

仁科芳雄博士生誕 120 周年記念講演会

日本現代物理学の父

## 仁科芳雄博士の輝かしき業績

コペンハーゲンから理研へー 素粒子物理学のあけぼの

**小林 誠** 日本学術振興会理事  
高エネルギー加速器研究機構特別荣誉教授

ミューオンの発見

**西村 純** 東京大学名誉教授  
宇宙科学研究所名誉教授

ウラン-237 と対称核分裂の発見

**池田 長生** 筑波大学名誉教授  
元日本アイソトープ協会常務理事

2010 年 12 月

本財団の2010年度の仁科記念講演会は次のように開かれた。この仁科記念財団冊子 NKZ-52 はその講演録である。

2011年3月 仁科記念財団

**第56回定例 仁科記念講演会 仁科芳雄博士生誕120周年記念**

「日本現代物理学の父 仁科芳雄博士の輝かしき業績」

日時： 2010年12月6日（月） 16:00～17:30

場所： 東京大学理学部1号館 小柴ホール

講師： 小林 誠 日本学術振興会理事  
高エネルギー加速器研究機構特別荣誉教授

西村 純 東京大学名誉教授  
宇宙科学研究所名誉教授

池田 長生 筑波大学名誉教授  
元日本アイソトープ協会常務理事

共催： 東京大学理学部物理学教室、同 化学教室、  
理化学研究所仁科加速器研究センター

後援： 仁科記念財団

NKZ-52

第56回定例 仁科記念講演

「日本現代物理学の父 仁科芳雄博士の輝かしき業績」

© 2011 Nishina Memorial Foundation





# コペンハーゲンから理研へ

## —素粒子物理学のあけぼの—

小林 誠

日本学術振興会理事・高エネルギー加速器研究機構特別荣誉教授

私からは、「コペンハーゲンから理研へ」というタイトルで、仁科先生のヨーロッパ留学から理研の仁科研究室創設の頃までの仁科先生のご研究と当時の時代背景についてお話ししようと思います。見渡したところ私よりシニアなプロの物理屋さんの方がたくさんいらっしゃいますが、その方たちは、耳をふさいでいていただきたいと思います。

早速ですが、仁科先生は1890年の12月6日、ちょうど120年前の今日、岡山県の里庄町にお生まれになられます。そして1918年に東京帝国大学をご卒業になり、1921年に理研から派遣されてヨーロッパに向かわれます。最初はイギリスのケンブリッジのキャベンディッシュ研究所でラザフォードの下で学ばれ、翌年にはゲッチンゲン大学に移られ、ここではボルンやヒルベルトの講義を聞かれたということでもあります。そして、1923年の春にコペンハーゲンのニールス・ボーア研究所に移られます。1928年に帰国されますが、その直前に有名なクライン・仁科の公式の論文を発表されます。その後、1931年に理研仁科研究室を創設されるということでもあります。

このころは、ちょうど量子力学が出来上がる時期であります。その発展をその中心地で体験されたわけではありますが、さらに歴史に残るクライン・仁科の公式の業績を挙げられたのであります。そこで、まず最初にこの頃の量子力学をめぐる物理学の状況を簡単に復習しておくということから始めたいと思います。ここでは、量子力学の成立を1913年のボーアの原子模型から1924年頃までを前期と呼び、1925年から1927年にかけてを後期と呼ぶことにいたします。もちろんこれより前にプランクの公式があり、アインシュタインの光子量子仮説があるわけではありますが、ここでは1913年以降のことを考えます。

まず、前期でありますけれども、1913年にボーアの原子模型が提唱されます。これは水素原子のスペクトルを見事に説明するわけであります。高校の教科書にも出てくるお話であります。電子の古典的な軌道に量子条件というものを課して、その軌道間をジャンプするときエネルギー差に相当する光が放射されるという仮説

であります。このルールはそれまでの物理学から容認しがたいものでありますけれども、水素のバルマー系列というものを見事に説明しており、何らかの真理を表しているということははっきりしていたのだと思います。この考えに基づきまして、さらにスペクトルの微細構造をゾンマーフェルトが説明することに成功します。それから電場をかけたときのスタルク効果もこの考えの範囲でうまく説明できたという経緯があります。

しかしこの議論は電子が一個の時にはある程度うまくいくのですが、複数の電子があるとどうしていいかわからない。それにも関わらず、ボーアは電子軌道のシェル構造という考えにたどり着きます。それで元素の周期律表を説明しようということを試みます。現在から見ると不完全ではありますけれど、大筋においては正しいといえるのではないかと思います。

ボーアのこの原子構造の考察から生まれた一つの成果が、ハフニウム、72番の元素の発見であります。当時、72番の元素というのは未発見であり、それがランタノイド、今話題の希土類であります。ランタノイドがどうかというのが問題であったわけです。ボーアは彼のシェル模型に基づいて、ランタノイドが要するに内側の電子軌道のシェルに電子が順番に詰まっていくものだという事を見抜いたと言っていると思います。この軌道に何個電子が入るかということが問題でありまして、ボーアは彼自身の考察から、ランタノイドは71番までで、問題の72番は、



ボーア研究所 (1927年)  
仁科芳雄、青山新一、堀健夫、木村健二郎

周期律表で言うと第 IV 族に属してジルコニウムの下に位置するべきだということで、ジルコニウムの鉱石中に 72 番の元素を探しなさいということを示唆する。それにしたがって、コスターとヘヴェシーが実際に 1922 年に 72 番のハフニウムを発見するわけであります。1922 年の 12 月のことだそうでありまして、このときちょうどノーベル賞受賞のためにストックホルムにいたボーアのもとにこの発見の知らせが届いたと言われております。ハフニウムというのはコペンハーゲンを表すラテン語のハフニアという名前から命名されたそうであります。

さて、ボーアの原子模型は基本的にそのスペクトルに対するルールという形で与えられますので、その発展も基本的にスペクトルを中心に展開したわけであります。したがって X 線分光というのが実験的には当時の中心的なテーマの一つであったというふうに思われます。仁科先生もコペンハーゲンでは、X 線分光の仕事に取り組まれたわけであります。そしてこの頃のご研究の中で、先ほどのハフニウムに関係するものがありますのでそれをちょっと説明してみたいと思います。

ハフニウムというのは先ほど言いましたようにジルコニウムのすぐ下に位置し、共に第 IV 族であって、原子番号で言うとジルコニウムが 40 ですから 32 も違う。電子の数がそれだけ違うわけですが、にもかかわらずイオン半径がほとんど等しい。そのため、化学的に分離することが非常に難しいものだそうであります。そこでその鉱石中のハフニウムを定量するために、X 線を使うということをやられたのであります。これは先ほどのコスターという人と一緒に始めたお仕事であります。コスターがコペンハーゲンを離れた後、仁科先生が改良を加えてそのご研究を続けられたということであります。また、ランタノイドのあたりを中心とする X 線の L 吸収スペクトルのご研究というのを系統的にやられて、これが後に仁科先生の学位論文になったということであります。こうして実験家としての実績を積んでおられたのがこの時期ということになるかと思えます。

さて、量子力学の進展に戻りますけれども、先ほども言いましたように、前期の量子力学というのは、原子のスペクトルを中心に展開したわけでありますが、最終的にはパウリの排他原理やスピンの存在まで明らかになるという進歩を遂げます。しかし量子力学の原理という意味では、その謎に満ちた状態を抜け出すことはできなかったと言えると思います。軌道を古典的に計算しそれに量子条件を課すという、木に竹を接ぐと言われる方法では、理論の第一原理にはなりにくいものだったのだと思います。

1925 年になりますと、こうした状況が大きく変わります。それは、この年の 7 月でありますけれども、ハイゼンベルグがいわゆる行列力学とよばれる量子力学の定式化の論文を発表します。ハイゼンベルグはその論文の中で物理量の掛け算にあ



るルールを設けているのですが、それが行列の掛け算だということはその時点では知らなかったという話であります。それが行列の掛け算であるということをボルンがすぐに指摘し、ディラックとかそういう人たちによって取り上げられて発展するわけであります。そして、その年の秋にはパウリがその行列力学の方法で実際に水素原子のエネルギーレベルを導いてみせます。行列力学の手法で水素原子のレベルを導くのは今でも難しいのですけれども、このパウリの結果のインパクトは相当のものであったと言えるのではないかと思います。

さらに1926年の1月になると、シュレーディンガーがいわゆるシュレーディンガー方程式の論文を発表します。これは、微分方程式を解いて、やはり水素原子のレベルを求めて見せます。わずか数ヶ月の間に、2つの全く見かけの異なる方法、議論から、ボーアの求めたスペクトルの公式が導かれるということになったわけです。シュレーディンガーは当初、波動関数を実在のものと考えて、ボーアとの論争になったというのは有名な話でありますけれども、確率による解釈というのが広く受け入れられることになります。わずか2、3年の間に量子力学の骨格が出来上がったというのが、この当時の経緯であります。私の想像でありますけれども、仁科先生はこのハイゼンベルグに始まる急速な理論の進展というものを目の当たりにされたわけでありまして、理論の研究の必要性を強く感じられたのではないかと思います。仁科先生は1923年に、ボーアの下で研究したいという手紙をボーアに出されておりますが、その中でも理論の研究もしたいということを述べられておりますけれども、この進展を見て一層その思いが強くなったのではないかと思います。それが、クライン・仁科の公式のお仕事につながったのであらうと思います。

そこで、クライン・仁科の公式の話に進みたいと思いますけれども、仁科先生は1927年に一旦コペンハーゲンを離れます。そしてしばらくパリに滞在され、その後ハンブルグにしばらく滞在されて、そこにはパウリがいたわけですが、パウリの下で量子力学の理論の勉強をされたということでもあります。そしてその後1928年の春に、コペンハーゲンに戻り、そこでO. クラインとクライン・仁科のお仕事を始められたのであります。クラインという方は1894年生まれのスウェーデンの理論家であります。クライン・ゴールドン方程式とか、クライ



O. クライン (1894-1977)



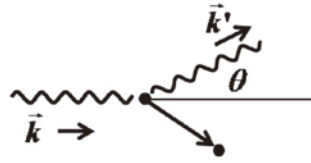
ン＝パラドクスとか、カルツァ・クライン理論というところにその名前が残っている人であります。クライン・仁科の公式というのは、光子と電子の衝突、これをコンプトン散乱といいます、この散乱の断面積を与える公式であります、これを理論的に計算したということです。

### クライン・仁科の公式

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{e^4}{2m^2c^4} \frac{v'^2}{v^2} \left( \frac{v}{v'} + \frac{v'}{v} - \sin^2 \theta \right)$$

$$v' = \frac{v}{1 + (hv/mc^2)(1 - \cos \theta)}$$

$$v = c|\vec{k}|, \quad v' = c|\vec{k}'|$$



ちょっと余談になりますがけれども光の粒子性というのは、アインシュタインの光電効果の理論が有名であります、これは1905年でありますけれども、これによって光の粒子性が直ちに確立したということではないようです。1923になってコンプトンが光子と電子の衝突反応を調べます。散乱後に出てくる光子の振動数が、散乱角に応じて変わる、つまり普通の粒子と同じように、衝突で運動量を失うということをしちんと確かめることによって、その粒子性というのが初めて確認されたということになります。ちなみに、photonという言葉は1925年以降に初めて登場し、それまではlight quantumと読んでいたということです。日本語にしますと光子と光量子でたいした違いはないのですが、光子という言葉はそんなに古くはないということになります。

クライン・仁科の公式は、コンプトン散乱の微分断面積を与える式でありますけれども、もともと仁科先生はX線の吸収の実験をされていたわけで、理論の仕事がしたいというときにこのテーマを選ばれたのは自然な流れと言えるかもしれません。しかし、それまで実験の研究をされていたのが、理論で最先端の仕事をするのはなかなか大変なことであっただろうと思われれます。

この計算で注目すべきことは、電子の状態を記述するために、ディラック方程式を使っていることであります。言うまでもなくディラック方程式は、電子の相対論的な運動を記述するためのものであります。だからこそ今でも正しい散乱公式が導けたわけではありますが、ディラック方程式は1928年の初めに提唱されたものです。仁科先生のお仕事は、1928年の春頃始まったと思われれますので、その速さという

のは注目すべき点ではありますが、それ以上に、ディラック方程式にはいわゆる負のエネルギーの解の存在という問題を抱えておりました。ディラック方程式には  $mc^2$  より上、 $-mc^2$  より下の両方に解がありますが、量子力学ではその負のエネルギーの解を単純には無視できません。正のエネルギーの電子が負のエネルギーのところにジャンプして光を放出してしまう可能性があるわけですから、この負のエネルギーの解があるということは大変困ったことであります。当初これをどうしたらいいのかというのは全くわからなかったわけです。

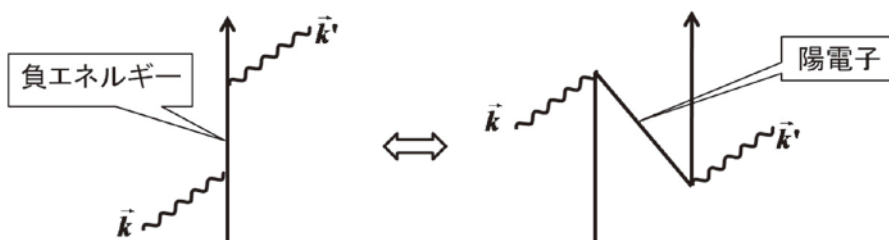
その頃クライン・仁科のお仕事が出てくるのでありますが、ちょっと話が前後しますけれど、まずこの負のエネルギーの問題がその後どう進展していくかを先に申し上げておきますと、まず、1929年の末になってディラックは負のエネルギーの問題を解消するために、実は負のエネルギーは最初から電子が詰まっているのだということを考えます。そして、もしその負のエネルギーに穴が開けば、それが正の電荷を持った粒子に見えるということを指摘します。当初はそれを陽子としようというのがディラックの考えでありましたが、いろいろな不都合がありますので、結局陽子説は放棄されて、今で言う陽電子の存在という結論に到達します。それは、1931年のこととされております。そして1932年にはアンダーソンによって陽電子が実験的に発見されるわけです。

では、クライン・仁科の公式では、この負のエネルギー解をどう扱っているかというのが問題であります。この計算は、いわゆる摂動論というものに従うと、電子が光を一旦吸収して、それがまた終状態の光を放出するというプロセス（および先に終状態の光を放出し後から始状態の光を吸収するというプロセス）を計算します。そして、中間の電子状態としてあらゆる状態を足し上げなさいというのが摂動論のルールであります。クライン・仁科の論文は、計算方法が少し違いますが、この中間状態に、負のエネルギーの解も足しあげたことになっております。当時、要するに邪魔者で、どう扱ってよいか分からなかった負の解ではありますが、それを取り入れて計算したわけであります。もし、その結果が実験と比べて一致すれば、もちろんその扱いは正しいという証明になりますけれども、残念ながら当時はコンプトン散乱の実験の精度はそれほど良くなかったので、そういう意味のチェックはできなかったということでもあります。

ここで一つ問題が生じます。もしディラックの言うように負のエネルギーには全て電子が詰まっているとしたら、この中間状態で電子が負のエネルギーに落ちることとはできないわけですから、この計算とは矛盾するはずです。

その謎解きはこういうことになります。通常の電子が光を吸収して1電子の中間状態になるという過程以外に、ディラックの空孔理論に従えば、一旦電子と陽電子

の対生成をして、あとから陽電子は電子と対消滅する、つまり中間状態には電子、陽電子、電子という状態も勘定しなければいけないということになります。空孔理論に従ってこういうプロセスを計算したのと、中間状態に負のエネルギーの解を入れたものが、実は同じ結果を与えるということで、正しい答えが出たということになります。1929年にはディラックはこのことを正しく認識していたようでありまして、ディラックからボーアへ宛てた手紙の中に、今の説明がきちんと書かれているということでもあります。ですからディラックも、自分の方程式の解釈を考える上で、クライン・仁科の公式というものを十分に意識して、それを考えていたのだということが想像されるわけがあります。



さて、仁科先生は、クライン・仁科の公式という最新の成果をお土産に1928年に帰国されます。しばらく理研の長岡半太郎先生の研究室に所属されたあと、1931年に仁科研究室を立ち上げられます。これが日本における原子核素粒子の研究の拠点になります。仁科研究室は理論から実験まで幅広く手がけたわけですが、初期の理論のメンバーとしては、時間的にオーバーラップがあったり、なかったりではありますが、朝永振一郎先生、坂田昌一先生、小林稔先生、玉木英彦先生、有山兼孝先生などが理論のメンバーとして所属されたということでもあります。

また、この時期、仁科先生は日本各地で量子力学の講義をされます。京都大学で集中講義をされた時には、湯川秀樹・朝永振一郎両先生もこの講義を聴かれたということでもあります。また、仁科先生はヨーロッパで築いた人脈に基づきまして、1929年にはハイゼンベルグ、ディラックを招聘されます。それからまた、1937年にはボーアを招聘されたということでもあります。1937年というのはまた、湯川先生の予言した粒子と思しき新粒子が発見された年でもあります。これは次のお話の主題でありますので、私の話はここまでとさせていただきます。



理化学研究所提供

仁科

京都大学での集中講義の際の記念写真

# ミューオンの発見

## —仁科研究室の研究について—

西村 純

東京大学名誉教授

ただいまご紹介にあずかりました西村です。小林さんが話されましたように、仁科先生は1928年に日本に帰られ、翌年、理研の長岡研究室に所属が決まりました。31年には仁科研究室を創設されておられます。帰国後、先生はコペンハーゲンで研究してこられた新しい物理学の普及や発展のために大変努力され、日本におけるこの分野の発展の基礎を築かれたことは、よく知られているところです。実験分野で最初に手がけられたのは宇宙線の研究です。先生の研究室で行われた宇宙線の研究は国際的にも非常に高く評価されている成果がいくつかありますが、今日は特にミューオンの発見に関わる問題についてお話したいと思います。

宇宙線の研究は日本では戦後非常に盛んになりました。戦前のことはつい忘れがちですが、仁科先生の時代にすでに国際的水準を抜くレベルの研究がいくつか行われて、戦後における宇宙線研究の発展に大きな影響を及ぼした事は心にとめておくべき事柄です。

仁科先生が宇宙線の研究に取りかかられた1930年代は、素粒子といえば電子と陽子と中性子、それからニュートリノは予言されていますがまだ見つかっていない。素粒子の種類もその程度ではないかと思われていた時代でした。その中でミューオンはこれらと違う素粒子として、真っ先に見つかった中間子です。ミューオンはその発見の後（ミューオンというのはご存じのように初めは湯川先生の提起された中間子だというふうに思われていたのですが）<sup>註1)</sup>、いくつか中間子が見つかり、現在の素粒子物理学が出来上がるきっかけになった重要な素粒子です。仁科財団で関係の研究者が議論しているうちに、ミューオン発見の中で仁科研究室の果たした役割が、国際的にどのような評価されているのか今ひとつハッキリしていない。先生の生誕120周年のこの機会に詳しく調べて、明確にしておく必要があるのではないか、ということになりました。時間とともに歴史も忘れ去られがちですので、仁科財団でこの問題に関心を持っている方々<sup>註2)</sup>が集まり、関係する原論文や資料を調べる事にしました。財団の記念室に埋もれている資料を掘り起こし、2年ばかり前から数回にわたって、仁科研のミューオンの観測に関する研究経過や科学的な評価も



加えて検討会を行い、議論してまいりました。

資料として取り上げたのは、原論文は勿論ですが、当事者や科学史の専門家の方々が書かれた本などです。それに加えて、仁科財団の記念室に所蔵されている霧箱の写真や観測をやられた竹内（柁）さんのメモ、仁科研究室の資料などを調べましたが、御参考に文献として最後に掲げておきました。

(II. 関連する文献、III. 参考資料)。

この中には最近出版された仁科書簡集という本があります。これは先生がヨーロッパに行かれた1919年からお亡くなりになる1951年までの書簡集です。1930年代に仁科研究室で行われたミューオンの実験の状況についての仁科先生と竹内さんとの間のやり取り、これに関する湯川先生、朝永先生、坂田先生やBlackettなどのお手紙が掲載されています。このほか、仁科財団の資料室にありました写真や、この実験に携わられた竹内さんのメモ、その他を参考に検討会が行われました。

まず、ミューオンの発見者は誰と考えるべきか。ネッダーマイヤー・アンダーソンと言う説をよく聞きます。確かにネッダーマイヤー・アンダーソンは1934年頃から37年に至るまで、新粒子の存在の必要性を非常に強く主張して、その証拠のようなものも示していますが、問題は必ずしも簡単ではありません。その理由は、当時は電子を取り扱う量子電磁力学は約 $137mc^2$ 以上のエネルギー（ $\sim 70$  MeV）では、理論が適用出来ないと可成り信じられていたことから、実験結果からミューオンと言う新粒子が存在する確定的な判定が難しく、明快に決めることが出来なかったためです。

検討会では資料に基づいて、ミューオンの発見者についてどのような見解があるか調べ、その結果は表1にまとめておきましたが、当時のこの方面の研究者も含めて意見はいろいろ分かれています。例えば1933年にバグゲとありますが、この方はドイツの宇宙線の学者で、霧箱写真を最初に撮ったのはドイツのロストック大学のクンツェという学者であると述べています。ロストックはキールに近い街ですが、非常に強い立派な電磁石をつくり、磁場の中に霧箱を入れて、湯川先生が理論を提唱される2年前の1933年に、偶然にこの中間子とおぼしきものを捉えています。今、見てみると確かにその飛跡はパイオンかミューオンのように見えます。よってバグゲは最初にミューオンを捉えた人はクンツェであると言っています。クンツェはその結果をドイツの学術雑誌に(Z. Physik,83,p.1 (1933))に出版していて、後年、ハイゼンベルグのところへ留学しておられた朝永先生も、仁科先生宛にこのことを手紙で知らせておられます。(仁科書簡集 No.794. p767 (1938/12/14))。

ファインマンの先生で理論物理学者として著名なウィーラーは普通言われている1937年のネッダーマイヤー・アンダーソンの論文でなく、前年の1936年のアンダ

ーソン・ネッダーマイアーの論文をもって発見としています。宇宙線の専門家で X 線天文学の創始者でもあるロッシはネッダーマイヤー・アンダーソン (1937) の実験だけでは不十分で、その後に出てきたストリート・ステューブソン (1937) の質量測定を合わせて初めてミューオンの存在が確立したと述べています。

当時、アンダーソン達と同じような実験をやっていたイギリスのブラケットは、ネッダーマイア・アンダーソン (1937) の結果だけではミューオンの存在を証立立てるには不十分で、ストリート・ステューブソン (1937) および仁科・竹内・一宮 (1937) の質量測定結果が出て、初めてミューオンの存在は確立したとしています。また、ストリート・ステューブソンの質量測定は精度が悪く、仁科・竹内・一宮の観測が信頼性が高いと述べています。イギリスの宇宙線学者のヒラスも、質量を正確に求めたのは仁科達であるとしています。

表1 誰がミューオンを見つけたか？

研究者	発見者	発見の時期
E.R.Bagge	P.Kunze	(1933)
.....	(H.Yukawa) (理論)	(1935)
J.Wheeler	Anderson・Neddermeyer	(1936)
B.Rossi	Neddermeyer・Anderson + Street・Steevenson	(1937)
J.C.Street	J.F.Carson & J.R.Oppenheimer	(1937)
P.M.S.Blackett	(Neddermeyer + Street + Nishina) グループ	(1937)
A.Pais	C.F.Powell ( $\pi - \mu$ )	(1947)
A.M.Hillas	(Neddermeyer + Street + Nishina) グループ	(1937)

パイスは理論物理学者ですが、パウエルが  $\pi - \mu$  中間子を発見した時に初めてミューオンの存在が確立したと述べております。

(Lattes, Occhialini and Powell (1947))

専門家の間でもいずれか一つが定説という訳ではありません。検討会ではこれらのことを出来るかぎり詳しく調べることに致しました。

ここでは、まず仁科先生がコペンハーゲンから日本に帰ってからの理研の中での仁科研究室の創設からお話を始めたいと思います。

仁科研究室は 1931 年に理化学研究所の中に創られました。竹内柁さんのメモによると、最初研究員になられたのは嵯峨根 遼吉先生です。皆さんご存じだと思いますが嵯峨根先生は、長岡半太郎さんのご子息で、後年、仁科財団のメンバーでした。私がお会いしたのはもちろん戦後で、先生の晩年の頃で、仁科研にお入りになって数年後のこのようにお若い時の写真を見たのは今回初めてです。先生は大変



実験のセンスと技術に優れた方で、まず最初に作られたのは当時放射線の研究に必要なガイガーカウンター（ガイガーおよびミュラーによりその3年前に開発されたばかり）、ついで霧箱を試作され、1年ぐらいの間にそれを成功されておられます。

その頃、竹内（柁）さんが研究生として嵯峨根先生をお手伝いすることになり直径10センチぐらいの霧箱、それに2000ガウスぐらいの磁場をかけて、宇宙線の実験を始められました。嵯峨根先生が新しいことをやられたのは、当時霧箱は（すでに数十年前に発明されていたのですが）水平に置いてピストンは上下に引くのが常識になっていたのを、霧箱を縦にして、ピストンを横に引くように理研の工作に頼んで作らせたことです。宇宙線は上から降ってきますから確かに良い飛跡がとれます。もうひとつ、非常に重要なことはカウンター・トリガーの霧箱を考えられたことです。



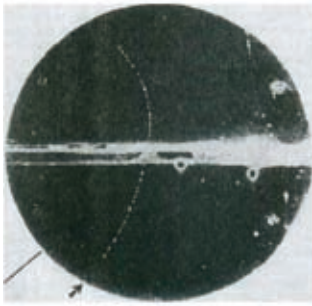
図1 嵯峨根遼吉先生（1905-1969）：長岡半太郎の5男として生まれ、嵯峨根家の養子となる。1931年に仁科研究室の最初の研究員となり、後に東京大学教授。仁科研究室の研究員として宇宙線の研究のためのガイガーカウンター、霧箱を完成させ、仁科研究室における宇宙線研究の基礎を築いた。1935年頃から、サイクロトロン建設に専心、宇宙線の研究は竹内柁さんが引き継いだ。多くの弟子を養成され、日本の原子核研究の基礎を築かれた。

当時、霧箱は一回膨張させると、次は温度が安定するのを待って、数分後に再膨張させていました。宇宙線と無関係にランダムに霧箱を開きますと、数十分の一のチャンスでしか良い飛跡がとれません。嵯峨根先生は霧箱の上下にカウンターを置いて宇宙線が同時にカウンターを通った時だけ霧箱を膨張させる方式を考案されたので、良い飛跡が撮れる確率が飛躍的によくになりました。朝永先生の随筆を読みますと、嵯峨根先生は大変得意になっておられたということです。

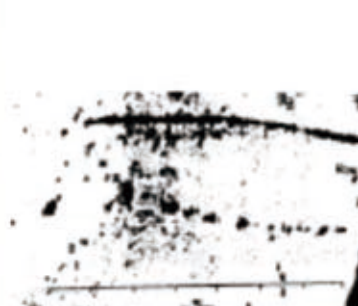
ところが1932年にブラケットのところネイチャー（Blackett, Occhialini, Nature 1932）に出した論文が日本に送られてきたのを見たところ、全くそっくり

なカウンター・トリガーの霧箱というのが載っていて、嵯峨根先生は「やられちゃったよ・・・!!」と言って大変悔しがっておられたと、朝永先生の随筆に書いてあります。確かに、外国のしかるべき雑誌にすぐ発表しておけば、大変評価されたお仕事で、非常に残念なことだったに違いありません。

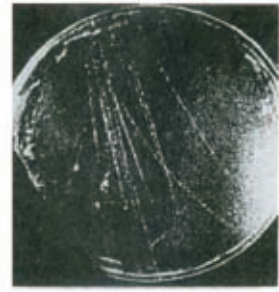
仁科研の霧箱でどんな飛跡を観測していたかという、写真を撮った当時はよくわからなかったそうですが、後でその気になってみると電子と陽電子の電子対生成とか電子シャワーがちゃんと映っていたと竹内さんは述べています。(参考資料:7)



陽電子.  
Anderson.



ミューオン?  
Kunze.



電子シャワー.  
Blackett & Occhialini.

図2 1933年に発表された外国の代表的な研究室の宇宙線の霧箱写真。

1933年頃、外国で撮られていた宇宙線の霧箱の写真を図2に示しておきました。一番左が有名なアンダーソンの陽電子の写真です。下から上にぬけています。それから先ほどお話ししましたクンツェの写真も1933年で、真ん中の写真で下のうすい飛跡が電子です。上の濃いものは明らかに陽子ではない。陽子なら、このような曲がりならもっと濃い飛跡のはずです。したがって、質量は電子の数百倍と推定され、現在の知識で考えてみるとパイオンかミューオンと思われます。ただ、湯川理論が発表される2年前で、当時はそういう新粒子が他の現象の解明に役立つとか、理論的に存在が期待されるという事がなかったので、関心をあまり引かず、実験の誤差として考えられていたようです。それから右側の電子シャワーはブラケットのところで撮ったものです。

このような写真を載せた雑誌が1932年頃から海外より送られてきて、改めて調べてみると、仁科研の霧箱にも電子シャワーが写っていました。松葉のように二本の飛跡が一箇所から出ていて、それは電子が一方から来て後方に跳ねたと思ひ、「電子はいやに後方に散乱するものだ・・・!!と感心していた」と竹内さんのメモに書いてあります。(笑・・・)。

けれども、これはガンマ線による電子・陽電子の対生成でした。陽電子がアンダーソンの所で発見されると、仁科先生はいち早く朝永先生に、これはガンマ線による電子対生成で発生した可能性があるので、ディラックの電子論で断面積を計算せよとおっしゃられています。事実、朝永先生は世界に先駆けて計算をされておられたのに（1932）、私が不思議に思うのは、同じ研究室の霧箱の飛跡の解釈には、あまり相談にのっておられなかったような感じを受けることです。あるいは、実験と計算に取りかかるまでに時間的に少しずれがあったのかも知れません。

ともあれ、1933年の時点で、仁科研の霧箱による宇宙線観測の技術は既に世界的なレベルに到達していた事を示す重要な事柄だと思います。

陽電子、そして電子シャワーが見つかり、当時、宇宙線の研究では地上の宇宙線の正体はどんなものかというのが中心課題の一つになっていました。電子のほかに厚い鉛板を貫通する粒子が居ることが問題でした。硬成分と呼ばれた成分です。

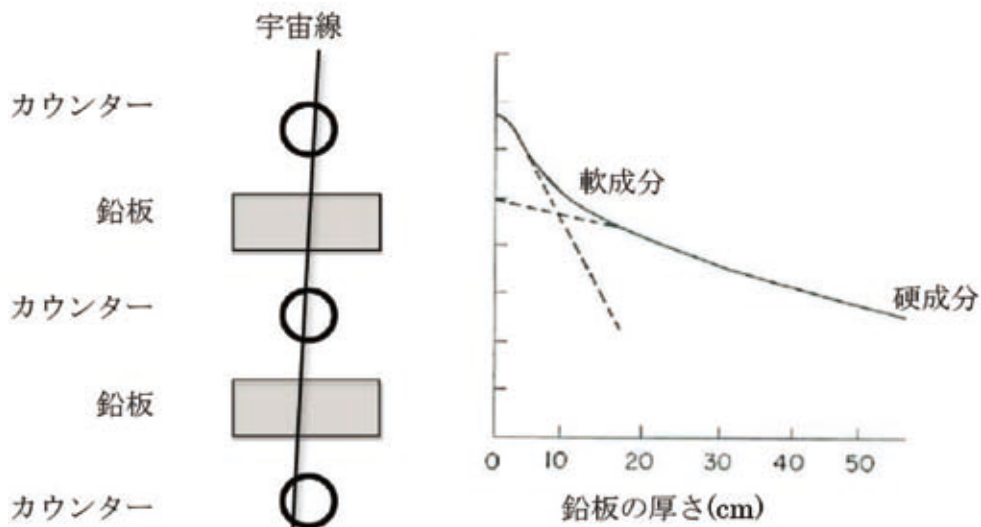


図3 宇宙線の軟成分と硬成分：カウンタの間に鉛板を入れ、厚さを変えると計数率が変わり、宇宙線の中で吸収されやすい粒子（軟成分）と貫通する粒子（硬成分）があることがわかった。

電子は質量が軽いので厚い鉛板は貫通できません。理由は次に説明しますが、鉛板数 cm で吸収される軟成分と呼ばれる部分が電子と考えられます。したがって、硬成分は陽子ではないかと考えられました。しかし、調べてみると、硬成分の粒子は荷電がプラスとマイナスのものがほぼ同数でマイナスの荷電を持つ反陽子がそんなに多く存在しているのはおかしく、とても陽子とは思えません。

次に電子が厚い鉛板中のエネルギー損失を計算する理論の正当性が問題になりま

した。相対論的な量子電磁力学で電子のエネルギー損失を高次の補正を入れて詳しく計算してみると発散して有効な答えが出てきません。

この理論の不具合の原因の一つは次のように理解されていました。電子が物質に入射して、原子核の近傍を通ると、電氣的な力で加速度を受けます。荷電粒子が加速度を受けると、衣のように身にまとっている電磁場を振り落とし、電磁波を放出してエネルギーを失うのでこれを制動輻射の損失と呼んでいます。エネルギーが高くなり放出する光子の波長が短くなると、粒子の大きさが問題となってきます。当時、荷電粒子は有限の大きさを持っていると考えられていました。無限小の大きさに有限の電荷を詰め込むと、静電エネルギーは無有限大になってしまうからです。したがって、荷電粒子を点状とする量子電磁力学は高いエネルギーでは成り立たないという説もありました。このエネルギーの限界は大体 100 MeV と推定されていました。

(この無限大の問題の正しい考察と解決は朝永先生、シュウィンガーの繰り込み理論が 1948 年に完成して初めて明らかとなり、量子電磁力学は高いエネルギーでも使える事が分かった)。

このような当時考えられていた高エネルギー電子の量子電磁力学 (QED) の適用限界からは、厚い鉛板を貫通する宇宙線の硬成分は、理論の破綻の結果を表していると考えたくなります。事実、当時の可成りの数の学者がその様に考えていました。もし、理論の破綻が起きなければ、鉛中での制動輻射が小さい必要があり、表 2.2 に示した様に、制動輻射は質量の逆 2 乗に比例するので、質量が電子より可成り大きい新粒子の存在が必要になります。

それを調べるためには霧箱が必要です。磁場の中に霧箱を入れて、宇宙線の飛跡の曲がりを見ますと運動量が分かります。それから、霧箱の中での電離損失の量は飛跡の濃さにもなります。鉛板のようなものがあると、この電離損失のほかにエネルギーに比例し質量の 2 乗に逆比例するような制動輻射による損失がおきます。制動輻射は質量の小さい粒子ほど起きやすいので、電子はあまり厚い板を貫通できず、質量の大きい陽子なら通れるということになります。ここで、霧箱の飛跡の特徴を表 2.2 にまとめておきました。

世界の宇宙線の研究はこの様な状況でしたが、仁科先生は次の霧箱として、世界で最高の性能を持つ大型マグネットの霧箱を作ろうと企画されました。ここが仁科先生の先見の明があるところだと思います。小型の霧箱を完成された嵯峨根さんはこの大型霧箱の計画が実現に向けて動き出した 1935 年頃には、すでにサイクロトロンの方に移られていましたので、宇宙線の研究は竹内さんが引き継いで大変立派な霧箱を作られました。(図 4 参照)

表2 霧箱中の飛跡の特性

1. 運動量（飛跡の曲がり）： 磁場 \* 曲率半径： に比例

2. エネルギー損失

●電離損失（飛跡の濃さ）： $1 / (\text{速度})^2$ ：にほぼ比例

●制動輻射： $\int dt (\text{加速度})^2 \sim (\text{エネルギー}) / (\text{質量})^2$ ： にほぼ比例

※ 貫通力： $\sim (\text{入射時のエネルギー}) / (\text{エネルギー損失}) = \text{エネルギー} / (\text{電離損失} + \text{制動輻射})$  鉛では10MeV以上の電子ではエネルギー損失は制動輻射が主になる。

質量が電子の200倍の粒子では制動輻射が電子のほぼ4万分の一になるので、 $10^{12}\text{eV}$ 以下では電離損失が主になる

仁科研の大型マグネット霧箱は図4に示しましたが、直径40センチで磁場が17,000ガウスというのは当時としては最強のものでした。マグネット霧箱は作り上げたのですが何しろ大変電流を食いますので、理研の中では使えず、出来上がった1936年から1937年の間は横須賀の海軍工廠で潜水艦の充電施設を貸してもらいました。500kWくらい使っていたようです。1938年になるとサイクロトロンのために大型の送受電設備が整ったので理研に戻って来ました。

なお、話が前後しますが、先ほどのドイツのクンツェのところも、彼が実験をやる度に数百kWも使うので、町中が暗くなって「また、あのおじさんが宇宙線の実験をやってるぞ・・・」と言って町の人が面白がっていたそうです。参考のために、当時の世界の代表的な研究グループのマグネット霧箱の仕様を表3に掲げておきました。仁科研の霧箱が最高の性能を持つものである事がわかります。

表3 1937年頃の各国のマグネット霧箱

研究グループ	霧箱の直径 (cm)	磁場の強さ (ガウス)
Anderson, Neddermeyer:	15	7,900
Street, Stevenson:	20	3,500
Crussard, Leprince-Ringuet:	50x15*	13,000
Blackett, Occhialini, Wilson:	25	14,000
Nishina, Takeuchi, Ichimiya:	40	17,000

\* 矩形

アンダーソン・ネッダーマイヤーはだいたい8,000ガウスで、20センチくらいの霧箱です。フランスではルプランス・ランゲが非常に大きい50センチ、ただしこれは縦型で幅が狭いのです。それからブラケット・オッキアリーニの霧箱がだいた



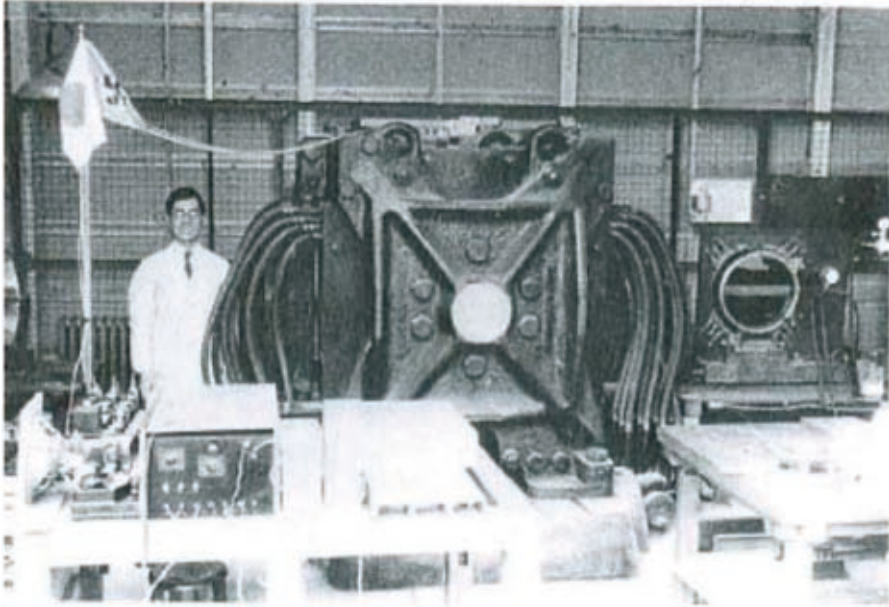


図4 仁科研究室の大型霧箱とマグネット：1936年に完成した。右側が霧箱、左側に立っているのは竹内（柁）さん。中央がマグネット（東芝製）、重量は約15トン。霧箱の直径は40cm、磁場は17,000ガウス。約500kWの大電力を消費するので、駒込の理化学研究所の送受電設備では稼働が難しく、完成後、1936年から1937年の末まで横須賀海軍工廠の潜水艦の充電設備を借りて実験が行われた。1937年の11月4日には、サイクロトロン完成に伴い、理化学研究所の送受電設備が整ったので、駒込地区の理研にもどり実験を継続したが、最終的には昭和20年4月13日の空襲でフィルムとともに焼失した。

い30センチくらいです。表を見ると、磁場としてはおおよそ3,000ガウスから20,000ガウスで、このなかでも一番下に書きました仁科・竹内・一宮は群を抜いて強力です。

だいたい日本はこういう実験をやる時に、いつも道具立てが貧弱で、腕でなんとかしようというような傾向があるのですが、これは珍しく最高の道具立てを備えていました。

これらの代表的なグループが先ほどお話をしました鉛を通過する硬成分について、どう考えていたのか？

表3に掲げたグループは同じような観測を行い、従って、同じようなデータを持っていました。ネッターマイヤー達は電子と陽子の中間の質量の粒子でエネルギー損失が少なくなるという考えを持っていました。ところが、ルプランス・ランゲとブラケット・ウィルソンは物質中での電子の吸収、制動輻射の理論はエネルギー

が高くなると成り立たなくなる、これは理論の適用外の現象である。だから電子が厚い鉛板を貫通してもおかしくないと思っていました。どうも新粒子を入れることに抵抗があったようです。

ストリート・スティーブンソンと仁科先生は電子と陽子の質量の中間の粒子ということで、質量を特定されました。アンダーソン・ネッダーマイヤーたちはこの新粒子の発見(?)を主張した37年の論文の前の年1936年に、高度4,300 mの高山<sup>註3)</sup>で実験を行い、何千枚もの写真を撮りました。霧箱の中に図5のような濃い飛跡を見つけましたが、そのまま解釈すると、質量が電子の400倍くらいに相当します。しかし、彼らの霧箱はアルゴンが入っていてクーロン散乱を比較的受けやすいこと、それと多重散乱の理論が当時はまだ完成していなかったので定量的な解析が困難でした。

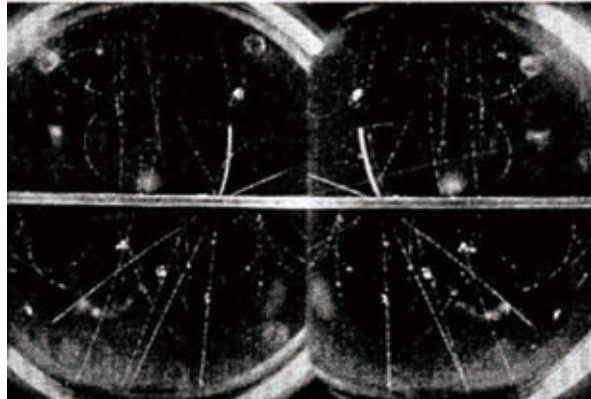
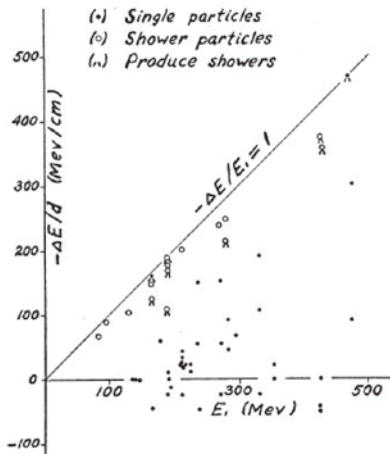


図5 アンダーソン・ネッダーマイヤー達が高山で撮った霧箱写真 Anderson and Neddermeyer, Phys. Rev. vol.50, p 263 (1936) より。飛跡は立体写真で撮られている。中央の鉛板0.35 cm で磁場は7,900 ガウスである。中央で上方に放出されている粒子はガス中で止まっている。飛程から推定される運動量は陽子であれば約50MeV/c (曲率半径20 cm) であるが、観測された曲率半径は約7 cm で一致しない。アンダーソン達はガス中の散乱の影響で曲率半径が小さくなっている可能性を考え、最終的には陽子の飛跡であるとした。散乱の影響がなければ飛跡の粒子の質量は電子の400倍程度に相当する。J. Wheeler はこの観測をミューオンの発見と見なした。(表1. および参考資料 11. 参照)

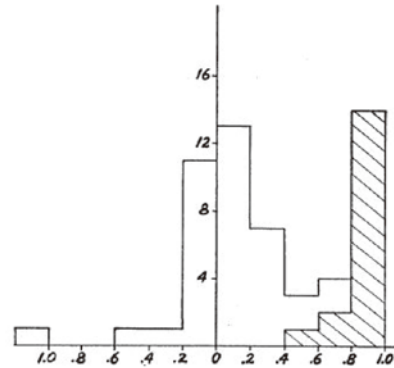
アンダーソン達は霧箱のガス中の多重散乱で陽子の飛跡の曲率半径が変わった可能性を考え、結果的には陽子としました。これは彼らがミューオンの存在を主張した論文の前の年です。表1に掲げたように、ウィーラーはこれをもってアンダーソン・ネッダーマイヤーたちがミューオンを最初に発見したと言っていますが、本人たちは上に述べたように最終的には陽子プロトンであると判定しました。



同じ頃、フランスではルプランス-ランゲ達がやはり高山の観測所で彼らの大型マグネット霧箱を使って観測を行い、厚い鉛を貫通する粒子が新粒子である可能性について検討していました。しかし、高エネルギー電子のエネルギー損失の理論が破綻している可能性があるため新粒子である確証を示すことはできなかつたと述べています。(Crussard, Leprince-Ringuet, 1935, 1937)



A エネルギー損失



B. プラチナ中のエネルギー損失の割合

図6 プラチナ 1cm の板の中でのエネルギー損失の分布。

6-A. 横軸：入射粒子のエネルギー  $E_1$ ； 縦軸：プラチナ中のエネルギー損失。

6-B. 横軸：エネルギー損失割合  $\Delta E/E_1$ ； 縦軸：エネルギー損失比の頻度。

図6-B の横軸で  $\Delta E/E_1$  のプラスの値は粒子が加速されたことになり、物理的におかしいが、観測誤差によるものもある。ほとんどのエネルギーを失った、 $\Delta E/E_1=1$  付近の右の斜線部分が電子にあたる。 $\Delta E/E_1$  が  $-0.1$  のあたりの盛り上がりは新粒子によるものとした。

Neddermeyer and Anderson, Phys. Rev. Vol.51, 884 (1937) より

次にアンダーソン達が行った実験は理論の破綻がないことを示すことが目的で、霧箱の中にプラチナの1センチの板を入れ、この中でのエネルギーの損失を測りました。(図6)

プラチナの1センチ厚は、電子の制動輻射に対して極めて効率的で、鉛に換算する約2センチに相当(輻射単位 4.r.l.)し、理論の結果が正しければ、電子は制動輻射でほとんどのエネルギーを失なう厚さです。その観測結果は図6に示しました。

磁場の中の飛跡の曲がりで見入射粒子、プラチナの板の下に出た粒子のエネルギーを測って、差し引きするとエネルギーの損失  $\Delta E$  が分かります。図6-Aに示したように横軸に入射粒子のエネルギー ( $E_1$ )、縦軸にエネルギー損失 ( $\Delta E$ ) を採ると、

エネルギーをほとんど失ったものは  $45^\circ$  の上の線に沿ってでできます。これは電子ですね。そのほかにエネルギーを失っていないものがあります。明らかに入射エネルギーとは無関係にエネルギーを失うものと失わないものがあることを示しています。別な図で描きますと右の 6-B 図になり、誤差は非常に大きいのですが、こちらの右側の斜線の部分は電子で、真ん中のあたりには別の新しい粒子が存在しているのが見えると主張しました。これが 1937 年にネッダーマイヤー・アンダーソン達が電子と陽子の中間の質量の新粒子があると主張した実験です。

この論文が出ると、湯川先生はアンダーソン達の 1936 年および 1937 年の論文で指摘された中間質量の粒子は、1935 年に発表した湯川粒子であろうと言う論文を書き、Phys. Rev. に投稿されました。しかし、観測された結果が湯川粒子とするにはまだ条件が不十分だという理由で掲載を断られ<sup>註1)</sup>、結果的に、この湯川先生の論文は日本数物学会の欧文に投稿され、掲載されました。(Yukawa,1937).

当時、ネッダーマイヤーたちと同じような実験を行っていた英国のブラケット達は、同じような観測データを持っていました。しかし、ネッダーマイヤー達と違って次のような解釈を行っています。図.6-A の結果では入射粒子が 100-200 MeV 以下では電子以外ほとんど存在していない。100-200 MeV から下では理論の期待値と一致していて、中間質量の粒子が存在している気配がない。自分達のデータも同じ傾向を示している。したがって、この実験結果は中間質量の粒子の存在を証明したのではなく、電子のエネルギーが 100-200 MeV から上では理論が破綻していることを示すものであると強く主張しました。ネッダーマイヤー・アンダーソンの結果だけでは中間質量の粒子が存在するとは言えないという主張です。(Blackett and Wilson, 1937)

ほぼ同じころストリート・スティーブソンもネッダーマイヤー・アンダーソンと同じような実験を行って、似た様な結果を得ています。調べてみますと 200 MeV 以上の入射エネルギーの所に限られていて、同じようなクレームが付くと思われれます。

そのころ、仁科先生たちは横須賀で霧箱の実験をやっていました。1日にだいたい 100 枚ぐらい写真を撮っていたようです。湯川先生の影響があったと思うのですが、4 月頃からは質量の精密測定に専心し、6 月か 7 月に図.7 に示すような写真.1 が撮れました。霧箱の中に 3.5 cm の鉛板が入れてあります。板の中で 10 度ばかり曲がっていますが、鉛板の前後で飛跡の曲率半径が変わっており、明らかに鉛板の中でエネルギーを失っています。曲率半径や、エネルギーの損失量を測定して粒子の質量を計算することができて、だいたい電子の質量の 300 倍ぐらい、その後、計算を改善しますと、もう少し答えは変わるのですが大きくは変わりません。

この写真に問題があるとするならば、鉛板中で散乱していますので、そこでエネルギーを失っているかもしれない。それを考慮に入れないで質量を計算すると、少し大きい質量の答えを出すという可能性はあります。

この写真が撮れた時にどういうやり取りがあったか？

先ほど述べた仁科書簡集の No.616 ,p.589 (1937/7/27) にありますが、竹内さんは7月27日に横須賀から仁科先生に実験の経過を書いて、手紙を出しています。手紙の終わりに「もう1本か2本なければなんとなく不安です・・・」と書いてあります。鉛中で散乱があるのが、何か気になるという事のようにです。

ただ、仁科先生は大変強気で、同じ日に湯川先生に「おい、見つかったぞ・・・」というような手紙を出しておられます。同じく書簡集の No.617,p.590 (1937/7/27) には湯川先生宛に「結局、その鉛における飛程を求め、電荷は電子と同じと仮定して質量を求めると陽子の1/6から1/7にあることが分かりました」と大変確定的に書いてあります。

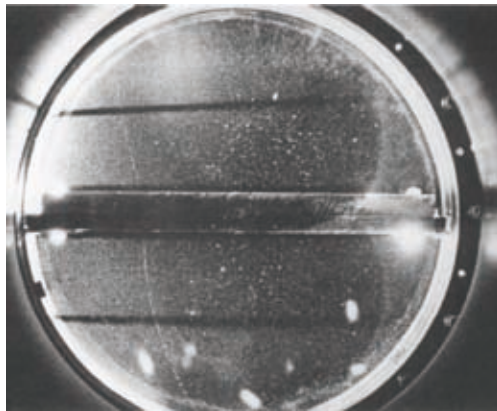


図.7 写真1、横須賀の海軍工廠で1937年6,7月に観測されたと推定される。磁場は8,000 ガウス、中央の鉛板は、3.5 cm 厚である。仁科研究室で初めて撮れた質量測定可能な写真。但し鉛板中で  $10^\circ$  ばかり散乱している。最初の測定値は電子の質量を  $m_e$  として  $280 \pm 20 m_e$  に当たるとした。詳しくは本文参照。この写真が撮れたので、科学と Phys.Rev. への論文の作成が行われたが、Phys. Rev. の論文の方は最終的には次に述べる写真. 2 の方の質がよいので、そのデータが使われた。

仁科芳雄：[新粒子の発見] 科学、7巻、p408, (1937) 岩波書店。

Y. Nishina, M. Takeuchi, T. Ichimiya, On the Nature of Cosmic-Ray Particles Phys. Rev. 51,p1198, (1937).

すぐ、岩波の「科学」とフィジカルレビューに論文を投稿されました。科学の9月号には「新粒子の発見」と題した論文に霧箱の写真(図.7 写真.1)が載っています。

すが、フィジカルレビューはレターでは長さを心配したのか写真が載せてありません。順調に行けば9月か10月にフィジカルレビューのレターで出た筈でした。8月5日に投稿して、郵送に時間が掛かり8月28日に受理されたのですが、8月か9月中にもう一つの写真<sup>2</sup>が撮れました。

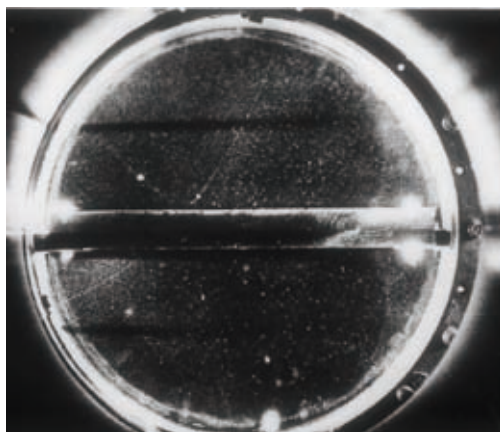


図8 写真. 2. 仁科研究室の霧箱の2番目のミューオン写真。1937年の8月末か9月に撮影されたものと推定される。磁場は17,000 ガウス。質量は当時  $220 \pm 40m_e$  と推定された。図7の文献、Phys. Rev. 51 (1937) にある質量はこの写真から測定されたものである。

これは図8の写真<sup>2</sup>に示しましたが、条件のよい飛跡で鉛板での散乱はありません。これで質量を出すと電子質量の  $220 \pm 40$  倍ぐらいでした。校正刷りのコピーを調べてみますと、校正時にこの写真<sup>2</sup>の方が質がよいので、写真<sup>2</sup>の値に書き換えられています。フィジカルレビューに載っているのはこの値です。

仁科先生が岩波の科学に書かれた論文は9月号に、フィジカルレビューの方は12月1日号に出版されて居ます。8月末に受け取って、12月に出版されたのはずいぶん遅い感じがしますが、その理由は、レターとして投稿したのが長すぎて、本文に回されたと、日本とアメリカの間の郵便の往復に1月以上掛かったためです。

仁科先生が岩波の科学に書かれた「新粒子について」という論文では、諸外国および仁科研究室の実験を紹介し、この発見された中間質量の粒子は湯川先生が提唱した湯川粒子に相違なく、日本がこの新粒子の分野で、理論及び実験ともに、国際的に第一線の研究をリードしていることは喜ばしいことだと書かれてあります。

不思議なことに、フィジカルレビューの論文には湯川先生の論文には全く触れておられません。湯川先生が論文をフィジカルレビューに投稿して断られたことをお話ししましたが、その問題でもめる可能性があり、出版が遅れることを懸念されたのかもしれませんが。しかし、仁科研究室がいち早く、新粒子の質量の直接精密測定

の方向に舵を切ったのは、仁科先生が湯川先生の研究の相談に常に乗っておられたからに違いありません。

一方ストリート・スティーブンソンも質量の直接測定に全力を尽くして居ましたが、1937年の10月に論文が投稿されて居ます。仁科研の投稿した時期に比べると約2月後の事です。どういう道具立てでやったかを図.9に示しました。

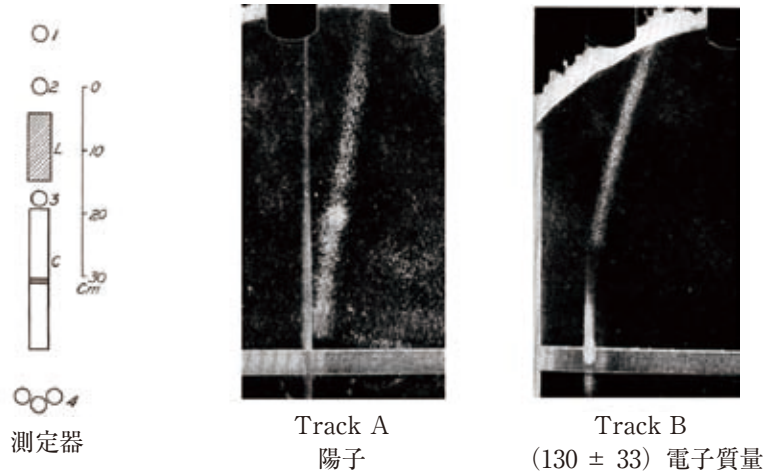


図.9 ストリート-スティーブンソンの実験。  
 カウンター1、2、3、を通過し、4は通過しない（反同時放電）で、霧箱の中で止まった宙線だけを観測する。  
 J.C.Street and E.C.Stevenson: Phys.Rev.52,p 1003 (1937) より。

1、2、3のカウンターの下に霧箱があり、その下にカウンター4がおいてあります。カウンター1、2、3を通過して4にはこないもの（反同時放電）、つまり霧箱の中で止まった飛跡を観測しようと言う狙いです。このカウンター1,2,3を通過して1秒たったところで霧箱を膨張したのです。霧がかなり拡散して霧の元になるイオンを数えやすくなります。

図の左側の Track A が陽子です。右側の Track B が中間子とおぼしき飛跡で、質量を計算すると電子の  $130 \pm 33$  倍の値を得ました。これは正確な値 207 倍からは可成りはずれていますが、その原因については後ほど触れることにします。

ミューオンに対する研究で、論文の発表時期を見ますと、クンツェは1933年にツァイトシュリフトに受理されて出版されています。ネッダーマイアー・アンダーソンは1937年の3月にフィジカルレビューに受理されました。ストリート・スティーブンソンのこれと似た内容のエネルギー損失の研究は当時学会で発表しフィジカルレビューに載っていますが、2回目の今お見せした質量測定の写真は10月6日に受理されまっています。



仁科・竹内・一宮の8月28日の受理に比べるとほぼ一月とちょっと後になっています。ところが出版されたのは、ストリート・スティーブソンは11月1日で、仁科・竹内・一宮は12月の1日ですからひと月遅れています。その原因は前にも述べましたが、仁科先生たちはフィジカルレビューのレターに投稿したのですが、長すぎて本文に回されたため、二月ばかり損したようです。順当に行けばストリート・スティーブソンより一月早く、10月中に出版されるべきものだったのですが・・・。

ミューオンの存在については1937年のフィジカルレビューの5月号のネッターマイヤー・アンダーソンを見て関係の研究者は新粒子があるかも知れないと思っ  
ているところへ、11月1日号のストリート・スティーブソンの質量測定が出てきて、皆さんこれで新粒子の存在は確定的と思ったことでしょう。続いて受理された日は早いのですが、一月後の12月1日号に仁科・竹内・一宮の論文が出ました。私見では、一見落着いている所なので、1ヶ月後に測定精度は高いが写真が載っていない仁科グループの論文が来ても、よほど詳しく検討した専門家でない限り、強いインパクトがなかったと思われま  
す。論文は内容が一番大事である事は勿論ですが、プレゼンテーションが非常に大事だという例だと思われま  
す。以上ミューオン発見の経緯はまとめて表4に掲げておきました。

表4 ミューオン発見に拘わる論文の発表時期

Authors	Accept date	Publication Date
Kunze	Mar.24 (1933)	Z. Physik (1933)
Neddermeyer, Anderson	Mar. 30 (1937)	Phys.Rev.May.15
Street, Stevenson.1	アメリカ物理学会 (April 29, 1937)	Phys.Rev.June.1
Street, Stevenson.2	Oct.6 (1937)	Phys.Rev.L.Nov.1
Nishina, Takeuchi, Ichimiya	Aug.28 (1937)	Phys.Rev.Dec.1

ネッターマイヤー・アンダーソンの実験については、当時の専門家から見るとこれだけでは不十分ではないかという意見もありました。前に述べたブラケット達の他に、当事者のストリート・スティーブソンも質量を測定した第2論文で、新粒子の存在の確立の為には、質量の決定が重要な事であると、次の様な意見述べています。(Street, Stevenson, 1937)

ネッターマイヤー・アンダーソンおよびのストリート・スティーブソンの実験では電子と陽子の中間の質量を持つ新粒子の存在を示唆したが、もし、それが正しければ、粒子の質量を直接測定して、質量が電子と陽子の中間の粒子が見つかり、

新粒子の存在は確立したことになる。

ブラケット達は自分たちの経験に依れば、ストリート達が霧箱を1秒遅らせて膨張させたため飛跡がその間にみだれて、運動量の測定におおきな誤差が入り、精度の高い測定は難しく、質量が $207m_e$ から大きくずれた原因であると述べています。

イギリスの代表的な宇宙線学者のヒラスも同じ様に、仁科達の実験の方が優れていると彼の本で可成り詳しく述べています。(Hillas, 1972, 参考資料.6)

仁科達の実験は優れているが、写真が掲載されていないので詳しいことがわからないのが難点であるとも述べています。(Blackett & Wilson, 1937)

発見者たちの中に仁科先生たちの名前があまりあげられてこなかった理由は、すでに述べたように、ひとつは論文の出版が遅れたことと、写真を載せなかったということによってインパクトが弱かったためだと思われます。

ブラケットは、仁科先生が1939年にフィジカルレビューにミュオン第二論文を出された時、写真の詳細についても問い合わせられています。仁科先生は写真とともに1939年9月7日に返事を送られています(仁科書簡集。No.901, p.855)、それは第二次世界大戦が始まる前夜でした。この手紙がブラケットの手元についたのは、ドイツ軍のポーランド侵攻は始まっていたころと思われますが、先生はブラケットにヨーロッパでの危機的な状況についての心配を伝えておられます。

数年前イギリスのブラケット記念館からブラケットが仁科先生に出した手紙の返事が失われたので探していて、そちらにコピーがないかという問い合わせがありました。当時、常務理事であった鎌田甲一さんの友人からの問い合わせでした。丁度、仁科先生からブラケット当ての手紙を鎌田さんが眺めていたところでしたので、すぐ返事を出しました。仁科財団は整理のおそらくよい財団であるといたく感心されましたが、本当はたまたま鎌田さんその手紙を見ていたところであったのですが……。

ミュオンの発見者というのは初めその可能性を強く示唆した人がいて、最終的に質量が測定されて、決まりということになったと考えられます。したがって、ネッターマイアー・アンダーソンに加えてミュオンの存在を確立させた質量の測定については、ストリート・スティーブソンより早い時期に精度の高い結果を得ていた仁科先生達は発見者の重要なメンバーであると思われます。仁科先生達の論文を載せたフィジカルレビューが後に出たために、国内外の専門家も含めて気がついておられないようなので、仁科財団としてはこの辺の関係を詳しくまとめて、経過を明らかにして行く事になると思っています。

仁科研で観測した数多くの貴重な写真は昭和20年の4月13日の空襲で焼失しま



したが、仁科財団の記念室にコピーが若干残ったものはないかと検討会では調べました。今回、印画紙に焼き付けた写真が10枚程見つかりました。ひとつは1938年に撮られた写真3で、第一論文の2年後の1939年にフィジカルレビューに論文として発表された写真です。

図.10の写真3は質量が $180m_e$ ぐらい。それから写真4は写真2と大変似ているのですが、鉛板が5.0 cmになっています。撮影されたのは写真3の前後で、1938年内と推定されますが、写真3が極めて精度の良い質量決定に使えたため、発表のチャンスを逸したのではないかと思います。写真5は撮影時期は不明ですが、磁場をかけていない時にミュオンが霧箱中のガスで散乱して壁の近くで止まったと推定される大変白い飛跡です。写真6の入射粒子は良く分かりませんが、あるいは電子かもしれません。

写真4から写真6までは、写真とその解釈も含めて、図.11から図.13に掲げておきました。

その後の仁科研究室の霧箱の研究はどうなったのでしょうか。

御参考までに検討会で調べた結果を述べておきます。直径15 cmの小型霧箱とこの40 cmのマグネット霧箱の二つを使って、電離損失と磁場による曲がり（運動量）を別々に測定して精度よく質量を決める実験が行われています。この実験では、質量が陽子の1/2ぐらいの粒子も観測され、あるいはK中間子であったのかもしれない、と竹内さんはその後述べて居られます。（参考資料3,7）

開戦から4ヶ月後の昭和17年には理化学研究所の創立25周年を記念して「科学の殿堂」という映画が作られました。（参考資料.12）.この映画を通して、当時の理研と仁科研究室の最盛期の様子を見ることが出来ます。

しかし、戦況が進むにつれて、実験の遂行はだんだん難しくなってきました。ミュオンの電子への崩壊を調べるため、ミュオンを霧箱中に止めることを目標とした直径60 cm 深さ50 cmの大型霧箱の試作、自動撮影の霧箱（40 cm × 10 cmの小判型）を陸軍の戦闘機に搭載して、高度10 km付近で観測する計画などが行われたと記録に残っています。昭和18年（1943）のころです。戦局は激しさを増し、この年のはじめには日本軍はガダルカナルで敗退して撤退し、秋には学徒動員が行われています。終戦の昭和20年には仁科研究室の霧箱関係の施設や資料は空襲ですべて灰燼に帰してしまいました。

終戦後は理研コンツェルンの解体、大河内所長の戦犯容疑による逮捕で、理研は経済的な基盤を失ってしまいました。仁科先生は大河内所長の後を引き継いで所長になられ、理研の再建と日本の学術の再興のために、日夜奮闘して居られました。

残念な事に還暦をむかえられた直後、1951年の1月に再建の道半ばにして、日本と理研の将来に大きな憂いを抱きながらこの世を去られました。竹内さんは横浜国立大学へ、一宮さんは1939年の研究の後に日本電信電話公社（NTT）の研究所に移られ、仁科研究室における大型霧箱による研究は終わりを迎えることになります。但し、竹内さんの弟子で、一宮さんの後にこられた猪木さん（後に山梨大学教授）は、他の宇宙線研究の人たちと理研に残って、霧箱による実験を一人でその後数年続けておられました。

戦後の宇宙線研究は仁科研究室の一部が理研に残り、関戸先生は名古屋大学へ、西川研究室からは皆川（理）先生が気象研究所を経て神戸大学へ、中川先生が立教大学へ移られました。大阪大学の菊池研究室から渡瀬（譲）先生が新設の大阪市立大学に移られ、宇宙線研究室を作られました。やや本格的に宇宙線の実験が始まったのは朝日新聞の寄付により乗鞍山頂に実験小屋が作られ、大阪市も実験小屋を山頂付近に作ってくれた1949年の頃です。1953年には、乗鞍宇宙線観測所が東京大学の付置の共同利用研究所として設立され、日本の宇宙線の研究はここを足場に発展を始めます。その後、原子核研究所に宇宙線部門が出来て、現在のスーパーカミオカンデ等が活躍している宇宙線研究所へと発展して行きました。仁科先生が始められた宇宙線の研究が基盤となって現在に至ったこと、先生が日本の現代科学の発展のために果たされたご尽力に深い感銘を受けるとともに、これから一月後の来年の1月には、先生が逝去されて、早くも60年の歳月が過ぎ去っていることを思うと、時の流れ行くさまに驚く他はありません。

ミューオンの発見は可成り複雑な経過をたどっていますが、科学史的に見ても、仁科グループの研究はミューオンの発見に対して極めて重要な寄与であり、これを明らかにして印刷した形で残し、また、今回の検討結果は海外にも発信して行きたいと思っています。

ご清聴ありがとうございました。

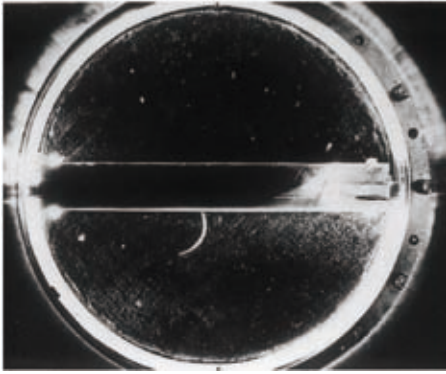


図.10 写真.3 : 1938年9月に撮影、中央の鉛板は5.0 cmで、磁場は12,600 ガウスである。鉛板で発生してガス中（空気1.2気圧で、飛程6.15 cm）で止まり、精度よく質量が求まる極めて良い条件の飛跡であった。論文では質量は  $170 \pm 9m_e$  として発表されたが、後にベーテが霧箱内のガス中での散乱の影響を指摘し、質量は  $177 \pm 22m_e$  であるとした。検討会では、その後の多重散乱理論の進歩を考慮して、散乱の補正を施すと質量は  $177 \pm 18m_e$  が妥当であるとした。

Y.Nishina, M.Takeuchi, T. Ichimiya, Phys. Rev. 55, p. 585 (1939).  
H.Bethe, Phys. Rev. 70, p.821 (1946).  
より。

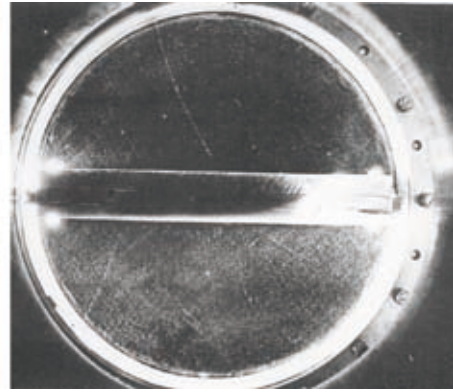


図.11 写真.4

竹内さんから仁科先生当ての手紙にこの飛跡から求めた質量の記述がある。(仁科書簡集のNo.775,p.751 (1938/10/28))。写真.3 とほぼ同じ時期に撮影されたと推測される。写真.2 と似ているが、入射方向が左右逆になっているのと、鉛板が5.0 cm になっている。曲率半径と、鉛板中のエネルギー損失から測定された質量は電子の  $400 \pm 70$  倍であったが、論文としては発表されていない。写真.3 が質量決定のために、極めて良い条件であったので、発表のチャンスを逸したものと推測される。



図.12 写真.5

撮影時期不明であるが、磁場がかけ  
てなく、極めて初期の時期（1936  
年）にテストで撮影した飛跡である  
可能性が考えられる。低いエネルギ  
ーのミュオンがガス中で減速して、  
散乱して霧箱の壁付近で止まった  
（または止まりかけた）ように見える。

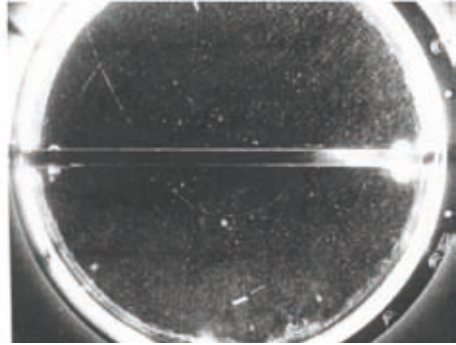


図.13 写真.6

撮影した時期は不明であるが、挿入  
された鉛板が薄く 1.5 cm であるの  
で、鉛板を霧箱に入れ始めた 1937  
年 4 月から 6 月のあたりと推定され  
る。撮影された飛跡は、電子の可能  
性もある。

## 註および参考資料

### I. 註

註1 ここで観測された中間子はミューオンであり、強い相互作用を持たない。ミューオンが発見された1937年頃は、ミューオンについての詳しい性質は分かっておらず、また、理論の信頼性も確立していなかった。加えて湯川中間子に相当するパイオンの質量がミューオンの質量は似ていること等で混乱が起きていた。実験が進むにつれてミューオンを湯川粒子とするには色々な矛盾が出てきた。日本ではこの困難を解決するために、1942年に坂田・谷川により2中間子論が提唱され、戦時中に検討が行われて、戦後、坂田・谷川・井上らにより欧文の論文がProg. Theoret.Phys. (1946), (1947)に発表され、海外に初めて知られることになった。一方、アメリカではMarshakとBetheが1947年に2中間子論を提唱、その後、同じ年の1947年にLattes, Occhialini, Powell達は原子核乾板中でパイオンがミューオン崩壊する飛跡を発見し、2中間子(パイオンおよびミューオン)の存在が確立した。この間の経過については下に掲げた参考資料の8. L.M. Brown and L. Hoddeson (1983)に詳しい。

註2 仁科研究室のミューオン観測について、財団の関係者の中で、メールなどで2005年頃より議論が行われていたが、関係者が集まって検討会を開いたのは2008年になってからである。

検討会は

第一回：2008年6月28日

第二回：2009年2月25日

第三回：2009年4月23日

第四回：2009年11月25日

の4回行われたが、主な出席者は

荒船次郎、池田長生、江沢 洋、中根良平、仁科浩二郎、仁科雄一郎、西村 純、宮沢弘成、山崎敏光、山田作衛(アイウエオ順)である。

検討会では原論文を調べて問題の整理を行い、ついで次に掲げる参考資料などを元に討論を行った。ここで述べた内容はおおむね検討会での相互討論の結果であるが、部分的には個人的な見解も入っていて、文責は筆者にある。

註3 宇宙線中のハドロン成分は4,300mの高山では地上の20-30倍になるので、宇宙線の核相互作用の観測を効率的に行う事が出来る

### II. 参考文献

- Anderson, C.D., Phys.Rev. Vol.43, p491 (1933).

- The Positive Electron.-

前年の1932年にはAndersonは陽電子を発見したが、この写真はきれいに撮れたので、よく引用されている。陽電子は下から上にぬけて、中央の鉛板でエネルギー損失を行っている。

- Anderson, C.D and Neddermeyer, S.H., Phys. Rev. Vol.50, p. 263 (1936).

(本文図2).

- Cloud Chamber Observations of Cosmic Rays at 4300ms Elevation and near Sea-Level.-

- ミューオンを発見したとする有名な Neddermeyer-Anderson の論文 (1936) の前年の出た論文。Pike's Peak (4,300m) の高山観測所と地上でマグネット霧箱で観測、鉛板中での宇宙線の核相互作用から放出される質量  $400m_e$  程度の粒子を観測した。最終的には、霧箱中のガス中の散乱の影響を考慮して陽子の飛跡とした。
- Bethe, H.A., Phys. Rev.70, p821, (1946).
    - Multiple Scattering and the Mass of Meson.-
 1937年から2, 3年の間に、学術雑誌に発表されたマグネット霧箱で曲率半径と飛程で測定した宇宙線のミューオンの質量は可成り散らばっているが、霧箱のガス中での多重散乱の影響を考慮すると、ミューオンの質量は  $200m_e$  付近としてすべて解釈出来る事を示した。
  - Blackett, P.M.S. and Occhialini,G., Nature,130, p.0363 (1932).
    - Photography of the Corpuscular Radiation.-
 カウンターコントロールのマグネット霧箱を考案して、霧箱中の飛跡が効率よく観測出来ることを示した速報で、本論文は次の Proc.Roy.Soc. である。仁科研では当時、嵯峨根さんが同じようにカウンターコントロールの霧箱を考案し、同じように効率よく観測を行っていたが、学術雑誌には発表して居なかった。嵯峨根さんはこの論文を見て、先をこされたと大変悔しがっておられた。(本文参照)
  - Blackett, P.M.S. and Occhialini, G., Proc.Roy.Soc.A139,p699 (1933).
    - Some Tracks of the Track of Penetrating Radiation.-
 Nature の論文は速報で、こちらに詳しい報告がなされている。15枚の霧箱写真を掲げ、その解釈を述べている。数本の粒子が同時に入射するシャワーの写真も撮れたが、(本文図.2)、まだ電子シャワーとは解釈されていない。ミューオンと思われる飛跡も写っているが、これが新粒子であろうという指摘はなされていない。
  - Blackett, P.M.S. and Wilson,J.G., Proc.Roy.Soc.A160,p304 (1937).
    - The Energy Loss of Cosmic Particles in the Metal Plate.-
 Neddermeyer 達 (1937) と自分達の観測データでは、100-200 MeV 以上の領域では、電子と違うエネルギー損失をしている粒子があるが、100-200 MeV 以下では電子だけが入射して、理論で期待される制動輻射による損失を行っている。低エネルギー領域では電子以外の粒子は観測されておらず、中間質量の粒子は必要でない。従って、観測事実は高いエネルギー領域での理論の破綻を示すものに他ならない。
  - Carson,J.F. and Oppenheimer,J.R., Phys.Rev.51,p220 (1937).
    - On Multiplicative Showers.-
 制動輻射と電子対生成による電子シャワーの解析的理論を展開、それまで実験で観測されていたシャワーが定量的に説明出来る事を示した。観測された飛跡の中には理論で期待される電子と異なり、厚い鉛板を貫通する粒子が存在するが、量子電磁力学の適用範囲を越えたためか、あるいは新粒子の存在の可能性がある。
  - Crussard,J. and Leprince-Ringuet,L., Compt.Rend.,211,p381 (1935), 204, p.240 (1937).
    - Etude des particules de grande énergie dans le champ magnetique de l'electroaimant de Bellevue.-



1936年頃から、大型のマグネット霧箱 (50cmx15m) を使い、Bellevue の地上とアルプスの高山での観測を行ってきた。Anderson たちと同じように、14cm の厚い鉛板を貫通する比較的低いエネルギー (300 MeV 以下) の粒子を観測した。電子と同じ程度の電離損失で、正負の電荷の粒子がほぼ同数であるので陽子ではない。新粒子の可能性も検討したが、当時は高エネルギーの電子に対して、理論が成り立っている保証がないので、新粒子の存在を確認することは出来なかった。

- Kunze,P.:Z.Physik.83,p1 (1933).

- Untersuch der Ultrastrahlung in der Wilsonkammer.-

18,400 ガウスの強磁場の中に直径 16.4 cm の霧箱を入れて観測を行った。宇宙線の飛跡から電離損失と運動量を求め、電子と陽子の中間の質量をもつ粒子を見いだした。ミュオンらしい飛跡を最初に観測した報告である。(本文、図2参照)。

- Lattes,C., Occhialini,G. and Powell,C.F., (1947)Nature, 160,p453, p486 (1947).

- Observation On The Track of Slow Mesons In Photographic Emulsions.

高感度の原子核乾板の開発に成功し、止まりかけの中間子の飛跡が観測出来る様になった。高山で露出した原子核乾板の中にパイオンがミュオンに崩壊する飛跡を発見し、パイオンとミュオンの2中間子の存在を確認した。

- Neddermeyer,S.H. and Anderson,C.D., Phys. Rev .Vol.51,p 884 (1937).

- Note on the Nature of Cosmic-Rays Particles.-

霧箱の中に1cm 厚のプラチナ板 (電子の制動輻射による損失は、鉛板に換算すると約2cm に当たる) を入れ、プラチナ板中での宇宙線のエネルギー損失を測定した。500MeV 以下の粒子について陽子や電子と違うエネルギー損失するものがあり、電子と陽子の中間の質量の粒子が存在していると主張した。また、この結果は論文投稿中に Harvard Group がアメリカ物理学会で発表した結果 (Street,Stevenson (1937)) とよく一致していると述べている。同じような実験を行ってきた Blackett 達 (1937) は実験の結果は理論の適用限界を越えたためと解釈すべきだと反論を述べている。(Blackett, and Wilson (1937) 参照)

- Nishina Y.,and Tomonaga,S., Proc, Phys.Math.Soc. Japan,15,p248 (1933).

- On the Creation of Positive and Negative Electrons.-

陽電子の発見に対して、陽電子はガンマ線による電子・電子の電子対生成に依るものとして、断面積を Dirac の電子論に基づいて計算した。

- Nishina Y., Takeuchi, M. and Ichimiya,T., Phys. Rev. 51,p1198 (1937).

- On the Nature of Cosmic-Ray Particles.-

マグネット霧箱でミュオンの飛跡を捉え、はじめて質量が  $220 \pm 40m_e$  であることを示した、ミュオンの質量測定としては Street Stevenson (1937) にくらべて、論文を投稿したのは、2月ばかり早い。(本文中、写真.1 および写真.2)

- Nishina Y., Takeuchi, M. and Ichimiya,T., Phys. Rev. 55,p585, (1939).

- On the Mass of the Mesotron.-

1938年の9月頃駒込の理化学研究所で撮影された。霧箱のガス中に止まった、極めて質量測定に適した飛跡ある、(本文写真.3参照) 質量としては論文では、 $(170 \pm 9)m_e$



- となっているが、後に Bethe (1946) が霧箱中のガスの多重散乱の影響を考慮して、 $(177 \pm 22)m_e$  が妥当であるとした。検討会ではその後の多重散乱の理論の修正を入れると、 $(177 \pm 18)m_e$  になるとした。
- Oppenheimer, J.R., and Serber, R., Phys. Rev. 51, p. 113 (1937).
    - Note on the Nature of Cosmic Ray Particles.-
  - Neddermeyer-Anderson (1937) と Street-Stevenson (1937) の霧箱で観測された粒子の質量は湯川粒子で期待されるものに近い。しかし、この粒子で核力の特徴を詳細に説明しようとするをやっかいな問題が出てくる。特に、陽子、中性子間、および同種の粒子間ではほぼ同じ大きさの核力が働き、また磁気モーメントや、核力の飽和を説明するには極端に不自然な仮定をおく必要がある。したがって、これらの考察は正しい理論の要素と考えることもできないし、新粒子の存在を示唆する議論としても用いられないと述べている。
  - Street, J.C. and Stevenson, E.C., Phys. Rev. 51, p. 1005 (1937).
    - Penetrating Corpuscular Components of Cosmic Radiation.-
  - アメリカ物理学会での発表。上下二段の霧箱を使い、上のマグネット霧箱で運動量を測定し、下の霧箱で粒子が 3cm 厚の鉛板を貫通する割合を観測した。結果は電子または陽子では説明出来ないことが明らかになった。
  - Street, J.C. and Stevenson, E.C., Phys. Rev. 52, p. 1003 (1937).
    - New Evidence of the Existence of a particle of Mass Intermediate Between the Proton and Electron.-
  - もし、Neddermeyer, Anderson や自分達の示唆が正しければ、飛跡の電離損失と飛程から質量を求め、陽子と電子の中間の質量を持つ粒子の存在が確証できる。質量の直接測定の重要性にふれ、2つの霧箱を使い電離損失と飛程から質量として  $(130 \pm 33)m_e$  を得た。論文が受理されたのは仁科グループより約 1ヶ月後である。現在の値  $207m_e$  から可成りずれているが、その原因については本文参照。
  - Yukawa, H.: Proc. Phys.-Math. Soc. Japan. 17, p. 48 (1935).
    - On the interaction of elementary particle.-
  - 核力を媒介する湯川粒子の論文。核力を媒介する粒子は後に発見されたパイオンで、ミューオンではなかったので混乱がおきた。(註 .1. 参照)
  - Yukawa, H.: Proc. Phys.-Math. Soc. Japan. 19, p. 712 (1937).
    - On a Possible Interpretation of the Penetrating Component of the Cosmic Rays.-
  - Neddermeyer-Anderson (1937) および Anderson-Neddermeyer が観測した中間質量の粒子は湯川粒子 (Yukawa, 1935) である可能性について論じた。この論文は初め Phys. Rev. に投稿されたが、掲載を断られた。ほぼ同時期に違う見解を述べた Oppenheimer, Serber (1937) の論文が投稿されたことと関係があるかも知れない。
  - 仁科芳雄, 科学 9月号, 岩波書店 7, p. 408 (1937).
    - 新粒子の発見 -
  - 写真.1 の観測結果の発表である。同時に Phys. Rev. に Nishina, Takeuchi, and Ichimiya (1937) を投稿した。内容は、Phys. Rev. の論文と基本的に同じだが、ここの科学に掲

載した論文「新粒子の発見」では湯川理論との関係および意義について詳しく論じている。

### III. 参考資料 - ミューオンの発見について調べた参考資料 -

1. 仁科芳雄, 「輓近の電気工学」, 日本電気工学会 (1939).  
日本電気学会での論文。本文中の図.8 の写真.2 が初めて印刷された本である。
2. 仁科芳雄, 関戸弥太郎, 竹内証, : 岩波講座物理学岩波書店 (1941).  
日本で初めて宇宙線について系統的に解説した教科書である。ミューオンの研究についても、仁科研究室と外国の研究を比べ、詳しく解説している。
3. Y.Sekido and H. Elliot, Early History of Cosmic Ray Studies, Reidel. Pub. Company (1982).  
1979年に京都で第16回宇宙線国際学会が開かれた折、H.Elliot, V.L.Ginzburg, B.Peters, J.A. Simpson, Y.Sekido が会合し、関戸先生の提案で宇宙線発見以来の歴史の記録を残して置くことの重要性が話し合われた。初期の発展に活躍をした人々に、当時の記録を書いてもらうため、関戸先生と Elliot が編集者となり、宇宙線の発見者 HESS を含めて数十人の研究者に執筆を依頼した。日本からは湯川先生、関戸先生、竹内証さん、小田稔さんなどが著者となっている。宇宙線研究の歴史を、その発展に携わった当事者が記述した貴重な資料である。
4. B.Rossi: Cosmic Rays, MacGraw-Hill (1964).  
Rossi は宇宙線研究者で有るとともに、X線天文学の創始者である。専門的な内容であるが、一般の人にも理解出来るように書かれた解説書である。
5. S.Hayakawa: Cosmic Ray Physics, Wiley InterScience John Wiley & Sons New York, (1967).  
宇宙線発見の1900年頃から1966年までの宇宙線の研究についてまとめた、標準的な教科書として国際的にも良く知られている。特に Communication が十分でなかった戦中および戦争直後の日本における研究について可成り詳しく述べている。
6. A.M.Hillars, Cosmic Rays, Oxford, Pergamon Press (1972).  
イギリスの宇宙線研究者で、宇宙線研究について明快に解説した教科書である。
7. 竹内証, 宇宙線による中間子研究の憶い出. 自然 1975年7月号。  
1930年代から終戦に至る迄の間、ミューオンの実験を行っていた竹内さんが、当時の思い出を述べており、仁科研究室の発足当時、1936,37年での横須賀や理研における実験、その後の仁科研究室の状況を知ることが出来る。
8. L.M. Brown and L.Hoddeson: The Birth of Particle Physics, Cambridge Univ. Press (1983). - 素粒子物理学の誕生 L.M. ブラウン, L. ホジソン / 編早川幸男 / 監訳. 講談社 (1986).-  
1930年から1950に至る間での素粒子物理学の誕生に関係する理論及び実験についてかなりくわしい解説がなされている。原著は可成り大部であるので、講談社から出版された早川さん監訳の本では訳出はおおよそ半分に関わり、日本での研究に関係が深い部分として参考資料 .3.Sekido and Elliot (1982) の一部およびその他を加えた。

9. 竹内 桓, (仁科研究室・宇宙線霧箱) Vol.45, pp.730-730, 日本物理学会誌 (1990).  
仁科先生の生誕 100 年を記念して日本物理学会誌特集号が出版された。この中で、1930 年後半から 1945 年に至る仁科研におけるミューオンの研究が述べてられている。
10. 仁科芳雄往復書簡集, 中根良平、仁科雄次郎、仁科浩二郎、矢崎裕二、江沢洋編、みすず書房、現代物理学の開拓 (2007)。  
仁科財団の仁科記念室に残された仁科先生の書簡を編者らが整理して作られた書簡集である。可成り膨大なもので、III 巻よりなる (解説を除いて約 1500 ページである)。1919 年から逝去された 1951 年に至るまでの往復書簡がほとんど採録されており、日本における現代科学の発展を知る上で、科学的に貴重な一次資料である。近く、遺補が発行される予定である
11. P.Galison, The Discover of the Muon and the Failed Revolution against Quantum Electro Dynamics; Centaurus, Volume 50, No.1-2, pp.105-159, Blackwell Publishing (2008).  
Harvard 大学の教授でアメリカの著名な科学史学者である。ミューオンの発見については、アメリカでの研究以外は調査が不十分な印象を受ける。このほか、彼の代表的な著作としては How Experiments Ends, University Chicago Press (1987) がよく知られている。
12. 辻二郎、渡辺俊平 編集, ビデオ「科学の殿堂」、昭和 17 年 3 月 20 日 (1942/3/20)。理研科学映画株式会社製作。URL:<http://www.riken.go.jp/r-navi/video/history.html> で見る事が出来る。理化学研究所設立 25 周年を記念して作られた記録映画。戦争は始まっていた (開戦 4 ヶ月目) が、理研および仁科研究室の最盛期の様子を見る事が出来る。
13. 仁科財団、資料室、(霧箱写真、竹内さんが書き残したメモや、研究室の記録など)。

# ウラン-237 と対称核分裂の発見

池田長生

筑波大学名誉教授・元日本アイソトープ協会常務理事

池田でございます。今日は仁科先生のお仕事のうち、サイクロトロンを使いまして、太平洋戦争の勃発する前の二、三年に、この演題に書きましたようなウラン237の発見とか、対称核分裂の発見などといったような大きな仕事をなさいましたが、そのことについてご紹介しようと思います。

1930年代の初めは、サイクロトロンが発明される、中性子とか、重陽子が発見または分離される、それから、1934年にジョリオ＝キュリー夫妻が人工放射性同位元素を発見するといったような大きな発明、発見が相次ぎまして、原子核の人工転換に関する研究が大きく花を開こうとした時代でございます。そのころ、我が国では仁科先生がこれからの日本にとって、原子核物理学の発展と、アイソトープの製造、利用の促進の上にサイクロトロンはぜひ必要であるというようにお考えになりまして、理研にサイクロトロンを作ろうという計画を立てられました。そして1935年に着工いたしまして、1937年にビームが出るようになりました。

表1 関連事項年表

1931	サイクロトロンの発明 (Lawrence)
1932	中性子の発見 (Chadwick)
1932	重水素の分離 (Urey)
1934	人工放射性同位元素の発見 (Joliot=Curie 夫妻)
<u>1935</u>	理研小サイクロトロンの着工 (仁科)
<u>1937</u>	理研小サイクロトロンの完成 (仁科)
<u>1938</u>	トリウムの高速中性子照射実験 (仁科・木村)
1939	核分裂の発見 (Hahn ら)
<u>1940</u>	ウランの高速中性子照射実験 (仁科・木村) $^{237}\text{U}$ の発見、 $^{237}\text{Np}$ の生成 対称核分裂の発見
1940	ネプツニウムの発見 (McMillan・Abelson)

このサイクロトロンを使いまして、仁科先生は早速ナトリウム24ですとか、リン32などのラジオアイソトープをつくりまして、生物学的なトレーサー実験に利用したり、放射線の生物学的影響の研究を行いました。

一方、核物理学的、核化学的な研究につきましては、東大理学部化学教室の木村健二郎先生の協力を得まして、トリウムとか、ウランに、サイクロトロンから得ら

れます高速中性子を照射する実験を行いました。その結果、ウラン 237 の発見とか、当時未発見の 93 番元素が生成していることとか、あるいは対称核分裂の発見といったような大きな成果を挙げられました。



図.1 仁科芳雄先生 (1890-1951)



図.2 木村健二郎先生 (1896-1988)

そのころはちょうど太平洋戦争が 1941 年に勃発する二、三年前にあたり、もうすでに日支事変も始まっておりまして、いわば激動の時代であったわけでございます。それと、もう一つは、こういった大きな仕事の論文が外国のジャーナルに投稿・発表されたということもございまして、わが国の当時の物理学者、あるいは化学者の多くの方が、案外この事実を知らなかったようでございます。むしろ、そのようなことで、海外の科学者の注目を集めたといったような仕事でございます。このような仕事につきまして、今日お話ししようと存じます。

まず、トリウムに高速中性子を照射する実験でございますが、これは硝酸トリウムをターゲットに使っております。この硝酸トリウムはあらかじめ化学的に精製処理を施して、壊変生成物やほかの微量元素を除去したものです。これにサイクロトロンで生じる高速中性子を当てたわけでございます。高速中性子はリチウムに 3 MeV の重陽子をあてて発生させたものです。そして、照射済みの硝酸トリウムにつきまして、さらにもう一回精製処理を施しまして、生成した他の元素の放射性同位体などを除去して、トリウムの部分だけを純粹に分離いたしました。そして、こうして得られましたトリウムのフラクションの放射能を測定いたしましたところ、半減期が 24.5 時間のベータ放射能を観察することができました。

これは、トリウムの照射の前と後に、十分精製処理をしてございますから、トリウムのアイソトープであるということは間違いのないわけございまして、ではその半減期 24.5 時間のトリウムは何かということになります。これは当時すでに知られておりましたトリウム 231 に一致することがわかりました。トリウム 231 は天



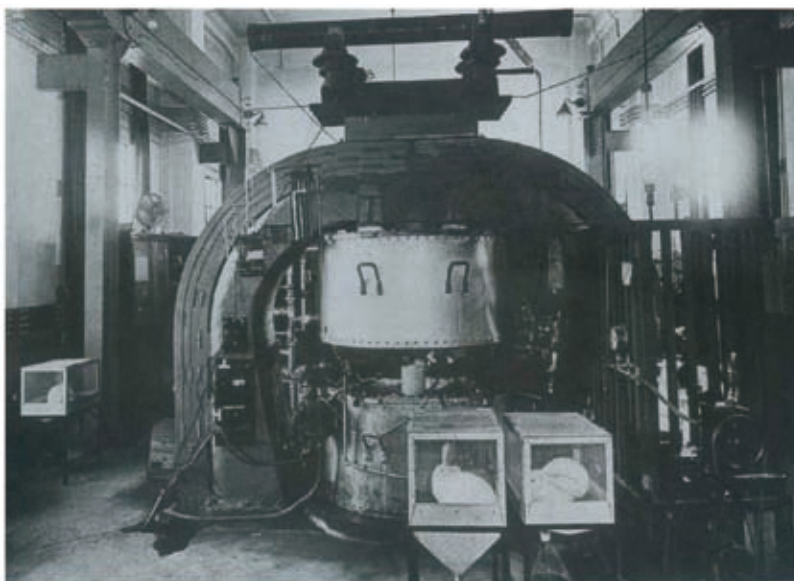
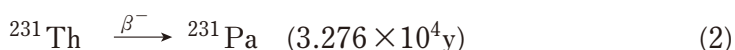
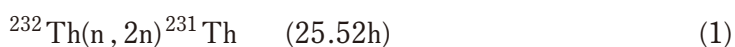


図.3 1937年に建造された理研小サイクロトロン

然のアクチニウム系列の核種でございます。トリウム 231 はアクチニウム系列の中でベータ壊変をして、プロトアクチニウム 231 になります。

こうしてトリウム 232 からトリウム 231 が生成するということがはっきりしたわけですが、ではその核反応はどういうものかということを考えてみますと、中性子が当たって、質量数が1減少するのは、もう1個中性子がたたき出されるという反応になりますので、仁科先生たちは  $(n, 2n)$  反応が起こっているというように考えられたわけでございます。これらの過程はつぎのような式で表されます。



括弧の中の数字は生成核種の半減期の値ですが、これは現在の半減期の値を示しております。仁科先生たちが実際に測定いたしましたのは24.5時間という値ですが、現在の値は25.52時間ということになっております。

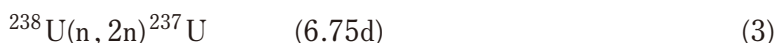
$(n, 2n)$  反応は当時まだこの核反応の例はありませんで、これが最初であったようでございます。それで、仁科研究室では、中性子捕獲反応をキャプチャー反応というのに対応いたしましたので、この反応は中性子がさらに1個たたき出されますから、ノックアウト反応といったような言葉で呼んでいたようでございます。木村先生もよくノックアウト反応という言葉を使っておられました。このようにして、 $(n, 2n)$  反応によってトリウム 231 を作ったわけでございますが、このお仕事は、ト

リウム系列の核種からアクチニウム系列の核種に人工転換をした最初の例としても注目されます。

次にウランの照射実験でございますが、この場合は酸化ウラン ( $U_3O_8$ ) をターゲットに用いております。これもあらかじめ化学的に精製処理を施しまして、壊変生成物や不純物元素を除去しておきまして、この精製酸化ウランに高速中性子を照射いたしました。照射済みの酸化ウラン試料につきまして、もう一回精製処理を施しまして、同時に生成するほかの元素の放射性同位体 (核分裂生成物など) や、照射中に生成する壊変生成物を除去しました。こうして得られましたウランのフラクションの放射能を測定いたしましたところ、半減期が 6.5 日のベータ放射体が生成していることが認められました。

半減期 6.5 日のウランの同位体は当時まだ知られておりませんでした。それで、ではこの新しいウランの同位体の質量数はいくつかということですが、仁科先生たちは、おそらく、これは先ほどお話をしたトリウムの場合の式 (1) の反応と同様に、ウランの場合も ( $n, 2n$ ) 反応が起こるのではないかとこのように考えられました。そういたしますと、( $n, 2n$ ) 反応の結果生ずるものは、中性子が 1 個入って、2 個出ますから、質量数は 238 から 1 減りまして、237 になります。それでここに生じた半減期 6.5 日のウランの同位体はウラン 237 であるというように結論をしたわけでございます。

ウラン 237 はベータ壊変をしますから、その壊変生成物は、原子番号が 1 上がって、93 番元素の 237 ということになります。この過程は、式 (1)、(2) に対応して、式 (3)、(4) のように表されます。



当時知られておりました元素は 92 番のウランまでで、93 番元素はまだ未発見でした。この 93 番元素は 1940 年にアメリカのマクミランとエーベルソンによって発見され、ネプツニウムと名づけられまして、元素記号は Np ということになりましたが、ここでは未発見ですので、[93] と書いておきました。93 番元素の 237 もおそらく式 (2) のプロトアクチニウム 231 と同じように、半減期は長いだろうと推測しております。

式 (3)、(4) を見ますと、この研究はウランの新しい同位体ウラン 237 を発見したこと、それから 93 番元素が確かにできていることを示した意味で非常に大きな仕事でございます。

また式 (4) の壊変系列の質量数 237 は 4 で割りますと、1 余りますので、( $4n+1$ )

系列に相当します。当時壊変系列と致しましては、ウラン系列、トリウム系列、アクチニウム系列の三つが天然に知られておりまして、ウラン系列は質量数を4で割りますと2余りますから、 $(n+2)$ 系列、アクチニウム系列は3余りますから $(n+3)$ 系列、トリウム系列は4で割り切れますから、 $4n$ 系列ともいわれております。 $(4n+1)$ 系列だけが天然にも人工的にも当時は知られていなかった欠員系列でございますが、式(4)の壊変が $(4n+1)$ 系列の例ということになるわけでございます。なお $(4n+1)$ 系列は現在ネプツニウム系列と呼ばれております。

この研究はまたウラン系列の核種から、ネプツニウム系列の核種に人工的に転換いたしました最初の例でもございます。

つぎに93番元素の探求のお話をいたします。ウラン237のベータ壊変によって、93番元素の237ができていることは確かでございます、これをうまく分離して、その放射能を測定、検出すれば、新元素であります93番元素の発見という非常に大きな仕事になるわけでございます。それで仁科先生、木村先生たちはこれを分離することを試みました。木村先生は当時の元素の周期表の上からは、93番元素はレニウムと同じ第7族元素で、レニウムに化学的性質が似ているだろうというようにお考えになりました。それで、レニウムを担体として加え、硫化レニウムの沈殿に93番元素を共沈させて分離しようと試みましたが、硫化レニウムの沈殿には放射能は検出されませんでした。それで、仁科先生、木村先生は93番元素の237は、式(2)のプロトアクチニウム231と同様に、半減期が非常に長くて、そのために放射能が非常に微弱で、検出できないものと考えまして、この結果をウラン237の発見の論文の中で、一緒に報告しております。

その後、アクチノイドという概念が提唱されまして、現在の周期表では89番のアクチニウムから103番のローレンシウムまでの15元素はアクチノイドというひとつの枠にまとめられまして、ウランもネプツニウムもアクチノイド元素の一員ということになりました。アクチノイド元素はランタノイド元素と同様に、現在の周期表の上では第3族元素ということになっておりますが、それから考えますと、ネプツニウムの化学的性質はレニウムに似るよりも、むしろウランやランタンに似ていると考えられます。木村先生ご自身も「レニウムを担体として用いたことはどうもまずかった。」と後日述懐をされておりますが、まあこれはアクチノイドという概念が出て初めてわかることございまして、当時の周期表からいえば、レニウムを使ったというのは至極当然な選択であったと思います。

いずれにいたしましても、そういった問題以前に、この質量数237の93番元素の半減期が非常に長かったということが致命的な原因であったわけです。1942年にカリフォルニア大学のグループによってネプツニウム237が合成、確認されまし

て、半減期が214万年というように測定されております。ですから、もう何を担体を選び、どんなにうまく分離が行われたとしても、半減期が200万年もあるのでは、放射能は極めて微弱で、到底測定できないわけでございます。放射能は半減期に反比例しますから、半減期が長くなれば長くなるほど、放射能は微弱になる、半減期が無限大になれば安定（非放射性）ということになるのでございまして、そのようなわけで仁科先生、木村先生の場合は、この半減期が200年以上であったということが、いわば運が悪かったといえるでしょう。ですから、レニウムを担体を選んだことが誤りであったというのも、ちょっと言い過ぎなので、やはり根本的な原因は半減期が極めて長かったためというように考えるのが妥当ではないかと思えます。

さて、93番元素についてでございますが、93番元素は、仁科先生、木村先生はいまお話ししましたように、式(3)、(4)の過程で生成する半減期のきわめて長いネプツニウム237を追っかけていたわけです。一方、カリフォルニア大学ではマックミランとエーベルソンがウランに低速中性子をあてまして、中性子捕獲反応でウラン239を生成させ、そのベータ壊変でネプツニウム239を得ております。その過程は式(5)、(6)のとおりです。



半減期はウラン239が23.5分、ネプツニウム239が2.4日というように、放射能を測定する上ではまことに手ごろな長さでございます。それからネプツニウム239はウラン239の壊変によって生じますから、ウランの照射終了後5時間以上たてば、ウラン239は減衰してしまって、後に残るのはネプツニウム239だけといったような有利さもあるわけでございます。

そんなようなことが幸いしまして、93番元素の発見者はマックミランとエーベルソンということになったわけでございますが、その点、まさに仁科先生たちの場合は93番元素を手中に収めながら、その半減期が長過ぎたことが、不運だったの一語に尽きるかと思えます。

つぎに対称核分裂の発見についてお話をいたします。ただいまお話ししましたのは、酸化ウランに高速中性子をあてまして、ウランのフラクシオンについて研究した結果でございますが、さらに仁科先生、木村先生たちはウラン以外のフラクシオンについても詳細な化学分析を行いました。その結果、ウラン以外のフラクシオンにルテニウム(Ru)、ロジウム(Rh)、パラジウム(Pd)、銀(Ag)、カドミウム(Cd)、インジウム(In)、スズ(Sn)の7元素の放射性同位体が生成していること

を認めました。当初仁科先生、木村先生たちはどのような機構でこれらの放射性同位体が生成するのか、その解釈に苦慮したと記されておりますが、やがてドイツのハーンらが核分裂の現象を発見し、その論文を見まして、これらの放射性同位体が核分裂生成物であることが分かったような次第です。

ここで原子番号を考えてみますと、分かりやすいかと思えます。ルテニウムが44番で、上に列記した順にスズの50番までが並びますが、この中で原子番号の46という数字がウランの92のちょうど半分であることに着目いたしますと、ウラン1個が真っ二つに分裂すれば、46番元素のパラジウムの同位体ができるということになるわけです。また、ある確率（断面積）でロジウムの同位体が生成するとすれば、これは45番元素ですから、その相方は47番元素の銀ということになります。同様に44番元素のルテニウムの片割れは48番元素のカドミウムであるといったようなことになるわけでございます。これは非常に対称性の高い核分裂でございます。同様の実験はシーボーグらのグループもカリフォルニア大学のサイクロトロンを用いて行っておりまして、ほぼ同様の研究結果を得ております。そしてこの現象を対称核分裂というように言っておりますが、この対称核分裂の発見は仁科先生、木村先生たちのグループの方がシーボーグらよりも早かったわけでございます。対称核分裂の発見者は仁科先生、木村先生であるということはシーボーグ自身も言っておりまして、まさにこれも世界的な大きな仕事であるといえます。

それからドイツのハーンらの核分裂ですが、これは低速中性子による核分裂でございます。高速中性子の場合には、ほとんど真っ二つに、対称的に分裂しますが、ハーンらの低速中性子による核分裂では四分六分に割れる確率が大きく、原子番号で言いますと、36付近と56付近に二つのピークができて、真ん中が著しく窪むといったような収率曲線を示します。それで、対称核分裂に對しまして、まあ名前が適当かどうかは別として、非対称核分裂といった名前を使っているようでございます。要するにハーンらが発見いたしましたのは非対称核分裂であり、仁科先生、木村先生たちが発見いたしましたのは対称核分裂であるということになります。

いまお話ししましたように、仁科先生、木村先生たちは7種類の元素の核分裂生成物が発見されたわけですが、戦前知られておりましたウランの核分裂生成物は、低速中性子によるものも含めまして、総数24元素でした。ですから、24元素のうち、7元素が日本で発見されたこととなります。なお、現在ではウランの核分裂生成物として、36元素が知られております。

以上が仁科先生、木村先生が戦前に行いました世界に誇る大きなお仕事の概要ですが、私は終戦の年の昭和20年に東大の理学部化学科に入りまして、一年生の学



生の時に木村先生の無機化学の講義をききました。その中で、木村先生がこういったお話を非常に熱をこめてお話になりましたことが、今でも印象深く記憶に残っておりまして、今日のお話も、木村先生の講義のノートから引用させていただいた部分も沢山ございます。

こういった大きな仕事は物理学者と化学者、あるいは物理学グループと化学グループとの緊密な連携プレーが大きな役割を演じているものでございまして、ただいまお話をいたしました立派な成果も、仁科先生、木村先生の連携プレーに負うところが大きいわけでございます。木村先生は若いころ、やはりコペンハーゲンのポーア先生の研究室に留学されまして、2年間ほど仁科先生と一緒に研究生活を送られました。そしてその間、化学結合と X 線スペクトルとの関連につきまして仁科先生と共同研究をして、共著の論文を発表されております。それ以来、仁科先生、木村先生はお互いに信頼し合う仲、いわば肝胆相照らす仲でございまして、ずっと親交を重ねてこられたわけでございます。仁科、木村両先生はまさに絶妙なコンビであったと申すことができます。今ここに両先生の偉大なお仕事に対しまして、心からなる尊敬の念と称賛の辞を捧げたいと存じます。どうもありがとうございました。

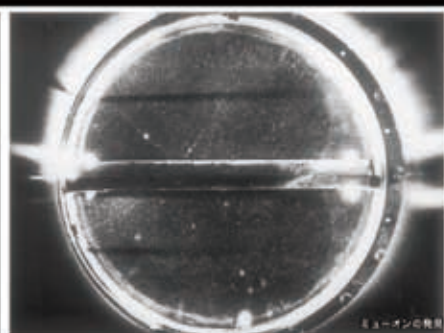
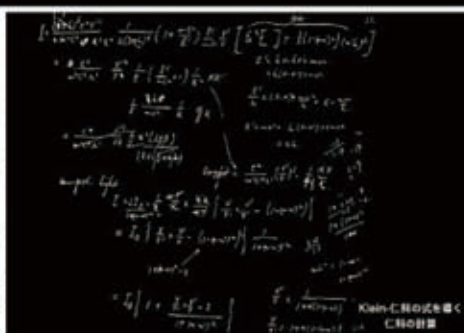
日本現代物理学の父

仁科芳雄博士生誕 120 周年記念講演会

# 仁科芳雄博士の輝かしき業績

日時 2010年12月6日 16:00-17:30 [15:30 開場]

場所 東京大学理学部1号館 小柴ホール



## プログラム

### 1. コペンハーゲンから理研へ — 素粒子物理学のあけぼの

小林 誠 | 日本学術振興会理事・高エネルギー加速器研究機構特別栄誉教授

### 2. ミューオンの発見

西村 純 | 東京大学名誉教授・宇宙科学研究所名誉教授

### 3. ウラン-237 と対称核分裂の発見

池田 長生 | 筑波大学名誉教授・元日本アイソトープ協会常務理事

共催 東京大学理学部物理学教室, 同 化学教室, 理化学研究所仁科加速器研究センター

後援 仁科記念財団

[http://www.phys.s.u-tokyo.ac.jp/20101206\\_nishina/index.html](http://www.phys.s.u-tokyo.ac.jp/20101206_nishina/index.html) にてインターネット配信