

丰中子 Ru 奇 A 核能级结构的进一步研究*

朱胜江^{1;1)} 张征¹ J. H. Hamilton² A. V. Ramayya²
J. K. Hwang² 肖树冬¹ 车兴来¹ 禹英男¹ 李明亮¹
郑然成¹ I. Y. Lee³ J. O. Rasmussen³ W. C. Ma⁴

1(清华大学物理系 北京 100084)

2(Department of Physics, Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, USA)

3(Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA)

4(Department of Physics, Mississippi State University, MS 39762, USA)

摘要 通过对重核²⁵²Cf自发裂变产生的瞬发 γ 谱的高精度测量数据的分析,扩展了丰中子奇A核^{109,111}Ru的高自旋态,对不同延迟符合矩阵的数据分析,得到了^{107,109,111,113}Ru低激发态多个能级的寿命,发现¹⁰⁹Ru核中的96.4 keV的能级为一寿命约为1300ns的同质异能态.对^{109,111}Ru转动带的转动惯量随转动频率变化的分析表明,在相邻偶偶核¹¹⁰Ru中观测到的集体回弯现象确实起源于一对 $h_{11/2}$ 中子的角动量顺排.用粒子-转子模型对^{107,109,111,113}Ru的集体带的部分能级及跃迁几率进行了计算,得到与实验较为满意的符合,指出在这几个核中的中子 $h_{11/2}$ 闯入带尼尔逊轨道的起源.

关键词 核结构 集体带 能级寿命 粒子-转子模型

近年来,我们通过对重核²⁵²Cf自发裂变产生的瞬发 γ 谱的测量,对于丰中子Ru奇A核的高自旋态研究不断取得进展.在较早期的实验研究中,曾对^{107,109,111}Ru的高自旋态结构研究进行了报道^[1,2],识别了这3个核中的集体转动带,所测得的 γ - γ 符合事件数为 2×10^9 .其后,我们利用新测得的具有 5.7×10^{11} 个 γ - γ 符合事件的高精度实验数据,对¹⁰⁷Ru的能级结构进行了重新分析,大大扩展了我们原先在文献[1]中报道的结果^[3,4],否定了另一研究组在文献[5]中报道的错误结果.在近期发表的文章中,我们第一次识别了极端丰中子核¹¹³Ru的集体转动带^[6,7].这里,我们报道对丰中子Ru奇A核结构的进一步研究结果:对^{109,111}Ru的高自旋态能级进行了扩展,从而确证了相邻偶偶核中晕带的集体回

弯机制;通过对延迟符合矩阵的数据分析,对^{107,109,111,113}Ru的低激发态能级寿命进行了研究;用粒子转子模型的计算对这几个核的集体带能级及跃迁几率进行了计算等.

实验测量是与国外实验组合作在美国洛伦兹伯克利国家实验室的Gammasphere探测装置上完成的,由102个反康Ge探测器组成的Gammasphere探测器阵列测量由²⁵²Cf源自发裂变产生的瞬发 γ 谱信号,记录三重以上的符合事件.经过离线处理,建立了在投影谱中具有 5.7×10^{11} 个折合成二维 γ - γ 符合的有效事件数的三维符合矩阵,此矩阵主要用于构筑能级纲图,详细的实验技术介绍可以参照其他文献的叙述^[8-10].测得的符合数据利用本实验组PC机上安装的Radware程序包^[11]进行分析.为了分析

2004-05-14 收稿

* 国家重点基础研究发展规划(G2000077405),国家自然科学基金(10375032),教育部博士点基金(20030003090),美国能源部项目(DE-FG05-88ER40407)资助

1) E-mail: zhushj@mail. tsinghua. edu. cn

丰中子核的能级寿命,我们对以前在洛仑兹伯克利国家实验室的 Gammasphere 探测装置上用 72 个反康 Ge 探测器阵列所测得的数据进行重新数据处理,建立了具有不同符合时间的多个三维符合矩阵.

利用新测得的高精度数据,在原先发表的能级纲图^[1,2]的基础上,对^{109,111}Ru 的高自旋态能级进行了扩展.新建立的能级纲图如图 1 所示.图中具有 $\Delta I = 2$ 的集体转动带按顺序用带括号的数字标在能

级纲图的上部.在¹⁰⁹Ru 中,新识别了 7 个能级与 10 条跃迁,将最高自旋态扩展到 $35/2\hbar$,并更正了文献[2]中报道的在带(1)中的一个错误跃迁,即将 $21/2^+ \rightarrow 17/2^+$ 跃迁的能量由 673.8keV 改为 764.2keV.在¹¹¹Ru 中,新识别了 5 个能级与 7 条跃迁,最高自旋态扩展到 $39/2\hbar$.这些新扩展的能级与跃迁都位于能级纲图高自旋态部分.

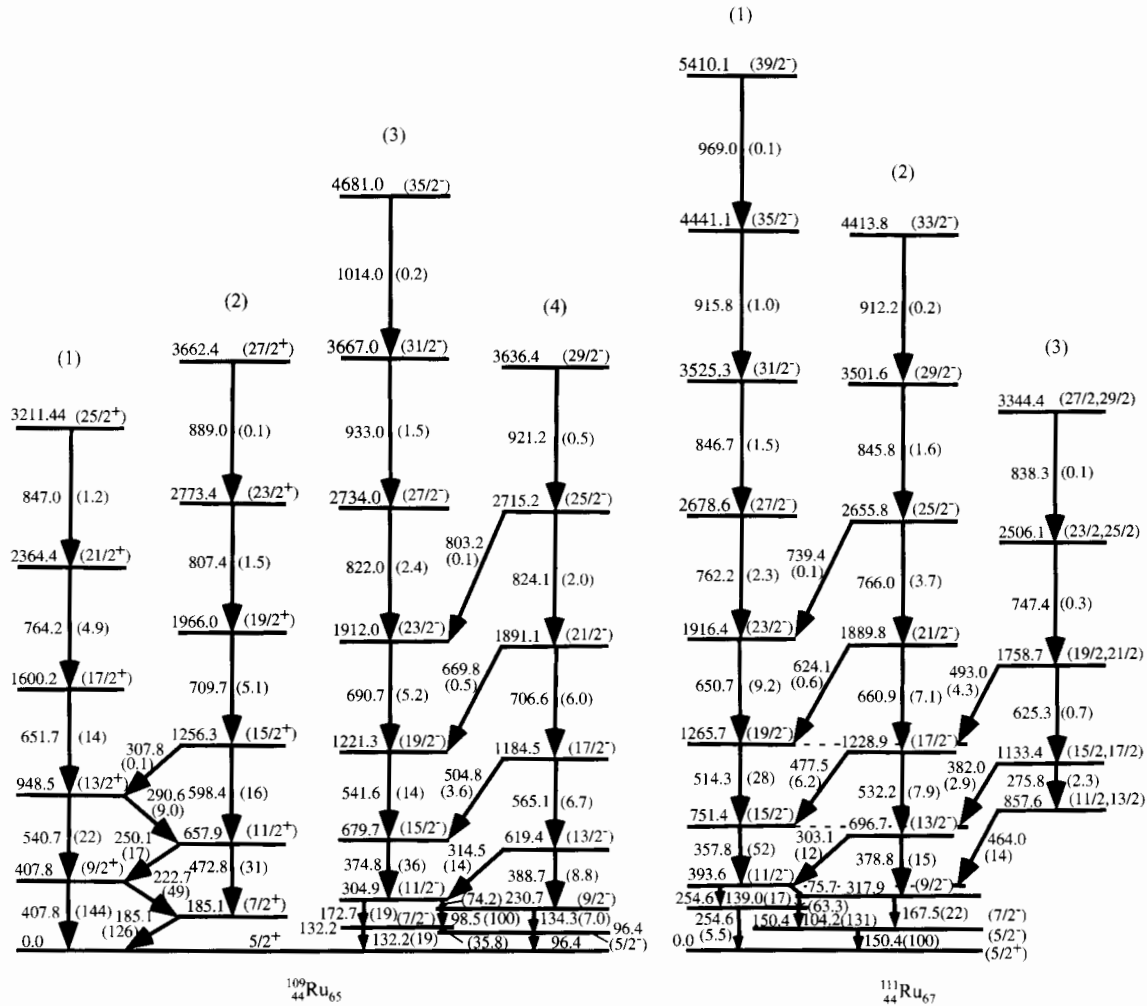


图 1 扩展的^{109,111}Ru 能级纲图

通过对具有不同延迟符合时间的三维符合矩阵的 γ 谱分析,我们对^{107,109,111,113}Ru 能级寿命进行了研究.这是一种新的研究能级寿命的方法,其原理与传统的延迟符合方法一致,然而数据处理有其特殊性,详细的数据处理方法我们将另文发表.表 1 为我们新识别的^{107,109,111,113}Ru 的一些能级的寿命.

它们都位于低激发态,寿命范围在 $\tau = 6-12\text{ns}$ 之间.然而,在¹⁰⁹Ru 中,发现 96.4keV 能级(自旋与宇称暂定为 $(5/2^-)$)为一寿命为 1300ns 的同质异能态,对其起源需要进一步的理论分析.作为一个例子,图 2 为测得的 1300ns 同质异能态的延迟符合曲线.

表 1 本实验测得的^{107,109,111,113}Ru 奇 A 核的能级寿命 τ

核素	¹⁰⁷ Ru			¹⁰⁹ Ru				¹¹¹ Ru			¹¹³ Ru
能级/keV	199.9	142.4	301.8	96.4	132.2	230.7	304.9	150.4	254.6	393.6	260.3
(I^π)	(7/2 ⁺)	(5/2 ⁻)	(11/2 ⁻)	(5/2 ⁻)	(7/2 ⁻)	(9/2 ⁻)	(11/2 ⁻)	(5/2 ⁻)	(7/2 ⁻)	(11/2 ⁻)	(11/2 ⁻)
τ /ns	6 ± 3	12 ± 5	10 ± 3	1300 ± 150	9 ± 4	10 ± 3	7 ± 4	9 ± 4	10 ± 4	9 ± 4	10 ± 4

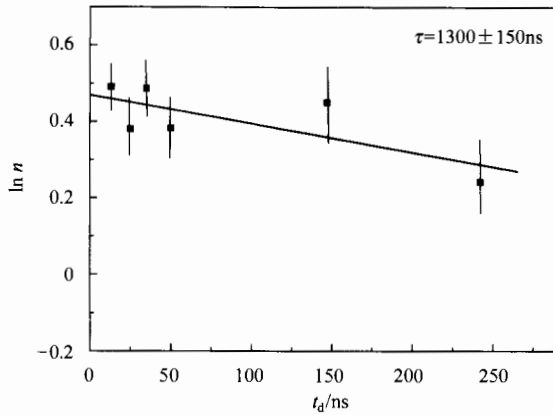


图 2 测得的¹⁰⁹Ru 的 96.4keV 能级寿命的延迟符合曲线
横坐标为延迟时间 t_d , 纵坐标为计数率的对数 $\ln n$.

扩展了的^{109,111}Ru 的高自旋态能级结构可以用来作为对此核区内 Ru 偶偶核的集体回弯机理解释的检验. 在较早期发表的文献中对 $Z = 46$ 的^{112,114,116}Pd 的晕带集体回弯机制解释时^[12], 认为是由一对 $g_{7/2}$ 质子的顺排引起的, 而我们对于 $Z = 48$ 的^{112,114,116}Cd 的高自旋态研究中^[13], 认为其晕带的集体回弯是由一对 $h_{11/2}$ 中子的顺排引起的. 最近我们对相邻丰中子偶偶核¹¹⁰Ru 的高自旋态研究作了报道^[14], 也观测到晕带的集体回弯现象, 并提出¹¹⁰Ru 的回弯机制与相邻偶 Z 核^{112,114,116}Pd 不同, 可能是由一对 $h_{11/2}$ 中子的顺排所致. 图 3 为我们观测到的^{109,111}Ru 的几条集体转动带连同¹¹⁰Ru 的晕带的第一类转动惯量 $J^{(1)}$ 随转动频率 $\hbar\omega$ 的变化曲线, 其中, 在¹⁰⁹Ru 中的 4 条转动带分别为: 带(1)与带(2)为基带的两条 signature 伙伴带, 带(3)与带(4)分别为基于 $11/2^-$ 能级的 $h_{11/2}$ 中子闯入带, 而在¹¹¹Ru 中的带(1)与带(2)也为 $h_{11/2}$ 中子的闯入带, 这些集体带的特性已在以往报道中讨论过^[1,2]. 从图中可以看出, ¹¹⁰Ru 晕带的集体回弯发生在 $\hbar\omega \approx 0.4\text{MeV}$ 的地方, 而在其相邻奇 A 核^{109,111}Ru 的转动带中, 直到 $\hbar\omega \approx 0.5\text{MeV}$ 时, 尚未观测到集体回弯现象. 这正说明, 在¹¹⁰Ru 中的集体回弯是由一对中子顺排所致, 因为在^{109,111}Ru 中, 由于奇中子的堵塞

效应, 使得中子的第一回弯不能发生或大大推迟. 而如果¹¹⁰Ru 中的集体回弯是由一对质子顺排所致, 则在^{109,111}Ru 中则不应存在堵塞效应, 应在与相邻偶核¹¹⁰Ru 相应的转动频率附近也观测到回弯现象.

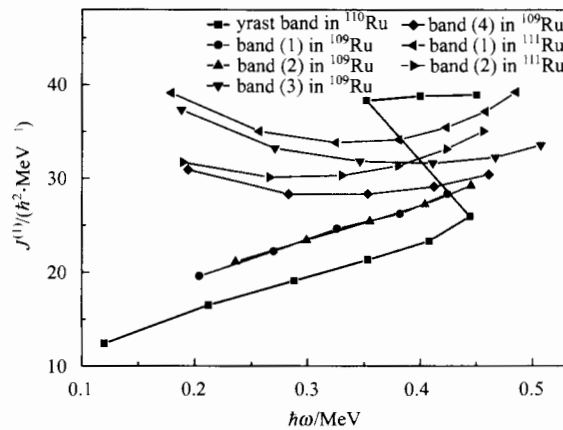


图 3 丰中子奇 A 核^{109,111}Ru 的集体转动带以及偶偶核¹¹⁰Ru 晕带的转动惯量 $J^{(1)}$ 随转动频率 $\hbar\omega$ 的变化曲线

为了进一步理解这些丰中子 Ru 奇 A 核的集体转动带特性及其起源, 我们进行了具有可变转动惯量芯的三轴转子加准粒子的粒子-转子模型计算, 程序的说明见文献^[15]. 在以往对于丰中子偶偶核^{108,110,112}Ru 的高自旋态研究中^[16], 指出这几个核为三轴形变核, 其形变参量 $\gamma \approx 20^\circ - 25^\circ$. 我们在计算中, 取的形变参量为: $\epsilon_2 = 0.19$, $\gamma = 24^\circ$, 对于不同的奇 A 核, ϵ_2 与 γ 值稍有调整, 其他参量取标准值. 分别计算了这些丰中子 Ru 奇 A 核的集体转动带的能级与正宇称带内跃迁几率 $B(M1)/B(E2)$ 的比值. 计算的集体转动带的能级与实验的比较如图 4 所示. 图中, 左边部分的能级分别为^{107,109}Ru 的基于 $5/2^+$ 基态转动带的能级, 而右边部分为^{107,109,111,113}Ru 的基于 $11/2^-$ 带头的闯入带能级. 理论计算的能级与实验总体符合是较满意的. 在自旋态较高的部分偏差要大些, 尤其对于^{109,111}Ru 负宇称带能级. 计算表明, ^{107,109}Ru 的基态转动带起源于 $d_{5/2}$ 与 $g_{7/2}$ 轨道准中子组态与相邻偶偶核芯的耦

合, $^{107,109,111,113}\text{Ru}$ 的负宇称带则起源于 $h_{11/2}$ 轨道中子与相邻偶核芯的耦合. 而对于具有不同中子数的奇 A 核, 其负宇称带对应于 Nillson 能级所占居的单粒子轨道分别为: ^{107}Ru : $[550\ 1/2]$, ^{109}Ru : $[541\ 3/2]$, ^{111}Ru : $[532\ 5/2]$, ^{113}Ru : $[523\ 7/2]$. 这与物理图像上的直观理解是一致的: 随着中子数的增加, 最后

一个奇中子所占居负宇称带的单粒子轨道相应抬高. 表 2 为算得的 $^{107,109}\text{Ru}$ 中的基带正宇称带的 $B(M1)/B(E2)$ 值与实验值的比较. 对 ^{107}Ru , 理论与实验符合得较好, 但对于 ^{109}Ru , 理论与实验值相差较大. 需要进一步改进.

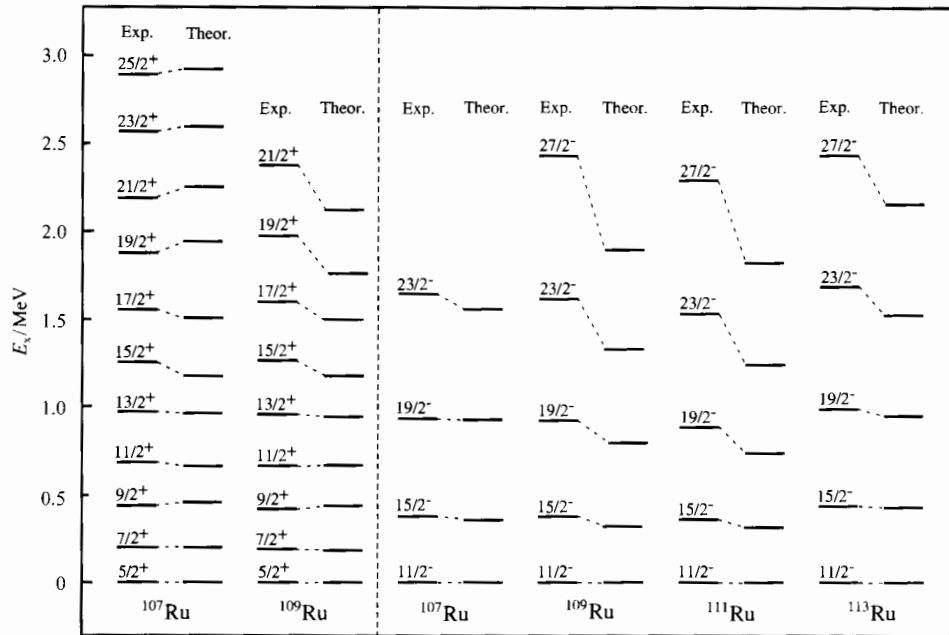


图 4 粒子-转子模型计算得到的转动带能级与实验比较

取带头能量值为零. 图中左边为 $^{107,109}\text{Ru}$ 的基带能级, 右边为 $^{107,109,111,113}\text{Ru}$ 的负宇称带(闯入带)能级.

表 2 粒子-转子模型计算得到的 $^{107,109}\text{Ru}$ 的基带中 $B(M1)/B(E2)$ 值与实验值比较

		$\frac{B\left(M1, \frac{9^+}{2} \rightarrow \frac{7^+}{2}\right)}{B\left(E2, \frac{9^+}{2} \rightarrow \frac{5^+}{2}\right)}$	$\frac{B\left(M1, \frac{11^-}{2} \rightarrow \frac{9^+}{2}\right)}{B\left(E2, \frac{11^+}{2} \rightarrow \frac{7^+}{2}\right)}$	$\frac{B\left(M1, \frac{13^+}{2} \rightarrow \frac{11^+}{2}\right)}{B\left(E2, \frac{13^+}{2} \rightarrow \frac{9^+}{2}\right)}$	$\frac{B\left(M1, \frac{15^+}{2} \rightarrow \frac{13^+}{2}\right)}{B\left(E2, \frac{15^+}{2} \rightarrow \frac{11^+}{2}\right)}$	$\frac{B\left(M1, \frac{17^+}{2} \rightarrow \frac{15^+}{2}\right)}{B\left(E2, \frac{17^+}{2} \rightarrow \frac{13^+}{2}\right)}$
^{107}Ru	实验	0.69	0.49	0.28	0.32	0.13
	理论	1.80	0.57	0.23	0.39	0.12
^{109}Ru	实验	0.24	0.58	0.54		
	理论	3.1	1.8	1.6		

参考文献 (References)

- ZHU S J, GAN C Y, Hamilton J H et al. Chin. Phys. Lett., 1998, 15: 793
- Hwang J K, Ramayya A V, Hamilton J H et al. J. Phys., 1998, G24: L9
- ZHU S J, Hamilton J H, Ramayya A V et al. Phys. Rev., 2001, C65: 014307
- ZHU Sheng-Jiang, XU Rui-Qing, Hamilton J H et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2002, 26: 791 (in Chinese)
(朱胜江, 许瑞清, Hamilton J H 等. 高能物理与核物理, 2002, 26: 791)

- 5 Fotiades N, Cizewski J A, Krücken R et al. Phys. Rev., 2000, **C61**: 064326
- 6 ZHANG Z, ZHU S J, Hamilton J H et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 064307
- 7 ZHANG Zheng, ZHU Sheng-Jiang, Hamilton J H et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2003, **27**: 688 (in Chinese)
(张征,朱胜江,Hamilton J H 等. 高能物理与核物理, 2003, **27**: 688)
- 8 Hamilton J H, Ramayya A V, ZHU S J et al. Prog. Part. Nucl. Phys., 1995, **35**: 635
- 9 ZHU S J, LU Q H, Hamilton J H et al. Phys. Lett., 1995, **B357**: 273
- 10 ZHU S J, Hamilton J H, Ramayya A V et al. Phys. Rev., 1999, **C59**: 1316
- 11 Radford D C. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., 1995, **A361**: 297
- 12 Aryaeinejad R, Cole J D, Greenwood R C et al. Phys. Rev., 1993, **C48**: 566
- 13 XIAO Shu-Dong, ZHU Sheng-Jiang, Hamilton J H et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2004, **28**: 37 (in Chinese)
(肖树冬,朱胜江,Hamilton J H 等. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 37)
- 14 JIANG Z, ZHU S J, Hamilton J H et al. Chin. Phys. Lett., 2003, **20**: 350
- 15 XING Zheng, CHEN Xing-Qu, XU Shu-Wei. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1996, **20**: 85 (in Chinese)
(邢正,陈星渠,徐树威. 高能物理与核物理, 1996, **20**: 85)
- 16 LU Q H, Butler-Moore K, ZHU S J et al. Phys. Rev., 1995, **C52**: 1348

Further Research on Level Structures of Neutron-Rich Odd-A Ru Nuclei*

ZHU Sheng-Jiang^{1,1)} ZHANG Zheng¹ J. H. Hamilton² A. V. Ramayya² J. K. Hwang² XIAO Shu-Dong¹
CHE Xing-Lai¹ YU Ying-Nan¹ LI Ming-Liang¹ ZHEN Ran-Cheng¹ I. Y. Lee³ J. O. Rasmussen³ W. C. Ma⁴

1(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2(Department of Physics, Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, USA)

3(Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA)

4(Department of Physics, Mississippi State University, MS 39762, USA)

Abstract Through analyzing the data with high statistics from measuring high-fold prompt γ -ray coincidence events following the spontaneous fission of ^{252}Cf with the Gammasphere detector array, the level schemes in neutron-rich odd- A $^{109,111}\text{Ru}$ nuclei have been extended up to higher spin states. Based on the data analysis of the coincidence matrices with different delay times, the life times for many low excited levels have been obtained in $^{107,109,111,113}\text{Ru}$ nuclei, among them, the 96.4 keV level in ^{109}Ru is an isomer with life time value 1300ns. It is shows that the observed backbending in the yrast band of the neighboring even-even ^{110}Ru is indeed originated from the alignment of a pair of neutrons through analyzing the moments of inertia $J^{(1)}$ vs. rotational frequencies $\hbar\omega$ of the observed collective bands in $^{107,109}\text{Ru}$ nuclei. Triaxial rotor plus particle model has been employed to calculate some levels of the collective bands as well as the $B(M1)/B(E2)$ values. The calculated results basically accord with the experimental ones.

Key words nuclear structure, collective band, life time of level, rotor plus particle model

Received 14 May 2004

* Supported by the Major State Basic Research Development Program (G2000077405), the National Natural Science Foundation of China (10375032), the Special Program of Higher Education Science Foundation (20030003090), U.S. Department of Energy (DE-FG05-88ER40407)

1)E-mail: zhushj@mail.tsinghua.edu.cn