

文章编号: 1007-4627(2008)01-0008-07

# 用中子晕弹核探寻同位旋非对称核物质状态方程\*

刘建业

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 总结和评述了用中子晕弹核探寻同位旋非对称核物质状态方程。在具有同位旋和动量依赖的同位旋相关量子分子动力学框架内, 采用对比中子晕弹核和相等质量稳定弹核在完全相同入射道条件下物理观测量的差别, 来突出中子晕核明显的同位旋效应和加强物理观测量对于同位旋的灵敏性, 从而提取核物质状态方程。例如, 与稳定弹核碰撞系统相比, 中子晕弹核明显提高了发射核子的中子-质子比和增加了它对于对称势的灵敏性, 这两点特征非常有利于提取对称势。同样, 由于中子晕弹核碰撞系统在低能区 ( $E < 60$  MeV) 由于内部松散结构减弱了核子碰撞力度和动量耗散, 与稳定核碰撞系统相比, 明显提高了原子核阻止; 而在高能区由于两体碰撞同位旋效应的增加, 从而明显提高了原子核阻止。利用这些特征可以提取核子-核子碰撞截面的介质效应和同位旋依赖性。

**关键词:** 中子晕弹核; 对称势; 核子-核子碰撞截面

**中图分类号:** O571.25<sup>+1</sup>; O571.4      **文献标识码:** A

## 1 引言

众所周知, 尽管近年来从实验和理论两个方面对同位旋非对称核物质状态方程进行了许多研究, 并取得了一定的进展, 但至今核物质状态方程的两个主要问题: 对称势和介质中核子-核子碰撞截面仍然存在很大的不确定性。例如, 表示对称能特征的不可压缩系数在正负 400 之间变动。至于介质中核子-核子碰撞截面, 尽管利用各种核多体理论从理论上进行了研究, 但仍有诸多争论。特别是通过重离子碰撞提取介质中核子-核子碰撞截面的研究不多, 对它的性质知之甚少。

国际上, 包括我们以前的工作<sup>[1-4]</sup>都是利用稳定核为炮弹对以上问题进行了研究。现在尝试利用中子晕核的特点, 特别是突出的同位旋效应, 在同位旋和动量相关的输运理论框架内来研究和提取对称势和介质中核子-核子截面的知识, 具有明显的优点。为了突出晕核作为弹核引起核反应的特征, 我们选择晕核与相等质量的稳定核在完全相同入射道条件下, 对两种碰撞系统的物理观测量进行对比。

结果表明, 与稳定核作为炮弹的碰撞系统相比, 晕核作为弹核时的发射核子中子-质子比和同位旋分馏比, 具有非常明显的同位旋效应, 同时加大了发射核子中子-质子比对于对称势的灵敏性。中子晕核碰撞系统的这两个特点非常有利于在重离子碰撞中提取对称势。

为了提取介质中核子-核子碰撞截面, 利用中子晕核采取如上同样的对比方法, 分别进行了计算。在考虑动量相关作用同位旋依赖性后, 同样加强了原子核阻止对于介质效应的灵敏性, 这样对于提取介质中核子-核子碰撞截面是非常有利的。

## 2 同位旋依赖的 QMD 简介

在考虑了量子分子动力学 (QMD)<sup>[5, 6]</sup> 中的同位旋相关平均场和两体碰撞包括泡利阻塞, 以及碰撞系统基态性质等的同位旋效应后得到了同位旋依赖的量子分子动力学 (IQMD), 而 IQMD 中的相互作用如下:

\* 收稿日期: 2007 - 07 - 11; 修改日期: 2007 - 09 - 20

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (G2000077400); 国家自然科学基金重点项目 (10435080); 国家自然科学基金面上项目 (10447006, 10575075); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KJXC2-SW-No2)

作者简介: 刘建业 (1937—), 陕西淳化人, 男 (汉族), 研究员, 博士生导师, 从事原子核物理理论研究工作; E-mail: liujy@lzb.ac.cn

$$U(\rho) = U^{\text{Sky}} + U^{\text{Coul}} + U^{\text{Sym}} + U^{\text{Yuk}} + U^{\text{MDI}} + U^{\text{Pauli}}. \quad (1)$$

为了简单, 仅给出与本文有关的对称势和核子-核子碰撞截面的形式, 其它的相互作用和平均势可参见文献[7, 8]。 $U^{\text{Sky}}$ ,  $U^{\text{Coul}}$ ,  $U^{\text{MDI}}$ ,  $U^{\text{Yuk}}$  和  $U^{\text{Pauli}}$  分别是密度相关的 Skyrme 势、库仑势、动量相关作用、Yukawa 势和泡利势。 $U^{\text{Sym}}$  是对称势<sup>[8]</sup>, 对称势的形式有很多种, 本文使用了两种常用的对称势:

$$U_1^{\text{Sym}} = cF_1(u)\delta\tau_z, \quad (2)$$

$$U_2^{\text{Sym}} = cF_2(u)\left[\delta\tau_z + \frac{1}{2}\delta^2\right], \quad (3)$$

其中

$$\tau_z = \begin{cases} 1 & \text{中子,} \\ -1 & \text{质子,} \end{cases}$$

这里  $c = 32 \text{ MeV}$  是对称势的强度,  $u \equiv \rho/\rho_0$ ;  $F_1(u) = u$  和  $F_2(u) = u^{1/2}$ ;  $\delta$  是相对中子过剩, 即

$$\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho},$$

其中,  $\rho$ ,  $\rho_0$ ,  $\rho_n$  和  $\rho_p$  分别是核子密度、饱和密度、中子密度和质子密度。一个密度相关的介质中核子-核子碰撞截面的经验公式如下<sup>[9]</sup>:

$$\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha) = \left(1 - \alpha \frac{\rho}{\rho_0}\right)\sigma_{\text{NN}}(0), \quad (4)$$

这里  $\alpha$  为介质效应参数, 取  $\alpha = +0.2$  时与集体流的实验数据符合得很好,  $\sigma_{\text{NN}}(0)$  是实验核子-核子碰撞截面<sup>[10]</sup>。

## 3 结果和讨论

### 3.1 晕核的初态特征

图 1 给出了用 Skyrme-Hatree-Fock 平均场理论

方法计算的中子晕核  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$  及相应的等质量稳定核  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^8\text{Li}$  基态的中子和质子密度分布, 然后将这些密度分布带入到 IQMD 初始程序中计算得到两体碰撞核的基态密度分布。可以清楚地看出, 与相应的稳定核相比, 中子晕核具有扩展的中子密度分布。

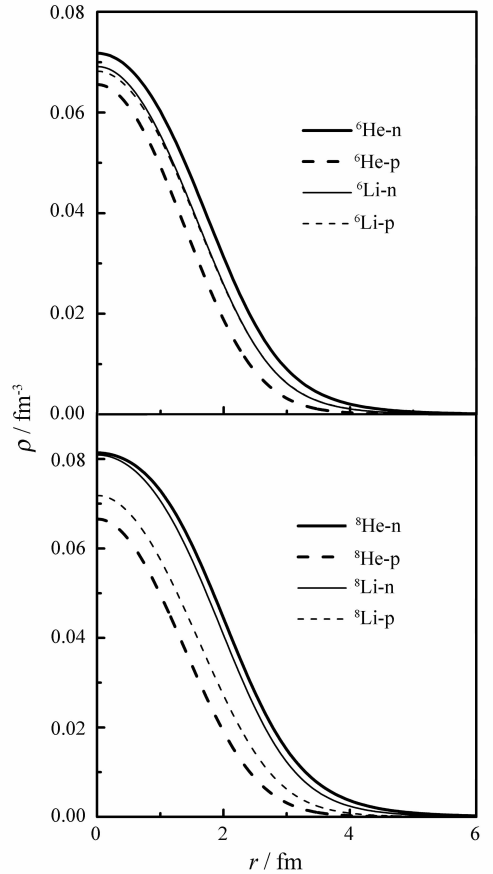


图 1 中子晕核  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$  及相应的等质量稳定核  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^8\text{Li}$  的中子和质子密度分布

表 1 给出了中子晕核  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$  和稳定核  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^8\text{Li}$  的结合能  $E_{\text{bin}}$ 、最后一个中子分离能  $S_n$ 、中子和质子均方半径  $R_n$  和  $R_p$  以及中子-质子比。

表 1  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^6\text{Li}$  和  ${}^8\text{Li}$  的结合能  $E_{\text{bin}}$ 、最后一个中子分离能  $S_n$ 、中子和质子的均方半径  $R_n$  和  $R_p$  以及中子-质子比

|                 | $E_{\text{bin}}/(\text{MeV/u})$ | $S_n/\text{MeV}$ | $R_n/\text{fm}$ | $R_p/\text{fm}$ | n/p  |
|-----------------|---------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|------|
| ${}^6\text{He}$ | 5.32                            | 1.74             | 2.68            | 1.74            | 2.0  |
| ${}^6\text{Li}$ | 6.14                            | 2.2              | 2.31            | 2.2             | 1.0  |
| ${}^8\text{He}$ | 4.09                            | 4.24             | 2.77            | 1.90            | 3.0  |
| ${}^8\text{Li}$ | 5.89                            | 7.73             | 2.54            | 2.20            | 1.67 |

从图 1 和表 1 可以明显看出, 与相应的等质量

稳定核相比, 中子晕核具有明显扩展的中子密度分

布、小的结合能和小的中子分离能、大的中子均方半径以及大的中子-质子比。中子晕核的以上特征，充分表明中子晕核具有明显弱束缚的内部结构和明显的同位旋效应。这些晕核特征在与靶核的碰撞动力学过程中体现出来。

### 3.2 用中子晕核提取对称势

图 2 分别给出了中子晕核  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$  和稳定核  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^8\text{Li}$  轰击  ${}^9\text{Be}$  时, 在两种对称势  $U_1^{\text{Sym}}$  和  $U_2^{\text{Sym}}$  以及完全相同入射道条件下发射核子的中子-质子比  $(n/p)_{\text{nucl}}$  随束流能量  $E$  的演化。可以明显看出, 晕

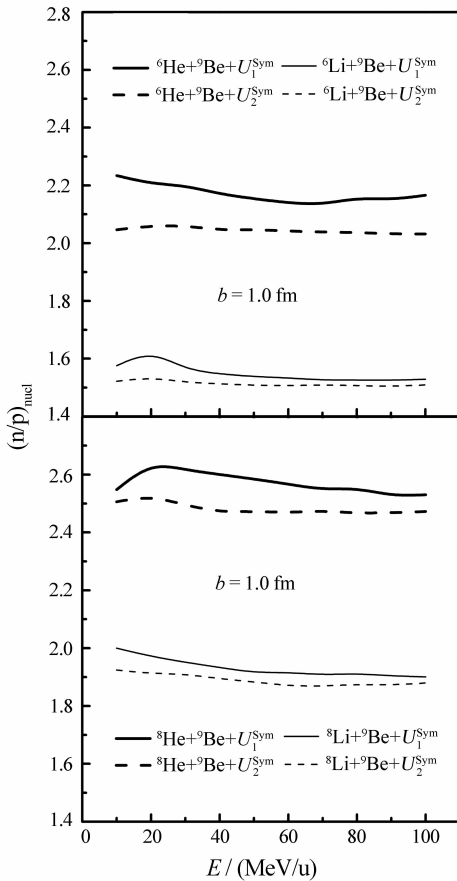


图 2 两类碰撞系统的  $(n/p)_{\text{nucl}}$  随束流能量的演化

核碰撞系统具有两个突出特征: (1) 具有大的  $(n/p)_{\text{nucl}}$  值, 即表明中子晕核碰撞系统具有非常明显的同位旋效应; (2) 用两种对称势所得的两个  $(n/p)_{\text{nucl}}$  值之差也明显变大, 表明中子晕核加大了  $(n/p)_{\text{nucl}}$  对于对称势的灵敏性。对于中子晕核  ${}^6\text{He}$  和  ${}^8\text{He}$  其结果具有同样特征。这正是图 2 和表 1 中子晕核特征在碰撞动力学过程中的体现。其原因如文献[1]中所讲,  $(n/p)_{\text{nucl}}$  灵敏地依赖于对称势。

由于中子晕核碰撞系统的  $\delta = (\rho_n - \rho_p) / (\rho_n + \rho_p)$  明显大于相应稳定核碰撞系统的  $\delta$ 。大的  $\delta$  对应的对称势强, 而小的  $\delta$  对应的对称势弱 (参看 (2) 和 (3) 公式)。即中子晕核碰撞系统的对称势比相应稳定核碰撞系统强。因为对称势对于中子是斥力而对于质子是吸引力。因此, 中子晕核碰撞系统会有更多的中子发射, 故与稳定核碰撞系统相比, 对于全部计算的能区, 明显增加了  $(n/p)_{\text{nucl}}$ , 即明显增加了  $(n/p)_{\text{nucl}}$  的同位旋效应。为了研究碰撞参数  $b$  对于  $(n/p)_{\text{nucl}}$  同位旋效应的影响, 图 3 给出了以上两类碰撞系统的  $(n/p)_{\text{nucl}}$  在束流能量  $E = 20 \text{ MeV/u}$  时随碰撞参数  $b$  的演化。从图 3 清楚地看到, 在所有碰撞参数区间,  $(n/p)_{\text{nucl}}$  同样具有与图 2 相同的特征。总之, 从图 2 和图 3 看到, 中子晕核碰撞系统一方面明显增加了  $(n/p)_{\text{nucl}}$  的同位旋效应, 同时增加了  $(n/p)_{\text{nucl}}$  对于对称势的依赖性。这两个特征无疑对于通过  $(n/p)_{\text{nucl}}$  提取对称势都是非常有利的。

这里需要说明, 库仑作用对于  $(n/p)_{\text{nucl}}$  具有明

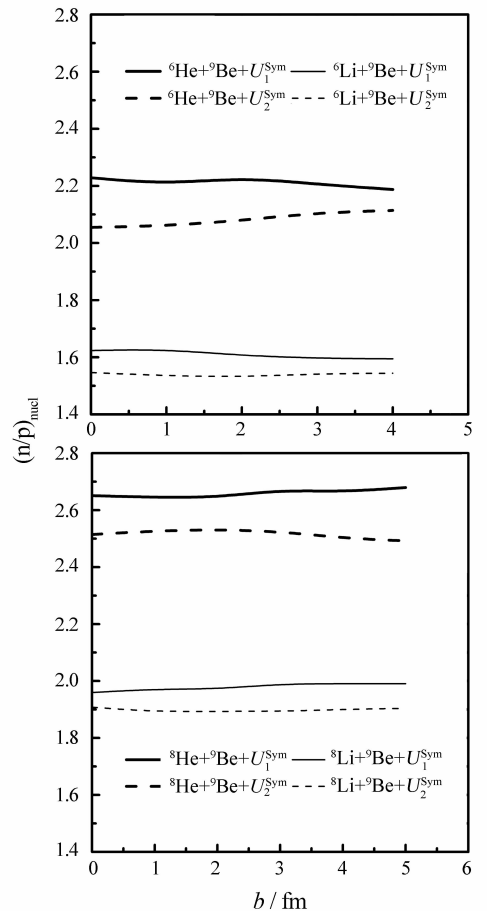


图 3 两类碰撞系统的  $(n/p)_{\text{nucl}}$  在束流能量  $E = 20 \text{ MeV/u}$  时随碰撞参数  $b$  的演化

显的同位旋效应, 与对称势的同位旋效应相互交织, 我们在文献[11]中有详细的讨论。因为对称势对于中子是斥力, 而对于质子是吸引力, 故对称势增加了中子发射数, 使  $(n/p)_{\text{nucl}}$  增大; 但是库仑作用使质子之间相互排斥, 使发射质子数增加, 从而使  $(n/p)_{\text{nucl}}$  减少。然而, 在图 2 和图 3 中, 对同一碰撞系统而言, 电荷数确定, 在确定电荷数条件下, 不同对称势引起  $(n/p)_{\text{nucl}}$  的相对差别, 不受库仑作用的影响。故在图 2 和图 3 中, 中子晕核和稳定核两种对称势造成  $(n/p)_{\text{nucl}}$  的相对间隔是确定的, 不受库仑作用的影响。

### 3.3 利用中子晕弹核提取介质中核子-核子碰撞截面

介质中核子-核子碰撞截面不仅对于了解原子核的性质和核物质状态方程是非常重要的, 同样对认识中子星和超新星性质也是很重要的。但是, 至今对于介质中核子-核子碰撞截面知之甚少。许多人通过各种多体理论进行了计算, 但结果有诸多争论。特别是从重离子碰撞实验上提取介质中核子-核子碰撞截面的工作不多。为此, 我们曾提出了利用放射性核引起重离子碰撞中的原子核阻止作为探针来研究和提取介质中核子-核子碰撞截面的知识<sup>[7]</sup>, 故在原有工作的基础上充分利用中子晕核作为弹核的优点, 在具有动量相关作用和同位旋依赖性的 IQMD 框架内, 同时考虑核子-核子碰撞截面介质效应和同位旋依赖性对通过中子晕核引起的重离子碰撞中作进一步研究和提取介质中核子-核子碰撞截面的介质效应和同位旋依赖性。

#### 3.3.1 介质中核子-核子碰撞截面 $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha)$

众所周知, 介质中核子-核子碰撞截面  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha)$  和中子-质子截面对质子-质子(中子-中子)截面比  $\sigma_{\text{np}}/\sigma_{\text{pp}}$  灵敏地依赖于碰撞系统密度分布和束流能量。同时碰撞系统的密度分布灵敏地依赖束流能量和碰撞时间。实验上重离子碰撞集体流的拟合强烈支持介质中核子-核子碰撞截面  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha)$  小于自由核子-核子碰撞截面  $\sigma_{\text{NN}}^1(0)$ 。这里对于不同强度的介质效应, 公式(4)中的  $\alpha$  为不等于 0 的各种值。我们的计算中采取  $\alpha = 0, 0.2$  和  $0.4$ , 以便研究介质效应的大小, 其中  $\alpha = 0$  为自由核子-核子碰撞截面, 而右上角指标表示核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性。其中  $\sigma_{\text{NN}}^0(\alpha)$  为同位旋无关的核子-核子碰撞截面。从公式(4)可以看出  $\sigma_{\text{NN}}^1(0) > \sigma_{\text{NN}}^1(\alpha \neq 0)$ 。

#### 3.3.1.1 $\sigma_{\text{np}}(0)$ 和 $\sigma_{\text{pp}}(0)$ 作为核子能量 $E_{\text{Lab}}$ 和密度 $\rho$ 的函数

图 4 给出了  $\sigma_{\text{np}}(0)$  和  $\sigma_{\text{pp}}(0)$  随核子能量  $E_{\text{Lab}}$  的演化, 图中黑圆点是实验数据, 而两条曲线是用最小二乘法拟合的实验数据, 表示如下:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{np}}(0) &= -70.67 - 18.18/\beta + 25.26/\beta^2 + \\ &\quad 113.85/\beta, \\ \sigma_{\text{pp}}(0) &= -13.73 - 15.04/\beta + 8.76/\beta^2 + \\ &\quad 68.67/\beta^4,\end{aligned}$$

这里  $\beta = v/c$ 。从图 4 可以明显看出,  $\sigma_{\text{np}}(0)$  和  $\sigma_{\text{pp}}(0)$  随核子能量  $E_{\text{Lab}}$  的增加而很快下降, 然后缓慢上升。但在  $E_{\text{Lab}} = 600$  MeV 以下能区,  $\sigma_{\text{np}}(0)$  总是大于  $\sigma_{\text{pp}}(0)$  (这里  $\sigma_{\text{m}}(0) = \sigma_{\text{pp}}(0)$ ), 即  $\sigma_{\text{np}}(0)$  和  $\sigma_{\text{pp}}(0)$  的数值和比例关系随  $E_{\text{Lab}}$  的增加而变化。

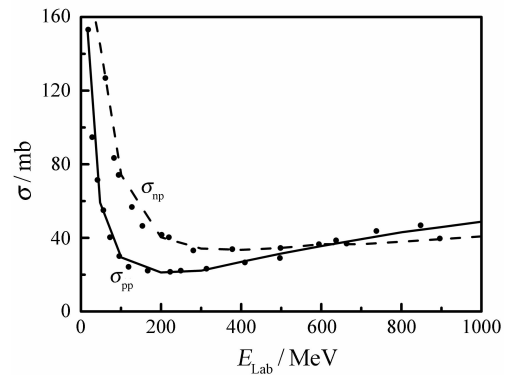


图 4  $\sigma_{\text{np}}(0)$  和  $\sigma_{\text{pp}}(0)$  随核子能  $E_{\text{Lab}}$  的演化

图 5 给出了  $\sigma_{\text{np}}/\sigma_{\text{pp}}$  作为  $E_{\text{Lab}}$  和密度  $\rho$  的函数, 其中  $\rho = 0, \rho_0, 2\rho_0, \rho_0$  是基态密度。实线是从实验数据得到的, 而虚线是利用 Dirac-Bruckner 方法和 Bonn 势计算得到的。很显然, 介质中核子-核子碰

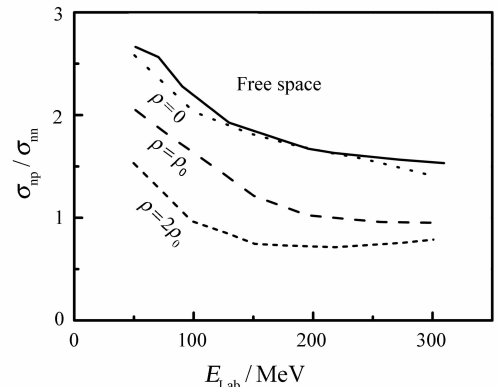


图 5  $\sigma_{\text{np}}/\sigma_{\text{pp}}$  作为  $E_{\text{Lab}}$  和密度  $\rho$  的函数

撞截面都明显小于自由核子-核子碰撞截面。同时  $\sigma_{np}/\sigma_{pp}$  随核子能量的增加而下降。然而,其它几个理论计算结果表明  $\sigma_{np}/\sigma_{pp}$  在对称介质中随  $E_{\text{Lab}}$  的增加而增加。因此,对于核子-核子碰撞截面的介质效应和同位旋依赖性从实验和理论的结论上进行研究是非常重要的。

### 3.3.1.2 核子-核子碰撞截面的介质效应和同位旋依赖性

原子核阻止的

$$R = \frac{2}{\pi} \frac{\sum_i^A |P_{\perp}(i)|}{\sum_i^A |P_{\parallel}(i)|},$$

其中  $P_{\perp}(i)$  和  $P_{\parallel}(i)$  分别为

$$P_{\perp}(i) = \sqrt{P_x(i)^2 + P_y(i)^2} \text{ 和 } P_{\parallel}(i) = P_z(i),$$

$A$  是弹核和靶核质量之和。因为原子核阻止主要是由两体碰撞过程中的动量耗散造成的。同时利用了中子晕核具有更明显的同位旋效应和松散的晕结构的特点,研究了核子-核子碰撞截面的介质效应和同位旋依赖性。为了突出中子晕核作为弹核明显的同位旋效应,在完全相同入射道条件下,将中子晕核碰撞系统与相等质量稳定弹核碰撞系统的结果进行对比和分析。在中子晕核和相应的稳定弹核轰击相同靶核  $^{40}\text{Ca}$ , 测量原子核阻止在不同介质 ( $\alpha = 0, 0.2, 0.4$ ) 以及同位旋相关截面  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha)$  和同位旋无关截面  $\sigma_{\text{NN}}^0(\alpha)$  条件下随核子能量  $E_{\text{Lab}}$  的演化。

图 6(a) 给出了两种碰撞系统  $^8\text{He} + ^{40}\text{Ca}$  和  $^8\text{Li} + ^{40}\text{Ca}$  在同位旋相关截面  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha)$  ( $\alpha = 0, 0.2, 0.4$ ) 条件下具有的原子核阻止  $R$  随核子能量  $E_{\text{Lab}}$  的演化。图 6(b) 给出了在同位旋无关截面  $\sigma_{\text{NN}}^0(\alpha)$  而其它条件与图 6(a) 完全相同时  $R$  随  $E_{\text{Lab}}$  的演化。这里顺便指出,  $\sigma_{\text{NN}}^0(\alpha)$  也可以定义为

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{np}}(\alpha) &= \sigma_{\text{pp}}(\alpha) = \sigma_{\text{nn}}(\alpha) \\ &= \frac{1}{2}(\sigma_{\text{np}}(\alpha) + \sigma_{\text{pp}}(\alpha)). \end{aligned}$$

但在这种定义下,核子-核子碰撞总数几乎与同位旋相关截面  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha)$  的碰撞总数相同,而原子核阻止主要是由于两体碰撞引起动量耗散产生的,故这种定义的结果对  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha)$  和  $\sigma_{\text{NN}}^0(\alpha)$  差别很不明显,

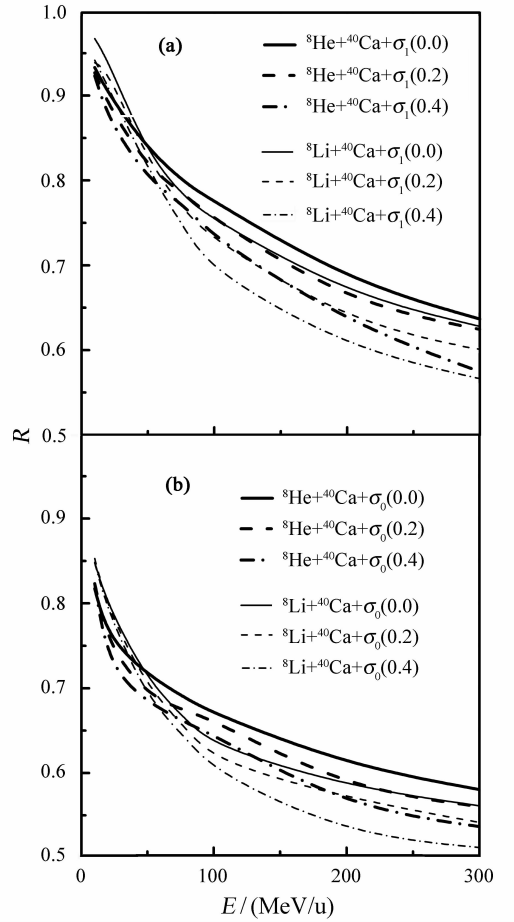


图 6 两种碰撞系统  $^8\text{He} + ^{40}\text{Ca}$  和  $^8\text{Li} + ^{40}\text{Ca}$  在同位旋相关截面  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha)$  条件下原子核阻止  $R$  随核子能量  $E_{\text{Lab}}$  的演化

我们的计算结果也表明这点。而在计算中仅用同位旋无关截面  $\sigma_{\text{nn}}(\alpha) = \sigma_{\text{pp}}(\alpha) = \sigma_{\text{np}}(\alpha)$  的定义。从图 6 中的结果可以看出以下几点明显的特征: (1) 核子-核子碰撞中的介质效应是明显的,且  $R$  的数值随  $\alpha$  的减少而增加。根据公式(4)有  $\sigma_{\text{NN}}^1(0) > \sigma_{\text{NN}}^1(0.2) > \sigma_{\text{NN}}^1(0.4)$  和  $\sigma_{\text{NN}}^0(0) > \sigma_{\text{NN}}^0(0.2) > \sigma_{\text{NN}}^0(0.4)$ , 而  $R$  是由于核子两体碰撞产生的,故截面大则碰撞数多,从而造成原子核阻止增加。(2) 两种碰撞系统的差别是明显的。在低能区,约在  $E_{\text{Lab}} = 60$  MeV 以下,中子晕核碰撞系统的  $R$  都小于稳定弹核系统的。我们在以前的工作中指出,低能区中子晕核的松散结构减弱了核子-核子碰撞的力度,也就减弱了动量耗散过程和原子核阻止。但随着核子能量  $E_{\text{Lab}}$  的增加两体碰撞过程变得重要,造成动量耗散的碰撞数起了重要作用。与  $^8\text{Li}$  相比,  $^8\text{He}$  是丰中子核,在两核质量相同的条件下,中子

数与质子数之差越小, 则中子-质子碰撞数越大, 即中子晕核  ${}^8\text{He}$  的中子-质子碰撞数比  ${}^8\text{Li}$  少。然而, 从图 4 可以明显看出, 在  $E_{\text{Lab}} = 400$  MeV 以下能区,  $\sigma_{\text{np}}$  都大于  $\sigma_{\text{pp}}$ , 故在  $E_{\text{Lab}} \leq 400$  MeV 能区, 由于中子晕核  ${}^8\text{He}$  的  $\sigma_{\text{np}}$  碰撞数小于  ${}^8\text{Li}$  的, 则  ${}^8\text{He}$  碰撞系统的总核子-核子碰撞截面小于  ${}^8\text{Li}$  碰撞系统的总核子-核碰撞截面, 因而  ${}^8\text{He}$  碰撞系统的原子核阻止  $R$  在 3 种  $\sigma$  介质条件下都小于  ${}^8\text{Li}$  碰撞系统的  $R$ 。我们也可称这种差别为中子晕核碰撞系统的同位旋效应, 因为这种差别与弹核中子-质子比直接相关。中子晕核的这种明显的介质效应对于通过理论与实验比较提取介质核子-核子碰撞截面更为有利。(3)  $R$  随  $E_{\text{Lab}}$  的增加而减少是由于随  $E_{\text{Lab}}$  的增加原子核碰撞中的穿透性增加所致。为了更清楚地研究和提取核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性, 如图 7 所示, 在确定截面同位旋相关性(即确定  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha)$  和  $\sigma_{\text{NN}}^0(\alpha)$  条件下, 把比较不同介质效应的影响改换成对确定介质效应(确定  $\alpha$ ) 下不同核子-核

子碰撞截面同位旋依赖性的比较。图 7(a), 图 7(b) 和图 7(c) 分别表示在 3 种介质效应即  $\alpha = 0, 0.2$  和  $0.4$  条件下同位旋无关截面  $\sigma_{\text{NN}}^0(\alpha)$  与同位旋相关截面  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha)$  的比较。从图 7 明显看到以下特征: (1) 两种碰撞系统在低能区和高能区的差别与图 6 相同, 解释一样; (2) 明显看出对两种碰撞系统, 计算能区和 3 种介质条件下对  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha)$  和  $\sigma_{\text{NN}}^0(\alpha)$  的差别, 即核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性明显的。对应于同位旋相关截面  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha)$  的原子核阻止都大于对应于  $\sigma_{\text{NN}}^0(\alpha)$  的原子核阻止。因  $\sigma_{\text{NN}}^0(\alpha)$  的定义为  $\sigma_{\text{mp}}(\alpha) = \sigma_{\text{pp}}(\alpha) = \sigma_{\text{nn}}(\alpha)$ , 在此定义下对于  $\sigma_{\text{NN}}^1(\alpha)$  的核子-核子碰撞总截面显然大于对于  $\sigma_{\text{NN}}^0(\alpha)$  条件的总截面, 因而前者的原子核阻止大于后者, 我们可以利用以上计算结果的特征通过理论计算结果与实验数据的系统比较来提取重离子碰撞中核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性和介质效应。

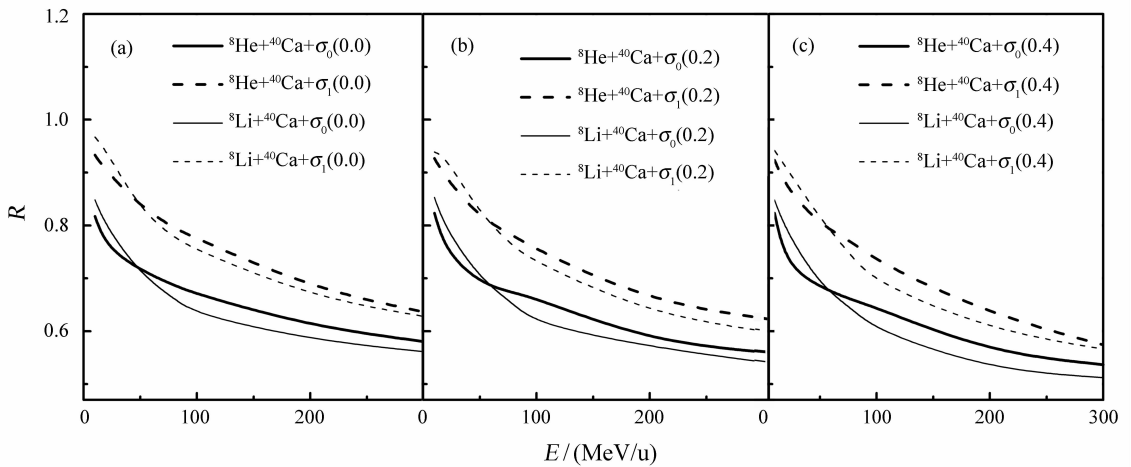


图 7 介质效应  $\alpha = 0, 0.2$  和  $0.4$  条件下同位旋无关截面

## 4 小结

与稳定核碰撞系统相比较, 中子晕核碰撞系统明显地增加了重离子碰撞中发射核子的中子-质子比; 同时也增加了发射核子中子-质子比对对称势的灵敏性。这两个明显的特点非常有利将中子晕核碰撞系统发射核子的中子-质子比 ( $n/p$ ) 作为提取对称势的探针。

与稳定弹核碰撞系统相比, 中子晕核碰撞系统在低能区明显提高了原子核阻止, 而在高能区降

低了原子核阻止, 我们可以利用两类碰撞系统原子核阻止在不同介质效应条件下的同位旋依赖性的差别及演化, 通过理论计算结果及实验数据的系统比较和拟合来提取核子-核子碰撞截面。

## 参考文献 (References):

- [1] Liu J Y, Guo W J, Ren Z Z, *et al.* Phys Lett, 2005, **B617**: 24.
- [2] Liu J Y, Guo W J, Ren Z Z, *et al.* Int Jour Mod Phys, 2006, **E15**: 1 069.
- [3] Liu J Y, Qing X G, Guo W J, *et al.* Chin Phys Lett, 2007, **24**:

- 660.
- [4] Liu J Y, Xiao G Q, Guo W J, *et al.* Chin Phys, 2006, **15**: 1 738.
- [5] Aichelin J, Rosenhauer A, Peilert G, *et al.* Phys Rev Lett, 1987, **58**: 1 926.
- [6] Aichelin J, Peilert G, Bohnet A, *et al.* Phys Rev, 1988, **C37**: 2 451.
- [7] Liu J Y, Guo W J, Wang S J, *et al.* Phys Rev Lett, 2001, **86**: 975.
- [8] Li B A, Udo Schröder W. Isospin Physics in Heavy-ion Collisions at Intermediate Energies. Huntington, New York; Nova Science Publishers, Inc. 2001, 1—475.
- [9] DKlakow D, Welke G, Bauer W. Phys Rev, 1993, **C48**: 1 982.
- [10] Alkhozov G, Bauer T, Bertini R, *et al.* Nucl Phys, 1977, **A280**: 365.
- [11] Liu J Y, Guo W J, Xing Y Z, *et al.* Phys Rev, 2004, **C70**: 0 324 610.

## Probing the Equation of State for Ansymmetrical Isospin Nuclear Matter by Means of Halo-neutron Projectile<sup>\*</sup>

LIU Jian-ye<sup>1)</sup>

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

**Abstract:** Based on the isospin and momentum dependent quantum molecular dynamics, we use the comparison for the differences between observables in the reactions induced by the halo-neutron projectile and stable projectile with the same mass under complete same incident channel condition to protrude the isospin effect of halo-neutron projectile and strengthen the sensitivity of observable on the isospin for extracting the information for the equation of state. For example, the halo-neutron projectile increases the emitted neutron-proton ratio and then enhances its sensitivity on the symmetrical potential. Two points above are more favorable than the normal neutron-rich and neutron-poor projectiles for extracting the symmetry potential.

We also found that the neutron-halo projectile induces the decrease of nuclear stopping in lower beam energy region and the increase in higher beam energy region, compared to corresponding same mass stable projectile under the same incident channel condition, so that we can use these properties to extract the information for the medium effect and isospin effect of in-medium nucleon-nucleon cross section.

**Key words:** halo-neutron projectile; symmetrical potential; nucleon-nucleon cross section

\* **Received date:** 11 Jul. 2007; **Revised date:** 20 Sep. 2007

\* **Foundation item:** Major State Basic Research Development Program in China (G2000077400); Major Project of National Natural Science Foundation of China (10435080); National Natural Science Foundation of China (10447006,10575075); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences(KJ CX2-SW-No2)

1) E-mail: liujy@lzb.ac.cn