

# 热核多重碎裂中的条件矩与核内液气相变信号<sup>\* 1</sup>

刘福虎

(山西师范大学物理系 临汾 041004)

摘 要 评述和研究了热核多重碎裂中的条件矩关联与分布,并讨论了核内液气相变的信号.

关键词 热核 多重碎裂 条件矩 液气相变 信号

分类号 O571.4

## 1 引言

热核多重碎裂是相对论性核核碰撞中的一个重要实验现象<sup>[1,2]</sup>.就目前的实验结果来看,热核多重碎裂过程主要通过两种方式实现,即核反应和电磁离解<sup>[2]</sup>.根据核反应末态产物中靶核碎片的数目和簇射粒子(相对论性单电荷粒子)的发射角,核反应又分为衍射激发(靶核碎片的数目为零,且所有簇射粒子发射角正弦之和小于 0.4)和非衍射激发(靶核碎片的数目不为零,或有一个簇射粒子发射角的正弦大于 0.4)事例两种<sup>[3]</sup>.热核多重碎裂可能与核内液气相变过程有关,因而引起人们广泛的注意.理论上研究多重碎裂主要包括两方面的工作:(1)研究发生多重碎裂的临界条件,即核能承受的最大激发能,包括有序的压缩能和无序的热能以及它们的相对重要性,这一研究同热压缩核的稳定性密切相关;(2)计算多重碎裂碎片的质量分布或电荷分布,以及与之相关的实验可观察量,以便和实验比较.由于一般的非衍射激发核反应事例没有足够大的弹核(旁观体)碎裂体积,在其中找到液气相变的迹象是困难的.在目前超高能核核碰撞实验中,人们研究核内液气相变现象的注意力主要集中在有较大碎裂体积的衍射激发和电磁离解事例上.

为了在衍射激发和电磁离解事例中提取

有关核内液气相变的信息,分析碎片电荷分布的条件矩关联及分布是一种行之有效的方法.本文将对目前加速器能区的有关热核多重碎裂中碎片电荷分布的条件矩关联与分布的实验数据及理论分析进行评述,并给出目前最高加速器能量下重核的衍射激发和电磁离解事例的条件矩关联及分布,进而讨论核内液气相变的可能信号.

## 2 条件矩关联与液气相变信号

在热核多重碎裂中,定义  $k$  次单事件矩(又叫条件矩)<sup>[4]</sup>为

$$M_k^i = \sum_{d \neq d_{\max}} d^k \cdot n^j(d), \quad (1)$$

式中,  $n^j(d) = 0, 1, 2, \dots$  是在第  $j$  事例中出现的电荷数为  $d$  的碎片数目,求和是对除了最大碎片以外的其它所有碎片进行的.定义归一化矩为

$$S_k^i = M_k^i / M_1^i, \quad (2)$$

式中,  $k$  取不同值时可以得到不同次条件矩.若  $k=1$ ,则  $M_1^i$  是射弹或旁观体的电荷.对后面准备讨论的 200 GeV/u  $^{32}\text{S}$  的衍射激发和电磁离解过程,  $M_1^i = 16 - d_{\max}$ ; 对 200 GeV/u  $^{32}\text{S}$  的非边缘碰撞的核反应过程,  $M_1^i < 16 - d_{\max}$ . (1)式和(2)式实际上也反映了

1997 - 09 - 25 收稿, 1998 - 04 - 06 收到修改稿.

\* 国家教委留学回国人员科研启动基金(项目号教外司[1997]436)、山西省归国留学人员基金(项目号 97030)和山西省中青年学科带头人基金(项目号 96024)资助.

射弹碎裂的程度. 若除最大碎片以外的其它碎片的电荷数较小, 则条件矩的值也较小, 这时可以认为射弹或其局部区域碎裂的程度较高.

文献[4]分析了 1 GeV/u  $^{197}\text{Au}$  在核乳胶中碎裂<sup>[5]</sup>的碎片电荷分布的条件矩, 认为  $\ln S_3$  与  $\ln S_2$  及  $\ln S_5$  与  $\ln S_2$  间均呈线性关联, 即三次条件矩与二次条件矩及五次条件矩与二次条件矩间均呈对数关联.

文献[6]指出, 对关联行为本身来说, (1)式中的求和包括与不包括最大碎片区别不大. 为方便起见, 用包括  $d_{\max}$  的

$$M_k^j = \sum_{d=1}^{d_{\max}} d^k \cdot n^j(d) \quad (3)$$

代替(1)式. (1)式和(3)式的区别在于: 前者未包括热核经历多重碎裂过程后的剩余产物, 后者则包括了. 一般说来, 剩余产物不能反映热核是否经历液气相变过程, 而(1)式比(3)式更能真实反映物理过程的特征.

为了研究条件矩间的对数关联, 我们曾用(3)式和(2)式分析了 3.7 和 200 GeV/u  $^{16}\text{O}$  及 200 GeV/u  $^{32}\text{S}$  与核乳胶作用的  $\ln S_3$  与  $\ln S_2$  及  $\ln S_5$  与  $\ln S_2$  的关联<sup>[7,8]</sup>, 结果支持了文献[4]的结论. 对 3.7 和 14.6 GeV/u  $^{28}\text{Si}$  与核乳胶作用<sup>[9]</sup>的相关分析表明<sup>[10]</sup>, 条件矩间也呈对数关联.

从理论上探讨条件矩间对数关联的实质成了多重碎裂领域研究的一个重要方面. 文献[4]认为, 对原子核这样的小系统, 条件矩间的对数关联是无限系统临界现象的特征在有限系统保留的痕迹. 也就是说, 条件矩间的对数关联是系统液气相变的一种反映. 文献[4]还用立方晶格链渗流模型得到了 1 GeV/u  $^{197}\text{Au}$  在核乳胶中碎裂的条件矩间的对数关联. 文献[11]和[12]则用重组聚集模型得到了类似的结果. 而文献[6]用蒙特卡罗方法, 根据核素表和质量守恒与电荷守恒, 同样得到了金原子核碎裂中的条件矩间的对

数关联, 但这种方法与临界现象似乎无联系. 另外, 作者也用瓜分客体的方法<sup>[13,14]</sup>, 根据(3)式和(2)式, 分析了高能原子核碎裂中的矩关联, 得到了与实验一致的结果<sup>[15~17]</sup>. 根据级联瓜分思想, 同样得到了与实验一致的高能原子核碎裂中的矩关联<sup>[10]</sup>. 由此可见, 级联瓜分方法似乎更逼近真实的物理过程.

鉴于在条件矩表示式中包括或不包括  $d_{\max}$  所反映的物理过程的真实程度不同, 以及衍射激发和电磁离解在液气相变研究方面的重要性, 我们将分别用(3)式和(1)式研究在目前最高加速器能量下,  $^{32}\text{S}$  在核乳胶中衍射激发和电磁离解过程中, 碎片电荷分布的条件矩关联.

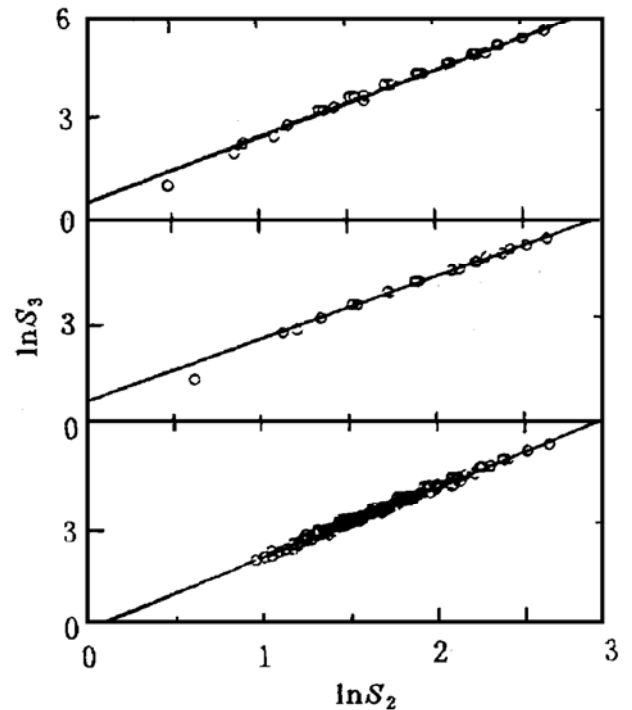


图 1 包括最大碎片时, 200 GeV/u  $^{32}\text{S}$  碎裂中的  $\ln S_3$  与  $\ln S_2$  关联

图 1 给出了利用(3)式和(2)式(包括  $d_{\max}$ )得到的 200 GeV/u  $^{32}\text{S}$  在核乳胶中碎裂的碎片电荷分布的三次条件矩和二次条件矩间的关联. 上、中和下图分别对应于根据原始实验数据<sup>[3,18]</sup>计算得到的衍射激发和电磁离解事例以及根据蒙特卡罗瓜分客体方法计算得到的模拟事例相应的结果, 模拟事例重

现了衍射激发和电磁离解事例. 图 2 给出了利用(1)式和(2)式(不包括  $d_{\max}$ )得到的同样事例样本的结果, 模拟事例不能反映实验结果. 上、中和下图的意义同图 1. 为清楚起见, 表 1 给出了实验观测到的 200 GeV/u  $^{32}\text{S}$  与核乳胶作用中, 由于衍射激发和电磁离解碎裂的不同而引起的碎裂道的事例数<sup>[3,18]</sup>. 当不包括  $d_{\max}$  时(图 2), 图 2 因不包括  $d_{\max}$  更能反映真实的物理过程, 不含液气相变机制的简单蒙特卡罗瓜分方法不能给出与实验一致的结果, 至少说明在用条件矩关联反映热核多重碎裂的真实物理过程时, 不应包括作为多重碎裂剩余产物的最大碎片.

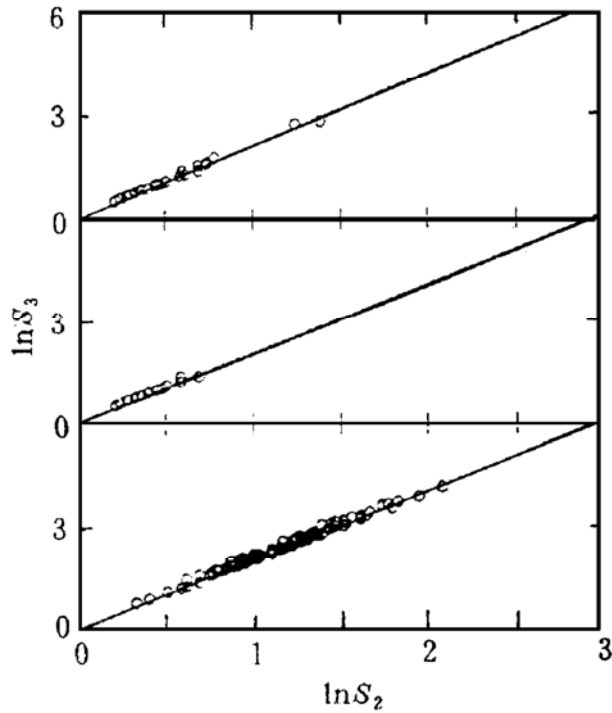


图 2 同图 1, 但不包括最大碎片

如果热核内部经历了液气相变, 多重碎裂的产物应包含较多的轻碎片. 在不包括  $d_{\max}$  的  $\ln S_3$  与  $\ln S_2$  关联图上, 这些经历了液气相变的事例应主要集中分布在  $\ln S_3$  与  $\ln S_2$  值较小的区域. 如图 2 的上、中图所示, 200 GeV/u  $^{32}\text{S}$  在核乳胶中的衍射激发和电磁离解事例就是主要分布在  $\ln S_3$  与  $\ln S_2$  值较小的区域. 至于  $\ln S_3$  与  $\ln S_2$  小到何种程度, 以及在  $\ln S_3$  与  $\ln S_2$  值较小区域的事例数占到

总事例数的多大比例时, 才可看成系统经历了液气相变, 这些都有待进一步研究.

表 1 200 GeV/u  $^{32}\text{S}$  与核乳胶作用中的碎裂道及事例数<sup>[3,18]</sup>

碎裂道	衍射激发	电磁离解
P+H	150	72
Si+He	12	25
Si+2H	52	26
Al+He+H	11	10
Al+3H	8	10
Mg+He+2H	4	13
Mg+2He	0	1
Mg+4H	3	2
Mg+Be	0	1
Na+Li+2H	0	2
Na+2He+H	2	1
Na+He+3H	1	1
Ne+3He	0	2
Ne+2He+2H	0	2
Ne+He+4H	1	1
Ne+6H	1	0
F+3He+H	0	2
F+2He+3H	2	3
F+He+5H	1	1
O+Li+He+3H	0	1
O+2He+4H	2	3
O+He+6H	2	1
N+B+He+2H	0	1
N+Li+2He+2H	0	1
N+3He+3H	0	2
N+2He+5H	1	1
C+3He+4H	0	1
C+Li+He+5H	1	0
C+2He+6H	3	0
B+Li+3He+2H	0	1
B+2He+7H	0	1
Be+Li+2He+5H	0	1
Li+4He+5H	3	0
5He+6H	0	2

### 3 条件矩分布与液气相变信号

由于经历了液气相变过程的事例主要集中在分布在关联图上  $\ln S_3$  与  $\ln S_2$  值较小的区域, 研究关联图上的事例数分布比研究关联行为本身更具有实际意义. 作为关联图上事

例数分布在  $\ln S_3$  或  $\ln S_2$  轴上的一种投影反映, 对条件矩分布本身的研究也有实际意义.

我们曾用简单瓜分客体的方法和级联瓜分客体的方法, 根据(3)式和(2)式, 分析了高能原子核碎裂中的条件矩分布<sup>[10]</sup>. 结果表明, 简单瓜分客体的方法不能符合实验数据, 而级联瓜分客体的方法与实验数据符合得很好.

为了进一步研究条件矩分布, 我们分别利用(3)式和(1)式, 研究了 200 GeV/u  $^{32}\text{S}$  在核乳胶中的衍射激发和电磁离解过程中碎片电荷分布的条件矩分布.

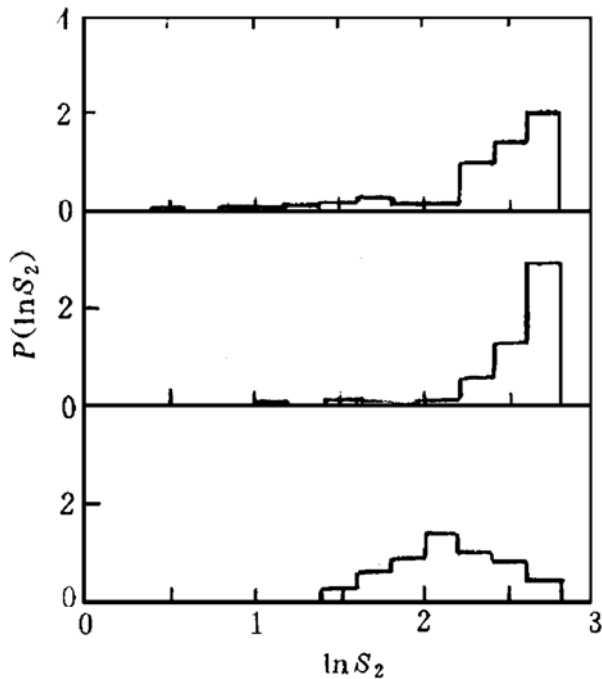


图 3 包括最大碎片时, 200 GeV/u  $^{32}\text{S}$  碎裂中的  $\ln S_2$  分布

图 3 给出了利用(3)式和(2)式(包括  $d_{\max}$ )得到的 200 GeV/u  $^{32}\text{S}$  在核乳胶中碎裂的碎片电荷分布的对数二次条件矩  $\ln S_2$  的分布  $P(\ln S_2)$ . 上、中和下图分别对应根据原始实验数据<sup>[3,18]</sup>计算得到的衍射激发和电磁离解事例以及根据蒙特卡罗瓜分客体方法计算得到的模拟事例相应的结果. 图 4 给出了利用(1)式和(2)式(不包括  $d_{\max}$ )得到的同样事例样本的结果, 上、中和下图的意义同图 3.

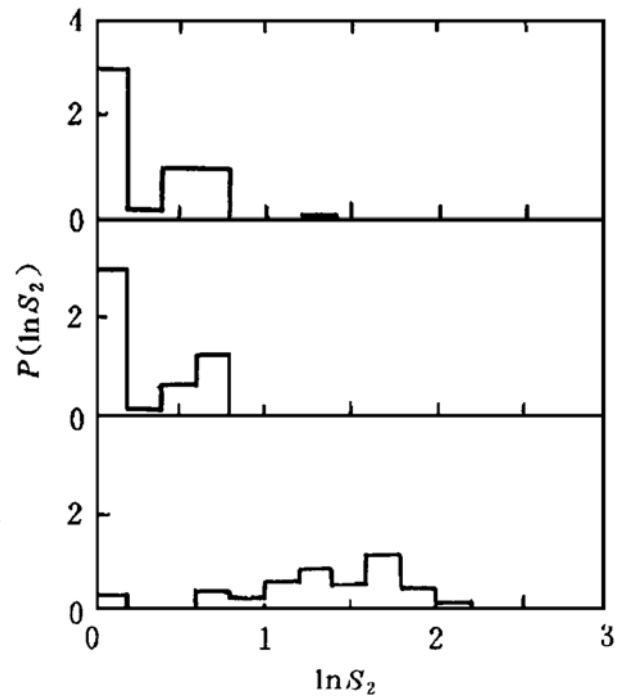


图 4 同图 3, 但不包括最大碎片

从图 3 和图 4 可以看出, 包括  $d_{\max}$  时, 模拟事例的  $\ln S_2$  分布范围与衍射激发和电磁离解事例一致, 但模拟事例的  $\ln S_2$  分布形状与两类实验事例不同; 不包括  $d_{\max}$  时, 模拟事例的  $\ln S_2$  分布范围和形状均与两类实验事例不同. 简单蒙特卡罗瓜分客体的方法不能重现实验给出的  $\ln S_2$  分布, 至少说明热核多重碎裂过程不是一般简单的瓜分客体过程, 而可能是级联瓜分客体过程<sup>[10]</sup>.

实验上观测到的热核多重碎裂事例, 在不包括  $d_{\max}$  时, 有较大的几率出现在低  $\ln S_2$  区域, 这一现象可能与核内液气相变现象相联系. 如果热核内经历了液气相变, 无疑会在末态出现大量的轻碎片, 这类事例自然具有较小的条件矩. 反映在  $\ln S_2$  分布上, 表现为低  $\ln S_2$  区域事例出现的几率远大于正常情况(例如根据一般简单瓜分客体方法进行的模拟); 而反映在  $\ln S_3$  与  $\ln S_2$  关联图上, 表现为在  $\ln S_3$  与  $\ln S_2$  值较小的区域, 事例出现的几率大.

在中高能重离子碰撞中, 热核碎裂的类型或模式有多种. 作者认为, 在高能和超高能碰撞中形成的热核或其局域有较大可能是

经历着从液相到气相的气化过程, 即液气相变. 暂不管相变进行的过程如何, 气化后的状态可看作热力学平衡态. 因为气化, 观测到的末态碎片主要是 H 和 He. 热核或其局部的气化不同于重核的多重碎裂, 后者可能与力学不稳定性因素有关.

#### 4 结束语

热核多重碎裂是一个重要的实验现象, 而核内液气相变是一个复杂的物理过程. 从多重碎裂产物的电荷(或质量)分布上, 能否观测到核内液气相变的信号, 是一个尚未定论的问题. 可以预期, 如果热核内经历了液气相变, 必然会产生大量的轻碎片. 这一现象反映在  $\ln S_2$  分布上, 表现为低  $\ln S_2$  值的事例增多; 反映在  $\ln S_3$  与  $\ln S_2$  关联图上, 表现为事例更多地出现在  $\ln S_3$  与  $\ln S_2$  值较小的区域.

在液气相变的研究中, 如何判选真正意义上的多重碎裂事例, 如何确定液气相变发生时的最大条件矩, 以及低条件矩事例至少应占多大比例等问题, 都有待进一步研究.

本文从统计学的角度出发, 对热核多重碎裂和核内液气相变现象进行了研究, 但未涉及物理过程的动力学问题. 由于多重碎裂现象的普遍性, 从动力学的角度对极端条件下原子核的多重碎裂现象进行研究, 具有重要的理论意义<sup>[19]</sup>.

#### 参 考 文 献

- Hüfner J. Heavy Fragments Produced in Proton-nucleus and Nucleus-nucleus Collisions at Relativistic Energies. *Phys Rep*, 1985, 125: 129~229
- 唐孝威, 许国发, 刘福虎. 相对论性核-核碰撞中的弹核碎裂过程. *物理学进展*, 1993, 13: 378~404
- Bahk S Y, Chang S D, Cheon B G *et al.* Diffractive Excitation of 14.6, 60 and 200 GeV/nucleon  $^{16}\text{O}$  and  $^{28}\text{Si}$  Nuclei in Nuclear Emulsion. *Phys Rev*, 1991, C43: 1410~1419
- Campi X. Multifragmentation: Nuclear Breakup Like Percolation Clusters. *J Phys*, 1987, A19: L917~922
- Waddington C J, Freier P S. Interactions of Energetic Gold Nuclei in Nuclear Emulsion. *Phys Rev*, 1985, C31: 888~895
- 刘洪民, 萨本豪, 郑玉明等. 热核破碎中的矩关联与临界现象. *高能物理与核物理*, 1991, 15: 1053~1057
- 刘福虎, 郑蒲英, 许国发. 3.7 GeV/u  $^{16}\text{O}$  碎裂中的条件矩关联. *山西师大学报(自然科学版)*, 1992, 6(4): 53~56
- Liu Fuhu (IHEP group). Correlations Between the Conditional Moments of  $^{16}\text{O}$  and  $^{32}\text{S}$  Fragmentation Behaviour in Nuclear Emulsion at 200 GeV/u. in Proceedings of the 10th EMU01 Collaboration Meeting, Wuhan, China, 19~21 September, 1991
- Adamovich M I, Aggarwal M M, Alexandrov Y A *et al.* Topological Characteristics of  $^{28}\text{Si}$  ( $^{32}\text{S}$ ) Fragmentation at 3.7, 14.6 and 200 A GeV. in Proceedings of the 10th EMU01 Collaboration Meeting, Wuhan, China, 19~21 September, 1991
- Liu Fuhu. Hot Nuclei Multifragmentation and Cascade Partition Method. *Chin J Nucl Phys*, 1995, 17: 200~204
- Ngo H, Ngo C, Lghezou F Z *et al.* Scaling Properties of Percolation Models for Multifragmentation. *Z Phys*, 1990, A337: 81~90
- Zheng Yuming, Ngo H, Ngo C *et al.* Scaling Properties of Nuclear Fragmentation. *Scientific Bulletin*, 1990, 35: 1713~1717
- Mekjian A Z. Model of a Fragmentation Process and its Power-law Behavior. *Phys Rev Lett*, 1990, 64: 2125~2129
- Mekjian A Z. Distribution of Cluster Sizes from Evaporation to Total Multifragmentation. *Phys Rev*, 1990, C41: 2103~2110
- 刘福虎, 孙汉城. 高能原子核碎裂中的矩关联. *核物理动态*, 1995, 12(3): 14~17
- Liu Fuhu, Sun Hancheng. Correlations Between the Conditional Moments in  $^{16}\text{O}$  and  $^{32}\text{S}$  Fragmentation at High Energy. *Chin J Nucl Phys*, 1995, 17: 13~16
- Liu Fuhu, Sun Hancheng. Investigation of Correlations Between Conditional Moments in Nuclear Fragmentation at High Energy. *Can J Phys*, 1995, 73: 365~368
- Singh G, Sengupta K, Jain P L. Electromagnetic Dissociation of  $^{32}\text{S}$  at Ultrarelativistic Energy in Nuclear Emulsion. *Phys Rev*, 1990, C41: 999~1004
- 张丰收, 葛凌霄. 极端条件下原子核性质研究——热核和多重碎裂. *原子核物理评论*, 1997, 14(4): 213~217

# Conditional Moments in Hot Nuclear Multifragmentation and Signals of Liquid-gas Phase Transition in Nuclear Matter

Liu Fuhu

(Department of Physics, Shanxi Teachers University, Linfen 041004)

**Abstract** The conditional moment correlations and distributions in hot nuclear multifragmentation are reviewed and investigated. The signals of liquid-gas phase transition in nuclear matter are discussed.

**Key words** hot nuclei multifragmentation conditional moment liquid-gas phase transition signal

(上接第 137 页)

- |  |  |
|--|--|
| ed. Gadioli E, Varenna, Italy, Jone, 1997  | Inhibited for Weakly Bound Nuclei. Phys Rev Lett, 1997, 78: 30~33                                |
| 9 Fekou-Youmbi V, Sida J L, Alamanos N <i>et al.</i> Sub-coulomb Fusion with Halo Nuclei. Nucl Phys, 1995, A583: 811~816 | 11 Glas D, Mosel U. On the Critical Distance in Fusion Reactions. Nucl Phys, 1975, A237: 429~446 |
| 10 Takahashi J, Munhoz M, Szanto E M <i>et al.</i> Is Fusion   |  |

## Fusion around Coulomb Barrier with Halo or Weakly Bound Nuclei

Liu Zuhua

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102431)

**Abstract** Study of fusion around coulomb barrier with halo nuclei are presently a very important topic, especially due to the debate about the influence of break up process in fusion. The theoretical debate and experimental status of halo nucleus fusion are reviewed. Fusion with weakly bound nuclei in stead of halo ones is discussed.

**Key words** halo nuclei weakly bound nuclei fusion around coulomb barrier