Hardcore bosons on the dual of the bowtie lattice: a quantum Monte Carlo study

张万舟，李来喜，郭文安

北京师范大学

2010-8，长春

背景

超固体：同时具有固体序(对角长程)和超流序(非对角长程)

光晶格中的冷原子提供了很好的实验场

硬核+最近邻排斥

$$H = -t \sum_{\langle i,j \rangle} \left(a_i^\dagger a_j + a_j^\dagger a_i \right) + V \sum_{\langle i,j \rangle} n_i n_j - \mu \sum_i n_i,$$

背景

超固体：同时具有固体序(对角长程)和超流序(非对角长程)

光晶格中的冷原子提供了很好的实验场

硬核+最近邻排斥

$$H = -t \sum_{\langle i,j \rangle} \left(a_i^\dagger a_j + a_j^\dagger a_i \right) + V \sum_{\langle i,j \rangle} n_i n_j - \mu \sum_i n_i,$$

目前发现超固体的仅有的二维晶格：三角晶格，含次近邻互作用正方晶格

背景

超固体：同时具有固体序(对角长程)和超流序(非对角长程)

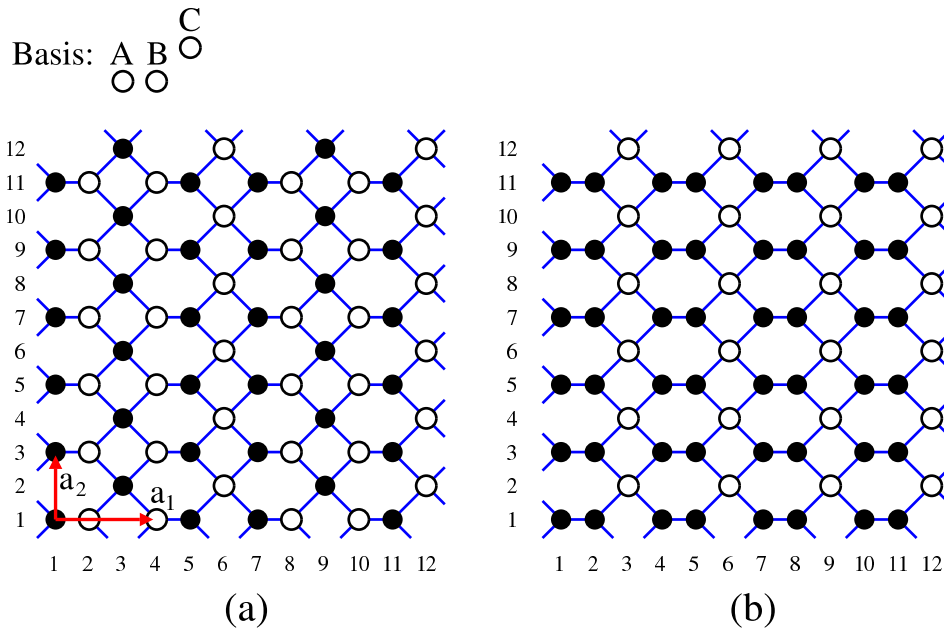
光晶格中的冷原子提供了很好的实验场

硬核+最近邻排斥

$$H = -t \sum_{\langle i,j \rangle} \left(a_i^\dagger a_j + a_j^\dagger a_i \right) + V \sum_{\langle i,j \rangle} n_i n_j - \mu \sum_i n_i,$$

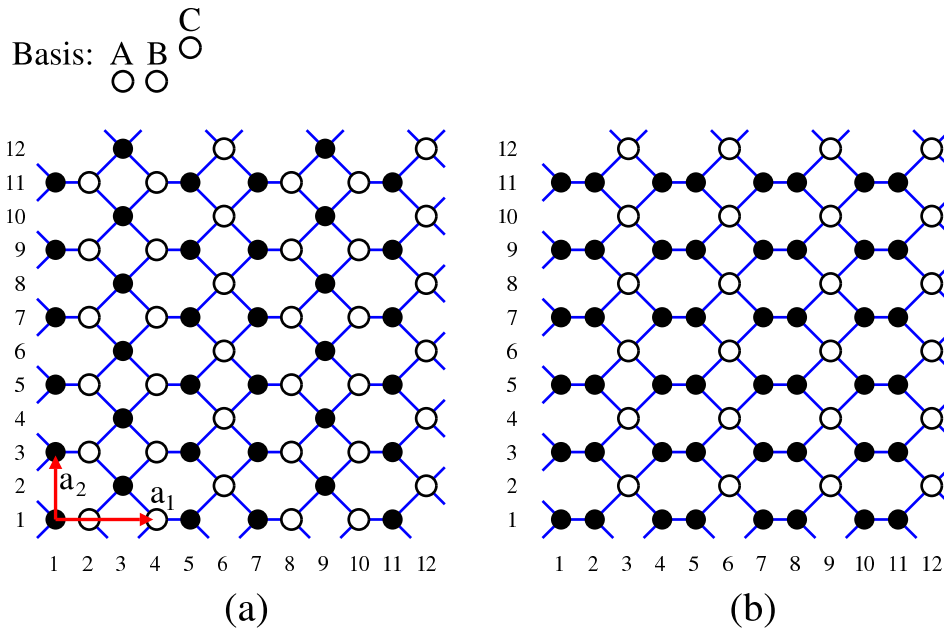
目前发现超固体的仅有的二维晶格：三角晶格，含次近邻互作用
正方晶格
几何阻挫(geometric frustralion)与量子涨落

Bowtie晶格的对偶晶格，对应的Bravais格子是长方晶格。每个‘基(元胞)’里有三个格点。



粒子的两种周期占据方式对应两种密度波

Bowtie晶格的对偶晶格，对应的Bravais格子是长方晶格。每个‘基(元胞)’里有三个格点。



粒子的两种周期占据方式对应两种密度波

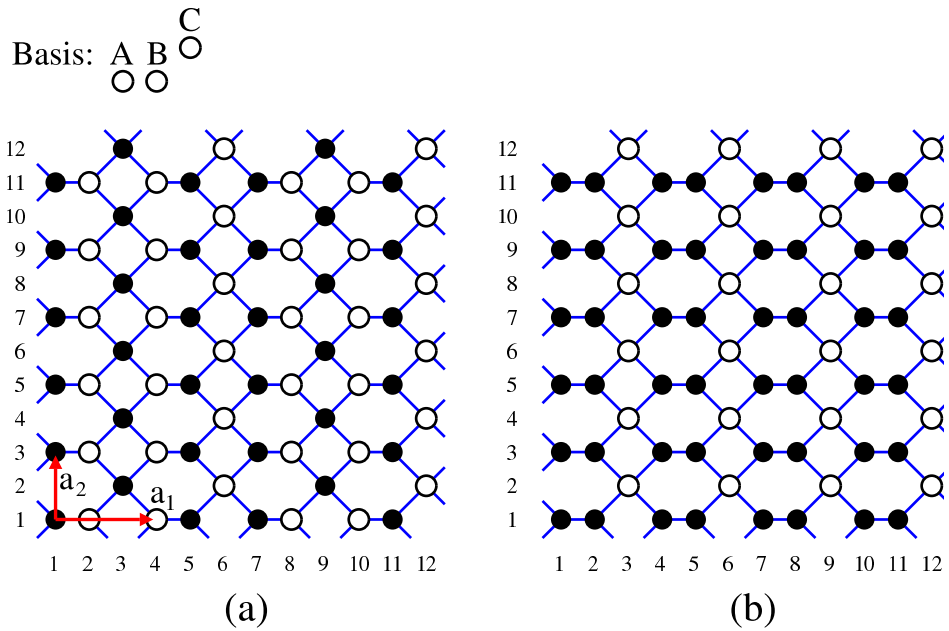
引入准结构因子

S_1: x方向奇偶格子密度差

S_2: A, B两套子晶格密度差

S_3: B, C两套子晶格密度差

Bowtie晶格的对偶晶格，对应的Bravais格子是长方晶格。每个‘基(元胞)’里有三个格点。



粒子的两种周期占据方式对应两种密度波

引入准结构因子

S_1: x方向奇偶格子密度差

S_2: A, B两套子晶格密度差

S_3: B, C两套子晶格密度差

Order I: $1/2$填充，$S_1 \neq 0, S_2 = 0$

Order II: $2/3$填充，$S_1 = 0, S_2 = 0, S_3 \neq 0$

研究方法

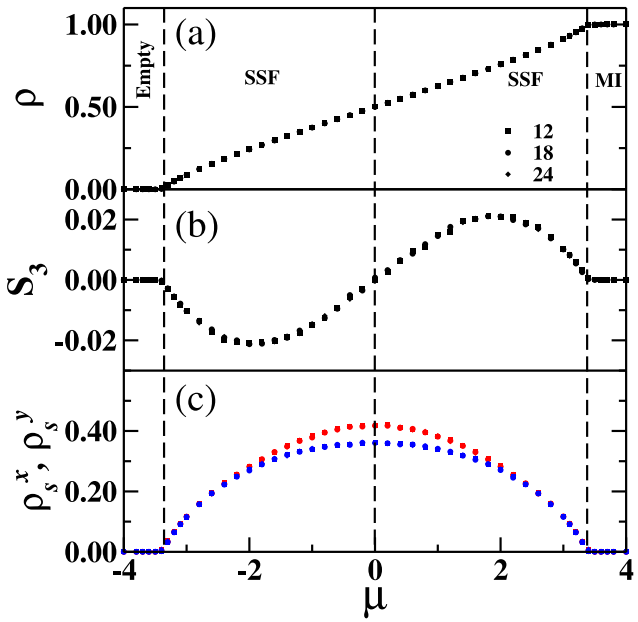
SSE 量子Monte Carlo 方法，directed loop algorithm

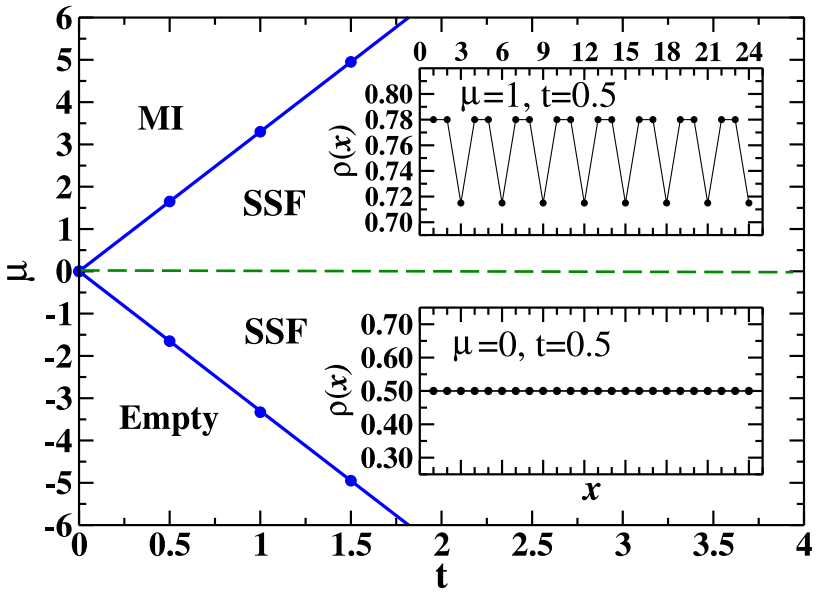
测量:

- 准结构因子S_1, S_2, S_3
- 超流坚硬度(superfluid stiffness) (反映系统是否处于超流态)
- 密度，能量

无最近邻相互作用情形$V=0$

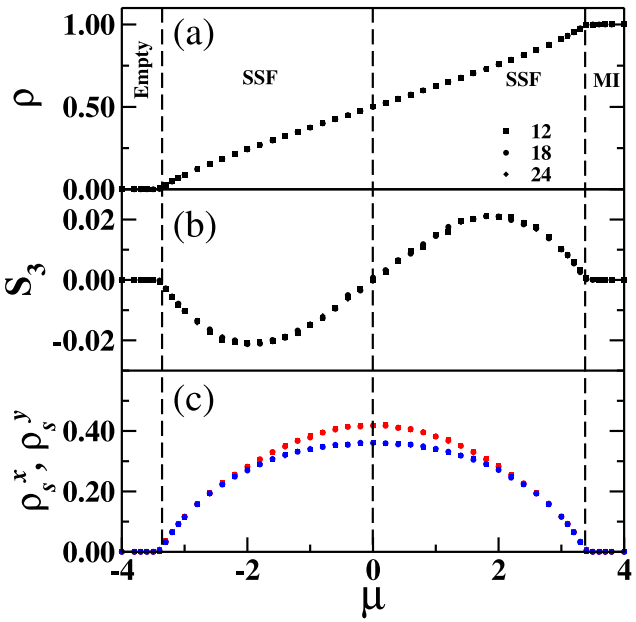
$t=1$

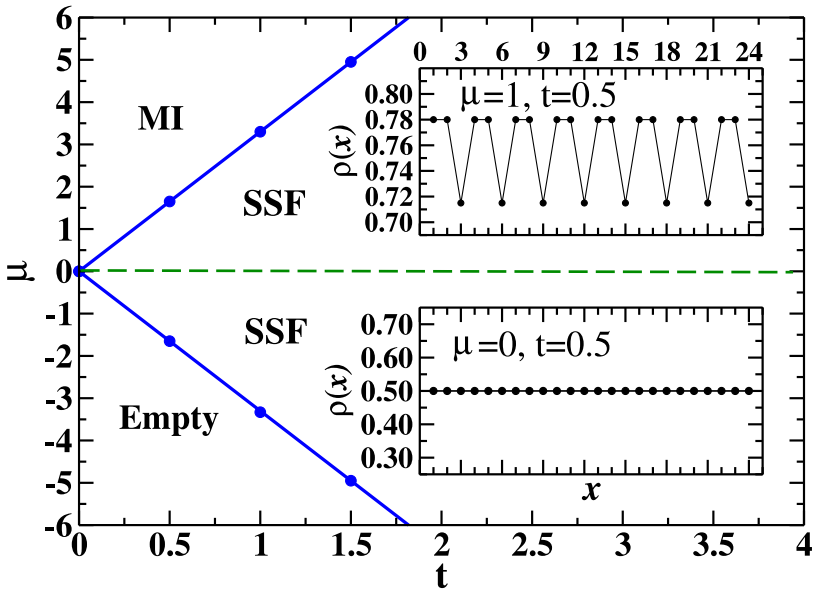




无最近邻相互作用情形$V=0$

$t=1$

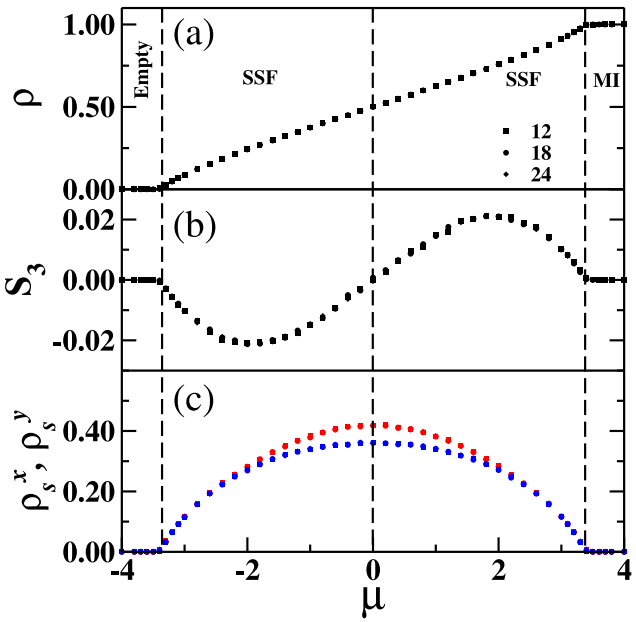


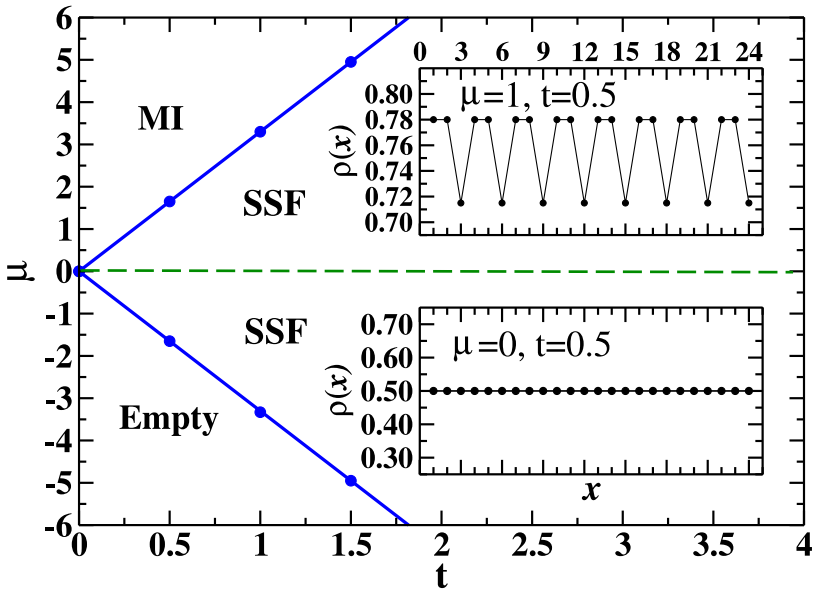


我们发现了同时具有Order II和超流序的态！

无最近邻相互作用情形$V=0$

$t=1$



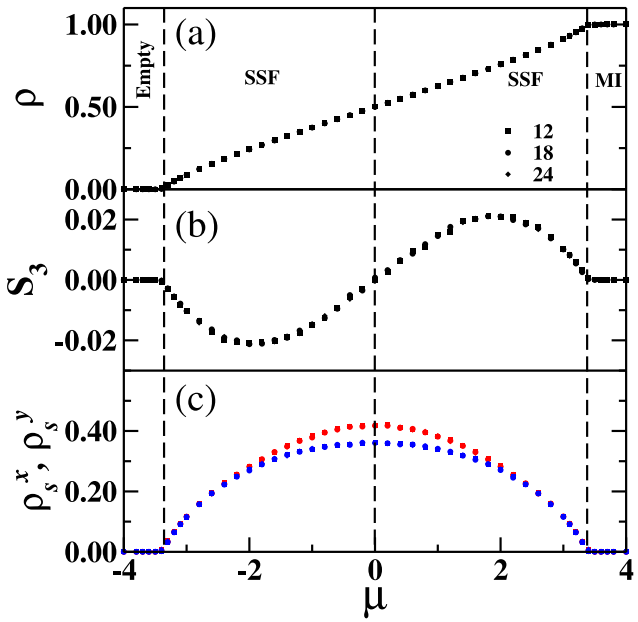


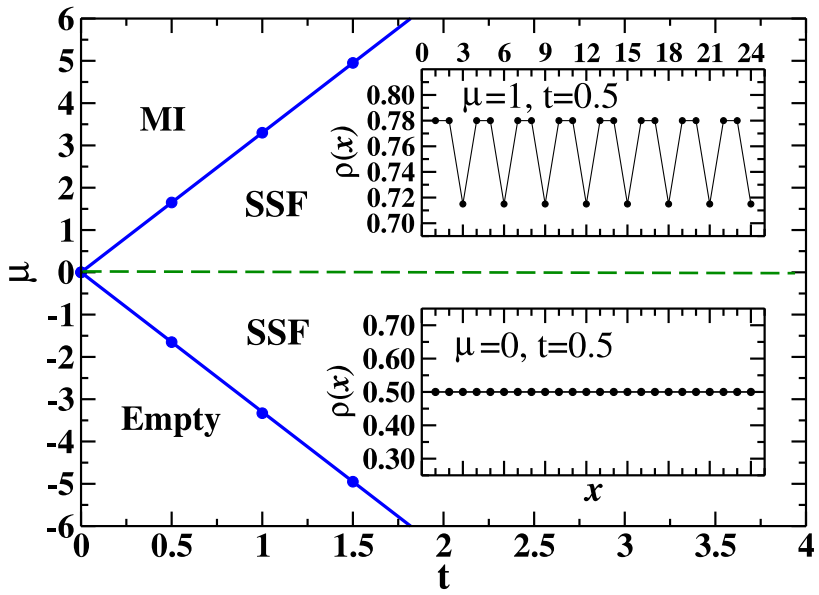
我们发现了同时具有Order II和超流序的态！

是不是超固体态？

无最近邻相互作用情形$V=0$

$t=1$



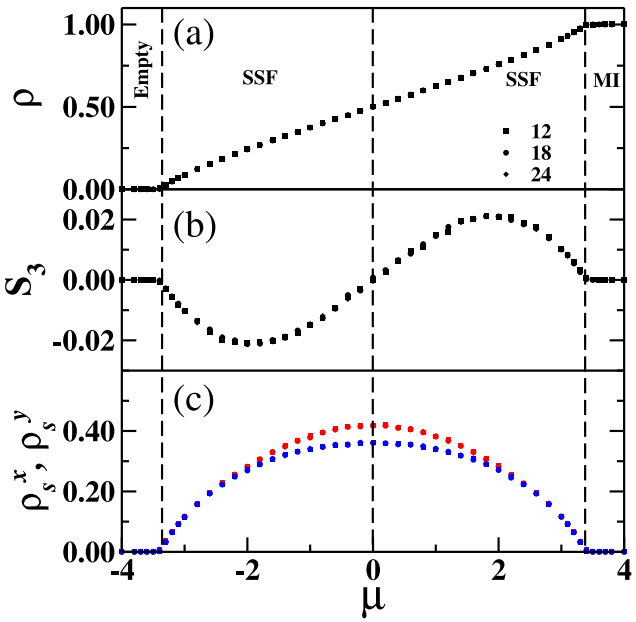


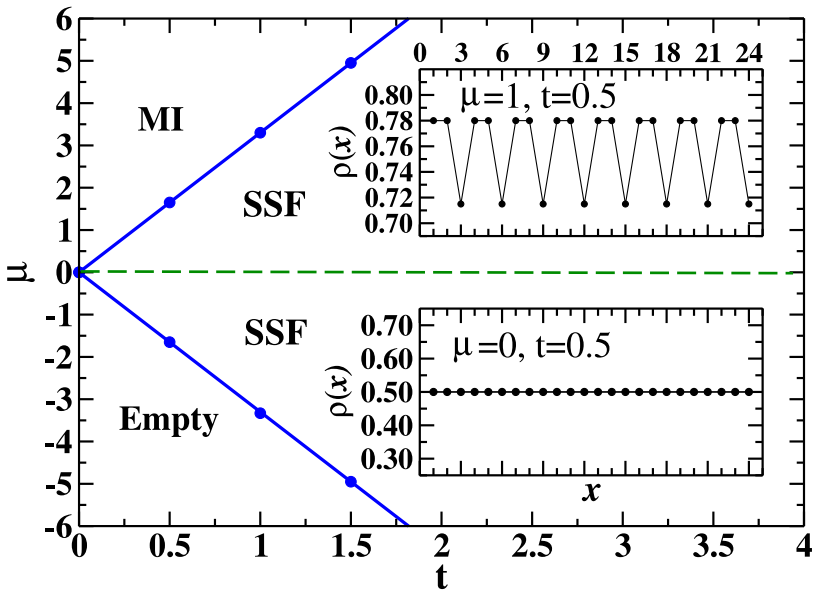
我们发现了同时具有Order II和超流序的态！

是不是超固体态？ 什么是固体态？

无最近邻相互作用情形$V=0$

$t=1$





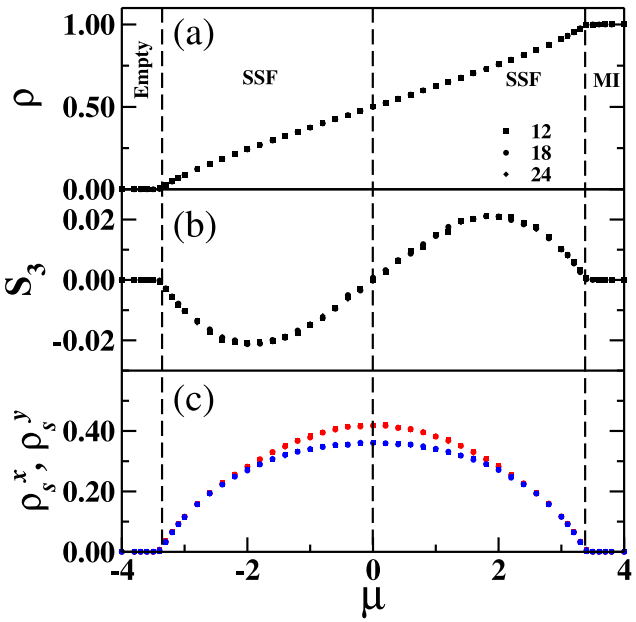
我们发现了同时具有Order II和超流序的态！

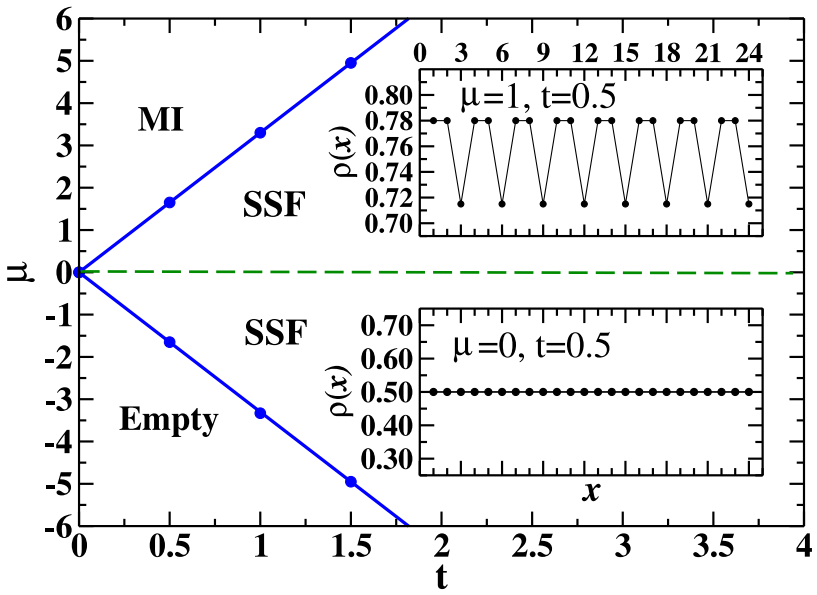
是不是超固体态？ 什么是固体态？

要打破原有Bravais lattice 的平移对称性，或者子晶格的对称性。

无最近邻相互作用情形$V=0$

$t=1$





我们发现了同时具有Order II和超流序的态！

是不是超固体态？ 什么是固体态？

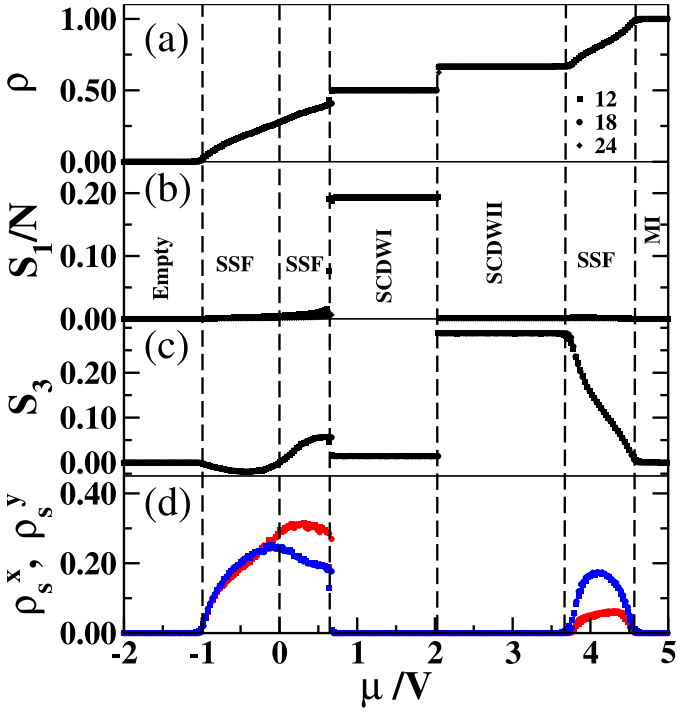
要打破原有Bravais lattice 的平移对称性，或者子晶格的对称性。

因此，系统并不具有固体序，我们可以称这种序为条纹序

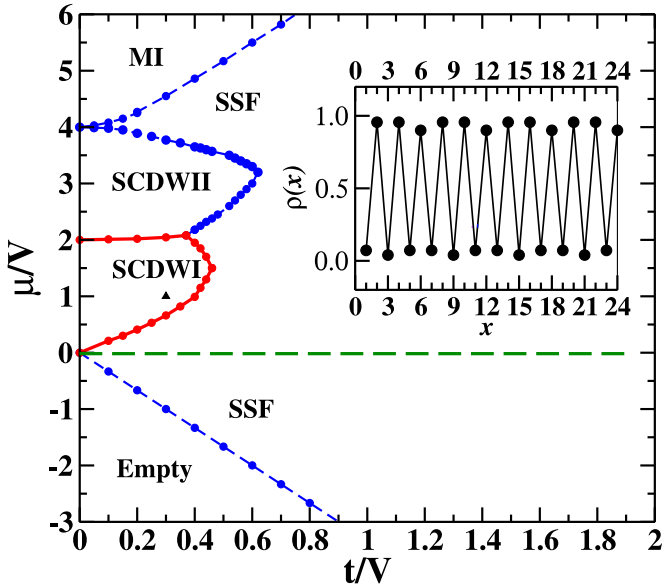
条纹超流相(Striped superfluid phase, SSF)

有最近邻相互作用情形$V \neq 0$

条纹密度波I (SCDW I) 与条纹密度波II (SCDW II)

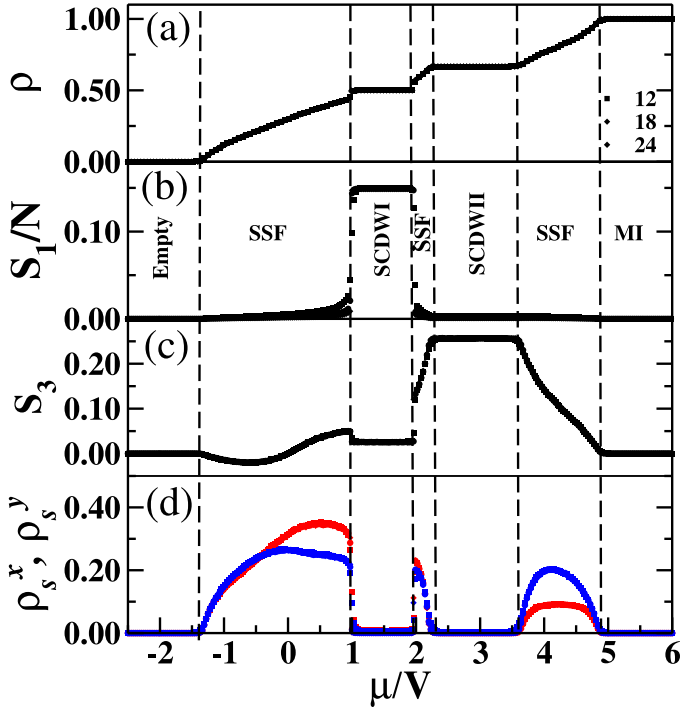


$t/V = 0.3$

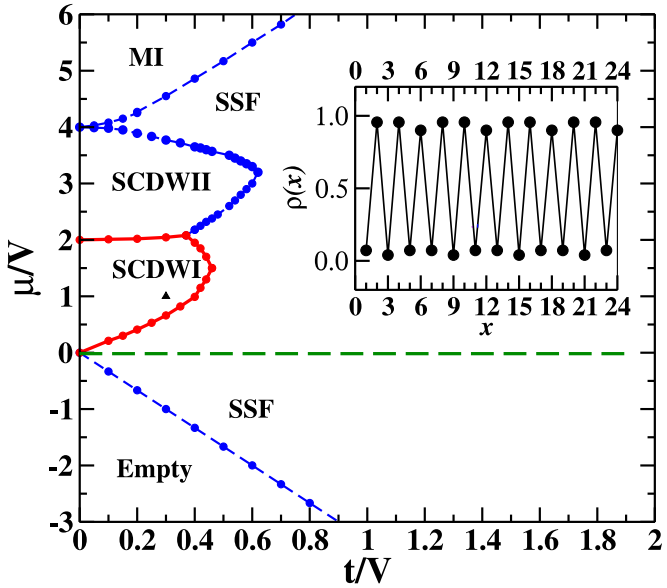


有最近邻相互作用情形$V \neq 0$

条纹密度波I (SCDW I) 与条纹密度波II (SCDW II)

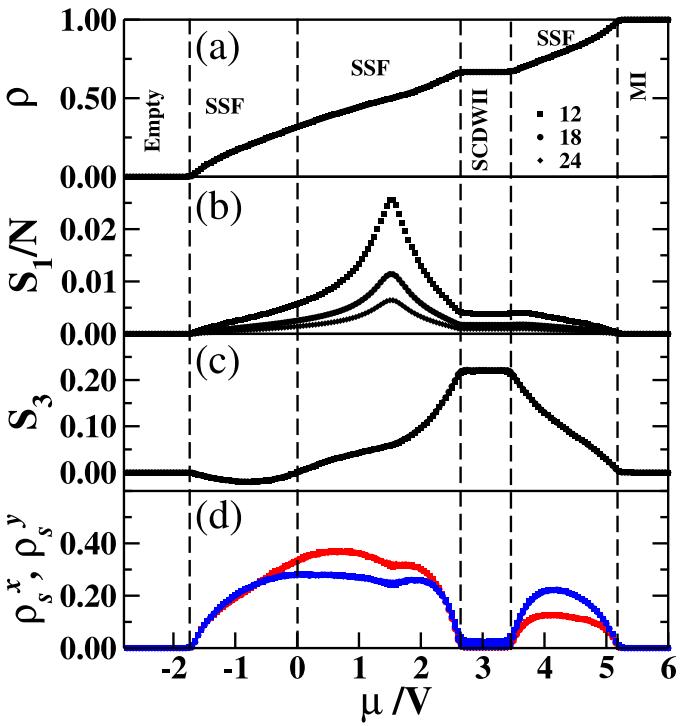


$t/V = 0.4$

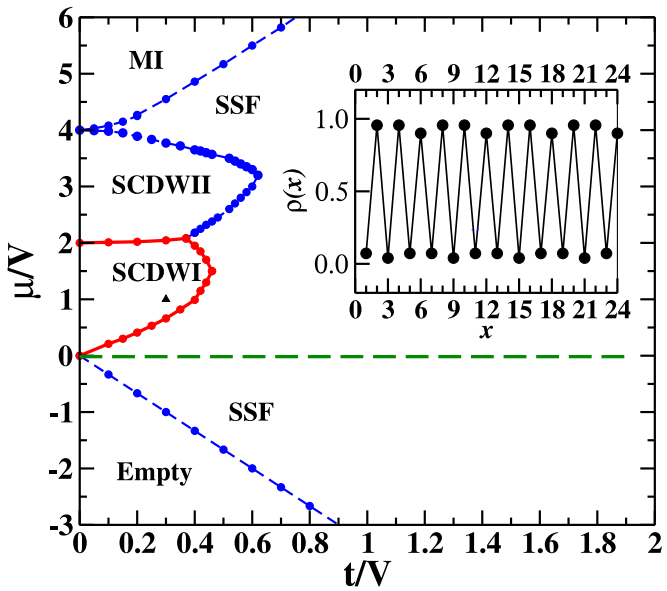


有最近邻相互作用情形$V \neq 0$

条纹密度波I (SCDW I) 与条纹密度波II (SCDW II)

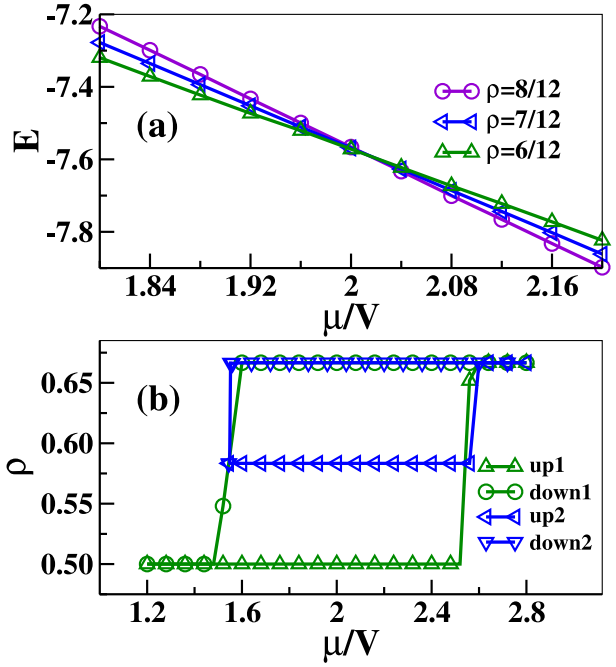


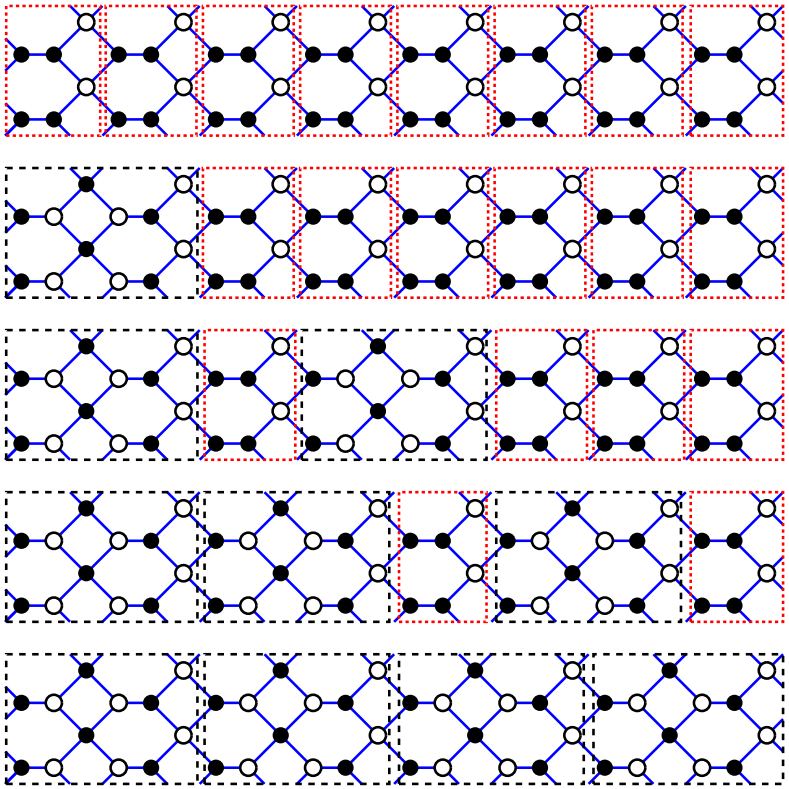
$t/V = 0.5$



SCDWI 与SCDWII之间的特殊一级相变

当$t/V << 1, \mu = 2$, 高度简并的能级





$$L = 3n_b, \rho = (2n_b - n)/(3n_b), n = 0, 1, \cdots, n_b/2$$
$$\Omega(\rho) = n_b(n_b - n - 1)!/(n_b - 2n)!/n!$$

小结

- 光晶格上硬核玻色子的固体相与密度波相

小结

- 光晶格上硬核玻色子的固体相与密度波相
- 对偶Bowtie晶格上我们发现了条纹超流相

小结

- 光晶格上硬核玻色子的固体相与密度波相
- 对偶Bowtie晶格上我们发现了条纹超流相
- 超流响应(stiffness)是各向异性的

小结

- 光晶格上硬核玻色子的固体相与密度波相
- 对偶Bowtie晶格上我们发现了条纹超流相
- 超流响应(stiffness)是各向异性的
- 发现一种有趣的一级相变行为

小结

- 光晶格上硬核玻色子的固体相与密度波相
- 对偶Bowtie晶格上我们发现了条纹超流相
- 超流响应(stiffness)是各向异性的
- 发现一种有趣的一级相变行为

谢谢