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：杨徵羽　指导教师：吴金雷

哈尔滨工业大学 (威海) 理学院

2022 年 11 月 5 日

目录

目录

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

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。

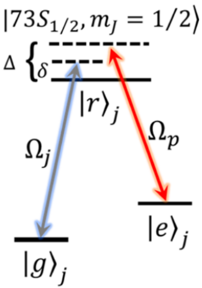

图: 能级示意图（只显示了其中一个原子）

[1]LI 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

在半经典理论中，单个原子与光场作用的哈密顿量为

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

变换到相互作用绘景，得

$$H^{\mathrm{I}}_{\mathrm{novdW},j} = \hbar(\mathrm{e}^{it\delta}\Omega_j |g\rangle\langle r|_j + \mathrm{e}^{it\Delta}\Omega_p |e\rangle\langle r|_j + \mathrm{H.c.}) \tag{2}$$

其中 $\delta = \Omega - \omega_r + \omega_g, \Delta = \Omega_p - \omega_r + \omega_e$ 为失谐量，其量级满足

$$\Delta \gg \delta \sim \Omega_p \gg \Omega_j \tag{3}$$

哈密顿量

故两个原子的与光场作用的哈密顿量为

$$
\begin{aligned}
H^{\mathrm{I}} = I_1 \otimes H_2 + H_1 \otimes I_2 \\
&= \hbar(\Omega_1 \mathrm{e}^{it\delta} |gg\rangle\langle rg| + \Omega_1 \mathrm{e}^{it\delta} |ge\rangle\langle re| + \Omega_1 \mathrm{e}^{it\delta} |gr\rangle\langle rr| \\
&+ \Omega_p \mathrm{e}^{it\Delta} |eg\rangle\langle rg| + \Omega_p \mathrm{e}^{it\Delta} |ee\rangle\langle re| + \Omega_p \mathrm{e}^{it\Delta} |er\rangle\langle rr| \\
&+ \Omega_2 \mathrm{e}^{it\delta} |gg\rangle\langle gr| + \Omega_2 \mathrm{e}^{it\delta} |eg\rangle\langle er| + \Omega_2 \mathrm{e}^{it\delta} |rg\rangle\langle rr| \\
&+ \Omega_p \mathrm{e}^{it\Delta} |ge\rangle\langle gr| + \Omega_p \mathrm{e}^{it\Delta} |ee\rangle\langle er| + \Omega_p \mathrm{e}^{it\Delta} |re\rangle\langle rr| + \mathrm{H.c.}) \qquad (4)
\end{aligned}
$$

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

$$
H^{\mathrm{II}} = \hbar(\Omega_1 \mathrm{e}^{it\delta} |ge\rangle\langle re| + \Omega_p |er\rangle\langle rr| + \Omega_2 \mathrm{e}^{it\delta} |eg\rangle\langle er| + \Omega_p |re\rangle\langle rr| + \mathrm{H.c.}) \quad (5)
$$

表象变换

将 H^{II} 中的不含时项对角化得

$$
\begin{aligned}
E_+ &= \sqrt{2}\hbar\Omega_p, \quad \left|\psi_+\right\rangle = \frac{1}{2}\left|er\right\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}\left|rr\right\rangle + \frac{1}{2}\left|re\right\rangle, \\
E_0 &= 0, \quad \left|\psi_0\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left|er\right\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}\left|re\right\rangle, \\
E_- &= -\sqrt{2}\hbar\Omega_p, \quad \left|\psi_-\right\rangle = \frac{1}{2}\left|er\right\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}\left|rr\right\rangle + \frac{1}{2}\left|re\right\rangle.
\end{aligned} \tag{6}
$$

将其本征态 $\left|\psi_+\right\rangle, \left|\psi_0\right\rangle, \left|\psi_-\right\rangle$ 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

$$
\begin{aligned}
H^{\mathrm{III}} = \hbar\Omega\Bigg(&\left|ge\right\rangle \left(\frac{1}{2}\left\langle\psi_+\right| e^{it(\delta-\sqrt{2}\Omega_p)} - \frac{1}{\sqrt{2}}\left\langle\psi_0\right| e^{it\delta} + \frac{1}{2}\left\langle\psi_-\right| e^{it(\delta+\sqrt{2}\Omega_p)} \right) \\
&+ \left|eg\right\rangle \left(\frac{1}{2}\left\langle\psi_+\right| e^{it(\delta-\sqrt{2}\Omega_p)} + \frac{1}{\sqrt{2}}\left\langle\psi_0\right| e^{it\delta} + \frac{1}{2}\left\langle\psi_-\right| e^{it(\delta+\sqrt{2}\Omega_p)} \right) \Bigg) + \mathrm{H.c.}
\end{aligned} \tag{7}
$$

有效哈密顿量

利用论文[2]的方法，可得有效哈密顿量为

$$
\begin{aligned}
H_{\text{eff}} = \hbar\Omega^2 \Bigg(& \frac{1}{\delta - \sqrt{2}\Omega_p} \left(-\frac{1}{4} |eg\rangle\langle ge| \right) + \frac{1}{\delta} \left(-\frac{1}{2} |eg\rangle\langle ge| \right) \\
& + \frac{1}{\delta + \sqrt{2}\Omega_p} \left(-\frac{1}{4} |eg\rangle\langle ge| \right) + \text{H.c.} + \frac{1}{\delta - \sqrt{2}\Omega_p} \left(\frac{1}{4} (- |ge\rangle\langle ge| - |eg\rangle\langle eg|) \right) \\
& + \frac{1}{\delta} \left(\frac{1}{2} (- |ge\rangle\langle ge| - |eg\rangle\langle eg|) \right) + \frac{1}{\delta + \sqrt{2}\Omega_p} \left(\frac{1}{4} (- |ge\rangle\langle ge| - |eg\rangle\langle eg|) \right) \Bigg)
\end{aligned} \tag{8}
$$

其中耦合系数（$|eg\rangle\langle ge|$ 项的系数）为

$$
J_{12} = \frac{\Omega^2}{4} \left(\frac{1}{\delta - \sqrt{2}\Omega_p} - \frac{2}{\delta} + \frac{1}{\delta + \sqrt{2}\Omega_p} \right) = \frac{\Omega^2 \Omega_p^2}{\delta^3 - 2\delta\Omega_p^2} \tag{9}
$$

这是一个 SWAP 门，J_{12} 反映了量子门的开关速率。

[2] JAMES 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

快速 SWAP 门

在前式中，令 delta-sqrt2omegap=0，保留前两项，有望构建具有⋯、⋯、⋯三个能级的系统，而 J12 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