子核の電気の量、つまり陽子の数によって決まるのであります。ですからここに、縦にある原子



n B Ne P Ca Mn Zn Br Zr Rh Sn Cs Nd Tb Yb Re Hg At
Be F Si K Cr Cu Se Y Ru In Xe Pr Gd Tm W Au Po
Li O Al A V Ni As Sr Tc Cd I Ce Eu Er Ta Pt Bi
He N Mg Cl Ti Co Ge Rb Mo Ag Te La Sm Ho Hf In Pb
H C Na S Sc Fe Ga Kr Nb Pd Sb Ba Pm Dy Lu Os Tl

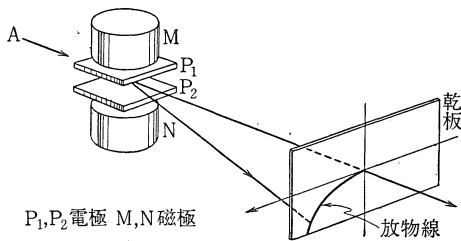
第 6 図

核はプロトンの数が同じでありますから全部 1つの元素であります。1つの元素に属しながら、ニュートロンの数の点で違っているものが何種類かある。これが、いわゆる同位体といいます。ですから、この図(第6図)はプロトンの数とニュートロンの数はどういうものが安定であるかという領域を示すと同時に、同位体が何種類存在するかということを示しているのであります。

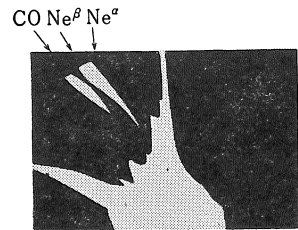
同位体の一番簡単なのは、水素ですとプロトン 1つからできている

原子核と、そのまわりに電子1つが回っているふつうの水素、プロトン1つとニュートロン1つとからできている原子核のまわりに電子が1つ回っている、いわゆる重水素があります。重水素でできている水のことを重水といいます。なお、ほとんど例外なしに、すべての元素は同位体をもっております。

次に、こうして原子核ができ上がりますと、原子核はプラスの電気をもっていますから、当然の帰結としまして、マイナスの電気をもっている粒子をひきつけるわけです。この引きつける力は、申すまでもなく、電気力学でいうクーロンの力であります。原子核ができるときに陽子と中性子の間に働く力は、いわゆる核力と申しまして、電磁氣的な力ではありませんし、また重



第 7 図



第 8 図

力みたいな力でもありません。われわれが、いままで知っている2つの離れた物体が引きあう力は、重力でなければ電磁氣的な力であったのでありますが、こういう力ではありません。これはまだ、非常に明瞭にはわかっていない一種の力でありまして、核力といっております。いま申しました原子核が電子を引きつける力、これはごくふつうの電氣的な力でありますから、中性子が陽子と結合して原子核を作るときの力とは全然違うのであります。そういうふうにしてでき上がったのが原子であります。

原子の質量測定装置

これは(第7図)原子の質量を測る装置の原理を示したものです。(A)から原子の流れを出し

まして、それを電場と磁場で曲げて、このうしろに写真の乾板を置きますと、ある質量に対応してこういうパラボラ（放物線）ができるようになっております。ここに同位体がいっておりますとパラボラが分れてきます。そうして、J. J. トムソンとアストンが、同位体を最初に発見したのですが、そのときの歴史的な写真がこれ（第8図）であります。ネオンというのは20.2という原子量をもっておりますが、2本のパラボラが出る——これはあまりはつきりしておりませんが——ということがわかります。

原子の大きさ

次に原子核を作っているものの1つの大きさは大体 10^{-13}cm 程度のものでありまして、こうして結合してできました核の大きさも 10^{-12}cm 程度の大きさのものでありますが、電子の動いている軌道は大きなものでありまして、仮に核の大きさを1cmぐらいの球であるとしみますと、電子の軌道は100m 近くの大さきになります。ですから原子と申しますのは、ほとんどが真空の空間でありまして、物質のつまっている所はほとんどないようなものです。原子の大きさといえますときは、電子の動いている全体の軌道の大きさをいうのであります。ですから原子というのは真空がなくなるまで圧縮してやると非常に圧縮されまして、人間などごみつぶぐらいになります。実際に、われわれが地上でいろいろな物質の密度を測って、一番重いのが20 ぐらいですが、星の中には密度が数万という密度の大きな物質があります。どうしてそんな物質が安定なのかよくわかりませんが、かなり空間があいているのですから何かの条件で物質がしまれば、密度が1万などというような物質も存在するということも考えられます。

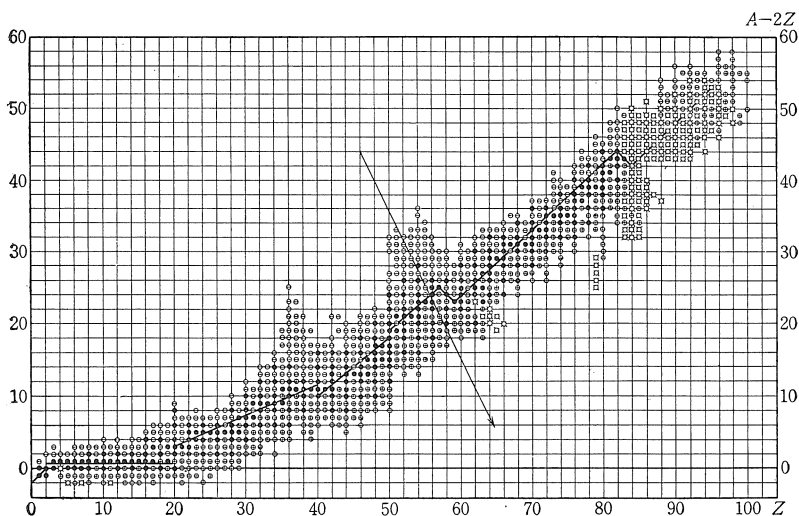
これで素粒子から原子核ができて、原子核が電子を引きつけて原子のできる過程をお話したわけです。ここでちょっとつけ加えておきたいのは、原子核ができると電子を引きつけると申しましたが、必ずしも電子でなくとも、マイナスの電気をもった粒子でさえあるならば、それを引きつけてここに原

子のようなものができると考えられます。事実そういうものがあります。たとえば、原子核に対して、電子がつくのではなく、さきほどお話したマイナスの電気をもっている μ 中間子が直接つくのもひとつの原子です。しかし、 μ 中間子は百万分の1秒ぐらいいしか寿命がありませんから、そういう原子はすぐになくなってしまいますけれども、百万分の1秒ほどは、原子核と μ 中間子がついてできている水素原子みたいなものが存在するわけです。

最近はいろいろな技術が発達しまして、非常に短い間に起るできごとが、正確に観測されますから、原子核と μ 中間子でできた原子みたいなものも、現在観測されております。また陽電子と電子は反対粒子ですから、プラス・マイナス引きあって結合すると質量がなくなって、光子のエネルギーに変わるのですけれども、その少し前にしばらく原子を作る状態もあります。事実そういうことも観測されております。つまり、これは原子の変り種であります。われわれが日常接している原子はそういう原子でなくて、ふつうの原子核と電子でできたふつうの原子であります。

放 射 能

次に進みまして、放射能ということがこのごろ問題になっております。放射能の雨が降ったり、漁船にくっついたり、少しノイローゼ気味になるくらい、いろいろ問題になっております。その放射能ということがどういうことかを少し簡単にお話したいと思います。さきほどニュートロンとプロトンで原子核を作るのに、安定である原子核がああ領域にずっとならぶということをお話しました。ではこの安定な領域の外にある、プロトンが1つ足りないとか、ニュートロンがちょっと多すぎるといったような原子核はどうなるかといいますと、それは完全に安定ではないけれども、ある程度の寿命を保っていられるというものなのです。この図(第9図)でこの線に沿った黒丸のほかのものがそうです。それがいわゆる放射性的原子核なのです。これらはみな崩壊まして安定な領域に、どしどしとうつつてゆく、そして最後にこの線にのるの



第 9 図

であります。いろいろな寿命のものがありまして、なかには何秒というようなものもありますけど、また数年、数百年、数万年、数百万年、一億年というようなほとんど安定に近いようなものもあります。この図はさきほどの図(第6図)とほとんど同じであります。縦軸には、ニュートロンとプロトンの差が——さきほどニュートロンの方が、プロトンより少し多いと申しましたが、その多い分を——取っております。ですから本質的にはさきほどと変わりはないのでありまして、黒丸が安定な原子核の存在する領域にあるもの、その横に四角やいろいろの記号で書いてありますが、みな放射性原子核なのであります。それで不安定ということの意味を、もうちょっとご説明しておきましょう。

さきほど、中性子自体は不安定なもので、自由な状態におくと寿命が13分ぐらいしかなくてこわれてしまうと申しました。ところが、偶然にうまい具合に原子核を作ると、その結合力によって安定な原子核を作る。しかしやっ

ぱり、本性は本性でありまして、中性子はいつもこわれて陽子と電子に変わってしまうという傾向をもっているわけでありますから、ある種の原子核ができ上がりますと、一時はそれで収まりますけれど、しょっちゅう、中性子の方はこわれてゆこうとしますから、結合力がじゅうぶんでないとしますと電子を出して陽子にこわれてゆきます。これをベータ放射能といい、放射能のひとつの型であります。逆に陽子というのは、元来は安定なものであります。が中性子が崩れて陽子と電子になるのと対称的に考えて、陽子が崩れて中性子と陽電子になっていいはずで、しかしエネルギーの関係からいって陽子はそっちに崩れるわけにはゆきません。ですから陽子は一応安定で、自由な状態では中性子からこっちには来るのですけれども、陽子の方からは変ってゆきません。しかし原子核を作りますと、中性子の不安定だったのが安定になったように、陽子が自由な状態ではできなかったことをやり始めます。これはつまり結合のエネルギーが利用できるからで、自由な状態ではどこからもエネルギーが来ないのでうつりようがありませんが、こんどは、陽子が中性子になるときに要る余分なエネルギーを結合エネルギーから取ってることが出来ますから、陽子が、中性子と陽電子に変るということが可能になります。さきほど陽子と中性子の数が安定な原子核の領域があることをお話ししましたが、それより多少中性子が多すぎる原子核ができますと、それは完全に不安定なのではなくて、ある程度そこに存在できますけども、これが陽子に変わった方が、より安定であるという具合になりますと崩壊します。つまり、この図(第9図)で、上の方から安定な領域の方へうつって来るのであります。逆にこの安定な領域の下側にある原子核は、プロトンが多すぎるので、これがニュートロンに変って、安定な領域の方へゆくということになり、陽子が中性子に変わって陽電子を出すという現象が起ります。それがいわゆる放射能なのであります。それを外から見ていれば、そこにある原子核がどんどんこわれて、そこからベータ線が出てくるといふ現象になります。

もうひとつの不安定な現象としてはアルファ崩壊というのがあります。これは、いまお話ししたベータ崩壊とはまるで違っていきまして、これは原子核があまり大きくなりすぎてしまって、中に陽子がいっぱいありすぎる。そうしますと、陽子というのは陽電気をもっていますから、原子核がかたまるときには核力でかたまっているのですが、陽子は、たがいに電気の力で反撥しております。核力はあまり遠くまで及ばないのですが、静電的な力はクーロンの力で距離の2乗に逆比例して遠方まで行きますから、原子核が大きくなってくると反撥力の方がだんだん優勢になる。その結果、大きな原子核というのは不安定になってくるので、その中からアルファ粒子というものを放り出します。そうして、だんだん安定なところの方へ近づいて来ることになります。ですからアルファ崩壊といっているのは原子番号の非常に高い元素に限られることであります。

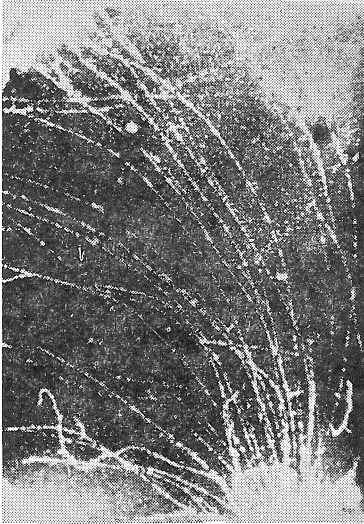
こういう不安定な原子核というのは、本来ならば、寿命が有限でありますから、みななくなってしまう、自然にはないはずなのでありますけれども、最近では原子核をこわしたりして、いわゆる元素の変換をする実験がいろいろ可能になっておりますから、不安定な原子核でも、どんどん作り出してゆくことができるようになっております。

放射性元素の起原

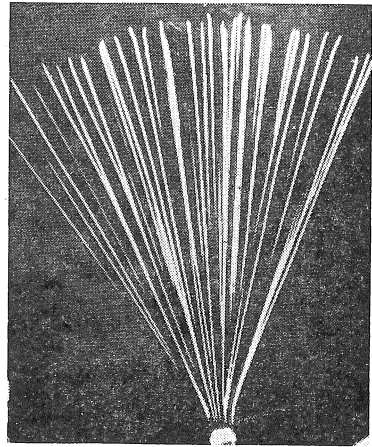
天然にも放射性原子核は存在しまして、いわゆるウランとかトリウムとかいうものがそうです。では一体、どうしてこんなものがあるのかという問題があります。不安定でどんどんこわれて行ってしまうのですから誰がそんなものを作ったのかということになります。天然に存在するものはウラン、トリウムに限るのでありますが、その寿命は10億年程度でありますから、それよりもずっと古くに地球ができて、そのまま、いまの状態ですっときたのだとすると、そういうものは存在しないはずであります。ですから、ウランなどのできたのが地球のできたころであって、その時の名残りが、ウランやトリウムとなっ

て、いま残っていると考えられます。放射性の原子核ということにつきましては、大体このくらいにいたしますが、ちょっとスライドをお目にかけます。

これ(第10図)は、ベータ放射性の物質をここに置きまして、それから出て



第 10 図



第 11 図

来るベータ線、つまり全部電子ですが、それが出ている写真であります。次の写真(第11図)はアルファ崩壊をしているところでありまして、ここから非常にまっすぐに線が出ております。これがアルファ粒子が放射されている写真であります。これはウィルソン霧箱でとった写真であります。

元素の人工変換

ここで少し話をかえまして元素の人工変換の問題にふれておきたいと思います。元素という

ものは変えることができないのだという、元素不滅という考えが長いこと考えられていました。しかし、今日では元素は自由に変えることができるようになっております。このことについては、ずいぶん古い歴史がいろいろありますが、原子核というものがニュートロンとプロトンの結合であるというふ

うに考えるならば、これは何か強い刺激を与えてやれば、こういうものがこわれるということは当然であると考えられます。

一番はじめに、元素というものは、さらに簡単なものに分解できるだろうことを百何年かまえにプラウトという人がとなえたことがあります。その人

元素	原子量	元素	原子量
H	1.0080	Na	22.997
He	4.003	Mg	24.32
Li	6.940	Al	26.98
Be	9.013	Si	28.06
B	10.82	P	30.975
C	12.010	S	32.066
N	14.008	Cl	35.457
O	16	A	39.944
F	19.00	K	39.100
Ne	20.183	Ca	40.08

はどういうふう考えたかといいますと、ここに上げましたのは(左表)水素からカルシウムまでの原子量でありますが、この表をご覧になるとわかりますように、水素が1.00で、他もすべて整数に非常に近くなっております。そこでプラウトは、ダルトンが1800年のはじめに原子論を出して原子量の概念を明らかにしてからまもなく、この原子量の表を見

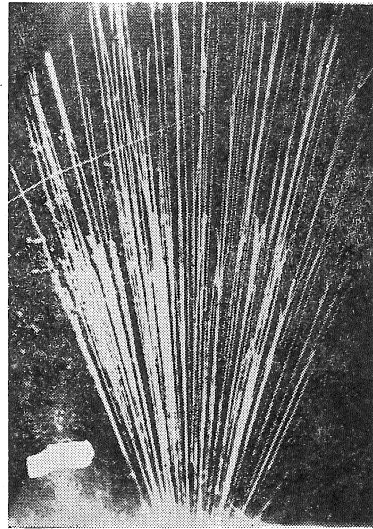
まして、原子量というのは水素原子の原子量の整数倍になっている。だからすべての原子というものは水素原子からできているのだろうということを言い出した。これがプラウトの仮説として有名なものであります。

これは元素というものが、一番簡単な水素原子に還元されるだろうといい出した最初のものでありましたが、その後、だんだんそういう考え方はむずかしくなってきました。というのは一方には、どうしたって元素は水素に還元されないという事実がありますし、他方には、たとえば塩素などですと、35.457 という非常に中途半端な原子量であります。それで一時、プラウトの考えは影をひそめておりましたが、その後、さきほどお話しました同位体の発見によって、またプラウトの仮説は復活して、今日のような状態になっているのであります。

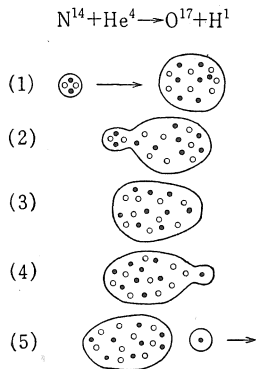
これはウィルソン霧箱でとった原子核破壊の写真であります(第12図)。 α 粒子が飛んで来て、ここで空気の窒素の原子核に衝突してこわしている写真であります。アルファ粒子は非常にいっぱいありますが、そのうちの1つが

窒素の原子核をこわし、できた酸素の原子核がこっちの方にちょっと飛び、プロトンがこっちの方に飛んでいる写真であります。これが、原子核がこわれているということの証拠となった最初の写真であります。その後、原子核を人工的にこわすということは、サイクロトロンの発明などいろいろなことがありまして、非常に盛んになりました。

これ(第13図)は、いまの写真の原子核破壊を図解してみせたものです。これがプロトン7つと中性子7つとから



第 12 図



第 13 図

できている窒素の原子核でありまして、向こうから、中性子2つとプロトン2つとからできているアルファ粒子が衝突して、こんなふうになりまして、酸素の原子核と陽子とに分れるというのであります。

こういうふうに原子核というものはいろいろ人工的にこわすことができるようになっておりますが、この点につきましては、明日の熊谷さんのお話がありますから、このくらいにします。

元素はどうしてできたか

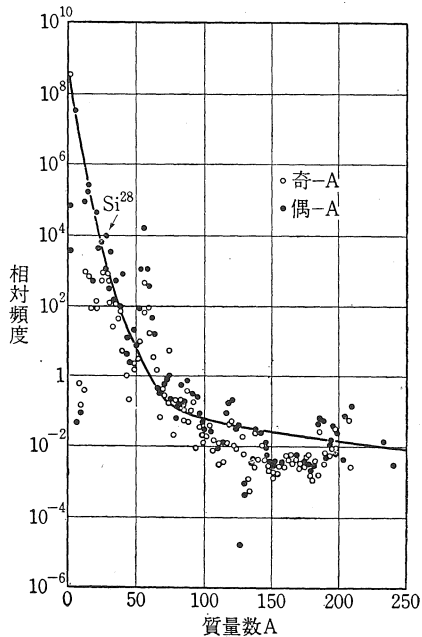
最後にわれわれが現在知っている元素というものが、一体どうしてできたのだらうということについて簡単に申しまして終らせていただき

ます。どうしてできたのだろうと申しました意味は、さきほどちょっと申しましたウラン、トリウムなどという放射性元素が現在地上に残っているというたぐいの問題であります。つまり、この宇宙がどういうふうにしてできたのか、また、われわれが現在知っている、どういうことを手掛りにそのことを考えてみればいかという問題であります。たとえば、いろいろな元素の存在する割合、——割合といいますのは、たとえば炭素、酸素、鉄、銅とか、いろいろありますけど、それがどのくらいの割合で存在しているかということです。宇宙全体について、そういう割合を考えるのですが、その前に考えてみなければならないのは、この地球にある元素の比率と、全く地球の外にある元素の存在する比率との比較です。たとえば、地球の外から飛んで来る隕石の中にある物質の元素を分析してみる。あるいは何かの方法で外の星にある元素の分量の比率を調べてみる。そういうふうにいたしますと、非常におもしろいことは、地球の上でも、太陽の中でも、太陽のずっと向こうにある何百万光年という星の中でも、どうも元素の分布の比率というものは、宇宙全般を通じて同じような分布をしているということが、だんだんとわかってまいりました。これは非常におもしろいことであります。もっとも、いろいろ特別な場合はあります。たとえば、この地球には水素とかヘリウムというガスはほとんどありませんが、木星になるといっぱいある。

それは特別な理由があるのでありまして、木星というのは地球などにくらべるとずっと大きいので、重力がずっと強い。地球のように小さいものになりますと水素とかヘリウムというような軽い原子を重力でおさえておけなくて、どこかへ飛んで行ってしまふ。ところが、木星の場合には大きいから重力に引かれてある。そういう、できたときの過程によってその星固有の差はありますけども、そういうことを除外して考えますと宇宙のどこでも元素の比率が一定しているということがわかります。結局、話を簡単にしてしまえば、宇宙というものは、一番最初はひとつの釜で料理されたものが、方々に

散らばって行ったのだという考え
方になります。

ここに示しましたのは(第14図)
下が質量数、つまりプロトンと
ニュートロンの数の和が書いてあ
ります。それに対してシリコン28
を基準にして 10^4 と取って、他の
原子がどういうふうな割合で分布
しているかと示した図であります。
この図は10の対数目盛で書いて
ありまして、一目盛が $1/100$ ずつ
違うわけです。それで見ますとわ
かりますように軽い原子がずっと
多く、重い原子になるにしたがっ
て少なくなっております。しかも



第 14 図

それがあるならかな曲線にそっております。これが大体、宇宙にある元素
の混合の割合であると考えられております。これがつまり宇宙が創造される
ときにでき上がったお料理でありまして、これから逆に宇宙が創造されると
きの火加減だとか、調味料の加減などが想像できるかどうかということが問
題になるわけであります。現在そういう議論がいろいろ進められておりまし
て、いろいろな考え方がありますがけれども、ここで簡単にご紹介しておきた
いのは、元素が一番先にどういうふうにしてできたかということでありまし
て、いまから10年か20年ぐらい前の原子核物理が発達していないときでありま
したら、いまのような資料からそういうことに推量を下すことは、非常にむ
ずかしいのでありますが、現在では原子核物理が進んできまして、いまのよ
うな資料からいろいろおもしろい推測ができるようになりました。そういう

推測によりますと、ご承知のようにわれわれの宇宙というのは、何億にもわたる銀河系というのがこの宇宙に散らばって、われわれの属している銀河系もそのひとつであります。そしてしかも、それらが非常な勢いで拡がっているということがいわれております。その拡がってゆくスピードもわかっております。そこでこのスピードで逆に縮まってきたら、何年たったらどのくらい縮まるかということがわかります。それでどのくらいいったら、いま拡がっているのが縮まってきて、いまわれわれの属している銀河系ぐらいの大きさのところに入ってしまうかということを当たてみますと、数十億年という時間になります。さっきお話ししましたウランの寿命というものが十億年くらいですから、そういうことから想像しまして、数十億年ぐらい前には、いま宇宙に拡がっている物質がみな一カ所に集まっていて、何十億年か前にここで大爆発が起ってこれがとび散ったのだ、そしてとび散るときに現在宇宙にちらばっている元素ができ上がったのだ、そういう考え方をしている人もあります。それについてはいろいろ議論もあるようでありますが、われわれの原子核に関する知識が拡がって行って、ついには、そういうところにまで進んで行ったわけです。そしてさらに、そういうとび散って行ったものから星ができるのはどういうわけかということも、原子核反応の知識から解釈してゆくことができます。

そういうわけでわれわれの話は、一番最初、物質の一番小さい粒子である素粒子の話からはじまったのでありますが、素粒子がわかってくると、次に原子核の話に入り、原子核のことがわかってきますと、今度はべらぼうに大きい宇宙の創造とか歴史にまで原子核の知識が応用されて、自然の非常にもしろいことがわかってくるということになったのであります。

以上が大体現在の原子物理学に立脚して物質というものを見わたしたところのひとつの像であります。ご静聴ありがとうございました。

Ⅳ 原子核の実験

熊谷 寛夫

東京大学教授

原子核の実験には粒子加速器と粒子検出器が必要である。粒子加速器は、原子核に衝突させるために陽子、重陽子、アルファ粒子などの速さを増して、エネルギーを大きくする装置である。粒子のエネルギーが大きくなるほど、研究の新しい分野が開けてきて、装置は複雑で大型になる。

最近、粒子検出器もいちじるしく進歩した。新しい検出器が使われるようになると研究結果も躍進する。

<昭和31年12月7日 講演>

は じ め に

昨晚、菊池先生から、原子の構造、あるいは
原子核の構造についていろいろお話がありました

たが、ああいう研究を実験的にはどうするかということを、今日はお話したいと思います。

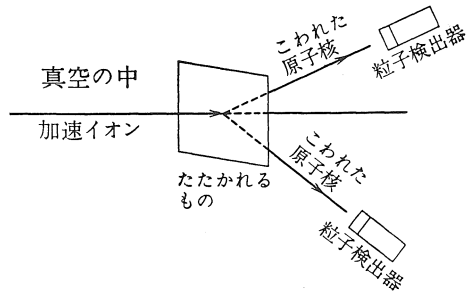
原子は非常に小さくて目に見えないものですが、それをはっきり絵にかいて、スライドに出しますと、いろいろのことがまるではっきりわかっているように思えますが、学問的にはまだわからないはっきりしないことが非常にたくさんあることをはじめにお話しておきます。だからこそ実験、理論ともこれから多くの研究が必要なわけであります。

原子核を研究しますのにいろいろな方法がありまして、今日おもにお話いたしますのは、原子核の中に入っております陽子、あるいは陽子と中性子がいっしょにくっついた重陽子をぶつけて、原子核をこわすということでございます。そうでない方法もあることをはじめにお話しておきます。サイクロトロンとかいろいろな装置を使って原子核をこわしてみるのには、原子核を爆撃するようなものでありますが、これとちがって、こわさないで撫でさするようにといたしますか、とにかくこわさないで研究する方法もございます。それについてのくわしい話は今日はいたしません、ごく簡単に申しますと、原子核には陽子と中性子がいくつか入っております、ちゃんと質量をもっておりますし、また電気をもっております。また、地球が自転しているようにくるくる回っている性質があり、このために電気をもっているものが回っていますから磁石の性質があります。その磁石の性質、電気の性質を調べるのに、昨日菊池先生がまっさきにお目にかけました素粒子の表（59ページ参照）の最初にあった光子というものを使います。光子は波長の長い方からいきますと電波・光・X線・ガンマ線とありますが、これらはみな同族なのでありまして光子と申しますが、それを原子核に当てるとどういうことが起るかということを見まして原子核を研究する方法がございます。これは

ふつうによく行なわれている方法でございます。この方法を使って原子核の性質について大事なことがたくさん出てきます。

原子核はどのよう にこわれるか

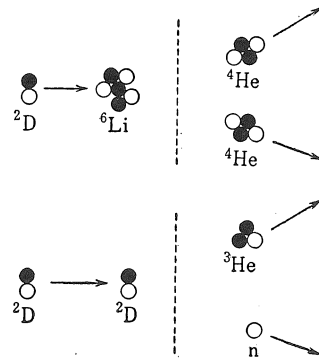
その他には、サイクロトロンなどを使って、陽子、重陽子などを加速して原子核をこわして研究するということがありますが、それをこれからお話したいと思います。まず第1図を見て下さい。これは原子核をこわしてみるという実験をどのようにやるかということを、模式的に書いた図でありまして、この実験はあとでお話しますように、全部真空中中でやります。真空の箱はここに書いてございませ



第1図 原子核を破壊する実験

ん。図の中央の四角の中に叩きたい原子核が入っておりますがそれをサイクロトロンなどを使って加速したイオンで叩きます。こわれた原子核があちこちらにとび出すのを図の粒子検出器で見つけて、どちらの方向へ、何がとび出してきたかということを調べます。粒子検出器の方は空中において、こわれた原子核はうすい膜を通して真空の外に出るようにすることがございます。この粒子検出器のお話を一番おしまいに少ししたいと思います。

次に第2図を見て下さい。これはどんな原子核がどういようようにこわれるかという例について、きわめて簡単なものを2つだけ示したのでございます。黒丸が陽子で白丸が中性子で、白丸と黒丸とが1つずつついたものが



第2図 原子核破壊の例

重陽子です。上の図で重陽子が衝突する原子核はリチウムの6と申しまして、黒丸が3つで原子番号が3で、白丸が3つついております。それにぶつけますと出てくるものがヘリウムの原子核です。

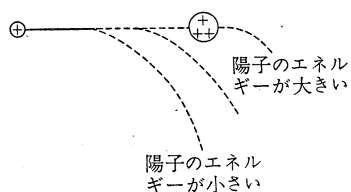
ヘリウムの原子核は陽子2つと中性子2つがいっしょになったものですが、これが2つできてまいります。この反応はサイクロトロンなどを使っても起すことができます。よくはわかりませんがこの反応は、水素爆弾といわれている熱核融合反応の方で大切な役目をしているらしいのです。図の下の方は重陽子と重陽子の衝突でして、このときにはいろいろなことが起りますが、その1つの場合には陽子が他方にうつりましてヘリウム3になります。これとふつうのヘリウムでは中性子が1つちがうのでありまして、黒丸すなわち陽子が、どちらも2つですからどちらもヘリウムです。このように質量がちがいますのは、昨日の菊池先生のお話の同位体、アイソトープであります。

陽子を飛び出させた残りは中性子でして、これは遠くまで飛び出してきました。これは中性子を作るのによく使う反応です。

次の第3図は、どうして加速器が必要か、エネルギーを上げるといこと



はどういう意味かということの説明するためでありまして、これはさきほど書きましたリチウム6というものに重陽子をぶつけるときを考えるというわけです。



第3図 原子核に近よる陽子のエネルギーがちがうとき

6というのは、丸の数が全部で6個だということです。6というのを、昨日の菊池先生のお話ですと右肩に書く、私は左肩に書く。これはいろいろな書き方がありまして、別に深い理由はありません。

重陽子の中の陽子が正の電気をもっていますから、これがリチウムの中の陽子3個分の正の電気と電気の力を及ぼし合って互に斥け合います。このために重陽子がのろのろ近づいたのでは、いいかえると陽子のエネルギーが小さいときには両方の電気が押し合うために衝突しないで離れてしまいます。これが衝突するためには重陽子の速さをかなり速くしなければならない。すなわち相当のエネルギーをもっていなければならないということになります。それでもっとエネルギーが強くなりますと、もし当たったとすると原子核の中に重陽子が入って、それをごちゃごちゃかきまわして次にいろいろなことが起ります。ですから原子核を爆撃しようと思いましたが、まずこのプラスの電気とプラスの電気がおしあっていることに打ち勝たなければならない。それがクーロンの障壁と申しまして原子核によって違いますけれども、大体100万電子ボルトあるいはその何倍かというくらいのエネルギーをもっておりませんとだめです。この電子ボルトというのはどういうことかというのは、あとでもう一度お話をいたしますから、今はそのままにしておきます。

ここで、いろいろなエネルギーで実験をするということの意味をもっとくわしくお話したいと思います。エネルギーを大きくすることは、電気の力でおしあっているのに打ち勝って近寄るためにまず必要なことであります。ただ近づけばいいかという、それだけではございません。単に近づくばかりでなく、もっとエネルギーが大きい方が原子核反応は盛んに起ります。またもっとエネルギーが上がると別の意味が出てきます。このために実験物理学者はエネルギーをどんどんと上げるように、もう20年以上も努力してきているのであります。

加速器の目的

ここで少し学者が粒子のエネルギーを大きくするために加速器というものを次々と作ってきたことについて考えてみたいと思います。これは人間の探究心と申しますか、ちょっと言葉が悪いのですが冒険心の現われで、尋常一様でないことを

やってみたい、尋常一様でない器械を作ってみたい。たとえてみれば高い山に登る、ヒマラヤに登ってみたいというようなことと、人間の気持としては同じような努力の現われであると思います。加速器を作るようになったもうひとつの刺激は、昨日菊池先生が話されました宇宙線の研究であります。宇宙線の研究では空から降ってくる速い粒子を使っているんな原子核の研究をするわけですが、宇宙線の中の粒子のエネルギーに近いものを、作ってみたいという欲望からも出てきたのでございます。

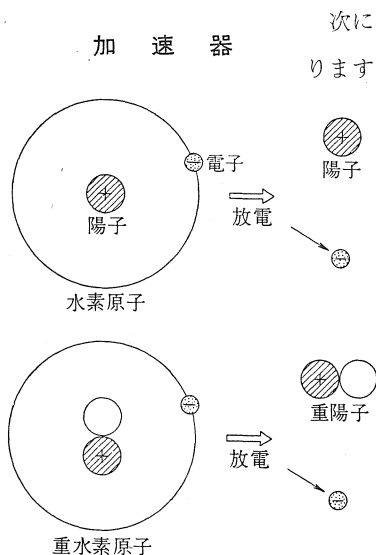
さて、陽子が原子核の電気との反撥力に打ち勝って原子核の中に飛び込んだとしまして、そのエネルギーが更に大きくて、昨日の菊池先生のお話になりました核力による結合エネルギーに比べて、ずっと大きなエネルギーで飛び込みますと、このときには原子核の中の粒子ひとつひとつがバラバラのように見えるというところが出てまいります。核力というのは、原子核の中だけにあって、それで互に結びあっておりますが、この力の性質を調べることが最大の問題であります。この核力による結合エネルギーと同じか、少し低いエネルギーで陽子を入れますと、原子核がかたまっている状態に見える。つまりあまり勢いよく叩きますと原子核の中の陽子や中性子がバラバラの状態の研究できます。それより低いエネルギーでは全部かたまっている状態で研究できるということになります。しかし、原子核の中の粒子がバラバラに見えるエネルギーより更にエネルギーを大きくするといろいろなことが起ってまいります。陽子を非常に大きなエネルギーに加速いたしまして、他の原子核にぶつけるのですが、ぶつかる陽子のエネルギーを 290×100 万電子ボルト(290 MeV)まで加速いたしますと、衝突のときに昨日お話のあった π 中間子を作ることができるのです。それからまたガンマ線を使ってもやっぱり π 中間子を作ることができます。外国ではできていますが、日本ではまだそこまで陽子を加速することはできません。原子核についての基本的な研究で宇宙線でやっていた仕事の相当の部分が加速器の方にうつってきたというのは、

陽子をこのように加速することができるようになったからです。

一方ガンマ線を使いまして陽電子を作ることができます。これは昨日のお話の中の素粒子のひとつでありますが、非常に大切なものです。電荷がマイナスのものがふつうの電子ですが、陽電子は重さは電子と同じで電荷がプラスです。エネルギーが100万電子ボルト以上のガンマ線を使うと電子と陽電子をいっしょに作ることができます。これはエネルギーが物質になるというひとつの例でございます。またガンマ線のエネルギーが9億電子ボルト以上になりますと、昨日のお話の素粒子の中のK中間子を作ることができます。また陽子のエネルギーを60億電子ボルト以上にしますと反陽子を作ることができます。できるはずだということになっておったところこのエネルギーの陽子を作る器械（ペバトロン）をちゃんと運転しましたら反陽子が出てきたことは皆さんご存知のとおりでございます。このような加速器を作るということは大変であります。これを使って反陽子がどのようにして作られるか、またできたものがどんな性質のものかということをしらべて、素粒子に関する基本的な問題を解いてゆくのであります。たとえば、陽子が2億9千万電子ボルト以上のエネルギーで他の陽子、または中性子にぶつかりますと中間子が出てくるということは、陽子はそのまわりに、ちょうど人がお餅を背負っているように中間子を持っていて、ふつうのありさまではそれを離さないけれども、勢いよく何かにぶつかるとお餅を放り出すような具合に中間子を吐き出すのです。

速く振動したり、ものにぶつかる何かを吐き出すという例は外にもあります。よくアンテナから電波が出ると申しますけれども、電波はやはり光、X線、ガンマ線と親戚でありますから光量子でありまして、あれが非常にたくさんわれわれの所のラジオに来ているのであります。電波という光量子がなぜ出たかといいますと、アンテナの銅線の針金の中で電子が振動して、電波の波長にもよりますけれども、1秒間に百万回、千万回あるいは1億回往復

運動をやりまして電波を出すのであります。その出方は陽子が勢いよく何かにつかって π 中間子を吐き出すということと、学問的にも非常に似たことで、ただ電波の光量子はひとつひとつのエネルギーが小さいものですから割合とやすやすと出るけれども、中間子の方は質量もありエネルギーも高いしその他の事情から、非常に陽子を強く加速して激しくどこかに衝突させないと出ないということが違うだけであります。このようにして、宇宙線も使いますが、加速器を使いまして、どんな素粒子があるかということを次々に調べ、その素粒子の間にはどんな力が働くか、質量はいくらか、どんな性質をもっているか、コマとしての性質、その回り方は激しいか、磁石としての性質、などを調べてゆくのが原子核あるいは素粒子に関する学問なのであります。



第4図 原子をイオンにする。

次にこういう実験を行なう装置の説明にはいます。第4図の左上は一番簡単な水素原子を表わしたものでありまして、中心の陽子が正の電気をもっていて、そのまわりを電子が回っております。左下の図は重水素の原子で、原子核に中性子が1つついて質量が2倍になり、そのまわりを電子が回っております。これを何とかいたしまして、たとえばネオンサインのような放電でもよろしいのですが、もみくちゃにするのであります。そうしますと電子と陽子と離れます。

右の図はこういうようにして陽子を離したのでありまして、陽子はプラスの電気、電子はマイナスの電気をもっております。マイナスの電気をもった電子を加速することもあり、プラスの電

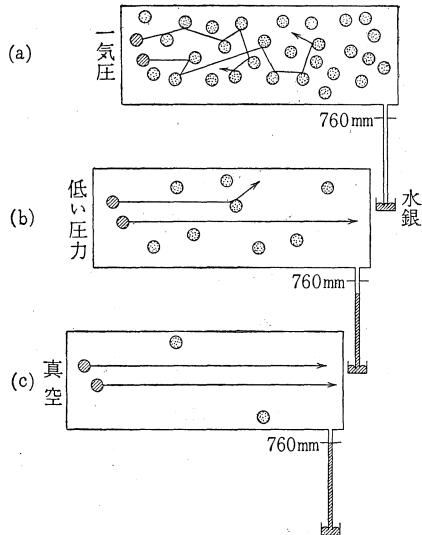
気をもった陽子を加速することもあります。重水素の原子核はプラスの電気1つをもってありますが質量は陽子のちょうど2倍になっております。陽子に力が働いて加速されるのですが、中性子もいっしょに動いていって原子核には2つともぶつかるわけです。

こうして原子を裸にいたしまして走らせるのでありますが、加速器を作るときに私どもが毎日苦勞しなければならないのは真空の問題であります。なぜかと申しますと私どもこうして暮しております所が空気の中でありまして、ご承知のようにたくさん空気の分子がありまして、この中をいまのように裸になった原子核を走らせるといたしますと、第5図の(a)のようにコツコツ衝突いたしまして困るのであ

ります。このときに衝突しないで走る平均の距離が、大体1気圧の空気の中では10万分の1cmぐらになります。空気の中では10万分の1cm走るともう衝突してしまうので、衝突しないために(b)(c)のように真空にしてやらなければなりません。こうして空気の分子を減らしてやるとよく走ようになります。よく走るといっても、ずーっと走るうちにはどこかで衝突いたしますが衝突回数が減ればいいのです。ですからどこかで空気がもれていたたり、あ

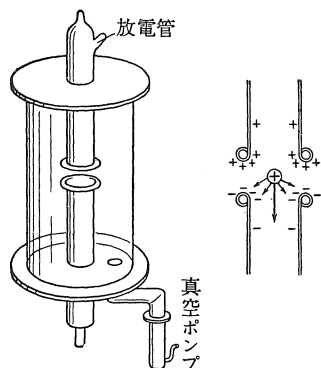
るいは真空ポンプが具合悪いと、たちまち真空が悪くなってだめになります。こういうことは実験するものの苦勞でございます。

次に第6図は加速器の一番簡単なものでございます。これはイギリスの原



第5図 イオンは真空中でないと自由に走れない。

子力の研究に大切な役目をなさっている、コッククロフトという人が、約24



年前に作った装置のことを頭にえがきながら書いたものでございます。こちらが真空ポンプで、ガラスの筒の中を真空にいたします。上に放電管がありまして水素を導いてくるのですがそれは書いてございません。放電を起させる電源のこと

第6図 イオンを加速する。

いのです。放電が起りますと、ここに小さな穴があってそこからイオンがとび出てきます。この装置では上の方にプラスの電圧をかけます。プラスの電気をもった陽子が2つの筒の間に飛んでまいります。ここまではゆっくり走ってきましてここからは電気の法則によって非常に速く、いわば金槌で下に向かってがくとなぐられたようになります。このように加速器というものを考えますと、全部電気の力を使っているのです、原子核の中の核力というものがありますがそういうものではなくて、電気の力だけを使っているということが特徴です。これはそうするよりほかに仕方がないわけです。

次に電気の力の実験をおめにかけますが、子どもだましのようで失礼かも知れませんが、まさつ電気の実験をひとつおめにかけたいと思います。

原子と電気

これはただのワラ半紙ですが、絹糸がついているだけです。紙と申しましてせんい素が多いのですが、せんい素は炭素・水素・酸素などそれぞれ原子の集まりでありまして、いまこの紙を私の髪の毛でこすりますとマイナスの電気をもちます。電気をもつというのは私どもの髪の毛も原子の集団であるということを考えますと、頭の毛の中の電子がうつるということでもあります。これは単なるま

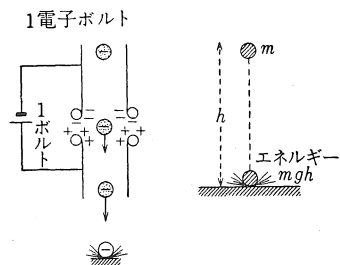
さつ電気の簡単な実験と申しますが、よく考えてみれば原子物理学のことなのです。なぜマイナスの電気が頭の毛から紙の方へうつるかということはよくわかりませんが、必ずマイナスの電気がこちらにうつります（乾燥が悪くて実験がうまくできない）。重力でもって2つがだらっと下がっているのですが、同じ電気をもちますと反撥力をもちまして、これが開くのであります。壇上で実験してうまくゆかないのは初めてですが、申し訳ありません。湿度がある程度低くないとうまくゆかないのです。

電子ボルト

次に第7図は、電子ボルトという言葉の説明しようと思って書いた図でありまして、さきほ

どの電極がありまして、これがマイナスの電気、下がプラスになっております。

電圧が1ボルトの電池というのはふつうありませんが仮にあったとしまして、これを2つの電極につなぎます。走ってきますのが電子でありまして、マイナスで

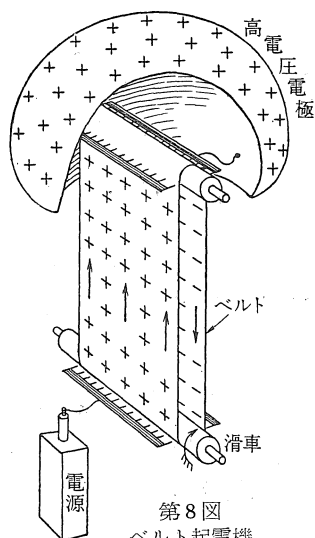


第7図 電子ボルトとは？

すから上から下へくる時に速くなりましてカッンと壁にぶつかります。電子の電荷は非常に小さいものですからエネルギーは非常に小さいものですが、この時にもっているエネルギーを1電子ボルトといいます。もちろんこれは全部真空中中でないといけません。これを他のたとえにいたしますと、皆さまご承知のように質量 m のものが地球の引力に引っぱられまして h という高さを落ちてきて、土にコッンとぶつかりますと、そのときもっていたエネルギーが mgh だということになります。原子核のほうでは1電子ボルトという単位は小さすぎるので、その百万倍の MeV をつかいますが、1 MeV のエネルギーというのは、1グラムのもものが引力で下に向かって 10^{-9} cm, つまり10億分の1 cm 動いたときのエネルギーということになります。また水素の分子は1グラムよりもずっと

軽いのでありますが、それがどのくらいわれわれの地球上の重力で走ったら 1 MeV のエネルギーになるかを当たてみましょう。ただし重力の大きさがずっと同じというところはないのでありますがもしあったといたしまして、光でおよそ3時間走って達する距離だけ走ってやっと 1 MeV になります。このことから分子が1グラムにくらべてどんなに軽いかということと、原子核を加速するときに重力というものがどんなに小さいかということを知っていただきたいのです。

ベルト起電機

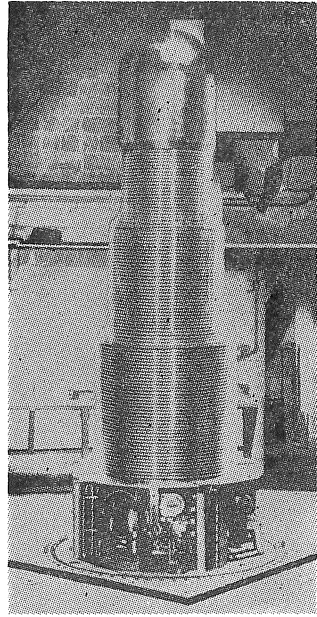


次に第8図はベルト起電機と申しまして、電気の激しい電圧を出すための装置であります。

滑車にベルトがかかっておりまして、下の滑車を速く回してベルトを速く動かします。行きがけにベルトに正の電気をむりやりにつけてやりますと、ベルトがそれをもってまいります。帰りにはマイナスの電気をつけて帰ってくるようにいたします。プラスの電気をどうやってくっつけるか、どうやって取るか、帰りがけにマイナスの電気をどうやってくっつけるかなどのは省略いたします。そうしますと、プラスの電気をもって行って帰りがけにマイナスの電気をもってきてしまいますから、差引き上の電極にはたくさんプラスの

電気がたまります。こうして非常に高い電圧を作り、これを使ってイオンを加速するのでございます。これは空気中でやりますと電極などから火花がとんでしまいますから、鉄の入れものに入れて中に圧縮空気を入れたり火花の飛ばないようなガスを入れたりしまして高い電圧を出します。こういう方法で 800 万ボルト、さきほどの話ですと 800 万電子ボルトまでが加速できるよ

うになっております。こういう装置は日本にもかなりたくさんあります。第9図はそういう装置の外観図でありまして、鉄のタンクにはいるべきものをタンクだけ取ったものです。中にタガのようなものがいっぱいつんでありますが、この中にベルトやイオンを加速する管があります。これでは大きな見当はつきませんけれども、鉄のタンクをかぶせて中の空気を抜いてから乾燥した窒素を数気圧に入れますと200万ボルトぐらいは楽に出せるものの写真でございます。タガをたくさん重ねましたのは、電圧を大体平均に分布させるように工夫したものです。



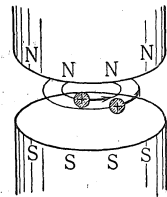
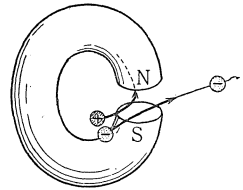
第9図 ベルト起電機

これから磁石を使う加速器の話をしていただきます。

サイクロトロン

くり返して申し上げますが、もちろん全部真空

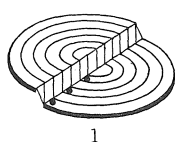
の中でやります。第10図の上のように磁石のN, Sの間を向こうに向かって走りますと、マイナスの電気は磁石の磁場のあるところで右に曲る。プラスの電気をもったものは左に曲ります。磁石のないところだとまっすぐに走る。それをサイクロトロンのときのようにいたしますと、いたるところで曲れ曲れという力が働いてまわってくる。エネルギーが高くなると大きな円をとって回ようになります。



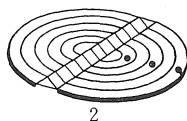
第10図の下は、実際のサイクロトロンのことを思いながらいた図であります。あとで関係がありますの

第10図 イオンは磁石の力でまがる。

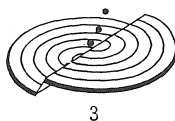
で、ついでにここでお話しておきたいのですが、ちょうどレンズの場合に光がガラスにはいると曲るということを使いまして光に対するレンズを作りますが、磁石の場合にも電荷をもつ粒子が磁石の力で曲りますから、これをうまく使いますとレンズができるのであります。レンズは粒子を集めるようにも、広げるようにも働くことができますから、それを使いましていやな方向には粒子がゆかないように工夫しなければなりません。そういうことがこの図には何もかいてございませんけれども、実際にサイクロトロンを作るものは苦勞して設計することになります。あとでそのレンズの作用のことをもう一度お話いたします。



1

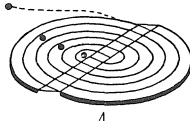


2

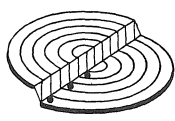


3

第11図 サイクロトロンで
イオンを加速する模型



4



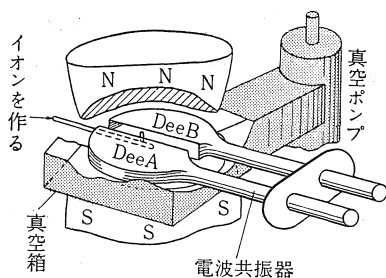
5

第11図はサイクロトロンがどうしてイオンを加速することができるかということを模式的にかいた図でございます。さきほどお話しましたように大きい加速器では最後は6000万 MeV, すなわち 100 万ボルトの6000倍ものエネルギーにするのでございます。普通のサイクロトロンにしましても100万ボルトの70倍とか100倍とかのエネルギーにするのであります。どうしてそんなことがで

きるのでしょうか。さきほどお話しましたようにペルトを使ったり、いろいろな工夫をしましても、一度に出る電圧は800万ボルトぐらいが止まりなのであります。これより高いエネルギーにできるのは、結局電波をうまく使ってくり返しくり返し加速するのであります。その例が第11図であります。1の図に黒いたまが3つありますが時計の針と反対の方向に回っていますが、ある時間たつと2の図の位置に来ます。ここでたまがまるく回

るのは、第 10 図のように磁石の力が真空中の中でイオンをまるく回すからです。3 の図まで回ってきますと右の半円と左の半円とは電圧がギッタンバッタンしまして、さっき円板のさかいの坂によって速くなったのが半回りした後でまた坂によって速くなります。たまは速くなると、ますます外に出て 4 の図のようにとび出していきます。これを原子核の実験に使うわけです。5 の図ではイオン源というところからたまが現われてずっと回ってきますと、また坂道がギッタンバッタンやりまして速くなるのであります。このギッタンバッタンやるのは電波の力を表わしたもので、これが 1 秒に 1000 万回もやります。サイクロトロンを作るときにはこういう電波を作るということが 1 つ、真空中にするとということが 1 つ、それからさきほどの電磁石を作るということが 1 つ、その 3 つを組み合わせますとサイクロトロンが動きます。話がこまかくなりますが、第 11 図で半径の小さなところを回ると、大きい半径で回るのが時間は同じなのであります。それがサイクロトロンの大きなミソでありまして、これはイオンの性質と磁石の力とからそうなのであります。アメリカのローレンス氏がサイクロトロンの建設をしたのは、こういう回る時間が半径によって変わりませんから、いつも同じ周期でギッタンバッタンやっておればよろしいということが大きなミソだったのであります。ところがある学者が、それはだめだ、それは力学の言葉で申しますと、たまがゆっくり動いている間は普通の力学でよかったのですが、非常に速くなると相対性原理の力学を使わなければならない。そうすると小さい半径で回る時間よりも大きい半径で回る時間の方が長い。だから同じ周期でギッタンバッタンやっていたのでは拍子が狂ってきて困る。だからサイクロトロンはある所でもう寿命がくる。確か 40 MeV になったらサイクロトロンはもうだめだと申したのであります。なるほどサイクロトロンの原理ではそこまでおしまい、それ以上はありません。しかしこれに対して次のような工夫があらわれました。エネルギーが高くなってくるにしたがってギッタンバッタンの

周期を長くしてやるようにしますと、もっとずっと高いエネルギーまで、つれてくることができます。そういうふうにしてつれてきたら、またもとにもどってはじめてからつれてくる。そういうようにくり返すのがシンクロサイクロトロンであります。それは電波の言葉でいいますと FM といまして周波数変調ということをやります。日本の原子核研究所にあるのはサイクロトロンとシンクロサイクロトロンの両方ができるようになっております。次に、



第12図 サイクロトロン

第12図はサイクロトロンの大事な部分を図にかいたのでありまして、NN, SS と書いたところがさきほどの電磁石、その間に真空箱があります。その中のDeeはさきほどのギットンバッタンを電気の力でやっております。これは英語のDという字に似ているので

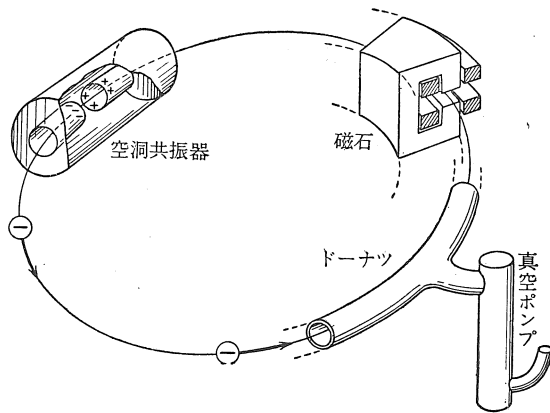
Deeというあだ名をもっております。もっともあだ名といっても本当の名です。これが2つありまして一方がプラスの電気をもっているときは他方はマイナスの電気をもっている。次にそれが逆になり、これをくり返すのであります。これだけを振動させるのにも放送局よりも大きな発振器があります。加速箱につながっているのが真空ポンプですが、これがどんな構造をもっているかということも今日は全然お話ししないことにします。2つのDeeの間にイオンをつくるイオン源があります。

シンクロトロン

第13図はシンクロトロンというものです。

さきほどのサイクロトロンですと、中央でイオンができたとしますとぐるぐる渦巻型に回っていった、しまいに大きな半径になってとび出すわけであります。それで磁石の力はどこも同じ値をもっていますので、そういう設計では大きなサイクロトロンでは非常にお金がかかって仕方がないのです。シンクロトロンと申しますのは、はじめてから回る

位置が決まっているのであります。ちょうど細いドーナツのような筒になっていまして、その中を真空中にしまして、この中を電子やイオンが回るのであります。図には一部分しかかいてありませんが、わりに電磁石がたくさ



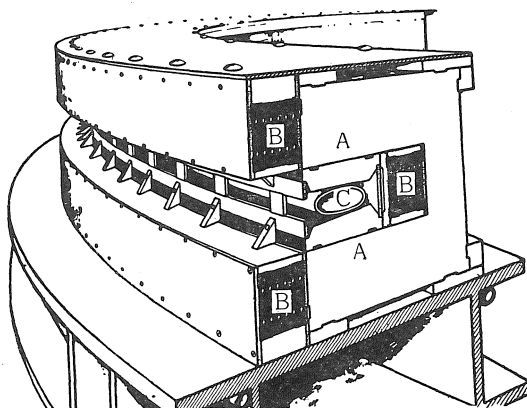
第13図 シンクロトロン

ん並んでいて、一カ所に空洞共振器というものがあましてこれは電波の器械でありまして、これがイオンのエネルギーを大きくするのです。磁石の力を磁界と申しますが、これが同じですとエネルギーが殖えてくると半径が外の方にいってしまいます。ですから一定の半径で回るように磁石の力をだんだんと強くします。

シンクロトロンで電子を回すものをエレクトロンシンクロトロン、陽子を回すものをプロトンシンクロトロンといいまして、プロトンシンクロトロンというのは今の大きな加速器の花形で、アメリカ、ソ連で大きいものを作ることの競争をしております。ペバトロンとかコスモトロンとかいうのは固有名詞でありまして、学名はプロトンシンクロトロンといいます。

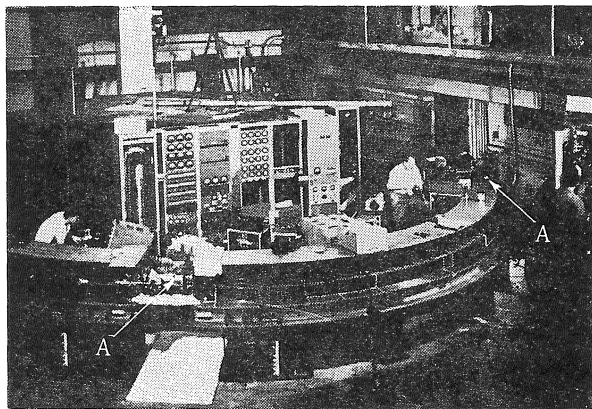
プロトンシンクロトロンというのは非常にむずかしいものでありまして、スケジュールにあわせて磁石の強さを強くしてゆかねばならない。陽子が1回りするのは始めは遅いのでありますが、だんだん速くなるのでありますから、空洞共振器にプラスマイナスの電気をあらかず時間をうまく調節いたしませんと調子が狂ってしまいます。それを電波の方でいいますと約10倍にも相当する周波数変調を、アナログ計算器のはたらきを使って確実にしてや

ります。ところが電子の場合ですと、加速と申します字がおかしいのですが、100 万ボルト 200 万ボルトとなりますと、速さが光の速さに近づいてきて、それ以上は決して速度が加わらない。その代わりエネルギーはどんどん殖えるのでありまして、質量が殖えてまいります。ですから電子の方のシンクロトロンは、1 回りする時間がいつも変わらないので装置がかなり簡単になるわけであります。



第14図 アメリカ、コーネル大学のシンクロトロンの磁石、コイルとドーナツ

左図はアメリカのコーネル大学にある電子シンクロトロンの一部分でありまして、Aは電磁石のヨークであります。Bがコイルで、Cはドーナツの切り口です。ドーナツの半径は 3.5m ぐらいあります。この電磁石はふつ

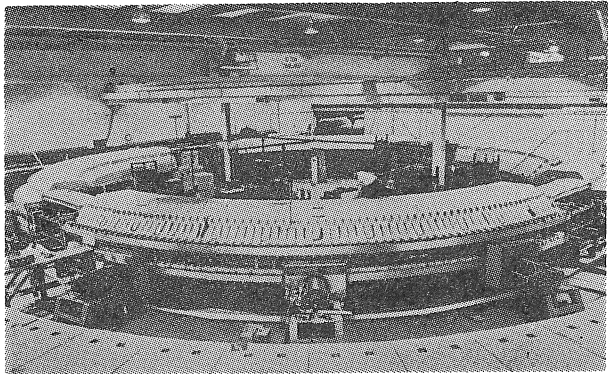


第15図 建設中のコーネル大学シンクロトロン

うの鉄の塊りではありませんで変圧器と同じように薄い鉄板をはりあわせて作ることが多いのであります。第15図は上の設計図のものを実際に作っているところで、電磁石が並ん

でいます。電磁石がぎっしりまるく並んですき間がないと電子を入れるところもないということになりますので電磁石のないところを作り、ドーナツがまっすぐなところを残してあります。このために円を4つに切りましてAのところに磁石のないところを残しておきます。

第16図はアメリカのブルックヘヴンにあるコスモトロンといわれるものです。陽子を100万ボルトの3000倍まで加速いたします。これも第15図と同じように電磁石の円を4つに切つてあります。電磁石の外側には真空ポンプがたくさんついていましてドーナツをいい真空にしてやります。

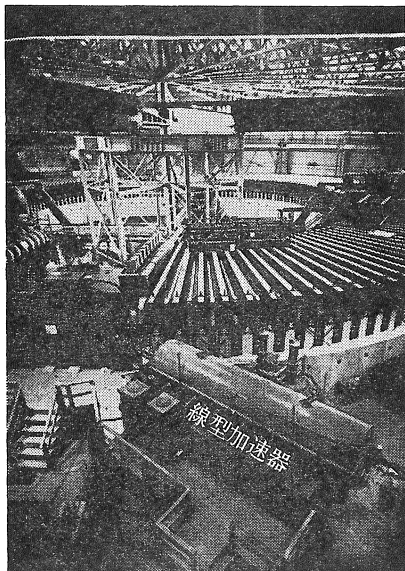


この電磁石の作る

第16図 コスモトロン

磁場は、はじめは弱いのでありますが、1秒間くらいにわたって強くなるのであります。そのあいだに陽子は何十万回、あるいは百万回ぐらい回るのであります。その回るあいだに上下や横の壁にぶつからないようにしなければなりません、一度コッソとぶつかったらおしまいでありますから何百万回もぶつからないように回すのがむずかしいのであります。さきほど申しましたとおり磁石の力を使うとレンズができますが、それはすでにご承知のように、電子顕微鏡のレンズとして利用されております。それと同じ理屈で、回るところからずれたらもとにもどるように磁石にレンズ作用をもたせてあります。そういうところがまたシンクロトロンにお金がかかるところであります。

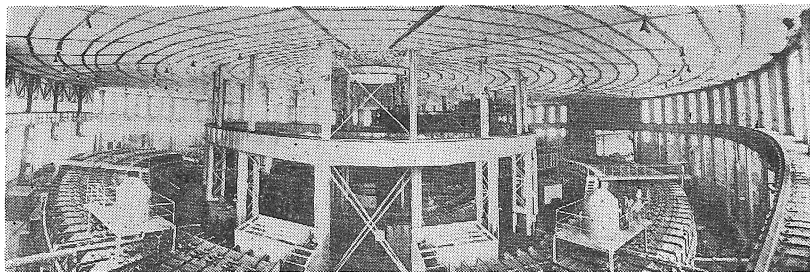
第17図はバークレーにありますペバトロンというプロトンシンクロトロ



第17図 アメリカのベバトロン

ンであります。これも磁石が4つに分れております。図の線型加速器というのは、陽子がある程度速くしてから磁石の方に入れてやる役目をもつものであります。ベバトロンは100万ボルトの約6000倍まで加速できまして、動いているものでは世界で一番大きくて盛んに仕事をしているチャンピオンです。これには1万トン近い鉄が使われております。

第18図はソ連のシンクロファゾトロンで、やはりプロトンシンクロトロンであります。電磁石には、3万



第18図 ソ連のシンクロファゾトロン

トンぐらいの鉄を使っているという話であります。動けば100万ボルトの1万倍、10BeVといわれ、カリフォルニアのが6BeVですからもっと大きいわけですが、まだ動いたというニュースがきておりませんので、いま調節中だと思えます*。

こうして陽子その他の粒子のエネルギーを上げまして、だんだん宇宙線に

* この加速器はこの講演の翌年の5月（昭和32年）に試運転に成功した。

肉薄してゆきます。宇宙線の粒子のエネルギーと同じになったとすると、器械の方がたくさん粒子を作りますから宇宙線で何年もかかってやった仕事をたちまちやってしまうので、加速器のエネルギーが上がってきますとそこところは宇宙線の方から加速器にまかす傾向がありますが、宇宙線の方は非常にエネルギーの範囲が広いのでまだまだ先があります。

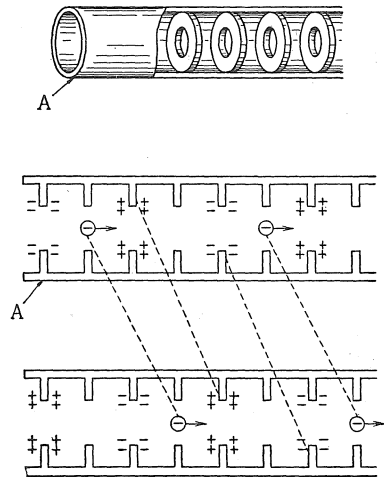
これ以上大きなものを作ろうとすると鉄が非常に多く入用で困るので、イオンがくるくる回るところのレンズの作用を工夫しまして、非常に細い路でもうまく回るように工夫します。そういうものを強収斂 (Strong Focus) といいです。これ以上大きな器械はそういうふうにして作るという傾向になっています。欧州の各国が共同でスイスに作ります研究所にできるものは 25 BeV でありまして、それには強収斂という考えを使ってあります。これは半径が 100 m から 200 m という道の中を非常に狭いドーナツの中でイオンを走らせるので、作る人はいろいろ心配で大変であります。ソ連でもアメリカでもそういうものを作るので世界各国が競争しております。

電子線型加速器

速する装

置を説明しておきます。第19図のAは銅の筒でありましてその中に穴のあいた円板をところどころ入れます。波長が短くなりますと電波がこういう筒の中におしこめられて走ってきます。そして電場が移動する速さを光の速さと同じにすることができます。ちょうどここに電子が光の速さと同じくらいに加速されて入ってきますと、電波の方がちょうどこれをおいかけてきまして、

最後に磁場を使わないで電子をまっすぐに加



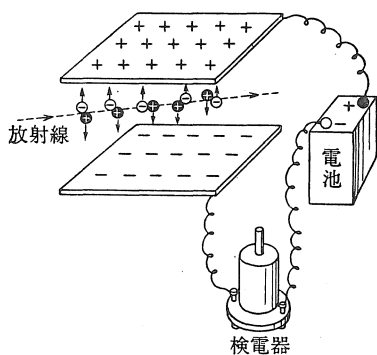
第19図 電子線型加速器

電子の方は、いたるところでエネルギーをもらいっぱなしで走ります。こういうものを電子線型加速器といい、これは作るのはむずかしいけれども一度作ってしまいますと割によく働くので、非常に注目されている器械であります。電子を加速するためには、このほかにベータートロンという装置もありますが、時間がありませんからお話するのをやめます。

これで加速器の方の話が大体終わりましたので、次に粒子をみつける器械の方にうつりたいと思います。

粒子検出器

まず、第4図の水素や重水素原子をイオン化する図を見て下さい。空気の原子も水素原子と似た構造をもっていますが、原子核の中の粒子や外側の電子の数が違います。これに陽子だのアルファ線だのが飛んで来て空気の原子をこわし、一方に $+$ 、一方に $-$ の電荷をもつイオンがあらわれるのを利用して測るのがほとんどであります。第20図は一番簡単な粒子検出器の模式図をかいたもので

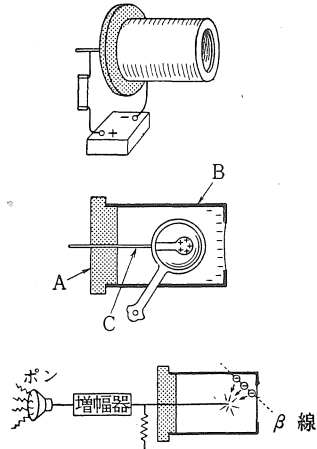


ありまして、空気中をずっと放射線が走ってきて空気の原子を $+$ と $-$ のイオンに分けます。上と下に2枚の板をおきまして上の板に $+$ 、下に $-$ の電荷を持たせます。そうすると $-$ になったイオンは上に、 $+$ のイオンは下に引かれます。このようにして動いた電気を図の検電器で検出しま

第20図 放射線は空中にイオンを作る。して放射線がとおったことを見つめます。これは真空中ではありませんで空気のあるところでやらないと困ります。むかしキュリー夫人が放射線の実験をやりましたときもこういう原理を使ったのです。

次の第21図はガイガー・カウンターといって、いま非常にたくさん使われ

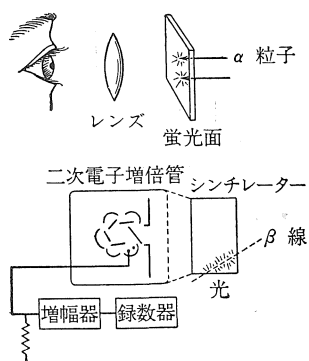
ているものでありましてベータ線その他をみつけるのに非常に具合よくゆくものであります。これも真空にしてはだめなのです。Aは絶縁物でして中央に細い針金Cが出ていまして、外の壁Bには-の電気、中の針金には+の電気を与えます。中にはアルゴンなどのガスが多いのですが、またアルコールなどのガスも入れてあります。なぜアルコールのガスを入れるかは説明しませんが、Bの窓には薄い雲母が張ってありまして、ここからベータ線が入ると図のようにイオンができます。こ



第21図 ガイガー・カウンターの内部構造

れと同じ器械をもってきましたのでちょっとお見せします。このさきにガイガー・カウンターが入っております。これが増幅器でありましてこの紙の中にベータ線を出す物質が入っております。これはいま紙を5,6枚とおっておりますが、そのくらいですとベータ線は出てまいります（バリバリ音がしている）。手ぐらいになりますと、もうとおけません（音は止む）。私の手をベータ線がたくさん叩いているのでありますが非常に小さいので痛くもかゆくもないのですが、もっと強いものになると火傷をいたします。この紙の中には、ラジウム (Ra) から出ましたラドン (Rn) というものを封入しましたガラスのかけらが、2つ3つ入っているだけでありまして、別に何も変わったことはありません。

ガイガー・カウンターはもう20年以上も前から使われているものでして、いまでも盛んに使われています。しかし、今では原子核に関する大切な測定にはシンチレーション・カウンターといって、放射線が光を出す性質を使うも

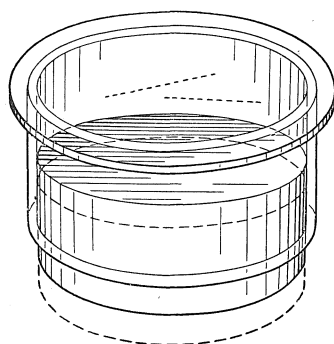


第22図

シンチレーション・カウンター

のの方が多く使われています。第22図がそれです。しかしシンチレーションを粒子の検出に使うことは、実はガイガー・カウンターより以前からあったことです。図のように硫化亜鉛などを塗った蛍光面にアルファ粒子などが当たりますとピカッと弱い光を出しますので、これを虫眼鏡で拡大して見たわけです。この方法は古いもので

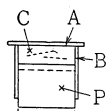
1917年にラザフォードが、はじめて原子核を人工的に破壊したときにこの方法を使いました。その後、ガイガー・カウンターが発明されて、シンチレーションを使う方法はほとんど使われませんでした。ところが二次電子増倍管といって微弱な光をうけてそれを相当に強い電流に変える真空管が発明されてから、むかしのシンチレーションの方法が、また盛んに使われるようになりました。第22図の下の方がその方法を説明したもので、右のシンチレーターといわれる特別な結晶に放射線が当たると光が出て、それが二次電子増倍管で増幅されて、さらにふつうの増幅器で増幅されてから数を記録されます。シンチレーション・カウンターは感度



第23図 ウィルソン霧箱

が高いうえに、短い時間にたくさんの粒子が到着しても歯切れよく計数することで、いままでのガイガー・カウンターにくらべ非常にすぐれていますので、原子核物理学の研究で盛んに使われるようになりました。

次に第23図はウィルソン霧箱の説明図です。硝子の板A、

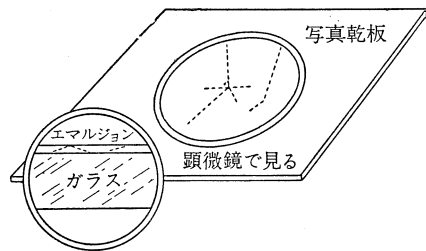


筒Bでかこまれた容器Cがあって、下にはピストンPがあります。Cの中の空気は密閉されて、外の空気とは遮断されています。Cの中には水またはアルコールなどの蒸気が飽和まで入れてあります。ピストンを下げてCの中の空気を適当に膨張させますと、中の空気は断熱膨張で冷たくなるために、Cの中に塵があるとそれを中心にして水やアルコールの霧ができます。しかし、何回も膨張をくりかえしていると、塵はなくなります。このようになったときに放射線がはいって、Cの中にイオンの行列を作りますと、イオンのまわりにできる霧のはっきり見えます。これを写真にとることが普通です。

このような理屈を使うものとしては、ピストンによる膨張を使わないで、容器の中の温度のちがいを利用する「拡散箱」といわれているものがあります。もうひとつは気体でなくて、液体を使って、液体の中にイオンを中心にして泡ができるようにして放射線を観測する「泡箱」といわれるものもあります。

写真エマルジョン

粒子検出方法として、もうひとつ大切な方法は写真用感光エマルジョンを使う方法です。写真の感光エマルジョンの中を放射線が走ってイオンを作ると、感光したと同じように、現像すると黒くなる微粒子ができることは古くからわかっています。いまでは、特に放射線に感じやすくした感光エマルジョンが作られ、またエマルジョンの部分を厚くして放射線のおとる道を広くしたものがあります。第24図はこれを説明したもので、エマルジョンの中のイオンの走った道は顕微鏡を使って長さ、方向、位置を調べます。感光エマルジョンを使う方法はサイクロトロンで加速した粒子を使う実験にも使われますが、もっともよ



第24図 写真エマルジョンと放射線

く使われているのは、気球を使って高空に上げて、高いところでまだ空気と衝突しない前の宇宙線のすがたを捉える実験です。

以上で放射線粒子検出のための方法で代表的なものを説明しました。最後に申し上げたいことは放射線の検出の方法も、また加速器を作ることも、日夜進歩しましてとどまることがないことであります。加速器にしましても新しく有能なものや、粒子検出法でもいままでにない立派な方法ができ上がると、原子核物理学はそれをきっかけにして飛躍的に進歩することでしょう。