

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.04.01

原子磁力仪在异常作用力及类轴子暗物质探测中的应用

赵一心, 刘曦屿, 于东睿, 肖伟, 彭翔, 吴腾*, 郭弘*

(北京大学 电子学院 量子信息技术中心, 北京 100871)

摘要: 简述了异常相互作用力及类轴子暗物质的理论模型, 回顾了近年来国内外研究人员使用原子磁力仪和共磁力仪等进行自旋相关的非磁性力探测和暗物质搜寻的技术方案, 归纳了迄今为止对自旋和速度相关相互作用、自旋引力相互作用、类轴子暗物质场梯度与核子的耦合强度的探测结果。在此基础上, 本文对该领域未来的发展方向进行了展望, 通过分析和抑制系统误差、寻找新的探测方案等方法, 有望为自旋相关相互作用的耦合参数空间提供更严格的约束, 在更广泛的质量范围内对类轴子暗物质与标准模型费米子的耦合给出更严格的界定。

关键词: 原子磁力仪; 共磁力仪; 自旋相关相互作用; 类轴子暗物质

中图分类号: TB939

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)04-0001-14

Search for exotic force and axionlike dark matter with atomic magnetometry

ZHAO Yixin, LIU Xiyu, YU Dongrui, XIAO Wei, PENG Xiang, WU Teng*, GUO Hong*

(Department of Electronics, and Center for Quantum Information Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: This article provides a brief overview of the theoretical models of anomalous interactions and axionlike dark matter. It reviews the technical approaches of domestic and foreign researchers in recent years, including atomic magnetometers and comagnetometers, for exotic spin-dependent forces detection and dark matter searches. The article summarizes the experimental results regarding spin-velocity dependent interactions, spin-gravity interactions, and the coupling strength between the gradient of axionlike dark matter field and nucleons. On this basis, it provides an outlook for the future development direction in this field. By analyzing and suppressing systematic errors, and exploring new experimental schemes, it is expected to provide more stringent constraints for the coupling parameter space of spin-dependent forces, and to establish more rigorous limits of the coupling between axionlike dark matter and standard model fermions within a broader mass range.

Key words: atomic magnetometer; comagnetometer; spin-dependent force; axionlike dark matter

收稿日期: 2023-03-21; 修回日期: 2023-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62071012)

引用格式: 赵一心, 刘曦屿, 于东睿, 等. 原子磁力仪在异常作用力及类轴子暗物质探测中的应用[J]. 计测技术, 2023, 43(4): 1-14.

Citation: ZHAO Y X, LIU X Y, YU D R, et al. Search for exotic force and axionlike dark matter with atomic magnetometry[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(4): 1-14.



0 引言

粒子物理学中的标准模型能够描述四种已知基本作用力中的三种(包括电磁力、强相互作用力和弱相互作用力),是对所有已知的基本粒子进行分类的理论。标准模型是人类历史上建立的最基本的物理理论之一,在实验预测方面起到了重要指导作用。但标准模型仍存在一些不完善的地方,例如:模型中没有包含引力相互作用,不能解释物质和反物质的丰度不一致^[1],没有包含任何可能的暗物质粒子^[2-3],不能解释由暗能量描述的宇宙加速膨胀等问题^[4-7]。为进一步完善标准模型,人们一直在寻找超出标准模型描述的新粒子^[8]。目前,粒子对撞机和精密测量是两种常用方法,前者通过模拟高能物理过程直接搜寻新粒子,后者主要探测新粒子对已知粒子所产生的异常物理效应。本综述主要关注后一种探测方法。

原子磁力仪作为一种高灵敏度的磁场测量技术,主要通过测量原子磁矩在磁场作用下的能量变化来测量磁场^[9]。随着激光技术的持续发展以及新磁场探测方案的提出,原子磁力仪的探测性能不断提升,在一定的工作条件下,磁场探测灵敏度甚至可达到亚 fT/Hz^{1/2}量级^[10]。原子磁力仪在生物医学^[11-12]、基础物理^[13-14]、量子信息^[15]等方面均得到了广泛应用。

根据原子磁力仪的工作原理,任何可能导致原子磁矩能量变化的因素,包括真实磁场和其他类磁偶极相互作用,都可以利用原子磁力仪进行探测。随着原子磁力仪磁场探测灵敏度的不断提升,人们逐渐意识到原子磁力仪在研究奇异物理探测领域的潜能,如探测异常作用力^[16-17]、暗物质^[18-19]、永久电偶极矩^[20-21],以及验证洛伦兹协变^[22]等,原子磁力仪探测逐渐成为前沿基础物理研究领域的核心技术之一,与高能粒子对撞机的实验结果产生了很好的互补作用。

本文针对基于原子磁力仪的奇异物理探测技术进行了介绍,总结了原子磁力仪在自旋相关的异常作用力以及类轴子暗物质探测两个方向的理论模型、技术方案以及探测结果,并对这两个方向进一步的发展趋势进行了讨论。

1 自旋相关的异常作用力探测

内禀自旋的概念来源于人们对反常塞曼效应的研究。自旋被发现以来,其在基本粒子的相互作用之间承担的作用一直是物理学的一个核心问题。

在早期探索中,人们研究过引力场^[23]、电场^[24]与费米子自旋的耦合效应。1977年,为了解决量子色动力学中的强电荷共轭-宇称(Charge Conjugate-Parity)守恒问题,Peccei-Quinn理论描述了一种自旋为零的新粒子—轴子(Axion)^[25-26],拉开了研究新粒子与已知粒子之间异常相互作用的序幕:新粒子既能够与已知粒子直接产生相互作用,也能作为作用媒介,在两种已知粒子(如费米子)之间产生新的相互作用,即第五力。本文第1节主要介绍以新粒子为作用媒介的异常作用力探测;第2节主要介绍新粒子与已知粒子之间的直接相互作用探测,即类轴子暗物质探测。

针对新粒子与已知粒子之间可能存在的相互作用,1984年,J. E. Moody和F. Wilczek给出了描述轴子与费米子之间相互作用的理论框架^[27]。这一理论在2006年经B. A. Dobrescu和I. Mocioiu扩展^[28](此后简记为MWDM理论),将作为作用媒介的玻色子从自旋为0的轴子拓展到自旋为0以及自旋为1的轴子两种情况。基于MWDM理论,作为作用媒介的玻色子可以在费米子之间产生16个独立的长程作用势。2019年,研究人员对MWDM理论在细节上进行了修正和补充,将短程接触项引入理论^[29],对探测微观尺度上的异常相互作用起到了重要指导作用。

MWDM理论描述的16个作用势有多种分类方法:从宇称的角度出发,可以将其分为8个奇宇称势和8个偶宇称势;从自旋的角度出发,这16个作用势只有1个与自旋无关,其余15个作用势都与自旋相关,这也是目前利用精密测量技术进行探测的主体。

本文综合考虑相互作用的粒子种类和相互作用是否与速度相关,将目前针对15个自旋相关作用势的探测实验分为三类:①自旋极化物体与自旋非极化物体之间的相互作用探测;②自旋极化

物体之间与速度无关的相互作用探测；③自旋极化物体之间速度相关的相互作用探测。

1.1 自旋极化物体与自旋非极化物体之间的相互作用

目前，针对自旋极化的物体与自旋非极化物体之间相互作用的探测实验，主要利用以下三种形式的相互作用势，具体形式(采用国际单位制)为^[17, 30]

$$V_{4+5} = \frac{g_A^i g_A^j \hbar^2}{16\pi m_i c} [\boldsymbol{\sigma}_i \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{r})] \left(\frac{1}{r\lambda} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-r/\lambda} \quad (1)$$

$$V_{9+10} = \frac{g_p^i g_s^j \hbar}{8\pi m_i c} (\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{r}) \left(\frac{1}{r\lambda} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-r/\lambda} \quad (2)$$

$$V_{12+13} = \frac{g_A^i g_V^j \hbar}{4\pi} (\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{v}) \left(\frac{1}{r} \right) e^{-r/\lambda} \quad (3)$$

式中：每一个待测的相互作用势都由两部分作用势求和组成，例如， V_{4+5} 为MWDM理论给出的第4项作用势和第5项作用势的求和，其余情况依此类推，注意此处的研究对象是自旋极化的物体和自旋非极化的物体，由于两部分作用势中的耦合参数相同，可以进行求和，并且求和的结果仅与其中一种粒子的自旋相关，形式更加简单，因此通常将两部分作用势求和后进行考虑； g_X^i 为耦合参数，上标*i*为物体中参与相互作用的已知粒子种类， $i = e, n, p$ ，分别为作用粒子为电子(electron)、中子(neutron)、质子(proton)，下标*X*为新粒子与已知粒子之间的耦合方式， $X = A, V, p, s$ ，分别为耦合方式为轴矢量(axial-vector)、矢量(vector)、赝标量(pseudoscalar)、标量(scalar)； $\hbar$ 为约化普朗克常数， m_i 为相互作用粒子的质量， c 为光速， $\boldsymbol{\sigma}_i$ 为自旋极化物体中的自旋矢量， $\mathbf{v}$ 为速度矢量， $\mathbf{r}$ 为位置矢量， r 为相互作用粒子间的距离， λ 为相互作用的尺度。

对于传递自旋为0的玻色子的相互作用势，其耦合常数与赝标量耦合参数和(或)标量耦合参数有关；对于传递自旋为1的玻色子的相互作用势，其耦合常数与轴矢量耦合参数和(或)矢量耦合参数有关。理论上，某些相互作用势的作用媒介既可以是自旋为1的粒子，也可以是自旋为0的粒子。为了获得更好的界定指标，一般会选取其中一种相互作用进行探测。

1.1.1 自旋和速度相关相互作用

2012年，研究人员提出将铜板作为非极化核子源，并利用极化慢中子束进行探测的方法^[31]，首次给出了 V_{4+5} 轴矢量相互作用在毫米范围内的耦合参数界限。2013年，研究人员使用极化慢中子束通过液态 ^4He ，并测量中子自旋的变化，对 V_{12+13} 的耦合参数给出了约束^[32]。2018年，多家科研机构合作，同样利用极化慢中子的探测手段，将 V_{4+5} 耦合参数的约束提高了2个数量级^[33]。同年，研究人员使用基于 ^{87}Rb 的无自旋交换弛豫(Spin-Exchange Relaxation-Free, SERF)磁力仪，给出了 V_{4+5} 相互作用的约束^[34]，将原子气室中的极化电子作为极化粒子源，高核子密度的顺磁绝缘体 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO)晶体作为非极化核子源，二者相距5 mm，并将BGO晶体顺时针、逆时针旋转的实验结果作差，以消除系统误差。

国内科研人员也在该领域展开了大量研究。2015年，多家科研单位合作，通过测量极化 ^3He 气体的自旋弛豫，在 $1 \sim 10^8 \text{ m}$ 的作用范围内对 V_{12+13} 的耦合参数给出了新的约束^[35]。2021年，研究人员搭建了基于 ^{87}Rb 和 ^{129}Xe 的自旋放大器^[36]， ^{129}Xe 的极化核子自旋与BGO晶体内部的非极化核子之间产生依赖于速度和自旋的相互作用，使 ^{129}Xe 的能级产生移动，并利用 ^{87}Rb 磁力仪对其进行探测，对 V_{4+5} 轴矢量耦合参数在 $0.04 \sim 100 \text{ m}$ 范围内提供了约束，对 V_{12+13} 轴矢量-矢量耦合参数在 $0.1 \sim 1 \text{ m}$ 范围内将约束提高了1~2个数量级。2022年，研究人员利用工作在SERF机制下的K-Rb- ^{21}Ne 共磁力仪对中子-核子之间的 V_{4+5} 耦合参数在 $0.1 \sim 10 \text{ m}$ 相互作用范围内将约束提高了1个数量级^[37]，并给出了质子-核子的 V_{4+5} 相互作用耦合参数约束；同时将中子-核子 V_{12+13} 相互作用耦合参数的界定在 $0.01 \sim 1 \text{ m}$ 的相互作用范围内提高了1个数量级，并给出了同区间内质子-核子耦合参数约束。同年，研究人员提出了利用2个独立的BGO晶体和4台基于 ^{87}Rb 的原子磁力仪阵列对多种自旋相关相互作用进行探测的方案，其预期的实验结果在 $0.01 \sim 1 \text{ m}$ 相互作用范围内对 V_{4+5} 和 V_{12+13} 耦合参数的界定都能够提高5个数量级^[38]。上述实验结果总结在了图1和图2中，图中的纵坐标为待测量

的相互作用耦合参数, 横坐标 λ 为相互作用范围, Mass为与相互作用范围对应的玻色子质量, 二者的关系为 $\lambda = \hbar/Mc$, M 为玻色子的质量。每个色块对应的实验和参考文献已在图例中标出, 代表在此范围内未探测到相应种类的相互作用, 即给出了此种相互作用耦合参数的约束。

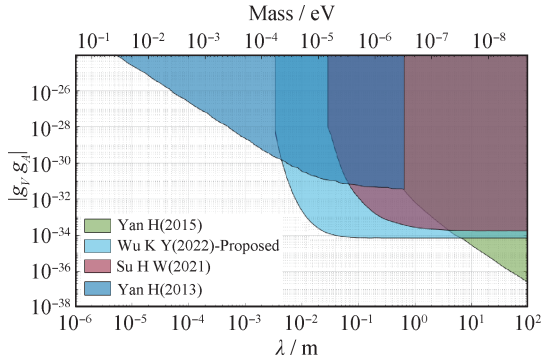


图1 自旋与速度相关相互作用 V_{4+5} 耦合参数约束
Fig.1 Parameter constraints on the spin-velocity dependent interaction V_{4+5}

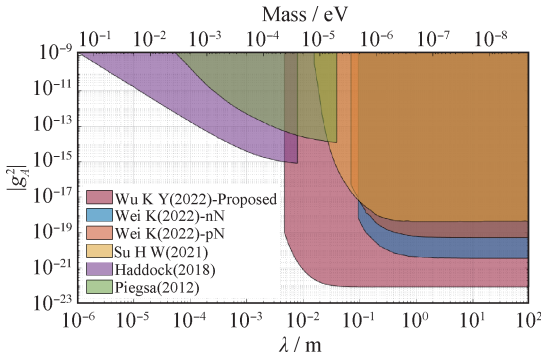


图2 自旋与速度相关相互作用 V_{12+13} 耦合参数约束
Fig.2 Parameter constraints on the spin-velocity dependent interaction V_{12+13}

作者所在团队改进了基于 ^{87}Rb 原子的SERF磁力仪装置, 将泵浦光区域和探测光区域实现空间分离, 有效地抑制了光功率展宽引入的光泵弛豫效应, 使磁力仪灵敏度提升至 $2 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 。同样利用BGO晶体作为非极化核子源, 使用高灵敏度SERF磁力仪对 V_{4+5} 相互作用进行探测, 在 $0.01 \sim 1 \text{ m}$ 的相互作用范围内将耦合参数约束提高了2个数量级。

1.1.2 自旋引力相互作用

在自旋引力相互作用研究中, 若将地球的组成粒子都考虑在单极耦合的范围内, 将每个粒子

的单极-偶极势 V_{9+10} 贡献都考虑在内, 可以得到自旋引力相互作用哈密顿量。质子和中子的 g_s^i 几乎相同, 且远大于电子与引力的耦合系数^[13], 因此, 可以忽略地球组成粒子中的电子与引力的相互作用, 将单极-偶极势对地球内的质子数量进行积分, 公式为

$$\frac{g_p^i g_s^j}{8\pi m_i c} \sigma_i \cdot r \int \frac{3M}{4\pi m_p R^3} r^2 \cos\theta \sin\theta \left(\frac{1}{r\lambda} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-r/\lambda} d\theta dr d\varphi \quad (4)$$

式中: R 为地球半径, M 为地球质量。在 $\lambda \gg R$ 的条件下, 式(4)积分可以简化为自旋引力耦合哈密顿量的形式^[17]

$$H_g = \frac{g_p^i g_s^j}{8\pi m_i c} \times \frac{4M}{\pi m_p R^2} \times \sigma_i \cdot r = \chi_i \sigma_i \cdot g \quad (5)$$

式中: χ_i 为粒子的旋重比, g 为重力加速度。式(2)和式(5)是在不同理论框架下对自旋引力相互作用的表达形式, 通过上述推导可以证明二者在满足近似条件下是等价的。

1992年, 科研人员最早利用 ^{199}Hg 和 ^{201}Hg 共磁力仪完成了关于自旋引力相互作用的实验, 该工作给出了在实验探测到的最长的相互作用范围内, 对极化中子和其他粒子之间的单极-偶极相互作用的最严格约束^[16]。这篇文章奠定了共磁力仪在单极-偶极相互作用探测中的重要作用, 关于质子和中子的许多后续研究都是利用不同种类的共磁力仪, 对相互作用耦合常数给出不同作用范围下的更严格约束。关于电子的耦合约束则通常使用自旋极化扭摆(pendulum)进行探测^[39-41]。利用共磁力仪可以将磁性作用导致的原子能级移动视为共模信号消除, 留下由非磁性作用引起的原子能级移动, 自旋相关相互作用就是其中一种可能的作用方式。系统误差分析是此类实验中的一环重要环节, 共磁力仪系统中的光频移效应、磁场梯度、温度等因素和地球自旋的陀螺效应都会对结果产生干扰。1995年的一项工作对地球自转陀螺效应在自旋引力耦合实验测量中的干扰进行了详细的分析计算^[42]。研究人员在2013年发表的利用 ^{87}Rb - ^{85}Rb 共磁力仪测量质子自旋引力相互作用的文章里对实验中的系统误差做出了详细的讨论^[43]。2017年, 他们采用 ^{87}Rb - ^{85}Rb 共磁力仪给出了质子

自旋引力相互作用在长距离探测下的迄今最严格约束^[17]。2018年,研究人员搭建了一种基于同种分子的核自旋共磁力仪^[44],抑制了在温度梯度存在下共磁力仪对一阶磁场梯度的响应,其对质子的自旋-引力耦合约束与2017年⁸⁷Rb-⁸⁵Rb共磁力仪的实验结果相当,并具有更大的提升潜力。

随着共磁力仪的发展,实验上对质子和中子自旋引力耦合常数的约束得到越来越严格的限定,由碱金属和惰性气体组成的共磁力仪对耦合常数在短距离上的探测起到了重要作用。2013年,研究人员在亚毫米距离尺度上获得了中子的单极-偶极相互作用的限制^[45],通过使用⁸⁵Rb-¹²⁹Xe-¹³¹Xe共磁力仪,利用铷原子测量极化¹²⁹Xe和¹³¹Xe的进动,探测单极-偶极相互作用。2010年、2015年,分别有两项研究工作通过测量超极化³He的纵向弛豫对短程单极-偶极相互作用耦合参数进行约束^[46-47]。

近年,国内的相关研究也取得了重要进展。2022年,研究人员搭建了¹²⁹Xe-¹³¹Xe-Rb共磁力仪,在亚毫米范围对单极-偶极势给出了新的约束极限^[48]。图3总结了上述实验对 V_9 、 V_{10} 的耦合参数约束,其中灰色部分是天文学观测结果^[49]。

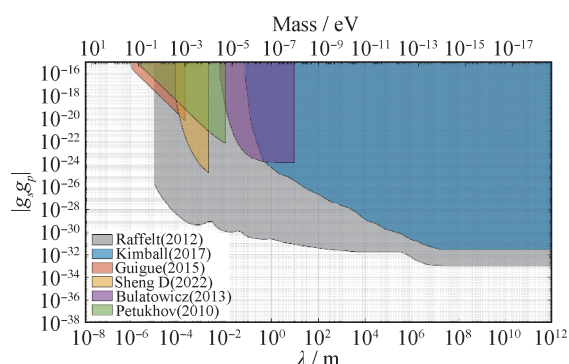


图3 自旋-引力相互作用 V_{9+10} 耦合参数约束

Fig.3 Parameter constraints on the spin-gravity interaction V_{9+10}

2020年,作者所在团队提出了一种基于单种⁸⁷Rb的共磁力仪^[50],可以很好地抑制传统的基于多种原子的共磁力仪的系统误差。基于⁸⁷Rb原子的共磁力仪对自旋引力相互作用耦合参数的约束与最高水平持平,并仍有很大的发展潜力。在此基础上,2021年又提出了一种基于铯原子的共磁力仪,通过测量铯原子不同基态超精细能级的自

旋进动频率消除共模磁场信号,探测奇异非磁性自旋引力相互作用,具体工作在作者所在团队的一篇博士论文中进行了详细的介绍^[51]。在长距离作用范围下对质子自旋引力耦合参数的约束达到了与2017年研究人员利用⁸⁷Rb-⁸⁵Rb共磁力仪得到的相同的数量级。除了共磁力仪,作者所在团队提出了新的自旋引力相互作用探测方案。在传统 M_x 磁力仪的基础上,在系统里施加缀饰射频磁场,在射频磁场的缀饰作用和自旋交换碰撞作用的耦合下,能够使磁力仪系统对磁性作用不敏感,因此可以用于自旋引力相互作用探测。

1.2 极化粒子之间速度无关相互作用

两个极化物体之间的自旋-自旋相互作用一共有9种,其中有3种是静态的(采用国际单位制),包括^[52-53]

$$V_2 = \frac{g_A^i g_A^j}{4\pi r} \sigma_i \cdot \sigma_j e^{-r/\lambda} \quad (6)$$

$$V_3 = \frac{g_p^i g_p^j \hbar^2}{16\pi m_i m_j c^2} \left[\sigma_i \cdot \sigma_j \left(\frac{1}{r^2 \lambda} + \frac{1}{r^3} \right) - (\sigma_i \cdot r)(\sigma_j \cdot r) \left(\frac{1}{\lambda^2 r} + \frac{3}{r^2 \lambda} + \frac{3}{r^3} \right) \right] e^{-r/\lambda} \quad (7)$$

$$V_{11} = \frac{\hbar^2}{4\pi} \left(\frac{g_V^i g_A^j}{2m_i} + \frac{g_A^i g_V^j}{2m_j} \right) (\sigma_i \times \sigma_j) \cdot r \left(\frac{1}{r \lambda} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-r/\lambda} \quad (8)$$

2008年,研究人员使用Rb-¹²⁹Xe-³He共磁力仪对中子之间的 V_2 、 V_3 耦合参数进行了约束,同时对电子之间的轴矢量偶极-偶极耦合范围给出了推断^[54]。实验中,首先泵浦铷原子,通过自旋交换碰撞极化³He,并在相隔41 cm处放置³He/¹²⁹Xe的微波激射器(maser),在对³He的核自旋极化进行调制的同时测量³He和¹²⁹Xe的核塞曼频率,利用两个频率和两种原子的旋磁比构造一个与待测异常自旋-自旋相互作用成正比的值,通过测量两种原子的自旋进动频率,可以实现对 V_2 、 V_3 耦合参数的约束。2009年,研究人员搭建了SERF机制下的K-³He共磁力仪,对中子之间的3种静态自旋-自旋相互作用耦合参数都给出了约束^[55]。2010年,通过测量Na-³He之间的自旋交换碰撞,研究人员给出了中子-质子之间的 V_2 、 V_3 耦合参数^[56]。2013年,多家研究单位合作提出将地球作为一个极化自旋源,研究自旋极化的地球电子与自旋极化的

电子和核子之间可能的长程相互作用^[53],并给出了多种费米子之间 V_2 、 V_{11} 势能的界限,对 V_2 的界定包括中子-电子、电子-电子、电子-质子和中子-中子之间的作用;值得注意的是, V_{11} 中涉及到两个自旋的叉乘,若不同种类的费米子交换相互作用顺序,其 V_{11} 耦合参数是不同的,例如中子-电子和电子-中子的 V_{11} 耦合参数是两个不同的值。研究人员通过实验给出了中子与电子、电子与质子

以及中子与中子之间的共5个耦合参数的界限。2020年,研究人员利用Rb-²¹Ne共磁力仪和基于SmCo₅的旋转电子自旋源给出了中子和电子之间 V_2 、 V_3 相互作用的耦合参数约束^[57]。

1.3 极化粒子之间速度相关相互作用

另外6种自旋-自旋相互作用势能依赖于两个费米子之间的相对速度^[58],其形式(采用国际单位制)分别为

$$V_{6,7} = -\frac{\hbar}{8\pi c^2} \left(\frac{g_V^i g_A^j}{2m_i} + \frac{g_A^i g_V^j}{2m_j} \right) \times [(\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{v})(\boldsymbol{\sigma}_j \cdot \mathbf{r}) \pm (\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{r})(\boldsymbol{\sigma}_j \cdot \mathbf{v})] \times \left(\frac{1}{r\lambda} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-r/\lambda} \quad (9)$$

$$V_8 = \frac{g_A^i g_A^j}{4\pi c^2} [(\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{v})(\boldsymbol{\sigma}_j \cdot \mathbf{v})] \frac{e^{-r/\lambda}}{r} \quad (10)$$

$$V_{14} = \frac{g_A^i g_A^j}{4\pi c} [(\boldsymbol{\sigma}_i \times \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \mathbf{v}] \frac{e^{-r/\lambda}}{r} \quad (11)$$

$$V_{15} = -\frac{g_V^i g_V^j \hbar^2}{8\pi m_i m_j c^3} \{ [\boldsymbol{\sigma}_i \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{r})](\boldsymbol{\sigma}_j \cdot \mathbf{r}) + [\boldsymbol{\sigma}_j \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{r})](\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{r}) \} \times \left(\frac{1}{\lambda^2 r} + \frac{3}{r^2 \lambda} + \frac{3}{r^3} \right) e^{-r/\lambda} \quad (12)$$

$$V_{16} = -\frac{\hbar}{8\pi c^2} \left(\frac{g_V^i g_A^j}{2m_i} + \frac{g_A^i g_V^j}{2m_j} \right) \{ [\boldsymbol{\sigma}_i \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{r})](\boldsymbol{\sigma}_j \cdot \mathbf{v}) + (\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{v}) \times [\boldsymbol{\sigma}_j \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{r})] \} \times \left(\frac{1}{r\lambda} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-r/\lambda} \quad (13)$$

式中:对于第6项作用势 V_6 ,中括号内的“ $\pm$ ”取“+”,对于 V_7 ,中括号中的“ $\pm$ ”取“-”。

对速度相关的6种自旋-自旋相互作用的实验探测比较少,2010年,研究人员将理论估计的由自旋-自旋相互作用引起的自旋交换碰撞截面的变化与实际实验数据进行对比,对中子-质子之间的 V_2 、 V_3 耦合参数做出了界定,并对长程作用范围的 V_8 耦合参数第一次在实验上给出了约束^[56]。随后,研究人员利用地球内部电子自旋模型去研究所有6种可能的长程速度依赖的自旋-自旋相互作用^[58],得到了将电子自旋与电子、中子和质子的自旋相联系的速度相关相互作用的界限,与2010年的长相互作用范围下中子-质子之间的 V_8 作用势能给出的约束相比,提高了30个数量级,并首次给出了其他5种依赖速度的自旋-自旋相互作用的约束。

2018年,国内多家科研单位合作使用具有高电子自旋密度的铁屏蔽的SmCo₅作为电子自旋源,利用SERF机制下的K-Rb-²¹Ne共磁力仪进行探测,给出了电子之间5 cm ~ 1 km范围内 $V_{6,7}$ 、 V_8 、 V_{15} 、 V_{16} 相互作用的最严格界限^[59]。

2 暗物质探测

暗物质的组成及其与普通物质间的相互作用,

是当代物理学前沿问题之一。根据宇宙学模型,暗物质占宇宙中物质的85%,它的存在已经被大量来自天体物理领域的观测结果所证实,但由于暗物质与电磁场之间不存在相互作用,不吸收、反射或发射电磁波,难以直接探测,人们至今尚不清楚暗物质的构成粒子。

轴子是回答标准模型存在的问题的可能答案之一^[25-26]。同时,由于轴子没有电磁相互作用,满足构成暗物质粒子的基本特性,是暗物质的一种候选粒子。

轴子和其他的轻赝标量玻色子(类轴子粒子)与物理标准模型之内的粒子,如光子、胶子和费米子等具有相互作用。本部分主要介绍类轴子暗物质与已知粒子之间的直接相互作用探测。轴子与光子的相互作用会产生感应电动势,可以使用微波腔探测,轴子暗物质实验(Axion Dark Matter eXperiment, ADMX)是其中的一项代表性工作^[60]。理论上,类轴子粒子与胶子的相互作用会产生中子的永久电偶极矩,使得粒子自旋绕电场方向进动,可以通过测量进动频率反推电偶极矩的大小;而类轴子粒子与费米子之间的相互作用造成原子能级的移动,这种由非磁性作用力造成的能级移动可以利用原子磁力仪或共磁力仪进行探测。

2.1 基本理论模型

考虑轴子模型与标准模型费米子之间的线性耦合,轴子与费米子之间的相互作用主要有两种:一种是以“轴子风”(Axion Wind)的形式,另一种是通过畴壁(Domain Wall, DW)的形式^[61]。

2.1.1 轴子风

轴子在早期宇宙中产生,太阳系移动穿过宇宙轴子形成轴子风,产生一个经典的振荡场(采用自然单位制)

$$a(t) = a_0 \cos(m_a t) \quad (14)$$

式中: a_0 为轴子场的特征幅度, m_a 为轴子的质量, t 为时间。

因此,对于一个自旋极化源来说,振荡的轴子暗物质场产生了随时间变化的非相对论势能,其形式与费米子自旋-含时赝磁场之间相互作用的形式类似,会导致费米子经历与时间有关的能级移动^[62]。

2.1.2 畴壁模型

轴子场在空间的分布不连续,形成拓扑缺陷,其二维存在形式叫作畴壁结构。对于一个中心处于 $z = 0$ 的畴壁,其内部的轴子场(采用自然单位制)可以表示为^[63]

$$a(z) = 4a_0 \arctan[\exp(m_a z)] \quad (15)$$

畴壁的表面平均张力 σ 是表征畴壁性质的一个重要参数,其定义为单位面积上类轴子粒子的能量,表达式为^[63]

$$\sigma = \int dz |\nabla a(z)|^2 = 4m_a a_0^2 \quad (16)$$

表面张力 σ 可以表示为畴壁能量密度 ρ_{DW} 与畴壁结构特征尺寸 L 的乘积,即

$$\sigma = \rho_{\text{DW}} \cdot L \quad (17)$$

其中,畴壁的能量密度可以由暗物质的密度 $\rho_{\text{DW}} \approx 0.4 \text{ GeV/cm}^3$ 给出^[64]。联立式(15)~式(17)可得畴壁内赝标量场的梯度为

$$\nabla a(z) = \frac{\sqrt{\rho_{\text{DW}} L m_a}}{\cosh(m_a z)} \quad (18)$$

类轴子粒子产生的赝标量场可以与标准模型费米子的自旋发生耦合,进而改变标准模型费米子的自旋极化在磁场作用下的进动频率。考虑赝标量场与费米子自旋的线性耦合,原子总角动量 F

与轴子场的梯度 ∇a 之间的相互作用哈密顿量为

$$H_{\text{DW}} = \frac{\mathbf{F} \cdot \nabla a(z)}{f_{\text{int}}} \quad (19)$$

式中: F 为总角动量量子数, f_{int} 为轴子与标准模型费米子之间的耦合常数,与具体的费米子类型有关,具有能量量纲。该相互作用形式和自旋与等效磁场的相互作用类似。将赝标量场的梯度式(18)代入式(19),可以得到

$$H_{\text{DW}} = \frac{1}{f_{\text{int}}} \frac{\sqrt{\rho_{\text{DW}} L m_a} \cos \phi}{\cosh(m_a z)} \quad (20)$$

式中: ϕ 为自旋角动量 F 和轴子场梯度 ∇a 之间的夹角。根据式中的哈密顿量,轴子场会给原子能级带来微小的能级扰动 δE_{DW} ,若能对这种微小的能量扰动进行高灵敏度探测,就可以实现对类轴子粒子畴壁模型暗物质的测量。

2.2 典型探测技术

近十年,随着理论模型和实验技术的发展,利用磁共振技术直接研究新粒子与标准模型费米子之间的相互作用取得了一定进展。宇宙轴子自旋进动实验(Cosmic Axion Spin Precession Experiment, CASPER)是研究人员在2014年提出的一种类轴子暗物质的探测手段,主要应用核磁共振技术探测宇宙背景暗物质轴子场所引入的自旋进动^[65]。根据类轴子与标准模型的耦合关系,CASPER分为两个主要研究方向: CASPER-Wind 实验探测类轴子-核自旋的耦合; CASPER-Electric 实验探测类轴子粒子与胶子的耦合。2018年,研究人员将 fT 量级灵敏度的 SERF 磁力仪应用到 CASPER 实验中,高灵敏度探测手段的应用使其在类轴子暗物质搜寻上具有一定的潜力^[66]。

使用原子磁力仪虽然能够给出轴子和原子核之间的耦合限制,但该指标仍弱于天文学给出的限制^[67]。人们需要寻找新的探测思路,提升信噪比,提高探测灵敏度,并在更广泛的质量范围内进行探索。目前,在实验室装置条件下探测轴子与类轴子暗物质的实验灵敏度主要受限于光子噪声极限和系统误差两个因素。近年来,科研人员针对这两个问题进行了探究。

由于超轻玻色子暗物质与原子自旋耦合的方式和磁场与原子自旋耦合的方式类似,真实磁场

是最主要的系统误差来源。除此之外,限制测量的最大系统误差来源于地球转动带来的陀螺效应。原子处于一个惯性参考系中,会感受到一个扭矩 $\tau = L\nu_{\text{rot}} = \mu\beta$, ν_{rot} 为地球转动频率, L 为角动量, μ 为磁矩。故等效虚磁场可以表示为 $\beta = \nu_{\text{rot}}/\mu$, 可以看出,这种效应引起的虚磁场频率位于由地球转动所确定的特定频率上,能够与其他实验室频率区分开^[68]。

关于抑制由真实磁场产生的系统误差,目前主要有几个发展方向:①提升磁屏蔽的性能;②共磁力仪探测方案;③构建磁力仪网络等。下面针对这几种方法分别进行阐述。

2.2.1 磁屏蔽

传统的实验室环境充斥着复杂的振荡磁场模式和不同的磁场梯度,故大多数敏感的磁力仪需要复杂的屏蔽环境,以免受到磁噪声干扰。抑制静磁场和慢变磁场带来的影响要求由高磁导率材料构成磁屏蔽,以引导样品周围的磁通量。较高频率的磁噪声也可以通过导电外壳被有效屏蔽。对于亚 kHz 的磁噪声,大多数原子磁力仪的灵敏度仍然受限于屏蔽材料的固有磁场噪声。2016年的一项工作表明:类轴子与粒子自旋的相互作用,在一般实验室条件下,不受磁屏蔽的影响^[69],若存在异常场与电子自旋的耦合,且磁屏蔽由软磁或铁磁材料构成,则会在磁屏蔽中产生感应磁场,影响对类轴子与自旋相互作用的探测。因此,不同条件下磁屏蔽性能的提升有助于消除磁场带来的系统误差^[70]。

2.2.2 共磁力仪方案

本文第一部分讨论自旋相关相互作用实验的进展时已经提到,在对非磁性力的测量中,为了抑制磁场波动引入的系统误差,减少系统对局域磁场变化的敏感性,研究人员提出了共磁力仪。下面对共磁力仪的分类与发展做详细阐述。共磁力仪是一种利用至少两种不同的原子磁力仪在同一空间内同步探测磁场的系统,根据共磁力仪的组成可以将其分为由核自旋-核自旋组成的核磁共振共磁力仪^[71]、电子自旋-电子自旋共磁力仪^[17],以及由核自旋-电子自旋构成的共磁力仪^[72]。核自旋-核自旋组成的核磁共振共磁力仪^[71]、电子自

旋-电子自旋共磁力仪^[17],这两种构建方案可以通过对比不同原子磁力仪对同一磁场的探测结果,有效分离磁性及非磁性作用力对原子能级的影响;核自旋-电子自旋构成的共磁力仪方案也称为自补偿式共磁力仪,此共磁力仪通常使用碱金属原子和原子核作为工作物质,利用它们之间的耦合,使用泵浦光先极化碱金属原子,经过自旋交换作用,进而极化稀有气体。通过选择合适的偏置磁场,即固定磁场在自补偿点,可以实现对慢变磁场信号的抑制,保留对类轴子场的响应。

2017年,多个国家的科研机构合作开展了利用冷中子以及¹⁹⁹Hg实现的共磁力仪系统对类轴子暗物质为期数年的探测工作^[18]。对于质量范围在 10^{-24} eV ~ 10^{-17} eV 的类轴子,这项工作首次给出了类轴子暗物质与胶子耦合的实验室限制,与天文物理极限相比,提升了3个数量级,并且相较原有的轴子-核子耦合限制提升了40倍。相较于其他探测系统,共磁力仪能够消除磁场变化的影响,是开展长期探测类轴子暗物质的理想方案之一。但是,不同原子体系的共磁力仪长期探测性能仍会受到一些物理因素的制约。2019年,研究人员提出了使用单一工作介质的共磁力仪方案,有效抑制了由磁场梯度带来的系统误差,在类轴子质量范围为 10^{-22} eV ~ 10^{-17} eV 内,得到了更严格的类轴子暗物质与核子的耦合强度限制^[19, 44]。这项工作作为CASPEr项目的一部分,与同年研究人员利用核磁共振技术对质量在 1.8×10^{-16} eV ~ 7.8×10^{-14} eV 之间的暗物质玻色子建立的新的实验界限相结合^[73],在不同的质量空间给出了严格的耦合强度限制。

碱金属-核自旋共磁力仪的性能优化也是人们关注的内容。在K-³He共磁力仪的基础上,2011年,研究人员提出了三种原子构建的²¹Ne-Rb-K共磁力仪^[74]。相较于K原子和³He的组合,Rb原子与²¹Ne之间有更大的自旋交换截面。此外,泵浦K原子,通过混合光泵浦极化Rb原子,能够避免高压铷原子蒸汽对泵浦光的强吸收效应。与K-³He共磁力仪相比,该系统的散粒噪声极限提升了1个数量级。根据不同探测需求,人们已经利用多种原子或分子体系构建了不同组合的共磁力仪。

除了实验上的研究,研究人员在共磁力仪的数据处理上也取得了一定进展。研究人员根据过去的共磁力仪数据,重新进行处理,得到类轴子粒子与中子和电子相互作用的新约束^[75]。研究人员考虑了不同实验时间数据的相关性,使用更长时间的数据得到耦合的限制,利用十年前的实验数据对与中子耦合的超轻类轴子粒子提出了迄今为止最严格的实验室约束,与来自恒星冷却的约束相当。

研究人员受到碱金属-核自旋共磁力仪方案的启发,利用碱金属和稀有气体间的自旋交换碰撞,提出了搜寻类轴子暗物质的新的探测方案。近期,研究人员使用自旋极化的Xe气体组成的探测器,进行了长达5个月的搜索,发表了超轻相干暗物质的稀有气体-碱金属自旋探测器(Noble and Alkali Spin Detectors for Ultralight Coherent Dark Matter Collaboration, NASDUCK)合作项目的第一批结果^[76],使用Floquet场能够提高核磁共振传感器在高频下的灵敏度,在轴子质量大于 4×10^{-13} eV时,该实验将轴子-中子的相互作用强度的实验室限制提升了1 000倍。

2.2.3 磁力仪网络

构建磁力仪网络也可以排除由真实磁场引入的系统误差,不过与单一原子磁力仪相比,磁力仪网络还具有更多优势。全球光学磁力仪网络(Global Network of Optical Magnetometers to Search for Exotic Physics, GNOME)是一个用于搜索奇异物理的相关瞬态信号的地理分离、时间同步的光泵浦原子磁力仪网络^[77]。单一的磁力仪虽然可以检测到这样的瞬态事件,但是区分由奇异物理产生的真实信号和由磁力仪的工作条件突变(如磁场尖峰、激光模式跳变、电路噪声等引起的假阳性)是比较困难的。因此需要空间分布的磁力仪,以消除假的局部效应。同时,通过观察全球分布的磁力仪网络中不同磁力仪探测到瞬态信号的相对时间,可以获得奇异场的运动速度。此外,多个磁力仪有望提升探测灵敏度。

2013年,研究人员提出了GNOME的理论模型,根据四台磁力仪记录的畴壁模型,暗物质穿过地球的时间可以确定暗物质的法向速度,剩余

的磁力仪可以验证测量结果^[63],并于2017年起定期开展联合运行实验。目前,共有来自德国、美国、中国、波兰、澳大利亚等国家的16家科研单位参与GNOME的联合运行,作者所在团队作为亚洲首个受邀加入该组织的单位,自2017年起参与GNOME的联合运行。该磁力仪网络的整体灵敏度在 $100 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 左右,依赖于活跃的站点数量与各站点自身的灵敏度。磁力仪的带宽要求大于100 Hz,保证时间分辨率小于10 ms。2021年发表了包括作者所在团队在内的来自6个国家共计9个研究小组首次联合探测类轴子暗物质的结果,研究人员对连续一个月运行的数据进行分析,没有发现统计学上的显著信号,将轴子-原子核耦合的参数空间 f_{int} 扩展到 $4 \times 10^5 \text{ GeV}$,超过了过去实验室搜寻轴子-原子核耦合实验所排除的范围^[78]。

为了降低核自旋对真实磁场的灵敏度,研究人员将原子磁力仪网络结合共磁力仪探测方案,构建共磁力仪网络(Advanced GNOME)进行暗物质探测。对比SERF磁力仪与碱金属-核自旋共磁力仪对非磁性力的响应的理论工作已经发表^[79],研究表明:与磁力仪相比,共磁力仪可以降低对低频磁场的敏感性,而不损失对非磁性耦合的敏感性,相关实验工作正在稳步推进中。除此之外,GNOME也在寻找类轴子畴壁外的新的探测模型,如轴子星与Q球^[80],并优化数据处理方式^[81-82],以期利用磁力仪网络采集的大量数据获得基础物理相关的更多信息。

2.2.4 国内研究现状

近年来,国内在该领域取得很多进展。对于碱金属-原子核共磁力仪,将磁场严格确定在自补偿点具有一定挑战性,研究人员针对该问题进行了深入的研究,对原子气室内系统的自补偿能力进行优化^[83-84]。他们使用了一种基于稳态交流响应的新方法,确定自补偿式共磁力仪中的磁场。结果表明:与过去基于瞬态过程的方法相比,该方法具有更高的分辨率和精度。这种方法可以用来抑制残余主磁场,以提升共磁力仪的系统稳定性。此外,研究人员提出了一种通过参数调制技术抑制低频磁场漂移的方案^[85],目前已经被应用于陀螺仪中。

在提升系统灵敏度方面,研究人员取得了一定成果。2021年,人们利用超极化的 ^{129}Xe 作为自旋放大器,在轴子质量为 67.5 feV 时,若存在类轴子,轴子和原子核的耦合强度应小于 $2.9 \times 10^{-9}\text{ GeV}^{-1}$,相较于原有的实验室限制至少提升了5个量级^[86]。利用轴子风理论,通过实验给出的轴子场梯度与核子之间的耦合强度约束可以总结如图4所示。

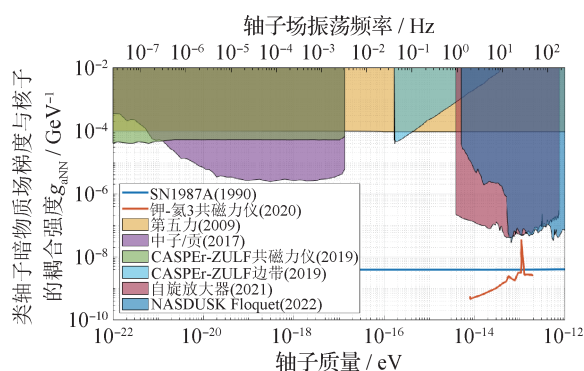


图4 类轴子暗物质场梯度与核子的耦合强度约束

Fig.4 Parameter constraints on coupling strength of axionlike dark matter field gradient and nucleons

此外,国内科研人员也尝试通过构建磁传感器网络探测类轴子暗物质。2022年,多家单位合作开发了矢量传感器网络^[87],该矢量磁传感器对信号的某些空间分量敏感,可以用来确定轻轴子或暗光子背景特性,并可能揭示玻色子的角度分布、偏振模式等特征。

基于在原子磁力仪领域的丰富经验,作者所在团队主要使用单一原子共磁力仪对暗物质探测展开了深入研究。通常人们默认构成共磁力仪的两个磁力仪感受到的磁场是相同的,但是由于极化^[88]、引力^[21]与热扩散速率^[59]等方面的差异,不同的原子在外界磁环境中可能拥有不同的平均位置。若存在磁场梯度,则两种原子感受到的磁场并不完全相同。为了解决该问题,借鉴使用单一液体分子构建核自旋共磁力仪的方法^[44],抑制由磁场梯度带来的系统误差。2020年,作者所在团队使用Rb原子的两个超精细能级构建的共磁力仪,克服了分子核自旋的极化率较低的问题^[50]。在此基础上,提出并搭建了一套基于铯原子光学自由感应衰减(Free Induction Decay, FID)方案的单

工作介质原子共磁力仪,在泵浦光关闭后对原子的自旋极化进动频率进行探测,实现了泵浦光和探测光和时间分离,有效抑制了由泵浦光带来的功率展宽、光频移等问题^[89]。

2021年,研究人员利用该系统进行暗物质畴壁模型搜寻实验,结果表明:若存在类轴子,相互作用强度应大于 $3.71 \times 10^7\text{ GeV}$ ^[90]。若对系统的各项参数如激光频率、功率做进一步优化,或者使用加热原子气室等方式提升信噪比,提高系统的探测灵敏度,将有望对质子自旋-类轴子暗物质赝标量场的耦合强度进行更严格的限制。

3 总结与展望

自1950年代提出原子磁力仪至今,其在探测灵敏度、系统装置、探测范围、应用场景等方面都有巨大的发展。高灵敏度原子磁力仪和相关量子精密测量技术在基础物理研究方面的应用十分广泛,已经成为了异常作用力探测、暗物质搜寻、寻找永久电偶极矩和验证洛伦兹协变等研究方向的重要实验手段,对现代物理学理论体系的进一步完善具有重要意义。

过去十年,来自粒子物理学、天体物理学、宇宙学、原子物理学等众多学科的新观点推动了超轻玻色子暗物质的理论和实验研究的复兴。基于现有技术,利用原子磁力仪或共磁力仪探测异常耦合的探测灵敏度未达到其理论极限,实验系统受到一些系统误差的影响,因此有很大的发展空间。通过分析和抑制系统误差、寻找新的方案提升系统的信噪比等手段,有望对自旋相关相互作用的耦合参数空间给出更严格的约束,在更广泛的质量范围内对类轴子暗物质与标准模型费米子的耦合给出更严格的界定。除此之外,研究人员也在寻找新的理论模型、优化数据处理方法方面不断努力。

国内科研人员在探测自旋相关相互作用和探测类轴子暗物质领域也做出了重要工作,并在国际上产生一定影响力。除了自旋相关的相互作用探测,探测一些粒子(如原子、中子、电子等)的固有电偶极矩,也常被用来探测类轴子暗物质。在粒子的固有电偶极矩测量方面,近期,研究人

员利用光学偶极阱技术对 ^{171}Yb 原子进行囚禁,同时结合量子无损测量技术,首次给出了利用该原子进行电偶极矩测量的实验界定^[91]。该方法也可以用来测量 ^{225}Ra 原子的固有电偶极矩。随着原子磁力仪探测灵敏度的不断提升,利用原子磁力仪(或共磁力仪)开展对固有电偶极矩的测量,或是更准确地评估由磁场引入的系统误差,也是目前该领域的核心发展方向。

参考文献

- [1] DINE M, KUSENKO A. Origin of the matter-antimatter asymmetry[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2003, 76(1): 1-30.
- [2] ZWICKY F. Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln[J]. *Helvetica Physica Acta*, 1933, 6: 110-127.
- [3] BERTONE G, HOOPER D, SILK J. Particle dark matter: evidence, candidates and constraints [J]. *Physics Reports*, 2005, 405(5-6): 279-390.
- [4] PERLMUTTER S. Nobel Lecture: Measuring the acceleration of the cosmic expansion using supernovae[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2012, 84(3): 1127-1149.
- [5] SCHMIDT B P. Nobel Lecture: Accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2012, 84(3): 1151-1163.
- [6] RIESS A G. Nobel Lecture: My path to the accelerating Universe[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2012, 84(3): 1165-1175.
- [7] ADAM R, AGHANIM N, ASHDOWN M, et al. Planck intermediate results-XLVII. Planck constraints on reionization history[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2016, 596: 1-19.
- [8] KHRIPLOVICH I B. Parity nonconservation in atomic phenomena[M]. United States: Gordon and Breach Science Publishers, 1991.
- [9] BUDKER D, ROMALIS M. Optical magnetometry [J]. *Nature Physics*, 2007, 3(4): 227-234.
- [10] KOMINIS I K, KORNACK T W, ALLRED J C, et al. A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer [J]. *Nature*, 2003, 422(6932): 596-599.
- [11] BOTO E, HOLMES N, LEGGETT J, et al. Moving magnetoecephalography towards real-world applications with a wearable system[J]. *Nature*, 2018, 555(7698): 657-661.
- [12] ZHANG R, XIAO W, DING Y D, et al. Recording brain activities in unshielded Earth's field with optically pumped atomic magnetometers [J]. *Science Advances*, 2020, 6(24): eaba8792.
- [13] SAFRONOVA M S, BUDKER D, DEMILLE D, et al. Search for new physics with atoms and molecules [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2018, 90(2): 025008.
- [14] TERRANO W A, ROMALIS M V. Comagnetometer probes of dark matter and new physics[J]. *Quantum Science and Technology*, 2021, 7(1): 014001.
- [15] JIANG M, WU T, BLANCHARD J W, et al. Experimental benchmarking of quantum control in zero-field nuclear magnetic resonance [J]. *Science Advances*, 2018, 4(6): eaar6327.
- [16] VENEMA B J, MAJUMDER P K, LAMOREAUX S K, et al. Search for a coupling of the Earth's gravitational field to nuclear spins in atomic mercury [J]. *Physical Review Letters*, 1992, 68(2): 135.
- [17] KIMBALL D F J, DUDLEY J, LI Y, et al. Constraints on long-range spin-gravity and monopole-dipole couplings of the proton[J]. *Physical Review D*, 2017, 96(7): 075004.
- [18] ABEL C, AYRES N J, BAN G, et al. Search for axion-like dark matter through nuclear spin precession in electric and magnetic fields[J]. *Physical Review X*, 2017, 7(4): 041034.
- [19] WU T, BLANCHARD J W, CENTERS G P, et al. Search for axionlike dark matter with a liquid-state nuclear spin comagnetometer[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(19): 191302.
- [20] ROSENBERRY M A, CHUPP T E. Atomic electric dipole moment measurement using spin exchange pumped masers of ^{129}Xe and ^3He [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(1): 22.
- [21] BAKER C A, DOYLE D D, GELTENBORT P, et al. Improved experimental limit on the electric dipole moment of the neutron[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(13): 131801.
- [22] ALTAREV I, BAKER C A, BAN G, et al. Test of Lorentz invariance with spin precession of ultracold neutrons [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(8): 081602.
- [23] THORNE K S, HARTLE J B. Laws of motion and precession for black holes and other bodies[J]. *Physical Review D*, 1985, 31(8): 1815-1837.
- [24] PURCELL E M, RAMSEY N F. On the possibility of electric dipole moments for elementary particles and nuclei [J]. *Physical Review*, 1950, 78(6): 807-807.
- [25] PECCEI R D, QUINN H R. Constraints imposed by CP

- conservation in the presence of pseudoparticles[J]. Physical Review D, 1977, 16(6): 1791–1797.
- [26] PECCEI R D, QUINN H R. CP conservation in the presence of pseudoparticles [J]. Physical Review Letters, 1977, 38(25): 1440–1443.
- [27] MOODY J E, WILCZEK F. New macroscopic forces? [J]. Physical Review D, 1984, 30(1): 130–138.
- [28] DOBRESCU B A, MOCIOIU I. Spin-dependent macroscopic forces from new particle exchange [J]. Journal of High Energy Physics, 2006, 2006(11): 005.
- [29] FADEEV P, STADNIK Y V, FICEK F, et al. Revisiting spin-dependent forces mediated by new bosons: potentials in the coordinate-space representation for macroscopic- and atomic-scale experiments [J]. Physical Review A, 2019, 99(2): 022113.
- [30] CHU P H, WEISMAN E, LIU C Y, et al. Search for exotic short-range interactions using paramagnetic insulators [J]. Physical Review D, 2015, 91(10): 102006.
- [31] PIEGSA F M, PIGNOL G. Limits on the axial coupling constant of new light bosons [J]. Physical Review Letters, 2012, 108(18): 181801.
- [32] YAN H, SNOW W M. New limits on possible long-range parity-odd interactions of the neutron from neutron-spin rotation in liquid ^4He [J]. Physical Review Letters, 2013, 110(8): 082003.
- [33] HADDOCK C, AMADIO J, ANDERSON E, et al. A search for possible long range spin dependent interactions of the neutron from exotic vector boson exchange [J]. Physics Letters B, 2018, 783: 227–233.
- [34] KIM Y J, CHU P H, SAVUKOV I. Experimental constraint on an exotic spin- and velocity-dependent interaction in the sub-meV range of axion mass with a spin-exchange relaxation-free magnetometer [J]. Physical Review Letters, 2018, 121(9): 091802.
- [35] YAN H, SUN G A, PENG S M, et al. Searching for new spin- and velocity-dependent interactions by spin relaxation of polarized ^3He gas [J]. Physical Review Letters, 2015, 115(18): 182001.
- [36] SU H W, WANG Y H, JIANG M, et al. Search for exotic spin-dependent interactions with a spin-based amplifier [J]. Science Advances, 2021, 7(47): eabi9535.
- [37] WEI K, JI W, FU C B, et al. New Constraints on exotic spin-velocity-dependent interactions [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1–7.
- [38] WU K Y, CHEN S Y, GONG J, et al. Searching for exotic spin-dependent interactions using rotationally modulated source masses and an atomic magnetometer array [J]. Physical Review D, 2022, 105(5): 055020.
- [39] HECKEL B. R, ADELBERGER E G, CRAMER C E, et al. Preferred-frame and CP-violation tests with polarized electrons [J]. Physical Review D, 2008, 78(9): 092006.
- [40] HOEDL S A, FLEISCHER F, ADELBERGER E G, et al. Improved constraints on an axion-mediated force [J]. Physical Review Letters, 2011, 106(4): 041801.
- [41] TERRANO W A, ADELBERGER E G, LEE J G, et al. Short-range, spin-dependent interactions of electrons: a probe for exotic pseudo-goldstone bosons [J]. Physical Review Letters, 2015, 115(20): 201801.
- [42] MASHHOON B. On the coupling of intrinsic spin with the rotation of the earth [J]. Physics Letters A, 1995, 198(1): 9–13.
- [43] KIMBALL D F J, LACEY I, VALDEZ J, et al. A dual-isotope rubidium comagnetometer to search for anomalous long-range spin-mass (spin-gravity) couplings of the proton [J]. Annalen der Physik, 2013, 525(7): 514–528.
- [44] WU T, BLANCHARD J W, KIMBALL D F J, et al. Nuclear-spin comagnetometer based on a liquid of identical molecules [J]. Physical Review Letters, 2018, 121(2): 023202.
- [45] BULATOWICZ M, GRIFFITH R, LARSEN M, et al. Laboratory search for a long-range T-odd, P-odd interaction from axionlike particles using dual-species nuclear magnetic resonance with polarized ^{129}Xe and ^{131}Xe gas [J]. Physical Review Letters, 2013, 111(10): 102001.
- [46] PETUKHOV A K, PIGNOL G, JULLIEN D, et al. Polarized ^3He as a probe for short-range spin-dependent interactions [J]. Physical Review Letters, 2010, 105(17): 170401.
- [47] GUIGUE M, JULLIEN D, PETUKHOV A, et al. Constraining short-range spin-dependent forces with polarized ^3He [J]. Physical Review D, 2015, 92(11): 114001.
- [48] FENG Y K, NING D H, ZHANG S B, et al. Search for monopole-dipole interactions at the sub-millimeter range with a ^{129}Xe - ^{131}Xe -Rb comagnetometer [J]. Physical Review Letters, 2022, 128(23): 231803.
- [49] RAFFELT G. Limits on a CP-violating scalar axion-nucleon interaction [J]. Physical Review D, 2012, 86(1): 015001.
- [50] WANG Z G, PENG X, ZHANG R, et al. Single-species atomic comagnetometer based on ^{87}Rb atoms [J]. Physical

- Review Letters, 2020, 124 (19): 193002.
- [51] 杨雨成. 基于铯原子磁力仪的自旋-引力耦合及畴壁暗物质探测[D]. 北京: 北京大学, 2021.
- YANG Y C. Spin gravity coupling and domain wall dark matter detection based on cesium atomic magnetometer [D]. Beijing: Peking University, 2021. (in Chinese)
- [52] LEDBETTER M P, ROMALIS M V, KIMBALL D F J. Constraints on short-range spin-dependent interactions from scalar spin-spin coupling in deuterated molecular hydrogen [J]. Physical Review Letters, 110 (4): 040402.
- [53] HUNTER L, GORDON J, PECK S, et al. Using the earth as a polarized electron source to search for long-range spin-spin interactions [J]. Science, 2013, 339 (6122): 928-932.
- [54] GLENDAY A G, CRAMER C E, PHILLIPS D F, et al. Limits on anomalous spin-spin couplings between neutrons [J]. Physical Review Letters, 2008, 101(26): 261801.
- [55] VASILAKIS G, BROWN J M, KORNACK T W, et al. Limits on new long range nuclear spin-dependent forces set with a K-³He comagnetometer [J]. Physical Review Letters, 2009, 103(26): 261801.
- [56] KIMBALL D F J, BOYD A, BUDKER D. Constraints on anomalous spin-spin interactions from spin-exchange collisions [J]. Physical Review A, 2010, 82(6): 062714.
- [57] ALMASI A, LEE J, WINARTO H, et al. New limits on anomalous spin-spin interactions [J]. Physical Review Letters, 2020, 125(20): 201802.
- [58] HUNTER L, ANG D G. Using geoelectrons to search for velocity-dependent spin-spin interactions [J]. Physical Review Letters, 2014, 112(9): 09803.
- [59] JI W, CHEN Y, FU C B, et al. New experimental limits on exotic spin-spin-velocity-dependent interactions by using SmCo₅ spin sources [J]. Physical Review Letters, 2018, 121(26): 261803.
- [60] ASZTALOS S, DAW E, PENG H, et al. Large-scale microwave cavity search for dark-matter axions [J]. Physical Review D, 2001, 64(9): 092003.
- [61] STADNIK Y. Manifestations of dark matter and variations of the fundamental constants of nature in atoms and astrophysical phenomena [D]. UNSW Sydney, 2017.
- [62] GRAHAM P W, RAJENDRAN S. New observables for direct detection of axion dark matter [J]. Physical Review D, 2013, 88(3): 035023.
- [63] POSPELOV M, PUSTELNY S, LEDBETTER M P, et al. Detecting domain walls of axionlike models using terrestrial experiments [J]. Physical Review Letters, 2013, 110 (2): 021803.
- [64] PEEBLES P J E, RATRA B. The cosmological constant and dark energy [J]. Reviews of Modern Physics, 2003, 75 (2): 559.
- [65] BUDKER D, GRAHAM P W, LEDBETTER M, et al. Proposal for a cosmic axion spin precession experiment (CASPEr) [J]. Physical Review X, 2014, 4 (2): 021030.
- [66] WANG T, KIMBALL D F J, SUSHKOV A O, et al. Application of spin-exchange relaxation-free magnetometry to the cosmic axion spin precession experiment [J]. Physics of the Dark Universe, 2018, 19: 27-35.
- [67] RAFFELT G G. Astrophysical methods to constrain axions and other novel particle phenomena [J]. Physics Reports, 1990, 198(1-2): 1-113.
- [68] GRAHAM P W, KAPLAN D E, MARDON J, et al. Spin precession experiments for light axionic dark matter [J]. Physical Review D, 2018, 97(5): 055006.
- [69] KIMBALL D F J, DUDLEY J, LI Y, et al. Magnetic shielding and exotic spin-dependent interactions [J]. Physical Review D, 2016, 94(8): 082005.
- [70] KORNACK T W, SMULLIN S J, LEE S K, et al. A low-noise ferrite magnetic shield [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(22): 223501.
- [71] TULLNEY K, ALLMENDINGER F, BURGHOFF M, et al. Constraints on spin-dependent short-range interaction between nucleons [J]. Physical Review Letters, 2013, 111 (10): 100801.
- [72] KORNACK T W, ROMALIS M V. Dynamics of two overlapping spin ensembles interacting by spin exchange [J]. Physical Review Letters, 2002, 89(25): 253002.
- [73] GARCON A, BLANCHARD J W, CENTERS G P, et al. Constraints on bosonic dark matter from ultralow-field nuclear magnetic resonance [J]. Science Advances, 2019, 5(10): eaax4539.
- [74] SMICKLAS M, BROWN J M, CHEUK L W, et al. New test of local lorentz invariance using a ²¹Ne-Rb-K Comagnetometer [J]. Physical Review Letters, 2011, 107 (17): 171604.
- [75] BLOCH I M, HOCHBERG Y, KUFLIK E, et al. Axion-like relics: new constraints from old comagnetometer data [J]. Journal of High Energy Physics, 2020, 2020 (1): 1-38.
- [76] BLOCH I M, RONEN G, SHAHAM R, et al. New constraints on axion-like dark matter using a floquet quantum detector [J]. Science Advances, 2022, 8 (5): eabl8919.

- [77] AFACH S, BUDKER D, DECAMP G, et al. Characterization of the global network of optical magnetometers to search for exotic physics (GNOME) [J]. *Physics of the Dark Universe*, 2018, 22: 162–180.
- [78] AFACH S, BUCHLER B C, BUDKER D, et al. Search for topological defect dark matter with a global network of optical magnetometers [J]. *Nature Physics*, 2021, 17 (12): 1396–1401.
- [79] PADNIUK M, KOPCIUCH M, CIPOLLETTI R, et al. Response of atomic spin-based sensors to magnetic and non-magnetic perturbations [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12 (1): 1–9.
- [80] KIMBALL D F J, BUDKER D, EBY J, et al. Searching for axion stars and Q -balls with a terrestrial magnetometer network [J]. *Physical Review D*, 2018, 97 (4): 043002.
- [81] MASIA-ROIG H, SMIGA J A, BUDKER D, et al. Analysis method for detecting topological defect dark matter with a global magnetometer network [J]. *Physics of the Dark Universe*, 2020, 28: 100494.
- [82] KIM D, KIMBALL D F J, MASIA-ROIG H, et al. A machine learning algorithm for direct detection of axion-like particle domain walls [J]. *Physics of the Dark Universe*, 2022, 37: 101118.
- [83] CHEN Y, QUAN W, ZOU S, et al. Spin exchange broadening of magnetic resonance lines in a high-sensitivity rotating K-Rb- ^{21}Ne co-magnetometer [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1–12.
- [84] JIANG L W, QUAN W, LI R J, et al. A parametrically modulated dual-axis atomic spin gyroscope [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(5): 054103.
- [85] LU Y, ZHAI Y Y, FAN W F, et al. Nuclear magnetic field measurement of the spin-exchange optically pumped noble gas in a self-compensated atomic comagnetometer [J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 17683–17696.
- [86] JIANG M, SU H, GARCON A, et al. Search for axion-like dark matter with spin-based amplifiers [J]. *Nature Physics*, 2021, 17(12): 1402–1407.
- [87] CHEN Y F, JIANG M, SHU J, et al. Dissecting axion and dark photon with a network of vector sensors [J]. *Physical Review Research*, 2022, 4(3): 033080.
- [88] SHENG D, KABCENELL A, ROMALIS M V. New classes of systematic effects in gas spin comagnetometers [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(16): 163002.
- [89] YANG Y C, WU T, CHEN J B, et al. All-optical single-species cesium atomic comagnetometer with optical free induction decay detection [J]. *Applied Physics B*, 2021, 127(3): 1–11.
- [90] YANG Y C, WU T, ZHANG J W, et al. Search for topological defect of axionlike model with cesium atomic comagnetometer [J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(5): 050704.
- [91] ZHENG T A, YANG Y A, WANG S Z, et al. Measurement of the electric dipole moment of ^{171}Yb atoms in an optical dipole trap [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129 (8): 083001.

(本文编辑: 朱俊真)



第一作者: 赵一心 (1997—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为原子共磁力仪技术及其在基础物理领域的应用。



通讯作者: 吴腾 (1988—), 男, 北京大学助理教授/研究员, 博士生导师, 北京大学博雅青年学者, 国家高层次人才引进计划青年项目获得者。主要研究领域为高灵敏度原子磁力仪技术及其在物理标准模型检验、生物磁探测、核磁共振等领域的应用。作为项目负责人主持多项国家重大专项重点项目及国家自然科学基金面上项目。



通讯作者: 郭弘 (1969—), 男, 北京大学博雅特聘教授, 博士生导师, 现任北京大学量子电子学研究所所长, 国家计划量子领域专家组首席科学家, 国家量子重大项目总体专家组专家等, 主持承担国家级、省部级科研项目10余项, 专项项目8项。曾获国家杰出青年科学基金、新世纪百千万人才工程国家级人选、茅以升北京青年科技奖、中国优秀博士后奖等多项荣誉称号, 享受国务院政府特殊津贴专家。