



寻找原子核中的CP破缺: 放射性分子的新机遇

梅文聪, 杨晓菲*, 叶沿林

北京大学物理学院和核物理与核技术全国重点实验室, 北京 100871

* 联系人, E-mail: xiaofei.yang@pku.edu.cn

2025-08-29收稿, 2025-10-23修回, 2025-11-04接受, 2025-11-05网络版发表

国家自然科学基金(12350007, 12027809)资助

摘要 宇宙中正反物质不对称性的起源是当今物质世界的未解之谜之一。而CP对称性破缺则被认为是解释宇宙中正反物质不对称的必要条件。至今,人们已经在不同的能标下开展了大量实验,但仍未观察到足以解释宇宙中正反物质不对称的CP破缺效应。在原子核及原子分子等低能复杂系统中寻找与CP破缺相关的电偶极矩(electric dipole moment, EDM)实验信号,能够与其他能标下的实验探索关联互补,共同约束超出标准模型的新物理。近年来,放射性分子谱学测量实验的成功,使人们有望将分子系统和八极形变重核的结构优势相结合,为寻找原子核中的CP破缺带来了全新的机遇,基于放射性分子的EDM测量也因此成为了国际上广泛关注的新兴研究领域。本文将从原子核中可观测的CP破缺效应出发,简要介绍基于放射性分子体系开展EDM实验测量的优势,以及近年来在放射性分子谱学研究领域的诸多进展,并对国内外正在开展和规划中的放射性分子研究工作进行总结和展望。

关键词 放射性分子, CP破缺, 永久电偶极矩, 激光核谱

现代宇宙学认为,在大爆炸产生的早期宇宙中,正反物质的数密度趋于相同^[1]。随着宇宙演化,正反物质成对产生和湮灭,应具有同等的地位。然而,对宇宙微波背景辐射和大爆炸核合成的研究却表明,宇宙中正反物质的总量明显地多于反物质^[2,3]。这种宇宙中正反物质不对称性的起源成为了始终困扰着人们的未解之谜^[4]。

为解释正反物质不对称性的起源,1967年物理学家萨哈罗夫(Andrei Sakharov)提出,宇宙演化的某个时期内必须同时满足以下三个必要条件^[5],即著名的“萨哈罗夫条件”: (1) 重子数不守恒; (2) 电荷共轭(C)对称性以及电荷共轭-宇称(CP)对称性应当同时破缺; (3) 脱离热力学平衡。其中, C对称性和CP对称性的同时破缺,保证了在重子数不守恒的物理过程中产生的重子和反重子的数量不同,对于最终形成正反物质的不对称性

具有重要的意义。实验上已陆续在奇异介子、底介子、粲介子和底重子的衰变过程中观测到了CP破缺的现象^[6~9], 能够被粒子物理标准模型中的卡比博-小林-益川(Cabibbo-Kobayashi-Maskawa, CKM)机制所解释^[10]。然而,标准模型给出的CP破缺效应似乎过于微弱,所能给出的重子光子比值远低于天文观测数据,不足以解释现实宇宙中的正反物质不对称性。因此,寻找与现实宇宙相对应的CP破缺新机制,是需要超出标准模型的新物理回答的重大科学问题。

在理论方面,超出标准模型的新物理有望提供额外的CP破缺机制。这些CP破缺效应也将体现在从基本粒子到原子核、原子分子等低能复杂系统的各个物质结构层次之中,使各能区的实验探索可通过理论相互关联和互补^[11]。数十年来,实验物理学家在不同能标下开展了大量实验寻找CP破缺效应,包

引用格式: 梅文聪, 杨晓菲, 叶沿林. 寻找原子核中的CP破缺: 放射性分子的新机遇. 科学通报, 2026, 71: 979–992
Mei W-C, Yang X-F, Ye Y-L. Exploring CP violation in nucleus: new opportunities with radioactive molecules (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 979–992, doi: [10.1360/CSB-2025-5440](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5440)

括高能粒子物理实验(如欧洲核子研究中心CERN大型强子对撞机LHC上的LHCb实验^[12], 北京正负电子对撞机BEPC上的北京谱仪BES实验^[13]等)、相对论重离子碰撞实验(如美国相对论重离子对撞机RHIC上的STAR实验^[14,15], CERN-LHC上的ALICE实验^[16]等)、中微子振荡实验(如日本T2K实验^[17]、中国的大亚湾^[18]和江门中微子实验^[19]等), 以及一系列与CP破缺相关的永久电偶极矩(elcetric dipole moment, EDM)测量实验^[11,20~22]. 但迄今为止, 各类实验中均未明确观测到足以解释宇宙正反物质不对称性的CP破缺信号, 因此未来最重要的是实验上能在某个能区率先取得突破.

近年来, 原子分子光物理技术的蓬勃发展极大增强了人们操控原子分子体系的能力, 推动了EDM精密测量实验的不断进步. 特别是分子体系在相关领域的应用, 为EDM的高精度测量带来了新的机遇^[11,21,22]. 得益于分子内部的强有效电场和外电场下的高极化度特性, 以及当今分子体系中的高精度量子操控技术, EDM测量的灵敏度在分子体系中可提升约4个量级. 例如, 近期基于HfF⁺分子的测量给出了目前最精确的电子EDM的测量结果 $|d_e| < 4.1 \times 10^{-30} \text{ e cm}$ ^[23]. 在原子核体系中, CP破缺相关的相互作用与核子的EDM等因素会使原子核出现一个可观的席夫(Schiff)矩, 从而诱导出增强的原子EDM(d_{atom})^[11]. 理论预言表明, 采用八极形变重核(多为锕系元素放射性核), 可将与原子核中CP破缺相关的EDM实验测量灵敏度大大提高^[24,25]. 例如, 理论计算给出八极形变核²²⁵Ra的 d_{atom} 将比稳定近球形核¹⁹⁹Hg提高约3个量级. 随着放射性核束装置不断发展, 越来越多的放射性核素得以人工制备, 为在这些不稳定的八极形变重核中开展EDM测量实验提供了基础条件. 特别值得关注的是, 近年来在放射性核束装置上成功开展的首个放射性分子RaF的光谱实验^[26], 为放射性核束与原子分子精密测量技术的交叉融合, 以及基于放射性分子的CP破缺研究带来了新的机遇. 这类放射性分子兼具八极形变重核与极性分子体系的优势, 有望将与原子核中CP破缺相关的EDM测量灵敏度提高约5~7个量级^[27], 引起了国际上的广泛关注. 基于放射性分子的EDM测量实验计划, 也相继被列入了美国和欧洲新一轮核物理长程规划之中^[28,29]. 但由于涉及放射性核素和放射性分子的产生、操控和在线谱学测量等技术难点, 绝大多数候选放射性分子

的谱学实验信息目前仍大量缺失, 未知的能级结构和复杂的内部自由度也为放射性分子的操控和精密测量带来了新挑战. 目前, 作为未来基于放射性分子体系开展EDM精密测量实验的基础, 针对放射性分子的谱学研究已在国际上的各大放射性核束装置上规划和部署^[27].

本文将从基于原子分子体系的原子核EDM测量与CP破缺研究的原理出发, 介绍当前原子核体系EDM精密测量实验的现状以及基于放射性分子体系开展原子核EDM实验测量的优势, 并根据近年来放射性分子在线制备与在线光谱测量实验的进展对未来放射性分子谱学研究的发展进行展望.

1 原子核中的可观测CP破缺效应

1.1 EDM与CP对称性破缺

受电子内禀磁矩的启发, 一个自然的猜想是: 电子或原子核是否也可能具有EDM? 如果电子或原子核存在EDM, 泡利不相容原理和相关的实验事实表明, 在基本粒子、原子分子和原子核中没有额外的自由度以描述其空间取向, 这种EDM应当平行或反平行于系统的自旋 $\mathbf{J}$ 方向^[30].

然而, EDM(极矢量)和自旋角动量(轴矢量)在宇称变换和时间反演对称操作下具有完全不同的变换性质. 如图1所示, 在宇称变换下, EDM会改变符号, 而自旋则保持不变; 在时间反演操作下, EDM会保持符号不变, 而自旋则会改变符号. 如果系统存在宇称或时间反演对称性, EDM与自旋平行和反平行这两种情形相互等

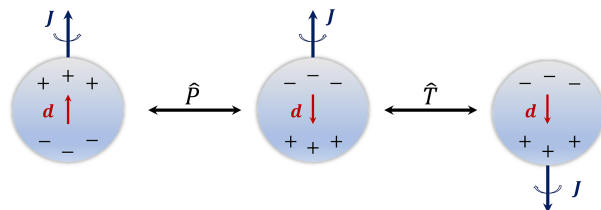


图1 (网络版彩色)EDM与宇称及时间反演对称性破缺: 在宇称变换 $\hat{P}$ 下, 自旋方向不变, EDM方向相反; 而在时间反演操作 $\hat{T}$ (等价于CP对称操作)下, EDM方向不变, 自旋方向相反

Figure 1 (Color online) EDM and the violation of parity and time-reversal symmetries: under the parity transformation $\hat{P}$, the spin remains unchanged, while the EDM reverses; under the time-reversal operation $\hat{T}$ (equivalent to the CP symmetry operation), the EDM remains unchanged, while the spin reverses

价, 则EDM的均值应为0^[30]. 因此, 非零EDM的存在将破坏宇称对称性和时间反演对称性(根据CPT定理, 等价于CP对称性). 早在1950年, 珀塞尔(E. M. Purcell)和拉姆齐(N. F. Ramsey)就曾指出, 在基本粒子和原子核的尺度上这些基本对称性的守恒定律尚未经过实验的系统检验, 并首次提出了EDM作为检验宇称守恒定律的重要实验信号^[31]. 当时, 宇称和时间反演对称性被广泛认为是自然界普遍成立的基本规律, 拉姆齐等人关于测量中子等微观粒子EDM的建议并未受到重视^[32]. 随着弱相互作用中宇称不守恒^[33,34]以及中性K介子中衰变中CP破缺^[7]的相继发现, EDM再度引起了人们的广泛关注, 成为了检验基本对称性的灵敏探针^[35]. 通过实验上对粒子EDM的直接测量, 不仅能够检验标准模型理论的有效性, 还能够对超出标准模型的CP破缺机制进行约束, 从而为解释宇宙中正反物质不对称性的起源提供重要线索.

基本粒子和低能复杂系统(原子核、原子和分子等)的EDM与基本理论中CP破缺机制的关联已有系统性的研究, 如图2所示^[11,21]. 标准模型以及超出标准模型的新物理中给出的CP破缺机制, 将赋予电子、夸克等基本粒子EDM, 进而诱导出核子的EDM, 并使核子-核子、电子-核子之间出现CP破缺的低能有效相互作用. 核子-核子相互作用中出现的CP破缺成分, 将与

核子固有的EDM协同贡献, 诱导出原子核的EDM, 使其所在的原子或分子体系表现出CP破缺的可观测效应; 而电子-核子之间的CP破缺相互作用, 同样会诱导出原子、分子中CP破缺的EDM. 如图2所示, 原子核体系的EDM测量实验, 与电子等基本粒子的EDM测量相互补充, 能够为研究基本理论中的CP破缺提供更为全面的信息. 在抗磁性原子和分子中, 由于电子总自旋为0, 电子EDM引起的CP破缺效应被极大地压制, 因而对原子核相关的EDM探测尤为灵敏.

1.2 核外电子的屏蔽效应与原子核的席夫矩

与测量磁矩的核磁共振方法相似, 测量外电场与EDM相互作用下系统能级的变化是目前EDM精密测量的主要技术手段. 以中子为例, 假设其具有自旋同向的EDM, 在外加静电场和静磁场的作用下, 其核能级将会发生变化, 即

$$H' = -\mathbf{d} \cdot \mathbf{E} - \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} = -(\mathbf{d} \cdot \mathbf{E} + \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B})/|\mathbf{J}|. \quad (1)$$

在这种情况下, 其自旋将绕外场方向做拉莫尔进动, 如图3(a)所示. 在精确控制外加磁场 $\mathbf{B}$ 的大小和方向保持不变的同时, 反转外加静电场 $\mathbf{E}$ 的方向, 将使系统在外场中的能级发生相应的移动 $\Delta E_{\text{CPV}} \propto \mathbf{E} \cdot \mathbf{d}$, 从而影响其自旋进动频率, 如图3(b)所示. 测量反转电场条件下的系统能级或自旋进动频率的差异, 即可提取出该系统的EDM.

与单个粒子不同, 原子和分子作为由原子核和电子组成的量子多体系统, 在外加电场的作用下, 电子或原子核感受到的电场将受到其他带电组分粒子运动的屏蔽. 席夫(Schiff)定理指出, 在由点粒子组成的非相对论的中性系统中, 带电粒子所感受到的净电场为0, 即外加静电场应完全被其他粒子所屏蔽^[36]. 因此, 如需通过原子和分子体系探测其中电子或原子核的EDM, 则必须突破席夫定理的限制. 实际上, 由于原子核不是一个点粒子, 它具有有限的尺寸和电荷分布, 考虑了核外电子的屏蔽效应后, 最低阶可观测的CP破缺电磁矩表现为半径平方加权的电偶极矩分布^[37], 即

$$\mathbf{S} = \frac{e}{10} \langle r^2 \mathbf{r} \rangle - \frac{e}{6Z} \langle r^2 \rangle \langle \mathbf{r} \rangle. \quad (2)$$

此电磁矩被称为原子核的席夫矩. 在外电场 $\mathbf{E}$ 的作用

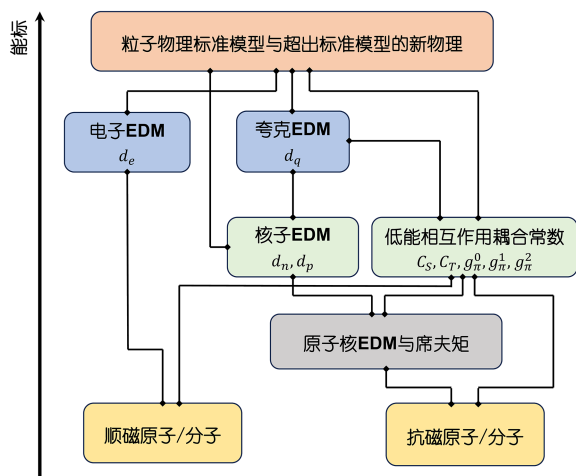


图2 (网络版彩色)顺磁性与抗磁性原子分子的EDM与CP破缺机制的理论关联

Figure 2 (Color online) The connections between the EDM of paramagnetic or diamagnetic atoms/molecules and the mechanisms of CP violation in fundamental theories

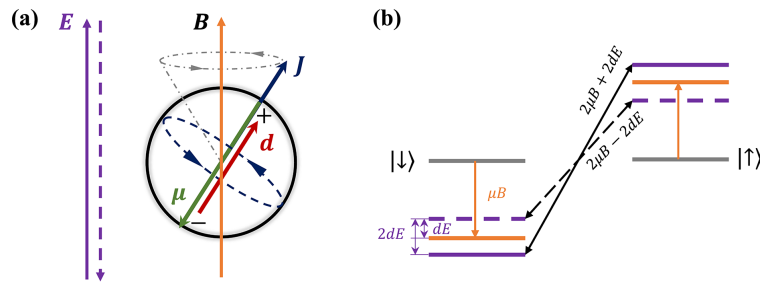


图3 (网络版彩色)EDM测量原理示意图。(a) 在外加电磁场的作用下, 中子自旋绕外场方向做拉莫尔进动; (b) 由于塞曼效应和斯塔克效应, 中子自旋向上和向下两个能级解除简并, 产生相应的能级移动。反转外电场方向, EDM与外电场相互作用引起的能级移动发生变化, 通过测量图(b)中两个跃迁(实线和虚线)的频率之差($4dE$), 即可提取中子的EDM

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of the EDM measurement principle. (a) Under an external electromagnetic field, the neutron spin undergoes Larmor precession around the direction of the external field; (b) due to the Zeeman and Stark effects, the degeneracy of the two spin states (spin-up and spin-down) is violated, resulting in corresponding energy level shifts. Reversing the direction of the external electric field shifts the energy level. The neutron's EDM can be extracted by measuring the difference in frequency ($4dE$) between the two transitions (shown in solid and dashed lines respectively) in figure (b)

下, 系统由于CP破缺的席夫矩产生的能级移动为^[38]

$$\Delta E_{\text{CPV}} = 2\mathcal{P}W_S \cdot S, \quad (3)$$

其中, W_S 为核外电子在原子核处的密度梯度, $\mathcal{P}$ 为系统的极化度。一般而言, W_S 近似正比于原子序数的平方, 因而探测重原子核席夫矩的实验将更为灵敏。

在物理图像上, 对于不同极化度的情形, 对式(3)的理解有所不同^[22]。对于原子体系等极化度较弱的情形($\mathcal{P} \ll 1$), 极化度 $\mathcal{P}$ 近似与外电场强度 E 成正比, 原子核席夫矩引起的能级移动可认为是原子核的席夫矩在原子核内激发了与核自旋同向或反向的静电场, 引起了宇称相反的原子轨道的混合, 从而诱导出原子的等效EDM, 即 $d_{\text{atom}}^{\text{equiv}} = \kappa_S S$, κ_S 为比例系数。而对于极性分子, 系统即使在弱场下也能接近完全极化($1 - \mathcal{P} \ll 1$), 此时原子核的席夫矩引起的能级移动不再受外场强度影响, 仅与分子结构有关。此时, 可认为极化分子中的等效内电场与席夫矩发生了相互作用, 导致分子能级发生变化。

1.3 原子核体系EDM实验测量进展

由于EDM等CP破缺效应极为微弱, 在原子和分子体系中只能引起微小的能级移动。因此, 要测量外场下如此微小的能级变化, 通常需采用分离振荡场的拉姆齐干涉方法^[39]。该方法包括系统的初态制备、自旋进动和末态读取三个步骤。通过制备的初态相继与时间间隔为 τ 的两个近共振 $\pi/2$ 脉冲之间相互作用

形成干涉, 将 τ 时间内自旋进动积累的相位信息映射到末态的相对布居数上, 以实现系统能级差的精密测量。对于 N 个粒子组成的自旋相干态系统, 其测量结果的统计误差受限于量子投影噪声, 即标准量子极限 $\delta\omega_{\text{SQL}} = \frac{1}{\tau\sqrt{N}}$ ^[40]。因此, 囚禁和探测的原子或分子数 N 越多, 自旋进动时间 τ 越长, EDM测量的精度就越高。此外, 由式(2)可知, 在保持电场均匀性和稳定性的条件下, 电场强度越大, EDM带来的能级移动 ΔE_{CPV} 越显著, 则EDM实验测量的灵敏度越高。

随着实验技术的不断进步, 上述决定实验测量灵敏度的关键因素不断优化, EDM实验测量精度随之不断提高。图4总结了截至目前原子核(含中子)系统EDM测量的实验进展^[20, 41~56]。目前, 在玻璃泡中进行的¹⁹⁹Hg热原子实验给出了当前最高精度的抗磁性体系EDM测量结果^[52, 53]。这是由于Hg元素在室温下饱和蒸气压较大, 玻璃泡中Hg原子数 N 较多, 同时玻璃泡的镀膜极大延长了其相干时间 τ ^[52, 53]。此类玻璃泡中的热原子实验要求待测元素具有特殊的物理化学性质(目前仅限于Hg和Xe元素), 并且由于玻璃泡实验装置的特性限制了实验中外电场强度的提高^[52, 53]。

迄今为止, 仍未有实验明确探测到非零的EDM。如图4所示, 目前抗磁性体系给出的EDM上限离标准模型给出的预言值仍有4个数量级以上的差距。超出标准模型的新物理由于具有额外的CP破缺源, 预期将使原子核以及原子、分子等低能复杂系统中出现更强的EDM信号^[21]。通过进一步提高EDM实验的精度, 直

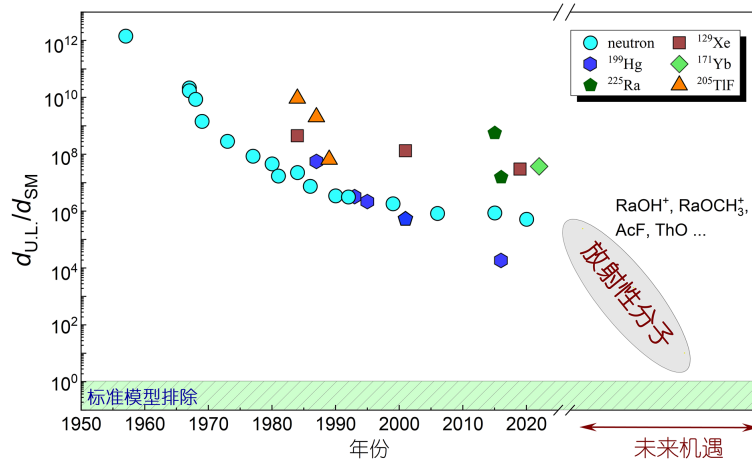


图4 (网络版彩色)中子及抗磁性原子分子体系EDM实验测量进展. 对于不同系统, 标准模型CP破缺机制给出的EDM预言值不同, 因此图中y轴给出了目前实验测量的EDM上限值($d_{U.L.}$)与标准模型给出的EDM预言值($d_{S.M.}$)的比值. 图中数据取自文献[20,41~56]

Figure 4 (Color online) Experimental progress in EDM measurements of neutrons and diamagnetic atoms or molecules. For different systems, the predicted values of EDM from CP violation mechanisms within the Standard Model differ. Therefore, the y-axis in the figure represents the ratio of the current experimental upper limit of the EDM ($d_{U.L.}$) to the Standard Model prediction ($d_{S.M.}$). The data are taken from the reference [20,41–56]

至观测到非零的EDM, 能够进一步约束新物理理论可能的参数空间, 对于标准模型以及超出标准模型的新物理中CP破缺机制的检验具有重要意义, 并为宇宙正反物质不对称性起源的未解之谜提供重要线索. 未来要提升基于抗磁性体系测量原子核系统EDM的实验灵敏度, 需要进一步发展先进的实验技术以及探索更灵敏的实验体系. 其中, 含八极形变重原子核的放射性分子被认为是未来测量原子核相关EDM的理想候选体系[27].

2 放射性分子体系EDM测量的新机遇

2.1 八极形变原子核中席夫矩的增强

根据原子核的壳模型, 当质子数 $Z \approx 34, 56, 88$ 以及中子数 $N \approx 34, 56, 88, 134$ 时, 费米面附近的核子占据的单粒子轨道宇称相反, 轨道角动量和总角动量满足 $\Delta l = 3$ 和 $\Delta j = 3$, 原子核中可能存在较强的八极关联, 从而出现八极形变原子核, 即“梨形”核[37]. 对于存在八极形变的奇A核, 在实验上通常可观测到能量近简并的宇称双重带, 以及宇称双重带之间增强的电偶极(E1)跃迁. 目前, 实验上已在多个质量区观测到了原子核存在稳定八极形变的证据[57].

原子核理论计算表明, 在存在空间反射对称性破缺的“梨形”八极形变奇A核中, 由于存在较大的八极集

体关联, 其席夫矩可以被大幅增强[24,25]. 这种增强效应一方面来自八极形变核较大的内禀席夫矩

$$S_{\text{intr}} \approx \frac{3}{20\pi\sqrt{35}} eZR^3\beta_2\beta_3, \quad (4)$$

其中, Z 为原子核电荷序数, R 为原子核半径, β_2, β_3 分别为原子核的四极和八极形变参数; 另一方面, 在内禀席夫矩向实验室系投影的过程中, 核子相互作用中可能存在的CP破缺相互作用 W 带来了较强的宇称本征态 $|I^\pm\rangle$ 混合, 即

$$S_{\text{lab}} = 2 \frac{\langle I^- | W | I^+ \rangle}{E_+ - E_-} \frac{I}{I+1} S_{\text{intr}}, \quad (5)$$

其中, $E_\pm$ 分别为正负宇称态 $|I^\pm\rangle$ 的能量, I 为核自旋. 由于八极形变原子核中存在近简并的正负宇称转动带(以 ^{225}Ra 为例, $\Delta E = |E_+ - E_-| \approx 55\text{keV}$), 宇称相反态的混合效应被极大地增强.

总体上, 理论计算给出的八极形变 ^{225}Ra 原子核的席夫矩相对于仅有四极形变的 ^{199}Hg 原子核席夫矩增强了约2~3个量级[24,25]. 其他候选八极形变重核的原子序数、自旋、宇称、半衰期、八极形变参数等性质和席夫矩的理论值如表1所示[58~60]. 这些八极形变重原子核基本都具有放射性, 为相关EDM的精密测量实验的开展带来了一定的困难.

2.2 极性分子的结构优势

由式(4)可知, 测量原子核席夫矩的实验可观测量

由系统的极化度 $\mathcal{P}$ 和原子分子结构参数 W_S 共同决定. 与原子轨道相比, 分子体系丰富的内态结构能够提供能级间隔更小的正负宇称态^[61]. 例如, 相邻分子转动能级的间距通常为10 GHz量级, 远远小于约100 THz量级的相邻原子轨道能级间距. 对于某些特殊的分子能级结构, 如具有非零轨道角动量的电子态中的 Λ 双重态、线性三原子分子弯曲振动模式下的 I 双重态等, 其正负宇称态的能级间距可达到更小. 因此, 即使在较弱的外场条件下, 分子系统往往也能实现较高的极化度 $\mathcal{P} \sim O(1)$, 比原子体系通常高3~4个量级. 极性分子高极化度和内部强有效电场的结构优势, 目前已经广泛应用于电子EDM的精密测量实验之中. 在过去的十几年中, ACME合作组与美国JILA研究所的实验团队分别利用ThO分子束和HfF⁺分子离子开展电子EDM的测量实验, 交替给出当前最高精度的电子EDM测量结果^[23, 62~64], 已将其上限推至了 $4.1 \times 10^{-30} e \text{ cm}$ ^[23].

通过选择不同的分子结构以及合适的电子组态, 也能够提高实验测量原子核席夫矩的灵敏度 W_S . 理论计算给出的部分候选放射性分子体系的结构信息如

表2所示^[59, 65~69]. 同时, 在选择分子内态时, 也应关注其 g 因子等性质. 较小的磁矩可以减弱外磁场梯度对分子的退相干效应, 从而延长其自旋相干时间, 也能够抑制磁场噪声带来的误差^[70]. 除此之外, 分子体系丰富的内态结构为EDM测量提供了天然的内共磁力仪^[21], 能够抑制外磁场不稳定性干扰. 相关实验中利用了分子内等效电场的不同方向, 因此无需反转外电场方向, 避免了反转电场操作可能引入的系统误差.

2.3 放射性分子EDM测量的机遇和挑战

放射性分子体系将八极形变重核和极性分子的优势相结合, 有望将原子核席夫矩测量的灵敏度提高5~7个量级, 这为基于原子核EDM测量的CP破缺研究带来了全新的机遇. 然而, 基于放射性分子开展EDM的测量实验, 目前仍面临着一定的困难和挑战.

分子具有丰富的内部自由度, 这些内部自由度相互耦合, 呈现出复杂的能级结构. 分子体系中众多暗态的存在显著增加了冷分子制备以及EDM实验中初态制备和量子态读出的复杂性. 同时, 由于涉及放射性核素

表 1 原子核席夫矩测量实验的候选八极形变重核, 以及其原子序数、自旋、宇称、半衰期、八极形变参数和理论计算给出的原子核席夫矩预测值^{a)}

Table 1 Candidate octupole-deformed nuclei for nuclear Schiff moment measurement experiments, along with their atomic number, spin, parity, half-life, octupole deformation parameters, and predicted values of the nuclear Schiff moment

核素	Z	I^π	$\tau_{1/2}$	β_3	$ S_{\text{intr}} (e \text{ fm}^3)$	$ S_{\text{lab}} (\bar{\theta} e \text{ fm}^3)$
²²¹ Fr	87	$5/2^-$	4.801 min	0.13	11	0.20
²²³ Fr	87	$3/2^-$	22.00 min	0.18	19	0.60
²²⁵ Ra	88	$1/2^+$	14.82 d	0.18	23	1.2
²²⁵ Ac	89	$3/2^-$	9.9190 d	0.18	22	2.7
²²⁷ Ac	89	$3/2^-$	21.772 a	0.037	5.1	0.19
²²⁹ Th	90	$5/2^+$	7916 a	0.115	-	2.0
²²⁹ Pa	91	$5/2^+$	1.55 d	0.049	7.9	56
²³⁷ Np	93	$5/2^+$	$2.144 \times 10^6 \text{ a}$	0.0054	1.1	0.0034

a) 表中原子序数、自旋、宇称、半衰期等基本性质来自NUBASE2020数据库^[58], 原子核八极形变参数及席夫矩的理论计算值取自文献^[59, 60]

表 2 部分候选放射性分子的电子态对原子核席夫矩探测的灵敏度^{a)}

Table 2 Sensitivity of some candidate radioactive molecules for detecting the nuclear Schiff moment

分子	分子点群	电子态	电子总自旋	$ W_S (e/4\pi\epsilon_0 a_0^4)$
RaF	$C_{\infty v}$	$X^2\Sigma_{1/2}$	1/2	25560
RaO	$C_{\infty v}$	$X^1\Sigma_0$	0	45192
RaOH ⁺	$C_{\infty v}$	$X^1\Sigma_0$	0	~30000
RaOCH ₃ ⁺	C_{3v}	$X^1\Sigma_0$	0	56300
AcF	$C_{\infty v}$	$X^1\Sigma_0$	0	8400
ThF ⁺	$C_{\infty v}$	$X^3\Delta_1$	1	45600
ThO	$C_{\infty v}$	$X^1\Sigma_0$	0	17085
ThOH ⁺	$C_{\infty v}$	$X^1\Sigma_0$	0	~30000

a) 表中理论计算值取自文献^[60, 65~69, 71]

的人工产生和操控,目前绝大部分放射性分子的光谱信息仍大量缺失,能级结构几乎完全空白.重核分子体系中较强的相对论效应和电子关联也为理论计算的准确性提出了较大的挑战.因此,放射性分子的谱学研究成为了当前阶段基于放射性分子的EDM实验的基础和关键.通过光谱测量提取放射性分子的结构信息,既能检验第一性原理的分子理论计算方法应用于重核分子体系的可靠性,推动理论计算方法的发展,也为未来基于放射性分子的EDM实验设计提供必要的信息.

3 放射性分子谱学研究进展

分子的结构和化学性质相对复杂,放射性分子的谱学研究因涉及含短寿命核素的分子的产生、操纵和在线光谱测量等技术难点,具有一定的挑战.应用于放射性核束装置的激光核谱学实验通过测量含不稳定原子核的原子/离子的超精细结构和同位素移位提取原子核的基本性质,在不稳定原子核奇特结构的研究中发挥着重要作用^[72~74].尽管面临众多挑战,CRIS(collinear resonance ionization spectroscopy)国际合作组近年来在欧洲核子研究中心CERN-ISOLDE(Isotope mass Separator On-Line DEvice)放射性核束装置上,采用激光核谱技术成功开展了国际首个放射性分子的光谱测量实验,揭开了国

际上放射性分子谱学研究的序幕^[26,69].用于不稳定核基本性质测量的激光核谱技术也成为了开展放射性分子谱学研究的关键技术之一.

3.1 基于放射性核束装置的放射性分子束制备

要开展放射性分子的谱学研究,首先需要通过放射性核束装置产生放射性核素.目前国际上常用的放射性核束装置有弹核碎裂型(projectile fragmentation, PF)和在线同位素分离型(isotope separator on line, ISOL).其中ISOL装置通常采用高能质子束流或轻原子核束流轰击厚靶(如 ThC_x 、 UC_x 等)引发核反应在靶内产生放射性核素,通过靶加热和离子源系统提取得到次级放射性核束,并经过高分辨磁铁进行同位素质量分离^[75].该装置提供的放射性核束具有纯度较高、束流品质好等优势,可直接与离子阱和共线激光谱仪等低能实验终端结合,由共线激光谱仪终端实现对含不稳定核的原子、离子乃至分子的高分辨、高灵敏度的超精细结构光谱测量^[74].通过化学反应,ISOL装置产生的放射性核素也可与其他稳定元素结合,产生特定的放射性分子束.在ISOL装置上,主要有两种技术方法可用来制备放射性分子束流,即ISOL靶源内的分子制备和离子阱中的分子制备,如图5所示.这两种基于ISOL装置制备放射性分子束的方法各具特点和优势^[76].

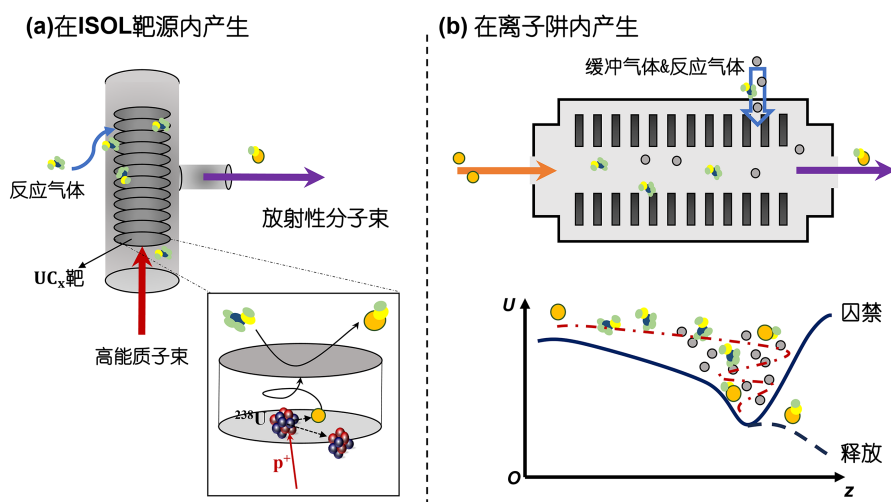


图5 (网络版彩色)在ISOL放射性核束装置的靶源(a)或RFQ离子阱(b)中制备放射性分子的原理示意图

Figure 5 (Color online) Schematic diagram of the methods for producing radioactive molecules in the target and ion source (a) or in an RFQ ion trap (b) at an ISOL radioactive beam facility

在ISOL靶源内,放射性核素通过与靶材料(一般为碳化物或者氧化物)中已有的组成元素(如C、O等元素)发生化学反应就可产生放射性分子. 这些放射性分子产物已在ISOL型放射性装置上被广泛发现^[76,77]. 向ISOL靶源内通入其他反应气体(如CF₄、SF₆等)能够提高目标放射性分子的产额,并产生种类更丰富的放射性分子产物. 这种方法也已在ISOL型放射性核束装置中得到了广泛的应用^[78~85]. 尤其对于部分难熔元素(如非金属元素Si、C、B等,过渡金属元素Nb、V、Mo、Tc、W、Re、Os等),其饱和蒸气压过低,在ISOL靶源的工作温度下通常难以转变为气态,从而限制了ISOL型装置上此类放射性核素的提取和放射性核束的产生. 实验学家通过将元素转化为熔点较低的氧化物或氟化物等分子,使其在靶材料内的迁移率大大提高,实现其放射性同位素从靶材料中的高效释放^[83~85],从而提高其短寿命放射性核素的产额^[81,86],用于后续实验测量. 另外,通过与其他元素结合成质量更重的分子,也可大大压制部分放射性核素释放提取、电离和电磁分离时难以完全去除的同量异位素杂质,从而提高产生的放射性核束的纯度. ISOL靶源内放射性制备分子的方法,极大地拓展了这类装置产生放射性核束的种类. 在某些情况下,靶源中目标元素之外的杂质元素较多,化学反应较为复杂,通常会产生很多目标产物之外的杂质分子. 这时通过合理控制通入靶源内反应活性气体的流量、靶源的工作温度等条件,能够有选择性地生成更多的目标分子产物. 在CERN-ISOLDE放射性核束装置上,采用靶源内放射性分子制备的方法,已能为实验终端成功提供BaF、RaF、AcF等放射性分子束流^[76,87,88].

但对于结构更为复杂的多原子放射性分子,靶源内发生的化学反应更加复杂,反应条件较难控制. 靶源的高温环境(通常约2000°C)也可能会使得部分结构不稳定的分子发生解离,不利于目标放射性分子产物的产生^[76]. 此外,与原子相比,分子具有更为复杂的振动和转动能级结构. 因此,在ISOL靶源的高温环境下,生成的放射性分子可能布居成千上万个能态,多个电子振转跃迁分支的交叠将使测量得到的分子光谱更加复杂,不利于光谱的解析工作^[74]. 因此,利用放射性核束装置上普遍采用的射频四极(radio-frequency quadrupole, RFQ)冷却聚束器(一种线性Paul离子阱),制

备并冷却放射性分子,有望推动未来对多原子放射性分子的光谱测量研究. 在CERN-ISOLDE等放射性核束装置上开展的实验中,利用多反射飞行时间质谱仪,已观察到放射性核束在通过RFQ冷却聚束器时,与真空中残余的杂质气体反应而产生的放射性分子^[89]. 通过向RFQ冷却聚束器内充入额外的反应活性气体,即可选择性地制备特定的放射性分子. 这种方法也将成为未来在放射性束装置上开展放射性分子束制备的关键技术之一. 目前,有望用于EDM测量的大部分放射性重核离子与气体分子反应的动力学数据仍大量缺失. 因此,国际上已经有多个实验团队在开展通过RFQ离子阱内的离子-分子化学反应制备放射性分子的系统性研究^[27].

3.2 放射性分子光谱的测量

如前文所述,国际上首个放射性分子的光谱测量实验是在CERN-ISOLDE装置上开展的,采用了高分辨、高灵敏度的共线共振电离激光光谱技术^[26].

共线共振电离激光光谱仪的结构示意图如图6所示,其测量原理如下:进入实验终端的放射性分子离子束AB⁺需首先通过电荷交换室(charge exchange chamber, CEC)完成中性化. CEC内装有钠或钾金属固体,在实验中通过加热CEC使金属Na或K熔化(熔点分别约为98和63°C)并挥发为Na或K金属蒸气. 分子离子束在穿过碱金属蒸气时,俘获电离能较低的Na或K原子中的外层电子,发生电荷交换反应变成中性的分子束. CEC后安装的静电偏转电极可去除未被中性化的分子离子,而中性的AB分子束传输到相互作用区(interaction region, IR). 脉冲的中性分子束在相互作用区内与多步脉冲激光在空间上共线重叠,在时序上匹配,并发生共振激发和随后的电离. 共振电离后的分子离子经过静电偏转,被谱仪末端的MagneTOF离子探测器收集. 离子探测器记录共振电离的离子计数以及每个事件中离子的飞行时间. 通过测量离子计数率和共振激发激光频率的对应关系,即可重建得到放射性分子的光谱.

2018年至今,基于CERN-ISOLDE放射性核束装置,CRIS(Collinear Resonance Ionization Spectroscopy)国际合作组已相继开展了多轮针对放射性分子的光谱测量实验^[26,90~93],成功提取了RaF等放射性分子的谱学

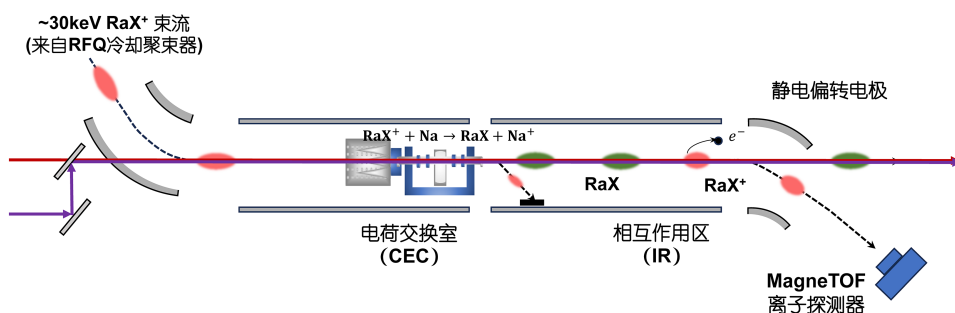


图6 (网络版彩色)共线共振电离激光谱仪的结构示意图

Figure 6 (Color online) Schematic structure of a collinear resonance ionization laser spectroscopy setup

结构参数^[26,90,91],取得了系列结果.实验发现RaF分子基态 $X^2\Sigma^+$ 至第一电子激发态 $A^2\Pi_{1/2}$ 的电子振动跃迁具有高度对角化的Franck-Condon因子,采用3束激光即可形成高效的准封闭激光冷却跃迁循环,初步验证了在放射性RaF分子体系中进行激光冷却和精密测量的可行性^[90];通过延时共振电离的方法,实验测量了RaF分子的 $A^2\Pi_{1/2}$ 激发态能级寿命约为35(1) ns,这一相对较短的寿命能够为激光冷却提供较高的光子散射率^[94].此外,实验还获得了放射性分子 ^ARaF 的同位素移位^[92]、 ^{225}RaF 超精细结构谱^[91]、RaF高激发态电子能级^[93]、电离势^[95]等信息,在提取原子核电荷半径、磁矩和磁分布等核物理信息外,也为第一性原理的分子理论和量子化学计算的有效性提供了检验,揭示出电子关联和相对论效应修正在相关计算中的重要作用.此外,针对 ^{227}AcF 分子的首轮低分辨在线光谱实验,已经发现了理论预言的 $X^1\Sigma^+ \rightarrow (8)^1\Pi$ 这一基态至激发态的最强电子态跃迁,为未来EDM实验中量子态的高效读取创造了条件^[69].以寻找AcF分子的其他电子激发态以及实现高分辨的能级结构测量为目标的在线实验目前仍在计划和准备中^[96,97].

除上述在放射性核束装置上开展的在线放射性分子光谱测量实验外,近期科学家也开始在离线实验室中,开展长寿命的多原子放射性分子的制备和光谱测量实验,目前已实现了离子阱中 $^{226}\text{RaOH}^+$ 和 $^{226}\text{RaOCH}_3^+$ 多原子分子离子的制备^[98], $^{226}\text{RaOH}$ 以及 $^{226}\text{RaOD}$ 中性分子光谱的初步测量^[99].

4 总结和展望

放射性分子体系通过将八极形变原子核与极性分

子的结构优势相结合,有望大幅提升探测原子核盾夫矩等CP破缺效应的灵敏度,为探索新的CP破缺机制开辟了新的方向.近年来,伴随着放射性核束装置和激光核谱学技术的发展,放射性分子的在线制备和光谱测量已取得重要进展,引起了国际上的广泛关注.目前,对放射性分子谱的研究已在国际上多个放射性核束装置上规划部署,例如欧洲核子研究中心(CERN)的ISOLDE、德国亥姆霍兹重离子研究中心(GSI)的FRS(Fragment Separator)、芬兰于韦斯屈莱大学(JYU)的IGISOL(Ion Guide Isotope Separator On-Line)、加拿大粒子与核物理国家实验室(TRIUMF)的ISAC(Isotope Separator and ACcelerator)、美国密歇根州立大学(MSU)的FRIB(Facility for Rare Isotope Beams)等^[27,100].此外,国际上众多团队也已经在规划和准备放射性分子的冷却和EDM精密测量实验,例如来自美国哈佛大学、麻省理工大学、加州理工大学等单位的多个实验团队组成了RaX合作组,致力于RaF和RaOH分子的激光冷却研究,为后续开展相关分子的冷却、囚禁和EDM测量奠定基础.

目前,我国已经有多个实验团队致力于开展稳定的Yb原子^[54]和PbF^[101,102]、MgF^[103]、BaF^[104]分子等体系中的EDM测量实验,在冷原子和冷分子领域积累了丰富的技术经验,取得了一系列杰出成果.近年来,为了在我国的放射性核束装置(如北京放射性核束装置BRIF(Beijing Radioactive Ion beam Facility)^[105]、强流重离子加速器装置HIAF(High Intensity heavy-ion Accelerator Facility)等^[106])上开展不稳定原子核的基本性质和结构研究,以及放射性分子制备和光谱测量研究,北京大学激光核谱与核性质课题组在国内率先发展了高分辨和高灵敏度的共线共振电离激光

谱仪(PLASEN: Precision LAsEr Spectroscopy for Exotic Nuclei)^[107], 其中也包含用于束流冷却和脉冲化, 以及分子制备的RFQ冷却聚束器^[108]. 目前, 基于离线稳定核和BRIF装置提供的放射性核的测试, PLASEN谱仪的各项技术参数已经达到了国际最高水平^[107]. BRIF装置结合铜系元素重靶也可以产生Ra、Ac等重放射性核素^[105], 为基于RFQ冷却聚束器的放射性分子制

备和基于PLASEN谱仪的放射性分子光谱测量创造了条件^[107,108]. 近期, 利用与Ra元素化学性质相似的稳定Ba、Yb离子束, 我们课题组正在北京大学亚原子粒子探测实验室开展RFQ冷却聚束器内的分子制备和分子共线激光光谱测量工作, 这将为在BRIF装置上开展放射性分子制备和在线光谱测量奠定基础.

参考文献

- Mazumdar A. The origin of dark matter, matter-anti-matter asymmetry, and inflation. 2011, arXiv: 1106.5408
- Bennett C L, Larson D, Weiland J L, et al. Nine-year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: final maps and results. *Astrophys J Suppl Ser*, 2013, 208: 20
- Fields B D, Olive K A, Yeh T H, et al. Big-bang nucleosynthesis after Planck. *J Cosmol Astropart Phys*, 2020, 2020: 010
- Dine M, Kusenko A. Origin of the matter-antimatter asymmetry. *Rev Mod Phys*, 2003, 76: 1–30
- Sakharov A D. Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. *Soviet Physics Uspekhi*, 1991, 34: 392
- Christenson J H, Cronin J W, Fitch V L, et al. Evidence for the 2π decay of the K_S^0 meson. *Phys Rev Lett*, 1964, 13: 138–140
- Sachs R G. CP violation in K^0 decays. *Phys Rev Lett*, 1964, 13: 286–288
- Aubert B, Boutigny D, Gaillard J M, et al. Observation of CP violation in the B^0 meson system. *Phys Rev Lett*, 2001, 87: 091801
- Aaij R, Abdelmotteleb A S W, Beteta C A, et al. Observation of charge – parity symmetry breaking in baryon decays. *Nature*, 2025, 643: 224–227
- Tanabashi M, Hagiwara K, Hikasa K, et al. Review of particle physics. *Phys Rev D*, 2024, 110: 030001
- Cairncross W B, Ye J. Atoms and molecules in the search for time-reversal symmetry violation. *Nat Rev Phys*, 1: 510–521
- Aaij R, Abellán Beteta C, Adeva B, et al. Observation of CP violation in charm decays. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 211803
- Ablikim M, Achasov M N, Adlarson P, et al. Probing CP symmetry and weak phases with entangled double-strange baryons. *Nature*, 2022, 606: 64–69
- Abelev B I, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. Azimuthal charged-particle correlations and possible local strong parity violation. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 251601
- Abelev B I, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. Observation of charge-dependent azimuthal correlations and possible local strong parity violation in heavy-ion collisions. *Phys Rev C*, 2010, 81: 054908
- Abelev B, Adam J, Adamová D, et al. Charge separation relative to the reaction plane in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 012301
- Abe K, Akutsu R, Ali A, et al. Constraint on the matter – antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations. *Nature*, 580: 339–344
- An F P, Bai J Z, Balantekin A B, et al. Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 171803
- An F, An G, An Q, et al. Neutrino physics with JUNO. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2016, 43: 030401
- Alarcon R, Alexander J, Anastassopoulos V, et al. Electric dipole moments and the search for new physics. 2022, arXiv:2203.08103
- Chupp T E, Fierlinger P, Ramsey-Musolf M J, et al. Electric dipole moments of atoms, molecules, nuclei, and particles. *Rev Mod Phys*, 2019, 91: 015001
- Safronova M S, Budker D, DeMille D, et al. Search for new physics with atoms and molecules. *Rev Mod Phys*, 2018, 90: 025008
- Roussy T S, Caldwell L, Wright T, et al. An improved bound on the electron’s electric dipole moment. *Science*, 2023, 381: 46–50
- Auerbach N, Flambaum V V, Spevak V. Collective T- and P-odd electromagnetic moments in nuclei with octupole deformations. *Phys Rev Lett*, 1996, 76: 4316–4319
- Spevak V, Auerbach N, Flambaum V V. Enhanced T-odd, P-odd electromagnetic moments in reflection asymmetric nuclei. *Phys Rev C*, 1997, 56: 1357–1369
- Garcia Ruiz R, Berger R, Billowes J, et al. Spectroscopy of short-lived radioactive molecules. *Nature*, 2020, 581: 396–400
- Arrowsmith-Kron G, Athanasakis-Kaklamanakis M, Au M, et al. Opportunities for fundamental physics research with radioactive molecules. *Rep Prog Phys*, 2024, 87: 084301
- Aidala C, Aprahamian A, Bacca S, et al. A New Era of Discovery: the 2023 Long-range Plan for Nuclear Science. Technical Report, Lawrence Livermore National Laboratory, United States, 2023. <https://www.osti.gov/biblio/2212868>
- NuPECC. NuPECC long range plan 2024 for European nuclear physics. 2025, arXiv: 2503.15575

- 30 Shapiro F L. Electric dipole moment of elementary particles. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 11: 345
- 31 Purcell E M, Ramsey N F. On the possibility of electric dipole moments for elementary particles and nuclei. *Phys Rev*, 1950, 78: 807–807
- 32 Landau L. On the conservation laws for weak interactions. *Nucl Phys*, 1957, 3: 127–131
- 33 Lee T D, Yang C N. Question of parity conservation in weak interactions. *Phys Rev*, 1956, 104: 254–258
- 34 Wu C S, Ambler E, Hayward R W, et al. Experimental test of parity conservation in beta decay. *Phys Rev*, 1957, 105: 1413–1415
- 35 Ramsey N F. Electric dipole moments of particles. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 1982, 32: 211–233
- 36 Schiff L I. Measurability of nuclear electric dipole moments. *Phys Rev*, 1963, 132: 2194–2200
- 37 Zhao P W. Exotic shapes of atomic nuclei (in Chinese). *Physics*, 2019, 48: 773–779 [赵鹏巍. “奇形怪状”的原子核心. *物理*, 2019, 48: 773–779]
- 38 Grasdijk O, Timgren O, Kastelic J, et al. CeNTREX: a new search for time-reversal symmetry violation in the ^{205}Tl nucleus. *Quantum Sci Technol*, 2021, 6: 044007
- 39 Ramsey N F. A molecular beam resonance method with separated oscillating fields. *Phys Rev*, 1950, 78: 695–699
- 40 Ye J, Zoller P. Essay: quantum sensing with atomic, molecular, and optical platforms for fundamental physics. *Phys Rev Lett*, 2024, 132: 190001
- 41 Wilkening D A, Ramsey N F, Larson D J. Search for P and T violations in the hyperfine structure of thallium fluoride. *Phys Rev A*, 1984, 29: 425–438
- 42 Schropp D, Cho D, Vold T, et al. New limits on time-reversal invariance from the hyperfine structure of thallium fluoride. *Phys Rev Lett*, 1987, 59: 991–994
- 43 Parker R H, Dietrich M R, Kalita M R, et al. First measurement of the atomic electric dipole moment of ^{225}Ra . *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 233002
- 44 Bishof M, Parker R H, Bailey K G, et al. Improved limit on the ^{225}Ra electric dipole moment. *Phys Rev C*, 2016, 94: 025501
- 45 Cho D, Sangster K, Hinds E A. Search for time-reversal-symmetry violation in thallium fluoride using a jet source. *Phys Rev A*, 1991, 44: 2783–2799
- 46 Cho D, Sangster K, Hinds E A. Tenfold improvement of limits on T violation in thallium fluoride. *Phys Rev Lett*, 1989, 63: 2559–2562
- 47 Jacobs J P, Klipstein W M, Lamoreaux S K, et al. Limit on the electric-dipole moment of ^{199}Hg using synchronous optical pumping. *Phys Rev A*, 1995, 52: 3521–3540
- 48 Jacobs J P, Klipstein W M, Lamoreaux S K, et al. Testing time-reversal symmetry using ^{199}Hg . *Phys Rev Lett*, 1993, 71: 3782–3785
- 49 Vold T G, Raab F J, Heckel B, et al. Search for a permanent electric dipole moment on the ^{129}Xe atom. *Phys Rev Lett*, 1984, 52: 2229–2232
- 50 Rosenberry M A, Chupp T E. Atomic electric dipole moment measurement using spin exchange pumped masers of ^{129}Xe and ^3He . *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 22–25
- 51 Romalis M V, Griffith W C, Jacobs J P, et al. New limit on the permanent electric dipole moment of ^{199}Hg . *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 2505–2508
- 52 Graner B, Chen Y, Lindahl E, et al. Reduced limit on the permanent electric dipole moment of ^{199}Hg . *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 161601
- 53 Graner B, Chen Y, Lindahl E, et al. Erratum: reduced limit on the permanent electric dipole moment of ^{199}Hg [*Phys Rev Lett* 116, 161601 (2016)]. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 119901
- 54 Zheng T, Yang Y, Wang S Z, et al. Measurement of the electric dipole moment of ^{171}Yb atoms in an optical dipole trap. *Phys Rev Lett*, 2022, 129: 083001
- 55 Allmendinger F, Engin I, Heil W, et al. Measurement of the permanent electric dipole moment of the ^{129}Xe atom. *Phys Rev A*, 2019, 100: 022505
- 56 Lamoreaux S K, Jacobs J P, Heckel B R, et al. New constraints on time-reversal asymmetry from a search for a permanent electric dipole moment of ^{199}Hg . *Phys Rev Lett*, 1987, 59: 2275–2278
- 57 Butler P A, Nazarewicz W. Intrinsic reflection asymmetry in atomic nuclei. *Rev Mod Phys*, 1996, 68: 349–421
- 58 Kondev F G, Wang M, Huang W, et al. The NUBASE2020 evaluation of nuclear physics properties. *Chin Phys C*, 2021, 45: 030001
- 59 Flambaum V V, Mansour A J. Enhanced nuclear Schiff and electric dipole moments in nuclei with octupole deformation. *Phys Rev C*, 2025, 111: 055501
- 60 Flambaum V V. Enhanced nuclear Schiff moment and time-reversal violation in ^{229}Th -containing molecules. *Phys Rev C*, 2019, 99: 035501
- 61 Brown J M, Carrington A. *Rotational Spectroscopy of Diatomic Molecules*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003
- 62 The ACME Collaboration, Baron J, Campbell W C, et al. Order of magnitude smaller limit on the electric dipole moment of the electron. *Science*, 2014, 343: 269–272
- 63 Cairncross W B, Gresh D N, Grau M, et al. Precision measurement of the electron’s electric dipole moment using trapped molecular ions. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 153001
- 64 ACME Collaboration. Improved limit on the electric dipole moment of the electron. *Nature*, 2018, 562: 355–360
- 65 Gaul K, Berger R. Global analysis of CP-violation in atoms, molecules and role of medium-heavy systems. *J High Energy Phys*, 2024, 2024: 100
- 66 Gaul K, Hutzler N R, Yu P, et al. CP-violation sensitivity of closed-shell radium-containing polyatomic molecular ions. *Phys Rev A*, 2024, 109: 042819
- 67 Kudashov A D, Petrov A N, Skripnikov L V, et al. Calculation of the parity- and time-reversal-violating interaction in ^{225}RaO . *Phys Rev A*, 2013, 87: 020102

- 68 Skripnikov L V, Mosyagin N S, Titov A V, et al. Actinide and lanthanide molecules to search for strong CP-violation. *Phys Chem Chem Phys*, 2020, 22: 18374–18380
- 69 Athanasakis-Kaklamanakis M, Au M, Kyuberis A, et al. Laser spectroscopy and CP-violation sensitivity of actinium monofluoride. *Nature*, 2025, 648: 562–568
- 70 Leanhardt A, Bohn J, Loh H, et al. High-resolution spectroscopy on trapped molecular ions in rotating electric fields: a new approach for measuring the electron electric dipole moment. *J Mol Spectrosc*, 2011, 270: 1–25
- 71 Kudashov A D, Petrov A N, Skripnikov L V, et al. *Ab initio* study of radium monofluoride (RaF) as a candidate to search for parity- and time-and-parity - violation effects. *Phys Rev A*, 2014, 90: 052513
- 72 Ye Y, Yang X, Sakurai H, et al. Physics of exotic nuclei. *Nat Rev Phys*, 2025, 7: 21–37
- 73 Campbell P, Moore I, Pearson M. Laser spectroscopy for nuclear structure physics. *Prog Part Nucl Phys*, 2016, 86: 127–180
- 74 Yang X, Wang S, Wilkins S, et al. Laser spectroscopy for the study of exotic nuclei. *Prog Part Nucl Phys*, 2023, 129: 104005
- 75 Blumenfeld Y, Nilsson T, Duppen P V. Facilities and methods for radioactive ion beam production. *Phys Scr*, 2013, 2013: 014023
- 76 Au M. Production of actinide atomic and molecular ion beams at CERN-ISOLDE. Doctor Dissertation. Mainz: Johannes Gutenberg University Mainz, 2023
- 77 Kronenberg A, Spejewski E, Carter H, et al. Molecular sidebands of refractory elements for ISOL. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2008, 266: 4252–4256
- 78 Bjørnstad T, Hagebø E, Hoff P, et al. Methods for production of intense beams of unstable nuclei: new developments at ISOLDE. *Phys Scr*, 1986, 34: 578
- 79 Köster U, Carbonez P, Dorsival A, et al. (Im-)possible ISOL beams. *Eur Phys J Spec Top*, 2017, 150: 285–291
- 80 Köster U, Arndt O, Bouquerel E, et al. Progress in ISOL target - ion source systems. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2008, 266: 4229–4239
- 81 Kirchner R. Release studies of elementary and metal-fluoride ions at the GSI on-line mass separator. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 1997, 126: 135–140
- 82 Köster U. Yields and spectroscopy of radioactive isotopes at LOHENGRIN and ISOLDE. Doctor Dissertation. Munich, Germany: Technical University Munich, 1999
- 83 Frånberg H, Ammann M, Gäggeler H W, et al. Chemical investigations of isotope separation on line target units for carbon and nitrogen beams. *Rev Sci Instrum*, 2006, 77: 03A708
- 84 Franberg H. Production of exotic, short lived carbon isotopes in ISOL-type facilities. Doctor Dissertation. Bern: University of Bern, 2008
- 85 Seiffert C. Production of radioactive molecular beams for CERN-ISOLDE. Doctor Dissertation. Darmstadt: Technical University of Darmstadt, 2014
- 86 Stracener D. Status of radioactive ion beams at the HRIBF. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2003, 204: 42–47
- 87 Au M, Ballof J. Molecular sidebands for radioactive ion beam extraction. Zenodo, 2022, <https://doi.org/10.5281/zenodo.6884293>
- 88 Au M, Nies L, Stegemann S, et al. Production and purification of molecular ^{225}Ac at CERN-ISOLDE. *J Radioanal Nucl Chem*, 2024, 334: 367–379
- 89 Au M, Athanasakis-Kaklamanakis M, Nies L, et al. In-source and in-trap formation of molecular ions in the actinide mass range at CERN-ISOLDE. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2023, 541: 375–379
- 90 Udrescu S M, Wilkins S G, Breier A A, et al. Precision spectroscopy and laser-cooling scheme of a radium-containing molecule. *Nat Phys*, 2024, 20: 202–207
- 91 Wilkins S G, Udrescu S M, Athanasakis-Kaklamanakis M, et al. Observation of the distribution of nuclear magnetization in a molecule. *Science*, 2025, 390: 386–389
- 92 Udrescu S M, Brinson A J, Ruiz R F G, et al. Isotope shifts of radium monofluoride molecules. *Phys Rev Lett*, 2021, 127: 033001
- 93 Athanasakis-Kaklamanakis M, Wilkins S G, Skripnikov L V, et al. Electron correlation and relativistic effects in the excited states of radium monofluoride. *Nat Commun*, 2025, 16: 2139
- 94 Athanasakis-Kaklamanakis M, Wilkins S G, Lassègues P, et al. Radiative lifetime of the $A^2\Pi_{1/2}$ state in RaF with relevance to laser cooling. *Phys Rev A*, 2024, 110: L010802
- 95 Wilkins S G, Perrett H A, Udrescu S M, et al. Ionization potential of radium monofluoride. *Phys Rev Res*, 2025, doi: 10.1103/fvsv-v1q6
- 96 Athanasakis-Kaklamanakis M, Wilkins S, Au M. Laser ionization spectroscopy of AcF. Technical Report. CERN-INTC-2021-053, INTC-P-615. Geneva, Switzerland: CERN, 2021. <https://cds.cern.ch/record/2782407>
- 97 Athanasakis-Kaklamanakis M. Laser spectroscopy of radioactive molecules for future searches of new physics. Doctor Dissertation. Leuven, Belgium: KU Leuven, 2023
- 98 Fan M, Holliman C A, Shi X, et al. Optical mass spectrometry of cold RaOH^+ and RaOCH_3^+ . *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 023002
- 99 Conn C J, Yu P, Howard M I, et al. Production and spectroscopy of cold radioactive molecules. 2025, arXiv: 2508.08368

- 100 Ballof J, Nusgart N, Lalain P, et al. Progress towards the FRIB-EDM3-frontend: a tool to provide radioactive molecules from isotope harvesting for fundamental symmetry studies. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 2023, 541: 224–227
- 101 Wang Z, Pang R, Ma J, et al. Spectroscopic characterization of buffer-gas-cooled lead monofluoride molecules in the $B^2\Sigma^+ (v' = 0) \leftarrow X^2\Pi_{1/2} (v'' = 0)$ transition. *Spectrosc Acta Pt A-Molec Biomolec Spectr*, 2025, 329: 125508
- 102 Zhu C, Wang H, Chen B, et al. Fine and hyperfine interactions of PbF studied by laser-induced fluorescence spectroscopy. *J Chem Phys*, 2022, 157: 084307
- 103 Xu S, Xia M, Gu R, et al. Three-dimensional modeling of magneto-optical trapping of MgF molecules with multilevel rate equations. *Phys Rev A*, 2019, 99: 033408
- 104 Zeng Z, Deng S, Yang S, et al. Three-dimensional magneto-optical trapping of barium monofluoride. *Phys Rev Lett*, 2024, 133: 143404
- 105 Nan W, Guo B, Chen J, et al. Nuclear physics at BRIF. *Prog Part Nucl Phys*, 2025, 145: 104188
- 106 Zhou X, Yang J, et al. Status of the high-intensity heavy-ion accelerator facility in China. *AAPPS Bull*, 2022, 32: 35
- 107 Hu H R, Guo Y F, Yang X F, et al. Development and characterization of a high-resolution, high-sensitivity collinear resonance ionization spectroscopy system. *Sci Bull*, 2025, 70: 2721–2724
- 108 Liu Y S, Hu H R, Yang X F, et al. Commissioning of a radiofrequency quadrupole cooler-buncher for collinear laser spectroscopy. *Nucl Sci Tech*, 2026, 37: 13

Summary for “寻找原子核中的CP破缺: 放射性分子的新机遇”

Exploring CP violation in nucleus: new opportunities with radioactive molecules

Wen-Cong Mei, Xiao-Fei Yang* & Yan-Lin Ye

School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China

* Corresponding author, E-mail: xiaofei.yang@pku.edu.cn

The origin of the matter-antimatter asymmetry in the Universe remains an unsolved mystery in our understanding of the world. According to the Sakharov conditions, the simultaneous violation of charge conjugation (C) and charge-parity (CP) symmetry is indispensable. CP violation has been observed in the decays of mesons and baryons, and can be explained by the CP violation mechanism (such as Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix) within the Standard Model. However, the extent of CP violation provided by the Standard Model is far from sufficient to account for the matter-antimatter asymmetry in the present universe, revealing the existence of new CP violation mechanisms beyond the Standard Model. Thus, the search for CP-violation mechanisms beyond the Standard Model is of significant scientific importance.

Exploring experimental signatures of CP violation in low-energy complex systems, such as permanent electric dipole moment (EDM) in atoms, molecules and nuclei, offers complementary correlations with experimental searches at other energy scales, collectively providing a stringent benchmark of Standard Model physics and constraining new physics beyond the Standard Model. In recent years, radioactive molecules, which combine the structural advantages of polar molecules and heavy octupole-deformed nuclei, have brought new opportunities for measuring the nuclear Schiff moment, a sensitive probe for nuclear CP violation. Consequently, spectroscopic studies of radioactive molecules have emerged as a brand new and widely-recognized research frontier, which has subsequently been included in the new long-range plans for nuclear science in both the United States and Europe, sparking intense international competition. Research on the production and spectroscopic measurement of radioactive molecules is also being extensively planned and deployed at major radioactive nuclear beam facilities worldwide.

This paper briefly reviews recent progress in the spectroscopic study of radioactive molecules and summarizes ongoing and planned research efforts in this field, both domestically and internationally, while also providing perspectives for future developments.

radioactive molecules, CP violation, permanent electric dipole moment, laser spectroscopy for exotic nuclei

doi: [10.1360/CSB-2025-5440](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5440)