

用系统学研究 ADS 靶材料的质子反应裂变截面

解慧明^{1,2}, 李莉莎¹, 张正军¹, 孙秀泉¹

(1. 西北大学 物理学系, 陕西 西安 710069; 2. 西安中学, 陕西 西安 710003)

摘要:用系统学公式研究 ADS 靶材料的质子反应裂变截面, 旨在为核设计提供依据。首先在液滴模型、壳修正模型等相关的理论模型的基础上, 利用铅、铋这两个重要核材料质子裂变反应截面的实验数据得到了一系列的理论参数。基于所给出的一组最佳理论参数, 对无实验数据的能区裂变截面及其他重要核素的裂变截面进行了预言, 可知随着靶核的质子数 Z 和质量数 A 的减小, 裂变截面减小得很快。

关键词:裂变反应; ADS 靶材料; 液滴模型; 理论参数

中图分类号: O571.43⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-274 X (2003)02-0137-02

核能是一种高效洁净的能源。以能量密度比较, 裂变材料所蕴藏的能量比相同质量的煤高百万倍; 以废物量比较, 核电站所排放的总废物量为相同发电量的煤电站的几十万分之一, 其中只有不到 1% 是真正待处理的“废物”^[1]。

目前, 商业应用的核能系统还存在若干阻碍裂变能进一步发展的缺陷, 即高放射性废物的最终处理, 铀资源利用率不高和安全性等问题。虽然, 人们把最终解决能源问题的希望寄予核聚变能的应用, 但核聚变能的实际应用还有相当长的过程。近十余年来, 核科学界一直在寻求可以克服这些障碍的新技术路线。加速器驱动的次临界系统 ADS (Accelerator driven clean nuclear power system) 将成为目前商用核能系统与核聚变能系统间的过渡, 同时, ADS 系统还有嬗变核废料的能力^[1,2]。

洁净核能系统在嬗变核废料和增值核燃料方面的优点与效益, 已被国际核科技界所认同, 并被多个国家和地区所重视。可选作 ADS 靶材料的核素为重金属元素。在中高能质子轰击下, 会发生裂变反应。裂变反应会改变 ADS 靶发射中子的截面和能谱。所以, 裂变部分不能被忽略。到目前为止, 已经积累了大量裂变现象的实验数据, 提出了各种模型理论来解释这些实验现象, 但还缺乏比较完整的定量分析理论。几种不同的, 甚至是相互矛盾的模型还同时被

采用着。如液滴模型和壳修正模型, 一个是宏观模型, 而另一个却是微观模型。

本文通过相关的理论模型利用 Pb, Bi 等已有的实验数据确定一系列参数, 进而对无实验数据的 HgW 等的裂变截面进行预言。由于通常情况下发生三分裂和四分裂的几率很小, 计算的质子入射能小于 250 MeV, 因此本工作中主要考虑两分裂的裂变现象。

1 理论模型及参数

利用系统学公式对质子入射重金属靶核裂变反应进行研究, 裂变截面 $\sigma_{p,f}$ 由复合核形成截面 σ_c , 裂变宽度 Γ_f , 中子发射宽度 Γ_n 相关的公式给出

$$\sigma_{p,f} = \sigma_c \frac{\Gamma_f}{\Gamma_f + \Gamma_n}, \quad (1)$$

$$\Gamma_f(E, A) = \frac{1}{2\pi\rho(E, A)} \cdot \int_0^\infty \frac{\rho_f(\epsilon, A, Z)d\epsilon}{1 + \exp\left[\frac{2\pi}{\hbar\omega}(V_f + \epsilon - E)\right]}, \quad (2)$$

$$\Gamma_n(E, A) = M_G \int_0^{\epsilon - S_n} \epsilon \rho(E - \epsilon - S_n^A, A - 1, Z) d\epsilon. \quad (3)$$

式中: $\hbar\omega$ 是裂变位垒曲率, 作为可调参数, 逆截面常

收稿日期: 2002-12-18

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G199022603)

作者简介: 解慧明(1966-), 女, 山西运城人, 西北大学硕士生, 西安中学高级教师, 从事核理论与计算核物理的研究。

数取 $M_G = 1.414\text{MeV}^{-1}$; S_n^A 是中子结合能。

单峰位垒高度 V_f 由液滴模型给出

$$V_f = 0.83(1 - 0.0195Z^2/A)^3 a_n A^{2/3}. \quad (4)$$

液滴模型参数 = 15.764MeV, $\rho(U, A, Z)$ 是复合核能级密度, $\rho_f(U, A, Z)$ 为鞍点能级密度, 能级密度公式取 Cameron 公式^①

$$\rho(U, A, Z) = \begin{cases} \frac{1}{T} \exp\left[-\frac{U-U_0}{T}\right], & U \leq U_x + \Delta \\ \frac{\exp[2\sqrt{aU_x}]}{12\sqrt{2}\sigma U_x (aU_x)^{1/4}}, & U > U_x + \Delta. \end{cases} \quad (5)$$

其中: U 是激发能; Δ 为对修正, 且

$$\Delta = P(Z) + P(N), N = A - Z \quad (6)$$

$$U_x = 2.5 + \frac{150}{A}, \quad (7)$$

$$U_0 = U - \Delta, \quad (8)$$

$$\sigma^2 = \begin{cases} 0.0888(aU_x)^{1/2} A^{2/3}, & U \geq U_x + \Delta \\ 0.0888(aU_x)^{1/2} A^{2/3}, & U \leq U_x + \Delta \end{cases} \quad (9)$$

$$U_0 = U - \Delta +$$

$$T \left[\ln \left(\frac{12\sqrt{2}\sigma U_x (aU_x)^{1/4}}{T} \right) - 2\sqrt{aU_x} \right]. \quad (10)$$

a 为能级密度参数, 形式如下: 对复合核

$$a_n = a_{n0} + a_{n1}(1 + a_{n2}E)^{a_{n3}}, \quad (11)$$

对鞍点态

$$a_f = a_{f0} + a_{f1}(1 + a_{f2}E)^{a_{f3}}. \quad (12)$$

其中, $\hbar\omega, a_{n0}, a_{n1}, a_{n2}, a_{n3}, a_{f0}, a_{f1}, a_{f2}, a_{f3}, a_{f4}$ 为可调参数, 由于核力及裂变反应理论不是十分成熟, 理论参数值给出一个合理变化范围。铅、铋是两个重要的核材料, 质子裂变反应截面有一些实验数据(取自 EXFOR 实验数据库), 利用这些实验数据对理论参数进行确定。给出一组最佳理论参数之后, 用以预言无实验数据的能区裂变截面, 并对其他重要核素的裂变截面进行了预言。

2 结果分析

在 300MeV 以下找到 $p+^{208}\text{Pb}$, $P+^{209}\text{Bi}$ 反应的裂变实验数据(取自 EXFOR 实验数据库)。拟合实验数据得到参数如下表: 用以上参数对质子入射 ^{202}Hg 和 ^{184}W 进行预言, 得到的结果如图 1 所示, 从图上可以看到, 随着靶核的质子数 Z 和质量数 A 的减小, 裂变截面减小得很快。在质子能量为 300 MeV 时, $p+^{184}\text{W}$ 反应的裂变截面只有 30 几个 mb ($1\text{b}=10^{-28}\text{m}^2$), 不到反应截面的 2%, 而 Pb, Bi 以上的材料裂变截面相对很大。按照以上趋势, 对 Al, Fe 等重要的核材料在质子能量为 300 MeV 以下时可不计裂变机制。

表 1 裂变反应理论参数

Tab. 1 The theoretical parameter of fission reaction

$\hbar\omega/\text{MeV}$	a_{n0}	a_{n1}	a_{n2}	a_{n3}	a_{f0}	a_{f1}	a_{f2}	a_{f3}
0.002	5.214	0.007	0.024	1.044	5.398	0.003	-0.006	0.971

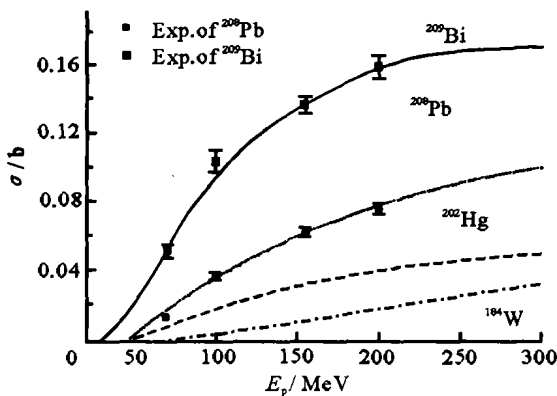


图 1 质子入射 ^{208}Pb , ^{209}Bi , ^{202}Hg , ^{184}W 的裂变截面

Fig. 1 The fission cross sections of proton ^{208}Pb , ^{209}Bi , ^{202}Hg , ^{184}W

3 结论

从以上的结果及分析可知, 随着靶核的质子数 Z 和质量数 A 的减小, 裂变截面减小得很快。例如质子能量为 300MeV 时 $p+^{184}\text{W}$ 反应的裂变截面只有 30 几个 mb, 不到反应截面的 2%, 而 Pb, Bi 以上的裂变截面相对很大。按照以上趋势, 可选作 ADS 靶材料的 Al, Fe 等重要的核材料的质子裂变截面在 300MeV 以下可不计裂变机制, 即裂变反应对改变 ADS 靶发射中子的截面和能谱的作用可以被忽略, 而 Pb, Bi 以上的核材料在中高能质子轰击下, 裂变部分不能被忽略。

(下转第 142 页)

① 王书暖. 核反应理论讲义. 中国原子能科学研究院核工业研究生部.

- [2] DUHAMEL D, HOTMANN H. Split-radix FFT algorithm[J]. Electronics Letters, 1984, 20(1): 14-16.
- [3] WINOGRAD S. On computing the discrete Fourier transform Proc [J]. Nat Acad Sci USA, 1976, (4): 1 005-1 006.
- [4] 胡广书. 数字信号处理——理论算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 82-84.
- [5] 张彦仲, 沈乃汉. 快速傅立叶变换及沃尔什变换[M]. 北京: 航空工业出版社, 1989.
- [6] 王 冰, 田东涛, 董庆彦, 等. 基于对称特性的快速傅立叶变换算法[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2001, 31(S): 281-284.

(编辑 曹大刚)

A new algorithm for fast Fourier transform based on 3 levels of symmetry of Fourier kernel

WANG Bing¹, DONG Qing-yan², TIAN Lai-ke², YAO He-bao²

(1. Department of Computer Science, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: After analysing the character of Fourier transform, using 3 level symmetry of Fourier Kernel as a new algorithm for fast Fourier transform was proposed. The principle of the algorithm is simple and it only needs to calculate 1/8 proportion of number of Fourier Kernel. It is also easy for computer program. The number of N might be any whole number in the algorithm. The method of computer program is also given. Using the algorithm and DFT algorithm the result is given for $x(n) = e^{-t}$. It shows that the speed for Fourier transform increases more than 4 times.

Key words: image processing; fast Fourier transform; algorithm; program

(上接第 138 页)

参考文献:

- [1] 丁大钊. 未来核能利用的方案探讨——加速器驱动放射性洁净核能系统[A]. 赵志祥. 加速器驱动放射性洁净核能系统概念研究论文集[C]. 北京: 原子能出版社, 2000.
- [2] 丁大钊. 关于加速器驱动洁净核能系统原理验证装置的几点考虑[A]. 赵志祥. 加速器驱动放射性洁净核能系统概念研究论文集[C]. 北京: 原子能出版社, 2000. 53.

(编辑 曹大刚)

A study of proton fission reaction cross sections of the target materials used in ADS with system theory

XIE Hui-ming^{1,2}, LI Li-sha¹, ZHANG Zheng-jun¹, SUN Xiu-Quan¹

(1. Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. XIAN Middle School, Xi'an 710003, China)

Abstract: Based on the study of proton fission reaction cross sections of the target material used in the ADS (accelerator driven clean nuclear power system) with system theory, the result can offer the basic parameters of proton induced fission cross sections for nuclear design. The fission cross sections in energy regions without experimental data and those of other important nuclear materials have been predicted by making use of the theoretical model such as the liquid drop model and the experimental data of proton fission reaction cross sections of Pb and Bi. The result indicated that the fission cross section has a deeply decrease with the decrease of the target material's A and Z.

Key words: fission reaction; ADS target material; the liquid drop model; theoretical parameter