

粲 Λ -核子相互作用和粲 Λ 核结合能

庄 斐 陈华中 金星南
(中国科学院原子能研究所)

摘 要

本文用 Hartree-Fock 方法计算了 Λ 超核 ${}^3\Lambda\text{He}$ 与 ${}^8\Lambda\text{Be}$ 的 Λ 的结合能及粲 Λ (Λ_c) 核 ${}^3\Lambda_c\text{He}$ 与 ${}^8\Lambda_c\text{Be}$ 的 Λ_c 的结合能. 在使前两者的 Λ 结合能之比与后两者的 Λ_c 结合能之比相等时, 定出 Λ_c 与核子的相互作用约为 Λ 与核子的相互作用的 $4/5$. 用此相互作用计算了 $1p$ 壳 Λ 超核和 Λ_c 核的结合能, 结果表明核芯 $A \geq 4$ 的 Λ_c 核是存在的.

一、引 言

原子核中的一个核子或几个核子被奇异强子如 Λ 超子所替代, 便形成 Λ 超核. 同样地, 原子核中的一个核子或几个核子被粲强子 (charmed baryon) 如 Λ_c 所替代, 则形成 Λ_c 核. Λ 与 Λ_c 的夸克组成上的差别, 仅仅是在于 Λ 中的 s 夸克为 c 夸克所代替. 两者性质的差别为: (1) Λ_c 的寿命是 10^{-13} 秒, 而 Λ 的寿命是 10^{-10} 秒; (2) Λ_c 带电荷为 e^+ , Λ 为中性; (3) Λ_c 的质量为 2260 MeV, 而 Λ 的质量为 1150 MeV; (4) Λ_c 与核子的相互作用和 Λ 与核子的相互作用不同.

Λ_c 核是否存在的问题, 近年来已有一些作者^[1-5]从理论上进行过分析, 并论证其存在的可能性, 在实验上也有存在的证据^[6].

探讨 Λ_c 核的存在问题, 首先需要研究 Λ_c - N 的相互作用. 用 $SU_4^{[1,5]}$ OBE 模型分析得出 Λ_c - N 的相互作用应稍弱于 Λ - N 相互作用. H. Bando 与 M. Bando^[4] 用集团模型研究了 Λ_c 核 ${}^3\Lambda_c\text{He}$ 与 ${}^8\Lambda_c\text{Be}$ 的存在问题, 并认为 $V_{\Lambda_c N}^0 \sim \frac{2}{3} V_{\Lambda N}^0$ (V^0 是 $r = 0$ 时相互作用 V 的值) 似乎是最现实的.

本文用双高斯型叠加的相互作用势, 并用前几年我们所建立起来的 Hartree-Fock 方法程序来研究 Λ_c 核的存在问题, 并认为 $V_{\Lambda_c N} \sim \frac{4}{5} V_{\Lambda N}$ 较为合适.

二、计算方法

在 Hartree-Fock 方法中所用的单粒子波函数为谐振子壳模型波函数的线性叠加:

$$\varphi_{lm}(\mathbf{r}) = \sum_{n=0}^3 c_{nlm} \varphi_{nlm}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

其中 $\varphi_{nlm}(\mathbf{r})$ 为谐振子波函数, c_{nlm} 为待定参数.

系统的波函数可以表示为:

$$\Psi\left(1, \dots, A; \begin{matrix} \Lambda \\ \Lambda_c \end{matrix}\right) = \frac{1}{\sqrt{A!}} \det\{\varphi(1) \cdots \varphi(A)\} \begin{matrix} \varphi_\Lambda, \text{ 对 } \Lambda \text{ 超核} \\ \varphi_{\Lambda_c}, \text{ 对 } \Lambda_c \text{ 核} \end{matrix} \quad (2)$$

核子波函数中的谐振子参数和 φ_{Λ_c} 中的谐振子参数, 取为相同的 $\hbar\omega$ 使 $\hbar\omega \sim 15\text{MeV}$.

$N-N$ 相互作用 V_{N-N} 取 Volkov 型, 我们这里取 Volkov No 1^[9]. $\Lambda-N$ 相互作用也取两高斯叠加的形式:

$$V(r) = \left\{ -V_0 \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right) + V_1 \exp\left(-\frac{r^2}{b^2}\right) \right\} (W + MP^r + BP^r - HP^r) \quad (3)$$

其中所有参数给在表 1 内. 我们取两种不同的参数.

表 1 V_{N-N} 与 $V_{\Lambda-N}$ 中的参数

	$V_0(\text{MeV})$	$V_1(\text{MeV})$	$a(\text{fm})$	$b(\text{fm})$	W	M	B	H
V_{N-N}	83.34	144.86	1.6	0.82	0.4	0.6	0	0
$V_{\Lambda-N}(1)$	75.15	144.86	1.05	0.6	0.1	0.9	0	0
$V_{\Lambda-N}(2)$	63	144.86	1.11	0.6	0.2	0.8	0	0

Λ_c-N 相互作用 V_{Λ_c-N} 取为:

$$V_{\Lambda_c-N} = \alpha V_{\Lambda-N} \quad (\alpha \leq 1) \quad (4)$$

三、计算结果及结论

在计算中, 我们扣除了质心运动的动能, 但忽略了库仑相互作用.

首先我们拟合 ${}^3_\Lambda\text{He}$ 的 Λ 结合能与实验值一致, 这样我们就得到了表 1 中 $V_{\Lambda-N}(1)$ 的参数. 我们算得的 ${}^3_\Lambda\text{He}$ 中的 Λ 结合能为:

$$B_\Lambda({}^3_\Lambda\text{He}) = 3.15\text{MeV},$$

而实验值 $B_\Lambda({}^3_\Lambda\text{He}) = 3.12 \pm 0.02 \text{MeV}$.

用同样的参数计算得

$$B_\Lambda({}^8_\Lambda\text{Be}) = 8.7\text{MeV}$$

而实验值 $B_\Lambda({}^8_\Lambda\text{Be}) = 6.71 \pm 0.04 \text{MeV}$. 施义晋等用集团模型也得到同样的情况^[7], $1s$ 壳 Λ 超核的 Λ 结合能与 $1p$ 壳 Λ 超核的 Λ 结合能不能用同一组势来符合, 如果 $1p$ 壳 Λ 超核的 Λ 结合能与实验值符合, 则用同样的相互作用势, 将使 $1s$ 壳 Λ 超核的 Λ 结合能与实验值比要小.

我们用公式 (4) 所给出的相互作用势, 计算 Λ_c 核 ${}^3_{\Lambda_c}\text{He}$ 与 ${}^8_{\Lambda_c}\text{Be}$ 的 Λ_c 的结合能, 并取了四种不同的 α 值. 计算结果列在表 2 内.

我们可合理地假定 $B_{\Lambda_c}({}^3_{\Lambda_c}\text{He}) : B_{\Lambda_c}({}^8_{\Lambda_c}\text{Be}) = B_\Lambda({}^3_\Lambda\text{He}) : B_\Lambda({}^8_\Lambda\text{Be})$, 因此取 $\alpha \approx 4/5$ 是比

表 2 ${}^5_{\Lambda_c}\text{He}$ 与 ${}^9_{\Lambda_c}\text{Be}$ 的 Λ_c 结合能

α	$B_{\Lambda_c}({}^A_{\Lambda_c}\text{He})$ (MeV)	$B_{\Lambda_c}({}^A_{\Lambda_c}\text{Be})$ (MeV)
1	7.470	14.31
0.9	5.124	11.36
0.81	3.09	8.89
0.67	0.067	5.16

较合适的. 这个结论与 Bando 等人所得到的 $v_{\Lambda_c N}^0 \approx \frac{2}{3} v_{\Lambda N}^0$ 不相矛盾.

用表 1 中 $V_{\Lambda-N}(2)$ 的参数并取 $\alpha = 0.82$, 我们计算了 $5 \leq A \leq 16$ 的 $1p$ 壳 Λ_c 核的 Λ_c 结合能. 为了比较起见, 我们同时计算了 $5 \leq A \leq 16$ 的 $1p$ 壳 Λ 超核的 Λ 结合能. 这些结果列在表 3 内. 在表 3 中同时给出了某些 Λ 超核的 Λ 结合能的实验值^[8]. 由于在我们的计算中, 没有考虑库仑场与自旋的影响, 因此表 3 中 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$, ${}^7_{\Lambda}\text{Be}$; ${}^8_{\Lambda}\text{Li}$, ${}^8_{\Lambda}\text{Be}$; ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$, ${}^9_{\Lambda}\text{B}$; ${}^{11}_{\Lambda}\text{B}$, ${}^{11}_{\Lambda}\text{C}$; ${}^{15}_{\Lambda}\text{N}$, ${}^{15}_{\Lambda}\text{O}$ 的 B_{Λ} 计算值是相同的.

表 3 $A \geq 5$ 的 Λ 超核与 Λ_c 核的 Λ 与 Λ_c 的结合能

Λ 超核	B_{Λ} (理论) (MeV)	B_{Λ} (实验) (MeV)	Λ_c 核	B_{Λ_c} (理论) (MeV)
${}^4_{\Lambda}\text{He}$	3.299	4.18 ± 0.11	${}^4_{\Lambda_c}\text{He}$	3.35
${}^7_{\Lambda}\text{Li}({}^7_{\Lambda}\text{Be})$	4.62	5.58 ± 0.03 (5.16 ± 0.08)	${}^7_{\Lambda_c}\text{Li}$	4.82
${}^8_{\Lambda}\text{Li}({}^8_{\Lambda}\text{Be})$	5.91	6.80 ± 0.03 (6.84 ± 0.05)	${}^8_{\Lambda_c}\text{Li}$	6.06
${}^9_{\Lambda}\text{Be}({}^9_{\Lambda}\text{B})$	7.22	6.71 ± 0.04 (7.88 ± 0.15)	${}^9_{\Lambda_c}\text{Be}$	7.23
${}^{10}_{\Lambda}\text{B}$	8.28	8.89 ± 0.12	${}^{10}_{\Lambda_c}\text{B}$	8.38
${}^{11}_{\Lambda}\text{B}({}^{11}_{\Lambda}\text{C})$	9.55	10.24 ± 0.05 (10.76 ± 0.19)	${}^{11}_{\Lambda_c}\text{B}$	9.65
${}^{12}_{\Lambda}\text{B}$	10.94	11.37 ± 0.06	${}^{12}_{\Lambda_c}\text{B}$	10.96
${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$	12.43	11.69 ± 0.12	${}^{13}_{\Lambda_c}\text{C}$	12.396
${}^{14}_{\Lambda}\text{C}$	13.62	12.17 ± 0.33	${}^{14}_{\Lambda_c}\text{C}$	13.40
${}^{15}_{\Lambda}\text{N}({}^{15}_{\Lambda}\text{O})$	15.06	13.59 ± 0.15 (-)	${}^{15}_{\Lambda_c}\text{N}$	14.73
${}^{16}_{\Lambda}\text{N}$	16.621	-	${}^{16}_{\Lambda_c}\text{N}$	16.08
${}^{17}_{\Lambda}\text{O}$	18.255	-	${}^{17}_{\Lambda_c}\text{O}$	17.45

B_A 与 B_{Λ_c} 的理论计算值对每一种核来说, 相差不大。如 $B_A({}^4_2\text{He}) = 3.299$ MeV, $B_{\Lambda_c}({}^4_{\Lambda_c}\text{He}) = 3.35$ MeV。核轻时 B_A 稍小于 B_{Λ_c} ; 但当核质量增大时 B_A 稍大于 B_{Λ_c} , 如 $B_A({}^{15}_7\text{N}) = 15.06$ MeV 而 $B_{\Lambda_c}({}^{15}_{\Lambda_c}\text{N}) = 14.73$ MeV。

从表 3 的结果可见, 如果 ${}^5_{\Lambda_c}\text{He}$ 存在, 则 $A > 5$ 的 Λ_c 核也能存在。这一结论有待于实验工作来验证。

参 考 文 献

- [1] C. B. Dover and S. H. Kahana, *Phys. Rev. Lett.*, **39**(1977), 1506.
- [2] S. Iwao, *Lett. Nuovo Cimento*, **19**(1977), 647.
- [3] R. Gatto and F. Paecanoni, *Nuovo Cimento*, **46A**(1978), 313.
- [4] H. Bando and M. Bando, *Phys. Lett.* **109B**(1982), 164.
- [5] C. B. Dover, S. H. Kahana, *Phys. Rev.* **D16**(1977), 799.
- [6] Yu. A. Batusov et al., Serpukhov Preprint D1-80-676.
- [7] 施义晋, 庄斐, 高能物理与核物理, **6**(1982), 750.
- [8] 卢希庭, 原子核物理, 原子能出版社 (1981)388.
B. Povh, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, Vol 28(1978), Edited by J. D. Jackson et al.
- [9] A. B. Volkov, *Nucl. Phys.*, **74**(1965), 33.

Λ_c -N INTERACTION AND BINDING ENERGY OF Λ_c NUCLEI

ZHUANG FEI CHEN HUA-ZHONG JIN XING-NAN
(Institute of Nucleus, Academia Sinica)

ABSTRACT

The Hartree-Fock method is used to calculate the binding energy of Λ hypernuclei ${}^4_\Lambda\text{He}$ and ${}^8_\Lambda\text{Be}$ and the binding energy of charmed $\Lambda(\Lambda_c)$ nuclei ${}^4_{\Lambda_c}\text{He}$ and ${}^8_{\Lambda_c}\text{Be}$. By setting the ratio of the binding energy of Λ in ${}^4_\Lambda\text{He}$ and ${}^8_\Lambda\text{Be}$ to be equal to the ratio of the binding energy of Λ_c in ${}^4_{\Lambda_c}\text{He}$ and ${}^8_{\Lambda_c}\text{Be}$, the Λ_c -N interaction is determined to be equal to 4/5 of the Λ -N interaction. With the interaction thus obtained the binding energy of 1p-shell Λ hypernuclei and 1p-shell Λ_c nuclei are calculated.