

文章编号: 1007-4627(2016)01-0008-05

中子皮厚度测量探针对核物质状态方程的依赖性

孙小艳¹, 方德清², 马余刚²

(1. 临沂大学理学院, 山东 临沂 276000;
2. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘要: 利用同位旋相关的量子分子动力学 (IQMD) 模型模拟了 $^4\text{He}+^{208}\text{Pb}$ 的碰撞反应, 发现中子-质子产额比 (R_{np}) 与 ^{208}Pb 的中子皮 (δ_{np}) 之间存在很好的线性关联, 中子-质子产额比可以作为中子皮厚度测量的一个探针。选取 IQMD 模型中核物质状态方程的两套不同势参数进行模拟, 通过对比发现, 中子皮的厚度测量探针 (中子-质子产额比) 对核物质状态方程中选择软势和硬势非常敏感, 相同反应条件下, 软势比硬势计算所得的中子质子产额比要低。无论选择何种状态方程参数, 中子质子产额比与中子皮之间都存在线性关联。

关键词: 中子皮厚度; 量子分子动力学; 核物质状态方程

中图分类号: O571.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.01.008

1 引言

原子核内质子与中子的分布半径是核物理研究中一个基本的物理量, 中子密度分布的测量对丰中子核结构、核相互作用势能、中子星、丰中子物质及其状态方程的研究具有重要的意义^[1-2]。质子的分布半径可以通过电磁相互作用测量而达到很高的精度 (一般误差为 0.02 fm), 由于中子不带电, 现有的实验手段还很难对其进行直接测量, 因而中子的分布半径不像质子那样可以达到很高的精度。对于比较重的原子核, 中子数超过质子数较多, 多余的中子被认为倾向于出现在原子核的表面, 进而在原子核表面形成一个富中子的区域, 这种结构我们称之为“中子皮(δ_{np})”。从数值上中子皮的厚度定义为中子均方根半径和质子均方根半径的差, 其大小依赖于核力各部分的平衡。目前对中子皮厚度测量的精度还很低。许多人采用不同的尝试来研究中子的分布, 例如强子散射^[3-11], 相对论能量下重离子碰撞相互作用截面^[12]、中子擦去截面测量方法^[13], 宇称破缺电子散射^[14], 饱和点处核物质对称能 J 与对称能系数 asym 之差 $J-\text{asym}$ ^[15] 等。

核物质状态方程作为核物理研究的关键问题, 一直是人们关注的前沿课题之一。通过采用不同平均场的重离子微观输运理论模型计算结果与实验数据比较, 可以间接地确定核态方程的形式。核物质状态方程表示核子的能量与核物质密度、温度以及同位旋不对称度的关

系。通常在不考虑温度的情况下, 核子能量一般表达式中有一项同位旋不对称度的二次幂项, 我们称之为对称能。对已有的中子皮研究发现^[16], 丰中子核的中子皮厚度与核物质状态方程中对称能项之间存在直接关联, 因而可以从中子皮厚度获取对称能的信息, 进而确定核物质状态方程的形式。

在寻求中子皮厚度测量探针的过程中, 我们发现 Ca 和 Ni 等丰中子核碰撞产生的中子质子产额比与中子皮之间存在很好的线性关联^[17], 中子质子产额比 (R_{np}) 可以作为丰中子核中子皮厚度测量的一个探针。在模型中, 关于核物质状态方程的参数有两套: 软势和硬势。中子质子产额比作为中子皮厚度测量探针, 是否适用于 ^{208}Pb 这个重的稳定核, 以及对核物质状态方程的依赖性如何, 是本文的主要工作。

2 IQMD模型介绍

量子分子动力学 (QMD) 模型是一个微观输运的理论模型, 在这个模型中, 每一个核子的单粒子分布函数采用一个高斯波包来描述, 核子在自洽的平均场中运动, 可以给出任何时刻的核子的坐标与动量。同位旋相关的量子分子动力学 (IQMD) 模型就是在 QMD 模型的基础上, 在决定中能重离子碰撞动力学的三个基本要素: 相互作用平均场、两体碰撞以及泡利阻塞中引入了同位旋自由度发展而来的。

收稿日期: 2015-12-14; 修改日期: 2016-01-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11205079); 临沂大学博士科研启动基金项目(LYDX2013BS046); 临沂大学校级一般项目资助

作者简介: 孙小艳(1983-), 女, 山东滨州人, 副教授, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: sunxyphy@163.com。

模型中平均场通常表示为

$$U(\rho, \tau_z) = \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma + \frac{1}{2} (1 - \tau_z) V_c + C_{\text{sym}} \frac{(\rho_n - \rho_p)}{\rho_0} \tau_z + U^{\text{Yuk}} + U^{\text{MDI}}, \quad (1)$$

其中： $\rho_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$ 是正常核物质密度； ρ_n 、 ρ_p 和 ρ 分别对应于中子、质子以及总的核子密度； τ_z 是同位旋 z 方向分量，质子等于 1，中子对应 -1； α 、 β 和 γ 是核物质状态方程参数； C_{sym} 是对称能系数，如果不考虑对称能项可取 $C_{\text{sym}} = 0$ ，考虑对称能项，则 $C_{\text{sym}} = 32 \text{ MeV}$ 。在本次计算中，我们没有考虑动量相关势，考虑了对称能项。常用的核状态方程参数有两套：分别是软势所对应的参数 (S) 和硬势所对应的参数 (H)，具体参数取值见表 1。

表 1 核物质状态方程两套势参数数值

α/MeV	β/MeV	γ	K/MeV	EOS
-356	303	7/6	200	S
-124	70.5	2	380	H

在用 IQMD 模型对靶核 ^{208}Pb 进行相空间初始化时，中子和质子的密度分布是区别对待的，我们采用了

液滴模型密度分布形式^[18]。

$$\rho_i(r) = \frac{\rho^0}{1 + \exp\left(\frac{r - C_i}{f_i t_i / 4.4}\right)}, \quad i = n, p, \quad (2)$$

ρ^0 是归一化因子，弥散系数 $t_i = 2.18$ ， C_i 是中子质子密度分布半密度半径，

$$C_i = R_i \left[1 - \left(\frac{b_i}{R_i} \right)^2 \right], \quad i = n, p, \quad (3)$$

$b_i = 0.413 f_i t_i$ ， R_i 是中子或者质子的等价表面半径，这些值都可以从液滴模型^[18]中得到。引入了 f_i 来调节弥散度系数，质子 $f_p = 1.0$ ，调节中子弥散度系数 f_n 从 1.0 到 1.6，可以得到一系列不同弥散度的中子密度分布。我们用液滴模型计算了 ^{208}Pb 在不同弥散系数下的密度分布，图 1(a) 图为 $f_p = f_n = 1.0$ 时的密度分布，对于 ^{208}Pb ，中子数多于质子数 82 个，因此中子密度分布大于质子密度分布。图 1(b) 为 f_n 分别取值 1.0 和 1.6 时的密度分布对比，从图中我们可以看到弥散系数越大，中子密度分布尾部核子密度越高。

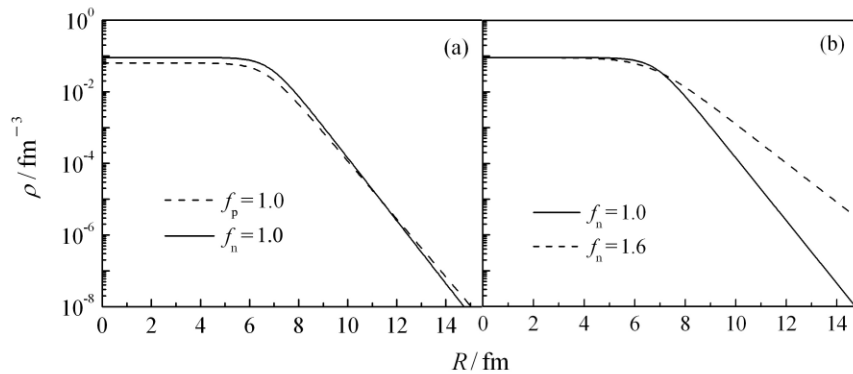


图 1 液滴模型计算 ^{208}Pb 质子密度分布和 $f_n = 1.0, 1.6$ 时中子密度分布

把液滴模型计算得到的密度分布输入到 IQMD 中作为抽样函数，利用 Monte-Carlo 方法分别抽样出弹核与靶核的中子和质子的径向坐标 r_i ，有了核子的径向位置坐标，我们就可以进一步抽样得到核子的空间坐标。核子在动量空间的抽样所采取的局域费米动量是区分中子和质子的，即

$$p_F^i = \hbar(3\pi^2 \rho_i(\mathbf{r}))^{1/3}, \quad i = n, p \quad (4)$$

核子动量的大小从 $[0, p_F]$ 进行随机抽样得到。这样我们就可以得到初始核的相空间信息。

抽样出的初始核应该检验其稳定性，初始核基态传播的稳定性一般是通过观察其均方根半径、均方根动量

以及平均结合能随时间的演化来检验的。随着中子弥散度系数的增大，靶核 ^{208}Pb 的均方根半径增大，结合能降低。为了研究中子皮厚度，我们引入液滴模型，通过调节液滴模型中的中子弥散度系数来调节中子的密度分布，中子和质子的密度分布是区别对待的。液滴模型在计算中子密度分布时，大部分中子分布在中心区域，少部分中子分布在外围，利用 IQMD 模型计算得到的结合能比不引入液滴模型进行初始核抽样时计算的结合能要大；同时不同弥散度系数下对应的结合能是不同的，为了减少对结合能的不合理的约束，我们对稳定核结合能的检验只看其稳定性。图 2 显示靶核 ^{208}Pb 均方根半径和结合能随时间的演化图。从图 2 中我们看

出 200 fm/c 的演化时间内涨落很小，符合我们挑选稳定核的条件。把挑选出的稳定初始核的相空间信息输入到 IQMD 模拟碰撞反应，碎片是通过一个同位旋相关的核子组合模型来实现的，即把核子间相对动量小于 300 MeV/c 并且相对距离小于 3.5 fm 的核子合并成一个簇团。

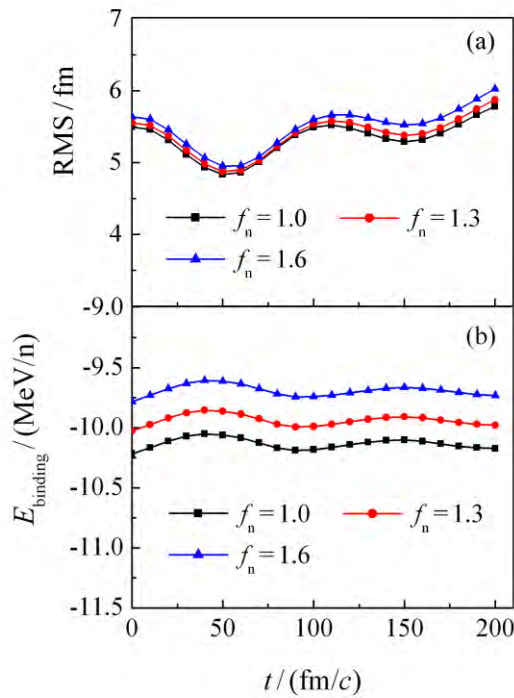


图 2 (在线彩图) 靶核²⁰⁸Pb在中子弥散度系数 $f_n = 1.0, 1.3$ 和 1.6 时的均方根半径和结合能随时间的演化

3 结果与讨论

本文用 IQMD 模型模拟了 $^4\text{He} + ^{208}\text{Pb}$ 碰撞系统在入射能量为 $E/A = 50$ MeV 的核反应。中子弥散度系数 f_n 分别取值 1.0 ~ 1.6，对应于 ^{208}Pb 的中子皮厚度分别为：0.0843, 0.1299, 0.1795, 0.2330, 0.2903, 0.3511, 0.4155 fm。

周边碰撞所得到的中子质子产额比要比中心碰撞高^[15]，中国科学院近代物理研究所研究人员在他人的强子散射实验数据中也发现测量中子皮厚度的主要误差也来源于表面区域^[13]。因此我们选取周边碰撞反应，即碰撞参数选择 6 ~ 8 fm。 $^4\text{He} + ^{208}\text{Pb}$ 碰撞系统中，我们要寻找敏感于靶核 ^{208}Pb 中子皮的实验可观测量，需要把炮弹的影响降到最低，我们引入了炮弹归一后的快度 R_{ap} ，选择 $R_{ap} < 0$ 来排除来自炮弹的碎片。快度计算公式如下，

$$R_{ap} = \frac{1}{2} \log \frac{E + P_z}{E - P_z} / R_{ap\text{proj}}, \quad (5)$$

其中： E 是碎片的能量； P_z 是动量的 z 分量， $R_{ap\text{proj}}$ 是炮弹的快度。

下面是对于核物质状态方程中选择的两套不同的参数进行对比。

3.1 核物质状态方程选择软势时数据分析

选择软势时，对应于表 1 中 S 参数，即： $\alpha = -356$ MeV, $\beta = 303$ MeV, $\gamma = 7/6$, $K = 200$ MeV；当中子弥散度系数选择 $f_n = 1.0$ 时，此时对应 ^{208}Pb 的中子皮厚度为 0.0843 fm。由于靶核是丰中子核，因此，来自靶的 R_{np} 应该大于来自炮弹和靶两部分的 R_{np} 。如图 3 所示，实心方块是取快度 $R_{ap} < 0$ ，即来自靶核 ^{208}Pb 的 R_{np} 随时间演化图，实心圆点表示来自炮弹和靶两部分的 R_{np} 随时间演化图，可以看到对于快度取 $R_{ap} < 0$ 这种情况， R_{np} 的值要更大。

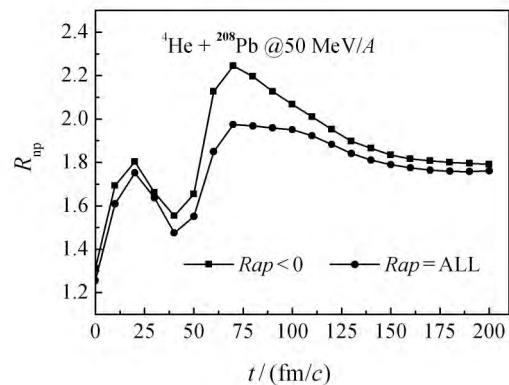


图 3 实心方块是取快度 $R_{ap} < 0$ 时 R_{np} 随时间的演化, 实心圆点表示来自炮弹和靶两部分的 R_{np} 随时间的演化

中子弥散度系数 f_n 分别选择 1.0 ~ 1.6，就得到一系列中子皮数据。分析不同 f_n 下 IQMD 模型计算结果，在 $R_{ap} < 0$ 时，发现 R_{np} 与中子皮之间存在很好的线性关联，如图 4 用线性公式进行拟合，就能够得到中子皮

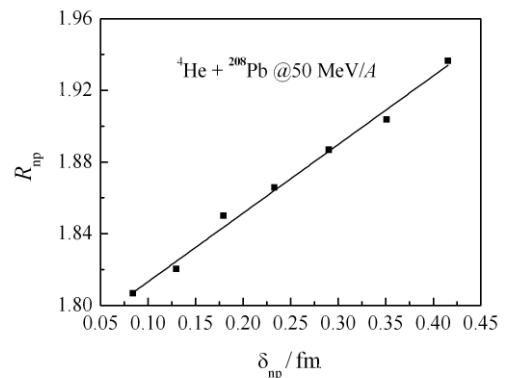


图 4 实心方块是 R_{np} 与 ^{208}Pb 中子皮 δ_{np} 的关联，直线是对数据进行线性拟合的结果

δ_{np} 与 R_{np} 的关系, 如果实验上测量得到 R_{np} 的准确数据, 就能够通过这个公式计算出中子皮厚度的数据。

3.2 核物质状态方程选择硬势时数据分析与对比

由密度依赖指数 γ 值基本上可以将参数分为两大类, 硬势 (Hard) 和软势 (Soft) 两种。硬势对应的 $\gamma = 2$, 软势对应的 $\gamma = 7/6$, 选择硬势时, 参数对应于表 1 中 H 参数: $\alpha = -124$ MeV, $\beta = 70.5$ MeV, $\gamma = 2$, $K = 380$ MeV; 当 $f_n = 1.0$, 我们对硬势和软势下中子质子产额比随时间演化情况, 如图 5 所示, 选择硬势时 R_{np} 要比软势高。采用软的对称势时计算给出的出射核子的 N/Z 之比要比硬的对称势所给的相应的 N/Z 之比要高^[19], 因而自由中子与质子的产额比要低。这与我们计算得出的结果也是一致的。

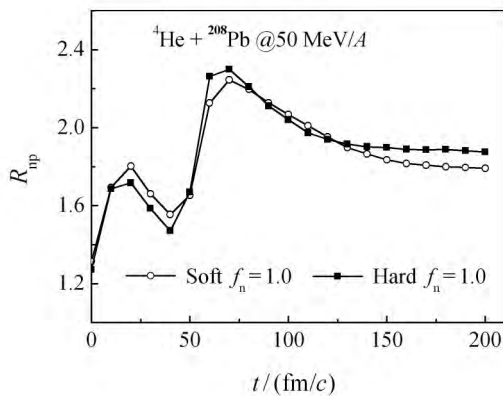


图 5 空心圆是状态方程选择软势时 R_{np} 随时间的演化, 实心方块表示状态方程选择硬势时 R_{np} 随时间的演化

在状态方程选择硬势时, 中子弥散度系数 f_n 分别选择 1.0 ~ 1.6, 得到了中子皮厚度与 R_{np} 的关联, 如图 6 所示, 从图中我们可以看到选择硬势状态方程所对应的参数时, 中子皮厚度与 R_{np} 仍然存在关联, 而且计

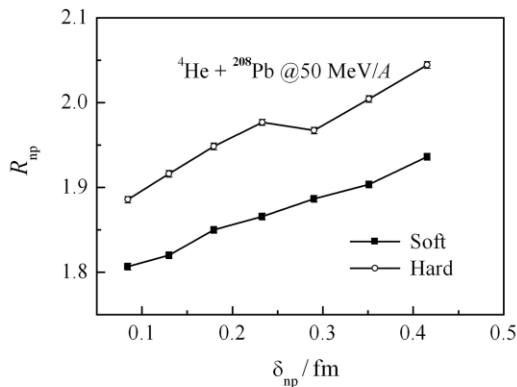


图 6 实心方块是状态方程选择软势时所对应的中子-质子产额比 R_{np} 与中子皮厚度的关联, 空心圆是硬势下中子-质子产额比 R_{np} 与中子皮厚度的关联

算得到的中子质子产额比要比软势时高。状态方程选择硬势时具有更强的排斥势, 促使更多质子和中子发射出来, 使得碰撞之后, 测得的产物中质子中子的来源更加复杂。对中子皮已有研究显示其主要误差也来源于表面区域^[15], 因而选择硬势时, 中子皮与 R_{np} 的关联会有偏差。

4 结论

本文用 IQMD 模型模拟了 ${}^4\text{He} + {}^{208}\text{Pb}$ 碰撞系统的核反应。发现中子-质子产额比与中子皮之间存在很好的线性关联, 可以作为 ${}^{208}\text{Pb}$ 中子皮厚度测量的探针。当选取核物质状态方程中不同势参数时, 中子-质子产额比也发生变化, 相同反应条件下, 软势对应的中子-质子产额比要低于硬势下所得到的中子-质子产额比。但是无论选择哪种参数, 中子-质子产额比都与中子皮厚度存在线性关联。

参考文献:

- [1] LI Kuoang, YE Yanlin. Nucl Sci Tech, 2014, **37**: 100501. (in Chinese) (李阔昂, 叶沿林. 核技术, 2014, **37**: 100501)
- [2] ZHANG Zhaowen, SHEN Hong. Nucl Sci Tech, 2014, **37**: 100514. (in Chinese) (张肇文, 申虹. 核技术, 2014, **37**: 100514)
- [3] HOFFMANN G W, RAY L, BARLETT M, *et al.* Phys Rev C, 1980, **21**: 1488.
- [4] ZENIHIRO J, SAKAGUCHI H, MURAKAMI T, *et al.* Phys Rev C, 2010, **82**: 044611.
- [5] GARCIA-RECIO C, NIEVES J, OSET E, *et al.* Nucl Phys A, 1992, **547**: 473.
- [6] RAY L, COKER W R, HOFFMANN G W, *et al.* Phys Rev C, 1978, **18**: 2641.
- [7] STARODUBSKY V E, HINTZ N M. Phys Rev C, 1994, **49**: 2118.
- [8] CLARK B C, KERR L J, HAMA S. Phys Rev C, 2003, **67**: 054605.
- [9] TRZCINSKA A, JASTRZEBSKI J, LUBINSKI P, *et al.* Phys Rev Lett, 2001, **87**: 082501.
- [10] DONNELLY T W, DUBACH J, SICK INGO. Nucl Phys A, 1989, **503**: 589.
- [11] TAMII A, POLTORATSKA I, VON NEUMANN-COSEL P, *et al.* Phys Rev Lett, 2011, **107**: 062502.
- [12] SUZUKI T, GEISSEL H, BOCHKAREV O, *et al.* Phys Rev Lett, 1995, **75**: 3241.
- [13] MA Chunwang, FU Yao, FANG Deqing, *et al.* Chinese Physics B, 2008, **17**: 1674.
- [14] ABRAHAMIAN S, AHMED Z, ALBATAINEH H, (PREX Collaboration) *et al.* Phys Rev Lett, 2012, **108**: 112502.
- [15] DONG Jianmin, ZUO Wei, GU Jianzhong. Phys Rev C, 2015, **91**: 034315.

- [16] Centelles M, Roca-Maza X, Vinas X, *et al.* Phys Rev Lett, 2009, **102**, 112502.
- [17] SUN Xiaoyan, FANG Deqing, MA Yugang, *et al.* Phys Lett B, 2010, **682**: 396.
- [18] MYERS W D, SCHMIDT K H. Nucl Phys A, 1983, **410**: 61.
- [19] ZHANG Yingxun, LU Xiaohua, ZHAO Kai, *et al.* Nuclear Physics Review, 2011, **28**(4): 377. (in Chinese)
(张英逊, 卢晓华, 赵凯, 等. 原子核物理评论, 2011, **28**(4): 377.)

Nuclear Equation of State Dependence of the Probe of Neutron Skin Thickness

SUN Xiaoyan^{1,1)}, FANG Deqing², MA Yugang²

(1. School of Sciences, Linyi University, Linyi 276000, Shandong, China;

2. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The reaction system of ${}^4\text{He} + {}^{208}\text{Pb}$ has been simulated by Isospin-dependent Quantum Molecular Dynamics (IQMD) mode and it was found that the neutron-to-proton yield ratio (R_{np}) has a good linear relationship with the neutron skin thickness of ${}^{208}\text{Pb}$. Therefore R_{np} could be taken as a probe of neutron skin thickness of ${}^{208}\text{Pb}$. Using two sets of parameters for the nuclear equation of state (EOS) in IQMD model, it shows that R_{np} is sensitive to nuclear equation of state. The calculation results of R_{np} with the soft EOS is lower than the hard EOS. No matter which kind of EOS parameter has been chosen, however, R_{np} holds a good linear correlation with the neutron skin thickness.

Key words: neutron skin thickness; IQMD model; nuclear equation of state

Received date: 14 Dec. 2015; **Revised date:** 13 Jan. 2016

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11205079); Doctoral Research Fund of Linyi University (LYDX2013BS046); General Project of Linyi University

1) E-mail: sunxyphy@163.com.