

東京大学公開講座

流れ

東京大学出版会

東京大学公開講座

流れ

東京大学出版会

東京大学公開講座 28

流れ

検印廃止

一九七九年一月三十一日 初版

著者代表 向坊隆

発行者 加藤一郎

発行所 財団法人 東京大学出版会

一三三 東京都文京区本郷東大構内
電話 (八一一) 八八一四
振替 東京 六一五九六四

三陽社印刷・新栄社製本

1300-03587-5149

はしがき

今回の公開講座では「流れ」の問題が色々な分野から取扱われた。

「流れ」という言葉はあまりにも身近であるために、かえって、その意味を正確に規定しようとするのが容易ではない。この言葉はおそらく水の流れから出たものであるが、物理的には、必ずしも水のような流体でなくとも、粒子や物体の集団の、ある方向（それは必ずしも一定の方向とは限らない）への動きをあらわすのに使われている。自動車が一台走っていても流れとはとれないが、多数の自動車の動きは流れとして見るができる。

物理的でない対象の集団的な移動も流れとしてとらえられる。今回の講座の中では、情報とかドルとかがそのようなものとして紹介されている。この場合にも電話を一回かけたり、電報が替で一回ドルが送られただけでは流れとは考えにくい、色々な形で多量の情報やお金が動けば、それらも流れとして扱うことができるわけである。

流れという言葉は、古くから流派（英語の school）という意味にも使われている。この場合には、逆に時間が経っても、ある変わらないもの（考え方、技術など）を共通に伝え続ける集団といった意味に使われているので、前に述べた一群の流れとは異なっているようにも思われる。しかし、一筋の情報の流れに乗っている集団と考えれば、やはり同じ考え方にそっているともいえるであろう。

今回の講座に表立って取扱われなかったものに「時の流れ」がある。実はどの項目にも関連してい

るのであるが、特にそのものを取り出して論ぜられてはいない。しかし、これは正面から取り組むと、広い視野から扱いうる意味の深い問題といえるであろう。将来、この講座でも取りあげられることを期待したい。

公開という意味からは、ささやかな催しに過ぎないが、本学ではこの講座を大切な事業の一つとしており、規模はそう大きくできないかもしれないが、内容はいつそう充実して行きたいと考えている。最後に、熱心に参加された聴講の皆様、ならびに多忙な中から充実した内容の講義をして下さった講師諸氏に、また、編集、出版の労をとって下さった東大出版会に感謝の意を表する。

一九七八年十二月

東京大学総長 向 坊 隆

目次

はしがき

向坊 隆

I 素粒子の流れ

——加速器とその応用

小柴 昌俊 (理学部教授・物理学)

1

II 生命と流れ

古川 俊之 (医学部教授・循環生理学)

41

III 大陸移動とマントル対流

竹内 均 (理学部教授・地球物理学)

85

IV 乱流

佐藤 浩 (宇宙航空研究所・流体力学)

115

V 情報の流れ

渡辺 茂 (工学部教授・情報工学)

143

VI 交通の流れ

越前 正毅 (生産技術研究所助教授・交通工学)

169

VI 資源の流れ	相馬胤和（工学部教授・金属工学）	191
VII ドルの流れからみた世界経済	森田桐郎（経済学部教授・国際経済学）	223
IX 時流と政治	伊藤藤隆（文学部助教授・国史学）	245
X 西洋美術の流れ	前川誠郎（文学部教授・美術史学）	273

I 素粒子の流れ——加速器とその応用

小柴 昌 俊

●はじめに

「素粒子の流れ」というものをできるだけ数学とか数式を使わないで、絵とかスライド、そういうものを使って、だいたいこんなものだという印象を得ていただきたい、というのが私の願いです。このごろでは高等学校でも教えるようですが、いったい物質粒子というのは波であるのか粒子であるのか、いろんなことが教科書に書いてあります。しかしここでは、波であるということはすっかり忘れてしまつて、物質粒子というのは粒である、こういうふうに考えて話を簡単にします。量子力学などというのはどこかへっぽつてしまふわけです。そこで全体の統一テーマというのは「流れ」ですから、その「流れ」というものと素粒子の研究というものは、いったいどういうところでどういうふうにからまってくるかということをお話しなきゃならないのですが、まず最初に物質はどういうものかなっているのか、という問いかけから始めていくことにします。

●物質の解剖

みなさんが中学校、高等学校でお習いになったように、物質を細かく分けていくと、その物質特有の分子というものに到達します。それ以上分けてしまうと、その物質特有の性質はなくなってしまう、

ということを知ったことでしよう。ですから「物質の構成要素は分子である」、そういう命題がある正確さの範囲内で成り立つわけです。ところがもう少しほじくりたい人がいて、では分子はなんでできているかという問いかけをすると、今度は分子をこわして、こわれた破片がなんであるかをみるわけです。分子をこわすためにはいろいろな方法がありますが、一番簡単に考えられる方法としては温度を上げてやる。たとえばアンモニア水というのは、温度を上げてやるとアンモニアと水に分解します。分子を原子に分けよ、という場合はこれよりも少したいへんですが、温度を上げてやるのが一つの方法であることは確かです。こうして分子を分けていくと、「分子を構成している要素は原子である」とわかります。これも中学で習ったことでしよう。

ここで準備段階として、みなさんご存じだと思いますが、物質の温度を上げるといふことは、それを構成している粒子の平均の運動エネルギーを高くしていくことだということを頭において下さい。つまり温度を上げていくと、その中の物質粒子がだんだんと激しい運動を始めるということです。ではいったいどのくらいの温度が、どのくらいの運動エネルギーに対応しているのだろうか？

エネルギーの単位で、一エレクトロン・ボルトという単位があります。電子すなわちエレクトロンの(e)と電圧の単位のボルトの(V)をかけて、(eV)と書きます。これは電子を一ボルトの電位差があるところにおくと、電子はマイナスの電気をもっているから、プラスの電極のほうへ引っ張られていく。ある程度運動エネルギーがふえるわけですが、ちょうどそのふえる分がエネルギーの単位として一エレクトロン・ボルトです。それでは物質粒子がそれぞれ平均に一エレクトロン・ボルトのエネルギーをもっていたとしたら、その物質の温度はどのくらいになるかという約一万度です。

さて今度は、さらに一歩立ち入って、「原子はいったい何からできているのか」。これも最近では高等学校で教えているようですが、原子をこわすには原子同士を激しく衝突させます。たとえばガスを非常に高い温度にもっていくと原子の電離という現象が起きます。それは原子の外側にくっついていた電子がはがれていくわけです。その外側の電子を全部はがしてしまおうと、あとに芯が残る。その芯というのが原子核です。原子核というのは、一つのかたまりであるから、それはそのままにしておいて、「原子を構成している要素は原子核と電子である」といつてもさしつかえないと思います。物理屋に限らず先へ先へと進みたい人はどこにでもいるもので、それでは原子核というのはいったい何からできているのかという問いかけをします。原子核は何からできているかというのを調べようと思ったら、やはりそれを互いにぶつかり合わせてこわしてみるのが一番早いわけです。

しかしこの段階になると、ちょっとくらそつとあたためたくらいでは原子核はこわれてくれません。たとえば原子核をこわすくらいの温度というのと、だいたい一〇〇億度くらいまで上げないとこわれてくれない。そんな温度は実現不可能であるから、もう少し利口な方法を考えるわけですが、その方法についてはもう少しあとで話をするにします。原子核をなんらかの方法でお互いにぶつければいいと、今度は陽子と中性子というものにこわれることがわかる。陽子というのは水素の原子核です。「原子核はそれを構成している要素としては、陽子と中性子を考えればよろしい」。こういうふうに次から次へと分解して構成要素にリデュースしていくことによって、物理学は問題を非常に簡単なものに焼きなおしてきました。

たとえば私が戦後間もなく大学を出るころには、私は化学にいかうか、物理にいかうかと迷ったの

ですが、化学にいくと九二種類の元素を扱わなきゃならない、組合せを考えただけでも頭が痛くなる。そのころわかっていた物理の本の素粒子というのは、陽子と中性子と電子とそのほかにあと一、二種類でした。これならなんとかやれるのじゃないかと思って物理にきたわけです。それからしばらく経ってみると、それがたいへんな間違いであつたということがわかつたのですが、これは後のまつり。

そのころの素粒子としては、陽子、中性子、湯川先生の予見したパイ中間子のそれぞれプラス、ゼロ、マイナスの電氣をもっているもの、それからガンマー線、陰陽電子、正負ミュー中間子(近ごろはミューオンという名前が使われる)と電氣的に中性なニュートリノ(これは当時仮設的なものだった)が後に実験で二種類あることがわかつた)、このぐらいしかなかった。さらにそれぞれに対して反粒子というものが考えられ、陽子に対して反陽子、中性子に対して反中性子、パイ中間子はそれ自身で反粒子になる。つまりパイプラスの反粒子はパイマイナス、パイゼロの反粒子はパイゼロ、ガンマーの反粒子はガンマーそのもの。これらの粒子とそれぞれの反粒子というのが全部で、これだけうまく説明できれば物理の研究はおしまいだと思っていました。

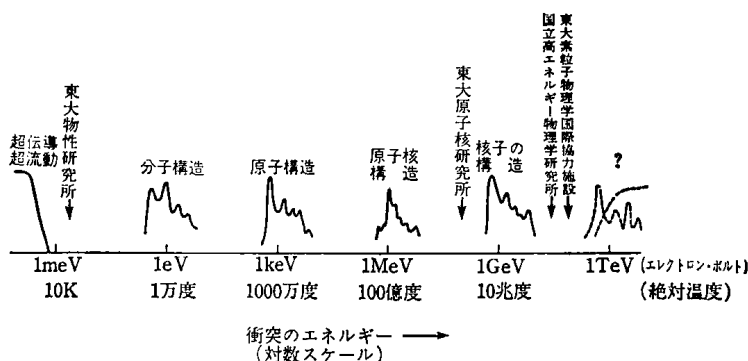
●物質構造の階層

今世紀の初めころ——量子力学がこれからできようといふころ——いろいろな発見がありました、その中の一つは水素のパルマー系列——水素原子が出す光は特定の波長が規則正しく出てくる——の発見があります。これはのちに量子力学といふものをつくり上げるうえに非常に基本的な材料になつ

た実験結果ですが、だいたい数百エレクトロン・ボルトから、一キロ・エレクトロン・ボルト——つまり一〇〇〇エレクトロン・ボルト——くらいのエネルギーの粒子を原子にぶつけると、その原子に特有の波長の光が出てきます。それを調べることによって、原子の構造がわかったわけです。さらに、エネルギーのスケールを千倍に上げてみる。つまり一キロ・エレクトロン・ボルトの代りに一ミリオン・エレクトロン・ボルト——つまり一〇〇万電子ボルトで、温度が一〇〇億度に相当する——のエネルギー領域での衝突を見てみると、そこでは原子核に特有の波長のガンマ線(電磁波)が出てきます。そのエネルギー領域でものを見ると、原子核に特有の構造というのが見えてくるわけです。

一方、一キロ・エレクトロン・ボルトから、今度は逆に三桁下げて千分の一にして、一エレクトロン・ボルトぐらいの衝突エネルギーのところへいくと、今度は分子の構造を反映した光が見えてきます。ですからおさっぱな言い方ですが、エネルギーを変えていくと約千倍ごとに、それぞれ違った階層の構造が見えてくる、こういうことがいえそうに思えます。

それならさっきの一ミリオン・エレクトロン・ボルトをさらに千倍エネルギーを上げてみたらどうか。そうすると今度はいままで素粒子だと思っていた陽子、中性子、パイ中間子、そういったものの内部構造が見えてきます。そうすると衝突エネルギーの三桁ごとに新しい階層の構造が見えてきたということが、すでに四回あったことになるわけです。分子構造の段階、原子構造の段階、原子核の構造の段階、素粒子の構造の段階で同じようなことが四回起きたわけです。いわば柳の下にどじょうが四匹いたわけです。五匹目があるかどうかですが、たとえばもう千倍エネルギーを上げたらいったい何が見えるか、あるいはもう千倍エネルギーを下げたら、どういうものが見えるのか、という疑問が



第1図 物質構造の階層的あらわれ

当然起きてくるでしょう。

一つの例として一エレクトロン・ボルトをもう千分の一エネルギーを下げて、一ミリ・エレクトロン・ボルトの領域を眺めてみたら、いったいどういふことが見えるかを取りあげて見ましょう。これは温度でいうと絶対零度に非常に近くなって、絶対零度で数度というところになりますが、その温度以下、つまりそれより下の領域では、いまままでみたいはそのもの特有の光が出てくるというようなことは起こらなくて、超伝導とか、超流動とか、そういう非常に奇妙なことが起きてくる。それはさっきいった、別の階層の構造が見えてきたということにはあたるわけですが、今度はある特有のエネルギー（ある特定の温度）だけに現象が現われるのではなくて、ある温度以下ではずっと超伝導（あるいは超流動）の状態でありつづけるというところが違います。ですから必ずしも柳の下にいつも同じ種類のどじょうがいるとは限らないわけです。では、もう一度、エネルギーの高いほうにもどって素粒子の構造が見えた一〇兆エレクトロン・ボルトよりもさらに千倍エネルギーを上げたら、いったい今度はなんの構造が見えるのか、これはやはり答を知りたい質問ですが、いまの物理学者のそれに対す

る答は「やってみなければわかりません」いうより仕様がなないわけです。

第1図を見て下さい。

これら第1図の一つ一つの構造に対応してやることはたくさんあり、たとえば東京大学の中でもこういうところ(原子、分子構造や超伝導現象)を研究するために物性研究所というのがあります。このへんのこと(原子核構造)を研究するのに原子核研究所ができています。このへんのもう少し上のところ(核子の構造)をやるには国立高エネルギー物理学研究所が筑波にできています。私の所属している素粒子物理学国際協力施設もこのへんのところ(核子の構造)を研究する目的でできているわけです。

●素粒子の流れをつくる

話を「流れ」にもっていきましょう。

構造を調べるのには粒子同士を衝突させればよい、そしてこわしてみればよい、という。だけれども先ほど言ったように、エネルギーと温度の換算率がものすごく悪くて、一エレクトロン・ボルトが一万度というのでは、ちよつとエネルギーを上げようと思つたら、たいへんな温度を実現しなければならぬ。たとえば理想的なエネルギー源といまいわれている夢の核融合炉が実現したとしても、そこでの温度は一億度ぐらいです。これは粒子の平均エネルギーになおせば、たかだか一万エレクトロン・ボルトぐらいです。

たとえばわれわれ物理学で現在想像し得る一番温度の高い状態は超新星の爆発です。超新星が爆発したときその芯になっているところはたいへんな高温になるはずで、それでもたかだか一〇〇〇億

度程度でしょう。エネルギーにして一〇〇〇万エレクトロン・ボルトぐらいしかありません。

そうすると、われわれが粒子同士を衝突させて、こわしてみようとするためには、もう少し上手なことを考えなければならぬ。つまりもう少しコントロールされた粒子の流れをつくってやることです。

●静電加速器

そこで考案されてきたのが、いろいろな型の粒子加速器です。一番簡単なのは、電気をもっている粒子だったら、さっきのように何万ボルトという電位差をかけてやる。たとえばマイナスの電気だったらプラスのほうに引かれていくし、プラスの電気だったらマイナスのほうに引かれていく、そして加速ができるわけです。

たとえば家庭のテレビは、蛍光面を電子銃で加速した電子ビームでたたいて、それで光を出しているわけですが、その電子のもっているエネルギーは約一〇キロ・エレクトロン・ボルトです。このぐらゐのエネルギーにするのはわけなゐことです。一億度の温度をつくるのはたいへんですが、この温度に相当するエネルギーをもった粒子の流れをつくることは簡単です。

さらに電子銃を大型にすると、一〇〇〇万エレクトロン・ボルトぐらゐまでいくことができます。ところがある程度以上電圧を上げると、電極から自然に放電を起こして、電圧を保持していくことができなくなるから、もう少し利口に考えなければなりません。

●線型加速器

そこで、一カ所だけで加速するのではなく、電子銃の筒(パイプ)をどんどん伸ばして、何カ所にも電圧をかけて、つまり順々に何回にも分けて電子を加速してやる。こういうタイプの線型加速器といわれるものがあります。この種類で世界で一番大きいのは、アメリカのスタンフォード大学にある長さが三キロ・メートル余りの線型加速器です。

真空のパイプの中を電子がずっと走って、ある特定の場所へいくごとに電場がかけられて加速されていくわけです。これだと二〇〇億エレクトロン・ボルト(20 GeV)の電子の流れが得られます。アメリカではこのパイプの長さをさらに長くして、三〇キロぐらいのものをつくろう、というような計画があるようです。

しかし長さを長くするというのは限度があります。

●シンクロトロン

それで今度は、ある粒子をまわく回してやって、一定のところにくるごとにボン、ボンと、肩をたたくように加速してやる。そうするとはじめはゆっくりだけれども、だんだん粒子が速くなる、こういうタイプの加速器ですと、一回ごとに与えるエネルギーとその間に失われるエネルギーがつり合うところまでは加速できる。こういうタイプをシンクロトロンといいます。シンクロトロンの仲間で世界で一番大きいのはやはりアメリカにあって、これは陽子つまり水素の原子核を五〇〇〇億エレクト

ロン・ポルト(500 GeV)まで加速します。

それではいったい加速器というのは、どこまでエネルギーを大きく伸ばしていくことができるかということを考えてみると、地球上で考えられる一番大きなエネルギーの加速器というのは、地球の赤道のまわりに電磁石をずっと並べて、粒子を赤道の回りに回してやる。それで所々に加速空洞を置いて加速してやる。それをやっても到達できるエネルギーというのは通常の電磁石を使う限り一京エレクトロン・ポルト(京は兆の一万倍ぐらいが限度です)。

●ビーム・ビーム衝突

そこで物理屋はいろいろ知恵をめぐらします。今までお話ししてきた加速器というのは、ある種の粒子を勢いよく加速して、それを取り出してきて止まっている粒子にバシッとぶつつける。そういうふうにして使っているわけです。それならば、止まっているものにバシッとぶつつけるというのはなくて、こっちも加速し、こちらも加速し、それで互いに正面衝突をやらせれば、もっと激しい衝突が起きるじゃないか、こういうことで考え出されたのが、ビーム・ビーム衝突装置です。現在世界最大のものは、通常加速器の一〇〇兆エレクトロン・ポルトに相当するくらいの衝突を実現できます。

さっき回してやればいいじゃないかといいましたが、水だって回すためには、土手をつくってやらなければなりません。そこで土手に相当するもの、加速粒子の流れを曲げてやるもの、そういうものをなんでやるかというと電磁石を使います。電磁石の磁極の間に荷電粒子を通すと、プラスならばこちらへ、マイナスならばあちらへというふうにそれぞれ特有の方向に曲がる。しかし、ただ回してい