

在原子核物理中研究核物质对称能与巨共振观测量的关联

宋一丹*, 肖乃云

上海理工大学理学院, 上海

收稿日期: 2025年6月19日; 录用日期: 2025年7月29日; 发布日期: 2025年8月12日

摘要

在原子核物理相关课程中, 巨共振现象是核结构部分的重要内容, 其观测是探究核物质性质的有效探针。本文利用BUU输运模型模拟了原子核 ^{208}Pb 的同位旋矢量巨偶极共振, 并根据巨共振的强度函数提取了峰值能量 E_x , 其计算结果与实验值相符。然后选取了50种Skyrme有效相互作用, 系统性地研究了峰值能量 E_x 与核物质对称能 J 之间的关系。通过研究发现 E_x 与 J 之间不存在直接的线性关联, 但当引入与同位旋矢量单核子有效质量 $m_{v,0}^*/m$ 有关的偶极增强因子 k 后, 物理量 $\sqrt{J(1+k)}$ 与 E_x 之间呈现出显著的线性关系, 其拟合的Pearson系数为0.93。本文验证了利用输运模型研究原子核巨共振现象的合理性, 同时为通过实验观测 E_x 约束核物质的 J 和 $m_{v,0}^*/m$ 提供了新思路, 也为原子核物理教学中的科研拓展内容提供了新的素材。

关键词

原子核巨共振, 峰值能量, 对称能, 同位旋矢量单核子有效质量

Investigation of the Correlation between Nuclear Matter Symmetry Energy and Giant Resonance Observables in Nuclear Physics

Yidan Song*, Naiyun Xiao

College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 19th, 2025; accepted: Jul. 29th, 2025; published: Aug. 12th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 宋一丹, 肖乃云. 在原子核物理中研究核物质对称能与巨共振观测量的关联[J]. 物理化学进展, 2025, 14(3): 505-511. DOI: 10.12677/japc.2025.143047

Abstract

In nuclear physics courses, the phenomenon of giant resonance is a key topic of nuclear structure, and its observations serve as effective probes for exploring the properties of nuclear matter. In this work, we simulate the isovector giant dipole resonance of ^{208}Pb using the BUU transport model and extract the peak energy E_x from the strength function of the resonance. The calculated E_x shows good agreement with experimental data. We then employ 50 Skyrme effective interactions to systematically study the relationship between the E_x and the nuclear symmetry energy J . The results reveal that there is no direct linear correlation between E_x and J . After introducing the dipole enhancement factor k , which is related to the isovector nucleon effective mass $m_{v,0}^*/m$, a strong linear correlation emerges between E_x and the $\sqrt{J(1+k)}$, with a fitted Pearson correlation coefficient of 0.93. This result demonstrates the effectiveness of using transport models to investigate nuclear structure phenomena and provides a new theoretical approach to constraining the J and the $m_{v,0}^*/m$ through experimental E_x . Furthermore, the findings provide new material for integrating frontier research into nuclear physics education.

Keywords

Nuclear Giant Dipole Resonance, Peak Energy, Symmetry Energy, Isovector Nucleon Effective Mass

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

对称能是核物质状态方程中的重要特征参量, 它不仅深刻影响原子核的结构与稳定性, 还在中子星等致密天体的物理演化过程中扮演着重要角色[1]。近年来, 关于对称能的研究已成为核物理和天体物理领域的核心问题之一。大量研究工作尝试通过原子核结构性质、原子核反应数据以及天体观测信息等途径来提取对称能及其密度依赖的特征[2]-[4]。然而, 由于对称能对密度的依赖具有高度非线性和模型敏感性, 目前尚无法精确确定其在不同密度下的行为。因此, 寻找能够提供高灵敏度和高准确性的探针, 成为研究核物质同位旋相关性质的关键。

在核物质性质的研究中, 原子核巨共振, 特别是同位旋矢量巨偶极共振(Isovector Giant Dipole Resonance, IVGDR), 因其对 neutron 与 proton 在外场作用下相对运动的响应机制高度敏感, 所以它的实验观测是研究核物质同位旋性质的有效探针[5]-[9]。IVGDR 的实验观测, 如峰值能量、半高宽, 以及电偶极化率等, 不仅被用于研究核物质的同位旋相关性质, 还为研究核子-核子间有效相互作用, 以及单核子有效质量等核物质性质提供了丰富的信息。例如, 基于随机相位近似方法, 在 Skyrme 有效相互作用框架下计算 IVGDR 的能量加权求和规则, 从而对同位旋矢量单核子有效质量 $m_{v,0}^*/m$ 进行了有效约束[8]。而 IVGDR 的半高宽与碰撞阻尼强度密切相关, 可以用于研究核物质中核子-核子散射截面的介质修正[5]。此外, 原子核的电偶极极化率也为约束饱和密度处的对称能, 以及对称能斜率提供了重要的信息[9]。

本工作旨在基于 Boltzmann Uehling Uhlenbeck (BUU) 输运模型[10], 模拟不同 Skyrme 有效相互作用下原子核 ^{208}Pb 的 IVGDR 现象, 并提取其强度函数的峰值能量 E_x 。然后系统性分析峰值能量 E_x 与核物

质对称能 J 以及同位旋矢量单核子有效质量 $m_{v,0}^*/m$ 之间的关联, 探讨通过巨共振实验观测量约束核物质中同位旋性质的新方法。本研究不仅可为核物质基本性质的理论理解提供依据, 也为原子核物理课程中融合科研前沿内容提供了有价值的教学资源。

2. 研究方法

输运理论自提出以来便广泛应用于核物理研究, 能够较为准确地描述不同能量下的核反应过程, 是研究核物质性质的重要工具之一[11]。本工作采用的是基于 Lattice Hamiltonian 框架下的 BUU 输运模型[10], 通过求解包含平均场项与两体散射项的输运方程, 同时考虑了核子之间的平均场势与核子-核子碰撞, 可有效模拟重离子碰撞和原子核集体激发的动力学过程。在本工作使用的 BUU 模型中, 基于 Skyrme-Hartree-Fock 框架完成原子核的初始化和平均场部分, 利用随机碰撞方法处理核子-核子散射过程。此外, 为提高计算效率与精度, 该模型在 GPU 框架下进行高性能并行计算, 使试验粒子的数量扩展至十万量级, 大大提高了数值求解的效率和精度, 为研究微观动力学过程提供了可靠支撑。本文主要关注在 BUU 模型中利用激发算符产生原子核巨共振的方法, 因此不再对模型进行详细的介绍, 具体相关信息可参考文献[10]。

在原子核巨共振的研究中, 基态原子核受到外部微扰激发后, 由于系统量子态的变化, 可以激发出不同模式的巨共振现象。这些激发模式与球谐函数的角动量形式密切相关。其中, 原子核 IVGDR 的激发算符可以通过球谐函数 Y_1^0 得到[12][13]:

$$\hat{Q}_{IVD} = Y_1^0 \hat{r}_i = \frac{N}{A} \sum_{i=1}^Z \hat{z}_i - \frac{Z}{A} \sum_{i=1}^N \hat{z}_i, \quad (1)$$

在公式(1)中, 符号 A 、 N 、 Z 分别表示原子核的质量数、中子数和质子数。 r_i 为第 i 个核子相对于球心的径向坐标, z_i 则是 r_i 在 z 轴方向上的分量。将公式(1)作用于原子核的基态哈密顿量上, 可以得到激发态系统的能量表达形式, 从而提取出原子核在发生巨偶极共振时的能量信息。随着激发态原子核通过集体振动的方式向外释放能量, 系统最终回归基态。在这一动态演化过程中, 原子核内部的“质子球”和“中子球”沿 z 轴发生如图 1 所示的相对振动。

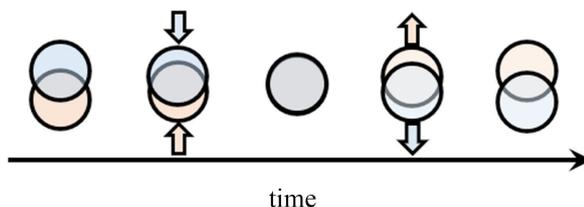


Figure 1. The process of the dynamic evolution of the giant dipole resonance
图 1. 原子核巨偶极共振的动态演化过程

通过巨共振单体激发算符的期望随时间的演化, 可以揭示原子核结构在振动过程中的变化规律, 其具体形式与单核子激发算符有关。根据公式(1), 进一步推导出 IVGDR 单核子激发算符 $q(\vec{r}, \vec{p})$ 在相空间下的表达式, 它描述了核子的空间坐标对偶极激发模式的响应,

$$q(\vec{r}, \vec{p}) = \frac{N}{A} r_z - \frac{Z}{A} r_z, \quad (2)$$

这里 \vec{r} 和 \vec{p} 表示核子的空间和动量坐标, r_z 表示空间坐标在 z 轴方向的投影。在 BUU 模型中研究 IVGDR 的动态演化过程, 需要在初始化原子核后使其产生偶极激发。将公式(2)带入到 Vlasov 运动方程中, 可以

得到产生偶极激发模式的具体表达式:

$$\bar{p}_i \rightarrow \begin{cases} p_{zi} + \lambda \frac{Z}{A} & \text{中子,} \\ p_{zi} - \lambda \frac{N}{A} & \text{质子,} \end{cases} \quad (3)$$

上式中的 p_{zi} 表示第 i 个核子的动量 \bar{p}_i 在 z 轴方向的分量。该公式作用在基态原子核上时, 只会对所有核子的初始动量施加微扰, 并不改变核子的初始位置信息。对核子的动量产生微扰后, 中子和质子的动量分别以相反的方向发生偏移, 从而产生图 1 中的往复集体运动。公式(3)中激发系数 λ 的大小, 可以控制偶极激发的强度, 从而影响原子核巨共振演化过程中形变的剧烈程度。

在 BUU 模型中, 根据系统的分布函数对空间和动量坐标进行积分, 可以得到原子核巨共振的单体激发算符的期望随时间演化的表达式:

$$\langle \hat{Q}_{IVD} \rangle = \int d\vec{r} d\vec{p} f(\vec{r}, \vec{p}) q(\vec{r}, \vec{p}), \quad (4)$$

这里 $f(\vec{r}, \vec{p})$ 为反映核子随时间演化的相空间分布函数, 其具体形式和模型相关, 这里不再详细叙述。根据公式(4)得到激发算符期望随时间的演化 $\langle \hat{Q}_{IVD} \rangle(t)$ 后, 基于线性响应理论对激发算符期望相对于基态时的变化量 $\Delta \langle \hat{Q}_{IVD} \rangle(t)$ 进行傅立叶积分, 得到强度函数 $S(E)$ 和系统激发能 E 之间的关系[14]:

$$S(E) = -\frac{1}{\pi\lambda} \int_0^\infty dt \Delta \langle \hat{Q}_{IVD} \rangle(t) \sin \frac{Et}{\hbar}. \quad (5)$$

通过 $S(E)$ 分布可以进一步提取巨共振的峰值能量 E_x , 从而为后续探究原子核集体激发机制与核物质性质之间的关系打下基础。

3. 结果与讨论

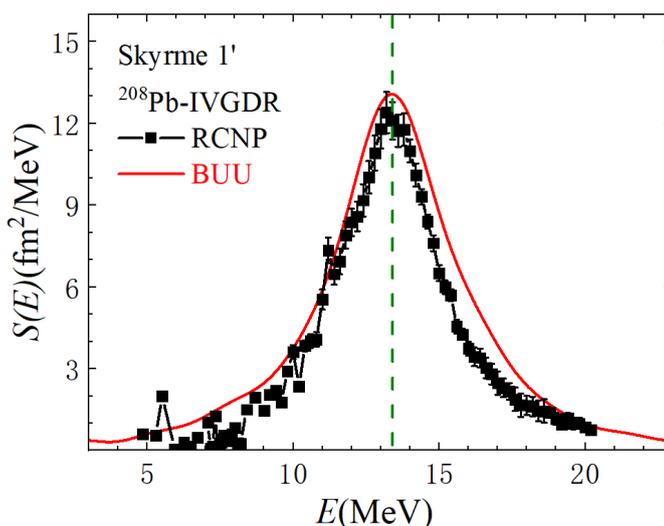


Figure 2. The strength function of the nuclear giant dipole resonances
图 2. 原子核巨偶级共振的强度函数

在 Skyrme 1' 有效相互作用下[15], 利用 BUU 运输模型计算得到了原子核 ^{208}Pb 的 IVGDR 强度函数分布。图 2 中红色实线表示 BUU 模型计算得到的强度函数分布, 黑色方块为对应的实验数据[9]。 $S(E)$ 的峰值位置对应的横坐标即为峰值能量 E_x , 图中的绿色虚线表示实验峰值能量 $E_x = 13.4$ MeV。通过比较

发现红色实线的峰值能量与绿色虚线基本一致, 这表明了 BUU 模型在计算巨共振激发能量的准确性, 为后续利用 BUU 模型探究核物质对称能与峰值能量之间的关系提供了可靠的理论基础。然而, 比较红色实线与黑色方块之间的形状发现, 其半高宽之间存在部分差异, 这和 BUU 模型碰撞积分项中核子-核子散射的介质修正有关。在计算巨共振的半高宽时, 只有选择合适的介质修正形式, 才能更好地重现出实验结果[5]。

为了研究核物质对称能与峰值能量之间关系, 我们选取了 50 种具有代表性的 Skyrme 有效相互作用势和 Skyrme 赝势, 用于模拟 ^{208}Pb 原子核的 IVGDR 现象。这里用到的势能包括: LNS5、RATP、SkS3、SLyIII.0.7、SIII、SkS1、SQMC650、SP6h、SQMC700、SkM、SP6m、SkS4、MSk5*、MSL1、SV-bas、SV-K226、SKXm、SKXce、BSk15、KDE0v、BSk17、BSk14、Skyrme 1'、SLy10、Sly7、SLy4、SLy1、SLy0、SLy2、SLy5、BSk12、BSk11、SkT8、SkT9、SV-kap02、BSk5、BSk4、BSk7、BSk8、BSk9、SV-min、Skxs20、Skxs15、SkSC14、SkT1、SkT2、SkT3、Ska35s20、Ska35s15、Ska45s20 [15]。这些势能都可以较好地再现核物质状态方程的特征参量, 其覆盖的同位旋矢量单核子有效质量 $m_{v,0}^*/m$ 范围为[0.50, 1.05]。利用上述 50 种势能分别模拟原子核 ^{208}Pb 的 IVGDR 过程, 提取对应的峰值能量 E_x , 进而分析其与核物质的 J 和 $m_{v,0}^*/m$ 之间的关系。

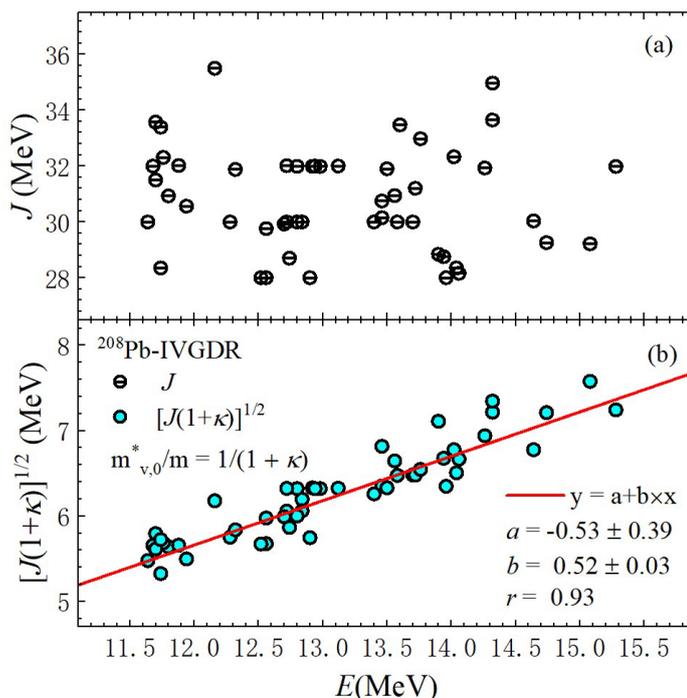


Figure 3. The correlation between symmetry energy of nuclear matter and peak energy of giant dipole resonance
图 3. 核物质对称能与巨偶极共振峰值能量之间的关联

如图 3(a)所示, IVGDR 的峰值能量 E_x 与对称能 J 之间并无直接关联。这一结果与其他研究结果相符, 即 IVGDR 的峰值能量与核物质状态方程的特征参量之间不呈现直接的线性关系[16]。然而, 当引入与 $m_{v,0}^*/m$ 有关的偶极增强因子 k 后, 结果发生了显著变化

$$k = \frac{m}{m_{v,0}^*} - 1 \quad (6)$$

基于公式(6), 我们定义了和对称能有关的物理量 $\sqrt{J(1+k)}$, 来探究其与 IVGDR 的峰值能量之间的关系。

在图 3(b)中通过点对点方式展示了 50 种 Skyrme 有效相互作用下, 原子核巨共振的 E_x 与 $\sqrt{J(1+k)}$ 之间的显著线性关联, 对其拟合可得方程 $E_x = a + b \times \sqrt{J(1+k)}$ 。这里方程的截距 $a = -0.53 \pm 0.39$ 、斜率 $b = 0.52 \pm 0.03$, 以及 Pearson 系数 $r = 0.93$ 显示出极强的正相关性。这个结果表明, 尽管 IVGDR 的 E_x 与对称能 J 之间无直接线性关联, 但在考虑 $m_{v,0}^*/m$ 影响的情况下, E_x 受到 J 和 $m_{v,0}^*/m$ 的共同约束。基于以上结果, IVGDR 的实验峰值能量 E_x 不仅可以用于研究原子核的集体激发机制, 也为反向约束核物质的 J 和 $m_{v,0}^*/m$ 提供了一条可行的理论路径, 这有助于加深对原子核结构与核物质基本性质之间联系的理解。

4. 总结

本文在 Skyrme 相互作用框架下, 采用 BUU 输运模型模拟了原子核 ^{208}Pb 的 IVGDR 现象, 其计算的观测量与实验数据相吻合, 验证了 BUU 模型在原子核巨共振研究中的可靠性。在此基础上, 我们系统性地分析了 50 种 Skyrme 相互作用下 IVGDR 的峰值能量 E_x 与核物质对称能 J 之间的关系。研究表明, 单一的对称能 J 难以有效解释峰值能量的变化规律。而引入与同位旋矢量单核子有效质量 $m_{v,0}^*/m$ 有关的偶极增强因子 k 后, 其物理量 $\sqrt{J(1+k)}$ 与 E_x 之间表现出强相关性。该结果不仅深化了我们对原子核集体激发机制与核物质性质之间内在联系的理解, 也为利用实验观测量反向约束核物质性质提供了新的思路。未来的研究可进一步结合其他实验观测量, 如电偶极化率和共振宽度等, 探索原子核巨共振现象与核物质性质之间的关联。同时, 本研究也为原子核物理教学提供了拓展素材。在实际的原子核结构教学中引入前沿的科学问题, 不仅有助于学生理解原子核集体运动的物理本质, 还能激发其对相关科学领域研究的兴趣, 促进理论知识与前沿成果之间的有效衔接。

基金项目

本论文得到 2023 年上海市教育委员会“上海高校青年教师培养资助计划”项目的资助(编号: 10-24-341-003)。

参考文献

- [1] Estee, J., Lynch, W.G., Tsang, C.Y., *et al.* (2021) Probing the Symmetry Energy with the Spectral Pion Ratio. *Physical Review Letters*, **126**, Article ID: 162701. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.126.162701>
- [2] Zhang, Z. and Chen, L. (2013) Constraining the Symmetry Energy at Subsaturation Densities Using Isotope Binding Energy Difference and Neutron Skin Thickness. *Physics Letters B*, **726**, 234-238. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2013.08.002>
- [3] Sorensen, A., Agarwal, K., Brown, K.W., *et al.* (2024) Dense Nuclear Matter Equation of State from Heavy-Ion Collisions. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, **134**, Article ID: 104080.
- [4] Tsang, C.Y., Tsang, M.B., Lynch, W.G., Kumar, R. and Horowitz, C.J. (2024) Determination of the Equation of State from Nuclear Experiments and Neutron Star Observations. *Nature Astronomy*, **8**, 328-336. <https://doi.org/10.1038/s41550-023-02161-z>
- [5] Song, Y., Wang, R., Zhang, Z. and Ma, Y. (2023) In-Medium Nucleon-Nucleon Cross Sections from Characteristics of Nuclear Giant Resonances and Nuclear Stopping Power. *Physical Review C*, **108**, Article ID: 064603. <https://doi.org/10.1103/physrevc.108.064603>
- [6] Song, Y., Wang, R., Zhang, Z. and Ma, Y. (2021) Nuclear Giant Quadruple Resonance within a Transport Approach and Its Constraint on the Nucleon Effective Mass. *Physical Review C*, **104**, Article ID: 044603. <https://doi.org/10.1103/physrevc.104.044603>
- [7] Li, Z.Z., Niu, Y.F. and Colò, G. (2023) Toward a Unified Description of Isoscalar Giant Monopole Resonances in a Self-Consistent Quasiparticle-Vibration Coupling Approach. *Physical Review Letters*, **131**, Article ID: 082501. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.131.082501>
- [8] Zhang, Z. and Chen, L. (2016) Isospin Splitting of the Nucleon Effective Mass from Giant Resonances in $\text{Pb}208$. *Physical Review C*, **93**, Article ID: 034335. <https://doi.org/10.1103/physrevc.93.034335>
- [9] Tamii, A., Poltoratska, I., von Neumann-Cosel, P., *et al.* (2011) Complete Electric Dipole Response and the Neutron

Skin in Pb208. *Physical Review Letters*, **107**, Article ID: 062502.

<https://doi.org/10.1103/physrevlett.107.062502>

- [10] Wang, R., Zhang, Z., Chen, L. and Ma, Y. (2020) Nuclear Collective Dynamics in Transport Model with the Lattice Hamiltonian Method. *Frontiers in Physics*, **8**, Article 330. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00330>
- [11] Bertsch, G.F. and Das Gupta, S. (1988) A Guide to Microscopic Models for Intermediate Energy Heavy Ion Collisions. *Physics Reports*, **160**, 189-233. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(88\)90170-6](https://doi.org/10.1016/0370-1573(88)90170-6)
- [12] 宋一丹. 原子核的温度及巨共振[D]: [博士学位论文]. 上海: 复旦大学, 2022.
- [13] 宋一丹. 基于量子力学中的球谐函数研究原子核巨四级共振[J]. *物理化学前沿*, 2024, 13(4): 565-572.
- [14] Fetter, A. and Walecka, J.D. (1971) *Quantum Theory of Many-Particle Systems*. McGraw-Hill.
- [15] Dutra, M., Lourenço, O., Sá Martins, J.S., Delfino, A., Stone, J.R. and Stevenson, P.D. (2012) Skyrme Interaction and Nuclear Matter Constraints. *Physical Review C*, **85**, Article ID: 035201. <https://doi.org/10.1103/physrevc.85.035201>
- [16] 李征征. 基于 Skyrme 密度泛函理论对原子核巨共振的超越平均场描述[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2023.