



Title	New reaction model for revealing deuteron inside nuclei
Author(s)	茶園, 亮樹
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/87811
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (茶園 亮樹)

論文題名

New reaction model for revealing deuteron inside nuclei
(核内重陽子を実証する新しい反応模型)

論文内容の要旨

高いエネルギーをもった陽子による核子ノックアウト反応(p,pN)は、「核内における入射陽子と核子の2体散乱」という直感的な描像がよく成り立つ。この特徴から、(p,pN)反応は原子核の1粒子構造を観るための強力なプローブとなっている。この反応の自然な拡張として、核内核子ではなく核子の塊（クラスター）を叩き出すクラスター・ノックアウト反応が考えられ、やはり原子核のクラスター構造を観るための強力なプローブになると期待できる。典型的なクラスターである α クラスター（ ^4He 原子核）を叩き出す α ノックアウト反応($p,p\alpha$)については、精力的な理論研究がなされ、また、この反応を用いて軽い核から重い核までアルファクラスター構造を実証する実験が実施・計画されている。

重陽子ノックアウト反応(p,pd)の研究も少数ではあるが存在する。40年前に行われた ^{16}O を標的核とする実験では、(p,pd)反応の断面積が($p,2p$)反応の断面積のほぼ半分もあると報告されている。この実験結果をナイーブに捉えると、 ^{16}O の基底状態には、陽子の半数近い重陽子が存在することになり、非常に興味深い。しかし、重陽子は核子当たりの束縛エネルギーが約 1 MeV の弱束縛系であり、この点で(p,pd)反応は($p,2p$)反応や($p,p\alpha$)反応と決定的に異なる。この脆さ故に、重陽子は反応の素過程において陽子によって破碎され得る。また、終状態相互作用（Final-State Interaction: FSI）によって、核外に叩き出された重陽子は束縛状態と分解状態の間を遷移すると考えられる。更に、素過程で破碎された重陽子がFSIにより再び束縛する過程も考えられる。これらの過程は、ノックアウト反応を記述する標準的な反応模型である歪曲波インパルス近似（Distorted Wave Impulse Approximation: DWIA）では考慮されていない。したがって、(p,pd)反応の測定結果が得られたとしても、これをDWIAによって解析しただけでは、核内に重陽子が存在するか否かに結論を下すことができない。

本博士論文の目的は、核内重陽子を解明するために(p,pd)反応を適切に記述する新しい反応模型を構築することである。本研究では、そのために必要な3つの要素(a)核内重陽子の微視的な記述、(b)素過程における重陽子破碎、(c)FSIによる陽子-中性子系の束縛-分解状態間遷移、を重陽子ノックアウト反応の記述に初めて取り入れ、この反応におけるそれぞれの寄与を明らかにした。

要素(a)については、エネルギー密度汎関数法で記述した ^{16}O 内のアイソスカラーな pn 対の波動関数を用い、DWIAで(p,pd)反応の断面積を計算した。反応の断面積は、 pn 対の存在だけでなく、その相関の強さも反映することが明らかになった。一方、計算で得られた断面積は実験データを2桁過小評価していた。その原因は、主に平均場的なアプローチにあると考えられる。

要素(b)に関しては、陽子と重陽子の弾性散乱および分解反応を、重陽子内のそれぞれ核子による入射陽子の1ステップ散乱として、核子-核子間の有効相互作用から記述する枠組みを構築し、その信頼性をテストした。この枠組みは、本論文内で議論する(p,pd)反応の運動学で寄与するエネルギーおよび角度範囲で、弾性散乱の実験データを良く再現することが示された。分解反応については、比較可能なデータが存在しないが、上で述べた描像は重陽子が束縛状態と分解状態のどちらにあるかに関係なく成立すると考えられる。したがって、この枠組みは(p,pd)反応の素過程の記述に安全に採用できると期待される。

要素(c)については、終状態における陽子-中性子系の遷移を連続状態離散化チャネル結合法（Continuum-Discretize d Coupled-Channels method: CDCC）で扱った。素過程で破碎されることなく叩き出された重陽子が分解チャネルを経て弾性チャネルに戻ってくるback-couplingが、この反応の断面積を減少させることが判明した。この過程の影響は低エネルギーで特に大きくなる。また、素過程で破碎された重陽子がFSIにより再び束縛する過程も断面積を減少させることが示された。

以上の結果から、重陽子ノックアウト反応の記述において、各要素を適切に扱う必要があると結論付ける。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (茶 園 亮 樹)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教授 保坂 淳
	副 査	教授 川畑 貴裕
	副 査	教授 青井 考
	副 査	准教授 嶋 達志
	副 査	准教授 緒方 一介

論文審査の結果の要旨

陽子・中性子(総称して核子)からなる原子核は、しばしば、それぞれの核子が一体ポテンシャル中を独立に運動しているという描像で捉えられる。しかし、この独立粒子描像が成立する度合いは約 65% に留まることが、安定核に対する多くの先行研究で知られている。そして残りの 35% は、独立粒子描像が依拠する一体ポテンシャルとしては表現できない核子同士の関係、すなわち核子相関の表れであると解釈されている。核子相関には様々な種類があるが、本論文で茶園氏は、核内で陽子と中性子がスピン 1, アイソスピン 0 を組み、あたかも重陽子のように振る舞う、重陽子クラスター相関に着目した。

2 つの陽子と 2 つの中性子が原子核中で α 粒子(^4He 原子核)を形成する α クラスターは古くから知られ、数多くの先行研究がある。これに対して重陽子クラスターは、その弱束縛性と、約 4 fm にも及ぶ空間的な広がりから、核内における個性を保った“塊”とみなしてよいかどうかさえ確立していない。

一方、実験研究に目を向けると、数 100 MeV 程度のエネルギーをもった粒子(特に陽子)を原子核に撃ち込み、その中から種々のクラスターを叩き出す反応、いわゆるクラスターノックアウト反応が、原子核内に存在するクラスターを直接“観る”手段として近年注目されている。少数ながら、原子核から飛び出てきた重陽子を測定した例も存在し、原子核から陽子を叩き出す反応と同じオーダーの断面積が得られている。これを素朴に解釈すれば、当該データは、核内重陽子クラスターの存在を強く示唆していると考えられる。

本論文の主題は、重陽子のような弱束縛系に関して、クラスターノックアウト反応の断面積がもつ意味(端的には核内重陽子の数)を明らかにすることである。特に、入射した陽子によって原子核内の重陽子が破碎され、陽子と中性子が原子核から飛び出し、その後、陽子・中性子が残留核と相互作用することで重陽子が形成・測定される可能性に着目し、その影響を初めて定量的に評価した。この目的のために茶園氏が新規に開発したものが、論文の表題にもなっている「核内重陽子を実証する新しい反応模型」である。その実体は、入射陽子が原子核の一部(今の場合は重陽子)とのみ衝突してこれを叩き出すという、いわゆるインパルス近似と、重陽子と原子核の散乱問題を、陽子・中性子・原子核という 3 体系の散乱として扱う、連続状態離散化チャネル結合法を融合させた反応模型である。

茶園氏はこの新しい反応模型を、250 MeV の陽子を ^{16}O に入射して陽子と重陽子を測定する反応に適用し、一旦重陽子の破碎を経由する過程を取り入れると、この反応の断面積が約 20% 減少することを明らかにした。断面積が減少するのは、今回新たに考慮した過程と、旧来のノックアウト反応計算に取り入れられていた過程とで、遷移振幅が逆位相になっているためである。この振る舞い(位相の関係)が反応系によってどう変化するかについては、今後の系統的研究が待たれるところである。

茶園氏の研究は、原子核を陽子で叩き、最終的に重陽子を測定する実験の結果に対して、重陽子の弱束縛性に起因する反応経路を十全に考慮することで、その正確な解釈を与える道筋を付けるものであり、実験データを核内重陽子の数に正しく換算するための重要な一歩が刻まれたといえる。

以上より、本論文は博士(理学)の学位論文として十分に価値のあるものと認める。