arXiv:2302.02165v1 [nucl-ex] 4 Feb 2023

放射性分子基础物理研究的机遇

2023年2月7日

摘要。
含有寿命短的放射性原子核的分子，在基本对称性、天体物理学、核结构和化学等领域，为实现广泛的科学发现提供了独特条件。近期，制备、冷却并控制复杂分子至量子级别的能力不断进步；与此同时，世界各地多个设施在放射性物种制备方面已取得进展，未来也将继续发展。这些进展共同创造了一个绝佳机会，使我们能够协调并结合相关努力，对含有极端原子核的分子进行精密测量和控制。在这篇稿件中，我们回顾研究放射性分子的科学依据，讨论为其研究奠定基础的近期原子、分子、核、天体物理学和化学领域的进展，介绍目前和未来将制备这些物种的设施，并展望这一新兴领域的未来。

1 执行摘要 **8**

2 科学动机 **10**

2.1 电荷宇称破坏.102.2 宇称破坏.132.3 核结构.142.4 天体物理学.162.5 放射化学.18

3 近期进展 **19**

3.1 放射性分子光谱学.193.2 分子中的 CP破坏搜索.203.3 分子中的 P破坏.213.4 分子束.223.5 直接激光冷却.233.6 由激光冷却原子组装.243.7 离子俘获.253.8 当代固态方法.283.9 从头算分子理论.293.10 核理论.313.11 放射性原子.39

4 实验设施机遇 **43**

4.1 FRIB.454.2 GSI / FAIR.474.3 TRIUMF.494.4 ISOLDE.534.5 IGISOL.58

5 杰出挑战 **6** **3**

5.1 测量 ^{229}Pa 宇称双重态.635.2 格点量子色动力学研究 $\bar{g}_0$, $\bar{g}_1$ 及夸克色偶极矩.645.3 改进计算 ^{199}Hg 核 Schiff 矩、与 CP 破坏的关系 πNN . . . . 655.4 改进放射性同位素的计算，以提高对 CP 破坏的灵敏度 . . . . 665.5 电偶极矩测量中具有八极关联的原子核 665.6 放射化学与分子制备.67

6 机遇篇 **6** **8**

7 展望 **72**

8 致谢致谢 **7** **3**

Gordon Arrowsmith-Kron
美国密歇根州东兰辛市 48824，密歇根州立大学稀有同位素束流设施

Michail Athanasakis-Kaklamanakis
实验物理系，欧洲核子研究中心，CH-1211 日内瓦 23，瑞士；鲁汶大学物理与天文学系、核与辐射物理研究所，B-3001 鲁汶，比利时

Mia Au
欧洲核子研究中心，日内瓦，瑞士；美因茨约翰内斯·古腾堡大学，美因茨，德国

Jochen Ballof
加速器系统部，欧洲核子研究中心，1211 日内瓦 23，瑞士 稀有同位素束流设施，密歇根州立大学，密歇根州东兰辛，48824，美国

Robert Berger
化学系，马尔堡菲利普大学，汉斯-梅尔魏因街 4 号，35032 马尔堡，德国

Anastasia Borschevsky范斯温德伦粒子物理与引力研究所，格罗宁根大学，荷兰

Alexander A. Breier物理研究所，卡塞尔大学，海因里希-普莱特街 40 号，34132 卡塞尔，德国

Fritz Buchinger麦吉尔
大学，加拿大

Dmitry Budker
亥姆霍兹研究所、GSI亥姆霍兹重离子研究中心和约翰内斯·古腾堡大学，美因茨 55128，德国，美因茨 55128，德国物理系，加州大学伯克利分校，加利福尼亚州伯克利 94720-7300，美国

Luke Caldwell
JILA、美国国家标准与技术研究院和科罗拉多大学，博尔德，科罗拉多州 80309，美国物理系，科罗拉多大学，博尔德，科罗拉多州 80309，美国

Christopher Charles
加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华市韦斯布鲁克购物中心4004号，邮编V6T 2A3，TRIUMF；加拿大安大略省伦敦市里士满街北1151号，邮编N6A 5B7，西安大略大学

Nike Dattani
加拿大安大略省滑铁卢市，HPQC实验室；
加拿大安大略省滑铁卢市，HPQC学院

Ruben P. de Groote
鲁汶大学核与辐射物理研究所，鲁汶大学，比利时鲁汶；于韦斯屈莱大学物理系，芬兰于韦斯屈莱

David DeMille
美国伊利诺伊州芝加哥市芝加哥大学；美国伊利
诺伊州莱蒙特市阿贡国家实验室

Timo Dickel
GSI亥姆霍兹重离子研究中心有限公司，德国达姆施塔特64291；第二物理研究所，
吉森尤斯图斯-李比希大学，德国吉森35392

Jacek Dobaczewski*
约克大学物理、工程与技术学院，英国约克赫斯灵顿 YO10 5DD；华沙大学理论物理
研究所、物理学院，波兰华沙 Pasteura 街 5 号，PL-02-093。电子邮件：
jacek.dobaczewski@york.ac.uk

Christoph E. Düllmann
约翰内斯·古腾堡大学化学系——TRIGA场址，Fritz-Strassmann-Weg 2，55128 美
因茨，德国；GSI 重离子研究亥姆霍兹中心，Planckstr. 1，64291 达姆施塔特，德国；
美因茨亥姆霍兹研究所，Staudingerweg 18，55128 美因茨，德国

Ephraim Eliav
特拉维夫大学化学学院，拉马特阿维夫，特拉维夫 69978，以色列

Jonathan Engel北卡罗来纳大学物理与天文学系，北卡罗来纳州教堂山，北卡
罗来纳州 27599-3255，美国

Mingyu Fan加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校物理系，加利福尼亚州 93106，
美国

Victor Flambaum新南威尔士大学，悉尼 2052，澳
大利亚

KieranT. Flanagan曼彻斯特大学光子科学研究所、物理与天文学系，曼彻
斯特 M13 9PL，英国

Alyssa N. Gaiser稀有同位素束流设施，密歇根州立大学，密歇根州东兰辛
48824，美国

Ronald F. GarciaRuiz*麻省理工学院，剑桥，马萨诸塞州
02139，美国 电子邮箱：rgarciar@mit.edu

Konstantin Gaul化学系，马尔堡菲利普大学，汉斯-梅尔魏因街 4 号，35032
马尔堡，德国

Thomas F.Giesen物理研究所，卡塞尔大学，海因里希-普莱特街40号，
34132 卡塞尔，德国

Jacinda S. M. Ginges
数学与物理学院，昆士兰大学，澳大利亚昆士兰州布里斯班 4072

Alexander GottbergTRIUMF，韦斯布鲁克购物中心 4004 号，
温哥华，BC V6T 2A3，加拿大

Gerald Gwinner物理与天文学系，曼尼托巴大学，温尼伯，MB R3T 3M9，加拿大

Reinhard Heinke欧洲核
子研究中心，日内瓦，瑞士

Steven Hoekstra范斯温德伦粒子物理与引力研究所，格罗宁根大学，荷兰；
Nikhef，国家亚原子物理研究所，阿姆斯特丹，荷兰

Jason D. HoltTRIUMF，4004 韦斯布鲁克购物中心，温哥华，不列颠哥伦
比亚省 V6T 2A3，加拿大；麦吉尔大学物理系，蒙特利尔，魁北克省 H3A
2T8，加拿大

NicholasR. Hutzler*加州理工学院，帕萨迪纳，加利福尼
亚州 91125，美国 电子邮箱：hutzler@caltech.edu

Andrew Jayich*加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校物理系，加利福尼亚州圣巴巴
拉 93106，美国 电子邮箱：jayich@physics.ucsb.edu

Jonas Karthein麻省理工学院，剑桥，马萨诸塞州 02139，美国

Kyle G.Leach稀有同位素束流设施，密歇根州立大学，密歇根州东兰辛 48824，
美国；科罗拉多矿业大学，戈尔登，科罗拉多州 80401，美国

Kirk W. Madison英属哥伦比亚大学物理与天文学系，温哥华，不列颠哥伦比
亚省 V6T1Z1，加拿大

Stephan Malbrunot-EttenauerTRIUMF，4004 韦斯布鲁克购物中心，温哥
华，BC V6T 2A3，加拿大；多伦多大学物理系，圣乔治街 60 号，多伦多，安大略
省，加拿大

Takayuki Miyagi
TRIUMF，4004 韦斯布鲁克购物中心，温哥华，BC V6T 2A3，加拿大

Iain D. Moore
加速器实验室，物理系，于韦斯屈莱大学，芬兰于韦斯屈莱，40014。

Scott Moroch
麻省理工学院，美国马萨诸塞州剑桥市，邮编 02139

Petr Navratil
TRIUMF，4004 韦布鲁克购物中心，温哥华，BC V6T 2A3，加拿大

Witold Nazarewicz*
稀有同位素束设施及密歇根州立大学物理与天文学系，密歇根州东兰辛，密歇根州 48824，美国 电子邮箱：witek@frib.msu.edu

Gerda Neyens
鲁汶大学，物理与天文学系，核与辐射物理研究所，B-3001 鲁汶，比利时

EricB. Norrgard传感器科学部，美国国家标准与技术研究院，盖瑟斯堡，马里兰州 20899，美国

Nicholas Nusgart
稀有同位素束流设施，密歇根州立大学，密歇根州东兰辛，密歇根州 48824，美国

Lukáš F. Pašteka
范斯温德伦粒子物理与引力研究所，格罗宁根大学，荷兰 物理与理论化学系，自然科学学院，夸美纽斯大学，布拉迪斯拉发，斯洛伐克

Alexander N Petrov
以 B.P. Konstantinov 命名的彼得堡核物理研究所，“库尔恰托夫研究所”国家研究中心（国家研究中心“库尔恰托夫研究所”- PNPI），奥尔洛瓦罗夏 1 号，微区，圣彼得堡国立大学，大学滨河路 7/9 号，圣彼得堡，199034，俄罗斯

Wolfgang R. Plaß
GSI亥姆霍兹重离子研究中心有限公司，64291达姆施塔特，德国 第二物理研究所，吉森尤斯图斯-李比希大学，35392 吉森，德国

Roy A. Ready
加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校物理系，美国加利福尼亚州 93106

Moritz Pascal Reiter
爱丁堡大学物理与天文学学院，Peter Guthrie Tait 路，EH9 3FD，英国爱丁堡

Mikael Reponen
加速器实验室，物理系，于韦斯屈莱大学，芬兰于韦斯屈莱，40014。

Sebastian Rothe欧洲核子
研究中心，瑞士日内瓦

Marianna S. Safronova
物理与天文学系，特拉华大学，特拉华州纽瓦克 19716，美国；联合量子研究所，美国国家标准与技术研究院及马里兰大学，马里兰州盖瑟斯堡 20742，美国

Christoph Scheidenerger
GSI亥姆霍兹重离子研究中心有限公司，德国达姆施塔特 64291；吉森尤斯图斯-李比希大学第二物理研究所，德国吉森 35392；亥姆霍兹黑森州FAIR研究院（HFHF），吉森校区，德国吉森

Andrea Shindler
稀有同位素束流设施与密歇根州立大学物理系，美国密歇根州东兰辛 48824

Jaideep T. Singh*
稀有同位素束流设施，密歇根州立大学，美国密歇根州东兰辛 电子邮箱：singhj@frib.msu.edu

Leonid V. Skripnikov
彼得堡核物理研究所（隶属“库尔恰托夫研究中心”国家研究中心），1 奥尔洛瓦罗夏 mcr.，加特契纳，188300，俄罗斯列宁格勒州；圣彼得堡国立大学，7/9 大学滨河路，俄罗斯圣彼得堡，199034

Anatoly V. Titov
彼得堡核物理研究所（隶属“库尔恰托夫研究中心”国家研究中心），1 奥尔洛瓦罗夏 mcr.，加特契纳，188300，俄罗斯列宁格勒州；圣彼得堡国立大学，7/9 大学滨河路，俄罗斯圣彼得堡，199034

Silviu-Marian Udrescu
美国马萨诸塞州剑桥市，麻省理工学院，邮编 02139

Shane G. Wilkins
美国马萨诸塞州剑桥市，麻省理工学院，邮编 02139

杨晓飞
北京大学物理学院与核物理与核技术国家重点实验室，中国北京 100871

* 通讯作者

1. 执行摘要

放射性分子在诸多领域展现出巨大的发现潜力。重元素短寿命原子核极端的核性质，以及分子所具备的内在灵敏度、灵活性和量子控制机会，使其成为推动高能粒子物理学、宇宙学、核物理、天体物理学和化学发展的有力平台——相关研究群体的广泛构成正体现了这一点。除发现潜力之外，将这一研究群体联系在一起的共同主题，还包括开展放射性分子研究所面临的两项挑战：在单个量子态层面控制重型复杂分子，以及放射性同位素的制备与处理。

幸运的是，这两项挑战正在多个方面迅速得到解决。双原子分子乃至多原子分子已被囚禁在超低温下（Fitch 和 Tarbutt，2021；Vilas 等人，2022），为量子信息科学、量子化学、多体物理学、精密测量和量子传感带来了新的机遇（Bohn 等人，2017；Safronova 等人，2018；Isaev 和 Berger，2018；Chupp 等人，2019；Hutzler，2020；Fitch 和 Tarbutt，2021）。囚禁分子离子的内部态和运动态均已在单量子级别得到控制（Chin-wen 等人，2017；Chou 等人，2020）。在电子电偶极矩最灵敏测量的纪录方面，分子领先了多个数量级（Roussy 等人，2022；Andreev 等人，2018）。值得注意的是，尽管这些进展主要针对稳定物种，但相关工作与控制放射性分子的研究高度协同，尤其是在提高效率方面；稳定分子也将继续作为新技术的试验平台。

除了在分子操控方面取得进展外，处理放射性同位素的能力也在不断提升，其中包括近期具有里程碑意义的放射性分子光谱学研究（Garcia Ruiz 等人，2020年；Udrescu 等人，2021）。大学研究团队已成功使用少量放射性同位素（Hucul 等人，2017；Fan 等人，2019年），预计效率还将进一步提升（Martoff等人，2021）。与此同时，核设施持续扩展其放射性分子研究能力，并提高生成具有应用前景的短寿命放射性同位素可用量的能力。‡ 将最先进的分子测量与操控方法应用于放射性物种，将是一项不小的挑战。

重要的是，分子实验有望继续带来重大的技术改进。许多进展，包括对现有实验的升级、新实验以及新的理论方法，都为本十年及未来实现重大改进提供了途径。借鉴量子信息科学（QIS）领域的进展，将延长相干性并改善

‡ 这里我们将寿命短于 $\sim 10^6$ 年的同位素视为“短寿命”同位素，这意味着必须人工制造它们才能进行研究。像 ^{232}Th这样的长寿命天然物种具有放射性，但由于其寿命极长（$\tau = 1.4{\times}10^{10}$ 年），在实际应用中可视为稳定，因此能够以宏观数量获得。

这有助于实现控制，从而提高基础物理学和化学中各类精密测量的实验灵敏度。重且具有形变的奇异原子核能显著增强对强子对称性破坏的灵敏度，并为核结构研究带来机遇。拓展短寿命物种的分子光谱学将推动从头算 分子理论的发展，并为基本对称性研究奠定基础。放射性分子的精密光谱学对于在天体物理研究中识别这些分子至关重要。

放射性分子将在推动这些领域的科学发展中发挥重要作用。例如，对基本对称性破坏的灵敏度通常随质子数迅速增大，一般按 Z^2 至 Z^5的比例变化。因此，最重的原子核虽然具有放射性，却也能提供最高的灵敏度。此外，原子核形变还能带来显著的额外增强。具有八极(β_3)形变的原子核，可通过核 Schiff 矩（NSM）使对电荷宇称（CP）破坏强子物理的灵敏度提高100至1,000倍，这还不包括分子增强。例如，与 10^5 至 10^6相比，合适的含镭分子对强子CP破坏的本征灵敏度约高出 ^{199}Hg (Kudashov 等人，2016年)，而目前对多种强子CP破坏源的最佳限制正是由其给出（Graner 等人，2016年）。

借助放射性分子实现科学发现，需要广泛的理论支持。原子、分子和核理论的诸多领域，对于筛选研究对象、设计实验和解读结果至关重要。某些测量的影响取决于我们能否理解源自核子尺度、却体现于分子光谱中的信号。因此，需要理论将多个领域的物理学联系起来。原子和分子理论有助于将实验室测量结果转化为 CP破坏可观测量，例如电偶极矩（EDM）和核对称性破坏矩。核理论则建立核性质与其底层物理来源之间的联系，例如夸克电偶极矩和强相互作用电荷宇称破坏。高能理论对于将这些来源与基础物理联系起来至关重要，其中包括标准模型扩展，见图 1。

本文综述了放射性分子的科学研究动机以及相关的实验和理论技术，讨论了能够产生这类物种的设施目前和未来的研究机遇，并展望了该领域的发展前景。尽管将分子实验与放射性原子核结合起来面临重重挑战，但近年来已取得重要进展，例如 RaF 光谱学（Garcia Ruiz 等人，2020年；Udrescu 等人，2021年），以及含镭分子离子的囚禁和冷却（Fan 等人，2021年；Yu 和 Hutzler，2021年）。放射性分子这一新兴领域为众多不同领域的科学家带来了丰富机遇。想到未来十年将取得的进展，尤其是那些必将出现、推动科学发现的意外突破与新思路，令人振奋。

2. 科学动机

本节聚焦于放射性分子能够为重大突破带来独特机遇的几个领域。首先，放射性分子可以结合分子和原子核的增强效应，大幅放大超越标准模型及标准模型内部的对称性破坏信号。其次，分子中原子核所处的电磁环境为研究精细核结构提供了途径，例如高阶宇称破坏效应以及核电荷和弱流的分布。第三，放射性分子是重要的天体物理探针，而基于实验室的光谱学对于揭示恒星过程的详细信息至关重要。第四，极端质量和核电荷的同位素将使人们能够研究元素周期表中一个很大程度上尚未探索、且化学性质迥异的区域。

2.1. 电荷宇称破坏

分子对标准模型内外的多种物理现象都具有高灵敏度。基本对称性破坏尤为引人关注且意义重大，因为分子对这类对称性破坏的特征具有独特的灵敏度，能够成为探测高能物理的高灵敏度探针（Engel 等人，2013；Roberts 等人，2015；DeMille，2017；Safronova 等人，2018；Isaev 和 Berger，2018；Cesarotti 等人，2019；Chupp 等人，2019；Cairncross 和 Ye，2019；Skripnikov 等人，2020；Hutzler，2020；Alarcon 等人，2022）。

研究基本对称性破坏的动机十分广泛。首先，宇宙中物质与反物质之间已观测到的不平衡提供了明确的研究动机；标准模型无法解释这一现象，这表明可能存在新的CP破坏物理（Huet 和 Sather，1995年；Dine 和 Kusenko，2003年）。其次，既然CP并非宇宙的对称性（Christenson 等人，1964；Fanti 等人，1999年；Abe 等人，2001；Aubert 等人，2001，2004），就没有理由认为新粒子和新力会保持CP对称性，因此，寻找对称性破坏通常是探测新物理的有力手段。第三，强CP问题（Kim 和 Carosi，2010年）促使人们测量强CP破坏；它会体现在低能可观测量中，同时也暗示着可能存在新的CP破坏粒子。最后，原子系统中的宇称破坏能为低动量转移下的电弱物理提供关键信息，而目前这类高精度信息仍然缺乏（Safronova 等人，2018年；Roberts 等人，2015）。

在低能区，CP破坏表现为对称性破坏的电磁矩，例如电偶极矩、核 Schiff 矩和磁四极矩（MQM）。与其他实验平台相比，这些矩的可观测效应在分子中可增强数个数量级。这归因于分子中极强的内部电磁场，以及只需施加适度的外部电场即可使这些场完全定向的独特组合（Roberts 等人，2015；Safronova 等人，2018年；DeMille 等人，2017；Chupp 等人，2019年；Cairncross 和 Ye，2019年；Hutzler，2020年；Alarcon 等人，2022年）。尽管面临相当大的

分子实验面临诸多挑战，但分子通过这种“分子增强”所获得的更高内禀灵敏度，加上本文讨论的各种新实验技术，使得分子实验如今开始超越原子实验，成为搜寻CP对称性破坏效应最灵敏的手段。此外，所有这些搜寻都将受益于重放射性原子核的可用性；分子对CP破坏的内禀灵敏度大致按 Z^2 to Z^3 缩放。

目前对电子电偶极矩（eEDM）最严格的限制来自使用 HfF^+ （Cairncross 等人，2017；Roussy 等人，2022）和 ThO（Andreev 等人，2018）分子的实验。这些实验与一项使用 YbF 的实验（Hudson 等人，2011）相比，灵敏度高于原子实验所获得的最佳限制（Regan 等人，2002）。在约 10 年间，分子实验将 eEDM 的限制提高了约 100 倍，并且已经探测到直接高能对撞机搜寻无法触及的参数空间——对于与电子耦合的新 CP破坏粒子，能量范围最高达 $\sim$50 TeV（Andreev 等人，2018；Cesarotti 等人，2019；Alarcon 等人，2022）。由于标准模型中的 CP破坏仍比这些实验的不确定度小许多数量级（Yamaguchi 和 Yamanaka，2020；Ema 等人，2022），这些实验为探测标准模型之外的新物理提供了无背景的手段。

一个重要的理论考量是，分子CP破坏对广泛的可观测量都具有灵敏度¯，包括电子电偶极矩、θ_{QCD} 、夸克电偶极矩、色偶极矩、CP奇四夸克算符以及CP破坏的电子-原子核相互作用（Engel 等人，2013年；Yamanaka 等人，2017；Safronova 等人，2018年；Cesarotti 等人，2019年；Dekens 和 de Vries，2013年；Kley 等人，2021年；Alarcon 等人，2022年）。对任何给定分子物种中CP破坏的测量，都对这些效应的某种组合具有灵敏度，因此无法单凭自身分离并探究某一个潜在来源（Chupp 和 Ramsey-Musolf，2015；Chupp 等人，2019年）；来自多项实验的全局约束能够为CP破坏参数提供最严格的界限。为了可靠地识别新物理的来源，我们需要对多种分子物种进行测量，同时还需要分子理论和核理论来理解分子对不同来源的灵敏度。这推动了第3节所讨论的实验和理论工具的持续发展。

中性原子和分子中的电子会屏蔽核电偶极矩，因为带电原子核会移动到平衡位置，使平均电场为零（Schiff，1963）。然而，仍可通过核 Schiff 矩（NSM）探测原子或分子电偶极矩（Flambaum和Ginges，2002年）。八极形变核的核 Schiff 矩会显著增强（Auerbach等人，1996），这源于三个因素：NSM在核参考系中的集体性质，$\Delta E_{\pm}$ 宇称相反的核态双重态之间存在较小的能量间隔，以及这两个双重态核态之间存在较强的 T、P 破坏相互作用。

具有四极和八极形变参数的原子核的核 Schiff 矩 β_2

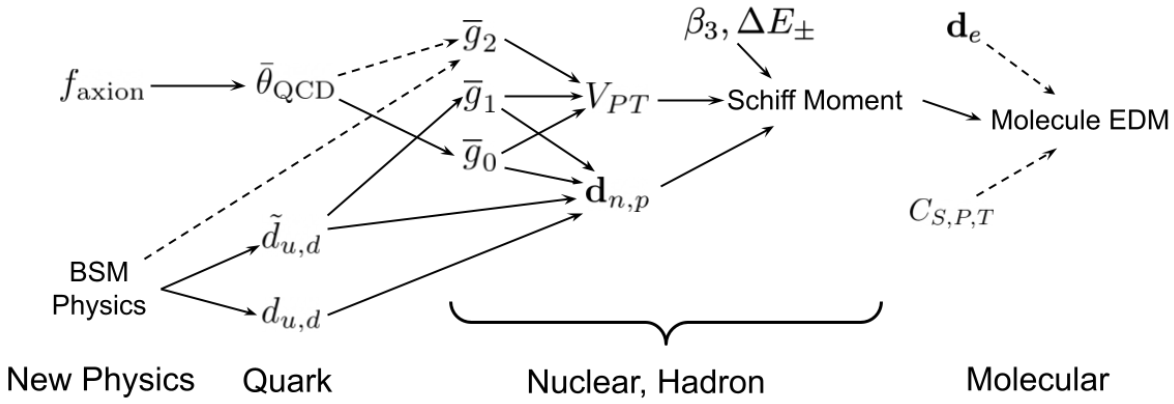

图1. 超越标准模型物理的来源，例如超对称粒子，可通过夸克电偶极矩（d_u、$_d$）和色电偶极矩（$\tilde{d}_u$、$_d$）与标准模型粒子耦合，或通过与QCD θ_{QCD} 参数耦合的轴子场（f_{axion}）发挥作用。这些来源随后经由强子物理和核物理，传递至放射性分子的时间反演对称性破缺矩，并可对其进行测量。同位旋标量、 $\bar{g}_0$和同位旋矢量、$\bar{g}_1$的π介子-核子-核子（πNN）耦合参数会产生一个 P、T奇的核哈密顿量项 V_{PT}，以及质子和中子电偶极矩 $\mathbf{d}_n$、$_p$。而同位旋张量参数 $\bar{g}_2$则只与 V_{PT}耦合。Schiff 矩由 V_{PT}和核子电偶极矩决定，并在八极形变核中因 $\Delta E_\pm$而显著增强，见公式1。 P、T奇的电子-核子耦合C_S、$_P$、$_T$以及电子电偶极矩 $\mathbf{d}_e$也会微弱地贡献于整体分子电偶极矩。不过，在具有成对价电子的分子（例如 $^1\Sigma$）中，这些贡献很小；这类分子由于对磁场不敏感，非常适合用于测量强子CP破坏。图示灵感来自（Graner，2017）。

和 β_3，分别 效地，按比例缩放约为（Spevak等人，1997年；Flambaum和Ginges，2002年 ）

$$S \propto \frac{\beta_2 \beta_3^2 Z A^{2/3}}{\Delta E_\pm}. \tag{1}$$

钫、镭、钍和镤的放射性同位素§ 的核希夫矩增强可达 10^{2-6}与汞等球形原子核相比（Haxton和Henley，1983；Auerbach等人，1996；Spevak等人，1997年；Dobaczewski和Engel，2005年；Parker等人，2015；Dobaczewski等人，2018年；Flambaum，2019年）。

八极形变的另一个优点是计算结果具有稳定性。事实上，Schiff 矩的表达式 S 包含两个大小相近、符号相反的项：主项和屏蔽项；后者与核电偶极矩成正比（Chupp 等人，2019年）：

$$\vec{S} = \frac{1}{10}\int r^2\ \vec{r}\rho_Q\ d^3r - \frac{1}{6Z}\int r^2 d^3r \int \vec{r}\ \rho_Q\ d^3r, \tag{2}$$

其中， ρ_Q 是核电荷分布， $\vec{d}_N = \int \vec{r}\rho_Q d^3r$ 是核电偶极矩。也就是说，核 Schiff 矩源于质量和电荷分布之间的差异，存在于

§ 第 5.1 节讨论了 ^{229}Pa (Haxton和Henley，1983年这一特殊情况；预计其宇称双重态劈裂异常小。

原子核。大小相近的这些项之差会使 ^{199}Hg 和 ^{129}Xe等原子核中的结果不太稳定。然而，在发生八极形变的原子核中，Schiff 矩和电偶极矩具有集体性质，屏蔽项的贡献相对较小，因为集体电偶极矩仅由质子和中子分布之间的差异产生，而这种差异很小。方程（1）中的 Schiff 矩表达式与 β_3^2成正比。即使静态形变$\langle\beta_3\rangle = 0$，具有软八极振动模的原子核中 $\langle\beta_3^2\rangle$ 的值也可能很大。这可能大幅扩充候选原子核名单（Engel 等人，2000年；Flambaum 和 Zelevinsky，2003年）。

值得注意的是，通过原子和分子测量，原子核的磁四极矩也可用于研究强子CP破坏。由于所谓的自旋刺猬机制，具有四极形变的原子核中的磁四极矩具有集体性质，可产生约一个数量级的增强（Flambaum，1994）。许多重原子核具有较大的四极形变，因此可选用的分子也相应很多，且灵敏度显著，其中许多并非放射性（Flambaumetal.，2014；Maison等人，2019；Denis 等人，2020年；Fleig，2017b；Maison等人，2020年）

2.2. 宇称破坏

在探索标准模型之外的新物理的同时，检验其预言以确保该模型在“普通”物质领域的有效性也十分重要。宇称破坏（PV）测量是检验标准模型电弱部门的有力手段（Safronova 等人，2018年）。宇称破坏测量可探测标准模型中的若干电弱和原子核参数，而这些参数目前尚不明确，包括电子-夸克电弱中性流耦合、核子-原子核耦合、核环形偶极矩、原子核弱电荷以及弱四极矩。精确确定这些参数对于理解核子如何结合形成原子核、描述支配原子核衰变的过程，以及刻画核素图上原子核的电弱结构至关重要。同时，宇称破坏测量也可用于寻找标准模型之外的新物理，例如轻子疏耦 Z' 玻色子（Langacker等人，1992年；Novikov 等人，1977年；González-Alonso 和 Ramsey-Musolf，2013 年）。已有研究提出，可通过搜寻振荡宇称破坏信号来探测类轴子粒子；这也是一种主要的暗物质候选粒子（Stadnik 和 Flambaum，2014年；Gaul等人，2020年a，b）。

核自旋无关宇称破坏（NSI-PV）已在质子宇称破坏电子散射实验以及若干重原子中测得（The Jefferson Lab Qweak Collaboration, 2018; Macpherson et al., 1991; Meekhof et al.,1993; Vetter et al., 1995; Nguyen et al., 1997; Wood et al., 1997; Antypas et al., 2019），结果与标准模型基于弱电荷 Q_W 对宇称破坏的预测相符；在 ^{133}铯中，测量精度达到 0.5%，数值为 0.5 至 1.5 σ ，但辅助实验中的差异（Toh et al., 2019; Bennett and Wieman, 1999）以及多体原子

理论（Porsev et al., 2009; Dzuba et al., 2002, 2012; Tran Tan et al., 2022）。相反，尽管目前正在若干重原子物种（Toh et al., 2014; Antypas et al., 2019）中开展宇称破坏测量，包括放射性原子（Gwinner and Orozco, 2022）和分子物种（Altuntaş et al., 2018），原子核自旋相关宇称违反（NSD-PV）唯一一次非零测量（相对不确定度为 14%）来自^{133}铯（Wood et al., 1997）；该结果对标准模型介子—核子耦合施加的限制与其他核宇称违反测量结果不一致（Haxton and Wieman, 2001; Johnson et al., 2003）。值得注意的是，在某些分子中，不同宇称态彼此接近，因此相较于原子最先进实验，分子对核自旋相关宇称破坏的灵敏度可增强逾十一个数量级（Sushkov and Flambaum, 1978; Flambaum and Khriplovich, 1985; Altuntaş et al., 2018）。

理论预测，手性分子中的核自旋相关宇称破坏（NSD-PV）主要会导致对映异构体——即手性分子的两个不相同的镜像——在核磁共振（NMR）（Barra等人，1988年；Laubender和Berger，2003年；Soncini等人，2003年；Weijo等人，2005年、2007年；Nahrwold和Berger，2009年；Eills等人，2017年）、电子顺磁共振（Khriplovich，1985年）和穆斯堡尔（Khriplovich，1985年）光谱中出现宇称违反劈裂。相比之下，预计核自旋无关宇称破坏（NSI-PV）会造成对映异构体之间的宇称破坏能量差（Yamagata，1966年；Letokhov，1975年），并在高分辨率转动-振动-电子光谱中产生宇称违反共振频率差（Letokhov，1975年；Quack，1989年；Berger，2004年；Crassous等人，2005年；Quack等人，2008年；Schwerdtfeger，2010年）。尽管数十年来人们进行了多次实验尝试，但迄今仍未能分辨出手性分子光谱中这些理论预测的微小劈裂；不过，对手性分子宇称不守恒效应较为严格的上限来自对对映体富集的CHBrClF进行的高分辨率红外光谱学研究（Daussy等人，1999年；Ziskind等人，2002年）；对映异构体之间振动频率相对差的上限 $\Delta\nu/\nu \leq 10^{-13}$比预测的效应大小低约三个数量级。由于自旋-轨道耦合对宇称破坏能量位移至关重要，手性分子中的NSI-PV效应会随 Z^5急剧增强。因此，经过专门设计、含有砹等重放射性原子核的分子（Berger和Stuber，2007年），有望首次成功测量手性分子中的电弱宇称违反，并可作为高灵敏度探针，用于探测宇宙赝矢量场引起的宇称破坏（Gaul等人，2020a,b）。这类赝矢量场被视为局域洛伦兹不变性破缺的标志（Colladay和Kostelecký，1998年），或暗物质候选者（An等人，2015年；Graham等人，2016年）。

2.3. 核结构

原子和分子光谱能够揭示原子核的详细信息，包括电荷、质量和磁化的分布，以及弱核力及其高阶效应。大型重原子核可以

将这些效应的幅度推至极限，并提供以新方式、更高分辨率获取这些信息的机会。

我们关于核矩的大部分光谱数据，来自对原子谱线超精细分裂的测量（Yang 等人，2022年）。沿着较长的同位素链进行这些测量，可以严格检验不同的核模型（Garcia Ruiz 等人，2016年；de Groote 等人，2020年；Vernon 等人，2022年）。然而，对于某些元素，原子或离子结构可能无法提供对高阶核矩的灵敏度（Koszorús 等人，2021年）。对于处于特定电子能级的原子，由于角动量选择定则，相应的核矩严格为零；或者这些能级寿命过短，无法提取核矩。另一方面，在分子的电子基态中，这些核矩的期望值不为零，而长寿命转动能级的存在使得人们能够高精度地测量这些核矩（Kellö 和 Sadlej，1998）。因此，与相应的原子相比，分子具有显著优势。

用于探测原子中宇称不守恒效应的实验可用于测量原子核内中子的四极分布（Flambaum等人，2017）。为此，可以考虑宇称不守恒哈密顿量的张量部分，并引入弱四极矩（Flambaum等人，2017）。由于中子的弱电荷远大于质子，这种相互作用主要由中子与电子之间的宇称不守恒相互作用主导。具有 $^3\Delta_1$ 电子态的分子是研究此类问题的有趣体系： $^3\Delta_1$ 态与 $^3\Delta_{-1}$ 态可通过这种宇称不守恒张量相互作用直接混合。已有研究表明，对于 ^{177}HfF$^+$ 分子（Skripnikov等人，2019），由弱四极矩诱导的张量弱相互作用对宇称不守恒效应的贡献占主导地位，其贡献超过矢量环形矩和标量弱电荷的贡献。后两种效应只能通过与非绝热效应的干涉产生贡献，因此受到抑制。

核磁矩在寻找分子中的宇称不守恒效应以及时间反演和宇称不守恒效应方面发挥着至关重要的作用。对此类效应的原子与分子增强因子预测，通常通过将超精细结构（HFS）常数的理论预测与实验数据进行比较来检验。此外，真实原子核具有有限大小，这会导致有限核磁化分布效应，即所谓的布赖特-怀纳（BW）效应（Bohr 和 Weisskopf，1950；Bohr，1951；Sliv，1951）。这种效应难以准确预测（Sen' kov 和 Dmitriev，2002），因此在大多数情况下会采用近似核模型，这可能导致超精细结构常数产生数个百分点的不确定性（Ginges 等人，2017；Roberts 和 Ginges，2021）。人们已经提出了结合理论与实验确定该效应的方法，适用于原子（Ginges 和 Volotka，2018；Roberts 等人，2022；Sanamyan 等人，2022；Prosnyak 等人，2020）和分子（Skripnikov，2020）（见下文）。对布赖特-怀纳效应的研究还有助于探测原子核中中子的分布（Zhang 等人，2015），这对于准确评估原子宇称不守恒振幅是必要的（Safronova 等人，2018）。（关于核理论的进一步讨论见第 3.10.1 节。）

准确预测原子与分子系统的磁偶极超精细结构（HFS）常数所面临的另一个问题，是某些重原子的核磁矩存在不确定性。最近，这导致了 Bi 超精细结构“谜题”问题（Ullmann 等，2017）——实验结果（Ullmann 等，2017）显示出相对于在强场束缚态量子电动力学框架内进行的理论预测（Shabaev 等，2001）的 7σ 偏差。正如研究所示（Skripnikov 等，2018），这一谜题的根源在于 ^{209}Bi 的核磁矩表列值不准确。表列值不准确的原因，是计算屏蔽常数时采用了近似理论；而从实验核磁共振数据中提取核磁值需要用到该屏蔽常数。为解决这一问题，人们提出了一种基于相对论耦合簇理论的新方法（Skripnikov 等，2018）。在中性原子中考虑布赖特-怀纳效应和超精细磁异常，对于预测短寿命同位素的核磁偶极矩至关重要（Persson，1998；Schmidt 等，2018；Barzakh 等，2020；Prosnyak 和 Skripnikov，2021；Konovalova 等，2017；Prosnyak 等，2020）。在这里，通常需要稳定同位素和短寿命同位素两个电子态的原子超精细结构常数的实验与理论输入。如果具备准确的原子理论，就可以通过比较单个电子态的理论与实验超精细结构常数来确定核磁矩，正如对钫的同位素所进行的研究（Roberts 和 Ginges，2020）。

研究表明，考虑布赖特-怀纳效应对于预测重原子分子的超精细结构常数至关重要。例如，该效应对^{225}镭F 的电子基态（Skripnikov，2020年）中的超精细位移贡献约为 4%。研究还表明，对于重原子分子，可以将布赖特-怀纳效应对超精细结构常数的贡献分解为纯电子部分和一个取决于核磁化分布的通用参数。这一重要关系使我们能够结合实验数据与理论数据，提取某种原子的核磁化分布参数，并将其用于分子预测，反之亦然。这意味着，如果能够准确预测电子结构，就可以避免直接进行核结构计算来确定磁化分布。此外，这也意味着可以像原子研究那样，利用放射性分子的实验和理论输入，获得短寿命同位素的核磁矩值（Schmidt 等人，2018年）。

2.4. 天体物理学

数百万年来，世代更迭的恒星通过核聚变过程（Asplund 等人，2009年）使原初物质富集了重化学元素。即使是最重的准稳定元素，钍和铀，也已在恒星大气中被观测到（Frebel 等人，2007年；Yong 等人，2021年）。恒星核合成产生的稳定原子核，为我们了解恒星在广阔延伸的太空区域中的长期演化提供了信息；相比之下，寿命较短至

中等的原子核则反映了当前恒星演化的动力学（Langer，2012年；Tur 等人，2007年、2010年；Kamiński 等人，2018年；Brinkman 等人，2019年、2021年）。直到最近，当前恒星族群中的放射性原子核还只能通过其高能 γ射线衰变信号进行天文探测（Diehl 等人，2021年）。然而，正如最近在一氟化铝案例中所证明的那样，放射性原子核一旦融入分子，就可以通过毫米波波段中的低能光子发射被探测到。这些放射性分子随后能够借助当前一代望远镜设施所提供的超高灵敏度和前所未有的空间分辨率进行观测，即阿塔卡马大型毫米/亚毫米阵列（ALMA）（ALMA合作组织，2015）；TEXES（Lacy 等人，2002年）；SOFIA（Young 等人，2012年）。在一个 ^{26}Al原子核释放高能光子之前，其分子对应物，即 ^{26}AlF，已经发射了十亿个低能光子。图2展示了由阿塔卡马大型毫米/亚毫米阵列望远镜设施观测到的合并事件CK Vul周围 ^{26}AlF的空间分辨率。

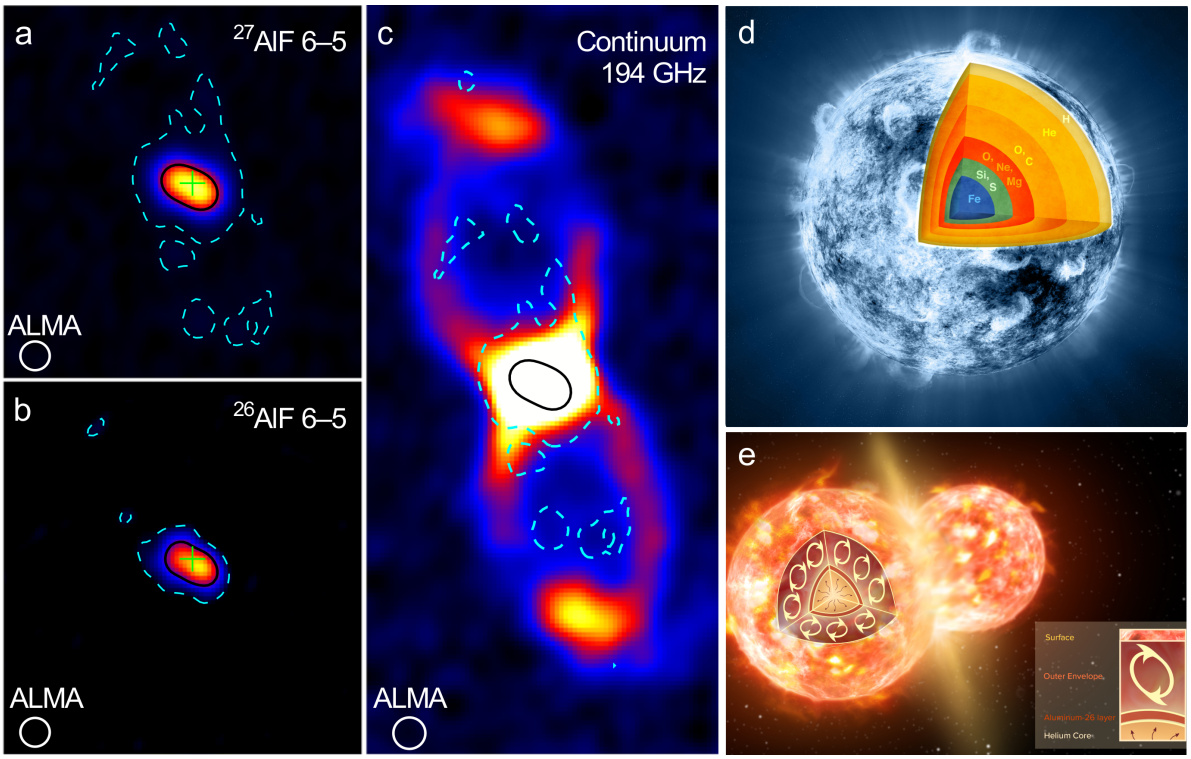

图 2. 分子发射图 ^{27}AlF [a], ^{26}AlF [b] 以及尘埃连续谱 [c]恒星遗迹周围的*CK Vul* (Kamiński 等人，2018年）。十字标记表示射电源的位置。超巨星剖面图，展示核合成过程及形成的元素 [d]图片来源：NASA/CXC/M. Weiss。艺术家描绘了两颗恒星碰撞的场景，这两颗恒星类似于形成*CK Vul* [e] 图片来源：美国国家射电天文台/AUI/NSF；S. Dagnello。

恒星天体在不稳定的恒星阶段会喷出原子和离子物质，随后这些物质可在冷却气体膨胀形成的星周包层中生成小型至中型分子（Campbell 等，2015；Endres 等，2016）。膨胀一年后，喷出的恒星物质温度降至适中水平，适合形成稳定分子。这些分子最初由难熔元素凝结形成，例如

金属和重原子，其中也包括寿命从几十年到数千年的短寿命放射性物种。膨胀的恒星壳层中的局部物理和化学条件，依据反应焓决定分子形成过程（Gail 和 Sedlmayr，2014年），还可能促成更大的放射性分子聚集体和尘埃颗粒形成（Wallner 等，2016年；Groopman 等，2015；Diehl 等，2021年）。总体而言，恒星演化阶段与特定放射性示踪分子的出现密切相关。超新星事件的最后阶段，大多数重原子都被束缚在尘埃颗粒中；然而，放射性衰变会释放大量热能，从而加热并部分汽化包围着仙后座A（Grefenstette 等，2016年）和 SN1987A（Boggs 等，2015）等超新星遗迹的尘埃茧物质。除 ^{26}Al 和 ^{60}Fe 外，特别值得关注的还有 ^{56}Ni、 ^{60}Co、 ^{44}Ti 和^{32}Si 等放射性原子核，它们会在尘埃和气体膨胀的早期致密阶段发生衰变。此前，人们曾多次尝试在老化的富碳恒星 IRC 10216 的星周区域观测放射性分子（Guélin 等，1995年；Forestini 等，1997年），希望在它们被锁入星际尘埃颗粒之前探测到它们，但均未成功（Cernicharo 等，2000年）。然而，亮蓝变星和沃尔夫-拉叶星等较大质量的恒星天体，应该能产生更多长期稳定的放射性原子核；这些原子核会在其贫氢、缓慢膨胀且已脱离的恒星外层中凝结成分子化合物，从而使天文学家能够识别它们。

观测恒星源中放射性分子的低能转动振动态，需要非常精确地了解其特定特征频率，因此必须进行精确的实验室测量。尽管可以通过对稳定同位素体进行实验室测量来获得双原子分子的精确光谱（Breier 等，2018年，2019年；Waßmuth 等，2020年），但对于 ^{26}AlOH 等三原子物种，以及所有更大的物种而言，由于分子势能日益复杂，这种间接方法会失效。在大多数恒星环境中，预计更大的物种丰度更高（Agúndez 等，2020年）。因此，需要对放射性分子进行原位光谱学测量。ISOLDE-CERN、TRIUMF 和 FRIB 等设施为开展这种分子光谱学提供了绝佳机会，详见第4节。对放射性物种开展光谱学研究，将推动未来的天文观测，从而为了解大质量恒星内部正在发生的恒星核合成过程提供关键洞见。

2.5. 放射化学

放射化学是一个研究严重不足的领域。近几十年来，技术进步使人们能够安全地开展放射性元素实验，并优化小规模实验。不同的放射性核素通常会同时生成，因此优化同位素分离对于研究高纯度样品至关重要。元素的分离可能取决于其浓度，从而使分离过程进一步复杂化（Nash 等人，2006）。此外，许多受到关注的同位素

例如 ^{229}Pa，会因相对稀少且难以处理而缺乏研究。

未来开展 ^{229}Pa 工作的理想镤同位素是最适合优化镤化学的 ^{231}Pa（半衰期为32,760年）。 ^{231}Pa样品主要通过从铀矿石中提取获得（Kirby，1960），数十年来已产生大量放射性子体产物，例如 ^{227}Ac 。这些比活度很高的子体产物虽然质量占比很小，对整体化学性质影响不大，却会显著增加 ^{231}Pa 的剂量，因此更难安全操作。众所周知，镤还会沉积在玻璃表面上，这给研究带来困难，尤其是在样品量较少时。

尽管只存在放射性同位素的元素本身具有种种障碍，但 ^{225}Ra领域仍取得了令人瞩目的成果与进展。镭面临着独特的挑战：它会衰变产生气态子体氡，而且还具有比活度很高的子体同位素（Failla，1932）。这使得镭的安全操作和实验异常困难，尤其是在能够确立基础化学性质的大规模样品处理中。尽管存在这一障碍，对 ^{225}Ra 原子及含镭分子的光谱学研究，已显示出研究重要放射性同位素的巨大潜力（Parker 等人，2015；Garcia Ruiz 等人，2020年）。

3. 近期进展

近年来，各种技术取得了快速进展，而要实现上述重大科学进展，这些技术都是必不可少的。本节将选取部分相关的实验和理论进展进行综述。目前，其中许多技术尚未直接涉及放射性分子，但它们构成了坚实的基础，将推动放射性物种研究取得进展。此外，放射性分子为汇聚这些差异极大的领域、共同解决一个挑战提供了独特机遇。

3.1. 放射性分子光谱学

研究放射性分子需要克服重大挑战。这些分子只能以极微量的数量制备或处理，通常仅为 < 1 纳克。因此，高效利用这些合成分子至关重要。它们的寿命也很短，需要快速开展实验，同时还必须充分考虑重要的安全因素。

近期，研究人员利用离子阱、快束流和共线共振电离，在室温下对一氟化镭 (RaF) 的转动结构和超精细结构进行了高灵敏度研究（Garcia Ruiz 等人，2020年；Udrescu 等人，2021年）。这些实验结果支持了关于 RaF 适用于激光冷却的预测（Isaev 等人，2010年）。为克服短寿命分子固有的挑战，研究人员将共线共振电离光谱与离子团束结合使用。随后对镭分子同位素位移测量结果的解读

表明 RaF 对核尺寸效应具有较高的灵敏度（Udrescu 等人， 2021年）。这些结果为进一步发展量子化学理论提供了实验边界，而量子化学理论是从核结构角度解读分子光谱学的重要组成部分。

近期，一项新的实验研究利用共线共振电离光谱技术，获得了 RaF 分子的光谱，分辨率达到 ~ 50 MHz，灵敏度很高（特定转动态中的分子数少于 100 个）（Udrescu 等人，2022年）。这些测量将使研究人员能够提取不同 RaF 分子的高精度同位素位移、转动常数和超精细结构参数。如第 4 节所述，研究 RaF 和其他放射性分子，需要借助专门设施获取这些奇异物种。

3.2. 分子中的 *CP*破坏搜索

分子对各种基本对称性破坏具有增强的灵敏度（Safronova 等人，2018年；Chupp 等人，2019年；Hutzler，2020年；Alarcon 等人，2022年），相较于原子还具有若干关键优势。分子中的强电磁场会放大 CP破坏电磁矩的效应，包括电子电偶极矩、核 Schiff 矩、核磁四极矩，以及电子与核子之间的 CP破坏相互作用。由于分子可以在实验室电场中有效极化，而原子通常不能，因此分子可达到的灵敏度通常高出 $\gtrsim 10^2$ 至 10^3 倍。此外，某些分子可采用“内部共磁力计”方案，可靠地排除系统误差（Baron 等人，2014年；Cairncross 等人，2017；Kozyryev 和 Hutzler，2017；Andreev 等人，2018年）。

目前，已有三项分子实验的电子电偶极矩灵敏度超过了灵敏度最高的原子实验（Tl（Regan 等人，2002年））：YbF（Hudson 等人，2011）、HfF^+（Cairncross 等人，2017；Roussy 等人，2022年）和 ThO（Baron 等人，2014年；Andreev 等人，2018年）。这些实验目前都在积极升级，目标是在未来几年内将当前限值至少提高一个数量级（Panda 等人，2019；Wu 等人，2020年；Ho 等人，2020年；Alauze 等人，2021年；Masuda 等人，2021年；Ng 等人，2022年），而后续几代实验也有进一步提升的途径。这些实验已经能够探测一般性 CP破坏物理的 TeV 量级（Andreev 等人，2018年；Cesarotti 等人，2019年；Alarcon 等人，2022年），并且可以利用本文讨论的许多技术显著提高灵敏度。新的分子电子电偶极矩搜索有许多前景广阔的候选体系，包括 BaF（Aggarwal 等人，2018年）、^{174}YbOH（Kozyryev 和 Hutzler，2017；Denis 等人，2019；Prasannaa 等人，2019；Gaul 和 Berger，2020a；Augenbraun 等人，2020年；Zakharova 等人，2021年；Petrov 和 Zakharova，2022年）、 ^{226}RaOH（Isaev 等人，2017；Kozyryev 和 Hutzler，2017；Gaul 和 Berger，2020a；Zakharova 和 Petrov，2021年）、BaOH（Denis 等人，2019；Gaul 和 Berger，2020a）、SrOH（Kozyryev 等人，2017；Gaul 和 Berger，2020a；Lasner 等人，2022年），以及在基质中分离出的物种（见第 3.8 节）。所有这些体系的实验都可以

也可用于探测电子与核子之间交换类轴子粒子所产生的效应（Stadnik 等人，2018年；Maison、Flambaum、Hutzler 和 Skripnikov，2021年；Maison、Skripnikov、Oleynichenko 和 Zaitsevskii，2021年），因为此类相互作用能够诱导原子和分子的静态电偶极矩。例如，HfF^+ 实验的数据已被用于在多个数量级范围内约束类轴子粒子的质量（Roussy 等人，2021年）。

目前也正在开展利用分子搜索强子CP破坏的实验。核 Schiff 矩和磁四极矩能够探测强子参数的来源，例如第2.1节所讨论的那些来源（Ginges 和 Flambaum，2004；Engel 等人，2013年；Safronova 等人，2018年；Alarcon 等人，2022年）。这些实验包括 CENTReX ^{205}TlF（Hunter 等人，2012年；Grasdijk 等人，2021年）、^{173}氢氧化镱（Kozyryev 和 Hutzler，2017；Maison等人，2019年；Denis 等人，2020年；Pilgram 等人，2021年）、$^{181}TaO^+$（Fleig，2017b；Chung 等人，2021年）、$^{175}LuOH^+$（Maison 等人，2020，2022年），以及针对短寿命放射性物种的实验，例如 RaF（Kudashov 等人，2014；Garcia Ruiz 等人，2020年；Gaul 和 Berger，2020年；Udrescu 等人，2021年）和含镭分子离子，例如 $RaOCH_3^+$（Fan 等人，2021年；Yu 和 Hutzler，2021年）。Maison 等人（2020年）汇总了其中一些分子因 QCD 参数 θ_{QCD} 和夸克色电偶极矩所产生的预期能级位移。还需注意的是，搜索振荡型CP破坏可观测量同样具有研究动机，尤其是强子源，因为它们能够探测轴子和类轴子场（Graham 和 Rajendran，2011，2013；Stadnik 和 Flambaum，2014；Budker 等人，2014；Flambaum 和 Tan，2019年；Arvanitaki 等人，2021年）。此外，传统上用于电子电偶极矩实验、且采用无自旋重原子核的顺磁分子，例如^{232}ThO，实际上还会通过高阶效应对强子和核CP破坏敏感（Flambaum、Pospelov、Ritz 和 Stadnik，2020年；Flambaum、Samsonov 和 Tan，2020a,b）。

3.3. 分子中的 *P*破坏

电子与核子之间的弱相互作用会产生若干宇称破坏效应，使原子和分子中宇称相反的态发生混合。对于具有能量相近且宇称相反态的系统，宇称不守恒效应会得到增强，因此分子是进行宇称破坏测量的理想平台。例如，相邻的分子转动能级具有相反的宇称，并且可以在约 0.1 T 至 1 T 的磁场中调至近简并（Kozlov，1985；Flambaum 和 Khriplovich，1985；DeMille 等人，2008）。除了转动结构外，线性多原子分子还具有宇称相反的 ℓ-双重态，其能量间隔约比转动能级小 100 倍，并且可用相应更小的磁场调至近简并（Norrgard 等人，2019）。在手性分子中，也就是那些无法与其镜像重合且立体异构化势垒很高的分子中，宇称相反态之间的简并仅因量子力学隧穿而被解除（Hund，1927年）。这种隧穿会导致能级分裂，预计其量级比

构型稳定的手性分子中的宇称破坏矩阵元小几个数量级（Berger 等人，2001；Quack 等人，2008；Sahu 等人，2021）。这会对手性分子的结构和动力学产生深远影响（Quack，1989；Berger 等人，2001；Quack，2002；Berger，2004；Berger 和 Stohner，2019）（见下文）。原则上，可以测量分子中每个组成原子核的宇称破坏效应，从而对系统误差和理论进行有力的一致性检验。与原子一样，许多分子物种可以经激光冷却并囚禁，以延长相互作用时间，并与基于束流的宇称破坏测量相比提高灵敏度（Isaev 等人，2010；Isaev 和 Berger，2016，2018）。

需要对多个原子核的核自旋相关宇称破坏进行精密测量，理想情况下应同时研究非常重的原子核和较轻的原子核，以区分两个主要贡献来源：核环偶极矩，以及电子与单个核子之间的 Z_0 玻色子交换。未来测量的有前景候选对象包括 RaF（Isaev 等，2010年）和 RaOH分子（Isaev 等，2017；Norrgard 等，2019年）。与 ^{137}BaF相比，RaF 和 RaOH 中的核自旋相关宇称破坏矩阵元预计会大一个数量级，这主要归因于相对论增强 $\propto Z^2$ 以及环偶极矩的 $\propto A^{2/3}$ 标度。RaF 和 RaOH分子具有两项有利于激光冷却的性质：高度封闭的光学跃迁（Isaev 等，2010年、2017；Garcia Ruiz 等人，2020年），以及（对于 ^{213}Ra 和 ^{225}Ra 同位素体）核自旋最小，$I = 1/2$ 这是研究核自旋相关宇称破坏所必需的。使用 RaF 或 RaOH 研究宇称破坏的一项挑战在于，在重体系中，分子与核结构计算都很困难，例如确定分子对宇称破坏信号的灵敏度，以及不同宇称破坏来源的大小。然而，镭有九种同位素，其 $I > 0$ 和半衰期为 $\tau > 10$ 秒。同位素链提供了分离核结构效应和分子结构效应的机会，从而能够对二者分别进行可靠检验。在多种轻分子中，还可以开展对 Z_0 玻色子交换更加敏感的互补性核自旋相关宇称破坏测量（DeMille 等人，2008年；Norrgard 等，2019年；Hao 等，2020年），因为在这些分子中，分子与核计算都最为精确。

3.4. 分子束

近一个世纪以来，原子和分子的准直束一直是原子物理的核心，也是最成熟的分子光谱学技术（Scoles，1988年）。通常，人们希望在几开尔文或更低的温度下研究分子，使粒子布居集中到最低的几个转动态；然而，这带来了挑战，因为处于这种温度下的分子会冻结并附着在表面上。最常见的解决方法是制备由自身经过冷却的惰性气体冷却的分子束，例如超音速束（Scoles，1988年）或低温缓冲气体束（CBGB）（Hutzler et al.，2012年）。这些束流技术已用于对极其广泛的物种进行光谱研究，从双原子分子到大型有机分子，涵盖开壳层与闭壳层物种，以及具有反应活性、难熔或其他方面颇具挑战性的物种。用于制备这些物种的技术灵活性极高，而且

包括烧蚀固体前体、注入高温蒸气、使金属与气体发生反应，以及光驱动化学生产（Hutzler et al.，2012年；Patterson et al.，2009年；Jadbabaie et al.，2020年）。

在三个灵敏度超过铊实验的分子电子电偶极矩实验中，有两个使用了分子束：ThO（Andreev 等人，2018年）和 YbF（Hudson 等人，2011）。可以利用旨在产生慢速束流的低温缓冲气体束技术来延长探测时间（Lu 等人，2011；Hutzler 等人，2012年），并可利用磁透镜或静电透镜，或横向激光冷却来增强探测器处的通量（DeMille，2013年；Ho 等人，2020年；Alauze 等人，2021年），所有这些方法都正在实施，以改进基于分子束的电偶极矩搜索。分子束还可作为许多其他技术的重要起点，例如激光冷却与俘获（第 3.5节），这些技术旨在囚禁分子，以实现更长的相干时间。

3.5. 直接激光冷却

提高精度的一种方法是直接对分子进行激光冷却（Di Rosa，2004；Shuman 等人，2010年；Fitch 和 Tarbutt，2021）。激光冷却是原子领域一项成熟的技术（Metcalf 和 van der Straten，1999年），也是推动基于原子的量子科学发展的重要动力，涵盖中性粒子和离子中的原子钟、量子信息处理及量子模拟。该技术依靠反复的吸收—自发辐射循环，将动量从激光场传递给原子或分子，从而施加作用力。结合多个激光场，并控制其频率、偏振和外部直流场，可实现冷却，并在光场中将粒子囚禁至微开尔文温度，同时达到较高密度。在分子精密测量中应用激光冷却具有充分的动因：相干探测时间、态制备和读出效率的提升，以及对小体积内电磁场更好的控制，都可能使对基本对称性破坏的灵敏度提升数个数量级（Tarbutt 等人，2013年；Kozyryev 和 Hutzler，2017），并推动暗物质搜索（Kozyryev 等人，2021）及更多研究（Safronova 等人，2018年；Hutzler，2020年）。

激光冷却分子的主要挑战在于其旋转和振动自由度，这些自由度可能因自发辐射而被激发。某些分子的光学跃迁具有近乎闭合的衰变路径，因此只需几个激光器就能实现数千次光子循环（Di Rosa, 2004; Shuman 等人, 2010; Isaev and Berger, 2016; Fitch and Tarbutt, 2021）。这类分子通常具有电子自由度与振动自由度解耦的特性；因此，分子可以吸收光子、获得动量反冲，随后自发衰变回相同的初始态，而不会受到振动激发，如图 3 所示。近期，轻双原子分子已被囚禁在磁光阱中（Barry et al., 2014; Truppe et al., 2017; Anderegg et al., 2017; Collopy et al., 2018），冷却至微开尔文温度（Cheuk et al., 2018; Caldwell et al., 2019），并转移到保守

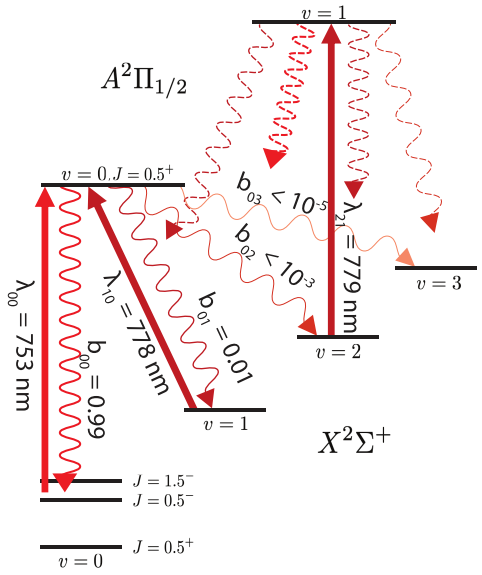

图 3. RaF 的激光冷却方案（Isaev 等人，2010年；Garcia Ruiz 等人，2020年；Udrescu 等人，2022年），其振动分支比基于实验测量和理论预测。

磁阱（Williams et al., 2018; McCarron et al., 2018）或光阱（Anderegg et al., 2019; Langin et al., 2021）中，适用于具有长相干时间的精密测量。已发现多种含有重原子的物种适合激光冷却，包括 RaF（Isaev et al., 2010）（见 3）、YbF（Tarbutt et al., 2013; Lim et al., 2018）、BaF（Aggarwal 等人, 2018）、RaOH（Isaev et al., 2017; Kozyryev and Hutzler, 2017）、YbOH（Kozyryev and Hutzler, 2017; Augenbraun et al., 2020）、HgF（Prasannaa et al., 2015）、TlF（Cho et al., 1991; Hunter et al., 2012; Grasdijk et al., 2021）和 SrOH（Kozyryev et al., 2017; Gaul and Berger, 2020a; Lasner et al., 2022）。近期研究表明，一些分子阳离子，例如 $AcOH^+$，也可用于激光冷却（Oleynichenko et al., 2022）。由于减慢重分子需要散射更多光子，使用更重、更复杂物种开展实验更具挑战性，但相关研究正在迅速推进，已在一维和二维中实现光子循环和激光冷却（Kozyryev et al., 2017; Mitra et al., 2020; Augenbraun et al., 2020; Lim et al., 2018），并近期实现了多原子分子的磁光囚禁（Vilas et al., 2022）。

3.6. 由激光冷却原子组装

实现大量超冷囚禁分子的一种有力方法，是原位利用超冷原子组分将它们组装起来。与直接激光冷却分子相比，这种方法的显著优势在于，只需将原子冷却到所需的超低温即可；对于许多原子种类，这方面的技术已经十分成熟。未束缚原子可以通过结合使用 Feshbach共振和/或激光跃迁，以相干方式驱动至束缚态——包括绝对

基态。据报道，这使超冷囚禁原子能够转化为超冷囚禁分子，转化效率最高可达 $\approx 50\%$（Duda 等人，2021）。这一过程已在多种由两个碱金属原子组成的双原子物种中得到验证（Ni 等人，2008年；Rvachov 等人，2017；Hu 等人，2019年；Park 等人，2015；Seeßelberg 等人，2018年；Yang 等人，2019年；Liu 等人，2019年；Guo 等人，2016年；Molony 等人，2014年；Takekoshi 等人，2014年；Voges 等人，2020年）；这些原子最容易冷却和囚禁。此类实验已制备出大量超冷光学囚禁分子，其温度为 ~ 100 nK，（核）自旋相干时间接近 10 s（Gregory 等人，2021）。然而，将这种分子组装技术用于对称性破坏实验，仅限于能够由激光冷却原子形成的分子。

直到最近，由两个可激光冷却、同时对电偶极矩或核希夫矩具有高灵敏度的原子组成的分子仍未被发现（Meyer and Bohn，2009年）。此外，迄今为止，人们只组装出了具有闭合电子壳层的分子，尽管目前也在大力推进将相关技术扩展到含有未成对电子的物种（Barbé et al.，2018年；Wilson et al.，2021年）。在最近的一项提案中，Ag被认为是一种很有前景的类碱金属原子，可与较重的、可激光冷却的放射性同位素（如钫或镭）配对（Fleig and DeMille，2021年；Kłos et al.，2022年）。这种实验有望通过在超低温下囚禁所实现的长自旋相干时间，以及能够制备的大量分子，对CP破缺物理达到极高的灵敏度。为了实现这类系统，还有许多重要的前期工作需要完成，例如实现由共囚禁Ag原子与近简并的钫或镭组成的近简并气体，并预测和寻找必要的Feshbach共振（Chin et al.，2010年）及受激拉曼跃迁（Bergmann et al.，2019年），从而将分子制备到所关注的科学态。最后，光学囚禁超冷分子平台有望利用自旋压缩等先进技术进一步提高灵敏度（Hosten et al.，2016年；Aoki et al.，2021年；Takano et al.，2009年；Tscherbul et al.，2022年；Bilitewski et al.，2021年），或应用有前景的新型CPV测量方案（Verma et al.，2020年）。

3.7. 离子俘获

离子阱利用各种电磁场构型囚禁带电粒子，其中最常见的两种是彭宁阱和保罗阱。离子阱作用于粒子的电荷，其稳定性仅取决于粒子的荷质比。俘获机制不受原子或分子内部结构影响，因此能够灵活地处理种类繁多的物种。典型的离子阱足够深，可以囚禁温热的原子或分子，同时还能抵御被俘获离子与中性背景气体粒子之间的弹性碰撞。库仑相互作用限制了被俘获离子的密度，但测量相干时间（Zhou 等人，2020年；Wang 等人，2021年）可以很长，通过重复测量（通常针对同一批被俘获离子），可以实现较低的统计不确定度。此外，离子-

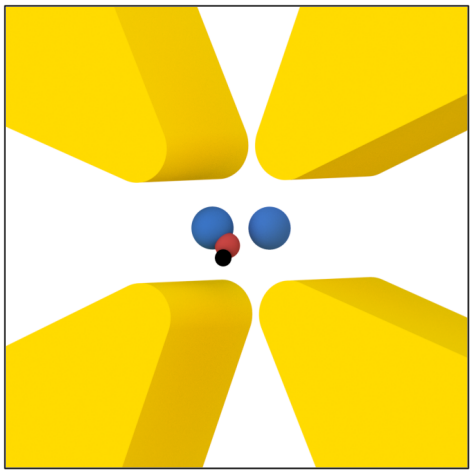

图 4. 离子俘获的本质：少量粒子可以长时间囚禁，无需激光探测。图中展示了一个带电原子（例如镭$^{+}$）和一个囚禁在保罗阱中的分子离子。离子阱的射频（RF）电极（金）在径向约束离子，其工作原理与四极杆质谱仪相同；轴向约束则由直流电极提供（图中未显示）。这种俘获机制只取决于粒子的电荷和质量，因此与其内部结构无关。离子阱非常深，可由坚固可靠的射频和直流电源产生，因此能够连续囚禁离子数周（Olmschenk 等人，2009年）。放射性分子可以在阱中合成：先囚禁放射性离子（例如镭$^{+}$、锕$^{2+}$、镁$^{+}$），然后引入中性气体试剂。与中性原子或分子实验相比，粒子数灵敏度有所降低，但在一定程度上可以通过较长的测量相干时间来弥补。

囚禁系统可以经过表征以实现高测量精度（Brewer 等人，2019年）。利用少量原子或分子实现高精度测量的能力，使离子阱成为高效研究放射性物种的理想选择。

近期，稳定分子离子领域取得了与其放射性对应物相关的进展。在 JILA 的一项实验中，研究人员使用了一个相对较大的离子阱来囚禁 HfF^{+} 分子，并通过测量对电子电偶极矩的大小设定了上限（Cairncross 等人，2017；Roussy 等人，2022年）。在这项实验中，旋转电场使囚禁的分子极化，随后采用态选择性光解离进行读出（Zhou 等人，2020年）。

利用共阱的激光冷却原子离子对分子离子进行伴随冷却，可以制备低温分子样品。对于荷质比相近的原子离子和分子离子，原子与分子的运动通过库仑相互作用强烈耦合，从而使分子运动温度与激光冷却原子的温度相关联。采用这种技术，已将大型库仑晶体中的多达 1,000 个分子离子冷却至 100 mK（Mølhave 和 Drewsen，2000年）。这些被囚禁的低温分子是开展光谱学研究的良好起点，因为多普勒效应等谱线展宽效应已得到抑制。

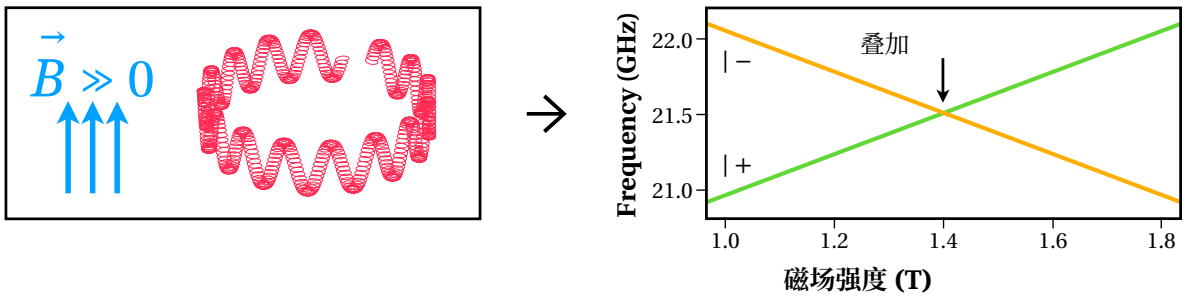

图 5。示意图：囚禁在彭宁阱强磁场中的分子离子，其本征运动（红色曲线）以及由此导致的分子相反宇称能级发生偏移并形成叠加态（右），从而大幅增强强子宇称破坏。

在单个分子离子与单个原子离子共阱的极限情况下，伴随冷却已被用于将分子冷却至运动基态（Wolf 等人，2016年；Chin-wen 等人，2017年）。例如，CaH^+ 经伴随冷却达到运动基态后，研究人员采用一种称为量子逻辑光谱学（QLS）的技术（Schmidt 等人，2005年），将 CaH^+ 制备到单一态中，随后利用 Ca^+ “逻辑”离子对其进行相干控制（Chin-wen 等人，2017年）。(Chin-wen 等人，2017年）中用于驱动分子态之间跃迁的受激拉曼跃迁可避免自发辐射，后者会随机布居转动-振动能级。加入频率梳后，研究人员利用量子逻辑光谱学在不同转动态之间相干驱动跃迁，并以 ppm 级精度测量转动跃迁频率（ Chou 等人，2020 年）。QLS 所提供的相干控制还被用于制备分子转动能级与共阱原子内部态之间的纠缠态（Lin 等人，2020年）。

放射性分子离子，包括 $RaOH^+$ （Kozyryev 和 Hutzler，2017）、$RaOCH_3^+$（Yu 和 Hutzler，2021）以及 PaF^{3+} （Zülch 等人，2022年），已被提议作为搜寻 CP 破坏的研究对象，但目前尚无其实验光谱信息。利用稳定分子和稳定原子开发的 QLS 技术应可直接应用于这类重放射性分子，其中镭$^+$ 或镭$^+$ 可作为单电荷分子的逻辑离子。$RaOCH_3^+$及其同位素体 $RaOCD_3^+$，以及另外两种用于搜寻 CP破坏的候选分子（$RaOH^+$ 和 $RaOD^+$），最近也已完成合成、囚禁和冷却（Fan 等人，2021年）。此后，未发表的研究也在 $RaSH^+$ 上取得了类似成果（Hutzler 和 Yu，2021年；Jayich，2021年）。然而，要将 QLS 应用于这些分子，或几乎任何转动常数较小的非氢化物，都需要低温环境，以抑制黑体辐射引起的转动跃迁激发。在这些低温下，镭基分子等用于研究 CP破坏的目标分子，其初态占据率与室温下的 CaH^+ 相近。

彭宁阱通过施加较弱的静电场和数特斯拉的强磁场来囚禁离子。这些离子阱已成功应用于（Mougeot

等人，2021年）放射性同位素的精密质谱学，因为它们可以直接测量离子的回旋频率（Brown 和 Gabrielse，1986）。目前正持续开展相关研究（Karthein 等人，2021年），旨在利用彭宁阱的强磁场对相反宇称分子态进行塞曼位移，使其形成叠加态（见图5）。正如近期分子束实验所展示的（Altuntaş 等人，2018年），这种叠加态可以大幅增强强子宇称破坏效应，例如核环偶极矩以及依赖于核自旋的 Z^0玻色子在电子与原子核之间的交换（Sushkov 和 Flambaum，1978；Flambaum 和 Khriplovich，1985；Safronova 等人，2018年）（见第2.2节）。因此，彭宁阱能够显著延长相干时间，从而以高精度测量宇称破坏。然而，有必要系统研究不同分子，借助它们随质量变化的不同标度关系，区分宇称破坏的不同来源（见第3.3节）。

3.8. 当代固态方法

在固态中寻找 T 破缺被认为具有很大潜力，因为其中可能存在高数密度的敏感粒子。传统上，这类实验被设计为测量各种经过精心选择的材料中的体线性磁电效应（Shapiro，1968年；Ignatovich，1969年；Bialek 等，1986）：或者（1）将材料磁化，检测由非零原子电偶极矩产生的电极化；或者（2）将材料置于电场中，使非零原子电偶极矩发生取向，并利用灵敏的磁力测量检测由此产生的磁化。已有研究建议将这种方法应用于基质隔离原子（Pryor 和 Wilczek，1987年）和分子（Kozlov 和 Derevianko，2006）。

基质隔离是一种将原子和分子隔离在由仲氢或稀有气体等惰性气体形成的固体中的技术。数密度可以调节到高达 $10^{16}/\mathrm{cm}^3$（1 ppm 掺杂分数）（Xu，2014年），同时仍能使客体物种彼此高度隔离。自旋弛豫时间最终受到相邻客体之间长程偶极相互作用的限制；在这些浓度下，核自旋和电子自旋的自旋弛豫时间最长可分别达到 1000 s 和 1 s（Van Vleck，1948）。尺寸较大的（100 mm^3）光学透明多晶样品相对容易生长，因此可以实现激光操控和基于荧光的读出。当涉及少量掺杂剂时（稀有同位素的情况正是如此），约为 0.3 的掺杂剂俘获效率（Loseth，2020年）颇具吸引力。

利用激光和射频辐射在凝聚相中操控原子（Arndt et al.，1993年）和分子（Hinds，1997年）的想法并不新鲜（Moroshkin etal.，2008年），但近年来再度受到关注（Xu etal.，2011；Vuthaetal.，2018年*b*）。这在一定程度上归因于人们已在基质隔离碱金属原子中实现了光抽运（Kanaginet al.，2013-12；Upadhyay et al.，2016年），并获得了较长（0.1秒）的自旋相干时间（Upadhyayet al.，

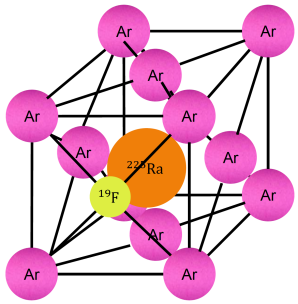

图 6. 固态氩中的 RaF 分子取向。

2020年）这一成果。此外，有人提出，分子会沿着稀有气体固体的局部晶体轴取向，见图（6）；若这一设想得以实现，便可消除电偶极矩测量周期中施加电场所带来的许多系统效应（Vutha et al.，2018年）。结合可生长单晶以抑制非均匀展宽效应的能力，基质隔离分子是开展CP破坏搜索的有前景平台，其统计灵敏度可能比当前电偶极矩限值高出几个数量级。目标放射性分子包括 ^{225}RaF、 ^{225}RaO、 ^{229}PaO和 ^{229}PaN；这些分子可被囚禁并隔离在固态氩或同位素富集的固态 ^{20,22}Ne中（$I = 0$）。主要挑战包括生长杂质（如O{v7）含量极低的掺杂单晶；实现固体中分子的光抽运；实现量子态的散粒噪声极限激光诱导荧光读出；以及为闭壳层分子建立共磁测量方案，以搜索强子源导致的CP破坏，类似于针对开壳层分子的共磁测量方案（Vutha et al.，2018年）。最后，Singh（2019年）介绍了另一种基于激光和射频的方案的机遇与挑战，该方案使用植入光学晶体中的锕系离子，例如 ^{229}Pa。

3.9. 从头算分子理论

电子结构理论在利用放射性分子开展基础物理研究中发挥着许多关键作用。它可用于识别适用于特定实验、处于不同电子态的分子候选体系，而理论研究对于指导正在进行和计划开展的实验至关重要。为此，可以高效采用具有良好可扩展性的独立粒子层次电子结构方法，即哈特里–福克（HF）或密度泛函理论（DFT）（Isaev和Berger，2014年；Gaul和Berger，2017；Gaul等人，2019年；Gaul和Berger，2020年*c*）。这些方法能够在一小时内以低于 20% 的不确定度预测含重原子化合物的大多数分子性质，适用于双原子分子，也可用于多达 100 个原子的体系（Gaul和Berger，2017，2020*c*，*b*；Skripnikov和Titov，2016年）。

理论 也有助于从

实验测量中提取电子和原子核的性质。这些特性包括电子电偶极矩、核磁偶极矩和电四极矩、核 Schiff 矩、磁四极矩以及其他对称性破坏效应。相对论耦合簇方法是处理重原子和分子最有力的方法之一（Visscher 等人，1996；Eliav E 等人，2015）。该方法能够高精度地计算能量及各种参数，这些参数对于解释光谱实验至关重要（Skripnikov，2016；Sasmal 等人，2016；Abe 等人，2018；Kahl 等人，2019；Barzakh 等人，2021；Leimbach 等人，2020；Kanellakopoulos 等人，2020；Gustafsson 等人，2020；Skripnikov，2021；Zhang 等人，2021），并且还展现出强大的预测能力。这种方法也适用于系统且现实的误差估计（Skripnikov 和 Titov，2015；Skripnikov，2016；Leimbach 等人，2020；Haase 等人，2020，2021）。人们为发展多参考组态相互作用方法付出了巨大努力（Fleig，2017a）。

近年来，分子跃迁能的理论预测已达到相当高的精度。例如，现在可以在四分量全相对论分子计算中考虑量子电动力学效应（Skripnikov，2021年；Skripnikov 等人，2021年），其精度与原子计算所能达到的精度相同（Shabaev 等人，2013年；Flambaum和Ginges，2005年）。此外，相对论 Fock 空间耦合簇方法的新进展提升了其精度，并将其适用范围扩展至电子结构复杂的系统（Oleynichenko 等人，2020年）。

如今，Dirac-Coulomb 等哈密顿算符已被常规用于研究小分子的性质。相对论有效芯势等形式上近似的哈密顿算符（Titov和Mosyagin，1999年；Petrov 等人，2002年；Titov 等人，2006，2005年；Mosyagin 等人，2016年）也可以成功应用（Zakharova 等人，2021年；Zakharova和Petrov，2021年）。这两种方法可以结合起来，得到准确的理论预测（Skripnikov，2016年）。还可以直接采用两步法，预测晶体的此类性质，例如振荡核 Schiff 矩的增强（Skripnikov和Titov，2016年）；这一性质与拟用于暗物质搜寻的晶体等系统相关（Aybas 等人，2021年），

理论方法也可用于分析系统效应，并预测置于外场中的分子的性质。例如，可以预测分子的 g因子对外电场的依赖关系（Petrov 等，2014年）。在参考文献（Petrov 和 Skripnikov，2020年）中，研究人员发现了一种对电子电偶极矩灵敏度为零的态，可用于检验 RaF 中的系统效应。此外，他们还发现了对应于相反宇称能级交叉的磁场值。这些数据可用于规划利用 RaF 搜寻 T、P 破坏效应和宇称不守恒效应的实验。在参考文献（Petrov 和 Zakharova，2022年）中，研究人员研究了线性三原子分子的分子灵敏度对外电场值的依赖关系。

3.10. 核理论

正如我们所见，CP破坏可导致核 Schiff 矩，进而诱导分子电偶极矩。因此，要解读分子实验的结果，就必须计算希夫矩对 CP破坏基本理论底层参数的依赖关系。这类计算难度很大。我们关注的重原子核若视为质子-中子团簇，就是包含 200–250 个粒子的强相互作用系统。我们准确计算其性质的能力有限，而希夫矩尤其难以预测，详见第 2.1 节。诱导这些矩的 CP破坏核子-核子势尚不明确；与其他核物理量不同，希夫矩从未被观测到，因此我们无法直接检验计算希夫矩的能力。下文将简要介绍该领域当前的研究水平。

3.10.1. 密度泛函理论 计算重而复杂的原子核性质时，首选工具是核密度泛函理论（Bender等人，2003年）；经验证的全局能量密度泛函（EDF）用于描述有效的介质内核相互作用，其精度往往可达到基于局部优化实验参数的唯象方法的水平，并能将预测外推至核领域的 未知区域（Neufcourt等人，2020年）。核密度泛函理论计算得到的现实核电荷密度和流（Reinhard和Nazarewicz，2021年）可用于定量预测电荷半径、高阶径向矩（Reinhard等人，2020年）、四极矩、超精细相互作用常数，以及提取超越标准模型物理所需的其他矩阵元（Allehabi等人，2021年；Hur等人，2022年）。一项关键挑战是运用先进的不确定性量化工具评估理论预测的不确定性（Dobaczewski等人，2014年；Neufcourt等人，2018年，2020年）。

根据核密度泛函理论，大多数原子核的基态具有椭球形，并保持反射对称性。然而，在少数情况下，原子核可能会自发打破其内禀反射对称性，并获得与梨形相关的非零八极矩；全面综述请参见文献（Butler 和 Nazarewicz，1996；Butler，2020年）。核素图中出现梨形原子核局域区域的必要条件是存在涉及 $\Delta\ell = \Delta j = 3$ 质子或中子单粒子壳层的宇称双重态，其中 ℓ 和j 分别表示轨道和单粒子总角动量量子数。正如文献（Chen 等，2021年）所讨论的，这一条件本身并不足以确定是否会实际出现梨形。预测的反射不对称形变能，实际上源于核结合能中偶数与奇数多极性分量之间的显著抵消。

在电偶极矩搜索的背景下，全局密度泛函理论综述（Möller 等人，2008年；Robledo 和 Bertsch，2011；Agbemava 等人，2016年；Xia 等人，2017；Ebata 和 Nakatsukasa，2017；Cao 等人，2020年）甄别出八极集体性的三个特定区域：缺中子锕系元素、富中子镧系元素，以及对重元素核合成建模具有重要意义的富中子

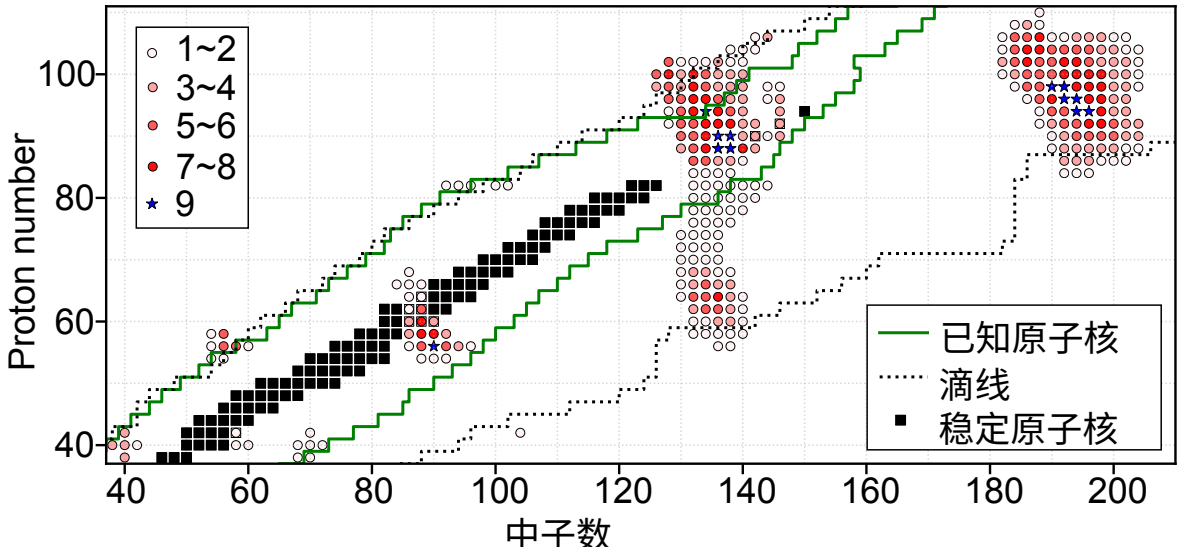

图 7。 偶偶核中基态八极形变的分布。圆形和星形表示预测具有非零八极形变的原子核。模型数目 $m(Z,\ N)$表示预测某个原子核具有非零八极形变的模型数量 $(Z,\ N)$，具体数目由图例标示。已知原子核（即实验发现的原子核）的边界以实线标出。为简便起见，该边界由每种元素已发现的最轻和最重同位素确定。贝叶斯机器学习研究得出的平均双核子滴线（Neufcourt 等人，2020年）以虚线标出。稳定核素以方形表示。

重核和超重核。共有12个偶偶核被系统性地预测为八极形变核：^{146}Ba、^{224,226}Ra、^{226,228}Th、^{228}Pu、^{288,290}Pu、^{288,290}Cm，以及^{288,290}Cf。在中子缺乏锕系区域，除氡、镭和钍同位素外，文献（Cao 等人，2020年）还指出，^{224,226,228}U、^{226,228,230}Pu和^{228,230}Cm具有稳定的梨形。理论上预期唯一稳定的梨形偶偶核是^{146,148,150}Nd和^{150}Sm。系统开展针对奇质量核和奇奇核中梨形形变、宇称双重态及希夫矩的密度泛函理论研究，具有重大意义。通过采用投影技术，对奇粒子系统的探索已取得进展，主要体现在对希夫矩的系统计算方面（Dobaczewski等人，2018年），但仍有大量工作有待完成。正如第2.1节所述，理解八极形变核对于通过核希夫矩实现强子 CP 破坏增强至关重要。

关于核矩的全局密度泛函理论及超越密度泛函理论描述，参见例如（Bonneau 等，2015；Borrajo 和 Egido，2017；Li 和 Meng，2018年；Péru 等，2021年），尽管最初的尝试颇有前景（Sassarini 等，2022年；Bonnard 等，2022年），但这种描述尚未在整个核素图范围内得到充分发展。这里的挑战在于，用一种一致的方法取代在核素图不同区域分别调整相互作用、耦合常数、价空间或有效电荷/g-因子的做法

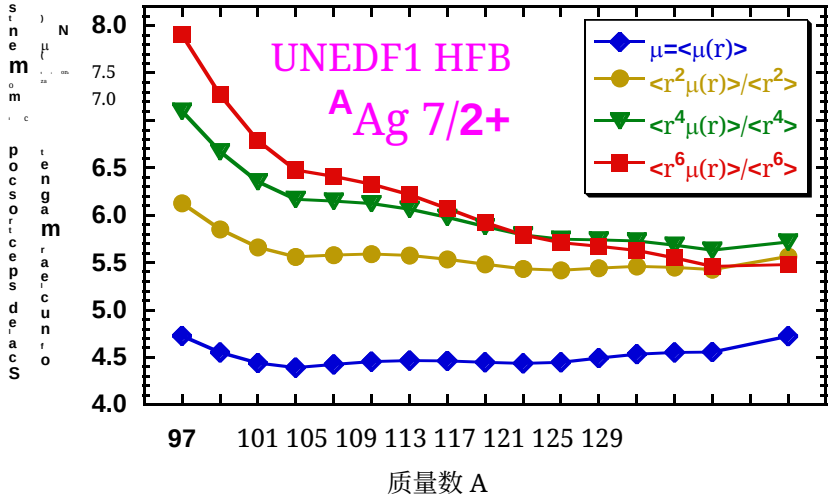

图8。采用 UNEDF1 Skyrme 泛函，在 Hartree-Fock-Bogolyubov (HFB) 密度泛函理论框架内计算的核磁化谱学矩缩放值（Kortelainen 等人，2012年）银同位素中的7/2+ 态。

，即采用适用于任意核素的核密度泛函。对于磁矩而言，这种描述需要改进泛函的时间反演奇平均场部分；迄今为止，这一部分在很大程度上受到忽视，因为泛函标定通常只考虑时间反演偶观测量。这方面的研究将从奇近幻核（Sassarini 等，2022年）开始，逐步拓展到半幻核奇邻核的同位素链和同中子素链（Vernon 等，2022年）以及奇-A 半幻核，最终延伸至开壳层过渡核和形变原子核（Bonnard 等，2022年）。

在小形变下，也就是说，在几乎所有半幻核中，由于 K 量子数发生碎裂（其中 K 表示内禀单粒子角动量在量子化轴上的投影），因此不能依赖标准的强耦合近似。为直接将谱学矩与实验数据进行比较，对称性恢复（Sheikh 等，2021）因而必不可少。这要求开发基于与密度无关的泛函生成器的新型泛函，以确保采用无自相互作用方法（Tarpanov 等，2014；Sheikh 等，2021）。此外，由于奇粒子或空穴对电荷和自旋分布的极化至关重要（Sassarini 等，2022；Vernon 等，2022；Bonnard 等，2022），必须恰当考虑内禀形状与流的相对取向，因为它们可能显著影响结果（Satuła 等，2012）。最后，只要核矩的单参考描述被证明不够充分（Sassarini 等，2022），就需要系统地采用一致的多参考组态相互作用方法（Satuła 等，2016）。

核密度泛函理论还可以给出核磁化的特征 $\boldsymbol{\mu}(\boldsymbol{r})$(磁矩密度)，这对于将观测到的原子或分子超精细性质与核矩联系起来至关重要，见第2.3节。尤其是，

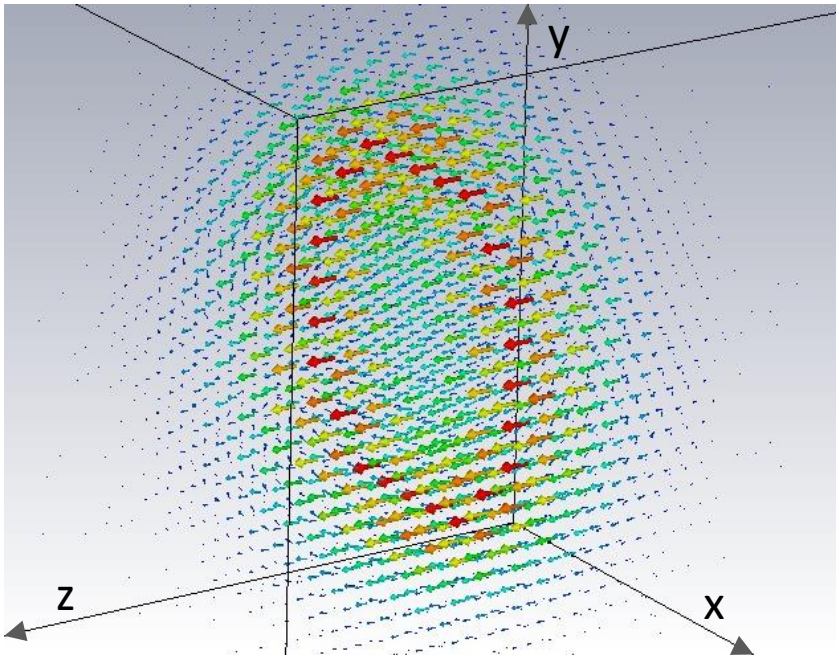

图 9. 在采用 UNEDF1 泛函的哈特里–福克密度泛函理论中计算得到的核总角动量密度（三维表示，包含轨道和自旋部分）（Kortelainen 等人，2012年），对应于 ^{131}Sn 中的 11/2$^-$态。箭头的大小和颜色表示矢量场在空间中给定位置的数值。图片由欧洲核子研究中心的 Nikolay Azaryan 提供。

核磁化的矩，$\langle r^n \boldsymbol{\mu}(\boldsymbol{r})\rangle$ 决定了布赖特-怀纳效应（第2.3节），可通过微观计算得到，而无需依赖简化近似。请注意，核磁偶极矩 μ 对应于磁化的 $n = 0$ 矩。在图8中，我们展示了银同位素中 7/2+ 态的 $n = 0$、2、4 和 6 阶矩的计算结果。可以看到，按相应径向矩 $\langle r^n\rangle$ 缩放后的矩彼此差异显著，这表明，基于单粒子态近似（径向和角向依赖彼此分离）得到的结果可能并不充分。进一步深入研究 $\boldsymbol{\mu}(\boldsymbol{r})$ 非常有必要。

类似地，环形偶极矩（第2.1节和2.2节）是核电流的矩 $\langle r^n \boldsymbol{j}(\boldsymbol{r})\rangle$，可在核密度泛函理论框架内计算，而无需依赖单粒子近似。这样便可以自洽地考虑来自核芯中感生轨道电流和自旋电流的重要贡献。图9展示了此类计算的一个示例，其中可以看到总角动量密度的环形结构。

3.10.2. 从头算过去15年间，我们计算原子核性质的能力取得了巨大进展（Ekström等人，2022年）。从头算计算相较于密度泛函理论等低分辨率方法具有一项关键优势：波函数和算符以一致的方式确定。因此，波函数具有

充分关联的特性。目前，从头算方法的主要缺点，尤其是与密度泛函理论相比，是难以纳入描述电磁矩和跃迁绝对值所需的完整单粒子强度（Vernon等人，2022年；Stroberg 等人，2022年）。另一个缺点是计算重原子核需要大量的计算时间和内存。因此，要系统地应用从头算方法，就必须能够使用我们最强大的计算资源。

两项独立的成就推动了从头算理论的发展：一是基于核子和π介子的手征有效场论（有效场论）构建核相互作用和算符；二是创立和／或改进了多种方法，以受控近似求解核多体问题。有效场论会给出一套完备的算符，在 p/Λ 或 m_π/Λ 的每个阶次上均有贡献，其中 m_π 为π介子质量， p 为核子动量，而 Λ 为理论必须失效的能标，约为 500 MeV，因为除π介子和核子之外的其他自由度也会显现出来。随后，核哈密顿量及其他算符可以写成这套完备算符的总和，并由有限个数值系数（每个阶次）分别乘以这些算符。虽然幂次计数只有在微扰理论中才能保证成立，但在实践中，它在非微扰计算中也相当有效。

现在有多种多体方法可以利用有效场论算符。近期，无芯壳模型（NCSM）（Barrett 等人，2013年）被用于计算轻核的环形偶极矩和电偶极矩（Hao 等人，2020年；Froese和Navratil，2021年）。这些计算的动机是拟议中的测量：在由轻元素铍、镁、氮和碳组成的三原子分子中测量核自旋依赖的宇称破坏效应（Norrgard 等人，2019年）。这些分子具有间隔很近、宇称相反的态，可通过调谐使其简并，从而增强宇称破坏效应（见第2.2节）；要解释这些实验，需要进行从头算核计算。

在无芯壳模型中，原子核被视为由 A 非相对论点状核子构成的系统，这些核子通过真实的二体和三体相互作用彼此作用。多体波函数在由反对称 A核子谐振子（HO）态构成的基底中展开。无芯壳模型计算宇称破坏量所需的唯一输入是哈密顿量，它由宇称守恒（PC）的手征核子-核子（NN）和三核子（3N）相互作用，以及宇称破坏（PV）的核子-核子相互作用构成；后者使非自然宇称态混入原子核基态。迄今已针对 ^{9}铍、 ^{13}碳、 ^{14,15}氮和 ^{25}镁开展了无芯壳模型计算，这些同位素具有实验研究价值（Norrgard 等人，2019年）。

轻核的电偶极矩计算采用相同的方法。只需将宇称不守恒核子间相互作用替换为宇称和时间反演破坏的核子间相互作用，并将环形偶极矩算符替换为电偶极算符。在参考文献（Froese和Navratil，2021年）的无芯壳模型计算中，采用了包含 $\pi-$、$\rho-$ 和 $\omega-$ 介子交换的单介子交换宇称和时间反演破坏的核子间相互作用。该论文报告了 ^{3}He 的基准计算结果，以及以下原子核的电偶极矩结果：

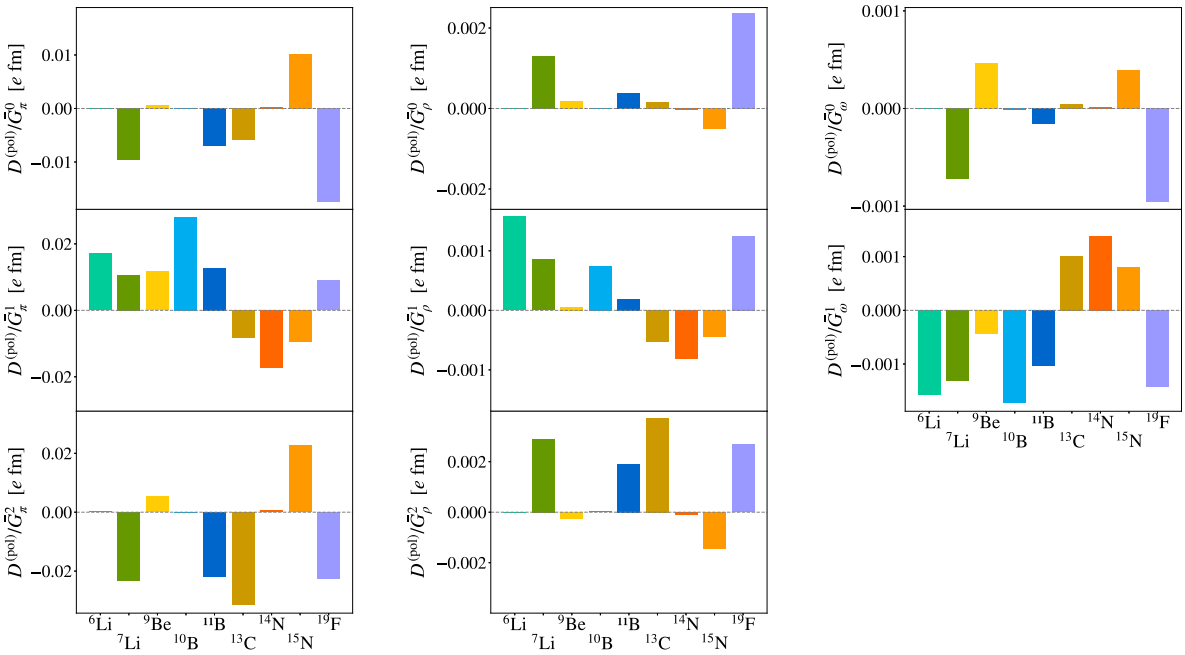

图 10. 稳定 p壳原子核和 ^{19}F（单位：e fm）的电偶极矩极化贡献，该贡献由 χ交换宇称破坏时间反演破坏 NN 相互作用引起，其中 χ 表示 π、 ρ或 ω。顶行（中行、底行）表示同位旋标量（同位旋矢量、同位旋张量）贡献。耦合常数 $\bar{G}^T_\chi = \bar{g}_\chi g_{\chi NN}$ 是宇称破坏时间反演破坏 χ介子-核子耦合常数与其对应强耦合常数的乘积。不同颜色的柱形代表不同同位素。图引自（Froese和Navratil，2021年），其中提供了更多细节。

更复杂的原子核 ^{6,7}Li、 ^{9}铍、 ^{10,11}B、 ^{13}碳、 ^{14,15}氮和 ^{19}F。结果表明，不同原子核可用于探测宇称和时间反演破坏相互作用中的不同项；见图 10。原则上，可以在储存环中测量剥离了电子的轻核的电偶极矩（Abusaif等，2019年）。

轻核环形偶极矩和电偶极矩的无芯壳模型计算可通过多种方式改进。首先，应纳入环形偶极矩算符的高阶项，包括双体流贡献（Haxton等人，2002年）以及类似的双体宇称破坏时间反演破坏算符（Liu和Timmermans，2004）。其次，近期发展的手征宇称破坏和宇称破坏时间反演破坏相互作用（de Vries 等人，2020年；Gnech和Viviani，2020年；de Vries 等人，2021年）可用于替代单介子交换模型力。鉴于无芯壳模型基组大小收敛令人满意，可以乐观地认为，实施上述改进后，轻核核计算的不确定性可降低至 ∼10%。反过来，轻核的无芯壳模型结果可用于对我们接下来讨论的方法——介质相似重整化群（IMSRG）和耦合簇方法——进行基准测试，从而增强我们对这些方法应用于中等质量和重原子核所得结果的信心。

以上内容应已清楚表明，NCSM（以及量子蒙特卡罗）能够在轻核中得出良好的结果。然而，由于指数级扩展，它们无法用于原子和分子电偶极矩实验中所用的重同位素。

正如我们先前所指出的，在这些同位素中，可以采用另外两种方法：耦合簇理论和介质相似重整化群（IMSRG）。

耦合簇理论基于这样一种关于原子核基态的试探形式：一体和二体算符以迭代方式将粒子从已占据轨道激发到空轨道。与所有 从头算 方法一样，通过允许三体、四体等算符同样激发粒子，可以使其达到精确。该方法主要用于计算原子核能谱以及低能态之间的跃迁，但也被用于计算光激发的截面等（Hagen 等人，2014年；Bonaiti 等人，2022年）。最近，该方法还被用于计算 ^{48}Ca 的无中微子双贝塔衰变矩阵元（Novario 等人，2021年），这是一个与本文所研究问题相似的问题。

介质相似重整化群专注于将复杂的物理学纳入有效哈密顿量和其他算符，而不是纳入波函数。该过程通过流方程实现，这些方程逐步变换哈密顿量，使其在用一个简单的“参考态”（例如斯莱特行列式）替代基态时仍能给出正确结果。流方程通过将哈密顿量中把该参考态与其他态耦合的部分驱动至零来实现这一点，从而使参考态成为变换后哈密顿量的基态。与耦合簇相比，该方法在某些方面更加灵活，因为参考态可以自由选择；它不必是斯莱特行列式。与耦合簇理论一样，它已被应用于中等质量原子核中的许多可观测量——能量、跃迁、原子核半径等（Hergert 等人，2016年；Hergert，2017；Stroberg 等人，2019年）。该方法的一种形式——介质生成坐标法（IM-GCM）——从形变平均场态或此类态的混合构造参考态，并将其投影到具有良好角动量的态上。这种复杂的参考态使该方法尤其擅长描述集体性质，例如 E2跃迁（Yao 等人，2020年）。

互补的价空间方法（价空间介质相似重整化群）则会生成一种近似幺正变换，将核芯性质以及有效价空间哈密顿量与完整的 A体哈密顿量解耦。这使从头算 计算的适用范围扩展到标准唯象壳模型的范围（Stroberg 等人，2017），基本上涵盖至少到 $A = 100$区的所有原子核（Stroberg 等人，2021年）（此时对角化可能变得难以处理），同时生成与哈密顿量相一致的有效价空间算符。宇称破坏的物理尤其需要同时包含正、负宇称轨道的价空间；而近期已开发出一种新的多壳层方法来处理这类价空间哈密顿量（Miyagi 等人，2020年）。

介质相似重整化群和耦合簇理论的精度相近，这两种方法面临的主要挑战都是如何高效扩展至实验关注区域的原子核，这些原子核约含 200 个核子。此前，限制 $A \approx 100$ 以上收敛计算的主要因素，是计算能力不足，无法纳入足够多的三核子力矩阵元。然而，最近

在存储此类矩阵元方面取得的突破，适用于采用球形参考态的方法，如今已将收敛计算推进至 ^{132}Sn 区域（Miyagi 等人，2022年），现在可以研究与宇称破坏搜寻相关的关键体系。最近，这一进展还使人们能够对最重的双幻原子核 ^{208}Pb（Hu 等人，2021年）进行收敛计算。

对于这两种介质相似重整化群（IMSRG）变体，必须特别谨慎地处理有效算符，例如 Schiff 算符。不过，与耦合簇理论一样，IMSRG 已用于研究无中微子双贝塔衰变（Yao 等人，2020年；Belley 等人，2021年），也用于研究自旋相关暗物质散射（Hu 等人，2022年），其研究范围已涵盖许多宇称破坏实验所关注的区域；在这些研究中，也必须处理类似问题。目前，针对轻核的电偶极矩初步基准计算正在进行。例如，从与无芯壳模型（NCSM）相同的计算设置出发，价空间介质相似重整化群（VS-IMSRG）给出的结果 $D^{(\mathrm{pol})}/G_\pi^0$ 比 NCSM 对 ^{15}氮的计算结果小约 50%。这一差异表明，需要改进所采用的多体近似，和／或进一步扩展价空间。目前正在开发高阶相似重整化群（Heinz 等人，2021年），并将其扩展至更大的价空间。结合先进的价空间技术（Shimizu 等人，2021年），而非采用蛮力对角化，有望对这里涉及的较重实验候选核作出有意义的相关物理预测。

在基础物理和放射性分子领域，目前以及不久的将来能实现什么？对于轻核——即核子数少于约 20 的原子核——可以使用无芯壳模型和量子蒙特卡罗方法计算几乎所有静态可观测量。只要付出足够努力，对于任何形变不太大的原子核，介质相似重整化群也能做到这一点。因此，例如，直至铯同位素的原子核中的宇称破坏跃迁率和环形偶极矩，现在就可以着手研究。对于同时具有强四极形变和八极形变的轻锕系元素，密度泛函理论仍是最佳方法。只要将必要的代码调整为能够充分利用我们最先进的计算机，IM-GCM 就可以用于研究这些原子核。我们将在第 ^{199}5.3 ^{225}节和第 5.3 节5.4中讨论它们在计算 ^{199}Hg 和 ^{225}Ra 的 Schiff 矩方面的应用。

*3.10.3. CP*破坏的强子理论 由于电偶极矩、核 Schiff 矩和磁四极矩实验都是低能测量，因此可以通过有效场论（EFT）方法来描述不同的 CP 破坏机制。标准模型包含一个四维¯CP破坏算符，即 θ_{QCD} 项；而夸克电偶极矩、色电偶极矩和 CP奇四夸克算符等更高维算符，则可能源自超出标准模型的物理。文献中已对这些更高维算符及其向低能标演化进行了完整的有效场论研究（Dekens 和 de Vries，2013年；Kley 等人，2021年）。

接下来，必须将 CP破坏算符匹配到一种新理论中，用以描述强子自由度（如 π介子和核子）之间的 CP奇相互作用。这种匹配已通过手征有效场论完成（Hammer 等人，2020年）；该理论对于

每一种 CP破坏来源，都会预测不同强子CP奇相互作用的形式及相对大小（Mereghetti 等人，2010年；de Vries 等人，2013年）。拉格朗日量中的重要项包括 CP 奇的 π 介子 - 核子相互作用和核子 - 核子相互作用，也包括核子 - 光子耦合或 π 介子-核子-光子耦合。随后可利用手征相互作用，按照手征幂次计数逐阶计算 CP破坏的核子-核子势和 CP破坏的核电流（de Vries 等人，2020年）。

仍有两个重大的未决挑战。首先，手征拉格朗日量中的每种相互作用都带有一个耦合常数，通常称为低能常数（LEC），而手征对称性论证无法对其进行预测。对于每一种 CP破坏来源，¯例如 $\theta_{\rm QCD}$ 项或夸克色电偶极矩，都必须采用非微扰技术计算低能常数。格点量子色动力学一直在计算低能常数；关于综述，参见文献（Shindler，2021年），但其中许多仍然未知。第二个问题是原子核多体问题。要根据 CP奇核势和流，可靠地计算重原子核的核 Schiff 矩和磁四极矩，已被证明十分复杂（Engel 等人，2013年；Yamanaka 等人，2017）。对于轻核，研究人员采用了从头算方法，将 CP偶和 CP奇的手征核子-核子势结合起来，同时计算原子核波函数和 CP奇矩。相关理论不确定性较小，例如参见（Bsaisou 等人，2015；Froese和Navratil，2021年）。遗憾的是，将这些计算扩展到实验上感兴趣的重核并不简单。

3.11. 放射性原子

放射性分子与放射性原子相关的研究之间存在许多协同效应。目前正在研究某些放射性同位素，因为与其稳定对应物相比，它们具有独特优势。例如，^{133}Ba^{+} 最近因其在量子信息科学领域的潜在用途而被囚禁并激光冷却（Hucul 等人，2017）。Ba^{+} 亚稳态 D 的辐射寿命约为一分钟，可实现高保真度读出；长波长跃迁则使人们能够使用为可见光和近红外光谱开发的光子技术。由于其$I = 1/2$ 核自旋 ^{133}Ba^{+} 还具有其他优势，包括稳健的态制备和超精细量子比特读出，以及可使用 $m_F = 0$ 超精细态和光学“钟”态量子比特；这些量子比特对磁场相对不敏感（m_F 是总角动量的投影量子数 F）。Ba 没有稳定同位素具有 $I = 1/2$。

人们认为放射性是一道障碍，这一直是未开展放射性同位素研究的主要原因，尽管它们具有潜力和独特性质；不过，相关机遇足以克服这些障碍。目前，多个利用放射性原子开展基础物理研究的方向正在推进：利用钫研究宇称破坏和电子电偶极矩（Gwinner和Orozco，2022年；Aoki等人，2021），利用 ^{225}镭进行电偶极矩搜索（Parker等人，2015），开发基于 ^{229}钍的核钟（Peik等人，2021年），实现基于镭的原子钟$^{+}$ （Holliman等人，2022年），以及开发原子

基于高电荷态Cf^{15+} 和Cf^{17+} 离子的原子钟（Porsev 等人，2020年；Barontini等人，2021年）、利用 ^{131}铯搜寻惰性中微子（Martoff等人，2021年），以及利用激光冷却和光抽运研究β衰变不对称性（Fenker等人，2018年）。此外，还可利用各种放射性同位素，通过精密同位素位移测量开展第五种力搜索，以解决标准模型不确定性（Counts等人，2020年）。这些应用也推动了重原子及电子结构复杂原子的原子理论进一步改进（Porsev、Cheung和Safronova，2021年；Porsev、Safronova和Kozlov，2021年；Ginges和Dzuba，2015年；Dzuba等人，2017年）。

3.11.1. 宇称破坏与电偶极矩搜索。如第2.2节所述，所有以往及正在进行的原子宇称破坏实验，都依赖重原子核中观测效应的大幅增强。钫是最重的碱金属原子（$Z = 87$），兼具简单的电子结构和高灵敏度；由于其核电荷较大，它对原子宇称破坏和永久电偶极矩等效应尤为敏感。在 10^6 个原子被囚禁的条件下，TRIUMF 钫俘获设施中的钫实验（Zhang 等人，2016年）已达到样本量要求，为近期计划启动的宇称破坏实验计划做好准备（Gwinner 和 Orozco，2022年）；宇称破坏跃迁的磁偶极跃迁强度最近也已测得（Hucko，2022年）。

在碱金属原子中，^{210}钫对电子电偶极矩（eEDM）的增强因子最大。文献（Aoki 等人，2021年）提出了一种测量电子电偶极矩的方法：将超冷纠缠钫原子囚禁在光学晶格中，并将测量不确定度降至标准量子极限以下。基于量子传感技术的这一测量方案，其统计误差和系统误差估算结果表明，有望将电子电偶极矩搜索的灵敏度提高到低于 10^{-30} e cm 的水平。近期一项理论研究指出，该测量在分析电子电偶极矩和标量-赝标量电子-原子核相互作用的贡献方面具有优势（Shitara 等人，2021年）。钫电偶极矩实验还可用于约束电子之间或电子与钫原子核之间交换类轴子粒子所引起的 P、T破坏效应（Maison 和 Skripnikov，2022年）。目前正在铯原子中开展零磁场原子喷泉电子电偶极矩实验（Wundt 等人，2012年），并计划将实验拓展至钫，以利用其大得多的张量斯塔克位移（Feinberg 等人，2015）。

3.11.2. 镭原子电偶极矩搜索的进展。放射性^{225}镭原子因其显著的核八极形变和较大的原子质量，是搜索永久电偶极矩的理想对象（见第2.1节）。 ^{225}镭从实验角度看也颇具吸引力，因为其14.9天半衰期使得这种同位素可以作为放射源获取，且数量足以支持实验在加速器之外离线进行。其原子电偶极矩的首次测量结果发表于（Parker 等人，2015），测得的上限为 $|d(^{225}\text{镭})| < 5.0 \times 10^{-22}$ e cm（95%置信度）。该研究展示了冷原子技术，可用于研究光学偶极阱中受困 ^{225}镭原子的自旋进动。随后又开展了进一步研究

另一项测量将灵敏度提高了36倍，而对系统误差的详细分析表明，在可预见的未来，这种方法对 ^{225}镭的测量将受统计误差限制（Bishof等人，2016年）。目前正在进行多项升级，以增加原子数（Booth等人，2020年）、增强电场（Ready等人，2021年）并提高自旋进动的读出效率（Rabga，2020年）；这些升级实施后，统计灵敏度将提升数个数量级。从长远来看，通过FRIB进行同位素收集（见第4节）（Ready，2021年）将进一步增加原子数，使积分时间延长至两周以上，并支持对系统效应开展详细研究。

3.11.3. 光学原子钟和核钟的发展。过去十五年间，光学原子钟的精度取得了非凡提升（Ludlow 等，2015；Bothwell 等，2022），目前已达到 $< 10^{-20}$ 分数精度，使得人们能够检验基本常数的恒定性和局域位置不变性（Lange 等，2021）、搜寻暗物质（Kennedy 等，2020）、检验洛伦兹不变性（Sanner 等，2019）以及检验广义相对论（Takamoto 等，2020）。未来时钟的发展将使这些实验的精度提升多个数量级。将高精度时钟部署到太空可用于许多应用，包括检验引力（Derevianko 等，2022）、搜寻太阳束缚的暗物质晕（Tsai 等，2022），以及探测在地球上无法触及的波长范围内的引力波（Vutha，2015；Kolkowitz 等，2016；Fedderke 等，2021）。

这些进展推动了新型原子钟的开发，使其对基本常数的变化具有很高的灵敏度，从而可用于暗物质搜寻。如果基本常数随时空变化，原子和原子核能谱以及时钟频率也会随之变化。基本常数的变化会改变时钟滴答速率，并使其取决于时钟的类型，因为不同原子钟的频率对基本常数的依赖各不相同。超轻暗物质可引发基本常数的振荡和瞬态变化，这些变化可通过比较两台不同原子钟的频率，或比较原子钟与腔体的频率来探测（Safronova 等人，2018年；Kennedy 等人，2020年）。

近期，研究人员利用镭实现了一台光学时钟$^{+}$，这是因为镭有助于为基本常数随时间变化设定限制，而且其波长与集成光子技术兼容，可用于制造可运输光学时钟（Holliman 等人，2022年）。在所有已实现的时钟中，它对精细结构常数随时间变化的正向增强最大，$K = 2.8$。

研究表明，高电荷离子具有适用于高精度原子钟研发的跃迁，且对精细结构常数的变化具有很高的灵敏度，α这是强相对论效应和高电离能的结果（Kozlov 等人，2018年）。人们详细探讨了利用高电荷 Cf^{15+} 和 Cf^{17+} 离子的基态与低能激发态之间的跃迁来研制光学钟的可能性（Porsev 等人，2020年无量纲灵敏度因子 $|\Delta K|$ 对

的变化 α 对于 Cf^{17+} 和 Cf^{15+} 原子钟组合，预测值为 107（见（Kozlov 等人，2018年））。八种 Cf 同位素中有三种半衰期较长： $A = 249$， $I = 9/2$（351 年）， $A = 250$， $I = 0$（13.1 年），以及 $A = 251$， $I = 1/2$（898 年）。目前正在开展一项基于这些 Cf 离子研制光学钟的项目（Barontini 等人，2021年）。

除 ^{229}钍之外， $\tau = 7,800$ 年的核跃迁频率都远远超出激光可达范围。其基态与第一激发态之间能量差的当前最高精度测量值为$8.19(12)$ eV（Peik等人，2021年）；这是近期两项测量的平均值（Seiferle 等人，2019年；Sikorsky 等人，2020年）。这种同位素的独特特性带来了诸多机遇，包括设计一种超高精度核钟，使其对基本常数的变化具有极高灵敏度，这些常数包括精细结构常数 α、强相互作用和夸克质量（Fadeev等人，2020年）。目前，核钟的研发正在进行中（Peik等人，2021年）。

3.11.4. 基于高精度同位素位移测量的第五种力搜索。高精度同位素位移（IS）原子光谱学可用于搜索原子核中子与原子电子之间假想的第五种力。该方法考察King图的非线性：针对一系列同位素，将两种光学跃迁的质量缩放频移相互作图（King，1963）。标准模型对同位素位移的主要贡献——质量位移和场位移——会使两种电子跃迁之间呈线性关系（就不同的同位素位移测量而言）。新的自旋无关相互作用会导致King图出现非线性（Delaunay等，2017；Berengut等，2018）。然而，标准模型高阶贡献也会破坏King图的线性关系（Berengut等，2018），因此必须以高精度进行计算（Yerokhin等，2020），或通过采用更多跃迁和同位素的广义分析将其消除（Mikami等，2017；Berengut等，2020）。初步分析已需要四种偶宇称同位素；要通过广义分析消除标准模型的非线性，则还需要放射性同位素（Counts等，2020；Hur等，2022）。这类同位素位移实验可补充大爆炸核合成和 K 介子衰变所给出的界限（Knapen等，2017）。

*3.11.5. HUNTER*实验：寻找惰性中微子。虽然在上述所有情况下，放射性都是使用重原子所带来的不利副作用，但在使用超冷 ^{131}铯（Martoff等人，2021年）的HUNTER实验中，放射性却是不可或缺的要素。通过总能量-动量重建寻找重型不可见中微子（HUNTER）是一项高精度的实验室规模实验，能够寻找耦合极弱、可能构成全部或部分银河系暗物质的惰性中微子。该实验将对磁光阱悬浮在真空中的一群 ^{131}铯原子中的K俘获事件进行完整的运动学重建。若存在质量为keV/c^2 、并与衰变产生的电子型中微子发生混合的惰性中微子，就会表现为一组彼此分离的事件，其重建缺失质量非零（最大可达衰变的可用能量， $Q = 352$ keV）。

4. 设施中的机遇

用于放射性分子研究的相关同位素，其半衰期可能短至数天到数周；例如钫同位素 ^{223}Fr 的半衰期甚至只有几分钟。因此，这些同位素的放射性特征要求人工制备这些放射性核素。数十年来，全球已形成专门设施网络，为基础研究以及众多不同领域的应用提供半衰期较短和较长的放射性原子。为此，基于核反应堆的稀有同位素生产得到了粒子加速器的补充。在短寿命“奇异”同位素研究的前沿，存在由加速器驱动的放射性离子束（RIB）设施；这些设施在各自的生产机制以及束流形成和输运方法方面各不相同（Blumenfeld等人，2013年）。概括而言，它们可分为两类：采用飞行中分离的设施，以及基于在线同位素分离（ISOL）的生产场所，见图11。在前一类设施中，重离子束通常被加速到每核子数百兆电子伏，并撞击薄靶，以利用入射核碎裂、裂变或熔合蒸发反应等生产机制。（放射性）产物携带入射核的大部分动量，因此保持高能离子束，随后通过飞行中分离器来识别并选择目标离子。快速束流实验可直接受益于这些束流；而低能实验研究则要求先用减速器降低束流速度，随后使其通过离子捕获器或气体池，以耗散剩余的离子能量，并形成可通过静电离子光学系统输运至实验站的离子束。目前主要的飞行中分离设施包括美国的稀有同位素束流设施（FRIB）、日本的放射性同位素束流工厂（RIBF）、法国的GANIL，以及德国的反质子与离子研究设施（FAIR）。

自1951年以来，人们一直采用在线同位素分离（ISOL）方法生产同位素，以制备放射性物种（Kofoed-Hansen 和 Nielsen，1951）。通过将加速器直接连接到质量分离器设施，ISOL方法利用加速后的（轻）驱动束轰击（重）靶核，通过裂变、碎裂和散裂等反应生成反应产物。放射性同位素生成后，目标同位素必须在靶基体中扩散，从表面解吸，并通过靶材料中的孔隙逸出。这一过程称为“释放”，通常通过将靶加热至高于2000 °C的温度来促进。随后，放射性物种必须到达离子源，在那里通过多种技术使其电离，包括表面电离、电子轰击和共振激光电离。电离后的物种经电压差引出，之后可进行后加速、冷却和聚束，或作为带电粒子束送往实验装置。许多靶材料（Gottberg，2016年）和离子源（Kirchner，1996）已在 ISOLDE（Catherall等人，2017）和 TRIUMF（Dilling、Krücken 和 Merminga，2014年）等同位素分离在线设施中得到开发、测试和应用。ISOL方法

ISOL方法不断发展壮大，与此同时，各个ISOL设施也建立起丰富多样的实验项目，以利用现有的放射性束流；其中包括即将在GANIL的SPIRAL2等新建ISOL设施投入使用的束流。

从在线同位素分离和飞行中分离设施的低能分支出发，多个在线实验室的放射性束流可重新加速至最高 $\sim$ 10兆电子伏/核子，以研究和利用各种核反应。在放射性分子的研究背景下，利用这些离子束能量进行（多步）库仑激发实验，可提供关键信息，帮助识别能提高核 Schiff 矩实验灵敏度的八极形变核；尤其是在将其结合到极性分子中时。

对放射性分子本身开展低能实验，需要将针对由稳定核素组成的分子而成熟的实验方法，拓展应用到稀有同位素科学领域。为应对由此带来的挑战，例如短半衰期、可用样本量有限或离子束温度等问题，这些进展将借鉴现有放射性离子束项目积累的丰富经验；这些项目已充分利用原子物理技术所具备的高精度和准确度。其中包括离子与原子囚禁、激光光谱学等应用（Blaum 等人，2013年；Campbell 等人，2016年；Dilling 等人，2018年）。多年来，这些技术不断发展，已能对半衰期不足 10 毫秒的放射性核素开展高精度实验（Smith 等人，2008年），也能研究产额低于每小时一个离子的核素（Ramirez 等人，2012年）。此外，人们还开发了一系列基于缓冲气体（Herfurth 等人，2001）、激光冷却和伴随冷却（Sels 等人，2022年）的装置，可将最初高速和/或高温的离子束高效转化为高质量的冷离子系综。因此，将这些高灵敏度、快速的放射性离子束技术与分子物理学的先进方法相结合，将为放射性离子束设施开启精密测量的新时代。

放射性分子这一新兴领域的形成，恰逢全球新一代放射性离子束设施陆续建成并投入运行，或即将投入运行。这些设施将大幅提升放射性样品的种类和可获得性。多束流设施将增加直接在线获取样品的机会，而同位素收集和发生器源则是持续供应放射性样品的有前景方案，尽管这会增加化学处理和辐射防护的复杂性。此外，这些设施的持续发展预计还将完善实验基础设施，从而有利于放射性分子研究计划，例如改进分子形成过程，或为稀有同位素束流设施的实验人员提供更多实验室空间。下文将介绍已开展或计划开展放射性分子研究的稀有同位素束流设施目前及未来的研究机遇。

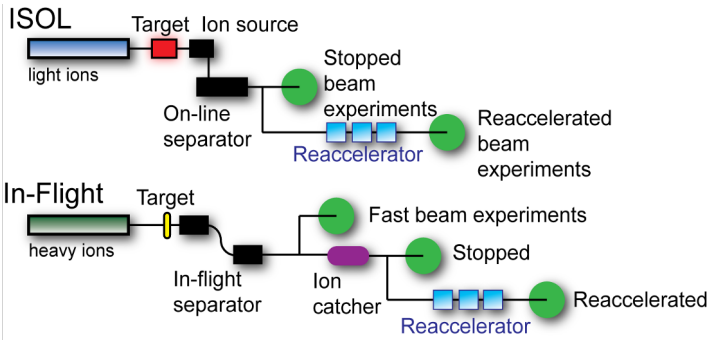

图 11。稀有同位素束：在线同位素分离与飞行中分离。TRIUMF、ISOLDE 和 IGISOL 采用在线同位素分离方法，相关内容将在对应章节中讨论。FRIB 采用飞行中分离方法，相关内容将在 FRIB 章节中进一步讨论。

4.1. FRIB

密歇根州立大学的稀有同位素束流设施（FRIB）于2022年6月投入运行。FRIB 将使研究人员能够前所未有地获取核素图中从氢到锕系区域的放射性同位素。FRIB 将使研究人员能够研究多达约 80% 的同位素，范围从氢到铀（Erler 等人，2012年）。FRIB 采用“飞行中”分离方法（Morrissey 和 Sherrill，1998）。重初级束流，例如 ^{238}铀，被射向碳（石墨）靶。通过多种机制产生的产物形成次级束流，并在飞行过程中进行分离、筛选和纯化（Hausmann 等人，2013年），随后被导向相应的实验区，见图（11）。这些实验区包括快束流区，其次级束流能量接近初级束流能量；停止束流区；以及再加速束流区。后两个区域由离子捕获器供束：离子捕获器先使次级束流停止，再将停止的束流加速至适当能量。这种飞行中技术能够相对快速地获得几乎任何感兴趣的同位素。

FRIB 的核心是一台由 46 个低温模块组成的三段式超导射频直线加速器（LINAC）。该直线加速器能够为从氧到铀的所有重离子束提供 400 kW 的功率。直线加速器的第三段预留了安装另外 11 个低温模块的空间，未来若实施升级，功率可翻倍至 800 kW。预计运行时间中约有一半将使用铀作为初级束流，这对于生产锕系区域的电偶极矩候选同位素至关重要。随后，初级束流可加速至每核子 200 兆电子伏，并射向旋转石墨靶。通过弹核碎裂、核子转移、裂变和库仑激发产生次级束流。未使用的初级束流产物将被引导至水束流倾卸器，并可通过一种称为“同位素收集”的过程提取。纯化后的次级束流随后被引导至三个实验区之一。

通过快速束流区和再加速束流区，可以开展锕系区域八极集体性的研究。停止束流区（见图（12））将可用于

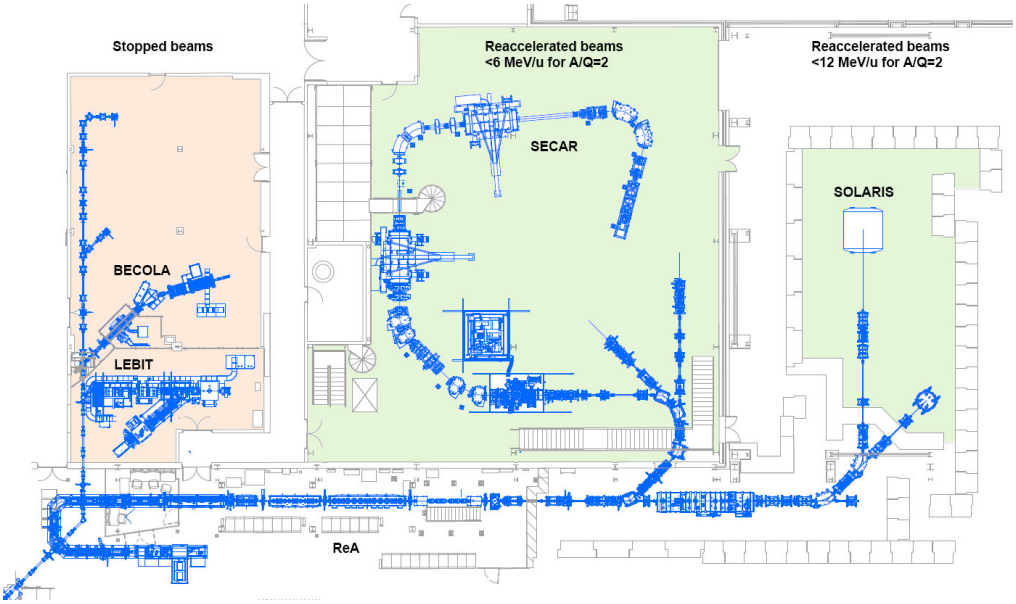

图 12. FRIB：停止与再加速束流区。

利用 BECOLA 的共线激光光谱学（Minamisono 等人，2013年）（束流冷却与激光光谱区）以及 RISE（共振电离光谱实验区）的共线共振电离光谱学，对放射性原子和分子进行光谱研究。多种离线离子源可为停止束流区提供束流，因此无需专用初级束流即可对放射性物种进行激光光谱学研究。这在很大程度上得益于 FRIB 的同位素采集计划（Abel 等人，2019年）。

FRIB 的同位素收集基础设施将在 2023 年底前建成。屏蔽室将用于大量提取气态和溶解态同位素。随后，这些同位素将被运送至同位素处理区（IPA），该区域将配备其他屏蔽室、放射化学通风橱、密封工作台面、适用于开放式放射化学操作的通风设施、安保设施、分析设备以及短期废物储存设施。IPA 将支持各种所需的放射化学操作，以化学分离目标同位素，并使其能够用于离线实验及其他应用。密歇根州立大学化学系还设有多个放射化学实验室，帮助将收集到的同位素转化为可用于离线实验的形式。

从2022年起的约六年间，FRIB 将分阶段稳步提高束流功率，以积累束流调试经验。在此期间，将逐步完善同位素采集计划，使其在 FRIB 于2028年左右达到计划运行功率400 kW时能够稳定运行。如果 FRIB400 项目得以推进，那么根据同位素的不同，核素图上次级束流强度的产额将提高2至100倍。对于锕系区域的电偶极矩候选同位素，同位素收集产额可能会提高到三倍（Gade 和 Sherrill，2019年）。此外，也可以开展专门的实验活动，使用一束

^{232}钍初级束流，与 ^{238}铀束流相比，可使锕系区域的产额提高约一个数量级。K500超导回旋加速器预计仍可用于电子元件辐射测试，以模拟宇宙射线和空间辐射的影响。该回旋加速器还可用于专门的实验活动：将质子束或氘核束射向 ^{232}钍靶，生产锕系区域的电偶极矩候选同位素。最后，目前正在讨论在设施内提供实验空间，以开展基于原子、分子和光学的电偶极矩搜索实验。

4.2. GSI / FAIR

德国GSI亥姆霍兹重离子研究中心于1969年成立，目前运行着一座大型加速器综合设施，其中包括直线加速器UNILAC、重离子同步加速器SIS-18以及实验储存冷却环ESR。该加速器设施可支持多项实验并行运行，例如在UNILAC、SIS和ESR上开展实验。借助UNILAC，所有元素的离子（从质子到铀）均可加速至11兆电子伏/u；借助SIS-18，离子可加速至2吉电子伏/u；在ESR中，则可储存并冷却稳定或放射性离子束，能量最高可达560兆电子伏/u（铀）。

反质子与离子研究设施FAIR目前正在建设中。其中一部分，即低能储存环CRYRING，已经投入运行，可用于开展实验。它与ESR束流线相连，可提供经过冷却的初级束流和次级束流，能量范围从4兆电子伏/u至10千电子伏/u，供原子物理学和核物理学领域使用高电荷态离子开展实验。该设施还配备了内部离子源，可独立开展稳定束流实验。与此同时，GSI现有的加速器设施正在升级，以提高束流强度、进一步增强并行运行能力，并实现FAIR设计指标下的束流运行。目前正在建设一条束流线，将现有的SIS-18（将作为注入环）与新建的重离子同步加速器SIS-100以及FAIR的Super-FRS连接起来；这两者目前都在建设中。Super-FRS将于2025年开始供首批实验使用。

在 GSI / FAIR，依据初级束流和能量的不同，会采用多种核反应来产生奇异原子核，例如聚变、深度非弹性转移反应、飞行中碎裂和裂变。产生的原子核通过大型飞行中分离器与强初级束流分离，例如重离子反应产物速度分离器（SHIP）（Münzenberg等人，1979年）、碎片分离器（FRS）（Geissel等人，1992年）或充气式超锕元素分离器与化学装置（TASCA）（Semchenkov等人，2008年）。飞行中产生的方法能够获得覆盖整个核素图中所有元素、纯度几乎达到百分之百的放射性离子束，从而探讨核与粒子物理以及医学、固态科学和应用科学领域的各种科学问题。

低能放射性离子束的制备依赖于所谓的阻停池（Wada 等人，2003年；Savard 等人，2003年）。在这些装置中，入射的快速离子束

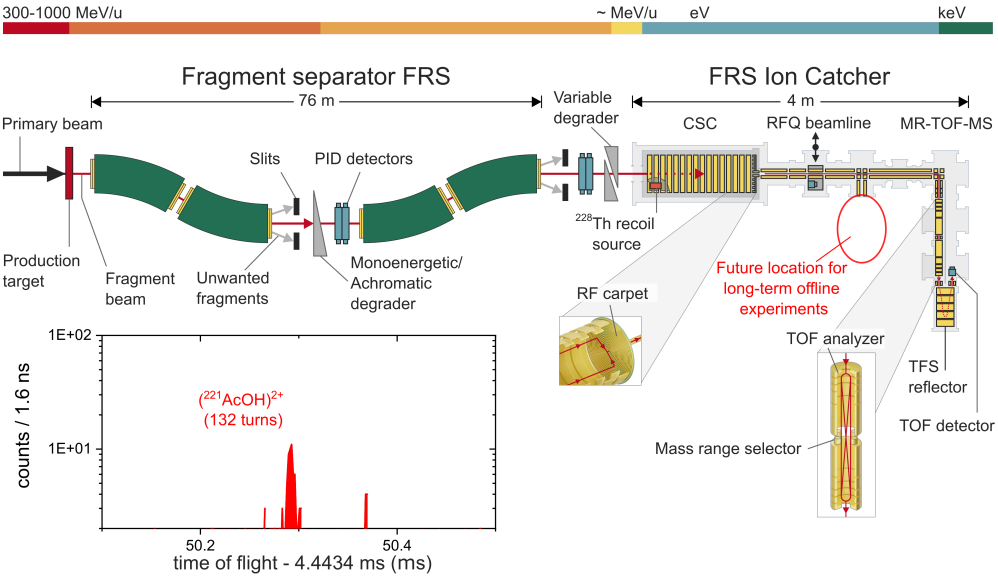

图 13. GSI 的 FRS 离子捕获器示意图。放射性同位素在飞行中产生，并通过 FRS 在相对论能量下进行分离和鉴定，随后在低温停止池（CSC）中停止，再经低能射频四极杆束流线输送至多反射飞行时间质谱仪（MR-TOF-MS）。可使用微量反应物种促进分子形成，例如插图所示的 ^{221}氢氧化锕$^{2+}$ 。此外，CSC 配备了长寿命反冲源，例如 ^{148}Gd、 ^{223}Rn 或 ^{228}Th，可用于 α 衰变子体的离线实验。目前正在开发一个专用实验位置，以便开展更长时间的离线实验，研究放射性离子和分子。

通过与氦缓冲气体碰撞而完全减速并停止。离子热化后，可利用静电场和射频场的组合，将其从气体体积中提取至差分抽气的低能束流线；提取通常依赖射频四极杆（RFQ）离子阱。离子停止后，可将其送入需要低能、高亮度离子束的高精度实验，例如计划在 Super-FRS 低能分支开展的 MATS 和 Laspec 未来实验（Rodríguez 等人，2010年）。近年来，大多数阻停池均采用低温运行，从而提高氦气纯度，进而实现纯离子束的提取。在 GSI / FAIR，已有多个低温停止池（CSC）投入运行，例如 FRS 后方的低温停止池（Ranjan 等人，2011；Purushothaman 等人，2013年），作为 FRS 离子捕获器实验的一部分（Plass 等人，2013年）；以及 SHIP 后方的低温停止池（Eliseev 等人，2008年；Droese 等人，2014年），作为 SHIPTRAP 实验的一部分（Dilling 等人，2000年）。

4.2.1. FRS 离子捕获器中放射性分子制备的现状与未来机遇如图所示，FRS 离子捕获器13专长于停止的碎裂产物和裂变碎片的高精度实验，并作为 FAIR 未来 Super-FRS 低能分支的测试平台。它由四个

主要部分组成：(i) FRS，包括其粒子鉴别系统和减速器系统；(ii) 低温充气停止池（CSC）；(iii) 基于射频四极杆的束流线；以及 (iv) 多反射飞行时间质谱仪（MR-TOF-MS）。放射性同位素在飞行中产生，并在相对论能量下经 FRS 分离和鉴别，随后在 CSC 中停止。热化后，它们从停止池中提取出来，并经低能射频四极杆束流线输送至 MR-TOF-MS，以进行鉴别和高精度质量测量。在 CSC 或射频四极杆束流线的超纯氦气中加入微量反应气体（如 H_2O、N_2 或 CH_4，可能会促进放射性分子的形成（Mollaebrahimi，2021年）。

在独特的低温条件下，可以形成许多特殊分子，其中包括单电荷 XeOH 和 KrOH 放射性分子，以及单电荷和双电荷的 UO、UOH 和 ThO；这些分子已在 FRS 离子捕获器中提取并鉴定。近期，研究人员展示了 AcOH 的提取（该分子可用于宇称和时间反演搜索（Oleynichenko 等人，2022年））。图中展示了 AcOH 的一个质谱示例$^{2+}$，其中含有短寿命的 ^{221}Ac 同位素，见图 13。

此外，利用长寿命放射源，可以从 CSC 提取子体核素的次级束流。截至目前，已提取来自 ^{148}Gd、^{223}Rn 和^{228}Th 放射源的衰变子体，并将其提供给长期实验。例如，研究人员开展了一项为期 135 天的实验，搜索由 ^{224}Ra 产生的稀有衰变模式；该镭来自 ^{228}Th 放射源。未来，^{248}Cu 和 ^{237}Np 放射源有望提供离线束流，其中包含 ^{244}Pu 和 ^{233}Pa离子。目前正在开发一个专用离线实验区（见图 13），供长期实验使用，使研究人员能够从反冲源中收集衰变子体，开展长时间实验。未来还可通过开发专用微型停止池来扩展生产方案，从而在大学实验室开展分散式放射性分子离线实验。

在 GSI / FAIR，先进的高强度低温停止池（Dickel 等人，2016年；Reiter 等人，2016年）与 FAIR 的 Super-FRS 结合，将能够以具有竞争力的强度产生放射性分子，尤其适用于研究含有活性元素的放射性分子；这类研究目前无法通过在线同位素分离方法实现。

4.3. TRIUMF

TRIUMF 是加拿大的粒子加速器中心，1968年以 TRI- 大学介子工厂之名成立。TRIUMF 运行着 500 MeV 回旋加速器，自 1974 年起加速 H^- 离子。高强度的 500 MeV 质子束驱动着稀有离子束同位素分离器与加速器（ISAC）设施（Dilling、Krücken 和 Ball，2014年）。ISAC 于 1995年投入运行。TRIUMF 最近启动了 ARIEL（先进稀有同位素实验室）的建设，旨在大幅拓展核物理、生命科学和材料科学领域的稀有离子束计划（Dilling、Krücken 和 Merminga，2014年）。核物理计划

将拓展其主要支柱：核结构、天体物理学和基本对称性检验。ARIEL 的核心是一台 100 kW、30 MeV 的电子加速器（电子直线加速器），用于通过光致产生和光致裂变生产同位素；此外，还设有一条来自 TRIUMF 500 MeV 回旋加速器的第二条质子束线，用于通过质子诱发散裂、碎裂和裂变生产同位素。ARIEL 还包括两个生产靶及相关基础设施、质量分离器和通往 ISAC 的离子束传输系统，以及用于电荷态提升的电子束离子源（EBIS）。ARIEL 将建立多用户运行能力，可同时提供多达三束稀有离子束，并为 TRIUMF 用户提供更多种类的新同位素。项目计划于 2026年分阶段完成，在施工期间穿插开展科学研究。

放射性束流被输送至ISAC实验大厅，那里配备了一系列先进实验站，可在三种不同的离子束能量范围内运行。后加速束流可达到中等能量（最高1.8 MeV/u），也可借助ISAC-II超导直线加速器达到每核子5–11 MeV。ISAC低能区专用于离子阱和激光光谱学实验、 β-核磁共振、放射性核衰变光谱学，以及可临时在线接入其他项目的束流线端口。

基于原子物理技术的实验项目包括TRIUMF的原子与核科学离子阱（TITAN）。这是一座专用于高精度质量测量（例如Smith等人，2008；Leistenschneider等人，2018）和阱内衰变光谱学（Lennarz等人，2014；Leach等人，2015）的多离子阱设施。目前，TITAN由用于束流制备的线性保罗阱（Brunner等人，2012）、用于质量分离或高灵敏度质量测量的多反射飞行时间（MR-ToF）装置（Dickel等人，2019）、用于将短寿命原子增殖至高电荷态的电子离子束阱（EBIT）（Lapierre等人，2010；Ettenauer等人，2011），以及用于以最高可达精度进行质量测量的彭宁阱（Brodeur等人，2012）组成。此外，ISAC还设有TRIUMF的β衰变中性原子阱（TRINAT）（Fenker等人，2018）；此前，石溪（Gwinner等人，1994）和伯克利（Lu等人，1994）已开展相关研究，而TRINAT则在磁光阱（MOT）中囚禁放射性同位素（Behr等人，1997）。TRINAT的科学计划聚焦于弱相互作用研究和新物理探索（Behr和Gorelov，2014），并与全球范围内的原子与离子阱研究展开竞争（Burkey等人，2022）。TRIUMF的钫俘获设施（Zhang等人，2016；Kalita等人，2018；Gwinner和Orozco，2022）是另一套磁光阱系统，旨在开展一项新的、改进的原子宇称不守恒（APNC）实验。最后，激光光谱学工作或者在TRIUMF共振电离激光离子源（TRILIS）（Li等人，2020；Raeder等人，2013）中直接靠近生产靶进行，或者利用共线构型中的快束流开展（Voss等人，2016）

4.3.1. 离子反应池（*IRC*）下一代实验需要以高纯度和高产额，从RIB中高效在线制备奇异放射性分子。尤其是，随着实验和量子化学理论发现新的物种，对新型定制分子或精细分子的需求将会增加，

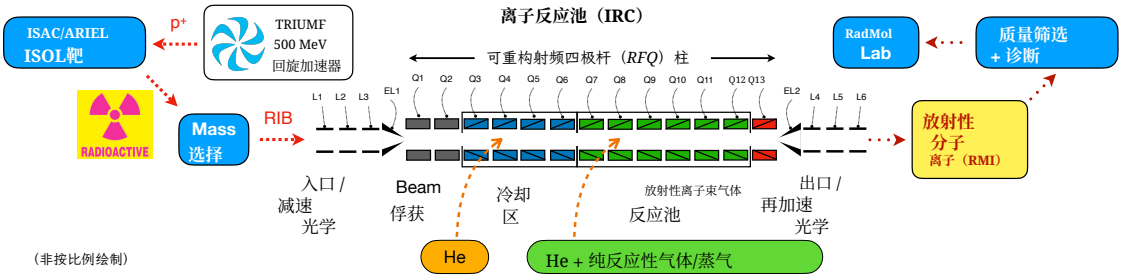

图 14。TRIUMF 离子反应池（IRC）的简化示意图，该装置通过放射性离子束气体化学在线生成奇异放射性分子。

某些稀有分子，包括RaF及其他稳定的伴峰，确实会在使用反应性气体的在线同位素分离靶中形成（Garcia Ruiz 等人，2020年）。然而，热腔离子源和引出系统内部极端的非平衡条件往往会使分子碎裂，极不利于通过优化化学反应形成精细或复杂的物种。随着靶的改进，人们正在着手解决这些难题；然而，仍有严峻挑战（高温和强辐射场、真空度差、显著的同量异位素干扰、不利的能量和靶几何条件、化学反应物使用方面的问题等）。要确保这一领域稳步进展，并通过全面的化学反应路径和反应物实现高纯度、高产额且灵活地制备奇异分子，亟需创新的在线方法。

图 14 展示了离子反应池（IRC）。IRC是TRIUMF新建的射频四极离子导引器和气体反应池，具有三项主要功能：(i) 接收来自ISAC与ARIEL靶站、最高达 1 μA、能量为40 keV（未来改造后可达60 keV）的正放射性离子束；(ii) 在室温下通过可控且特定的气相化学反应，利用放射性离子束生成稀有或奇异分子；(iii) 将新生成的分子输送至TRIUMF即将启用的RadMol设施进行实验。IRC还可接收可能对未来项目有用的负离子。

所有射频四极杆，包括离子反应池、TRIUMF 的 ARQB，以及 ISOLDE 的 ISCOOL 或 ISOLTRAP，均利用振荡的四极电场沿纵轴约束放射性离子束。在离子反应池内，放射性离子束以低马蒂厄q值进行准马蒂厄运动，并在气体中与氦以及氦和反应性气体或蒸气的混合物相互作用，形成分子物种。离子反应池采用专用的束流减速段和再加速段、每个射频四极杆分段上可调的直流梯度杆，以及两级差分抽气、可重新配置的射频四极杆柱，见图14。这种灵活性意味着，可以通过改变反应池的体积和长度、气体压力和碰撞次数，以及使用多种反应气体及其混合物，针对选定的反应调整气体反应池，并微调沿射频四极杆柱的碰撞冷却和离子能量分布。例如，在促使吸热反应进行时，可以精确控制传递给离子的能量，使其达到 <1 eV。随后，可通过高度选择性的化学反应，在亚电子伏特能量下高效优化分子制备

从而最大限度地减少其他非目标分子的形成。

通过为合适的反应性气体提供有利的能量条件，使其电子亲和能接近目标 RIB 离子的电子亲和能，从而实现分子的生成而非破坏（Charles 等人，2015）。精细调节并匹配反应物能量与入射 RIB 能量，可促进化学键形成，从而利用多种试剂，以高产额和高纯度生成种类繁多的分子；这些试剂无法用于热腔在线靶。反应性气体包括氟、氯、氮氧化物、酸蒸气和无机蒸气；它们在同位素分离在线设施的典型 RFQ 中会造成问题。专为 IRC 设计的 Altem 专有配方可确保 RFQ 柱和真空系统具备化学耐受性，并配有半导体级进气系统。第二个进气口改造自气相色谱-燃烧-同位素比质谱法（GC-C-IRMS），用于引入复杂的有机蒸气以及气体和蒸气的混合物。

多年来，分析化学家一直在离子-气体反应质谱法中以多种形式使用射频四极杆。然而，这些系统从未被系统地应用于在线放射性离子束化学。随着 TRIUMF 建设新的 RadMol实验室，离子反应池提供了一种新颖且关键的在线技术，可供同位素分离在线设施用于束流输送，并用于制备多种稀有分子。离子反应池研究关注的分子包括同核和异核物种、许多独特的双原子和三原子物种、复杂大分子、涉及有机化合物的物种，以及其他脆弱或定制的物种。这些奇异而稀有的放射性分子的可用性将推动超越标准模型物理、核结构、医用分子和示踪剂、放射化学以及天体/星周化学方面的研究。

*4.3.2. RadMol*实验室 基于 TRIUMF 产生多种放射性离子束的能力，国际 RadMol合作组力求在 TRIUMF 建立一座专门研究放射性分子和基础物理的实验室。图中展示了计划中的 RadMol实验室示意图 15。实验室将设有三个独立的实验站，通过一条低能束流线直接连接到 TRIUMF 的 ARIEL 和 ISAC 放射性离子束设施。实验室还将为前文讨论的离子反应池（IRC）提供场地和基础设施（见第 4.3.1 节），作为放射性分子的一个生成地点。设施规划还包括一座专用激光实验室，位于楼上一层，紧邻实验站 1 和 2。

2022年2月，该项目已获得TRIUMF内部批准，因此RadMol实验室的详细规划现已启动，包括制定其资金策略。规划包括为低能束线建造一座新楼、建设IRC（图14），以及为一项实验单独设置一个实验室房间（图15中的实验3）。实验站1和2以及激光室均整合在TRIUMF现有的实验室空间内，待其基础设施升级以满足RadMol的要求后即可投入使用。

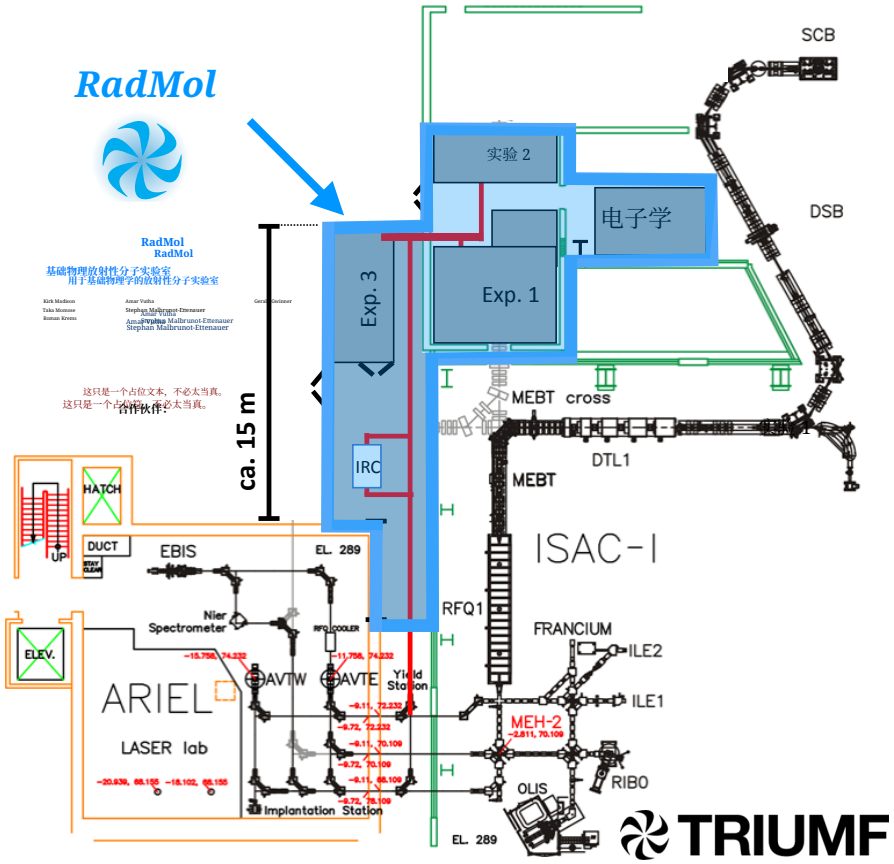

图 15。 TRIUMF 放射性分子规划实验室。新建的低能束流线（红色）将来自 ISAC 与 ARIEL 的放射性束流输送至三个实验站，即实验 1–3。为形成分子，可将离子反应池（IRC；图 14）用于束流输送和分子形成。另设有一间专用激光实验室（未显示），位于实验 1 和 2 附近。

鉴于实验站1和2预计较早启用，研究团队计划首先开展针对寿命较长物种的实验，无需直接在线耦合。为此，RadMol合作组成员设想开发一个减速与注入池，该装置可直接与ISAC或ARIEL耦合，用于收集放射性样品。随后，这些样品可被转移至RadMol实验室，以释放放射性离子——包括注入的离子或子体产物——从而首次开展放射性分子的精密测量实验。

4.4. ISOLDE

ISOLDE是欧洲核子研究中心（CERN）的一座放射性束流设施（Catherall等人，2017），通过用1.4 GeV质子轰击多种靶材来生产同位素，可提供75种以上元素的1200多种不同同位素和同核异能态（*ISOLDE产额数据库，版本0.2*，2021；Ballof等人，2020）。ISOLDE的两个在线靶站与

两台质量分离器（HRS和GPS）相连，可为实验提供原子或分子物种的放射性离子束，以探索核物理、原子物理、核天体物理、基本相互作用物理以及硬、软凝聚态物质研究等广泛科学问题。单电荷原子离子或分子离子的同量异位素分离由磁式质量分离器实现，随后离子以通常为30至50 keV的能量被送入多条实验束线。ISOLDE的实验利用放射性离子束开展高精度质量测量（ISOLTRAP；Wolf等人，2013；Lunney，2017；Mukherjee等人，2008）、衰变性质研究（IDS；IDS Collaboration，2021）、超精细结构和同位素位移测量（CRIS；Cocolios等人，2013）等（Borge等人，2015；Butler，2005；Borge，2014）。ISOLDE还在每个靶站的主靶之后设有两个辐照点，可对标准ISOLDE靶以及材料样品进行辐照。在这些位置辐照的靶可连接至CERN-MEDICIS设施，以离线提取医用同位素（Duchemin等人，2021）；也可连接至ISOLDE靶站，在所谓的冬季物理运行期间提供长寿命同位素。此时ISOLDE仍在运行，但欧洲核子研究中心的加速器综合体不提供质子。近期对RaF的光谱学研究由ISOLDE的CRIS实验在一次延长的冬季物理运行期间完成（Garcia Ruiz等人，2020）。

近期针对 RaF 开展的实验具有里程碑意义，这是首次对短寿命放射性分子进行激光光谱学研究（Garcia Ruiz 等人，2020年）。在这项实验中，研究人员利用来自 CERN PSB 的 1.4 GeV 质子轰击碳化铀靶，在 ISOLDE 制备了氟化镭。CF_4 气体通过校准漏孔注入离子源后部，为分子形成提供氟源。质子撞击时，放射性镭同位素由母体铀靶原子核产生。要形成 RaF 分子，它必须通过高度依赖温度的扩散过程穿过靶材料，找到相应的氟原子。随后，分子在热腔离子源中通过表面电离轻易电离，之后即可提取为束流。对于长寿命同位素，可以在不加热的情况下照射靶，从而限制产物的扩散，并在厚靶基体中收集目标同位素的放射性活度。此类靶随后可留作长寿命放射性分子束源，并进行低温储存。与 RaF 研究中采用的方法一样，之后可将含有长寿命放射性活度的靶单元重新投入使用并加热，以释放剩余同位素，从而无需占用质子束机时即可运行。

分子形成可能发生在放射性物种沿途经过的路径上，从而为离子束产生过程增添另一个步骤。与构成它们的放射性原子相比，分子具有不同的挥发性、蒸气压和吸附焓，因此其释放和电离性质也有所不同。还需考虑其他因素，包括分子的潜在解离和碎裂行为：通过分解较大的分子提高产额，或因目标分子解离而降低产额。以往研究曾探索通过向不同的靶

和离子源组合中通入反应性气体（通过校准漏孔）或引入固体蒸气，观察分子和分子离子的形成（Eder等人，1992年）。几十年来，人们一直在ISOLDE研究分子束（Kirchner，1997年；Köster，2000年；Köster等人，2007年，2008年），以提高活性物种的挥发性，并产生所需同位素的高纯度束流，例如碳（Franberg，2008年）和硼（Ballof等人，2019年）。

氟是电负性最强的元素，会与许多物种反应，形成在ISOL靶和离子源环境中稳定的分子。在多项实验中，人们观测到了氟化物分子的放射性束流，它们以伴峰或污染物的形式出现（BaF、BFx、RaF、SrF），其中有些甚至在不存在活性氟气体的情况下也能观测到。其他类似的伴峰也在多年的运行中被观测到并记录下来（图16 展示了其中一些以及其他尚未观测到的分子），因此它们有望成为研究放射性分子的候选对象。

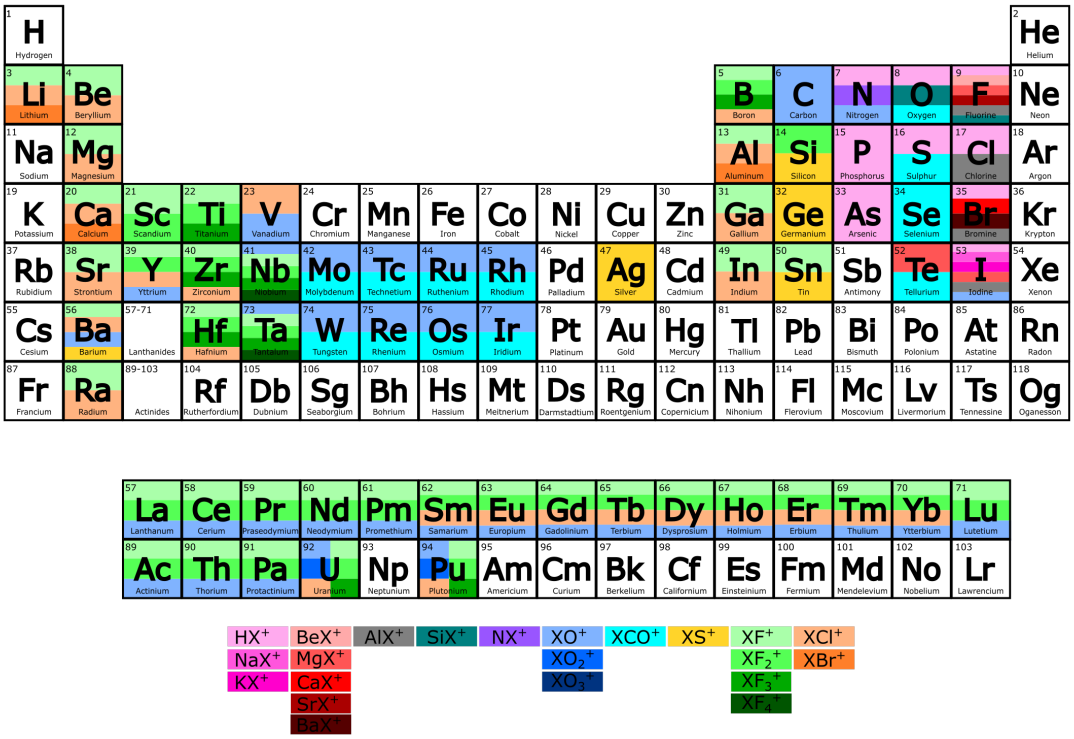

图16。 从ISOL靶和离子源中观测到及预测可能产生的放射性分子离子束汇总（Au和Ballof，2022年）。其中一些分子（例如过渡金属羰基化合物、氧化物或COTe）目前仍停留在概念层面，需要开展离子源开发。除铀以外的锕系元素预计会以多种价态形成化合物，因此需要进行束流开发。等离子体离子源或电子轰击离子源可能导致分子碎裂。

尽管 ISOLDE 已成功制备出多种双原子物种，但对于易碎分子，ISOLDE 各类靶及

离子源的高温环境会导致分子解离和破碎。制备挥发性分子的另一种途径是利用离子阱促进分子形成。离子阱是 ISOLDE 常用的基础工具，广泛用于放射性同位素实验以及制备用于后续研究的束流（Wolf 等人，2013年）。ISOLDE 束流线配备了射频四极杆冷却聚束器（RFQcb），利用直流电势在轴向（沿束流轴）囚禁离子，并以振荡电势实现径向囚禁。离子通常被囚禁在 RFQcb 中，并通过与不断注入的缓冲气体原子反复碰撞而冷却。在 ISOLDE，已在 ISCOOL 射频四极杆冷却聚束器和 ISOLTRAP 射频四极杆冷却聚束器中观察到初级质量分离束流形成分子，这可能是由于与缓冲气体中的污染物发生碰撞所致。采用缓冲气体制备离子的方法，便于有意注入反应性气体，以促使其与放射性物种形成分子。在离子阱环境中已观察到 $^{226}RaOH^+$ 的形成（Fan 等人，2021年）。通过向离子阱中注入微量反应性气体，ISOLDE 有望发展出主动形成并输送放射性束流中多原子对称陀螺分子和手性分子等物种的能力。目前，研究人员正在 ISOLDE Offline 2设施中利用 RFQcb，研究将反应性气体注入缓冲气体以及随后形成分子的过程，所用元素为 Ra 的同族元素。

除了在离子阱内形成分子外，开发一种可在低至环境温度下运行的电子碰撞离子源，还能实现脆弱分子的提取。在常用的多功能弧光放电离子源（VADIS）（Penescu 等人，2010年）中，用于与中性粒子碰撞并诱导电离的电子由加热至约 2000 °°C的阴极通过热电子发射产生。引入通过光电效应释放电子的光电阴极，可使离子源在环境温度下运行。（Ballof、Chrysalidis、Düllmann、Fedosseev、Granados、Leimbach、Marsh、Ramos、Ringvall-Moberg、Rothe、Stora、Wilkins 和 Yakushev，2022年）提出了一种光阴极驱动离子源。概念验证实验（Ballof、Au、Barbero、Chrysalidis、Düllmann、Fedosseev、Granados、Heinke、Marsh、Owen、Rothe、Stora 和 Yakushev，2022年）支持了这一方案的可行性；不过，要实现更高的电离效率，仍需进一步研发。

4.4.1. CRIS 共线共振电离光谱（CRIS）实验是设在 ISOLDE 的固定束流线，用于对放射性原子和分子进行高灵敏度、高分辨率的激光光谱研究（Cocolios 等人，2013年）。在 CRIS 技术中，入射的放射性离子束首先在碱金属蒸气池中被中和，随后利用一系列脉冲激光器逐步进行共振再电离。通过扫描其中一台激光器的频率，并将离子偏转至探测器上，可以研究含有质子中子比极端的原子核的原子与分子系统的超精细结构（Koszorús 等人，2021年）。这些测量通常用于研究长同位素链中核电荷半径和电磁矩的变化规律

（de Groote 等人，2020年），并理解分子结构中的电子、振动、转动和超精细效应（Garcia Ruiz 等人，2020年）。

2018年，CRIS实验首次对一种不含稳定或原始同位素异构体的分子开展了激光光谱学研究，研究了RaF中低能电子跃迁和振动跃迁（Garcia Ruiz 等人，2020年）。此外，通过研究含有不同Ra同位素的RaF分子的电子和振动结构，测量了不同同位素异构体分子跃迁频率的微小变化，并将其与镭原子核的电荷半径随中子数变化的关系联系起来（Udrescu 等人，2021年）。研究结果表明，重的极性放射性分子的光谱可能对核尺寸效应敏感，这进一步为利用分子激光光谱学开展核结构研究铺平了道路。

RaF实验活动是在用质子辐照ISOLDE靶一个多月后开展的，因此得以利用欧洲核子研究中心官方运行期之外的束流时间。随着含有半衰期足够长的不稳定原子核的目标分子数量不断增加，可以设想开展一项无需同步进行质子辐照的广泛研究计划；而短寿命分子的实验则可在质子束流时间段内进行。

下一步，CRIS合作组将首次使用激光光谱学研究AcF的低能电子结构（Athanasakis- Kaklamanakis 等，2021年）。有人提出，AcF的能级对Ac原子核的破坏对称性的Schiff 矩Skripnikov 等，2020年）十分敏感；据预测，对于 ^{227}Ac和 ^{225}Ac（Flambaum和Dzuba，2020年），该矩的数值会异常巨大。利用CRIS技术研究AcF的低能电子结构，将对用于预测其分子性质的量子化学技术进行基准测试；这些技术的准确性对于将来把电子光谱中的宇称破坏测量结果与Ac原子核中存在Schiff 矩联系起来至关重要。

4.4.2. 源内光谱学 在与生产靶相连的离子源中直接应用激光光谱学（Alkhazov 等人，1989年； Fedosseev 等人，2017），并使用专用的、基于衰变识别的粒子探测器，已证明可将灵敏度提高到每秒产生不足 0.1 个离子的水平（Marsh 等人，2018年）。尽管其效率无可匹敌，但仍存在一些局限：非激光相关机制（如表面电离）可能导致同位素污染；此外，释放所需的高温环境会造成多普勒展宽，从而限制可实现的光谱分辨率。专用激光离子源，如 ISOLDE的LIST（Fink 等人，2015）或 TRIUMF的IG-LIS（Raeder 等人，2014年），可大幅降低污染，但代价是效率下降。近期推出的一种采用交叉激光束/原子束几何结构的工作模式（Heinke 等人，2017； Heinke，2019年）还提供了一种提高光谱分辨率的方法，使其接近共线光谱学装置的性能。这项技术此前已在离线条件下用于多种长寿命

无线电活性原子种类（Heinke，2019年； Studer 等人，2020年； Kron 等人，2020年 ）.

4.5. IGISOL

在线离子导向同位素分离（IGISOL）技术（Ärje 等人，1987年；Moore 等人，2014年），于 20 世纪 80 年代初构想而成，是氦喷流法的一种创新改进，用于提供低能奇异放射性束流，其中包含短寿命原子核，可用于核结构研究、核天体物理、基础研究及应用。IGISOL设施设于于韦斯屈莱大学加速器实验室（JYFL-ACCLAB），由一台配备三台电子回旋共振（ECR）离子源（6.4 GHz、14 GHz 和 18 GHz）及一台多极 H^-轻离子源的 K130回旋加速器提供束流。目前可提供能量最高约为 65 兆电子伏、强度达数十微安的初级质子束，并已实现将高强度重离子束加速至铅。第二台高强度 MCC30/15轻离子回旋加速器目前正在调试，建成后将为 IGISOL 实验提供质子（18 至 30 兆电子伏）和氘核（9 至 15 兆电子伏）。该回旋加速器的第二条引出束线或可为未来的靶站带来机遇，后文将对此进行讨论。

在放射性离子束产生的离子导向器方法中，初级束流与薄靶（通常为几 mg/cm^2）相互作用。反应产物从靶中反冲出来，并在压力为几百 mbar 的惰性缓冲气体（通常为氦）中停滞并热化。气体环境中的电荷态重置使大多数反冲离子以单电荷态被提取；不过，如果纯度足够高，也可以提取更高电荷态的离子。多种气体池几何构型和薄靶，加上可供选择的各种初级束流，使人们能够通过轻离子和重离子诱发的熔合蒸发反应、带电粒子诱发的锕系元素靶裂变，以及最近的多核子转移反应，获得种类广泛的原子核。这使得人们能够研究远离β稳定性的原子核，包括缺中子和富中子同位素。这种对核反应产生的初级反冲离子进行直接在线质量分离的方法，对元素周期表中的挥发性和非挥发性元素均实现了相近的提取效率。离子导向器方法的普适性，加上在某些情况下气体池提取时间可短至 $\sim$1 ms，为开展丰富的物理学研究计划提供了极佳机会。

作为离子导向器方案的替代方法，可以采用气体中激光共振电离。该技术利用目标元素独特的原子能级指纹，通过脉冲可调谐激光辐射，使电子从原子基态经共振过程跃迁至电离态。在在线环境中实现这一技术的一项挑战，是使反冲离子中和。通常会使用氩气来促进中和，因为它有助于加快原子离子的复合。光离子在从气体池中提取时因复合而损失，这一问题带来了诸多复杂因素，导致停止区与电离区被物理分离

。然而，这种操作模式更难实现，仅用于特定实验，部分原因在于难以获得与热腔方法等相当的激光电离效率，这是因为气体池中的碰撞退激会与之竞争。

最近，该设施引入了一种互补的靶-离子源系统，用于提取从石墨中释放效率较高的元素。该系统是一种感应加热热腔捕集器激光离子源（Reponen 等人，2015，2021）。与气体池方法类似，它是一种薄靶装置：反应产物从靶中反冲出来，注入热石墨捕集器，并迅速以原子的形式扩散到捕集腔中，随后逸出至传输管。在那里，原子通过多步激光电离被选择性电离。

4.5.1. 光谱技术 无论 IGISOL 采用离子导向器还是热腔捕集器激光离子源，离子首先经由射频六极离子导向器（SPIG）（Karvonen 等人，2008）穿过差分抽气区，随后加速至 30 kV 电势并进入质量分离器。质量分离由偶极扇形磁铁实现，其标称质量分辨本领为 $M/\Delta M = 500$。在质量分离器焦平面的下游，该设施配备了一个射频四极杆（Nieminen 等人，2002），连续离子束在其中冷却并聚束，以供后续实验使用。

外部用户可以使用种类广泛的设备。其中包括用于高精度质量测量，或作为阱后核衰变能谱学质量纯化器的双潘宁阱 JYFLTRAP（Eronen 等，2012年）；新近投入使用的多反射飞行时间质谱仪；用于离子和原子高分辨激光能谱学的共线激光能谱学站（de Groote、de Roubin、Campbell、Cheal、Devlin、Eronen、Geldhof、Moore、Reponen、Rinta- Antila 和 Schuh，2020年）；以及一条衰变能谱学束线。最近，已建成一条新的低能束流线（RAPTOR），用于共线共振电离光谱（CRIS），设计上可接收能量在 1 至 10 keV 之间可调的离子束。与在几十 keV 下运行的标准共线激光光谱学实验相比，该装置产生的多普勒压缩较小，但占地面积更小，并且电荷交换效率可能更高。RAPTOR连接至JYFLTRAP束线，因此可用于同位素纯或同核异能态纯束流的激光辅助质量测量，或用于激光辅助衰变能谱学。最后，IGISOL设施配备了一个专用于囚禁放射性铯同位素及同核异能态的原子阱（Giatzoglou 等，2018年）。2022年，MORA实验建成。这是一项基于阱的实验，旨在探寻由IGISOL产生的放射性原子核发生核β衰变时CP破坏的信号（Delahaye 等，2019年）。

4.5.2. 锕系元素的生产能力中子缺乏的锕系原子核历来是八极形变研究的重点，理论预测在中子数为 N=136 左右时形变达到最大值。直接实验

信息仅在少数几种同位素中有所报道，然而理论研究已指出，铀、钚和锔的若干丰质子同位素是很有希望的候选对象。有人提出，通过测量核电荷半径的相对变化，可以指示原子核中八极形变的出现。IGISOL设施的近期进展为生产这些同位素提供了很有前景的路线图；借助现有基础设施，还可能探索核结构，从而支持全球其他设施开展的相关研究。

近年来，IGISOL设施开展了一项研究计划，旨在研究锕系同位素的核结构。该计划的动因是：镭以上元素的基态核信息十分匮乏，而镭是目前通过共线激光光谱学在线研究过的最重元素。这种数据匮乏反映了材料稀缺以及这些元素原子结构复杂。在线同位素分离器设施无法获得短寿命同位素，因此必须通过重离子碰撞中的聚变反应，或利用放射性靶进行转移反应来生产。尽管高通量反应堆能够增殖足量的超铀元素，但相关研究只能局限于长寿命同位素。

在IGISOL，研究人员采用了三管齐下的方法来生产重元素，并以此推动操控和研究这类同位素的技术发展。首先，他们将气体池内共振激光电离与长寿命锕系元素的热解吸相结合。对于锕系区域而言，灯丝源面临着特殊挑战：许多锕系元素的挥发性相对较差，而且某些同位素稀缺，也使灯丝制造更加困难。与美因茨大学核化学系合作，将含有 $^{238-240}$、^{242}、^{244}钚的样品通过电解沉积到钽基底上。对释放出的原子进行气体池内激光电离，为研究钚所表现出的气相化学特性提供了窗口（Pohjalainen等人，2016年）。单原子产额足以进行高分辨率共线激光光谱学测量，从而测得均方电荷半径和超精细结构（Voss等人，2017）。类似地，研究人员利用维也纳工业大学原子与亚原子物理研究所（ATI）制作的钍分配器，研制出一种钍离子源（Pohjalainen、Moore、Geldhof、Rosecker、Sterba和Schumm，2020年）。

放射性离子束产生的第二种方法是使用 α 反冲源。例如，^{233}U 源已用于产生钍离子源，以研究 ^{229}Th 中的低能同核异能态（von der Wense 等人，2015；Pohjalainen、Moore 和 Sajavaara，2020年）。于韦斯屈莱开展了广泛的靶表征研究，采用 α 和伽马射线的核衰变光谱学，以及基于材料的分析技术（例如卢瑟福背散射谱法），以研究元素组成随靶深度的变化。反冲离子效率对靶厚度、纯度和质量非常敏感。此外，对于气体池中的离子操控，还可以通过引入痕量气体来调节提取离子的电荷态。例如，研究表明，在氦缓冲气体中加入氙，可使钍的电荷态从三价降为二价，这是由于电离势存在差异。

从三价变为二价。这在产生机制导致形成多种电荷态、而其中并非所有电荷态都适用于后续光谱学时很有用。其他可能值得关注的 α 反冲源包括 ^{223}Ra（$\tau_{1/2} = 11.4$ 天）和 ^{239}Pu（$\tau_{1/2} = 24.1$ 千年）。前者常用于通过测量质量分离子体活度来确定气体池效率，其子体为 ^{219}Rn（$\tau_{1/2} = 3.96$ 秒）。目前正在研究后者能否作为激光光谱学的一种潜在途径，用于研究 α 衰变子体 ^{235}U；该核素在核素图中具有第二低的同核异能态，能量为 76 eV。

最后，已经开始探索利用质子诱发聚变蒸发反应，在锕系元素靶上制备更广泛的短寿命锕系同位素，例如 ^{232}Th。通过核衰变光谱学鉴别出了钍同位素，直至 ^{225}Th，以及镤同位素，直至 ^{224}Pa；后者是在蒸发掉 9 个中子后获得的，质量分离产额为 ∼1pps。这些产额是在 60 兆电子伏质子轰击数 mg/cm^2 金属 ^{232}Th靶时测得的。根据截面计算，对于初级束流能量更低的较不奇异物种，预计这些产额会有所提高；然而，由于相关半衰期较长，无法使用传统的衰变光谱学进行测量。近期将尝试使用彭宁阱质谱仪进行离子鉴别，并根据可获得的产额评估未来开展激光光谱学实验的前景。美国茨大学在靶材料开发方面取得了重要进展，形成了一种新型锕系元素靶制造工艺，即使用喷墨打印机的按需滴落（DoD）法（Haas 等人，2017）。首批此类 ^{232}Th 靶已在 IGISOL 的在线条件下进行了测试，并在使用 10 粒子微安、50 兆电子伏质子束连续照射 10 小时期间，对长期产额稳定性进行了监测。已制造出若干 ^{233}U 靶，将为通过轻离子聚变蒸发反应制备奇异镎提供机会。未来将这些反应应用于更重的靶材料，有望显著增进我们对其他同位素链的认识。

4.5.3. 分子束研究的机遇 在采用离子导向器／气体捕集器方法产生放射性束流时，气体纯度对原子离子在从气体池中提取过程中的存活至关重要。分子形成是重要的损失机制，且取决于杂质浓度。另一方面，在 IGISOL 尚未尝试过的一种方法是可控地引入少量杂质，这能以简单的方式促进锕系元素形成分子，直接有利于潜在的放射性分子束实验。图 17展示了我们前述灯丝实验（Pohjalainen等人，2016年）获得的原子钚及相关分子所在区域的质谱。离子在 IGISOL 质量分离器的焦平面上直接测量。在这项工作中，使用氩作为缓冲气体，而灯丝支架意外放气，成为杂质的来源，主要是水和氧。在单原子模式上方 16 u 处观察到第一个分子同位素模式，对应于

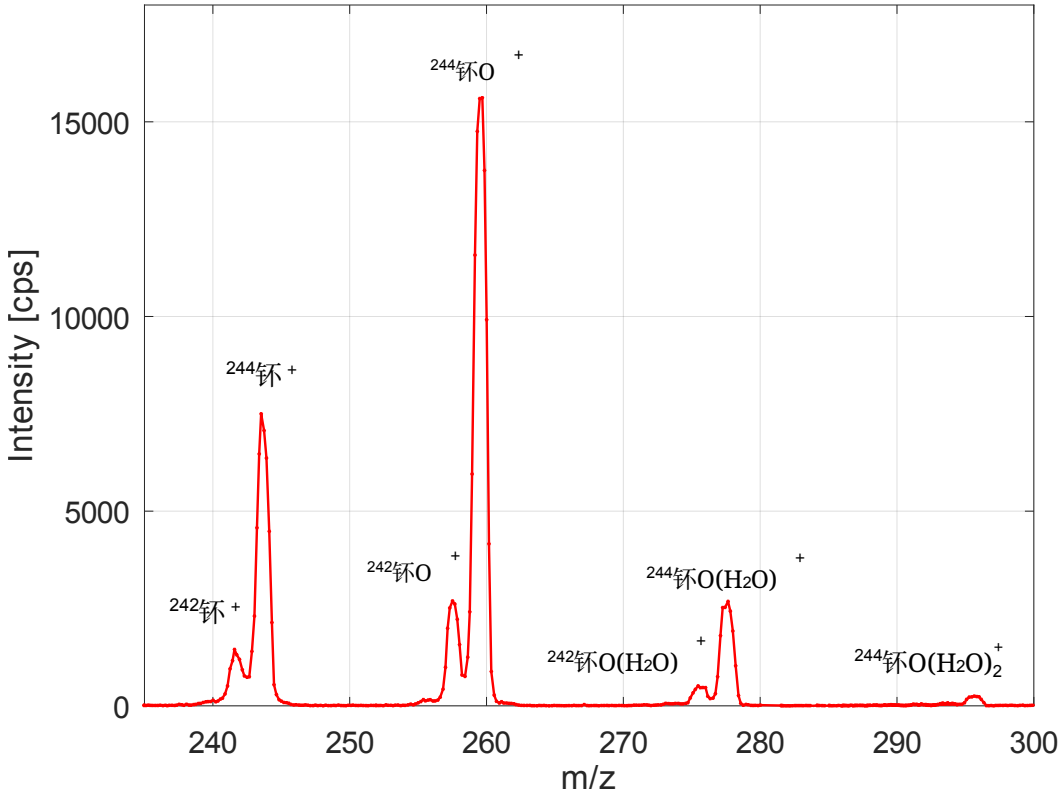

图17。 在 IGISOL 质量分离器的焦平面测得的单原子钚及相关分子的质量谱。可以轻松完成同位素鉴定和分子鉴定。

PuO^+ 离子。随后还会与水分子发生反应，通过三体缔合反应形成氧化物分子的水合物加合物。在钍中也观察到了非常相似的化学反应（Pohjalainen、Moore、Geldhof、Rosecker、Sterba 和 Schumm，2020年），预计其他活泼的锕系元素也会出现这种情况。值得注意的是，这些分子在束流输运过程中不易解离，因此可供研究。

需要指出的是，激光器不会选择性地电离气相中的中性分子；相反，在产生共振原子离子后，这些离子会在从气体池中提取的过程中与杂质发生反应，从而形成分子。通过研究质量分离物种的时间轮廓，如果已知化学反应速率系数，便可确定杂质浓度。气体池设施采用的典型气体净化方法可将杂质含量降至十亿分之一以下。在图 17 所示的示例中，杂质含量估计为百万分之一。

通过可控地引入反应性气体或其他杂质，形成含放射性同位素的分子的潜力，或可推动专用于分子形成的气体池的研发。结合上一节所述制备短寿命锕系元素的多种方法，利用 IGISOL 目前已有的技术，或许能够制备并研究多种含重放射性同位素的分子

。因此，该实验室可成为理想的测试平台，探索各种可能有趣的分子系统。未来还可拓展至加速器实验室现有的研究领域，在那里建设一座类似 IGISOL、专用于分子研究的设施。例如，可将其连接至现有的 K130回旋加速器，或连接至 MCC30/15轻离子回旋加速器的第二条引出束流线。后者目前仅向 IGISOL 实验室提供质子束和氘核束。这样一来，或许就有机会定期进行靶照射，从而开展需要定期获取放射性同位素的测量。

5. 尚待解决的挑战

尽管放射性分子科学及其应用已取得巨大进展，但仍有一些关键问题亟待回答，以便了解其研究范围、影响以及未来可能出现的机遇。以下列出若干亟待解决的优先挑战。

5.1. 测量 ^{229}Pa宇称双重态

稀有同位素 ^{229}Pa于1983年首次被确定为搜索CP破坏的有前景候选者（Haxton和 Henley，1983）。预期（Chasman，1980）它具有八极形变原子核，并存在一组能量间隔较小（50 eV）的相反宇称核态；与 ^{225}Ra已经得到八极形变增强的灵敏度（宇称双重态间隔为55 keV）相比，这将使其对CP破坏的灵敏度提高约 $10^3\times$ 倍，正如第2.1节所述；其灵敏度也将高于作为原子物理标杆的 ^{199}Hg（Graner 等人，2016）。然而，与 ^{225}Ra的情况不同， ^{229}Pa存在宇称双重态及八极形变增强这一点尚未得到实验确认（Dragoun 等人，1993年；Lösch 等人，1994；Ahmad 等人，2015），这主要是因为该原子核历来很难研究，部分原因在于，若$5/2^{\pm}$ 态确实存在，预计它们之间的能量间隔为（60 ± 50）eV（Ahmad 等人，2015）。不过，近年来已开发出一些新技术（Ponce、Swanberg、Burke、Henderson 和 Friedrich，2018），有望用于测量 ^{229}Pa的低能核能级结构，其中一些技术改编自测量 ^{229}Th低能同核异能态的尝试（Ponce、Swanberg、Burke、Faye 和 Friedrich，2018）；此外，还有其他用于测量同核异能跃迁能量的拟议技术（Jin 等人，2022）。

可以在 FRIB 使用高强度的 ^{229}铀束流测量宇称双重态。铀需要先在分离柱中与其他不需要的放射性同位素分离，然后再放入探测器。随后，约 80% 的^{229}铀（半衰期为 58 分钟）会通过电子俘获衰变生成 ^{229}Pa，并使 ^{229}Pa 原子核跃迁至激发态。为测量基态宇称双重态，需要滤除高能伽马射线

以及 ^{229}Pa 的 X射线，以便测量预期的数十 eV 光子，该光子对应于八极形变态之间的跃迁。

5.2. 用于 $\bar{g}_0$、 $\bar{g}_1$ 和夸克色偶极矩的格点量子色动力学

在强子尺度上，超越标准模型的CP破坏相互作用可由有效算符描述，这些算符包含夸克和胶子等自由度。这些有效算符会对单核子、 d_n 和 d_p以及核电偶极矩产生贡献；除夸克电偶极矩算符（即张量流）这一情形外，它们都受到很大的不确定性影响，通常 $\sim 100\%$ (Engel 等人，2013年）。正如第3.10.3节所强调的，另一个尚待解决的重大挑战是确定CP破坏低能常数， $\bar{g}_i$， $i = 0, 1, 2$，原则上每一种CP破坏有效算符都会对这些常数产生贡献。上述两种情况都需要采用非微扰技术；最终目标是利用格点量子色动力学（LQCD），精确、可靠地确定单核子电偶极矩以及CP破坏的π-核子耦合， $\bar{g}_0$ 和 $\bar{g}_1$，它们会对核子-核子势以及核子电偶极矩中的π介子圈效应产生贡献。精确确定单核子电偶极矩和低能常数之所以重要，直接源于它们对原子和分子电偶极矩均有显著贡献。

手征对称性考量为低能耦合提供了初步估算，例如， θ_{QCD} 项对 $\bar{g}_0$有很大贡献，但对 $\bar{g}_1$没有；而夸克色电偶极矩（qCEDM）等有效算符则对 $\bar{g}_0$ 和 $\bar{g}_1$的贡献相同。例如，对于氘核，根据这些手征对称性考量，在 θ_{QCD} 项的情况下，电偶极矩的主要贡献来自单核子电偶极矩；而在 qCEDM 的情况下，主要贡献则来自 $\bar{g}_1$。

格点量子色动力学是精确确定核子电偶极矩和低能耦合的理想方法。格点量子色动力学研究群体一直积极开展研究，以确定不同 CP 破坏源所产生的电偶极矩， $\bar{g}_0$ 以及 $\bar{g}_1$ 综述请参见文献（Shindler，2021）。对于 θ_{QCD} 项，尽管目前计算仍主要受统计精度较低的限制（Abramczyk 等人，2017；Dragos 等人，2021；Alexandrou 等人，2021；Bhattacharya 等人，2021），首批格点量子色动力学结果（Dragos 等人，2021）似乎证实了手征对数（Crewther 等人，1979）的主导作用，并支持基于强子光谱计算对 $\bar{g}_0$的确定（de Vries 等人，2015）。对于夸克色电偶极矩，目前几乎没有格点量子色动力学的测定结果，仅有一些测量裸矩阵元的初步尝试（Abramczyk 等人，2017；Kim 等人，2018；Bhattacharya 等人，2018）。确定强子夸克色电偶极矩矩阵元的主要挑战在于，使用标准 RI-MOM技术时，重整化模式相当繁复（Bhattacharya 等人，2015）。尤其是，最大的系统误差来自幂律紫外发散。基于梯度流的新技术（Narayanan 和 Neuberger，2006；Lüscher，M.，2010；Lüscher，M. 和 Weisz，2011；Lüscher，M.，2013；Lüscher，2014）为确定夸克色电偶极矩及其相应的 $\bar{g}_0$开辟了新的、颇具前景的途径

以及 $\bar{g}_1$（Shindler 等人，2014，2015；Dragos 等人，2018；Kim 等人，2018）。关于非微扰确定夸克色电偶极矩的幂发散的初步结果（Kim 等人，2021）以及对匹配系数的微扰确定（Rizik 等人，2020；Mereghetti 等人，2022）为非微扰确定核子电偶极矩以及 $\bar{g}_1$（源自夸克色电偶极矩算符）做好了准备。另一种确定 $\bar{g}_1$ 的方法，是基于与夸克色电偶极矩算符相关的光谱量（de Vries 等人，2017）。此外，使用梯度流有助于解决重整化方面的挑战。

下一代格点量子色动力学计算的目标，应是改进对核子电偶极矩中 θ_{QCD} 项贡献的确定，以及相应的$\bar{g}_0$；并首次可靠地确定夸克色电偶极矩及其相应的 $\bar{g}_0$ 和 $\bar{g}_1$。这些计算将为重核和分子电偶极矩研究提供宝贵的参考。

5.3. 改进 ^{199}Hg 核 *Schiff* 矩的计算及其与 *CP* 破坏 πNN的关系

即使成功地将 CP破坏低能常数与其背后的 CP 破坏物理联系起来，仍然需要将低能常数直接与分子电偶极矩联系起来。计算链中的一个重要步骤，是计算 Schiff 矩对低能常数的依赖关系。为此，需要应用第 3.10节讨论的方法。

在核密度泛函理论或壳模型中计算 ^{199}Hg 的 Schiff 矩，结果仍存在显著的不确定性。在密度泛函理论中，我们可以采用更好的泛函，并更忠实地再现软基态；这需要一种称为生成坐标法（GCM）的多参考技术，将不同形状的平均场叠加起来。壳模型计算则可受益于如今能够采用的更大空间，以及对这些空间之外激发态的更好处理，例如在壳模型基础上应用多体微扰理论。然而，核物理中的微扰理论颇具挑战性，应用它需要大量工作。

尽管关于到激发态的 Schiff 强度分布，或作为替代方案，关于到这些态的同位旋标量偶极强度分布的数据，对于约束用于计算 Schiff 矩的模型将极其有用，但从长远来看，获得更可靠 Schiff 矩的最大希望在于从头算计算（见第3.10节）。介质相似重整化群的一种特定变体——称为价空间介质相似重整化群——有望用于计算近球形或软形变原子核（例如 ^{199}Hg）的 Schiff 矩。在这种方法中，参考态通过流演化被驱动为仅与价壳模型空间内的态耦合，因此有效哈密顿量 H 以及其他有效算符可以像普通壳模型计算中的组成部分一样使用。这里对有效算符的确定将比迄今为止所做的任何工作都更加困难，因为破坏时间反演对称性的核子-核子势会将壳模型态与其他相差

数个兆电子伏的态耦合起来。只要投入足够的努力和计算资源，就应该能够完成一次良好的计算。

计算上更简单的低分辨率方法，在这里仍能发挥重要作用。核密度泛函理论，见第 3.10.1 节，尤其有用，因为它灵活，能够处理形变及其他类型的集体性，而且对现有计算机的要求相对较低。分析 Schiff 矩与其他可观测量（例如八极形变核的本征八极矩）之间的相关性，已证明有助于完善这一方法。未来几年与 DFT 相关的首要任务，是构造能够通过形状混合来描述 ^{199}Hg 软基态的波函数。用于实现这一点的技术已相当成熟，但尚未应用于 Schiff 矩问题。

5.4. 改进放射性同位素计算以提升 *CP* 破坏灵敏度

如第 2.1 节所述，放射性同位素中的八极形变可以增强 Schiff 矩。这类原子核中的计算与例如 ^{199}Hg 中的计算大不相同。CP破坏势会将基态与许多其他态耦合起来，但在存在八极形变时，其中只有一个态至关重要：基态的宇称双重态伴态。此外，任何类型的强形变都需要以本征形变态为基础。这排除了壳模型以及一些基于壳模型的从头算方法。处理八极形变的 DFT 方法现已相当成熟，见第3.10.1节。尽管这些方法仍可改进，但同样地，在缺少能够约束基态与其相反宇称伴态之间 Schiff 算符矩阵元的数据时（见下一小节），从头算计算最有望取得显著进展。对于具有强形变（无论是四极形变还是八极形变）的原子核，介质生成坐标法（IM-GCM）或耦合簇（CC）方法都很有用。在这些方法中，参考态是形变平均场态，或是这类态的混合，并投影到具有良好角动量的态上。这样，集体物理便被纳入参考态本身。尽管对真正重的原子核进行 IM-GCM 或 CC 计算需要耗费大量 CPU 时间和计算机内存，但只要投入足够的努力，仍然可以实现（正如它们在 Hg 中的对应计算一样）（Hu 等人，2021年）。

5.5. 电偶极矩测量中的八极关联原子核

在一些可借助现代原子与分子技术开展电偶极矩搜索的元素中，已发现具有低能宇称双重态的原子核，这些双重态可能通过八极关联增强 Schiff 矩。核实验面临的挑战包括表征八极效应，其形态涵盖从振动结构、八极软系统到稳定八极形变；不同计算往往得出相近的 Schiff 矩增强结果，但具体细节却大相径庭。八极关联在多大程度上影响宇称双重态的原子核波函数，有时仍存疑问，因为其他核结构效应也可能

产生能量接近的相反宇称态双重态。关于大多数案例的实验和理论证据，已有三十年来的综述对此进行了审慎考察（Butler 和 Nazarewicz，1996；Butler, P. A. 等，2020年；Ahmad 和 Butler，1993年）。相关文献索引见资源论文（Behr，2022年）。理论方面的挑战已在前文讨论。

5.6. 放射化学与分子制备

过去几十年间，相关技术不断发展，使研究人员能够更安全地处理放射性材料，同时这些材料的可获得性也有所提高。尽管取得了这些进展，在能够以毫克规模制备的锕系元素中，镤仍然是研究极少的元素（Wilson，2012年）。这是因为镤同位素的产量极低，而且镤的溶解度极低，因而难以开展研究。此外，镤容易吸附在玻璃表面上，使其操控愈发困难。镤的性质与过渡金属铌和钽相似，具有稳定的五价态；同时也与早期锕系元素相似，具有易于形成的四价态。与铀、钚和镎不同，镤形成的是单氧离子，而非铀酰、镎酰和钚酰所具有的双氧离子，因此这些元素对于模拟镤化学的帮助较小。

为了优化使用 ^{229}Pa的实验——其半衰期为1.5天——最好先使用铌或钽等非放射性类似物，然后再转向半衰期更长的镤同位素，最终使用 ^{229}Pa。 ^{231}Pa 是半衰期最长的镤同位素，半衰期为32,760年，可从铀矿石中分离获得。从铀矿石中分离 ^{231}Pa是一项规模巨大的工作，自20世纪60年代以来就再未进行过。第二长寿命的同位素是 ^{233}Pa ，半衰期为27天。尽管 ^{233}Pa是在核燃料循环中通过对 ^{232}Th 进行中子辐照而产生的，但分离和纯化工艺，加上其较短的半衰期，使得分离该同位素用于宏观化学研究徒劳无功，尤其是与 ^{231}Pa (Uribe，2018年）相比。由于缺乏易于获得的镤源，而且镤是研究最不充分的锕系元素之一，因此为 ^{229}Pa 研究设计一种源是一项巨大挑战。

此外，一旦靶针对实验完成优化， ^{229}Pa 的半衰期为 1.5 天，因此具有较高的比活度；随着样品衰变，仅由辐射和原子反冲就会导致严重的材料退化。这可能使材料嵌入样品托，并使样品发生辐射硬化，因而难以从靶中提取实验所需的材料。尽管可以优化靶材制备的化学过程，样品退化这一固有问题仍然存在。

能够以较高产率制备且半衰期足够长的放射性同位素，可以收集到足够的量，用于制备可供离线研究使用的样品。存在多种方法可以制备适用于此目的的薄

层或放射性同位素，例如，手动移液或对溶液进行按需喷墨打印（DoD）（Haas 等人，2017），或者从有机溶液中进行电化学沉积，这种方法称为分子电镀（Parker 和 Falk，1962年；Vascon 等人，2012年）。激光烧蚀是一种常用技术，可制备这些物种的（单）带电离子，使其能够用于实验。该技术相当简单，可产生原子离子，并可在第二步中将其转化为分子离子（Heaven 等人，2014年；Fan 等人，2021年），也可直接产生分子离子（Eibach 等人，2014年）。有时，具体生成何种离子物种并不那么重要，例如 Eibach 等人（2014年）通过一氧化物离子测定锕系同位素的原子质量，仅仅是因为一氧化物离子是丰度最高的离子物种，随后再对氧的存在进行校正。然而，许多应用都要求特定的分子物种。对于基底材料、烧蚀层中共沉积的化学物种、烧蚀激光器的波长、激光脉冲持续时间（Shirk 和 Molian，1998年）、残余气体的压力和组成等参数如何影响激光烧蚀过程中特定离子物种的形成，目前尚缺乏详细、系统的认识。这些参数细节的重要性因元素而异，烧蚀元素的化学反应性很可能是关键因素。一个典型例子是反应性极强的元素钍。对钍的研究之所以引人关注，其中一个原因是 ^{229}Th 中存在一种奇特的低激发核同质异能态（Thirolf 等人，2019年），其激发能为 8.10(17) eV，可通过光学方式达到（von der Wense 等人，2016年；Seiferle 等人，2019年；Sikorsky 等人，2020年；Seiferle 等人，2022年）。多项实验致力于研究钍离子的性质，这里列举钙辅助冷却的囚禁钍离子（TACTICa）实验作为一个例子。在初期实验中，研究人员通过激光烧蚀天然金属钍箔，制备了原子 ^{232}Th$+$ 离子（Groot-Berning 等人，2019年）。在 TACTICa 实验中，还将研究其他钍同位素（Haas 等人，2020年），这些同位素无法以金属箔的形式获得。TACTICa 项目也将研究含钍分子，因为它们与基本对称性检验有关（Flambaum，2019年）。此前，研究人员未能从例如通过按需喷墨打印制备的样品中产生原子 Th$^+$ 离子，这可能是由于形成了尚未确定的分子物种，表明仍需开展进一步的系统研究。

6. 机遇

利用放射性分子开展物理学研究蕴藏着巨大机遇，相关领域正处于令人振奋的发展关口。复杂分子的制备、研究和操控方面取得的实验进展，推动了精密测量和量子科学的快速发展。理论方法的发展能够描述并预测日益复杂的重原子核结构。量子化学计算对重双原子分子性质的计算精度可达到百分之一。

近期建成及即将建成的先进稀有同位素设施将大量产生奇异元素，从而开展灵敏度极高的实验。这些努力的持续结合

将开启一个全新的科学时代，并对核科学、高能科学、天体物理学和量子科学产生深远影响。

这一领域前景十分乐观，学界已有并正在开发许多有助于推动科学发展的工具。不过，我们也在下文列出了一些不容错过的进一步发展机遇。

分子结构。即使是最简单的双原子分子，其结构也出乎意料地复杂。要达到开展精密测量或量子科学实验所需的理解水平，针对单一分子物种往往需要多年理论与实验工作的结合。要完整绘制能级图谱并确定不同状态之间的跃迁，需要运用多种技术；目前通常由能力各异的不同团队拼凑完成。尤其对于复杂且较重的物种，一项亟需的关键进展是投入专门力量研究分子结构，并整合、协调所有必要的实验与理论工具。此类设施能够预测并测量涵盖所有能量尺度的分子结构，从光学到微波范围皆可覆盖；若再结合先进的制备方法以及处理放射性物种的能力，就能将这些工作所需时间从数年缩短至数月，大幅减少实现科学目标所需的时间。

用于专门开展精密测量的设施空间。 目前有几处设施具备互补的放射性同位素生产能力。为这些设施增设专用实验室空间至关重要，这些空间应适合开展基于痕量同位素的精密测量实验；由于痕量同位素半衰期较短，不适合在异地开展实验。例如，强子CP破坏实验需要核自旋，而具有核自旋的同位素半衰期通常比零自旋同位素短。这类实验通常需要较长的运行时间：数周甚至数月的数据采集时间，并且需要至少数倍于此的时间，才能详细研究和了解系统不确定度。这些实验还需要能够保持高度温度稳定性（± 1 °C）的环境，以免激光器在测量期间的频率或振幅明显漂移。磁场噪声也是一种棘手的潜在系统误差来源，因此实验室不宜靠近电梯或其他会产生切换磁场的设备。通常，光学实验室空间需要进行 HEPA过滤；需要使用紫外激光时，这一点就更加重要。

各设施的同位素收集。精密测量所需的时间尺度使直接束流使用不可行。因此，除了提供合适的实验室空间外，为现场和异地研究提供离线同位素支持也很重要。FRIB 已规划了用于离线应用的锕系元素收集和纯化能力。ISOLDE 提供辐照站，并能够对冷靶进行辐照，从而生成放射性同位素库存；这些同位素可储存起来，之后再以离子束的形式提取，无需占用束流时间。开发其他设施的类似能力，并大力支持 FRIB、TRIUMF 和 ISOLDE 的相关工作，同样十分重要。寿命较长的同位素（包括零自旋同位素）具有很高的研究价值，因此应使大学研究人员能够广泛获得这些同位素。零核自旋同位素

对于发展技术非常有价值；收集并分发适量的这类同位素，供大学开展研究也十分重要，这有助于简化必须在现场进行的复杂实验。长半衰期的自旋同位素，例如^{229}Th ($\tau = 7,800$ 年)，尤其值得关注，也可以提供给异地研究人员。

计算资源。 分子、核物理和格点量子色动力学计算对这些研究至关重要，并需要大量计算资源和支持。

含有重元素的分子电子结构计算对计算资源的要求很高。因此，要可靠地研究各种系统及其多样的性质，必须将强大的高性能计算（HPC）资源与持续的方法开发相结合。大学及其他研究机构本地安装的专用计算集群，对于该领域的方法开发、探索性研究和短期项目至关重要；而需要最高计算资源的大规模应用，则需要州级、国家级和国际级的专用高性能计算设施。除了配备高性能硬件并持续投资于新技术外，研究进展还极大依赖理论学家的创新思路，例如：i）提出并探索在不同层面检验基本相互作用的新方案；ii）确定适合的分子系统，这些系统应具有显著增强效应和有利的实验性质；iii）开发高效方法，以预测相应的分子性质；iv）描述外场中的分子系统。例如，近年来及未来在研究基本相互作用的相对论电子结构方法、数据整理与压缩算法，以及计算代码的并行化和向量化方面取得的进展，将提升计算效率，并使得对重多电子系统常规应用高度复杂的方法成为可能。由此，理论物理学家便能在合理的时间范围内，对大量性质给出更准确的预测，为规划和解读重放射性分子实验提供必要依据。

随着核多体问题理论研究取得令人振奋的进展，实验也同步发展，核结构研究正取得显著进步。核物理中使用的量子多体方法，在处理复杂系统的其他领域（例如凝聚态物质以及原子与分子物理）中都有类似方法；但核相互作用的独特特征，对当前及未来计算科学的发展提出了特殊要求。借助应用数学、计算机科学和计算硬件领域的进步，从头算 方法如今已能研究远比以往认为可能的重原子核（Hu 等人，2021年）。如今，这些研究还可拓展至复杂的形变原子核，从而使我们能够研究种类显著增多的物理现象。密度泛函理论能够研究目前从头算 方法尚无法触及的大型系统的物理性质。密度泛函理论的结果可以与从头算 方法相结合（Malbrunot- Ettenauer 等人，2022年），从而衔接轻核与重核。为实现

这些研究需要在大规模模拟方面取得重大进展，包括稀疏线性代数、负载均衡，以及在顶尖级计算系统上进行性能优化。同时，还需要在数值优化和不确定性量化方面取得进展，以确定输入的相互作用、解释模拟结果、为实验提供指导，并预测那些难以甚至无法测量的量。

格点量子色动力学计算旨在从夸克和胶子的基本自由度出发，为强子电偶极矩和CP破坏低能常数提供理论上稳健且不确定度得到全面量化的预测。在百亿亿次级计算时代，只要我们高效利用国家实验室目前已部署和计划部署的GPU加速架构，这一目标便触手可及。为了最大限度地利用当前和未来的超级计算机，需要开展的软件开发包括：可在CPU/GPU架构上运行、用于构建核子和π介子关联函数的引擎；用于共享计算成本高昂的格点量子色动力学数据的高性能输入/输出库；以及能够处理大量高度关联且协方差欠采样数据的数据分析套件。

测量八极矩的专门核结构研究。需要在锕系区域开展核结构实验，以校准电偶极矩候选同位素对新物理的灵敏度。需要进行两种不同类型的测量：（1）低能核谱学，精确测量涉及核基态的宇称双重态的能级分裂；（2）库仑激发实验，测量八极（E3）核跃迁强度。由于宇称双重态可能是偶然形成的，因此需要测量强核八极跃迁强度，以确认这些同位素中存在能够放大T和P破坏效应所需的八极集体性。使用基态核自旋非零的同位素开展库仑激发实验尤其难以分析，因为其中涉及大量伽马射线跃迁。因此，这些同位素的八极集体性通常是根据邻近基态核自旋为0的同位素的测量结果推断出来的（Dobaczewski等人，2018年）。FRIB将为此类研究进一步提供进入锕系区域的机会，这可能对确定 ^{229}Pa作为电偶极矩候选同位素具有决定性作用。

对放射化学的支持。放射化学需要周密考虑诸多因素。首先，获取放射性物质不仅需要许可和文件手续，还需要严格准备能够处理此类物质的实验室空间，例如专用通风橱和手套箱、适当的辐射检测设备、专用个人防护装备、进阶人员培训等。用于处理放射性物质的设备和仪器很少能与非放射性材料共用，而且往往必须针对特定同位素，以避免同位素之间交叉污染。因此，与非放射性实验相比，这需要更多实验室用品，并且每个步骤都必须持续采取预防措施以避免污染。放射性物质本身以及各类设备的费用总计高昂，同时还会耗费大量时间、空间

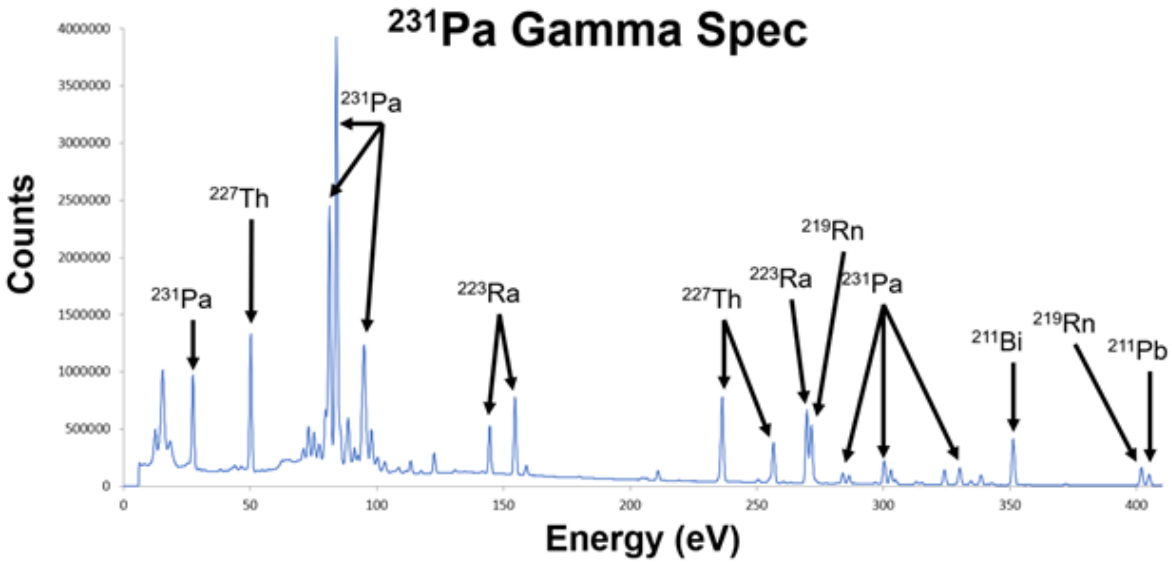

图 18. 镤-231老化样品的伽马射线能谱学。

和人力。

此外，研究对象并非唯一需要考虑的因素；还必须考虑子体和孙体同位素可能带来的围封和屏蔽问题。根据衰变链的不同，甚至可能还需考虑其余子体同位素。例如，^{231}Pa 本身的比活度并不高，但样品老化数十年后，由于子体积累产生的放射性，安全处理时就需要使用铅屏蔽手套箱。因此，许多最难处理的同位素都缺乏研究，这使得有效分离可能干扰目标同位素处理和表征的子体同位素更加困难。例如，图18展示了老化的 ^{231}Pa 样品的伽马能谱。衰变链中的许多子体同位素都能在能谱中轻易辨认。若不将这些同位素成功去除，在后续研究中，母体同位素的处理和表征都会因此更加困难。

7. 展望

新兴的放射性分子领域前景令人鼓舞。能够以足以用于广泛应用的数量获得奇异原子核，将相应地改变我们开展各种科学研究的方式。这一方向已经开启了新的研究路线，并促成了许多不同科学领域之间的交汇。对少数几种放射性分子取得的初步成果令人振奋，展现出巨大的潜力；但要实现放射性分子的潜能，需要实验物理学家、理论物理学家和相关设施持续且协调一致地开展工作，以驾驭这些复杂而富有挑战性的物种。

8. 致谢

我们感谢 Jo 感谢 Behr、Vincenzo Cirigliano 和 Jordy de Vries 的有益讨论。

本研究获得以下资助：美国能源部科学办公室核物理办公室，资助编号 DE-SC0013365（密歇根州立大学）、DE-FG02-97ER41019（北卡罗来纳大学）、DE-SC0021179、DE-SC0021176（麻省理工学院）、DE-SC0022034（加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校）；美国国家科学基金会，资助编号 PHY- 2146555（加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校）、PHY-1847550（加州理工学院）、PHY- 2209185（密歇根州立大学）、PHY-2012068（特拉华大学）；德国研究联合会（DFG），资助编号 328961117 – SFB 1319 ELCH（卡塞尔大学）、423116110、390831469：EXC 2118 PRISMA+ 卓越集群（约翰内斯·古腾堡大学）；科学与技术设施委员会（STFC），资助编号 ST/P004423/1、ST/V001116/1、ST/X00502X/1（曼彻斯特大学）、ST/P003885/1、ST/V001035/1；波兰国家科学中心合同编号 2018/31/B/ST2/02220；芬兰科学院项目编号 339245（于韦斯屈莱大学）；欧盟“地平线2020”研究与创新计划项目编号 861198，项目“LISA”，玛丽·斯克沃多夫斯卡-居里创新培训网络（约翰内斯·古腾堡大学）；美国国家标准与技术研究院精密测量资助，编号 60NANB18D253（加州理工学院）和 60NANB21D185（加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校）；亚历山大·冯·洪堡基金会费奥多尔·莱宁奖学金（麻省理工学院）；海辛-西蒙斯基金会资助编号 2022-3361（加州理工学院）；戈登与贝蒂·摩尔基金会资助编号 GBMF7947（加州理工学院）；阿尔弗雷德·P·斯隆基金会资助编号 G-2019-12502（加州理工学院）；W. M. 凯克基金会（加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校）；美国海军研究局资助编号 N00014-20-1-2513（特拉华大学）；加拿大自然科学与工程研究委员会资助编号 SAPIN-2022-00019（TRIUMF）；弗兰德斯研究基金会国际研究基础设施（鲁汶大学）；卓越科学（EOS）项目 40007501（鲁汶大学）；鲁汶大学项目 C14/22/104；莱弗休姆信托基金研究项目资助；俄罗斯科学基金会资助编号 19-72-10019（彼得堡核物理研究所）；“BASIS”理论物理与数学发展基金会研究项目编号 21-1-2-47-1（彼得堡核物理研究所）；中国国家自然科学基金委员会资助编号 12027809。

谨此鸣谢以下计算支持：橡树岭国家实验室（ORNL）橡树岭领导计算设施（OLCF）的 Summit 超级计算机 INCITE 奖；芬兰 CSC-IT 科学中心有限公司；由约克大学提供的高性能计算设施 Viking 集群；约克大学高性能计算服务、Viking 集群及研究计算团队。

TRIUMF 通过与加拿大国家研究委员会签订资助协议，获得联邦资助。

谨此致谢戈登与贝蒂·摩尔基金会基础物理创新奖（编号 GBMF6210、APS GBMF-008-2020）对相关会议和研讨会的支持；这些会议和研讨会启发了本稿件。

参考文献

Abe K、Abe K、Abe R、Adachi I、Ahn B S、Aihara H、Akatsu M、Alimonti G、Asai K、Asai M、Asano Y、Aso T、Aulchenko V、Aushev T、Bakich A M、Banas E 等。2001 中性 *B* 介子系统中的大 *CP* 破坏 《物理评论快报》 **87**，091802。
https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.87.091802Abe M、Prasannaa V S 和 Das B P 2018 应用有限场耦合簇方法计算与电子电偶极矩搜索相关的分子性质《物理评论*A*》**97**，032515。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.97.032515Abel E P、Avilov M、Ayres V、Birnbaum E、Bollen G、Bonito G、Bredeweg T、Clause H、Couture A、DeVore J、Dietrich M、Ellison P、Engle J、Ferrieri R、Fitzsimmons J、Friedman M、Georgobiani D、Graves S、Greene J、Lapi S、Loveless C S、Mastren T、Martinez-Gomez C、McGuinness S、Mittig W、Morrissey D、Peaslee G、Pellemoine F、Robertson J D、Scielzo N、Scott M、Severin G、Shaughnessy D、Shusterman J、Singh J、Stoyer M、Sutherlin L、Visser A 和 Wilkinson J 2019 FRIB 的同位素收集：科学发现的更多机遇 《*G*辑物理学杂志：核与粒子物理》 **46**（10），100501。
https://doi.org/10.1088/1361-6471/ab26ccAbramczyk M、Aoki S、Blum T、Izubuchi T、Ohki H 和 Syritsyn S 2017 核子的电偶极矩和形状因子的格点计算 《物理评论》 **D96**（1），014501。Abusaif F、Aggarwal A、Aksentev A、Alberdi-Esuain B、Atanasov A、Barion L、Basile S、Berz M、Beyss M、Böhme C、Böker J、Borburgh J、Carli C、Ciepal I、Ciullo G、Contalbrigo M、Conto J M D、Dymov S、Felden O、Gagoshidze M、Gaisser M、Gebel R、Giese N、Grigoryev K、Grzonka D、Tahar M H、Hahnraths T、Heberling D、Hejny V、Hetzel J、Hölscher D、Javakhishvili O、Jorat L、Kacharava A、Kamerdzhiev V、Karanth S、Käseberg C、Keshelashvili I、Koop I、Kulikov A、Laihem K、Lamont M、Lehrach A、Lenisa P、Lomidze N、Lorentz B、Macharashvili G、Magiera A、Makino K、Martin S、Mchedlishvili D、Meissner U G、Metreveli Z、Michaud J、Müller F、Nass A、Natour G、Nikolaev N、Nogga A、Pesce A、Poncza V、Prasuhn D、Pretz J、Rathmann F、Ritman J、Rosenthal M、Saleev A、Schott M、Sefzick T、Senichev Y、Shergelashvili D、Shmakova V、Siddique S、Silenko A、Simon M、Slim J、Soltner H、Stahl A、Stassen R、Stephenson E、Straatmann H、Ströher H、Tabidze M、Tagliente G、Tal man R、Uzikov Y、Valdau Y、Valetov E、Wagner T、Weidemann C、Wirzba A、Wrońska A、Wüstner P、Zuprański P 和 Zurek M 2019 《利用储存环搜索带电粒子的电偶极矩——可行性研究》。arXiv1912.07881。https://arxiv.org/abs/1912.07881Agbemava S E、Afanasjev A V 和 Ring P 2016 偶偶核基态中的八极形变：协变密度泛函理论框架下的全局分析 《*Physical Review C*》**93**，044304。
https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.93.044304Aggarwal P、Bethlem H L、Borschevsky A、Denis M、Esajas K、Haase P A B、Hao Y、Hoekstra S、Jungmann K、Meijknecht T B、Mooij M C、Timmermans R G E、Ubachs W、Willmann L 和 Zapara A 2018 测量 BaF 中电子的电偶极矩 《欧洲物理学杂志*D*辑》 **72**（11），197。
http://link.springer.com/10.1140/epjd/e2018-90192-9Agúndez M、Martínez J、de Andres P、Cernicharo J 和 Martín-Gago J A 2020 渐近巨星支大气中的化学平衡：小分子、团簇和凝聚物方面的成就、失败与前景 《天文学与天体物理学》 **637**，A59。

Ahmad I 和 Butler P A 1993 原子核中的八极形状 《Annual Review of Nuclear and Particle Science》43, 71. Ahmad I、Chasman R R、Greene J P、Kondev F G 和 Zhu S 2015 58分钟半衰期的 22992U 的电子俘获衰变及 22991 Pa 的能级 《Physical Review C》92, 024313. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.92.024313 Alarcon R、Alexander J、Anastassopoulos V、Aoki T、Baartman R、Baeßler S、Bartoszek L、Beck D H、Bedeschi F、Berger R、Berz M、Bhattacharya T、Blaskiewicz M、Blum T、Bowcock T、Brown K、Budker D、Burdin S、Casey B C、Casse G、Cantatore G、Cheng L、Chupp T、Cianciolo V、Cirigliano V、Clayton S M、Crawford C、Das B P、Davoudiasl H、de Vries J、DeMille D、Denisov D、Diwan M V、Doyle J M、Engel J、Fanourakis G、Fatemi R、Filippone B W、Fomin N、Fischer W、Gardikiotis A、Garcia Ruiz R F、Gatti C、Gooding J、Graham P、Gray F、Griffith W C、Haciomeroglu S、Gwinner G、Hoekstra S、Hoffstaetter G H、Huang H、Hutzler N R、Incagli M、Ito T M、Izubuchi T、Jayich A M、Jeong H、Kaplan D、Karuza M、Kawall D、Kim O、Koop I、Lebedev V、Lee J、Lee S、Leung K K H、Liu C Y、Long J、Lusiani A、Marciano W J、Maroudas M、Matlashov A、Matsumoto N、Mawhorter R、Meot F、Mereghetti E、Miller J P、Morse W M、Mott J、Omarov Z、O’Shaughnessy C、Ozben C、Park S、Pattie R W、Petrov A N、Piacentino G M、Plaster B R、Podobedov B、Poelker M、Pocanic D、Prasannaa V S、Price J、Ramsey-Musolf M J、Raparia D、Rajendran S、Reece M、Reid A、Rescia S、Ritz A、Roberts B L、Safronova M S、Sakemi Y、Shindler A、Semertzidis Y K、Silenko A、Si ngh J T、Skripnikov L V、Soni A、Stephenson E、Suleiman R、Sunaga A、Syphers M、Syritsyn S、Tarbutt M R、Thoerngren P、Timmermans R G E、Tishchenko V、Titov A V、Tsoupas N、Tzamarias S、Variola A、Venanzoni G、Vilella E、Vossebeld J、Winter P、Won E、Zelenski A、Zhou Y 和 Zioutas K 2022《电偶极矩与新物理的探索》。https://arxiv.org/abs/2203.08103 Alauze X、Lim J、Trigatzis M A、Swarbrick S、Collings F J、Fitch N J、Sauer B E 和 Tarbutt M R 2021 用于检验基础物理的超冷分子束 《Quantum Science and Technology》6(4), 044005. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ac107e Alexandrou C、Athenodorou A、Hadjiyiannakou K 和 Todaro A 2021 在物理点利用格点量子色动力学模拟研究中子电偶极矩 《Physical Review D》103(5), 054501. Alkhazov G、Letokhov V、Mishin V、Panteleyev V、Romanov V、Sekatsky S 和 Fedoseyev V 1989 在高温金属腔中对原子进行高效Z选择性光电离，随后静电约束离子 Pis’ma Zh. Techn. Fiz. 15, 63–6. Allehabi S O、Dzuba V A、Flambaum V V 和 Afanasjev A V 2021 原子核形变是 Yb^{+} 离子中 King 图非线性的来源 《物理评论A》103, L030801. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.103.L030801 ALMA合作组织 2015 2014年ALMA长基线观测活动：概述 《The Astrophysical Journal Letters》808, 1. Altuntaş E、Ammon J、Cahn S B 和 DeMille D 2018 展示一种测量核自旋依赖宇称破坏的灵敏方法 《物理评论快报》120(14), 142501. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.120.142501 An H、Pospelov M、Pradler J 和 Ritz A 2015 暗光子暗物质的直接探测限制 《Physics Letters B》747, 331–338. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269315004402 Anderegg L、Augenbraun B L、Chae E、Hemmerling B、Hutzler N R、Ravi A、Collopy A、Ye J、Ketterle W 和 Doyle J M 2017 CaF的射频磁光俘获，采用

高密度 《物理评论快报》119(10), 103201. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.119.103201 Anderegg L、Cheuk L W、Bao Y、Burchesky S、Ketterle W、Ni K K 和 Doyle J M 2019 超冷分子的光镊阵列 《科学》365(6458), 1156–1158. http://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.aax1265 Andreev V、Ang D G、DeMille D、Doyle J M、Gabrielse G、Haefner J、Hutzler N R、Lasner Z、Meisenhelder C、O'Leary B R、Panda C D、West A D、West E P 和 Wu X 2018 电子电偶极矩限制的改进 《自然》562(7727), 355–360. http://www.nature.com/articles/s41586-018-0599-8 Antypas D、Fabricant A、Stalnaker J E、Tsigutkin K、Flambaum V V 和 Budker D 2019 原子镱中宇称破坏的同位素变化 《自然·物理》15(2), 120–123. https://doi.org/10.1038/s41567-018-0312-8 Aoki T、Sreekantham R、Sahoo B K、Arora B、Kastberg A、Sato T、Ikeda H、Okamoto N、Torii Y、Hayamizu T、Nakamura K、Nagase S、Ohtsuka M、Nagahama H、Ozawa N、Sato M、Nakashita T、Yamane K、Tanaka K S、Harada K、Kawamura H、Inoue T、Uchiyama A、Hatakeyama A、Takamine A、Ueno H、Ichikawa Y、Matsuda Y、Haba H 和 Sakemi Y 2021 利用超冷纠缠钫原子对电子电偶极矩进行量子传感 《量子科学与技术》6(4), 044008. Arndt M、Kanorsky S、Weis A 和 Hänsch T 1993 超流氦中的顺磁原子能否用于搜寻永久电偶极矩? Physics Letters A 174(4), 298–303. Arvanitaki A、Madden A 和 Van Tilburg K 2021 压电轴子效应 arXiv:2112.11466. Asplund M、Grevesse N、Sauval A J 和 Scott P 2009 太阳的化学组成 Annual Review of Astronomy and Astrophysics 47(1), 481–522. https://doi.org/10.1146/annurev.astro.46.060407.145222 Athanasakis-Kaklamanakis M、Wilkins S G、Au M、Berger R、Borschevsky A、Chrysalidis K、Cocolios T E、de Groote R P、Duellmann C E、Flanagan K T、Garcia Ruiz R F、Geldhof S、Heinke R、Isaev T A、Johnson J、Kiuberis A、Koszorús Á、Lalanne L、Mougeot M、Neyens G、Nies L、Reilly J、Rothe S、Schweikhard L、Vernon A R 和 Yang X F 2021 AcF的激光电离光谱学 技术报告 欧洲核子研究中心。https://cds.cern.ch/record/2782407 Au M 和 Ballof J 2022《放射性离子束提取的分子边带》。https://doi.org/10.5281/zenodo.6884293 Aubert B、Barate R、Boutigny D、Couderc F、Gaillard J M、Hicheur A、Karyotakis Y、Lees J P、Tisserand V、Zghiche A、Palano A、Pompili A、Chen J C、Qi N D 等 2004 CP破坏的 $B^0 \to K^+\pi^-$ 衰变中的不对称性 《物理评论快报》93, 131801. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.93.131801 Aubert B、Boutigny D、Gaillard J M、Hicheur A、Karyotakis Y、Lees J P、Robbe P、Tisserand V、Palano A、Chen G P、Chen J C、Qi N D、Rong G、Wang P、Zhu Y S 等 2001 在 B^0 介子系统中观测到CP破坏 《物理评论快报》87, 091801. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.87.091801 Auerbach N、Flambaum V V 和 Spevak V 1996 具有八极形变的原子核中的集体T奇、P奇电磁矩 《物理评论快报》76(23), 4316–4319. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.76.4316 Augenbraun B L、Lasner Z D、Frenett A、Sawaoka H、Miller C、Steimle T C 和 Doyle J M 2020 用于提升电子电偶极矩搜寻能力的激光冷却多原子分子

《新物理学杂志》**22**(2), 022003。
https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/ab687bAybas D, Adam J, Blumenthal E, Gramolin A V, Johnson D, Kleyheeg A, Afach S, Blanchard J W, Centers G P, Garcon A, Engler M, Figueroa N L, Sendra M G, Wickenbrock A, La wson M, Wang T, Wu T, Luo H, Mani H, Mauskopf P, Graham P W, Rajendran S, Kimball D F J, Budker D 和 Sushkov A O 2021年 使用固态核磁共振搜寻类轴子暗物质 《物理评论快报》**126**, 141802。Ballof J, Au M, Barbero E, Chrysalidis K, Düllmann C E, Fedosseev V, Granados E, Heinke R, Marsh B A, Owen M, Rothe S, Stora T 和 Yakushev A 2022年 一种由光电阴极驱动的冷电子碰撞离子源——放射性分子束输运的新机遇? 《物理学杂志：会议系列》**2244**(1), 012072。
https://doi.org/10.1088/1742-6596/2244/1/012072Ballof J, Chrysalidis K, Düllmann C E, Fedosseev V, Granados E, Leimbach D, Marsh B A, Ramos J P, Ringvall-Moberg A, Rothe S, Stora T, Wilkins S G 和 Yakushev A 2022年 一种在 CERN-ISOLDE 提取难熔元素、生成羰基络离子的方案《欧洲物理学杂志 *A*》**58**(5)。
https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00739-1Ballof J, Ramos J, Molander A, Johnston K, Rothe S, Stora T 和 Düllman C 2020年 升级后的 ISOLDE 产额数据库——预测束流强度的新工具《核仪器与方法物理研究*B*辑：束流与材料和原子的相互作用》**463**, 211–215。Ballof J, Seiffert C, Crepieux B, Düllmann C E, Delonca M, Gai M, Gottberg A, Kröll T, Lica R, Madurga Flores M, Martinez Palenzuela Y, Mendonca T M, Owen M, Ramos J P, Rothe S, Stora T, Tengblad O 和 Wienholtz F 2019年 在 CERN-ISOLDE 通过在线同位素质量分离产生的放射性硼束《欧洲物理学杂志 *A*》**55**(5)。Barbé V, Ciamei A, Pasquiou B, Reichsöllner L, Schreck F, Żuchowski P S 和 Hutson J M 2018年 观察到碱金属原子与闭壳层原子之间的 Feshbach 共振《自然·物理》**14**(9), 881–884。Baron J, Campbell W C, DeMille D, Doyle J M, Gabrielse G, Gurevich Y V, Hess P W, Hutzler N R, Kirilov E, Kozyryev I, O'Leary B R, Panda C D, Parsons M F, Petrik E S, Spaun B, Vutha A C 和 West A D 2014年 电子电偶极矩的上限降低了一个数量级《科学》**343**(6168), 269–272。http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1248213Barontini G, Blackburn L, Boyer V, Butuc-Mayer F, Calmet X, Lopez-Urrutia J R C, Curtis E A, Darquie B, Dunningham J, Fitch N J, Forgan E M, Georgiou K, Gill P, Godun R M, Goldwin J, Guarrera V, Harwood A, Hill I R, Hendricks R J, Jeong M, Johnson M Y H, Keller M, Sajith L P K, Kuipers F, Margolis H S, Mayo C, Newman P, Parsons A O, Prokhorov L, Robertson B I, Rodewald J, Safronova M S, Sauer B E, Schioppo M, Sherrill N, Stadnik Y V, Szymaniec K, Tarbutt M R, Thompson R C, Tofful A, Tunesi J, Vecchio A, Wang Y 和 Worm S 2021年 '利用时钟网络测量基本常数的稳定性'。arXiv2112.10618。https://arxiv.org/abs/2112.10618Barra A L, Robert J B 和 Wiesenfeld L 1988年 高分辨率核磁共振可能观测到宇称不守恒*Europhys. Lett.***5**, 217–222。Barrett B R, Navrátil P 和 Vary J P 2013年 从头算无芯壳模型《粒子物理进展》

与核物理 69（C辑增刊），131–181。
http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641012001184 Barry J F, McCarron D J, Norrgard E B, Steinecker M H andDeMille D 2014年 双原子分子的磁光阱俘获 《自然》512（7514），286–289。
http://dx.doi.org/10.1038/nature13634http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nature13634 Barzakh A, Andreyev A N, Raison C, Cubiss J G, Van Duppen P, Péru S, Hilaire S, Goriely S, Andel B, Antalic S, Al Monthery M, Berengut J C, Bieroń J, Bissell M L, Borschevsky A, Chrysalidis K, Cocolios T E, Day Goodacre T, Dognon J P, Elantkowska M, Eliav E, Farooq-Smith G J, Fedorov D V, Fedosseev V N, Gaffney L P, Garcia Ruiz R F, Godefroid M, Granados C, Harding R D, Heinke R, Huyse M, Karls J, Larmonier P, Li J G, Lynch K M, Maison D E, Marsh B A, Molkanov P, Mosat P, Oleynichenko A V, Panteleev V, Pyykkö P, Reitsma M L, Rezynkina K, Rossel R E, Rothe S, Ruczkowski J, Schiffmann S, Seiffert C, Seliverstov M D, Sels S, Skripnikov L V, Stryjczyk M, Studer D, Verlinde M, Wilman S 和 Zaitsevskii A V 2021年 中子缺乏的铋同位素中显著的形状交错 《物理评论快报》127，192501。
https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.127.192501 Barzakh A E, Atanasov D, Andreyev A N, Al Monthery M, Althubiti N A, Andel B, Antalic S, Blaum K, Cocolios T E, Cubiss J G, Van Duppen P, Goodacre T D, de Roubin A, Demidov Y A, Farooq-Smith G J, Fedorov D V, Fedosseev V N, Fink D A, Gaffney L P, Ghys L, Harding R D, Joss D T, Herfurth F, Huyse M, Imai N, Kozlov M G, Kreim S, Lunney D, Lynch K M, Manea V, Marsh B A, Martinez Palenzuela Y, Molkanov P L, Neidherr D, Page R D, Rosenbusch M, Rossel R E, Rothe S, Schweikhard L, Seliverstov M D, Sels S, Van Beveren C, Verstraelen E, Welker A, Wienholtz F, Wolf R N 和 Zuber K 2020年 金中的超精细反常及 $I^{\pi} = 11/2^{-}$ 金同核异能态的磁矩 《Physical Review C》101，034308。
https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.101.034308 Behr J 2022年 适用于原子与分子电偶极矩测量的实用元素中具有增强 Schiff 矩的原子核 arXiv nucl-ex/2203.06758。
https://arxiv.org/abs/2203.06758 Behr J A 和 Gorelov A 2014 β-衰变与中性原子阱中的角关联 《G辑物理学杂志：核与粒子物理》41（11），114005。
https://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/41/11/114005 Behr J A, Gorelov A, Swanson T, Häusser O, Jackson K P, Trinczek M, Giesen U, D'Auria J M, Hardy R, Wilson T, Choboter P, Leblond F, Buchmann L, Dombsky M, Levy C D P, Roy G, Brown B A 和 Dilling J 1997年 利用在线同位素分离器对 β衰变的 $^{38}K^{m}$, ^{37}k进行磁光阱俘获 《物理评论快报》79，375–378。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.79.375 Belley A, Payne C G, Stroberg S R, Miyagi T 和 Holt J D 2021年 ^{48}Ca、^{76}Ge 和 ^{82}Se 的从头算无中微子双β衰变矩阵元 《物理评论快报》126，042502。
https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.126.042502 Bender M, Heenen P H 和 Reinhard P G 2003年 用于核结构研究的自洽平均场模型 《现代物理评论》75（1），121–180。https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.75.121 Bennett S 和 Wieman C 1999年 原子中 6s-7s 跃迁极化率的测量

铯与对标准模型的改进检验 《物理评论快报》82(12), 2484. http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.82.4153 Berengut J C、Delaunay C、Geddes A 和 Soreq Y 2020 广义金线性关系与利用同位素位移搜寻新物理 《物理评论研究》2(4). http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.043444 Berengut J C 等 2018 利用同位素位移光谱学探测新型长程相互作用 《物理评论快报》120, 091801. Berger R 2004 分子中的宇称破坏效应，载于 P Schwerdtfeger 编《相对论电子结构理论，第二部分：应用》，Elsevier，荷兰，第 188–288 页。 Berger R、Gottselig M、Quack M 和 Willeke M 2001 宇称破坏主导二氯二硫烷中手性的动力学 《应用化学国际版》40, 4195–4198. Berger R 和 Stohner J 2019 宇称破坏 WIREs Comput. Mol. Sci. 9(3), e1396. https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wcms.1396 Berger R 和 Stuber J L 2007 手性分子中的电弱相互作用：多卤代甲烷振动频移的双分量密度泛函理论研究 Mol. Phys. 105, 41–49. Bergmann K、Nägerl H C、Panda C、Gabrielse G、Miloglyadov E、Quack M、Seyfang G、Wichmann G、Ospelkaus S、Kuhn A 等 2019 受激拉曼绝热通道应用路线图 《物理学杂志 B：原子、分子与光学物理》52(20), 202001. Bhattacharya T、Cirigliano V、Gupta R、Mereghetti E 和 Yoon B 2015 五维CP奇算符：量子色动力学混合与重整化 《Physical Review D》92(11), 114026. Bhattacharya T、Cirigliano V、Gupta R、Mereghetti E 和 Yoon B 2021 量子色动力学 Θ项对核子电偶极矩的贡献 《Physical Review D》103(11), 114507. Bhattacharya T、Yoon B、Gupta R 和 Cirigliano V 2018 超越标准模型的中子电偶极矩 PoS LATTICE2018, 188. Bialek W、Moody J 和 Wilczek F 1986 宏观 T 不守恒：新实验的前景 《物理评论快报》56, 1623–1626. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.56.1623 Bilitewski T、De Marco L、Li J R、Matsuda K、Tobias W G、Valtolina G、Ye J 和 Rey A M 2021 超冷偶极分子中自旋压缩的动态生成 《物理评论快报》126(11), 113401. Bishof M、Parker R H、Bailey K G、Greene J P、Holt R J、Kalita M R、Korsch W、Lemke N D、Lu Z T、Mueller P、O’Connor T P、Singh J T 和 Dietrich M R 2016 改进的^{225}镭电偶极矩上限 《物理评论C》94(2), 025501. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.94.025501 Blaum K、Dilling J 和 Nörtershäuser W 2013 利用放射性束流进行核物理研究的精密原子物理技术 Physica Scripta 2013(T152), 014017. https://dx.doi.org/10.1088/0031-8949/2013/T152/014017 Blumenfeld Y、Nilsson T 和 Duppen P V 2013 放射性离子束产生的设施与方法 Physica Scripta 2013(T152), 014023. https://dx.doi.org/10.1088/0031-8949/2013/T152/014023 Boggs S E、Harrison F A、Miyasaka H、Grefenstette B W、Zoglauer A、Fryer C L、Reynolds S P、Alexander D M、An H、Barret D、Christensen F E、Craig W W、Forster K、Giommi P、Hailey C J、Hornstrup A、Kitaguchi T、Koglin J E、Madsen K K、Mao P H、Mori K、Perri M,

Pivovaroff M J、Puccetti S、Rana V、Stern D、Westergaard N J 和 Zhang W W 2015 来自 SN1987A 的钛-44伽马射线发射线揭示了一场非对称爆炸 《科学》348, 670. Bohn J L、Rey A M 和 Ye J 2017 冷分子：化学与量子物质量子工程的进展 《科学》357(6355), 1002–1010. http://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.aam6299 Bohr A 1951 重原子核中角动量的量子化 《物理评论》81, 134. Bohr A 和 Weisskopf V F 1950 核结构对重元素超精细结构的影响 《物理评论》77(1), 94. Bonaiti F、Bacca S 和 Hagen G 2022 ^{8}He基态和偶极激发态的从头算耦合簇计算 《Physical Review C》105, 034313. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.105.034313 Bonnard J、Dobaczewski J、Danneaux G 和 Kortelainen M 2022 利用核密度泛函理论计算重变形开壳奇数核中侵入组态的电磁矩，包含$63 \leq Z \leq 82$ 和 $82 \leq N \leq 126$ arXiv:2209.09156。https://arxiv.org/abs/2209.09156 Bonneau L、Minkov N、Duc D D、Quentin P 和 Bartel J 2015 芯极化对变形奇质量数核磁偶极矩的影响 《Physical Review C》91, 054307. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.91.054307 Booth D W、Rabga T、Ready R、Bailey K G、Bishof M、Dietrich M R、Greene J P、Mueller P、O'Connor T P 和 Singh J T 2020 镭$6d7p\ ^3F_2^o$ 态的光谱学研究与寿命测量 《光谱学报B辑：原子光谱》172, 105967. Borge M J G 2014 ISOLDE设施与hie-hisolde项目：近期亮点 《AIP会议论文集》1606(1), 237–242. https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4891139 Borge M J G、Kowalska M、Kadi Y 和 Blumenfeld Y 2015 HIE-ISOLDE项目及其科学机遇，载于《放射性同位素科学进展会议（ARIS2014）论文集》。《日本物理学会志》。https://doi.org/10.7566/jpscp.6.030109 Borrajo M 和 Egido J L 2017 利用对称性保持方法研究偶、奇镁同位素的基态性质 《物理快报B》764, 328–334. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269316307006 Bothwell T、Kennedy C J、Aeppli A、Kedar D、Robinson J M、Oelker E、Staron A 和 Ye J 2022 测定毫米尺度原子样品中的引力红移 《自然》602(7897), 420–424. https://www.nature.com/articles/s41586-021-04349-7 Breier A A、Waßmuth B、Büchling T、Fuchs G W、Gauss J 和 Giesen T F 2018 一氧化铝和一硫化铝的质量无关扩展 Dunham 分析 《分子光谱学杂志》350, 43. Breier A A、Waßmuth B、Fuchs G W、Gauss J 和 Giesen T F 2019 气相一氧化钛稳定同位素体的质量无关分析——TiO 《分子光谱学杂志》355, 46. Brewer S M、Chen J S、Hankin A M、Clements E R、Chou C W、Wineland D J、Hume D B 和 Leibrandt D R 2019 $^{27}Al^{+}$ 量子逻辑钟，系统不确定度低于 10^{-18} 《物理评论快报》123(3), 033201. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.123.033201

Brinkman H, Doherty C, Pols O, Li E, Côté B 和 Lugaro M 2019 大质量双星中的铝-26。I. 非旋转模型 《天体物理学杂志》884(1), 38. Brinkman H E, den Hartogh J, Doherty C, Pignatari M 和 Lugaro M 2021 大质量双星中的铝-26。II. 直至核坍缩的旋转单星及其对早期太阳系的影响 《天体物理学杂志》923(1), 47. Brodeur M, Ryjkov V, Brunner T, Ettenauer S, Gallant A, Simon V, Smith M, Lapierre A, Ringle R, Delheij P, Good M, Lunney D 和 Dilling J 2012 验证TITAN彭宁阱质谱仪的准确性 《国际质谱学杂志》310, 20– 31. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387380611004568 Bro wn L 和 Gabrielse G 1986 锗离子理论：彭宁阱中单个电子或离子的物理学 《现代物理评论》58(1), 233. Brunner T, Smith M, Brodeur M, Ettenauer S, Gallant A, Simon V, Chaudhuri A, Lapierre A, Mané E, Ringle R, Simon M, Vaz J, Delheij P, Good M, Pearson M 和 Dilling J 2012 TITAN数字射频四极杆离子束冷却器和聚束器的运行与性能 《核仪器与方法物理研究A辑：加速器、光谱仪、探测器及相关设备》676, 32–43. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900212001398 Bsaisou J, de Vries J, Hanhart C, Liebig S, Meissner U G, Minossi D, Nogga A 和 Wirzba A 2015 手征有效场论中的核电偶极矩 《高能物理学杂志》03, 104.|勘误：《高能物理学杂志》05, 083 (2015)|. Budker D, Graham P W, Ledbetter M, Rajendran S 和 Sushkov A O 2014 宇宙轴子自旋进动实验（CASPEr）提案 《物理评论X》4(2), 021030. http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevX.4.021030 Burkey M T, Savard G, Gallant A T, Scielzo N D, Clark J A, Hirsh T Y, Varriano L, Sargsyan G H, Launey K D, Brodeur M, Burdette D P, Heckmaier E, Joerres K, Klimes J W, Kolos K, Laminack A, Leach K G, Levand A F, Longfellow B, Maaß B, Marley S T, Morgan G E, Mueller P, Orford R, Padgett S W, Pérez Galván A, Pierce J R, Ray D, Segel R, Siegl K, Sharma K S 和 Wang B S 2022 基于 ^{8}Li β 衰变改进的弱相互作用张量流上限 《物理评论快报》128, 202502. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.128.202502 Butler P 2005 借助加速的放射性束流探测原子核：透过镜面 《核物理A》751, 485–493. 第22届国际核物理会议（第一部分）论文集。https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375947405001211 Butler P A 2020 梨形原子核 《英国皇家学会学报A辑》476(2239), 20200202. https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.2020.0202 Butler, P. A. 等 2020 通过对放射性 ^{222}Ra和 ^{228}Ra束流进行库仑激发，研究镭原子核中八极形变的演化 《物理评论快报》124, 042503. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.124.042503 Butler P A 和 Nazarewicz W 1996 原子核中的内禀反射不对称性 《现代物理评论》68(2), 349–421. Cairncross W B, Gresh D N, Grau M, Cossel K C, Roussy T S, Ni Y, Zhou Y, Ye J 和 Cornell E A 2017 利用囚禁分子离子精密测量电子电偶极矩 《物理评论快报》119(15), 153001. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.119.153001

Cairncross W B 和 Ye J 2019 原子和分子在寻找时间反演对称性破缺中的作用 Nature Reviews Physics 1(8), 510–521. http://www.nature.com/articles/s42254-019-0080-0 Caldwell L, Devlin J A, Williams H J, Fitch N J, Hinds E A, Sauer B E 和 Tarbutt M R 2019 分子的深度激光冷却与高效磁压缩 《物理评论快报》123(3), 033202. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.123.033202 Campbell E K, Holz M, Gerlich D 和 Maier J P 2015 实验室确认C60+ 是两条弥散星际带的载体 《自然》 523(7560), 322–323. Campbell P, Moore I 和 Pearson M 2016 用于核结构物理学的激光光谱学 《粒子与核物理进展》86, 127–180. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641015000915 Cao Y, Agbemava S E, Afanasjev A V, Nazarewicz W 和 Olsenss E 2020 梨形偶偶核的分布图景 《Physical Review C》102, 024311. Catherall R, Andreazza W, Breitenfeldt M, Dorsival A, Focker G J, Gharsa T P, Giles T J, Grenard J L, Locci F, Martins P, Marzari S, Schipper J, Shornikov A 和 Stora T 2017 ISOLDE设施 《G辑物理学杂志：核与粒子物理》 44(9). Cernicharo J, Guélin M 和 Kahane C 2000 碳星包层IRC+10216 的分子谱线巡天 《天文学与天体物理学增刊》142, 181. Cesarotti C, Lu Q, Nakai Y, Parikh A 和 Reece M 2019 诠释电子电偶极矩约束 《高能物理学杂志》2019(5), 59. Charles C, Cornett R, Zhao X L, Litherland A 和 Kieser W 2015 用于AMS分析的在线碘同位素分离 《核仪器与方法物理研究B辑：与材料和原子的相互作用》361, 189–192. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.03.030 Chasman R 1980 轻锕系元素中的初始八极形变与奇质量核的宇称双重态 《物理快报B》96(1-2), 7–10. Chen M, Li T, Dobaczewski J 和 Nazarewicz W 2021 反射不对称核形状的微观起源 《Physical Review C》103, 034303. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.103.034303 Cheuk L W, Anderegg L, Augenbraun B L, Bao Y, Burchesky S, Ketterle W 和 Doyle J M 2018 Λ-增强光学囚禁中分子的成像 《物理评论快报》121(8), 083201. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.121.083201 Chin C, Grimm R, Julienne P 和 Tiesinga E 2010 超冷气体中的Feshbach共振 《现代物理评论》82(2), 1225–1286. http://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.82.1225 Chin-wen C, Christoph K, Hume D B, Plessow P N, Leibrandt D R 和 Dietrich L 2017 单个分子离子的纯量子态制备与相干操控 《自然》545(7653), 203–207. https://doi.org/10.1038/nature22338 Cho D, S angster K 和 Hinds E A1991 利用喷流源在氟化铊中寻找时间反演对称性破缺 《物理评论A》44(5), 2783–2799. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.44.2783

Chou C W、Collopy A L、Kurz C、Lin Y、Harding M E、Plessow P N、Fortier T、Diddams S、Leibfried D 和 Leibrandt D R，2020，《纯量子态单分子离子的频率梳光谱学》，《科学》367(6485)，1458–1461。https://doi.org/10.1126/science.aba3628 Christenson J H、Cronin J W、Fitch V L 和 Turlay R，1964，《2π 介子的衰变证据》，《物理评论快报》13，138–140。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.138 Chung T、Cooper M C 和 Zhou Y，2021，《用于探索标准模型之外新物理的氧化钽光谱学》，载于《国际分子光谱学研讨会》，第 RB06 页。Chupp T E、Fierlinger P、Ramsey-Musolf M J 和 Singh J T，2019，《原子、分子、原子核和粒子的电偶极矩》，《现代物理评论》91(1)，015001。https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.91.015001 Chupp T 和 Ramsey-Musolf M，2015，《电偶极矩：全局分析》，《物理评论C》91(3)，035502。http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.91.035502 Cocolios T E、Al Suradi H H、Billowes J、Budinčević I、de Groote R P、De Schepper S、Fedosseev V N、Flanagan K T、Franchoo S、Garcia Ruiz R F、Heylen H、Le Blanc F、Lynch K M、Marsh B A、Mason P J R、Neyens G、Papuga J、Procter T J、Rajabali M M、Rossel R E、Rothe S、Simpson G S、Smith A J、Strashnov I、Stroke H H、Verney D、Walker P M、Wendt K D A 和 Wood R T，2013，《CERN-ISOLDE共线共振电离光谱（CRIS）实验装置》，《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》317，565–569。https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X13007088 Colladay D 和 Kostelecký V A，1998，《标准模型的洛伦兹破缺扩展》，《物理评论D》58，116002。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.58.116002 Collopy A L、Ding S、Wu Y、Finneran I A、Anderegg L ï、Augenbraun B L、Doyle J M 和 Ye J，2018，《一氧化钇的三维磁光阱》，《物理评论快报》121(21)，213201。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.121.213201 Counts I、Hur J、Aude Craik D P L、Jeon H、Leung C、Berengut J C、Geddes A、Kawasaki A、Jhe W 和 Vuletić，2020，《镱中非线性同位素位移的证据：寻找新玻色子》，《物理评论快报》125(12)。http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.123002 Crassous J、Chardonnet C、Saue T 和 Schwerdtfeger P，2005，《通过光谱学观测分子中宇称破坏（PV）效应的最新实验与理论进展》，《有机与生物分子化学》3(12)，2218–2224。Crewther R、Di Vecchia P、Veneziano G 和 Witten E，1979，《量子色动力学中中子电偶极矩的手征估算》，《Physics Letters B》88，123。Daussy C、Marrel T、Amy-Klein A、Nguyen C T、Bordé C J 和 Chardonnet C，1999，《通过激光光谱学对手性分子对映异构体间宇称不守恒能量差的限制》，《物理评论快报》83，1554–1557。de Groote R、de Roubin A、Campbell P、Cheal B、Devlin C、Eronen T、Geldhof S、Moore I、Reponen M、Rinta-Antila S 和 Schuh M，2020，《IGISOL共线激光光谱实验的升级》，《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料的相互作用

与原子的相互作用》463，437–440。
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X19302125 de Groote R P 等，2020，《奇偶交错效应的测量及微观描述：奇特铜同位素的电荷半径》，《自然·物理》16(6)，620–624。https://www.nature.com/articles/s41567-020-0868-y de Vries J、Epelbaum E、Girlanda L、Gnech A、Mereghetti E 和 Viviani M，2020，《宇称和时间反演破坏的核力》，《物理学前沿》8，218。
https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fphy.2020.00218 de Vries J、Gnech A 和 Shain S，2021，《 CP破坏核力的重整化》，《Physical Review C》103，L012501。
https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.103.L012501 de Vries J、Mereghetti E、Seng C Y 和 Walker-Loud A，2017，《强子CP破坏的格点量子色动力学谱学》，《Physics Letters B》766，254–262。de Vries J、Mereghetti E、Timmermans R G E 和 van Kolck U，2013，《六维宇称和时间反演破坏的有效手征拉格朗日量》，《物理年鉴》338，50–96。de Vries J、Mereghetti E 和 Walker-Loud A，2015，《SU(3)手征微扰理论中的重子质量劈裂与强CP破坏》，《Physical Review C》92(4)，045201。Dekens W 和 de Vries J，2013，《六维宇称和时间反演破坏源的重整化群演化》，《高能物理学杂志》05，149。Delahaye P、Liénard E、Moore I、Benali M、Bissell M L、Canete L、Eronen T、Falkowski A、Fléchard X、Gonzalez-Alonso M、Gins W、De Groote RP、Jokinen A、Kankainen A、Kowalska M、Lecesne N、Leroy R、Merrer Y、Neyens G、De Oliveira Santos F、Quemener G、De Roubin A、Retailleau B M、Roger T、Severijns N、Thomas J C、Turzo K 和 Ujic P，2019，《MORA项目》，《超精细相互作用》240(1)，63。https://doi.org/10.1007/s10751-019-1611-x Delaunay C、Ozeri R、Perez G 和 Soreq Y，2017，《在精密前沿探测原子希格斯样力》，《Physical Review D》96(9)，093001。DeMille D、Barry J F、Edwards E R、Norrgard E B 和 Steinecker M H，2013，《辐射减速分子束的横向囚禁》，《分子物理学》111(12-13)，1805–1813。
http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00268976.2013.793833 DeMille D、Cahn S B、Murphree D、Rahmlow D A 和 Kozlov M G，2008，《利用分子测量核自旋相关宇称破坏》，《物理评论快报》100(2)，023003。
http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.100.023003 DeMille D、Doyle J M 和 Sushkov A O，2017，《通过桌面规模实验探索粒子物理学前沿》，《科学》357(6355)，990–994。http://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.aal3003 Denis M、Haase P A B、Timmermans R G E、Eliav E、Hutzler N R 和 Borschevsky A，2019，《BaOH和YbOH分子中电子电偶极矩的增强因子》，《物理评论A》99(4)，042512。
https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.99.042512 Denis M、Hao Y、Eliav E、Hutzler N R、Nayak M K、Timmermans R G E 和 Borschesvky A，2020，《可激光冷却分子中增强的宇称和时间反演破坏核磁四极矩效应》，《化学物理学杂志》152(8)，084303。

https://doi.org/10.1063/1.5141065http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1. 5141065 Derevianko A, Gibble K, Hollberg L, Newbury N R, Oates C, Safronova M S, Sinclair L C 和 Yu N 2022 太空中采用最先进的光学钟开展基础物理研究 《量子科学与技术》7(4), 044002. Di Rosa M D 2004 激光冷却分子 《欧洲物理学杂志D辑》31(2), 395–402. http://www.springerlink.com/index/10.1140/epjd/e2004-00167-2 Dickel T, Plass W, Geissel H, Heiße F, Miskun I, Purushothman S, Reiter M, Rink A K 和 Scheidenberger C 2016 为 Super-FRS 低能分支设计新一代低温停止池 《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》376, 216–220. 第十七届电磁同位素分离器及相关主题国际会议（EMIS2015）论文集，美国密歇根州大急流城，2015年5月11日至15日。 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X1600063X Dickel T, San Andrés S A, Beck S, Bergmann J, Dilling J, Greiner F, Hornung C, Jacobs A, Kripko-Koncz G, Kwiatkowski A, Leistenschneider E, Pikthtelev A, Plaß W R, Reiter M P, Scheidenberger C, Will C 和 TITAN合作组 2019 TITAN（TRIUMF）多反射飞行时间质谱仪的近期升级 《超精细相互作用》240(1), 62. https://doi.org/10.1007/s10751-019-1610-y Diehl R, Lugaro M, Heger A, Sieverding A, Tang X, Li K A, Li E T, Doherty C L, Krause M G H, Wallner A 等 2021 宇宙和太阳系中的放射性原子核 ^{26}Al与 ^{60}Fe 《澳大利亚天文学会刊》38, e062. Dilling J, Ackermann D, Bernard J, Hessberger F P, Hofmann S, Hornung W, Kluge H J, Lamour E, Maier M, Mann R, Marx G, Moore R B, Münzenberg G, Quint W, Rodriguez D, Schädel M, Schönfelder J, Sikler G, Toader C, Vermeeren L, Weber C, Bollen G, Engels O, Habs D, Thirolf P, Backe H, Dretzke A, Lauth W, Ludolphs W 和 Sewtz M 2000 SHIPTRAP项目：GSI用于俘获和储存来自SHIP的重放射性核素的设施 《超精细相互作用》127(1), 491–496. Dilling J, Blaum K, Brodeur M 和 Eliseev S 2018 原子与核物理中的潘宁阱质量测量 《核与粒子科学年度评论》68(1), 45–74. https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-102711-094939 Dilling J, Krücken R 和 Ball G 2014 ISAC概述 《超精细相互作用》225(1), 1–8. https://doi.org/10.1007/s10751-013-0877-7 Dilling J, Krücken R 和 Merminga L，编 2014 ISAC与ARIEL：TRIUMF放射性束流设施与科学计划 施普林格·荷兰。 https://doi.org/10.1007/978-94-007-7963-1 Dine M 和 Kusenko A 2003 物质-反物质不对称性的起源 《现代物理评论》76(1), 1–30. https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.76.1 Dobaczewski J 和 Engel J 2005 核时间反演破坏与^{225}Ra的希夫矩 《物理评论快报》94(23), 232502. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.94.232502 Dobaczewski J, Engel J, Kortelainen M 和 Becker P 2018 轻锕系元素中的希夫矩与八极矩的相关性 《物理评论快报》121, 232501. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.121.232501

Dobaczewski J, Nazarewicz W 和 Reinhard P G 2014 理论模型的误差估计：指南 J. Phys. G 41, 074001. https://doi.org/10.1088/0954-3899/41/7/074001 Dragos J, Luu T, Shindler A 和 de Vries J 2018 格点量子色动力学的电偶极矩结果 EPJ Web Conf. 175, 06018. Dragos J, Luu T, Shindler A, de Vries J 和 Yousif A 2021 通过格点量子色动力学中的梯度流确认强CP问题的存在 《Physical Review C》103(1), 015202. Dragoun O, Rysavy M 和 Günther C 1993 ^{229}Pa中所提出的220电子伏特跃迁的多极性 《Physical Review C》47, 870–872. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.47.870 Droese C, Eliseev S, Blaum K, Block M, Herfurth F, Laatiaoui M, Lautenschläger F, Minaya Ramirez E, Schweikhard L, Simon V 和 Thirolf P 2014 SHIPTRAP的低温气体阻停池 《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》338, 126–138. Duchemin C, Ramos J P, Stora T, Ahmed E, Aubert E, Audouin N, Barbero E, Barozier V, Bernardes A P, Bertreix P, Boscher A, Bruchertseifer F, Catherall R, Chevallay E, ChristodoulouP,ChrysalidisK,Cocolios TE,Comte J, CrepieuxB,DeschampsM,DockxK, Dorsival A, Fedosseev V N, Fernier P, Formento-Cavaier R, El Idrissi S, Ivanov P, Gadelshin V M, Gilardoni S, Grenard J L, Haddad F, Heinke R, Juif B, Khalid U, Khan M, Köster U, Lambert L, Lilli G, Lunghi G, Marsh B A, Palenzuela Y M, Martins R, Marzari S, Menaa N, Michel N, Munos M, Pozzi F, Riccardi F, Riegert J, Riggaz N, Rinchet J Y, Rothe S, Russell B, Saury C, Schneider T, Stegemann S, Talip Z, Theis C, Thiboud J, van der Meulen N P, van Stenis M, Vincke H, Vollaire J, Vuong N T, Webster B, Wendt K 和 Wilkins S G 2021 CERN-MEDICIS：自2017年调试运行以来的回顾 《医学前沿》 8. https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmed.2021.693682 Duda M, Chen X Y, Schindewolf A, Bause, von Milczewski J, Schmidt R, Bloch I 和 Luo X Y 2021 从极化子凝聚态到由异核分子构成的简并费米气体的跃迁 arXiv预印本 arXiv:2111.04301 . Dzuba V A, Berengut J C, Flambaum V V 和 Roberts B 2012 重新审视铯中的宇称不守恒 《物理评论快报》109, 203003. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.109.203003 Dzuba V A, Berengut J C, Harabati C 和 Flambaum V V 2017 将组态相互作用与微扰理论结合，用于含大量价电子的原子 《物理评论A》95, 012503. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.95.012503 Dzuba V A, Flambaum V V 和 Ginges J S M 2002 高精度计算铯中的宇称不守恒并检验标准模型 《Physical Review D》66, 076013. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.66.076013 Ebata S 和 Nakatsukasa T 2017 基于三维Skyrme Hartree-Fock加BCS模型的核素图中的八极形变 Physica Scr. 92(6), 064005. 10.1088%2F1402-4896%2Faa6c4c Eder R, Grawe H, Hagebø E, Hoff P, Kugler E, Ravn H L 和 Steffensen K 1992 ISOLDE在线质量分离器上氟化靶产生放射性离子束的产额 《核仪器与方法物理研究》B 62(4), 535–540. Eibach M, Beyer T, Blaum K, Block M, Düllmann C E, Eberhardt K, Grund J, Nagy S, Nitsche H, Nörtershäuser W, Renisch D, Rykaczewski K P, Schneider F, Smorra C, Vieten J, Wang

M and Wendt K 2014 对 ^{241,243}Am、 ^{244}Pu和^{249}Cf进行直接高精度质量测量 《物理评论C》89(6). https://doi.org/10.1103/physrevc.89.064318 Eills J, Blanchard J W, Bougas L, Kozlov M G, Pines A and Budker D 2017 使用核磁共振光谱学测量分子宇称不守恒 《物理评论A》96, 042119. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.96.042119 Ekström A, Forssén C, Hagen G, Jansen G R, Jiang W and Papenbrock T 2022 '核理论中的从头算究竟是什么？'. https://arxiv.org/abs/2212.11064 Eliav E, Borschevsky A and Kaldor U 2015 最重元素的高精度相对论耦合簇计算 《相对论量子化学手册》pp. 819– 849. Eliseev S, Block M, Dworschak M, Herfurth F, Kluge H J, Martin A, Rauth C and Vorobjev G 2008 一种新型低温充气停止室，适用于SHIPTRAP 《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》266(19), 4475–4477. 第十五届国际电磁同位素分离器及相关应用技术会议论文集。 Ema Y, Gao T and Pospelov M 2022 '顺磁性电偶极矩的标准模型预言'. https://arxiv.org/abs/2202.10524 Endres C P, Schlemmer S, Schilke P, Stutzki J and Müller H S 2016 虚拟原子与分子数据中心VAMDC中的科隆分子光谱数据库CDMS 《分子光谱学杂志》327, 95–104. Engel J, Friar J L and Hayes A C 2000 核八极关联及原子时间反演破坏的增强 《物理评论C》61(3). https://doi.org/10.1103/physrevc.61.035502 Engel J, Ramsey-Musolf MJandvanKolckU 2013核子、原子核和原子的电偶极矩：标准模型及其之外 《粒子与核物理进展》71, 21–74. http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0146641013000227 Erler J, Birge N, Kortelainen M, Nazarewicz W, Olsen E, Perhac A M and Stoitsov M 2012 核素图的边界 《自然》486(7404), 509–512. Eronen T, Kolhinen V S, Elomaa V V, Gorelov D, Hager U, Hakala J, Jokinen A, Kankainen A, Karvonen P, Kopecky S, Moore I D, Penttilä H, Rahaman S, Rinta-Antila S, Rissanen J, Saastamoinen A, Szerypo J, Weber C and Äystö J 2012 JYFLTRAP：用于精密质量光谱学和同量异位素纯化的彭宁阱 《欧洲物理学杂志 A》48(4), 46. https://doi.org/10.1140/epja/i2012-12046-1 Ettenauer S, Simon M C, Gallant A T, Brunner T, Chowdhury U, Simon V V, Brodeur M, Chaudhuri A, Mané E, Andreoiu C, Audi G, López-Urrutia J R C, Delheij P, Gwinner G, Lapierre A, Lunney D, Pearson M R, Ringle R, Ullrich J and Dilling J 2011 首次在彭宁阱中使用高电荷态测量短寿命核素的质量 《物理评论快报》107, 272501. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.107.272501

Fadeev P, Berengut J C and Flambaum V V 2020 精细结构常数变化对th229核钟跃迁的灵敏度 《物理评论A》102(5). http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.102.052833 Failla G 1932 镭防护 《放射学》19(1), 12–21. https://doi.org/10.1148/19.1.12 Fan M, Holliman C A, ShiX, Zhang H, Straus M W, Li X, Buechele S W and Jayich A M 2021 对冷却$RaOH^+$和$RaOCH_3^+$进行光学质谱 《物理评论快报》126, 023002. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.126.023002 Fan M, Holliman C A, Wang A L and Jayich A M 2019 镭离子的激光冷却 PRL 122(22), 223001. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.122.223001 Fanti V, Lai A, Marras D, Musa L, Bevan A, Gershon T, Hay B, Moore R, Moore K, Munday D, Needham M, Parker M, Takach S, White T, Wotton S, Barr G, Blümer H et al. 1999 对中性K介子双π介子衰变中直接CP破坏的新测量 《物理快报B》465(1), 335–348. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269399010308 Fedderke M A, Graham P W and Rajendran S 2021 '用于微赫兹引力波探测的小行星'. arXiv2112.11431. https://arxiv.org/abs/2112.11431 Fedosseev V, Chrysalidis K, Goodacre T D, Marsh B, Rothe S, Seiffert C and Wendt K 2017 使用ISOLDE的激光离子源产生并研究放射性同位素 《G辑物理学杂志：核与粒子物理》44(8), 084006. Feinberg B, Gould H and Munger C T J 2015 使用钫测量电子电偶极矩 TRIUMF S1324LOI . https://mis.triumf.ca/science/experiment/view/S1324LOI Fenker B, Gorelov A, Melconian D, Behr J A, Anholm M, Ashery D, Behling R S, Cohen I, Craiciu I, Gwinner G, McNeil J, Mehlman M, Olchanski K, Shidling P D, Smale S and Warner C L 2018 自旋极化 ^{37}K衰变中 β 不对称性的精密测量 《物理评论快报》120, 062502. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.120.062502 Fink D, Richter S, Blaum K, Catherall R, Crepieux B, Fedosseev V, Gottberg A, Kron T, Marsh B, Mattolat C, Raeder S, Rossel R, Rothe S, Schwellnus F, Seliverstov M, Sjödin M, Stora T, Suominen P and Wendt K 2015 在ISOLDE/欧洲核子研究中心在线实现并首次运行激光离子源与阱 《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》344, 83–95. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X14010222 Fitch N and Tarbutt M 2021 激光冷却分子 《先进原子、分子与光物理学》70, 157–262. https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1049250X21000033 Flambaum V and Ginges J 2002 原子中的核 Schiff 矩及时间反演不变性破坏 《物理评论A》65(3), 1–9. http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.65.032113 Flambaum V, Pospelov M, Ritz A and Stadnik Y 2020 顺磁性原子与分子中的电偶极矩实验对强子CP破坏的灵敏度 《物理评论D》102(3). https://doi.org/10.1103/physrevd.102.035001

Flambaum V, Samsonov I and Tan H T 2020a 顺磁分子中 CP破坏的核子间相互作用的影响 《物理评论D》102(11). https://doi.org/10.1103/physrevd.102.115036 Flambaum V V 1994 宇称和时间反演不变性破坏相互作用诱导的自旋刺猬与集体磁四极矩 《物理快报B》320(3-4), 211–215. Flambaum V V 2019 含229Th分子中增强的核 Schiff 矩与时间反演破坏《 Physical Review C 》 99(3), 035501. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.99.035501 Flambaum V V, DeMille D and Kozlov M G 2014 核磁四极矩诱导的分子中时间反演对称性破缺 《物理评论快报》113(10), 103003. http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.113.103003 Flambaum V V and Dzuba V A 2020 增强的核 Schiff 矩产生的原子和分子的电偶极矩 《物理评论A》101(4), 042504. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.101.042504 Flambaum V V, Dzuba V A and Harabati C 2017 核四极矩对原子中宇称不守恒的影响 《物理评论A》96, 012516. Flambaum V V and Ginges J S M 2005 多电子原子能级和电磁振幅的辐射势及量子电动力学辐射修正计算 《物理评论A》72, 052115. Flambaum V V and Khriplovich I V B 1985 关于双原子分子中宇称不守恒效应的增强 《物理快报》110A(3), 121–125. Flambaum V V, Samsonov I B and Tan H B T 2020b 顺磁分子对 CP破坏的强子相互作用和质子电偶极矩的限制 《高能物理学杂志》2020(10). https://doi.org/10.1007/jhep10(2020)077 Flambaum V V and Tan H B T 2019 轴子暗物质诱导的振荡核电偶极矩产生原子和分子的电偶极矩及核自旋转动 《物理评论D》100(11), 111301. Flambaum V V and Zelevinsky V G 2003 软核八极振动导致原子中核 Schiff 矩增强及时间反演破坏 《物理评论C》68, 035502. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.68.035502 Fleig T 2017a HfF^+ 的 $\mathcal{P},\mathcal{T}$-奇宇称和磁超精细相互作用常数及激发态寿命《物理评论A》96, 040502. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.96.040502 Fleig T 2017b TaO^+ 作为搜寻标准模型之外新物理的候选分子离子《物理评论A》95(2), 022504. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.95.022504 Fleig T and DeMille D 2021 适于由激光冷却原子组装、用于新物理搜寻的含镭分子的理论方面 《New J. Phys.》23(11), 113039. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/ac3619 Forestini M, Guelin M and Cernicharo J 1997 渐近巨星支星中的碳-14：IRC+10216的情况。《Astron. Astrophys.》317, 883. Franberg H 2008 同位素分离在线型设施中奇异短寿命碳同位素的产生 博士论文 Bern U. https://cds.cern.ch/record/1136904

Frebel A, Christlieb N, Norris J E, Thom C, Beers T C and Rhee J 2007 发现富含铀的强 r 过程增强贫金属星 HE 1523-0901 《天体物理学杂志》660(2), L117–L120. https://doi.org/10.1086/518122 Froese P and Navratil P 2021 轻核电偶极矩的从头算计算 《Physical Review C》104(2), 025502. Gade A and Sherrill B 2019 FRIB 400 MeV/u能量升级的科学依据 技术报告 FRIB/密歇根州立大学. https://frib.msu.edu/news/2019/frib400-upgrade.html Gail H P and Sedlmayr E 2014 星周尘埃壳的物理学与化学 剑桥大学出版社. Garcia Ruiz R, Bissell M, Blaum K, Ekström A, Frömmgen N, Hagen G, Hammen M, Hebeler K, Holt J, Jansen G et al. 2016 富中子钙同位素的电荷半径异常大 《自然·物理》12(6), 594–598. Garcia Ruiz R F, Berger R, Billowes J, Binnersley C L, Bissell M L, Breier A A, Brinson A J, Chrysalidis K, Cocolios T E, Cooper B S, Flanagan K T, Giesen T F, de Groote R P, Franchoo S, Gustafsson F P, Isaev T A, Koszorús Á, Neyens G, Perrett H A, Ricketts C M, Rothe S, Schweikhard L, Vernon A R, Wendt K D A, Wienholtz F, Wilkins S G and Yang X F 2020 短寿命放射性分子的光谱学 《自然》581(7809), 396–400. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2299-4 Gaul K and Berger R 2017 电子电偶极矩相互作用的零阶正则近似方法 《化学物理学杂志》147(1), 014109. Gaul K and Berger R 2020a 激光冷却三原子分子中宇称和时间反演破坏的从头算研究 《物理评论A》101(1), 012508. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.101.012508 Gaul K and Berger R 2020b 含重元素手性分子中核电四极耦合常数的准相对论研究 《分子物理学》118(19- 20), e1797199. https://doi.org/10.1080/00268976.2020.1797199 Gaul K and Berger R 2020c 用于基础物理精密检验的分子性质准相对论计算工具箱方法 《化学物理学杂志》152(4), 044101. https://doi.org/10.1063/1.5121483 Gaul K, Kozlov M G, Isaev T A and Berger R 2020a 手性分子作为直接探测 $\mathcal{P}$-奇宇称宇宙场的高灵敏度探针 《物理评论快报》125, 123004. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.125.123004 Gaul K, Kozlov M G, Isaev T A and Berger R 2020b 手性分子中的电子与宇宙场之间的宇称不守恒相互作用 《物理评论A》102, 032816. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.102.032816 Gaul K, Marquardt S, Isaev T and Berger R 2019 极性双原子自由基中相对论和化学增强对 $\mathcal{P},\mathcal{T}$-奇宇称效应的系统研究 《物理评论A》99, 032509. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.99.032509 Geissel H, Armbruster P, Behr K, Brünle A, Burkard K, Chen M, Folger H, Franczak B, Keller H, Klepper O, Langenbeck B, Nickel F, Pfeng E, Pfützner M, Roeckl E, Rykaczewski K, Schall I, Schardt D, Scheidenberger C, Schmidt K H, Schröter A, Schwab T, Sümmerer K, Weber M, Münzenberg G, Brohm T, Clerc H G, Fauerbach M, Gaimard J J, Grewe A,

Hanelt E, Knödler B, Steiner M, Voss B, Weckenmann J, Ziegler C, Magel A, Wollnik H, Dufour J, Fujita Y, Vieira D和Sherrill B 1992 GSI弹核碎片分离器（FRS）：一种用于相对论性重离子的多功能磁系统 《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》70(1), 286–297. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168583X9295944M Giatzoglou A, Poomaradee T, Pohjalainen I, Rinta-Antila S, Moore I D, Walker P M, Marmugi L和Renzoni F 2018 铯同位素和同核异能态的制备与激光冷却设施 《核仪器与方法物理研究A辑：加速器、光谱仪、探测器及相关设备》908, 367–375. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218310532 Ginges J和Flambaum V 2004 原子中的基本对称性破缺及基本粒子统一理论的检验 物理学报告 397(2), 63–154. http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0370157304001322https: //linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0370157304001322 Ginges J S M和Dzuba V A 2015 钡、镭和120号元素的光谱：组合相关势、单激发-双激发及组态相互作用从头算方法的应用 《物理评论A》91, 042505. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.91.042505 Ginges J S M和Volotka A V 2018 检验原子核附近区域的原子波函数：结合经验推导的核效应和量子电动力学效应研究超精细结构 《物理评论A》98, 032504. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.98.032504 Ginges J S M, Volotka A V和Fritzsche S 2017 Rb、Cs、Fr、Ba^{+}和Ra^{+} 的基态超精细分裂 《物理评论A》96, 062502. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.96.062502 Gnech A和Viviani M 2020 轻核中的时间反演破坏 《Physical Review C》101, 024004. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.101.024004 González-Alonso M和Ramsey-Musolf M J 2013 轻子惰性 Z' 玻色子与宇称破坏ed 散射 《Physical Review D》87, 055013. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.87.055013 Gottberg A 2016 奇异核素在线分离束流的靶材料 《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》376, 8–15. http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2016.01.020 Graham P W, Kaplan D E, Mardon J, Rajendran S和Terrano W A 2016 利用加速度计直接探测暗物质 《Physical Review D》93, 075029. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.93.075029 Graham P W和Rajendran S 2011 利用冷分子探测轴子暗物质 《Physical Review D》84, 055013. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.84.055013 Graham P W和Rajendran S 2013 直接探测轴子暗物质的新可观测量 《物理评论D》88(3), 1–13. Graner B, Chen Y, Lindahl E G和Heckel B R 2016 降低了 ^{199}Hg永久电偶极矩的上限 《物理评论快报》116(16), 161601. Graner B M 2017 降低 ^{199}Hg永久电偶极矩的上限 博士论文 华盛顿大学。 http://hdl.handle.net/1773/40676

Grasdijk O, Timgren O, Kastelic J, Wright T, Lamoreaux S, DeMille D, Wenz K, Aitken M, Zelevinsky T, Winick T和Kawall D 2021 CeNTREX：在铊-205原子核中搜寻时间反演对称性破缺 Quantum Science & Technology 6(4), 044007. Grefenstette B W, Fryer C L, Harrison F A, Boggs S E, DeLaney T, Laming J M, Reynolds S P, Alexander D M, Barret D, Christensen F E, Craig W W, Forster K, Giommi P, Hailey C J, Hornstrup A, Kitaguchi T, Koglin J E, Lopez L, Mao P H, Madsen K K, Miyasaka H, Mori K, Perri M, Pivovaroff M J, Puccetti S, Rana V, Stern D, Westergaard N J, Wik D R, Zhang W W和Zoglauer A 2016 仙后座A中放射性 ^{44}Ti的分布 《天体物理学杂志》834, 19. Gregory P D, Blackmore J A, Bromley S L, Hutson J M和Cornish S L 2021 超冷极性分子中的稳健存储量子比特 《自然·物理》17(10), 1149–1153. Groopman E, Zinner E, Amari S, Gyngard F, Hoppe P, Jadhav M, Lin Y, Xu Y, Marhas K和Nittler L R 2015 从超新星产生的太阳前星际尘埃颗粒推断出的初始 ^{26}Al/^{27}Al比值高于此前估计 《天体物理学杂志》809(1), 31. https://doi.org/10.1088/0004-637x/809/1/31 Groot-Berning K, Stopp F, Jacob G, Budker D, Haas R, Renisch D, Runke J, Thörle-Pospiech P, Düllmann C E和Schmidt-Kaler F 2019 用于光谱学的单个钍离子的囚禁与伴随冷却 《物理评论A》99(2). https://doi.org/10.1103/physreva.99.023420 Guélin M, Forestini M, Valiron P, Ziurys L M, Anderson M A, Cernicharo J和Kahane C 1995 渐近巨星支星中的核合成：观测IRC $+$ 10216 中的镁-25和镁-26，并可能探测到铝-26 《天文学与天体物理学》297, 183. Guo M, Zhu B, Lu B, Ye X, Wang F, Vexiau R, Bouloufa-Maafa N, Quéméner G, Dulieu O和Wang D 2016 制备基态偶极钠-23铷-87分子的超冷气体 《物理评论快报》116(20), 205303. https://journals-aps-org.proxy.uchicago.edu/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.205303 Gustafsson F P, Ricketts C M, Reitsma M L, Garcia Ruiz R F, Bai S W, Berengut J C, Billowes J, Binnersley C L, Borschevsky A, Cocolios T E, Cooper B S, de Groote R P, Flanagan K T, Koszorús A, Neyens G, Perrett H A, Vernon A R, Wang Q, Wilkins S G和Yang X F 2020 用于原子与核结构研究的锡共振电离方案 《物理评论A》102, 052812. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.102.052812 Gwinner G, Behr J A, Cahn S B, Ghosh A, Orozco L A, Sprouse G D和Xu F 1994 放射性 ^{79}Rb的磁光囚禁 《物理评论快报》72, 3795–3798. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.72.3795 Gwinner G和Orozco L A 2022 原子系统中的弱相互作用研究：迈向钫原子宇称不守恒测量 Quantum Science and Technology 7(2), 024001. Haas R, Kieck T, Budker D, Düllmann C E, Groot-Berning K, Li W, Renisch D, Schmidt-Kaler F, Stopp F和Viatkina A 2020 开发一种可提供慢速钍离子（包括 $^{229(m)}$Th）的反冲离子源，且其电荷态分布范围宽 《超精细相互作用》241(1). https://doi.org/10.1007/s10751-019-1688-2 Haas R, Lohse S, Düllmann C, Eberhardt K, Mokry C和Runke J 2017 用于核靶制备的按需喷墨打印系统的开发与表征 《核仪器与方法物理研究A辑：加速器、

《光谱仪、探测器及相关设备》874, 43–49. https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.08.027 Haase P A B, Doeglas D J, Boeschoten A, Eliav E, Iliaš M, Aggarwal P, Bethlem H L, Borschevsky A, Esajas K, Hao Y, Hoekstra S, Marshall V R, Meijknecht T B, Mooij M C, Steinebach K, Timmermans R G E, Touwen A P, Ubachs W, Willmann L 和 Yin Y 2021 BaF 中 P、T 奇分子增强因子的系统研究与不确定度评估 《化学物理学杂志》155(3), 034309. Haase P A B, Eliav E, Iliaš M 和 Borschevsky A 2020 相对论耦合簇层次上的超精细结构常数及其不确定度 《物理化学杂志A》124(16), 3157–3169. PMID: 32202783. https://doi.org/10.1021/acs.jpca.0c00877 Hagen G, Papenbrock T, Hjorth-Jensen M 和 Dean D J 2014 原子核的耦合簇计算 《物理学进展报告》77(9), 096302. https://doi.org/10.1088/0034-4885/77/9/096302 Hammer H W, König S 和 van Kolck U 2020 核有效场论：现状与展望 《现代物理评论》92(2), 025004. Hao Y, Navrátil P, Norrgard E B, Iliaš M, Eliav E, Timmermans R G E, Flambaum V V 和 Borschevsky A 2020 轻多原子分子中的核自旋依赖宇称破坏效应 《物理评论A》102, 052828. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.102.052828 Hausmann M, Aaron A, Amthor A, Avilov M, Bandura L, Bennett R, Bollen G, Borden T, Burgess T, Chouhan S, Graves V, Mittig W, Morrissey D, Pellemoine F, Portillo M, Ronningen R, Schein M, Sherrill B 和 Zeller A 2013 FRIB 先进稀有同位素分离器 ARIS 的设计 《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》317, 349–353. 第十六届电磁同位素分离器及相关应用技术国际会议，2012年12月2日至7日，日本松江。 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X13007210 Haxton W C 和 Henley E M 1983 增强的 T不守恒核矩 《物理评论快报》51, 1937–1940. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.51.1937 Haxton W C, Liu C P 和 Ramsey-Musolf M J 2002 核环偶极矩 《Physical Review C》65, 045502. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.65.045502 Haxton W C 和 Wieman C E 2001 原子宇称不守恒与核环偶极矩 《核与粒子科学年度评论》51(1), 261–293. http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.nucl.51.101701.132458 Heaven M C, Barker B J 和 Antonov I O 2014 最简单锕系元素化学键的光谱与结构 《物理化学杂志A》118(46), 10867–10881. https://doi.org/10.1021/jp507283n Heinke R, Kron T, Raeder S, Reich T, Schönberg P, Trümper M, Weichhold C 和 Wendt K 2017 垂直几何构型下的高分辨率源内激光光谱学 《超精细相互作用》238(1). Heinke R M 2019 钬放射性同位素的源内高分辨率光谱学——在 ISOLDE 的激光离子源与阱 LIST 中定制的在线垂直激光相互作用 博士

论文 美因茨约翰内斯·古腾堡大学。http://doi.org/10.25358/openscience-2346 Heinz M, Tichai A, Hoppe J, Hebeler K 和 Schwenk A 2021 包含三体算符的介质相似重整化群《Physical Review C》103(4), 044318. Herfurth F, Dilling J, Kellerbauer A, Bollen G, Henry S, Kluge H J, Lamour E, Lunney D, Moore R, Scheidenberger C, Schwarz S, Sikler G 和 Szerypo J 2001 用于积累、束团化以及改善放射性离子束发射度的线性射频离子阱 《核仪器与方法物理研究A辑：加速器、光谱仪、探测器及相关设备》469(2), 254–275. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900201001681 Hergert H 2017 用于闭壳层与开壳层原子的介质相似重整化群 Phys. Scripta 92(2), 023002. http://stacks.iop.org/1402-4896/92/i=2/a=023002Hergert H, Bogner S K, Morris T D, Schwenk A 和 Tsukiyama K 2016 介质相似重整化群：一种新颖的原子核第一性原理方法《物理学报告》621, 165–222. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157315005414 Hinds E A 1997 利用分子检验时间反演对称性 Phys. Scr. T70, 34–41. Ho C J, Devlin J A, Rabey I M, Yzombard P, Lim J, Wright S C, Fitch N J, Hinds E A, Tarbutt M R 和 Sauer B E 2020 测量电子电偶极矩的新技术 《新物理学杂志》22(5), 053031. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/ab83d2 Holliman C A, Fan M, Contractor A, Brewer S M 和 Jayich A M 2022 镭离子光钟 PRL 128(3), 033202. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.128.033202 Hosten O, Engelsen N J, KrishnakumarR 和 Kasevich MA2016 使用纠缠原子实现比量子投影极限低 100 倍的测量噪声 《自然》529(7587), 505–508. http://dx.doi.org/10.1038/nature16176 Hu B, Jiang W, Miyagi T, Sun Z, Ekström, Forssén C, Hagen G, Holt J D, Papenbrock T, Stroberg S R 和 Vernon I 2021 “从头算预测将 ^{208}Pb 的中子皮与核力联系起来”。arXiv2112.01125. https://arxiv.org/abs/2112.01125 Hu B S, Padua-Argüelles J, Leutheusser S, Miyagi T, Stroberg S R 和 Holt J D 2022 自旋依赖暗物质直接探测的从头算结构因子 《物理评论快报》128(7), 072502. Hu M G, Liu Y, Grimes D D, Lin Y W, Gheorghe A H, Vexiau R, Bouloufa-Maafa N, Dulieu O, Rosenband T 和 Ni K K 2019 直接观测超冷 KRb 分子的双分子反应 《科学》366(6469), 1111–1115. https://www-science-org.proxy.uchicago.edu/doi/abs/10.1126/science.aay9531 Hucko T 2022 《美国物理学会原子、分子与光学物理分部》第53届年会上报告的首次观测到钔中 7s-8s M1 跃迁，p. C03.00006. Hucul D, Christensen J E, Hudson E R 和 Campbell W C 2017 合成囚禁离子量子比特的光谱学 《物理评论快报》119, 100501. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.119.100501

Hudson J J、Kara D M、Smallman I J、Sauer B E、Tarbutt M R 和 Hinds E A，2011，改进的电子形状测量，《自然》473(7348)，493–496。http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21614077http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nature10104 Huet P 和 Sather E，1995，电弱重子生成与标准模型CP破坏，《物理评论D》51(2)，379–394。Hund F，1927年，《分子光谱的解释。III. 关于含有两个以上原子的分子的振动和转动光谱的评论》，《物理学杂志》43，805–826。Hunter L R、Peck S K、Greenspon A S、Alam S S 和 DeMille D，2012，激光冷却TlF的前景，《物理评论A》85(1)，012511。http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.85.012511 Hur J、Craik D P A、Counts I、Knyazev E、Caldwell L、Leung C、Pandey S、Berengut J C、Geddes A、Nazarewicz W、Reinhard P G、Kawasaki A、Jeon H、Jhe W 和 Vuletić V，2022年，在搜寻新玻色子的光谱学研究中发现双源King图非线性的证据，《物理评论快报》128(16)。https://doi.org/10.1103/physrevlett.128.163201 Hutzler N R，2020年，将多原子分子用作基础物理的量子传感器，《量子科学与技术》5(4)，044011。https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/abb9c5 Hutzler N R、Lu H I 和 Doyle J M，2012，缓冲气体束：一种强、冷且慢的原子和分子源。《化学评论》112(9)，4803–27。http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/cr200362uhttp://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22571401 Hutzler N 和 Yu P，2021，在多原子分子中探测形变原子核的基本对称性，载于《美国物理学会原子、分子与光学物理分部第52届年会》，第 K03.00009 页。IDS Collaboration，2021，《ISOLDE衰变站》。https://isolde-ids.web.cern.ch/ Ignatovich V K，1969年，原子中电子电偶极矩的放大，《苏联物理学·实验与理论物理学杂志》29(6)，1084–1088。http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/e/index/e/29/6/p1084?a=list Isaev T A 和 Berger R，2014，开壳层双原子分子中宇称破坏超精细耦合常数的周期性趋势，《分子光谱学杂志》300，26–30。Isaev T A 和 Berger R，2016，基于简单理论概念、适用于激光冷却的多原子候选分子，《物理评论快报》116(6)，063006。http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.063006 Isaev T A 和 Berger R，2018，迈向超冷手性分子，《CHIMIA国际化学杂志》72(6)，375–378。http://www.ingentaconnect.com/content/10.2533/chimia.2018.375 Isaev T A、Zaitsevskii A V 和 Eliav E，2017，含重原子核的可激光冷却多原子分子，《物理学杂志B》50(22)，225101。http://stacks.iop.org/0953-4075/50/i=22/a=225101?key=crossref.af387ac5bacab24f0a405e6c627545fc Isaev T、Hoekstra S 和 Berger R，2010，作为测量分子宇称破坏的有前景候选者的激光冷却RaF，《物理评论A》82(5)，052521。http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.82.052521

Jadbabaie A、Pilgram N H、Klos J、Kotochigova S 和 Hutzler N R，2020，通过激发态化学提高低温缓冲气体束源的分子产率，《新物理学杂志》22，022002。https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/ab6eae Jayich A，2021，利用镭分子搜寻新物理的前景。研讨会：放射性分子基础物理研究的新机遇。Jin J、Bekker H、Kirschbaum T、Litvinov Y A、Pálffy A、Sommerfeldt J、Surzhykov A、Thirolf P G 和 Budker D，2022，在高能储存环中激发和探测低能核态。https://arxiv.org/abs/2208.05042 Johnson W R、Safronova M S 和 Safronova U I，2003，相干Z交换与超精细相互作用对原子宇称非守恒相互作用的综合影响，《物理评论A》67，062106。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.67.062106 Kahl E V、Berengut J C、Laatiaoui M、Eliav E 和 Borschevsky A，2019，lr^{+} 能谱的高精度从头算计算，《物理评论A》100，062505。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.100.062505 Kalita M R、Behr J A、Gorelov A、Pearson M R、DeHart A C、Gwinner G、Kossin M J、Orozco L A、Aubin S、Gomez E、Safronova M S、Dzuba V A 和 Flambaum V V，2018，钫 $7s \rightarrow 8s$ 跃迁中的同位素位移：测量及与从头算理论的比较，《物理评论A》97，042507。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.97.042507 Kamiński T、Tylenda R、Menten K M、Karakas A、Winters J M、Breier A A、Wong K T、Giesen T F 和 Patel N A，2018年，在古老爆炸遗迹中天文观测到放射性分子 ^{26}AlF，《自然·天文学》2(10)，778–783。http://www.nature.com/articles/s41550-018-0541-x Kanagin A N、Regmi S K、Pathak P 和 Weinstein J D，2013-12，在固态氩中冻结的铷原子的光抽运，《物理评论A》88(6)，063404。Kanellakopoulos A、Yang X F、Bissell M L、Reitsma M L、Bai S W、Billowes J、Blaum K、Borschevsky A、Cheal B、Devlin C S、Garcia Ruiz R F、Heylen H、Kaufmann S、König K、Koszorús A、Lechner S、Malbrunot-Ettenauer S、Neugart R、Neyens G、Nörtershäuser W、Ratajczyk T、Rodríguez L V、Sels S、Wang S J、Xie L、Xu Z Y 和 Yordanov D T，2020，$N = 40$ 附近锗同位素的核矩，《Physical Review C》102，054331。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.102.054331 Karthein J、DeMille D P、Dilling J、Garcia Ruiz R、Hutzler N R、Mohapatra P、Moroch S B、Ringle R J 和 Udrescu S M，2021，迈向在彭宁阱中利用单分子离子测量破坏对称性的核性质，载于《美国物理学会核物理分部2021年秋季会议》，第 DL.00007 页。Karvonen P、Moore I D、Sonoda T、Kessler T、Penttilä H、Peräjärvi K、Ronkanen P 和 Äystö J，2008，一种用于提高IGISOL效率和束流质量的六极离子束导引器，《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》266(21)，4794–4807。http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X08009191 Kellö V 和 Sadlej A J，1998，根据KF和KCl的微波数据得到的 ^{39}K和 ^{41}K原子核的四极矩，《化学物理快报》292(4)，403–410。https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009261498006800

Kennedy C J、Oelker E、Robinson J M、Bothwell T、Kedar D、Milner W R、Marti G E、Derevianko A和Ye J，2020，《精密计量与宇宙学相遇：通过原子-腔频率比较改进对超轻暗物质的限制》，《物理评论快报》125(20)。http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.201302 Khriplovich I B，光学异构体中超精细结构常数的 1985 P奇差异，《物理学杂志》A 322，507–509。Kim J、Dragos J、Shindler A、Luu T和de Vries J，2018，《利用梯度流和夸克色电偶极矩算符确定核子电偶极矩》，载于《第36届格点场论国际研讨会（Lattice 2018）》，美国密歇根州东兰辛，2018年7月22日至28日。Kim J E和Carosi G，2010，《轴子与强CP问题》，《现代物理评论》82(1)，557–601。https://doi.org/10.1103/revmodphys.82.557 Kim J、Luu T、Rizik M D和Shindler A，2021，《利用梯度流对夸克色电偶极矩进行非微扰重整化：幂发散》，《物理评论D》104(7)，074516。King W H，1963，《关于“钐光谱同位素位移的特异性”一文的评论》，J. Opt. Soc. Am. 53(5)，638–639。Kirby H，1960，《镁的放射化学》，Natl. Acad. Sci. Nuclear Science Series NAS-NS-3016，81–93。Kirchner R，1996，《放射性束流离子源及相关问题（综述）（特邀）》，《科学仪器评论》67(3)，928–933。Kirchner R，1997，《GSI在线质量分离器上元素离子和金属氟化物离子的释放研究》，《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》126(1-4)，135–140。Kley J、Theil T、Venturini E和Weiler A，2021，《六维标准模型有效场论中单圈电偶极矩》。Kłos J、Li H、Tiesinga E和Kotochigova S，2022，《由激光冷却原子组装超冷放射性分子的前景》，New J. Phys. 24(2)，025005。https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/ac50ea Knapen S、Lin T和Zurek K M，2017，《轻暗物质：模型与限制》，PRD 96(11)，115021。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.96.115021 Kofoed-Hansen O和Nielsen K，1951，《短寿命氪同位素及其子体物质》，Physical Review Journals 82(96)，499。Kolkowitz S、Pikovski I、Langellier N、Lukin M、Walsworth R和Ye J，2016，《利用光晶格原子钟探测引力波》，《物理评论D》94(12)。http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.94.124043 Konovalova E A、Kozlov M G、Demidov Y A和Barzakh A E，2017，《铊超精细异常的计算》，Rad. Appl. 2，181–185。arXiv:1703.10048 Kortelainen M、McDonnell J、Nazarewicz W、Reinhard P G、Sarich J、Schunck N、Stoitsov M V和Wild S M，2012，《核能量密度优化：大形变》，《物理评论C》

85，024304。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.85.024304 Köster U，2000，《LOHENGRIN和ISOLDE上的放射性同位素产额与光谱学》。Köster U、Arndt O、Bouquerel E、Fedoseyev V N、Frånberg H、Joinet A、Jost C、Kerkines I S和Kirchner R，2008，《ISOL靶—离子源系统的进展》，《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》266(19-20)，4229–4239。Köster U、Carbonez P、Dorsival A、Dvorak J、Eichler R、Fernandes S、Frånberg H、Neuhausen J、Novackova Z、Wilfinger R和Yakushev A，2007，《（不）可能的ISOL束流》，载于《欧洲物理学杂志：专题》第150卷，施普林格出版社，第285–291页。Koszorús Á、Yang X F、Jiang W G、Novario S J、Bai S W、Billowes J、Binnersley C L、Bissell M L、Cocolios T E、Cooper B S、de Groote R P、Ekström A、Flanagan K T、Forssén C、Franchoo S、Garcia Ruiz R F、Gustafsson F P、Hagen G、Jansen G R、Kanellakopoulos A、Kortelainen M、Nazarewicz W、Neyens G、Papenbrock T、Reinhard P G、Ricketts C M、Sahoo B K、Vernon A R和Wilkins S G，2021，《奇异钾同位素的电荷半径挑战核理论和 $N=32$ 的幻数特性》，《自然·物理》17，439。https://doi.org/10.1038/s41567-020-01136-5 Kozlov M，1985，《双原子分子自由基中P奇和P、T奇效应的半经验计算》，JETP 62(6)，1114。Kozlov M G和Derevianko A，2006，《利用基质隔离自由基灵敏搜索电子电偶极矩的提案》，《物理评论快报》97，063001。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.97.063001 Kozlov M G、Safronova M S、Crespo López-Urrutia J R和Schmidt P O，2018，《高电荷离子：光学钟及其在基础物理中的应用》，《现代物理评论》90(4)，045005。Kozyryev I、Baum L、Matsuda K、Augenbraun B L、Anderegg L、Sedlack A P和Doyle J M，2017，《多原子分子的西西弗斯激光冷却》，《物理评论快报》118(17)，173201。http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.118.173201 Kozyryev I和Hutzler N R，2017，《利用激光冷却的多原子分子精密测量时间反演对称性破缺》，《物理评论快报》119(13)，133002。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.119.133002 Kozyryev I、Lasner Z和Doyle J M，2021，《线性自由基SrOH光谱中对超轻玻色暗物质的增强灵敏度》，《物理评论A》103(4)，043313。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.103.043313 Kron T、Beerwerth R、Raeder S、Fritzsche S、Heinke R、Schönberg P、Trümper M和Wendt K，2020，《新型激光离子源中 ^{97,98,99}铟的超精细结构研究及高分辨激光光谱学》，《物理评论C》102(3)。Kudashov A D、Petrov A N、Skripnikov L V、Mosyagin N S、Isaev T A、Berger R和Titov A V，2014，《一氟化镭（RaF）的从头算研究：一种用于搜寻宇称和时间反演破坏效应的候选分子》，《物理评论A》90(5)，052513。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.90.052513 Kudashov A D、Petrov A N、Skripnikov L V、Mosyagin N S、Titov A V和Flambaum V V，2013，《 ^{225}氧化镭中宇称和时间反演破坏相互作用的计算》，《物理评论A》87，020102(R)。

Lacy J H, Richter M J, Greathouse T K, Jaffe D T and Zhu Q 2002 TEXES：用于中红外的高灵敏度高分辨率光栅光谱仪《太平洋天文学会出版物》114(792), 153–168. https://doi.org/10.1086/338730 Langacker P, Luo M and Mann A K 1992 高精度电弱实验：全面探索超越标准模型的新物理 《现代物理评论》64, 87–192. https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.64.87 Lange R, Huntemann N, Rahm J M, Sanner C, Shao H, Lipphardt B, Tamm C, Weyers S and Peik E 2021 从原子钟比较中改进对局域位置不变性破缺的限制 《物理评论快报》126(1), 011102. Langer N 2012 大质量单星和双星的超新星前演化 Annual Review of Astronomy and Astrophysics 50(1), 107–164. https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081811-125534 Langin T K, Jorapur V, Zhu Y, Wang Q and DeMille D 2021 对 Λ冷却极性分子的偏振增强深光学偶极阱俘获 《物理评论快报》127, 163201. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.127.163201 Lapierre A, Brodeur M, Brunner T, Ettenauer S, Gallant A, Simon V, Good M, Froese M, Crespo López-Urrutia J, Delheij P, Epp S, Ringle R, Schwarz S, Ullrich J and Dilling J 2010 用于高电荷态短寿命同位素质量测量的TITAN电子束离子阱电荷增殖器——首次在线运行 《核仪器与方法物理研究A辑：加速器、光谱仪、探测器及相关设备》624(1), 54–64. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210020231 Lasner Z, Lunstad A, Zhang C, Cheng L and Doyle J M 2022 实现SrOH近乎闭合快速光子循环的振动-电子分支比 《物理评论A》106(2), L020801. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.106.L020801 Laubender G and Berger R 2003 手性分子核磁共振谱中宇称破缺化学位移的从头算计算 ChemPhysChem 4, 395–399. Leach K, Grossheim A, Lennarz A, Brunner T, Crespo López-Urrutia J, Gallant A, Good M, Klawitter R, Kwiatkowski A, Ma T, Macdonald T, Seeraji S, Simon M, Andreoiu C, Dilling J and Frekers D 2015 TRIUMF阱内衰变光谱学装置 《核仪器与方法物理研究A辑：加速器、光谱仪、探测器及相关设备》780, 91–99. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215001023 Leimbach D, Karls J, Guo Y, Ahmed R, Ballof J, Bengtsson L, Boix Pamies F, Borschevsky A, Chrysalidis K, Eliav E et al. 2020 砹的电子亲和能 《自然·通讯》11(1), 1–9. Leistenschneider E, Reiter M P, Ayet San Andrés S, Kootte B, Holt J D, Navrátil P, Babcock C, Barbieri C, Barquest B R, Bergmann J, Bollig J, Brunner T, Dunling E, Finlay A, Geissel H, Graham L, Greiner F, Hergert H, Hornung C, Jesch C, Klawitter R, Lan Y, Lascar D, Leach K G, Lippert W, McKay J E, Paul S F, Schwenk A, Short D, Simonis J, Somà V, Steinbrügge R, Stroberg S R, Thompson R, Wieser M E, Will C, Yavor M, Andreoiu C, Dickel T, Dillmann I, Gwinner G, Plaß W R, Scheidenberger C, Kwiatkowski A A and Dilling J 2018 通过富中子钛同位素的精密质量测量，见证 $N = 32$ 壳层闭合的初现 《物理评论快报》120, 062503. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.120.062503

Lennarz A, Grossheim A, Leach K G, Alanssari M, Brunner T, Chaudhuri A, Chowdhury U, Crespo López-Urrutia J R, Gallant A T, Holl M, Kwiatkowski A A, Lassen J, Macdonald T D, Schultz B E, Seeraji S, Simon M C, Andreoiu C, Dilling J and Frekers D 2014 电荷态增强放射性离子的阱内光谱学 《物理评论快报》113, 082502. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.113.082502 Letokhov V S 1975 弱相互作用导致的左手性和右手性分子能级差异 《物理快报A》53, 275–276. Li J and Meng J 2018 协变密度泛函理论中的核磁矩 Front. Phys. 13, 132109. https://doi.org/10.1007/s11467-018-0842-7 Li R, Mostamand M, Romans J, Reich B B and Lassen J 2020 TRIUMF离线激光离子源测试台的最新共振电离激光离子源进展 《超精细相互作用》241(1), 22. https://doi.org/10.1007/s10751-020-1694-4 Lim J, Almond J R, Trigatzis M A, Devlin J A, Fitch N J, Sauer B E, Tarbutt M R and Hinds E A 2018 用于测量电子电偶极矩的激光冷却的氟化镱分子 《物理评论快报》120(12), 123201. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.120.123201 Lin Y, Leibrandt D R, Leibfried D and Chou C w 2020 原子与分子之间的量子纠缠 《自然》581(7808), 273–277. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2257-1 Liu C P and Timmermans R G E 2004 P-和 T-奇宇核子相互作用与氘核电偶极矩 《Physical Review C》70, 055501. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.70.055501 Liu L R, Hood J D, Yu Y, Zhang J T, Wang K, Lin Y W, Rosenband T and Ni K K 2019 基态冷却的单原子的分子组装 《物理评论X》9(2), 021039. Lösch A, de Boer J, Kvasil J, Levon A I, Würkner M, Baltzer H, Grafen V and Günther C 1994 ^{229}Pa中的低能级与宇称双重态 《物理学杂志A》348(3), 235–235. https://doi.org/10.1007/BF01291923 Loseth B T 2020 用于光学探测原子核反应产物的单原子显微镜的研制 博士论文 密歇根州立大学。https://d.lib.msu.edu/etd/48380 Lu H I, Rasmussen J, Wright M J, Patterson D and Doyle J M 2011 一束冷而慢的分子束。《物理化学化学物理：PCCP》13(42), 18986–90. Lu Z T, Bowers C, Freedman S J, Fujikawa B K, Mortara J L, Shang S Q, Coulter K P and Young L 1994 短寿命放射性同位素的激光囚禁 《物理评论快报》72, 3791–3794. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.72.3791 Ludlow A D, Boyd M M, Ye J, Peik E and Schmidt P O 2015 光学原子钟 《现代物理评论》87(2), 637–701. Lunney D 2017 利用ISOLTRAP扩展并精化核质量面 《G辑物理学杂志：核与粒子物理》44(6). Lüscher, M. 2010 格点量子色动力学中Wilson流的性质与用途 《高能物理学杂志》1008, 071. Lüscher, M. 2013 手征对称性与杨–米尔斯梯度流 《高能物理学杂志》1304, 123. Lüscher M 2014 杨–米尔斯梯度流在格点量子色动力学中的未来应用 PoS LATTICE2013, 016.

Lüscher, M. and Weisz P 2011 非阿贝尔规范理论中梯度流的微扰分析 《高能物理学杂志》 1102, 051. Macpherson M J D, Zetie K P, Warrington R B, Stacey D N and Hoare J P 1991 在876纳米波长下对铋原子宇称不守恒光学旋光的精密测量 《物理评论快报》67, 2784–2787. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.67.2784 Maison D E, Flambaum V V, Hutzler N R and Skripnikov L V 2021 为搜寻类轴子粒子而研究一氢氧化镱分子的电子结构 《物理评论A》103, 022813. Maison D E and Skripnikov L V 2022 类轴子粒子交换诱导的钫原子静态电偶极矩 《物理评论A》105, 032813. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.105.032813 Maison D E, Skripnikov L V and Flambaum V V 2019 为搜寻核磁四极矩而对 ^{173}YbOH进行的理论研究 《物理评论A》 100(3), 032514. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.100.032514 Maison D E, Skripnikov L V, Flambaum V V and Grau M 2020 利用$LuOH^+$ 阳离子搜寻CP破坏核磁四极矩 《化学物理学杂志》153(22), 224302. https://doi.org/10.1063/5.0028983 Maison D E, Skripnikov L V, Oleynichenko A V and Zaitsevskii A V 2021 一氢氧化镱分子中的轴子介导电子-电子相互作用 《化学物理学杂志》154(22), 224303. https://doi.org/10.1063/5.0051590 Maison D E, Skripnikov L V, Penyazkov G, Grau M and Petrov A N 2022 $\mathcal{T},\mathcal{P}$-奇效应，见$LuOH^+$ 阳离子 《物理评论A》106(6). https://doi.org/10.1103/physreva.106.062827 Malbrunot-Ettenauer S, Kaufmann S, Bacca S, Barbieri C, Billowes J, Bissell M L, Blaum K, Cheal B, Duguet T, Garcia Ruiz R F, Gins W, Gorges C, Hagen G, Heylen H, Holt J D, Jansen G R, Kanellakopoulos A, Kortelainen M, Miyagi T, Navrátil P, Nazarewicz W, Neugart R, Neyens G, Nörtershäuser W, Novario S J, Papenbrock T, Ratajczyk T, Reinhard P G, Rodríguez L V, Sánchez R, Sailer S, Schwenk A, Simonis J, Somà V, Stroberg S R, Wehner L, Wraith C, Xie L, Xu Z Y, Yang X F and Yordanov D T 2022 镍同位素 $^{58-68,70}$Ni的核电荷半径 《物理评论快报》128, 022502. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.128.022502 Marsh B A, Day Goodacre T, Sels S, Tsunoda Y, Andel B, Andreyev A N, Althubiti N A, Atanasov D, Barzakh A E, Billowes J, Blaum K, Cocolios T E, Cubiss J G, Dobaczewski J, Farooq-Smith G J, Fedorov D V, Fedosseev V N, Flanagan K T, Gaffney L P, Ghys L, Huyse M, Kreim S, Lunney D, Lynch K M, Manea V, Martinez Palenzuela Y, Molkanov P L, Otsuka T, Pastore A, Rosenbusch M, Rossel R E, Rothe S, Schweikhard L, Seliverstov M D, Spagnoletti P, van Beveren C, van Duppen P, Veinhard M, Verstraelen E, Welker A, Wendt K, Wienholtz F, Wolf R N, Zadvornaya A and Zuber K 2018 汞原子核中形状交错效应的表征 《自然·物理》14(12), 1163–1167. Martoff C J, Granato F, Palmaccio V, Yu X, Smith P F, Hudson E R, Hamilton P, Schneider C, Chang E, Renshaw A, Malatino F, Meyers P D and Lamichhane B 2021 HUNTER：基于激光冷却原子源的高精度重中微子搜寻 《量子科学与技术》6(2), 024008。

Masuda T, Ang D G, Hutzler N R, Meisenhelder C, Sasao N, Uetake S, Wu X, DeMille D, Gabrielse G, Doyle J M and Yoshimura K 2021 多通道硅光电倍增管阵列中光学串扰的抑制 《光学快报》29(11), 16914. https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-29-11-16914 McCarron D J, Steinecker M H, Zhu Y and DeMille D 2018 超冷极性分子的磁俘获 《物理评论快报》121(1), 013202. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.121.013202 Meekhof D M, Vetter P, Majumder P K, Lamoreaux S K and Fortson E N 1993 铅原子中宇称不守恒光学旋光的高精度测量 《物理评论快报》71, 3442–3445. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.71.3442 Mereghetti E, Hockings W H and van Kolck U 2010 θ项的有效手征拉格朗日量 《物理年鉴》325, 2363–2409. Mereghetti E, Monahan C J, Rizik M D, Shindler A and Stoffer P 2022 梯度流方案中夸克偶极算符的单圈匹配 《高能物理学杂志》2022(4). https://doi.org/10.1007/jhep04(2022)050 Metcalf H J and van der Straten P 1999 激光冷却与俘获 施普林格出版社。 Meyer E R and Bohn J L 2009 基于碱金属或含碱土金属分子的电子电偶极矩搜索 《物理评论A》80(4), 042508. http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.80.042508 Mikami K, Tanaka M and Yamamoto Y 2017 利用同位素位移探测新的原子内力 《欧洲物理学杂志C辑》77(12), 896. Minamisono K, Mantica P, Klose A, Vinnikova S, Schneider A, Johnson B and Barquest B 2013 国家超导回旋加速器实验室BECOLA设施共线激光光谱系统的调试 《核仪器与方法物理研究A辑：加速器、光谱仪、探测器及相关设备》709, 85–94. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213001034 Mitra D, Vilas N B, Hallas C, Anderegg L, Augenbraun B L, Baum L, Miller C, Raval S and Doyle J M 2020 对称陀螺分子的直接激光冷却 《科学》369(6509), 1366–1369. https://doi.org/10.1126/science.abc5357 Miyagi T, Stroberg S R, Holt J D and Shimizu N 2020 从头算多壳层价空间哈密顿量与反转岛 《Physical Review C》102(3), 034320. Miyagi T, Stroberg S R, Navrátil P, Hebeler K and Holt J D 2022 重原子核的收敛从头算 《Physical Review C》105(1), 014302. Mølhave K and Drewsen M 2000 在离子阱中形成平动冷却的MgH^+ 和MgD^+ 分子 《物理评论A》62, 011401. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.62.011401 Mollaebrahimi A 2021 质量和半衰期测量：A为100的丰质子同位素；FRS离子捕获器和CISE的发展 博士论文 格罗宁根大学。 Möller P, Bengtsson R, Carlsson B G, Olivius P, Ichikawa T, Sagawa H and Iwamoto A 2008 原子核基态的轴对称性与反射不对称性 《原子数据与核数据表》94(5), 758–780. Molony P K, Gregory P D, Ji Z, Lu B, Köppinger M P, Le Sueur C R, Blackley C L, Hutson J M and Cornish S L 2014 在转动振动态中制备超冷 $^{87}Rb^{133}Cs$分子

基态。《物理评论快报》113(25), 255301. https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.113.255301 Moore I D, Dendooven P 和 Ärje J 2014 IGISOL 技术——三十年的发展。《超精细相互作用》223(1), 17–62. https://doi.org/10.1007/s10751-013-0871-0 Moroshkin P, Hofer A 和 Weis A 2008 固态氦-4中的原子和分子缺陷。物理学报告 469(1), 1–57。Morrissey D J 和 Sherrill B M 1998 基于弹核碎裂的放射性核束设施。伦敦皇家学会哲学汇刊。A辑：数学、物理与工程科学 356(1744), 1985–2006. https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rsta.1998.0260 Mosyagin N S, Zaitsevskii A V, Skripnikov L V 和 Titov A V 2016 锕系元素的广义相对论有效芯势。《国际量子化学杂志》116(4), 301–315。Mougeot M, Atanasov D, Karthein J, Wolf, Ascher P, Blaum K, Chrysalidis K, Hagen G, Holt J, Huang W 等 2021 对 $^{99-101}$In的质量测量挑战了关于核素 ^{100}Sn的从头算核理论。《自然·物理》17(10), 1099–1103。Mukherjee M, Beck D, Blaum K, Bollen G, Dilling J, George S, Herfurth F, Herlert A, Kellerbauer A, Kluge H J, Schwarz, Schweikhard L 和 Yazidjian C 2008 ISOLTRAP：用于短寿命核素质谱测量的在线彭宁阱。《欧洲物理学杂志 A》35(1), 1–29。Münzenberg G, Faust W, Hofmann S, Armbruster, Güttner 和 Ewald 1979 速度过滤器SHIP：一种用于分离未经减速的重离子聚变产物的装置。《核仪器与方法》161(1), 65–82。Nahrwold S 和 Berger R 2009 宇称破坏核磁共振屏蔽张量的零阶正则近似方法。《化学物理学杂志》130(21), 214101。Narayanan R 和 Neuberger H 2006 连续统威尔逊环算符中的无限N相变。《高能物理学杂志》0603, 064。Nash K L, Madic C, Mathur J N 和 Lacquement J 2006，载于 L. R Morss、N. M Edelstein 和 J Fuger 编，《锕系与超锕系元素化学》，施普林格·荷兰，多德雷赫特，第2622–2798页。https://doi.org/10.1007/1-4020-3598-5_24Neufcourt L, Cao Y, Giuliani S A, Nazarewicz W, Olsen E 和 Tarasov O B 2020 核素图范围的定量界限。《Physical Review C》101, 044307. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.101.044307 Neufcourt L, Cao Y, Nazarewicz W 和 Viens F 2018 将贝叶斯方法用于核可观测量的基于模型的外推。《Physical Review C》98, 034318. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.98.034318 Ng K B, Zhou Y, Cheng L, Schlossberger N, Park S Y, Roussy T S, Caldwell L, Shagam Y, Vigil A J, Cornell E A 和 Ye J 2022 对ThF+ 中电子电偶极矩敏感态的光谱学。《物理评论A》105(2). https://doi.org/10.1103/physreva.105.022823 Nguyen A T, Budker D, DeMille D 和 Zolotorev M 1997 在原子镝中搜寻宇称不守恒。《物理评论A》56, 3453–3463. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.56.3453

Ni K K, Ospelkaus S, de Miranda M H G, Pe'er A, Neyenhuis B, Zirbel J J, Kotochigova S, Julienne P S, Jin D S 和 Ye J 2008 极性分子的高相空间密度气体。《科学》322(5899), 231–235. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18801969 Nieminen A, Campbell P, Billowes J, Forest D H, Griffith J A R, Huikari J, Jokinen A, Moore I D, Moore R, Tungate G 和 Äystö J 2002 用于共线激光光谱学的在线离子冷却与束团化。《物理评论快报》88(9), 094801. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.88.094801 Norrgard E B, Barker D S, Eckel S, Fedchak J A, Klimov N N 和 Scherschligt J 2019 光学囚禁多原子分子中的核自旋依赖的宇称破坏。《自然·通讯物理》2(1), 77. http://arxiv.org/abs/1812.00064http://www.nature.com/articles/ s42005-019-0181-1 Novario S, Gysbers P, Engel J, Hagen G, Jansen G R, Morris T D, Navrátil P, Papenbrock T 和 Quaglioni S 2021 钙 ^{48}中的无中微子双β 衰变的耦合簇计算。《物理评论快报》126, 182502. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.126.182502 Novikov V N, Sushkov O P, Flambaum V V 和 Khriplovich I B 1977 《苏联物理学·实验与理论物理学杂志》46, 420 (1977) 《苏联物理学·实验与理论物理学杂志》46, 420。或《实验与理论物理学杂志》73, 802 (1977)。Oleynichenko A V, Skripnikov L V, Zaitsevskii A V 和 Flambaum V V 2022 用于$\mathcal{CP}$破坏搜寻的可激光冷却$AcOH^+$ 离子。《物理评论A》105, 022825. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.105.022825 Oleynichenko A V, Zaitsevskii A 和 Eliav E 2020 迈向高性能相对论电子结构建模：EXP-T 程序包，载于 V Voevodin 和 S Sobolev 编，《超级计算》第1331卷，施普林格国际出版，Cham，第375–386页。Olmschenk S, Matsukevich D. N, Maunz P, Hayes D, L.-M. D 和 Monroe C 2009 远距离物质量子比特之间的量子隐形传态。《科学》323(5913), 486–489. https://doi.org/10.1126/science.1167209 Panda C D, Meisenhelder C, Verma M, Ang D G, Chow J, Lasner Z, Wu X, DeMille D, Doyle J M 和 Gabrielse G 2019 在ACME测量中达到电子电偶极矩测量的散粒噪声极限。《物理学杂志 B：原子、分子与光学物理》52(23), 235003. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6455/ab4a61 Park J W, Will S A 和 Zwierlein M W 2015 绝对基态中的超冷偶极费米气体 ^{23}Na^{40}K分子。《物理评论快报》114(20), 205302. https://journals-aps-org.proxy.uchicago.edu/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.114.205302 Parker R H, Dietrich M R, Kalita M R, Lemke N D, Bailey K G, Bishof M, Greene J P, Holt R J, Korsch W, Lu Z T, Mueller P, O'Connor T P 和 Singh J T 2015 首次测量 ^{225}Ra的原子电偶极矩。《物理评论快报》114, 233002. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.114.233002 Parker W 和 Falk R 1962 分子电镀：电解形成无机薄膜的方法。《核仪器与方法》16, 355–357. https://doi.org/10.1016/0029-554x(62)90142-8 Patterson D, Rasmussen J 和 Doyle J M 2009 通过氖缓冲气体冷却产生强原子束与分子束。《新物理学杂志》11(5), 055018。

Peik E, Schumm T, Safronova M S, Pálffy A, Weitenberg J 和 Thirolf P G 2021 用于检验基础物理的核钟 《量子科学与技术》6(3), 034002。Penescu L, Catherall R, Lettry J 和 Stora T 2010 欧洲核子研究中心 ISOLDE 高效多用途电弧放电离子源的研制 《科学仪器评论》81(2), 02A906。Persson J 1998 无需核磁偶极矩精确值即可提取超精细异常 Eur. Phys. J. A 2(1), 3–4。Péru S, Hilaire S, Goriely S 和 Martini M 2021 Gogny Hartree-Fock-Bogolyubov框架中的磁矩描述：在汞同位素中的应用 《Physical Review C》104, 024328。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.104.024328 Petrov A, Mosyagin N, Isaev T, Titov A, Ezhov V, Eliav E 和 Kaldor U 2002 考虑电子关联的205 TlF中P、T奇效应计算 《物理评论快报》88(7), 73001。http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.88.073001 Petrov A N 和 Skripnikov L V 2020 外部电场和磁场中一氟化镭 RaF 的能级：用于搜寻 P-和 T, P-破缺效应 《物理评论 A》102, 062801。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.102.062801 Petrov A N, Skripnikov L V, Titov A V, Hutzler N R, Hess P W, O'Leary B R, Spaun B, DeMille D, Gabrielse G 和 Doyle J M 2014 ThO $\mathrm{H}3\Delta1$ 中的塞曼相互作用：搜寻电子电偶极矩 《物理评论A》89(6), 062505。http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.89.062505 Petrov A 和 Zakharova A 2022 外部电场中 YbOH 分子对 $\mathcal{PT}$- 奇效应的灵敏度 《物理评论 A 》 105, L050801。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.105.L050801 Pilgram N H, Jadbabaie A, Zeng Y, Hutzler N R 和 Steimle T C 2021 ^{171}YbOH和 ^{173}YbOH中的精细相互作用和超精细相互作用 《化学物理学杂志》154(24), 244309。https://doi.org/10.1063/5.0055293 Plass W, Dickel T, Purushothaman S, Dendooven P, Geissel H, Ebert J, Haettner E, Jesch C, Ranjan M, Reiter M, Weick H, Amjad F, Ayet S, Diwisch M, Estrade A, Farinon F, Greiner F, Kalantar-Nayestanaki N, Knöbel R, Kurcewicz J, Lang J, Moore I, Mukha I, Nociforo C, Petrick M, Pfützner M, Pietri S, Prochazka A, Rink A K, Rinta-Antila S, Schäfer D, Scheidenberger C, Takechi M, Tanaka Y, Winfield J 和 Yavor M 2013 FRS 离子捕获器——一座用于开展停止的入射粒子和裂变碎片高精度实验的设施 《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》317, 457–462。第十六届电磁同位素分离器及相关应用技术国际会议，2012年12月2日至7日，日本松江。https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X13008823 Pohjalainen I, Moore I, Geldhof S, Rosecker V, Sterba J 和 Schumm T 2020 在IGISOL使用灯丝分配器开展的钍气体池研究 《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》484, 59–70。https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X20303761 Pohjalainen I, Moore I, Kron T, Raeder S, Sonnenschein V, Tomita H, Trautmann N, Voss A 和 Wendt K 2016 在IGISOL开展的钚同位素气体池内激光电离研究 《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》

材料与原子》376, 233–239。第十七届电磁同位素分离器及相关主题国际会议（EMIS2015），美国密歇根州大急流城，2015年5月11日至15日。https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X16001361 Pohjalainen I, Moore I 和 Sajavaara T 2020 用于生产229(m)Th束流的 ^{233}U α反冲源表征 《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》463, 441–448。https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X19302101 Ponce F, Swanberg E, Burke J, Henderson R 和 Friedrich S 2018 对 ^{235}U第一个核激发态的精确测量 《Physical Review C》97, 054310。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.97.054310 Ponce F, Swanberg E L, Burke J T, Faye S A 和 Friedrich S 2018 利用超导隧道结搜寻亚稳态 ^{229m}Th的衰变 《低温物理学杂志》193(5), 1214–1221。https://doi.org/10.1007/s10909-018-1989-x Porsev S G, Beloy K 和 Derevianko A 2009 通过原子宇称破坏精确测定电弱耦合及其对粒子物理学的影响 《物理评论快报》102, 181601。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.102.181601 Porsev S G, Cheung C 和 Safronova M S 2021 ^{229}Th^{35+} 的低能级与电子桥过程 《量子科学与技术》6(3), 034014。Porsev S G, Safronova M S 和 Kozlov M G 2021 为提取 ^{229}Th的核矩而进行的超精细常数精确计算 《物理评论快报》127(25), 253001。Porsev S G, Safronova U I, Safronova M S, Schmidt P O, Bondarev A I, Kozlov M G, Tupitsyn I I 和 Cheung C 2020 基于Cf^{15+} 和Cf^{17+} 离子的光学钟 《物理评论A》102(1), 012802。Prasannaa V S, Shitara N, Sakurai A, Abe M 和 Das B P 2019 YbOH中电子电偶极矩灵敏度的增强：理论的作用 《物理评论A》99(6), 062502。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.99.062502 Prasannaa V S, Vutha A C, Abe M 和 Das B P 2015 卤化汞：适用于电子电偶极矩搜寻 《物理评论快报》114(18), 183001。http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.114.183001https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.114.183001 Prosnyak S D, Maison D E 和 Skripnikov L V 2020 铊原子中的超精细结构：核磁化分布效应研究 《化学物理学杂志》152(4), 044301。https://doi.org/10.1063/1.5141090 Prosnyak S D 和 Skripnikov L V 2021 伍兹-萨克森模型中的核磁化分布效应：中性铊中的超精细分裂 《Physical Review C》103, 034314。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.103.034314 Pryor C 和 Wilczek F 1987 用于时间反演破坏实验的“人工真空” 《物理快报B》194(1), 137–140。https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269387907830 Purushothaman S, Reiter M P, Haettner E, Dendooven P, Dickel T, Geissel H, Ebert J, Jesch C, Plass W R, Ranjan M, Weick H, Amjad F, Ayet S, Diwisch M, Estrade A, Farinon F, Greiner

F, Kalantar-Nayestanaki N, Knöbel R, Kurcewicz J, Lang J, Moore I D, Mukha I, Nociforo C, Petrick M, Pfützner M, Pietri S, Prochazka A, Rink A K, Rinta-Antila S, Scheidenberger C, Takechi M, Tanaka Y K, Winfield J S and Yavor M I 2013 首次利用低温停止池处理在 1000 MeV/u 能量下产生的短寿命重铀碎片，取得实验结果 《欧洲物理快报》104(4), 42001. https://doi.org/10.1209/0295-5075/104/42001 Quack M 1989 手性分子的结构与动力学 《应用化学国际版》28, 571–586. Quack M 2002 宇称破坏对分子与生物分子手性有多重要? 《应用化学国际版》41, 4618–4630. Quack M, Stohner J and Willeke M 2008 手性分子中宇称破坏的高分辨率光谱研究与理论 Annu. Rev. Phys. Chem. 59, 741–769. Rabga T 2020 镭永久电偶极矩测量改进方案的升级 博士论文 密歇根州立大学。https://d.lib.msu.edu/etd/49486 Raeder S, Dombsky M, Heggen H, Lassen J, Quenzel T, Sjödin M, Teigelhöfer A and Wendt K 2013 TRILIS 中的源内激光光谱学进展——迈向锕和钪的光谱学研究 《超精细相互作用》216(1), 33–39. https://doi.org/10.1007/s10751-013-0832-7 Raeder S, Heggen H, Lassen J, Ames F, Bishop D, Bricault P, Kunz P, Mjøs A and Teigelhöfer A 2014 用于同量异位素抑制稀有同位素束的离子导引激光离子源 《科学仪器评论》85(3), 033309. Ramirez E M, Ackermann D, Blaum K, Block M, Droese C, Düllmann C E, Dworschak M, Eibach M, Eliseev S, Haettner E, Herfurth F, Heßberger F P, Hofmann S, Ketelaer J, Marx G, Mazzocco M, Nesterenko D, Novikov Y N, Plaß W R, Rodríguez D, Scheidenberger C, Schweikhard L, Thirolf P G and Weber C 2012 直接描绘最重元素中的核壳层效应 《科学》337(6099), 1207–1210. https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1225636 Ranjan M, Purushothaman S, Dickel T, Geissel H, Plass W R, Schäfer D, Scheidenberger C, de Walle J V, Weick H and Dendooven P 2011 停止池的新能力：高气体密度及低温运行下射频地毯的性能 《欧洲物理快报》96(5), 52001. https://doi.org/10.1209/0295-5075/96/52001 Ready R A 2021 用于搜索镭-225原子永久电偶极矩的高压研发与激光光谱学 博士论文 密歇根州立大学。https://d.lib.msu.edu/etd/49854 Ready R A, Arrowsmith-Kron G, Bailey K G, Battaglia D, Bishof M, Coulter D, Dietrich M R, Fang R, Hanley B, Huneau J, Kennedy S, Lalain P, Loseth B, McGee K, Mueller P, O'Connor T P, O'Kronley J, Powers A, Rabga T, Sanchez A, Schalk E, Waldo D, Wescott J and Singh J T 2021 镭电偶极矩实验用高压电极的表面处理与放电调理 《核仪器与方法物理研究A辑：加速器、光谱仪、探测器及相关设备》p. 165738. Regan B, Commins E, Schmidt C and DeMille D 2002 电子电偶极矩的新上限 《物理评论快报》88(7), 071805. http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.88.071805

Reinhard P G and Nazarewicz W 2021 球形与形变原子核中的核电荷密度：迈向电荷半径的精确计算 《Physical Review C》103, 054310. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.103.054310 Reinhard P G, Nazarewicz W and Garcia Ruiz R F 2020 超越电荷半径：第四径向矩的信息含量 《Physical Review C》101, 021301. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.101.021301 Reiter M, Rink A K, Dickel T, Haettner E, Heiße F, Plass W, Purushothaman S, Amjad F, Ayet San Andrés S, Bergmann J, Blum D, Dendooven P, Diwisch M, Ebert J, Geissel H, Greiner F, Hornung C, Jesch C, Kalantar-Nayestanaki N, Knöbel R, Lang J, Lippert W, Miskun I, Moore I, Nociforo C, Petrick M, Pietri S, Pfützner M, Pohjalainen I, Prochazka A, Scheidenberger C, Takechi M, Tanaka Y, Weick H, Winfield J and Xu X 2016 用于处理在 1000 MeV/u 能量下产生的铀弹核碎片的低温停止池的速率能力 《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》376, 240–245。第十七届电磁同位素分离器及相关主题国际会议（EMIS2015）论文集，美国密歇根州大急流城，2015年5月11日至15日。 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X15012604 Reponen M, de Groote R P, Al Ayoubi L, Beliuskina O, Bissell M L, Campbell P, Cañete L, Cheal B, Chrysalidis K, Delafosse C, de Roubin A, Devlin C S, Eronen T, Garcia Ruiz R F, Geldhof S, Gins W, Hukkanen M, Imgram P, Kankainen A, Kortelainen M, Koszorús Á, Kujanpää S, Mathieson R, Nesterenko D A, Pohjalainen I, Vilén M, Zadvornaya A and Moore I D 2021 富质子银-96核尺寸突然增大的证据 《自然·通讯》12(1), 4596. https://www.nature.com/articles/s41467-021-24888-x Reponen M, Moore I D, Pohjalainen I, Rothe S, Savonen M, Sonnenschein V and Voss A 2015 感应加热热腔捕集器激光离子源 《科学仪器评论》86(12), 123501. https://doi.org/10.1063/1.4936569 Rizik M D, Monahan C J and Shindler A 2020 CP破坏算符的短流时间系数 《Physical Review D》102(3), 034509. Roberts B M, Dzuba V A and Flambaum V V 2015 原子系统中的宇称与时间反演破坏 Annu. Rev. Nucl. Part. Sci 65, 63–86. Roberts B M and Ginges J S M 2020 通过精密超精细比较测得的钫-207–213核磁矩 《物理评论快报》125, 063002. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.125.063002 Roberts B M and Ginges J S M 2021 重原子中的超精细反常及其在精密原子新物理搜索中的作用 《物理评论A》104, 022823. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.104.022823 Roberts B M, Ranclaud P G and Ginges J S M 2022 玻尔-魏斯科夫效应：从类氢离子实验到重原子超精细结构计算 《物理评论A》105, 052802. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.105.052802 Robledo L M and Bertsch G F 2011 偶偶核八极激发的全局系统学 《Physical Review C》84, 054302. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.84.054302

Rodríguez D, Blaum K, Nörtershäuser W, Ahammed M, Algora A, Audi G, Äystö J, Beck D, Bender M, Billowes J 等，2010年，MATS和Laspec：在FAIR利用离子阱和激光器开展的高精度实验，《欧洲物理学专题》183(1), 1–123。Roussy T S, Caldwell L, Wright T, Cairncross W B, Shagam Y, Ng K B, Schlossberger N, Park S Y, Wang A, Ye J 和 Cornell E A，2022年，《电子电偶极矩的新上限》。https://arxiv.org/abs/2212.11841 Roussy T S, Palken D A, Cairncross W B, Brubaker B M, Gresh D N, Grau M, Cossel K C, Ng K B, Shagam Y, Zhou Y, Flambaum V V, Lehnert K W, Ye J 和 Cornell E A，2021年，跨越七个数量级质量范围对类轴子粒子的实验约束，《物理评论快报》126(17)。https://doi.org/10.1103/physrevlett.126.171301 Rvachov T M, Son H, Sommer A T, Ebadi S, Park J J, Zwierlein M W, Ketterle W 和 Jamison A O，2017年，具有电偶极矩和磁偶极矩的长寿命超冷分子，《物理评论快报》119(14), 143001。https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.119.143001 Safronova M S, Budker D, DeMille D, Kimball D F J, Derevianko A 和 Clark C W，2018年，利用原子和分子寻找新物理，《现代物理评论》90, 025008。https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.90.025008 Sahu N, Richardson J O 和 Berger R，2021年，手性分子隧穿劈裂的瞬子计算，《计算化学杂志》42(4), 210–221。https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jcc.26447 Sanamyan G, Roberts B M 和 Ginges J S M，2022 年，铯中玻尔 – 魏斯科夫效应的经验测定及在新物理搜索中对精密原子理论的改进检验，arXiv:2209.05099。https://arxiv.org/abs/2209.05099 Sanner C, Huntemann N, Lange R, Tamm C, Peik E, Safronova M S 和 Porsev S G，2019年，用于检验洛伦兹对称性的光学钟比较，《自然》567(7747), 204–208。https://www.nature.com/articles/s41586-019-0972-2 Sasmal S, Pathak H, Nayak M K, Vaval N 和 Pal S，2016年，作为宇称和时间反演破坏相互作用候选者的RaF相对论耦合簇研究，《物理评论A》93, 062506。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.93.062506 Sassarini P L, Dobaczewski J, Bonnard J 和 Garcia Ruiz R F，2022年，奇质量近双幻核电磁矩的核密度泛函理论分析，《G辑物理学杂志：核与粒子物理》49(11), 11LT01。https://doi.org/10.1088/1361-6471/ac900a Satuła W, Bączyk P, Dobaczewski J 和 Konieczka M，2016年，针对同位旋和角动量投影态的无核芯组态相互作用模型，《Physical Review C》94, 024306。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.94.024306 Satuła W, Dobaczewski J, Nazarewicz W 和 Werner T R，2012年，在同位旋和角动量投影核密度泛函理论中对超允许费米 β 衰变的同位旋破缺修正，《Physical Review C》86, 054316。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.86.054316 Savard G, Clark J, Boudreau C, Buchinger F, Crawford J, Geissel H, Greene J, Gulick S, Heinz A, Lee J 等，2003年，开发和运行用于热化

聚变蒸发产物和碎裂产物，《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》204, 582–586。Schiff L I，1963年，《核电偶极矩的可测性》，《物理评论》132(5), 2194。Schmidt P O, Rosenband T, Langer C, Itano W M, Bergquist J C 和 Wineland D J，2005年，利用量子逻辑进行光谱学研究，《科学》309(5735), 749。http://science.sciencemag.org/content/309/5735/749.abstract Schmidt S, Billowes J, Bissell M L, Blaum K, Ruiz R F G, Heylen H, Malbrunot-Ettenauer S, Neyens G, Nörtershäuser W, Plunien G, Sailer S, Shabaev V M, Skripnikov L V, Tupitsyn I I, Volotka A V 和 Yang X F，2018年，^{208}Bi的核磁矩及其对检验束缚态强场量子电动力学的重要性，《Physics Letters B》779, 324 – 330。Schwerdtfeger P，2010年，《在手性分子中寻找宇称破坏》。https://doi.org/10.1002/9783527633272.ch7 Scoles G，1988年，《原子与分子束方法》，牛津大学出版社。Seeßelberg F, Luo X Y, Li M, Bause R, Kotochigova S, Bloch I 和 Gohle C，2018年，在自旋解耦魔术阱中延长相互作用极性分子的转动相干性，《物理评论快报》121(25), 253401。https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.121.253401 Seiferle B, Moritz D, Scharl K, Ding S, Zacherl F, Löbell L 和 Thirolf P G，2022年，进一步增进我们对 ^{229}Th核同质异能态的认识，《原子和分子》10(1), 24。https://doi.org/10.3390/atoms10010024 Seiferle B, von der Wense L, Bilous P V, Amersdorffer I, Lemell C, Libisch F, Stellmer S, Schumm T, Düllmann C E, Pálffy A 和 Thirolf P G，2019年，^{229}Th核钟跃迁的能量，《自然》573(7773), 243–246。https://doi.org/10.1038/s41586-019-1533-4 Sels S, Maier F M, Au M, Fischer P, Kanitz C, Lagaki V, Lechner S, Leistenschneider E, Leimbach D, Lykiardopoulou E M, Kwiatkowski A A, Manovitz T, Vila Gracia Y N, Neyens G, Plattner P, Rothe S, Schweikhard L, Vilen M, Wolf R N 和 Malbrunot-Ettenauer S，2022年，用于研究短寿命放射性离子的多普勒冷却和伴随冷却，《物理评论研究》4, 033229。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevResearch.4.033229 Semchenkov A, Brüchle W, Jäger E, Schimpf E, Schädel M, Mühle C, Klos F, Türler A, Yakushev A, Belov A, Belyakova T, Kaparkova M, Kukhtin V, Lamzin E 和 Sytchevsky S，2008年，GSI的超锕系元素分离器与化学装置（TASCA）——离子光学结构和磁体设计的优化，《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》266(19), 4153–4161。第十五届国际电磁同位素分离器及相关应用技术会议论文集。Sen’kov R A 和 Dmitriev V F，2002年，Bi^{82+} 离子的核磁化分布与超精细分裂，《Nucl. Phys. A》706(3), 351 – 364。Shabaev V M, Artemyev A N, Yerokhin V A, Zherebtsov O M 和 Soff G，2001年，通过研究重离子中的超精细分裂检验量子电动力学，《物理评论快报》86(18), 3959–3962。Shabaev V M, Tupitsyn I I 和 Yerokhin V A，2013年，相对论多电子原子兰姆位移计算的模型算符方法，《物理评论A》88, 012513。

Shapiro F L 1968 基本粒子的电偶极矩 《苏联物理学进展》11(3), 345. http://dx.doi.org/10.1070/PU1968v011n03ABEH003840 Sheikh J A, Dobaczewski J, Ring P, Robledo L M和Yannouleas C 2021 平均场方法中的对称性恢复 《G辑物理学杂志：核与粒子物理》48(12), 123001. https://doi.org/10.1088/1361-6471/ac288a Shimizu N, Tsunoda Y, Utsuno Y和Otsuka T 2021 采用对称性恢复准粒子真空态叠加的核壳模型计算变分方法 《物理评论C》103(1), 014312. Shindler A 2021 味对角CP破坏：电偶极矩 Eur. Phys. J. A 57(4), 128. Shindler A、de Vries J和Luu T 2014 通过梯度流计算标准模型之外的矩阵元 PoS LATTICE2014, 251. Shindler A、Luu T和de Vries J 2015 通过梯度流计算核子电偶极矩： θ项贡献 《Physical Review D》92(9), 094518. Shirk M D和Molian P A 1998 材料超短脉冲激光烧蚀综述 《激光应用杂志》10(1), 18–28. https://doi.org/10.2351/1.521827 Shitara N、Yamanaka N、Sahoo B K、Watanabe T和Das B P 2021 ^{210}Fr中的CP破坏效应及超越标准模型的新物理前景 《高能物理学杂志》2021(2), 124. Shuman E S、Barry J F和DeMille D 2010 双原子分子的激光冷却 《自然》467(7317), 820–823. Sikorsky T、Geist J、Hengstler D、Kempf S、Gastaldo L、Enss C、Mokry C、Runke J、Düllmann C E、Wobrauschek P、Beeks K、Rosecker V、Sterba J H、Kazakov G、Schumm T和Fleischmann A 2020 使用磁性微量热计测量 ^{229}Th同核异能态能量 《物理评论快报》125(14). https://doi.org/10.1103/physrevlett.125.142503 Singh J T 2019 一种利用囚禁于光学晶体中的Pa-229离子搜寻时间反演对称性破缺的新概念 《超精细相互作用》240(1), 29. Skripnikov L V 2016 用于搜寻电子电偶极矩的ThO四分量与相对论赝势联合研究 《化学物理学杂志》145(21), 214301. http://dx.doi.org/10.1063/1.4968229 Skripnikov L V 2020 分子中的核磁化分布效应：Ra$^+$ 和RaF的超精细结构 《化学物理学杂志》153(11), 114114. https://doi.org/10.1063/5.0024103 Skripnikov L V 2021 通过纳入量子电动力学效应，使一氟化镭分子RaF和镭阳离子Ra$^+$ 的跃迁能量达到meV精度 《化学物理学杂志》154(20), 201101. https://doi.org/10.1063/5.0053659 Skripnikov L V、Chubukov D V和Shakhova V M 2021 量子电动力学效应在重原子碱土金属一氟化物分子跃迁能量中的作用：Ba$^+$、BaF、RaF和E120F的理论研究 《化学物理学杂志》155(14), 144103. https://doi.org/10.1063/5.0068267

Skripnikov L V、Mosyagin N S、Titov A V和Flambaum V V 2020 用锕系和镧系分子搜寻强CP破坏 物理化学与化学物理 22, 18374–18380. http://dx.doi.org/10.1039/D0CP01989E Skripnikov L V、Petrov A N、Titov A V和Flambaum V V 2019 HfF^+ 作为搜寻核弱四极矩的候选者 《物理评论A》99, 012517. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.99.012517 Skripnikov L V、Schmidt S、Ullmann J、Geppert C、Kraus F、Kresse B、Nörtershäuser W、Privalov A F、Scheibe B、Shabaev V M等 2018 铋-209的新核磁矩：破解铋超精细结构难题 《物理评论快报》120(9), 093001. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.120.093001 Skripnikov L V和Titov A V 2015 用于搜寻电子电偶极矩的氧化钍理论研究：ThO中$H^3\Delta_1$的电子性质 《化学物理学杂志》142(2), 024301. http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jcp/142/2/10.1063/1.4904877 Skripnikov L V和Titov A V 2016 用于搜寻固体中宇称和时间反演破坏相互作用的$PbTiO_3$晶体基于LCAO的理论研究 《化学物理学杂志》145(5). http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jcp/145/5/10.1063/1.4959973 Sliv L 1951 计算内转换系数时考虑核有限尺寸 《实验与理论物理学杂志》21(7), 770–774. Smith M、Brodeur M、Brunner T、Ettenauer S、Lapierre A、Ringle R、Ryjkov V L、Ames F、Bricault P、Drake G W F、Delheij P、Lunney D、Sarazin F和Dilling J 2008 首次使用潘宁阱测量奇异晕核 ^{11}Li的质量 《物理评论快报》101, 202501. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.101.202501 Soncini A、Faglioni F和Lazzeretti P 2003 宇称破坏对核磁屏蔽的贡献 《物理评论A》68, 033402. Spevak V、Auerbach N和Flambaum V V 1997 反射不对称原子核中增强的T奇、P奇电磁矩 《物理评论C：核物理》56(3), 1357– 1369. Stadnik Y V、Dzuba V A和Flambaum V V 2018 根据原子和分子的电偶极矩改进对轴子样粒子介导的电子与核子间P、T破坏相互作用的限制 《物理评论快报》120(1), 013202. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.120.013202 Stadnik Y V和Flambaum V V 2014 轴子在原子、分子和原子核中的诱导效应：宇称不守恒、环形偶极矩、电偶极矩以及自旋-引力和自旋-轴子动量耦合 《物理评论D》89(4), 043522. http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.89.043522 Stroberg S R、Calci A、Hergert H、Holt J D、Bogner S K、Roth R和Schwenk A 2017 用于核结构的核素依赖价空间方法 《物理评论快报》118, 032502. Stroberg S R、Henderson J、Hackman G、Ruotsalainen P、Hagen G和Holt J D 2022 采用价空间介质相似重整化群研究 sd 壳中 $E2$ 强度的系统性 《物理评论C》105, 034333. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.105.034333 Stroberg S R、Hergert H、Bogner S K和Holt J D 2019 核壳模型的非经验相互作用：最新进展 《核与粒子科学年度评论》69(1), 307– 362. https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-101917-021120

Stroberg S R, Holt J D, Schwenk A 和 Simonis J 2021 原子核的第一性原理极限 《物理评论快报》126(2), 022501。Studer D, Ulrich J, Braccini S, Carzaniga T S, Dressler R, Eberhardt K, Heinke R, Köster U, Raeder S 和 Wendt K 2020 $^{143-147}$Pm的高分辨率激光共振电离光谱 《欧洲物理学杂志A：强子与原子核》56(2), 69。Sushkov O P 和 Flambaum V V 1978 双原子分子中的宇称破缺效应 《苏联物理学·实验与理论物理学杂志》48(4), 608–611。Takamoto M, Ushijima I, Ohmae N, Yahagi T, Kokado K, Shinkai H 和 Katori H 2020 通过一对可移动光晶格钟检验广义相对论 《自然·光子学》14(7), 411–415。https://doi.org/10.1038/s41566-020-0619-8 Takano T, Fuyama M, Namiki R 和 Takahashi Y 2009 利用核自旋为二分之一的冷原子系综实现自旋压缩 《物理评论快报》102(3)。http://prl.aps.org.ezp-prod1.hul.harvard.edu/abstract/PRL/v102/i3/e033601 Takekoshi T, Reichsöllner L, Schindewolf A, Hutson J M, Le Sueur C R, Dulieu O, Ferlaino F, Grimm R 和 Nägerl H C 2014 转动振动与超精细基态偶极RbCs分子的超冷高密度样品 《物理评论快报》113(20), 205301。https://journals-aps-org.proxy.uchicago.edu/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.113.205301 Tarbutt M R, Sauer B E, Hudson J J 和 Hinds E A 2013 用于测量电子电偶极矩的YbF分子喷泉设计 《新物理学杂志》15(5), 053034。http://stacks.iop.org/1367-2630/15/i=5/a=053034?key=crossref.8f48a86fba35202d24f2007c674efeae Tarpanov D, Toivanen J, Dobaczewski J 和 Carlsson B G 2014 在能量密度泛函和准粒子随机相位近似方法中研究单粒子能量的极化修正 《 Physical Review C 》 89, 014307。http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.89.014307 杰斐逊实验室 Qweak 合作组 2018 质子弱电荷的精密测量 《自然》557(7704), 207–211。https://doi.org/10.1038/s41586-018-0096-0 ISOLDE产额数据库，版本0.2 2021 https://cern.ch/isolde-yields。 [在线；访问日期：01.03.2022]。Thirolf P G, Seiferle B 和 von der Wense L 2019 钍-229同核异能态：从原子钟迈向核钟之路的门户 《物理学杂志 B：原子、分子与光学物理》52(20), 203001。https://doi.org/10.1088/1361-6455/ab29b8 Titov A V 和 Mosyagin N S 1999 广义相对论有效芯势：理论基础 《国际量子化学杂志》71(5), 359–401。Titov A V, Mosyagin N S, Petrov A N 和 Isaev T A 2005 分子芯层性质精确计算的两步法 《国际量子化学杂志》104(2), 223–239。Titov A V, Mosyagin N S, Petrov A N, Isaev T A 和 DeMille D P 2006 极性重原子分子中的P、T宇称破坏效应研究 Progr. Theor. Chem. Phys. 15, 253–283。Toh G, Antypas D 和 Elliott D S 2014 铯原子中 $6s\,^2S_{1/2} \rightarrow 7p\,^2P_J$跃迁的斯塔克位移测量 《物理评论A》89, 042512。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.89.042512

Toh G, Damitz A, Tanner C E, Johnson W R 和 Elliott D S 2019 铯 $6s^2S_{1/2} \rightarrow 7s^2S_{1/2}$ 跃迁的标量与矢量极化率测定及其对原子宇称不守恒的影响 《物理评论快报》123, 073002。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.123.073002 Tran Tan H B, Xiao D 和 Derevianko A 2022 用于计算宇称破坏振幅的宇称混合耦合簇形式 《物理评论A》105, 022803。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.105.022803 Truppe S, Williams H J, Hambach M, Caldwell L, Fitch N J, Hinds E A, Sauer B E 和 Tarbutt M R 2017 冷却至多普勒极限以下的分子 《自然·物理》13(12), 1173–1176。http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nphys4241 Tsai Y D, Eby J 和 Safronova M S 2022 利用空间量子传感器直接探测束缚于太阳的超轻暗物质 《自然·天文学》7(1), 113–121。https://doi.org/10.1038/s41550-022-01833-6 Tscherbul T V, Ye J 和 Rey A M 2022 通过极性分子中的偶极相互作用实现稳健的核自旋纠缠 arXiv预印本 arXiv:2205.00190。Tur C, Heger A 和 Austin S M 2007 大质量恒星核合成和演化对太阳丰度及氦燃烧反应率不确定性的敏感性 《天体物理学杂志》671(1), 821。Tur C, Heger A 和 Austin S M 2010 核心坍缩超新星中 ^{26}Al、 ^{44}Ti和 ^{60}Fe的生成：对三α反应率及12c（α, γ）16o反应率的敏感性 《天体物理学杂志》718(1), 357。Udrescu S M, Brinson A J, Garcia Ruiz R F, Gaul K, Berger R, Billowes J, Binnersley C L, Bissell M L, Breier A A, Chrysalidis K, Cocolios T E, Cooper B S, Flanagan K T, Giesen T F, de Groote R P, Franchoo S, Gustafsson F P, Isaev T A, Koszorús A, Neyens G, Perrett H A, Ricketts C M, Rothe S, Vernon A R, Wendt K D A, Wienholtz F, Wilkins S G 和 Yang X F 2021 一氟化镭分子的同位素位移 《物理评论快报》127, 033001。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.127.033001 Udrescu S M 等 2022 准备中。Ullmann J, Andelkovic Z, Brandau C, Dax A, Geithner W, Geppert C, Gorges C, Hammen M, Hannen V, Kaufmann S, König K, Litvinov Y, Lochmann M, Maas B, Meisner J, Murböck T, Sánchez R, Schmidt M, Schmidt S, Steck M, Stöhlker T, Thompson R, Trageser C, Vollbrecht J, Weinheimer 和 Nörtershäuser W 2017 铋中的高精度超精细测量对束缚态强场量子电动力学提出挑战 《自然·通讯》8, 15484。Upadhyay S, Dargyte U, Patterson D 和 Weinstein J D 2020 通过动力学去耦延长固态仲氢中铷原子的自旋相干时间 《物理评论快报》125(4), 043601。Upadhyay S, Kanagin A N, Hartzell C, Christy T, Arnott W P, Momose T, Patterson D 和 Weinstein J D 2016 固态仲氢中光抽运铷原子的纵向自旋弛豫 《物理评论快报》117(17), 175301。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.117.175301 Uribe E 2018 镤对钍反应堆安全保障构成挑战 技术报告 IAEA-CN–267 国际原子能机构（IAEA）国际原子能机构（IAEA）。http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:51003755

Van Vleck J H 1948 晶体中磁共振谱线的偶极展宽 《物理评论》74, 1168–1183. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.74.1168 Vascon A, Santi S, Isse A, Reich T, Drebert J, Christ H, Düllmann C and Eberhardt K 2012 恒定电流密度分子电镀的阐明 《核仪器与方法物理研究A辑：加速器》696, 180–191. https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.08.072 Verma M, Jayich A M and Vutha A C 2020 利用超冷分子中的钟跃迁搜寻电子电偶极矩 PRL 125(15), 153201. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.125.153201 Vernon A R et al. 2022 铟同位素的核矩揭示幻数82处的突变 《自然》607(7918), 260–265. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04818-7 Vetter P A, Meekhof D M, Majumder P K, Lamoreaux S K and Fortson E N 1995 通过对原子铊中宇称不守恒的新测量精确检验电弱理论 《物理评论快报》74, 2658–2661. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.74.2658 Vilas N B, Hallas C, Anderegg L, Robichaud P, Winnicki A, Mitra D and Doyle J M 2022 多原子分子的磁光囚禁与亚多普勒冷却 《自然》606(7912), 70–74. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04620-5 Visscher L, Lee T J and Dyall K G 1996 一种包含非迭代连通三激发的相对论非限制耦合簇方法的形式化与实现 《化学物理学杂志》105(19), 8769–8776. https://doi.org/10.1063/1.472655 Voges K K, Gersema P, Meyer Zum Alten Borgloh M, Schulze T A, Hartmann T, Zenesini A and Ospelkaus S 2020 超冷玻色气体中的基态 ^{23}Na^{39}K分子 《物理评论快报》125(8), 083401. https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.125.083401 von der Wense L, Seiferle B, Laatiaoui M, Neumayr J B, Maier H J, Wirth H F, Mokry C, Runke J, Eberhardt K, Düllmann C E, Trautmann N G and Thirolf P G 2016 直接探测 ^{229}Th核钟跃迁 《自然》533(7601), 47–51. https://doi.org/10.1038/nature17669 von der Wense L, Seiferle B, Laatiaoui M and Thirolf P G2015 测定从MLL缓冲气体阻停池中提取 ^{233}U源 α-反冲离子的效率 《欧洲物理学杂志 A》51(3), 29. https://doi.org/10.1140/epja/i2015-15029-8 Voss A, Procter T, Shelbaya O, Amaudruz P, Buchinger F, Crawford J, Daviel S, Mané E, Pearson M and Tamimi W A 2016 TRIUMF共线快束激光光谱（cfbs）实验 《核仪器与方法物理研究A辑：加速器》811, 57–69. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215015648 Voss A, Sonnenschein V, Campbell P, Cheal B, Kron T, Moore I D, Pohjalainen I, Raeder S, Trautmann N and Wendt K 2017 长寿命钚同位素的高分辨激光光谱学

同位素 《物理评论A》95, 032506. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.95.032506 Vutha A 2015 利用卫星多普勒测速进行引力波探测的光学频率标准 《新物理学杂志》17(6), 063030. http://stacks.iop.org/1367-2630/17/i=6/a=063030Vutha A, Horbatsch M and Hessels E 2018a 稀有气体基质中极性分子的取向依赖超精细结构：一种测量电子电偶极矩的方案 《物理评论A》98, 032513. Vutha A, Horbatsch M and Hessels E 2018b 固态惰性气体基质中的取向极性分子：一种测量电子电偶极矩的方法 《原子》6(1), 3. http://www.mdpi.com/2218-2004/6/1/3 Wada M, Ishida Y, Nakamura T, Yamazaki Y, Kambara T, Ohyama H, Kanai Y, Kojima T M, Nakai Y, Ohshima N et al. 2003 来自弹核碎片分离器的慢速放射性离子束 《核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子的相互作用》204, 570–581. Wallner A, Feige J, Kinoshita N, Paul M, Fifield L, Golser R, Honda M, Linnemann U, Matsuzaki H, Merchel S, Rugel G, Tims S, Steier P, Yamagata T and Winkler S 2016 通过星际放射性铁-60的全球沉积探测近期近地超新星 《自然》532(7597), 69–72. Wang P, Luan C Y, Qiao M, Um M, Zhang J, Wang Y, Yuan X, Gu M, Zhang J and Kim K 2021 相干时间预计超过一小时的单离子量子比特 《自然·通讯》12(1), 233. https://doi.org/10.1038/s41467-020-20330-w Waßmuth B, Breier A A, Melosso M, Fuchs G W and Giesen T F 2020 稀有一氧化铁同位素体的转动光谱学：一种质量无关分析 《分子物理学》118(19- 20), e1774087. Weijo V, Bast R, Manninen P, Saue T and Vaara J 2007 核磁共振参数中宇称破坏效应计算的方法学问题 《化学物理学杂志》126(7), 074107. Weijo V, Manninen P and Vaara J 2005 核磁共振参数中宇称破坏效应的微扰计算 《化学物理学杂志》123, 054501. Williams H J, Caldwell L, Fitch N J, Truppe S, Rodewald J, Hinds E A, Sauer B E and Tarbutt M R 2018 激光冷却分子的磁俘获与相干控制 《物理评论快报》120(16), 163201. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.120.163201 Wilson K E, Guttridge A, Segal J and Cornish S L 2021 铯与镱的量子简并混合物 《物理评论A》103(3), 033306. Wilson R 2012 奇特的镁 《自然·化学》4(7), 586–586. https://doi.org/10.1038/nchem.1389 Wolf F, Wan Y, Heip J C, Gebert F, Shi C and Schmidt P O 2016 用于分子离子量子逻辑光谱学的非破坏性态探测 《自然》530(7591), 457–460. http://www.nature.com/articles/nature16513 Wolf R N, Wienholtz F, Atanasov D, Beck D, Blaum K, Borgmann C, Herfurth F, Kowalska M, Kreim S, Litvinov Y A, Lunney D, Manea V, Neidherr D, Rosenbusch M,

Schweikhard L、Stanja J 和 Zuber K，2013，《ISOLTRAP的多反射飞行时间质谱分离器/质谱仪》，《国际质谱学杂志》349-350(1)，123–133。Wood C S、Bennett S C、Cho D、Masterson B P、Roberts J L、Tanner C E 和 Wieman C E，1997，《铯中的宇称不守恒与环形偶极矩测量》，《科学》275，1759–1763。Wu X、Han Z、Chow J、Ang D G、Meisenhelder C、Panda C D、West E P、Gabrielse G、Doyle J M 和 DeMille D，2020，《ThO的亚稳态$Q^3\Delta_2$ 态：ACME电子电偶极矩搜索的新资源》，《新物理学杂志》22(2)，023013。https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/ab6a3a Wundt B J、Munger C T 和 Jentschura U D，2012，《用于提高电子电偶极矩测量灵敏度的原子喷泉实验中的量子动力学》，《物理评论X》2，041009。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevX.2.041009 Xia S Y、Tao H、Lu Y、Li Z P、Nikšić T 和 Vretenar D，2017，《利用相对论能量密度泛函研究反射不对称原子核的光谱学》，《Physical Review C》96，054303。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.96.054303 Xu C Y，2014，《固态氖基质中的中性镱原子研究》，博士论文，芝加哥大学。Xu C Y、Hu S M、Singh J、Bailey K、Lu Z T、Mueller P、O'Connor T P 和 Welp U，2011，《固态氖基质中镱原子的光学激发与衰变动力学》，《物理评论快报》107(9)，093001。Yamagata Y，1966，《关于地球上生物分子非对称外观的假说》，《理论生物学杂志》11，495–498。Yamaguchi Y 和 Yamanaka N，2020，《标准模型中带电轻子电偶极矩的巨大长距离贡献》，《物理评论快报》125(24)。https://doi.org/10.1103/physrevlett.125.241802 Yamanaka N、Sahoo B K、Yoshinaga N、Sato T、Asahi K 和 Das B P，2017，《利用抗磁原子的电偶极矩探索核物理与粒子物理交界处的奇异现象：探测强子和半轻子CP破坏的独特窗口》，《欧洲物理学杂志A》53(3)，54。http://link.springer.com/10.1140/epja/i2017-12237-2 Yang H、Zhang D C、Liu L、Liu Y X、Nan J、Zhao B 和 Pan J W，2019，《观测到超冷 $^{23}Na\ ^{40}K + ^{40}K$碰撞中可由磁场调谐的Feshbach共振》，《科学》。363(6424)，261–264。https://www-science-org.proxy.uchicago.edu/doi/abs/10.1126/science.aau5322 Yang X、Wang S、Wilkins S 和 Ruiz R G，2022，《用于研究奇异原子核的激光光谱学》，《粒子与核物理进展》，第104005页。https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641022000631 Yao J M、Bally B、Engel J、Wirth R、Rodríguez T R 和 Hergert H，2020，《对集体关联和 ^{48}Ca 无中微子双β衰变的从头算处理》，《物理评论快报》124，232501。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.124.232501 Yerokhin V A、Müller R A、Surzhykov A、Micke P 和 Schmidt P O，2020，《类铍、类硼和类碳氩离子中的非线性同位素位移效应》，《物理评论A》101，012502。

Yong D、Kobayashi C、Da Costa G、Bessell M、Chiti A、Frebel A、Lind K、Mackey A、Nordlander T、Asplund M、Casey A、Marino A、Murphy S 和 Schmidt B，2021，《磁旋转超新星产生的r过程元素》，《自然》595(7866)，223–226。Young E T、Becklin E E、Marcum P M、Roellig T L、Buizer J M D、Herter T L、Güsten R、Dunham E W、Temi P、Andersson B G、Backman D、Burgdorf M、Caroff L J、Casey S C、Davidson J A、Erickson E F、Gehrz R D、Harper D A、Harvey P M、Helton L A、Horner S D、Howard C D、Klein R、Krabbe A、McLean I S、Meyer A W、Miles J W、Morris M R、Reach W T、Rho J、Richter M J、Roeser H P、Sandell G、Sankrit R、Savage M L、Smith E C、Shuping R Y、Vacca W D、Vaillancourt J E、Wolf J 和 Zinnecker H，2012，《SOFIA（平流层红外天文观测台）的早期科学成果》，《天体物理学杂志》749(2)，L17。https://doi.org/10.1088/2041-8205/749/2/l17 Yu P 和 Hutzler N R，2021，《在对称陀螺分子中探测形变原子核的基本对称性》，《物理评论快报》126，023003。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.126.023003 Zakharova A、Kurchavov I 和 Petrov A，2021，《一氢氧化镱分子的转动振动态结构与P、T破坏搜索》，《化学物理学杂志》155(16)，164301。https://doi.org/10.1063/5.0069281 Zakharova A 和 Petrov A，2021 $\mathcal{P},\mathcal{T}$-奇效应：振动激发态中的RaOH分子，《物理评论A》103，032819。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.103.032819 Zhang C、Zheng X 和 Cheng L，2021，《基于解析相对论耦合簇梯度理论计算时间反演对称性破坏灵敏度参数》，《物理评论A》104，012814。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.104.012814 Zhang J、Collister R、Shiells K、Tandecki M、Aubin S、Behr J A、Gomez E、Gorelov A、Gwinner G、Orozco L A、Pearson M R 和 Zhao Y，2016，《冷钫原子的高效阱间转移》，《超精细相互作用》237(1)，150。Zhang J、Tandecki M、Collister R、Aubin S、Behr J A、Gomez E、Gwinner G、Orozco L A、Pearson M R 和 Sprouse G D，2015，《Fr中的超精细异常：球形单粒子模型的适用边界》，《物理评论快报》115，042501。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.115.042501 Zhou Y、Shagam Y、Cairncross W B、Ng K B、Roussy T S、Grogan T、Boyce K、Vigil A、Pettine M、Zelevinsky T、Ye J 和 Cornell E A，2020，《在量子投影噪声极限下测得的秒级相干性：数百个分子离子》，《物理评论快报》124(5)，053201。https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.124.053201 Ziskind M、Daussy C、Marrel T 和 Chardonnet C，2002，《提高在CHFClBr对映异构体振动光谱中搜索宇称破坏能量差的灵敏度》，《欧洲物理学杂志D》20，219–225。Zülch C、Gaul K、Giesen S M、Garcia Ruiz R F 和 Berger R，2022，《用于精密检验基础物理的冷分子高电荷离子》。https://arxiv.org/abs/2203.10333 Ärje J、Äystö J、Taskinen P、Honkanen J 和 Valli K，1987，《用于在线同位素分离的离子导向器方法》，《核仪器与方法物理研究B辑：束流

与材料和原子的相互作用 **26**(1),384–
393.https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168583X8790783X