

激光对磁振子压缩态的作用

冯 澎 白 浩

北京科技大学物理系, 北京 100083

摘要 压缩态的量子起伏低于相干态相应的量子起伏. 同声子和光子比较, 自旋波的元激发——磁振子, 也属于玻色子; 在粒子数表象中, 磁振子的哈密顿量在形式上与光子和声子的哈密顿量相似, 因而磁振子的压缩态是可能存在的. 通过测量在激光场下自旋分量的量子涨落, 可以获得材料的性能参数.

关键词 压缩态; 相干态; 磁振子; 自旋波
分类号 O 482.52

现代技术已使物理测量和通信的精度接近标准量子极限的水平. 在处理一个量子体系时, 描写体系的正交分量存在无规真空涨落. 即使采用有效方法去掉测量过程中的所有误差源的影响, 量子噪声依然存在于各种形式的辐射之中, 这种量子噪声来源于量子力学本征统计性质. 由于量子噪声的存在从根本上限制了物理测量和通信精度的进一步提高. 因此, 减少甚至完全抑制量子噪声已经成为理论和实验物理学家十分关心和感兴趣的研究课题. 当场算符某一分量的量子起伏低于相干态相应分量起伏时, 就达到了压缩态. 这样, 原则上允许我们进行灵敏度突破标准量子极限的亚噪声测量^[1-7]. 如果用一束激光照射在反铁磁体上, 通过调节激光的参数(频率), 来调制自旋波的量子涨落, 并且有可能观察到预期的关于磁振子压缩态的性质.

1 光场与自旋波作用形式

外场作用下反铁磁自旋波哈密顿量为^[8-10]:

$$H(t) = E_0 + \sum_k [\hbar\omega_a a_k^\dagger a_k + \hbar\omega_b b_k^\dagger b_k] + \sum_k C_k(t) (a_k b_k + a_k^\dagger b_k^\dagger) \quad (1)$$

其中, $\hbar\omega_a = 2ZS|J| + g\mu_B(B_A + B)$, $\hbar\omega_b = 2ZS|J| + g\mu_B(B_A - B)$,

$$C_k(t) = 2|J|S\gamma_k - \varepsilon_0 S U_x \cos(\omega t + \varphi)\gamma_k - \varepsilon_1 S U_y \cos(\omega t + \varphi)\gamma_k, \\ \gamma_k = \sum_S e^{ik \cdot R_S}$$

式中, B 是沿 Z 方向的外磁场, B_A 是各向异性场, a_k 和 b_k 是两种磁振子的湮灭算符, a_k^\dagger 和 b_k^\dagger 是相应

的产生算符, Z 是配位数, S 是自旋量子数, $|J|$ 是交换积分, μ_B 是玻尔磁子, g 是朗德裂因子, ε_0 和 ε_1 是双激光场的场强, U_x 和 U_y 是激光场与自旋耦合的耦合参数, $C_k(t)$ 是包含激光场与自旋波相互作用的因子.

通过求解产生湮灭算符时间演化关系, 可以求得自旋分量涨落:

$$\langle \Delta S_x^2 \rangle = \frac{S}{2} \sum_{k, \bar{m}} e^{ik \cdot \bar{m}} [2 + 4\text{Sh}^2(\zeta_k \bar{\zeta}_k)] - \\ \frac{S}{2} \sum_{k, \bar{m}} e^{ik \cdot \bar{m}} \text{Sh}(2\sqrt{\zeta_k \bar{\zeta}_k}) \cos(\omega_s + \omega_b)t \cdot \left(\sqrt{\frac{\zeta_k}{\bar{\zeta}_k}} + \sqrt{\frac{\bar{\zeta}_k}{\zeta_k}} \right) - \\ \frac{S}{2} \sum_{k, \bar{m}} e^{ik \cdot \bar{m}} \text{Sh}(2\sqrt{\zeta_k \bar{\zeta}_k}) \cdot i \sin(\omega_s + \omega_b)t \cdot \left(\sqrt{\frac{\zeta_k}{\bar{\zeta}_k}} - \sqrt{\frac{\bar{\zeta}_k}{\zeta_k}} \right) \quad (2)$$

这里, $\zeta_k, \bar{\zeta}_k$ 是压缩因子.

2 激光场的几种情况的讨论

2.1 激光频率远小于 $\omega_s + \omega_b$

此时产生压缩态的条件:

$$\sin\left(\frac{\omega_s t + \omega_b t}{2}\right) < -\text{th}\sqrt{\zeta_k \bar{\zeta}_k} \quad (3)$$

通过求解不等式(3), 可求得周期性的压缩态其周期为:

$$T = \frac{4\pi}{\omega_s + \omega_b} \quad (4)$$

2.2 激光频率近似等于 $\omega_s + \omega_b$

产生压缩态的条件:

$$\text{th}\left[\left(\frac{S\gamma_k(\varepsilon_0 U_x + \varepsilon_1 U_y)}{4\hbar}\right)t\right] < \sin(\omega_s t + \omega_b t) \quad (5)$$

通过求解超越方程(5), 可以得到产生压缩态的区间. 随着时间的延续, 产生压缩态的区间逐渐变小, 压缩态的时间分布显然不具有周期性.

时间足够长时,压缩态将消失.

2.3 激光频率远大于 $\omega_a+\omega_b$

产生压缩态的条件:

$$\text{th}\left[\frac{2|J|S\gamma_t}{\hbar(\omega_a+\omega_b)}\sin\frac{t}{2}(\omega_a+\omega_b)\right]<\sin\frac{t}{2}(\omega_a+\omega_b) \quad (6)$$

求解不等式(6),可以得到周期性的压缩态,其的周期为:

$$T=\frac{4\pi}{\omega_a+\omega_b} \quad (7)$$

以上三种情况的计算表明:在准共振状态,即激光光场的频率等于两种磁振子频率之和时,磁振子压缩态是不稳定的.在这种情况下,磁振子和光子产生有效地耦合,磁振子系统吸收光子能量,使磁振子系统更加不稳定,涨落幅度加大.

3 结论

通常,反铁磁材料存在周期性的压缩态.但当激光的频率接近某一个值的时候($\omega=\omega_a+\omega_b$),压缩态的周期性被破坏,并且随着时间的增大,产生压缩态的时间范围越来越小,当时间足够长时,压缩态会消失;而周期性压缩态出现的频率与材料的交换积分(J)及各向异性场(B_A)有关,即:

$$\omega=\frac{4ZS|J|+2g\mu_B B_A}{\hbar} \quad (8)$$

因此可以通过测量这个固定频率,得到研究材料物理性质的参数.由于中子反铁磁体材料相互作

用的微分散射截面与自旋分量的涨落有关,建议通过时间分辨的中子衍射来验证压缩态的存在.

参考文献

- 1 Hu X, Nori F. Squeezed phonon states: Modulating quantum fluctuations of atomic displacements [J]. Phys Rev Lett, 1996, 76 (13): 2294
- 2 Hu X, Nori F. Quantum phonon optics: Coherent and squeezed atomic displacements [J]. Phys Rev B, 1996, 53 (5): 2419
- 3 Hu X, Nori F. Phonon squeezed states generated by second-order Raman scattering [J]. Phys Rev Lett, 1997, 79 (23): 4605
- 4 Hu X, Nori F. Phonon squeezed states: Quantum noise reduction in solids [J]. Phys B, 1999, 263: 16
- 5 Feng P. Self-squeezing states of magnons in an antiferromagnet [J]. Europhys Lett, 2001, 54 (5): 688
- 6 Feng P. Crystal-field-modulated magnon squeezing states in a ferromagnet [J]. Phys B, 2003, 334 (1): 183
- 7 Feng P. Modulated magnon squeezing states in an antiferromagnet [J]. Phys B, 2003, 334 (2): 359
- 8 Biegala L, Ulner J. Theory of the magnon-photon interaction in magnetic field induced ferromagnet [J]. Z Phys B, 1983, 50: 45
- 9 Magnon instability in bulk magnetic semiconductors in two laser fields under quantizing magnetic fields [J]. Solid State Commun, 1996, 97 (1): 63
- 10 Callaway J. Quantum Theory of the Solid State [M]. New York: Academic Press, 1976

Effect of Laser on Squeezed States of Magnon

FENG Peng, BAI Hao

Applied Science School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT A squeezed state of phonons and photons may have less quantum fluctuation than a coherent state. Compared to phonons or photons, the elementary excitations of the spin waves—magnons, are also bosons, their Hamiltonian in a particle-number representation is similar to that of phonons or photons, and thus the squeezed state of magnons is possible to exist. The parameters characterizing the properties of materials can be calculated by measuring the quantum fluctuation of spin components in the laser field.

KEY WORDS squeezed state; coherent state; magnon; spin wave