

快报

2ν 型双 β 衰变核矩阵元的计算¹⁾

傅德基 甘幼评

(中国科学院原子核研究所) (广西大学)

摘 要

本文由 Skyrme III 力自洽场建立单粒子能量及其组态, 采用 Tamm-Dancoff 近似计算 Gamow-Teller 共振的方式, 计算了硒(82)及碲(130)的双 β 衰变 (2ν) 型的核矩阵元。计算表明, 选用合适的配对力强度 G₀ 时, 可以获得与目前实验要求相符的结果。

双 β 衰变有双中微子 (2ν) 和无中微子 (0ν) 两种模式, 其研究牵涉到轻子数守恒的基本问题^[1]。理论计算双 β 衰变寿命必须用到有关原子核的 Gamow-Teller 跃迁矩阵元

$$M_{GT} = \langle f | \sum_i \sigma_i \tau_i^+ | i \rangle$$

及 Fermi 跃迁矩阵元

$$M_f = \langle f | \sum_i \tau_i^+ | i \rangle.$$

由于其跃迁算符只含自旋 σ 及同位旋 τ 的泡利算符, 对核结构知识能提供的初态 |i> 和末态 |f> 波函数是一个较明确的检验。目前已积累了 ⁴⁸Ca、⁷⁶Ge、⁸²Se、¹³⁰Te 等核由实验测定双 β 衰变结果抽取出来的按下式定义的 (2ν) 型时核矩阵元数据^[1,2]:

$$M_{GT} = \sum_m \frac{\langle f | \sum_i \sigma_i \tau_i^+ | m \rangle \langle m | \sum_k \sigma_k \tau_k^+ | i \rangle}{E_m - (M_i + M_f)/2}. \quad (1)$$

Haxton 等人^[1,3]在估算上式时, 对中间核态能量 E_m 作了平均处理, 因此求和可以简易进行, 文献上统称闭合近似。本文不作闭合近似, 而由中间核(一般是奇奇核)的 1⁺ 态和母核(偶偶核)的基态 |i> 间计算

$$\beta_{(m)}^- = \langle m | \sum_k \sigma_k \tau_k^+ | i \rangle;$$

又由子核基态 |f> 和同上的中间核态间计算

$$\beta_{(m)}^+ = \langle f | \sum_i \sigma_i \tau_i^+ | m \rangle,$$

(1)式可化为:

¹⁾ 中国科学院科学基金资助的课题。
本文 1986 年 7 月 26 日收到。

in the
en and
action

$$M_{GT} = \sum_m \frac{\beta_{(m)}^+ \beta_{(m)}^-}{\omega^{(m)} + \Delta E}. \quad (2)$$

对于 ^{82}Se 及 ^{130}Te 等核来说, 可以采用球形单粒子组态, 经 BCS 变换成准粒子表象来作, 这样比 Haxton 等人^[1] 用严格壳模型多粒子组态的作法简单, 也是本文拟检验的内容. 对于核相互作用 Haxton 取真实力 G 矩阵元. 我们对(2)式中 $\omega^{(m)}$ 由通常计算 (p, n) 反应 Gamow-Teller 共振时^[4], 设置

$$V_{GT} = \chi \sum_{i>j} \sigma_i \cdot \sigma_j \tau_i \cdot \tau_j$$

核相互作用下, 由 Tamm-Dancoff (TDA) 程序算出各本征态 (m) . χ 的数值由经验可知为 $(23/A) \text{ MeV}$, A 表示核子数^[4].

BCS 处理中, 选取单极对力强度 G_0 如下: 对 ^{82}Se , $G_0^{(n)} = G_0^{(p)} = (24.5/A) \text{ MeV}$, 中子及质子皆取进幻数 20—82 之间所有单粒子组态, 求得能隙参量 Δ , 中子部份为 $\Delta^{(n)} = 1.41 \text{ MeV}$, 质子部份为 $\Delta^{(p)} = 1.52 \text{ MeV}$; 对 ^{130}Te , 取 $G_0^{(n)} = (21.5/A)$, $G_0^{(p)} = (30/A) \text{ MeV}$, 质子取进 28—82, 中子取进 50—126 之间所有单粒子组态, 求得 $\Delta^{(n)} = 0.96 \text{ MeV}$, $\Delta^{(p)} = 0.98 \text{ MeV}$. 这些与核结构知识相符.

总之, 与 Haxton 工作相比, 本文试图找到计算双 β 衰变核矩阵元的简易有效的途径.

文献[2]与本文思路相似, 不同点在于三个方面:

(一) 关于单粒子能态的选取. [2] 取之于经验数值, 其原始哈密顿量中没有库伦项和对称能项, 不能顾及不同核的基态总结合能亦不同, 因此, 文献[2]引入如下的 ΔE 来弥补:

$$\Delta E = M_{\text{奇奇}} - M_{\text{初核}} + \frac{1}{2} T_{\text{max}} - (E_{\text{奇}}^{(n)} + E_{\text{奇}}^{(p)})_{\text{min}}, \quad (3)$$

其中, $M_{\text{奇奇}}$ 、 $M_{\text{初核}}$ 表示中间核、母核的原子质量, 有表可查^[5]. T_{max} 是发射轻子动能^[1]; $(E_{\text{奇}}^{(n)} + E_{\text{奇}}^{(p)})_{\text{min}}$ 表示奇奇核中双准粒子最低能量. [2] 中并未给出 ΔE 的确切数值. 本文从包含了库伦能和对称能因素的 Skyrme III 力 HF 自洽场出发, 发现 [2] 引入的 ΔE 数值不大, 对 M_{GT} 影响很小. 这说明直接由建立于自洽场上的单粒子能态出发, 通过双准粒子 (BCS) Gamow-Teller 型的相干激发足可描述 (1) 式中的中间核态和 $|i\rangle$ 及 $|f\rangle$ 的关系. 必须提及, Skyrme 力自洽场给出的单粒子能量间隔比经验数值大, 计及表面振荡影响之后^[6], 方能得到与实际情况相符的费米面附近的一些单粒子能级. 通过核子等效质量的计算^[7]可知, 这可以通过对所有费米面附近的自洽场单粒子能量乘以 0.6—0.7 压缩因子来完成. 然而由表 1 看来, 考虑压缩因子与否, 对 M_{GT} 影响甚微.

(二) 母核及子核态的选取. 文献[2]将 $|i\rangle$ 及 $|f\rangle$ 皆取为母核基态的近似是不妥的, 他们也声明会对 M_{GT} 带来 40% 的误差. 本文则是区分了 $|i\rangle$ 及 $|f\rangle$ 之后求得 $\beta_{(m)}^{\pm}$ 的.

(三) RPA 与 TDA. 本文认为 GT 共振中基态关联不大^[4], 尝试用 TDA 解决问题, 这比用于此类问题的 RPA 要简易得多.

最后结果综述如下:

^{82}Se 及 ^{130}Te 的 M_{GT}^{exp} (实验值)^[2] 分别为 3.9×10^{-3} 及 8.9×10^{-3} . 表 1 展示了本

(2)

来作,
内容,
, n) 反

经验可

eV, 中
 $\Delta^{(n)} =$
 $= (30/$
5MeV,

的途

率伦能
的 ΔE

(3)

功能^[1];
数值.
引入的
发,通
| i) 及
十及表
过核子
6—0.7

是不妥
求得

解决问

示了本

文对 ^{130}Se 的计算结果及与其他结果的比较:

表 1

M_{GT} / 压缩因子 \ χ	0	$23/A$	$34/A$
0.6	$0.17 = 4.4M_{GT}^{exp}$	$0.05 = 1.3M_{GT}^{exp}$	$0.035 = 0.9M_{GT}^{exp}$
1.0		$0.04 = 1.1M_{GT}^{exp}$	$0.032 = 0.8M_{GT}^{exp}$
Haxton 结果 ^{[1][2]}	$0.092 = 2.4M_{GT}^{exp}$	Vogel 结果 ^[2]	$0.082 = 2.1M_{GT}^{exp}$

对于 ^{130}Te , 取 $\chi = 23/A$, 压缩因子为 0.6 时, 计算值为 $M_{GT} = 0.040 = 4.5M_{GT}^{exp}$. Haxton 的计算值为 $M_{GT} = 0.11 = 12.3M_{GT}^{exp}$, Vogel^[2] 的计算值 $M_{GT} = 10.1M_{GT}^{exp}$. 比实验值大的问题未能解决. 文献[2]的能隙参量定的与我们相同. 关于 χ 值, [2]考虑了 Δ_{33} 影响, 取为 $(28/A)$, 但仍不能明显降低 M_{GT} , 最后结果不如本文的好.

用求和规则检验本文计算:

$$S_{GT} = \sum_m [(\beta_{(m)}^-)^2 - (\beta_{(m)}^+)^2] = (N - Z), \quad (4)$$

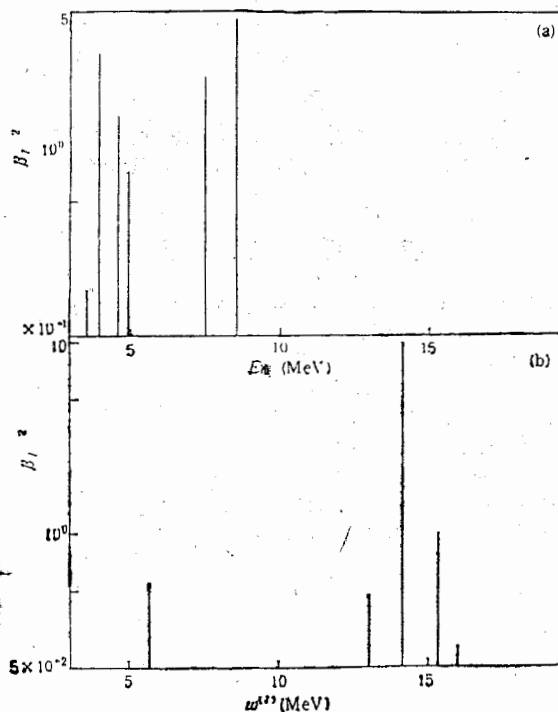
对 ^{130}Se , $S_{GT} \cong 13$; 对 ^{130}Te , $S_{GT} \cong 20$. 后者偏离中子质子数之差较大, 这有待于从扩

图 1

(a) ^{130}Se 的 β^- 跃迁强度, $\chi = 0$, 压缩因子=0.6(b) ^{130}Se 的 β^- 跃迁强度, $\chi = 23/A$, 压缩因子=0.6

大组态空间和不舍弃较小贡献的跃迁矩阵元来改进。进一步的工作正在进行。作者感谢夏克定同志的有益讨论。

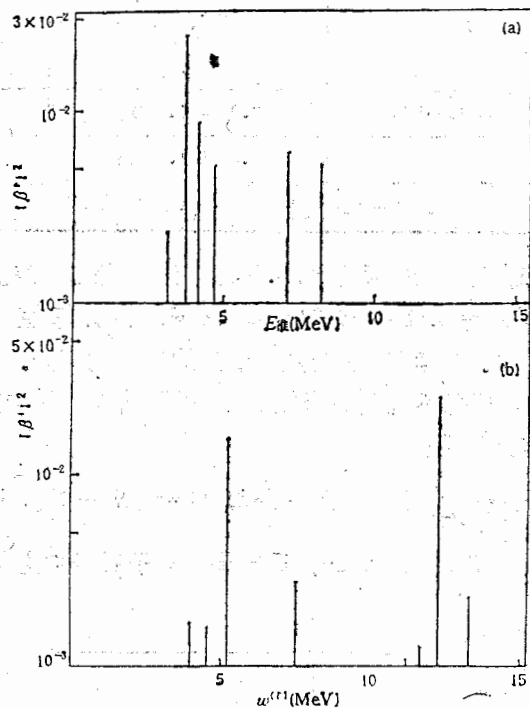


图 2

- (a) ^{82}Kr 的 β^+ 跃迁强度, $\alpha = 0$, 压缩因子 = 0.6
 (b) ^{82}Kr 的 β^+ 跃迁强度, $\alpha = 23/A$, 压缩因子 = 0.6

参 考 文 献

- [1] W. C. Haxton and G. J. Stephenson, Jr. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, **12**(1984), 409.
 吴慧芳, 黄涛, 自然杂志, **9**(1986), 167.
 [2] P. Vogel and P. Fisher, *Phys. Rev.*, **C32** (1985), 1362.
 [3] H. V. Klapdor and K. Grotz, *Phys. Lett.*, **B142**(1984), 323.
 M. Doi et al., *Prog. theor. Phys.*, **69**(1983), 602.
 [4] C. Gaarde et al., *Nucl. Phys.*, **A369**(1981), 258.
 [5] A. H. Wapstra and N. B. Gove, *Nucl. Data Table*, **9**(1971), 265.
 [6] I. Hamamoto and P. Siemens, *Nucl. Phys.*, **A269**(1976), 199.
 [7] P. F. Bortignon et al., *Phys. Lett.*, **B108** (1982), 247.

quasi
medi
(III)
initia
satisf

THE CALCULATION OF 2ν $\beta\beta$ NUCLEAR MATRIX ELEMENT

FU DE-JI

(*Institute of nuclear research*)

GAN YOU-PING

(*Guangxi University*)

ABSTRACT

The nuclear structure part of the 2ν mode $\beta\beta$ decay of ^{82}Se and ^{130}Te are calculated by quasiparticle Tamm-Dancoff Approximation treating the Gamow-Teller transitions to the intermediate odd-odd nucleus and the single particle configurations generated from Skyrme force (III) Hartree-Fock procedure. With the relevant pairing effect and correct dealing with both initial and final state, the nuclear matrix element observed experimentally can be reproduced satisfactorily.