LETTER

doi:10.1038/nature17409

Quantum phases from competing short- and long-range interactions in an optical lattice

Renate Landig[1], Lorenz Hruby[1], Nishant Dogra[1], Manuele Landini[1], Rafael Mottl[1], Tobias Donner[1] & Tilman Esslinger[1]

Gabriel T. Landi
Journal Club do FMT
30/08/2016

Grupo do Prof. Tilman Esslinger, ETH Zürich

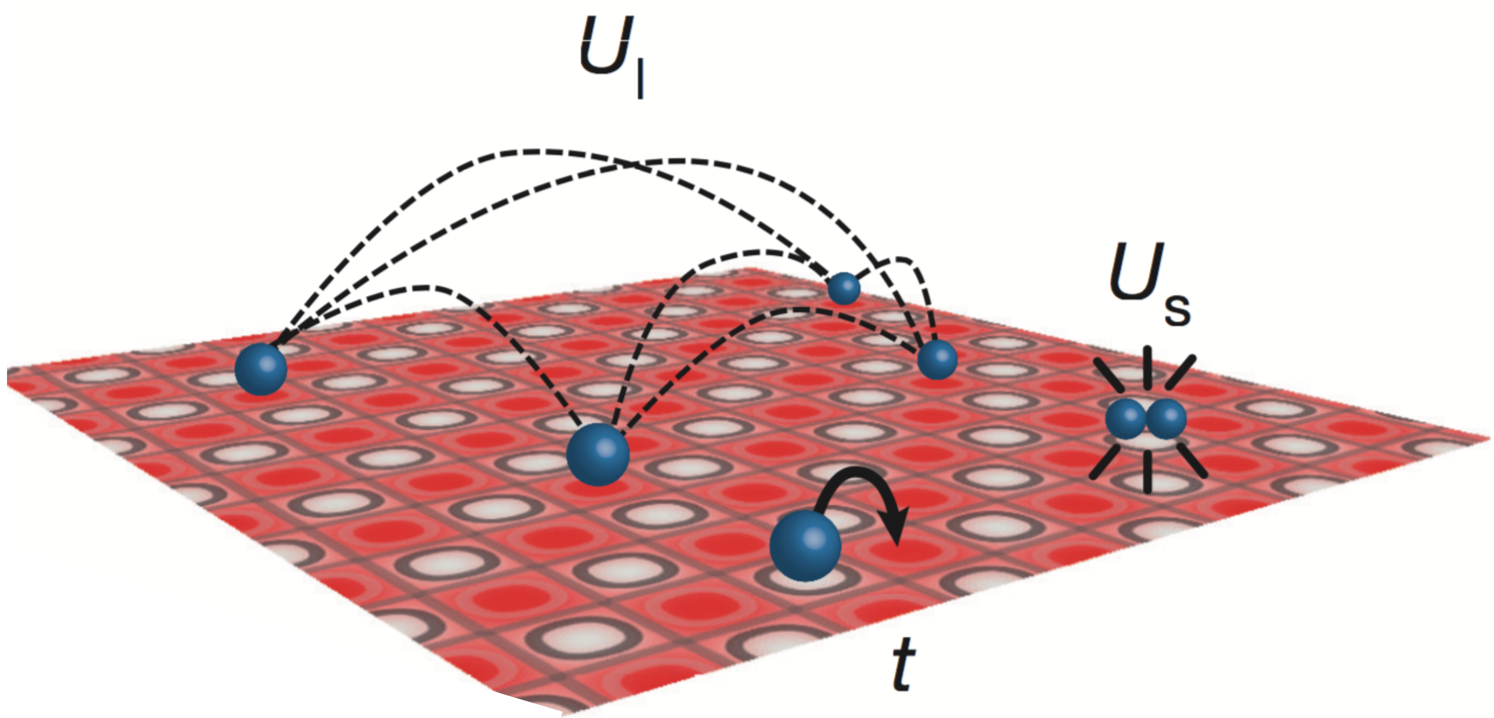
- Combinam conhecimento de
  - Ótica quântica
  - Condensados de Bose-Einstein (quantum gases)
- Possuem um sistema único:
  - Condensado de Bose-Einstein aprisionado em uma cavidade ótica.
- Idéia: usar esse sistema para simular sistemas de muitos corpos (many-body; strongly correlated) e transições de fase quânticas.

Papers explorando o mesmo setup experimental

- Nature **532**, 476-479 (2016).
- Science **350**, 1498-1501 (2015).
- Nature Communications 6, 7046 (2015).
- Nature **517**, 64-67 (2015).
- Nature **515**, 237-240 (2014).
- Science **342**, 713-715 (2013).
- Science **340**, 1307-1310 (2013).
- Nature **491**, 736-739 (2012).
- Science **337**, 1069-1071 (2012).
- Nature Physics **8**, 455-459 (2012).
- Science **336**, 1570-1573 (2012).
- Nature **483**, 302–305 (2012).
- Nature **464**, 1301-1306 (2010).
- Nature **455**, 204-207 (2008).
- Science **322**, 235 (2008).
- Science **315**, 1556-1558 (2007).
- Nature **450**, 268-271 (2007).

Modelo de Bose-Hubbard com interação de curto e longo alcançe

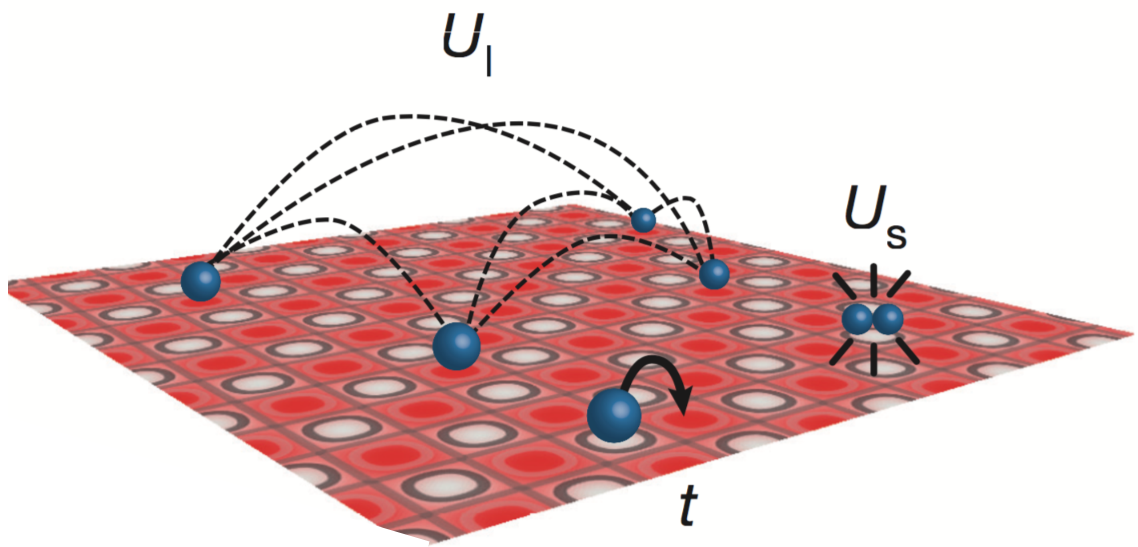
- O objetivo do experimento é simular Bosons em uma rede quadrada (2D) com interações de curto e longo alcance



- O Hamiltoniano que eles simulam é:

$$H = -t \sum_{\langle e,o \rangle} (b_e^\dagger b_0 + \mathrm{h.c.}) - \sum_{i \in \{e,o\}} (\mu - \epsilon_i)\hat{n}_i$$

$$+ \frac{U_s}{2} \sum_{i \in \{e,o\}} \hat{n}_i(\hat{n}_i - 1) - \frac{U_1}{K}\left(\sum_e \hat{n}_e - \sum_o \hat{h}_o\right)^2$$



A parte referente ao modelo de Bose-Hubbard (curto alcance) já é conhecida.

Quantum phase transition from a superfluid to a Mott insulator in a gas of ultracold atoms

Markus Greiner*, Olaf Mandel*, Tilman Esslinger†, Theodor W. Hänsch* & Immanuel Bloch*

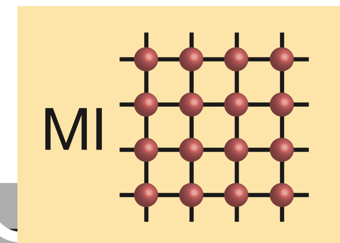
* *Sektion Physik, Ludwig-Maximilians-Universität, Schellingstrasse 4/III, D-80799 Munich, Germany, and Max-Planck-Institut für Quantenoptik, D-85748 Garching, Germany*

† *Quantenelektronik, ETH Zürich, 8093 Zurich, Switzerland*

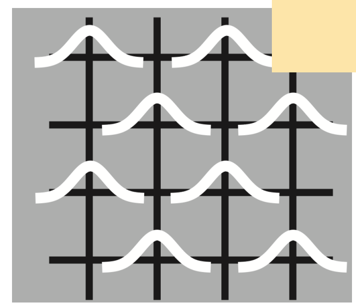
- Variando os parâmetros Us e U1 eles mostram que o sistema pode apresentar quatro fases quânticas diferentes:

    - Superfluido (SF): Bósons se movem sem viscosidade (BEC)

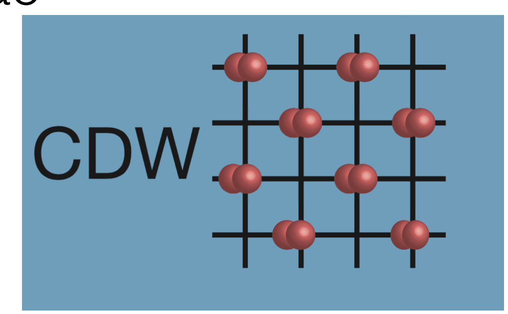
    - Isolante de Mott (MI): Bósons ficam localizados devido à repulsão de curto alcance.

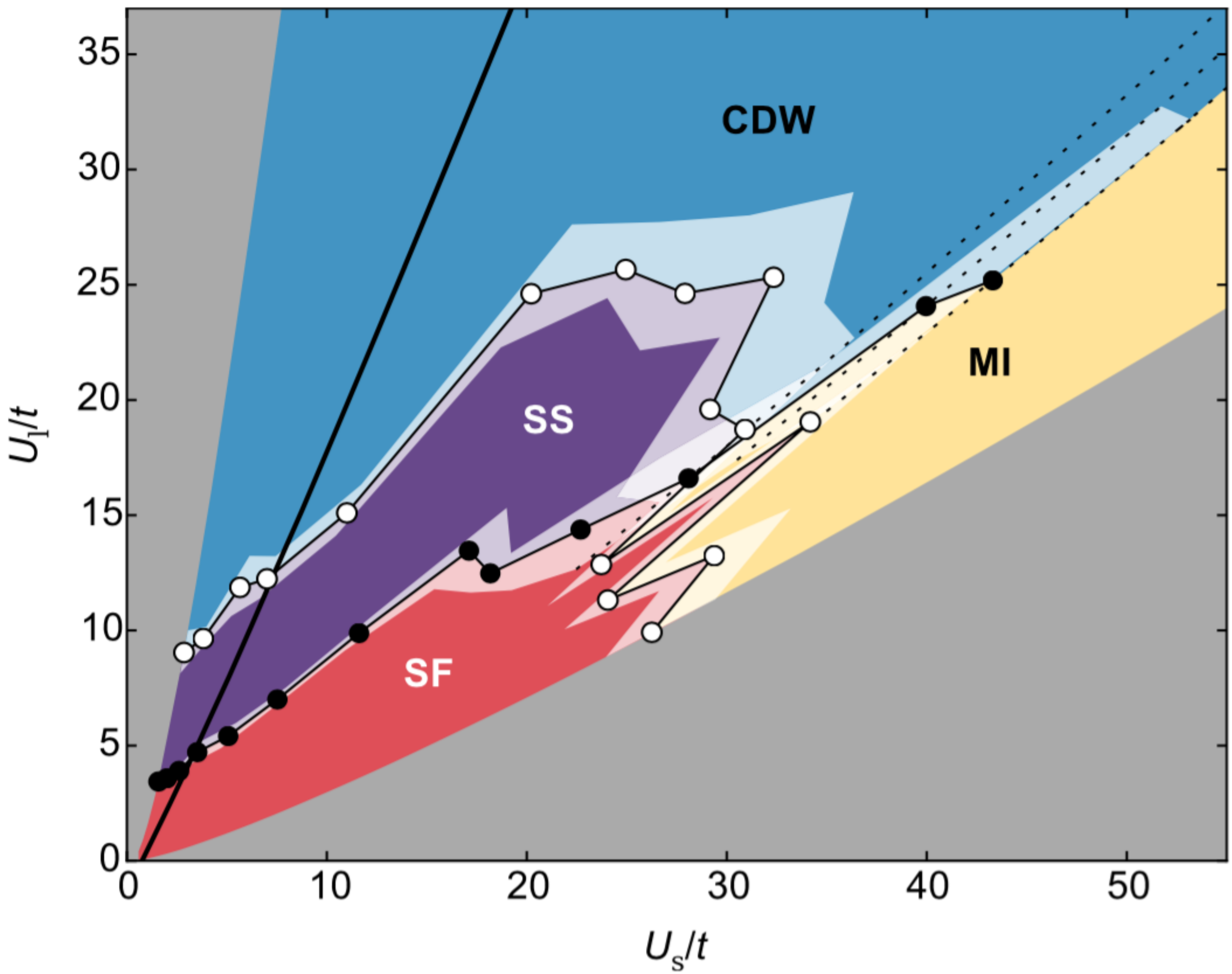


    - Supersólido (SS): Vacâncias (bosônicas) se movem sem viscosidade.



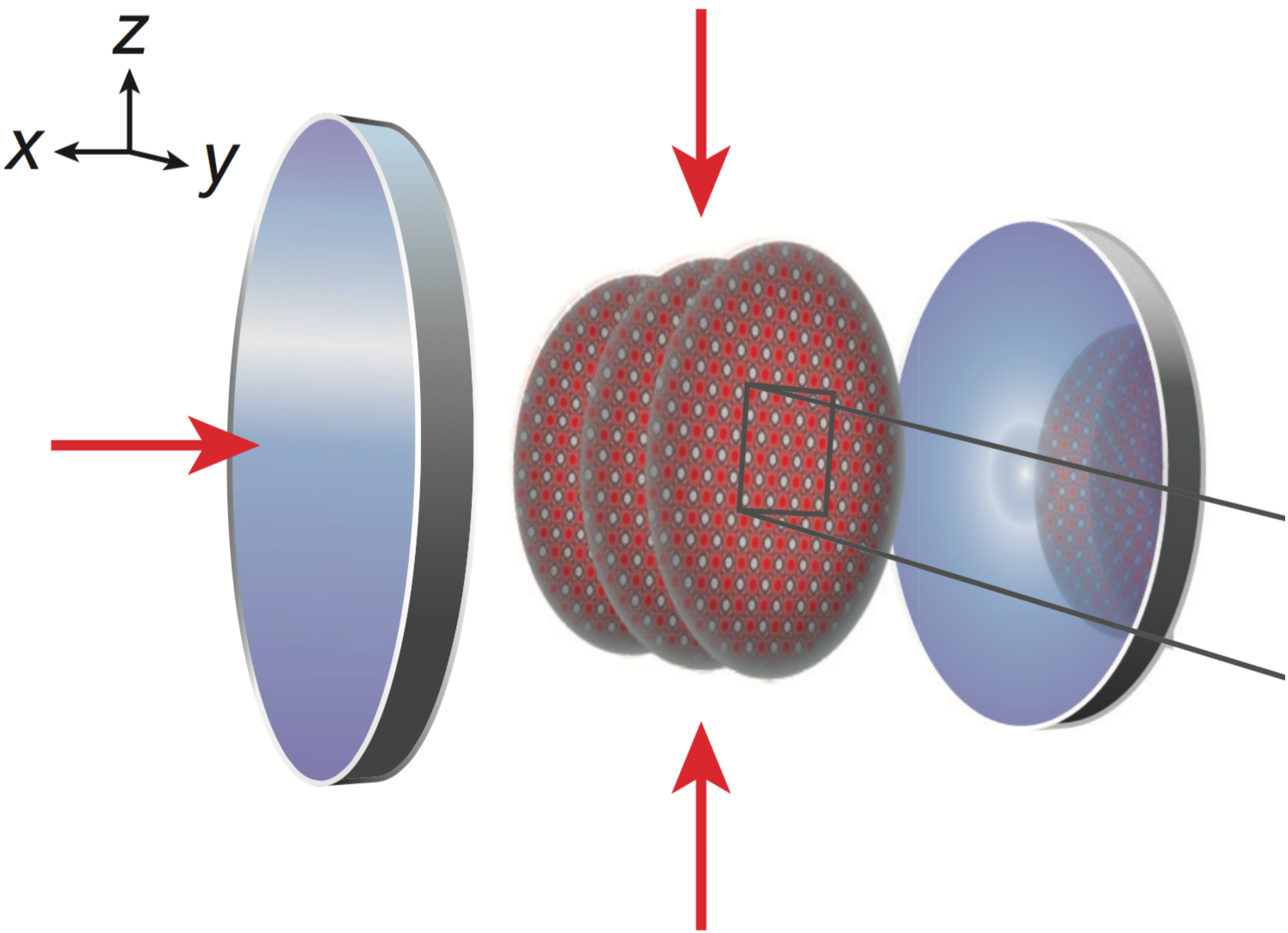
    - Charge Density Wave (CDW): distorção periódica da rede e dos átomos.





CDW
SS
SF
MI
U_l/t
U_s/t
0
5
10
15
20
25
30
35
0
10
20
30
40
50

Setup experimental



Setup experimental
Parte 1: separar o gás em camadas

- Gás com 4.2 x 10^4 átomos de ^{87}Rb à 42 nK.

- Cavidade ótica (largura ~ 178 μm) com uma armadilha ótica de dipolo > cria um BEC de ~ 10 μm.

- Em seguida aplica-se um laser (λ = 670 nm) modulado no tempo na direção *y*, que separa os átomos de Rb em camadas.

  - Aprox. 60 camadas, com 1300 átomos na camada central (e um pouco menos nas outras).

Setup experimental
Parte 2: criar uma rede quadrada em cada camada.

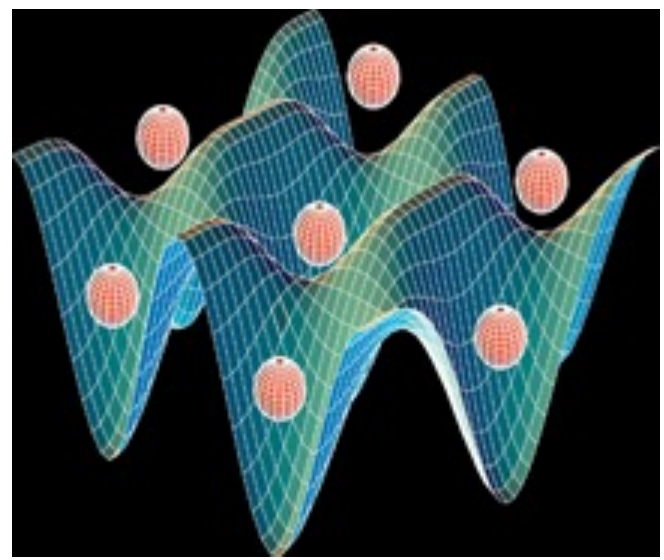
- As camadas de gás são expostas a uma rede ótica no plano *xz* (λ = 785.3 nm).

- Isso gera um potencial sentido pelos átomos do tipo:

$$V(x,z) = V_{2\mathrm{D}}\Big[\cos^2(kx) + \cos^2(kz)\Big], \qquad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

- O potencial V_{2D} pode ser controlado experimentalmente.

- Ele vai determinar U_s do Hamiltoniano de muitos corpos



- Os lasers que produzem as armadilhas possuem um número enorme de fótons e portanto podem ser incluídos na análise do sistema de maneira indireta.

- Mas há também o campo eletromagnético da cavidade (aprisionado devido aos espelhos semi-transparentes).
    - Esse modo da cavidade é essencial para gerar a interação de longo alcance.

- O Hamiltoniano de um átomo interagindo com o modo da cavidade será:

Consegue controlar experimentalmente.

$$\Delta_c = \omega_z - \omega_c$$

$$H_1 = \frac{p_x^2}{2m} + \frac{p_z^2}{2m} + V_{2\mathrm{D}}\left[\cos^2(kx) + \cos^2(kz)\right] - \hbar\Delta_c a^\dagger a$$

$$+\hbar\eta(a^\dagger + a)\cos(kx)\cos(kz)$$

O átomo espalha fótons do laser e os transforma em fótons da cavidade

$$+\hbar U_0 \cos^2(kx) a^\dagger a$$

O átomo sente um potencial periódico adicional devido ao campo da cavidade.

a = operador do campo da cavidade (aprisionado devido aos espelhos)

- Para descrever o sistema de muitos átomos, mudamos para a linguagem da segunda quantização
  - Promovemos a função de onda do sistema para um operador bosônico (O ^{87}Rb possui spin inteiro, 1 ou 2).

$$\Psi(x,z) = \text{ operador que aniquila um átomo na pos. (x,z)}$$

  - E incluímos também a repulsão entre os átomos:

$$\mathcal{H} = \int \mathrm{d}x\mathrm{d}z \left[\Psi^\dagger H_1 \Psi - \mu \Psi^\dagger \Psi + g_{2\mathrm{D}} \ \Psi^\dagger \Psi^\dagger \Psi \Psi\right]$$

Interação repulsiva entre átomos no mesmo sítio. Esse é o termo U_s no Hamiltoniano básico

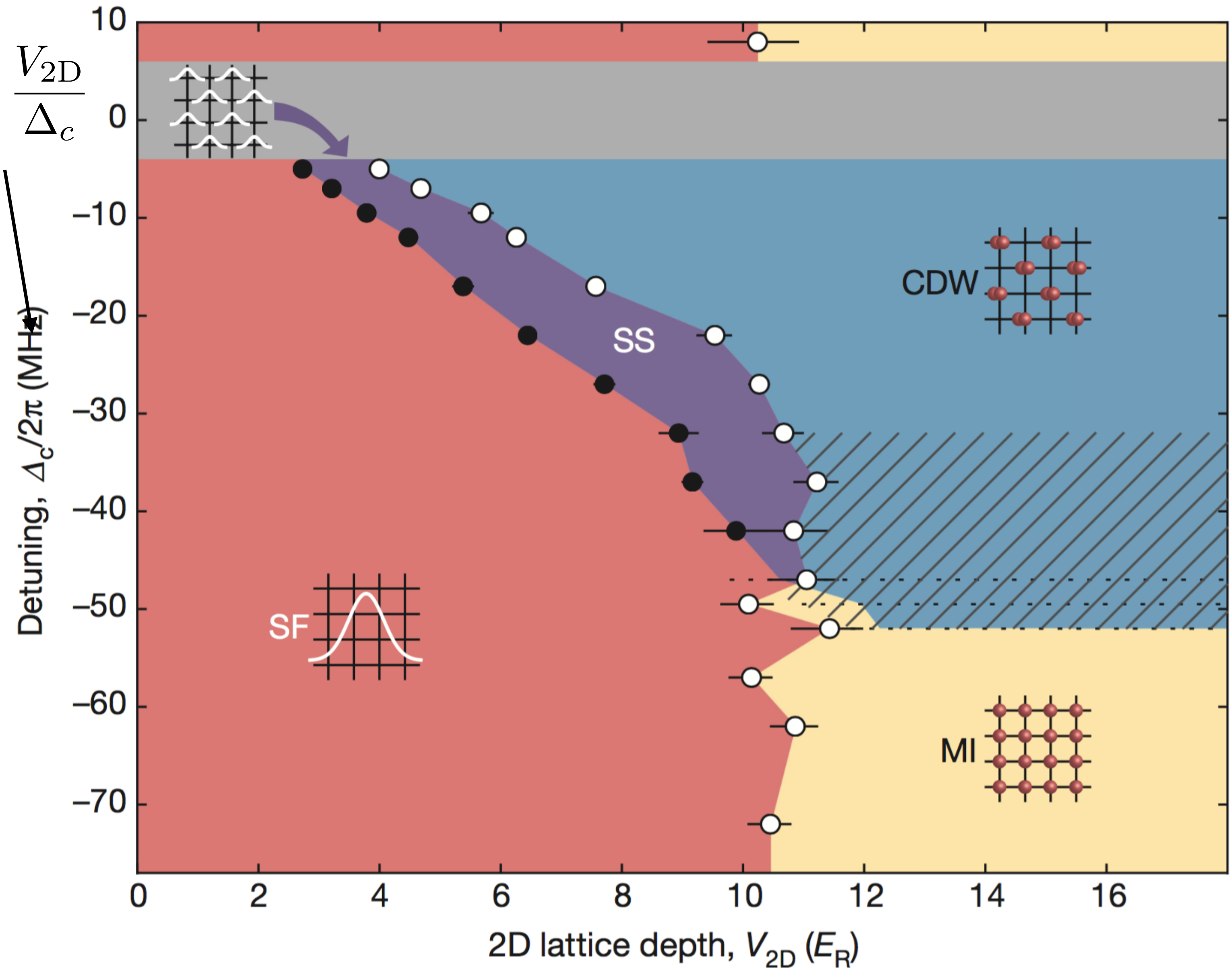
- Expansão em funções de Wannier

$$\Psi(x,z) = \sum_{n,m} \phi_{n,m}(x,z) b_{n,m}$$

- Eliminação adiabática do modo da cavidade

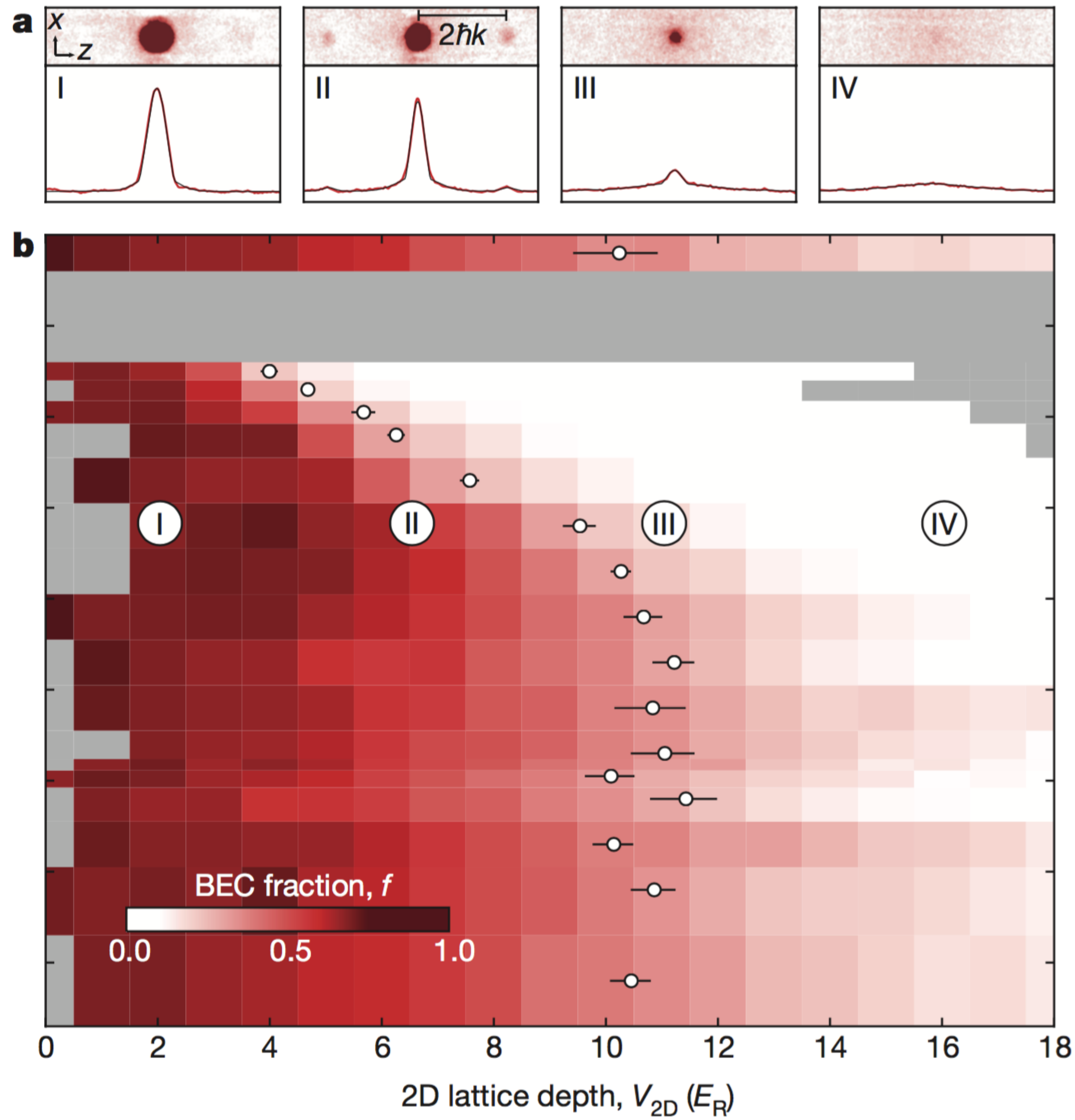
$$a \propto \left(\sum_e \bar{n}_e - \sum_o \bar{n}_o \right)$$

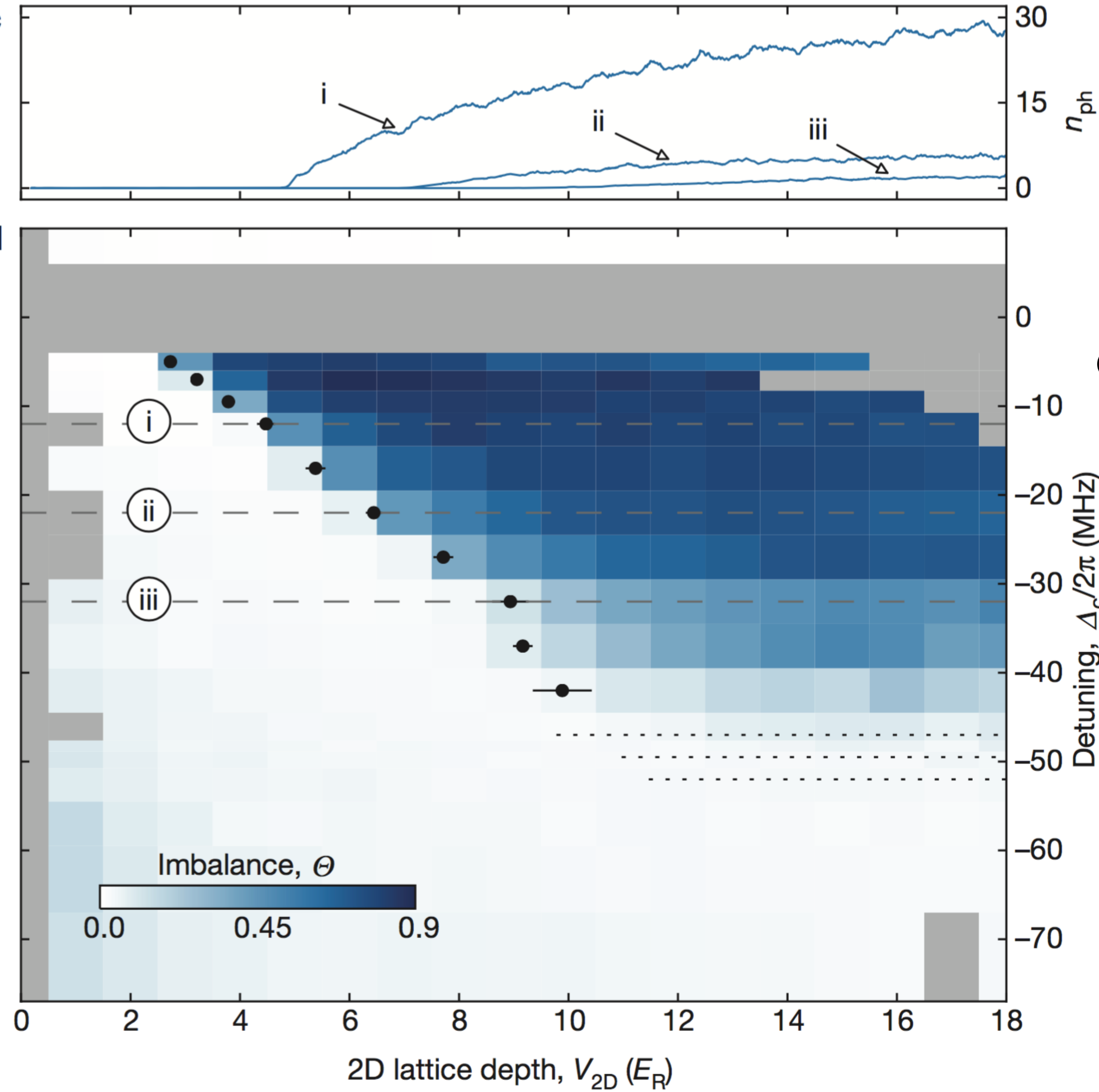
$$U_1 \propto \frac{V_{2\mathrm{D}}}{\Delta_c}$$



Determinação da transição SF - MI

Expansão livre do gás ao desligar todas as armadilhas

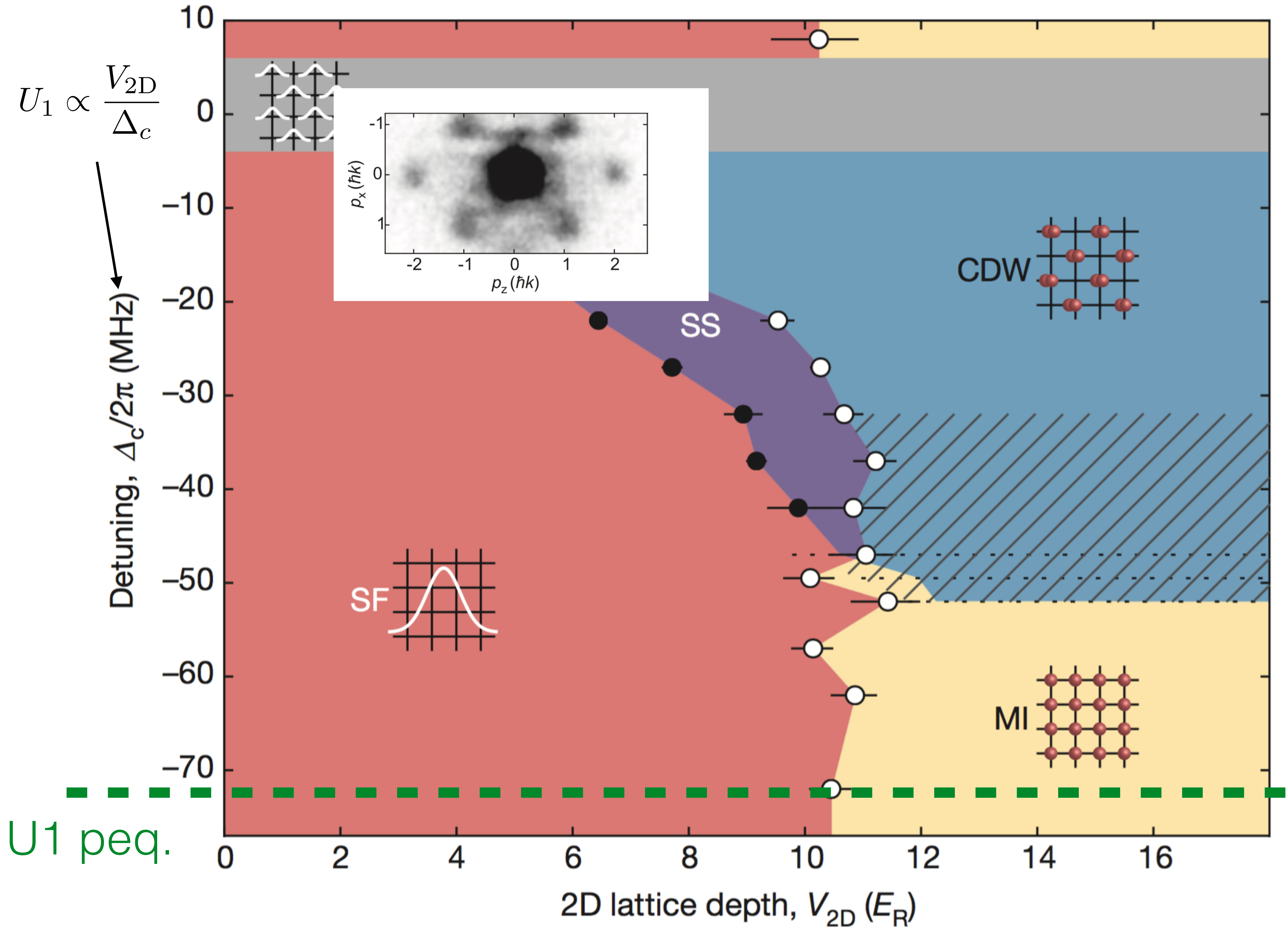




Outra medida:
Desbalanço
par-ímpar

$$\Theta = \left| \frac{\sum_e \langle \bar{n}_e \rangle - \sum_o \langle \bar{n}_o \rangle}{\sum_e \langle \bar{n}_e \rangle + \sum_o \langle \bar{n}_o \rangle} \right|$$

$$\propto \sqrt{n_{\mathrm{ph}}}$$



$U_1 \propto \frac{V_{2D}}{\Delta_c}$
U1 peq.
SS
CDW
SF
MI
Detuning, $\Delta_c/2\pi$ (MHz)
2D lattice depth, V_{2D} (E_R)
p_x ($\hbar k$)
p_z ($\hbar k$)