

## 轻粒子产额及其关联的同位旋效应\*

苏前敏<sup>1</sup> 马余刚<sup>1,2</sup> 沈文庆<sup>1</sup> 王建松<sup>1</sup> 蔡翔舟<sup>1</sup> 方德清<sup>1</sup>

1 (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

2 (复旦大学李政道综合物理实验室 上海 200433)

**摘要** 用晶格气体模型系统地研究了热发射体的粒子发射特性,阐述了发射体系的同位旋对轻系统的中子、带电粒子和轻粒子产额,以及对轻粒子产额比和双产额同位素比的影响.发现轻粒子产额和产额比是复合系统同位旋的敏感观测量,而双产额同位素比几乎不依赖于体系的同位旋.

**关键词** 同位旋效应 轻粒子发射 轻同位素比

### 1 引言

放射性核束的兴起,使人们对同位旋自由度的研究和认识发生了重大的变化.通过研究同位旋自由度对核反应性质的影响,并进一步提取同位旋相关的核态方程和介质中核子-核子碰撞截面,这对核物质的基本性质的理解,甚至对有关高能物理和核天体物理的进一步研究有着重要的作用.

轻粒子的产额是重离子反应中重要的可观测量.一方面,通过它可一定程度地体现出反应机制和物理内涵.随着核温度的变化,系统可能经历从轻粒子的蒸发为主到碎裂,甚至多重碎裂<sup>[1]</sup>进而在到气化<sup>[2]</sup>的变化,在这些过程中通过对轻粒子和碎片发射的仔细研究可以获得系统演变的有关情况.另一方面,无论从实验和理论来看,核温度是一个相当重要的物理量.而对它的提取通常也需要借助于对轻粒子及其同位素进行观测.例如,核温度的提取可以从对轻粒子能谱的 Maxwell-Boltzman 拟合中求出系统的运动学温度,或者通过测量不稳定的轻粒子的激发态布居求出核的发射温度<sup>[3]</sup>,或者从轻粒子同位素对的比提取核的同位素温度<sup>[4]</sup>.最后一个热温度计的应用和解释已成为当今核物理的一个热点问题.尤其是关于激发能-温度曲线的测量(即核的量热曲线)和解释<sup>[5]</sup>,已成为当今核物质液气相变研究的一个重要依据<sup>[6]</sup>.从这些角度出发,我们将选取轻粒子发射作为观测量来分析原子核的同位旋效应对它的影响.

1999-01-05 收稿

\* 国家自然科学基金(19705012),国家杰出青年基金(19725521),上海市科技启明星计划(97QA14038),中国科学院院长基金特别支持,国家教委和国家人事部择优资助留学回国人员基金,上海市引进海外高层次留学人员专项基金资助项目

目前,由于 $4\pi$ 探测器的投入使用,使得对出射的轻粒子和碎片的测量更为完整,发射源的诸多产物都可以逐个事件地记录下来.国内兰州重离子加速器上正在建造相应的 $4\pi$ 探测器,这为今后在国内开展反应动力学和热力学性质的研究打好了基础.同时放射性束流的建立及其储存环的投入建设<sup>[7]</sup>,将为国内开展同位旋物理创造必要的实验条件<sup>[8-10]</sup>.本工作将采用晶格气体模型系统地研究轻系统的轻粒子产额、产额比及双产额同位素比的同位旋效应,以期今后有关利用放射性束流和 $4\pi$ 探测器的实验作出理论上的指导.

## 2 模型

很早以前,李政道和杨振宁用晶格气体模型<sup>[11]</sup>(Lattice Gas Model,以下简称格气模型)将单一原子气体的巨配分函数映射到用于描写粒子自旋为 $1/2$ 的伊辛模型中的正则系综,成功地描述了原子体系的液气相变.目前格气模型已经应用到核物理领域,例如,在巨正则系综中用正则系综的近似抽样研究了不对称的核体系<sup>[12]</sup>,用平均场近似研究非对称的无限核物质<sup>[13]</sup>.加拿大的J. Pan, Das Gupta小组在格气模型方面做了大量的工作,并成功地拟合了大量的中心碰撞<sup>[14]</sup>和周边反应<sup>[15]</sup>的实验结果.

这里格气模型的研究对象为中能重离子反应中入射道形成的已达到热力学平衡的具有 $n$ 个核子的体系.模型中通过蒙特卡罗抽样交换粒子,直到平衡态.此时的核物质被想象成三维晶格,其格点或者是空的或者是被质子(或中子)占据.将 $n$ 个核子放进格点数 $N$ 的三维晶格中,格点为空时,占有数 $\tau = 0$ ;格点为质子(中子)占据时, $\tau = 1(-1)$ .相邻核子的相互作用为 $\epsilon_{\tau_i\tau_j}$ ,以模拟短程强相互作用.模型中哈密顿量为

$$H = \sum_{i=1}^n \frac{p_i^2}{2m} - \sum_{i < j} \epsilon_{\tau_i\tau_j} \tau_i \tau_j, \quad (1)$$

$\epsilon_{11} = \epsilon_{-1-1} = 0, \epsilon_{1-1} = \epsilon_{-11} = -5.33\text{MeV}$ ,  $p_i$ 为第 $i$ 个核子的动量, $m$ 为每核子质量.即假定不考虑同类核子间的相互作用,而考虑异类核子间的吸引作用,这与泡利不相容原理也是自洽的.当然,也可假定同类核子间存在排斥势,但这并不改变用本文的参数得出的结论.参数的选取要符合核的基态结合能性质.三维晶格格点数为 $N$ ,故体系的相对密度为 $\rho_t/\rho_0 = n/N$ ,其中 $\rho_0 = 0.168\text{fm}^{-3}$ 为正常核密度, $\rho_t$ 为冻结密度.由于考虑了符合经典统计力学的体系,故对于位置 $r$ 和动量 $p$ 的抽样可以相互独立.位置通过蒙特卡罗的Metropolis抽样方法获得,而动量通过麦克斯韦-玻耳兹曼分布的蒙特卡罗抽样获得.这样一个组态就形成了.

在核反应的基本测量中,一个重要的物理量是碎片的分布.在格气模型中,假定相邻核子的相互作用 $\epsilon_{\tau_i\tau_j}$ 与其相对运动动能 $P_r^2/2\mu$ 决定着集团(碎片)的形成,并假定满足条件 $P_r^2/2\mu + \epsilon_{\tau_i\tau_j} < 0$ ,则相邻的两核子属于同一碎片, $\mu$ 为核子约化质量,这种思想已经体现在凝聚态物理的液滴大小的计算中<sup>[16]</sup>.有了碎片的形成机制,许多与碎片相关的物理量就可在这样的框架下直接进行计算.

格气模型仅输入两个正则变量,即核温度 $T$ 和冻结密度 $\rho_t$ ,可方便地研究体系散裂后碎片的分布和它的相关物理量.与渗透模型<sup>[17,18]</sup>相比,格气模型也是统计模型,也用晶

格来简化研究对象,唯象地描述复杂的多体问题,都能描述多重碎裂,但它具有温度和密度双重依赖性,需要输入两个参数,并且该模型里包含着哈密顿量,相邻核子有相互作用,这样可以求出核状态方程和它的热力学性质,也包含了更丰富的物理思想.

### 3 计算结果及讨论

本工作选择了 $^{32}\text{Ar}$ ,  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{Ar}$  和  $^{44}\text{Ar}$  4个轻的同位素系统,它们的同位旋分别为  $-0.125, 0, 0.1$  和  $0.182$ . 同时还选择了质量数等于40的 $^{40}\text{Si}$ ,  $^{40}\text{S}$ ,  $^{40}\text{Ar}$  和  $^{40}\text{Ca}$  4个核,它们的同位旋分别为  $0.3, 0.2, 0.1$  和  $0$ . 这些核的冻结密度取为接近于  $0.39\rho_0$ , 即取边长为  $4\times 5\times 5$  的长方晶格. 选取  $0.39\rho_0$  作为冻结密度,是基于文献[14]中对  $\text{Ar} + \text{Sc}$  及文献[15]中对  $\text{Cl} + \text{Au}$  和  $\text{Ge} + \text{Ti}$  的格气模型的计算符合实验数据. 我们的计算从  $3\text{--}5.5$  MeV, 间隔  $0.5$  MeV, 每次抽样 1000 个事件.

图1显示了随着核温度和同位旋的变化, Ar同位素热发射源产生的中子产额、质子产额和带电粒子产额的变化(图左边). 图中可以清晰地看出含中子数相对多的系统, 它的中子产额就相对多, 而质子产额和带电粒子产额就相对少. 从表面上看, 同一温度下质子和带电粒子的产额决定于系统中所含的中子的多少, 中子越多, 其产额就越少. 对于中子的理解, 可以很好地联系于体系的同位旋. 然而对质子和带电粒子的理解似乎有些困难, 因为这些核是同位素核, 体系的电荷数均是18, 因此从表面上说, 质子和带电粒子数呈现了与同位旋的反关联. 然而从我们的另一个工作的结论中知道, 激发能也许是一个更为基本的物理量<sup>[18]</sup>. 在格气模型中, 激发能定义为

$$E^*/A = E_T - E_{\text{gs}} = \frac{3}{2}T + \epsilon_{\tau\bar{\tau}} \frac{N_{\tau\bar{\tau}}^T}{A} - \epsilon_{\tau\bar{\tau}} \frac{N_{\tau\bar{\tau}}^{\text{gs}}}{A}, \quad (2)$$

式中  $N_{\tau\bar{\tau}}^T$  为温度  $T$  系统的最大成键数,  $N_{\tau\bar{\tau}}^{\text{gs}}$  为系统在基态的最大成键数. 当采用激发能  $E^*/A$  替代核温度  $T$  (图右边) 时, 发现中子的发射规律没有变化, 不同激发能时的质子和带电粒子的发射弥散在同一条曲线上. 即在同一  $E^*/A$  处, 质子和带电粒子显示了同位旋的不相关性, 这与体系的电荷数相同的事实是自洽的. 对于  $A=40$  的  $\text{Si}$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{Ar}$  和  $\text{Ca}$  的结果, 中子的同位旋相关性仍然成立. 而质子和带电粒子的发射显示了同位旋的反关联, 即使将  $E^*/A$  作为横坐标, 也同样显示反关联. 由于在这些系统中质子数的不同, 实际上显示了质子和带电粒子与系统电荷数的正关联(尤其在低激发能区).

图2中显示了 Ar同位素随着核温度和同位旋的变化, 其同位素产额比  $R(p/d)$  和  $R(d/t)$ 、同质异位素产额比  $R(n/p)$  和  $R(t/^3\text{He})$  及  $^A_Z\text{X}/^{A+1}_{Z+1}\text{X}$  的轻粒子比  $R(d/^3\text{He})$  和  $R(t/^4\text{He})$ . 在同位素产额比  $R(p/d)$  和  $R(d/t)$  中, 分母粒子比分子粒子多一个中子, 因此这些比反映了发射源的缺中子程度. 从图中可清晰地看出, 在同样温度下, 产额比随着发射源中的中子丰度变化. 发射源的中子越多, 则其同位素产额比就越低, 这同发射体系的  $N/Z$  系统学相一致. 同质异位素产额比  $R(n/p)$  和  $R(t/^3\text{He})$  反映了发射体的丰中子程度. 同样, 系统的中子数越少(对同位素而言)或核电荷数(对同质异位素而言)越多, 它的产额比就越低, 这同碎裂体系的  $N/Z$  系统学也是相一致的. 在温度稍高时, 产额比开

始变得平缓.对于  $R(d/{}^3\text{He})$  和  $R(t/{}^4\text{He})$ , 也反映了丰中子的程度.图 2 显示的结果说明了越是高同位旋的核,越是有大的  $R(d/{}^3\text{He})$  和  $R(t/{}^4\text{He})$ , 这与系统  $N/Z$  系统学也是相一致的.对于  $A = 40$  的一串核,这些比也支持了上面的看法.

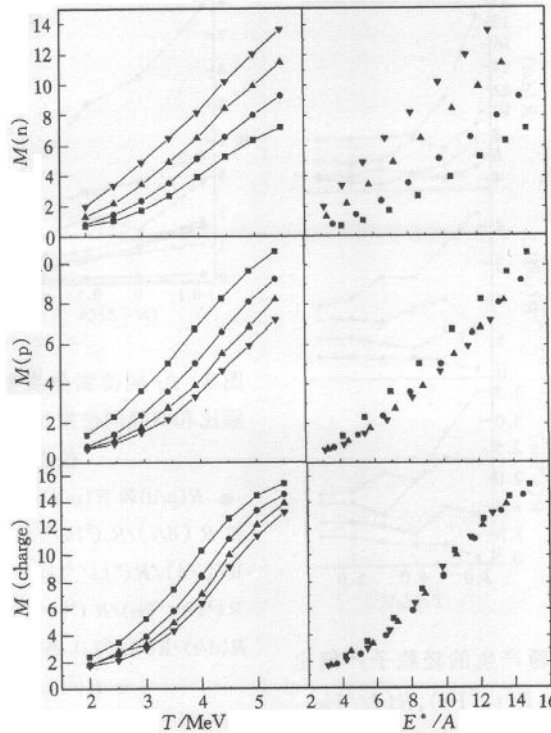


图 1 Ar 同位素热发射源<sup>32</sup>Ar(■),<sup>36</sup>Ar(●),<sup>40</sup>Ar(▲)和<sup>44</sup>Ar(▼)发射的中子、质子和带电粒子的多重性随温度(左边)和激发能(右边)的变化

为了清楚地显示轻核素的比随发射源的同位旋的系统规律,选取一个固定的温度,如 4.5MeV 下,看它们随同位旋的变化.应该指出选择不同的温度轻核素比的数值会有所不同,但规律不会变化(见图 2).图 3(a)显示了在 4.5MeV 时 Ar 同位素的轻粒子产额比  $R(p/d)$ ,  $R(d/t)$ ,  $R({}^3\text{He}/{}^4\text{He})$ ,  $R({}^6\text{Li}/{}^7\text{Li})$ ,  $R({}^3\text{He}/d)$ ,  $R({}^4\text{He}/t)$ ,  $R({}^3\text{He}/t)$  和  $R(p/n)$  的变化.从图可以看到,它们随着发射源的同位旋的升高而明显降低(为了统一反映同位旋的依赖性,对同质异位素的比和  ${}^A_Z\text{X}/{}^{A+1}_{Z+1}\text{X}$  的比采用的是倒数,以使它们同样反映的是系统的缺中子程度).然而,当我们组合一对轻的同位素时,即利用同位素对的产额比  $\frac{R(p/d)}{R({}^3\text{He}/{}^4\text{He})}$ ,  $\frac{R(d/t)}{R({}^3\text{He}/{}^4\text{He})}$ ,  $\frac{R(p/d)}{R({}^6\text{Li}/{}^7\text{Li})}$ ,  $\frac{R(d/t)}{R({}^6\text{Li}/{}^7\text{Li})}$  和  $\frac{R({}^3\text{He}/{}^4\text{He})}{R({}^6\text{Li}/{}^7\text{Li})}$ , 却发现它们对同位旋并不敏感(见图 3(b)).从理论上说,轻粒子产额比的变化反映了化学势,而同位素对的组合比(选择了  $\Delta Z=0, \Delta N=1$  的同位素)却抵消了化学势的影响.这个事实也表明了 Albergo 的核温度确定方法不敏感于核体系的同位旋.实验上同样的图像出现在 40MeV/u  ${}^{112}\text{Sn} + {}^{112}\text{Sn}$  和  ${}^{124}\text{Sn} + {}^{124}\text{Sn}$  的对心碰撞中<sup>[19]</sup>.从另一个角度说,实验上选择同位素温度来刻度核温度计有一定的合理性,它原则上不受元素种类和源尺寸的影响.但粒子和碎片的

本身衰变和边馈效应在实验的测量上可能会明显影响同位素温度<sup>[5,20]</sup>,而且在高激发能时,同位素比与温度的关系不敏感,导致实验结果出现温度饱和.  $A=40$  和 Si, S, Ar 和 Ca 系统的情况,结论是相同的.

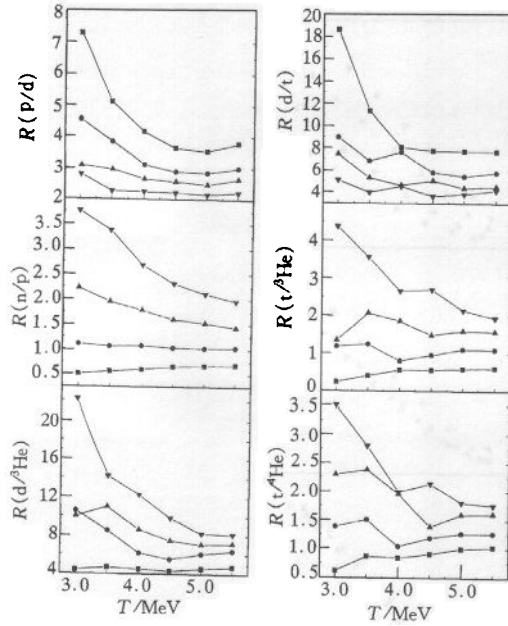


图2 Ar 同位素热发射源产生的轻粒子产额比  $R(p/d)$ ,  $R(d/t)$ ,  $R(n/p)$ ,  $R(t/{}^3\text{He})$ ,  $R(d/{}^3\text{He})$  和  $R(t/{}^4\text{He})$  随温度的变化  
图中符号说明如图1.

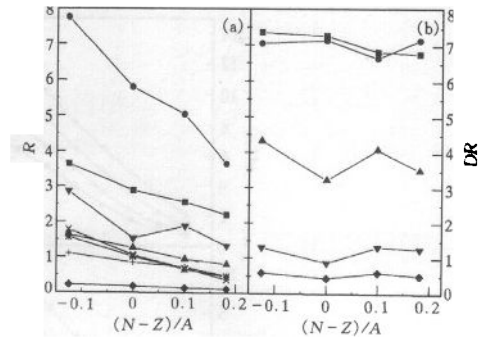


图3 Ar 同位素热发射源产生的轻粒子产额比和双轻同位素比在  $T=4.5\text{MeV}$  时随同位旋的变化  
—■—  $R(p/d)$  和  $R(p/d)/R({}^3\text{He}/{}^4\text{He})$ , —●—  $R(d/t)$  和  $R(d/t)/R({}^3\text{He}/{}^4\text{He})$ , —▲—  $R({}^3\text{He}/{}^4\text{He})$  和  $R(p/d)/R({}^6\text{Li}/{}^7\text{Li})$ , —▼—  $R({}^6\text{Li}/{}^7\text{Li})$  和  $R({}^3\text{He}/{}^4\text{He})/R({}^6\text{Li}/{}^7\text{Li})$ , —◆—  $R({}^3\text{He}/d)$  和  $R(d/t)/R({}^6\text{Li}/{}^7\text{Li})$ . 另在(a)中, —+—  $R({}^4\text{He}/t)$ , —x—  $R({}^3\text{He}/t)$ , —\*—  $R(p/n)$ .

### 4 小结

本文尝试用晶格气体模型系统地研究轻系统中轻粒子产额、产额比及双产额比的同位旋效应. 说明了轻粒子产额和产额比是反应系统的同位旋的敏感观察量, 而双产额同位素比并不敏感. 后者也从理论上预言了对于一串同位素核它们的同位素温度是相同的. 当然这些理论预言是基于统计平衡模型的框架获得的, 因此用一些同位旋相关的动力学运输模型, 如 IBUU<sup>[8]</sup> 和 IQMD<sup>[9]</sup> 等来作类似的研究是有意义的. 有关这方面的理论研究也可以为今后利用放射性束流的  $4\pi$  实验提供一个研究方向.

### 参考文献 (References)

- 1 MA Y G et al. Phys. Rev., 1995, C51: 710
- 2 Rivet M F et al. Phys. Lett., 1996, B388: 219
- 3 Morrissey D J et al. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 1993, 44: 676
- 4 Albergo S et al. Nuovo Cimento, 1985, 89: 1

- 5 MA Y G et al. Phys. Lett. ,1997, **B390**:41
- 6 Bondorf J P et al. Phys. Rev. ,1998, **C58**:R27
- 7 The Elementary Schematic Design of CSR in HIRFL. Institute of Modern Physics, CAS, 1997,1  
(HIRFL-CSR 初步方案设计. 中国科学院近代物理研究所,1997,1)
- 8 LI B A et al. Int. J. Mod. Phys. ,1998, **E7**:147
- 9 CHEN LieWen et al. J. Phys. ,1997, **G23**:211
- 10 MA Y G et al. Chin. Phys. Lett. ,1997, **16**:256
- 11 Lee T D, Yang C N. Phys. Rev. , 1952, **87**:410
- 12 Samaddar S K, Richert J Z. Phys. ,1989, **A332**:443
- 13 Ray S, Shamanna J, Kuo T T S. Phys. Lett. ,1997, **B392**:7
- 14 PAN J, Das Gupta S. Phys. Rev. ,1995, **C51**:1384; Das Gupta S, Pan J. Phys. Rev. ,1996, **C53**:1319
- 15 Beaulieu L et al. Phys. Rev. ,1996, **C54**:973
- 16 Coniglio A, Klein W. J. Phys. ,1980, **A13**:2775
- 17 Bauer W. Phys. Rev. ,1988, **C38**:1297
- 18 MA Y G et al. Euro. Phys. J. ,1999, **A4**:217
- 19 Kunde G J et al. Phys. Lett. ,1998, **B416**:56
- 20 Gullmineli F, Durand D. Nucl. Phys. ,1997, **A615**:117

### Isospin Effect on the Yield of Light Particles and Their Correlations \*

SU QianMin<sup>1</sup> MA YuGang<sup>1,2</sup> SHEN WenQing<sup>1</sup>  
WANG JianSong<sup>1</sup> CAI XiangZhou<sup>1</sup> FANG DeQing<sup>1</sup>

1 (Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2 (T. D. Lee Physics Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract** The Lattice Gas Model is essentially introduced to describe the features of isospin effect on the yield of light particles, their ratios and double isotopic ratios. Calculations show that the multiplicity of light particles is consistent with the systematics of isospin. Moreover, the isotopic yield ratios are in accordance with  $N/Z$  of the system. With the increasing of  $(N-Z)/A$ , the isotopic ratios decrease, but double isotopic ratios display their insensitivity to isospin.

**Key words** isospin effect, emission of light particle, ratio of light isotopes

---

Received 5 Jan 1999

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China (19705012), National Natural Science Fund for Distinguished Young Scholar under Grant (19725521), Shanghai Science and Technology Development Fund under the Grant (97QA14038), Special Foundation of Presidential of The Chinese Academy of Sciences, Scientific Research Foundations for Returned Overseas Chinese Scholar by the National Human Resource Affair Administration and Education Administration of China and Shanghai Government