

# 重离子核反应与核物质状态方程\*

肖志刚<sup>†</sup>

(清华大学物理系 北京 100084)

2020-02-16收到

<sup>†</sup> email: xiaozg@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20200301

## Heavy ion reactions and equation of state of nuclear matter

XIAO Zhi-Gang<sup>†</sup>

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

**摘要** 核物质状态方程描述核物质结合能、压强、密度和中子—质子数差异等宏观量之间的关系。核物质状态方程不仅仅与核力属性、核结构性质以及重离子核反应的动力学过程紧密相关,还与致密星体如中子星的结构、演化、辐射与并合等天体过程紧密相关。基于加速器装置的重离子核反应实验,是地面实验室模拟产生极端条件核物质的唯一手段,因而也成为研究核物质状态方程的有效途径。当核物质中的中子数远大于质子数时,例如中子星内部的情形,核物质状态方程中的主要贡献项是对称能项。迄今为止,对称能关于密度的函数是核物理和天体物理中一个未知而又非常重要的物理量。通过重离子核反应的实验和理论研究来确定对称能的密度依赖关系及其在核反应以及致密星天体事件中的物理效应,是当代核物理基础研究的重要前沿。文章介绍了中能重离子核反应和核物质状态方程的一些背景知识和研究方法,以及近年来的一些进展。

**关键词** 重离子核反应, 核物质状态方程

**Abstract** The nuclear equation of state describes the relationship among the macroscopic quantities including the binding energy, pressure, density and the density difference of neutrons and protons in bulk nuclear matter. It is not only relevant to the nuclear force properties, nuclear structure and dynamics of heavy ion reactions, but also related to the thermodynamic properties, structure, evolution and merging events of dense stellar objects like neutron stars. As a unique terrestrial way to produce nuclear matter in extreme conditions far away from saturation point, heavy ion reactions based on particle accelerators provide an effective tool to study the nuclear equation of state in a ground laboratory. When the neutron density is much higher than the proton density, as is the situation in an inner neutron star, the main contribution in the nuclear equation of state comes from the symmetry energy term, which is a function of density. This dependence is the most important yet so far unknown quantity in nuclear physics and astrophysics. Thus, it is now a foremost challenge of modern nuclear physics to determine, through experimental and theoretical research on the heavy ion reactions, the dependence of the symmetry energy on density as well as its effects on nuclear reactions and astrophysics events involving dense stellar objects. This paper presents the background and methods in the study of medium energy heavy ion reactions and the nuclear equations of state, followed by a brief introduction to some research progress in recent years.

**Keywords** heavy ion reactions, nuclear equations of state

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2015CB856903)、国家自然科学基金(批准号: 11875174, 11375094)资助项目

## 1 引言

2017年8月17日,物理和天文学研究中发生了一件激动人心的事情,LIGO和VIRGO合作组的科学家们,观测到了来自太空的一个双中子星并合过程产生引力波的事件GW170817,随后不同地方的望远镜也都观测到与此事件关联的各种电磁信号(包括极短波长的伽马信号),由此开启了天文学的多信使时代<sup>[1-3]</sup>。图1为两个中子星由旋进到并合的过程示意图。事实上,这一发现不仅对天文学研究产生了很大的影响,在核物理学领域,也掀起了一阵研究的浪潮。这是为什么呢?中子星的并合过程,与核物理有什么关系?本文的故事,就从这里开始讲起。

为了逐步理解二者之间的联系,让我们先回顾一下核物理中的几个基本问题。众所周知,原子核由质子和中子构成,质子带电而中子不带电。质子和中子统称核子。最早通过卢瑟福散射实验,人们就已经知道原子核的线度大约在10 fm左右(1 fm=10<sup>-15</sup> m),比原子的线度约小了4个量级。在这么小的一个范围之内,带正电的质子之间有很强的库仑排斥力,为什么原子核不会解体?很显然,除了电磁相互作用之外,质子和中子之间还有很强的核力存在。核力是强相互作用的表现形式,与核子带电与否无关。核力的概念最早由汤川秀树提出,后来经过了许许多多的散射实验,人们对核力的认识已经相当深入。

下一个问题就来了。既然有核力存在,而且核力在原子核的尺度下表现出吸引作用,那么,是否可以将成千上万个质子和中子都“挤到”一个原子核内,组成一个很重的原子核?答案是不行的,我们现在发现的最重的原子核,是2006年人

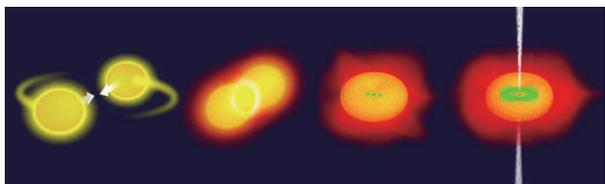


图1 两个中子星并合过程的示意图(引自参考文献[4])

工合成的118号元素Oganasson(简称Og)<sup>[5]</sup>。原来,核力具有饱和性,相对电磁力而言,它的力程要短得多,作用强度的衰减也比电磁相互作用快得多,某一个核子只对周围的核子产生很强的吸引作用。故无限制地往一个原子核内增加质子和中子,对质子和中子的束缚强度不会增长,尤其是处于表面的这些核子更是如此,而质子之间的排斥越来越大,二者竞争会导致原子核不稳定。事实上,人类合成的超重元素,基本上都会发生自发裂变或者 $\alpha$ 衰变成为更轻的原子核。除非一个非常极端的情形发生,即一个体系里质子和中子数量再增加数十个量级,让原本被忽略的万有引力变得很强,此时这些质子和中子又会形成一个整体。这样的整体就是中子星。关于中子星如何形成,性质如何,可以参阅《物理》2019年肖迪等人的一篇文章<sup>[6]</sup>。从这个角度来说,中子星虽然不是一个普通的原子核,但它却是一个包含了引力、强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用于一体的系统,最大密度高于普通的原子核密度(普通原子核密度大约为 $2.7 \times 10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>),这种物质我们称为核物质。中子星的内部结构性质和演化以及两个中子星的并合过程,都与核物质的性质(也就是核物质状态方程)密切相关。中子星内抗衡引力塌缩的中子简并压,其实就是(极丰中子)核物质的不可压缩性,可由核物质状态方程导出。

显然,人们认识核物质状态方程的途径有两个,一是对中子星性质和行为过程的观测,二是在地面实验室的核物理实验。在地面实验室,重离子核反应便是研究核物质状态方程的主要手段。因为这个联系,天文学中观测到的GW170817双中子星并合事件,也必引起核物理学家的高度关注和极大兴趣。

基于此,本文简单介绍重离子核反应与核物质状态方程研究方面的一些方法和进展。

## 2 重离子核反应研究

什么是核反应?和化学反应类似,两个原子核通过一定的途径撞到一起,生成新的原子核,

同时释放能量或消耗能量的过程，就是核反应。众所周知，第一个人工核反应是1919年卢瑟福发现质子的反应， $\alpha+{}^{14}\text{N}\rightarrow\text{p}+{}^{17}\text{O}$ 。而查德威克则通过 $\alpha+{}^9\text{Be}\rightarrow\text{n}+{}^{12}\text{C}$ 这一核反应发现中子。上面说的118号元素Og，是在 ${}^{48}\text{Ca}+{}^{249}\text{Cf}\rightarrow{}^{294}\text{Og}+3\text{n}$ 反应中合成的。而在太阳内部，时时刻刻都发生着的包括 $\text{p}+\text{p}\rightarrow\text{d}+\text{e}^++\nu_{\text{e}}$ 、 $\text{d}+\text{p}\rightarrow{}^3\text{He}+\gamma$ 等在内的核反应过程，源源不断向外辐射热量。

原子核外的电子部分或者全部剥离，就形成离子。所谓重离子，通常是指核电荷数 $Z\geq 3$ 的离子。由于离子带电，它容易在加速器提供的电场中加速，达到一定的速度或者动能。我们把加速的离子束称作束流。通常，束流离子的速度比核外电子的轨道速度大得多，因此，当这种重离子发生反应的时候，核外电子的影响完全可以忽略。重离子核反应，便是指一个被加速的重离子轰击另一个重离子、或者两个被加速的重离子碰撞的过程。在第一种情况下，入射的离子称作弹核，被轰击的离子称作靶核。

在核物理研究中，束流能量通常用兆电子伏(MeV)或者吉电子伏(GeV)来表示，与能量的国际单位焦耳(J)满足如下等式： $1\text{ MeV}=1.6\times 10^{-13}\text{ J}$ 。我们知道，原子核内部每个核子的结合能大约只有8 MeV，故不难想象，当入射能量达到每核子几十MeV及以上时(每核子10 MeV的入射动能，对应的运动速度是光速的14.5%)，两个原子核的碰撞过程可以变得非常剧烈，此时原子核中的核子，可以在剧烈碰撞中被撞击出来。如果说某一个产物的组合记为一个反应道或者出射道，在这种重离子核反应中，大量的出射道将被打开。

前面提到，重原子核的线度大约有10 fm，因此，两个原子核碰撞时，存在一定的对心度。这一特点通常用瞄准距离 $b$ 来表征，也称为碰撞参数，如图2所示。当碰撞参数较大时，核反应擦边进行，称为擦边碰撞，而当碰撞参数较小时，弹、靶的重叠部分增大，此时称为中心碰撞。 $b=0\text{ fm}$ 时的特殊情形，称为对心碰撞。

虽然原子核的线度很小，但是不管在对撞实验中，还是在固定靶实验中，物理学家总有办法

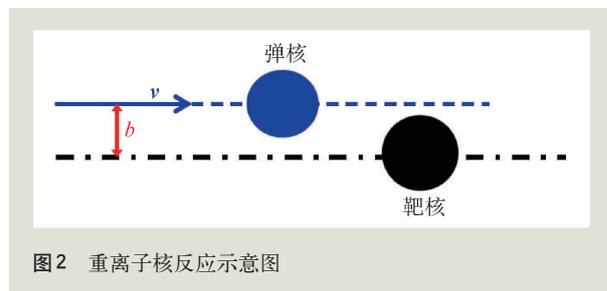


图2 重离子核反应示意图

让弹核和靶核以一定的概率撞到一起发生反应，这听起来有点不可思议。对重离子核反应的分类，正是依据入射能量和碰撞参数来进行的，当弹靶确定之后，不同的入射能量或者碰撞参数，导致的结果是不同的。在能量很低时，弹核和靶核可能发生熔合反应，生成更重的复合核，伴随着复合体系的高速旋转和粒子蒸发过程。当能量升高后，反应变得更剧烈，原子核可能会被打破甚至发生多重碎裂的过程，或者被短暂压缩，在很小的体积内形成密度很高、寿命很短的核物质。当能量足够高，可能还会产生新的粒子甚至发生从核物质到夸克胶子等离子体的相变过程。

我们暂时把讨论局限在每核子几十兆电子伏这样的重离子核反应中。这个能区的重离子反应过程是极为复杂的。复杂性主要表现在如下几个方面：(1)反应的时间极短，约为 $10^{-21}\text{ s}$ 量级，因此对原子核反应的直接“摄像”变得几乎不可能；(2)反应机制复杂，每个反应事例有数十个甚至数百个核子参与，核子与核子之间存在相互关联，每个核子除了受到其他核子提供的作用势(包括核势和库仑势)之外，还会与其他核子频繁发生两两碰撞的过程；(3)体系可能高速转动，携带很大的角动量；(4)由于这是一个有限大小的体系，而且作用时间短，整个过程可能是一个非平衡过程。上述复杂性，使得通过对反应末态产物的测量来重构整个碰撞过程变得较为困难。理论上对重离子核反应的描述，需通过运输模型来实现。目前有两种主要的运输模型方法，一种是基于量子分子动力学(Quantum Molecular Dynamics, 简称QMD)的逐事件描述方法，另一种是基于Boltzmann—Uehling—Uhlenbeck(简称BUU)方程的测试粒子方法。

### 3 核物质状态方程

状态方程是联系一个物质体系内能、温度、压强、体积等宏观量之间关系的等式。同样，对于一个核物质体系，其状态方程描述系统的结合能与密度、温度、中子数与质子数之差等物理量的关系。这里要特别强调系统的质子数和中子数之间的差异，因为这一差异会导致系统性质的变化。在原子核中，当质子数和中子数的数量关系偏离 $\beta$ 稳定线时，原子核变得不稳定。例如，锂(Li)是最轻的金属， ${}^6\text{Li}$ 是一种常见的稳定核素，但另一种同位素 ${}^{11}\text{Li}$ 的中子数比质子数多得多，它的最外面两个中子会形成一个空间展布很大的晕，并且原子核不稳定，很快会衰变。在原子核的液滴模型描述中，因为中子数和质子数差异带来的结合能项，便是对称能项。

核物质状态方程是重离子核反应研究的重要物理目标。在零温的时候，核物质状态方程可以通过每核子结合能 $E(\rho, \delta)$ 表示成如下形式

$$E(\rho, \delta) = E_0(\rho) + E_{\text{sym}}(\rho)\delta^2 + O(\delta^4), \quad (1)$$

式中 $\rho = \rho_n + \rho_p$ ，表示中子和质子的总密度， $\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}$ 表示中子和质子的密度差，也称同位旋非对称度(isospin asymmetry)。海森堡曾引入同位旋的概念来区分中子和质子，他认为中子和质子是核子在同位旋空间的两个态。(1)式中的第一项，是描述对称核物质的项，此处的对称即为中子数和质子数(密度)相等；第二项则是描述非对称核物质的项，正比于同位旋非对称度的平方。同位旋非对称度的高阶项通常被忽略。

(1)式中第二项的系数 $E_{\text{sym}}(\rho)$ 被称作对称能，在零温时，敏感依赖于核物质密度。当核物质的同位旋非对称度很大时，这一项将产生决定性的影响。例如，重核外层的中子皮厚度(极丰中子，密度远低于饱和密度)、丰中子重离子核反应的动力学演化以及中子星的属性与并合过程等，都和 $E_{\text{sym}}(\rho)$ 密切相关。

核物质状态方程的一个典型应用，在于帮助

人们通过模型计算和理解中子星的许多结构和演化属性，包括中子星的半径—质量( $R-M$ )关系曲线，中子星液芯与壳层的转换密度，中子星冷却机制等等。例如，求解静态中子星的 $R-M$ 关系时，要用到Tolman—Oppenheimer—Volkoff方程(简称TOV方程)，而TOV方程的输入量则是核物质状态方程。也就是说，核物质状态方程和中子星的 $R-M$ 曲线直接相关。在GW170817的双中子星并合事件中，当两个中子星绕旋至相互靠近时，会产生潮汐形变，从而具有潮汐极化(tidal polarizability)，进而引起引力波频率和强度的变化，LIGO的引力波探测器对引力波频率和强度变化敏感，故能给出潮汐极化的大小。而潮汐极化和两个中子星的质量和半径均有关系。因此，引力波的观测通过中子星 $R-M$ 关系也与核物质状态方程建立起联系。这就回答了文章一开始提出的问题。

### 4 重离子核反应与核物质状态方程的研究进展

如前所述，重离子核反应由于能够“制备”偏离饱和密度点的核物质，故成为研究核物质状态方程的重要手段。具体的研究方法如下。通过测量反应的末态产物，尤其是具有同位素分辨的轻粒子出射的结果，提取出特定的一些物理量，再与考虑了同位旋效应的QMD或者BUU运输模型计算结果相互比较，就可以判断在运输模型中作为输入参数的核物质状态方程的正确性，从而达到对状态方程的约束。由于运输模型的完整框架中包含了参数，在数值处理上也有很多近似，从单一的观测量、单一的实验来约束状态方程是不够的，需要利用多个观测量来实现对状态方程的测定。

迄今为止，人们在重离子反应中已经找到了许多观测量来约束核物质状态方程。对于对称核物质，人们通过重离子反应中的介子产额、集体流等，得到了对称核物质状态方程的大体形式。而争议较大的是非对称核物质的情形，当(1)式中

的  $\delta \gg 0$  时, 对称能项就变得非常重要了, 这恰好也是中子星里的情形。目前, 对于对称能的密度依赖行为, 在大的密度范围内, 尚没有得到很好的约束, 尤其是在高密区, 不确定性更大。近来谢文杰等人通过引入贝叶斯分析方法, 对 GW170817 的数据进行了多维参数分析, 在 2 倍饱和和密度附近, 得到改善的核物质状态方程约束结果<sup>[7]</sup>。

研究表明, 每核子几十兆电子伏的重离子核反应, 由于尚没有形成压缩状态(即高密)的核物质, 故有利于用来研究在饱和密度附近以及亚饱和和密度区的核物质状态方程。尽管在饱和密度附近, 实验和相应的理论都取得了很大的进展, 但对于对称能密度依赖行为的约束, 不确定性依然较大, 在减小不确定度方面, 依然存在很大的提升空间。

前面提到, 在稳定原子核中, 对称能项控制着中子和质子的比分。同理, 在重离子核反应中, 对称能控制着中子和质子不同的输运行为, 包括中子和质子在丰度不同的区域间进行扩散, 以及中子和质子从高密度相区向低密气相区的迁移。这两种不同的机制, 分别称为同位旋扩散和同位旋漂移。在重离子核反应中, 这两种机制都会起作用, 最终影响出射产物的各种分布特征。因此, 从重离子核反应中提取核物质状态方程的研究与核反应中同位旋自由度(还有其他自由度)弛豫过程的研究, 总是紧密相关的。换句话说, 同位旋自由度弛豫的特征受对称能的支配。目前, 人们已经发现了许多可以约束对称能的实验观测量, 包括同位旋扩散、同位旋标度和重核中子皮厚度等, 并从中获得了饱和点附近的核物质状态方程的特性。

近年来, 人们一直在探索和寻找更多约束对称能的敏感探针。容易理解, 在重离子反应中形成的体系, 在经历裂变时(这一能区的裂变, 多为快裂变和准裂变), 会形成一个裂变的颈部区域。颈部区域断裂时, 密度经历低密区直至最终断裂, 同时因为重核外层通常有一层中子皮, 颈部区域一般是丰中子的, 因此颈部的粒子发射具有

丰中子特性, 且携带有对称能的信息。沿着这条思路, 我们设计了实验, 能够同时测量裂变反应的碎片和关联的轻带电粒子。通过分析这些轻粒子谱发现, 在重离子核反应中, 弹靶碰撞形成的交叠区域造成的早期动力学粒子发射, 主要贡献到实验室的前角区域, 相对而言具有更高的中子丰度; 而对于晚期蒸发出来的轻带电粒子, 主要贡献到实验室的后角区域, 中子丰度相对较低。实验观察到, 在很大的角度范围内, 这些带电轻粒子的相对中子丰度随着实验室系出射角度增加而减小, 意味着同位旋的弛豫过程可能持续到激发体系的统计蒸发阶段, 如图 3(a)所示。输运模型和统计蒸发模型的联合分析表明, 轻粒子中子丰度的大范围角分布是约束对称能的敏感探针。图 3(b)显示的是实验室系角度  $\theta_{\text{lab}} < 100^\circ$  范围内该角分布的斜率与在不同对称能密度依赖参数  $\gamma$  下的理论计算结果之间的比较, 从中提取对称能在饱和点处随密度依赖的斜率  $L = 47 \pm 14 \text{ MeV}$ , 这表明对称能具有偏软的性质<sup>[8]</sup>。这一结果和稍晚从其他物理过程, 包括对 GW170817 引力波事件分析所得到的结果相符<sup>[9]</sup>。

发现同位旋弛豫的一些定性特征是不够的, 这方面的研究一直在持续。人们还会问, 同位旋自由度弛豫的时标, 可否定量测量? 如何测量? 由于同位旋自由度弛豫受对称能的支配, 对上述问题的回答, 也会推动核物质状态方程研究的发

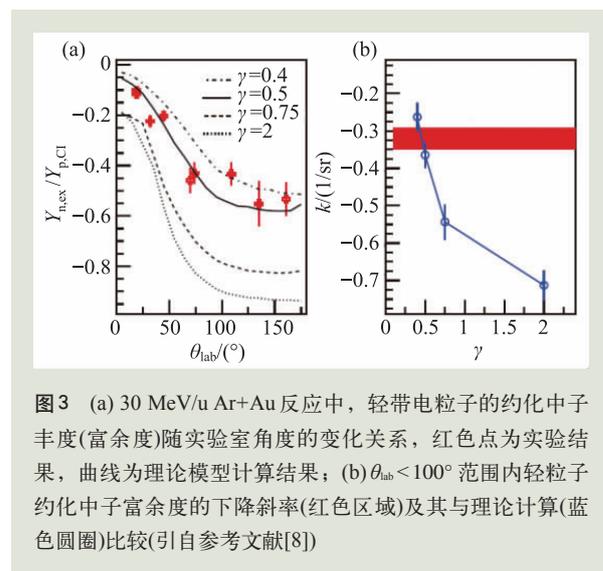


图3 (a) 30 MeV/u Ar+Au 反应中, 轻带电粒子的约化中子丰度(富余度)随实验室角度的变化关系, 红色点为实验结果, 曲线为理论模型计算结果; (b)  $\theta_{\text{lab}} < 100^\circ$  范围内轻粒子约化中子富余度的下降斜率(红色区域)及其与理论计算(蓝色圆圈)比较(引自参考文献[8])

展。然而，前面有述，重离子核反应的持续时间在 $10^{-21}$  s量级，还没有什么计时设备可以达到如此小的时间量程和测量精度。因此必须借助特殊的方法。

20世纪50年代，两位天文学家 Hanbury Brown 和 Twiss 发明了一种强度干涉学的方法，也称为 HBT 方法，可以测量遥远的天狼星的角尺寸<sup>[10]</sup>。在这一方法中，人们测量来自同一个发射体的两束相距很近的光，通过分析这两束光同时被记录的概率相对于各自单独被记录的概率的大小(定义为 HBT 关联函数)，可以得到发射体的空间尺度信息。由于 HBT 关联是强度干涉，故不要求两束光满足相干条件。这种方法在 20 世纪 90 年代被大量用到重离子核反应中，从一个星体出来两束光，类比于从一个反应系统发出的两个粒子。这种推广是有物理基础的，如果对比一下发射体大小和测量距离的比值，会发现对星体的观测和对核反应体系的观测是相近的(这是核物理和天体物理的又一个紧密联系的地方)。与遥远的星体不同的是，核反应是一个随时间变化的短暂过程，因此两粒子关联函数不仅包含了反应体系的空间大小信息，也包含粒子发射的随时间演化信息<sup>[11]</sup>。也就是说，在重离子核反应中，HBT 关联函数包含了核反应体系的时空演化信息。已有的实验表明，这种方法对粒子发射时标测量的精度，可以达到约 $1 \times 10^{-22}$  s (约 30 fm/c)<sup>[12]</sup>，可以小于这一能区重离子核反应的持续时间。

随着核物理探测技术的进步，这方面的测量精度可以进一步改善。相比于本世纪初的实验条

件，现在的探测器和电子学技术更好，具有更高的位置分辨、能量分辨和粒子鉴别本领，因此小角关联函数的测量精度将得到显著改善，可以用于研究不同同位旋粒子发射时标之间的差异。清华大学物理系近年来搭建了一个小型的核反应测量谱仪(a Compact Spectrometer for Heavy Ion Experiment, 简称 CSHINE)，这一谱仪采用大面积的位置灵敏平行板雪崩计数器(PPAC)来记录裂变产生的重碎片，采用六套先进的硅条望远镜阵列测量符合出射的轻粒子，既可以精确测量出射粒子的种类和能量，也可以精确测量其出射角度。图 4 为 CSHINE 的结构示意图。我们利用该谱仪在我国的大科学装置——兰州重离子研究装置(HIRFL)上完成两轮重离子核反应的束流实验，有望在不久的将来，取得数据分析的结果。

值得一提的是，在重离子核反应中，参与反应的自由度极多，大量反应道打开，描述重离子核反应的输运模型参数多，物理机制和数值处理复杂，这可能导致不同的模型计算结果之间亦可能存在差异<sup>[13]</sup>。因此，从重离子核反应中提取状态方程的信息，依然有些不确定因素。人们不禁进一步思考，能否利用参与反应自由度少的反应类型，例如直接反应，来寻找核物质状态方程的敏感探针呢？答案是肯定的。许昌和他的合作者发现，根据 Hugenholtz—Van Hove 定理，饱和点附近的对称能及其密度依赖斜率，可以由中子和质子与原子核散射的全局光学势之差解析导出<sup>[14]</sup>。因此，只要分别得到质子和中子与原子核的光学势，就能够导出对称能的密度依赖。

这一想法可以在氘核的破裂反应中实现。氘核是一个奇妙的原子核，其结合能只有大约 2 MeV，结合很松散。当氘核与原子核靠近的时候，质子受库仑排斥而中子没有，因此容易理解，当氘核在重核场中散射，会出现极化效应，即质子远离核势的中心。这一效应称为“库仑极化”，是 R. Oppenheimer 和 E. Lawrence 等人在 20 世纪 30 年代研究氘核引发的嬗变反应中发现的。基于类似的图像，如果中子和质子受到的同位旋矢量势不同，氘核在核场中的散射也会出现所谓的“同位

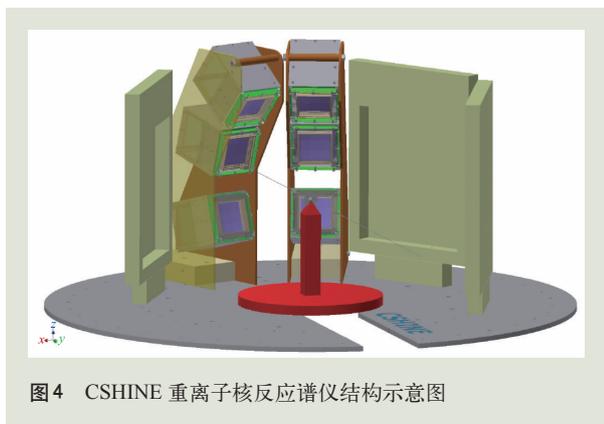


图4 CSHINE 重离子核反应谱仪结构示意图

旋矢量极化”效应，如图5所示。即当一个有固定取向的氘核进入靶核的核势场中时，作用在中子上的排斥核势和作用在质子上的吸引核势就像一个转动力矩一样，使得氘核瞬间发生额外的“转动”，并且在其后续的破裂反应中留下清晰的实验信号。例如可以测量后续氘核破裂出射的质子和中子，通过它们相对运动的角分布，有助于提取亚饱和密度区核对称能的性质<sup>[15]</sup>。这一过程等效于观测了中子和质子与靶核的光学势之差，如果能够被实验证实，将为核物质状态方程的研究提供一个新的思路。

## 5 总结

核物质状态方程是联系核物理和天体物理的一个重要纽带，也是研究原子核结构、核反应以及中子星的结构、演化属性和并合过程等问题的重要输入。目前国际上许多大型核物理实验室和天文观测台都把同位旋非对称的核物质状态方程作为重要的研究目标。基于加速器装置的重离子核反应，是地面实验室研究核物质状态方程

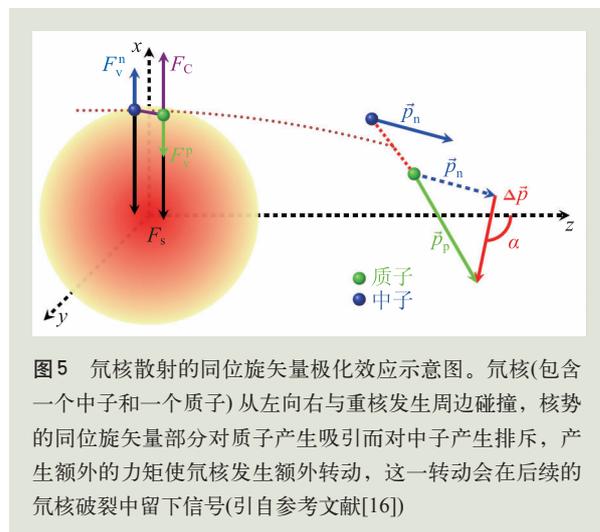


图5 氘核散射的同位旋矢量极化效应示意图。氘核(包含一个中子和一个质子)从左向右与重核发生周边碰撞，核势的同位旋矢量部分对质子产生吸引而对中子产生排斥，产生额外的力矩使氘核发生额外转动，这一转动会在后续的氘核破裂中留下信号(引自参考文献[16])

的重要途径。尽管在饱和点附近的核物质状态方程，尤其是对称能的密度依赖属性研究中取得了很大进展，但对称能的精确约束还需要更多的理论和实验探索。文中我们介绍了从重离子核反应的途径约束对称能的研究背景、方法和一些进展。鉴于重离子核反应理论描述的复杂性，提出运用氘核的同位旋矢量极化效应开展这方面研究的构想。

## 参考文献

- [1] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119:161101
- [2] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 121:161101
- [3] De S, Finstad D, Lattimer J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 121:091102
- [4] McLaughlin M. Physics, 2017, 10: 114
- [5] Oganessian Y T, Utyonkov V K, Lobanov Yu V *et al.* Phys. Rev. C, 2006, 74:044602
- [6] 肖迪, 耿金军, 戴子高. 物理, 2019, 48(9):545
- [7] Xie W J, Li B A. Astro. Phys. J., 2019, 883: 174
- [8] Zhang Y, Tian J L, Wang R S *et al.* Phys. Rev. C, 2017, 95:041602(R)
- [9] Zhu Z Y, Zhou E P, Li A. Astro. Phys. J., 2018, 862:98
- [10] Hanbury Brown R, Twiss R Q. Nature, 1956, 178: 1046
- [11] Koonin S. Phys. Lett. B, 1977, 70:43
- [12] Xiao Z G, Hu R J, Wu H Y *et al.* Phys. Lett. B, 2006, 639:436
- [13] Xu J, Chen L W, Tsang B *et al.* Phys. Rev. C, 2016, 93:044609
- [14] Xu C, Li B A, Chen L W. Phys. Rev. C, 2010, 82:054607
- [15] Ou L, Xiao Z G, Yi H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 115:212501
- [16] Liang X, Ou L, Xiao Z G. Phys. Rev. C, 2020, 101:024603

# 安捷伦科技 TwisTorr 305 新型分子泵



## New TwisTorr 305 创造品质真空



全无油超高真空



超低振动和噪音



APP 智能连接



多项严苛测试



安捷伦科技（中国）有限公司 真空产品热线：

800 820 6778（固定电话拨打） 400 820 6778（手机拨打）

了解更多，请扫描左侧二维码关注“安捷伦真空”微信公众号  
或登陆安捷伦官方网站：[www.agilent.com](http://www.agilent.com) 搜索“TwisTorr 305”。