



# 质子-中子剪刀振动态的转动: 一种新型原子核集体运动模式

孙扬

上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240

E-mail: [sunyang@sjtu.edu.cn](mailto:sunyang@sjtu.edu.cn)

## Rotation of proton-neutron scissors-vibration state: A novel mode of nuclear collective motion

Yang Sun

School of Physics & Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

E-mail: [sunyang@sjtu.edu.cn](mailto:sunyang@sjtu.edu.cn)

doi: [10.1360/TB-2022-0774](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0774)

强关联量子多体问题是近代物理最活跃的研究方向之一, 其中对称性、对称性破缺以及相变是研究的中心<sup>[1]</sup>. 强关联下的多粒子体系经常呈现出各种各样的新奇状态, 展现一种被物理学大师菲利普·安德森(Philip W. Anderson)<sup>[2]</sup>称之为“众则异(More is different)”的物理现象. 最近, 上海交通大学、兰州大学和美国田纳西大学的合作研究报道了一种新型量子集体运动模式<sup>[3]</sup>. 通过关于形变原子核<sup>156</sup>Gd的计算发现, 做剪刀式振动的原子核在转动时, 描述转动的物理量——转动惯量总是在具有偶数和奇数角动量的量子态之间发生振荡变化. 作者将这一完全出乎意料的现象称之为转动带的“ $\Delta I = 2$ 分叉( $\Delta I = 2$  bifurcation)”. 计算还证实了这一现象的“鲁棒性(robustness)”, 即结果可能在所有形变原子核中普遍存在, 与核子之间相互作用等细节无关. 作者推断, 类似的效应还可能出现在其他具有集体剪刀振动-转动的量子系统中.

原子核物理是20世纪初与量子力学同时期发展起来的一门近代物理学科. 一方面, 早期原子核物理研究提出的问题曾极大地促进了量子力学的发展, 而另一方面, 原子核又是那个时期人们验证量子理论的重要场所. 例如, 量子隧穿(quantum tunnelling)理论最早曾被用来解释原子核的 $\alpha$ 衰变, 不少人们熟知的近代物理先驱都是核物理学家, 或者从事与原子核相关研究的科学家, 如卢瑟福(Ernest Rutherford)、费米(Enrico Fermi)、维格纳(Eugene Wigner)、伽莫夫(George Gamow)、惠勒(John Wheeler)、贝特(Hans Bethe)等. 直到第二次世界大战结束前, 原子核物理几乎是近代物理的唯一前

沿学科, 其间发展起来的原子核理论和实验方法在很大程度上影响了后来其他近代物理分支的发展. 自20世纪60年代以来, 得益于源自核物理研究的加速器以及各类探测手段的快速发展, 物理研究逐渐往物质的更深层次(以粒子物理为代表)以及量子系统的更多样化(以凝聚态物理为代表)的方面延伸, 曾经处于近代物理最前沿的核物理则逐渐演变成了一门“小众”学科. 然而, 核物理的重要性不容小觑. 由于原子核所处物质层次的特殊性, 由核物理研究演化出了不少与粒子物理或与原子物理的交叉学科. 近年来, 核物理与天体物理的交叉研究更是形成了一门非常活跃的领域——核天体物理. 另外, 原子核物理是一个有关国计民生的基础学科, 在能源、国防、航空航天、现代医学等领域都有非常重要的应用.

原子核是由小到几个、大到200多个质子和中子组成的微量量子体系. 作为一类强关联多体系统, 原子核无论是在低能激发区(通常1~3 MeV)还是高能区(高至十几个MeV)都显示出丰富的集体运动模式. 1975年诺贝尔物理学奖颁发给了小玻尔(Aage Bohr, 量子力学主要创始人Niels Bohr的儿子)、莫特森(Ben Mottelson)和雷恩沃特(James Rainwater), 以表彰原子核集体运动的发现. 那时人们认为, 原子核在低激发能区的主要集体激发模式有两类: 原子核的转动(rotation)和振动(vibration)<sup>[4]</sup>, 其中沿形变主对称轴方向的振动通常叫 $\beta$ -振动, 而沿与形变主对称轴垂直方向的振动叫 $\gamma$ -振动.

库柏对(Cooper pair)是近代物理的另一个重要概念. 在BCS理论发表的第二年, 费米子配对概念就被引进了原子核物理<sup>[5]</sup>. 但有意思的是, 相比于凝聚态物理中的电子库柏对,

核物理中的费米子在内容上更加丰富。这是因为构成原子核的有两种费米子，即质子和中子。质子和中子在电磁相互作用下是不同的粒子(很显然，质子带电而中子不带电)，但在强相互作用下可近似认为它们是同一粒子(核子)的两种状态，用同位旋(isospin)量子数来区分。一个有趣的问题是：原子核做集体运动时，是否要求组成质子和中子的两个集团始终同步运动呢？值得注意的是，在小玻尔-莫特森的集体运动图像中不区分同位旋，例如原子核在转动时，构成质子和中子的两个转子的运动始终是同步的。

1978年，两位意大利人——N. Lo Iudice和F. Palumbo<sup>[6]</sup>预言了原子核低能激发的第三类集体运动模式，即剪刀模式(scissors mode)或称剪刀振动(scissors vibration)。他们构建了一个半经典的双转子模型，在模型中假设质子和中子构成两个相互作用的转子，分别用一把剪刀的两页刀片来表示(图1, <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Scissors-20130122-wiki.pdf>)。两个转子的质心固定，以变化的夹角相对于彼此振动。由于质子-中子相互作用可以形成一个很强的恢复力，振动仅限于很小的夹角范围，运动中两个刚体转子各自保持形状不变。他们预言形变原子核发生这种运动时，会产生磁偶极辐射，特征是发生比较强的由 $1^+$ (表示角动量为1，宇称为正)剪刀激发态到原子核基态( $0^+$ )的M1跃迁。几年后的1984年，德国核物理学家A. Richter领导的课题组<sup>[7]</sup>首次在稀土原子核 $^{156}\text{Gd}$ 中通过实验观察到了这种辐射。随后他们对稀土区及邻近其他核区的大量形变的和近球形的原子核系统进行了实验，无一例外地看到了这种特征M1跃迁。自此，人们知道原子核的剪刀振动与转动、 $\beta$ -和 $\gamma$ -振动等原子核集体运动同样普遍。特

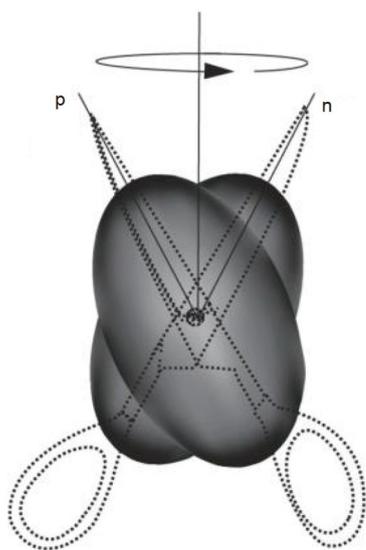


图1 原子核中的剪刀振动模式图示。质子(p)和中子(n)转子围绕它们的平分线转动。图片来自维基百科

Figure 1 Schematic illustration of the scissors-vibrational mode in nuclei. The proton (p) and neutron (n) rotors rotate around their bisector while doing the scissors vibration. This image is taken from Wikipedia

别令人惊奇的是，实验所有观测到的 $1^+$ 剪刀振动态全部集中在3~3.5 MeV激发能附近<sup>[8]</sup>，基本上和原子核质量大小、原子核形变大小无关。

在Iudice和Palumbo<sup>[6]</sup>的双转子模型中，质子和中子体系被模拟成没有结构的刚体转子。由于它具有清晰的物理图像，原子核剪刀运动模型不断被其他领域所借鉴。受此启发，文献<sup>[9]</sup>预言了磁阱中玻色-爱因斯坦凝聚(Bose-Einstein condensation)的类似集体激发，不久就被实验证实<sup>[10]</sup>。在这种情况下，剪刀的一页刀片被认为是移动的原子云，而另一片是势阱。人们预言类似的剪刀式集体激发还可能在许多其他系统中存在，包括金属簇(metallic clusters)、量子点(quantum dots)、超流费米气体(superfluid Fermi gases)和各向异性晶体(anisotropic crystals)等<sup>[3]</sup>。

在集体运动中，转动通常和振动可以同时出现。在小玻尔-莫特森的转动图像中，原子核转动的主要实验证据之一是形变原子核的转动带随角动量 $I$ 的能级分布(能带)遵循经典转子中 $E \sim I(I+1)$ 的规律。实验证明，分别与原子核基态、 $\beta$ -和 $\gamma$ -振动态对应的转动基带、 $\beta$ -振动带和 $\gamma$ -振动带都遵循这个规律。人们自然认为，剪刀振动带(由 $1^+$ 、 $2^+$ 、 $3^+$ ...的剪刀振动能级组成)的能量-角动量关系也遵循这个规律。然而，自1984年实验上首次看到剪刀振动 $1^+$ 态以来，人们从未在实验上观测到完整的剪刀振动-转动带(即 $1^+$ 剪刀振动态以上的 $2^+$ 、 $3^+$ ...能级)。换言之，尽管实验核物理有极为丰富的探测经验，却似乎很难找到一种理想的实验方法自上(通过重离子激发退激)或自下(通过光子或轻的带电粒子激发)“触及到”这些剪刀振动-转动能级。这就带来了一个十分有趣的问题：是这些能级有什么特殊结构以致它们被“保护”起来了吗？

最近，Lü等人<sup>[3]</sup>对这个问题做了详细的研究。在文献<sup>[11]</sup>的基础上，作者利用一种原子核微观多体方法——投影壳模型<sup>[12]</sup>先将形变平均场理论计算得到的质子、中子准粒子真空态利用角动量投影方法变换到实验室坐标系，然后用角动量耦合计算获得壳模型意义下的态矢量，最后在这些态矢量张开的基中严格求解Hill-Wheeler方程。为了使计算更接近3 MeV左右激发能区的物理，组态空间还包括了质子、中子两准粒子组态。投影壳模型的微观计算出现了完全出乎意料的结果：对于具有稳定形变的稀土原子核 $^{156}\text{Gd}$ ，作者得到的 $1^+$ 剪刀振动带的转动行为与通常的集体转动能带非常不同，其特点是得到的转动能带在相邻偶数和奇数角动量态之间发生能量劈裂。这表明做剪刀式振动的原子核在转动时，相应的转动能带不可能是平滑的，而总是呈锯齿型振荡(如图2(a)所示)。总体来看，原子核处于偶数角动量时的转动惯量比奇数角动量的转动惯量大，平均要大10%左右。这说明在转动的过程中，随着总角动量 $I$ 的增加，转动惯量 $J(I)$ 的值在奇、偶角动量状态之间来回跳跃。对于一个角动量守恒的转动体系，条件 $I = J\omega$ 要求 $\omega$ 随 $I$ 的变化而跳跃变化，这就意味着偶数(奇数)角动量状态下的转动比通常的转动要慢(快)。或者说，对

于奇、偶数的不同角动量，转动轴必须周期性地改变方向，以保证角动量守恒。后一种可能性表明，在剪刀运动中，孤立的、做剪刀振动的多体系统有一种很不寻常的转动图像，它破坏了核结构中所有已知的与集体运动相关的内禀对称性。

通过系统计算后，文献[3]最后得出结论：这可能是原子核 $1^+$ 剪刀转动带的一个普遍特征。图2(a)所示的结果同时解决了2018年的一篇实验文章的困惑<sup>[13]</sup>，即为什么他们认为好像是剪刀转动带 $2^+$ 态的能级和 $1^+$ 态近似简并(能量仅相隔19 keV)。由此文献[3]建议，文献[13]的结果可以作为剪刀转动带能级振荡预言的首个实验证据。图2(b)显示了剪刀转动带的另外一个特征量，即带内磁偶极M1跃迁几率接近零(虽然也有小幅度奇偶振荡)。

要证实文献[3]的预言，则需要实验观测剪刀转动带 $2^+$ 态以上的诸条能级，这对实验来说可能是个很大的挑战。德国科学家主要通过光子或轻的带电粒子(电子或质子)来激发剪刀振动态<sup>[8]</sup>，而我国一直没有类似的 $\gamma$ 光源设备。上海光源二期即将投入使用的上海激光电子伽马源(Shanghai Laser Electron Gamma Source, SLEGS)<sup>[14]</sup>是一个极具国际竞争力的、有希望观测到文献[3]预言的装置。此外，根据计算结果不依赖于系统的动力学细节这个现象来看，作者猜测这一新型原子核集体运动模式有可能源自某种几何效应，值得核物理及其他领域进一步研究。

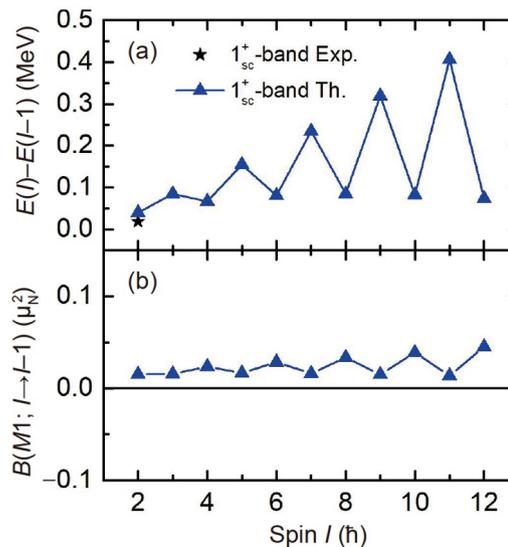


图2 (网络版彩色) $^{156}\text{Gd}$ 剪刀转动带的振荡特性的预言<sup>[3]</sup>。(a)  $^{156}\text{Gd}$ 剪刀转动带能级差 $\Delta E = E(I) - E(I-1)$ 。左下方的小五角星为实验值<sup>[13]</sup>。(b)  $^{156}\text{Gd}$ 剪刀转动带内磁偶极跃迁几率 $B(M1; I \rightarrow I-1)$   
Figure 2 (Color online) Staggering features predicted for the scissors-mode rotational band in  $^{156}\text{Gd}$ <sup>[3]</sup>. (a) Energy differences  $\Delta E = E(I) - E(I-1)$  for the scissors-mode rotational band in  $^{156}\text{Gd}$ . The small five-pointed star in the lower left corner denotes the experimental data. (b) Intra-band  $B(M1; I \rightarrow I-1)$  transition probabilities for the scissors-mode rotational band in  $^{156}\text{Gd}$

致谢 感谢兰州大学陈芳祁副教授和上海交通大学博士研究生吕翠娟的讨论。感谢国家自然科学基金(U1932206)资助。

## 推荐阅读文献

- Guidry M, Sun Y. Symmetry, Broken Symmetry, and Topology in Modern Physics. Cambridge: Cambridge University Press, 2022
- Anderson P W. More is different. *Science*, 1972, 177: 393–396
- Lü C J, Chen F Q, Sun Y, et al.  $\Delta I = 2$  bifurcation as a characteristic feature of scissors rotational bands. *Phys Rev Lett*, 2022, 129: 042502
- Bohr A, Mottelson B R. Nuclear Structure. New York, Amsterdam: W.A. Benjamin, 1975
- Bohr A, Mottelson B R, Pines D. Possible analogy between the excitation spectra of nuclei and those of the superconducting metallic state. *Phys Rev*, 1958, 110: 936–938
- Iudice N L, Palumbo F. New isovector collective modes in deformed nuclei. *Phys Rev Lett*, 1978, 41: 1532–1534
- Bohle D, Richter A, Steffen W, et al. New magnetic dipole excitation mode studied in the heavy deformed nucleus  $^{156}\text{Gd}$  by inelastic electron scattering. *Phys Lett B*, 1984, 137: 27–31
- Heyde K, von Neumann-Cosel P, Richter A. Magnetic dipole excitations in nuclei: Elementary modes of nucleonic motion. *Rev Mod Phys*, 2010, 82: 2365–2419
- Guéry-Odelin D, Stringari S. Scissors mode and superfluidity of a trapped Bose-Einstein condensed gas. *Phys Rev Lett*, 1999, 83: 4452–4455
- Marago O M, Hopkins S A, Arlt J, et al. Observation of the scissors mode and evidence for superfluidity of a trapped Bose-Einstein condensed gas. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 2056–2059
- Sun Y, Wu C L, Bhatt K, et al. Scissors-mode vibrations and the emergence of SU(3) symmetry from the projected deformed mean field. *Phys Rev Lett*, 1998, 80: 672–675
- Sun Y. Projection techniques to approach the nuclear many-body problem. *Phys Scr*, 2016, 91: 043005
- Beck T, Beller J, Pietralla N, et al.  $E2$  decay strength of the  $M1$  scissors mode of  $^{156}\text{Gd}$  and its first excited rotational state. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 212502
- Wang H W, Fan G T, Liu L X, et al. Development and prospect of Shanghai Laser Compton Scattering Gamma Source (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2020, 37: 53–63 [王宏伟, 范功涛, 刘龙祥, 等. 上海激光康普顿散射伽马源的发展和展望. 原子核物理评论, 2020, 37: 53–63]