

第2世代素粒子と遊んだ30年

山崎敏光

東京大学大学院理学系研究科、理化学研究所仁科センター

これは故杉本健三先生に捧げるエッセーです。原子核中のハドロン、ハイパー核、パイ中間子核、そして今、夢中になっている「高密度超低温」K中間子原子核、についてその変転の道をたどります。

1 30年前

中井浩二さんが創られた *Nuclei, the Playing Field of Physics* に寄稿したとき、私は転機にいることを自覚していた [1]。それまで、ミュオンという第2世代レプトンのとりこになっていた私にとって、ストレンジネスは次の魅力であった。1978年、東大理学部に中間子科学実験施設というミニラボを創り、創設間もない高エネルギー物理学研究所 (KEK) 内に出店を構えた。メソンファクトリーという規模には到底及ばないが、世界で初めてのパルス状ミュオンビーム施設として永嶺さんをリーダーとするチームはユニークな研究を展開していた。私とその発展として志向したのは、K中間子を使う科学の開拓である。これはKEKの12 GeV PSを使って可能であった。この物理だけではなく、12 GeV PSは新しい科学の可能性を秘めている、と信じていた中井さんは、自らKEKに移ってそのリーダーとなってくれた。そのためには、1984年に予定されていたトリスタンのためのPSのシャットダウンをもってPSを閉鎖する、とのかねてからの行政機関にあった考えを打ち破ることに中井さんも私も全力を尽くしていた。幸いにしてPSのシャットダウンの可能性は遠のき、われわれは新しい研究を始めることができるようになったのである。

1980年ごろ、ニュートリノに質量があるか、はホットトピックスであった。私はK中間子の崩壊で放出されるニュートリノに重いものがあるか、という R. Shrock の問題提起に共感し、KEK 12 GeV PS からの K 中間子ビームを用いて崩壊粒子ミュオンの運動量スペクトルを精密測定するために二重収束且つ広域運動量分布が測定可能な電磁スペクトロメーターを設計・製作することになった。早野龍五氏をリーダーとするチームは皆、高エネルギー実験には素人であったが、この実験を遂行し、(仮想的) 重ニュートリノの混合の上限を質量の関数として与えることができた [2]。何とそのスペクトロメーターを「ニュートリノ質量分析器」と名付けていたほど、われわれは重ニュートリノの存在の可能性に執心していたのである。この質量 300 MeV 以下、混合比 10^{-6} に及ぶ探索実験は、神岡で小柴昌俊教授のグループが始めたカミオカンデ実験の狙いと極端に異なるものであった。小柴グループはその後、ニュートリノ振動の現象を発見し、ニュートリノ質量は有限であるが、極めて小さなものであること、世代の混合比はほぼマキシマルであることを明らかにした。

このKEK-PSでの実験の副産物はいろいろあった。K⁺崩壊に関しては、ヒッグス粒子のような未知の中性粒子 X₀ の探索 [3]、崩壊ミュオンの偏極の測定から右巻きニュートリノの混在の探索 [4]、など。やがてこれは今里純氏らの時間反転非保存の探索に繋がった [5]。別の面の副産

物は K^- 中間子の吸収からハイパー核が多量に生成されることを見つけたことであった [6]。そのハイライトは早野グループにより、赤石義紀氏によって予言されていた幅の狭いシグマヘリウム核を液体ヘリウム中に生成し同定したことである [7]。これによって、わが国でのこの分野の実験的研究は、理論ともども国際的に認められるようになった。その潮流は今も続いている。

もう一つの大きな副産物、それは、液体ヘリウム標的中に止まった負の K^- 中間子の一部が核の吸収を逃れ、自由崩壊を遂げる、という不思議な遅延現象を見つけたことである [9]。この現象は、さらに KEK-PS からの反陽子ビームを用いて解明された [10]。大量の π^- 中間子のバックグラウンドに埋もれた弱い反陽子ビームではあったが、3 マイクロ秒もの寿命を保つ反陽子が 3 % もあることが発見されたのである。これは反陽子王国の CERN でも見つかっていなかった新現象で、島国日本での発見は世界の研究者を驚かせた。CERN では、ほとんど直ちに、われわれのグループに LEAR からの冷却された低エネルギー反陽子ビームを提供することになり、この遅延現象は液体ヘリウムのみならず、固相、気相においても同様に起こることが発見された [11]。この研究は、LEAR のシャットダウンまで定常的な実験プロジェクトとして続けられ、好奇心から始まった研究は、反陽子ヘリウム原子分子 (atomolecule) のレーザー分光の成功により high precision spectroscopy の域に達し、CPT 対称性の研究へと発展することになった [12]。そして、この活力は LEAR シャットダウン後、AD リングプロジェクトの創設の原動力となり、今も続いている [13]。

これらはどれも、試行錯誤の結果わかってきたことで、初めから研究テーマや方法がわかっていたわけではない。多くは幻滅の連続であったが、それでも遊びながら遭遇した宝物であった。

2 Enhanced nuclear magneton

野村亨さん、永宮正治さんらと和光の理研新キャンパスでの最初のサイクロトロンを使って見つけた核磁気モーメントにおける軌道 g 因子の異常 [14] は、宮沢弘成先生が 1951 年に予言された π^- 中間子交換電流効果 [15] の実験的証明として良く知られるところとなっていたが、この効果を執念をもって調べてみると、その異常の度合いは陽子に対して大きいものに対して中性子に対しては小さいことがわかってきた。もちろん、これは、原子核の中性数が陽子数より大きいということから予想されるトリビアな N/Z 依存性を差し引いた結果である。私は、これは核磁気モーメントの単位として使われ、何の疑問も差し挟む余地のなかった基本単位 (核磁子) $\mu_N = e\hbar/M_N$ 自体が増大しているためではないか、との問題提起を行った。1984 年、TRISTAN 建設のための KEK-PS のシャットダウン期間の半年間、私がミュンヘン工科大学のキーンレ教授のチェアに座っていた頃であった。「増大する核磁子」は、核磁子の定義を辿れば、「減少する核子質量」と結びつく。当時、核物理の世界では、「核媒質中のハドロンの挙動」がトレンドで重要なトピックスとなっていた。私が見出した小さな効果は、この大きな問題と関係するのではないかと思った。私は力を込めてこの問題に関する論文を書いて発表した [16] が、注目されることならなかった。ただ、Erice の学校で会ったスタンフォードの Stan Brodsky 氏だけは π^- 中間子交換効果に大きな関心を寄せ、熱の籠もった議論をしてくれたのが嬉しく、この論文の末尾で謝辞を捧げた。

3 核媒質中のハドロン質量

当時、多くの人は、原子核中に生成するハドロンの質量はその崩壊で発生する粒子のエネルギー・運動量を観測することにより決定できると信じていた。次の不変質量である。

$$InvM^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{P}_1 + \vec{P}_2)^2 \quad (1)$$

私はその考えに疑問を持ち続けた。それは単純なことで、ある粒子が核中にあれば、それは既に off-shell オブジェクトであって、その粒子の部分空間で定義された「不変」質量は全体空間では不変量ではない。従って、不変質量は存在しないので、そのような観測から質量を決定する意味がない。そもそも、核媒質中で相互作用するハドロンでは、自由空間で持っていた属性が変わるのではないかと、という極めて興味あるテーマを探求しているのではないかと。とするなら、上記の不変質量は不変ではなくなる、という自己矛盾をみとめざるを得ない。素人の私がそのような疑問にもとづく質問を学会などですると、誰も理解できないようであった。恥ずかしさも顧みず、1986年のヴィースバーデン核物理国際会議のプレナリーセッションでも質問したものである。「不変でありえない量を測って、それを不変質量というのはおかしいのではないかと？」と。日本の物理学会でもそういう質問をしたが、不毛であった。

誰も相手にしてくれないなら、自分で考えよう、という気持になった。この問題の混乱しているところは、上の式を不変質量と名付けたところから始まる。にもかかわらず、この不変でない「不変質量」は実験データから構成できるのである。その「”不変でない不変質量”のもつ意味は何か？」と問うことができる。これは部分空間の範囲での不変質量であるので、partial-invariant mass (PM_{inv}), quasi-invariant mass (QM_{inv}) とか、pseudo-invariant mass (PM_{inv}) と呼ぶことにした。原子核研究所に赴任して来られた赤石義紀さんは、この問題に大きな興味を示され、次々と意味のある物理的考察、計算などを行ってくれた。

すぐできる例題は、負ミュオンが核のクーロン場に捕獲されてつくられるミュオン原子の $1s$ 状態が電子と二つのニュートリノに崩壊する際、仮想的にこれらの崩壊粒子のエネルギー・運動量が完全に観測されるものとする、「それらで再構成されるミュオンの不変質量は何か？」という問いである。このレプトンと電磁相互作用の世界には、QCD 的意味における媒質中の質量変化は無い筈である。ところが、誰にでもできる簡単な計算をやってみると、ミュオン質量から大きく離れて減少した量になることがわかってくる。わかってしまえば当たり前のことであるが、束縛された粒子の PM_{inv} は裸の質量でもなく、その状態のエネルギーでもなく、 $(totalE)^2 - (total\vec{P})^2$ となり、核内での運動量の分布を反映する。簡単なミュオン原子でもそのような具合であるので、さらにハドロンの束縛状態や共鳴状態を考察した。核中にあるハドロンはまわりにある核子などと衝突するので、それによって PM_{inv} は質量の低い方に幅の広い分布をもつ。この「異常成分」は、 $(totalE)^2 - (totalP)^2$ のシフトとは異なり、collisional broadening と呼ぶべきダイナミックな効果によるもので、媒質密度の増加とともにスペクトルの形を変え増大する。メスバウアー効果のデバイーワラー因子と対比できる。

この collisional broadening は、存在しない方がおかしい。しかし探求しつつある QCD 的質量変化を、それから分離して取り出すことができるかは、大きな問題である。当時、高エネルギー原子核反応によって核内で発生するロー中間子的な不変質量分布が媒質中で変化するとの報告が世の中を騒がせていた。それが Brown-Rho [17] の予言を証明しているかの如く言われたが、定

性的にはわれわれのオモチャのような考察が的を射ている、と我々は信じていた。最近になって KEK-PS で行われたファイ中間子崩壊の不変質量分布の結果でも、自由質量より低いところに核標的に依存する「異常成分」が見出された [18] が、これも collisional broadening 効果を考慮の上、解釈される必要がある。我々の理論的考察は論文としてまとめられ、1999年に Phys. Letters B に出版された [19]。しかし、なんと、この論文は学界からは無視され続けている。

我々の考察の「実用的価値」は、神岡の水チェレンコフ装置で行われている陽子崩壊の実験結果の解釈に関係する。陽子崩壊と言っても、その陽子の大部分は水のなかの酸素原子核の中の陽子である。その崩壊粒子と覚しきものの不変質量分布（実は $PMinv$ ）を測定し、それが陽子の質量に一致することをもって陽子崩壊の同定としている。もし、われわれが考察したような collisional broadening が起き、 $PMinv$ 分布が陽子質量から遠く離れるとすれば、そのような同定法は意味を失う。計算の結果、通常の核密度をもつ ^{16}O からの陽子崩壊では、その $PMinv$ は束縛効果による小さなシフトしか起こさず、設定している陽子質量の窓の範囲に含まれること、したがって、神岡のデータ解析の正当性が保証されることになった [20]。

4 苦しみの時代 ハイパー核からパイ中間子核へ

パイ中間子原子の X 線スペクトロスコピーを越えた深部束縛パイ中間子状態の研究は、その存在と生成法を提案した 1988年の Toki-Yamazaki の論文 [21] に始まる。ここに到るまでは私にとって至難の時期であった。KEK-PS で stopped K^- を使う新しいハイパー核の実験法が確立できたのは良かったが、それを使って当時セルンで in-flight K^- を使った Povh 氏の率いるハイデルベルク・グループがシグマ束縛状態の発見を報告していた [22]。我々の方法はシグマ束縛基底状態の生成とスペクトロスコピーに最適の筈であった。PRL に発表した最初の論文は stopped K^- の特徴を論じたもので、あわせて狭い幅のシグマ共鳴状態に関する実験結果を報告した [23]。これを基に、ハイデルベルクグループと共同で KEK で共同研究を推進することになった。意気揚々とした気分満ちた時代であった。

皮算用によれば、セルンで見つかったような幅の狭い状態が基底状態として存在するならば、いわば一網打尽に観測できる筈だと楽観した。しかし、実際には、シグマ \rightarrow ラムダ転換に依る幅が大きすぎるためであろうか、期待したピークは見つからなかった。最初の論文で報告した狭い共鳴状態は統計の揺らぎによるものと判断された。われわれの発表は当時この方面の研究をやっていた人々の間に大きな混乱をもたらしてしまった。この難局をどう打開するか？

我々は少数多体系の専門家である赤石さんに相談した。赤石さんは独自の深い考察から、シグマハイパー核は通常の原子核では存在しないであろうが、 ^4He 核は特別な例外だということであった [24]。われわれはその最後の可能性を求めて準備を行い、実験を遂行した。その結果、ついに ^4_2He の基底状態が見つかったのである [7]。

では他の核に存在しないと、シグマ粒子と核との相互作用は永遠にわからないのであろうか？私は原子核研究所の所長のかたわら、この問題を模索した。その結果、藁をもつかむ思いでたどり着いた考えはクーロン束縛ハイブリッド状態は必ず存在する筈だということであった。森松さん、矢崎さんに反応断面積やスペクトル分布を計算してもらった [25]。

5 パイオン原子の内部軌道：深部束縛パイ中間子状態

これを考えているうちにたどり着いたもう一つの考えは、負パイオンの原子核束縛状態である。1965年頃、バークレーにいた私は、パイオン原子のx線スペクトロスコピーにそこで開発されていたシリコン検出器を適用することを目指した。初めての精密分光は成功し、軽いミュオン原子の束縛エネルギーの強相互作用シフトの系統的決定が行われた[26]。その後、半導体検出器の発展に助けられて中間子原子などエキゾテック原子の研究は一世を風靡したが1980年代には下火になっていた。それは、外から負中間子を核標的に注入するという方法では、核吸収のため重い核ではx線崩壊カスケードは外の軌道（最終軌道と呼んでいる）で終わってしまい、その内部の状態（特に基底状態）には到達できない。

そもそも、中間子原子の最終軌道の内部の世界は存在しない、と信じられていた。状態そのものが存在しないとは如何なることか？この問いを発しても満足ゆく答えは聞かれなかったのであった。誰でも皆、内部世界に関しては思考停止、いわば頭真っ白の世界の如くであった。我々はシグマハイパー核の問題で苦しみ、試行錯誤を続けていたので、負のシグマ粒子のハイパー核は、シグマ原子の内部状態に他ならないことをよく認識していたのである。外部のクーロン束縛状態と内部の原子核状態との間に切れ目はない。そこには Coulomb-assisted nuclear bound states が存在する筈である。そこで土岐博さんとの理論的共同研究が始まった。わかったことは、負パイオン-中性子間の局所的相互作用が斥力であるため、重い核から負パイオンが受けるポテンシャルは核内で高く、核の周りではクーロン引力を受け、その結果、いわばクーロンポケットにトラップされたハロー状態ができる。 ^{208}Pb のような重い核でも、パイオンの基底状態は狭い幅の離散的状態として存在できる。この状態はパイオン原子x線の方法では到達できないが、内部にパイオンを生み出す原子核反応によって生成可能となる。我々はこれを湯川バーテックスになぞって、パイオン移行反応と名付けた。

理論計算の結果は1988年にPLBに発表された[21]が、当然のことながら、レフェリーから大反対を受けた。パイオン核物理の専門家と覚しき或るレフェリーは、そのような内部状態ではパイオン吸収の幅は100 MeVほどになるので、束縛状態は存在しない、と断言した。思考停止した頭の真っ白な人々には、内部世界は真っ黒に見えたに違いない。にもかかわらず、PLBのエディター、John Schiffer氏は、1988年7月、次のようなメッセージを我々に送り、論文の採択を告げてくれた。

“Personally I would bet you a bottle of champagne that there are no such states.

But the idea is intriguing and should be published” (J. Schiffer, 1988)

この御蔭もあって、この仕事は、比連崎悟氏、早野龍五氏の参加を得て発展し、核物理の世界では深部束縛パイ中間子状態の可能性が認められるようになってきたが、実験的検証は数々の困難に遭遇した。

この物語は最近出版された Physics Reports (T. Yamazaki, S. Hirenzaki, R.S. Hayano and H. Toki) “Deeply Bound Pionic States in Heavy Nuclei” [27] に詳しく述べられている。その冒頭を飾った図を下に示す。結論的を言うと、重イオン研究所GSIにおいて重イオンならぬ（或いは最も軽い重イオンの！）重陽子ビームを用いた($d, ^3\text{He}$)反応によって、理論的予測通り、探し求めていた状態が見つかった。1996年の春であった。直ちに Z. für Physik 誌に発表された[28]。

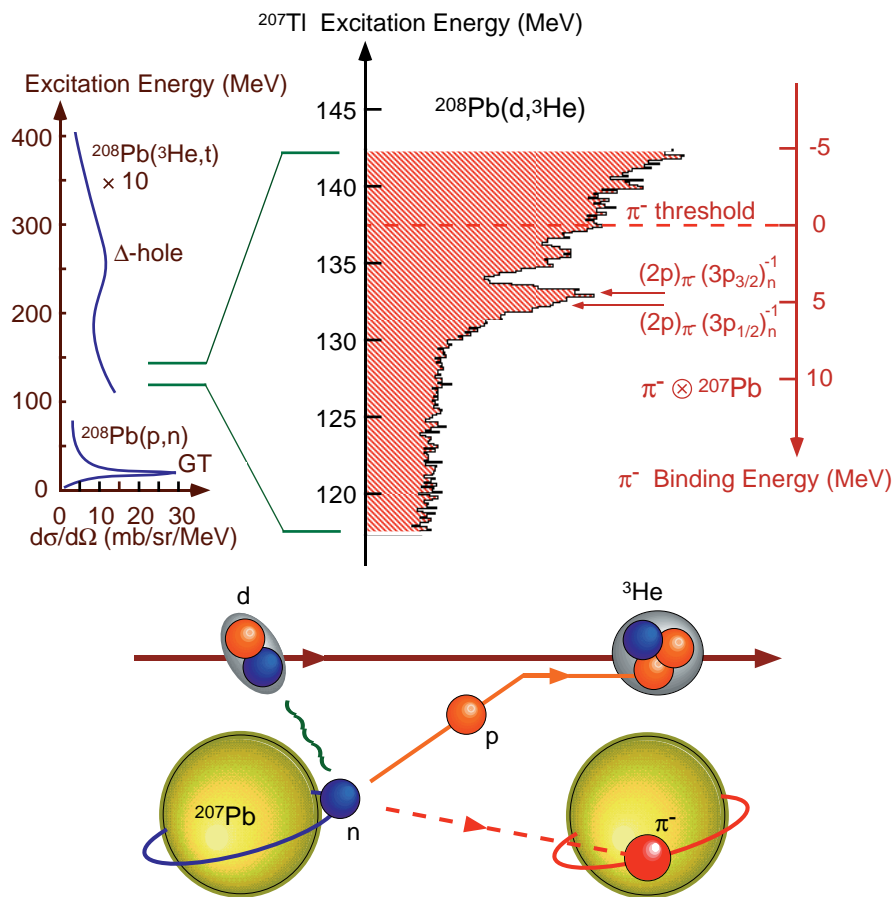


図 1: 1996 年、GSI 研究所において初めて観測されたパイ中間子原子核 π^- ^{207}Pb の生成スペクトル [28]。この状態は 133 MeV の原子核励起状態とも見なすことができる。下に示すのはパイ中間子移行反応と名付けた生成反応。実験スペクトルは比連崎—土岐の理論計算とよく一致していた。日本物理学会誌表紙より。

ここで、我が友パウル・キーンレ (Prof. Paul Kienle) 先生について述べないわけにはゆかない。この杉本先生のご逝去に前後してキーンレ先生は病に倒れ、2013年1月29日に急逝された。私はその亡くなる日、ミュンヘンの病院にキーンレさんを見舞っていた。パイ中間子核から始まって、次に述べるK中間子核に関する研究に、直前まで一緒に携わっていたのであった。キーンレ先生は1967年の東京国際会議「Nuclear Structure」に初来日され、1972年に杉本健三先生の主宰された大阪会議「Nuclear moments and nuclear structure」ではサマリー・トークをなされ、以後、日本の研究者と深い絆を築かれた。以下は日本物理学会誌に求められて筆者が書いた追悼文 [29] の草稿の一節である。ここに杉本先生とあわせてキーンレ先生のご冥福をお祈り申し上げる。キーンレさんの名前のイニシャルは「PK」であるが、晩年に執心された二つのゴールドストーン・ボゾン粒子をなぞって「P(*pion*)K(*kaon*)」先生と呼ぶのに相応しい。

1999年春、ゴールデンウィークの直後、私は、ちょうどPKさんの理研来訪の機会に、PKさんを囲むミニワークショップを東大の山上会館で催した。そこでのハイライトは、A) 土岐博さん、比連崎悟さんのパイ中間子核生成反応の理論の展開、B) K中間子核束縛状態の理論的予言(赤石義紀)、それに続くC) PKさんは、何と、「パイ中間子-核相互作用から核内クオーク凝縮を探る」という、それまで誰も聞いたことのないシナリオを発表した。これは理論と実験の交流という見地から、私が体験した最もオリジナリティに満ちたワークショップで、来る21世紀における展開を予想させるものであった。

PKさんの発表の骨子は次のようになる。パイ中間子と核との間のEricson-Ericsonポテンシャルの中で最も重要なものは、アイソベクトル型s波相互作用 (b_1 というパラメーターで表示) である。それは友沢-Weinberg 則によりパイオン崩壊定数 f_π と関係付けられ、さらにそれはGell-Mann-Oakes-Renner 関係を通して、対称性の自発的破れによる真空のクオーク凝縮を反映する。パイ中間子が核中にあると、対称性の破れは部分的に回復し、クオーク凝縮は減少し、 $|b_1|$ は増大する筈である。1961年の南部陽一郎先生の深遠な理論 [30] は、初田一國広 [31] により核物質へと展開され、あたかも超伝導が外部磁場で破壊されるように、クオーク凝縮は核物質中で減少することが予言されていた。この南部理論の壮大なシナリオの実験的証明はパイ中間子原子核の研究から行われるのではないか、というのがPKさんの発想であった [32]。

この b_1 を実験的に抽出するには、中性子過剰の重い原子核で同位体の多いもの、しかもパイ中間子の $1s$ 状態が主に生成すること、が要求される。このために錫の同位体を用いる実験が綿密に計画され実行された。500 MeV のビームエネルギーによる ($d, {}^3\text{He}$) 反応から生成するパイ中間子束縛エネルギーを 10 keV の絶対精度で決定するということが必須であった。実験はもくろみ通り成功し、その結果の解析から b_1 の値が精密に決定され、核物質中では自発的に破られていた対称性が部分的に回復するという南部のシナリオが実験的に証明された [33]。これは、PKさんが主導してできたGSIの重イオンシンクロトロンと実験装置、それを本来の目的を越えて適用する、というフレキシブルな対応、素粒子の根本問題を原子核の世界に持ち込むというユニークな発想のおかげである。ここではcuriosityから始まった研究がhigh precision spectroscopyに発展し、素粒子・原子核の世界で最も重要な問題の解明に貢献することになった。この研究は最近板橋健太氏らによって理研の新しいサークロトロンを用いて発展しつつある。

6 K中間子核の探求

1998年、GSIの2回目のパイ中間子実験がさらに成功してその発展を目指していた頃、私もキーンレさんも、K中間子の束縛状態の問題に関心が移っていた。その年、矢崎紘一さんの退官記念のINSシンポジウムでGSIでの2回目の実験についてPb核に束縛されたパイオン1s状態を見つけた報告をした際、最後にK中間子核に関するプランを付け加えた。その頃は当然ながら、パイ中間子からの類推で、負K中間子のCoulomb-assisted nuclear bound statesを考察していた。赤石さんはこれを計算し、幅の狭い沢山の励起状態を予言した。考えていた反応は (K^-, p) であった。このシンポジウムに参加していたガル教授はその数ヶ月後、早々と、そのような励起状態の計算の論文をPLB誌に発表したのに驚いた。しかし、このことはかえって、K中間子核の問題をパイ中間子核の延長上におくのではなく、全く新しい視点から考えることを可能とした。

それは、 $\Lambda(1405)$ 共鳴の存在と岩崎雅彦グループがKEK-PSで得たK中間子水素の新しいデータ[34]に基づくもので、赤石さんはK中間子-核子相互作用を $\bar{K}N - \pi\Sigma$ 結合チャネルのもとに導き出した。その最大の特徴は K^-p 間の $I = 0$ $\bar{K}N$ 相互作用が大きな引力をもつことで、それを用いて $K^-^3\text{He}$, $K^-^4\text{He}$ などの小数多体系の構造が計算された。赤石さんが見出した驚くべきことは、核密度一定という核物理の“法則”の制限を外すと、核子間の短距離斥力があるにもかかわらず、それに打ち勝って核は収縮するということであった。この結果は、赤石さんのもう一つの仕事coherent Sigma-Lambda couplingとともに、1999年、Frascatiで行われた第2回DAPHNEシンポジウムで発表され、Frascati Physics Series XVIに記録されている。これを伝え聞いたR.H. Dalitz先生は、その会儀の冒頭の基調講演で、赤石さんの業績を最近の最もエキサイティングな結果として紹介した。

この論文は初めPLB誌に投稿したが、レフェリーとの度重なる不毛な論争の末、我々は諦めて、内容を広げたバージョンをPRC誌に投稿し、やっと2002年に日の目を見ることになる[35]。この間に起きた驚くべき事件は、2000年にトリノで行われたHypernuclear Physics 2000の国際会議での赤石さんの招待講演の論文“Deeply bound kaon nuclear states”が、そのプロシーディングから掲載を拒絶されたことである。会儀に関係している一人のレフェリーの理由乏しき反対の故と聞いている。曰く、この論文の内容は新しいため、通常の雑誌の査読を経る必要があるので、国際会議プロシーディングスには適さない、と。私はその会議でサマリートークを依頼されていたので、21世紀のストレンジネス核物理に関するオーバービューについて講演した。その中で、Dalitz先生に絶賛された赤石さんの仕事の一端もかろうじて記録された[36]。会議終了の翌朝、ホテルを出るDalitz先生はホテルの便せんに次のような私あてのメッセージを残された。感激であった。

COMUNICAZIONE VICTORIA HOTEL TORINO Oct-28-2000

Dear Toshio, That was a superb Conference Summary you gave us yesterday. I look forward to your transparencies from that talk. You raised so many new questions in my mind that I shall need a full year to understand them all. My prediction of your retirement years, at your retirement meeting (which seems now so far in the past!), were very positive but they were understatements! You have been so active

and so original in "retirement"! It was good to see how it has turned out and I wish you all the strength you need. It was good to see you again. Cheers! Yours sincerely, Dick.

私は会儀主催者に赤石論文の件につき抗議したが、ついに容れられなかった。国際会議での招待講演の論文を招聘した当事者が拒否したことは、前代未聞の事件である。しかし、そのような嫌がらせとしか思えない行為が科学の世界に存在するとは！

その後、京大の土手さんが参加し、核密度にコンストレイントなしの多体問題の計算が進行し、軽いK核で核がシュリンクすることは一般的現象であることが明らかとなった。PLBに投稿した土手さんの第一論文 [37] もレフェリーとの論争で出版まで2年を要し、やっと2004年に出版された。びっくりするようにシュリンクしたK原子核の密度分布の図はすでに2002年にProg. Theor. Phys.に掲載されているのに、PLBのレフェリーは強硬に反対した。核密度一定の“法則”を盲信する故であろうか？今日でも、理論家の多くは、K原子核がシュリンクすることを認めようとしない。しかし、少数多体系の計算で実際にK核の波動関数を計算した例は赤石、土手の仕事を除いては無いのである。コンストレイントなしの計算を行わずして、どうして核がシュリンクしないと云えるのであろうか？

7 K 中間子の作る超強核力

最も基本的なK核は K^-pp で、2002年に初めて予言されたこのストレンジダイバリオン [38] は、興味の尽きない系である。自由空間では束縛されない2個の陽子が負K中間子の助けで堅く束縛される。赤石さんの変分法による計算で波動関数も求められた。これを表示すると興味あることがわかってくる。まず、 K^-pp 系においては、我々は初め、二つの陽子の間に挟まって K^- が存在していると考えていたが、そうではなく、どちらかの陽子の周りに束縛されて K^-p を形成しているかのようなようであった。その K^- 中間子は隣の陽子にマイグレートし、それを繰り返す。これはまさに水素原子間の共有結合の如くである [39, 40]。我々は、初めて量子力学を用いて水素分子の結合を解明した1927年のHeitler-London理論 [41] を勉強し、力の大きさとレンジは全く異なるが、定性的には K^-pp の結合はHeitler-Londonと類似していることを知ったのである。そのような意味で、まさしく $\Lambda(1405)$ はミニfm原子、 K^-pp はミニfm分子である。

この頃、私は西島和彦先生のあと、仁科記念財団理事長となり、仁科芳雄博士とその弟子たちが築いた国際的なフロンティアに接する機会を持った。2005年、同財団の創立50周年の記念講演会が行われ、西島先生と伊達宗行先生が特別講演を行った。西島先生の講演は、水素分子の共有結合モデルから始まり、湯川理論にいたる道筋を示す、極めて示唆に富むものであった。1932年、中性子が発見されるや、ハイゼンベルクは陽子と中性子を結びつける核力を説明するため、さまざまな考察を行った [42]。その中の一つが水素分子モデルである。そのダイアグラムは陽子の線に電子が巻き付いているものであった。若き湯川・朝永もこの問題に挑戦していたが、これによって核力を説明するのは様々な理由で無理であった。これを超克して生まれたのが湯川の中間子理論 [43] である。それは媒介するバーチャルなボソンを予言する。やがて湯川中間子はパイオンとして発見され、それ以後、物理学の世界において、媒介する粒子は相互作用の背後にあって本質的な役割を担う実体として登場するようになった。赤石さんと一緒に興奮したこと

は、我々の K^-pp は、何と、ハイトラー・ロンドン・ハイゼンベルク (HLH) の分子模型で電子の代わりに負 K 中間子を用いたものになっている、ということであった。回遊する実の K^- 中間子が強い分子的共有結合を生み出しているのである。その強さはパイ中間子の媒介する通常核力の 4 倍にもなる。われわれは 2007 年にこのような新種の核力を Super Strong Nuclear Force (SSNF) と名付け、論文を日本学士院欧文紀要 [39] に発表した。また、その構造と生成反応の詳細を PRC 誌に発表した [40]。この視点に達するまでの間、山口嘉夫先生から有意義なご意見をいただいた。また、ハドロン物理の外の分野の学識者からは次のようなお手紙をいただいた。

オーエ・ボーア先生からの書簡：

Dear Toshio :

Thank you for sending me your paper on kaonic nuclear bound states, with the new perspectives in the exciting research you have been pioneering.. Your remarks on the historical background for your work and for the development of atomic and nuclear physics in Japan was nice reading.

Warm greetings Aage

伊達宗行先生からの書簡

貴論文およびお手紙 拝見しました。面白いですね。湯川さん達がハイトラー・ロンドンにすごいインパクトを受けた(らしい)事は盲点になっていましたが、考えてみれば当然ですね。引力のない中性の 2 個の水素原子に大引力を生じさせるわけですから。そして今回の貴論文、その新しさに驚きました。私は原子核の素人ですから、何故 K のみが? がわかりません。しかし「踏み尽くされた」核力の中にこんな視点が浮上するとは何ともうれしいことです。いずれじっくりその話をききたいものです。ご返事まで 草々

杉本先生からは図 2 に掲げるような書簡で励ましの言葉を戴いた。この K^-pp 核の探求こそは 2007 年以後の私のすべてをかけているテーマである。

この学説はこの分野ではあまり注目もされていないようであるが、國広悌二さんから、内容に富む励ましのメールをいただいていた。深い内容が含まれているので引用をさせていただく。

山崎 → 國広 2007.5.8

国広さん：ご無沙汰しております。YKIS の論文は推敲したものを保坂さんに出しておきました。

それと関係ありますが、最近、赤石さんと二つの論文を作りました。一つは YKIS の full paper 版です。既に PRC に投稿しました。これまでの例から推し量ると、きっとメチャメチャなレフェリーが登場して、出版には 1-2 年を要すると予想しています。そこで、短い論文を日本学士院の欧文誌である Proc. Japan Academy B に投稿しました。これは間もなく印刷されることになります。そこには見慣れない題目を付けました。SuperStrongNuclearForce というもので、おおげさな表現との誹りを覚悟していますが。仮想パイ中間子が媒介する通常の核力ではなく、実の K 中間子が

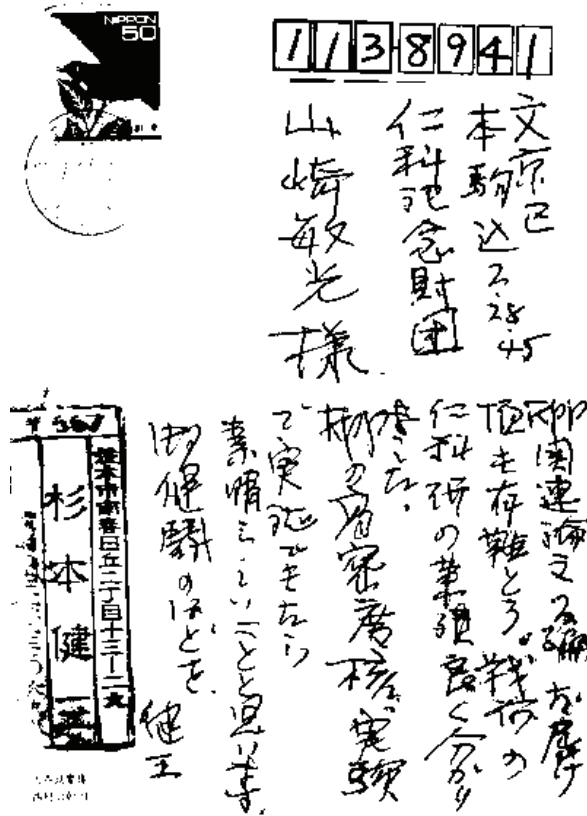


図 2: 杉本健三先生からの励ましの葉書。「K p p 関連論文 2 編お届け頂き有り難う。戦前の仁科研の業績良く分かりました。K p p の高密度核、実験で実証できたら素晴らしいことと思います。ご健闘のほどを。健三」と書かれている。

migrate することにより起こる、はるかに強い核凝集力のことです。歴史的には、湯川が悪戦苦闘のち克服した Heitler- London-Heisenberg の考えの復活ということが出来ます。昨年、湯川朝永シンポジウムに出たときからわき起こった捉え方です。多分、国広さんなら、われわれの論文の心を理解して下さると思ひ、お送りする次第です。この中で、K 中間子の存在が NN の短距離反発力を和らげるのでは、という予想が書いてありますが、この辺は国広さんに議論していただきたい問題です。コメントいただければ大変嬉しいことです。

山崎敏光

国広 → 山崎 2007.5.9

YKIS の proceedings への原稿を送っていただきありがとうございます。また、その原稿とともに PRC に投稿された最新の論文も送っていただきありがとうございました。

早速、短い PTP の論文の方を中心にざっとですが読ませていただきました。PRC の方もとばし読みですが読んでみましたが、PTP の方が impressive でした。K⁻pp

がハイトラーロンドンの (ほとんど (?) real な粒子として析出した) K^- を媒介とする「共有結合状態」であるという観点は新鮮で、この系の新奇さがよく表現されているように思いました。また、K-nuclear CLUSTER という表現も印象的です。ただし、 $\pi-\Sigma$ 系とのチャンネル結合の効果はどのようなだろう、という疑問が湧きましたが、それは PRC のところで $\pi-\Sigma$ のチャンネルの効果を消去して複素ポテンシャルを構成している、という説明が詳しくされていて納得しました。(しかし、それでもそのような取り扱いの妥当性とその限界のようなものもあるはずと思うのですが、そのあたりのことが私自身見えないので、粗く読んだ範囲では個人的に確信を持つところまでは至りませんでした。)

特に、印象に残ったのは $p-p$ 散乱を K^-pp 系生成に用いるという提案とその予想外の断面積の大きさと特異なエネルギー依存性です。たいへん興味深いと思いました。さらに、実験も G S I で近々されるようでその結果がたいへん楽しみです。この実験は論文でも山崎先生が書かれているように、 K^-pp の存在の確証だけでなく、その空間的広がり (小ささ) をも明らかにする可能性があるわけで、画期的なものになる可能性があるように思いました。

さて、 $uud-s\bar{u}-uud$ 系において $s\bar{u}$ の存在により核子間の斥力コアが弱くなるのではないか、という興味深い予想についてですが、これはよく分かりません。すでに山崎先生も書かれているように、 K^-pp 系は $N-\Lambda^*$ であるようです。すると、その段階でこの 2-バリオン系の斥力コアは小さくなっている可能性があります。つまり、 $N-N$ 間と $N-\Lambda^*$ 間の短距離斥力の差の問題に帰着されるので、直接 NN 間の斥力コアの reduction は「見えない」可能性があります。ただ、この議論の出発点であるクォークレベルでコンパクトなハドロン 3 体系を考えるという発想に立ち返り想像をたくましくすると、実際はこの系の全波動関数の short-range 部分はハドロンが「溶けて」クォーク 6 体系あるいは 8 体系になっているのかもしれない。そしてそのようなクォーク多体系では斥力効果はパウリ原理による効果が小さく、またカラーマグネチック相互作用もストレンジネスの質量の大きさの分、斥力が少し小さくなっている、という議論ができます。

以上、原稿を送っていただいたお礼と、取り留めもない感想を書かせていただきました。また直接議論させていただく機会を楽しみにしています。

国広

8 K^-pp の探索

K^- 中間子を含む原子核は通常の原子核とくらべ大きな密度をもつと予言される。その原因は SSNF に支配されているからである。これの実験的検証は K^-pp を創ることにかかっている。そのための模索が始まった。まだまだ続く長い物語の現状を簡潔に記そう。

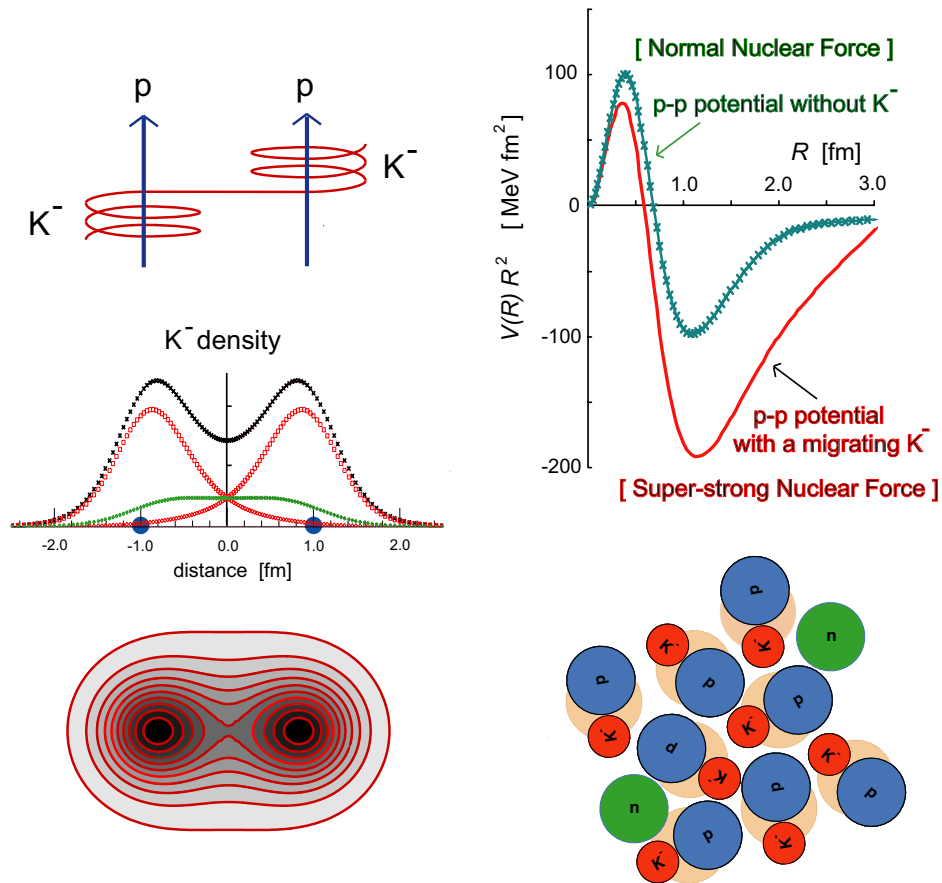


図 3: 回遊する実の中間子 K^- がもたらす超強核力の世界。(左) 2 個の陽子を強く結びつけ、一種の分子を作る K^- 中間子。(右上) その共有結合の力は通常核力の 4 倍にもなる。(右下) K^- と陽子の中性集合体は低温で凝縮した新物質であろう。

Quark Gluon Plasma

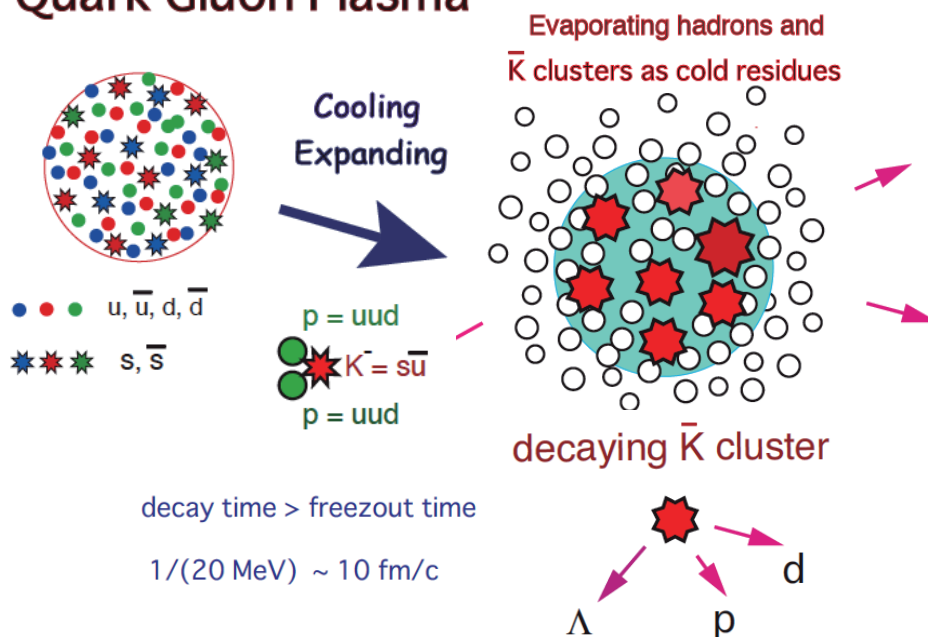


図 4: クォーク・グルオン・プラズマ中に生成する高密度K中間子クラスターは、しばし生き残った後、崩壊する。その生成物 $p + \Lambda$ の不変質量からK中間子クラスターの探索が可能である [?]。K中間子クラスターは subthreshold 反応の熱平衡の後にも生成するかも知れないが、 $p p$ 衝突の直接反応からの方が大事であろう。そこからは $K^- K^- pp$ が直接に作られる可能性がある [47, 48]

1. 2007年、Akaishi-Yamazaki は、 $K^- pp$ はほぼ、 $\Lambda^* = \Lambda(1405) = K^- p$ に p が結合して作る深く且つ高密度の状態であるので、大きな運動量移行と短距離衝突での $pp \rightarrow p + \Lambda^* + K^+$ 生成反応では、極めて大きな sticking: $\Lambda^* + p \rightarrow \Lambda^* p \rightarrow K^- pp$ が起こることを予言した [40]。常識的理解とは正反対の予言である。既にある DISTO 実験のデータ $pp \rightarrow p + \Lambda + K^+$ を解析した所、 $\Delta M(pK^+)$ 及び $M(p\Lambda)$ のスペクトル中に、 $M = 2267$ MeV を中心とする幅の大きなピークが $\Lambda(1405)$ 生成に匹敵する強度で見つかった [44, 45]。[40] の予言に照らすと、これは高密度の状態 $K^- pp$ が生じたためと結論される。

2. 観測された質量ピークの位置から決まる $K^- pp$ の束縛エネルギー 100 MeV は予言値の倍もある。予言に使う $\bar{K}N$ 相互作用は $\Lambda(1405)$ の実験値から決めたものを使っているが、それは核媒質中では変わっているかも知れない。パイ中間子核の場合に見出されたように、クォーク凝縮がカイラル対称性の回復のため減少することがあれば、引力の $\bar{K}N$ 相互作用は核媒質中では増大し、K核クラスターの束縛エネルギーは容易に倍増することが、最近前多らにより示された [46]。

3. pp 反応で $K^- pp$ が大きな断面積で生ずるという事実は、さらに高いエネルギーでの反応では、 Λ^* 2個が同時に同一位置で生成し、結合することが予言される [47]。こうして pp の直接

反応から二重K核 K^-K^-pp を生み出す実験方法が提案された [48]。J-PARC での次の課題である。

4. これを拡張すると、マルチK核の存在と生成が期待される。その束縛エネルギーは極めて大きく、且つ高密度に凝縮している。弱い相互作用でしか崩壊できない準安定相 (ps の寿命)、もしかすると質量が小さくなり、強い相互作用でも崩壊できない安定相になるかも知れない。これこそ、K中間子凝縮状態 [49, 50] ということができよう。そこでは、ハドロンの記述に代わり、QCD的記述が必要になるであろう。

5. やがて、重イオン反応でK核ストレンジレットが探索される日が来るであろう [51]。かくしてわれわれの目標は、誰でもが注目する高温高密度のクォーク・グルオン・プラズマではなく、誰も注目しない**超低温・高密度のクォーク・グルオン束縛状態**である、ということができよう。これは、重イオン反応の中で熱平衡でできるというよりは、最近の論文で強調しているように、最初の一撃で生成する multi- \bar{K} であるに違いない。これには実験室系で 8 GeV/u が必要とされる [47, 48]。

6. このエッセーの最後の部分は今、J-PARC の E15 の実験室で書き終えようとしている。私が驚いているのは、ビームの強度や時間スピルの安定性である。ここでは若い世代の人たちが大強度K中間子ビームを用いて K^-pp を創り出そうとしている。その結果がどうなるか、まだ誰にもわからない。

これが、誰もやってないことを探求せよ、との杉本精神に沿って私がたどり着いた地点である。昨年逝去された杉本健三先生を偲びながら、この辺で未完の物語の筆を措きたい。また、あわせて、パウル・キーンレ先生にもこのエッセーを捧げたい。そして、苦楽を共にした多くの研究仲間たちにも。終わりに、長年の友でこの Festschrift の完成に多大な情熱を注がれた中井浩二さんに感謝したい。

参考文献

- [1] T. Yamazaki, in "Nuclei, the Playing Fields of Physics" (ed. K. Nakai, J.C. Baltzer AG, 1985) p. 85.
- [2] R.S. Hayano *et al.*, Phys. Rev. Lett. **49** (1982) 1305.
- [3] T. Yamazaki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **52** (1984) 1089.
- [4] R.S. Hayano *et al.*, Phys. Rev. Lett. **52** (1984) 329.
- [5] M. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 131601; Phys. Rev. D **73** (2006) 072005.
- [6] T. Yamazaki, T. Ishikawa, K. Yazaki and Matsuyama, Phys. Lett. **144B** (1984) 177.
- [7] R.S. Hayano *et al.*, Phys. Lett. **B231** (1989) 355.

- [8] T. Yamazaki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **54** (1985) 102.
- [9] T. Yamazaki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **63** (1989) 1590.
- [10] M. Iwasaki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **67** (1991) 1246.
- [11] T. Yamazaki *et al.*, Nature **361** (1993) 238.
- [12] T. Yamazaki, N. Morita, R.S. Hayano, E. Widmann and J. Eades, Phys. Rep. **366** (2002) 183.
- [13] M. Hori *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 243401.
- [14] T. Yamazaki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **25** (1970) 547.
- [15] H. Miyazawa, Prog. Theor. Phys. **6** (1951) 801.
- [16] T. Yamazaki, Phys. Lett. **160B** (1985) 227.
- [17] G.E. Brown and M. Rho, Phys. Rev. Lett. **66** (1991) 2720.
- [18] M. Naruki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 092301.
- [19] T. Yamazaki and Y. Akaishi, Phys. Lett. **B453** (1999) 1.
- [20] M. Shiozawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 3319.
- [21] H. Toki and T. Yamazaki, Phys. Lett. **213B** (1988) 129.
- [22] R. Bertini *et al.*, Phys. Lett. **90B** (1980) 375.
- [23] T. Yamazaki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **54** (1985) 102.
- [24] T. Harada *et al.*, Nucl. Phys. A **507** (1990) 715.
- [25] T. Yamazaki *et al.*, Phys. Lett. **207B** (1988) 393.
- [26] D. Jenkins *et al.*, Phys. Rev. Lett. **17** (1966) 562.
- [27] T. Yamazaki, S. Hirenzaki, R.S. Hayano and H. Toki, Phys. Reports **514** (2012) 1.
- [28] T. Yamazaki *et al.*, Z. Phys. **A355** (1996) 219.
- [29] 山崎敏光、日本物理学会誌 2013 年 7 月号.
- [30] Y. Nambu and G. Jona-Lasinio, Phys. Rev. **122** (1961) 345; **124** (1961) 246.
- [31] T. Hatsuda and T. Kunihiro, Phys. Rev. Lett. **55** (1985) 158; Phys. Reports **247** (1994) 221.
- [32] P. Kienle and T. Yamazaki, Prog. Part. Nucl. Phys. **52** (2004) 85.

- [33] K. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 072302.
- [34] M. Iwasaki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 3067.
- [35] Y. Akaishi and T. Yamazaki, Phys. Rev. **C 65** (2002) 044005.
- [36] T. Yamazaki, Nucl. Phys. **A691** (2001) 515c.
- [37] A. Doté, H. Horiuchi, Y. Akaishi and T. Yamazaki, Phys. Lett. **B 590** (2004) 51; Phys. Rev. **C 70** (2004) 044313.
- [38] T. Yamazaki and Y. Akaishi, Phys. Lett. **B 535** (2002) 70.
- [39] T. Yamazaki and Y. Akaishi, Proc. Jpn Acad. **B 83** (2007) 144.
- [40] T. Yamazaki and Y. Akaishi, Phys. Rev. **C 76** (2007) 045201.
- [41] W. Heitler and F. London, Z. Phys. **44** (1927) 455.
- [42] W. Heisenberg, Z. Phys. **77** (1932) 1, **78** (1932) 156, **80** (1933) 587.
- [43] H. Yukawa, Proc. Phys. Math. Soc. Jap. **17** (1935) 48.
- [44] T. Yamazaki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 132502.
- [45] P. Kienle *et al.*, Eur. Phys. J. A **48** (2012) 183.
- [46] S. Maeda, Y. Akaishi and T. Yamazaki, to be published.
- [47] T. Yamazaki, M. Hassanvand and Y. Akaishi, Proc. Jpn. Acad. **B 87** (2011) 362.
- [48] M. Hassanvand, Y. Akaishi and T. Yamazaki, Phys. Rev. **C 84** (2011) 015207.
- [49] D.B. Kaplan and A.E. Nelson, Phys. Lett. **B175** (1986) 57.
- [50] G.E. Brown, C.H. Lee, M. Rho and V. Thorsson, Nucl. Phys. **A567** (1994) 937; G.E. Brown, *ibid.* **A574** (1994) 217c; G.E. Brown and M. Rho, Phys. Rep. **269** (1996) 333.
- [51] T. Yamazaki, A. Doté and Y. Akaishi, Phys. Lett. **B 587** (2004) 167.