

物理学者日下周一について(2)

- 学位論文 -

斎藤 吉彦、大倉 宏、加藤 賢一

大阪市立科学館

概要

日下周一(1915-1947)が博士号を取得するために受けた学位審査の最終試験プログラムおよび提出された論文について紹介する。本最終試験は1942年2月、ロバート・オープンハイマーが委員長になって行なわれ、日下は素粒子のスピンに関する研究を中心とした5本の論文を提出した。ここではその内容を概観して当時の素粒子研究の状況を振り返り、日下の研究の意義を考える。

1. はじめに

日下周一(1915-1947)の生涯や業績の一端については本研究誌で紹介した(論文1、加藤2005)。本論文はその2として、日下が博士号を得るために受けた学位審査のための最終試験プログラムおよび提出された論文について紹介する。

基礎となった資料である最終試験プログラムは日下の甥であるビクター・クサカ氏(カナダ・バンクーバー市在住)が所蔵されているもので、土居卓治氏(京都市左京区端柳ヶ坪町)が2004年12月、クサカ氏を尋ねた折に提供され、加藤に紹介があったものである。

最終試験プログラムは4ページにわたって手書きで作成されていて、日下の自筆と推察される。その外観を図1に、その邦訳を表1に掲げる。

主任教授のオープンハイマー(1904-1967)が審査委員長を努め、この最終審査に合格して日下は学位を取得した。オープンハイマーは在職中約30人に学位を与えているが、その一人が日下周一であった。なお、この審査会には委員として、他にシーボーグやセグレという高名な物理学者も参加していた。

シーボーグ(1912-1999)は当時、バークレー放射線研究所の教授で、1941年にプルトニウムを人工的に生成し、発見していた。その後、マクミランらと共同で95番から102番までの全ての超ウラン元素を発見し、またそれらを単離に成功した。これによって1951

年、マクミランらとともにノーベル化学賞を受けた。また、プルトニウムが核分裂することを発見したことから、1943年からオープンハイマー率いるマンハッタン計画に参加し、プルトニウム分離法開発の指揮をとった。戦後はアメリカ原子力委員長などを歴任した。(以上、物理学辞典1986)

セグレ(1905-1989)はイタリア生まれで、フェルミの最初の教え子であった。1937年、カリフォルニア大学のサイクロトロンで照射したモリブデンから人工的に作られた最初の放射性元素「テクネシウム」(「人工」という意味)を発見した。1938年、カリフォルニア大学の研究員として渡米し、1942年当時はバークレー放射線研究所の所員であった。翌年からはオープンハイマーと共にマンハッタン計画に参加することになる。1955年、反陽子を発見し、その功績により1959年、ノーベル物理学賞を受けた。(以上、物理学辞典1986)

こうした人たちから分るように、日下は当時原子核研究の最先端に行くバークレーで研究生を送り、原子爆弾開発にアメリカ中の主要な物理学者が動員されるマンハッタン計画が始まる直前に大学院生活を終了した。マンハッタン計画の指揮をとったのは恩師オープンハイマーであり、彼らが大学で物理学者として研究生を送っていた最後の時期にあたる。

なお、本稿は1, 2章ならびに図・表を加藤が、3

章以下は斎藤および大倉が執筆し、全体調整を加藤が行なった。

2. 日下の学位論文

日下が最終試験に提出した論文のタイトルは以下の通りであった。

- A. 重水素核の4重極電気モーメント
- B. メソトロンとガンマ線との相互作用
- C. メソトロンによるバースト発生
- D. スピン 3/2 のニュートリノを伴った崩壊
- E. 高階スピンを持つ粒子に対する波動場の量子化

全体のタイトルは「素粒子のスピンに関する研究」であり、いずれも理論によるアプローチを行なった。Aは1939年に、B, C, Dは1941年にフィジカル・レビュー誌に発表していた。審査当時、博士課程3年目で、弱冠26歳であった。他にも同誌への発表論文が1本あり、堂々たる成果を挙げての学位審査であったと思われる。

A, B, C, Dのタイトルと Physical Review 誌の掲載号は以下の通りである。

- A: Electric Quadrupole Moment of the Deuteron, R. F. Christy and S. Kusaka, Phys. Rev. 55, 665 (1939)
- B: The Interaction of gamma -Rays with Mesotrons, R. F. Christy and S. Kusaka, Phys. Rev. 59, 405 (1941)
- C: .Burst Production by Mesotrons, R. F. Christy and S. Kusaka, Phys. Rev. 59, 414 (1941)
- D: beta -Decay with Neutrino of Spin 3 / 2 S. Kusaka, Phys. Rev. 60, 61 (1941)

日下は中間子を mesotron と書いているが、現在は meson と綴る。これは1934年、湯川秀樹(1907-1981)が中間子を提唱後しばらくして用いられるようになった用語で、アンダーソンが命名したようである。ミュオン発見後の1937年以降後に使われるようになったらしいが、その後、meson と表現するようになった。

1943年発表されたパウリ(1900-1958)と日下の共同研究論文のタイトルは「On the Theory of a Mixed Pseudoscalar and a Vector Meson Field」となっており、meson が使われている。

湯川の中間子論は1935年に発表された。中間子は原子核を小さく固めている力の源泉として導入された未知粒子であったが、1937年、アンダーソンによりそれらしい粒子(ミュオン)が発見され、それが湯川の中間子と目された。オッペンハイマーらも同様の見解を発表しており、彼が中間子論に大いに関心を抱いていたことが分る。

しかし、やがてこのミュオンは湯川の中間子ではないことが判明し、湯川理論は困難な壁にぶつかる。それを打開すべく提唱されたのが1942年頃の坂田・谷川・井上らの2中間子論で、湯川粒子が崩壊して、アンダーソンが発見した粒子を生成するというアイデアであった。この研究成果は第二次世界大戦のため発表が遅れ、1946年に公表された。そして、翌年、1947年にパウエルによって宇宙線中に、現在パイオンと呼ぶ新粒子が発見された。これは強い相互作用を行い、質量は電子の250倍ほどで、湯川の予言した中間子であった。それと同時に、パイオンがミュオンに崩壊している様子が観測されており、坂田・谷川・井上の仮説が実証されたのであった。

ニュートリノはパウリ(1901-1954)が1930年、崩壊を説明するために導入した未知粒子であった。ニュートリノは中間子より早く多くの研究者が認めるところとなったが実際に発見されたのは1956年のことである。

日下はこのように理論的に存在が予言されていながら発見されず、また性質もよく分らない未知の素粒子に関する研究を行っていた。そのため、現在の目から見ると、いささか奇妙な表現や考察も散見される。これは、日下らが最前線で、まさにパイオニアとして手探り状態で研究を続けていた証と言えるであろう。詳細は以下の章で紹介したい。

なお、日下がフィジカル・レビュー誌に発表した論文が他に4本ある。それらを以下で紹介しておく。

- ・ The Energy Spectrum of the Primary Cosmic Radiation, S. Kusaka, Phys. Rev. 67, 50 (1945)
- ・ The Effect of Radiation Damping on Burst Production, S. Kusaka, Phys. Rev. 64, 256 (1943)
- ・ On the Theory of a Mixed Pseudoscalar and a Vector Meson Field, W. Pauli and S. Kusaka, Phys. Rev. 63, 400 (1943)
- ・ Galactic Rotation and the Intensity of Cosmic Radiation at the Geomagnetic Equator, M. S. Vallarta, C. Graef, and S. Kusaka, Phys. Rev. 55, 1 (1939)

3 . 論文 A . 重水素核の 4 重極電気モーメント

重陽子が $2 \times 10^{-27} \text{cm}^2$ の電気 4 重極子モーメント (註 1) を持つと解釈できるような観測があった (Kellog et al. 1939)。これは通常のマヨラナ力とハイゼンベルグ力 (註 2) だけでは説明できないものであった。この論文 A は、次のスピン - 軌道相互作用を導入することで、重陽子の電気 4 重極子モーメント $2 \times 10^{-27} \text{cm}^2$ が説明可能となることを示した。

$$J(r) (\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}_1) (\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_1) \dots (1)$$

論文の記述はおおよそ次のとおり。

通常の力を井戸型ポテンシャル (幅: $2.2 \times 10^{-13} \text{cm}$)、J も同じ幅の井戸型 (註 3) とすると、両者の深さが同程度ならば、 $2 \times 10^{-27} \text{cm}^2$ の電気 4 重極子モーメントが得られる。

(1) を採用する動機に湯川の中間子論 (Yukawa et al. 1938) を匂わせている。すなわち、湯川理論から導かれる相互作用の一次の項に似ていると。そこでは湯川グループだけでなく Schwinger (1939) をも引用している。

(1) と湯川理論から導かれる相互作用とは同程度であるが、湯川理論から導かれる相互作用は斥力であり、電気 4 重極子モーメントは実験値と異なって負となる。

もし、(1) が通常の力と同程度なら、重陽子の全

スピンは保存しない。近似的にも保存するとは言えない。

湯川はノーベル賞講演 (Yukawa 1949) で、核力と電気 4 重極子の両方が正しい符号を与える中間子の場合は擬スカラー場だけであると、Rarita & Schwinger (1941a, b) を引用して述べている。Rarita & Schwinger (1941a, b) は、(1) を含んだ、より一般的な核力を吟味しているが、論文 A を引用していない。論文 A を評価するには、論文 A からこの Rarita & Schwinger (1941a, b) までの仕事をレビューする必要がある。

ところで、次の記述が当時の中間子論の状況をうかがわせているので付記する。Rarita & Schwinger (1941a, b) は、自分たちの核力の形は湯川理論から導かれるものと似ているが、不完全な湯川理論に裏付けられる必要はないと次のように強調している (Rarita & Schwinger 1941b)。

"It should be stressed, however, that any evidence offered on behalf of one of these potentials should not necessarily be construed as support for the corresponding mechanism suggested by the present, incomplete mesotron theories."

これと Kusaka の記述 (註 3) は、当時の湯川理論が困難な状況にあったことを表しているのであろう。

<以上、斎藤>

NMR を用いて原子核の電気 4 重極モーメントが盛んに測られはじめたのは 1950 年代とされているが、それより 10 年も前の先駆的な実験に日下たちは着目したようである。

重陽子は $2.738 \times 10^{-24} \text{cm}^2$ の電気 4 重極モーメントを持っている。4 重極モーメントを持つということは、核の形が球形からずれているということであり、重陽子の基底状態は 3S_1 状態にテンソル力によりわずかに 3D_1 状態が結合したものとして理解されている。

理論的に扱うためには、たとえ核の飽和性を説明するために導入された交換力 (スピンやアイソスピンを入れ替える項) を考慮しても、中心力だけでは解は球

形となり 4 重極モーメントは現れることはない。しかし非中心力を導入し、適切なパラメータの値を用いれば 4 重極モーメントの値を再現することは可能である。

用いた非中心力に対して日下は spin-orbit interaction という用語を用いているが、 $r \times (\mathbf{p}_p + \mathbf{p}_n)$ の L S 力ではなく、形からすれば明らかにテンソル力 $3(\mathbf{p}_p \cdot \mathbf{r})(\mathbf{p}_n \cdot \mathbf{r})/r^2 - (\mathbf{p}_p \cdot \mathbf{p}_n)$ の一部である。なぜ spin-orbit interaction と言っているのかは分らない。

スピン $\mathbf{p}_p, \mathbf{p}_n$ と空間相対座標 $\mathbf{r} (= r_p - r_n)$ との相互作用を含まない中心力だけでは、S 状態に D 状態を混合させることは不可能であり、日下らの spin-orbit interaction は湯川らの仕事を知った上で、現象論的に導入されたものなのかもしれない。

1938 年の坂田、武谷と著した中間子論第 3 論文の中で、湯川は陽子と中性子との間の交換力を導出している。その中には、テンソル力の形を持つ非中心力が現れている（湯川らはその項に対して spin-orbit interaction という用語を用いてはいない）。そして、厳密な中心力ではないため S 状態、P 状態などというものは近似的なもの、つまり混合が起こることも指摘している。

1939 年の日下の論文はこの湯川らの論文を参照している。しかし、相互作用としては湯川型ではなく、簡単な井戸型を用いてポテンシャルの深さをマヨラナ力と比較して議論している。

4 重極モーメントが小さい基底状態の中心は S 状態であり D 状態の混合が少ないことは、中心力に比べてテンソル力が弱いことを意味するが、日下は彼の spin-orbit interaction の強さがマヨラナ力（テンソル力の中のマヨラナ項ではなく中心力のマヨラナ項）と同程度であると述べている。なぜウイグナー項など考えずにマヨラナ力なのか、なぜ同程度になるのかは、この論文からだけでは分らない。

<以上、大倉>

4 . 論文 B . メゾトロンとガンマ線との相互作用

この論文に先立って、オッペンハイマーらは次のような結果を得ていた (Oppenheimer et al. 1940)。原子核の電磁場をクーロン場とした場合と、クーロン場を原子核サイズでカットオフした場合の断面積を計算すると、2 つの結果は大きくかけ離れたものとなる。Kusaka らは、この大きな違いは、カットオフした場合の高振動フーリエ成分によるものとして、オッペンハイマーらの計算結果を修正した。それがこの論文である。そして、下記 の計算結果を続く論文 "Burst Production by Mesotrons" で、バースト現象の解析に使った。

なお、下記 に関しては、小林稔・内山龍雄が同時期に同様の仕事をしていて、先に発表している (Kobayasi & Utiyama 1940a,b)。このことについては、小林らの論文が発表されたのは、Kusaka が論文 B を投稿した後であると論文 B の脚注に記されている。

論文 B の主な成果

スピン 1 の mesotron の 線による対生成と、原子核の電磁場による制動放射との断面積を次の 3 通りの方法で与えた。

原子核の静電ポテンシャルをクーロン場とする

原子核の静電ポテンシャルを、原子核の大きさを考慮して、クーロン場を補正したものとする（カットオフではない）、

制動放射との断面積に対して、仮想光子の方法(註 5) で計算する。原子核の大きさを考慮するために空間積分の下限を原子核サイズとするが、この任意性をの結果を用いて決定する。断面積の下限を得るために振動数積分をある値でカットオフする。対生成に関する計算は行っていないが、これは続くバーストの研究に重要でないからと記している。

の計算に際して、mesotron のエネルギーを十分に大きい場合の近似として Born 近似を使って摂動計算を行っている。

<以上、斎藤>

5 . 論文 C . メゾトロンによるバースト発生

本論文は mesotron が発見されて数年後、 中間子

が発見される 7 年前に発表されたもので、強い相互作用をしないミュオンを湯川粒子と同一とした混沌とした時代の仕事である。

この論文は Shein & Grill (1939) によるバースト (註 6) の観測から mesotron のスピンを議論したもので、スピン 1 を棄却し、 $1/2$ か 0 とした。

Shein らが観測したバーストを、鉛の中で $1 \sim 100\text{GeV}$ の mesotron によって弾性衝突により弾き飛ばされた電子が、あるいは鉛の原子核の静電場による mesotron の制動放射が、カスケードシャワーを起こしたものと仮定した。制動放射の断面積をスピンの場合は論文 B を、スピン 0 の場合を新たに計算し、スピン $1/2$ のそれは、ハイトラー(Heitler 1936) のものを与えている。電子との弾性衝突の断面積もそれまでの知見 (Bhabha 1938; Massey & Corben 1939; Corben & Schwinger 1940) を用いている。これらの断面積を用いて、バーストサイズ (mesotron のエネルギー) - 頻度の関係をスピン 1 (カットオフした場合) としない場合、 $1/2$ 、0 のそれぞれの計算結果と、Shein らの観測値を比較し、スピン 1 を棄却している。

論文 C のインパクト

坂田・井上の 2 中間子論の背景

1937 年、アンダーソンとネッダマイヤーが μ を質量が電子の 200 倍の荷電粒子と結論し、mesotron と命名した (アンダーソン 1936)。この発見で、湯川の間子論が注目され、mesotron を湯川粒子と同一とするが、様々な矛盾で中間子論は混沌としていた。坂田・井上 (Sakata & Inoue 1946) が、湯川粒子がスピン $1/2$ の、谷川がスピン 0 の mesotron に崩壊するとの説 (2 中間子論) を提唱し、1947 年の湯川粒子が発見され日の目を見ることになった。坂田・井上 (Sakata & Inoue 1946) が mesotron のスピンを $1/2$ と仮定したのは、本論文 "Burst Production by Mesotrons" に裏付けられている。なお、2 中間子論に対して、湯川、朝永、それぞれが素人の発想とし、否定的であったと言う。mesotron の問題を、湯川は場の量子論における発散問題に起因するものと考え、朝永は近似の精度の問題と考えていた (長島 2005)。

湯川・坂田による評価

湯川と坂田 (湯川、坂田 1942) は 1942 年 11 月 21 日発行の教科書に論文 C について

「この結果を見ると、中間子のスピンの値としては 0 或いは $1/2$ を採るのが最も観測結果を正しく表はす様に思われる。斯様な結論は最近有力となった擬スカラー場の理論或いは混合場の理論と關聯して興味がある」

と紹介している。

早川による評価

早川 (1986) は、論文 C について

「この仕事は 1941 年に日本を訪れた Kusaka によって知らされ、大戦中の中間子論の発展に影響を与えた」

と "Burst Production by Mesotrons" を評しているが、これは上記 のことを含むのであろう。また、

「・・・バーストについての問題が解決しただけでなく、中間子のスピンについて重要な知識が得られた。クリスティーとクサカの仕事は中間子の衝突過程を定量的に計算し、宇宙線の実験と比較した最初のものである」

とも評している (早川 1972)。

1950 年代の再評価

1950 年代の宇宙線の教科書に次のような再評価がある (Wilson & Wouthuysen 1958)。

「Christy と日下は鉛内で生成されるバーストの結果を解析した。制動放射に関してはボルン近似を適用しているが、ボルン近似が成立するのは原子番号の小さな物質である。鉛を使った観測との比較結果は疑わしい。そこで、1952 年 Drigger (1952) は原子番号の小さいレンガとコンクリートを使用した観測で Christy と日下の解析を再評価し、スピン $1/2$ を得た。」

<以上、斎藤>

6 . 論文 D . スピン $3/2$ のニュートリノを伴った 崩壊

オープンハイマーが示唆したニュートリノスピン $3/2$ の可能性を、崩壊の energy-lifetime relation で

吟味し、棄却したもの。Physical Review 誌の Letter として掲載された。その要約は以下のとおり。

「ニュートリノのスピンは $1/2$ とされているが、それは単なる理由以外に先験的理由はなかった。オッパンハイマーが、different masses and spins を持つニュートリノの可能性を示唆した(Oppenheimer 1941)。それは Konopinski - Uhlenbeck タイプのものである。Rarita & Schwinger (1941c) (註7) による $3/2$ スピン粒子の波動方程式を使って計算すると、energy-lifetime relation が 7 乗則に乗る。spectra の観測は 7 乗則よりも Fermi distribution で与えられる 5 乗則の方に乗る。ニュートリノのスピン $3/2$ は棄却される。」

崩壊の energy-lifetime relation の導出方法が不明瞭であり、この調査を今後の課題としたい。

<以上、斎藤>

7. 論文 E . 高階スピンを持つ粒子に対する波動場の量子化

外静電磁場中での、任意の整数と半整数スピンの場の量子化を試みる。場の交換関係が射影演算子に関係することを示す。そして、スピン $3/2$ の場合について計算し、point 演算子になることを示した。空間的に離れた 2 点では電荷密度が交換する。

相対論的に矛盾しない結果を得たようであるが、どのような動機でこの仕事を行ったのか不明である。

<以上、斎藤>

< 註 >

註 1 . 現在では $2.859 \times 10^{27} \text{ cm}^2$ とされている。

註 2 . 交換力は重原子核の束縛エネルギーが核子数に比例することを説明する。マヨラナカもハイゼンベルグ力も交換力で、それぞれ、2 核子のパリティによって符号を変える力、2 核子のアイソスピン状態が $S = 1$ と $S = 0$ で符号を変える力である。

註 3 . 井戸型を採用する理由に

"This schematic form for K was chosen for convenience since divergences render questionable

the form of the terms given by Yukawa's theory."

と湯川理論の発散による困難に触れている。

註 4 . 註 3 の文献を引用しているが、該当する論文は Physical Review 誌に見当たらない。

註 5 . 原子核による静電場を mesotron が静止する慣性系へローレンツ変換して扱う方法。mesotron に高エネルギーの線が衝突する描像で計算を行う。

註 6 . 電離箱内のイオン濃度が急激に増す現象。

註 7 . 謝辞に "Dr. Julian Schwinger" とある。また、引用文献のあとに、

"The author is greatly indebted to Drs. Rarita and Schwinger for letting him make use of their theory before publication."

とある。この Rarita and Schwinger の論文の次に論文 D が Physical Review 誌に掲載されている。

参考文献

- Bhabha, H. J. 1938, Proc. Roy. Soc. **A164**, 257.
Christy, R. F., & Kusaka, S. 1939, Phys. Rev. **55**, 665.
Christy, R. F., & Kusaka, S. 1941a, Phys. Rev. **59**, 405.
Christy, R. F., & Kusaka, S. 1941b, Phys. Rev. **59**, 414.
Corben, H. C., & Schwinger, J. 1940, Phys. Rev. **58**, 953.
Driggers, F. E. 1952, Phys. Rev. **87**, 1080.
Heitler, W. 1936, The Quantum Theory of Radiation, Oxford, p.168.
Kellog, J. M. B. et al. 1939, Phys. Rev. **55**, 318L.
Kobayasi, M., & Utiyama, R. 1940a, Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Research, Tokyo **37**, 221.
Kobayasi, M., & Utiyama, R. 1940b, Proc. Phys. Math. Soc. Japan **22**, 882.
Kusaka, S. 1941, Phys. Rev. **60**, 61.
Massey, H. S. W., & Corben, H. C. 1939, Proc. Camb. Phil. Soc. **35**, 463.
Oppenheimer, J. R. 1941, Phys. Rev. **59**, 908.

大阪市立科学館研究報告 15, 51-61(2005)

Oppenheimer, J. R., Snyder, H., & Serber, R. 1940,
Phys. Rev. **57**, 75.

Rarita, W., & Schwinger, J. 1941a, Phys. Rev. **59**,
436.

Rarita, W., & Schwinger, J. 1941b, Phys. Rev. **59**,
556.

Rarita, W., & Schwinger, J. 1941c, Phys. Rev. **60**,
61.

Sakata, S., & Inoue, T. 1946, Prog. Theor. Phys. **1**,
143.

Schwinger, J. 1939, Phys. Rev. **55**, 235.

Shein, M., & Grill, P. S. 1939, Rev. Mod. Phys. **11**,
267.

Wilson, J. G., & Wouthuysen, S. A. 1958, Progress
in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics **5**,
114, North-Holland Publishing company
Amsterdam

Yukawa, H. 1949, Nobel Lecture

Yukawa, H., Sakata, S., & Taketani, M. 1938, Proc.
Phys. Math. Soc. Japan **20**, 319.

アンダーソン 1986、素粒子物理学の誕生、L. M. ブラ
ウン・L. ホジソン編、講談社 p122.

加藤賢一 2005、大阪市立科学館研究報告 15, 43

長島順清 2005、日本物理学会誌 Vol.60, No3. p.171

早川幸男 1986、素粒子物理学の誕生、L. M. ブラウ
ン・L. ホジソン編、講談社、p.86.

早川幸男 1972、宇宙線、筑摩書房

物理学辞典 1986、物理学辞典編集委員会編、培風館

湯川秀樹・坂田昌一 1942、原子核及び宇宙線の理論、
岩波書店