

# 费米超流气体在么正极限区域的非线性 Ramsey 干涉\*

蒙红娟 苟学强 王文元 杨阳 马莹 马云云 段文山<sup>†</sup>

(西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃省原子分子物理与功能材料重点实验室, 兰州 730070)

(2012年1月15日收到; 2012年3月22日收到修改稿)

该文分别研究了在三种极限情况下费米超流气体在么正极限区域的非线性 Ramsey 干涉图样的频率与系统参数之间的关系, 研究发现费米子间的相互作用以及双势阱间最低能量差对干涉图样的角频率有显著的影响. 通过数值模拟和理论分析, 得到了干涉图样的角频率和系统参数之间的关系, 发现数值和解析结果符合得很好.

**关键词:** 费米超流气体, 非线性 Ramsey 干涉

**PACS:** 73.40.Gk, 03.65.-w, 03.75.Lm

## 1 引言

激光冷却与囚禁技术的发展为我们研究稀薄原子气体的超低温冷却与量子简并行为提供了强有力的工具. 自从玻色-爱因斯坦凝聚 (BEC) 实现<sup>[1]</sup>以后, 人们在实验和理论上对玻色气体<sup>[2-8]</sup>进行了许多深入而有意义的研究. 基于 Feshbach 共振技术, 我们可以使费米子通过配对形成具有单自旋类玻色子性质的库伯对, 从而克服了泡里不相容原理的限制, 使得费米凝聚得以实现, 同时激发了人们对费米气体<sup>[9-14]</sup>研究的极大兴趣.

双势阱模型被广泛地用于研究超冷原子的各种动力学性质, 由于原子间相互作用的存在, 系统会出现许多非常有意义的现象, 如非线性稳态的存在<sup>[15]</sup>, 非线性 Josephson 振荡和自俘获现象<sup>[16,17]</sup>, 强耦合周期驱动<sup>[18]</sup>, 以及两阱间的朗道齐纳隧穿现象<sup>[19]</sup>等. Ramsey 干涉现象最早由 Ramsey 提出, 它是利用不同振荡脉冲的原子干涉量度分析方法<sup>[20]</sup>, 该技术为当前的标准时间计量提供了基础<sup>[21]</sup>. Ramsey 干涉是超冷原子具有

的一个有趣的量子现象, 在研究超冷原子系统中我们用两个 Rosen-Zener 脉冲作用于表征两个势阱间耦合强度的系数, 然后看看干涉对隧穿的影响. 对于 BEC 的非线性 Ramsey 干涉现象, 科技工作者已经进行了相关的研究<sup>[22,23]</sup>, 本文重点研究费米超流气体在么正极限区域的非线性 Ramsey 干涉现象. 这里所说的么正极限区域是指费米子间的散射长度趋于无穷大时的极限情况.

本文以 Rosen-Zener 隧穿和非线性 Ramsey 干涉理论为基础, 在平均场近似下, 首先从超流费米气体的基本理论出发, 通过引入表征费米子间的相互作用的高阶非线性项, 介绍了费米超流气体在么正极限区域中所满足的基本动力学方程. 然后通过对于干涉图样的分析, 发现了相互作用参数对干涉图样的影响, 可以发现高阶非线性参数对干涉图样的频率有显著的影响. 最后我们分别在三种极限情况下研究了非线性参数对干涉图样角频率的影响. 分别给出了非线性与干涉图样角频率的关系. 同时我们理论推导了干涉角频率的解析表达式, 发现数值模拟和解析结果符合得很好.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10725521, 91021021, 10875098)、国家基础研究计划项目 (批准号: 2007CB814800, 2011CB921503) 和西北师范大学自然科学基金 (批准号: NWNNU-KJXGC-03-48) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: duanws@nwnu.edu.cn

## 2 模型

以平均场理论为基础, 通过两模近似处理 [24,25], 费米超流气体在么正极限区域的动力学方程满足如下动力学方程组 [26-28]:

$$i\dot{\psi}_1 = \frac{\gamma}{2}\psi_1 + (c_0N_1^{2/3} + c_1N_1^{1/3})\psi_1 - k\psi_2, \quad (1)$$

$$i\dot{\psi}_2 = -\frac{\gamma}{2}\psi_2 + (c_0N_2^{2/3} + c_1N_2^{1/3})\psi_2 - k\psi_1. \quad (2)$$

其中,  $\gamma$  是两阱间的能级差,  $k$  是两阱间的耦合系数.  $c_0$  是原子间非线性参数 [22,29],  $c_1$  是原子间的高阶非线性参数项 [16].

令  $\psi_{1,2} = \sqrt{N_{1,2}}e^{i\theta_{1,2}}$ , 并引入布局数差  $s = (N_2 - N_1)/N$ , 和相对相位  $\theta = \theta_2 - \theta_1$ . 得到系统的经典形式哈密顿量为

$$H = \gamma s + \frac{3e_0}{5}[(1+s)^{5/3} + (1-s)^{5/3}] + \frac{3e_1}{4}[(1+s)^{4/3} + (1-s)^{4/3}] - 2k\sqrt{1-s^2}\cos\theta \quad (3)$$

式中,  $e_0 = (N/2)^{2/3}c_0$ ,  $e_1 = (N/2)^{1/3}c_1$ ,  $s, \theta$  是经典哈密顿系统的一对正则变量, 满足

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \theta}, \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial H}{\partial s}.$$

因此我们可以得到布局数差  $s$  和相对相位  $\theta$  满足如下方程组:

$$\frac{ds}{dt} = -2k\sqrt{1-s^2}\sin\theta, \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \gamma + e_0[(1+s)^{2/3} - (1-s)^{2/3}] + e_1[(1+s)^{1/3} - (1-s)^{1/3}] + \frac{2ks}{\sqrt{1-s^2}}\cos\theta. \quad (5)$$

## 3 计算结果及其分析

本文我们将研究费米超流系统在么正极限区域的非线性 Ramsey 干涉现象, Ramsey 干涉描述了一个非线性系统在两个 Rosen-Zener 脉冲的作用下, 费米超流气体的干涉现象, 在本文的研究中, 我们给表征两个势阱间耦合的相互作用参数  $k$  加上两个类似 Rosen-Zener 隧穿的脉冲调制, 来构成非线性 Ramsey 干涉计, 其中第一个 Rosen-Zener 脉冲用来制备干涉源, 第二个 Rosen-Zener 脉冲用来实现干涉. 势阱间耦合作用参数  $k$  的具体形式由下列

形式给出:

$$k(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ k_0 \sin^2\left(\frac{\pi t}{T}\right), & t \in [0, T], \\ 0, & t \in [T, T + \tau], \\ k_0 \sin^2\left[\frac{\pi(t - T - \tau)}{T}\right], & t \in [T + \tau, 2T + \tau], \\ 0, & t > 2T + \tau, \end{cases} \quad (6)$$

式中  $k_0$  为最大耦合强度 (为了方便计算, 本文一律取为 1),  $T$  表示完成一个 Rosen-Zener 脉冲所用的时间,  $\tau$  是个可调的参数, 它将两个 Rosen-Zener 脉冲分开. 本文从描述粒子间相互作用的化学势出发, 引入高阶非线性项, 重点研究高阶非线性项对干涉的影响. 我们假设开始演化的时候, 粒子全部制备在其中的一个阱中, 我们定义隧穿率为两个脉冲结束后, 在另一个阱中的粒子数演化的概率  $|\psi_2|^2$ . 通过反复调节两个脉冲之间的独立演化时间间隔  $\tau$ , 测量记录不同隧穿率就可以在时间域上得到 Ramsey 干涉图样.

### 3.1 数值模拟和分析

这一小节里我们研究费米超流气体的非线性 Ramsey 干涉的一些基本规律. 图 1 给出了非线性相互作用参数一定的时候, 不同扫描周期对 Ramsey 干涉图样的影响. 其中图 1(a), (b), (c) 是没有考虑高阶非线性相互作用时的情况, 我们可以看出, 不同的扫描周期对干涉有显著的影响, 在扫描周期很小的时候 (图 1(a)  $T = 0.5$ ), 隧穿率随两个脉冲的间隔  $\tau$  的演化表现出了类似正余弦变化规律. 随着扫描周期的增加, 隧穿率随两个脉冲的间隔  $\tau$  的演化图样变得更加丰富, 但还是表现出了多周期的三角函数型振荡 (如图 1(b)  $T = 20$ ). 继续增加扫描周期, 隧穿率随两个脉冲的间隔  $\tau$  的演化图样变得比较有规则, 表现出了类矩形振荡 (如图 1(c)  $T = 1500$ ), 这说明了在周期很大的时候, 粒子数布局将在两个势阱间振荡, 在某些  $\tau$  的区域, 粒子数全部在第一个势阱中, 而在其他  $\tau$  的区域, 粒子数将全部演化在第二个势阱中. 通过以上的分析, 我们可以通过控制周期来操纵双势阱中费米子的隧穿规律.

考虑高阶非线性相互作用的影响, 我们发现隧穿率随两个脉冲的间隔  $\tau$  的演化表现出了一些更有趣的图样, 如图 1(a'),(b'),(c'), 我们给出了对应于图 1(a), (b), (c) 参数下, 高阶相互作用对隧穿的影响. 在扫描周期很小的时候 (图 1(a')), 隧穿率随  $\tau$  的演化依然表现出了类余弦变化规律. 只是高阶项的存在, 使其振荡周期变小. 图 1(b') 中仍然表现出了多周期的三角函数型振荡, 但振荡图样发生了变化. 扫描周期很大的时候 (如图 1(c')), 隧穿率随两个脉冲的间隔  $\tau$  的演化图样变得比较复杂, 但仍然表现出了周期性. 通过以上分析, 我们可以得出结论, 高阶非线性相互作用使得隧穿率随  $\tau$  的演化更具有敏感性.

上面分析了相互作用参数一定时, 不同的脉冲周期下, 隧穿率随两个脉冲的间隔  $\tau$  的演化. 接下来我们研究相互作用参数对于干涉图样的影响, 我们选择周期  $T = 20$ , 图 2(a), (b), (c) 分别给出了不同非线性相互作用参数下, 隧穿率随两个脉冲的间隔  $\tau$  的演化. 不同扫描周期对 Ramsey 干涉图样的影响. 可以发现, 不同的相互作用参数下, 其振荡规律仍然表现为多周期的三角函数型振荡, 随着相互作用参数的增加, 其振荡周期变小. 图 2(a'), (b'), (c') 对应于图 2(a), (b), (c) 分别给出了的参数取值, 分别给出了高阶非线性相互作用参数存在时, 隧穿率随两个脉冲的间隔  $\tau$  的演化. 可以看出高阶项的存在使得扫描图样发生了一定的变化.

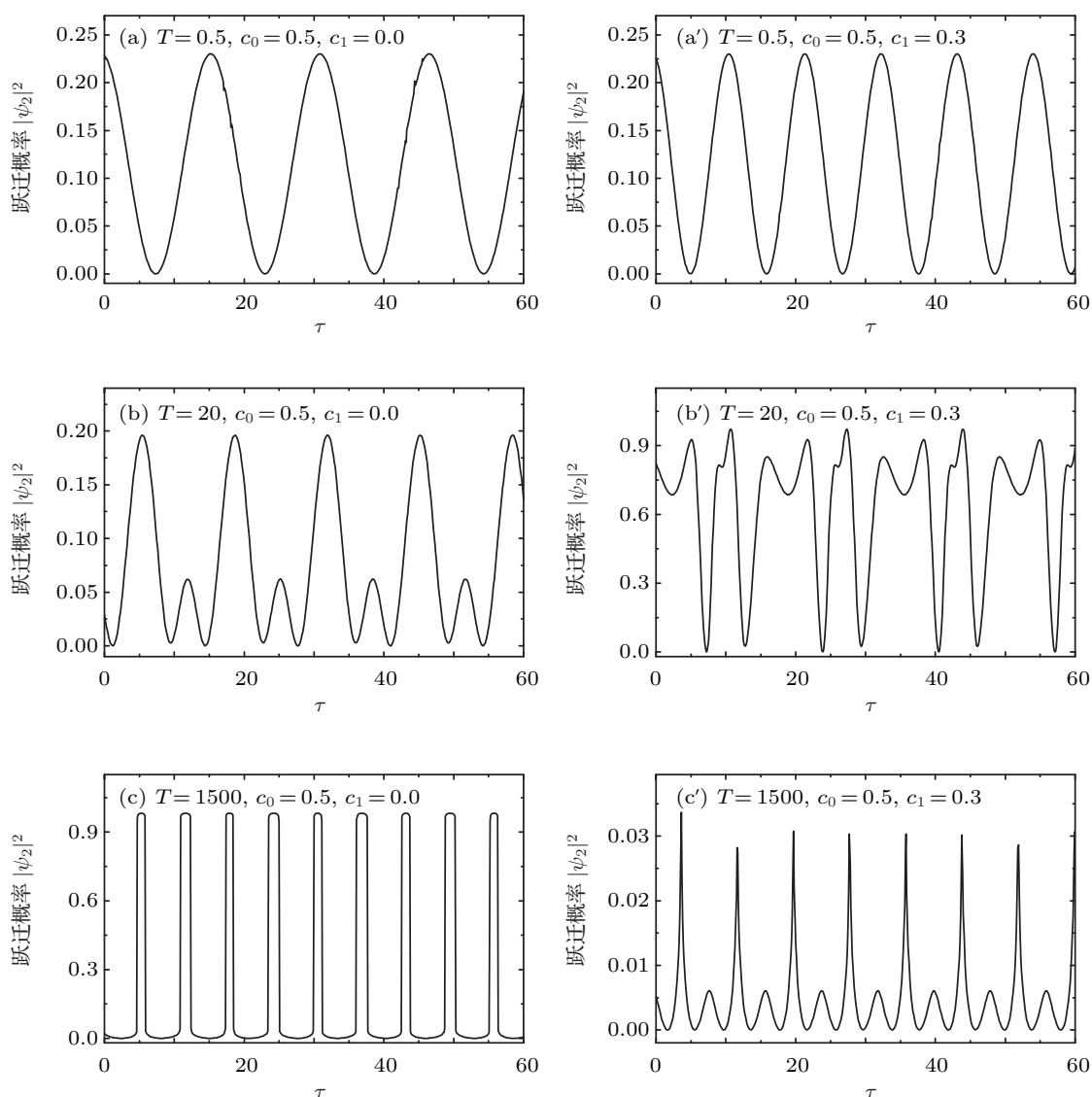


图 1 不同扫描周期时的 Ramsey 干涉图样

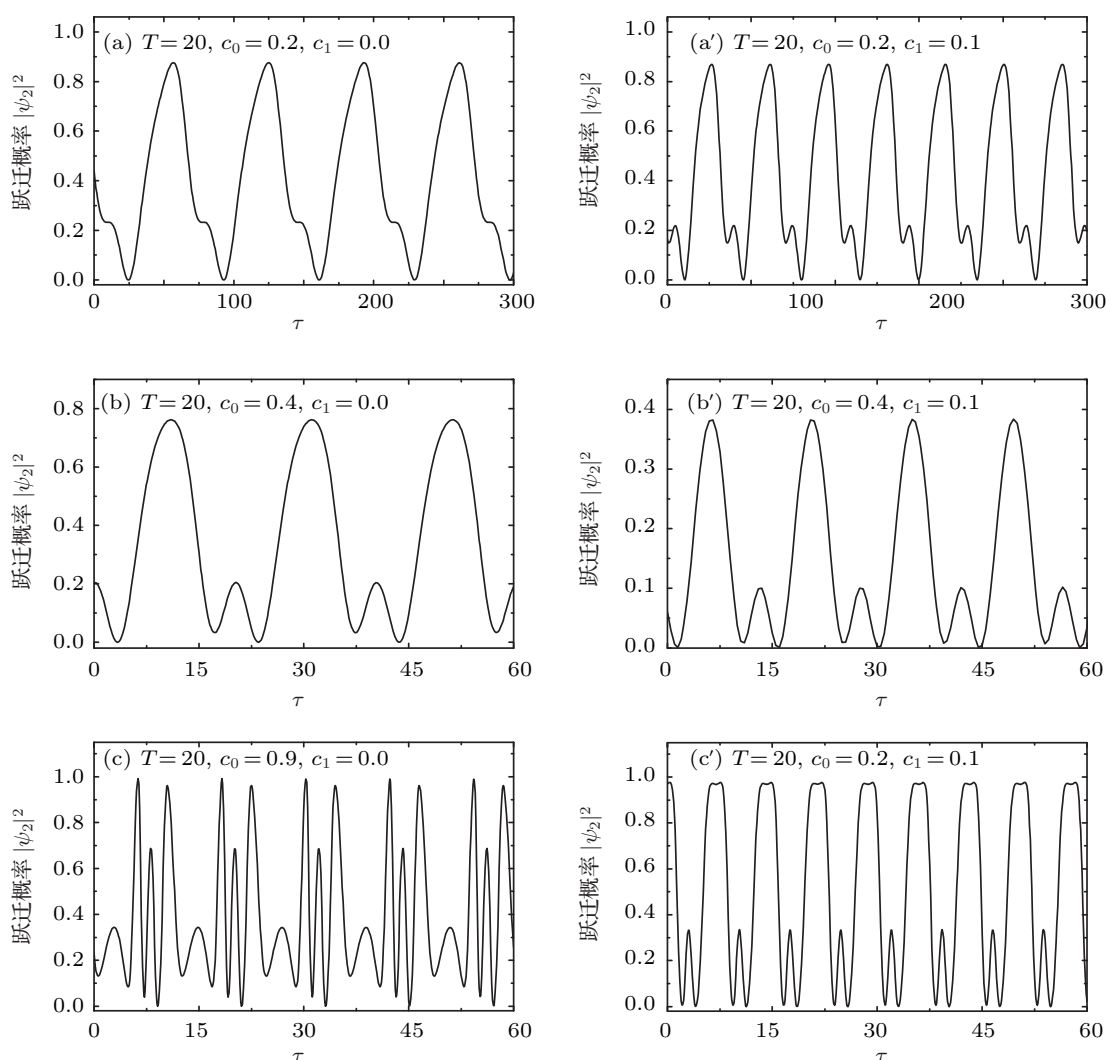


图2 不同非线性参数的 Ramsey 干涉图样

从以上的分析我们可以看出, 非线性相互作用参数  $c_0, c_1$  以及 Rosen-Zener 脉冲的周期  $T$  对隧穿的频率有显著的影响, 所以下面一部分我们重点分三种极限情况来讨论它们之间的关系.

### 3.2 干涉图样频率分析及其解析结果

通过对以上干涉图样的分析, 我们发现在时间域上的 Rosen-Zener 脉冲的周期对干涉图样的演化起到了非常重要的影响. 因此在下面的这一小部分里, 我们还是分三种情况分别讨论非线性相互作用对 Ramsey 干涉图样的频率的影响.

#### 3.2.1 快速扫描的极限

首先我们在快速扫描的极限下讨论. 我们这里所说的快速扫描极限是指时间域上 Rosen-Zener 脉

冲的周期足够小 ( $T \ll 2\pi/k_0$ ), 这样就能保证扫描过程快速发生.

图 3 (a) 给出了在快速扫描极限下, Ramsey 干涉图样的角频率  $\omega$  与非线性参数  $c_0$  之间的关系, 从图可以看出, 随着非线性参数  $c_0$  的增大, Ramsey 干涉的角频率也增大, 而且它们之间也符合一定的线性关系, 这一线性关系在接下来的讨论中会给出. 为了研究高阶非线性项  $c_1$  的存在对 Ramsey 干涉角频率的影响, 我们分别在图中取不同的三组  $c_1$  作了比较, 我们发现其存在能够影响其角频率的变化, 具体表现为随着高阶非线性参数  $c_1$  的增加, Ramsey 干涉的角频率也增加.

图 3 (b) 给出了在快速扫描极限下, Ramsey 干涉图样的角频率  $\omega$  与两个势阱间的最低能量差  $\gamma$  之间的关系, 从图中我们可以看出, 通过调节两个

势阱间的高度, 可以影响 Ramsey 干涉. 一个有趣的现象是角频率零点的出现, 这意味着粒子数布局在这一点将不再振荡. 我们发现高阶非线性相互作用的增加, 使得该零点数值有所减小, 在该零点的左边, 高阶非线性项的增加, 能够使干涉频率减小, 而在该零点的右边, 高阶非线性项的增加, 能够使干涉频率增大.

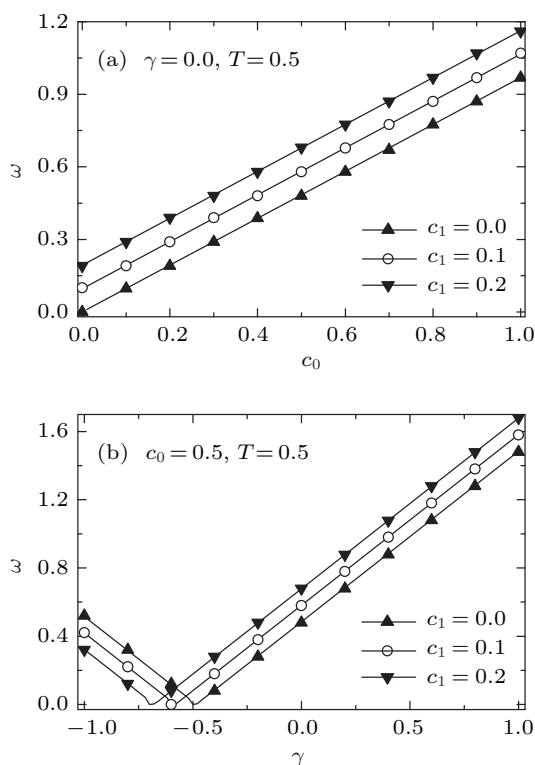


图3 Ramsey 干涉图样的角频率  $\omega$  分别与 (a) 非线性参数  $c_0$ , (b) 两个势阱间的最低能量差  $\gamma$  之间的关系

接下来我们通过一定的数学过程, 推导出角频率与这些非线性参数之间的解析表达. 和上面的数值计算过程一样, 我们还是讨论一种简单的情况, 并对波函数做如下变换:

$$\psi_1 = \psi'_1 \exp \left\{ -i \int_0^t \left[ -\frac{\gamma}{2} + c_0(|\psi_1|^2)^{2/3} + c_1(|\psi_1|^2)^{1/3} \right] dt \right\}, \quad (7)$$

$$\psi_2 = \psi'_2 \exp \left\{ -i \int_0^t \left[ -\frac{\gamma}{2} + c_0(|\psi_2|^2)^{2/3} + c_1(|\psi_2|^2)^{1/3} \right] dt \right\}. \quad (8)$$

则方程 (1) 和 (2) 式可以写成以下形式

$$i\psi'_1 = \frac{\gamma}{2}\psi'_1 - k\psi'_2, \quad (9)$$

$$i\psi'_2 = -\frac{\gamma}{2}\psi'_2 - k\psi'_1. \quad (10)$$

这样我们消去哈密顿量主对角线上的矩阵元, 其中  $\psi_2$  的一阶近似可以通过令方程右边中的  $\psi'_1 = 1, \psi'_2 = 0$  得到, 于是得到

$$\psi'_2(t) = \frac{k_0}{2} \int_0^t \sin^2 \frac{\pi t}{T} e^{-i(\gamma+c_0+c_1)t} dt. \quad (11)$$

再令积分上限为  $T$  得隧穿率

$$|\psi_2(t)|^2 = \frac{2\pi^4 k_0^2 \{1 - \cos[(\gamma + c_0 + c_1)T]\}}{(\gamma + c_0 + c_1)^2 [4\pi^2 - (\gamma + c_0 + c_1)^2 T^2]^2}. \quad (12)$$

为了简便这里引入相对相位差  $\phi(\tau)$  来描述两个脉冲在中间无耦合时间间隔里累计的相位. 因为这两个脉冲在这段时间间隔里独立演化, 所以从方程 (1), (2) 可得  $\phi(\tau) = |\gamma + (c_0 + c_1)s|\tau$ , 其中,  $s = |\psi_2(T)|^2 - |\psi_1(T)|^2$  表示第一个脉冲结束后两个阱中的粒子数布局之差. 这个相对相位差正比于时间间隔  $\tau$ , 很明显 Ramsey 干涉图样的角频率可以由下面的式子表示:

$$\omega = |\gamma + (c_0 + c_1)s|. \quad (13)$$

通过对上面这个表达式的分析, 我们可以看出, Ramsey 干涉的角频率完全依赖于参数  $c_0, c_1, \gamma$ , 以及布局数差  $s$ . 我们将上面的表达式 (12) 通过布局数的关系代入 (13) 式可得到在快速扫描极限下的 Ramsey 干涉的角频率:

$$\omega = \left| \frac{4(c_0 + c_1)k_0^2 \pi^4 [1 - \cos((\gamma + c_0 + c_1)T)]}{(\gamma + c_0 + c_1)^2 [4\pi^2 - ((\gamma + c_0 + c_1)T)^2]^2} - (\gamma + c_0 + c_1) \right|. \quad (14)$$

图中点为数值结果, 线为解析结果. 我们用得到的解析结果和数值模拟结果进行了比较, 发现两者符合得很好.

### 3.2.2 绝热极限

这一小节我们研究绝热极限下 Ramsey 干涉图样的角频率  $\omega$  分别与非线性参数  $c_0$  和两个势阱间的最低能量差  $\gamma$  之间的关系. 我们这里所说的绝热极限是指周期很大, 导致扫描很缓慢的进行的情况. 为保证扫描周期足够长我们在计算中取  $T = 1500$ , 同样我们研究干涉图样的角频率随非线性参数的变化关系.

图 4(a) 给出对于不同的高阶非线性参数  $c_1$ , Ramsey 干涉图样的频率随非线性参数  $c_0$  的变化关系. 可以发现在绝热极限和快扫描极限得到的

结果非常类似,从图中可以看出,非线性参数  $c_0$  与 Ramsey 干涉图样的角频率  $\omega$  也存在某种线性关系,高阶非线性项的增大,使得干涉频率也增大.图 4(b) 给出了在绝热极限下, Ramsey 干涉图样的角频率  $\omega$  与两个势阱间的最低能量差  $\gamma$  之间的关系,它们的关系与快速扫描极限的情况类似,我们不再赘述.

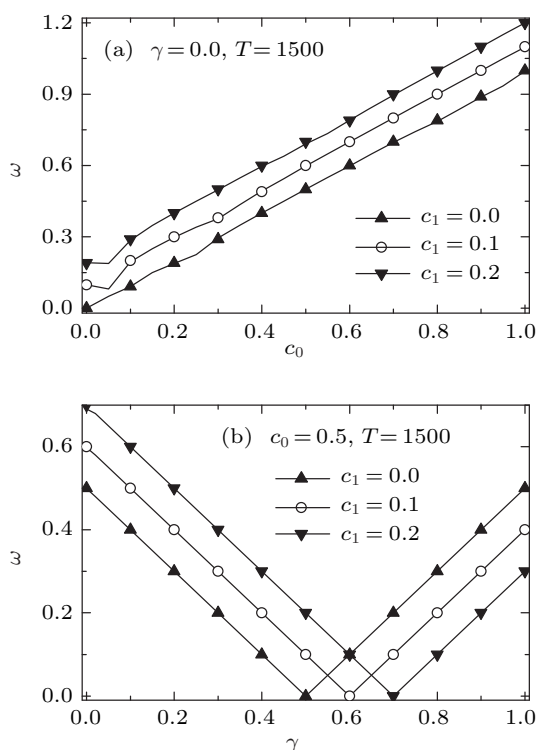


图 4 绝热极限下 Ramsey 干涉图样的角频率  $\omega$  分别与 (a) 非线性参数  $c_0$ , (b) 两个势阱间的最低能量差  $\gamma$  之间的关系

图 4 中,点为我们的数值结果,线为我们根据  $\omega = |\gamma + (c_0 + c_1)s|$  给出的解析结果,它们同样符合的很好的.

### 3.2.3 一般情况

前面我们研究了两种极限情况下 Ramsey 干涉图样的变化关系,这一小节接着讨论一般情况,我们取扫描的脉冲的周期  $T = 20$ . 在这种情况下, Ramsey 干涉图样的角频率  $\omega$  随非线性参数的变化关系明显不同于两种极限情况,如图 5. 图中我们分别给出了 Ramsey 干涉图样的角频率  $\omega$  与非线性参数  $c_0$  和两个势阱间的最低能量差  $\gamma$  之间的数值模拟与理论预测 ( $|\gamma + (c_0 + c_1)s|$ ) 的结果,比较显示出它们具有很好的一致性.

通过图 5 (a) 我们发现,随着非线性参数  $c_0$  的增大, Ramsey 干涉的角频率表现出了一定的振荡.

因此在一般情况下,我们可以调节  $c_0$ , 来影响干涉后两个势阱中的粒子数布局. 图中我们分别给  $c_1$  取了三组不同的值,比较的研究了高阶非线性项  $c_1$  的存在对 Ramsey 干涉角频率的影响,研究发现高阶非线性项的存在对干涉图样的角频率有一定的影响 (如图 5(a)).

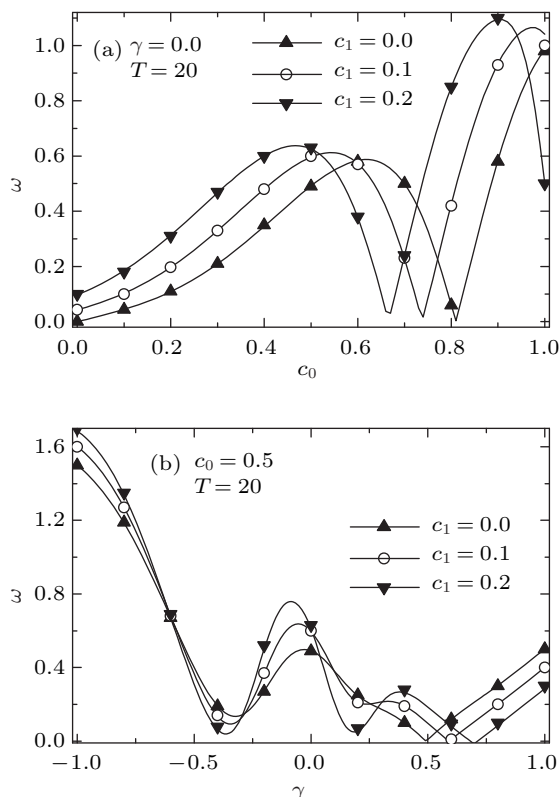


图 5 一般情况 Ramsey 干涉图样的角频率  $\omega$  分别与 (a) 非线性参数  $c_0$ , (b) 两个势阱间的最低能量差  $\gamma$  之间的关系

图 5 (b) 给出的 Ramsey 干涉图样的角频率  $\omega$  与两个势阱间的最低能量差  $\gamma$  之间的关系. 从图中我们可以看出,当  $\gamma$  比较小的时候,两个势阱间的最低能量差  $\gamma$  和干涉角频率之间表现出了一定的线性关系. 随着  $\gamma$  的增加,这一线性关系遭到破坏,以至于出现了不规则的振荡.

## 4 结论

本文研究了双势阱中的费米超流气体在么正极限区域的 Ramsey 干涉现象. 利用两个 Rosen-Zener 脉冲,构成了 Ramsey 干涉计. 然后分三种极限情况分别讨论了系统可调参数对 Ramsey 干涉图样的角频率的影响. 因为以上参数在实验上是可以调制实现的. 因此我们希望本文的理论研究结果可以对实验物理有所帮助.

- [1] Anderson M H, Ensher J R, Matthews M R, Wieman C E, Cornell E A 1995 *Science* **269** 198
- [2] Ma Y, Fu L B, Yang Z A, Liu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5623 (in Chinese) [马云, 傅立斌, 杨志安, 刘杰 2006 物理学报 **55** 5623]
- [3] Liu W M, Fan W B, Zheng W M, Liang J Q, Chui S T 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 170408
- [4] Wen W, Shen S Q, Huang G X 2010 *Phys. Rev. B* **81** 014528
- [5] Fang Y C, Yang Z A, Yang L Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 0661 (in Chinese) [房永翠, 杨志安, 杨丽云 2008 物理学报 **57** 0661]
- [6] Sun Q, Hu X H, Liu W M, Xie X C, Ji A C 2011 *Phys. Rev. A* **84** 023822
- [7] Zang X F, Li J P, Tan L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4348 (in Chinese) [臧小飞, 李菊萍, 谭磊 2007 物理学报 **56** 4348]
- [8] Wang G F, Fu L B, Liu J 2006 *Phys. Rev. A* **73** 13619
- [9] Wen W, Huang G X 2009 *Phys. Rev. A* **79** 023605
- [10] Xiong H W, Lin S J, Zhang W P, Zhan M S 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 120401
- [11] Men F D, Lin H, Zhu H Y 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3236
- [12] Qin F, Chen J S 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2654
- [13] Men F D, Liu H, Fan Z L, Zhu H Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2649
- [14] Huang Z F, Ou C J, Chen J C 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1380
- [15] Wu B, Liu J 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 020405
- [16] Wang W Y, Duan W S, Sun J A, Yang Y 2011 *Eur. Phys. J. B* **84** 283
- [17] Wang G F, Fu L B, Zhao H, Liu J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5003 (in Chinese) [王冠芳, 傅立斌, 赵鸿, 刘杰 2005 物理学报 **54** 5003]
- [18] Wu Y, Yang X X 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 013601
- [19] Liu J, Fu L B, Ou B Y, Chen S G, Wu B, Niu Q 2002 *Phys. Rev. A* **66** 023404
- [20] Ramsey N F 1950 *Phys. Rev.* **78** 695
- [21] Seidel D, and Muga J G 2007 *Phys. Rev. A* **75** 023811
- [22] Li S C, Fu L B, Duan W S, Liu J 2008 *Phys. Rev. A* **78** 063621
- [23] Li S C 2010 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **43** 205303
- [24] Wang G F, Ye D F, Fu L B, Chen X Z, Liu J 2006 *Phys. Rev. A* **74** 033414
- [25] Fu L B, Liu J 2006 *Phys. Rev. A* **73** 063614
- [26] Adhikari S K, Salasnich L 2008 *Phys. Rev. A* **77** 033618
- [27] Ancilotto F, Salasnich L, Toigo F 2009 *Phys. Rev. A* **79** 033627
- [28] Meng H J, Yang Y, Wang W Y, Qi P T, Ma Y Y, Ma Y, Wang S J, Duan W S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 060303 (in Chinese) [蒙红娟, 杨阳, 王文元, 祁鹏堂, 马云云, 马莹, 王善进, 段文山 2012 物理学报 **61** 060303]
- [29] Wu B, Niu Q 2000 *Phys. Rev. A* **61** 023402

# Nonlinear Ramsey interference of Fermi superfluid gases in unitarity regime\*

Meng Hong-Juan Gou Xue-Qiang Wang Wen-Yuan Yang Yang  
Ma Ying Ma Yun-Yun Duan Wen-Shan<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Atomic and Molecular Physics & Functional Materials of Gansu Province, College of Physics and Electronic Engineering,  
Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

(Received 15 January 2012; revised manuscript received 22 March 2012)

## Abstract

We investigate the relationships between the nonlinear Ramsey interference pattern of the angular frequency and system parameters of fermi superfluid gas in unitarity regime in three limited cases. We find that the interaction between fermions and the difference in energy between double-well potentials have a significant influence on the angular frequency of the interference pattern. Through numerical simulation and theoretical analysis, the relationship between angular frequency of the interference pattern and the system parameters is given, and the numerical simulations and theoretical analyses are in good agreement.

**Keywords:** Fermi superfluid gases, nonlinear Ramsey interference

**PACS:** 73.40.Gk, 03.65.-w, 03.75.Lm

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos 10725521, 91021021, 10875098), the National Fundamental Research Program of China (Grant Nos. 2007CB814800, 2011CB921503), and the Natural Science Foundation of Northwest Normal University (Grant No. NWNNU-KJCXGC-03-48).

<sup>†</sup> E-mail: duanws@nwnu.edu.cn