

(p,n)和(p,2n)反应激发函数的系统学研究

马引群 庄友祥

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

张正军

(西北大学物理系 西安 710069)

摘要 从普朗克(Planck)黑体辐射公式和实验测量数据出发,采用唯象的方法提出了包含两个可调参量,入射质子能量从阈能到150 MeV,靶核质量数在 $44 < A < 239$ 和 $44 < A < 242$ 范围内分别能够较好地描述(p,n)和(p,2n)反应激发函数的系统学经验公式.

关键词 带电粒子核反应 实验数据 (p,n)和(p,2n)反应 系统学

1 引言

随着核科学与技术的不断发展,带电粒子核反应数据的应用领域日益广泛,而带电粒子核反应已有的实验数据及激发函数远远满足不了理论研究及实用方面的需要,这就要求不断地获取这方面的核数据,对于未测量的能区及靶核有一些可以通过理论模型和系统学预言加以解决.用理论模型计算比较复杂,输入参数多,对使用者来说调整起来有一定的难度,而系统学方法则方便和简单得多.随着带电粒子核反应数据的不断积累,研究带电粒子系统学已成为可能.目前国内外对带电粒子系统学的研究还很少,尤其是对有些特定反应道系统学的研究,如(p,n)反应,至今尚未见到这方面的报道,只是Letaw^[1]、Pearstein^[2]和申庆彪^[3]等人做了中能质子去弹截面的系统学工作.

本工作在普朗克黑体辐射公式的启发下,通过对大量带电粒子核反应数据的观察和分析,发现带电粒子引起核反应出射中子反应道的激发函数曲线与黑体辐射曲线十分相似,我们知道普朗克黑体辐射公式是描述温度为 T 的绝对黑体处于热平衡条件下,在单位时间内向外界辐射(发射)能量为 $h\nu$ (单位为MeV)的电磁波强度(几率)的.而在核反应中,据玻尔假说入射粒子与靶核形成复合核,复合核在一定核温度下发射粒子.描述复合

核衰变的理论是蒸发模型(这里暂不考虑其它核反应机制),这里将温度为 T 的绝对黑体的电磁辐射与复合核在一定核温度下的衰变过程进行类比^[4],考虑到两种物理现象的本质区别,在综合分析大量实验数据的基础上对普朗克公式进行修正,提出了能较好描述 (p,n) 和 $(p,2n)$ 反应截面的系统学经验公式. 系统学公式的适用范围是入射粒子能量从阈能到 150 MeV,靶核质量数使用范围对于 (p,n) 反应为 $44 < A < 239$, 对于 $(p,2n)$ 反应为 $44 < A < 243$.

2 (p,n) 反应激发函数的系统学

2.1 (p,n) 反应激发函数的经验公式

在普朗克黑体辐射规律的公式和 (p,n) 反应实验数据基础上,得出描述 (p,n) 反应激发函数曲线的经验公式为

$$\sigma_{p,n}(E) = \frac{C_0 (E - E_{th})^3}{e^{\beta_0 (E - E_{th})} - 1} \prod_{i=1}^6 \beta_i, \quad (1)$$

$$\text{其中, } \beta_0 = E^{-C_1}, \beta_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{C_2}{E - E_{th}}\right)^2}, \beta_2 = \frac{1}{1 - \sin(E - E_{th})^{C_3}}, \beta_3 = 1 - C_4 e^{(-C_5 |E - 25|^{C_5})},$$

$$\beta_4 = 1 - C_6 e^{(-C_7 |E - 38|)}, \beta_5 = e^{\left(\frac{E}{25}\right)^{C_8}}, \beta_6 = e^{\left(\frac{E}{120}\right)^{C_9}}.$$

$$\text{对于 } (p,n) \text{ 反应, } C_1 = \begin{cases} 0.3669 / A^{1/2} & \text{当 } A > 51 \text{ 时} \\ 0.2644 & \end{cases}$$

$$C_3 = 0.08907, C_4 = 0.7683, C_5 = 0.000008299, C_6 = 0.6985, C_7 = 0.06811, C_8 = 1.6772, C_9 = 7.5.$$

上述公式中 E 为入射质子在实验室的能量,单位为 MeV; E_{th} 为 (p,n) 反应阈能,单位为 MeV; C_0, C_2 为两个可调参量.

2.2 C_0, C_2 两个可调参量的获取

为了得到两个可调参量 C_0, C_2 的值,我们从 EXFOR 实验数据库中收集了 25 个核的 (p,n) 反应激发函数实验数据,并对收集到的数据进行了初步评价,当各家实验数据存在较大分歧时,把最新实验数据的权取得大一些,即认为最新的实验数据更可靠.

这里定义

$$\chi^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_{thc}(E, i) - \sigma_{exp}(E, i)}{\Delta \sigma_{exp}(E, i)} \right)^2, \quad (2)$$

其中, n 为实验数据的个数, $\sigma_{thc}(E, i)$ 为反应截面经验公式的理论计算值, $\sigma_{exp}(E, i)$ 和 $\Delta \sigma_{exp}$

(E, i)分别为反应截面的实验值及误差值. 定义(2)式的目的是通过经验公式(1)去拟合实验数据获取 C_0, C_2 值. 为此, 我们用 FORTRAN 语言编写了自动寻找 C_0, C_2 值的程序, 使得 C_0, C_2 值满足 χ^2 最小值为拟合激发曲线的最佳值. 这样得出的 C_0, C_2 值称为特适参数.

2.3 (p, n)反应特适参数 C_0, C_2 的系统学

我们不仅关心所提出的经验公式 $\sigma_{p,n}(E)$ 表达式是否能够很好描述实验数据, 而且更关心其中所含的可调参量 C_0, C_2 是否有系统学规律. 只有当特适参数有系统学规律时, 才能对那些没有实验数据核素的激发函数作出可靠的预言, 工作才有意义.

在文献 [4] 的基础上, 我们发现用 $\frac{N-Z}{A}$ (其中, N, Z, A 分别表示靶原子核的中子数、质子数及质量数) 作自变量, 特适参数 C_0 作为函数. 它们之间的系统学规律性比 $C_0 \sim A$ 之间的系统学规律性更强, 由此预言的激发曲线与实验曲线符合得更好, $C_2 \sim A$ 之间关系不变. 同样可以定义一个 χ^2 , 与 2.2 节方法相同, 可以得到 C_0 与 $(N-Z)/A$ 的系统学规律为

$$C_0 = \left(-0.009556 + 0.1665 \frac{N-Z}{A} \right) \left(1 - 0.3e^{-1800 \left(\frac{N-Z}{A} - 0.185 \right)^2} \right), \quad (3)$$

从以上系统学研究得出的参数 C_0 称为普适参数. 图 1(a) 给出了特适参数与普适参数之间的拟合情况.

3 (p, 2n)反应激发函数的系统学

3.1 (p, 2n)激发函数的经验公式

同 2.1 节, 我们提出描述 (p, 2n) 反应截面的经验公式为

$$\sigma_{p,2n}(E) = \sigma_1(E) + \sigma_2(E) \delta_{E, C_5}, \quad (4)$$

$$\text{其中, } \delta_{E, C_5} = \begin{cases} 0, & E = C_5 \\ 1, & E \neq C_5 \end{cases}, \quad \sigma_1(E) = \frac{C_0(E - E_{th})^3}{e^{\beta_0(E - E_{th})} - 1} \beta_1 \beta_2 \beta_3,$$

$$\sigma_2(E) = \sigma_1(C_5) (C_5 / E)^{C_6} \beta_4, \quad \beta_0 = E^{-C_1 / A^{1/12}}, \quad \beta_1 = e^{-C_2 \left| \frac{C_7 - E}{E} \right|}, \quad \beta_2 = e^{(E / C_5)^{C_3}},$$

$$\beta_3 = \frac{1}{1 + C_4 e^{30(E - C_5)}}, \quad \beta_4 = \frac{1}{1 + C_4 e^{30(C_5 - E)}}.$$

其中, $C_1 = 0.3669$, $C_4 = 0.000001$, $C_5 = 35 \text{ MeV}$, $C_6 = 1.5$, $C_7 = C_8 = 25 \text{ MeV}$.

$$C_2 \text{ 与靶核质量数 } A, \text{ 电荷数 } Z \text{ 有关, 即 } C_2(A, Z) = (3.9299e^{-120 \left| \frac{A-2Z}{A} - 0.2077 \right|} + \frac{0.5}{1 + e^{100000 \left(\frac{A-2Z}{A} - 0.1955 \right)}}) e^{-\left(\frac{A-2Z}{A} \right)^{52}}.$$

公式中 E 为入射质子在实验室的能量, E_{th} 为 (p, 2n) 反应阈能, 单位为 MeV; C_0, C_3 为两个可调参量.

3.2 C_0 、 C_3 两个可调参量的获取

从 EXFOR 实验数据库中收集了 22 个核的 (p, 2n) 反应激发函数实验数据, 并对收集到的数据进行了系统评价. 同 2.2 节一样, 还拟合出 22 个核的 C_0 、 C_3 值, 并称其为特适参数 (见表 1).

表1 实验数据拟合得到的特适参数 C_0 、 C_3

靶核	$\frac{N-Z}{A}$	E_{th}/MeV	C_0/bMeV^3	C_3
⁴⁵ Sc	0.06667	12.65	0.001599	1.6197
⁵² Cr	0.07692	16.74	0.004954	1.1619
⁵⁶ Fe	0.07143	15.72	0.002001	1.4576
⁵⁷ Fe	0.08772	13.22	0.009589	0.9589
⁶³ Cu	0.07936	13.5	0.004259	0.9698
⁶⁸ Zn	0.1176	12.16	0.03453	0.85
⁶⁹ Ga	0.1014	11.66	0.02352	0.7859
⁷⁶ Se	0.1053	15.15	0.01659	0.5786
⁷⁸ Se	0.1282	12.81	0.03198	0.7123
⁸⁸ Sr	0.1364	13.95	0.04139	0.5879
⁹³ Nb	0.1183	9.354	0.045	0.685
⁹⁶ Mo	0.1250	11.76	0.042	0.600
¹⁰⁹ Ag	0.1376	8.358	0.0485	0.685
¹¹¹ Cd	0.1351	11.81	0.04105	0.585
¹¹² Cd	0.1429	11.11	0.04384	0.7735
¹²⁴ Te	0.1613	11.51	0.05048	0.9695
¹⁸¹ Ta	0.1934	7.7	0.1298	0.9775
¹⁹⁷ Au	0.1979	8.2	0.1673	1.56
²⁰⁶ Pb	0.2039	11.62	0.08279	1.761
²⁰⁷ Pb	0.2077	11.23	0.06768	0.3592
²⁰⁹ Bi	0.2057	9.69	0.04989	2.8668
²⁴¹ Am	0.2116	10.12	0.001299	0.8855

3.3 (p, 2n) 反应特适参数 C_0 、 C_3 的系统学

对特适参数 C_0 、 C_3 经过仔细的系统学研究, 利用 2.2 节中提到的方法, 我们可得到特适参数 C_0 、 C_3 的系统学规律. 为方便起见, 令 $X = \frac{N-Z}{A}$, 则 C_0 、 C_3 与 X 的关系为

$$C_0 = \begin{cases} 0.002635e^{(20.485X + (\frac{0.06514}{X})^{20} - (\frac{0.08}{X})^5)}, & X < 0.19796 \\ 2.476935 - 11.7X, & X \geq 0.19796 \end{cases}; \quad (5)$$

$$C_3 = \begin{cases} 0.6057e^{(3.5|X - 0.1323| + 132|X - 0.1323|^{1.899})}, & X < 0.2055 \\ (260.7769 - 1253.8X) \left(1 - \frac{5.65X}{1 + 0.0000001e^{1000000(0.20775 - X)}} \right), & X \geq 0.2055 \end{cases}. \quad (6)$$

从以上系统学研究得出的参数 C_0 和 C_3 称为普适参数. 图 1(b)、(c) 给出了特适参数

与普适参数之间的拟合情况.

4 结果与讨论

利用本工作提出的系统学公式,可以预言入射质子能量从阈能到 150MeV 范围内 (p,n) 和 (p, 2n) 反应的激发函数. 对于 (p, n) 反应, 当靶核质量数在 $50 < A < 112$ 范围内时, 系统学公式计算的激发函数曲线与实验测量的激发曲线符合得很好, 如图 2(a)、(b) 所示. 靶核质量数在 $A < 50$ 和 $A > 112$ 范围内计算值与实验值分歧较大, 原因尚待进一步研究. 对于 (p, 2n) 反应, 系统学公式预言的激发曲线当靶核质量数在 $44 < A < 242$ (同时满足条件 $0.06665 < \frac{N-Z}{A} < 0.2117$) 范围内与实验测量的激发曲线符合得较好, 如图 2(c-f) 所示.

在本工作基础上, 还将进行 (p, 3n)、(d, n)、(d, 2n)、(α , n)、(α , 2n) 等反应的系统学研究. 另外, (p, n) 和 (p, 2n) 反应系统学公式将在评

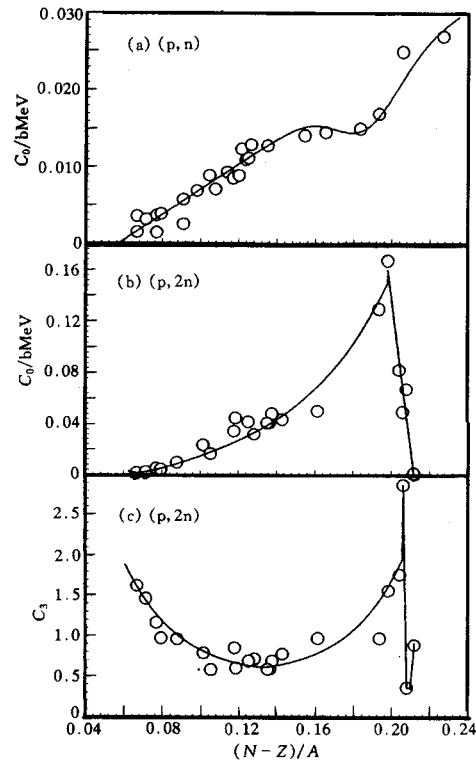
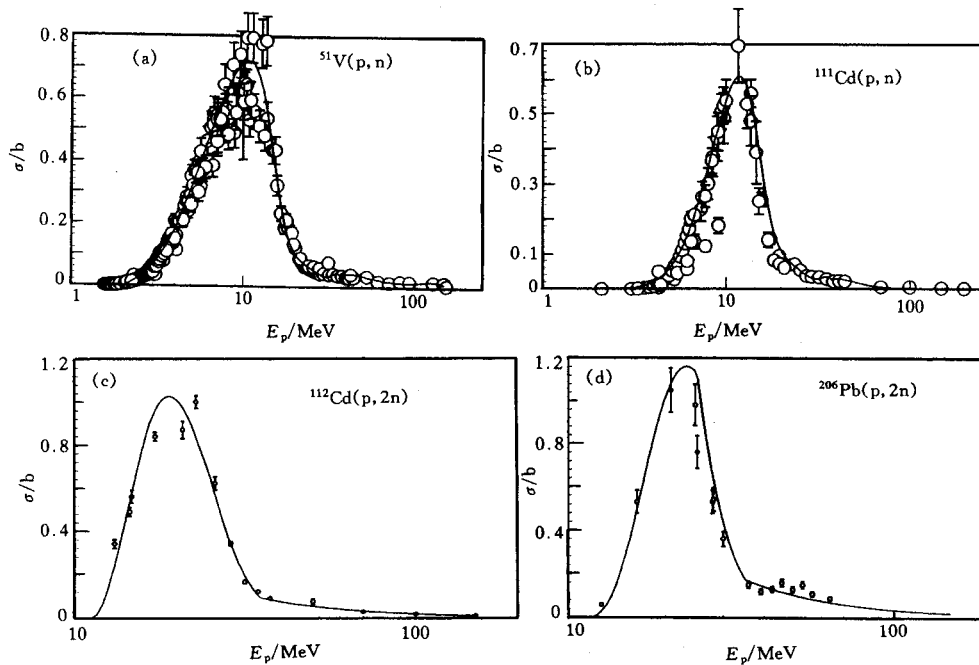


图 1 特适参数和普适参数之间的比较

○ 实验数据; — 普适参数.



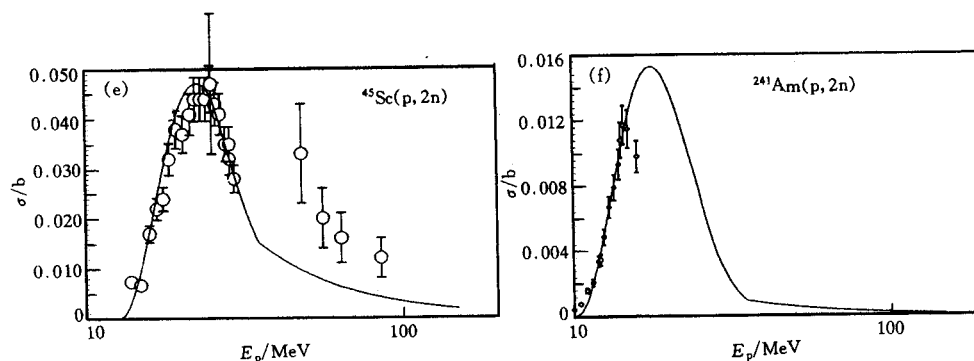


图 2 反应截面系统学预言值与实验值的比较

○ 实验数据; — 本工作系统学预言曲线.

价工作中得到应用和检验.

对与周德邻、赵志祥、卢涵林研究员进行多次有益的讨论,表示衷心的感谢.

参 考 文 献

- [1] John R. Letaw et al. The Astrophysical Journal Supplement Series., 1983, **51**:271—275
- [2] Pearlstein S. Astrophysical Journal, 1989, **346**:1049—1060
- [3] Shen Qingbiao. INDC (CPR)-020. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1991.
- [4] Ma Yinqun, Zhuang Youxiang. Atomic Energy Science and Technology (in chinese), 1997, **31**(6):493—498
(马引群, 庄友祥. 原子能科学技术, 1997, **31**(6): 493—498)

Systematics Research on (p,n) and (p,2n) Reaction Excitation Functions

Ma Yinqun Zhuang Youxiang

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Zhang Zhengjun

(Department of Physics, Northwest University, Xian 710069)

Abstract On the basis of Planck formula of black body radiation and experimental data, an empirical systematic formula with two adjustable parameters is presented. For incident proton energies from threshold to 150MeV and target masses in $44 < A < 239$ and $44 < A < 242$ region, this formula can describe (p,n) and (p,2n) reaction cross sections nicely.

Key words charged particle nuclear reaction, experimental data, (p,n) and (p,2n)