

中高能重离子碰撞中奇异粒子产生和超核 研究进展

冯兆庆 刘恒金 程辉淦 韦斯纳
(华南理工大学 物理与光电学院 广州 510641)

摘要 本文概述了中高能重离子碰撞奇异粒子产生动力学机制和超核实验测量和理论研究进展。基于量子分子动力学(Lanzhou Quantum Molecular Dynamics model, LQMD)输运模型,即引入 Skyrme 能量密度泛函和相对论协变密度泛函描述核子和共振态动力学演化,考虑介子-核子和超子-核子相互作用势和阈能修正效应。以反应系统 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 、 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 、 $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ 和 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 为例,研究了阈能附近 K 介子、 \bar{K} 介子和超子(Λ 、 Σ 、 Ξ)产生机制并分析了核介质效应和高密区域对称能对同位旋粒子比值的影响。基于量子并合方法构造超核并研究了超核形成相空间分布,给出超核形成的质量数、电荷数、动能、快度分布、集体流等信息。引入两体、三体、四体核子碰撞和核结构效应分析了重离子碰撞中预平衡结团发射机制。介绍了考虑同位旋矢量介子 ρ 和 δ 耦合相对论协变的量子分子动力学输运模型。

关键词 重离子碰撞, 奇异粒子产生, 介质效应, 并合方法, LQMD 输运模型

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080010

关联视频 DOI: 10.12351/ks.2208.0608



Progress in strange particle production and hypernuclear physics in intermediate and high-energy heavy-ion collisions

FENG Zhaoqing LIU Hengjin CHENG Huigan WEI Sina

(School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract We reviewed the recent progress on strange particle production and hypernuclear physics both in experiments and in theories. The temporal evolutions of nucleons and resonances are described by the Skyrme energy density functional and relativistic covariant density functional theory, in which the meson-nucleon and hyperon-nucleon interactions are considered. Calculations are performed for the reactions of $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$, $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$, $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$, and $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$. The in-medium effects and high-density symmetry energy from the production of kaon, antikaon, and hyperon (Λ , Σ , Ξ) are investigated systematically. A quantum coalescence method is used to construct the hypernucleus, and the phase-space distribution is investigated in terms of the mass, charge, kinetic energy, rapidity distribution, collective flows, etc. Pre-equilibrium cluster emission in heavy-ion collisions is analyzed by implementing 2-, 3-, and 4-body nucleon collisions. The relativistic quantum molecular dynamics model is introduced by including ρ and δ coupling for nucleon transportation, and the collective flows are calculated for protons and neutrons.

国家自然科学基金(No.12175072, No.11722546)、华南理工大学双一流建设经费(No.20210115)资助

第一作者: 冯兆庆, 男, 1979 年出生, 2007 年于中国科学院研究生院获博士学位, 研究领域为原子核物理, E-mail: fengzhq@scut.edu.cn

收稿日期: 2022-12-09, 修回日期: 2023-02-01

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12175072, No. 11722546), the Talent Program of South China University of Technology (No.20210115)

First author: FENG Zhaoqing, male, born in 1979, graduated from graduate school of Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2007, focusing on nuclear physics, E-mail: fengzhq@scut.edu.cn

Received date: 2022-12-09, revised date: 2023-02-01

Key words Heavy-ion collisions, Strange particle production, In-medium effect, Coalescence method, LQMD transport model

奇异粒子是含有s夸克的介子和重子,包括K、 \bar{K} 、 ϕ 、 Λ 、 Σ 、 Ξ 、 Ω 等。中高能重离子碰撞可以产生大量奇异粒子,如K介子阈能1.58 GeV,是研究致密物质状态方程主要观测测量。中高能重离子碰撞可以产生高温高密核物质状态,致密区域发射的奇异粒子相空间分布可以获取高重子密度物质性质。超子-超子和超子-核子相互作用势会影响超子产生分布和超核形成,可以通过理论计算^[1-4]和超子-核子散射实验数据提取相互作用势的密度、动量和同位旋依赖形式^[5-7]。高重子密度物质性质是理解天体演化相关物理问题的重要输入量,如致密星体的塌陷;超新星爆炸;中子星形成、结构及演化;中子星中的介子凝聚;双中子星并合引力波发射等^[8-10]。通过奇异粒子产额、动能或动量谱、集体流等信息可以研究高重子密度物质性质,如核物质状态方程、奇异粒子-核子相互作用势、强子物质相变等。近年来,基于输运模型分析德国重离子研究中心FOPI和KAOS合作组K⁺介子实验数据,一致给出在2~3倍饱和密度区域较软核物质状态方程能够解释实验数据^[11-13]。通过分析¹⁹⁷Au+¹⁹⁷Au和¹²C+¹²C碰撞 Λ 超子产额比激发函数,较软的状态方程给出与K⁺介子相同的结果,而核介质效应对双比值影响很小^[14]。通过分析重离子碰撞和高能质子轰击原子核实验数据,得出K⁺、K⁻、 Λ 在饱和密度的光学势分别为25 MeV、-100 MeV和-30 MeV^[15]。奇异粒子与核子相互作用势对其与原子核形成的束缚态有重要影响。目前,人们对 Λ - Λ 相互作用还不清楚,通过双奇异性超核性质和重离子碰撞 Λ - Λ 关联发射可以提取 Λ - Λ 相互作用势信息。同位旋非对称致密核物质的状态方程一直是核物理研究的热点课题之一。目前,亚饱和密度对称能信息研究比较详细,但高密区域对称能还不很清楚。高能核物理过程中产生的奇异粒子会导致核物质状态方程的软化,对于中子星也会使其质量-半径关系发生变化,甚至在一些模型中对中子星的质量-半径关系约束不允许其内部出现奇异粒子^[16-19]。中子星中超子的出现和超子-核子相互作用势有关。例如,吸引的 ΣN 相互作用会导致在低密区域 Σ 先于 Λ 出现,但排斥的光学势则会导致 Σ 无法出现在中子星中。因此,超子和核子的相互作用很大程度上影响着我们对中子星内部结构的认识^[20]。

自从1953年波兰物理学家Danysz和Pniewski在宇宙线乳胶实验中首次发现 Λ 超核以来^[21],超子

与原子核形成的束缚态一直是核物理研究重要课题。核素图也从二维扩展到三维,超核的奇特结构和衰变谱学研究也是核结构研究前沿课题。目前,人们已在实验中发现了大量包含一个 Λ 超子(奇异数 $S=-1$)的超核,而 $S=-2$ 的超核数量较少仅为三、四个^[22-23]。超核中超子不受到泡利不相容原理限定可以处在不同能级导致超核半反常收缩^[24]。超子-核子的相互作用也受到了广泛的关注,关于自由空间中超子与核子的相互作用通过超子-核子散射的实验已经研究得比较充分,但介质中的超子-核子(YN)相互作用以及包含更多奇异夸克超子和核子的相互作用,目前的研究还不是很清楚,Rijken、Nagels、Yamamoto等^[25-27]提出了一些模型用于描述介质中的YN相互作用。重离子碰撞可以生成含有奇异粒子的原子核(如K原子核、超核等),极大地扩展了核物理研究范畴。超子在原子核内部不会受到泡利不相容原理限制,可以占据核内任何轨道态,对应的结合能也极大不同,如 Λ 超子占据不同单粒子态²⁰⁸ Λ Pb的s、p、d、f、g对应分离能分别为26.9 MeV、22.5 MeV、17.4 MeV、12.3 MeV和7.2 MeV^[28]。核内奇异夸克成分也改变了原子核性质,其均方根半径与结构有密切关系如 Λ H为5 fm,而 Λ H为2 fm^[29]。超核研究可以帮助人们理解超子-核子、超子-超子两体作用和超子-核子-核子、超子-超子-核子三体作用势等基本问题^[30-31],以及致密星体内部结构(如中子星等)^[32]。迄今为止,人类在实验室里已发现的超核有40余个,40个 Λ 超核,1个 Σ 超核(Σ^0 He)和3个 $\Lambda\Lambda$ 超核($\Lambda\Lambda^6$ He、 $\Lambda\Lambda^{10}$ Be、 $\Lambda\Lambda^{12}$ Be),其中,超核 $\Lambda\Lambda^{10}$ Be和 $\Lambda\Lambda^{12}$ Be目前还不确定^[33]。值得一提的是,中国合作团队领导的STAR合作组在美国布鲁克海文相对论重离子对撞机上首次发现了反超核 Λ^0 H^[34],开创了人类开始向反超核($S=1$)方向的研究。反超核性质可以研究反超子-核子相互作用和检验电荷-宇称-时间反演(CPT)对称定理。铜系超核延迟裂变现象也是超核研究领域有意义的工作,主要通过反质子轰击铜系核形成^[35]。极端丰中子或丰质子超核性质在理解强相互作用、中子星性质、短程关联、少体束缚态问题等方面有重要物理意义,重离子碰撞是产生极端同位旋不对称超核的唯一途径。目前,在这方面的理论和实验研究都比较缺乏,正在惠州建设的强流重离子加速器(High Intensity Accelerator Facility, HIAF)为研究极端丰中子或丰质子超核提供了实验平台^[36]。重离子碰撞主要基于碎裂反应产生超核,

在理论上需要深入研究同位旋扩散、超子产生和演化、结团关联、超核碎片构造等过程。

目前,世界核物理实验室已建成或正在建设产生远离 β 稳定线的奇异核素工厂,如我国兰州重离子加速器冷却储存环(Heavy-Ion Research Facility in Lanzhou, Cooling Storage Ring, HIRFL-CSR)和HIAF^[36]、北京在线同位素分离丰中子束流装置(Beijing Isotope Separation On-Line, BISOL)^[37]、德国重离子研究中心(Super-conducting Fragment Separator, Super-FRS)^[38]、法国大型加速器实验室(GANIL)放射性束流装置SPIRAL2^[39]、韩国放射性束加速器装置(RAON)^[40]、美国密歇根州立大学放射性同位素束流装置(Facility for Rare Isotope Beams, FRIB)^[41]、日本的理化学研究所放射性同位素束工厂(Radioactive Isotope Beam Facility, RIBF)^[42]、俄罗斯 Dubna Nuclotron-based Ion Collider fAcility(NICA)^[43]等。理论上,基于现实核子-核子相互作用建立的微观多体模型研究稀有同位素奇特结构。重离子输运模型是研究稀有同位素引起的核反应动力学主要工具,考虑不稳定核的结团结构、短程关联、对称能的密度依赖性、不同反应道耦合等。本文概述了输运模型构建的物理基础,重点介绍量子分子动力学模型(Lanzhou Quantum Molecular Dynamics model, LQMD)和中高能重离子碰撞中奇异粒子产生和超核形成方面的应用,讨论阈能修改、核碎片和超核碎片构造以及可能进一步的发展。

1 输运模型介绍

输运模型是基于非平衡统计理论描述碰撞系统随时间演化的动力学过程。重离子输运模型依据描述自由度不同可分为宏观和微观模型。宏观输运模型即基于核-核相互作用势(弹靶密度分布采用瞬时近似、绝热近似、时间演化)或位能曲面构建模型,描述弹靶碰撞集体自由度时间演化,如质量不对称度、电荷不对称度、径向自由度、颈部自由度等,包括多维朗之万方程^[44]、双核模型等^[45-47]。微观输运模型是基于核子-核子相互作用势(Skyrme力, Gogny力, Walecka介子交换)自洽平均场下动力学演化,如量子分子动力学模型及其扩展^[48-51]、Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck模型^[52]、Time-Dependent Hartree-Fock(TDHF)等^[53]。

近年来发展的LQMD输运模型描述包括强子-强子弹性和非弹性碰撞、共振态($\Delta(1232)$, $N^*(1440)$, $N^*(1535)$)、超子(Λ , Σ , Ξ)和介子(π , η , K)产生和演化,反质子与核子弹性散射、电荷交换、湮

灭反应和非弹性碰撞。强子动力学演化满足正则方程:

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \vec{p}_i}, \quad \frac{d\vec{p}_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \vec{r}_i} \quad (1)$$

反应体系哈密顿量由动能、库仑能、局域相互作用势能和动量相关势能构成:

$$H = T + U_{\text{Coul}} + U_{\text{loc}} + U_{\text{mom}} \quad (2)$$

1.1 Skyrme能量密度泛函下核子和共振态动力学演化

核子和共振态哈密顿量以如下形式表示^[54-55]:

$$H_B = \sum_i \sqrt{p_i^2 + m_i^2} + U_{\text{int}} + U_{\text{mom}} \quad (3)$$

式中:右边三项分别为相对论能量、有效相互作用势和动量相关势。其中, p_i 和 m_i 分别表示重子的动量和质量;有效相互作用势 U_{int} 又包括库仑势 U_{Coul} 和局域相互作用势 U_{loc} ,其中库仑相互作用势表示为:

$$U_{\text{Coul}} = \frac{1}{2} \sum_{i,j \neq i} \frac{e_i e_j}{r_{ij}} \text{erf}(r_{ij}/(2\sigma_\tau)) \quad (4)$$

式中: e_i 和 σ_τ 分别为电荷数以及高斯波包宽度; $r_{ij} = |r_i - r_j|$ 是两个带电粒子的相对距离。局域相互作用势能直接由Skyrme能量密度泛函得到:

$$U_{\text{loc}} = \int V_{\text{loc}}[\rho(r)] dr \quad (5)$$

其中:

$$V_{\text{loc}}(\rho) = \frac{\alpha}{2} \frac{\rho^2}{\rho_0} + \frac{\beta}{1+\gamma} \frac{\rho^{1+\gamma}}{\rho_0^\gamma} + E_{\text{sym}}^{\text{loc}}(\rho) \rho \delta^2 + \frac{g_{\text{sur}}}{2\rho_0} (\nabla\rho)^2 + \frac{g_{\text{sur}}^{\text{iso}}}{2\rho_0} [\nabla(\rho_n - \rho_p)]^2 \quad (6)$$

式中: ρ_n 、 ρ_p 和 $\rho = \rho_n + \rho_p$ 分别表示中子密度、质子密度以及核子的总密度; $\delta = (\rho_n - \rho_p)/(\rho_n + \rho_p)$ 为同位旋不对称度。表面项系数 g_{sur} 、 $g_{\text{sur}}^{\text{iso}}$ 和饱和密度 ρ_0 分别为 $23 \text{ MeV} \cdot \text{fm}^2$ 、 $-2.7 \text{ MeV} \cdot \text{fm}^2$ 以及 0.16 fm^{-3} 。LQMD中采用了Skyrme形式的动量相关相互作用势:

$$U_{\text{mom}} = \frac{1}{2\rho_0} \sum_{i,j \neq i} \sum_{\tau, \tau'} C_{\tau, \tau'} \delta_{\tau, \tau'} \delta_{\tau, \tau'} \int \int dp dp' dr f_i(r, p, t) \times \left[\ln(\epsilon(p - p')^2 + 1) \right] f_j(r, p', t) \quad (7)$$

其中:同位旋符号 τ 表示中子或质子; $C_{\tau, \tau} = C_{\text{mom}}(1 + x)$, $C_{\tau, \tau'} = C_{\text{mom}}(1 - x)$ ($\tau \neq \tau'$), x 表示核子有效质量的劈裂,当 $x = -0.65$ 时, $m_n^* > m_p^*$, 当 $x = 0.65$ 时, $m_n^* < m_p^*$, m_n^* 和 m_p^* 分别表示中子和质子的有效质量。表1给出了在包括或不包括动量相关项时对称核物质信息, PAR1和PAR2分别对应动量相关项和不包括动量相关项,两者给出的不可压缩系数都是 230 MeV 。

表1 Skyrme能量密度泛函下饱和密度为 0.16 fm^{-3} LQMD模型中对称核物质参数
Table 1 Parameters and properties of isospin symmetric EOS in the LQMD model at a saturation density of 0.16 fm^{-3} with the Skyrme energy density functional

Parameters	α / MeV	β / MeV	γ	$C_{\text{mom}} / \text{MeV}$	$\epsilon / \text{c}^2 \cdot \text{MeV}^{-2}$	m_n^* / m	K_∞ / MeV
PAR1	-215.7	142.4	1.322	1.76	5×10^{-4}	0.75	230
PAR2	-226.5	173.7	1.309	0	0	1	230

核物质对称能由费米运动的动能、密度依赖局域平均场势和动量相关势组成,即:

$$E_{\text{sym}}(\rho) = \frac{1}{3} \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{3}{2} \pi^2 \rho \right)^{2/3} + E_{\text{sym}}^{\text{loc}}(\rho) + E_{\text{sym}}^{\text{mom}}(\rho) \quad (8)$$

其中,密度依赖的局域平均场势为:

$$E_{\text{sym}}^{\text{loc}}(\rho) = \frac{1}{2} C_{\text{sym}}(\rho/\rho_0)^{\gamma_s} \quad (9)$$

$$E_{\text{sym}}^{\text{loc}}(\rho) = a_{\text{sym}}(\rho/\rho_0) + b_{\text{sym}}(\rho/\rho_0)^2$$

包括动量相关项时 $C_{\text{sym}} = 52.5 \text{ MeV}$, $a_{\text{sym}} =$

43 MeV , $b_{\text{sym}} = -16.75 \text{ MeV}$, 不考虑动量相关项时 $C_{\text{sym}} = 38 \text{ MeV}$, $a_{\text{sym}} = 37.7 \text{ MeV}$, $b_{\text{sym}} = -18.7 \text{ MeV}$, 指数因子 $\gamma_s = 0.5, 1$ 和 2 分别应于对称能随密度变化呈现偏软、线性和较硬三种形式,结合超软形式分别给出对称能斜率 $[L(\rho_0) \equiv 3\rho_0 dE_{\text{sym}}(\rho)/d\rho] = 24 \text{ MeV}$, 53 MeV , 82 MeV 和 139 MeV , 如图 1 所示。不同的有效质量劈裂形势下即 $x = -0.65$ 或 0.65 , 对称能动量相关项贡献不同,如 $m_n^* > m_p^*$ 时对称能中动量相关项为负值。

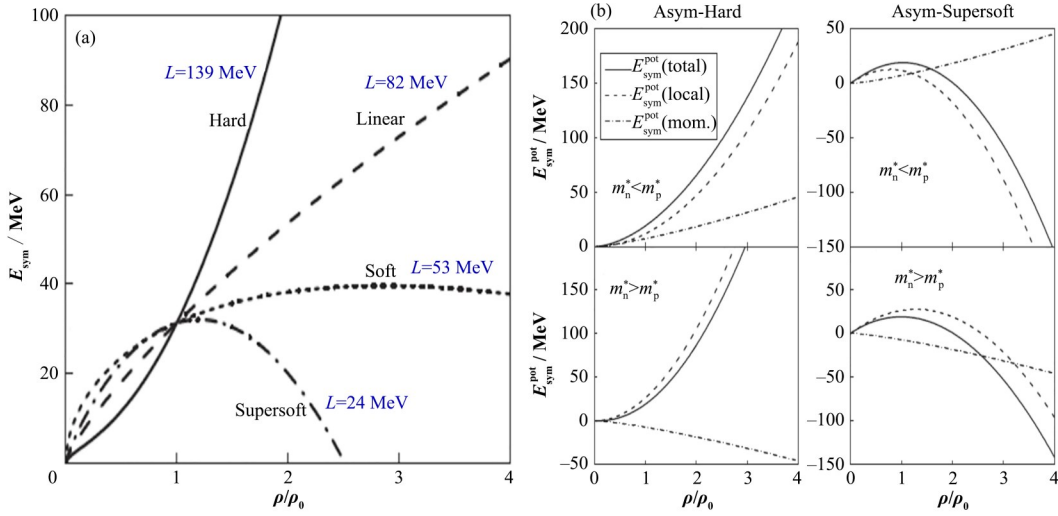


图1 不同对称能随密度变化关系(a)和对称能中势能部分局域及动量相关项随密度变化(b)

Fig.1 Density dependence of symmetry energy with different degrees of stiffness (a), and the contribution of local interaction- and momentum-dependent potential to symmetry energy (b)

1.2 相对论密度泛函下核子和共振态动力学演化

在相对论协变密度泛函下,核子和共振态动力学演化:

$$\dot{\vec{r}}_i = \frac{\vec{p}_i^*}{p_i^{*0}} + \sum_{j=1}^N \left(\frac{M_j^*}{p_j^{*0}} \frac{\partial M_j^*}{\partial \vec{p}_j} + z_j^{*\mu} \cdot \frac{\partial V_{j\mu}}{\partial \vec{p}_i} \right)$$

$$\dot{\vec{p}}_i = - \sum_{j=1}^N \left(\frac{M_j^*}{p_j^{*0}} \frac{\partial M_j^*}{\partial \vec{r}_j} + z_j^{*\mu} \cdot \frac{\partial V_{j\mu}}{\partial \vec{r}_i} \right) \quad (10)$$

其中: $z_j^{*\mu} = p_j^{*\mu}/p_j^{*0}$ 和有效质量 $M_i^* = M_N - S_i$ 。标量和矢量势分别由式(11)求出:

$$s_i = \frac{1}{2} g_\sigma \sigma_i + \frac{1}{2} g_\delta t_i \delta_i$$

$$V_{i,\mu} = \frac{B_i}{2} g_\omega \omega_{i,\mu} + \frac{B_i t_i}{2} g_\rho b_{i,\mu} \quad (11)$$

介子场 $\sigma, \omega, \delta, \rho$ 由相对论平均场求出:

$$m_\sigma^2 \sigma_i + g_2 \sigma_i^2 + g_3 \sigma_i^3 = g_\sigma \rho_{s1,i}$$

$$m_\omega^2 \omega_i^\mu = g_\omega J_i^\mu$$

$$m_\delta^2 \delta_i = g_\delta (\rho_{s_{p,i}} - \rho_{s_{n,i}}) = g_\delta \rho_{s3,i}$$

$$m_\rho^2 b_i = g_\rho (\rho_p - \rho_n) = g_\rho R_i^\mu \quad (12)$$

对称能由费米运动、 ρ 介子耦合和 δ 介子耦合构成,如下所示:

$$E_{\text{sym}} = \frac{1}{6} \frac{p_F^2}{E_F^*} + \frac{1}{2} \left[f_\rho - f_\delta \frac{M^{*2}}{E_F^{*2} [1 + f_\delta A(p_F, M^*)]} \right] \rho \quad (13)$$

其中: 因子 $f_{\rho,\delta} = g_{\rho,\delta}/m_{\rho,\delta}$ 。表 2 给出了两组耦合常数

分别对应对称核物质不可压缩系数 230 MeV 和 300 MeV, 耦合介子 ω 、 ρ 、 σ 和 δ 质量分别是 783 MeV、763 MeV、550 MeV 和 500 MeV。同位旋矢量介子 ρ 和 δ 引入导致对称能密度依赖性不同, 对称能斜率也不同, 如图 2 所示。在高密区域对称能差异性比较明显, 而在亚饱和和密度区域差异性不大。因此, 低密区域对称能研究, 我们采用非相对论形式, 如费米能区重离子碰撞、散裂反应等。中高能重

离子碰撞提取对称能信息采用非相对论和相对论密度泛函两种形式, 相对论模型能够自洽引入洛伦兹收缩、介质效应阈能修正、核子有效质量劈裂、介子-核子和超子核子相互作用等。在描述反质子引起的核反应时, 能够自洽描述核子-核子相互作用、反核子-核子相互作用, 反应系统动力学演化自洽描述有一定优势。

表 2 相对论协变密度泛函下在饱和密度为 0.16 fm^{-3} 和单核子结合能 -16 MeV 下 LQMD 模型中的参数
Table 2 Parameters for the relativistic mean field in the LQMD model at a saturation density of 0.16 fm^{-3} with a binding energy per nucleon of -16 MeV

Model	g_σ	g_ω	g_2 / fm^{-1}	g_3	g_ρ	g_δ	M^*/M_N	E_B / MeV	K / MeV	$E_{\text{sym}} / \text{MeV}$	L / MeV
set1	8.145	7.570	31.900	21.800	—	—	0.813	-16.0	230	14.3	33.3
set1 ρ	8.145	7.570	31.900	21.800	4.049	—	0.813	-16.0	230	31.6	85.3
set1 $\rho\delta$	8.145	7.570	31.900	21.800	8.673	5.347	0.813	-16.0	230	31.6	109.3
set2	8.830	9.500	11.310	13.750	—	—	0.738	-16.0	300	15.6	40.4
set2 ρ	8.830	9.500	11.310	13.750	3.897	—	0.738	-16.0	300	31.6	88.5
set2 $\rho\delta$	8.830	9.500	11.310	13.750	7.219	4.280	0.738	-16.0	300	31.6	109.4

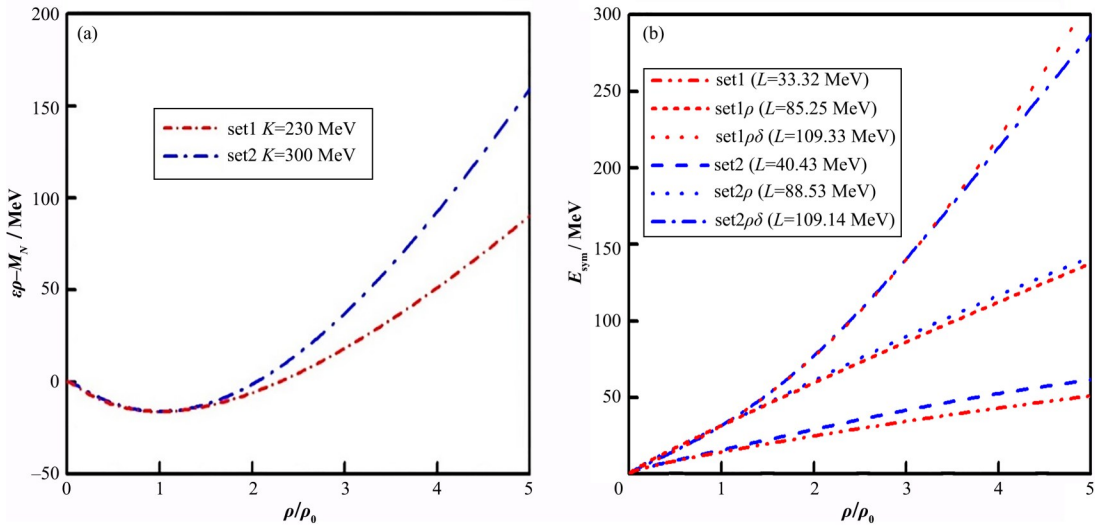


图 2 LQMD 中相对论协变密度泛函下对称核物质(a)和对称能(b)随密度变化

Fig.2 Density dependence of energy per nucleon of isospin symmetric nuclear matter (a) and symmetry energy (b) in the LQMD model with the covariant density functional

1.3 强子-强子碰撞反应道

LQMD 模型中包括了共振态质量 2 GeV 以下所有强子-强子碰撞, 产物 π 、 η 、 K 、 ρ 、 ω 等介子和 Λ 、 Σ 、 Ξ

$$NN \leftrightarrow N\Delta, NN \leftrightarrow NN^*, NN \leftrightarrow \Delta\Delta, \Delta \leftrightarrow N\pi, N^* \leftrightarrow N\pi, N^* \leftrightarrow \Delta\pi, N^* \leftrightarrow N\pi\pi, NN \rightarrow NN\pi (s\text{-state}) \quad (14)$$

奇异粒子产生由强子-强子两体碰撞到两体、三体和四体直接产生:

$$BB \rightarrow BYK, BB \rightarrow BBK\bar{K}, B\pi(\eta) \rightarrow YK, YK \rightarrow B\pi, B\pi \rightarrow NK\bar{K}, Y\pi \rightarrow B\bar{K}, B\bar{K} \rightarrow Y\pi, YN \rightarrow \bar{K}NN,$$

$$BB \rightarrow B\Xi KK, \bar{K}B \leftrightarrow K\Xi, YY \leftrightarrow N\Xi, \bar{K}Y \leftrightarrow \pi\Xi \quad (15)$$

其中: 弹性碰撞、电荷交换和奇异数交换反应道包括: $KB \rightarrow KB, \bar{K}B \rightarrow \bar{K}B, YB \rightarrow YB, \Xi B \rightarrow \Xi B, \Xi N \rightarrow$

等超子的产生, 共振态 ($\Delta(1232), N^*(1440), N^*(1535)\dots$) 产生和衰变。共振态产生和衰变反应道如下:

$\Lambda\Lambda, \Xi N \rightarrow \Lambda\Sigma$ 。其中: $B(N, \Delta, N^*)$, 超子 $Y(\Lambda, \Sigma, \Xi), K(K^0, K^+)$ 和 $\bar{K}(\bar{K}^0, K^-)$ 。基于手征有效场理论

和相对论平均场模型,考虑了介子、共振态、超子与核子相互作用势,还需要仔细分析超子光学势的同位旋、密度和动量依赖性。超子-超子相互作用如 Λ - Λ (Λ - Σ , Σ - Σ)通过分析双 Λ 超核基态性质提取饱和密度处相互作用势,而高密或低密区域由有效场模型计算外推引入输运模型中。

2 结果和讨论

2.1 中高能重离子碰撞中奇异介质效应和核物质状态方程

这里我们重点讨论重离子碰撞中超子 Λ 、 Σ 、 Ξ 和介子 K 、 \bar{K} 产生机制。阈能附近重离子碰撞中超子主要由核子-核子和 π -核子碰撞产生,如反应道 $NN \rightarrow KYN$ ($E_{\text{lab}}=1.58$ GeV)和 $\pi N \rightarrow KY$ 是主要过程($Y=\Lambda, \Sigma$), $YY \rightarrow N\Xi$ 是 $S=-2$ 超子的主要反应道,而反应道 $NN \rightarrow KKNE$ ($E_{\text{lab}}=3.72$ GeV)截面非常低约 $10 \mu\text{b}$ 。分析了反应系统 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 在 $1.5 \text{ GeV} \cdot \text{核子}^{-1}$ 入射能量中心碰撞情况($b=1 \text{ fm}$)下产生介子 π 、 η 、 K^+ 和超子 Σ 密度分布,如图3所示。可以看出, K^+

主要在重离子碰撞压缩阶段产生,最大产生率在 $2\rho_0$ 附近,而 π 、 η 和超子 Σ 有广阔的密度区域分布,主要是因为这些粒子产生后又被核子吸收成为共振态或反 K 介子。因此,要提取高密区域核物质信息,需要在重离子碰撞压缩阶段发射的粒子信息,如中心快度、高横向动量、方位角等约束。近年来,基于输运模型分析德国重离子研究中心FOPI和KAOS合作组 K^+ 介子实验数据,一致给出在 $2\sim 3\rho_0$ 密度区域较软核物质状态方程能够解释实验数据^[56-58]。通过分析 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 和 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 碰撞 Λ 超子产额比激发函数,较软的状态方程给出与 K^+ 介子相同的结果,而核介质效应对双比值影响很小^[59]。通过分析重离子碰撞和高能质子轰击原子核实验数据,得出 K^+ 、 K^- 、 Λ 在饱和密度的光学势分别为 25 MeV 、 -100 MeV 和 -30 MeV ^[60]。奇异粒子与核子相互作用势对其与原子核形成的束缚态有重要影响。 Σ -核子相互作用目前还不清楚,大部分模型计算给出较弱排斥势,如饱和密度附近 15 MeV 。基于手征微扰理论,引入密度、动量和同位旋相关的 Σ -核子势,并研究了 Σ 超子产生快度、横向动量、不变质量谱、集体流等^[61]。

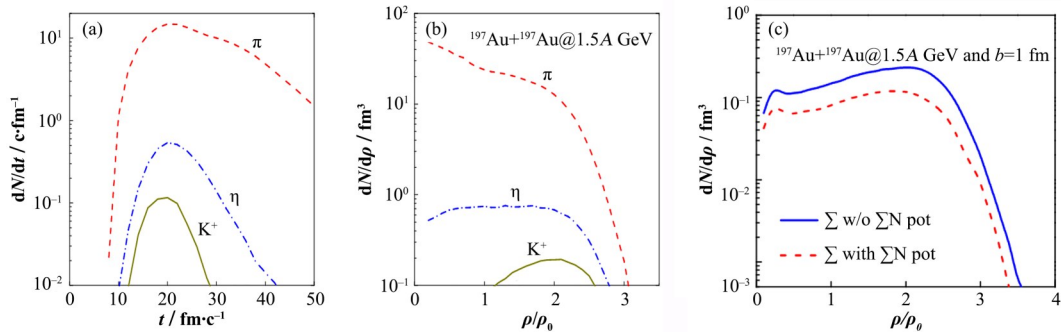


图3 反应体系 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 在入射能量为 $1.5 \text{ GeV} \cdot \text{核子}^{-1}$ 和碰撞参数为 1 fm 时介子 π 、 η 、 K^+ 和超子 Σ 产生时间演化和密度依赖
Fig.3 Temporal evolution and density profiles of π , η , K^+ , and Σ in collisions of $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ at an incident energy of $1.5 \text{ GeV} \cdot \text{nucleon}^{-1}$ and impact parameter of 1 fm

重离子碰撞中粒子发射相空间分布可以通过集体流表征,粒子的三维动量可以用相对于碰撞方向的方位角 ϕ 、纵向快度和横向动量表述,产额分布可以写成:

$$\frac{dN}{d\phi}(y, p_t) = N_0 [1 + 2V_1(y, p_t) \cos(\phi) + 2V_2(y, p_t) \cos(2\phi) + 2V_3(y, p_t) \cos(3\phi) + 2V_4(y, p_t) \cos(4\phi) + \dots + 2V_n(y, p_t) \cos(n\phi)]$$

其中: $p_t = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ 和 $y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z}$ 分别为沿束流方向的横向动量和纵向快度; ϕ 为粒子出射方位角($\tan(\phi) = p_y/p_x$, p_x 和 p_y 分别为反应平面内和出平面内垂直于束流方向的横动量的分量)。 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 分别为直接流、椭圆流、三角流、四阶流,阶数越高其

值越小,呈现了出射粒子在反应平面分布各向异性程度。图4给出了平面流和椭圆流快度分布以及 K^+ 和超子产额的快度和横向动量分布, Λ 超子平面流与E895实验数据做了比较^[60]。超子 Λ 和 Σ 集体流分布很相似,也比较符合Lawrence Berkeley实验数据^[62]。总体来看,超子发射与质子具有相似的行为,在中心快度区域呈现出挤出发射。较软的核物质状态方程压低了 K^+ 的产生,而对超子产额影响较弱。目前, Σ 超子实验数据非常稀少,有望在HIAF测量重离子碰撞中 Σ 超子的集体流、不变质量谱、超子-核子/原子核散射等信息提取 Σ 超子与核子相互作用势并研究其束缚态(超核)性质。在致密物质中,如中子星,超子-核子-核子和超子-超子-核子三体相互作用问题也需要特别关注,中子星物质中超子成分目前还不清楚,需要更进一步研究^[63]。输运模型

中可以通过考虑三体相互作用势研究重离子碰撞中超子产生集体流、横向动量分布等信息可以提取超子相关的三体力性质,我们基于QMD输运模型在非相对论和相对论框架下正在进行细致的研究。

2.2 超核形成相空间分布

近年来,超核的研究在实验和理论方面都引起广泛兴趣。利用重离子碰撞可以产生非常丰富的超核,如中性超核(三中子或四中子与超子构成的束缚态)和 Λ 构成的超核、反超核、极端丰中子或者丰质子超核等。对超核反应机制研究有利于人们认识超核形成机理和实验室测量超核探测器布局。然而,中高能重离子碰撞中超核形成机制研究还比较少,动力学模型较缺乏。在LQMD模型中,碰撞末态重碎片构造采用最小树并合方法,即核子的相对动量和相对距离小于某一值时被认为是结合为同一碎片,如 $|r_i - r_j| < 3$ fm 和 $|p_i - p_j| < 200$ MeV \cdot c $^{-1}$ 。并合参数的选取主要依据原子核多重碎裂反应的描述。不同参数的选取对核碎片产额影响甚小,主要改变低动能核子的多重性。而轻碎片特别是质量数 $A \leq 4$ 是基

于波函数的量子并合方法构造原子核^[64]。值得提到,一部分轻质量原子核(核结团)在碰撞过程中发射,即前平衡结团发射,其结团形成和发射与结合能、核子-核子(超子)碰撞和Mott效应有关,我们正在完成该过程结团发射。因此,初级碎片产额没有结构效应。引入统计衰变后,碎片产额略有改善。我们分析了入射能量为4.25 GeV \cdot 核子 $^{-1}$ $^{20}\text{Ne}+^{12}\text{C}$ 碰撞产生自由超子、氦核、 ^3He 、 ^3H 、 ^4H 和 ^4He 快度和横向动量分布,如图5所示。可以清楚地看到,超核碎片较核碎片产额很快下降,约降低4个数量级,并且主要分布在中心快度和低动能区域。原子核内 Λ 超子通常强衰变为质子和 π^- ,寿命约160 ps,如 $^4\text{H} \rightarrow \text{t} + \text{p} + \pi^-$ 。重离子碰撞产生的超子以较快速度运动,只有少数被核碎片俘获形成超核并以较慢速度演化,自由超子形成超核碎片产额降低约100倍。研究结果有助于我国在惠州即将建设的HIAF上开展超核实验研究并提供参考依据。近期相对论重离子对撞机STAR合作组利用干涉学方法测量矢量介子研究夸克胶子物质整体极化现象^[65-66],为获取

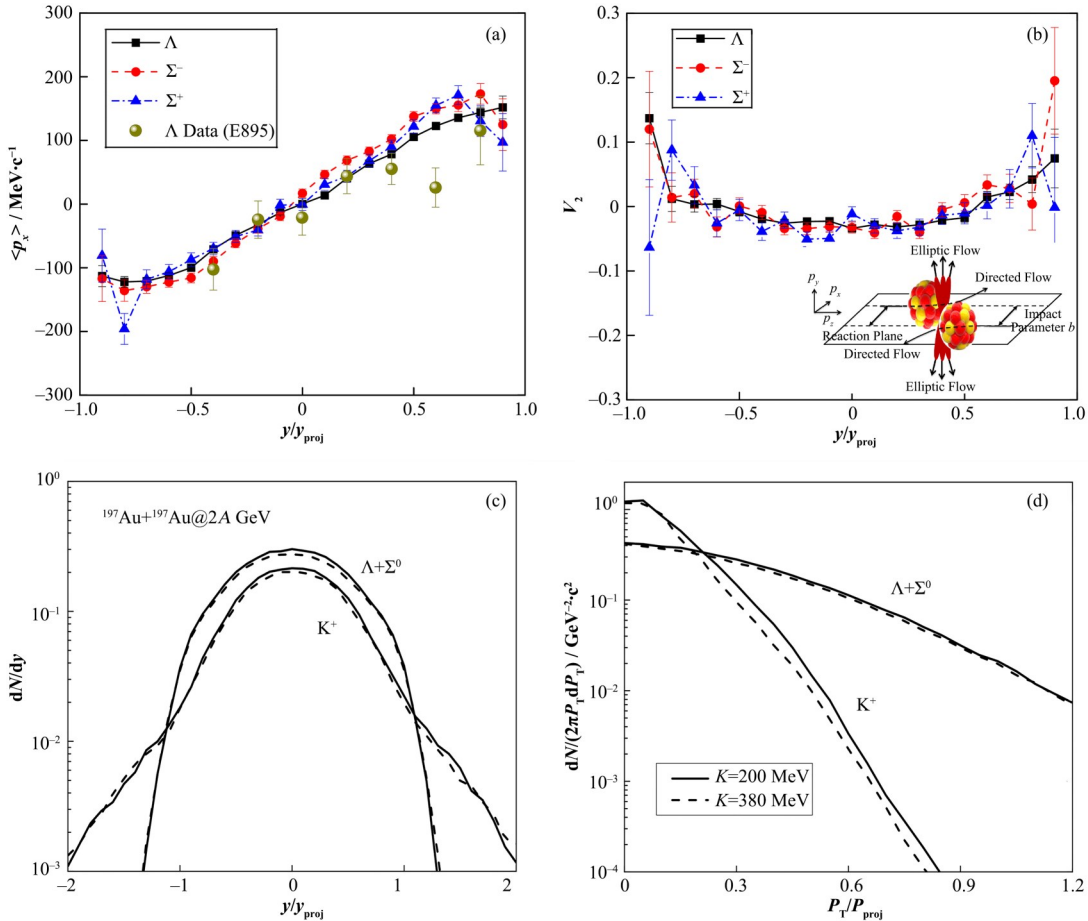


图4 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 反应体系在入射能量为2 GeV \cdot 核子 $^{-1}$ 时 Σ 超子平面流(a)、椭圆流(b)、 K^+ 和超子产额快度(c)及横向动量分布(d)比较

Fig.4 Rapidity distributions of transverse flows (a), elliptical flows (b), and total yields of hyperons (c) and transverse momentum spectra (d) of hyperons and kaons

QCD 物质自旋排布机制奠定了基础。

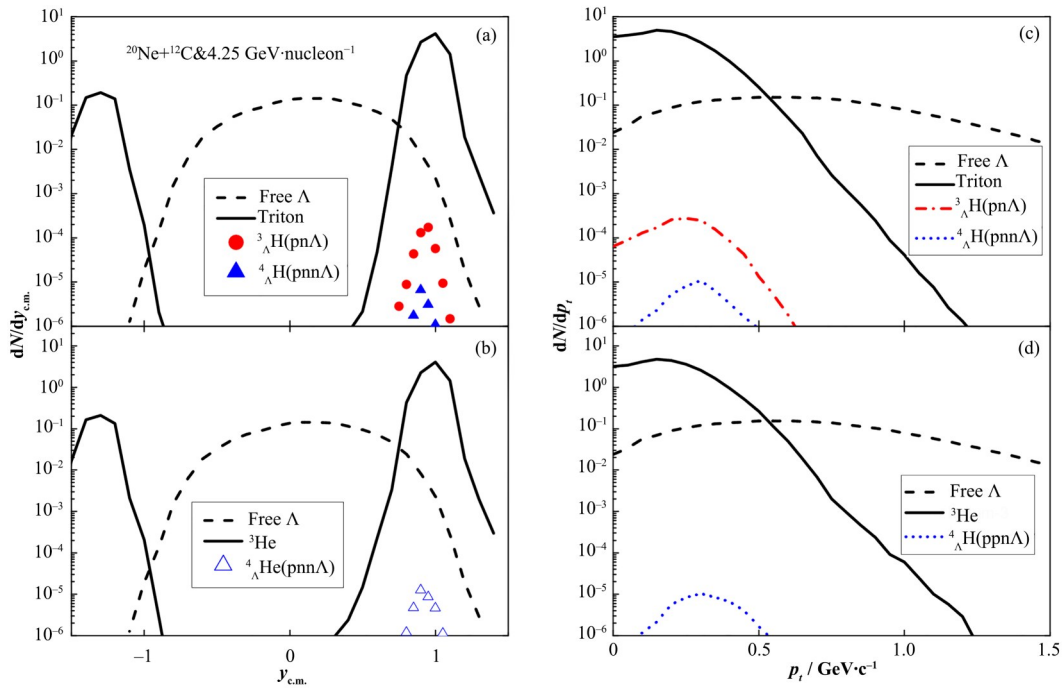


图5 入射能量为 $4.25 \text{ GeV} \cdot \text{核子}^{-1}$ $^{20}\text{Ne}+^{12}\text{C}$ 碰撞产生 Λ 、 ^3H 、 ^3He 、 $^3_{\Lambda}\text{H}$ 、 $^4_{\Lambda}\text{H}$ 和 $^4_{\Lambda}\text{He}$ 快度和横向动量谱分布^[62]
 Fig.5 Comparison of rapidity and transverse momentum distributions for the production of free Λ , ^3H , ^3He , $^3_{\Lambda}\text{H}$, $^4_{\Lambda}\text{H}$, and $^4_{\Lambda}\text{He}$ in collisions of $^{20}\text{Ne}+^{12}\text{C}$ at an incident energy of $4.25 \text{ GeV} \cdot \text{nucleon}^{-1}$ ^[62]

3 结语

本文概述了重离子输运理论发展历程,包括宏观输运模型和微观输运模型构建物理思想。重点介绍了量子分子动力学输运模型和近些年我们基于LQMD模型取得的主要工作,即在LQMD模型中引入了Skyrme能量密度泛函和相对论协变密度泛函自洽地描述核子和共振态的动力学演化,基于有效场论和共振态模型描述共振态、介子、奇异粒子等产生和介子-核子、超子-核子相互作用以及介质修正效应。反应系统在GeV能区 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 、 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 、 $^{112}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ 和 $^{197}\text{Au}+^{197}\text{Au}$ 碰撞产生K介子、 \bar{K} 介子和超子(Λ , Σ , Ξ)物理机制并分析了核介质效应和高密度区域对称能对同位旋粒子比值的影响。结果给出粒子产额和相空间分布会受到核介质效应的影响并与核物质状态方程有关,较软的物态方程有利于粒子产生。 K^+ 介子主要在高密区域产生, π 、 η 和超子一部分在亚饱和密度区域形成,而高横向动量区域的粒子主要在核-核碰撞压缩阶段形成可以提取高密度区域核物质信息,如不可压缩系数、对称能系数、对称能斜率参数等。输运模型中核结团或超核结团主要通过前平衡阶段构造和末态(Freeze-out)相空间构造。自由 Λ 超子产额主要分布在中心快度区域,而核碎片和超核碎片主要分布在“类弹”或“类靶”快

度区域,超核碎片形成后具有较小的横向动量分布。同时,该方法也能给出超核形成的质量数、电荷数、动能、快度分布、集体流等信息。我国在广东惠州正在建设的强流重离子加速器HIAF为研究致密物质性质和超核物理提供了优质实验平台,相关结果为实验测量可以提供参考。

作者贡献声明 冯兆庆撰写第一稿;冯兆庆、刘恒金、程辉淦、韦斯纳负责材料准备、数据收集和分析。所有作者都对研究概念和设计作出了贡献,对该手稿的前几个版本发表了评论,阅读并批准了该手稿。

参考文献

- 1 Haidenbauer J, Meißner U G. Jülich hyperon-nucleon model revisited[J]. Physical Review C, 2005, 72(4): 044005. DOI: 10.1103/physrevc.72.044005.
- 2 Dai L R, Zhang Z Y, Yu Y W, et al. NN interactions in the extended chiral SU(3) quark model[J]. Nuclear Physics A, 2003, 727(3-4): 321. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2003.08.006.
- 3 Fujiwara Y, Nakamoto C, Suzuki Y, et al. Quark-Model Baryon-Baryon interaction and its applications to hypernuclei[J]. Progress of Theoretical Physics

- Supplements, 2004, **156**: 17. DOI: [10.1143/PTPS.156.17](https://doi.org/10.1143/PTPS.156.17).
- 4 Fujiwara Y, Suzuki Y, Nakamoto C, *et al.* Baryon - baryon interactions in the SU6 quark model and their applications to light nuclear systems[J]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2007, **58**(2): 439. DOI: [10.1016/j.pnpnp.2006.08.001](https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2006.08.001).
 - 5 Nagata J, Yoshino H, Limkaisang V, *et al.* Phase-shift analysis of elastic Σ^+ p scattering[J]. Physical Review C, 2002, **66**(6): 061001. DOI: [10.1103/physrevc.66.061001](https://doi.org/10.1103/physrevc.66.061001).
 - 6 Kadokaki T, Asai J, Imoto W, *et al.* Asymmetry measurement of the polarized Σ^+ p elastic scattering and the hyperon-nucleon spin-orbit interaction[J]. The European Physical Journal A, 2002, **12**: 295. DOI: [10.1140/epja/i2002-10054-4](https://doi.org/10.1140/epja/i2002-10054-4).
 - 7 Kondo Y, Ahn J K, Akikawa H, *et al.* Σ^- p elastic-scattering in the region of $400 < p\Sigma^- < 700$ MeV/c with a scintillating-fiber active target[J]. Nuclear Physics A, 2000, **676**(1 - 4): 371. DOI: [10.1016/S0375-9474\(00\)00191-3](https://doi.org/10.1016/S0375-9474(00)00191-3).
 - 8 Lattimer J M, Prakash M. The physics of neutron stars[J]. Science, 2004, **304**(5670): 536 - 542. DOI: [10.1126/science.1090720](https://doi.org/10.1126/science.1090720).
 - 9 Abbott B P, Abbot R, Abbott T D, *et al.* GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral[J]. Physical Review Letters, 2017, **119**: 161101. DOI: [10.1103/PhysRevLett.119.161101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.161101).
 - 10 Li T P, Xiong S L, Zhang S N, *et al.* Insight-HXMT observations of the first binary neutron star merger GW170817[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2018, **61**: 031011. DOI: [10.1007/s11433-017-9107-5](https://doi.org/10.1007/s11433-017-9107-5).
 - 11 Sturm C, Böttcher I, Dębowski M, *et al.* Evidence for a soft nuclear equation-of-state from Kaon production in heavy-ion collisions[J]. Physical Review Letters, 2001, **86**: 39. DOI: [10.1103/PhysRevLett.86.39](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.39).
 - 12 Fuchs C, Faessler A, Zabrodin E, *et al.* Probing the nuclear equation of state by K^+ production in heavy-ion collisions[J]. Physical Review Letters, 2001, **86**: 1974. DOI: [10.1103/PhysRevLett.86.1974](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.1974).
 - 13 Hartnack C, Oeschler H, Aichelin J. Hadronic matter is soft[J]. Physical Review Letters, 2006, **96**: 012302. DOI: [10.1103/physrevlett.96.012302](https://doi.org/10.1103/physrevlett.96.012302).
 - 14 Feng Z Q. Constraining the high-density behavior of the nuclear equation of state from strangeness production in heavy-ion collisions[J]. Physical Review C, 2011, **83**(6): 067604. DOI: [10.1103/physrevc.83.067604](https://doi.org/10.1103/physrevc.83.067604).
 - 15 Feng Z Q. Nuclear in-medium effects of strange particles in proton-nucleus collisions[J]. Physical Review C, 2014, **90**: 064604. DOI: [10.1103/PhysRevC.90.064604](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.90.064604).
 - 16 Weber F. Strange quark matter and compact stars[J]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2005, **54**(1): 193. DOI: [10.1016/j.pnpnp.2004.07.001](https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2004.07.001).
 - 17 Jiang W Z, Li B A, Chen L W. Large-mass neutron stars with hyperonization[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2012, **756**(1): 56. DOI: [10.1088/0004-637x/756/1/56](https://doi.org/10.1088/0004-637x/756/1/56).
 - 18 Tsuruta S, Sadino J, Kobelski A, *et al.* Thermal evolution of hyperon-mixed neutron stars[J]. The Astrophysical Journal, 2009, **691**(1): 621. DOI: [10.1088/0004-637X/691/1/621](https://doi.org/10.1088/0004-637X/691/1/621).
 - 19 Baldo M, Burgio G F, Schulze H J. Hyperon stars in the Brueckner-Bethe-Goldstone theory[J]. Physical Review C, 2000, **61**(5): 055801. DOI: [10.1103/physrevc.61.055801](https://doi.org/10.1103/physrevc.61.055801).
 - 20 Schaffner B J, Hanauske M, Stöcker H, *et al.* Phase transition to hyperon matter in neutron stars[J]. Physical Review Letters, 2002, **89**(17): 171101. DOI: [10.1103/PhysRevLett.89.171101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.171101).
 - 21 Danysz M, Pniewski J. Delayed disintegration of a heavy nuclear fragment: I[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1953, **44**(350): 348 - 350. DOI: [10.1080/14786440308520318](https://doi.org/10.1080/14786440308520318).
 - 22 Al W M Y E. Review of particle physics[J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2006, **33**(1): 1 - 1232. DOI: [10.1088/0954-3899/33/1/001](https://doi.org/10.1088/0954-3899/33/1/001).
 - 23 Abdallah M S, Aboona B E, Adam J, *et al.* Measurements of $^3_\Lambda\text{H}$ and $^4_\Lambda\text{H}$ lifetimes and yields in Au+Au collisions in the high baryon density region[J]. Physical Review Letters, 2022, **128**(8): 202301. DOI: [10.1103/PhysRevLett.128.202301](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.202301).
 - 24 Sasao J, Abe D, Akikawa H, *et al.* $^7_\Lambda\text{Li}$ ground-state spin determined by the yield of γ -rays subsequent to weak decay[J]. Physics Letters B, 2004, **579**(3-4): 258. DOI: [10.1016/j.physletb.2003.11.022](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2003.11.022).
 - 25 Nagels M M, Rijken T A, de Swart J J. Baryon-baryon scattering in a one-boson-exchange-potential approach. II. hyperon-nucleon scattering[J]. Physical Review D, 1977, **15**(9): 2547. DOI: [10.1103/PhysRevD.15.2547](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.15.2547).
 - 26 Rijken T A, Stoks V G J, Yamamoto Y. Soft-core hyperon-nucleon potentials[J]. Physical Review C, 1999, **59**(1): 21. DOI: [10.1103/PhysRevC.59.21](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.59.21).
 - 27 Rijken T A, Yamamoto Y. Extended-soft-core baryon-

- baryon model. II. hyperon-nucleon interaction[J]. Physical Review C, 2006, **73**(4): 044008. DOI: [10.1103/physrevc.73.044008](https://doi.org/10.1103/physrevc.73.044008).
- 28 Gal A, Hungerford E V, Millener D J. Strangeness in nuclear physics[J]. Reviews of Modern Physics, 2016, **88**(3): 035004. DOI: [10.1103/revmodphys.88.035004](https://doi.org/10.1103/revmodphys.88.035004).
- 29 Armstrong T A, Barish K N, Batsouli S, *et al.* Production of ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ and ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ in central 11.5 GeV/c Au+Pt heavy ion collisions[J]. Physical Review C, 2004, **70**: 024902. DOI: [10.1103/PhysRevC.70.024902](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.70.024902).
- 30 Gibson B F, Hungerford E V III. A survey of hypernuclear physics[J]. Physics Reports, 1995, **257**(6): 349 - 388. DOI: [10.1016/0370-1573\(94\)00114-i](https://doi.org/10.1016/0370-1573(94)00114-i).
- 31 Demorest P B, Pennucci T, Ransom S M, *et al.* A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay[J]. Nature, 2010, **467**: 1081 - 1083. DOI: [10.1038/nature09466](https://doi.org/10.1038/nature09466).
- 32 Weissenborn S, Chatterjee D, Schaffner-Bielich J. Hyperons and massive neutron stars: the role of hyperon potentials[J]. Nuclear Physics A, 2012, **881**: 62 - 77. DOI: [10.1016/j.nuclphysa.2012.02.012](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2012.02.012).
- 33 Tamura H. Strangeness nuclear physics experiments at J-PARC[J]. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2012: 02B012. DOI: [10.1093/ptep/pts056](https://doi.org/10.1093/ptep/pts056).
- 34 Collaboration T S. Observation of an antimatter hypernucleus[J]. Science, 2010, **328**(5974): 58 - 62.
- 35 Bocquet J P, Epherre-Rey Campagnolle M, Ericsson G, *et al.* Observation of the delayed fission induced by antiproton annihilation in ${}^{238}\text{U}$ [J]. Physics Letters B, 1986, **182**(2): 146 - 150. DOI: [10.1016/0370-2693\(86\)91566-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(86)91566-2).
- 36 Yang J C, Xia J W, Xiao G Q, *et al.* High intensity heavy ion accelerator facility (HIAF) in China[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2013, **317**: 263. DOI: [10.1016/j.nimb.2013.08.046](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.08.046).
- 37 北京在线同位素分离丰中子束流装置(BISOL)[EB/OL]. 2023. <https://bisol.org/>.
Beijing online isotope separation neutron-rich beam facility[EB/OL]. 2023. <https://bisol.org/>.
- 38 Äystö J, Behr K H, Benlliure J, *et al.* Experimental program of the Super-FRS Collaboration at FAIR and developments of related instrumentation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2016, **376**: 111-115. DOI: [10.1016/j.nimb.2016.02.042](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.02.042).
- 39 Gales S. SPIRAL2 at GANIL: at the dawn of a new era [J]. American Institute of Physics Conference Proceedings, 2010, **1224**: 424. DOI: [10.1063/1.3431448](https://doi.org/10.1063/1.3431448).
- 40 Hong B, Ahn J K, Go Y, *et al.* Plan for nuclear symmetry energy experiments using the LAMPS system at the RIB facility RAON in Korea[J]. The European Physical Journal A, 2014, **50**: 49. DOI: [10.1140/epja/i2014-14049-2](https://doi.org/10.1140/epja/i2014-14049-2).
- 41 Szabados L B, Tod P. A review of total energy-momenta in GR with a positive cosmological constant[J]. International Journal of Modern Physics D, 2019, **28**(1): 1930003. DOI: [10.1142/s0218271819300039](https://doi.org/10.1142/s0218271819300039).
- 42 Yano Y. The RIKEN RI beam factory project: a status report[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2007, **261**(1 - 2): 1009. DOI: [10.1016/j.nimb.2007.04.174](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.04.174).
- 43 Kolesnikov V I, Kekelidze V D, Matveev V A, *et al.* Progress in the construction of the NICA accelerator complex[J]. Physica Scripta, 2020, **95**(9): 094001. DOI: [10.1088/1402-4896/aba665](https://doi.org/10.1088/1402-4896/aba665).
- 44 Zagrebaev V, Greiner W. Low-energy collisions of heavy nuclei: dynamics of sticking, mass transfer and fusion[J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2007, **34**: 1. DOI: [10.1088/0954-3899/34/1/001](https://doi.org/10.1088/0954-3899/34/1/001).
- 45 Volkov V V. Deep inelastic transfer reactions — the new type of reactions between complex nuclei[J]. Physics Reports, 1978, **44**: 93. DOI: [10.1016/0370-1573\(78\)90200-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(78)90200-4).
- 46 Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W, *et al.* Treatment of competition between complete fusion and quasifission in collisions of heavy nuclei[J]. Nuclear Physics A, 1997, **627**(2): 361 - 378. DOI: [10.1016/s0375-9474\(97\)00605-2](https://doi.org/10.1016/s0375-9474(97)00605-2).
- 47 Feng Z Q, Jin G M, Fu F, *et al.* Production cross sections of superheavy nuclei based on dinuclear system model[J]. Nuclear Physics A, 2006, **771**: 50. DOI: [10.1016/j.nuclphysa.2006.03.002](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2006.03.002).
- 48 Aichelin J. "Quantum" molecular dynamics—a dynamical microscopic n-body approach to investigate fragment formation and the nuclear equation of state in heavy ion collisions[J]. Physics Reports, 1991, **202**: 233. DOI: [10.1016/0370-1573\(91\)90094-3](https://doi.org/10.1016/0370-1573(91)90094-3).
- 49 Feng Z Q. Nuclear dynamics and particle production near threshold energies in heavy-ion collisions[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**: 40. DOI: [10.1007/s41365-018-0379-z](https://doi.org/10.1007/s41365-018-0379-z).

- 50 Shi C Z, Ma Y G. α -clustering effect on flows of direct photons in heavy-ion collisions[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**: 66. DOI: [10.1007/s41365-021-00897-9](https://doi.org/10.1007/s41365-021-00897-9).
- 51 Liu C, Deng X G, Ma Y G. Density fluctuations in intermediate-energy heavy-ion collisions[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**: 52. DOI: [10.1007/s41365-022-01040-y](https://doi.org/10.1007/s41365-022-01040-y).
- 52 Bertsch G F, Das Gupta S. A guide to microscopic models for intermediate energy heavy ion collisions[J]. Physics Reports, 1988, **160**(4): 189 - 233. DOI: [10.1016/0370-1573\(88\)90170-6](https://doi.org/10.1016/0370-1573(88)90170-6).
- 53 Guo L, Simenel C, Shi L, *et al.* The role of tensor force in heavy-ion fusion dynamics[J]. Physics Letters B, 2018, **782**: 401. DOI: [10.1016/j.physletb.2018.05.066](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.05.066).
- 54 Feng Z Q, Jin G M. Dynamics of pion production in heavy-ion collisions around 1A GeV energies[J]. Physical Review C, 2010, **82**(4): 044615. DOI: [10.1103/physrevc.82.044615](https://doi.org/10.1103/physrevc.82.044615).
- 55 Feng Z Q. Nuclear in-medium effects and collective flows in heavy-ion collisions at intermediate energies[J]. Physical Review C, 2012, **85**: 014604. DOI: [10.1103/physrevc.85.014604](https://doi.org/10.1103/physrevc.85.014604).
- 56 Sturm C, Böttcher I, Dębowski M, *et al.* Evidence for a Soft nuclear equation-of-state from Kaon production in heavy-ion collisions[J]. Physical Review Letters, 2001, **86**: 39. DOI: [10.1103/PhysRevLett.86.39](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.39).
- 57 Fuchs C, Faessler A, Zabrodin E, *et al.* Probing the nuclear equation of state by K^+ production in heavy-ion collisions[J]. Physical Review Letters, 2001, **86**: 1974. DOI: [10.1103/PhysRevLett.86.1974](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.1974).
- 58 Hartnack C, Oeschler H, Aichelin J. Hadronic matter is soft[J]. Physical Review Letters, 2006, **96**: 012302. DOI: [10.1103/physrevlett.96.012302](https://doi.org/10.1103/physrevlett.96.012302).
- 59 Feng Z Q. Constraining the high-density behavior of the nuclear equation of state from strangeness production in heavy-ion collisions[J]. Physical Review C, 2011, **83**(6): 067604. DOI: [10.1103/physrevc.83.067604](https://doi.org/10.1103/physrevc.83.067604).
- 60 Feng Z Q, Xie W J, Jin G M. Nuclear in-medium effects of strange particles in proton-nucleus collisions[J]. Physical Review C, 2014, **90**(6): 064604. DOI: [10.1103/physrevc.90.064604](https://doi.org/10.1103/physrevc.90.064604).
- 61 Zhang D C, Cheng H G, Feng Z Q. Hyperon dynamics in heavy-ion collisions near threshold energy[J]. Chinese Physics Letters, 2021, **38**(9): 092501. DOI: [10.1088/0256-307x/38/9/092501](https://doi.org/10.1088/0256-307x/38/9/092501).
- 62 Chung P, Ajitanand N N, Alexander J M, *et al.* Directed flow of L hyperons in (2 - 6) A GeV Au+Au collisions[J]. Physical Review Letters, 2001, **86**: 2533. DOI: [10.1103/PhysRevLett.86.2533](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.2533).
- 63 Bombaci I. The hyperon puzzle in neutron stars[J]. Nuclear Physics News, 2021, **31**(3): 17 - 21. DOI: [10.1080/10619127.2021.1915024](https://doi.org/10.1080/10619127.2021.1915024).
- 64 Feng Z Q. Formation and dynamics of exotic hypernuclei in heavy-ion collisions[J]. Physical Review C, 2020, **102**(4): 044604. DOI: [10.1103/physrevc.102.044604](https://doi.org/10.1103/physrevc.102.044604).
- 65 Ma Y G. New type of double-slit interference experiment at Fermi scale[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**: 16. DOI: [10.1007/s41365-023-01167-6](https://doi.org/10.1007/s41365-023-01167-6).
- 66 Wang X N. Vector meson spin alignment by the strong force field[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**: 15. DOI: [10.1007/s41365-023-01166-7](https://doi.org/10.1007/s41365-023-01166-7).