

里德堡原子基态拓扑量子信息传输

毕业论文开题报告

答辩人：杨微羽 指导教师：吴金雷

哈尔滨工业大学 (威海) 理学院

2022 年 11 月 4 日

目录

1 课题背景

2 当前进展

3 未来计划

目录

1 课题背景

2 当前进展

3 未来计划

量子信息技术

摩尔定律，量子信息的快速计算、不可监听……总之非常有前景；但目前极不成熟，故很值得研究（两页？）

量子比特与量子逻辑门

查 Nielsen and Chuang

实现量子逻辑门的物理方法

有……多种方法，我研究里德堡中性原子，它的优点有……（查老师毕业论文）

研究里德堡原子系统的一般步骤

写哈密顿量、表象变换化简、大失谐近似求有效哈密顿量、分析系统性质（本来要解薛定谔方程，但可以直接从有效哈密顿量系数中看出我们要的性质）（大致说这几步的目的，绘景变换公式等方法在下节讲）

目录

1 课题背景

2 当前进展

3 未来计划

哈密顿量

目前复现了¹的一部分：两个 Λ 型原子与光场 Raman 相互作用。
单个原子与光场作用的哈密顿量为（以下均忽略系数）

$$H_{\text{novdW},j}^S = \hbar(\omega_g |g\rangle\langle g|_j + \omega_i |r\rangle\langle r|_j + \omega_e |e\rangle\langle e|_j + (\Omega_j |g\rangle\langle r|_j + \Omega_p |e\rangle\langle r|_j + \text{H.c.})) \quad (1)$$

变换到相互作用绘景，得

$$H_{\text{novdW},j}^I = \hbar(e^{i\tau\delta}\Omega_j |g\rangle\langle r|_j + e^{i\tau\Delta}\Omega_p |e\rangle\langle r|_j + \text{H.c.}), \quad (2)$$

$$\delta = \Omega - \omega_r + \omega_g, \quad \Delta = \Omega_p - \omega_r + \omega_e$$

¹LI X X, et al. Coherent ground-state transport of neutral atoms[J/OL]. Physical Review A, 2022, 105: 032417. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.105.032417>. DOI: 10.1103/PhysRevA.105.032417.

哈密顿量

故两个原子的与光场作用的哈密顿量为

$$\begin{aligned}
 H^I &= I_1 \otimes H_2 + H_1 \otimes I_2 \\
 &= \hbar(\Omega_1 e^{it\delta} |gg\rangle\langle rg| + \Omega_1 e^{it\delta} |ge\rangle\langle re| + \Omega_1 e^{it\delta} |gr\rangle\langle rr| \\
 &\quad + \Omega_p e^{it\Delta} |eg\rangle\langle rg| + \Omega_p e^{it\Delta} |ee\rangle\langle re| + \Omega_p e^{it\Delta} |er\rangle\langle rr| \\
 &\quad + \Omega_2 e^{it\delta} |gg\rangle\langle gr| + \Omega_2 e^{it\delta} |eg\rangle\langle er| + \Omega_2 e^{it\delta} |rg\rangle\langle rr| \\
 &\quad + \Omega_p e^{it\Delta} |ge\rangle\langle gr| + \Omega_p e^{it\Delta} |ee\rangle\langle er| + \Omega_p e^{it\Delta} |re\rangle\langle rr| + \text{H.c.}) \quad (3)
 \end{aligned}$$

考虑到 van der Waals 相互作用，并采用旋波近似，经一系列分析，上式可简化为

$$H^{II} = \hbar(\Omega_1 e^{it\delta} |ge\rangle\langle re| + \Omega_p |er\rangle\langle rr| + \Omega_2 e^{it\delta} |eg\rangle\langle er| + \Omega_p |re\rangle\langle rr| + \text{H.c.}) \quad (4)$$

表象变换

将 H^{II} 中的不含时项对角化, 将其本征态 $|\psi_+\rangle, |\psi_0\rangle, |\psi_-\rangle$ 作为新的基, 再进行相互作用绘景变换, 得到最终哈密顿量的形式为

$$H^{\text{III}} = \hbar\Omega \left(|ge\rangle \left(\frac{1}{2} \langle\psi_+| e^{it(\delta-\sqrt{2}\Omega_p)} - \frac{1}{\sqrt{2}} \langle\psi_0| e^{it\delta} + \frac{1}{2} \langle\psi_-| e^{it(\delta+\sqrt{2}\Omega_p)} \right) \right. \\ \left. + |eg\rangle \left(\frac{1}{2} \langle\psi_+| e^{it(\delta-\sqrt{2}\Omega_p)} + \frac{1}{\sqrt{2}} \langle\psi_0| e^{it\delta} + \frac{1}{2} \langle\psi_-| e^{it(\delta+\sqrt{2}\Omega_p)} \right) \right) + \text{H.c.} \quad (5)$$

有效哈密顿量

利用论文²的方法，可得有效哈密顿量为

$$\begin{aligned} H_{\text{eff}} = & \Omega^2 \left(\frac{1}{\delta - \sqrt{2}\Omega_p} \left(-\frac{1}{4} |eg\rangle\langle ge| \right) + \frac{1}{\delta} \left(-\frac{1}{2} |eg\rangle\langle ge| \right) \right. \\ & + \frac{1}{\delta + \sqrt{2}\Omega_p} \left(-\frac{1}{4} |eg\rangle\langle ge| \right) + \text{H.c.} + \frac{1}{\delta - \sqrt{2}\Omega_p} \left(\frac{1}{4} (-|ge\rangle\langle ge| - |eg\rangle\langle eg|) \right) \\ & \left. + \frac{1}{\delta} \left(\frac{1}{2} (-|ge\rangle\langle ge| - |eg\rangle\langle eg|) \right) + \frac{1}{\delta + \sqrt{2}\Omega_p} \left(\frac{1}{4} (-|ge\rangle\langle ge| - |eg\rangle\langle eg|) \right) \right) \quad (6) \end{aligned}$$

其中耦合系数

$$J_{12} = \frac{\Omega^2}{4} \left(\frac{1}{\delta - \sqrt{2}\Omega_p} - \frac{2}{\delta} + \frac{1}{\delta + \sqrt{2}\Omega_p} \right) = \frac{\Omega^2 \Omega_p^2}{\delta^3 - 2\delta \Omega_p^2} \quad (7)$$

这是一个 SWAP 门， J_{12} 反映了量子门的开关速率。

²JAMES D F V, JERKE J. Effective Hamiltonian theory and its applications in quantum information[J]. *Canadian Journal of Physics*, 2007, 85: 625-632.

目录

1 课题背景

2 当前进展

3 未来计划

快速 SWAP 门

在前式中，令 $\delta - \sqrt{2}\omega_g = 0$ ，保留前两项，有望构建具有…、…、…三个能级的系统，而 J_{12} 数量级有望减小（……阶动力学），从而实现更快速的 SWAP 门。

拓扑量子信息传输

将 2 个原子推广成一系列原子，此时有望实现量子态从最左边传到最右边（论文截图）

请各位老师批评指正