

American Physical Society 誌に掲載された日下周一の論文

斎藤 吉彦*

概要

日下周一(1915-47)が American Physical Society (APS)に発表した全論文 8 編を紹介する。

1. はじめに

日下周一は幼少のころにカナダに移住し、オープンハイマーの下で中間子を研究し、湯川グループと競った大阪出身の理論物理学者である。1940年には来日し、阪大理学部で湯川グループと議論し、その知見をもとに中間子のスピンに関する重要な結果を見出した。戦後、プリンストン大学助教授の職を得たものの、1947年に水死した^{1,2}。大阪市立科学館は日下と湯川グループが議論した阪大理学部跡地にあり、湯川が中間子論を構想した地でもある。このような経緯から、日下の学問的足跡を明らかにすることは大阪市立科学館にとって重要な課題である。日下が学位審査のために提出した論文については、2005年に報告した²。本編では、日下が発表した論文8編を紹介する。これらは、American Physical Society (APS)誌に掲載されたもの全てで、文献2で紹介した論文については、加筆し再掲する。特に次のことを詳しく論ずる。すなわち、日下らが導いた mesotron スピンの結論は歴史的な評価を得ているが、それは小林稔・内山龍雄との議論に負うところが大きかったと推測される。

2. APS 誌に掲載された日下の全論文

[1] Galactic Rotation and the Intensity of Cosmic Radiation at the Geomagnetic Equator
M. S. Vallarta, C. Graef, and S. Kusaka
Phys. Rev. 55, 1-5 (1939)

著者によると、当時の宇宙線理論の基本的な疑問は宇宙線が銀河の外から来ているのかどうかであった。1935年、これに答えうる方法として最初に指摘したのが Compton と Getting³で、彼らは銀河の回転運動によ

る宇宙線強度の恒星時変化の効果は小さいながらもあるはずと主張した。Compton らをはじめ多くの研究者が精力的にその証拠を探したが、矛盾があり広く受け入れられるものではなかった。Compton らの指摘は地球磁場内の荷電粒子の運動を無視したものであったので、著者らはこれを考慮して宇宙線強度の恒星時変化を計算した。計算は宇宙線の地磁気の赤道面内運動に限られたもので、エネルギー強度分布が逆3乗則と指数関数的な場合および低エネルギー極限について、陽電荷と負電荷の割合を1:0, 1:1, 3:1に対して行った。結果は当時の観測にはかからない微小なものであった。著者は、地磁気に対する赤道面内に限った計算を一般のものにすることを課題にしているが、その後、日下はAPSにはこの研究に関して発表していない。

[2] Electric Quadrupole Moment of the Deuteron
R. F. Christy and S. Kusaka
Phys. Rev. 55, 665 (1939)

重陽子が $2 \times 10^{27} \text{ cm}^2$ の電気4重極子モーメント⁴を持つと解釈できるような観測があった⁴。これは通常のマヨラナ力とハイゼンベルグ力⁵だけでは説明できないものであった。この論文[2]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。

$$J(r) (\rho \cdot r_1) (\sigma \cdot r_1) \dots \dots (1)$$

論文の記述はおおよそ次のとおり。

通常のを井戸型ポテンシャル (幅: 2.2×10^{-13}

⁴現在では $2.859 \times 10^{27} \text{ cm}^2$ とされている。

⁵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。マヨラナ力もハイゼンベルグ力も交換力であり、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。

*大阪市立科学館 学芸課
E-mail: saito@sci-museum.jp

cm)、J も同じ幅の井戸型ⁱⁱⁱ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⁵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 Schwinger⁶ をも引用している。

ここでの方法で計算したスピン軌道相互作用と、重陽子の¹S 状態の陽子・中性子の位置から計算されるハイゼンベルグ力との比は、湯川理論から導かれるものの比と同程度となる^{iv}。(2007年1月29日改)

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⁷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 と Schwinger^{8,9}を引用して述べている。Rarita と Schwinger は(1)を含んだ、より一般的な核力を吟味しているが、論文[2]を引用していない。論文[2]を評価するには、論文[2]から Rarita と Schwinger 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 と Schwinger 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⁹。

"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ⁱⁱⁱ 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。

[3] The Interaction of γ -Rays with Mesotrons

R. F. Christy and S. Kusaka

Phys. Rev. 59, 405-414 (1941)

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¹⁰。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、カットオフした場の高振動フーリエ成分によるものとして、

ⁱⁱⁱ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。

^{iv} 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湯川理論の問題点を指摘しながら、この結果が興味深いと書いている。

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 [4]で、バースト現象の解析に使った。

論文[4]の主な成果

スピン1の mesotron の γ 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^v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 γ 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。

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^{11,12}。この件に関しては、脚注に文献 11 を引用し次のようにプライオリティを主張している。

"M. Kobayasi and R.Utiyama, Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Research, Tokyo 37,221(1940) (文献 11). Note added in proof. Since our manuscript was sent to press a paper by M.Kobayasi and R.Utiyama, Proc Phys. Math. Soc. Japan 22, 882(1940)(文献 12), has appeared in which bremsstrahlung and pair production cross sections at high energies are calculated by eliminating hegh frequencies, $k > hc/e^2$, as in this paper."

しかし、文献 12 は文献 11 の詳述であり、文献 11 には、" $k > hc/e^2$ " が記されており、Kusaka らの主張は矛盾している。一方、小林・内山は文献 12 の脚注で、次のように記している。

"Mr. S. Kusaka kindly informed us of the results of their calculations when he visited at Osaka Imperial University in this summer. We wish to express our thanks to him for his kind discussions."

^v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 γ 線が衝突する描像で計算を行う。

これから、文献 11 が出版された 1940 年の 4 月 20 日の後の夏に、Kusaka は小林・内山と大阪大学理学部で議論したことが分かる。Kusaka は遅くともこの時点で小林・内山の " $k > hc/e^2$ " を知っていたはずである。

一方の小林・内山は、文献 12 の次の記述から、Kusaka との議論で自信を深めたものと思われる。"Further, our attentions was drawn to the fact that R.F. Christy and S. Kusaka read a paper on the caluculations of the cross sections for the same processes before the 235th meeting of the American Physical Society at the University of Washington. These authors also adopted Kemmer's matrix formulation. But, they calculated these probabilities according to the second order perturbation theory. Therefore, their results seem at first sight to be more acculate than ours. However, if we take into account the fact that we have no acculate knowledge about the form of the actual field in the neighborhood of a nucleus and the cross sections obtained by them may sensitively depend on this form, their results seems to be also not free from the indefinite numerical factors. And, as far as order of magnitude is concerned, their results essentially agree with ours." そして、小林・内山は計算結果が現象と矛盾しないと次のように結論した。

"It seems to be notable that these lower limits, involving that of the differential cross section for emission of high energy photons, still increase with increasing energy of the incident particle. This circumstance seems to be in favour of the explanation of cosmic ray showers found at great depths in matter, though the direct collision of mesons with atomic electrons may be also responsible to these showers." "The cross section (33) for pair creation seems to be too small to account for the number of mesons in the atmosphere by assuming that these mesons are created by photons in this process. However it is not necessary so, when we take into account the multiple processes. And, it is desirable to explain the origin of cosmic ray hard component in this manner, because other possible explanations will contain the difficulty that the cross section for the inverse process in which the meson is absorbed is also large."

Kusaka らの論文[3][4]は 1940 年 12 月 31 日に編集部に届き、翌年の 3 月 1 日に発表されている。Kusaka らは来日直前の 6 月の学会発表¹³では についてのみ発表し、 については触れていない。これ

らのことから、Kusaka らは小林・内山の手法を 1940 年の夏にはじめて知り、論文[4]のために小林・内山の手法を取り入れ、急遽 の計算を行い、mesotoron スピンの重要な知見を見出したものと考えられる。

[4] Burst Production by Mesotrons

R. F. Christy and S. Kusaka

Phys. Rev. 59, 414-421 (1941)

論文[4]が発表されたのは、mesotoron が発見されて数年後で、中間子が発見される 7 年前で、強い相互作用をしないミューオンを湯川粒子に同定できないために混沌としていた時期である。

この論文は Shein と Grill によるバースト^{vi}の観測¹⁴から mesotoron 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 ~ 100GeV の mesotoron 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 mesotoron 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が 1 の場合は論文[3]を、スピン 0 の場合を新に計算し、スピン 1/2 のそれは、ハイトラー¹⁵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¹⁶を用いている。これらの断面積を用いて、バーストサイズ (mesotoron 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 を棄却した。

論文[4]のインパクト

坂田・井上の 2 中間子論の背景

1937 年に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、mesotoron と命名した¹⁷。この発見で、湯川の中間子論が一躍注目され、mesotoron を湯川粒子に同定することが試みられたが、このような試みは様々な矛盾で中間子論は混沌としていた。坂田・井上が、湯川粒子がスピン 1/2¹⁸、谷川がスピン 0 の mesotoron に崩壊するという説 (2 中間子論) を提唱した。1947 年、湯川粒子である の崩壊が発見され、2 中間子説は日の目を見ることになった。坂田・井上が mesotoron のスピンを 1/2 と仮定したのは、論文[4]に裏付けられている¹⁸。ところで、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て否定的であった。mesotoron 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¹⁹。

湯川・坂田による評価

^{vi}電離箱内のイオン濃度が急激に増す現象。

湯川と坂田は1942年11月21日発行の教科書²⁰に論文[4]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

早川は、論文[4]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。」と評しているが²¹、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²²。

1950年代の再評価

1950年代の宇宙線の教科書²³に次のような再評価がある。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 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²⁴で Christy と日下の解析を再評価し、スピン $1/2$ を獲た。

[5] beta -Decay with Neutrino of Spin $3/2$

S. Kusaka

Phys. Rev. 60, 61-62 (1941)

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、それは単単性の理由以外に先験的理由はなかった。オープンハイマーが、different masses and spins を持つニュートリノの可能性を示唆した²⁵。それは Konopinski-Uhlenbeck タイプのものである。Rarita and Schwinger^{vii}による $3/2$ スピン粒子の波動方程式²⁶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。」

^{vii} 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。

崩壊の energy-lifetime relation の導出方法は不明。

[6] On the Theory of a Mixed Pseudoscalar and a Vector Meson Field

W. Pauli and S. Kusaka

Phys. Rev. 63, 400-416 (1943)

Pseudoscalar の発散を回避するための任意性を新しい粒子 Vektor meson に置き換えることを動機としている。新粒子の導入は好ましくないが、将来 Pseudoscalar の励起状態などで表現できることを期待したが、結局この試みは失敗した。

[7] The Effect of Radiation Damping on Burst Production

S. Kusaka

Phys. Rev. 64, 256-257 (1943)

Chakrabarty が mestron によるバーストの生成頻度について論文[4]を再計算し、論文[4]と矛盾する結果、mestron スピン1を導出した。Kusaka は Chakrabarty の指摘に基づいて再計算し、論文[4]の結果を変更することなく、mesotron スピン1を棄却した。

Chakrabarty は Wilson の制動放射 damping の公式²⁷を使ったが、Kusaka はこの Wilson の公式は間違いであることを指摘した。これが Chakrabarty と日下との結論が異なる理由である。

[8] The Energy Spectrum of the Primary Cosmic Radiation

S. Kusaka

Phys. Rev. 67, 50-51 (1945)

Millikan は自分たちの実験から一次宇宙線を電子とする次のような仮説をたてていた。すなわち、一次宇宙線のエネルギーは星間物質 C,N, O,Si などの原子の静止エネルギーが全てが変換したものと提唱していた²⁸。日下はこれに対して、Millikan らの実験は一次宇宙線のエネルギースペクトルが高エネルギーでは逆3乗に比例し、6 GeV 以下ではフラットになることを示していると結論した。このことから、Millikan の一次宇宙線の原子崩壊による電子説を否定した。宇宙線の緯度依存性を議論しているが、これは論文[1]の研究が背景にあったかもしれない。

Millikan は自身の宇宙線起源の原子重合仮説を強く信奉しており、Millikan の弟子であり、陽電子とミューオンを発見したアンダーソンは、その信奉ぶりに辟易していたようである¹⁷。

日下は謝辞にパウリとの議論に触れている。

引用文献

- ¹ 加藤賢一：大阪市立科学館研究報告 15, 43 (2005)
- ² 斎藤吉彦、大倉宏、加藤賢一：大阪市立科学館研究報告 15, 51(2005)
- ³ A.H.Compton and I.A.Getting: Phys. Rev. 47, 817 (1935).
- ⁴ J. M. B. Kellog, et al.: Phys. Rev. 55, 318L(1939)
- ⁵ H.Yukawa, S. Sakata, & M.Taketani: Proc. Phys. Math. Soc. Japan 20, 319(1938)
- ⁶ J.Schwinger: Phys. Rev. 55, 235(1939)
- ⁷ H.Yukawa: Nobel Lecture(1949)
- ⁸ W.Rarita & J.Schwinger: Phys. Rev. 59, 436 (1941)
- ⁹ W.Rarita & J.Schwinger: Phys. Rev. 59, 556 (1941)
- ¹⁰ J.R.Oppenheimer, H.Snyder, & R.Serber: Phys. Rev. 57, 75 (1940)
- ¹¹ M. Kobayasi and R.Utiyama, Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Research,Tokyo 37,221(1940).
- ¹² M.Kobayasi and Utiyama, Proc Phys. Math. Soc. Japan 22, 882(1940)
- ¹³ “MINUTES OF THE SEATTLE, WASHINGTON, MEETING, JUNE 18-21, 1940”:Phys. Rev. 58, 187-197 (1940)
- ¹⁴ M.Shein and P.S.Grill : Rev. Mod. Phys. 11,267(1939)
- ¹⁵ W.Hetler, The Quantum Theory of Radiation (Oxford, 1936) P.168
- ¹⁶ H.S.W.Massey and H.C.Corben, Proc. Camb. Phil. Soc. 35, 463 (1939); H.C. Corben and J. Scwinger, Phys.Rev. 58, 953 (1940); H.J.Bhabha, Proc. Roy. Soc. A164, 257 (1938).
- ¹⁷ アンダーソン：素粒子物理学の誕生(L.M.ブラウン・L.ホジソン編)講談社 122 (1986)
- ¹⁸ Sakata and Inoue : Prog. Theor. Phys. 1 143 (1946)
- ¹⁹ 長島順清：日本物理学会誌 Vol.60 No3. 171 (2005)
- ²⁰ 湯川秀樹・坂田昌一「原子核及び宇宙線の理論」岩波書店(1942)
- ²¹ 早川幸男：素粒子物理学の誕生(L.M.ブラウン・L.ホジソン編)講談社 86(1986)
- ²² 早川幸男：「宇宙線」筑摩書房(1972)
- ²³ J.G.Wilson and S.A.Wouthuysen:Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics Vol.5 114, North-Holland Publishing company Amsterdam (1958)
- ²⁴ F.E.Driggers : Phys. Rev. 87 1080 114 (1952)
- ²⁵ J.R.Oppenheimer: Phys. Rev. 59 908 (1941)
- ²⁶ W.Rarita and Schwinger: Phys. Rev. 60 61 (1941)
- ²⁷ A.H.Wilson: Proc. Camb. Phil. Soc. 37,301(1941).
- ²⁸ Millikan, Neher, and Pickering: Phys. Rev. 61, 397 (1942); H.V. Neher and W.H.Pickering, Phys. Rev. 61,407 (1942); Millikan, Neher, and Pickering:Phys. Rev. 63, 234 (1943).