arXiv:2602.09743v1 [physics.atom-ph] 10 Feb 2026

利用氦电离能异常检验奇异电子–电子相互作用

Lei Cong[1,2,3], Filip Ficek[4, 5, *], Rinat Abdullin, Mikhail G. Kozlov[+] 和 Dmitry Budker[1,2,3,6]

[1] *Helmholtz Institute Mainz, 55099 Mainz, Germany* [2] *GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, 64291 Darmstadt, Germany* [3] *Johannes Gutenberg University, Mainz 55128, Germany* [4] *Faculty of Mathematics, University of Vienna, Oskar-Morgenstern-Platz 1, 1090 Vienna, Austria* [5] *Gravitational Physics Group, University of Vienna, Währinger Straße 17, 1090 Vienna, Austria* [6] *Department of Physics, University of California at Berkeley, Berkeley, California 94720-7300, USA*

* *filip.ficek@univie.ac.at;* [+] *mihailgkozlov@gmail.com*

精密原子光谱学为探索标准模型之外的物理提供了灵敏探针。近期报道的亚稳态氦电离能中存在的 9σ 理论与实验偏差，促使人们提出假设：一种新玻色子介导了奇异电子–电子相互作用。通过对诱导能移进行模型无关的符号一致性分析，我们表明，仅符号要求这一条件就足以排除矢量–矢量相互作用和赝标量–赝标量相互作用作为解释该异常的可能性。结合现有限制与本文得到的独立限制，还可进一步排除轴矢量情形。在本文考察的单玻色子框架内，只有受到严格限制的标量介导相互作用仍然可行。举例而言，略微提高电子旋磁比测定的精度，便有望探测剩余的参数空间。

引言。——探索标准模型之外的物理（BSM），源于基础物理学中若干长期悬而未决的重要问题，[1——4]。在众多旨在探测 BSM 物理的实验方法中，[5——7]，精密原子光谱学已成为强有力的低能探针，将高精度测量与可能存在的标准模型之外新相互作用联系起来。特别是氢等简单的少体原子系统，[8],正电子素 [9]，和氦 [10, 11] 提供了极为纯净的试验平台；理论与实验之间的差异可作为探测未知力的灵敏手段。

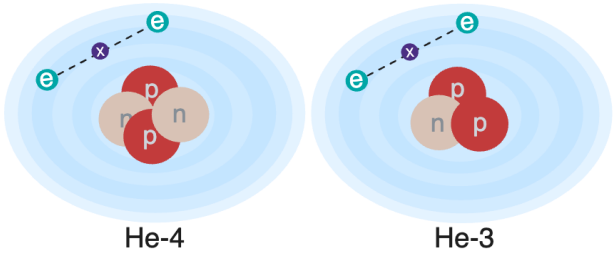

图1：示意图展示了假设的奇异相互作用，该相互作用由一种新玻色子（X）介导，发生在 ^{4}He和 ^{3}He内部的电子之间。这里只考虑电子—电子奇异相互作用，因为尽管两种同位素的核结构不同，它们产生的领先阶能量位移却相同。阴影区域表示示意性的电子概率分布。

氦光谱学长期以来一直是实验[12–15] 与理论 [16–20] 量子物理学的基石，使人们能够对量子电动力学 [21] 进行严格检验，并确定基本常数 [13]。理论与实验之间长期以来的一致性，最近因有报告指出亚稳态 2^3S_1 的 ^{4}He [14, 19]，电离能存在 9σ 差异而受到挑战；这一差异如今也已在 ^{3}He [15]中观测到。因此，人们讨论了这一异常在两种同位素中的持续存在是否可能意味着新物理 [22]。

基于这一观察，我们注意到，^{4}He 和 ^{3}He 中差异的幅度相近，这强烈排除了以核结构为根源的解释，因为氦-3原子核和 α粒子的组成及自旋有显著差异。具体而言，文献 [23] 已排除核有限尺寸效应是该异常成因的可能性。这一考量反而指向以下相互作用：其中的电子氦（见图1），这证实氦光谱学是一种对新粒子极为敏感的低能探针，其工作范围与高能对撞机所探索的区域互为补充。

从新玻色子搜寻的角度来看，在 9σ 量级出现差异，标志着一个质的转折点。如今，这一异常已经足够显著，因此任何拟议的新物理贡献的符号都成为决定性的一致性判据，而不再是次要细节。这使得检验奇异相互作用的方法发生了根本性转变，不再局限于逐步收紧现有限制 [6]。

在本 Letter 中，我们将报道的氦差异视为事实，并对单玻色子假说进行严格检验。我们建立了一项符号

一致性判据，该判据在 9σ水平上具有决定性作用。我们计算了四种一般耦合结构所导致的氦电离能修正——$g_A g_A$、 $g_s g_s$、 $g_V g_V$和 $g_p g_p$（上标分别表示轴矢量、标量、矢量和赝标量耦合）。这些耦合源于两个电子之间交换奇异自旋0和自旋1玻色子，例如类轴子粒子和 Z' 玻色子 [5, 6], 。我们考察这些耦合的符号和大小能否一致地解释观测到的偏差。我们发现，赝标量和矢量相互作用因符号不一致而立即被排除。对现有限制进行一致的重新解读，再加上本文得出的更严格限制，进而排除了

排除了轴矢量情形，使标量耦合成为唯一仍部分可行且与所有现有数据相容的可能性。

理论。——在过去四十年间，人们已发展出由“新”玻色子介导的奇异相互作用理论[24–26], 。如参考文献 [6],所述，十六种可能的奇异势可归为九种不同的耦合类型。在本研究中，我们考察四类：轴矢量–轴矢量（AA）、赝标量–赝标量（pp）、矢量–矢量（VV）和标量–标量（ss）。相关势分别为自旋相关势 $V|_{AA}$； $V|_{pp}$； $V|_{VV}$；以及自旋无关势 $V|_{ss}$。由于公式较长且部分内容冗余，正文仅展示 $V|_{AA}$ 和 $V|_{ss}$ ；其余内容见补充材料。

$$V_{AA} = \underbrace{-g_A^e g_A^e \frac{\hbar c}{4\pi} \boldsymbol{\sigma}_e \cdot \boldsymbol{\sigma}_e' \frac{1}{r} e^{-r/\lambda}}_{V_2|_{AA}} \underbrace{-g_A^e g_A^e \frac{\hbar c}{4\pi} \lambda^2 \left[\boldsymbol{\sigma}_e \cdot \boldsymbol{\sigma}_e' \left[\frac{1}{r^3} + \frac{1}{\lambda r^2} + \frac{4\pi}{3}\delta(\boldsymbol{r}) \right] - (\boldsymbol{\sigma}_e \cdot \hat{\boldsymbol{r}})(\boldsymbol{\sigma}_e' \cdot \hat{\boldsymbol{r}}) \left(\frac{3}{r^3} + \frac{3}{\lambda r^2} + \frac{1}{\lambda^2 r} \right) \right] e^{-r/\lambda}}_{V_3|_{AA}}, \tag{1}$$

$$V_{ss} = \underbrace{-g_s^e g_s^e \frac{\hbar c}{4\pi} \frac{e^{-r/\lambda}}{r}}_{V_1|_{ss}}, \tag{2}$$

其中， $\hbar$ 为约化普朗克常数， c 为真空光速， $\boldsymbol{\sigma}_e$ 和 $\boldsymbol{\sigma}_e'$ 为表示两个电子自旋 $\boldsymbol{s}_i = \hbar\boldsymbol{\sigma}_i/2$ 的泡利矩阵矢量， m_e 为电子质量， M 为新玻色子的质量，与力程λ成反比 $M = \hbar/(c\lambda)$ ，而 r 为两个电子之间的距离。

方法。——为了根据氦的 2^3S_1 态电离能中观察到的理论与实验差异，提取假想新玻色子的耦合强度，我们将该差异完全归因于一种奇异相互作用。通过使用该态的电子波函数计算奇异势的矩阵元，可得相应的能量位移，

$$E^{\text{exotic}} = \langle \Psi_{2^3S_1} | \, V_i \, | \Psi_{2^3S_1} \rangle \, . \tag{3}$$

所得位移可写成 E^{exotic} =$g^e g^e$ C(λ)的形式，其中总量级由最新实验测定值与理论测定值之间的差异确定，

$$\Delta E = E_{\text{exper}} - E_{\text{theor}} = \mu \pm L \, , \tag{4}$$

其中， μ 表示差异的中心值，而L 表示实验与理论的合并不确定度（95%置信水平，CL），其定义为 $\int_{-L}^{L} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-x^2/(2\sigma^2)} \, dx = 0.95$。在这种解释下，相应的耦合强度为 $g^e g^e = \Delta E / C(\lambda)$。在本例中，我们根据上限和下限提取耦合强度， $\mu \pm L$(见表I)，并将其显示为对应的带状区域，见图2 和 3。

另一方面，近期对氦超精细结构的测量[30] 以及精细结构间隔的 [29, 31] 改进，使得能够精确测定 $2^3S_1 - 2^3P_0$ 跃迁（见表I）。在这种情况下，理论预言与实验结果高度吻合，因此能够设定比早期研究 [11]（更多内容请参见补充材料）。

结果。——我们首先表明，仅凭符号一致性就已排除四种一般耦合结构中的两种，而与任何定量限制无关。特别是，由赝标量和矢量介导的奇异电子–电子相互作用与观测到的氦电离能差异不相容。

这一结论源于一个简单但决定性的观察。对于 e–e 奇异相互作用，相关耦合仅通过其平方 $g_A^{e\,2}$、 g_p^{e2}、 g_s^{e2} 和$g_V^{e\,2}$进入，而这些平方严格为正。因此，每一种奇异势都以由其算符结构唯一确定的固定符号作出贡献。由于测量能量与理论能量满足 $E^{\text{exper}} = E^{\text{theory}} + E^{\text{exotic}}$,

表I：用于计算 ΔE的理论和实验输入数据。相关的电离能和跃迁能列于此处；电离能以电离阈值为基准，因此束缚态能量为负。 $\mu =$ 实验值 $-$ 理论值， $\sigma = \sqrt{\sigma_{\rm th}^2 + \sigma_{\rm expt}^2}$。量 L 由下文公式（4）给出的积分方程推导得出。对于新玻色子情形， $\Delta E = \mu \pm L$。请注意，为了与理论值比较，我们将实验电离能结果的统计不确定度和系统不确定度按平方和开根号合并。

参数	理论值（kHz）	实验值（kHz）	μ（kHz）	σ（kHz）	ΔE（kHz）
$^4He\ 2^3S_1$	-1152 842 742 231 (52) [19]	-1152 842 742 708.2 (60) [14]	-477	52	-477 ± 102
$^3He\ 2^3S_1$	-1 152 788 844 133 (52) [18, 19, 27]	-1 152 788 844 615.4 (81) [15]	-482	53	-482 ±103
2^3S_1-2^3P_0	276 764 094 677 (54) [18, 19, 28]*	276 764 094 712.45 (0.86) [29]	-35	54	125

* 所用理论值的计算见补充材料。

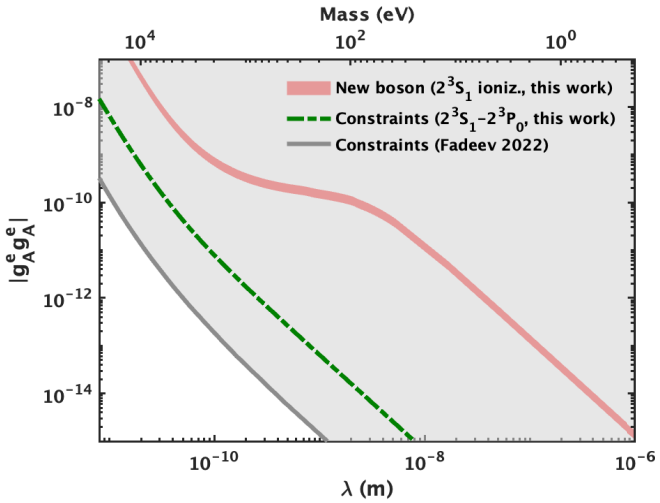

图2：由氦异常推断的轴矢量新玻色子耦合乘积 $g_A^e g_A^e$（粉色带），与现有限制（灰色曲线）以及本工作获得的新限制（绿色点划线）一并显示，作为相互作用程 λ（下轴）的函数。相应的玻色子质量M 标于上轴。对于轴矢量玻色子，氦异常所隐含的耦合，结合文献 [6] 中的先前极限，被我们的新限制所排除。

表I 中的氦数据要求 $E^{\rm exotic}$ 为负。这一符号要求立即排除赝标量相互作用以及$V_1 + V_2 + V_3|_{VV}$形式的矢量型势，其预言的偏移具有相反的符号。

在先前对新奇相互作用限制的分析中，例如参考文献[11]，，理论与实验差异要小得多，并且主要受跨越正负两侧的合并不确定度支配，因此新奇贡献的符号实际上无关紧要。相比之下，此处大得多的 9σ 差异使符号一致性成为决定性标准。

仅凭符号一致性排除赝标量和矢量情形后接下来，我们将考察剩余的轴矢量相互作用和标量相互作用是否与现有实验限制相容。

我们的结果汇总于图2 和 3中。两幅图中的粉色带表示解释氦异常所需的耦合强度，该强度是从 ^{4}He 数据中提取的。从 ^{3}He 推断出的相应耦合带相对于 ^{4}He 的中心值偏移约 1%，其宽度则几乎与 ^{4}He 带相同，差异低于 10^{-3}水平；它略高于 ^{4}He 曲线，因此为清晰起见未予展示。点划绿色曲线表示本研究得到的新限制，灰色曲线则代表现有的直接或间接界限。

图2 表明，基于合并奇异势的限制，与用轴矢量玻色子解释氦异常的说法不相容。由于物理的轴矢量媒介子通常会诱导所有允许的轴向–轴向相互作用项，因此必须针对完整的合并势$V_2 + V_3|_{AA}$ [6, 32–34] 而非单独的各项贡献来评估相关限制（更多内容见补充材料）。因此，图2 比较了解释氦异常所需的耦合强度与根据合并 $V_2 + V_3|_{AA}$ 相互作用得出的限制。本文从 2^3S_1–2^3P_0 跃迁（见表I）获得的新限制以及先前确立的界限 [34] 均完全排除了这一情形。

现在我们转而讨论自旋无关的标量相互作用。在这种情况下，诱导的能量位移与观测到的差异符号相同，因此通过了符号一致性检验。利用文献[11, 17], 中给出的2^3S_1 态波函数，我们发现，对于质量为 $M < 800$ eV的标量媒介子，重现报告差异所需的耦合强度低于现有限制，因此仍有可能用它来解释这一差异。

更详细地说，图3 显示，与基于氦中的$2\,^1S_0 - 2\,^3S_1$ 和 $2\,^3P_0 - 3\,^3D_1$ 跃迁得到的先前限制（灰色虚线）相比，自旋无关的标量玻色子仍然是允许的 [10],

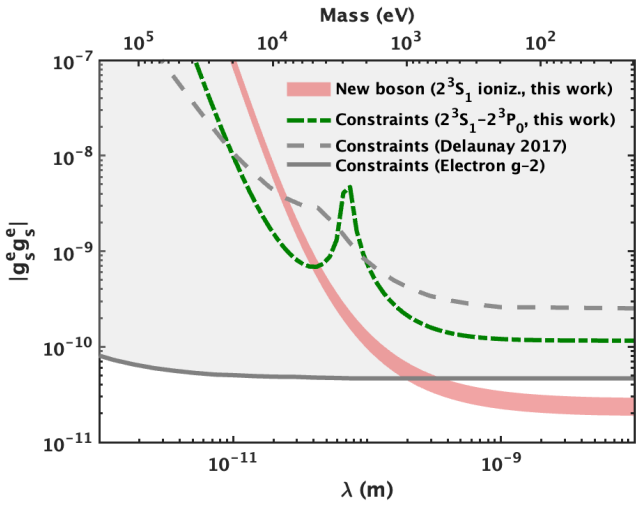

图3：根据氦异常推断出的标量新玻色子耦合乘积 $g_s g_s$（粉色带），以及

本研究得到的新限制（绿色点划线）和文献 [10] 中的已有限制（灰色曲线），随相互作用程 λ的变化关系。相应的玻色子质量M 标示在上方坐标轴上。在这种情况下，氦异常所暗示的耦合在$M < 800$电子伏特范围内仍有可能，而更高质量范围则受到已有和新增限制的排除。

允许的质量范围为 $M < 8000$eV。然而，根据我们利用 2^3S_1–2^3P_0 氦跃迁新得到的限制（绿色点划线），剩余参数空间缩小至 $M < 5000$eV。为了进一步缩小新玻色子的可能质量窗口，我们还在图 $g-2$ 中展示了标量玻色子的电子 [10] 限制3。这一界限更为严格，进一步排除了用标量玻色子解释氦异常的可能性，仅在 $M < 800$eV 时仍有可能。

与最先进的氦波函数计算结果进行比较 [35] 表明，改进电子波函数至多会使相关矩阵元发生数量级为 1 的变化（见补充材料），不足以从根本上改变上述结论。不过，我们注意到，电子 g–2 对新物理的限制[36, 37] 在概念上不同于第五种力搜索。在氦光谱学中，假设一个新玻色子在两个电子之间交换，从而产生一种有效的奇异势 [6], ；而在 $g-2$ 测量中，它则通过电子–光子顶角的虚圈修正参与其中 [10, 38, 39]。因此，相应的 $g-2$限制取决于所假设的相互作用紫外完备，故不能与第五种力实验给出的限制直接等同。我们期待通过氦原子跃迁的新测量等方式，进一步直接限制 $g_s g_s$。

结论——我们考察了奇异的自旋相关或自旋无关相互作用能否解释此前报道的 9σ 亚稳态 2^3S_1 氦 ^{3}He 和 ^{4}He 电离能差异。对诱导能移进行符号分析后可立即排除赝标量–赝标量（$g_p g_p$）和矢量–矢量（$g_V g_V$）耦合，因为它们产生的能移符号不正确。在其余可能性中，若一致地考虑完整的$V_2 + V_3|_{AA}$ 结构和现有限制，则轴矢量相互作用（$g_A g_A$）也可排除。标量相互作用（$g_s g_s$）仍是唯一部分可行的情形：我们基于 2^3S_1–2^3P_0 氦原子跃迁得出的新限制将其排除至 $M < 5000$eV，而间接的电子 $g-2$ 限制则进一步排斥质量高于 $M \gtrsim 800$eV 的情形。总体而言，观测到的差异极不可能是新单个玻色子的信号；唯一可能的例外，是在本文所考虑的单玻色子、单耦合框架下，质量为 $M < 800$eV 的轻标量媒介粒子。

然而，即使是这一标量窗口，也已受到严格限制，这说明任何可行的新物理解释都必须与可能遗漏的理论贡献仔细区分开来。一个耐人寻味的线索是，尽管测得的 $^3S_1$–^3P_J 跃迁频率与最先进的计算结果[19, 29, 40]，高度吻合，但各个 $(1s)(2s)\,^3S_1$ 和 $(1s)(2p)\,^3P_J$ 能级的计算束缚能却分别存在偏差，量级达到 ~ 0.5兆赫 [41]。因此，跃迁频率表面上的吻合可能源于偶然抵消，这凸显了重新审视高阶量子电动力学贡献（包括α^7 项）的重要性。

最后，我们的方法并不限于出现异常的系统，也适用于广泛的精密测量平台，包括μ子原子、原子钟及相关系统。

致谢——作者感谢 Frederick Merkt、Gordon Drake、Yevgeny Stadnik、Vladimir Yerokhin、Shui-Ming Hu 和 Danial Saeed 提供的有益讨论。本研究得到“精密物理、基本相互作用与物质结构”卓越集群（PRISMA++EXC 2118/2）的支持，该集群由德国研究联合会（DFG）通过德国卓越战略资助（项目编号 390831469）；此外，本研究还得到COST行动通过 COSMIC WISPers项目（资助编号CA21106）提供的支持。F. F. 感谢奥地利科学基金（FWF）通过项目编号 PAT 9429324（DOI:10.55776/PAT9429324）提供的资助。R.A. 和 M.K. 得到了“BASIS”理论物理与数学促进基金会的资助。

[1] M. Dine 和 A. Kusenko，《现代物理评论》**76**，1（2003）。

[2] J. L. Feng, 《天文学与天体物理学年度评论》48, 495 (2010)。[3] P. W. Graham、D. E. Kaplan 和 S. Rajendran, 《物理评论快报》115, 221801 (2015)。[4] S. Navas *et al.*（粒子数据组）, 《物理评论D辑》110, 030001 2024( )。[5] M. S. Safronova、D. Budker、D. DeMille、D. F. J. Kimball、A. Derevianko 和 C. W. Clark, 《现代物理评论》90, 025008 2018( )。[6] L. Cong、W. Ji、P. Fadeev、F. Ficek、M. Jiang、V. V. Flambaum、H. Guan、D. F. Jackson Kimball、M. G. Kozlov、Y. V. Stadnik 和 D. Budker, 《现代物理评论》97, 025005 (2025)。
[7] *Cosmic Wispers WG4 Report: WISPs Direct Searches*, 技术报告（COST行动CA21106，暗宇宙中的宇宙WISP，2025）。[8] S. G. Karshenboim, 《物理评论快报》104, 220406 (2010)。[9] G. Adkins、D. Cassidy 和 J. P´erez-Rı́os, 《物理学报告》975, 1 (2022)。[10] C. Delaunay、C. Frugiuele、E. Fuchs 和 Y. Soreq, 《物理评论D辑》96, 115002 (2017)。[11] F. Ficek、D. F. J. Kimball、M. G. Kozlov、N. Leefer、S. Pustelny 和 D. Budker, 《物理评论A辑》95, 032505 (2017)。[12] H. A. Schuessler、E. N. Fortson 和 H. G. Dehmelt, 《物理评论》187, 5 (1969)。[13] Y. R. Sun 和 S.-M. Hu, 《国家科学评论》7, 1818 (2020)。[14] G. Clausen、K. Gamlin、J. A. Agner、H. Schmutz 和 F. Merkt, 《物理评论A辑》111, 012817 (2025)。[15] G. Clausen 和 F. Merkt, 《物理评论快报》134, 223001 (2025)。[16] M. Born、R. J. Blin-Stoyle 和 J. M. Radcliffe, *Atomic Physics* 1989 (Courier Corporation,)。[17] H. A. Bethe 和 E. E. Salpeter, *Quantum Mechanics ofOne-and Two-Electron Atoms* (Springer Science & Business Media, 2013)。[18] K. Pachucki、V. Patk´o˘s 和 V. Yerokhin, 《物理评论A辑》95, 062510 (2017)。[19] V. Patk´o˘s、V. A. Yerokhin 和 K. Pachucki, 《物理评论A辑》103, 042809 (2021)。[20] G. W. F. Drake, 载于 *Springer Handbook of Atomic Molecular* , 由 G. W. F. Drake 编（Springer International Publishing, Cham, 2023）, 第199–216页。[21] R. J. Rengelink、Y. van der Werf、R. P. M. J. W. Notermans、R. Jannin、K. S. E. Eikema、M. D. Hoogerland 和 W. Vassen, 《自然物理》14, 1132 (2018)。[22] A. T. Bondy, 《Physics》18, 110 (2025)。[23] K. Steinebach、J. C. J. Koelemeij、H. L. Bethlem 和 K. S. E. Eikema, "在0.25 ppt不确定度下对 ^{4}He进行光谱学测量，并改进α粒子与氦-3原子核电荷半径差的测定", （2026）, arXiv:2601.19444。[24] J. E. Moody 和 F. Wilczek, 《物理评论D辑》30, 130 (1984). [25] B. A. Dobrescu 和 I. Mocioiu, 《高能物理学杂志》2006, 005（2006）。[26] P. Fadeev、Y. V. Stadnik、F. Ficek、M. G. Kozlov、V. V. Flambaum 和 D. Budker, 《物理评论A辑》99, 022113（2019）。[27] K. Pachucki 和 V. A. Yerokhin, 《物理与化学参考数据》44, 031206（2015）。[28] K. Pachucki 和 V. A. Yerokhin, 《物理评论快报》104, 070403 2010( )。[29] J.-L. Wen、J.-D. Tang、Y.-N. Lv、Y. R. Sun、C.-L. Zou、J.- F. Dong 和 S.-M. Hu, 《科学进展》11, eadu9796（2025）。[30] X. Zheng、Y. R. Sun、J.-J. Chen、W. Jiang、K. Pachucki 和 S.-M. Hu, 《物理评论快报》118, 063001（2017）。[31] X. Zheng、Y. R. Sun、J.-J. Chen、W. Jiang、K. Pachucki 和 S.-M. Hu, 《物理评论快报》119, 263002（2017）。[32] L. Cong、F. Ficek、P. Fadeev 和 D. Budker, "氢原子中电子与质子间奇异相互作用的限制改进"（2025）, arXiv:2408.11009。[33] R. Kang 和 X. Rong, "通过近阈值增强在小尺度上搜寻奇异相互作用"（2025）, arXiv:2511.21073。[34] P. Fadeev、F. Ficek、M. G. Kozlov、D. Budker 和 V. V. Flambaum, 《物理评论A辑》105, 022812（2022）。[35] R. Abdullin、M. G. Kozlov、 *et al.*, "标题待定"（2026）。[36] J. P. Leveille, 《核物理B辑》137, 63（1978）。[37] M. Lindner、M. Platscher 和 F. S. Queiroz, 《物理学报告》731, 1（2018）。[38] NA64合作组、Yu. M. Andreev、D. Banerjee、J. Bernhard、V. E. Burtsev、A. G. Chumakov、D. Cooke、P. Crivelli、E. Depero、A. V. Dermenev、S. V. Don-skov、R. R. Dusaev、T. Enik、N. Charitonidis、A. Fes-hchenko、V. N. Frolov、A. Gardikiotis、S. G. Gerassi-mov、S. N. Gninenko、M. H¨osgen、V. A. Kachanov、A. E. Karneyeu、G. Kekelidze、B. Ketzer、D. V. Kirpichnikov、M. M. Kirsanov、V. N. Kolosov、I. V. Konorov、S. G. Kovalenko、V. A. Kramarenko、L. V. Kravchuk、N. V. Krasnikov、S. V. Kuleshov、V. E. Lyubovitskij、V. Lysan、V. A. Matveev、Yu. V. Mikhailov、L. Molina Bueno、D. V. Peshekhonov、V. A. Polyakov、B. Radics、R. Rojas、A. Rubbia、V. D. Samoylenko、H. Sieber、D. Shchukin、V. O. Tikhomirov、I. Tlisova、A. N. Toropin、A. Yu. Tri-fonov、B. I. Vasilishin、P. V. Volkov 和 V. Yu. Volkov, 《物理评论快报》126, 211802（2021）。[39] C. Frugiuele、J. P´erez-Rı́os 和 C. Peset, 《物理评论D辑》100, 015010（2019）。[40] P. C. Pastor、G. Giusfredi、P. D. Natale、G. Hagel、C. de Mauro 和 M. Inguscio, 《物理评论快报》92, 023001（2004）。[41] G. B. Clausen, *Precision Spectroscopy in ^{3}He and ^{4}He: Rydberg States and Ionization Energies* , 博士论文, 苏黎世联邦理工学院, 瑞士苏黎世（2025）。