

## 超冷原子实验验证量子相变的时空对称性

冯磊<sup>†</sup>

(芝加哥大学物理系 美国芝加哥 IL60637)

2016-12-13收到

† email: leif1@uchicago.edu

DOI: 10.7693/wl20170305

当一个物理系统在发生连续相变的时候，微观尺度的细节不再扮演重要角色，一个宏观尺度的普适理论原则上可以描述相变的物理现象，无论此相变发生在什么具体的物理体系中，例如液氦超流体<sup>[1]</sup>，液晶<sup>[2]</sup>，生物细胞膜<sup>[3]</sup>，超冷原子<sup>[4, 5]</sup>，甚至于整个宇宙早期的宏观结构<sup>[6]</sup>。普适性理论对于描述平衡态物理已经取得相当大的成功。然而当系统快速通过相变过程的时候，其演化过程是否也能用一个普适性理论来描述呢？

针对这一问题，奇博(T. Kibble)于1967年首先提出了奇博—祖瑞机制。奇博认为宇宙演化初期大尺度结构是可以由连续相变过程产生的<sup>[4]</sup>。而后祖瑞(W. Zurek)于1985年进一步将此想法推广至凝聚态系统中，以描述相变过程中拓扑缺陷

的产生<sup>[1]</sup>。这一理论指出相变过程的时空尺度由单一参数决定。这个参数就是相变发生的速度，相变过程发生越快，拓扑缺陷出现越快，且数量越多。更进一步，拓扑缺陷出现的时间和数量与相变速度成幂次律。

冷原子体系是研究此类相变的绝佳体系。我们的实验是先将铯原子玻色—爱因斯坦凝聚置于一个一维光学晶格中，而后逐渐加强振动这个晶格(周期往复平移晶格)。当振动幅度 $S$ 超过一个临界值时，铯原子在晶格中的有效质量变为负数，凝聚态突然发生一种新奇的类铁磁性量子相变，如图1(a)所示。2013年我们首次发现这种相变伴随有类铁磁畴壁的产生<sup>[7]</sup>。在此基础上，我们用增加振动幅度的速率 $\dot{S}$ 来衡量相变发生的速度，

进一步研究此相变的动态过程。实验发现，相变过程中畴壁产生的过程及空间分布显示了相变演化中物理现象具有唯一的时间和空间尺度<sup>[8]</sup>。

根据奇博—祖瑞机制，当系统以一定速度通过相变点，并且通过时间小于系统弛豫时间时，体系的演化被冻结，直至系统通过时间再次长于系统弛豫时间(如图1(b)所示)。当系统演化解冻时，拓扑缺陷产生了。其产生时间 $t_{kz}$ 和大小 $x_{kz}$ 与相变速度 $\dot{S}$ 之间具有一个尺度不变的对称性。幂次律数学形式为

$$t_{kz} \propto \dot{S}^{-\frac{1}{1+\nu}}$$

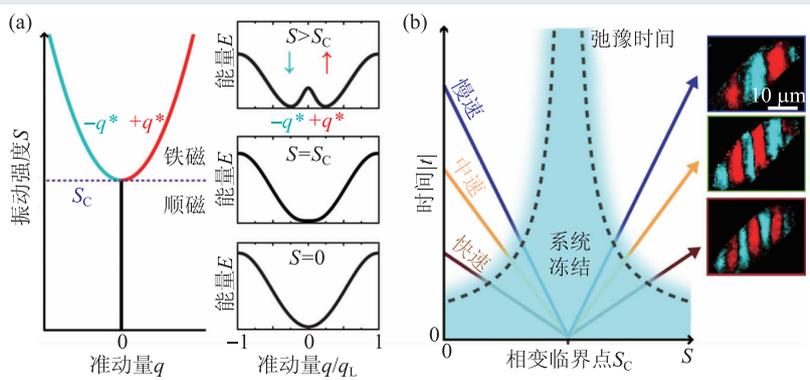


图1 连续量子相变及拓扑缺陷的产生 (a)当晶格振动较弱时( $S < S_c$ ),色散关系只有一个能量最小值,即系统有唯一的基态(顺磁相)。当晶格振动增强时( $S > S_c$ ),从能量色散关系中可以看到,系统此时有两个简并的基态,它必须从两个等价的基态中做出选择,导致了自发的对称破缺(铁磁相)。区别于传统的顺磁—铁磁相变,我们的自旋态( $\uparrow, \downarrow$ )为这两个简并的基态( $+q^*$ 和 $-q^*$ );(b)根据奇博—祖瑞机制,当体系以一定的速度经过相变,如果通过时间小于系统弛豫时间,系统演化被冻结;而当通过时间再次大于弛豫时间时,系统解冻,磁畴也随之产生。图中右侧为铁磁化的冷原子凝聚态,红色(蓝色)代表自旋( $\uparrow$ )( $\downarrow$ )磁域,分割磁域的畴壁便是相变过程产生的拓扑缺陷。实验中,越快速增加晶格振动就会越快速地诱发相变发生,而越快速的相变过程会产生更多的畴壁

\* 美国国家基金会、美国陆军研究室资助项目

$$x_{kz} \propto S^{-\frac{z}{1+z}},$$

这里  $z$  为动力学临界指数,  $\nu$  是关联长度临界指数。最近研究进一步预测, 任何可观测量的时空演化  $F(x, t)$  应该完全取决于  $t_{kz}$  和  $x_{kz}$  这两个奇博—祖瑞时空参数, 即

$$F(x, t; S) \propto f\left(\frac{x}{x_{kz}}, \frac{t}{t_{kz}}\right),$$

其中  $f(x, y)$  是一个普适函数, 适用于描述所有一般的连续相变演化过程。

实验中, 我们利用飞行时间成像来监测磁域形成的过程。这一观测提供了时间尺度参数, 同时也确定了系统解冻即磁域形成的时刻。当磁域刚刚形成时, 我们利用动量空间投影的方法来直接观测磁域的空间分布, 进而得到其磁矩关联函数, 而关联长度提供了唯一的空间尺度参数。实验表明在相当大的相变速度范围内, 所有观测到

的时间及空间尺度都满足上述奇博—祖瑞机制的预言。根据平均场理论的预测, 实验中冷原子体系的临界指数为  $z\nu/(1+z\nu) = 1/2$  和  $\nu/(1+z\nu) = 1/4$ , 相较于实验测量值分别为 0.50(2) 和 0.26(2)。这一结果完全符合理论的预期, 验证了奇博—祖瑞时空尺度的单一性。更有意思的是, 如将所有的测量结果以奇博—祖瑞时空尺度  $t_{kz}$  和  $x_{kz}$  为单位来表示, 相变过程中可观测量的时空演化普适性也得到了有力的证明。

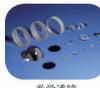
这一成果由洛根·克拉克、冯磊在芝加哥大学金政教授的冷原子实验室中完成, 并在 2016 年 11 月 4 日发表于 *Science* 期刊<sup>[8]</sup>。论文获取地址: [https://ultracold.uchicago.edu/2016\\_publications](https://ultracold.uchicago.edu/2016_publications)。了解更多关于芝加哥金政冷原子实验室的研究, 请访问: <https://ultracold.uchicago.edu>。

## 参考文献

- [1] Zurek W H. *Nature*, 1985, 317: 505  
 [2] Chuang I, Durrer R, Turok N *et al.* *Science*, 1991, 251: 1336  
 [3] Veitch S L, Soubias O, Keller S L *et al.* *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2007, 104: 17650  
 [4] Zhou Q, Ho T L. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 105: 245702  
 [5] Polkovnikov A, Sengupta K, Silva A *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2011, 83: 863  
 [6] Kibble T W B. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 1976, 9: 1387  
 [7] Parker C V, Ha L C, Chin C. *Nature Physics*, 2013, 9: 769  
 [8] Clark L W, Feng L, Chin C. *Science*, 2016, 354: 606

## 标准光学元件库存--- 供您随时选用

总量多达10万片, 超过700个品种规格的透镜, 棱镜, 反射镜, 窗口, 滤光片等常用光学器件; 涵盖紫外, 可见, 近红外, 红外等光学应用领域。



光学透镜



光学棱镜



可见光学元件



红外元件



颜色滤光片



窄带干涉滤光片



北京欧普特科技有限公司  
Beijing Golden Way Scientific Co., Ltd

地址: 北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋5层东段  
电话: 010-88096218/88096099 传真: 010-88096216  
邮箱: optics@goldway.com.cn

## 第十四届全国超导学术研讨会

由国家超导技术联合研究开发中心发起和主办的全国超导学术研讨会, 是我国超导界规模最大的系列学术会议, 其目的旨在交流我国超导物理研究和技术开发领域的最新成果, 促进我国超导事业的进一步发展。

2017年8月20日至23日会议于天津大学北洋园校区举行。

会议网站: <http://nscs2017.tju.edu.cn>。

会议邮箱: [sc2017@tju.edu.cn](mailto:sc2017@tju.edu.cn)。

欢迎相关研究人员参会! 欢迎相关材料, 设备, 仪器供应商参展!