

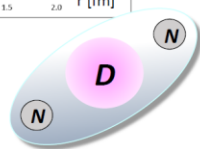
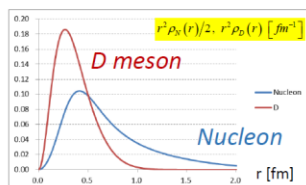
Λ_c hypernucleus は面白いのか？

K E K理論センター 土手昭伸

ここ数年、ハドロン物理業界では重いクォーク、特にチャームクォークの物理が盛り上がりを見せてつつある。チャームクォークを含むシングルハドロン (charmed meson, charmed baryon) の性質の理解が第一歩であり、そのような研究が理論・実験で展開されつつある。ここでは少し先走った感もあるが、チャームバリオンを含んだ多体系、具体的にはチャームバリオンの基底状態 Λ_c を一つ含んだ原子核 (Λ_c hypernucleus、 Λ_c ハイパー核) において、構造の観点から面白いことがあると思うか、簡単な考察してみたい。

Λ_c ハイパー核においては、言うまでもなくこれまでの NN・YN 相互作用とは違った相互作用が Λ_c と核子の間に働く。これにより面白い現象が生じることが考えられる。このことに加え、 **Λ_c が重い粒子である**という点も特徴的である。これまでのハイパー核で扱ってきたハイペロン Λ の質量は 1116 MeV であるのに対し、 Λ_c は 2246 MeV であり、核子 (939 MeV) の二倍以上の質量である。個人的には重い不純物である Λ_c が原子核に加わることで、原子核の構造、運動様式 (励起スペクトル) に何らかの影響を与えるのではないかと期待する。

構造 (one-body density)



先に行った D 中間子原子核の理論的研究[1]において、チャームクォークを持つ重い D 中間子による特徴的な性質を確認したので、参考として述べておく。D 中間子原子核とは、D 中間子 (= $c\bar{q}$) が束縛した原子核のことである。D 中間子は 1867 MeV とほぼ核子の 2 倍の質量を持つ。この D 中間子と二つの核子からなる DNN を調べた。DN 間相互作用に関しては賛否両論議論のあるところであるが、ここではこの点については触れない。変分計算の結果、DNN の構造は、系の中心付近に D 中間子が

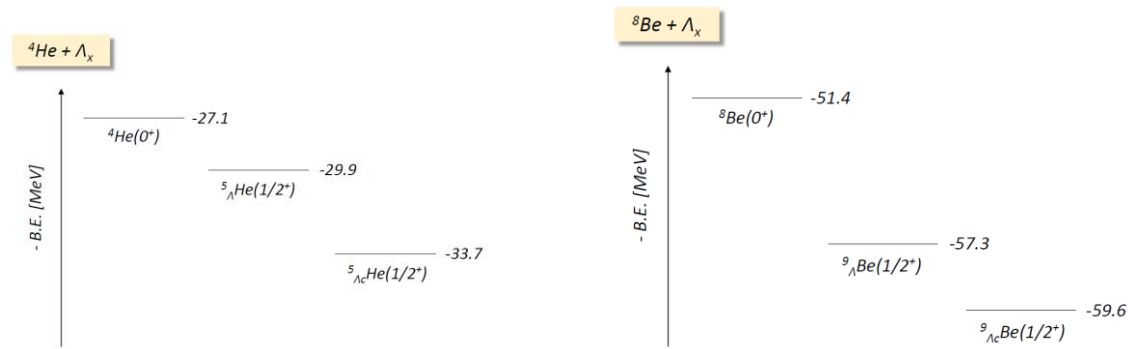
分布し、その周りに二核子が分布するというものであった。重い D 中間子の周りを核子が回っているような構造である。DNN のストレレンジネス版

エネルギー

である $K^{\text{bar}}NN$ とは逆である。反 K 中間子 ($K^{\text{bar}} = s\bar{q}$) は核子の約半分の質量と軽い。この場合 2 核子が芯となり、その周りに反 K 中間子が分布する。DNN において、D 中間子の周りを核子が回るといいう構造は、D 中間子が核子よりかなり重いことが原因である。またその後の考察により、DNN の深い束縛は、D 中間子が重い粒子であるために運動エネルギーが抑制されることにあることも分かった。

<u>DNN vs $K^{\text{bar}}NN$</u>		NN pot.: HN1R
	$K^{\text{bar}}N$ potential	DN potential
M_K	<u>$K^{\text{bar}}NN$</u> Total B.E. = 28 MeV Γ = 67 MeV	Total B.E. = 40 MeV Γ = 11 MeV
M_D	Total B.E. = 187 MeV Γ = 180 MeV	<u>DNN</u> Total B.E. = 225 MeV Γ = 26 MeV

このようにD中間子がチャームクォークを含むために重いということに起因し、最もシンプルなD中間子原子核 DNN にはストレンジネスの場合とは違った性質が現れる。そこで、同じくチャームクォークを持つバリオン Λ_c を含む多体系を考察する。ここでは Λ_c を一つ含む Λ_c ハイパー核 ${}^5_{\Lambda_c}\text{He}$ 、 ${}^9_{\Lambda_c}\text{Be}$ を考える。各々 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^8\text{Be}$ に一つ Λ_c が加わった原子核である。 Λ_c の大きな質量の影響を考察することに集中するため、unknown な $\Lambda_c\text{N}$ 相互作用としては、 ΛN 相互作用をそのまま利用することにする。同様の考察は過去に坂東らによってクラスター模型を用いて行われている[2]。ここでは簡易版ではあるが反対称化分子動力学法（通称AMD法）[3]を用い、多体系を完全に微視的に取り扱った。NN有効相互作用は Volkov No. 1、 ΛN 有効相互作用は serber 型 one range Gaussian ポテンシャルを使用した。([3]を参照)

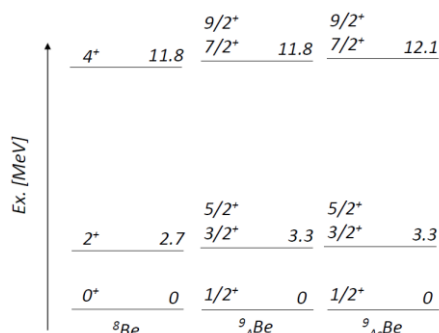


計算の結果であるが、 Λ が Λ_c に変わること基底状態の全束縛エネルギーは数 MeV 程度増加する： ${}^5_{\Lambda_c}\text{He}$ で約 4 MeV、 ${}^9_{\Lambda_c}\text{Be}$ で約 2 MeV。He の場合について詳細な結果を示した。（左下表） Λ を Λ_c に置き換えることで、より深い束縛になり、それに伴い系の平均二乗半径（Rrms [fm]）も若干小さくなる。一粒子を表現するガウス波束の広がりパラメータ ν も ${}^5_{\Lambda_c}\text{He}$ の方が大きくなっている。（ ν は fm^{-2} の次元を持ち、大きい値の方が分布のサイズが小さいことに対応）この表

	4He	Λ 5He	Λ_c 5He	Λ 5He'
Kinetic	50.0	68.5	69.4	70.9
NN pot.	-77.9	-81.8	-83.4	-83.4
NN Coul.	0.8	0.8	0.9	0.9
XN pot.	0.0	-17.4	-22.4	-18.1
XN Coul.	0.0	0.0	1.8	0.0
Rrms	1.45	1.39	1.37	1.37
ν	0.27	0.29	0.30	0.30

からは直接は読み取りにくい、 ${}^5_{\Lambda_c}\text{He}$ において DNN の場合と同様運動エネルギーの抑制が起きている。 ${}^5_{\Lambda_c}\text{He}$ は ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ に比べてコンパクトになっているが、もし ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ がこの ${}^5_{\Lambda_c}\text{He}$ のサイズであったら、エネルギーはどうなるであろうか？系のサイズを主に決める広がりパラメータ ν を人為的

に ${}^5_{\Lambda_c}\text{He}$ のものに固定（ $\nu=0.3\text{fm}^{-2}$ ）に固定したまま ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ を計算した結果が、表の一番右列のもの（ Λ 5He'）である。運動エネルギーが ${}^5_{\Lambda_c}\text{He}$ に比べて 1.5 MeV 大きくなっている。つまり Λ_c が重いがために系のサイズを小さくしても運動エネルギーがそれほど増加せず、結果的に Λ の時に比べポテンシャルエネルギーを稼ぐように系のサイズを小さく出来たということになる。続いて ${}^9_{\Lambda_c}\text{Be}$ Be であるが、コア原子核である ${}^8\text{Be}$ は 2 α クラスター構造で有名な原子核である。そこに重い質量の Λ_c が加わることで、回転バンドに変化が生じるかと思われたが、実際に計算したところ ${}^9_{\Lambda}\text{B}$



e と同様、 ^8Be と全く同じ励起スペクトルであった。(本計算では ΛN 間のスピン依存力がないため $J \pm 1/2$ 状態が縮退)

確かに Λ ハイパー核に比べ全束縛エネルギーの増加、エネルギーの内訳に変化がある。しかし $^5_{\Lambda^c}\text{He}$ と $^9_{\Lambda^c}\text{Be}$ を比べて分かるように、変化の度合いは核子数が増えると小さくなっている。いくら Λ^c が核子の二倍もの質量を持つ

とは言え、不純物一つの影響は全体の粒子数が増えると、その効果はマスクされてしまう。また Λ^c は Λ と違い電荷を持っている。そのため $^9_{\Lambda^c}\text{Be}$ で顕著であるが、エネルギーの内訳をみると、 $^9_{\Lambda}\text{Be}$ に比べて $\Lambda^c\text{N}$ ポテンシャルの引力の寄与が増加しているものの、ほとんどその分が Λ^c と陽子のクーロン斥力によってキャンセルされてしまっている。

今回の簡単な考察の結果では、 Λ^c が核子に比べ極端に重いということだけでは、残念ながら原子核において予想外な目新しい現象が起きそうには思えない。ただ冒頭で少し言及した $\Lambda^c\text{N}$ 相互作用の性質に関しては、ここでは完全に無視している。ストレンジネスセクターでは、 $\Lambda\text{N} - \Sigma\text{N}$ 混合がハイパー核において重要であることはよく知られているが、チャームセクターでも同様の混合が考えられる。しかも $\Sigma^c(1/2^+)$ と $\Sigma^c(3/2^+)$ の質量差が 70 MeV 程度しかないため、 Σ^c も混合に参加してくると考えられる。つまりチャームハイパー核では $\Lambda^c\text{N} - \Sigma^c\text{N} - \Sigma^c\text{N}$ 混合と言った、ハイパー核より多彩なチャネル結合が考えられる。この混合の重要性は二体系 $\Lambda^c\text{N}$ (charmed deuteron) において指摘されている [3]。またハイパー核ではアイソスピンの大きい原子核において混合の寄与が大きくなる coherent $\Lambda\text{N} - \Sigma\text{N}$ 混合がある [4]。同様の機構(coherent YcN 混合)がチャームハイパー核で働くのか？働くとしたら 3 チャネルにまたがっているのでその寄与はより大きいのか？等、この点は大変興味を持たれる。また先に述べたように Λ^c が Λ と違い正電荷をもつ。このことは束縛に関しては不利に働くが、構造や崩壊過程において面白いことを起こすかもしれない。このようにチャームハイパー核は興味の尽きない研究対象である。これまでに理論・実験両面から精力的に調べられてきたハイパー核と比較しつつ研究を進めることで、軽いストレンジネスの世界と重いチャームの世界の相違点・共通点が浮き彫りとなり面白いと思われる。

【参考文献】

- [1] M. Bayer, A. Dote, T. Hyodo, M. Oka, C. W. Xiao and E. Oset, PRC 86, 044004 (2012)
- [2] H. Bando and M. Bando, PLB 109, 164 (1982)
- [3] 木村真明、土手昭伸、大西明、松宮浩志、原子核研究 Vol. 53, Suppl. 2, 50 (2009)
- [4] M. Oka, Y.-R. Liu and W. Meguro, Few-Body Syst. 54, 1255 (2013)
- [5] Y. Akaishi, T. Harada, S. Shinmura and Khin Swe Myint, PRL 84, 3539 (2000)