

原子核裂变机制的理论和实验研究

胡济民 包尚联 樊铁栓 钟云霄 刘金泉

(北京大学重离子物理研究所, 北京大学技术物理系 北京 100871)

摘要 简要介绍了关于核裂变机制的理论和实验研究的进展和进一步的设想.

关键词 核裂变机制 多通道理论 中子能谱测量

1 引言

经过对核裂变现象五十余年的理论和实验研究,人们积累了大量的实验数据,并建立和发展了若干理论模型,这些工作已经成为人类开发和利用核能资源的重要基础.但是,对裂变这种大形变的集体运动机制的定量研究,仍然是核物理基础研究的一个难点.另一方面,与核能利用相伴而生的大量放射性废物的适当处理已是一个涉及到核能事业本身存在和发展的具有挑战性的问题,而长寿命放射性废物主要由裂变产物组成,所以如何充分利用和妥善解决核废料的课题又对锕系元素的裂变机制和裂变性质的基础研究提出了新的要求,也带来了新的机遇.

自 80 年代中期以来,围绕低能裂变的一系列重要问题,从实验和理论两方面一直开展工作,并取得了一些进展.

2 自发裂变的实验研究

80 年代初,欧共体 Geel 所的 H. H. Knitter 小组首次成功地把双屏栅电离室应用到冷裂变和冷碎片的实验研究中,并得到了一些新数据和新现象^[1].包尚联等人在国内首先研制了流气式和封闭式双屏栅电离室.将流气式电离室与基于 IBM 微机的多参数数据获取系统相结合,可用来获取裂变碎片的质量分布、动能分布及其它裂变参数.与半导体探测器相比较,用双屏栅电离室测量裂变碎片和重离子具有许多优点:探测效率高;能量分辨率好;由研究入射粒子在气

体中的电离性能,可以方便地得到裂变碎片的多种参数;由于电荷收集不完全而引起的脉冲高度亏损较小;若使用流气式,电离室的辐射损伤可以忽略;用这种电离室和多参数数据获取系统进行 α 源绝对强度测量,有效地降低了由背散射和自吸收引起的误差,使测量精度达到了 0.3%.使用双屏栅电离室裂变碎片测量系统,已完成了对 ^{252}Cf 自发裂变碎片性质的多参数关联测量,获取了碎片质量分布、平均总动能分布及单个碎片动能分布等数据.

坚持对超铀元素自发裂变的积分中子能谱进行实验研究. ^{252}Cf 自发裂变中子能谱是国际上公认的一级标准能谱,对它进行准确测定,无论对应用还是理论研究均具有重要意义.而该能谱低能端(低于 500keV)数据存在的分歧,一直是国际上十分关注的问题.我们从 1987 年开始用飞行时间法测量了 ^{252}Cf 裂变低能端中子能谱(下限为 100keV),对影响谱形的各种因素进行了系统分析.为了更好地理解裂变中子的发射机制,首次测量了 ^{252}Cf 的单个碎片在 0° 和 180° 的角分布,并对散射中子和散射 γ 射线的本底修正作了较详尽的研究,改进了在低能端裂变中子谱测量中对散射影响的修正,使实验结果具有较好的测量精度.如没有未知的系统误差,则估计可能有 10% 的非平衡中子发射(即在碎片分裂和加速过程中的中子发射)^[2,3].另外,与俄国 V. G. Khlopin 镭研究所合作,进行了 ^{246}Cm 自发裂变的积分中子谱的测量工作.实验结果表明,在 500keV 以下的低能

端, 中子产额系统地高出 Maxwell 分布约 20%。详细而准确地测定裂变瞬发中子谱, 不仅对裂变能的充分利用有实际意义, 而且对于中子发射机制的理论研究, 也会起到重要的推动作用。

3 低能裂变的理论研究

十几年来, 裂变机制的理论研究主要进行了两方面的工作: (1) 穿越裂变位垒动力学过程的研究; (2) 裂变后现象(碎片质量分布、动能分布和中子数分布)及其关联理论研究。

3.1 穿越裂变位垒的动力学过程研究

关于裂变动力学过程的工作主要集中于裂变输运理论研究。胡济民等人早在 80 年代初首先得出普遍的多维 Kramers 公式^[4]。为了比较不同维数对裂变速率的影响, 最近用多维 Kramers 公式计算了裂变速率, 发现裂变速率随着维数增大而适当增大, 不同的形变参量以及不同的计算质量和粘滞系数的方法对计算核裂变速率的影响不大^[5]。用布朗运动模型研究核裂变问题可以归结为解 Fokker-Plank 方程(简称 F-P 方程)。但由于解 F-P 方程的困难, 曾用简化的 Smoluchowski 方程(简称 Smo 方程)做了一系列穿越位垒几率的计算。钟云霄和胡济民还曾用 Monte Carlo 方法直接解朗之万方程, 计算了质量系数随形变参量变化的二维核裂变问题, 得到了裂变时的动能分布和质量分布^[6]。最近又发展了一种用变分法解 F-P 方程的方法, 计算了一维核裂变几率, 研究了 F-P 方程与 Smo 方程的关系, 为推导多维的质量系数和粘滞系数随形变参量变化具有交叉项的 Smo 方程和解位垒形式比较复杂的多维 F-P 方程打下基础^[7]。今后将进一步考虑核温度不为零及转动核的裂变几率的计算。

3.2 裂变的多通道理论研究

主要采用了多通道模型研究裂变后的各种现象。王福成和胡济民曾分析了大量低能裂变的放中子前碎片质量分布的数据, 建立

了一个系统的 5-Gauss 质量分布公式, 用以计算放中子前碎片质量分布, 利用双中心模型进行了裂变核在断点处的位能曲面计算, 得到断点附近有极小点与多通道理论的要求基本一致^[8]。

上述工作的主要缺点是只考虑了质量分布, 没有把各种裂变后现象联系起来。因此, 采用了 U. Brosa 等人^[9]把多通道模型和无规颈断裂理论相结合的想法后, 认为不同裂变通道对应不同的断前形状, 按如下几个步骤研究裂变后现象: (1) 首先确定各通道的断前形状; (2) 根据无规颈断裂理论和断前形状计算每一通道的碎片质量分布、动能分布和瞬发中子数分布; (3) 由拟合质量分布的实验数据得出各通道的分布概率; (4) 各通道叠加得出可与实验数据比较的平均总动能分布、平均瞬发中子数分布和单个碎片的动能分布等碎片性质^[10]。用这个模型, 系统地研究了 $^{232}\text{Th}(n, f)$ 、 $^{233}\text{U}(n, f)$ 、 $^{235}\text{U}(n, f)$ 、 $^{238}\text{U}(n, f)$ 、 $^{237}\text{Np}(n, f)$ 、 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 、 $^{240}\text{Pu}(n, f)$ 、 $^{241}\text{Pu}(n, f)$ 和 $^{242}\text{Pu}(n, f)$ 以及 ^{252}Cf 的自发裂变的裂变后现象, 入射中子能量的覆盖范围为 $E_n = 0 \sim 6.0 \text{ MeV}$ 。对不同的入射中子能量, 计算了这些裂变系统的出射碎片的质量分布、平均总动能分布和瞬发中子数分布, 由拟合实验的质量分布数据来确定各通道的分布概率, 对 $^{232}\text{Th}(n, f)$ 、 $^{233}\text{U}(n, f)$ 、 $^{235}\text{U}(n, f)$ 、 $^{238}\text{U}(n, f)$ 、 $^{239}\text{Pu}(n, f)$ 和 $^{241}\text{Pu}(n, f)$ 等裂变系统, 研究了各通道概率随激发能的变化规律。可应用这些规律对至今缺乏实验数据的裂变系统进行理论预言和计算, 如已计算了 ^{237}U 裂变碎片的质量分布、平均总动能分布和瞬发中子数分布^[11]。将进一步扩展对实验数据的理论分析, 改善断点模型中关于发射中子的理论计算以及对通道概率的理论分析。

参 考 文 献

- 1 Knitter H H, et al. Nucl. Phys. 1988 A245:307

(下转第 3 页)

个新的研究方向,已于 1994 年招收研究生. 在这个研究方向上建立了两个实验室:核医学物理和医学影像工程实验室,核药物化学实验室. 核医学物理和核药物化学是近年来国际上发展迅速的学科. 核医学物理和影像工程学方面的研究,集中在成像新的原理、方法、新工艺及集成更多更现代化技术于 MRI 和 NMI 设备并用于癌症的诊断、治疗和脑功能的研究等. 现在正在酝酿硼中子俘获治癌 (BNCT) 和功能 MRI 及应用研究的世界前沿的研究课题. 核药物化学已经在单克隆抗体的放射性标记于癌症的诊断、治疗进行了 10 多年的工作,现正开展 BNCT 的药物、中西医结合治疗癌症的药物研究开发工作.

重离子物理研究所既是基础研究的基地,也是培养人才的基地. 研究所有计划地培养中青年学术带头人,已经形成了一支老中青相结合的学术骨干队伍. 研究所把培养研究生放在重要的位置,一方面充实课程、努力提高教学质量,另一方面使学习与研究工作紧密结合,同时发挥研究所与国外很多优秀的科研单位有良好合作关系的优势,联合培

养博士研究生. 研究所也重视对在职人员的培养,积极为青年人的成长创造条件.

研究所积极开展与国内外有关单位的学术交流与合作研究,从而有力地促进了科研工作. 努力推行开放的运行模式,特别是注重提高开放层次,发展高水平的国内外合作. 充分利用北京大学学科种类多的优势,积极发展交叉学科,组织跨学科的科研项目. 这些措施活跃了研究所的学术思想,密切了研究所科研工作与国际前沿的联系,促进了科研水平的提高.

作为基础性研究所改革试点单位,将进一步改革人事制度,推动人员流动,招聘优秀人才,以便在流动与竞争中建设一支高水平的科研队伍. 九五期间,还要积极参加国家的一些重大科研项目,努力使科研工作上一个新水平. 要办好重离子物理开放实验室,进一步扩大开放度,提高开放水平,出一批具有国际先进水平的科研成果. 同时也要抓好应用性研究成果的转化,为国民经济的发展与人民健康水平的提高做出应有贡献.

(上接第 8 页)

- | | |
|---|---|
| 2 包尚联,刘金泉. CNIC-00890, PU-0006,北京:原子能出版社,1994年9月 | 7 钟云霄,胡济民. 高能物理与核物理,1994,18:949 |
| 3 包尚联,刘金泉. CNIC-00897, PU-0007,北京:原子能出版社,1994年10月 | 8 Wang Fucheng, Hu Jimin. J. Phys., G. Nucl. Part., 1989,15:829 |
| 4 胡济民,钟云霄. 高能物理与核物理,1980,4:368 | 9 Brosa U, et al. Phys. Repts., 1990,197:167 |
| 5 钟云霄,胡济民. 高能物理与核物理,1994,18:340 | 10 樊铁栓,胡济民,包尚联,高能物理与核物理,增刊 1994,18:55 |
| 6 Zhong Yunxiao, Hu Jimin, 50 Years with Nuclear Fission,1989,2:668 | 11 Fan Tieshuan, Hu Jimin, Bao Shangliang. Nucl. Phys., 1995,A519:161 |

Theoretical and Experimental Studies on Fission Mechanisms

Hu Jimin Bao Shangliang Fan Tieshuan Zhong Yunxiao Liu Jinqun

(Institute for Heavy Ion Physics, Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract The brief review for the advances and future plans of theoretical and experimental studies on the fission mechanisms is given.

Key Words fision mechanism multichannel fission theory neutron energy spectrum measurement