

研究活動報告

石川壮一

我々を形作っている物質をどんどん切り刻んでいくと、物質としての最小単位である原子・分子にたどり着く。原子・分子の典型的なサイズはおよそ 10^{-10} m であるが、原子の中心にはさらに小さいおよそ 10^{-15} m というスケールの原子核が存在している。原子核は、核子（陽子・中性子）からなる量子力学的多体系である。私は、原子核というミクロな体系のなかでどのような相互作用機構が働いていて、その相互作用によってどのように多体系が組み立てられているのかについて興味を持って研究を行っている。

核子間の相互作用（いわゆる核力）がどのように記述されるかという問題は、湯川秀樹以来、原子核物理学にとって重要な研究課題の一つである。近年、核子-核子散乱の実験データを高精度で再現するポテンシャル・モデル（現実的核力）がいくつか提案されている。また、原子核内における中間子や核子励起の自由度に伴い、3体力のような複雑な相互作用が存在することが予想され、いくつかのモデルが提案されている。核力を理解する道の一つは、仮定した核力モデルを用いて理論的に計算した原子核の性質を実験と比較することにより、用いたモデルの検証を行っていくことである。少数（2、3、4、…）個の核子からなる原子核（散乱系も含む）については、最近の電子計算機能力の大幅な向上により、それらが従う量子力学の基礎方程式を数値計算により精密に解きあげることが可能となってきた。

このような少数核子系の厳密計算を用いて、核子間相互作用の詳細な理解を得る事を目的として、平成13年度から3年間にわたり科学研究費補助金の援助により

「少数核子系の厳密計算に基づく核子間相互作用の理論的研究」

を遂行し、今年度は最終年度であった。この中では、次のような個別的課題について研究を行った。

1. 核子-重陽子散乱偏極量における3体力効果
2. クーロン力を含む低エネルギー3核子散乱問題の研究
3. 低エネルギー3核子散乱における荷電対称性の破れの研究
4. 4体クーロン問題の定式化
5. ハイペロン-核子散乱における偏極量
6. 陽子-ヘリウム3後方弾性散乱の研究

以下では、これらの研究成果の概略を述べる。

1. 核子-重陽子散乱偏極量における3体力効果

核子-核子散乱データを高精度で再現するいわゆる現実的核力（2体力）を用いて3核子系の計算を行うと、いくつかの観測量に対して、実験データと計算結果との間に系統的な不一致が見られる。この原因の一つとして、原子核内における中間子や核子励起の自由度に伴う3体力の存在が考えられている。3体力を導入した計算を行うことにより、3核子束縛エネルギーや核子-重陽子弾性散乱の微分断面積等については、不一致が解消されることが知られていて、3体力存在の大きな証拠となっている。一方で、同じ3体力の導入が、核子-重陽子弾性散乱のspin偏極観測量に対しては必ずしも良い効果を与えていないことも報告されている。そこで、偏極観測量から3体力のspin依存性に関する情報を得ることを目的として研究を行い、以下のような結果を得た。

(1) 散乱振幅のスピンの構造

散乱観測量は、与えられた相互作用について散乱方程式を解いて求められた散乱振幅から計算される。そこで、核子-重陽子弾性散乱振幅のspin空間での構造を、不変振幅法と呼ばれる処方を用いて調べると、2個のスカラー振幅、4個のベクトル振幅、9個のテンソル振幅、3個の3階テンソル振幅からなることがわかった。これらの散乱振幅のspin成分には、対応する核力のspin依存成分の情報が、すなわちスカラー振幅にはspin非依存力やspin・spin力、ベクトル振幅にはspin・軌道力、テンソル振幅にはテンソル力の情報が含まれていることが期待できる。

(2) 偏極観測量の表式

散乱振幅を用いた偏極観測量の表式は一般に複雑になるが、スカラー振幅が支配的である近似を用いて、見通しの良い偏極観測量の表式を求めた。そして、散乱振幅のspin成分の情報が、より直接的に得られるような偏極観測量の組み合わせをいくつか見いだした。この組み合わせを用いると、結合エネルギーや微分断面積の計算値と実験データとの間の系統的な不一致を解消するために導入された3体力が、正しいspin依存性を持っているかどうかを検証することができるようになる。

(3) スカラー振幅

スカラー振幅は、核子と重陽子の合成spinが1/2である状態（二重状態）に対する振幅と、合成spinが3/2である状態（四重状態）に対する振幅からなる。(2)で得られた結果の一つとして、spin相関係数と呼ばれる偏極観測量 $C_{\alpha,\beta}(\theta)$ ($\alpha, \beta = x, y, z$) と微分断面積 $\sigma(\theta)$ とを用いると、二重状態スカラー振幅の絶対値は

$$\{C_{x,x}(\theta) + C_{y,y}(\theta) + C_{z,z}(\theta) - 1\}\sigma(\theta) \quad (1)$$

から、四重状態スカラー振幅の絶対値は

$$\{C_{x,x}(\theta) + C_{y,y}(\theta) + C_{z,z}(\theta) + 2\}\sigma(\theta) \quad (2)$$

から得られる。

我々は、現実的2体力と3体力を用いた計算により、

- ・スカラー振幅を分離する方法として、式(1)、式(2)は、有効な式であること、
 - ・3核子束縛状態の結合エネルギーを再現するような3体力は、低エネルギー散乱では二重状態スカラー振幅に大きな効果を与えること、
 - ・したがって、式(1)の組み合わせをとることによって、観測量から3体力の寄与が大きい二重状態スカラー振幅の情報を取り出すことが可能となること、
- を明らかにした。

(4) テンソル成分

上で述べた結合エネルギーや微分断面積に対する効果は、計算で用いられた3核子間で2個の π 中間子を交換する過程に起因する3体力(2 π 交換3体力)の中心力成分(spin・スカラー成分)からの寄与である。一方で、 π 中間子交換の大きな特長であるテンソル力については、これまで具体的な検証は行われてこなかった。テンソル力の効果が大きいと考えられる核子-重陽子弾性散乱テンソル分解能の角度分布($T_{20}(\theta)$ 、 $T_{21}(\theta)$ 、 $T_{22}(\theta)$)について、実験データ、現実的2体力による計算、2 π 交換3体力を含んだ計算、を比較すると、3体力の寄与が、 $T_{22}(\theta)$ では実験データを説明する方向に働いているのに対して、 $T_{20}(\theta)$ と $T_{21}(\theta)$ では実験データとの合いを悪くする方向に働いていることがわかった。さらに我々は、2 π 交換3体力のテンソル成分の符号が実験から要請されるものと違っていることがこれらの食い違いを生じる理由であること示した。物理的な原因としては、 π 中間子交換以外の機構による3体力の寄与によりテンソル力の符号が変わっていることが考えられるが、具体的にどの

ような機構が有効であるかについては、新たな課題として研究が進行中である。

2. クーロン力を含む低エネルギー 3 核子散乱問題の研究

原子核では、短距離力である核力と、長距離力であるクーロン力とが相互作用として働いている。量子力学の散乱理論は、通常、短距離力に対して定式化がなされていて、クーロン力が作用する場合には適用できない。これは、一番簡単な 2 体問題でも起きていて、2 体散乱を記述する積分方程式である Lippmann-Schwinger 方程式は、クーロン力が働く場合にはそのまま適用することはできない。しかしながら、陽子-陽子散乱のように、核力とクーロン力とが働く 2 体問題では、純粋 2 体クーロン問題の解析解が知られていることを活用して、短距離力だけが作用する場合とほぼ同様に数値計算を遂行できる事が知られている。

一方、3 体以上の量子系では、純粋クーロン問題の解析解は知られていないので、クーロン力が働く少数核子系の問題を解くことは容易ではない。我々は、「補助ポテンシャルの方法」と呼ばれる方法を用いて、低エネルギー陽子-重陽子散乱の高精度計算コードの開発に成功した。このことにより、低エネルギーでの陽子-重陽子散乱の解析を、クーロン力の取り扱いの曖昧さ無しに行うことが可能になった。

3. 低エネルギー 3 核子散乱における荷電対称性の破れの研究

核力における荷電対称性の破れ (CSB、今の場合、中性子-中性子 (nn) 力と陽子-陽子 (pp) 力の違い) の発生機構が、従来考えられてきたように ρ メソン- ω メソン混合によるものなのか、それとも最近提案されたように核子の質量差と 2 中間子交換によるものなのか、を明らかにすることは、興味深い課題である。しかし、CSB の効果を一番大きく反映する観測量である nn 系と pp 系の 1S_0 -散乱長の差は、どちらの機構を用いても良く再現されるため、これらの区別には使えない。そこで、高部分波成分の寄与、或いは、スピン・軌道力のようなスピン状態に依存する力を調べることによって CSB 力発生機構の検証を行うことが必要となってくる。ここでは、 ρ メソン- ω メソン混合によって生じるスピン・軌道 CSB 力の効果に注目する。

nn 系の散乱実験は現実問題として不可能であることから、スピンに依存する CSB 力を調べる上で観測可能な手段としては、3 核子系散乱、すなわち、中性子-重陽子散乱と陽子-重陽子散乱のベクトル分解能の比較が考えられる。低エネルギー (数 MeV~数十 MeV) での核子-重陽子散乱のベクトル分解能は、同じエネルギーでの核子-核子散乱のベクトル分解能と比べて 10 倍程大きい値となっており、 1S_0 -散乱長のように、核力モデルの小さな差を拡大して我々に示してくれ、荷電対称性のような核力の詳細を調べる上で効果的であると期待できる。我々は、本研究により開発したクーロン力を正しく取り入れた 3 体計算を用いて、陽子-重陽子散乱と中性子-重陽子散乱のベクトル分解能を比較し、電磁気力や ρ メソン- ω メソン混合によるスピンに依存する CSB 力の効果を吟味した。

4. 4 体クーロン問題の定式化

4 体問題を記述する方程式である Yakubovsky 方程式は、本来核力のような短距離力に対して定式化された式であり、クーロン力のような長距離力に対しては、数学的な困難を伴

う。3体系でクーロン力を取り込むことに成功した「補助ポテンシャルの方法」を、4体問題に拡張するための定式化を行い、クーロン力を取り込んだ変形 Yakubovsky 方程式を導出した。

5. ハイペロン-核子散乱における偏極量

核子間相互作用、いわゆる核力の問題、をバリオン間相互作用の一環としてとらえることは、自然のより深い理解に結びつくものと期待できる。我々は、今後、より高精度の実験データが期待されている、ハイペロン-核子（一般にはスピン 1/2 粒子同士の）散乱について、散乱の観測量と、ハイペロン-核子間相互作用、特に、スピン・スピン力、スピン・軌道力等のスピンに依存する相互作用、との関係を追求した。そして、これらのスピン依存相互作用の特徴を反映する偏極観測量の組み合わせを見いだした。具体的な例として、 Σ^+ 粒子と陽子の弾性散乱について、これまでに提案されているいくつかのポテンシャル模型を用いた数値解析を行い、現時点で存在する実験データとの比較を行った。

6. 陽子-ヘリウム3 後方弾性散乱の研究

陽子とヘリウム3原子核の後方弾性散乱は、ヘリウム3原子核の構造を通して核力の様相を調べることができる手段として期待されている。ただし、そのためには、反応過程についての不定性が取り除かれていなければならない。現実的核力モデルから計算したヘリウム3の波動関数をもとに、この反応の反応機構を調べ、これまでに得られている微分断面積の実験データを再現する上で中間子交換過程が重要な寄与を果たすことがわかった。