

極低温の世界

1982年5月15日(土) 午後2時~4時

仁科記念講演会

名古屋大学工学部4号館3階講義室において

東京大学物性研究所長 中 嶋 貞 雄

中嶋でございます。ただいま久保先生から御説明ありましたような由緒のある仁科財団の御指名を賜り、また碓井先生から御紹介がありましたように、十年余り奉職いたしましたこの名古屋大学で、皆さんにお話する機会を与えられ、大変光栄に存じております次第でございます。ただいま御紹介がありましたような極低温の研究につきましては、この名古屋大学でも理論では碓井先生、実験では益田先生、お二人の先生の御指導で立派な実験および理論的研究が行われております。そういう所へ私がわざわざ東京から出向いてお話し上げることもないのではあるまいかと初めは思ったのでございますけれども、人が変われば物の見方も考え方も多少は違うということもございましょう、そう考えてお引き上げすることにした次第でございます。

極低温の研究というのは非常に基礎的な研究でございます、例えば早川先生のやっぴらっしゃる宇宙の研究とも関係しているわけでございます。極低温の装置をロケットに積んで飛ばすというような技術的なことばかりではなく、遠いカニ星雲の中心にあるパルサーの中で中性子の流体が超流動状態にあるらしいというような基本的な話もあるわけでございまして、色々と基礎物理全体に関係があるところでございます。ただ、今日は時間の制約もございまして、他のフィールドとの関係についてはお話する時間がおそらくないと思います。

超伝導と超流動

私が名古屋大学に在任当時所属しておりましたのはS研であります。S研のSは超伝導を意味するドイツ語の Supraleitung, あるいは英語の Superconductivity の頭文字であります。S研の創設者有山兼孝先生は英語よりもドイツ語を得意としていらっしゃいましたので多分S研のSはドイツ語の方からおとりになったのではないかと思います。さてこの超伝導という言葉は最近新聞

の記事にも、超伝導磁石とかジョセフソン・コンピューターといった言葉と関連してかなり頻繁に取り上げられていますので御存知の方も多いのではないかと思えます。一言で申しますと、金属の電気抵抗が極低温度でゼロになってしまうという現象であります。

ところで最近のS研の中心的なテーマは、超流動でございます。これも英語では Superfluidity ですから、やはり頭文字はSなので看板を塗りかえる必要はありません。この超流動の方は、液体ヘリウムという液体の粘性抵抗がゼロになってしまう現象で、超伝導に非常に良く似た現象です。例えば注射器の針から空気を押し出そうといたしますと外から強い圧力をかけておしてやらないと空気といえども細い穴を通過することができないのであります。これは空気が粘性をもっているためですが、液体ヘリウムの場合にはそういう粘性抵抗なしに、水や空気の通れないような非常に細い隙間をするすると通り抜けてしまいます、これが超流動現象でございます。

超伝導にしろ超流動にしろ非常に不思議な現象で、日常体験しております普通の温度では観測することができないものです。室温に比べまして約二桁低い低温に物質を冷やしてやりますと初めてこういう現象が観測されるのでございます。

今日のお話はそういう極低温はどうして作り出せるのか、また極低温に物質を冷してやるとどうして超伝導や超流動という不思議な現象がおこるのかという筋のお話にしようと思えます。

低温の対数表示

まずその前に念のため温度の表わし方について説明しておくことにします。これから先のお話の中では温度は全て絶対温度で表わすことにします。絶対温度の実用単位はケルヴィンと呼ばれておりまして、大文字のKで表わすことになっています。普通のセツ氏目盛りとの間には、 0°C が 273.15 K に等しいという関係がございます。273.15 だけずらしてやりますと、絶対温度の目盛りになる訳です。以下の話は余りこまかい温度の数字に注意する必要はなくて、例えばこの 273.15 という数字をごらんになったら、これは三桁であると、せいぜい桁数に注意して下されば結構です。あるいは室温を基準にして考えるときには、これをゼロ桁と考えていただいた方がわかりやすいかも知れません。大気

圧のもとでのいろいろな気体が液体になる温度、 あるいは液体が気体になる温度を表にしてみます	大気圧のもとでの沸とう点		
と、例えば水はもちろん 100°C ですから 373 K で	水	373 K	0 桁
す。この桁数をゼロにとりますと、酸素が気体か	O ₂	90 K	-1 //
ら液体になる温度は 90 K でマイナス 1 桁、ヘリ	N ₂	77 K	-1 //
	He	4 K	-2 //

表 1

ウムが 4 K でマイナス 2 桁であります。このように表わしますと割合感じも出ますし、覚えるにも便利であります。

ところでここに挙げましたような低い温度はいつごろ我々の力で実験室の中で作ることができるようになったかと申しますと、19 世紀後半であります。この頃気体を液化しようという競争が一部の科学者の間でおこりまして、色々な努力がされました。家庭の電気冷蔵庫に使いますフレオンのようなガスですと、ただコンプレッサーで圧縮すれば簡単に液体になりますけれども、空気とか水素またヘリウムなどは、普通の温度でいくら圧縮しても液化という現象を示しません。そういうわけで、昔はこういう気体のことを永久気体と呼んでいました。しかしその後の研究によりまして永久気体も充分低温に冷やしてやれば液体になるはずだ、ということがわかってきました。その結果、気体液化競争は、低温生成の競争に変わっていくことになりました。その競争の結果、低い温度が魔法びんの中に作られるようになったわけです。

その最初の成果は空気液化の成功でありまして、1895 年でした。これが低温工学の誕生であると考えられています。どうしてかといいますと、酸素と窒素の液化する温度に約 13 度の差があります。そのために、空気を一度液体にしておきまして、それから蒸発させるということをしなすと窒素と酸素とが別々の温度で蒸発してくれる。つまり空気を窒素と酸素に分けることができるわけです。こういう方法によりまして、工業の必要とする純粋な酸素が大量に補給できるようになった訳です。低温工学誕生と考えるゆえんであります。

カマリング・オネスの業績

それに対しましていわゆる物理学としての低温物理は、永久気体のうち最も液化しにくかったヘリウムを液化できた日が誕生日と考えられます。それは 1908 年の 7 月 10 日でありまして、これに成功いたしましたのはオランダの実験物理学者カマリング・オネスでした。この日を低温物理の誕生日とするのはなぜか

といいますと、ひとつにはヘリウムで気体液化競争は終点だったことと、オネス自身がヘリウム液化に成功して間もなく超伝導現象を発見したことによるわけです。彼は液体ヘリウムを魔法びんの中に溜めましてそれに色々な金属を浸して電気抵抗の温度変化を測りました。例えば金のような電気抵抗は図1に書

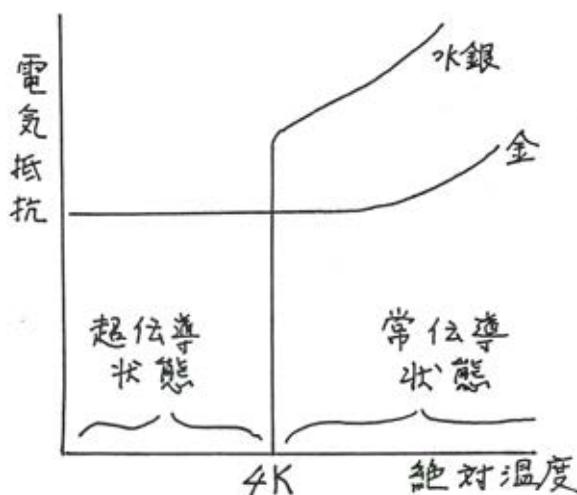


図1

きましたように、温度を下げてゆきますと低温ではある一定の値に近づいてゆきます。この一定の値は残留抵抗と言いまして、金属の試料の純度があがるほど小さな値になることが知られています。これに対し水銀の電気抵抗を測ってみましたところちょうど4Kの辺

のところでずとんとゼロになってしまいました。4K以下の温度では電気抵抗がゼロになるわけです。オネスはオームの法則に従う普通の伝導と違った何か新しい状態が出現したと考えまして水銀の4K以下の状態を超伝導状態と名付けました。何故これが低温物理の誕生といわれるほどの重大な事件かということについてはあとでお話することにいたしまして、さしあたってオネスのやった実験の簡単な紹介をいたします。

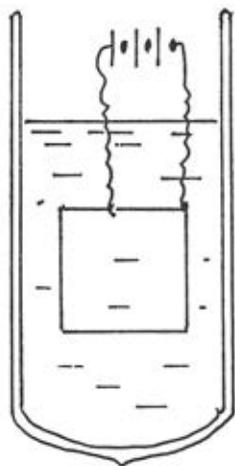


図2

第1のものは永久電流の実験です。図2の四角のループは鉛でできていまして、これに並列に入れたワイヤーを通して外部の電池から電流を流しておきます。そうしてこの魔法びんの中に液体ヘリウムを注ぎこんでやりますと、鉛は超伝導状態になるわけです。ここで外部の電池を取り外しますと、普通の導体であればたちまちここを流れていた電流はゼロになってしま

まして蓄えられていた電気的エネルギーは熱になって

しまうわけですが、超伝導のワイヤーの場合には電流がいつまでも流れ続けるので、それが永久電流と呼ばれます。永久電流と申しましても電流には違いありませんから当然そのまわりには磁場ができるわけです。つまり超伝導で作りましたループが磁石の働きをするという訳でございます。実際に使われます超伝導磁石のメカニズムはこれよりももう少し複雑なものでありますが、その説明は専門的になりすぎますので省略いたします。この永久電流を使って磁石の働きをさせることにいたしますとまず熱の発生がない訳です。外から電池や発電機をつないだりする必要がなく、電力の消費ということがありません。磁石としては大変便利だということになります。その特徴が最も良く現われますのはたとえば核融合への応用です。名大のプラズマ研究所でも行われているのですが、核融合をおこさせるためにプラズマを非常に強い磁場で圧縮してやる、その時に磁石が必要になるわけです。これを普通の電磁石でやろうといたしますと電磁石の食う電力の方が核融合で得られる電力よりも大きいかもしれないということもおこりかねない。その点で超伝導磁石がどうしても必要だということになります。それからさきほど久保先生のお話に出てまいりました筑波の高エネルギー研究所でトリスタン計画という新しい加速器の計画が発足したわけでございますけれども、そこでは超伝導磁石が非常に豊富に使われるはずでございます。現在すでに高エネルギー研究所ではいろんな場所に超伝導磁石を利用しており、液体ヘリウムをたくさん使っているわけであります。もうひとつ、国鉄が時速 500 km で東京と大阪の間で超高速列車を走らせようという計画があります。これが実現するかどうか、あるいは国鉄の赤字と関係あるか、そういうことは私にはわかりませんが、技術的にはすでに問題が解決されているようでございます。時速 500 km というような超高速になりますと普通のレールの上を車輪が転がるという方式は使えなくなります。それで列車の上に超伝導磁石を積み、地上のレールの代わりにコイルを置きまして超伝導磁石がコイルの上をつっ走るようにしますと、コイルに電流が流れていて作る磁場を超伝導磁石が反発し、列車が浮き上がります。

最近では超伝導磁石が生物にどう影響を及ぼすかという研究もなされているようであります。経済的な問題はともあれ技術的問題は解決済みのように思われます。

以上が応用の話であります。ここで少し理屈っぽい話に戻ることにいたし

まして、さきほどの、ヘリウムの液化がなぜそんなに大事な意味をもっていたかということの話をしたいと思います。

19世紀の後半に色々の科学者が低温作りに夢中になっていた時代、当時の学界の主流派がそういう動きをどう見ていたか？ 当時一般には低温作りの競争というのは、まあエヴェレストの登山みたいなものであって全然意味がないとはいえないけれども科学的にどれほどの意義があるか疑問であるという見方がどうも支配的であつたらしい。それにはちゃんとした根拠がありました。当時物理学の基本的な法則というのはニュートンの力学とマクスウェルの電磁気学との上に建てられたいわゆる古典物理学であります。この古典物理学の立場から見ますと、低温作りに意味があるとは思えなかった。もう少し詳しく申しますと、物質のもつ熱は物質の中にあります沢山のマイクロな粒子、原子とか分子とか電子というマイクロな粒子の運動であります。仮にマイクロな粒子がニュートンの法則にしたがって運動しているといたしますと、物質の絶対温度は粒子のもっている運動エネルギーに比例している、あるいは簡単に運動エネルギーそのものだと思っていただいてよいのですが、さきほどのケルヴィンという単位は運動エネルギーそのもののようには定義されておきませんので、一般的には運動エネルギーに比例する、ということであります。したがって絶対零度では、粒子の運動エネルギーゼロ、つまり粒子がとまってしまっているわけです。どういう位置に止まってしまうかといいますと、粒子はお互い同士に力を及ぼしあっていますし、場合によっては重力など外からの力も考えなければいけないかもしれませんが、そういう粒子がいろんな力を受けている、するとこの力によるポテンシャルエネルギーが最も低い所に止まってしまう。それが絶対零度の状態ということになります。少し温度を上げてもこの事情は本質的には変わらない訳で粒子はつり合いの位置のまわりで小さな振動をしているだけだということになります。それを言い換えますと、結局どんな物質ももしマイクロな粒子がニュートン力学にしたがっているとすれば全てじゅうぶん低温にもってゆけば固体になる筈である、という結論が出て来るわけです。そんな結論ならば何も極低温に冷やさなくても普通の温度の経験からじゅうぶんわかっているではないか、という反論が出て来るかもしれないわけですがオネスはそうは考えなかったわけです。オネスが特別関心を持ちましたのはそういう結論が金属の中の自由電子にもあてはまるだろうかということでした。それでヘリウムの液化

に成功いたしますと金属を液体ヘリウムに浸して電気抵抗の温度変化を測るといふことをはじめたわけです。

金属というのは、金属の中を比較的自由に動き回る電子と、電子をはぎとられてプラスの電荷をもった陽イオンでできています。陽イオンは、きまった位置に並んで空間的な格子を作っています。格子を作っている陽イオンの間を電子が走っているという描像が成り立ちます。したがって金属の中の電子は一種の流体を作っていると言っているわけですね。この電子の流体にニュートン力学があてはまるとすると、じゅうぶん低温に冷やしてやると電子流体も凍ってしまって電気を伝える能力を金属は失ってしまうのではないかと思われるわけです。ところが実験の結果オネスは超伝導を発見してしまったわけで、ということは低温では電子がとまってしまふどころか普通の温度よりもはるかに動きやすくなって抵抗なしにどんどん流れてしまうということでございます。

オネスのノーベル賞受賞の講演など読んでみますと、彼は非常にはっきりと、超伝導の本当の説明というのは量子論によって与えられるに違いないと断言しています。ところがこの超伝導の量子論というのは大変難しい問題でございます。それが本当に確立されたのは約半世紀近くも後の1957年であります。バーディーン、クーパー、シュリーファーという三人の理論家によってこの量子論は確立されましたので、普通BCS理論と呼ばれています。そのように解決には長い時間が必要だったわけですがけれども、オネスの見通しの正しかったことが示されたわけです。

量子論とゼロ点運動

超伝導の量子論の説明の前に量子論について少しお話いたします。現在ではミクロな粒子の運動はニュートン力学ではなく、量子力学に従うということを知っている訳でございます。これはミクロな粒子が、実は粒子と波動の二重性をもっている、したがって、仮に電子を粒子と見なしても良いのですがこの電子が粒子であるという時の粒子は古典物理で考えていたような粒子の性質を全部持っている訳ではなく、おのずからそこには波動性を反映した粒子像への制限があります。その制限が有名な不確定性原理というものでありまして、粒子の位置あるいは運動量というものには一般にははっきりきまった値をもたないものである程度ゆらぎをもっている。そのゆらぎの大きさを Δx , Δp と書いておき

ますと、両者の積が、プランク定数 h よりも小さくならない

$$\Delta x \cdot \Delta p > h$$

という不確定性原理が成り立つわけであります。この原理は量子力学の基本的な原理でありますがこれからただちに出てくるのが、物質を仮に絶対零度まで冷やすことができたとしても、その物質の中の粒子がどこかに止ってしまうということはありませんということであります。止ってしまったとしますと、位置がはっきりきまってしまうし、運動量もはっきりゼロという値をもつわけですから不確定性原理に矛盾するわけです。という訳で量子力学では絶対零度でも物質中の粒子は運動しているという結論が出てくるわけです。これがいわゆるゼロ点運動であります。そういうゼロ点運動が存在するということが非常にわかりやすいといえますか、はっきりした証拠がこの液体ヘリウムであります。

物質の温度と圧力を色々を変えまして、物質が気体であるか液体であるか固体であるかという領域を区別してみますとよく教科書に書いてありますように図3-a のようになっております。普通の物質を温度を下げていくと低い温度ではどんな物質でも固体になってしまうわけでありまして、こういう図を見ている限りはさきほどのニュートン力学の結論と矛盾はないわけです。が、ヘリウムの同じような図を調べてみますと、図3-b のようになっております。低圧

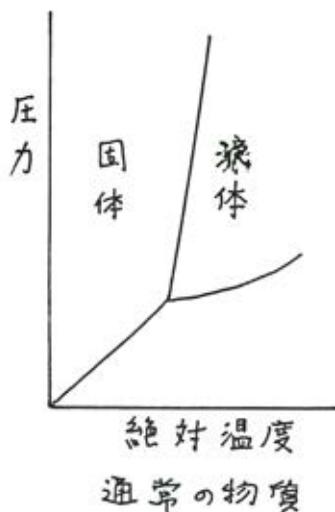


図 3-a

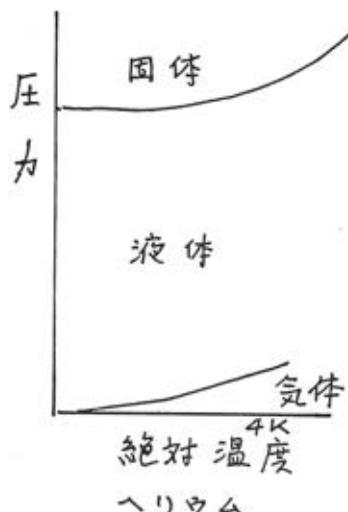


図 3-b

で液体ヘリウムを冷やしてやっても固体にはならないわけです。固体ヘリウムを作ろうといたしますと、かなり大きな圧力をかけてやらなくてはならない。この絶対零度まで液体のままにいる凍ることのない物質が存在するという事はニュートンの力学を仮定したのでは絶対に説明できないわけで、これがゼロ点運動の存在のいちばんはっきりした証拠になるわけです。

少し式をいじくってみると、仮に原子が固体を作って固体の中で振動しているとします。振動の振幅を Δx とすると、原子の位置はおおよそ Δx 位の幅の中に収まっているわけですから、不確定性原理の位置のゆらぎにこの Δx をとることができて、ただちに運動量のゆらぎが

$$\Delta p \sim h / \Delta x$$

と与えられます。原子の質量を m とすれば原子の速度のゆらぎが

$$\Delta v \sim \frac{1}{m} \frac{h}{\Delta x}$$

となりますから、運動エネルギーは

$$\frac{1}{2} m (\Delta v)^2 \sim \frac{h^2}{2m} \frac{1}{(\Delta x)^2}$$

程度のゆらぎで与えられます。そのほかに原子を束縛する力のポテンシャルエネルギーがあって、これをばねとして考えれば、ばね定数を f と書いて

$$\frac{1}{2} f (\Delta x)^2$$

となります。原子のエネルギーは両者の和で図4のようになり、全エネルギー

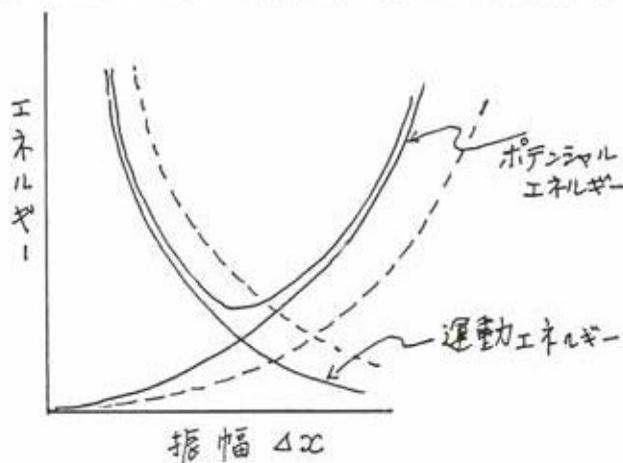


図 4

が最も小さい所がゼロ点振動の振幅になるわけです。そこで原子間引力が弱くなり、原子の質量が軽くなるといたしますと、図の点線のように最小の位置は右にずれ、ゼロ点振動の振幅は大きくなります。ヘリウムというのは原子の質量が非常に小さく、原子間の引力が非常に弱い物質であります。引力が弱いからこそヘリウムというのは非常に低い温度まで気体でいる訳です。こういう物質ですと絶対零度でもゼロ点振動のために固体は融けてしまう。普通の固体が融けますのは温度が上ってきて熱振動の振幅が大きくなるせいですが、ヘリウムの場合にはゼロ点振動が激しいために絶対零度でも融けてしまう。そうやってできました流体のことを普通量子流体と呼び、量子力学的効果のために流体でいるという意味を含ませます。それからまた、量子流体にならないような普通の固体でも、実はゼロ点振動の効果というものはあるわけでした、固体の中で振動している原子の振動するエネルギーを計算してやりますと、それが温度によって図5のように変化します。もし古典理論を仮定したといたします

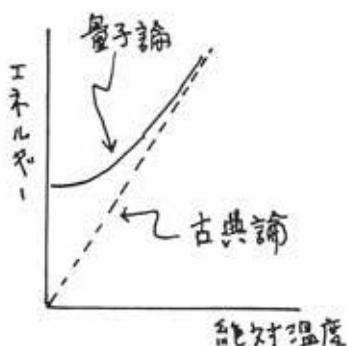


図5

と、点線でかいた直線になるわけです。つまり絶対温度に比例したエネルギーを持ちます。この点線の勾配が固体の比熱を表わすのです。つまり固体の温度を変えるためにどの位外からエネルギーを加えなければならないかということを表わします。この古典理論からはどんな温度の所でも比熱は一定の値をもつということになります。ところが量子論によりますと実線のようにある所で線が横に寝てしま

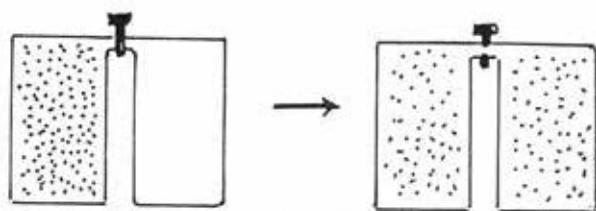
いまして有限な値で絶対零度になる。この高さがゼロ点振動のエネルギーの大きさを表わしています。ここで曲線が寝てしまいますから、比熱は温度が下がるとゼロに近づく、というのが量子論からの結論になるわけです。実際実験をすると固体の比熱は極低温で小さくなってゼロに近づきます。

このような実験を説明するために、固体の原子の振動に初めて量子論を適用したのがアインシュタインでありまして、それがたしか1907年ぐらいであります。ほぼ液体ヘリウムを作るのに成功したのと同じ頃であります。

エントロピー

このように量子論にしたがいいますと絶対零度でも物質の粒子が振動している。つまりゼロ点振動が存在しているということになります。そうしますと絶対零度での振動と普通の温度でおこっている熱振動の間には何か違いがあるだろうか、ということが問題になってきます。その違いを表わすのが熱力学に出て来るエントロピー S という量であります。このエントロピーの意味は、物質の中の粒子の運動の秩序あるいは無秩序の度合でありまして、無秩序だとエントロピーの値が大きいということが出来ます。

太陽の周りの惑星の運動とかあるいは人工衛星の運動といったようなものは単純な力学の法則が成り立ちまして、その運動を非常に精密に予言することができるわけであります。が、マクロな物質の中にあります非常に多くのミクロな粒子の運動というのはどうしても何らかの無秩序さを持っております。したがって確率論の対象になるわけでありましてこれが統計力学という学問で扱われるわけでありましてその無秩序さを表わす量がエントロピーということになります。たとえばエントロピーの非常に大きな物質というのは気体でありまして、気体の中の粒子はでたらめに箱の中を飛び回っておりますからその位置がどこにあるかということとはわからない、つまりでたらめに分布しているわけであります。図6のようにコックを開けて片方の箱の中にだけ気体があるよう



$$\Delta S = \log 2$$

図 6

にしていた状態から、コックを開いて両方の容器にまたがって気体が存在できるようにした状態と、もし温度が同じであるといえますと、右側の場合の方が粒子の存在できる空間が2倍にふくらんでおりますので、それだけわからなさが増えてしまいエントロピーが増えるわけであります。普通エントロピーを

測る場合、2倍の2そのものではなくてその対数を取りまして、 $\log 2$ だけ右側の図の方がエントロピーが大きい、という言い方をするわけでございます。もう少し正確には $\log 2$ の前に定数がつくのですが、その話はここでは省略いたします。それからまた、物体が非常にゆっくり熱量を吸収した場合には、吸収した熱量はその時におこったエントロピーの変化に物体の絶対温度をかけたものに等しいという法則が成り立っております。

$$\text{物体の吸収する熱量} = T \times \Delta S$$

ですからエントロピーというのは熱と非常に密接に関係しているのであります。

低温作りの原理

このことを考慮に入れますと一般の低温を作るための原理、つまりどのようにして低温を作ったらよいかという理屈がわかってくることとなります。ちょっと考えますと、物を冷やすのだったら何か冷たいものと接触させればいいのではないかといわれるかも知れませんが、ここで問題にしておりますのはそういう冷たいものがないときにどうやって冷い温度を作るか、その一般的な方法を考えているわけです。それに対する答えは、エントロピーを探せ、ということとなります。つまり、ミクロな無秩序の度合いの大きい運動を探せということとなります。

その一番手近かな物体というのは、さきほどの気体でありまして、気体の原子なり分子なりの運動というのは非常にランダムな運動でありますから大きなエントロピーを持っているわけでありまして、さきほど申しましたように体積を縮めてやりますとエントロピーは多少へるわけでありまして、図7は気体のエ

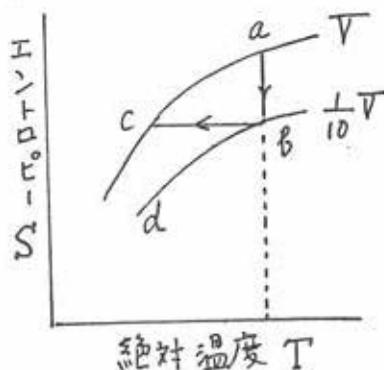


図7

ントロピーを温度の関数としてグラフに表わしたもので、曲線 ac は体積 V のときのエントロピーと温度の関係を表わしています。次に体積を十分の一に縮めたときには曲線 bd のようになり、体積 V のときより、エントロピーが低いわけです。室温が a にあったとします。そのとき a という状態から出発、温度を一定に保ったまま気体をコンプレッサーか何かで縮

めてもという状態になったとしますとエントロピーが減るわけです。エントロピーが減るということはさきほど申しましたように、熱を外部に放出してやらないてはならないわけですから、この過程では例えば水か空気を用いた大きな熱源に接触させて気体から熱を奪ってやる必要がある。次に、外部との熱の出し入れが無い位に速く気体の体積を元に戻してやる。つまり*b*から*c*の状態に移る。そうしますと、熱の出し入れが無いということはさきほど申しましたようにエントロピーの変化がないということですから、エントロピーが一定のまま体積が元に戻るわけで、結局温度がはじめに比べて下がるということになります。つまり熱の出し入れがない、断熱膨張させますと気体は冷えるわけです。この方法は気体を冷やす方法としては非常に有力な方法でありまして、現在ではヘリウムを液化させる装置はみなこの断熱膨張を利用して冷やしているわけです。

この膨張エンジン付きのヘリウムの液化機というものを最初に発明したと申しますか作り出したのが、ソ連の実験物理学者のカピッツァでありまして、1932年でした。このころカピッツァは英国におりましてケンブリッジでこの液化機を作ったわけです。この場合のポイントと申しますのはこのように非常に低い温度でエンジンを作動させるわけでありまして、普通の自動車のエンジン・オイルみたいなのを使ったのでは全部凍ってしまって役に立たないわけです。潤滑装置をどうするかということが一番のポイントだったわけですが、カピッツァは大変うまいアイデアでこの問題を解決しました。エンジンのピストンとシリンダーの間にほんの少し隙間を残しておく、そうするとそこにヘリウムの気体が入りこみましてピストンが往復運動を初めるとその気体が乱流状態になる、乱流状態になった気体が自ずからクッションの役割りをいたしまして潤滑の問題を解決してしまうというわけでありまして。

極限物性という考え

脱線いたしますけれども、この液化機のことを書きましたカピッツァの論文の中に、最近非常に流行っております極限物性という思想が実ははっきり書かれている。極限物性とはどういうことかと申しますと、物質を極低温とかあるいは非常に強い磁場とか、そういう普通にはなかなか実現できないような極端な条件の下に物質を置いてその性質を調べる、そういう研究をすることが物性

の研究において今日のひとつの非常に重要な手段である、という思想であります。カビッツアはそのとき、極低温と強磁場とを例にあげて重要性を強調いたしました。それからまたこの論文の中で、さきほどの断熱膨張させるエンジンの二つの可能性を検討しておりまして、いわゆるレシプロ・エンジンとタービン・エンジンと二つが考えられる。もし大量のヘリウムを作りたいならばタービン式の方がずっと有効である、しかしケンブリッジの低温の実験に使うのはそんなに多量のヘリウムではないからここではレシプロ式のエンジンを使った、ということを書いております。

それからまたこれはこの時期よりももう少し経ちまして、カビッツアがスターリンに呼び戻されてソ連に帰ってからの話になりますけれども政府への宣伝というようなことを非常に熱心にやっているわけです。これも現在では非常に重要なことであります。カビッツアは例えば共産党の幹部にもわかるようなデモンストレーションをやりまして、極低温の研究がいかに大事かということを宣伝している。そのデモンストレーション用に作ったのが、カビッツアの蜘蛛とあだ名の付いている実験装置であります。超流動状態にありますヘリウムというものは実は二流体性を示すということをやうまく利用したものであります。液体ヘリウムは二種類の運動をすることができる。ひとつはいわゆる超流動でありましてエントロピーもゼロ、粘性もゼロという種類の運動と、もうひとつはエントロピーもあるし粘性もある常流動の運動と、二つの種類の運動を独立に行うことができるのであります。液体ヘリウムを何かの容れものの中に入れて、片一方の壁を熱くしもう一方を低い温度にしておきますと、高い温度から低い温度に熱が流れるわけですが図8に書きましたように一種の対流で熱が運ばれる。高い温度から低い温度に向って常流動——エントロピーを持って

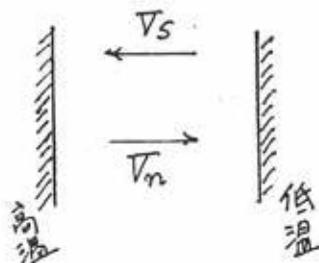


図 8

流れては困るわけで常流動が流れた分だけその質量の流れを打ち消すように、エントロピーがゼロの超流動が逆に流れる。そういうことで質量の流れはないけれども、エントロピーや熱の流れはあるそういう対流が起こるわけでありませう。そこでカビッツアがやりました実験というのは、図9に描いたように、魔法びんを逆さに

すが、ここで代表的な例を二つ挙げることにします。

ひとつは結晶であります。普通の物質は冷やしてやりますと固体になりますし、ゆっくりうまく冷やせば結晶になる可能性が大きいわけです。結晶というのは原子が規則正しく並んだ状態ですから、いわば粒子の位置について秩序立った状態だと言うことができます。それに対して、さきほど出てまいりました量子流体というのは、位置ではなくて、運動量の方の秩序ができた状態だというふうに考えることができます。

一般に量子力学では、いろんな物理量がみんな量子化されていて、連続的に勝手な値をとるというわけでなく、とびとびの値をとるわけであります。例えば（三次元の場合を考えると面倒なので）ある L の長さの直線上を粒子が運動しているといたします。さきほどの不確定性原理を一般化いたしまして、運動量は

$$p_n = \frac{h}{L} \times n \quad (n: \text{整数}, h: \text{プランク定数})$$

で表わされるとびとびの値をとるわけであります。それから、マクロな物質を考える場合、物質を構成している粒子がボーズ粒子であるかあるいはフェルミ粒子であるか、という区別が大切になります。ボーズ粒子の代表的な例は、ヘリウムの質量数が4の原子 ${}^4\text{He}$ であります。ヘリウムには安定な同位元素が二種類ありまして質量数が4のものと、3のものがあります。そのうちの4の方のものがボーズ粒子であります。今まで、ヘリウムと呼んで来ましてのはこのヘリウム4の方でありまして、これは北アメリカの天然ガスの中から採られるものであります。これに対して、フェルミ粒子の方は、ヘリウム3がフェルミ粒子でありまして、これは原子炉を利用して人工的に作ります。それから電子がフェルミ粒子であります。

まずボーズ粒子の場合からお話をすることにいたします。気体を考えることにします。ボーズ粒子で出来た気体の特徴は、同じ運動量を持った粒子が何個あってもよい、ということであります。したがって、絶対零度、一番エネルギーの低い状態を作ろうと思えばよろしいということになります。このように、たったひとつの状態を 10^{22} 個位のマクロな個数の粒子が占領している現象のことを、ボーズ凝縮と呼んでいます。そういう状態というのは実は絶対零度に限

りませんで、温度を少し上げてやりましたも、ある気体の密度によって決まる特性温度 T_0 というものがありまして、 T_0 という温度までの間は、運動量ゼロの粒子はマクロな数ある、それが一般的な意味でのボーズ凝縮であります。要するに運動量が全部揃っているわけでありまして、運動量に関する秩序状態でありまして、運動量ゼロの状態に落ち込んでいる粒子はエントロピーに寄与しない、という意味でエントロピーがゼロの完全に秩序だった状態といえるわけです。

液体ヘリウム4の場合は T_0 ではなくて T_λ と書く習慣ですが、この値が 2.17 K であります。この温度よりも低い温度で超流動性を示すわけです。この現象を発見したのがさきのカピッツアでありまして、1938年のことあります。この現象がボーズ凝縮と関係あるだろうと理論的に指摘したのが、F. ロンドンという理論物理学者であります。結局、ボーズ粒子系であるためにおこる独特の運動量についての凝縮、それが超流動の本質であります。つまり、超流動というのはエントロピーがないような運動、ゼロ点運動がマクロな運動として起こってくる現象なのだというふうに理解されております。

マクロな量子状態

普通は原子の中のようなミクロな世界でだけ起っている量子的な現象がマクロな世界に現われてくる可能性がありまして、マクロな量子現象と呼ばれております。図10に水素原子の絵と、それから二重の円筒の間を超流動ヘリウムがぐるぐる回っている絵をかきました。水素原子の方は陽子のまわりを電子がぐ

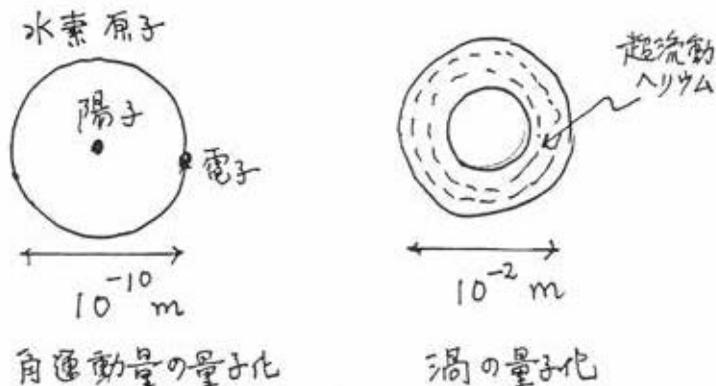


図 10

るぐる回っていて、量子力学によると、電子の回轉運動の角運動量が量子化されていまして、その値は

$$(\hbar/2\pi) \times \text{整数}$$

のとびとびの値しかとれないことになっています。ただ、そういう現象の起こっている領域が 10^{-10} m 程度の狭い所に限られているわけです。これに対して、超流動の実験では、1 cm 位のマクロなスケールの所で起こっているわけですが、やはりヘリウムの原子がぐるぐる回っておりまして、この場合も一原子当りの角運動量が量子化されているわけです。ただ非常に沢山の原子がありますから、渦が量子化されているという形で現象に現われてくるわけです。渦の強さが、普通の流体力学ではどんな値でも勝手にとれるはずであります。超流動ヘリウムの中ではある単位の整数倍というのとびとびの値しかとれないというわけです。マクロな現象についてこういう量子化の現象が現われてくる訳であります。それから、ヘリウムの渦は何も二重円筒を用意しなくてもそれ自身で図11の様な構造をとることが可能であります。これは台所の流しの排水口の所に出来る渦、中心に出来た空気の柱のまわりをぐるぐると水が渦を巻いている、あれと同じものであります。これが流体力学で渦糸と呼ばれているものであります。超流動ヘリウムの中にもこういう渦糸が出来る可能性



図 11

がある。そしてその渦糸の強さがやはり量子化されているわけでありまして、実は、こういうものが出来ると超流動に対して破壊的な効果を及ぼしまして、渦糸が沢山できてくると超流動が壊されます。

同じようなことは超伝導の場合にも起こりまして、リングの中を永久電流が流れておりますと当然磁束が出来るわけですが、その時そこに発生している磁束がやはり量子化されます。その単位が

$$\phi_0 \propto \frac{hc}{2e}$$

(c は光速、 e は電子の電荷) で与えられて、磁束はこの値の整数倍に量子化されるわけです。普通のリングの場合には磁束をコントロールするには、いちいち温度を上げてやらないと難しいのですけれども図12のように、リングに弱い所を作ってやりますとそこを通して中の磁束を制御してやることできるようになります。ここで弱い所と申しますのは、そこに薄い絶縁膜を置いてよろ

しいですし、この図に描きましたようにいわゆるポイント・コンタクト、非常に細い接点で接触させてやるという方法でも作ることができます。これが、当時ケンブリッジ大学の大学院生だったジョセフソンが1962年に理論的に予言した現象であります。

ジョセフソン素子



図 12

たとえば、リングの中に含まれている磁束がゼロかさきほどの磁束量子 ϕ_0 の1倍か、すなわち0か1かという状態の切換えが可能になります。これにデジタルな情報を対応させたジョセフソン・コンピューターというものがあります。動作時間、サイクル・タイムが1 nsec (10^{-9} 秒)で、普通の半導体を使ったものよりも1桁あるいはそれ以上高速になるわけでありまして、また発熱量も非常に小さいので現在注目を浴びているわけでありまして、計算機の速さをそんなに速くすることがどの位重要かわからないですけれども、一説によりますと、敵方の打ち上げたミサイルを発見し、その軌道を計算して迎撃ミサイルの軌道を決定しようとする今のコンピューターでは少し足りなくてジョセフソン・コンピューターが注目されているのだそうです。そういう物騒な話はあまり歓迎しないのですけれども。

超伝導の話になりますと、実は主役を演ずるのは電子でありまして、電子というのは自転に相当するスピンの自由度をもっている。そのスピンの方向が量子化されていて、上向きか下向きかの二つの状態しかとることができない。更に、ご存知の通りパウリの禁制原理というのがありまして、フェルミ粒子の場合にはたとえば同じ運動量と同じスピンを持った電子は2個以上は存在できない、という原理であります。

そのために次のようなことが起こります。さきほどの一次元の直線上を運動する電子を考えます。図13で横線が各運動量状態を表わします。間隔が h/L の運動量状態の下の方から電子を2つずつ配置してゆくことにい

パウリ禁制原理

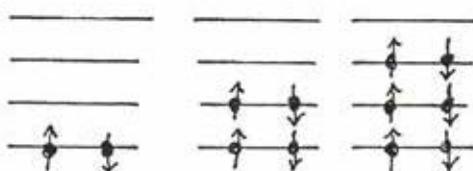


図 13

たしますと、電子が2個の場合には一番低い所に2個入れてそのスピンは上向きと下向きということになります。これで一番下の状態はいっぱいになります。したがって、4個の電子をもって来たときには残る2個はその上の状態に置かなくてはいけない。6個の場合は更にその上にしか置けません。また、スピンは各々の横線につき上向きと下向き1個ずつであります。N個電子がある場合には、下から数えてN/2個の運動量状態を使わなくてはならないということになります。したがって、絶対零度でもNが大きいときには非常に大きな運動量をもってることになります。一番大きな運動量の値というのは、一番上の状態にある電子の運動量ですから

$$\left(\frac{h}{L}\right) \times \frac{N}{2} = \frac{h}{2a} \quad \left(a = \frac{L}{N} \text{ 平均の間隔}\right)$$

となります。一次元に限らず三次元の場合にも似たような関係が成り立ち、平均の間隔に逆比例した大きな運動量を持って電子が存在する、ということになります。そのために絶対零度でも電子は大きな運動エネルギーをもつことになりまして、これがフェルミ・エネルギーと呼ばれているものであります。金属の場合にはこのエネルギーは温度に換算して約1万ケルヴィン位で、非常に激しい運動を表わしています。液体ヘリウム3の場合、これは液体ですから気体の議論をそのまま使ってよいかどうか問題がありますが、仮によろしいとすれば、電子よりも質量が重いためにゼロ点運動が少し弱くなりまして、フェルミ・エネルギーは1ケルヴィン位になります。この様に非常に大きなエネルギーで運動しているわけなのですが、これはゼロ点運動でありますからエントロピーはゼロであります。ただボーズ粒子系の場合と違って、この状態のエントロピーはゼロではありませんけれども、超伝導状態や超流動状態ではありません。電子系についていえば、色々な運動量の状態に電子がばら撒かれていますから、運動量について何か揃った運動をしているというわけではありません。

結局、超伝導の理論が非常に難しかったのは、パウリの禁制律のもとでどうやって電子が集团的に揃った運動をすることができるかという点でありました。これに対する答が始めに申し上げたBCS理論によって与えられたわけでありまして、一言で申せば、いわば電子が2個ずつペアを組んでその重心運動が揃ってしまうというものであります。こういう状態はパウリの禁制原理に矛盾しないで作ることができるわけです。ただしそういうペアを組むためには、電子

と電子の間に引力が必要であります。普通の超伝導ではどういう引力が働いているかといいますと、電子がやって来まして、音の量子=フォノンを吐き出す、それをもう一方の電子が吸い取る、ということを行いますと、電子がフォノンを仲立ちにして運動量を交換するわけです。運動量を交換するということは力が働くということでありまして、その力を調べてみるとこれがかなり強い引力である、場合によっては電子と電子の間のクーロン反発力よりも強くなる。そのために超伝導が起こるんだ、ということになります。

このようにして、フェルミ粒子でも、超伝導状態あるいは超流動状態が可能ということがわかりますと、当然、ヘリウム3はフェルミ粒子ですがこれのできた液体 ^3He も超流動になるだろうということを、考えつくわけです。事実BCS理論のできた直後、皆そう考えたわけです。ところが、実験的に液体 ^3He の超流動を見つけ出すのはなかなか難しいのです。というのは、これが非常に低い温度で起こるからであります。実験的に見つかったのは1972年でありまして、リー、リチャードソン、オシャロフという三人によって見つけられた。これの起こる温度が1 mKでありますから、常温からマイナス5桁という所があります。このような低い温度は、最近では極低温よりもっと低い温度という意味で、超低温と呼ぶことになっております。英語で Ultra Low Temperature であります。そういう超低温を作り出そうという努力が長い間続けられておりまして、そういう研究の最初の成果が今の液体ヘリウムの超流動だったわけです。

超低温の作りかた

そろそろ時間も経ちましたので最後に超低温の作り方についてお話ししたいと思います。そのまず第1は、希釈冷凍であります。このアイデアは、さきほどのフェリックス・ロンドンの弟のロンドンが1962年に提案したものでありまして、 ^3He と ^4He の混合液を使う方式であります。 ^3He と ^4He は同位体でありますので両方の間に働く力が非常に良く似ておりますから、古典的に考えると理想的な溶液を作るはずであります。しかし量子論的に見ますと一方はフェルミ粒子であり一方はボーズ粒子でありますので、あたかも水と油のような関係にあり、実際0.8 K以下に冷やしてやりますと、水と油のように二相に分離してしまいます。つまり図14のような状態になるわけです。 ^3He は ^4He よりも軽

希釈冷凍

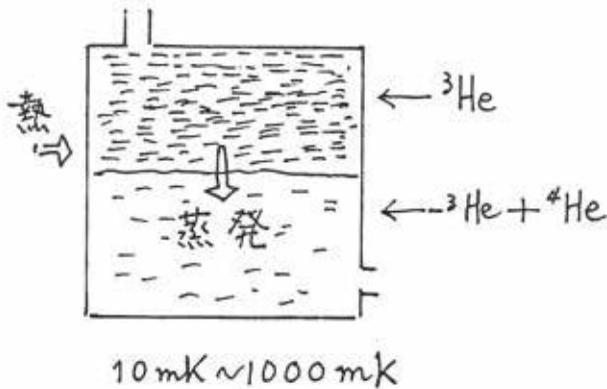


図 14

い原子なので、上の部分は低温ではほぼ100% ^3He だけになり、 ^4He の重い部分が下に沈むわけです。面白いことに、下の部分では、混っている ^3He が、絶対零度でも完全におし出されるわけではなく、普通の圧力では約6%程ここに残ることができるのであります。そうしますとこれは、 ^4He というバックグラウンドはありますが、その中に浮かんでいる非常に希薄なフェルミ粒子のガスだと考えてよろしいわけでありまして、したがって熱を与えてやりますと蒸発がおこるわけです。濃い方から薄い方へ ^3He が蒸発してゆくわけです。普通の蒸発の場合ですと、蒸気の方は古典的なガスでありまして温度が下がると蒸気圧が非常に小さくなってしまいます。したがって蒸発による冷却というのは余り低温まで使えないわけでありまして、ところがこの、 ^3He - ^4He の場合には、下の方にある ^3He が低温ではフェルミ気体となりゼロ点運動しているわけです。ゼロ点運動しているということは、その運動に伴う圧力があるわけで、これは絶対零度まで有限の圧力をもっている。そのために、この蒸発による冷却が低温にまで使えるのです。つまり気体が量子気体であることを巧妙に利用した方法であります。この方法によりますと、大体10 mK~1 Kの間の温度を簡単に作れます。この希釈冷凍機は現在では商品として売られております。

次はボメラランチュクの冷却法です。これは歴史的な方法ですが、現在では余り使われておりません。これを発案したのは、ソ連の素粒子の理論家ボメラランチュクで、1950年のことでした。アイデアは大変簡単であります。液体の ^3He

は、パウリの原理にしたがって、温度を下げるとそのエントロピーが、どんどん小さくなってしまふ。それに対して、固体 ^3He の中には ^3He の核スピンのふらふらとしている。そのために大きなエントロピーが低温まで残っている。したがってある温度以下になりますと、液体のエントロピーの方が固体のエントロピーよりも小さくなるという、普通にはちょっと実現できないことがおこるわけです。そこで適当な状態から出発して断熱固化、すなわち液体を断熱的に固体にしてやりますと、断熱変化ですからエントロピーは不変で、かなりの低温が実現できるわけです(図 15)。この方法で到達できる温度は、固体のエ

ポメランチュク冷却 (1950) 液体 ^3He の断熱固化

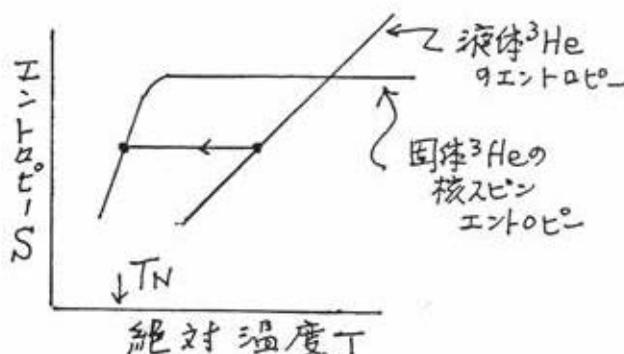
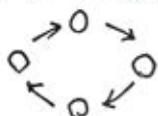


図 15

ントロピーが突然小さくなってしまふ、その温度であります。この温度を決定しているものは、固体の中の核スピンの間にどういふ相互作用が働くか、その相互作用の大きさで決まっているわけです。ポメランチュクは最初はこの相互作用が、核スピンの伴なう磁気モーメントの間に働くもの、小さな磁石の間の相互作用、と考えてその大きさを計算したわけです。そうしますとマイクロ・ケルヴィン、つまりマイナス 8 桁までの低温が得られるはずだと予想しました。ところが、1974 年、実際に実験が行われました所、観測値は、約千倍高い 1 mK であることがわかりました。どうしてそんなに高い温度になったかと申しますと ^3He の固体が量子固体と呼ばれるものだったからで、非常に激しい零点振動があるために固体の中の原子と原子が位置を入れ替えるということがおこりま

す。そのように位置の入れかえがおこると、量子力学によれば、スピンの間には非常に強い相互作用が働くこととなります。要するに非常に激しい零点振動による位置の交換が起こることによって、単純な磁石としての相互作用よりも千倍強い相互作用が働くということになるわけです。また面白いことに、位置の交換は隣り同志の原子の間で起こるのではなくて、図16のように4つの原子

零点振動による原子の位置交換



量子固体

が、満員電車の中で席を譲り合うようにぐるっとうまく回って位置を交換しているらしい、という

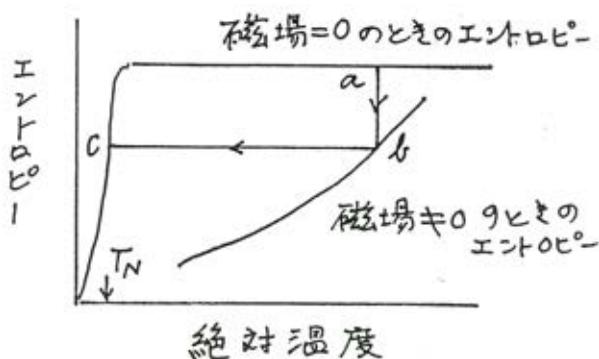
ことが色々な実験的な研

図 16

究でわかってきております。この固体 ^3He の実験は名大では益田先生の研究室で活発に行われております。このボメランチュクの方法では1mKぐらいまでしか作れないわけですが、 ^3He の超流動は最初にこの方法で得られたので、そういう意味では歴史的に重要な方法でありました。

1mKよりさらに低い温度をどうやって作るか。それは同じく固体原子の核スピンを利用するのですが、さきほどのように ^3He の特性を利用するのではなくて、磁場を利用して行います。図17の上の曲線が磁場のないときのエントロ

核磁気冷却



$a \rightarrow b$ 等温磁化

$b \rightarrow c$ 断熱消磁

図 17

ピーであります。これに磁場をかけてやりますと下の線のようにエントロピーが少し小さくなります。そこで、ある所で磁場をかけてエントロピーを小さくしておいて、それから次に外との熱の出入りのないようしておいて磁場をゼロにします。そうしますと、 b から c へとエントロピーが一定の変化がおこりまして、核スピン系が冷えるということになります。これが核磁気冷却の方法であります。この原理そのものは1934年に、ホーターとサイモンが提案していたのですが、最初の実験は1957年にオクスフォードで行われました。ところでこの方法で最初に冷えるのは核スピンであります。その核スピンの同じく固体の中にある電子や格子振動と相互作用しまして、その熱を吸いとるわけです。そうして冷やされたものが、今度は外の例えば冷却したい液体ヘリウムなどから熱を吸いとる、というふうな順序で熱の流れがおこるわけです。で、57年の実験では、核スピン系はたしかにマイクロケルヴィンまで冷えたのですが、それも、それとつながっている電子とか格子振動の方は10 mK ぐらいの温度にとどまっております。本当の意味では核磁気冷却にはならなかったわけです。本格的な成功というのはかなり遅れ、1974年になりましてルーナスマという人のグループが、銅を使って初めて成功したわけです。この場合には核スピン系を冷やしただけでなく、接触している液体 ^3He を冷やすことに成功したわけです。このように実用化されるまでに約40年が必要だったわけですが、成功した要因というのは二つあります。ひとつはさきほどの希釈冷凍機の性能が向上して、これによってあらかじめ低い温度を作っておくことができるようになったこと。もうひとつは、磁場を作るのに超伝導磁石を利用できるようになって、簡単に強い磁場が作れるようになったことでもあります。こういう二つの低温研究の成果自身が大きな要因になりまして、核磁気冷却の成功が導かれたわけがあります。現在では核磁気冷却によって1 mK よりももっと低いたとえば10 μK を実現することが低温研究の最先端ということになっているわけでありませう。

このように、今日の話、終りの方は少し急ぎましたけれども、低温研究の特色は非常に息の長い研究であるということがいえると思います。基礎的な研究だからであります。

現在日本では、東北大、名大、物性研、大阪市大で、超低温、マイクロケルヴィンの開発が活潑に行われていることを申し添えて私の話を終らせていただ

きます。ご清聴ありがとうございました。(拍手)

●こぼればなし

ゾンマーフェルトのデモンストレーションと朝永さん

岩波の雑誌『図書』1982年10月号に載っている朝永・湯川両博士の対談「二人が学生だったころ」(聞き手、豊田利幸氏)のなかに、京都大学の学生だった朝永さんが感銘を受けたゾンマーフェルトのデモンストレーションの話が出ています。二つの振動がカップリングして一方が減衰すると他方が盛んに振動し、まもなくその逆がおこって、それを交互にくりかえすという、よくある実験を、同じ形の2つの振り子ではなしに、1個のつるまきばねにおもりをつるしたもので、やって見せるものでした。おもりの上下振動と左右に回転する振動のあいだで共鳴がおこるようにしてあります。朝永さんが感心したのはその現象のめずらしさよりも、どういうメカニズムでそういうことが起こるのかという質問に対するゾンマーフェルトの返答の仕方にあったというのです。

「ゾンマーフェルトはしばらく考えておりました。そして言うのに、これをひっぱってごらん下さい、ひっぱるときに、ちょっとこういう感じがするだろう、そういう意味で、こういう振動とこういう振動が影響しあうんだと、そういう答えでした。これはぼくはひじょうに印象深く覚えている」「そういう感覚的な説明というのは、相当の達人じゃないと、なかなかできないですよ。式を書けばこうなるというのが、だいたい今の日本人のくせでしょう。」

直親性を重んじる朝永さんの人柄をよくあらわしています。実は、私はこれとおなじ話を朝永さんから直接聞いたのです。千葉大学の卒業研究の学生と一緒に、そういう仕掛けをつくらうと、いろいろ苦心した結果、うまくいったことを話したときでした。そのデモンストレーションを、ゾンマーフェルトはよほど気に入っていたものと見え、「理論物理学講座」の第1巻と第2巻に書いておられます。それを見て、つくって見る気になったのですが、適当に弱いばねが手に入らなくて、最初にできたのは、たいへん重いおもりをつけたごついものでした。それだと、ばねをつるす支点をよほどしっかり固定しないとうまくいきません。最近、思いきり弱いばねに軽いおもりをつけたごく小さいものをつくり、昨秋来日した米国の物理学者パノフスキーさんに進呈したりしましたが、大きな講堂で多数の聴衆に見せるのには向きません。ゾンマーフェルトは、どのくらいの大さきものを使い、支点の問題にどう対処したのだろうかとかねがね疑問に思っていました。『図書』の対談でその謎がとけました。プロジェクターで拡大した影絵を写して、後方の席の人にもわかるようにしたらしいのです。

朝永さんを感心させたゾンマーフェルトのカップリングの説明は、直接ばねにさわらない人には、こう言えばよいでしょう。「つるまきばねは引き伸ばそうとするとほどけようとする」と。ゾンマーフェルトもおそらくそんなようなことを言ったのだらうと思います。あるいは、朝永さんは子供のころ、理科の道具をいじるのが好きだったので、「ちょっとこういう感じ」というだけでわかったのかも知れません。(玉木英彦)

原子核物理学の奇蹟の年の50周年に因んで

昭和7年(1932年)という年は、物理学史上「奇蹟の年」といわれ、重要な発見、発明が相次いでおこなわれ、世界の物理学の frontline が原子の研究から原子核・素粒子の研究へと移った年です。わが国でも、その前年に理化学研究所内に仁科研究室が創設されて研究を始めており、このことはやがてわが国の物理学研究が欧米と肩を並べるようになるうえで、大きな意義があったと言えます。その50周年を記念する意味で、第16回仁科記念講演会でおこなわれた朝永振一郎博士の講演と、そのなかで出てくる話に関連のある仁科博士からブラケットへの手紙を載せることにいたします。(前者は財団の出版活動停滞の時期に講演者の意向で講演の翌年、雑誌「自然」(1971.3)に載ったもの、後者は「仁科記念室」所蔵の遺品の中から発見された下書きをもとにしました。)

原子核物理の思い出

核物理学事始時代の先人たち

1970年12月7日

定例第16回仁科記念講演会

朝日講堂において

朝永振一郎

原子核物理の勃興期に仁科研究室誕生

「原子核物理の思い出」という題を選びましたのは、今年ちょうど仁科財団が発足して15周年になるというので、その記念の意味を含めまして、日本の原子核物理学がどういふふうにして始まったかということをお話してみたいと思ったからでございます。よく若い者は未来を語って、年寄りには過去を語ると申しますが、そういうわけで、私が年寄役を買って出たわけでありませう。

ところで、今年は仁科記念財団の15周年になるだけでなく、もう一つの意味がございます。むかし理化学研究所という研究所が東京にありまして、いまも埼玉王県に同じ名の研究所がありますけれども、その前身である東京の理化学研究所のなかに仁科芳雄先生をボスとする研究室、すなわち仁科研究室ができましたのが昭和6年のことでございます。それで、ことしは昭和45年ですがもう12月ですから、ちょっとおまけをいたしますと、ちょうどそのときから40周年になる。そういう意味で、仁科研究室ができましたころの原子核物理の有様をお話するというのも、意義があるんじゃないかと思ったわけございませう。

す。

昭和6年という年は、仁科研究室ができた年だということをいま申しあげましたけれども、実はこのころから、原子核物理学が急速に発達してきた。そういう意味で、物理学にとりまして一つの区切りになった年なのであります。こういう、物理学自身が大きく変わるときに仁科研究室ができたということは、日本の物理学にとって非常に大きな意味があったといえるかと思うのであります。

実は仁科先生ご自身、はじめ研究室をつくる準備をしておられたころは、まだ原子核物理をやろうとは考えておられなかったらしいのであります。仁科先生は長い間ヨーロッパに行かれまして、現在の原子物理学の基礎であるところの量子物理学の発展の中心でありましたコペンハーゲンに、6年間もおられました。昭和のはじめごろ、この量子物理学といわれる新しい物理の分野がヨーロッパで非常に急激に発達しましたが、その時期をヨーロッパの一つの中心であるところのコペンハーゲンで過ごしてこられた仁科先生は、この新しい、まだ日本ではほとんどやる人がなかったようなそういう分野を、日本でもはじめようとしておられたわけであります。

ところが昭和7年になりまして、非常にたくさんの発見がありました。これは主としてヨーロッパ、およびアメリカでなされたのですけれども、その結果として、昭和6年と7年とを境にしまして、物理学が——原子とか分子とかを対象にしていたそれまでの原子物理学が——昭和7年の発見を契機としまして、原子、分子よりももっとなかの、つまり原子核のなかに踏み込んでいった。そういう意味でこの昭和6年、7年というのは、物理学の歴史では一つの区切りとなった非常に記念すべき年であったわけです。

昭和7年にいくつかの発見があったと申しましたが、どんなものかといえますと、まず原子核物理のほうで非常に重要な発見といたしまして、重い水素が発見された。ふつうの水素よりも2倍の質量をもった水素が発見されたということ。それから中性子が発見された。中性子と申しますのは、ふつうの水素の原子核とほぼ同じ質量でありながら、電気をもっていない。水素の原子核はプラスの電気をもっておりますが、電気をもっていない、そういう新しい粒子が見つかった。それから陽電子といたしまして、電子と同じ質量をもっている粒子でありながら、ふつうの電子はマイナスの電気をもっているのに、これはプラ

スの電気をもっている、そういうものが見つかった、そういう発見があった。さらに人工的にスピードをつけた、つまり人工的に加速した粒子をぶっつけて原子核をこわすという、非常に巧みな装置が発明された。そういうことであります。これらはいずれも原子核に関係のある発見でありまして、こういう発見の情報が、あいついで日本にもどんと入ってきたわけです。

私は昭和7年、ちょうどこの年に、仁科先生の研究室で先生のお手伝いをするという、助手のような任務になったわけでありましてけれども、その当時のことを思い出してみますと、今でも印象深くおぼえていますのは、この理化学研究所で毎週行なわれた輪講会のことであります。輪講会というのは、ご承知の方もあるかと思うんですけれども、外国あるいは国内からいろいろな研究の発表がございまして、それが専門雑誌に印刷されて、たくさんくるわけです。それを全部1人で読むのはとてもひまがないので、みんなの順番をきめておきまして、順ぐりにそれを読んで外からきた情報の紹介をする。そしてその論文についていろいろ討議をし、検討をする。あるいはそこからいろいろな問題をひっぱり出す。そして、場合によっては自分の研究にそれを取り入れる。そういうことをやるために、毎週集まりをやっていたわけでありまして。

昭和7年に、いま申しあげましたように五つか六つの、物理学者をたいへんに興奮させるような発見があいついで出てまいりましたので、この輪講会は、非常に活発な討論の場所になったのであります。たとえば、先ほど陽電子が発見されたと申しましたけれども、陽電子が宇宙線のなかに発見された。宇宙線というのは、ご承知の方が多いと思うんですけれども、宇宙のどっかから非常にエネルギーの大きい粒子が大気のなかへ飛び込んでくる。そして、それが地表まで到達する。あるいはさらに、地表から地面深く放射線が突き抜けていく。こういう現象はむかしからわかっていたわけでありましてけれども、そのなかで陽電子という、いままでだれも考えたことのないような粒子が見つかった。

いろいろな加速器の試み

そういうわけで、こういういろいろな発見が、仁科先生はじめ、当時理化学研究所にいた人たちの強い興味を中心になって輪講会で熱っぽい議論を引きおこしたわけです。仁科先生は、先ほど申しあげましたように、研究室をつくられる前には、原子核物理をおやりになるとはまだきめておられなかったようで

ありますけれども、まずこの宇宙線を取り上げようと考えられた。宇宙線というのは、せまい意味では原子核物理学とはいえないかもしれないですけれども、しかし、それは原子核物理学と非常に関係のある物理学である。という意味は、非常に大きなエネルギーの粒子を扱うという点で、原子核物理学と共通のいろいろな面があるわけです。宇宙線の研究に使われますいろいろな装置、たとえばガイガー・カウンターといったものですね。このガイガー・カウンターというのは、計数管ともいいますが、それはビキニの実験以来日本人でその名前を知らないものはないぐらい有名になりました装置で、放射線の粒子を一つ、二つと数える仕かけであります。そういうものが原子核物理にも使われますし、宇宙線にも使われる。そういう意味で共通の点が非常に多い。

それから、いま申しました、人工的に加速した粒子で原子核をこわす。これはイギリスの Cockroft、ウォルトンという2人の人が共同で、そういう機械を開発いたしました。これが成功したという情報が入りました。日本でも何とかして加速器をつくりたい。そういう原子核をこわすための機械をつくりたいという考えは前々からありまして、仁科先生も、いずれは仁科研究室にそういうものをつくらうと考えておられたようであります。

加速器にはいろいろな方式が考えられますが、要するに非常に高い電圧をかけて強い電場を真空中につくって、その真空中にイオンを打ち込みまして、それをその電場の方で電極のほうにひっぱってだんだん速度をあげていこう。そういう原理はいとも簡単なことなでありますけれども、実際には真空中に非常に高い電圧、電位差を作ることは、技術的にたいへん困難なことなであります。交流であれば、変圧器を使って電圧を上げることができますけれども、粒子を加速するには交流では困るので、その真空管のなかに作る電位差というのは、こっちがプラスでこっちがマイナスというふうに、電場をきまった方向に作ってやらなければいけない。

昭和7年に、Cockroftとウォルトンの2人が一つの機械を発明したわけですが、それ以前にいろいろなことが試みられておりました。たとえば非常に高い電圧をつくるというので、よく実用に使われておりました機械もあることはありました。それは高圧線の碍子——せともので針金をぶら下げている、あの碍子ですね。あれの試験をするのに非常に高い電圧をつくる必要がある。それから、雷に対するいろんな機械の強度をテストするという目的で、非

常に高い電圧をつくる。そういう装置が当時すでにあったわけです。そういうものを使うという考え方もあったわけであり、この機械をそなえているある工場を見にいったこともあります。しかしこの機械では非常に短い一瞬間だけなら高い電圧をつくれますけれども、それを持続することができないという意味で、これはあまり使いものにならない。

ある人は、雷さまをつかまえよう。つまり雷雲が出てきますと、空中の高いところと低いところとの間に非常に大きな電位差ができる。そこでちょうどフランクリンが雷雲のなかにタコを上げて雷をつかまえたのを、もっと大がかりにしようという考え方もありました。実際、アルプスの山のなかに、高いアンテナのようなものを張りまして、針金で地面にその電圧を伝えてくるという実験をやった人がありますが、これは成功しなかった。成功しなかったのみならず、雷さまといいますか、雷神の怒りに触れまして(笑声)、物理学者が1人、電気に撃たれ亡くなった。いまみなさん、ちょっと笑いかけたけれどもすぐおやめになった。実際、笑えないような出来事もあったわけです。

いろいろな方式が考えられたんですけども、もう一つ、わりあいやさしそうに見えるのは、バンドグラフの機械という名前では呼ばれるものであります。これは要するに、ベルトコンベアの上に電気をのっけて、それをグルグルまわす。ベルトコンベアが下から上に電気をのせていって、上に大きな中空の玉があるんですが、その玉のなかで電気をコンベアから玉のほうへうつす。そしてグルグル、下から電気を入れちゃ上にもって上がって、上に置いてきてもどってくる。あんまり大ざっぱな話で、ここにおられる加速器研究の大家である西川哲治先生あたりからしかられるかもしれませんが、一口にいうとそういうことです。

それで仁科研究室で、こういう機械を試作してみようということになりました。いまは、このベルトコンベアで電気をはこぶバンドグラフの機械も、たいへん大きなものがありまして、1階から3階4階までぶち抜いているようなものもある。それからいろいろ改良されて、実際にいろんな用途に使われておりますけれども、いきなりそんな大きなものを作るというのはいろいろ困難がありますので、とにかくおもちゃみたいなものでもいいから作ってみようというので、仁科先生の実験室で試作した。私が理化学研究所へ行きまして、実験室ではじめて見た機械がそれでありました。高さは1mより少し高いくらいでした

か、電気を伝えないようにせともので作った柱が立っていきまして、そのうえに中空の金属の丸い玉もっております。その柱のところに絹のリボンで作ったベルトコンベアがあって、グルグルまわっている、そういう仕かけになっておりまして、下からはふつうの変圧器で5万ボルトぐらいまで上げた電源がついております。

そういうのが二つならべてありまして、電圧が上がりますと、こっちの玉からあっちの玉に火花がパチンと飛ぶ。そういう、ほんとうの機械を作る前の、模型実験のような機械がありまして、それを運転した。最高は60万ボルトぐらい出たことが1回か2回あったようでありますけれども、とにかく日本という国は非常に湿気の多いところでありますから、こういう装置ですと、ふつうの部屋でやりますと、コンベアの上ののった電気が途中で湿気のために逃げてしまう。よそへ伝わってしまう。そういうわけで、非常に乾燥した日にはある程度うまくいって、パチンと火花が飛ぶんですけども、少しお天気が悪いと、せっかく電源は5万ボルトのものを使っても、上に運ばれる電気は5万ボルトよりも少ない。そんな状態でありました。

そういうわけで、バンドグラフの機械とか、あるいは雷をつかまえるということ仁科先生も考えられたんです。仁科研究室にそのときいた若い人に、仁科先生が、おまえ、赤城の山に行って雷の実験をやらんかといわれた。それで、それだけは勘弁してください(笑声)。さっきここであいさつされた山崎文男さんというのは、雷が大きらいで有名なんです、むかし、よく彼をからかったものです。あるとき、円筒形の鉛の卦算を、ベニヤ板みたいな薄い板が張ってある机の上でゴロゴロと転しましたら、彼はドキッとしちゃった(笑)。それで雷の実験も、私が行きましようという人はいないで、そのうちにドイツから、雷に撃たれて物理学者が死んだという情報が入ってきました。あとでお話することですが、その後、仁科研究室でやろうとしたことがしょっちゅう外国でさきにやられてガッカリしたことが多いのですが、この雷の実験だけはドイツに先手をうたれてかえってよかった。そんなわけで雷の計画は取りやめになりました。

コックロフト・ウォルトンの論文、大センセーションを引きおこす

そういう時期にイギリスのコックロフトとウォルトンの発表がありました。

実はそれまで原子核をこわすためには100万ボルト以上の電圧がいるということが常識になっていました。ところが、このコックロフト、ウォルトンの第1番目に作った装置は、100万ボルトよりもちょっと低かったんです。しかし、それで原子核をこわした。その情報が理化学研究所で大センセーションをおこしました。それからもう一つ、彼の装置は非常に巧妙にできておりまして、100万ボルトには届かなかったにしても、原子核をこわすために十分な、100万ボルトに近い電圧を非常に安定した形で作り出すことができる。そして、現にそれで原子核をこわしてみせた。そういうわけで、これはたいへんなセンセーションをおこしました。

彼らの論文が日本に、昭和7年の春ごろにやってきて、それに、どういう機械を作ったかということが発表されました。それを使って原子核をこわしたという実験の結果は、その年の秋ごろ発表された。そういう情報が日本に入ってきましたが、とにかく機械を作ったということが、理化学研究所の輪講会で報告されますと、たいへんな騒ぎがおこりました。それは、この機械の仕かけが誰も考えつかなかったような巧妙なものであること、その結果今まで人々が考えたような大げさなことをしないでもうまくいくということです。それでこれぐらいの装置ならば日本でも作れるじゃないかという意見が出ました。しかしそれと同時に、その機械の説明でよくわからないことがいっぱい出てきた。私は実験物理学者じゃございませんから、しゃべっていること間違っているかもしれないけれども、その当時、まずこの機械の電氣的な面ですね、電気回路をどんなふうにして高い電圧を得るかということは、討論しているうちにほぼその原理は理解できたわけですが、そのときに、コックロフトが使った放電管ですね、原子核をこわすための弾丸になる粒子を真空のなかで加速する管が、いままで見たこともないような構造をもっている。ふつう真空を作る場合には、ラジオやテレビのなかに入っている真空管、あるいは電灯の球も同様ですが、ガラスを密閉しまして、それでなかの空気を抜く。いや、なかの空気を抜いてから密閉する、先に密閉しちゃったら、空気が抜けない（笑声）。そういう構造をもっていたわけです。

ところが彼の放電管は、まるいガラスの筒ですね。さしわたし40cmぐらいの、長さは1mぐらいの円筒を重ね合わせる。途中にまんまかに孔のある板をはさみますけれども、板をはさんでは上に筒を重ね、また板をはさんでは上に

筒を重ねる。そうして上と下にふたをするわけです。そういう構造をしている。それで、研究所のみんなのわからない点は、そんな構造ではなかを真空にしようと思っても、板と筒の間にすき間がちょっとでもあれば空気がスースー入ってくるわけで、どうしてそんなにうまく空気がもれないようにできるのか。彼の論文を見ますと、いとも簡単に、空気がもれるとアビエゾン・コンパウンドとかいう薬をちょいといつけると止まる。アビエゾンQというのをなすりつけると、空気のもれが止まるということが書いてある。もちろん今まででも真空を作るのに必らずしも完全密閉のガラス器ばかり使っていたとはかぎらない。場合によってはスリ合せでガラスをつなぐこともありました。つまりガラスのつなぎめをピッタリとよく合うようにすり上げ、そこにグリースなどをぬってはめ込むというやり方です。しかし、コックロフトのような大胆なのは見たこともない。

妙薬アビエゾンQ

それで、いったいこのアビエゾンQというガマの油のような妙薬はどんなものだろうか、グリースのようなものだろうか、あるいはワックスのようなものだろうか、いろいろな議論が出たわけです。しかし、とにかく、どんなものかわからないけれども、イギリスに注文してみようということになって、物理や化学の薬などを注文するとすぐ買ってとどけてくれる便利な出入りの商人がおりましたので、それに頼んで買ってもらう。しかし今とちがって、それが到着するにはインド洋を船でくるので1月半はかかる。

さて、コックロフトの機械はだいたいこれなら日本でもできそうだということになったんですが、先ほど申しましたガラスの筒を、日本でどっかやってくれるメーカーがあるであろうかということが次に問題になりました。とにかくどっかメーカーを探そうということになって、あるメーカーに試作させたわけです。昔は板ガラスを作るときに先ずガラスを円筒形に吹いて、それを切りひらいて板にした。ですからガラスの筒の相当大きなものでも作れないことはないのです。しかし、われわれが必要とする筒を作るには、板ガラスのときのようにはいかない。と申しますのは、筒がほんとうにまんまるくなくては、切口がいびつであっては困る。なぜかと申しますと、そういう筒の上に板をのせて、その上にまた筒をのせる、そういう構造で放電管を作りまして、なかの

空気を抜く。そうしますと、筒がまんまるくなってなくて、ちょっとでもいびつになっておりますと、空気を抜いたとき、外気の圧力のかかり方にあちこちムラができるわけです。ムラができますと、上の筒と下の筒と途中の板との間に、どうしてもヒズミができ、そのためにすき間ができる。そこから空気が入ってしまう。ですから、いくらアビエゾンQという妙薬がありましても、そういうヒズミがある程度大きくなると、きき目がなくなってしまいます。ですから非常に正確に、まんまるの筒を作らなくちゃいけない、そういう問題があります。

ものをつくるさまざまな苦勞

それからもう一つは、そのガラスを作るときに、作り方によっては、熱いガラスを冷やす途中で、ピンとひびが入ったりすることがよくあります。ですから、熱処理をうまくやりませんと、ひびが入るところまではいなくても、ガラスのなかに外見ではわからない内部ヒズミができます。そんなヒズミがあると、なかの空気を抜いたとき外圧でそこからこわれる心配がある。そういうわけで、一つは形が非常にやかましい、一つは、ガラスの質が均一に、うまくできないと困まる。そういう、ふつうの板ガラスを作るときにはあまり考えなくてもよかった要求がでてくるわけです。

それでも、あるメーカーにたのんでガラスの筒を作ってもらったんですけども、それがはたして、1気圧の外からの圧力に耐えるかどうか、耐圧試験をやらなくちゃいけない。ところが板ガラスを作るにはそんな必要もなかったので、メーカーのほうにはそういう試験をやってくれるだけの装置もないし準備もない。そこで、そういう検査は、仁科研究室にいた人たちがみずからやらなくちゃいけない。この検査では、もちろん実際とはちょっと違う状況なんですけれども、とにかく、ある仕かけでだんだん圧力を上げて行って、どこまでもつかを見るのです。こういう実験は、やっていてなかなかこわいものらしいんです。もちろん、こわれても、そこらじゅうガラスのかけらが飛び散ってけがするようなことはないようにしてありますけれども、とにかく緊張、じわじわと圧力を上げて行って、いまこわれるか、いまこわれるかとやっている緊張感、スリルがあってなかなかいいという人もあるかもしれないですけれども(笑声)、あんまり気持ちのいいものではありません。

私は理論物理学者なので、実験を自分でやらないで傍観者的なことばかりいって申しわけないんですけども、多少ヤジ馬根性がありますから、その試験をやったときに見にまいりました。実験の人たちが、額に汗を流して、じわり、じわりと圧力をかけていく。そういうことまで全部自分でやらなくちゃいけない。そういうわけで、日本でまだだれもやってないことをやってみようというときには、いろいろな苦労があるわけです。実験室だけに優秀な機械をそろえ、優秀な人を集めればいかと申しますと、やはりその当時の日本の工業の水準が問題になる。ある機械を作ろうというときに、こっちは設計図だけ書いて、仕様書を見せて、こういうものを作ってくれとって、向こうでOKとって作ってくれるような態勢になっていれば楽なんですけれども、実際の実験をやって、ほんとうに物理学者らしい仕事に取り組む前に、その準備のために、現場の工具さんと同じようなことを研究室でやらなくちゃいけない。そういう苦労があったわけです。

たとえば私が理化学研究所の仁科研究室に入りましたときに、実験のほうの人たちがまずやっていたことは、先ほど申しましたガイガー計数管を自分で作るということです。いまでは計数管など、どっかの電気メーカーへ行けば、出来合いがたくさんあるわけです。もちろん現在でも、特殊の目的のために、出来合いでは具合が悪いような計数管は作らなくちゃいけない。そういう事情がありますけれども、しかし、そういうのもある程度注文をつけて、こういう性能をもった、こういう形を作ってほしいということをいえば、ある程度、向こうで作ってくれるということもあるわけです。当時はそういうことができなかつたものですから、何もかも手づくりでやらなくちゃいけない。そういう苦労がありました。

話が少しそれますが、例えば重い水（つまり重い水素が酸素と化合してできた水）なんてものも、原子核の研究を新しく進めるには欠くことのできないものでしたが、それがなかなか手に入らない。重い水は天然の水のなかにもごく少量は含まれているのですが、それを濃縮する必要があります。この濃縮を行なうには、水を電気分解するときに重い水のほうが普通の水よりいくらか分解されにくいという性質を利用するのです。そこで仁科先生は塩水を電解して苛性ソーダを作っているある会社に目をつけて、何十年も電解をつづけているその電解槽の水のなかにはある程度重い水がたまっているのではないかという

ので、その水をとりよせられました。しかし、その水のなかにも重い水はほとんど濃縮されておらず、そのままでは使いものになりません。日本ではこんな状態ですが、一方ヨーロッパでは重い水がどんどん作られて、それをいろいろな実験が進められていたのです。

話をまた宇宙線にもどしますが、宇宙線の研究をやりますのに、まずガイガー計数管が必要だ。それを手づくりする。宇宙線粒子を数える研究を仁科研究室でまっさきにやり始めたわけですが、そのために計数管の放電でおこる非常に微弱な電流を相当強いものに増幅して、それでリレーを動かして記録する。そのためには、サイラトロンという特殊な真空管、あるいは放電管が必要だ。しかし、そういうものも市販されていない。それをどうして作るかということ。そういう場合にはメーカーと一緒に……メーカーのほうも、あんまり金もうけにならん仕事で、おそらく迷惑だったと思うんですけども、日本の学問のためということ、あるいはメーカー自身にもそれが勉強になるということで、協力してもらえたんだと思うんですが、そういう新しい技術を産業界に開発してもらうためにいろいろと研究以外の仕事をやらなければいけない。こういう困難ですね、新しい学問を日本ではじめて進めていくときの困難、いろいろな困難を、私は仁科研究室で、先ほど申しましたように、ある意味じゃ傍観者であったわけですけども、たいへんなものだなということをつくづく実感したわけです。

核物理の「蘭学事始」

みなさんご承知だと思うんですが、徳川時代に西洋医学が日本に入ってきたときに、『蘭学事始』という、そういうときのことを書いた本がございますが、そのときにも当時の医学者たちは似たような苦勞をしなければならなかった。コックロフトの論文が入ってきたときの、彼の装置の設計に関する報告を読んだときに、日本の人たちの経験したことは、はじめてオランダの解剖書を手にした日本の医学の方々と相通ずるものがあったんじゃないかという感じがいたします。

そのほか、いろんな逸話のようなことがあるんです。たとえば宇宙線の研究に使う装置で、先ほどいいましたガイガー計数管のほかに、ウィルソンの霧箱という装置があるのですが、これを作るということ。霧箱とは放射線の粒子の

飛んだ足あとを写真にうつるようにする装置で、もちろん、当時日本の学界でもある程度用いられておりましたし、それを作った経験のある方もいたわけですが、ふつうの霧箱と違ったことが宇宙線の場合には必要である。

と申しますのは、いままで、ふつうの霧箱はラジウムやウランなどの放射線の研究に使われたわけですが、たとえばラジウムから出てくる α 粒子というのが、霧箱でどれぐらいの長さ走って止まるかというので、そのエネルギーをきめることなどが行なわれていたんですけども、これはまず霧箱を作って、その霧箱に合わせた適当な場所にラジウムを置けばいい。ところが宇宙線というのは、横からくるのもありますけれども、だいたい上から下にくるわけで、霧箱のほうをそれに合わせて設計しなくちゃいけない。それまで使われた霧箱は、横型といいますか、横に走ってくる粒子を検出するようにつくられている。縦型にしたって原理的にはいいわけですけども、縦にすると装置を動かす機械的な個所で技術的に非常にむずかしいことがおきますので、自然横型に作ったわけです。ところが、宇宙線は上から下にきますから、縦型の霧箱を作らねばならない。そういうわけで、横のものを縦にしなくちゃいけない。横のものを縦にするぐらい、わけないじゃないかと考えるかもしれないですけども、それがなかなかそうはいかない。そうはいかないわけを詳しくお話していると時間がかかるから省略いたしますが、とにかく横のものを縦にする場合に、機械の仕かけを全然新しく変えなくちゃいけない。同じ作りかたではできないということがございます。

こういうわけで、とにかくパイオニアといいますか——パイオニアというのは多少気がひけますのは、外国のほうがほんとの意味でのパイオニアなんで、こちらはその後についていくという意味では、あまりえらそうなことはいえないんですけども——しかし、とにかく日本ではパイオニアであったような仕事を、理化学研究所の人たちが引き受けてやりはじめたわけです。それで、それを引き受けた先人たちはヨーロッパやアメリカの人たちの知らないいろいろな問題を一つ一つ解決していかなければならないという、そういうことがあったのです。

このようなパイオニアの仕事がどんなに困難であったかを示す例をもう一つお話ししましょう。

私が仁科研究室に入りましたとき、いまは亡くなられましたが、後に原子力

関係の仕事で活躍された嵯峨根達吉くんが私より前に研究室に入っていて、実験作業の主任のような役目をしていた。多分、仁科先生と彼の討論の結果生れたアイディアだと思うのですが、ガイガー計数管と霧箱とを結びつけて働かそうという、そういう装置を作っていました。さっき宇宙線の研究に霧箱を使うということをお話しましたが、それまでは霧箱をやみくもに作動させて、宇宙線がきていてもきていなくてもかまわずに写真をとっていた。だから大変むだがあったのみならず、何とか写真がうつっても、ちょうど宇宙線粒子がきた瞬間に機械が作動するとはかぎらないので、ほとんどがぼんやりしたつまらない写真でしかなかった。そこで、ガイガー計数管を霧箱の上にしかけておいて、宇宙線がやってきて計数管を働かせたときだけ、しかもちょうどその瞬間に霧箱が作動するようにするという、そういう装置なのです。ところが、何しろさっきお話したように計数管にしろ、それをリレーにつなぐためのサイラトロンにしろ、日本ではまだすぐ手に入るという状態にはなっていない。だから、この装置を完成するのにたいへんな時間がかかりました。

そのころのある日、私が研究所の図書室で本を読んでいたときに、嵯峨根くんがイギリスの科学雑誌を手にして私のところへやってきて、「やられちゃったよ」というのです。よくききますと、彼のせっかくのアイディアとまったく同じ着想をイギリスのブラケットという学者ももっていて、しかもブラケットのほうはすでに装置を作りあげ、それを使っていろいろ面白い現象をたくさん発見したというのです。私はそのときの嵯峨根くんの残念そうな顔つきを、いまでも忘れられません。このほかにも、仁科研究室で出たいくつかのアイディアや、実際にやりあげた仕事が、発表する寸前にヨーロッパやアメリカの学者に先手をうたれ、先に発表されてしまって、たいへんくやしい思いをしたことがいくつもあります。ただ一つ先手とられてよかったなあと思ったのは、さっきの雷の話のときだけでした。

日米サイクロトロン of 不思議な因縁

しかし、この時期に、日本でたいへん幸いでありましたことは、その当時新しい大学ができたり、あるいは前からある大学に新しい講座が作られたりしたということです。いま、もと大阪大学教授の菊池正士先生がうしろから入場されまして、たいへんタイミングよくその席におつきになりましたが、先生は

大阪大学が新しくできたとき、そこの物理学教室に理化学研究所から移られることになりました。菊池先生は電子線の回折という仕事を理化学研究所でやっておられた。電子は、粒子であるようでもあり、波であるようでもあるんですが、その波であるようなということを実験的に示された、世界的な仕事がおありなんです。それまではそういう方面の仕事をずっとやっておられたんですけども、ちょうど大阪大学ができます時期が、いまの昭和7年の、たくさんの発見の時期のちょっと前と合わさったものですから、先生は大阪に行ってからやる仕事の計画を当初考えられたものからすっかり変えられまして、さっきの Cockroft の機械を大阪大学で作ろう、そういうことに踏み切られました。それで Cockroft の機械が大阪にできますし、それから京都大学その他にも同じような装置ができて、日本でも原子核物理がほうぼうでやられるようになりました。そうして次の時代をにう人たちが育っていく基盤が少しずつできていったのです。

理化学研究所でも、Cockroft の装置を作ろうという動きがあったんですが、そうこうしておりますうちに、アメリカでサイクロトロンという機械が発明されました。さきほど、今年度の仁科記念賞の受賞者発表のとき申しましたように、加速器にはまるい格好をしたのと細長い格好をしたのがありますが、このサイクロトロンというのは、まるい形をした機械のいちばんはじめに開発されたものであります。これが非常に性能がいいということがわかってまいりましたので、仁科研究室では、ほかのところで Cockroft の機械を作るんなら、じゃ、サイクロトロンを作ろうやということになりました。

いまは非常に巨大なサイクロトロンが作られておりますが、その当時作られましたのはそんなに大きなものではありません。直径26インチのまるい平べったい太鼓のような格好をした真空の箱を、ほぼ26インチの太さの電極をもった電磁石の極の間に置き、そしてその真空箱のなかで粒子を磁場の力でぐるぐる回しながら加速するという、そういう仕かけであります。この26インチの太さの電極といった大きな電磁石を作るのはたいへんなこと。当時の工業水準からみますと、いろいろと相まわずかしいこともあり、またたいへんに金のかかることであったわけですが、さいわい長岡半太郎先生という、物理学の大長老が理化学研究所におられまして、この方がいろいろ明治時代のことをよくご存じであった。

といいますのは、むかし、いまの発信用の真空管というものがまだ発明されていないころには無線電信の電波を作るのに、私くわしいことは知らないのですが、きくところによると、何でも電磁石の磁場のなかで強い放電をさせるというやり方で電波をおこしたんだそうです。長岡先生は、その無線電信用の電磁石が確かにどこかにあるはずだ、原ノ町というところに無線電信の発信所があって、そこでそういう大きな電磁石を使って電波を出していたはずだ、ということを知っておられました。そこで、原ノ町に行きまして、その磁石の行方をいろいろ探して、どっかの倉庫にあったのを見つけて、それを使ってサイクロトロンを作った。そういう話がございます。こういうように電磁石がすぐ手に入ったことはたいへん幸いなことであり、そのためこのサイクロトロンはきわめて短期間にあまり金をかけずに完成されました。そしてまた、これはたいへんうまく働きまして、これを使っていろいろな研究が日本でもやれるようになりました。

これはおもしろい話なんですけれども、サイクロトロンは、アメリカのローレンスという学者が発明したわけですが、彼の最初に作りましたサイクロトロンは、最初はこの机の上ののるぐらいの小さなものだったんですが、それでうまくいくという目あてがついたので、次に26インチの大きさのものを作った。26インチと寸法が日本のと一致したのは、アメリカにも無線電信に使った古い電磁石がありましたので、それを使った。そして、むかし原ノ町からアメリカに無線電信を打ちますと、アメリカでも同じ形の電磁石を使って日本に返事をよこした。そういうわけで、不思議な因縁と申しますか、少し年寄りくさい話になりますけれども（笑声）、一つの挿話でございます。

そういうふうには、いろいろ古道具を探したり、ちょうどボンコツ屋に行って、いろいろこわれかけた自動車の部品を集めてきて、オートバイを作ってみたりする趣味の方がおありだと思えますけれども、それに似たようなこともやっていた。当時の理化学研究所、あるいは大阪大学でもそうだったと思うんですけれども、そういうところで実験の仕事をしている方は、よくボンコツ屋などを訪ねる必要もあったわけです。いまでもそうだと思うんですけれども、実験をおやりになる方は、秋葉原のたいへんいいお得意だということを伺ったことがあります。実験やる装置の部品が、秋葉原あたりで、案外いいのが手に入ることがある。

外国に追いつき、追い越すために

そろそろ結びに入るんですけども、その前に一つだけつけ加えておきます。宇宙線の研究をやるすのに、先ほど申しましたウィルソンの霧箱を使うわけですが、そのときに大きな磁石があったほうが面白い研究ができる。はじめ仁科研究室では、あまり大きくない、さしわたし40 cm ぐらいの、電線をたくさんグルグル巻いた、しかし鉄の芯のない電磁石を作りました。というのは、その芯のところへ、いまのウィルソンの霧箱を入れなくちゃいけない。そういうものを作ったんですけども、それでは間に合わない。ウィルソンの霧箱を使って、もちろんさっきお話した計数管と連動するやつを使って、それを磁石の間において、宇宙線の性質を調べるといふ実験がさきほどお話ししましたイギリスのブラケットのところで非常に徹底的にやられまして、そこでいろいろな発見がありました。そこで仁科先生は、日本でもイギリス程度のことをやらなければいけないと考えられまして、ものすごくでかい電磁石をつくりました。これは鉄が入っております。その鉄のかたまりみたいな電磁石を作ったんですけども、これを運転するための電源ですね、電流をどうして確保するか、電磁石に使う電流は、直流でなければ具合が悪いわけですが、それが一つの点。それから一つの点は、電圧は100ボルトか200ボルトでいいんですけどもものすごく電流をくう。アンペアをくう。それで、交流を直流に直すことは、やってやれないことはないんですけど、そのものすごくアンペアの大きいのをうっかりやりますと、ヒューズはとばないようにしっかりしたのをつけておけばいいんですけど、隣近所どころか文京区内の相当遠方までの電流をみんな理化学研究所ですい取っちゃう。そうしますと、ほうぼうの家の電燈が暗くなったり、冷蔵庫のモーターが止まったり、これは近所迷惑で、いまのことばでいうと公害ということになるんですけども（笑声）、うっかりすると訴えられる。

そこで考えられましたのが横須賀の潜水艦、むかし潜水艦は、蓄電池をたくさん積んで、潜水中は蓄電池の電気で動かしていたわけです。その蓄電池を充電するために、直流の、それから非常に短時間に充電しなければいけないというので、非常にアンペアの大きな特殊な電源が横須賀の海軍のどっかにあるというので、それを使わせてもらおうということになりました。そこでこの大きな鉄のかたまりのような電磁石を霧箱と研究室の若者の1人といっしょに横須

賀まで運んで、そこでその電気を使わせてもらって実験をする。そのときに、理化学研究所から横須賀の工廠ですか、海軍のほうにあてた依頼の手紙があります。これは当時の空気を推察されるのにちょうどいい文章ですから、ちょっと読んでみます。(46ページ「仁科先生が海軍工廠に実験延長を依頼した文書」)

こういうことをやって、外国に負けないようにまだあと 600 本写真をとりたい、なんとかして、先手をうたれたブラケットに追いつき追い越したい、そういうみんなの気分がこの手紙によく出ています。とにかくいろんな苦勞をしたものです。

時間がきましたのでここでやめますけれども、要するに物事を、ほかの国に遅れている分野を何とかして追いつき追い越そうということを出発しますと、いろいろな苦勞があるわけです。いま日本の科学技術はどこの国にも負けないと思っている方もあるかと思うんですけども、それはたしかに、いまお話ししました時代から見ると進歩したと思います。いまでは、日本でも先ほど申しました放電管のようなものは、わけなく作ってもらえます。加速器やその部品を作った経験のあるメーカーもたくさんあります。また原子核物理そのものでもいろいろ世界的な成果が出ています。しかし、こちらが進歩すれば、また向こうも進歩するわけなんで、ある分野では現在、実際に向こうに追いつき、あるいは向こうを追い越したようなものもあるにちがいませんけれども、しかしいまでもなおいろいろ遅れている点もある。

そういうわけで、現在でも多かれ少なかれいろんなところに、むかしと同じような問題がやっぱりあるのではないか、そう考えますと、当時の、ゼロから出発して原子核物理を日本でやろうとした「核物理学事始」の先人の苦勞を、この 15 周年あるいは 40 周年の機会に思い出してみるのも意味あることではないでしょうか。私は横から傍観していた形でありますけれども、その「事始」の時期にその現場にいあわせたということは、私にとって得がたい経験であった、そういうふうに思っているわけでございます。

時間が 2 分ほど超過いたしました。次の講演のじゃまをしてはいけませんから、このへんで私の話は切り上げることにいたします。(拍手)

仁科博士からブラケット博士への手紙

15. 5. '33

Dear Dr. Blackett,

I saw the very important paper (Proc. Roy. Soc., vol. 139, 699, 1933) of yourself and Occhialini on the tracks of penetrating radiation. It was especially interesting for me, because we have been working for more than a year on exactly the same problem using the same method in principle, by which the high speed particles associated with cosmic rays can be made to take photographs of their tracks. At the time when your note appeared in Nature last year, our apparatus was just being constructed, but owing to different circumstances our progress has been very slow. Now we hope soon to get some photographs with our apparatus.

From our experience we cannot but admire your beautiful photographs and must congratulate you on your success. In our case something seems to be wrong with our method of illumination and I should be very much obliged to you, if you would be so kind and let me know the following points: —

(1) What are the dimensions (*i.e.* the inner and outer diameters and length) of the capillary mercury lamp which you mentioned in your paper, and of what is the capillary made?

(2) What is the capacity (kVA) of your 4000 volt transformer, and how do you use it for igniting the flash? (Whether you use any condenser etc.). How large is the current through the capillary mercury lamp?

仁科研究室草創期の宇宙線霧箱実験について

(当時の状況を回想して竹内証氏が書いたメモに基づいて記した。文責 玉木英彦)

霧箱はピストン型、直径 15 cm ぐらい。

カメラは組立暗箱で、取枠の中に中枠を入れ、手札型の汎色乾板を使っていたと思う。

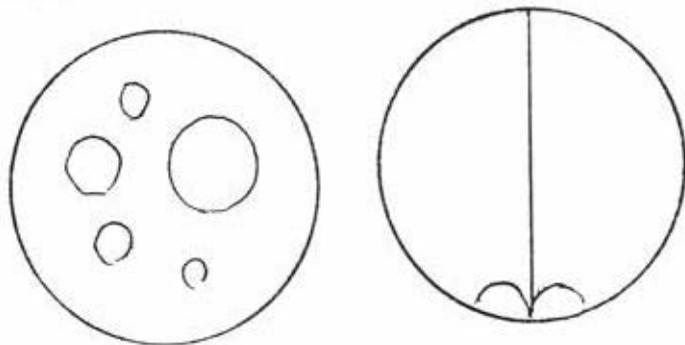
光源は毛髪ぐらいの細いタングステン線をコンデンサーの放電電流で爆焼。

コンデンサーは大きな紙コンデンサーを十数個、容量などは「実験ノート」を失ったので思い出せない。充電にはケネトロンで整流、電圧は 6~7 kV ぐらいのように思う。

タングステン線は、4本を張った保持板を回転して、1本の爆焼後、つぎのを用意できるようにしてあった。

磁界は、ヘルムホルツ型空心コイルに数十アンペアの電流を流してつくった。

これで撮影されたなかに、図のようなものがあった。多数の円形の出ているのは、磁界の強さと曲率半径からラジウムのガンマ線などよりエネルギーがずっと大きいので、宇宙線に関係があると確認できた。直線の飛跡のあるほうは、霧箱の壁のところの二つの円を電子の散乱と考え、直線の飛跡が同一点を通っているのを偶然なのかしらといぶかっていた。もしそれらをその一点から出ているとみなすなら、二つの円の一方は陽電子の飛跡だということになるが、シャワーとか陽電子とかいう考えがまだ出ないころのことで、そのまま見のがされてしまった。



爆焼タングステン線の光源は、その後、水銀灯に変えられた。しかし最初はやはりコンデンサーを用い、水銀灯を通して放電させたので、高圧放電で石英毛細管が破裂したりして具合が悪かった。仁科博士がブラケットにあてた手紙を書いたころは、そのようなやりかたをしていた。

その後、コンデンサーを使う高圧放電をやめて、変圧器の二次電源を水銀灯で短絡し、その結果の大電流を一次電源のサーキットブレーカーで遮断する方法がとられた。これだと水銀灯の発光時間が長くできる。これが、ブラケットが手紙でしらせてきた方式であろうと思われる*。

飛跡をはっきり撮影するために必要なことは、1. 光源の明るさ、2. カメラのレンズの明るさ、および 3. 感光材料の感度であるが、2と3については、まもなくライカのカメラとフィルムが使えるようになって、ずっと便利になった。

* ブラケットからきた手紙は、まだ見つからないが、その手紙に対する礼状の下書きはある。そのなかで仁科博士は

We shall soon try your system, which I hope will help us very much.
と書いている。

仁科先生が海軍工廠に実験延長を依頼した文書(43ページ参照)

昭和十二年四月十七日

東京市本郷区駒込上富士前町三一番地
財団法人 理化学研究所
所長 工学博士 大河内正敏
子爵 齋藤 大内 正敏

横須賀海軍工廠長 古市開雄殿

宇宙線研究追加御願

拝啓宇宙線研究ノ件ニ就テハ昨年来多大ノ御配慮ヲ
辱フシ洵ニ難有奉存候 同研究モ予定ノ通り進捗仕
リ三月末日ヲ以テ実験ヲ終了致シ約二四〇本ノ宇宙
線飛跡ノ撮影ヲ得目下其ノ検討中ニ有之候 然ルモ
最近英國ノ研究者「ブラケット」ハ約八〇〇本ノ
宇宙線飛跡ヲ得其ノ研究結果ヲ発表致候 其論文ハ
去ル四月上旬當地ニ到着致候ニツキ精細ニコレヲ檢
討致候結果該方ニ於テモ略々同數ノ飛跡ヲ得ルニ非
サレハコレニ匹敵スル研究結果ヲ得クレスルハト明
瞭ト相成申候 就テハ折角ノ実験ヲ有意義ナラシム
ル為更ニ約六〇〇本ノ飛跡ヲ撮影スルノ必要ニ迫ラ
レ申候ニ付テ洵ニ勝手ケ同數存候得共何卒事情御諒
察ノ上向フ六箇月間同実験ノ追加実施方御許可相成
度此段及御願候也

財団法人 仁科記念財団 役員名簿

(昭和57年9月現在)

理事長	久保 亮五				
常務理事	玉木 英彦	宮崎友喜雄	村越 司		
理事	芦原 義重 太田新太郎 永野 重雄 藤吉 次英	安藤 豊祿 茅 誠司 南部 政二 堀田 庄三	石川 六郎 駒井健一郎 鳩山 道夫 宮島 龍興	稲山 嘉寛 佐波 正一 土方 武 吉川 清一	井上 薫 武見 太郎 平岩 外四
監事	小山 五郎	佐々木秋生	瀬川美能留	田島 英三	
評議員	赤堀 四郎 石川 六郎 岩佐 凱夫 鳳戸 健二 小谷 正雄 佐々木秋生 竹内 征 中根 良平 仁田 勇 林 主税 伏見 康治 宮島 龍興 吉川 清一	芦原 義重 石橋幹一郎 植村 泰忠 鎌田 甲一 小林 稔 佐藤 尚 竹中 練一 永野 重雄 鳩山 道夫 土方 武 藤吉 次英 向坊 隆	有山 兼孝 伊藤 達二 江戸 英雄 茅 誠司 駒井健一郎 佐波 正一 武見 太郎 南部 政二 花村仁八郎 平岩 外四 堀田 庄三 村越 司	安藤 豊祿 稲山 嘉寛 太田新太郎 木村健二郎 小山 五郎 杉本 正雄 田島 英三 西島 和彦 浜田 達二 弘世 現 三浦 功 山崎 敏光	池田 長生 井上 薫 小田 稔 久保 亮五 坂井 光夫 瀬川美能留 玉木 英彦 西村 純 早川 幸男 福井 伸二 宮崎友喜雄 山本源左衛門
運営委員	池田 長生 豊沢 豊 鳩山 道夫 丸森 寿夫	小田 稔 中根 良平 原 康夫 三浦 功	鎌田 甲一 西島 和彦 浜田 達二 山崎 敏光	上坪 宏道 仁科雄一郎 広田 栄治 芳田 壺	田島 英三 西村 純 藤井 忠男 和田 昭允
事務局	横山 すみ	和田千代子	高橋 宝子		

