中間子の予言－湯川秀樹生誕百年

九 後　太 一

1. 湯川・朝永生誕百年

今年 2006 年 3 月 31 日は朝永振一郎博士の、2007 年 1 月 23 日は湯川秀樹博士の、それぞれ生誕百年である。湯川・朝永両博士にゆかりの京都大学、筑波大学、大阪大学の三大学は、国立科学博物館と共催で、今年 3 月 25 日から 40 日あまり東京上野の国立科学博物館で企画展「素粒子の世界を拓く－湯川秀樹・朝永振一郎生誕百年－」を開催した。これには、この種の科学啓蒙的な企画展としては破格の 4 万人以上の入場者を数えた。この企画展はその後、筑波大学、京都大学、大阪大学の順にそれぞれの大学で修飾は変わっても基本的には同じ内容で開催され、2007 年にはさらに全国の方々の大学で巡回展が計画されている。

このことからもうかがえるように、日本のノーベル賞受賞の第 1 号、第 2 号の湯川、朝永両博士は、単に物理学界の巨人というだけに閉じない、日本国民一般において極めて大きな存在だった。事実両博士は、あい協力して、全国共同利用研究所という全く新しい制度の創設を初めとした戦後の研究体制の構築から、広く教育、文化、平和の国民的諸課題まで積極的に取り組んだ。中でも冷戦下での激しい核兵器開発競争という人類存亡に関わる事態の中で、ラッセル・アインシュタイン宣言への署名、パグウォッシュ会議、科学者京都会議などを通して、原子力の平和利用への世論形成に大きな寄与をした。

しかしながらこの稿では、湯川の中間子論に関する物理学の問題やその歴史的背景と意義に話を絞ることにする。(ここ以降、敬称は略する。)

2. 物理学の最前線へ

湯川や朝永が京都大学に入学したのは 1926 年であり、まさに量子力学の誕生の時期であった。ハイゼンベルクの行列力学の論文が前年に出、その年にやっとシュレーディンガーの波動力学の論文が出た、という年である。湯川は早熟で、既に三高時代にも「量子論」の英訳教科書を精読し、京都大学理学部に入学してからも早くも 2 年生の時にはシュレーディンガーの波動力学論文集をむさぼり読み、3 年生の時には、提出間もないディラックの相対論的電子論を勉強している。近くに量子力学を理解する先生も居ず、もちろん纏まった教科書なども全く無い中で、重要な文献を的確に選んでいることにも感心させられる。湯川は、それでも、続々と出る量子力学の新しい成果の洪水の中で「自分は遅れたかも知れない」と焦るのである。湯川に勝るとも劣らない才能を持つが、もう少しおくてである朝永は、こういう湯川を前にしてさらに焦っただろうと、想像する。しかし、両人はお互いに文献などの情報を交換しながら共に切磋琢磨し、3 年生の卒論を終える頃には知識としては世界の物理の最先端にほぼ追いつくのである。実際、ちょうど彼らの卒業した 1929 年に、理

© 京都大学基礎物理学研究所湯川記念館史料室
Yukawa Hall Archival Library, YITP, Kyoto University

化学研究所（理研）の招聘で、ハイゼンベルクとディラックが来日し、東京大学と理研で彼ら自身の最新の成果について講義をしたが*1)、朝永は東京へこれを聴きに行き、「原論文で勉強していたのでわかった気がした。大変自信を得るきっかけになった。」[1] と言っている。

大学卒業後も二人は共に無給副手として京都大学に残り研究を続けるが、こういう状況の中で、大発見の相次ぐ「奇跡の年」1932 年を迎えるわけである。すなわち、チャドウィックが 2 月に中性子を発見し、重水素が発見され、9 月にはアンダーソンが陽電子を発見する。また、コッククロフト・ウォルトンの加速器が人工原子核破壊に初めて使われ、ローレンスのサイクロトロンも誕生している。特に中性子が発見されるや否や、ハイゼンベルクは原子核構造の論文を立て続けに発表し、原子核理論が始まる。原子核の構成子である陽子や中性子、それに電子や陽電子、などの素粒子世界に対する興味や研究もほのかに見え始める。

湯川は実に強運の人である。量子力学の応用として原子や分子、固体物性などの分野を研究するという観点ではやや出遅れたのであるが、原子核や素粒子の世界の解明という点では、まさにこの大発見の年という幕開けに立ち会い、日本が欧米に比べ遅れているというハンディがほとんど無い僥倖に遭遇したわけである。佐藤文隆氏の言うように、「20 世紀の物理学の一大革新期の波頭にちょうど出くわし、それにうまく乗る勇気と才能を持ち合わせていた」[2] のである。

3. 核力の問題へ：1933 年仙台学会講演

湯川は、1932 年 4 月には湯川スミと結婚し、ハイゼンベルクの原子核構造論の仕事を契機として、秋頃から核力の問題に取り組み始める。原子の大きさの 10 万分の 1、10^{-15}m、という非常に小さな原子核の中にそんなにも堅く陽子や中性子をつなぎ止めている強い力ー核力ーの起源は何なのか?

湯川理論のアイデアの原型は、すでに 1933 年の春には出来ていた。すなわち、1933 年 4 月 3 日の東北帝国大学において行われた数物学会年会での講演 (いわゆる仙台講演) である。湯川は学会講演はもちろん、研究室での発表でも必ず丁寧な原稿を作っていた。仙台講演の原稿では、「Neutron が electron を emit して Proton になり、Proton が electron を absorb して Neutron になるということ自身が、Neutron, Proton の間の interaction の原因となること、あたかも electron が radiation を emit または absorb しうるということが electron 同士の interaction の原因となる如きもの」と記している。（もちろん、ここで neutron、proton、electron というのは、それぞれ中性子、陽子、電子であり、radiation とは、輻射＝光子のことである。）ファインマン図と呼ばれるものでこのアイデアを図示すると、図 1 のようになる。時間は下から上へ流れているとしている。ただこのアイデアだと、核子（原子核を構成する陽子と中性子をまとめて核子と呼ぶ）によって放出・吸収される電子がフェルミ統計にしたがうことが、場の方程式と矛盾している*2) ことを、湯川自身が講演の最後に指摘している。この講演を聴いた仁科芳雄が「ボーズ統計に従う電子」を示唆したとされるが、それは湯川自身の指摘を受けてのものであった。

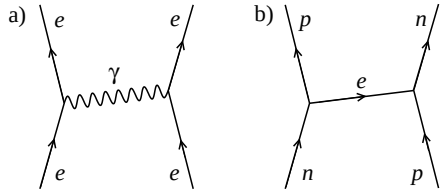

図 1　湯川は、a) 電子 (e) 同士の間の電磁気力が光子 (γ) の交換で生じるように、b) 中性子 (n) と陽子 (p) の間の力は電子 (e) の交換で生じる、と考えた。

*1)　読者の興味のために講義題目をあげておくと、ハイゼンベルクは、1. 強磁性体の理論、2. ブロッホ（Bloch）の電気伝導論、3. ハイゼンベルク・パウリの場の量子論 を、ディラックは、1. ディラック方程式、2. 統計量子力学、3. 電子の交換力によるスピン-スピン相互作用 について、それぞれ講義している。

*2)　スピンが半整数の粒子はフェルミ統計に従い、一つの相互作用頂点に付くフェルミ粒子は偶数個でなければ矛盾する。

© 京都大学基礎物理学研究所湯川記念館史料室
Yukawa Hall Archival Library, YITP, Kyoto University

この時点における湯川の重要な認識は、もう一つ、交換される粒子 (この場合電子) の質量 m の逆数に比例するコンプトン波長 $\hbar/mc$ が、その交換によって生じる力の到達距離を与える、という認識である。事実、仙台講演の予稿には、「電子には静止質量があるあることからして中性子と陽子との間の距離が $\hbar/mc$ に比して大きくなれば相互作用の勢力は急激に減少することが予想される」と書いている。

これは自身で「予想」と書いているように、数式を用いて導いたものではない。おそらく次のような物理的考察に基づくものであったろう。すなわち、質量 m の粒子は、エネルギー $E = mc^2$ を持っている。核子は、古典論的にはエネルギーが足りないからそんな粒子を放出できない。しかし量子論的には、エネルギーと時間の間の不確定性関係

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$$

があり、短い時間ではエネルギーを正確には確定できないので、大きなエネルギー $\Delta E \sim mc^2$ を持つ粒子でも、ごく短い時間 $\Delta t \sim \hbar/\Delta E$ なら放出できる。この時間内にこの粒子が最大光速 c で飛んでいくとすると、

$$\lambda = c\,\Delta t \sim c\,\frac{\hbar}{\Delta E} \sim \frac{\hbar}{mc} \qquad (1)$$

の距離 λ だけ、到達することが出来る。この表式はコンプトン波長に他ならず、これがこの粒子の交換によって生じる力の到達距離を与える。

ところが! である。湯川の残した仙台学会の講演原稿では「実際計算すると出てこない」と訂正されている。その左側の原稿前ページの裏面には「想像の誤り、$\cdots$ $\hbar/mc$ はきいてくるが、abstract で述べた意味では入ってこない。」と書き込まれている[3)]。実際に数式を用いた計算を進めてみるとこの距離で急激に減衰する表式が出てこない! と言っているのである。

これはどうしたことであろうか? もう少し詳しいことがその頃書かれた話し口調の「ボーズ電子論」の草稿に記されている。そこにおける「湯川の議論に従えば、$\cdots$ 電子のコンプトン波長を含む項は一種の位相因子として入り、$\cdots$ 距離と共に急激に減少するとは言えないという結論に導かれる。」[3)]

湯川ポテンシャルは、電子場に対して非相対論的なシュレーディンガー方程式を書いても出るはずなので、指数関数の減衰因子でなく「位相因子として入り」と言っているとすると、湯川も大分混乱していたことになる。ところが、この仙台の学会後、1933 年のおそらく 6 月頃に朝永が湯川に手紙を出している[*3)]。朝永は、核子間の引力のポテンシャルとして遠距離で急激に小さくなる関数を 3 つ仮定して、核力の到達距離をパラメータにして、重水素の束縛エネルギーと陽子中性子散乱の振幅を計算したが、その報告を湯川に送ったのである。この手紙が特に興味深いのは、朝永が、この 3 つの関数の一つとして今日湯川ポテンシャルと呼ばれる

$$U(r) \propto -\frac{e^{-\kappa r}}{r} \qquad (2)$$

を用いていた点である。(この手紙は現在京都大学総合博物館で開催中の湯川朝永生誕百年記念展で陳列されいるので、興味ある読者は是非見られたい。) この関数は、クーロンポテンシャル $1/r$ に比べて、指数因子 $e^{-\kappa r}$ がかかっており、距離 $r \sim 1/\kappa$ より大きくなると急激に減少する。もちろん朝永は純粋に現象論的にその関数形をとっただけであり、決して数式からその関数形を導いたわけではなかった。しかし、その関数形を用いた核力の計算を目の当たりにした湯川に相当なインパクトを与えたのではなかろうか? その手紙が湯川にもう一度考え直すきっかけを与え、ついに湯川ポテンシャルが $(\triangle - \kappa^2)U = 0$ の (原点に源を持つ) 解だということを、1933 年から 1934 年にかけて発見したのではないか、と筆者は想像するのである。そうだとすると、朝永は湯川のノーベル賞の仕事に対しても極めて重要な貢献をしていたことになる。湯川は、実際ノーベル賞の対象

*3) この手紙には日付が書いてなく、封筒も残っていない。しかし内容から、すでに暑い時でありかつ 6 月 20 日より前、と推測できる[4)]。小沼通二氏のご教示に感謝する。

© 京都大学基礎物理学研究所湯川記念館史料室
Yukawa Hall Archival Library, YITP, Kyoto University

となった彼の第一論文[5] の脚注で、朝永が現象論的なポテンシャルで重水素の束縛エネルギーと陽子中性子散乱を計算していることを引用し、感謝している。

4. π 中間子の予言へ

湯川は 1933 年 5 月には大阪帝国大学理学部講師となり、夏には西宮市苦楽園に転居している。1934 年早々フェルミの β 崩壊の理論が現れるが、その論文を伏見康治が阪大にもたらす。原子核の β 崩壊とは、原子核中の中性子が、陽子と電子と反ニュートリノに崩壊する過程

$$n \;\rightarrow\; p + e + \bar{\nu}_e$$

である。フェルミは、パウリによって存在が予言されたニュートリノを採り入れ、図 2 に示すような、統計と矛盾しないフェルミ粒子 4 体が関与す

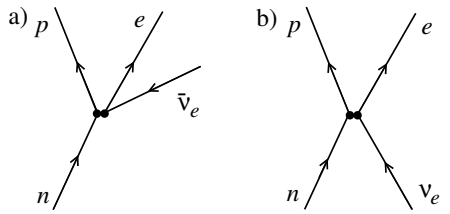

図 2　4 体フェルミ相互作用。a) が β 崩壊に相当する。場の理論では、反ニュートリノの線を折り返した図 b) も同等に存在する。

る相互作用ー今日 4 体フェルミ相互作用と呼ばれるーを書き下した。この仕事は素粒子の「弱い相互作用」に対して初めて場の理論を適用した画期的なものであり、湯川にも強い衝撃を与えた。これが現れるとすぐにタム (Tamm) とイワネンコ (Iwanenko) は、図 3 に示すように、この 4 体フェルミ相互作用を二回用いれば、陽子と中性子が、電子と反ニュートリノの対を交換して、互いに力を及ぼすことが出来ることを指摘し、その計算をした。しかし、これは原子核の強い力を説明するには余りに弱いことが判明した。

湯川は、フェルミの β 崩壊の理論の成功点は残しつつ、陽子と中性子の間の強い力を説明するに

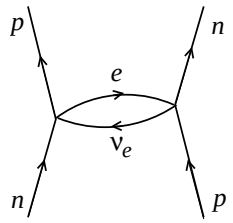

図 3　タムとイワネンコが計算した過程

はどうすれば良いのかに思考を集中する。そしてついに、1934 年 10 月の初めのある日に、新しい粒子、質量が電子の 200 倍の粒子ー π 中間子[*4]ーが存在するのだというアイデアに到達する。これは、10 月 27 日付けの未完の講演草稿に生々しく書かれている。フェルミの理論における図 2 の 4 体相互作用は、一つの過程ではなく、実はその間に「何か photon（光子）に似たような他の種類の quanta が介在している」と考える。この quanta（量子）が、湯川の π 中間子であり、図 4 のように、中性子が陽子に転化するときに放出され、それが電子、ニュートリノに吸収される、と考える。これがフェルミの弱い相互作用である。しかし、

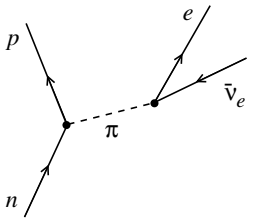

図 4　湯川は、図 2a) の 4 体フェルミ相互作用も、π 中間子が媒介していると考えた。

湯川理論では、中性子 ↔ 陽子の転移によって π 中間子が放出・吸収される図 5 の 3 体過程が基本相互作用である。このようなフェルミ粒子 2 体とボーズ粒子 1 体の頂点を持つ相互作用は今日一般に湯川相互作用と呼ばれる。それを二回使って図 6 のように、中性子と陽子の間で π 中間子を交換すれば、強い力を生じうる。 この π 中間子交換による力の到達距離は上の (1) 式より（あるいは

*4)　陽子の質量は電子の 1880 倍であり、したがって湯川の粒子は電子質量と陽子質量の中間の質量を持つという理由で後に中間子（メソン）と呼ばれた。

© 京都大学基礎物理学研究所湯川記念館史料室
Yukawa Hall Archival Library, YITP, Kyoto University

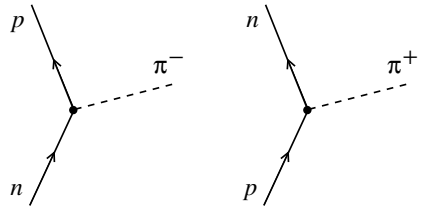

図 5　湯川相互作用

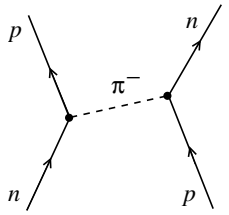

図 6　π 中間子の交換で強い核力が生じる

下で紹介する湯川ポテンシャルの表式から）π 中間子のコンプトン波長 $\hbar/mc$ であり、それが原子核の大きさ $l_N \simeq 2\times10^{-15}$m 程度でなければならないから、$\pi$ 中間子の質量は、その静止エネルギー mc^2 で言って

$$mc^2 = \frac{\hbar\cdot c}{l_N} \simeq \frac{2\times10^{-13}[\mathrm{MeV}\cdot\mathrm{m}]}{2\times10^{-15}[\mathrm{m}]} = 100\,\mathrm{MeV}$$

くらいと予言される。プランク定数の値 $\hbar\cdot c = 2\times10^{-13}\mathrm{MeV}\cdot\mathrm{m}$ を用いた。（MeV は、百万電子ボルトというエネルギーの単位。）電子質量 m_e は、$m_ec^2 = 0.5\,\mathrm{MeV}$ であるから、π 中間子は、電子の質量のほぼ 200 倍ということになる。

この考えでは、フェルミの 4 体相互作用が弱い理由は、π 中間子が（電子、ニュートリノ）に結合する強さが、（中性子、陽子）に結合する強さよりも、（1 億倍）弱いからである。すなわち、π 中間子を媒介させることによって、強い相互作用と、弱い相互作用が、それぞれ、π 中間子の核子（中性子、陽子）への結合定数と、レプトン（電子、ニュートリノ）への結合定数が異なりうるということで、統一的に理解出来たのである。

ノーベル賞の対象になった欧文の第一論文は、11 月 1 日から書き始められ、途中 17 日に東大における数物学会 11 月常会での発表があり、完成稿が 11 月 30 日付けで数物学会誌 *Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan* に投稿受理されている。この論文のタイトルは、よく知られているように、「On the Interaction of Elementary Particles I」、すなわち 「素粒子の相互作用について I」である。この題名の示すように、そして上で述べた経緯からも明らかなように、湯川の問題意識は初めから、単に強い核力の説明というものでなく、弱い相互作用も含めた素粒子世界の全ての相互作用を記述しようという統一理論構築を企図したものであったのである。

5. 湯川ポテンシャル

本誌は数理科学の雑誌なので、湯川ポテンシャルに関して少し数式を用いて議論する。

湯川は、交換されるボーズ場 U に対して次のクライン・ゴルドン型の相対論的な方程式を仮定した*5)。

$$\Big(\triangle - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \kappa^2\Big)U = \text{源} \qquad (3)$$

ここでラプラシアン $\triangle$ は空間座標についての 2 階微分の和

$$\triangle \equiv \nabla\cdot\nabla \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

である。ナブラ ∇ は空間微分 $\partial/\partial\boldsymbol{x}$ である。空間座標 (x,y,z) と時間座標 (の光速倍)ct の間の対称性を意味する相対論の要請から、式 (3) では、$(\partial/c\partial t)^2$ がマイナス符号で入っている。この場 U を量子化すると、対応する新しい粒子の生成消滅演算子になる。この粒子=π 中間子のエネルギー $E = -i\hbar\partial/\partial t$ と運動量 $\boldsymbol{p} = i\hbar\nabla$ で、自由な場合 (源=0) の式 (3) の $(i\hbar)^2$ 倍を書き直せば、

$$\Big(\boldsymbol{p}^2 - \frac{1}{c^2}E^2 + \hbar^2\kappa^2\Big)U = 0$$

となる。これより、$E^2/c^2 = \boldsymbol{p}^2 + \hbar^2\kappa^2$ の関係が出るが、これと相対論のエネルギー運動量の関係

*5)　論文の書き方は実は逆で、湯川ポテンシャル (2) を解として持つ相対論的波動方程式として (3) 式を導入している。

式 $E^2/c^2 = \boldsymbol{p}^2 + m^2c^2$ を比較すれば、クライン・ゴルドン方程式 (3) に現れるパラメータ κ は、この粒子の質量 m に比例し、そのコンプトン波長 λ (1) 式の逆数であることがわかる。

$$\kappa = \frac{mc}{\hbar} = \lambda^{-1}$$

(3) 式右辺の「源」は、この粒子を放出・吸収する核子の場が与える。原点に核子がある場合、すなわち右辺の源が $4\pi g\delta^3(\boldsymbol{x})$ の場合、その周りに出来る静的（時間変化のない）なポテンシャルは、

$$\left(\triangle - \kappa^2\right) U = 4\pi g\delta^3(\boldsymbol{x}) \tag{4}$$

の方程式の解となる。質量項 κ^2 が 0 の場合は、電磁気学でよく知られたポアッソン方程式である。この方程式の球対称解が湯川ポテンシャル

$$U(r) = -g\frac{e^{-\kappa r}}{r} \tag{5}$$

である。これを示そう。

球対称な関数、すなわち $r = \sqrt{\boldsymbol{x}\cdot\boldsymbol{x}}$ のみに依存する、任意の関数 $f(r)$ の上でラプラシアン $\triangle = \nabla\cdot\nabla$ を計算しよう。$\nabla r = \boldsymbol{x}/r$ や $\nabla\cdot\boldsymbol{x} = 3$(空間 3 次元の時) に注意して、

$$\nabla f(r) = (\nabla r)\frac{d}{dr}f(r) = \frac{\boldsymbol{x}}{r}\frac{d}{dr}f(r)$$

よって、$f(r)$ を省略して

$$\begin{aligned}\triangle &= \nabla\cdot\nabla \\ &= (\nabla\cdot\boldsymbol{x})\frac{1}{r}\frac{d}{dr} + \boldsymbol{x}\cdot(\nabla r)\frac{d}{dr}\frac{1}{r}\frac{d}{dr} \\ &= 3\frac{1}{r}\frac{d}{dr} + \boldsymbol{x}\cdot\frac{\boldsymbol{x}}{r}\left(-\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr} + \frac{1}{r}\left(\frac{d}{dr}\right)^2\right) \\ &= \frac{2}{r}\frac{d}{dr} + \left(\frac{d}{dr}\right)^2 = \frac{1}{r}\left(\frac{d}{dr}\right)^2 r\end{aligned}$$

この表式を用いれば、(4) に r を掛けて、

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} - \kappa^2\right) rU(r) = 0$$

が出て、$rU(r) \propto e^{-\kappa r}$ すなわち、湯川ポテンシャル $U(r) \propto e^{-\kappa r}/r$ がすぐに導かれる。この係数が $-g$ であるべきことは、(4) 式の両辺を、原点周りに半径 R の球 V_R 上で体積積分して、左辺も右辺と同じ $4\pi g$ を出すべきことから決まる。この時、

$$\int_{V_R} dV\,\frac{e^{-\kappa r}}{r} = -\frac{4\pi}{\kappa^2}\left((1+\kappa R)e^{-\kappa r} - 1\right)$$

$$\begin{aligned}\int_{V_R} dV\,\nabla\cdot\nabla\frac{e^{-\kappa r}}{r} &= \int_{S_R} d\boldsymbol{S}\cdot\nabla\frac{e^{-\kappa r}}{r} \\ &= -4\pi(1+\kappa R)e^{-\kappa R}\end{aligned}$$

に注意する。S_R は半径 R の球の表面で、$d\boldsymbol{S}$ は S_R 上の面積要素である。

6. 素粒子論の展開

湯川のこの論文は、i) 新しい実体（存在）の導入を行ったばかりでなく、ii) 場の量子論を電磁気学に限定されない普遍的な方法として用い「力の場＝粒子」というパラダイムを確立した、という点で画期的なものであった。1934 年初めのフェルミの弱い相互作用の仕事と相まって、場の理論をその基本的な言葉ないしは方法とする新しい素粒子論という学問領域を創始したのである。

その後、朝永のくりこみ理論[6] や坂田昌一学派の複合模型、南部陽一郎の対称性の自発的破れの概念導入、など、日本人の多くの決定的な寄与を通して、素粒子論は、ほぼ 40 年間の苦闘の末、1970 年代中頃、強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用、に対する標準模型の確立にいたる。自然界の全ての相互作用がゲージ原理という単純で美しい幾何学的な起源を持つという、透明な理解に達したのである。一方、標準模型の向こうに、重力まで含めた統一理論があるだろうことも、ほぼ確かなように思える。しかしそこへの道程は未だ全く定かではなく、湯川、朝永のように若い人たちの未知の領域への果敢な挑戦を待っている。

参考文献

1) 朝永振一郎 :『量子力学と私』（朝永振一郎著作集 11, みすず書房、1983）p18
2) 佐藤文隆：科学、76 (2006) 366.
3) 河辺六男、小沼通二、日本物理学会誌 37（1982）265.
4) 自然 1981 年 11 月増刊号 p70 および 文献[3].
5) H. Yukawa: Proc. Physico-Mathematical Society of Japan, 17 (1935) 48-57.
6) 宇川 彰：科学、76 (2006) 369.

© 京都大学基礎物理学研究所湯川記念館史料室
Yukawa Hall Archival Library, YITP, Kyoto University