

原子核を核力から作る —パイ中間子のすごさと難しさ— 土岐 博

今回の企画は「The Playing Fields of Physics 30年史」というタイトルがついている。30年というのはまさしく自らが原子核物理の神髄をつかみたいと思って、研究・勉強に励んできた期間である。この企画は実験の論文が中心であるが、理論屋として自らが研究して来た経験から、原子核物理学のあるべき姿を語り、今後どのように原子核物理が発展するべきかの方向についての思いを記述したい。

1. はじめに

この書き物を書くにあたって、私の阪大時代の理論物理の恩師であるが、数年前になくなられた村岡先生と、阪大の学生時代から実験の立場から私に大きな影響を与えてくれたが、昨年度になくなられた杉本先生にこの論文を捧げたいと思います。このお二人の先生に非常に大きな影響を受けました。私自身が大阪大学で過ごした学生時代の、多くの場面を思い出しますが、今回の論文では多くの科学者に役に立つ話として、両先生の共著の教科書の中身を少し紹介したいと思います。その上で、タイトルに対応する本論に入りたいと思います。

原子核物理学の流れを理解するために、杉本・村岡の教科書である「原子核物理学」の内容を紹介したいと思います[1]。1988年に発行されたこの本の特徴は原子核物理の実験結果が豊富に記載されていることである。そのさいに、実験結果を得るのに使う実験装置とその方法が簡潔に述べられている。さらに、その実験が何を意味するかの理論的な記述がなされている。多くの原子核を研究する人、勉強する人はこの本から原子核物理学を概観することが出来る。非常に有用で素晴らしい教科書だと思う。

この本の非常に特徴的なのは冒頭の表1に、この本が発行された1988年までの加速器の発展と、その測定器技術の発展、さらにはそれらの技術の開発に相まって原子核物理学の発展が時系列で詳しく述べられていることである。そのように始まるこの本では、その細部の説明の中で「歴史的発展の経緯からは、研究を進める上での多くの指針を学び取ることができる。」と書かれている。まさしく、技術の開発と科学の動機が新しい発見を生み出すことを読み取ることができる。

この教科書を手にとって読んでみられることをお勧めするが、さらには多くの物理量がどのように測定され、どのような系統性を持っているかを知る意味でも、非常に重要な教科書であると思う。最初に原子核の発見と、原子核の大きさや質量が実験方法も含めて非常にコンパクトに記述されている。原子核の大きさがどのような時期にどのような方法で測定されたかが詳細に記述されている。その次には2体の散乱の実験とその結果がまとめられており、スピンとアイソスピンに依存する中心力に加えてスピン軌道力やテンソル力まで含めた相互作用が必要であり、2体の核力の決め方が議論されている。その中でさらにデルタ粒子を介在した3体力の出現についても議論されている。

原子核の性質の情報は電磁気的な相互作用を通して得ることができる。電子散乱は原子核の密度分布をかなりの内部まで明らかにしてくれる。これらの情報から原子核のシェルモデル的な様相と集団運動的な様相が出現した。原子核物理学を概観する上で必要な実験事実とその理解の方法が非常に分かり易く語られている。

その上で、第1章の最後の所で、

「安定核の基底状態近傍において観測される現象を理解するために、今までに提案され成功を収めてきた核模型には、核内核子の軌道運動にもとづく殻模型(shell model) または核子の集団運動に着目した集団模型 (collective model) などがある。これらの核構造論は、しかしながら本質的には未だ現象論の段階にとどまっている。このことは次の2つの困難が未解決なことにもよるものである。その1つは少数多体系から多体系にわたる自由度の多い有限個の量子系の取扱いが困難であることと、いま1つは核力についての知識が、核子自身のもつ内部構造の問題が未解決でもあり、核構造を理解するのに十分ではないことである。したがって、なお将来に解答が待たれる課題を多く残している。」と言っている。

自らの研究対象としても、原子核の対相関、巨大共鳴や原子核の変形現象の研究から始まって、パイ中間子凝縮やスピンアイソスピン相関の物理を通して、パイ中間子が絡む物理に大きな問題を含んでいるという思いが膨らんできていた。そんな中で、多くの共同研究者との議論の中で、パイ中間子を陽に取り込んだ原子核物理を展開してみようということで、パイ中間子の原子核の役割についての研究にほぼ10年以上前から取り組んでいる。この論文では、パイ中間子の原子核での役割に焦点を当てて議論をしたいと思う。

2. パイ中間子のすごさとその難しさ

2-1 湯川先生のパイ中間子

1932年に中性子が発見されてすぐ、陽子と中性子の間に働く相互作用を、これまでの陽子と新しく発見された中性子と電子を考慮して、ハイゼンベルグが議論していた。さらにフェルミもニュートリノと電子の対を交換することから生じる相互作用の議論をしていた。湯川は1935年の論文で相互作用の強さや到達距離の問題から、全く新しい粒子が必要であるとして、質量が200MeV くらいの中間子が存在するべきであると結論した[2]。最初は湯川の中間子は電荷をもったベクトル粒子と考えられてきたが、その後の系統的な研究から、宇宙線で発見されたほぼ同じ質量をもつ粒子（今では μ と π ）の詳細な分析などから、湯川粒子であるパイ中間子は擬スカラーの性質を持っていると結論された。

2-2 メイヤーヤンセンのシェルモデル

核力はパイ中間子が重要な働きをすることはわかっていたものの、そのままでは原子核物理に直接使われることがなく、1949年になって、メイヤーとヤンセンは原子核を記述する方法としてシェルモデルを提案した[3,4]。その重要なことは、核子は原子核の中ではパウリ原理のため相互作用しない粒子のようにふるまい、1体の中心ポテンシャルで束縛されていることと、実験で示されているマジック数を再現するには非常に強いスピン軌道力が核子に働いていることを示したことである。それまでは、原子核の大きさや質量や、磁気モーメントなどの実験結果は存在していたものの、それらのデータを説明することができなかったが、原子核のマジック数の近傍の原子核の諸性質を見事に再現するモデルとして成功を収めた。したがって、この段階から原子核物理は実験の発展にもなって理論研究も盛んに行われて現在の豊かな原子核物理学が体系づけられた[1]。しかし、この流れは明らかに現象論的であり、原子核物理での湯川のパイ中間子の役割は定量的に議論される必要がある。

2-3 南部先生のカイラル対称性とその自発的破れ

核子のようなフェルミ粒子が質量をもたない場合にはカイラル対称性が成り立っている。1960年に発表された南部とジョナラシニオのNJLモデルは核子のような物質を構成する粒子が質量を獲得する機構を説明したばかりではなく、湯川の導入したパイオンが擬スカラー粒子であることも同時に証明した[5]。カイラル対称性の自発的破れにより質量を獲得した核子の集まりである原子核では必然的にカイラル対称性の破れを特徴づけるパイ中間子の役割が非常に重要になってくる。

3. パイ中間子を含む核力が教える物理

パイ中間子は南部理論によると、核子はその大部分の質量を獲得する機構（カイラル対称性の自発的破れ現象）に付随して非常に軽い核子間の相互作用を与える擬スカラー中間子として発現する。しかも核子との結合定数は非常に強く、パイ中間子は原子核で重要な役割を持っているはずである。しかし、擬スカラー粒子であることで、その取扱いは非常に難しい。さらには、核子が有限のクォーク構造を持っていることから生じる短距離の斥力を扱う必要がある。これまでの原子核理論では先に強い擬スカラー交換力と短距離斥力を取り込んだ理論的方法（ブリュクナー理論[6]）により処理した有効相互作用(G 行列)を無限の広がりをもつ核物質で作る。その方法で得られた密度に依存した有効相互作用を使ってシェルモデル的な記述をすることが一般的である。もちろんこのように記述した波動関数では擬スカラー力で束縛されている原子核の特徴を表現することが出来ない。特に、原子核には形を表現する低運動量の成分と、パイ中間子が導入する高い運動量成分を持ち合わせていることを表現することは出来ない。

3-1 現象論的核力

現象論的核力は一般的には短距離で強い斥力があり、中間領域から長距離領域ではパイオン交換力が支配的であることが分かっている。そこで、少し定量的な議論をするために、最近良く使われているアルゴンヌグループが提唱した AV8'ポテンシャルを使って一番軽い原子核である重水素を調べることにする[7]。重水素は 1^+ のスピンプリティーを持っている。そのチャンネルに働く相互作用は図1のようになる。

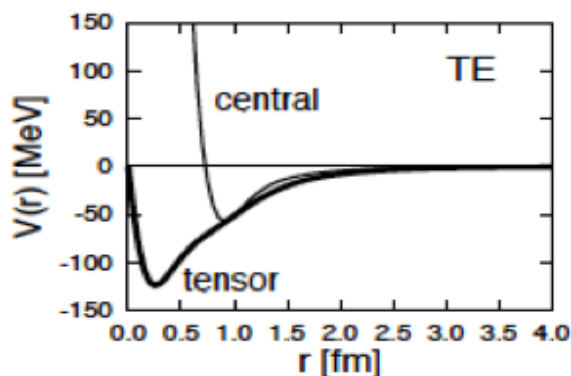


図1：重水素は 1^+ のスピンプリティー量子数を持っており、そのチャンネル(3E)に働く相互作用においては、強い斥力芯を持つ中心力と強いテンソル力がある。この図ではアルゴンヌグループの AV8'相互作用が距離の関数で示されている。

核力は核子散乱から得られる断面積と2体系で唯一の束縛状態である重水素の性質を再現するように作られた相互作用である。中長距離 ($r > 1\text{fm}$) でのパイ中間子交換力の部分は共通しているが、中間領域 ($r = 0.5 \sim 1\text{fm}$) や、ましてや短距離 ($r < 0.5\text{fm}$) の斥力芯の部分は現象論的に記述されている。その意味では後述するが、核子の構造を定量的にするとともに、核力も量子色力学 (格子 QCD 理論) から導出されることが望ましい。

3-2 重水素の構造とテンソル力

パイ中間子交換力の主役はテンソル力である。パイ中間子は擬スカラー粒子なので、パイ中間子を交換した時の核子間の相互作用は次のように書ける。

$$(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \vec{q})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \vec{q}) \frac{1}{m_\pi^2 + \vec{q}^2} = \frac{1}{3}(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2) \frac{\vec{q}^2}{m_\pi^2 + \vec{q}^2} + \frac{1}{3}S_{12}(\hat{q}) \frac{\vec{q}^2}{m_\pi^2 + \vec{q}^2}$$

最初の $\vec{\sigma} \cdot \vec{q}$ はパイ中間子が擬スカラー粒子で 0^- のスピンとパリティを持ち、その粒子を消したり作ったりする時には、同じ量子数を核子のスピン $\vec{\sigma}$ と運動量移行 \vec{q} の内積で作る。等号の右の式はスピン空間と運動空間の演算子の積で書くことで2つの項で表現される。一つはスピンスピン力と呼ばれる。もう一方はテンソル力と呼ばれる。ただし、 $S_{12}(\hat{q})$ は次のように書ける。

$$S_{12}(\hat{q}) = \sqrt{\frac{5}{24\pi}} [Y_2(\hat{q}) \times [\boldsymbol{\sigma}_1 \times \boldsymbol{\sigma}_2]_2]_0$$

このテンソル演算子は運動量空間の角運動量を2、スピン波動関数のスピンも2変化させることが可能である。したがって、2つの核子の相対座標で角運動量が0の状態と2の状態を結びつける。さらに重要なことは、テンソル力は分子に \vec{q}^2 がついており、2つの核子間で交換される運動量が大きいく、大きな行列要素をもつことである。この際にスピンスピン力の方も同じ運動量依存性を持つが、核子間には強い斥力が働いていることで核子は近づくことができず、スピンスピン力の高い運動量成分は効かなくなる。その意味ではパイ中間子を扱うということは強いテンソル力を扱う問題である。

実際に重水素の波動関数を求めると、確かにテンソル力による行列要素が非常に大きく、重水素が束縛するのに非常に大きな役割をしている。シュレディンガー方程式は図1で示した相互作用 V と運動エネルギー (T) を使って次のように表現される。

$$(T + V)\Psi = E\Psi$$

テンソル力 ($V_T S_{12}$) はS波間では行列要素は0になるが、S波とD波の間で大きな行列要素を持つ。

$$\Psi = C_S |S\rangle + C_D |D\rangle$$

この方程式を解くと、テンソル力がどのように働いているのかを知ることが出来る。それぞれの成分がどのように効いているかの詳細は引用した論文に詳しく示されている[8]。重水素は約 2.2MeV の束縛エネルギーを持っているが、S 波のみだと運動エネルギーの 10MeV に対して 4MeV くらいの引力エネルギーで束縛しない。最大の引力はテンソル力から生じるが、それは S 波から D 波へ遷移することにより 18MeV の引力エネルギーを得ることができる。なお、その間に運動エネルギーはさらに 10MeV くらい大きくはなるがネットでは、引力側がまさり、小さいが有限の束縛エネルギーを得ることができる。この事実が重い原子核でどのようにテンソル力を取り扱うかのヒントを与えている。つまりは、原子核は存在確立こそは小さいが高い運動量成分を持つ D 波成分が、非常に大きなテンソルの引力エネルギーをかせぐことにより成り立っている系である。

3-3 トリトンの構造と 3 体力

重水素は核力を決定するのに使われるので、核力から原子核を記述できるかどうかの最初の理論研究は 3 体系であるトリトン (${}^3\text{H}$) である。2 体力で 3 体系が記述出来るかという課題である。3 体系の計算には多くの日本の研究者がかかわった。使う核力により多少の定量的違いはあるものの、2 体力だけではトリトンの束縛エネルギーは再現出来ないという結論が多く研究者によりなされた。3 体系を再現するには 3 体力が必要であるということで、現象論的な 3 体力を含めた少数系の計算が行われるようになった。実験でも p+d 反応のような核子 3 つが関与する系では 2 体力では反応が記述出来ず、3 体力が必要であることも指摘されている。この 3 体力はパイ中間子が媒介するデルタ粒子の引力効果（藤田宮沢 3 体力）と相対論的な斥力効果の和で与えられると考えられている。この藤田宮沢型の 3 体力にはパイ中間子が重要な働きをしている[9]。

3-4 アルファーにおけるテンソル力

アルファー (${}^4\text{He}$) は軽い系でもっとも粒子あたりの束縛エネルギーが大きい系である。核力を使った 4 体系の計算は非常に難しいが、多くのグループが競って方法論の開発を行った。その計算結果は一つの論文にまとめられている[10]。その結果を見ると、テンソル力は全体の引力のうちの、ほぼ 50% の寄与をすることが分かる。さらには、4 体系の少数多体理論の結果では 2 体の核力だけでは数 MeV の束縛エネルギーが不足しており、アルファーの質量を再現するためには 3 体力を導入することが不可欠である。

3-5 アルゴンヌグループによる軽い原子核の核構造

アルゴンヌグループは長い年月をかけて、 ${}^4\text{He}$ よりも重い原子核を核力で記述する方法を開発

した[11]。現在では ^{12}C までの計算が可能になってきている。現象論的な3体力を導入することにより、束縛エネルギーや多くの物理量に対して非常に良い結果を得ている。その計算結果は次のようにまとめることができる。

- 2体力での計算ではパイ中間子交換力が70~80%の引力を与える。その中でもテンソル力の引力への寄与は全体の約50%の引力を与える。
- 2体力では原子核の束縛エネルギーが不足しており、3体力を必要としている。3体力は核子あたりで1~2MeVの束縛エネルギーを与える。3体力は現象論的に導入されたもので、何種類もの3体力の比較を行った。

これらの結果は原子核物理にとっては、非常に重要な成果だと言える。今後はもっと粒子数の大きな原子核の核力による記述が必要になる。もっとシェル構造が発達した重い原子核では単一粒子モデルの特徴であるマジック数がどのように出現するのかを見る上でもシェルモデル的な枠組みが望まれる。そのために現在では全シェルを導入するシェルモデル (No core shell-model: NCSM) の研究が盛んに行われている。このNCSMの計算には非常に大きな行列を扱う数値的方法の開発が望まれている。

4. テンソル最適化シェルモデル

少数多体系の方法では核子間の相対座標に核力から生じる全ての相関を表現する関数を導入することが必要である。この方法は核子数が増えると、その変分関数は膨大なものになり、解析的な計算も非常に困難になるばかりではなく、さらに数値計算においても現在のもっとも強力なスーパーコンピュータでも答えを出すのが難しくなる。

テンソル力は核子間に働く相互作用だが、相対波動関数の角運動量を2だけ変化させ、スピン波動関数を2だけ変化させる。さらには大きな運動量移行をする方が相互作用は大きい。この事実を表現するにはまずテンソル力を扱うもっとも有効的な方法を開発する必要がある。そのヒントは重水素の場合の引力の原因であり、その場合の一番大きな行列要素はS波からD波への遷移によってもたらされる。数値的に見るとD波の確立は僅か6%くらいだが、その引力エネルギーは大きくなる。このD波の確立をあまり大きくしないこともテンソル力の特徴である。その理由はテンソル力の行列要素が大きいのは大きな運動量を持つ状態であり、その成分が波動関数に入るのを妨げることによる。

重水素の場合を参考にすると、従来のシェルモデル (低い運動量成分) の配位をまずは用意しそれを $|0\rangle$ と書いて、その従来のシェルモデル状態から直接テンソル力で繋がる全ての状態を導

入するということが考えられる。したがって、テンソル力を扱う波動関数としては最低限で次のようなシェルモデル的な配位が考えられる。

$$\Psi = C_0|0\rangle + \sum_{\alpha} C_{\alpha}|2p-2h:\alpha\rangle$$

このように書くと、テンソル力は $\langle 0|V_T S_{12}|0\rangle = 0$ だが、 $\langle 0|V_T S_{12}|2p-2h:\alpha\rangle \neq 0$ であり、充分に大きな $2p-2h$ 配位を用意するとテンソル力を充分に取り込んだ波動関数になる可能性がある。さらには、高い運動量成分を取り込むことが重要であるが、 $2p$ 状態を表現するのに基底状態のものよりはコンパクトなガウス関数を使うと良い。これがテンソル最適化シェルモデル (TOSM) の名前の由来である。この成果は ${}^4\text{He}$ の計算で確かめられている [12]。なお、この際には短距離の斥力をうまく扱う必要があるが、最近ドイツで開発されたユニタリー演算子法 (UCOM) の中心相関に関する方法を使う [13]。

4-1 テンソル力がもたらす ${}^{11}\text{Li}$ のハロー構造

最近の原子核物理で非常に大きな発見は、中性子ドリフ線に近い中性子過剰核では中性子ハロー構造を持つことである。この現象はこれまで比較的均一な密度分布の原子核を研究してきた原子核物理学者に全く新しい課題を提供したことになる。特にもっとも最初に発見された ${}^{11}\text{Li}$ のハロー構造に関しては多くの理論研究が行われた。非常に興味深い現象なので多くの理論研究が行われたが、最終的にはテンソル力の効果を陽に扱わない理論ではどうしても $N=8$ のマジック数の上にある s -状態のエネルギーを下げるができなかった。すなわち、テンソル力はハロー核を生成するのに必要なスピン依存の効果を持つことが示された [12]。そのうえで、TOSM は He や Li アイソトープのスペクトルに重要な影響を与えることが示された [14,15]。

4-2 強テンソル相関ハートレーフォック理論

量子多体系を取り扱う標準的な方法はハートレーフォック (HF) 法である。ブリュックナー理論は高い運動量成分を先に積分して有効相互作用を計算した上で、低い運動量成分で構成される HF 状態を決定するための相互作用としてその有効相互作用を使う。この方法は原子核の基底状態のエネルギーと大きさをほぼ再現する。さらに、有効相互作用は殻模型の現象論的に得られたものと良く一致している。しかし、この方法によって得られた波動関数にはテンソル力が引き起こす大きな運動量成分が入らない。

そこで、新しい試みとして TOSM の考え方を HF 法に適応する。すなわち、HF 法による低い運動量成分を持つ波動関数を $|0\rangle$ と書いて、その状態からテンソル力の 1 回の演算で結ばれる状態を導入する。

$$\Psi = C_0|0\rangle + \sum_{\alpha} C_{\alpha}|2p-2h:\alpha\rangle$$

その上で、HF 状態が単一粒子の積で書かれているとして、その波動関数を求める。このようにすると、HF の単一粒子波動関数を求める方程式は Brueckner 理論の方程式と非常に似たものになる。強いテンソル相関を扱える理論なので強テンソル相関ハートレーフォック理論 (STCHF) と呼ぶことにする。現在は核物質での計算と有限核での計算が進行中である[16]。

5. 京コンピュータ時代の核構造

原子核は非常に複雑な量子多体系であり、その定量的な記述にはシェルモデルから始まる現象論が不可避であると考えられてきた。実際に、加速器の発展とともに多くの実験データを得ることが可能であり、詳細なデータが取得されると、その説明のために現象論的な記述に終始してきた。そのことにより原子核物理は大きく発展した[1]。

しかし、この数年来、日本では京コンピュータの導入が現実のものとなり、どんな難しい数値計算でもチャレンジ出来るだけの環境が（理論）科学者に与えられた。この事実は原子核物理の理論研究に大きな変革をもたらしている。いまや、第一原理から原子核を記述することが、原子核物理の目標となりつつある。約 10 年前に上坪先生の呼びかけと強い熱意のもとに、土岐・伊藤（九大）を中心として、実験、理論に加えて研究の第 3 極の方法としての超大型コンピュータの導入の重要性の文章を学術会議からの提言文章として用意したことを思い出す。日本の大きな先見性により、科学者は素晴らしい力を得たことになる。

5-1 量子色力学から記述される核力

量子色力学はコンピュータの能力とともにその威力を増してきている。筑波大学や高エネルギー研究所の強力なコンピュータを用いて、ハドロンの質量やその性質の詳細な計算がなされる中で、核子間の相互作用を導出する研究がなされるようになった。一般には核子間相互作用は 2 核子の散乱実験から得られる情報を再現するために長距離ではパイオン交換力を使う一方で、中距離や短距離では現象論的なポテンシャルを仮定して、そのパラメータを決定するという手法で研究されてきた。

量子色力学を使うと、短距離から中距離での散乱波動関数を計算することが可能であり、その情報から核子間の相互作用を導出する。格子 QCD 理論は核子の質量や磁気モーメントを再現することが可能であり、短距離での核子の広がり効果も取り込むことが可能である。その意味

では2核子散乱の実験と相補的な情報を与えることが出来る。

5-2 格子 QCD による核力の核構造での現状

格子 QCD 理論はハドロンの質量や構造を計算するのに成功している。最近、青木達は重心系で適当なエネルギーを持つ2体系の散乱状態のクォークで表現された2つのバリオンを適当な距離に置いて、2つのバリオン間の波動関数を計算することに成功した[17]。その波動関数を与えるポテンシャルの導出に際し、シュレディンガー方程式を使うことで、その波動関数を与えるバリオン間ポテンシャルを計算する。現在は、コンピュータの能力の制限からパイオンの質量として現実の値である 140MeV よりもずっと大きな質量を与えるクォーク質量を使って核力が計算されている。

詳しい内容が物理学会誌に紹介されているが、重水素のチャンネルの核力では中心力に大きな短距離斥力があり、大きなテンソル力が見受けられる。さらに、パイ中間子の質量を小さくして行くと、短距離斥力はより大きくなって行き、テンソル力も大きくなる。この結果は現象論的な核子間ポテンシャルの全てに共通する性質である。京コンピュータでの格子 QCD 計算が始まっており、現実的なパイ中間子の質量で核力が計算される日も近い[17]。

5-3 パイ中間子が作り出す3体力

核子系でパイ中間子の交換力が重要であるということは、同時にデルタ粒子の寄与が大きいことが予想される。通常は核子の自由度だけで、原子核の波動関数を表現する際には、このデルタ粒子の効果は3体力と言う現象論的なポテンシャルで表現されることになる。実際、格子 QCD 理論でも核子3体系(9クォーク系)の距離相関から3体力を導出する試みがなされている。

しかし、藤田宮沢の3体力はデルタを中間状態として励起することにより引き起こされると考えられている[9]。ハドロン物理から良く分かっているが、核子とパイ中間子が結合するとデルタ粒子状態が非常に強く励起される。その意味では、TOSM などのテンソル力を扱うことができる方法にデルタ粒子を陽に含む理論は非常に興味深い。デルタ粒子を陽に取り扱うには核子の自由度だけでも大きな空間を取り扱う必要がある所に、さらにデルタの自由度も扱うことになると膨大な波動関数空間を扱う。京コンピュータの出現はこの壮大なチャレンジも可能になると考えられる。

5-4 京コンピュータの核構造での役割

京コンピュータは日本のコンピュータ技術を結集して作られた超高速のスーパーコンピュータ

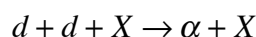
である。このコンピュータが科学技術の世界に導入されたことは、自然の法則を読み解くのに使われる実験と理論と言う2極の方法に加えて、第3極の方法を科学技術者が手に入れたことになる。この第3極の科学技術の方法は素粒子、原子核、天体物理を結びつけ、さらには物理学と数値計算工学を結びつけた。原子核構造の研究は明らかに新しい次元に入ったと言える。

第3極の科学技術の方法はこれまでとは全く異なった切り口の研究分野を結びつける。当然の結びつきは素粒子、原子核、天体物理というマイクロ系からマクロ系への自然界の段階的な成り立ちを記述する動機を現実のものとする。新しい結びつきは計算方法を通しての学問の融合である。物理学ではほとんどの場合に多次元の偏微分方程式を解く。数値計算の世界では、これらの方程式は超多次元の一階の常微分方程式に帰着する。この方法は工学の世界では現実の世界との対比でかなりの精度まで計算する技術が開発されている。物理の世界でも定量的な記述が宇宙の神秘を解き明かしてくれる日が来るであろう。

6. 重水素の融合

物質内での重水素の融合は多くの実験があるが、新しい原子核物理としてとらえると非常に興味深い。この問題を考えるのに最近の低エネルギーでの重水素同士の核力を使った反応計算は非常に興味深い。 $d+d$ の2体系の反応では終状態で ${}^4\text{He} + \gamma$ と ${}^3\text{He} + n$ および ${}^3\text{H} + p$ が出来る。新井達は非常に難しいが理論計算を行い、これらの反応の理解のためには核力の中のテンソル力が重要な役割をすることを示した[18]。これらの反応では一番引力が強い $d+d$ の $T=0, L=0, S=0$ のチャンネルは使っていない。まさしくこのチャンネルは ${}^4\text{He}$ が強い束縛状態として存在するので、 $d+d$ の相対運動は ${}^4\text{He}$ の波動関数と直交する必要があり斥力になってしまう。この理論計算が教えてくれているのは、 ${}^4\text{He}$ に反応が進むのが一番望ましいが、エネルギー運動量の保存を満足出来ないので、 $d+d$ の2体系では他のチャンネルを選択していることになる。

ところが、物質内の重水素反応のように、 $d+d$ の2体系以外の環境を用意出来ると、 $d+d$ が引っ付いて、もっともエネルギーが低い状態である ${}^4\text{He}$ を実現することが可能になる。重要なことは $d+d$ と相互作用する他の系が存在することで、 ${}^4\text{He}$ に移行する際に得られるエネルギーを他の系が受け取ることができることにより反応が可能になる。つまりは



の反応が可能になる。 $d+d$ 系としては α を作る反応が一番断面積の大きい反応チャンネルとなることが可能である。その意味では2体系の反応率とは比較にならない大きさとなる可能性を持っている。ただし、3体以上の反応率は $d+d$ の距離がどれくらいであるかに大きく依存する。

この反応はメスバウアー反応と類似している。しかし、この反応にともなう放出エネルギーは非常に大きく、重水素を内在する物質系は大きなエネルギーを受け取る必要がある。全く新しい核物理であると言える。

7. 原子核物理の面白さ

原子核においてパイ中間子を陽に扱うと、分からないことが山積みである。その取扱いも難しいが出てくる結果もこれまでのシェルモデルでの理解から大きく違っている。それが面白い。核子はその構成粒子としてクォークから出来ている。原子核の理解を進めると、量子色力学が随所で顔をだす。計算科学が京コンピュータの出現とともに研究方法の第3極になった今、原子核物理は大きく発展する兆しが見えている。

7-1 まとめにかえて

杉本先生とはこの10年間くらいはかなり近い所で、多くの話をさせていただきました。数年前までは良く研究室に来られて、そのさいは、必ず最近何か新しい話が出ていますか、と言う質問をされました。「J-PARCはどうですか。」「理研はどうですか。」「RCNPはどうなっていますか。」「理論はどうですか。」というような質問です。私はここに書いたようなことを、いつも話していました。

「はじめに」の所に書きましたが、杉本・村岡先生の教科書では原子核物理が現象論から抜け出すには、核力を使って原子核を記述する方法を開発することが必要であると書かれています。私には、TOSM的な記述法が一番近道に見えています。もう一つは、きっちりとした核力を導出することが必要であると書かれています。最近の格子QCD理論から導出される核力から、その真の姿を得ることができるであろうと考えています。原子核をパイ中間子の言葉で表現出来る日が近いことを心待ちにしています。

最後に、このような文章を書く機会を与えていただいた中井氏に感謝します。ここに書かれた一連の研究には多くの共同研究者がいます。その人たちに心から感謝したいと思います。

文献

- [1] 杉本健三 村岡光男、「原子核物理学」共立出版 (1988)
- [2] H. Yukawa, Proc. Phys. Math. Soc. Jap. **17** (1935) 48.
- [3] M.G. Mayer, Phys. Rev. **78** (1950) 16.

- [4] M.G. Mayer and J.H.D. Jensen, 'Elementary theory of nuclear shell structure', Wiley (1955).
- [5] Y. Nambu and G. Jona-Lasinio, Phys. Rev. **122** (1961) 345.
- [6] K. Brueckner, C. Levinson and H. Mahmoud, Phys. Rev. **95**, 217 (1954).
- [7] R.B. Wiringa et al., Phys. Rev. **C51** (1995) 38.
- [8] K. Ikeda, T. Myo, K. Kato and H. Toki, 'Clusters in Nuclei' Lecture Note in Physics (Springer) **818** (2010) 165.
- [9] J. Fujita and H. Miyazawa, Prog. Theor. Phys. **17** (1957) 360.
- [10] H. Kamada *et al.*, Phys. Rev. **C64** (2001) 044001.
- [11] S.C. Pieper and R. B. Wiringa, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. **51** (2001) 53.
- [12] T. Myo, H. Toki and K. Ikeda, Prog. Theor. Phys. **121** (2009) 511.
- [13] H. Feldmeier, T. Neff, R. Roth and J. Schnack, Nucl. Phys. **A632** (1998) 61.
- [14] T. Myo, A. Umeya, H. Toki and K. Ikeda, Phys. Rev. **C86** (2011) 024318.
- [15] T. Myo, A. Umeya, H. Toki and K. Ikeda, Phys. Rev. **C84** (2012) 034315.
- [16] Y. Ogawa and H. Toki, Annals Phys. **326** (2011) 2039.
- [17] S. Aoki, T. Hatsuda, N. Ishii and H. Nemura, Butsuri **67** (2012) 745.
- [18] K. Arai, S. Aoyama, Y. Suzuki, P. Descouvemont, and D. Baye, Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 132502.