

文章编号: 1005-5630(2024)01-0008-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202303060041

# 太赫兹里德堡态下阻塞效应的调控研究

张金标, 彭瑞杰, 彭滢

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 里德堡原子具有很大的极化率和跃迁偶极矩, 因此它对外界电磁场非常敏感, 结合量子干涉效应可实现太赫兹场的高灵敏度探测。采用外加电场的方式来调谐太赫兹里德堡激发态能级至 Förster 共振, 转变了原子间相互作用的方式, 进而改变了阻塞区域的大小。通过对比范德瓦耳斯和偶极-偶极 2 种作用方式下的主量子数以及共振激光拉比频率的变化对阻塞区域的影响, 发现 Förster 共振电场调谐下的偶极-偶极相互作用导致的阻塞效应更强, 造成的阻塞区域半径可以是范德瓦耳斯相互作用下的 2~3 倍。根据这一特点, 可利用外电场调控里德堡原子间相互作用来增强阻塞效应, 这对太赫兹里德堡跃迁中高质量单光子的制备以及原子检测准确度的提高具有参考意义。

**关键词:** 里德堡原子; 原子相互作用; 阻塞效应; Förster 共振; 太赫兹波

**中图分类号:** O 562 **文献标志码:** A

## Regulation of blockade effect in terahertz-dressed Rydberg states

ZHANG Jinbiao, PENG Ruijie, PENG Yan

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Rydberg atoms have large polarizabilities and transition dipole moments. They are extremely sensitive to external electric fields. Combining with the quantum interference effect, terahertz fields can be measured with high sensitivity. In this paper, we use a weak DC external electric field to tune the Rydberg state level to Förster resonance, thereby tuning the Rydberg pair interaction from the van der Waals interaction regime to the dipole-dipole interaction regime. This process creates an enhanced blockade effect and then enlarges the corresponding blockade region. The results show that the dipole-dipole interaction-induced blockade region can be 2-3 times larger than that of the van der Waals interaction. According to this characteristic, the external electric field can be used to enhance the blockade effect, which has reference significance for preparing high-quality unidirectional atoms and improving the accuracy of atomic detection in the terahertz-dressed Rydberg transition.

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 国家自然科学基金 (61922059)

第一作者: 张金标 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为太赫兹里德堡技术。

E-mail: 202310270@st.usst.edu.cn

通信作者: 彭滢 (1982—), 女, 教授, 研究方向为太赫兹技术。E-mail: py@usst.edu.cn

**Keywords:** Rydberg atoms; atomic interaction; blockade effect; Förster resonance; terahertz

## 引 言

里德堡原子<sup>[1-3]</sup>是主量子数  $n$  很大的原子, 且其外层电子处于高度激发态, 它具有半径大 ( $\propto n^2$ ), 寿命长 ( $\propto n^3$ ), 极化率大 ( $\propto n^7$ ) 以及强相互作用 ( $\propto n^{11}$ ) 等特点。因此, 里德堡原子在量子信息计算<sup>[4-5]</sup>、原子多体效应<sup>[6-7]</sup> 以及微波太赫兹场测量<sup>[8-11]</sup> 等研究领域具有重要的研究价值, 是原子物理学的研究热点之一。近年来, 随着激光冷却技术的实现, 人们可以获得温度为微开量级的超冷原子介质, 为研究里德堡原子间的相互作用提供了有效的技术平台。里德堡原子之间的相互作用<sup>[12-13]</sup> 大致可分为两类: 一类为范德瓦耳斯 (van der Waals, vdW) 相互作用; 另一类为偶极-偶极 (dipole-dipole, DD) 相互作用。里德堡原子间的相互作用会使里德堡原子能级发生变化, 从而限制在里德堡原子一定范围内的其他原子的激发, 形成里德堡阻塞效应<sup>[14-16]</sup>。这一效应可以有效控制阻塞区域内只存在单激发, 从而实现确定的单量子态的量子存储<sup>[17]</sup>。另外, 里德堡阻塞区域内原子的不同空间位置会产生不同的原子集体激发几率, 从而影响原子纠缠的保真度<sup>[18]</sup>。因此, 基于里德堡阻塞效应还可以实现多原子的纠缠<sup>[19]</sup> 和量子比特受控非门<sup>[20]</sup>, 为里德堡原子体系中量子计算的实现奠定了基础。

目前, 太赫兹 (terahertz, THz)<sup>[21-23]</sup> 探测技术主要是基于热探测方法, 包括辐射热计、高莱盒、热电探测器等。为了实现低噪声、高灵敏度和快速响应时间, 这些探测器需要在低温环境才能有效工作。近年来, 人们提出利用里德堡量子态检测来解决上述问题。碱性原子的里德堡态对弱电场扰动极其敏感, 这使得该类系统成为在室温下可以实现准确、实时、高灵敏度探测的优良探测器。此外, 这种原子探测系统可以实现校准至国际单位制基本单位 (SI) 的电场测量。因此, 基于里德堡原子的太赫兹波技术也引起了国内外研究者的兴趣。2017 年, 杜伦大学的 Wade 等<sup>[10]</sup> 采用太赫兹抽运里德堡原子, 通过对自发辐射产生的可见光波段荧光进行成像的方法, 实现了太

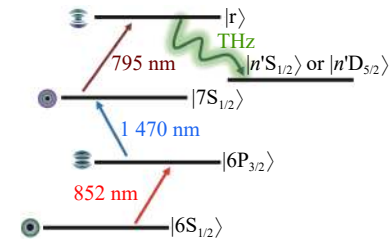
赫兹驻波场强空间分布的近场实时成像。2021 年, 陈志文等<sup>[24]</sup> 提出了基于四能级铯原子系统的太赫兹通信方案。2022 年, Chen 等<sup>[11]</sup> 在 1.06 THz 下利用里德堡原子的电磁诱导透明效应 (electromagnetically induced transparency, EIT) 实现了  $(11.07 \pm 0.06)$  V/m 的电场精准测量。为了进一步提高太赫兹里德堡原子的探测准确度, 探讨了利用里德堡原子的阻塞效应来严格抑制多光子聚集的现象, 从而产生高质量的单光子进行探测。对于里德堡原子系统, 阻塞效应的强度会决定所产生的单光子的质量<sup>[25]</sup>, 所以提出利用外加电场来调控增强阻塞效应, 理论上它可以很好地保证太赫兹里德堡跃迁中产生的光子序列的单光子性。

本文提出利用外界弱直流电场将里德堡原子间的相互作用由 van der Waals 相互作用转化为 dipole-dipole 相互作用, 以增强里德堡原子的阻塞效应。首先, 利用三光子激发方式制备太赫兹修饰的铯里德堡态, 并讨论了此状态下由于里德堡原子相互作用导致的里德堡阻塞效应。其次, 研究了里德堡原子对  $\{|31P_{3/2}\rangle|31P_{3/2}\rangle\}$  的相互作用势曲线, 通过对比 2 种相互作用方式下的主量子数以及共振激光拉比频率的变化对阻塞区域半径的影响, 发现电场调谐 Förster 共振下 dipole-dipole 相互作用导致的阻塞效应更强, 造成的阻塞区域半径可以是 van der Waals 相互作用下的 2~3 倍。这可用于不同太赫兹里德堡跃迁构型下的里德堡原子的单向高质量的制备。

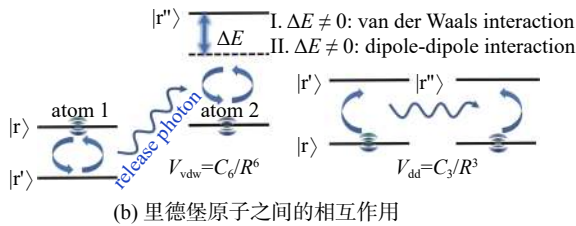
## 1 理论分析

如图 1(a) 所示, 利用中心波长分别为 852 nm、1470 nm 和 795 nm 的红外激光作为原子激发源, 制备了太赫兹修饰的铯原子里德堡态。相对于传统双光子激发方案, 里德堡三光子激发具有激发效率高, 选择性多以及空间分辨高等优势。在这一过程中会产生里德堡原子的 EIT 效应<sup>[26-27]</sup>, 该效应具有高精度和窄共振特性, 可以基于此效应来测量由内部原子相互作用或外部场引起的能

级移动。对于处于沿  $z$  轴方向，大小为  $F$  的电场中的里德堡原子，其哈密顿量的矩阵元可表示为



(a) 绝原子里德堡量子态的三光子能级跃迁



(b) 里德堡原子之间的相互作用

图 1 能级跃迁和原子相互作用的理论示意图

Fig. 1 Theoretical schematic diagram of energy level transition and atomic interaction

$$H_{nlm,n'l'm'} = \delta_{nlm,n'l'm'} E_{nl} + F \langle nlm | z | n'l'm' \rangle \quad (1)$$

式中： $n', l', m'$ 和  $n, l, m$  分别表示里德堡原子处于有无电场情况下的主量子数、角量子数和磁量子数； $E_{nl}$  为能量本征值； $\delta_{nlm,n'l'm'}$  为量子亏损； $F$  为电场。外加电场的 Stark 作用导致的密度矩阵元素的耦合会影响里德堡原子能级的混合，引起原子在其本征能级间的跃迁。另外，里德堡原子在外电场中会发生极化效应，导致里德堡原子的低角动量态能级和它附近的多重态能级产生耦合，从而产生能级的交叉现象。基于此，通过施加外部电场来调整里德堡能级<sup>[28-29]</sup>，可操控里德堡原子之间的相互作用。如图 1(b) 所示，假设无电场作用下 2 个原子处于相同的里德堡初始态  $|r\rangle$ ，通过吸收或发射光子可跃迁至相邻里德堡近态  $|r'\rangle$  和  $|r''\rangle$ ，对于距离为  $R$  的 2 个里德堡原子，原子间相互作用势<sup>[30]</sup> 可以表示为

$$V(R) = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{R^n} = \sum_{l,L=1}^{\infty} \frac{V_{lL}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)}{R^{l+L+1}} \quad (2)$$

式中： $C_n$  为相互作用系数； $\mathbf{r}_1$  和  $\mathbf{r}_2$  分别表示不同原子相对于原子核的位置矢量。里德堡相邻态之间的能量差为  $\Delta E = 2E_r - (E_r + E_r)$ ，将原子对  $\{|r\rangle|r\rangle\}$  和  $\{|r'\rangle|r''\rangle\}$  作为基向量，对原子哈密顿

量进行对角化，从而得到特征能量<sup>[31]</sup>

$$E = -\frac{\Delta E}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta E}{2}\right)^2 + \left(\frac{\boldsymbol{\mu}_1 \cdot \boldsymbol{\mu}_2}{R^3}\right)} \quad (3)$$

式中： $\boldsymbol{\mu}_1$  和  $\boldsymbol{\mu}_2$  分别表示里德堡态  $|r\rangle$  跃迁至  $|r'\rangle$  和  $|r''\rangle$  的跃迁偶极矩。当  $\Delta E \gg \boldsymbol{\mu}_1 \cdot \boldsymbol{\mu}_2 / R^3$  时，原子间表现为 van der Waals 相互作用，对应的相互作用势为  $V_{vdw} \propto n^{11} / R^6$ ，此时原子 1 从  $|r\rangle$  跃迁至  $|r'\rangle$  会释放 1 个光子，原子 2 吸收该光子后向  $|r''\rangle$  跃迁，但此过程会受到能量差  $\Delta E$  的限制。因此利用外电场对初始里德堡能级进行调控，使能量差满足  $\Delta E = 0$ ，此时里德堡原子间表现为 dipole-dipole 相互作用，对应的相互作用势为  $V_{dd} \propto n^4 / R^3$ 。同样处于初始  $|r\rangle$  态的里德堡原子可以通过吸收另一原子从  $|r\rangle$  跃迁至  $|r'\rangle$  时所释放的光子而跃迁到  $|r''\rangle$  态，这一过程被称为共振能量转移(resonance energy transfer, RET)。但是在 dipole-dipole 相互作用下能级会发生变化，使 2 个原子不能同时满足共振跃迁条件，从而不能被激发到同一里德堡态。因此，里德堡原子间的 van der Waals 和 dipole-dipole 相互作用都可以限制周围原子的进一步激发，形成一定的阻塞区域。

如图 2 所示，假设 2 个原子分别处于里德堡态和基态，该基态原子会受到前一个里德堡原子偶极-偶极相互作用的影响。在原子间距比较大的情况下，这种相互作用引起的能级位移是比较小的，但是在某一个临界点  $R_B$  附近，2 个原子的相互作用强度会使得基态原子的里德堡能级位移恰好与激光线宽  $\Gamma$  相等，即  $V(R_B) = \Gamma$ 。此时处于基态的原子与激光会完全失去耦合，不能被激发到里德堡态，这被称为里德堡阻塞效应， $R_B$  被称为里德堡阻塞半径。

图 2 给出了里德堡原子对  $\{|31P_{3/2}\rangle|31P_{3/2}\rangle\}$  在 Förster 共振电场下的 dipole-dipole 相互作用势曲线，结果表明：在短距离 ( $< R_B$ ) 情况下，原子相互作用会引起能级混合，其物理机制为 Stark 效应；当 2 个原子之间的距离接近  $R_B$  时，相互作用势曲线逐渐变得平滑并趋于收敛；在长距离 ( $> R_B$ ) 的情况下，基态原子可以激发到里德堡态，2 个原子此时独立经历 Stark 效应。这种相互作用下的基态特征有利于实现量子模拟协议。

另外，利用拉比频率  $\Omega = \boldsymbol{\varphi} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} / \hbar$  来衡量原子

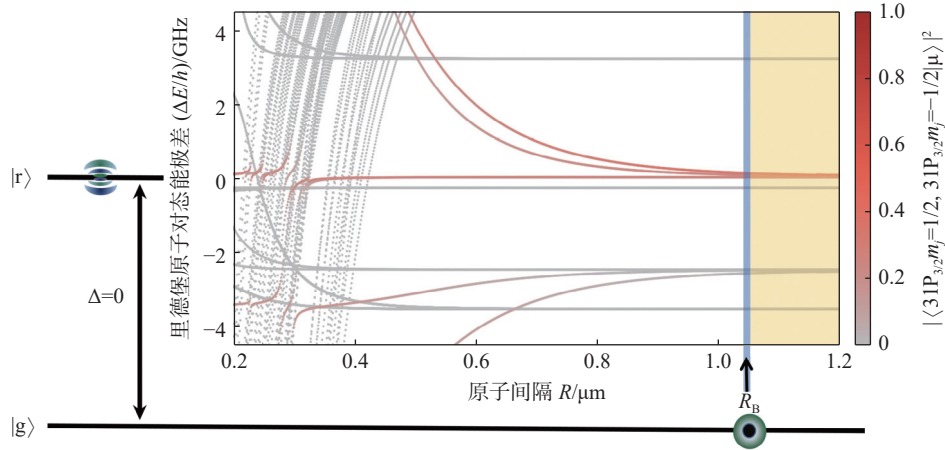


图 2 里德堡原子对 $\{|31P_{3/2}\rangle|31P_{3/2}\rangle\}$ 偶极-偶极相互作用势曲线

Fig. 2 The dipole-dipole interaction potential of the Rydberg pair  $\{|31P_{3/2}\rangle|31P_{3/2}\rangle\}$

与激发场之间的耦合, 其中  $\varphi$  是跃迁的偶极矩,  $\varepsilon$  为激光强度,  $\hbar$  为普朗克常量。共振激光的失谐量为该激光频率与基态和里德堡态能级之间的跃迁频率的差值。此时, 处于  $|r\rangle$  态原子的稳态分布符合共振激光失谐的洛伦兹函数<sup>[32]</sup>

$$\langle \hat{\Delta}_{rr} \rangle = \frac{\Omega^2}{2\Omega^2 + \frac{\Gamma_r}{2\gamma_{rg}}(\gamma_{rg}^2 + \Delta^2)} \quad (4)$$

式中:  $\gamma_{rg} = 1/2\Gamma_r + 2\Gamma_z$ , 表示原子系统的总弛豫率,  $\Gamma_r$  为里德堡原子的自发辐射衰减率,  $\Gamma_z$  为原子相干失相率。在共振激光较强的情况下 ( $\Omega^2 > \Gamma_r\gamma_{rg}$ ), 里德堡态原子稳态分布会达到饱和, 即  $\langle \hat{\Delta}_{rr} \rangle \rightarrow 1/2$ 。对于里德堡原子而言, 当它的能级位移 ( $\delta$ ) 大于里德堡能级的线宽 ( $\omega$ ) 时, 周围原子的激发被限制。可以通过  $\delta(R_B) = \omega$  来定义里德堡原子相互作用引起的阻塞半径<sup>[32]</sup>

$$R_B = \sqrt[n]{\frac{C_n}{\Omega}} \approx \left( \frac{C_n}{2\Omega} \sqrt{\Gamma_r/\gamma_{rg}} \right)^{1/n} \quad (5)$$

式中:  $\Omega = \gamma_{rg} \sqrt{4\Omega^2/\Gamma_{rrg} + 1}$ ;  $C_n$  为里德堡原子间的相互作用系数; 在 van der Waals 相互作用的情况下  $n = 3$ , 在 dipole-dipole 相互作用的情况下  $n = 6$ 。

## 2 结果与讨论

利用外加电场来调谐里德堡原子能级, 如图 3(a) 所示, 拟合结果表明, 外加电场下里德

堡能级的频移和能量差呈现出指数变化规律。当外电场增至 1.2 V/cm 时, 对应的里德堡相邻态之间的能量差  $\Delta E = 0$ , 此时里德堡原子间相互作用会由于能级间的 Förster 共振<sup>[33]</sup> 从 van der Waals 作用调谐至 dipole-dipole 作用。本文还研究了里德堡原子对  $\{|31P_{3/2}\rangle|31P_{3/2}\rangle\}$  在 van der Waals 和 dipole-dipole 2 种相互作用下的阻塞半径与共振激光的拉比频率的关系。如图 3(b) 所示, 共振激光的拉比频率变大意味着里德堡跃迁线宽变大, 阻塞半径会变小。当拉比频率足够大时, 被激发到里德堡态的原子数达到饱和, 此时大部分原子都处于阻塞半径内, 从而有十分明显的阻塞效应。

此外, 不同主量子数的里德堡原子相互作用强度是不同的。当主量子数增加时, 处于高激发态的里德堡原子更容易受到外场的影响, 导致里德堡原子能级的频移增加, 也会限制周围基态原子的激发。因此, 研究了阻塞半径随  $nP_{3/2}$  态里德堡原子 ( $n = 20 \sim 31$ ) 的变化规律, 如图 4(a) 所示。拟合结果表明, 随着主量子数的增加, 阻塞半径呈线性增加趋势。通过比较相同主量子数下的 van der Waals 和 dipole-dipole 相互作用的阻塞区域, 发现 Förster 共振电场下的 dipole-dipole 相互作用导致的阻塞区域更大。这是因为在 Förster 共振电场调谐下, 原子之间的偶极-偶极相互作用会变得更加强烈, 这会限制原子从基态向激发态的跃迁, 从而导致里德堡原子阻塞效应更加强烈。

图 4(b) 所示为  $nP_{3/2} - nS_{1/2}$ ,  $nP_{3/2} - (n+1)D_{5/2}$  以



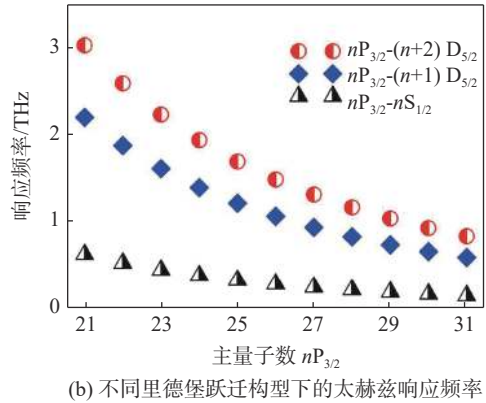
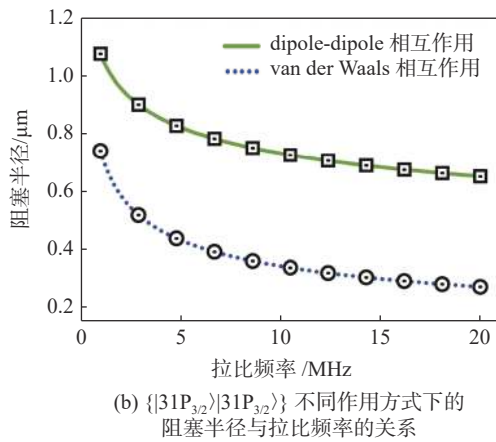
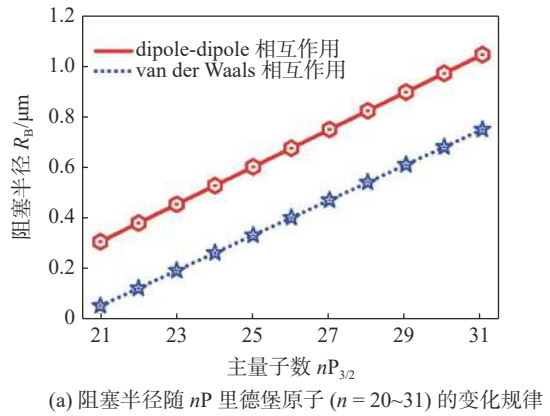
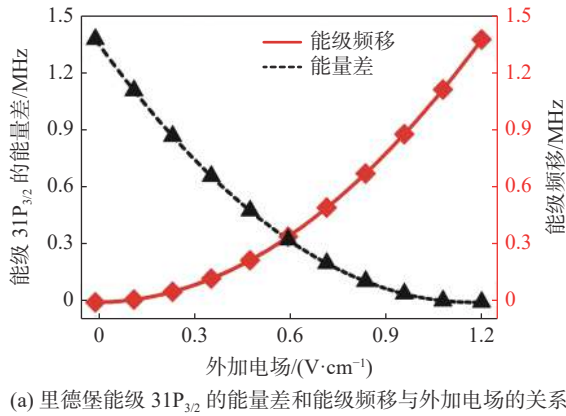


图 3  $31P_{3/2}+31P_{3/2} \rightarrow 31S_{1/2}+32S_{1/2}$  跃迁中能级变化以及里德堡原子对  $\{|31P_{3/2}\rangle|31P_{3/2}\rangle\}$  不同作用方式下阻塞半径与拉比频率的变化规律

Fig. 3 Changes of energy level in the transition  $31P_{3/2}+31P_{3/2} \rightarrow 31S_{1/2}+32S_{1/2}$  and the relationship between the blockade radius and the Rabi frequency for Rydberg pair  $\{|31P_{3/2}\rangle|31P_{3/2}\rangle\}$  under different modes of atomic interaction

图 4 不同主量子数下的里德堡阻塞半径变化趋势和不同跃迁构型下太赫兹响应频率

Fig. 4 Rydberg blockade radius variation trendlines under different principal quantum numbers and the THz response frequencies under different transitional configurations

及  $nP_{3/2}-(n+2)D_{5/2}$  不同里德堡跃迁构型下的太赫兹响应频率。太赫兹探测的高灵敏度和可溯源校准可以通过里德堡量子态探测来解决。随着主量子数的增加,太赫兹响应频率呈非线性下降趋势。特定的里德堡态只能耦合到少数几个接近共振的太赫兹频率,但可以选择不同的里德堡态来耦合不同的频率,实现太赫兹宽频域的探测。从低频到 3 T 对应于主量子数  $n = 20 \sim 31$ ,里德堡原子可以成为太赫兹波段场强和功率测量标准的理想候选者。所以利用外加电场调谐太赫兹里德堡激发态的原子能级,从而增加原子跃迁的阻塞区域的方法可以拓展应用于太赫兹里德堡跃迁中。这在理论上可以提高阻塞区域内产生的单光子的质量,从而提高太赫兹场里德堡原子探测的准确度。

### 3 结论

利用外部直流电场来调谐太赫兹修饰的里德堡能级,将原子间 van der Waals 相互作用转换为 dipole-dipole 相互作用,从而增强了里德堡原子阻塞效应。相关结果显示,dipole-dipole 相互作用引起的相应阻塞区域半径是 van der Waals 相互作用下的 2~3 倍,这对太赫兹里德堡跃迁中单光子制备具有参考价值。此外,这种电场调谐原子相互作用在多体系统、非辐射碰撞过程和物质量子态研究中起着重要作用。

#### 参考文献:

[1] 樊佳蓓,郝丽萍,白景旭,等.基于 Rydberg 原子的高灵敏微波探测与通信[J].物理学报,2021,70(6):7.

- [ 2 ] ANDERSON D A, MILLER S A, RAITHEL G, et al. Optical measurements of strong microwave fields with rydberg atoms in a vapor cell[J]. *Physical Review Applied*, 2016, 5(3): 034003.
- [ 3 ] ZHANG H F, YUAN J P, WANG L R, et al. High-precision three-dimensional Rydberg atom localization in a four-level atomic system[J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(5): 053202.
- [ 4 ] SAFFMAN M. Quantum computing with atomic qubits and Rydberg interactions: progress and challenges[J]. *Journal of Physics B:Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2016, 49(20): 202001.
- [ 5 ] CONG I, LEVINE H, KEESLING A, et al. Hardware-efficient, fault-tolerant quantum computation with rydberg atoms[J]. *Physical Review X*, 2022, 12(2): 021049.
- [ 6 ] 张正源, 张天乙, 刘宗凯, 等. 里德堡原子多体相互作用的研究进展 [J]. *物理学报*, 2020, 69(18): 22.
- [ 7 ] BLUVSTEIN D, OMRAN A, LEVINE H, et al. Controlling quantum many-body dynamics in driven Rydberg atom arrays[J]. *Science*, 2021, 371(6536): 1355 – 1359.
- [ 8 ] JING M Y, HU Y, MA J, et al. Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy[J]. *Nature Physics*, 2020, 16(9): 911 – 915.
- [ 9 ] SEDLACEK J A, SCHWETTMANN A, KÜBLER H, et al. Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances[J]. *Nature Physics*, 2012, 8(11): 819 – 824.
- [10] WADE C G, ŠIBALIĆ N, DE MELO N R, et al. Real-time near-field terahertz imaging with atomic optical fluorescence[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(1): 40 – 43.
- [11] CHEN S Y, REED D J, MACKELLAR A R, et al. Terahertz electrometry via infrared spectroscopy of atomic vapor[J]. *Optica*, 2022, 9(5): 485 – 491.
- [12] WU X L, LIANG X H, TIAN Y Q, et al. A concise review of Rydberg atom based quantum computation and quantum simulation[J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(2): 020305.
- [13] SU S L, LI W B. Dipole-dipole-interaction-driven antiblockade of two Rydberg atoms[J]. *Physical Review A*, 2021, 104(3): 033716.
- [14] URBAN E, JOHNSON T A, HENAGE T, et al. Observation of Rydberg blockade between two atoms[J]. *Nature Physics*, 2009, 5(2): 110 – 114.
- [15] DUMIN Y V. On the effect of interatomic interactions on the efficiency of the rydberg blockade[J]. *Moscow University Physics Bulletin*, 2021, 76(6): 440 – 446.
- [16] PAN L, ZHAI H. Composite spin approach to the blockade effect in Rydberg atom arrays[J]. *Physical Review Research*, 2022, 4(3): L032037.
- [17] BAUR S, TIARKS D, REMPE G, et al. Single-photon switch based on rydberg blockade[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(7): 073901.
- [18] DISTANTE E, PADRÓN-BRITO A, CRISTIANI M, et al. Storage enhanced nonlinearities in a cold atomic rydberg ensemble[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11): 113001.
- [19] SHI S, XU B, ZHANG K, et al. High-fidelity photonic quantum logic gate based on near-optimal Rydberg single-photon source[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4454.
- [20] LI R, LI S R, YU D M, et al. Optimal model for fewer-qubit CNOT gates with rydberg atoms[J]. *Physical Review Applied*, 2022, 17(2): 024014.
- [21] PENG Y, SHI C J, ZHU Y M, et al. Terahertz spectroscopy in biomedical field: a review on signal-to-noise ratio improvement[J]. *PhotonIX*, 2020, 1(1): 12.
- [22] ZHOU Y C, PENG R J, ZHANG J B, et al. Theoretical investigation on the mechanism and law of broadband terahertz wave detection using rydberg quantum state[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(3): 5931808.
- [23] PENG Y, HUANG J L, LUO J, et al. Three-step one-way model in terahertz biomedical detection[J]. *PhotonIX*, 2021, 2(1): 12.
- [24] 陈志文, 余圳跃, 廖开宇, 等. 基于 Rydberg 原子天线的太赫兹测量 [J]. *物理学报*, 2021, 70(6): 1 – 11.
- [25] DUDIN Y O, KUZMICH A. Strongly interacting Rydberg excitations of a cold atomic gas[J]. *Science*, 2012, 336(6083): 887 – 889.
- [26] DAS B C, DAS A, BHATTACHARYYA D, et al. Interplay between electromagnetically induced transparency (EIT), absorption (EIA), and Autler-Townes (AT) splitting in an  $N$ -type atomic system: experiment and theory[J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(3): 994 – 1010.
- [27] OYUN Y, ÇAKIR Ö, SEVINÇLI S. Electromagnetically induced transparency and absorption cross-over with a four-level Rydberg system[J]. *Journal of Physics B:Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2022, 55(14): 145502.
- [28] TRETYAKOV D B, ENTIN V M, YAKSHINA E A, et

- al. Controlling the interactions of a few cold Rb Rydberg atoms by radio-frequency-assisted Förster resonances[J]. *Physical Review A*, 2014, 90(4): 041403.
- [29] CABRAL J S, KONDO J M, GONÇALVES L F, et al. Effects of electric fields on ultracold Rydberg atom interactions[J]. *Journal of Physics B:Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2011, 44(18): 184007.
- [30] SINGER K, STANOJEVIC J, WEIDEMÜLLER M, et al. Long-range interactions between alkali Rydberg atom pairs correlated to the  $ns$ - $ns$ ,  $np$ - $np$  and  $nd$ - $nd$  asymptotes[J]. *Journal of Physics B:Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2005, 38(2): S295 – S307.
- [31] JIAO Y C, BAI J X, SONG R, et al. Electric field tuned dipolar interaction between Rydberg atoms[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 892542.
- [32] PETROSYAN D, HÖNING M, FLEISCHHAUER M. Spatial correlations of Rydberg excitations in optically driven atomic ensembles[J]. *Physical Review A*, 2013, 87(5): 053414.
- [33] VOGT T, VITEAU M, ZHAO J M, et al. Dipole blockade at forster resonances in high resolution laser excitation of Rydberg states of cesium atoms[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(8): 083003.

(编辑: 李晓莉)