

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540306

研究課題名(和文)炭素不安定核ビームと陽子の散乱による核内陽子・中性子密度分布の分離測定

研究課題名(英文) Proton elastic scattering with unstable carbon beam and extraction of proton and neutron density distributions

研究代表者

坂口 治隆 (Sakaguchi, Harutaka)

大阪大学・核物理研究センター・協同研究員

研究者番号：30025465

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：不安定核の密度分布を系統的に測定する為に理化学研究所仁科センターに陽子弾性散乱の測定コースを建設し、測定装置を移設した。移設後最初の実験として ^{16}C 不安定核の陽子弾性散乱を300MeV/Aで測定に成功した。一方安定核に関しては ^{12}C 、 ^{13}C の陽子弾性散乱実験に成功し、現在長寿命不安定核 ^{14}C 標的で安全に実験すべく放射線安全対策を行っている。不安定核で陽子、中性子分布を独立に抽出するには、まず安定核で抽出の方法を確立する必要があり、そのために90,92,94Zrで陽子弾性散乱を300MeV,200MeVで測定し、現在データ整理、解析中である。

研究成果の概要(英文)：In order to measure density distributions of unstable nuclei, we have constructed a new beam line at RIKEN Nishina center and installed our recoil proton spectrometer called ESPRI. As the 1st experiment we have succeeded to measure proton elastic scattering using the unstable ^{16}C nuclear beam and the solid hydrogen target. For ^{12}C , ^{13}C we have measured elastic scattering of polarized protons at RCNP. For ^{14}C we are now preparing radiation safety arrangements to avoid accidents. We have also successfully measured elastic scattering of protons from 90,92,94Zr at 200 MeV and 300 MeV to confirm to deduce proton and neutron density distributions independently and the data reduction and the analysis are in progress.

研究分野：原子核物理学実験

キーワード：陽子弾性散乱 不安定核 陽子分布 中性子分布 中間エネルギー陽子弾性散乱

1. 研究開始当初の背景

核子あたりのエネルギーが 200MeV～300MeV の中間エネルギー陽子弾性散乱はインパルス近似でかなりよく記述できることが知られている。我々はインパルス近似で使用している核力に現象論的な核内媒質効果を導入して理論的にも陽子・中性子分布の形が等しいと思われる ^{58}Ni 原子核で陽子散乱を精密に説明できるように改良した。これにより陽子散乱から核子密度分布を抽出する道筋が開けた。

安定核では電子散乱の実験結果が入手可能で電荷分布から陽子の密度分布が抽出できるので、電子散乱の結果を併用することにより陽子散乱からは中性子の密度分布が抽出でき、錫アイソトープや鉛アイソトープなどで陽子散乱から中性子密度分布を精密に抽出することに成功してきた。

不安定核の場合はパラ水素による薄い固体水素標的を開発して、 $^{9,10,11}\text{C}$, $^{66,68,70}\text{Ni}$ での陽子弾性散乱の測定を行ってきたが、不安定核での電子散乱が未だ実現していないので、陽子散乱からは核子密度分布を抽出するに留まっている。

不安定核の場合は陽子と中性子の数が極端にアンバランスな原子核も存在し、陽子中性子の分布、半径を別々に測定することは不安定核物理の最大の関心事でこれまでいろいろな試みがなされてきているが、分布まで測定した例は未だない。

2. 研究の目的

本研究はこれまで我々が推進してきた阪大核物理研究センターでの中間エネルギー偏極陽子弾性散乱、放医研や GSI での不安定核ビームによる陽子弾性散乱の研究をさらに発展させて、中間エネルギー陽子弾性散乱をエネルギーの大幅に異なる 2 点(例えば核子あたり 200MeV と 300MeV) で精密に測定することにより、中性子密度分布だけでなく陽子密度分布まで抽出しようとするものである。

核子あたりのエネルギー 200~300MeV 領域は核力が引力から斥力に変化する微妙な領域で、陽子が核内で感じる平均場もワインボトルの底の形から斥力型に変化していくし、核力の引力と斥力が大部分打ち消し合っているので核内クーロンポテンシャルも核力と同程度になっている。この平均場のエネルギー変化を逆手にとって陽子と中性子の密度分布を分離して求めようとするのが本研究である。

この方法を確立させるにはまず電子散乱実験より電荷分布がすでに測定され、それより陽子分布がすでに抽出されている典型的な安定原子核 Zr アイソトープで陽子弾性散乱を行う。そして陽子散乱だけから陽子分布と中性子分布を抽出して、電子散乱から得られたものと比較して、食い違わないことを示さなければならない。

その後、この方法を応用して不安定核で陽子分布と中性子分布の抽出に進む。陽子および中性子密度分布抽出は、安定核では陽子散乱と電子散乱を併用することで可能になりつつあるものの、不安定核では電子だけの標的が実現できず、電子散乱が未だ実用化されていないために、これまで不可能であった。

本研究ではこの状況を打破し、陽子散乱だけから初めて不安定核の陽子分布と中性子分布を独立に抽出し、不安定核物理を飛躍的に発展させる道筋を開拓することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 陽子弾性散乱で原子核の陽子・中性子分布を抽出するには散乱を正確に説明する核内での核子核子有効相互作用を知る必要がある。陽子数と中性子数の等しい原子核の基底状態では陽子・中性子分布が理論的にもかなり良い近似で等しいとされているので、 ^{12}C , ^{16}O , ^{40}Ca , ^{58}Ni など基準となる核で陽子散乱を測定し、電子散乱から抽出される陽子中性子分布を用いて核内有効相互作用を較正する。 ^{40}Ca より軽い原子核では核の個性が強く核媒質効果が質量数により変化する可能性があるため細かく較正する必要がある。

(2) $^{90,92,94}\text{Zr}$ の陽子弾性散乱を 200MeV と 300MeV で測定し、較正された相互作用を用いて相対論的インパルス近似を用いて測定結果より陽子・中性子密度分布を抽出し、電子散乱で得られた結果の陽子分布が再現できることを確認する。

(3) 理研で不安定核陽子弾性散乱測定を系統的に行うために、ビームコースを新設し、反跳陽子スペクトロメーター (Elastic Scattering of Protons with RI beam, 略して ESPRI) を移設する。そして不安定核陽子弾性散乱を定常的に系統的に測定出来る体制を整える。

(4) 炭素アイソトープの中性子密度分布は質量数の変化に伴い大きく変化することがクラスターモデル等の理論計算で予想されている。実験で系統的に炭素アイソトープの密度分布を調べる手始めとして不安定核である ^{16}C の測定を理研で実施し陽子中性子分布を抽出する。

(5) ^{12}C , ^{13}C については安定核なので中性子分布を測定するために阪大核物理研究センターで弾性散乱測定をする。

(6) ^{14}C は不安定核ではあるが、長寿命なので固体標的を作成し阪大で偏極陽子ビームを用いて精密測定をする。しかしこの放射性物質を固体標的にするほど集めると 1 ギガバケレル程度になり、標的の製作過程のみならず使用の際にもしっかりと安全対策、万

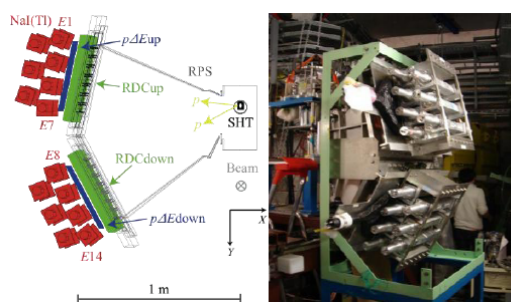
一の事故対策が必要になるので、十分な準備が欠かせない。

4. 研究成果

(1) ^{12}C , ^{16}O , ^{40}Ca , ^{58}Ni など基準核での測定を 300MeV で行い有効相互作用を求めた。その結果 ^{40}Ca より質量数の軽い核では軽くなるにつれて媒質効果が系統的に変化している事実を発見し、松田が物理学会で報告した(学会発表(4))。媒質効果と3体力効果の関連性を示唆するものとして関心を集めている。200MeVでの測定は ^{58}Ni のみしか実施していないが、Zr アイソトープの解析には ^{58}Ni で決めた媒質効果を使用するので問題ない。軽い不安定核用には順次 ^{12}C , ^{16}O の $E/A=200\text{MeV}$ データ収集も追加していく予定である。

(2) $^{90,92,94}\text{Zr}$ の偏極陽子弾性散乱測定を RCNP で $E_p=200\text{MeV}$ と 300MeV で実施した。現在データ整理、解析を急いでいる。今回の実験用に準備したビーム入射角度モニターのデータをデータ整理にどう取り込むかが課題である。

(3) 理研で不安定核陽子弾性散乱を測定するためのビームコースを迂回曲折のあげく理研 RIBF の BIG RIPS 収束地点 F12 に新設し、反跳陽子スペクトロメーターを移設することができた。しかし、その下流に位置する SAMURAI Spectrometer で実験をする際にはビームコースを空けなければならないので移動用精密レール架台を準備中である。下図に移設した反跳陽子スペクトロメーターの主要部分の概念図と写真を示す。



概念図の右端に SHT と印された大口径で厚さ 1mm の固体水素標的が設置されている。この標的を使用することでバックグラウンドの非常に少ない測定データおよび高収率を得ることに成功した。現在この大きさ(32mm 直径)で薄い(1mm)の固体水素標的をパラ水素を用いることにより実用化できたのは世界的に見て我々のグループだけであるので、この SHT には多くの実験グループから引き合いが殺到している。SHT から約 1m 離れたところに MWD C を設置して散乱角度測定を行い、その下流で NaI (Tl) のカロリメーターでエネルギー測定を行っている。反跳した陽子

角度分布を角度高分解能で測定できることがこの装置の特徴である。反跳陽子測定の場合の原子核の励起エネルギー測定のエネルギ分解能は主に角度分解能で決まる。我々の場合は FWHM で 700keV を実現している。

(4) 移設した反跳陽子スペクトロメーターを使用して理研のビームを使用して不安定核 ^{16}C の陽子弾性散乱測定に $E/A=300\text{MeV}$ で成功した。実験結果は現在解析中である。残念なことに陽子中性子分布を独立に求めるために必要な 200MeV の測定実験は理研側の都合で延期になった。この実験でこれまで ESPRI 用に使用してきたビームライン位置モニター用ドリフトチェンバーでは理研の高強度不安定核ビームには対応しにくいことが判明したので実験後、低ガス圧で高速のビームラインドリフトチェンバーを新たに製作した。その性能測定を行った結果を物理学会で発表した(学会発表(1))。これにより性能が 5 倍になった。炭素のアイソトープの陽子、中性子密度分布を求める第一弾として ^9C の陽子弾性散乱の結果を公表した(雑誌論文(5))。残念なことに ^9C の公表結果はまだ $E/A=200\text{MeV}$ のデータがないので不定性の大きいものになっている。 ^{10}C , ^{11}C の測定データも公表すべく努力中である。

(5) ^{12}C , ^{13}C の測定は $E_p=300\text{MeV}$ では修了し、電子散乱の結果と合わせて中性子分布を抽出できる状態である。 $E_p=200\text{MeV}$ での測定は Zr での結果待ちの状態である。Zr の解析で陽子分布がうまく抽出できる見込みが示されれば、200MeV の実験も実施される見込みである。

(6) ^{14}C の固体標的作成は作成の収率を上げるために油圧プレスで粉末炭素の $10\text{mg}/\text{cm}^2$ の厚さのディスク製作に成功した。現在標的周りの放射線安全装置を準備中である。グラウンド雷電スペクトロメーターに関しては焦点面の真空遮断膜が万一破れた場合を想定して真空劣化を高速で検知して 20 ミリ秒でグラウンド雷電スペクトロメーター入りロバルブが閉まり、ターゲットを保護する「高速バルブ開閉システム」を設置した。20 ミリ秒という数値は膜からバルブまでの距離が 20m 以上あるので、たとえ常温の分子運動の速度で衝撃が伝搬しても、ターゲットに到達する前にバルブが閉まることになる。小規模の膜破断テストではうまく動作することが確認された。

科研費全体としては思わぬ障害がいろいろあった為に、我々の想定よりは多少遅れ気味ではあるが、順調にすすんでいる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

(1) A.M.Krumbhltz, P.von Neumann, A.Tamii, H.Sakaguchi et al.,

Low energy electric dipole resonance in ^{120}Sn ,
Phys. Lett. B744(2015)7-12、査読有
DOI:10.1016/j.physletb.2015.03.023

(2) Wei-wei Qu, Gao-Long Zhang, I.Tanihata, H.Sakaguchi et al.,

Simulation of beam optics for $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$
scattering of RCNP by using Monte Carlo
method、

Chinese Phys. C 38(2014)116202(1-5) 査読有
DOI:10.1088/1674-1137/38/11/116202

(3) Y Maeda, A.Tamii, H.Sakaguchi et al.,
Measurement of the $2\text{H}(p,n)$ breakup reaction at
170 MeV and the Three-Nucleon Force Effects、
Few Body System 55(2014)729-732、査読有
DOI:10.1007/s00601-014-0868-5

(4) M.Itoh, S.Kishi, H.Sakaguchi 他 15 名 ;
Isoscalar giant resonance strength in ^{32}S and
possible excitation of super deformed and $^{28}\text{Si}+\alpha$
cluster band heads、

Phys. Rev. C 88(2013)064313—1-6、査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.88.064313

(5) Y.Matsuda, H.Sakaguchi, H. Takeda,
S.Terashima, J.Zenihito 他 12 名 ;

Elastic scattering of protons from ^{9}C with
a 290 MeV/nucleon ^{9}C beam;

Phys. Rev. C 87(2013)034614、査読有、
DOI: 10.1103/PhysRevC.87.034614

〔学会発表〕(計 6 件)

(1) 松田洋平、銭廣十三、Wen Chan, 坂口治隆
隆、田中純貴、津村美穂、中塚徳継、
高強度不安定核ビーム用 MWDC の開発、
日本物理学会(早稲田大学、2015.3.22)

(2) 馬場辰雄、松田洋平、銭廣十三、坂口治隆
隆 他 6 名、
 ^{16}C を用いた陽子弾性散乱実験、
日本物理学会(高知大学、2013.9.20)

(3) 三木謙二郎、民井淳、坂口治隆 他 30 名、
運動量移行 $200\text{-}300\text{MeV}/c$ 領域における
(p,dp)反応を用いた ^4He 核内テンソル相関の
検証、
日本物理学会(東海大学、2014.2.28)

(4) 松田洋平、坂口治隆、銭廣十三、松原礼明
他 16 名、

$N=Z$ 核における陽子弾性散乱の光学ポテンシ
ャルと媒質効果、
日本物理学会(広島大学、2013.3.26-29)

(5) 坂口聡志、上坂友洋、前田幸重、坂口治

隆 他 17 名、
 $N=Z$ 核に於ける錫同位体からの (p, n) IAS 反応、
日本物理学会(広島大学、2013.3.26-29)

(6) 三木謙二郎、民井淳、青井考、坂口治隆
他 14 名、

$^4\text{He}(p, dn)$ 測定を通じた原子核内テンソル相
関の研究、
日本物理学会(広島大学、2013.3.26-29)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂口 治隆 (SAKAGUCHI, Harutaka)

大阪大学・核物理研究センター・協同研究
員

研究者番号 : 30025465

(2) 研究分担者

なし

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

松田 洋平 (MATSUDA, Youhei)

甲南大学・理工学部・研究員

研究者番号 : 50569043

銭廣 十三 (ZENIHIRO, Juzo)

理化学研究所・仁科センター・研究員

研究者番号 : 70529057