

# RCNP Workshop on the Importance of Tensor Interactions in Nuclear and Hadron Structures

= 原子核およびハドロンの構造とテンソル力の重要性 =

## 報告書

RCNP Workshop on the importance of Tensor Interactions in Nuclear and Hadron Structure has been held in RCNP on July 11-12, 2013 and 82 scientists attended the workshop. This workshop was supported by RCNP and also by a Grants-in-Aid for Scientific Research “Effects of tensor forces in nuclear structure and search for hidden interactions in nuclei”.

The tensor interactions are the main part of the pion exchange interactions that is the most important part of the nuclear forces. However it is extremely difficult to be treated in mean field models and thus no theoretical models of nuclei includes the tensor forces explicitly, except for extremely light nuclei. In the last decades, changes of magic numbers and single-particle orbitals as well as a strong mixing of s- and p-waves in the halo of  $^{11}\text{Li}$  present the importance of tensor interactions in nuclear structure. Recent experimental and theoretical studies in wide ranges of proton and neutron ratios open a new view to the nuclear structure and show the necessity of tensor forces.

The tensor forces are considered to be important not only in nuclear structure but also in hadron structure.

In addition, the tensor interactions are known to provide a strong binding energy in  $^4\text{He}$  nucleus and thus they provide a driving force to form clusters in nuclei. Studies of new cluster forms in excited states are a strongly related subject.

Under such a situation, we have discussed some of the past and recent studies of tensor interactions and cluster formations aiming to see the related future perspective.

Many epoch making talks were presented at the workshop in experimental and theoretical developments of hadrons and nuclei related to tensor interactions as well as the new forms of alpha-clusters in nuclei. 31 talks have been presented in the workshop.

The organizers of the workshop are listed below.

核物理研究センター・ワークショップ「原子核およびハドロンの構造とテンソル力の重要性」を、2013年7月11-12日に核物理研究センターで開催致しました。このワークショップは核物理研究センターの研究会として援助を受けさらに科学研究費Sの「核構造におけるテンソル力の効果と隠された相互作用の研究」の一環として開催され、国内外から82名の参加者がありました。

核力におけるテンソル力は中心力と並んでパイオンの交換力の主要部分を担うものです。しかしながら、テンソル力は平均場近似にはなじまないため、陽にその影響を含めた核構造論は確立していません。不安定核の核構造研究が進みにつれ、魔法数の変化、単粒子軌道の変化や、 $^{11}\text{Li}$ 核におけるs-波とp-波の混合など、テンソル力が深く関与した現象が確認されています。最近になって、安定線から離れた核の構造変化や核内核子の高運動量成分などの研

究がはじまり、核構造をテンソル力を含めた新しい視点から探ろうという動きが始まっています。

また、核子多体系の原子核だけではなく、核子自身やハドロン構造の中でもテンソル力は重要な働きをしていると考えられています。

加えて、テンソル力は $^4\text{He}$ 核の結合エネルギーに最も強く関与しており、核の中にクラスター構造を促す働きがあります。不安定核の励起状態ではクラスター構造の発達が見られる場合があります、核構造の新しい一面として、研究が始まっています。

このような状況をもとに、これまでの研究を振り返りながら、今後テンソル力の核構造での重要性をどのような視点で進めていくのかという議論を行いました。

エポックメイキングなデータや理論がいくつも発表され活発な議論が行われました。このワークショップでは31の講演がなされました。

研究会の世話人は以下の通りです。

The organizer of the Workshop are, 研究会の世話人は以下の通りです、

青井 考	Aoi, N. (RCNP, Osaka University)
大塚孝治	Otsuka, T. (Department of Physics, University of Tokyo)
王 恵仁	Ong, H.J. (RCNP, Osaka University)
須田利美	Suda, T. (Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University)
谷畑勇夫	Tanihata, I. (RCNP, Osaka University)
民井 淳	Tamii, A. (RCNP, Osaka University)
東崎昭弘	Tohsaki, A. (RCNP, Osaka University)
土岐 博	Toki, H. (RCNP, Osaka University)
保坂 淳	Hosaka, A. (RCNP, Osaka University)
堀内 昶	Horiuchi, H. (RCNP, Osaka University)
明 孝之	Myo, T. (Osaka Institute of Technology)
张 高龙	Zhang, G. L. (Beihang University)

## ハイライト

この研究会では重要な示唆を含んだ最新のデータがいくつも発表されました。そのうちのいくつかについて簡単に紹介します。まずその一群は核内において大きな束縛エネルギーを生み出すテンソル力による効果に関するものであり、一つはスピン相関に関するもの、もう一つは高運動量成分に関するものです。テンソル力はスピンの方向がそろった陽子と中性子のペアに強く働きます。そのため核内では近くにいる陽子と中性子のスピンの方向がそろう可能性があり、また逆にテンソル力の影響はスピンがそろっている陽子と中性子のペアを見ることにより選択的に観測することができます。また、テンソル力の新しい影響は、核内核子の高運動量成分の増加に見られます。核内でのテンソル力はパイオンの交換により作られますがその最も大きな影響はパイオンの交換によって起こると考えられます。この交換力は高い運動量移行がともなうために、波動関数に大きな運動量成分を生み出すこととなります。パイオン交換力なのにテンソル力は高い運動成分を巻き込むので、非常に短距離で力が働くこととなります。

核内のスピンに関連した新しい実験データが2つ発表されました。一つは民井による $N=Z$ 核の基底状態におけるペアのスピンの偏りの検出(Spin-M1 sum-rule and tensor correlation in the ground states of  $N=Z$  nuclei)であり、もう一つが若狭によるSpin-flip Dipole (SD) 巨大共鳴エネルギーの変化です。民井は偶数の $N=Z$ 核のM1遷移強度を高い励起エネルギーまで測定し、それを用いて基底状態における $\langle S_p \cdot S_n \rangle$  (陽子スピンと中性子スピンの内積の期待値)を決定し、この値が有意に正の値を持っていることを示しました。これは核内で陽子と中性子のスピンの方向がそろっていると言うことを示しています。核全体はスピンが0であり、通常は $\langle S_p \rangle = 0$ ,  $\langle S_n \rangle = 0$ に結合しており、 $\langle S_p \cdot S_n \rangle$ も0と期待されますがこの値が正の値を持つと言うことは陽子と中性子のスピンの方向がある程度そろっていると言うことを示しており、テンソルによる相関と矛盾しないことを示すデータとなっています。一方、若狭は高分解能の(p,n)散乱の測定から、Spin-Dipole共鳴強度の励起エネルギー依存性を決定し、その強度分布が0, 1の期待されるものより低いエネルギーにずれることを示しました。このずれはテンソル力のうちでもTriplet-Evenの項が強く効いているということを示しています。

高運動量成分を明らかにしたのがオンの発表(Tensor Forces and High Momentum Nucleons)です。さらに、高運動量の成分とスピンの相関を関連させて観測しようとする最近の試みが三木(Study of the tensor correlation in  ${}^4\text{He}$  via the  ${}^4\text{He}(p, dp)$  reaction)により発表されました。オンの実験は100MeVから400MeVと高いエネルギーでの(d, p)を行い、 ${}^{16}\text{O}$ 内でテンソル相関が関連すると考えられる混合状態での高運動量の成分が桁違いに増加していることを示しました。一方、三木はテンソル力の影響が強いと信じられている ${}^4\text{He}$ 核の中で、高運動量を持った中性子を取り出し、相関していた陽子のスピンの方向がその中性子のスピンと同じ方向であったことを示そうというもので、低い運動量を持った中性子の場合と高い運動量を持った中性子の場合で、スピンのそろい方に変化が見えるだろうという予想の元に実験が行われています。予備的な結果では興味ある振る舞いを示しており、今後の発展が期待されます。

${}^4\text{He}$ 核ではテンソル力が本質的な働きをしており大きな束縛エネルギーを作り出します。それらが集まって出来る原子核のクラスター状態の研究では、最近新しい視点からの研究が始ま

りました。その中でも興味を抱かせるものは、核の励起状態にあると理論的に予言されるようになった、アルファ粒子のガス状態（アルファ凝縮状態）です。伊藤による系統的なデータが紹介されました。さらには秋宗により最近の $^{36}\text{Ar}$ の分解の実験(Search for  $\alpha$ -cluster gas by inverse kinematics reactions) のデータでは、一つの事象で7個ものアルファが狭い空間に放出されることが観測されたことが紹介されました。このような現象は予測される状態に関連している可能性が大きいため、大きな注目を集めました。

これらの際だった実験についての報告のほかにも、核構造の中での粒子軌道の変化や、スピン・軌道結合の変化などの発表がおこなわれました。理研の加速器では多くのアイソトープを系統的に実験することが可能になり、特に青井により $2+$ のエネルギー状態の変化からクリアーにマジック数の消失と生成が測定出来ることが紹介されました。核物理研究センターや理研の特色を生かした研究が新しい研究分野をリードしているということが良く伝わりました。

理論の方からはテンソル力に関する多くの研究成果が報告されました。テンソル力が原子核の束縛状態を作るのに重要な働きをしていることは、重水素やアルファ核の構造計算から良く理解されています。さらには核物質での原子核の飽和性の物理にはテンソル力が重要な働きをしており、原子核の束縛エネルギーの大半がテンソル力から生じていることが分かっていると言えます。そのテンソル効果が原子核において重要な働きをしていることを本格的に示したのがアルゴンヌグループのpシェル核の計算結果です。シェル構造やアルファ構造を形成するのにテンソル力がどのような働きをしているのかを定量的に計算する研究が始まり、かなりの成果がこの研究会で報告されました。

大きな束縛効果を生み出すテンソル力はフェルミ面までの低い運動量状態から高い運動量状態に変化する際に大きな引力が働きます。それを効果的に取り込む方法として開発されたテンソル最適化シェルモデルが明により報告されました。今のところはHe, Li, Be核の計算結果を得ているが、今後はより大きな原子核に適用されます。 $^4\text{He}$ の核力による少数多体計算法による計算が精力的に行われており、基底状態だけではなく、E1励起やスピン励起のスペクトルの計算結果が堀内により報告されました。テンソル力の重要性が多数の物理量に表れていることが示されています。テンソル力の高運動量成分を取り込む計算は強テンソル相関ハートレーフォック(HF)法で計算出来ることや、さらには3体力をデルタの効果を含め取り込むことで計算している結果が報告されました。デルタの効果は本質的に重要であるという印象を与えました。このような計算は原子核構造の研究で非常に大事です。加藤は原子核の構造変化に応じてテンソル力が作り出す中心力がどのように変化するのかを核構造の変化に応じたG行列計算をすることで示しました。このような計算が今後もなされることの重要性が主張されました。

テンソル力は低い運動量部分では小さい行列要素だが、殻構造に効果的に効く物理は原子核でNとZの数が増えたり減ったりするときに顕著に表れます。大塚はテンソル力のフォック項がスピン軌道状態に特徴的に働くことを発見し、不安定核のマジック数や変形の出現に大きな影響を持っていることが報告されました。さらに鈴木や宇都野により、多くのより重い原子核でのラージスケールシェルモデル計算による、この低運動量部でのテンソル力の効果の結果が系統的に報告されました。

Belleでは多くのチャームとボトムクォークに軽いudクォークが絡んだメソンが発見されています。飯嶋による系統的な実験データの紹介を受けて、安井、山口、大古田によりこれらのハドロンの構造にパイオンが中心的な働きをすることが指摘され、テンソル力を正確に取り扱った計算の結果が紹介されました。原子核の物理と同じようにこれらのハドロンでもテンソル力の重要な効果が指摘されました。肥山は $\Lambda$ と $\Sigma$ がテンソル力をとおして結合することにより、軽い $\Lambda$ ハイパー核の構造に大きな影響を与えていることを報告しました。さらに有意の大きさの3体の効果を持っていることが紹介されました。

テンソル力はアルファ構造とシェル構造の競合に重要な働きをすることが知られています。実験的にはアルファ凝縮状態が発見されており、理論的な研究により、どこにアルファ凝縮状態が出現するかの詳細な計算が報告されました。スピンドイポール状態についても佐川によるテンソル相関を取り込んだRPA計算の成果が報告されており、今後の発展が期待されます。原子核のような量子多体系では反対称化を正確に扱うことが重要です。AMD法にテンソルやスピン軌道力の効果を取り込む方法の開発は非常に重要であることが共通認識です。その方向での議論が板垣によりなされました。

テンソル力を切り口にして今の段階で、実験理論の活動が一挙に報告され、議論されたことは、今後の原子核物理の研究の方向をはっきりと見定めることができた非常に有意義な研究会であったことを示しています。これらの研究は日本の研究者が強力に推進しているものであり、今後の研究の発展の原動力になることが期待されています。

研究会のプログラムは以下のようでした。

RCNP Workshop on the Importance of Tensor Interactions in Nuclei and Hadreon structure @lecture room on 4th floor of RCNP

7月11日		[Tokij]:Chair	
10:00	谷畑勇夫	Tanihata	Introduction to the meeting
10:15	明孝之	Myo	テンソル最適化殻模型による軽い核でのテンソル力の働き (Importance of the tensor forces in light nuclei studied with TOSM)
10:45	民井淳	Tamii	Spin-M1 sum-rule and tensor correlation in the ground states of N=Z nuclei.
11:15	堀内渉	Horiuchi	Tensor correlations in 4He studied with spin-dipole responses
11:45	三木謙二郎	Miki	Study of the tensor correlations in 4He via the 4He(p,d) reaction
12:15	若狭智嗣	Wakasa	Spin-parity separation and tensor correlation effects in spin-dipole resonances
	lunch	[Horiuchi]:chair	
13:30	大塚孝治	Otsuka	Tensor force and shell structure -A person history -
14:00	加藤幾芳	Kato	Perspective of Bruekner-AMD
14:30	小川洋子	Ogawa	Strongly tensor correlated Hatree-Fock theory and importance of pions in nuclei
15:00	堀井香織	Horii	デルタの自由度を含む3Hでのテンソル力の効果と3体力 Effect of tensor force in triton including the delta degrees of freedom and its relation of three-body force
15:30	王恵仁	Ong	Tensor forces and High momentum nucleons
	coffee	[Hosaka]:chair	
16:30	伊藤正俊	Itoh	Study of $\alpha$ -cluster gas states in $^{12}\text{C}$ , $^{16}\text{O}$
17:00	飯嶋徹	Iijima	Studies on heavy hadrons at Belle
17:30	安井繁宏	Yasui	Tensor force in exotic hadron-nuclear systems with charm and bottom flavor
18:00	山口康宏	Yamaguchi	重いクォークを含むエキゾチックダイバリオンの解析 (Exotic dibaryons with a heavy antiquark)
18:30	川畑貴裕	Kawabata	Systematic measurement of monopole transition strengths at low excitation energies using $\alpha$ -inelastic scattering
19:00	Reception		

7月12日		[Tamii]:Chair	
9:30	肥山詠美子	Hiyama	$\Lambda\text{N}-\Sigma\text{N}$ coupling in A=4 $\Lambda$ hypernuclei)
10:00	鈴木俊夫	Suzuki	Roles of three-nucleon and tensor forces in nuclear structure
10:30	宇都野穰	Utsuno	Tensor-force driven shell evolution with large-scle shel-model calculations
11:00	佐川弘幸	Sagawa	Tesno interactions and deformations of Ne and Si isotopes and corresponding Ne hypernuclei
11:30	青井孝	Aoi	Study of shell evolution via in-beam gamma-ray spectroscopy -Shell evolution and Tensor interaction-
12:00	今井伸明	Imai	Spectroscopic factors of low-lying bound states in $^{31}\text{Mg}$
	lunch	[Tohsaki]:chair	
13:30	熊野俊三	Kumano	Hadronic molecule in the heavy quark region
14:00	大古田俊介	Ohkoda	テンソル力によって形成される重いメソン分子状態 (Molecular state of heavy meson formed by tensor interactions)
14:30	船木靖郎	Funaki	Alpha cluster states in nuclei
15:00	秋宗秀俊	Akimune	Search for $\alpha$ -cluster gas by inverse kinematics reactions
	coffee	[Tanihata]:chair	
16:00	张高龙	G.L Zhang	Sudy of the effect of three body force from 100A MeV $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ elastic scattering
16:30	藤田佳孝	Fujita	Collective Excitations studied by Gamow-Teller Transitions
17:00	尾立晋祥	Oryu	On the NN-potential property in one meson transfer region by NN $\pi$ and NN $\sigma$ three-body Faddeev equations
17:30	板垣直之	Itagaki	Cluster-shell competition and role of non-central interactions
18:00	上坂友洋	Uesaka	Spin-orbit splitting and tensor force