

# 中能区类弹碎片中质比的靶核相关性\*

徐瑚珊 诸永泰 陈列文 苟全补 刘航

魏志勇 张玉虎 王琦 李松林 卢俊

吴钟立 谢元祥 张丰收 靳根明

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 基于实验测量并结合模型分析,讨论了中能区重离子周边碰撞过程中出射的类弹碎片(PLF)的中质比( $N/Z$ )与靶核  $N/Z$  相关现象的产生原因。

**关键词** 类弹碎片 中质比 靶相关性

## 1 引言

在80年代初中能重离子加速器投入运行时,人们就发现中能区的弹核碎裂过程表现出一些与高能区碎裂过程不同的特点。如:产物能谱有低能尾巴<sup>[1]</sup>,角分布比适用于高能情况的几何碎裂预计的结果明显加宽<sup>[2]</sup>,约化动量分布宽度与弹核种类及能量相关<sup>[1,3]</sup>,以及出射碎片的  $N/Z$  明显与靶核的  $N/Z$  相关<sup>[1,4,5]</sup>等。其中,中能区重离子周边碰撞过程中出射的类弹碎片的  $N/Z$  与靶核  $N/Z$  相关的现象尤其引起人们的重视,这也是同位旋效应对重离子碰撞过程影响的研究成为目前研究的一个热点的原因。另外,这一研究对基于弹核碎裂机制的次级束流装置产生放射性束流的强度以及产生接近滴线的核素的估算也有重要意义。本文将通过模型计算与实验结果的比较来探讨这种靶相关性的产生原因。

## 2 实验测量及初步结果

实验是在兰州重离子研究装置(HIRFL)上进行的。实验用 HIRFL 提供的  $30\text{MeV}/u$  的  $^{40}\text{Ar}$  束流分别轰击了  $^{58}\text{Ni}$ 、 $^{64}\text{Ni}$  和  $^{115}\text{In}$  三个反应靶。3个靶的厚度均约为  $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 。所选择的3个靶核的  $N/Z$  相差较大,其目的是为了研究同位旋自由度对出射碎片的影响。表1列出了弹核、靶核及碰撞系统中的中质比。利用一个多叠层固体探测器组合对反应中前角区( $5^\circ-13^\circ$ )出射的碎片进行了测量。该探测系统是由3块透射型硅半导体探测

1998-01-07收稿,1998-03-10收修改稿

\* 国家自然科学基金(19235012)和中国科学院重大项目资助

器(厚度分别为  $43\mu\text{m}$ 、 $520\mu\text{m}$ 和  $3000\mu\text{m}$ )和 1 块 CsI(Tl) 晶体(4cm 厚)组成的. CsI(Tl) 晶体的信号由光二极管引出. 将第二块硅探测器的信号作为  $\Delta E$  信号, 实验中对直到 Al 的元素实现了同位素鉴别. 关于该系统的性能参见文献 [6].

表1 弹核、靶核及碰撞系统中的中质比  $N/Z$

靶	$^{58}\text{Ni}$	$^{64}\text{Ni}$	$^{115}\text{In}$
$(N/Z)_{\text{Ar}}$	1.22	1.22	1.22
$(N/Z)_{\text{target}}$	1.071	1.286	1.347
$(N/Z)_{\text{system}}$	1.130	1.261	1.313

图 1 给出的能谱对于所有  $Z \leq 13$  的元素各同位素的能谱具有代表性. 比较元素能谱和同位素能谱, 可以看出, 实现了同位素鉴别的碎片均来自于能谱的高能部分. 一般中能区重离子碰撞中在前角区出射的以接近束流速度运动的碎片主要来自于弹核碎裂过程和少数核子转移过程. 考虑到这里讨论的碎片远离弹核, 转移反应的贡献是小的<sup>[7]</sup>, 可以认为它们主要是来自于弹核碎裂过程.

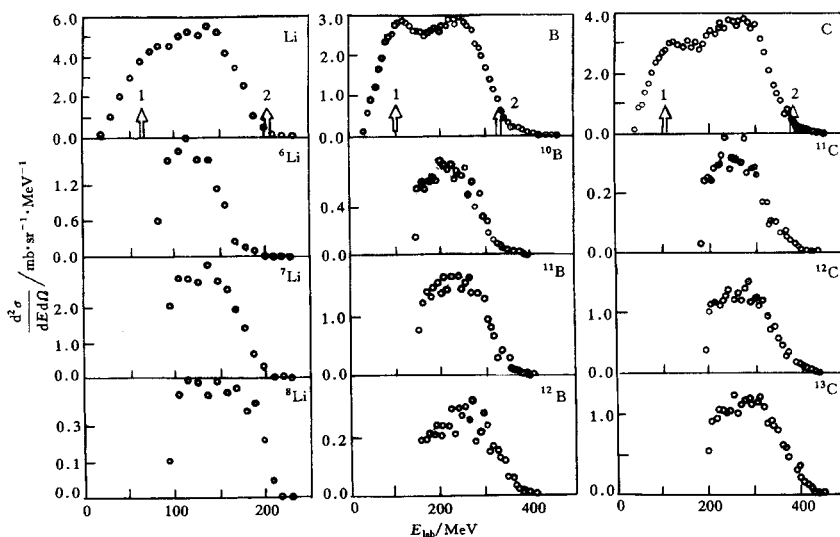


图 1  $30\text{MeV}/u$   $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$  反应中在  $\theta_L = 7^\circ$  出射的元素 Li、B 和 C 以及它们几个同位素的能谱. 箭头 1 为对应于 DIC 过程出射产物的全弛豫能量的位置, 箭头 2 为碎片以束流速度运动时对应的能量位置.

图 2 给出了  $\theta_L = 9^\circ$  处轰击 3 个靶时出射碎片的平均中质比  $\langle N \rangle / Z$  与出射碎片的电荷数  $Z$  之间的关系随靶的变化.  $\langle N \rangle / Z$  是由下式计算得到的

$$\langle N \rangle / Z = \frac{\sum_i N_i \cdot \sigma_i}{\left( Z \cdot \sum_i \sigma_i \right)}, \quad (1)$$

式中,  $Z$  为核电荷数,  $N_i$ 、 $\sigma_i$  分别表示该元素的第  $i$  个同位素的中子数和同位素的产生截面. 图中由上往下 4 个箭头分别表示  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ ,  $^{40}\text{Ar} + ^{64}\text{Ni}$ ,  $^{40}\text{Ar}$  自身以及  $^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$  形成的复合系统的  $N/Z$  值. 另外, 图中还同时给出了处于  $\beta$  稳定线上天然核素的  $\langle N \rangle / Z$

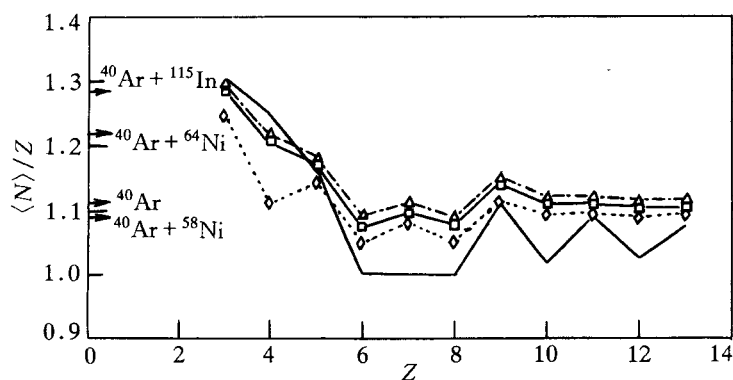


图 2 30MeV/u  $^{40}\text{Ar}$  轰击  $^{58}\text{Ni}$ 、 $^{64}\text{Ni}$ 、 $^{115}\text{In}$  靶  $\theta_L = 9^\circ$  处出射碎片的  $\langle N \rangle / Z$  随  $Z$  的变化关系

图中不含数据点的实线是天然稳定核素的  $\langle N \rangle / Z$ 。

...◇...  $^{58}\text{Ni}$ ，—□—  $^{64}\text{Ni}$ ，—·—△—·—  $^{115}\text{In}$ 。

值。由图 2 可以看出这些类弹碎片的  $\langle N \rangle / Z$  与靶核相关是明显的,而且可以得到:(1)靶核的  $N/Z$  值越大,出射碎片的  $N/Z$  值也越大;(2)无论什么靶,出射碎片的  $\langle N \rangle / Z$  随  $Z$  的变化均表现出强烈的奇偶效应,这些出射碎片  $\langle N \rangle / Z$  的演化在一定程度上与处于  $\beta$  稳定线上的核素的  $N/Z$  的变化趋势较为相似。另外,有些元素碎片  $\langle N \rangle / Z$  值会小于复合系统甚至弹核的  $N/Z$ 。人们还发现,这种靶相关性仅与靶核的中质比相关,而与靶核的大小基本无关<sup>[1]</sup>。

关于上述现象有两种较为典型的解释:一种是,尽管在费米能区两碰撞核的相互作用时间很短 ( $< 10^{-22}\text{s}$ ),但由于  $N/Z$  自由度平衡得很快,仍可以让两碰撞核之间进行少数核子交换,从而使得周边碰撞过程中产生的 PLF 也受到靶核的影响<sup>[1,5]</sup>。这是一种低能机制的表现。另一种解释是由 Harvey 提出来的一个微观模型<sup>[8]</sup>。模型中考虑了两核相碰时重叠区内核子-核子碰撞截面以及靶核的中子皮结构。将中能区出射碎片的  $\langle N \rangle / Z$  值随靶核的  $N/Z$  值增大而增大的现象归结为,由于在 20—200MeV/u 能区中 n-p 作用截面要大于 n-n 和 p-p 作用截面,丰中子靶核的外围中子密度相对于质子要高的必然结果。因为靶核外围的中子多于质子,周边碰撞中弹核质子由于 n-p 作用截面相对大而更多地参与了相互作用,从而使得在弹核旁观者中有较高中子丰度。到目前为止,至于哪种解释是合理的还没有定论。要搞清这一点无疑对反应机制的探讨是重要的,同样人们利用中能区弹核碎裂机制产生非常奇异的核素的研究也是很有意义的。

图 3 从另一个角度揭示了这种 PLF 的靶相关性。图中分别给出了 30MeV/u  $^{40}\text{Ar}$  轰击  $^{64}\text{Ni}$  靶与  $^{58}\text{Ni}$  靶反应 ((a) 图,探测角度均为  $9^\circ$ ) 以及轰击  $^{115}\text{In}$  靶与  $^{58}\text{Ni}$  靶时 ((b) 图,探测角度分别为  $11^\circ$  和  $9^\circ$ ) 实验室系擦边角外约  $6^\circ$  处出射的  $Z=3-13$  各元素不同同位素产生截面之比随  $A$  的变化关系。各元素不同同位素间指数拟合关系式为:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{target1}} / \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{target2}} \propto \exp(-\gamma A_f), \quad (2)$$

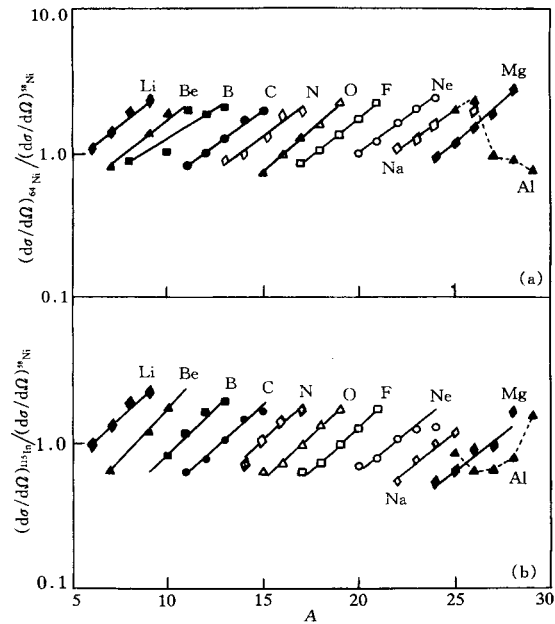


图 3 30MeV/u  $^{40}\text{Ar}$  轰击  $^{115}\text{In}$ 、 $^{64}\text{Ni}$  和  $^{58}\text{Ni}$  靶反应中擦边角外约  $6^\circ$  处出射的  $Z=3-13$  各元素不同同位素产生截面之比随  $A$  的变化关系  
直线为同一元素不同同位素间的指数拟合结果。

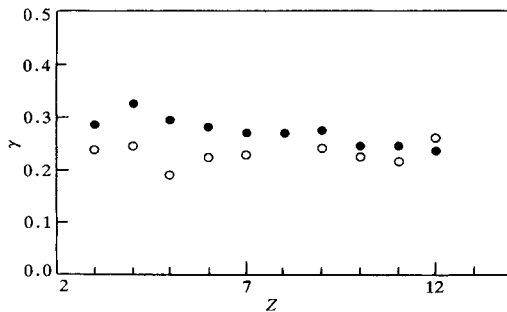


图 4 两对靶组合同位素产额比指数拟合的  $\gamma$  值  
○  $^{64}\text{Ni}/^{58}\text{Ni}$ , ●  $^{115}\text{In}/^{58}\text{Ni}$ .

式中  $A_i$  为同一元素不同同位素的质量数。

图 3 进一步清晰地显示出前角区出射的 IMF 的靶相关性——靶核的中质比越高出射的同位素分布向更丰中子方向移动。另外,该截面之比除元素 Al 外基本均在半对数坐标下呈近似线性关系。而且对于图中给出的两组比值,指数拟合的  $\gamma$  值与靶核的  $N/Z$  也似有一定的相关性(见图 4)。对于轰击  $^{64}\text{Ni}$  靶与  $^{58}\text{Ni}$  靶之比的情形有  $\gamma = 0.23 \pm 0.02$ , 而对轰击  $^{115}\text{In}$  靶与  $^{58}\text{Ni}$  靶之比的情形有  $\gamma = 0.24 \pm 0.02$ 。所表现出的

这些规律,必然包含有某种物理本质。

### 3 模型分析与讨论

为探讨轰击不同  $N/Z$  值靶核出射碎片同位素产额之比所表现出的规律性,这里用 IQMD 模型进行了计算分析。该模型是由近代物理研究所理论研究室在 Aichelin<sup>[9]</sup> 的基础上发展、改进的与同位旋相关的 QMD 模型<sup>[10]</sup>。

IQMD 模型与文献 [9] 不同之处主要有以下几点: (1) 在弹核和靶核的初始化过程中

区分了中子与质子,采用 Skyrme-Hartree-Fock<sup>[11]</sup>方法给出其中子和质子的密度分布(参数为 SKM\*),对丰中子核能给出合理的中子皮;(2)在核势中考虑了对称能;(3)核子-核子碰撞截面除继续保留了原来的与同位旋无关的 Cugnon 参数化形式<sup>[12]</sup>外,还采用了依据实验提取的与同位旋相关的参数化形式<sup>[10]</sup>,在本工作研究的能量下, n-n 和 p-p 碰撞截面约为 Cugnon 参数化下的 3 倍, n-p 碰撞截面则约为 6 倍;(4)考虑了泡利阻塞效应的同位旋相关。

在 IQMD 模型计算中,主要观察了采用同位旋相关和不相关的核子-核子碰撞参数化截面对出射初始碎片  $N/Z$  的影响。无论哪种情况,在弹、靶核动量空间的初始化中均考虑了中子的费米能面与质子的不同。另外,计算中平均场部分总是同位旋相关的。为定性说明问题,这里仅计算了轰击  $^{58}\text{Ni}$  靶与  $^{64}\text{Ni}$  靶之比的结果(见图 5)。图 5(a)的计算中考虑了中子皮但在碰撞项中没有区分中子与质子,图 5(b)中给出的是同时考虑中子皮和在碰撞项中区分中子与质子的结果。对每个碰撞系统,共计算了 500 个事例,并对每个事例跟踪了  $500\text{fm}/c$ 。计算中采用的是非动量相关的软势,对应  $K = 200\text{mV}$ ,没有用动量相关的软势或硬势进行计算,因为这里主要研究的是同位旋自由度的影响。由于计算中很难给出对应实验室角度的结果,考虑到实验数据仅取自周边碰撞过程的类弹产物,计算中通过限定碰撞参数来选取周边碰撞产物。这里选取  $b = 6\text{fm}$ 。

图 5(a)表明在计算中不区分核子-核子碰撞项中的中子与质子,  $30\text{MeV}/u$  的  $^{40}\text{Ar}$  轰击  $^{64}\text{Ni}$  靶与  $^{58}\text{Ni}$  靶各元素不同同位素截面之比没有明显的规律性。而在图 5(b)中,对于  $Z = 3-8$  的元素却表现出与实验结果较为类似的规律性——随靶核的中质比增高,出射的同位素分布向更丰中子方向移动,且同一元素的同位素截面之比在半对数坐标下呈近似线性关系。这表明出射产物的这种规律必然是与核子-核子碰撞同位旋效应相关的。换句话说,对费米能区的重离子碰撞,至少在周边过程中核子-核子相互作用也是重要的。所不同的是实验结果中不同元素所表现出来的线性关系的斜率基本是相同的,而 IQMD 计算则没能重现这一规律。但 IQMD 计算也定性地证明了实验结果。

另外,我们也用 abrasion-ablation 模型进行了计算<sup>[13]</sup>,计算结果显示对应图 3 中的截面之比随  $A$  的变化基本是常数( $\sim 1$ )。这是由 abrasion-ablation 模型的图像所决定的。按该模型,出射 PLF 的截面决定于弹、靶核间相碰时的几何条件,而与具体靶核无关。也就是

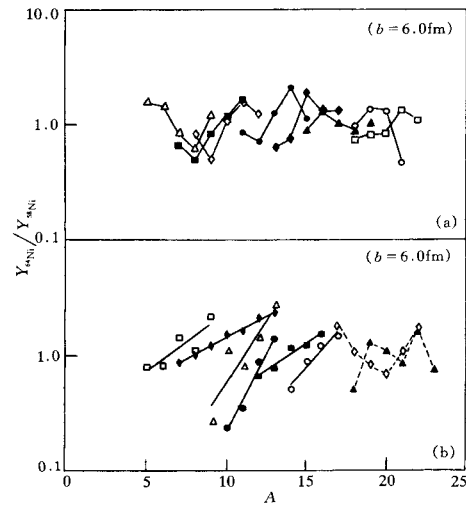


图 5 IQMD 模型计算得到的  $30\text{MeV}/u$   $^{40}\text{Ar}$  轰击  $^{58}\text{Ni}$  靶与  $^{64}\text{Ni}$  靶出射碎片的产额之比随质量数的变化关系

- (a) 没有区分中子与质子  $\triangle\text{Li}$ ,  $\blacksquare\text{Be}$ ,  $\diamond\text{B}$ ,  $\bullet\text{C}$ ,  
 $\blacklozenge\text{N}$ ,  $\blacktriangle\text{O}$ ,  $\circ\text{F}$ ,  $\square\text{Ne}$ ;  
 (b) 区分了中子与质子  $\square\text{Li}$ ,  $\blacklozenge\text{Be}$ ,  $\triangle\text{B}$ ,  $\bullet\text{C}$ ,  
 $\blacksquare\text{N}$ ,  $\circ\text{O}$ ,  $\diamond\text{F}$ ,  $\blacktriangle\text{Ne}$ 。

说,图 3 中显示的特点不包含在 abrasion-ablation 模型的图像之中,靶相关性是一种与高能碎裂不同的效应造成的,因此无法用建立在高能碎裂图像基础上的模型对这种现象进行分析.

图 4 中表明的两组截面比在半对数坐标下的斜率与靶核相关的现象,可能与靶核的中子皮厚度有关.为此,图 6 分别给出了 $^{64}\text{Ni}$ 和 $^{115}\text{In}$ 核的中子和质子密度分布.由图可以看出, $^{115}\text{In}$ 核中子皮的厚度的确比 $^{64}\text{Ni}$ 靶略厚,如:在核子分布密度为最大密度 10% 处, $^{115}\text{In}$ 核的中子分布约比质子分布厚 0.44fm,而对 $^{64}\text{Ni}$ 核该厚度约为 0.40fm.

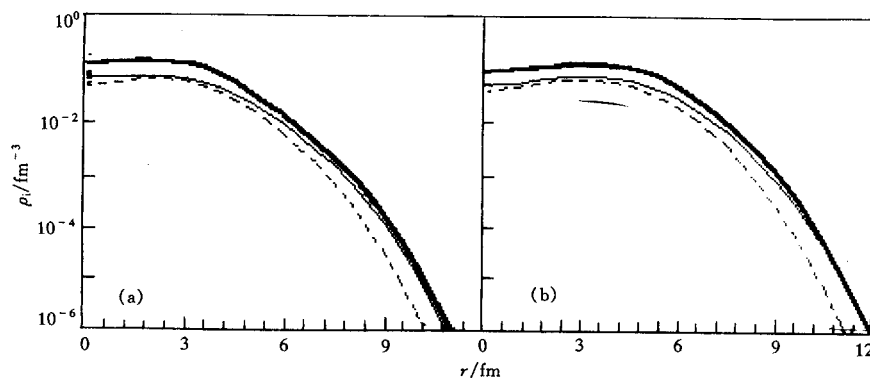


图 6  $^{64}\text{Ni}$ (a)和 $^{115}\text{In}$ (b)核中核子密度分布

粗实线:总的核子密度分布,细实线:中子密度分布,虚线:质子密度分布.

通过 IQMD 计算,并结合模型计算中所考虑的各种因素,对出射 PLF 的靶相关性进行了分析.综合起来可得出以下结论:出射碎片的靶核相关性是由于靶核表面附近的中子和质子分布的密度不同,以及在所研究的能区平均场和核子-核子作用截面的同位旋相关等因素共同作用的结果.如果说这是周边过程中出射碎片靶相关性的主要原因,则表明在费米能区的周边碰撞过程中核子-核子相互作用是非常重要的.这一结论与 Harvey 给出的解释<sup>[8]</sup>一致.但不同的是,文献 [8] 中对核子在平均场中传播时的同位旋效应没有给出具体考虑.这里,能定性地反映实验现象的计算是考虑了平均场相互作用同位旋相关得到的,因此平均场效应的影响也不可忽略.

作者感谢 HIRFL 运行和数据获取有关人员在实验过程中的大力配合,感谢 VAX 中心有关人员在数据处理过程中的大力协助.

### 参 考 文 献

- [1] Guerreau D. Nucl. Phys., 1985, **A447**:37c—66c
- [2] Bacri Ch O, Roussel P, Borrel V et al. Nucl. Phys., 1993, **A555**:477—498
- [3] Pfaff R, Morrissey D J, Fauerbach M et al. Phys. Rev., 1995, **C51**:1348—1355
- [4] Rami F, Coffin J P, Guillaume G et al. Z. Phys., 1984, **A318**:239—242
- [5] Borrel V, Gatty B, Gurreau D et al. Z. Phys., 1986, **A324**:205—216
- [6] Xu Hushan, Zhu Yongtai, Wei Zhiyong et al. Nucl. Sci. and Tech., 1996, 7:198
- [7] Stern M, Gerlic E, Billerey R et al. Nucl. Phys., 1993, **A559**:401—421

- [ 8 ] Harvey B G. Nucl. Phys., 1985, **A444**:498—518  
[ 9 ] Aichelin J. Phys. Rep., 1991, **202**:233  
[10] Chen Liewen et al. J. Phys., 1997, **G23**:211  
[11] Reinhard P G. In: Computational Nuclear Physics 1, Germany: Springer-Verlag, 1991. 28—50  
[12] Cugnon et al. Nucl. Phys., 1981, **A352**:505  
[13] Gosset J et al. Phys. Rev., 1977, **C16**:629

## Target-Dependence of Neutron-Proton Ratio of the PLF Produced in Heavy Ion Collisions at Intermediate Energies\*

Xu Hushan Zhu Yongtai Chen Liewen Gou Quanbu Liu Hang  
Wei Zhiyong Zhang Yuhu Wang Qi Li Songlin Lu Jun  
Wu Zhongli Xie Yuanxiang Zhang Fengshou Jin Genming

*(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)*

**Abstract** In this paper, the target-dependence of neutron-proton ratio of the projectile-like fragments, produced in the peripheral heavy-ion collisions, is discussed based on the comparison between the experimental results and the isospin dependent QMD model calculations.

**Key words** projectile-like fragments, neutron-proton ratio, target dependence

---

Received 7 January 1998, Revised 10 March 1998

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19235012) and Major Subject of the Chinese Academy of Sciences