

^{58,60,62,64}Ni 25.1 MeV 质子非弹性散射 研究及其低激发态能谱和 $B(E2)$ 比率的 IBA 分析

张杰 蒋大真 杨锦晴 张映箕

何建华 傅德基 程晓伍

(中国科学院上海原子核研究所, 201800)

摘 要

使用上海原子核研究所 1.4m 等时性迴旋加速器提供的 25.1 MeV 质子束, 测量了偶镍同位素弹性散射和第一激发态 2_1^+ 的非弹性散射微分截面. 用零程扭曲波玻恩近似 (DWBA) 作理论分析, 得到 ^{58,60,62,64}Ni 2_1^+ 态的四极形变参数 β_2 分别为 0.23, 0.28, 0.25, 0.21. 采用相互作用玻色子近似 (IBA) 计算了这些核低激发态能谱及其约化电跃迁几率 $B(E2)$. 并对 IBA 唯象参数作了初步的准粒子无规位相近似 (QPRPA) 微观计算.

一、引 言

镍同位素由于其质子组态正好填满 $f_{7/2}$ 壳, 曾是检验壳模型计算的对象. 在仅考虑价中子组态为 $f_{5/2}$, $p_{3/2}$ 及 $p_{1/2}$ 的组态混合计算中, Y. K. Gambir 等人^[1]对 ^{58,60}Ni 的低激发态作过研究, 其结果表明, 不考虑 ⁵⁶Ni 的核芯激发, 难以符合实验结果. ^{58,60,62,64}Ni 的低激发态能谱^[2]呈现出球形核振动谱特征. 其 $B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$ 实验值分别为 10.3, 13.3, 12.0, 8.4 Weisskopf 单位^[3], 这比通常单粒子跃迁值大, 因此表明这些核具有一定的集体性质. ^{56,58,60,62,64,66,68}Ni 2_1^+ 态激发能^[4]分别为 2.702、1.454、1.333、1.173、1.346、1.422、2.20 MeV. 其中 ^{56,58}Ni 明显比其它同位素高, 具有双幻核迹象. 因此, 对诸如核芯激发, 集体性强度, 以及质子数为 28、中子数为 40 的填满效应在镍同位素中的作用等问题的研究是令人感兴趣的.

从另一方面来看, 非弹性散射是研究原子核能级激发的有效手段. 通过 DWBA 计算与实验的比较, 可以抽取反映核激发的多极形变参数, 比如相应于四极激发 2_1^+ 态的 β_2 . 比较用同一种入射粒子轰击不同靶核测量得到的 β_2 , 可以看出反映各靶核集体性强度的四极激发强度的变化规律.

通过 (α, α') ^[5], (d, d') ^[6] 反应得到的 $^{58,60,62,64}\text{Ni}2^+$ 态四极形变参数 β_2 呈现随中子数先增大后减小的变化趋势。文献 [5,6] 工作获得的 β_2 是通过利用较复杂的复合粒子光学势抽取的。本工作测量了质子非弹性散射, 因此可以通过利用具备较完整系统学的核子-核光学势参数来抽取 β_2 。六十年代, S.F. Eccles 等人^[7]做过 19MeV 质子对 $^{58,60,62}\text{Ni}$ 的非弹性散射实验研究。D. Beston^[8] 亦做过类似工作, 质子能量为 12MeV, 靶核包括 $^{62,64}\text{Ni}$ 两种同位素。但在同一入射能量下, 系统地对这四个核作质子非弹性散射研究, 尚未见报道。本文试图用 25.1MeV 质子作为入射束, 通过测量非弹性散射截面角分布, 统一抽取各核的 β_2 值, 便于较准确地获得其随中子数变化的规律。

为了进一步研究这些核的性质, 本文以 IBA 作为计算框架, 考虑质子核芯对激发, 具体计算各核能谱及有关 $B(E2)$ 比率。探索 IBA 对这些核的适用程度。最后用 QPRPA 对各核的总玻色子数及相互作用项作了初步的微观计算。

二、非弹性散射

实验所用 25.1MeV 质子束由本所回旋加速器提供。束流经聚焦、准直后的直径为 3mm。在准直器与靶之间放置了一个 $\phi 6$ 的限流孔, 以阻挡从准直管边缘来的散射粒子。测量系统总体能量分辨率为 250keV。法拉第筒收集质子定出束流积分作相对归一。用固定于 45° 处的半导体探测器监督弹性峰计数, 用于同一块靶不同偏转角的归一。浓缩同位素自撑靶由电解法制成, 其同位素丰度分别为 99.6% (^{58}Ni)、99.3% (^{60}Ni)、95.2% (^{62}Ni)、95.5% (^{64}Ni)。由称重法结合 X 荧光测厚法得到其靶厚依次为 0.982, 1.01, 0.976, 0.788mg/cm²。

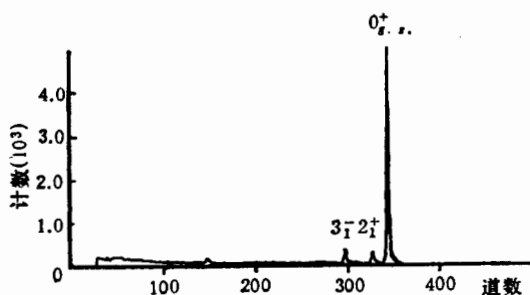


图 1 p 轰击 ^{64}Ni 反应中的质子能谱

用 $200\mu\text{m}$ 的全耗尽金硅面垒探测器和 5mm 硅锂探测器构成一个 $\Delta E-E$ 计数器望远镜, 来鉴别不同的出射粒子。采用常用的快慢符合技术减小偶然本底。测量时靶室真空保持在 7×10^{-3} 帕, 角分布范围为 $(15^\circ-160^\circ)$ 。在前角束流强度控制在 20nA 左右, 后角度提高到 $(50-100)\text{nA}$ 。

在 ΔE , $\Delta E + E$ 组成的二维能谱上, 相应于 p , d , t , α 粒子各自的轨迹清晰可辨。利用计算机软件完成不同粒子的分类, 然后投影得到一维能谱。典型能谱见图 1, 由图上可以看出 2_1^+ 态的非弹性峰与基态的弹性峰可清楚地分开。图中 3_1^- 所指的峰是对应于

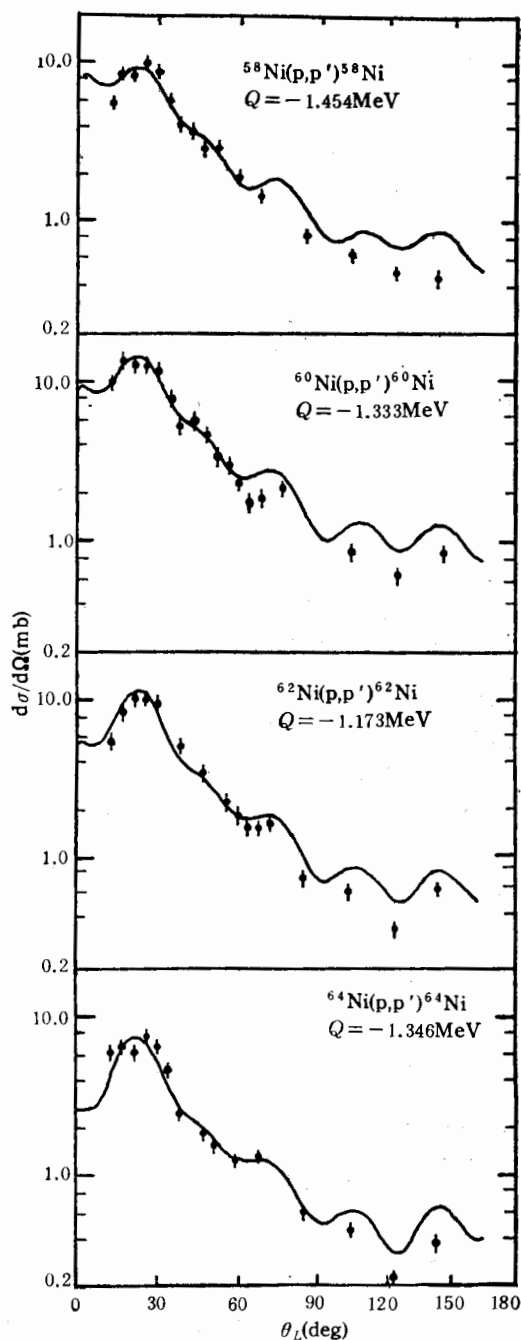


图2 $^{58,60,62,64}\text{Ni}(p,p')$ 截面角分布
 ◆ 为实验数据, 实线为 DWBA 计算结果

^{64}Ni 激发能为 3.56 MeV 的能级产生的。

DWBA 计算所需光学势参数取自 F. D. Becchetti 等人^[9]的系统学。使用这样的光学势参数, DWBA 计算能很好地再现各核实验弹性散射截面角分布。为了系统地获得 β_2 , 因而未对光学势参数作进一步精细调节。

2^+ 态四极形变参数由下式决定,

$$(\frac{d\sigma}{d\Omega})_{\text{EXP}} = \beta_2^2 (\frac{d\sigma}{d\Omega})_{\text{DWBA}}$$

式中 $(\frac{d\sigma}{d\Omega})_{\text{EXP}}$ 是实验非弹性散射微分截面, $(\frac{d\sigma}{d\Omega})_{\text{DWBA}}$ 为 DWBA 计算值。通过最小二乘法拟合 (结果见图 2) 定出 β_2 。

表 1 β_2 随中子数的变化

	^{58}Ni	^{60}Ni	^{62}Ni	^{64}Ni
(α, α') ^[5]	0.20	0.21	0.19	0.17
(d, d') ^[6]	0.232	0.254	0.218	0.198
(p, p') ^[7]	0.24	0.30	0.27	
(p, p') ^[8]			0.26	0.22
本文	0.23	0.28	0.25	0.21

表 1 列出了本实验获得的 β_2 以及以往有关工作的结果。因为 β_2 的抽取与所选取的光学势相关。不同种类粒子光学势形状不同, 因此用不同入射粒子的非弹性散射获得的 β_2 在绝对值上会有些差别。本文所得 β_2 随中子数的变化趋势与通过 (α, α') , (d, d') 所获得的结果是一致的。反映了集体性变化的规律。

实验结果误差为 10% 左右, 主要来自束流积分, 靶厚测量及统计误差。尤其在后角度, 由于截面较小, 统计误差成为主要因素。

三、IBA 分析

1974 年以来, IBM (Interacting Boson Model)^[10] 已经广泛应用于中重及重核的低

激发态研究^[11]。现在它与几何模型一样成为研究原子核结构的常用理论工具。也是研究核形变的有效方法^[12,13]。

在 IBM 计算中, 一个重要的问题是如何选取合适的玻色子数。为此, 我们从各种实验数据具体分析镍同位素的有关性质。从转移两个质子的 $^{56,58}\text{Fe}(^3\text{He}, n)^{58,60}\text{Ni}$ 反应^[14]来看, 末态为 0_2^+ (其激发能对应于 $^{58,60}\text{Ni}$ 分别是 3.54, 3.34 MeV) 的情况有明显较大的几率; $^{58}\text{Fe}(^6\text{Li}, d)^{62}\text{Ni}$ 反应^[15]也表明 ^{62}Ni 的 0_2^+ 态有较大的转移几率。但是转移两个中子的 $^{58,60}\text{Ni}(t, p)^{60,62}\text{Ni}$ 反应^[16]中, 末态核处于 0_2^+ 态的几率很小。这说明 $^{60,62}\text{Ni}$ 的 0_2^+ 态拥有很大的质子组态成份, 是质子对激发的反映。 $^{54}\text{Fe}(^3\text{He}, n)^{56}\text{Ni}$ 反应^[17]中, 末态核处于 0_2^+ 的截面很大, H. Nann 等人分析了这一结果, 认为 ^{56}Ni 的 0_2^+ 态是一对质子从 $f_{7/2}$ 激发到 $p_{3/2}$ 造成的。总之, 对于镍同位素低激发态研究来说, 质子数 28 不再是一个可被冻结的闭壳, 质子对激发必须加以考虑。为此, 我们认为, 质子对激发构成两个玻色子数(相应于一对价粒子和一对价空穴)。对于中子组态, 闭壳数取为 28, 40。这样, $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ 的总玻色子数分别为 3、4、5、4。

采用不区分中子和质子玻色子的相互作用玻色子近似 (IBA)。其哈密顿量取为通常的多极展开形式^[18],

$$H = \varepsilon'' \hat{n}_d + a_0(P^+ \cdot P) + a_1(L \cdot L) + a_2(Q \cdot Q) + a_3(T_3 \cdot T_3) + a_4(T_4 \cdot T_4)$$

文献 [18] 指出, 通常情况下, a_3, a_4 项可不予考虑, 因此取 $a_3 = a_4 = 0$ 。

电四极跃迁算符为

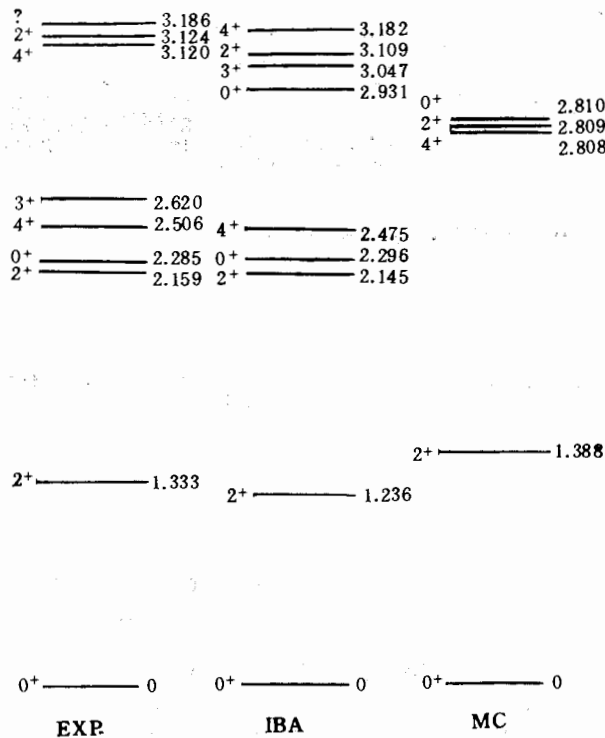
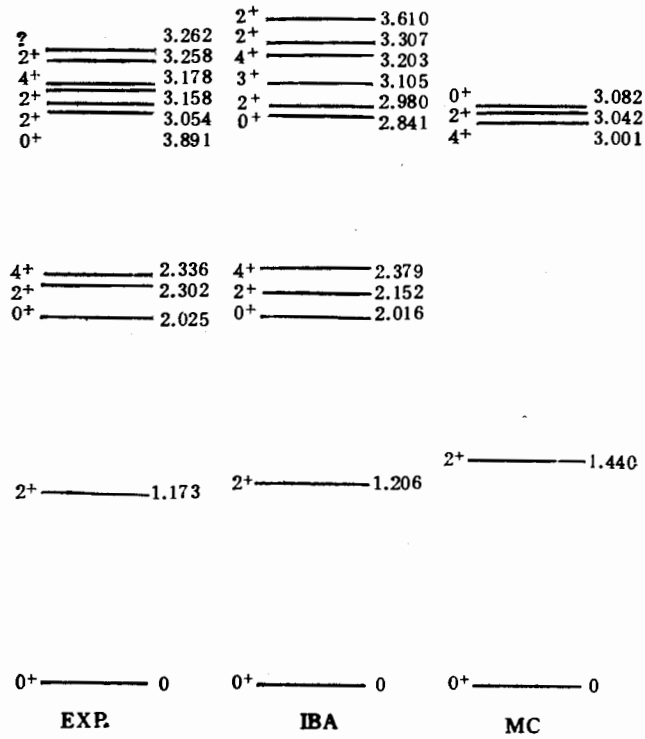
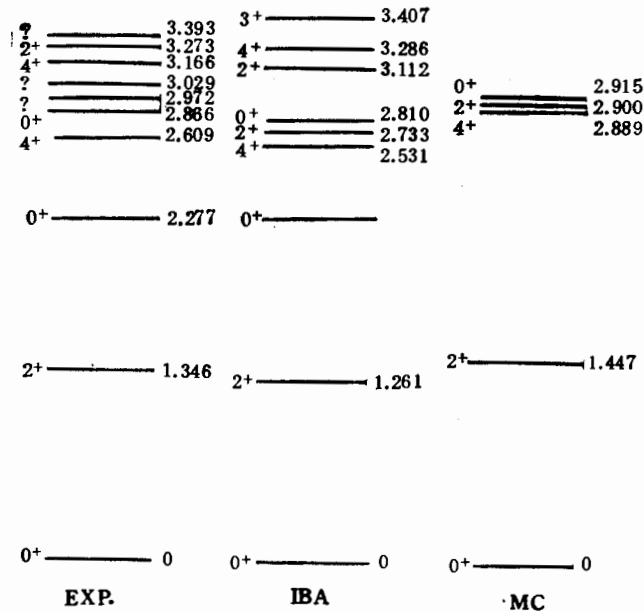


图 3 ^{60}Ni 能谱的理论实验比较

图4 ^{62}Ni 能谱的理论实验比较图5 ^{64}Ni 能谱的理论实验比较

$$T(E2) = \alpha_2[d^+s + s^+\tilde{d}] + \beta_2[d^+\otimes\tilde{d}]^{(2)}.$$

这里 α_2, β_2 为 $E2$ 跃迁唯象参数, 此处的 β_2 与前文表示四极形的参数 β_2 是完全不同

的。

在玻色子取定后,利用 PHINT 程序^[19]使计算所得能谱与输入实验能谱获得最佳符合,以此确定参数 ϵ'' , a_0 , a_1 , a_2 。在 PHINT 计算所得波函数基础上,拟合两个已知的 $B(E2)$ 实验数据,定出 α_2 , β_2 。然后以此计算其他的 $B(E2)$ 数值。

对于 ^{58}Ni , 计算结果不能与实验值很好符合,即使人为地改变玻色子数也是如此。 ^{58}Ni 第四激发态 (2.901MeV) 是 1^+ 态,这是 IBA 计算无法得到的。对于 $^{60,62,64}\text{Ni}$, 能谱符合情况较好,结果见图 3、4、5。图中所表数字及 ϵ'' , a_0 , a_1 , a_2 均以 MeV 为单位。实验能谱数据取自文献 [2]。

电四极跃迁 $B(E2)$ 实验数据^[3],对 ^{64}Ni 只给出 $B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$ 一个值,新的实验数据至今尚未见报道。因此, $B(E2)$ 计算只限于与 $^{60,62}\text{Ni}$ 两个核的实验数据比较。结果见表 2、3。

表 2 ^{60}Ni $B(E2)$ IBA 计算值与实验值比较

$J_i^{\pi_i}$	$J_f^{\pi_f}$	EXP. ^[3] (W.u.)	IBA(W.u.)
2_1^+	0_1^+	13.0*	13.0
2_2^+	0_1^+	0.21*	0.21
2_3^+	2_1^+	70.0	25.8
4_1^+	2_1^+	5.3	20.5
4_2^+	2_2^+	0.18	0.31
3_1^+	2_1^+	16.0	9.4
3_2^+	2_1^+	0.05	0.19

* 用于确定 α_2, β_2 . $\alpha_2 = 2.106$, $\beta_2 = -2.689$

表 3 ^{62}Ni $B(E2)$ IBA 计算值与实验值比较

$J_i^{\pi_i}$	$J_f^{\pi_f}$	EXP. ^[3] (W.u.)	IBA(W.u.)
2_1^+	0_1^+	12.0*	12.0
2_2^+	0_1^+	0.6*	0.6
4_1^+	2_1^+	18.0	16.5
2_3^+	4_1^+	0.007	0.048
4_2^+	2_1^+	1.5	1.3
4_3^+	2_2^+	7.0	2.8
2_4^+	4_1^+	13.0	11.1
2_5^+	0_1^+	6.0×10^{-3}	10.0×10^{-3}

* 用于确定 α_2, β_2 . $\alpha_2 = 2.218$, $\beta_2 = -3.728$

微观计算方面,仅按文献 [20] 的做法,单极对力强度 G_n 、 G_p 皆取自文献 [21]。未考虑单粒子运动和集体振荡的耦合^[22]。计算所得 $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ 的总玻色子数分别为 3.45, 4.01, 4.68, 4.21, 接近唯象选取值 3、4、5、4。微观计算其激发能谱,除第一激发态 2_1^+ 外,其余与实验值有较大差别 (见图 3、4、5)。这主要因为该微观方法本身未计入单粒子运动与集体振荡耦合,不足以体现较复杂的非谱效应,只局限于 $U(5)$ 型造成的。微观计算结果还给出了电跃迁参数 α_2 , β_2 的数值,以此计算出的 $B(E2)$ 远比 IBA 唯象计算结果

差。这是因为与能量本征值相比,电磁跃迁几率更敏感地依赖于波函数的准确性。

四、结论与讨论

本文在同一能量下,利用质子非弹性散射系统地得到了 $^{58,60,62,64}\text{Ni}2^+$ 态的四极形变参数,证实了其随中子数先增大后减小的趋势;唯象选取的 $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ IBA 总玻色子数分别为3、4、5、4,表明其集体性先增强后减弱。这两者是一致的。另外,IBA 计算所得能谱($^{60,62,64}\text{Ni}$)和 $B(E2)$ 比率($^{60,62}\text{Ni}$)与实验值符合较好。说明在镍区以中子数40作为中子闭壳是合理的,用两个玻色子代表质子从 $f_{7/2}$ 中的对激发是可取的。值得注意的是,QPRPA 微观计算所得总玻色子数与唯象选取值接近,但其计算所得能谱,尤其 $B(E2)$ 比率偏离实验值较大,表明单粒子运动与集体振荡的耦合不能忽略。对于镍区的IBA 计算,以往工作中未见到,我们将IBA 用于这些较轻的核是一个初步尝试。至于 ^{58}Ni 符合不好,可能由于单粒子激发耦合效应较强,上述简单图象不适用所致。

感谢本所迴旋加速器运行人员对本文实验工作的支持,感谢魏永钦、王秋玉、胡妙君等同志提供浓缩镍同位素靶。

参 考 文 献

- [1] Y. K. Gambir, et al., *Phys. Rev.*, **161**(1967), 1125.
- [2] NDS **48**(1986), 252.
28(1979), 206.
26(1979), 30.
- [3] P. M. Endt, *Atom. Dat. Nucl. Dat. Tab.*, **23**(1979), 547.
- [4] M. Sakai, *Atom. Dat. & Nucl. Dat. Tab.*, **31**(1984), 400.
- [5] A. A. Cowley, et al., *Nucl. Phys.*, **A229**(1974), 256.
- [6] B. C. Joles, *Nucl. Phys.*, **A123**(1969), 54.
- [7] S. F. Eccles, et al., *Phys. Rev.*, **141**(1966), 1067.
- [8] D. Beston, *Nucl. Phys.*, **A123**(1969), 594.
- [9] F. D. Becchetti, G. W. Greenless, *Phys. Rev.*, **182**(1969), 1190.
- [10] F. Iachello, A. Arima, *Phys. Lett.*, **53B**(1974), 309.
- [11] D. H. Feng, et al., Proceedings of the Workshop on Bosons in Nuclei, Drexel, USA, 1983.
- [12] P. O. Lipas et al., *Phys. Scr.*, **27**(1983), 8.
- [13] Ha Yiming, Fu Deji, *Chn. J. Nucl. Phys.*, **12**(1990), 151.
- [14] Nelson Stein, J. W. Sunier C. W. Woods, *Phys. Rev. Lett.*, **38**(1977), 587.
- [15] W. P. Alford, et al., *Nucl. Phys.*, **A243**(1975), 269.
- [16] W. Darcy, R. Chapman, S. Hinds, *Nucl. Phys.*, **A179**(1970), 253.
- [17] H. Nann, F. W. Benenson, *Phys. Rev.*, **C10**(1974), 1880.
- [18] F. Iachello, Nuclear Structure, Plenum Press, New York, 1981.
- [19] O. Scholten, The Program Package PHINT, KVI Report **63**(1979), 1.
- [20] 傅德基,潘为平,高能物理与核物理, **11**(1987), 522.
- [21] L. S. Kisslinger, R. A. Sorenson, *Rev. Mod. Phys.*, **35**(1963), 910.
- [22] I. Hamamoto, P. Siemems, *Nucl. Phys.*, **A269**(1976), 199.

**Study of Low-Lying States in $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ by (p,p')
Scattering at $E_p=25.1$ MeV for 2_1^+ State and IBA
Analysis for Spectra and $B(E2)$ Ratios**

ZHANG JIE JIANG DAZHEN YANG JINQING ZHANG YINGJI
HE JIANHUA FU DEJI CHENG XIAOWU
(*Shanghai Institute of Nuclear Research, Academia Sinica 201800*)

ABSTRACT

The deformation parameters of the first excited 2_1^+ states in $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ are obtained by comparing the experimental inelastic (p, p') differential cross-section with the prediction of zero range DWBA. IBA is used to study the energy spectrum and $B(E2)$ ratio of low-lying states in these nickel isotopes. The microscopic calculation of IBA phenomenological parameters are carried out as well.