

角动量和温度对耗散裂变明显触发的影响*

叶 巍

(东南大学物理系 南京 210096)

摘要 对大量中重裂变系统($A > 160$)实验数据的分析表明:温度和角动量是触发裂变延迟效应的两个最基本条件. In 的数据揭示了大角动量条件对轻系统情形的重要性.

关键词 耗散裂变 触发 温度效应 角动量效应 轻系统

在低激发能时,统计模型能很好地解释实验数据,如断前粒子多重性等.但自从通过测量 ^{158}Er 核的激发函数发现增强的断前中子发射以来^[1],在各种裂变系统中,对裂变前的中子^[2]、轻带电粒子^[3]和 γ 射线的多重性^[4]的测量都表明在某一个特定的轰击能量,测量值都高于模型的估计.这种现象被认为是该模型没有考虑裂变延迟.因为随着激发能的增加,粒子的发射时间变短,有可能在核还没有裂变之前发射,造成裂变前粒子的增强发射.人们从实验和理论两个方面广泛研究了影响裂变延迟的因素以及如何提取裂变延迟时间,估计核的粘滞系数大小等.目前,实验上已积累了大量的实验数据.在理论方面,最早是 Kramers^[5]视核的裂变为系统通过裂变位垒的扩散过程,随后许多作者发现裂变要达到它的准稳态值需要一段暂态时间^[6-10],并用考虑了核粘滞性的统计模型或直接用扩散模型来处理高激发能情况下的裂变过程.扩散模型预计了鞍点后发射是重系统($A \approx 200$)裂变前粒子发射的主要来源,对于轻系统($A \approx 110$)的情况,鞍点前蒸发的粒子则是主导部分^[11].这方面的知识表明,不管实验中裂变前粒子的来源区域,测量值对统计模型计算值的偏离都表明必须用考虑了核粘滞性的模型来处理裂变过程的粒子发射以及其他的实验可观测量.

在什么条件下必须用耗散裂变模型解释实验数据是本文将要研究的主题.到目前为止,除 Thoennessen 和 Bertsch^[12]从一条唯象的途径探讨了这个问题,并因此发现了耗散裂变存在阈值以外,还没有一个框架被建议用来研究这个主题.由于本文的目的是寻找支配耗散裂变触发的基本变量,因此我们采取的途径是从最基本的公式出发来分析实验数据.这样一方面可以得到一些基本的结果;另一方面是通过不借助一些中间的或由具

2000-08-24 收稿

* 东南大学基金(9207021099)资助

体的模型导出的公式,从而使获得的结果具有较高的可靠性.

下面首先介绍分析实验数据的思路,然后再对实验数据进行具体分析.我们的出发点是激发能公式,它的表达式为

$$E^* = E(T) + E_{\text{rot}}(L), \quad (1)$$

可以看出它由两部分组成:能量 $E(T)$ (下面称为热能)产生核温度;转动能 $E_{\text{rot}}(L)$ 是由于核的自旋,它没有用于蒸发粒子.这部分能量可以表示为

$$E_{\text{rot}}(L) = \frac{L(L+1)\hbar^2}{2I}, \quad (2)$$

这里 I 是系统的转动惯量,正比于 $A^{5/3}$,其中 A 是系统的质量数.

基于公式(1)可以获得一条理解裂变延迟效应在核裂变过程中起到重要作用(为叙述方便,以下简称为裂变延迟的触发)所需条件的途径.由于该效应是随着激发能的增加而变得明显起来的,因此它就必然受到上面的两部分能量的影响,即温度效应和角动量效应.温度能够影响粒子蒸发,角动量通过影响裂变位垒以及通过形成转动能的方式抑制了在一个固定的总激发能中热能 $E(T)$ 的大小,从而在粒子发射和裂变的竞争中起到了重

公式(2)表明对重系统由于其大的质量数,在总的激发能中,转动能只能占据极少的一部分,因此温度效应对耗散裂变的触发负责.此外,我们也注意到只有对于轻系统,而且当系统的自旋很大时,转动能才能在总的激发能中占有一个相当的比例,从而对触发耗散裂变产生可观的影响.

由于目前有关裂变延迟的数据主要集中在中重系统($A > 160$)区域,因此在表1中只列出了这些区域的由熔合反应形成的裂变系统.此外,对相同的反应系统,仅取最大束流能量的情况.原因是轰击能越高,通常热能和转动能也越高,因此温度效应和角动量效应

表中第一列是目前可以提供的最大的束流能量,下面依次是反应系统和它们所形成的复合核(CN);系统的激发能(E^*),系统的最大熔合角动量(L_{in})是用 Bass 模型^[13] 预计的,其裂变反应所对应的平均角动量(L_{out})取为最大熔合角动量的 2/3;系统的转动能(E_{rot})用的是转动有限力程模型^[14] 的计算值;最后两列是系统的热能 $E(T)$ 和转动能在总的激发能中的比例(E_{rot}/E^*).与文献[12]中分析的物理量不同,这里要分析的是系统的转动能和热能两个量.

从表1中可以看出形成的中重裂变系统的转动能在总的激发能中所占的比例都不大,基本上都不超过 1/5,对有的反应甚至不到 5%,如 $25.8\text{MeV } ^1_0\text{p} + ^{238}_{92}\text{U}$ 反应.原因是这些复合核都是通过轻的炮弹轰击重的靶形成的,因此造成被形成的复合系统的自旋比较小.再考虑到较重的核的质量数,由公式(2)可知,系统的转动能是非常小的.对表1中列出的复合核,热能 $E(T)$ 是激发能的主要部分,因此应对裂变延迟效应的触发负责.换句话说,表1中列出的大量实验数据表明,在中重系统($A > 160$)区域,高温度是触发裂变延迟效应的主要原因,而角动量则没有起到显著的作用.

另外,对公式(2)的分析已表明,要寻找显著的角动量效应,必须用具有大角动量的轻系统的数据.同重系统相比,这方面的数据非常稀少,但这并不会妨碍我们的分析,因为下面的两个实验能够提供充分的证据.目前实验上能够提供关于轻系统裂变延迟信息的是 $130\text{MeV } ^3_2\text{He} + ^{107}_{47}\text{Ag} \rightarrow ^{110,112}_{49}\text{In}^{[27]}$ 和 $890\text{MeV } ^{84}_{36}\text{Kr} + ^{27}_{13}\text{Al} \rightarrow ^{111}_{49}\text{In}^{[28]}$ 两个反应.对前一个反

应,复杂碎片激发函数的分析表明了复合核 $^{110,112}\text{In}$ 在裂变过程中不存在裂变延迟^[29]. 这个反应所对应的 L_{fin} 和 L_{ave} 分别是 $24\hbar$ 和 $16\hbar$,转动能是 3.5MeV ,这个值同热能 $E(T)$ 的值 135MeV 相比可以忽略,因此温度效应对 $^{110,112}\text{In}$ 核的裂变延迟的行为负责. 然而在后面一个形成复合核 ^{111}In 的反应中,增强的断前粒子发射表明了 ^{111}In 核在裂变过程中存在耗散. 对这个反应系统,裂变反应所对应的平均角动量是 $74\hbar$ ^[28],这么高的角动量产生的转动能占据了总激发能的 $1/3$.

表 1 分析的实验数据以及从中提取的物理量

E_{lab}	反应系统	CN	E^*	L_{fin}	L_{ave}	$E_{\text{rot}}(L)$	$E(T)$	E_{rot}/E^*
207	$^{16}\text{O} + ^{142}\text{Nd}$ ^[1]	^{158}Er	160	80	53	21	139	13%
122	$^{18}\text{O} + ^{150}\text{Sm}$ ^[15]	^{168}Yb	93	65	43	13	80	14%
165	$^{28}\text{Si} + ^{170}\text{Er}$ ^[15]	^{198}Pb	86	81	54	15	71	17%
160	$^{30}\text{Si} + ^{170}\text{Er}$ ^[15]	^{200}Pb	78	87	58	17	61	22%
124	$^{18}\text{O} + ^{192}\text{Os}$ ^[15]	^{210}Po	93	71	47	10	83	11%
138	$^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ ^[16]	^{251}Es	87	76	51	9	78	10%
124	$^{19}\text{F} + ^{159}\text{Tb}$ ^[16]	^{178}W	90	67	45	12	78	13%
135	$^{19}\text{F} + ^{169}\text{Tm}$ ^[16]	^{188}Pt	97	68	45	11	86	11%
25.6	$^1\text{p} + ^{238}\text{U}$ ^[17]	^{239}Np	31	11	7	0.2	31	0.6%
185	$^{28}\text{Si} + ^{164}\text{Er}$ ^[18]	^{192}Pb	93	79	53	15	78	16%
141	$^{19}\text{F} + ^{181}\text{Ta}$ ^[19]	^{200}Pb	98	70	47	11	87	11%
150	$^{24}\text{Mg} + ^{196}\text{Pt}$ ^[19]	^{220}Th	72	79	53	12	60	17%
140.5	$^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ ^[20]	^{213}Fr	98	64	43	8	90	8%
135	$^3\text{He} + ^{197}\text{Au}$ ^[21]	^{200}Tl	143	31	21	5	138	3.5%
135	$^3\text{He} + ^{208}\text{Pb}$ ^[21]	^{211}Po	139	32	21	5	134	3.7%
135	$^3\text{He} + ^{209}\text{Pb}$ ^[21]	^{212}At	138	32	21	5	133	3.8%
249	$^{40}\text{Ar} + ^{180}\text{Hf}$ ^[22]	^{220}Th	93	89	59	13	80	14%
1000	$^{40}\text{Ar} + ^{209}\text{Bi}$ ^[23]	^{240}Md	708	19	128	57	651	8%
257	$^{32}\text{S} + ^{184}\text{W}$ ^[24]	^{216}Th	137	104	69	21	116	15%
177	$^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ ^[25]	^{224}Th	118	81	54	12	69	15%
285	$^{32}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ ^[26]	^{240}Cf	138	116	78	23	115	17%

* 能量和角动量的单位分别是 MeV 和 \hbar .

我们注意到上面两个反应所形成的复合核 In 具有几乎一样的尺度和温度,但是核的自旋差别很大. 因此,由这两个反应所形成的复合核 In 的不同的裂变延迟行为提供了第一个明显的证明角动量影响裂变延迟触发的实验证据,同时也表明对轻系统,耗散裂变是否触发并不惟一地依赖温度条件,大角动量也是必不可少的条件. 因为这两个反应所形成的复合核都具有约 3.5MeV 这样的高温.

总之,对重、轻系统的裂变延迟数据的分析表明:耗散裂变的触发是由温度和角动量这两个基本因素决定的. 此外,它们也指出温度效应在重系统($A \approx 200$)触发裂变延迟中起了支配作用,而在轻系统(如 $A \approx 110$ 区域)的情况,角动量起到了关键作用.

最后简要地讨论一下本文的方法与文献[12]中的方法的关系. 我们注意到这两种分

析方法对同样一个主题提供了不同的但是互补的信息. 文献[12]的路线给出了裂变延迟的触发所必须满足的一个数值条件, 而本文的途径揭示了导致耗散裂变行为的基本变量, 这弥补了文献[12]中方法的不足. 此外, 本文的分析还指出了高角动量对轻系统耗散裂变触发的重要性.

参考文献(References)

- 1 Gavron A et al. Phys. Rev., 1987, **C35**:579—590
- 2 Hinde D J et al. Phys. Rev., 1992, **C45**:1229—1259
- 3 Lestone J P. Phys. Rev. Lett., 1993, **70**:2245—2248
- 4 Paul P, Thoennessen M. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 1994, **44**:65—108 and references therein
- 5 Kramers H A. Physica, 1940, **7**:284
- 6 Weidenmuller H A et al. Phys. Rev., 1984, **C29**:879—884
- 7 WU X Z et al. Commun. Theor. Phys., 1982, **1**:769—778
- 8 FENG R F et al. Chin. J. of Nucl. Phys., 1988, **A10**(1):16—23
- 9 LU Z D et al. Z. Phys., 1986, **A323**:477—484
- 10 Frobrich P et al. Nucl. Phys., 1993, **A556**:281—306
- 11 YE W et al. Z. Phys., 1997, **A359**:385—389
- 12 Thoennessen M, Bertsch G F. Phys. Rev. Lett., 1993, **71**:4303—4306
- 13 Bass R. Nucl. Phys., 1974, **A231**:45—63
- 14 Sierk A J. Phys. Rev., 1986, **C33**:2039—2045
- 15 Hinde D J et al. Nucl. Phys., 1986, **A452**:550—572; Nucl. Phys., 1989, **A502**:497c—514c
- 16 Newton J O et al. Nucl. Phys., 1988, **A483**:126—152
- 17 Strecker M et al. Phys. Rev., 1990, **C41**:2172—2187
- 18 Lestone J P et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **67**:1078—1081
- 19 Butsch R et al. Phys. Rev., 1990, **C41**:1530—1544; Phys. Rev., 1991, **C44**:1515—1527
- 20 Brinkmann K T et al. Phys. Rev., 1994, **C50**:309—316
- 21 Rubehn Th et al. Phys. Rev., 1996, **C54**:3062—3067
- 22 Rubchenya V A et al. Phys. Rev., 1998, **C58**:1587—1593
- 23 ZHENG J W et al. High Energy Phys. Nucl. Phys., 1999, **23**:946—953(in Chinese)
(郑纪文等. 高能物理与核物理, 1999, **23**:946—953)
- 24 Back B B et al. Phys. Rev., 1999, **C60**:044602 - 1—044602 - 7
- 25 Dioszegi I et al. Phys. Rev., 2000, **C61**:024613 - 1—024613 - 17
- 26 Shaw N P et al. Phys. Rev., 2000, **C61**:044612 - 1—044612 - 11
- 27 McMahan M A et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **54**:1995—1998
- 28 Nakagawa T et al. Nucl. Phys., 1995, **A583**:149—152
- 29 Moretto L G et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **74**:3557—3560

Effect of Angular Momentum and Temperature on the Onset of Dissipation Fission

YE Wei

(*Department of Physics, Southeast of University, Nanjing 210096, China*)

Abstract A new approach to studying the condition of onset of dissipation fission is put forward. Based on this approach, the analysis for a large body of data at intermediate and heavy fission system ($A > 160$) indicates that the angular momentum and temperature are the two most basic conditions needed to onset fission delay effect. The data of in nuclei suggests the importance of large angular momentum condition in the case of light fission system.

Key words dissipation fission, onset, temperature effect, angular momentum effect, light system

Received 24 August 2000

* Supported by the Foundation of Southeast of University (9207021099)