



UC | Chile

Mezclas y polarones

Felipe Isaule

Investigador Postdoctoral ANID
Instituto de Física, PUC

1ra Escuela Chilena de Átomos Ultrafríos
22/01/2025, PUC, Santiago, Chile

Literatura

- C. Baroni, G. Lamporesi, and M. Zaccanti, Nature Reviews Physics **6**, 736 (2024).
- P. Massignan, M. Zaccanti and G. M. Bruun, Rep. Prog. Phys. **77**, 034401 (2014).
- F. Grusdt, N. Mostaan, E. Demler, L.A. Peña Ardila, arXiv:2410.09413 (2024).
- P. Massignan, R. Schmidt, G. E. Astrakharchik, A. Imamoglu, M. Zwierlein, J. J. Arlt, and G. M. Bruun, arXiv:2501.09618 (2025).
- T. Sowiński and M. A. García-March, Rep. Prog. Phys. **82**, 104401 (2019).

Mezclas y polarones

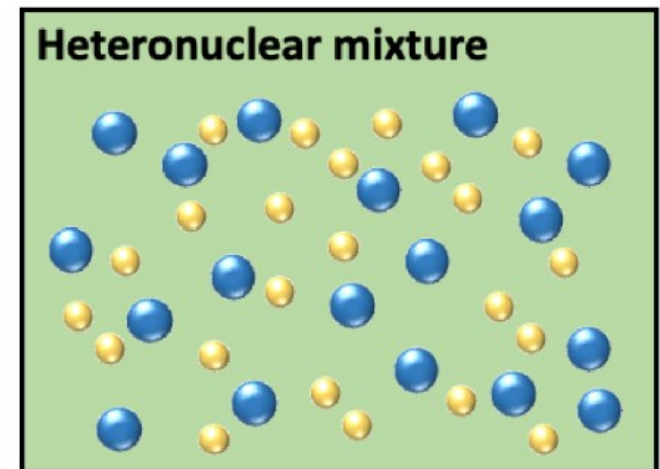
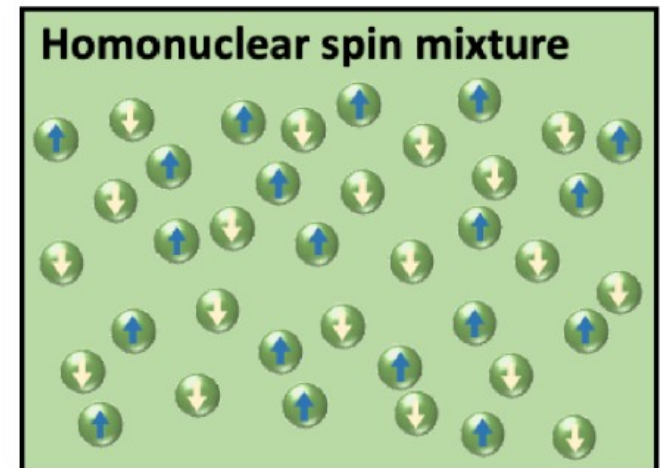
- **Mezclas** ultrafrías. Tipos de mezclas.
- Mezclas **Bose-Bose** y **gotas cuánticas**.
- **Impurezas** y **polarones**.

Mezclas y polarones

- **Mezclas** ultrafrías. Tipos de mezclas.
- Mezclas **Bose-Bose** y **gotas cuánticas**.
- **Impurezas** y **polarones**.

Mezclas de átomos ultrafríos

- Una **mezcla** de átomos ultrafríos corresponde a un sistema donde tenemos **varias especies** atómicas.
- Mezclas se pueden realizar de dos maneras:
 - **Mezcla homonuclear:**
Varios estados **hiperfinos** de un mismo isótopo.
 - **Mezcla heteronuclear:**
Distintos **isótopos**.
- Mezclas heteronucleares suelen ser experimentalmente más complejas.



Mezclas de átomos ultrafríos

- Mezclas de **dos componentes** son sistemas con dos especies atómicas.
- Gases de Fermi de spin $\frac{1}{2}$ corresponden a mezclas **Fermi-Fermi**.
- Las otras combinaciones corresponden a mezclas **Bose-Bose** y **Bose-Fermi**.
- Sin embargo, mezclas **multi-componente** también son estudiadas.
 - Sistemas **SU(N)**.

M. A. Cazalilla and A. M. Rey, Rep. Prog. Phys. 77, 124401 (2014).

Mezclas de átomos ultrafríos

- Mezclas de átomos permiten estudiar muchos fenómenos físicos:
 - Separaciones de fase.
 - Pairing no convencional.
 - Gotas y líquidos cuánticos.
 - Corrientes coherentes.
 - Entre muchos otros.

Mezclas y polarones

- Mezclas ultrafrías. Tipos de mezclas.
- Mezclas **Bose-Bose** y **gotas cuánticas**.
- Impurezas y polarones.

Mezclas Bose-Bose

- Una mezcla **Bose-Bose** corresponde a un sistema con **dos especies bosónicas**.
- Se vienen realizando experimentalmente por mucho tiempo.

JILA: C. J. Myatt *et al.*, Phys. Rev. Lett. **78**, 586 (1997). D. S. Hall *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81**, 1539 (1998). Mezcla ^{87}Rb $|F=1, m_f=2\rangle$ y ^{87}Rb $|2, 1\rangle$.
LENS: G. Modugno *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89**, 190404 (2002). Mezcla ^{40}K y ^{87}Rb .

- Una mezcla **balanceada** y de **igual masa** con dos especies A y B está descrita por:

$$\hat{H} = \sum_{\mathbf{k}\sigma} (\underbrace{\epsilon_{\mathbf{k}}}_{\text{Energía cinética}} - \underbrace{\mu}_{\text{Potencial químico}}) \hat{a}_{\mathbf{k}\sigma}^\dagger \hat{a}_{\mathbf{k}\sigma} + \frac{U}{2\mathcal{V}} \sum_{\mathbf{k}\mathbf{k}'\mathbf{q}\sigma} \hat{a}_{\mathbf{k}\sigma}^\dagger \hat{a}_{\mathbf{k}'\sigma}^\dagger \hat{a}_{\mathbf{k}'+\mathbf{q}\sigma} \hat{a}_{\mathbf{k}-\mathbf{q}\sigma}$$

↙ Interacción intra-especie repulsiva $U > 0$

$$+ \frac{U_{AB}}{\mathcal{V}} \sum_{\mathbf{k}\mathbf{k}'\mathbf{q}} \hat{a}_{\mathbf{k}A}^\dagger \hat{a}_{\mathbf{k}'B}^\dagger \hat{a}_{\mathbf{k}'+\mathbf{q}B} \hat{a}_{\mathbf{k}-\mathbf{q}A}$$

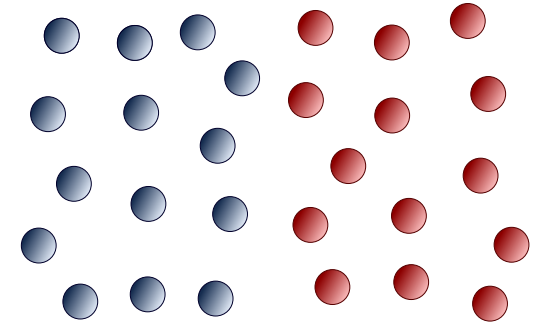
↙ Interacción inter-especie

$\epsilon_{\mathbf{k}} = \hbar^2 k^2 / 2m$
 $\sigma = A, B$

Separación de fase y colapso

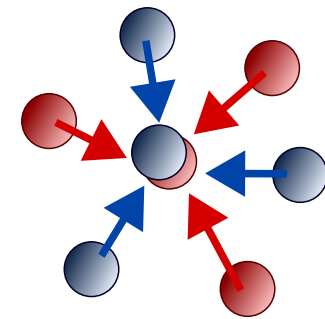
- A nivel de **campo medio** la mezcla muestra una **separación de fase** cuando:

$$U_{AB} > U > 0$$



- Por otro lado, **campo medio** predice que la mezcla **colapsa** para:

$$U_{AB} < -U < 0$$



Gotas cuánticas

- Hace una década, D. Petrov predijo que las **fluctuaciones cuánticas** pueden **prevenir el colapso** de la mezcla.
- En vez de colapsar, la mezcla forma una **gota cuántica**. En el límite termodinámico formaría un **líquido**.

D. S. Petrov, Phys. Rev. Lett. **115**, 155302 (2015).

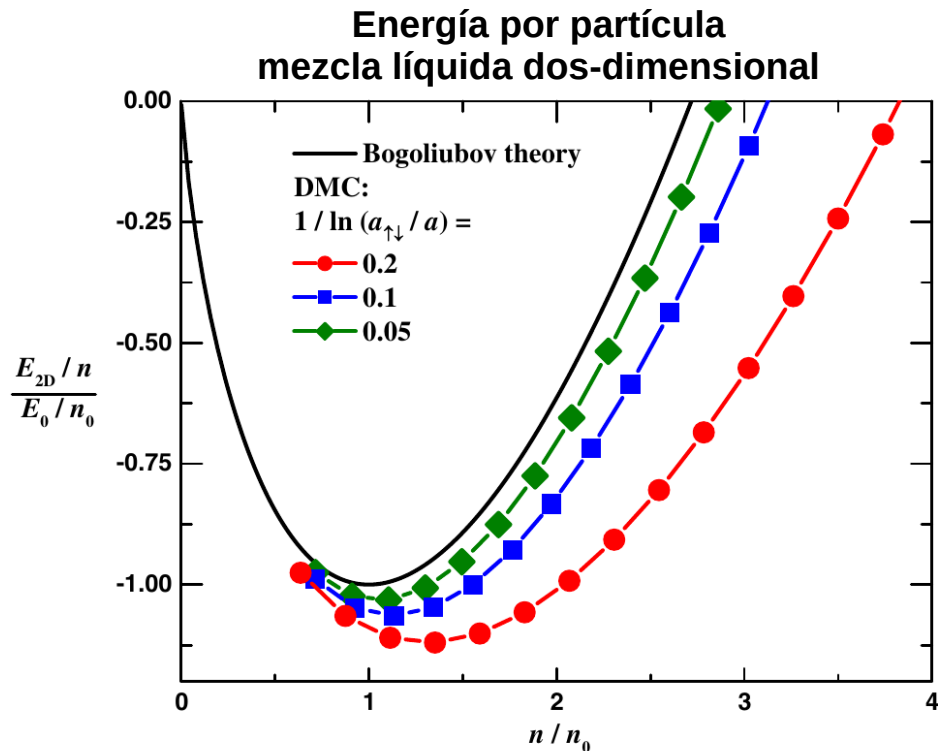


Figura tomada de D. S. Petrov and G. E. Astrakharchik, Phys. Rev. Lett. **117**, 100401 (2016).

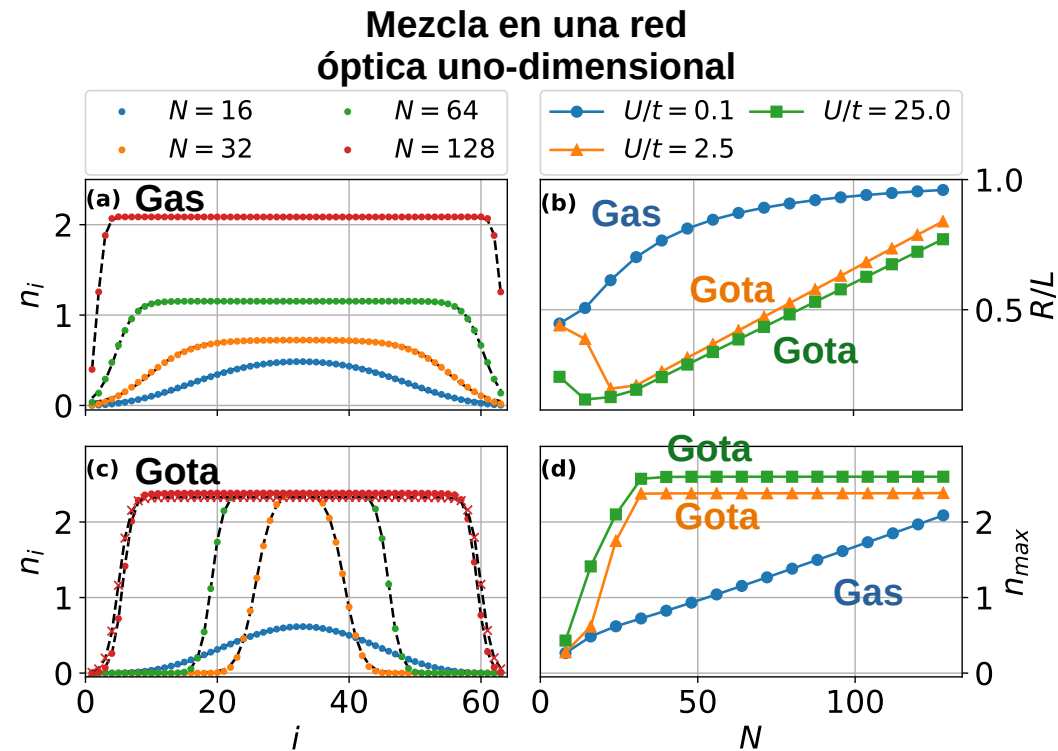


Figura tomada de I. Morera, G. E. Astrakharchik, A. Polls, and B. Juliá-Díaz Phys. Rev. Res. **2**, 022008(R) (2020).

Gotas cuánticas

- Gotas cuánticas se han logrado realizar **experimentalmente**.

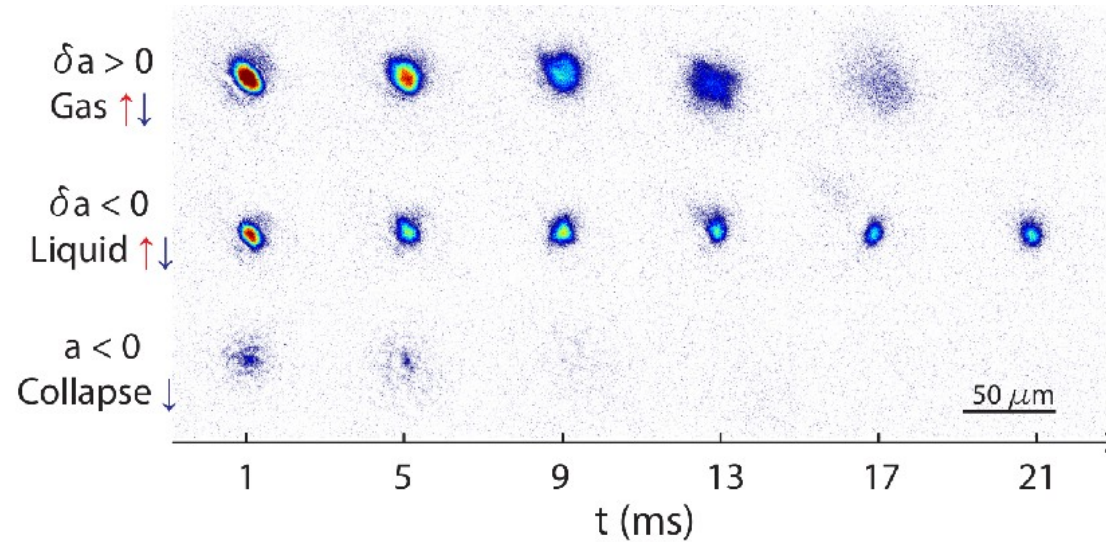


Figura tomada de: C. Cabrera *et al.*, Science **359**, 301 (2018). [ICFO]

- Desde entonces, el interés en estudiar gotas cuánticas en mezclas ha crecido enormemente.

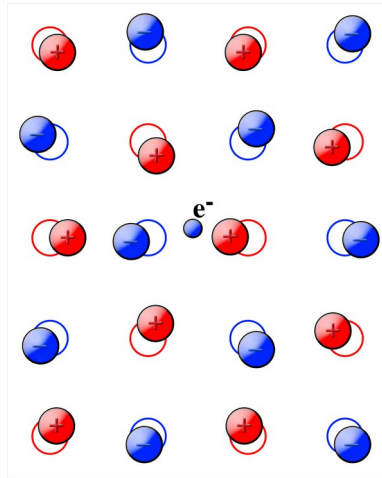
Z. H. Luo *et al.*, Front. Phys. **16**, 32201 (2021).

Mezclas y polarones

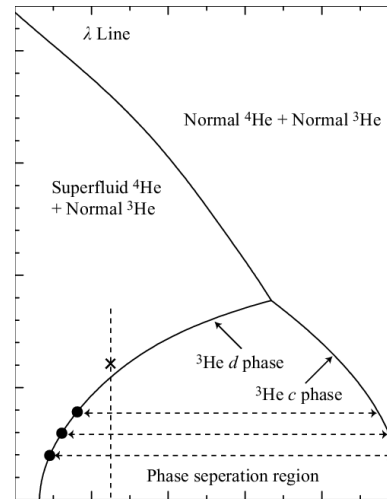
- Mezclas ultrafrías. Tipos de mezclas.
- Mezclas **Bose-Bose** y **gotas cuánticas**.
- **Impurezas y polarones**.

Impurezas y polarones

- El estudio de **impurezas en medios cuánticos** tiene una larga historia y es relevantes en muchas ramas de la física.

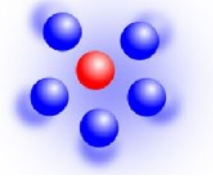


Electrones en cristal iónico
L. Landau and S. Pekar, Zh. Eksp. Teor. Fiz **18**, 419 (1948).

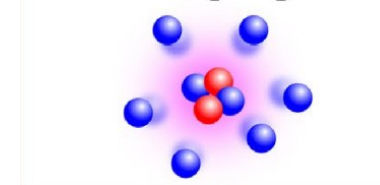


Impurezas de ^3He en ^4He .
G. Baym and C. Pethick, "Landau Fermi-Liquid Theory: Concepts and Application" (1991).

Polaronic proton



Polaronic alpha particle



Impurezas en sistemas nucleares
Tajima et al., AAPPS Bulletin, **34**, 9 (2024).

Impurezas y polarones

- Impurezas en medios cuánticos son usualmente entendidas como **cuasipartículas vestidas** llamados **polarones**.

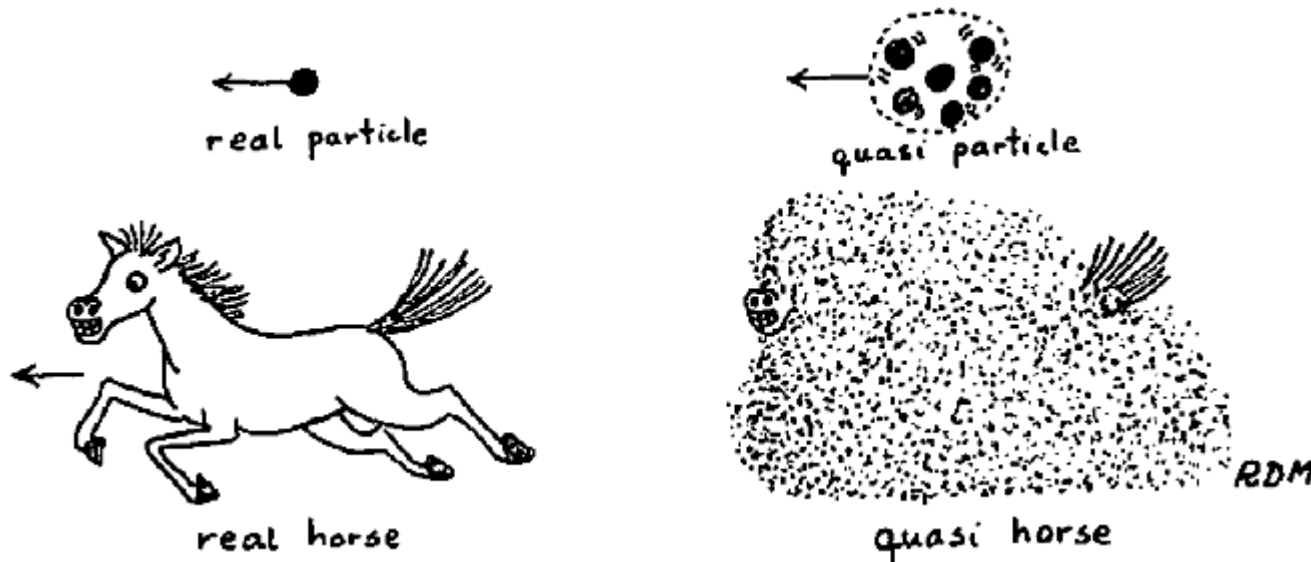
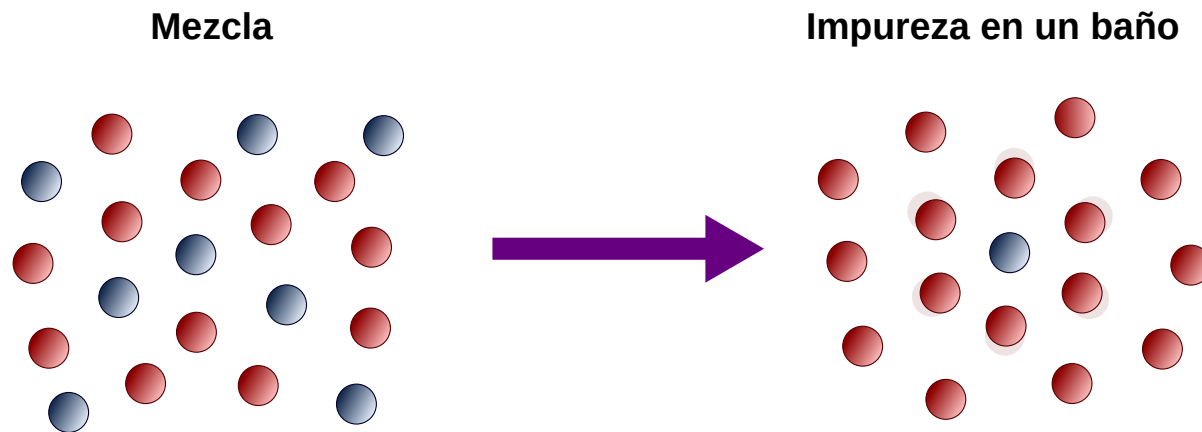


Figura tomada de R. D. Mattuck, *A guide to Feynman diagrams in the many-body problem* (Courier Corporation, 2012).

- Propiedades relevantes: **energía del polaron, masa efectiva, residuo.**
- Son ideales para estudiar sistemas de muchos cuerpos:
 - Transiciones de fase, transporte, topología, etc.

Polarones en gases de átomos ultrafríos

- El estudio de polarones se ha revitalizado gracias a su posible **realización experimental** en gases de átomos ultrafríos.
- Se prepara una mezcla con una **alta diferencia de población**, produciendo un **gas de impurezas**.
- Las propiedades del polarón se pueden medir experimentalmente para distintos parámetros.



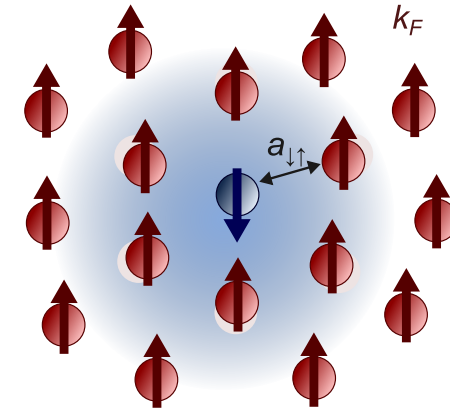
Polarón de Fermi

- El **polarón de Fermi** corresponde a una impureza inmersa en un **mar de Fermi no interactuante**.

$$\hat{H} = \sum_{\mathbf{k}, \sigma=\uparrow, \downarrow} (\underbrace{\varepsilon_{\mathbf{k}, \sigma}}_{\text{Energía cinética}} - \underbrace{\mu_{\sigma}}_{\text{Potencial químico}}) \hat{c}_{\mathbf{k}, \sigma}^{\dagger} \hat{c}_{\mathbf{k}, \sigma} + \frac{\underbrace{U_{\downarrow\uparrow}}_{\text{Interacción baño-impureza}}}{\mathcal{V}} \sum_{\mathbf{k} \mathbf{k}' \mathbf{k}''} \hat{c}_{\mathbf{k}, \uparrow}^{\dagger} \hat{c}_{\mathbf{k}', \downarrow}^{\dagger} \hat{c}_{\mathbf{k}' - \mathbf{k}'', \downarrow} \hat{c}_{\mathbf{k}' - \mathbf{k}'', \uparrow}$$

$$\varepsilon_{\mathbf{k}, \sigma} = \frac{k^2}{2m_{\sigma}}$$

$U_{\downarrow\uparrow}$: repulsivo o atractivo.



Parámetro: $k_F a_{\downarrow\uparrow}$

- El polarón de Fermi se ha producido experimentalmente desde **2009**.

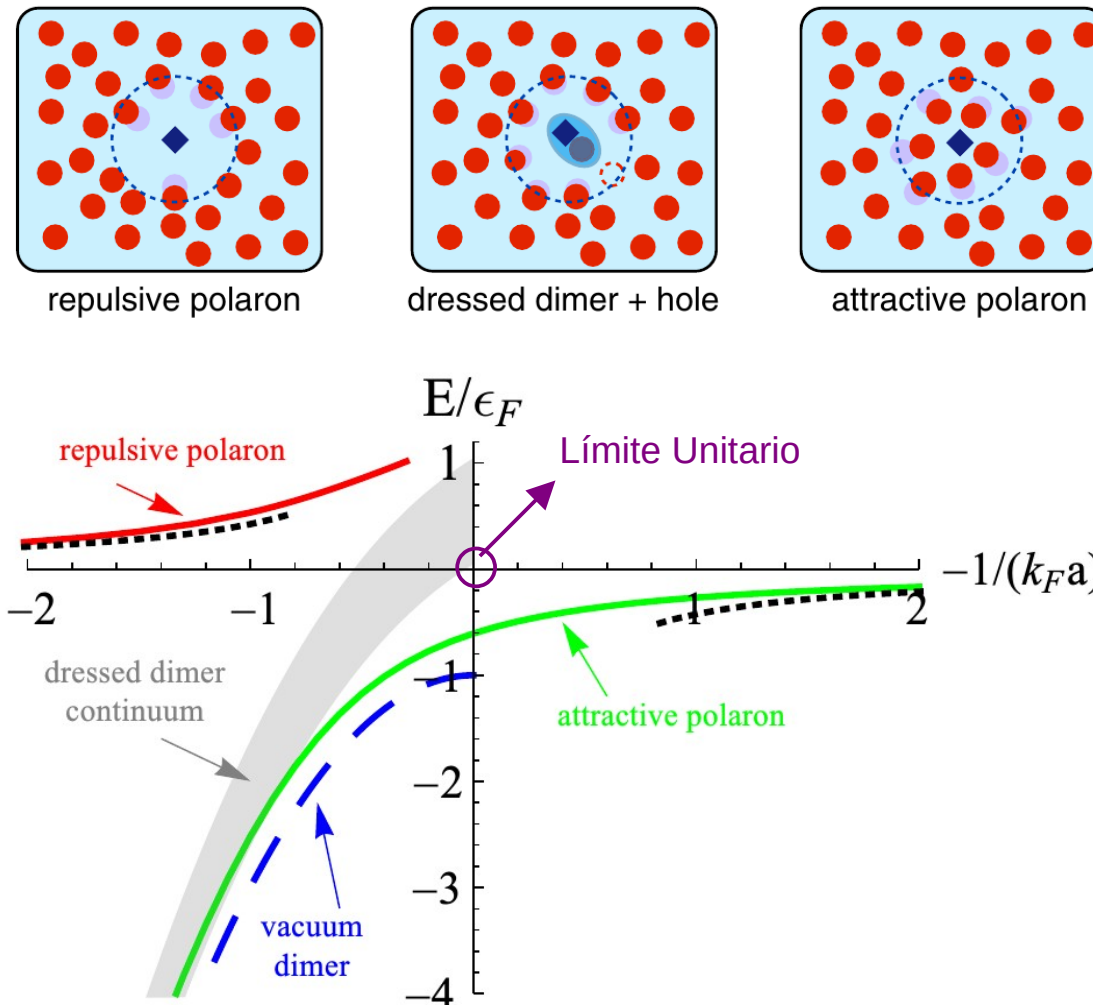
MIT: A. Schirotzek et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 230402 (2009).

- En la actualidad se encuentran teóricamente bien descritos.

P. Massignan et al., Rep. Prog. Phys. **77** 034401 (2014). M. M. Parish and J. Levinsen, arXiv:2306.01215.

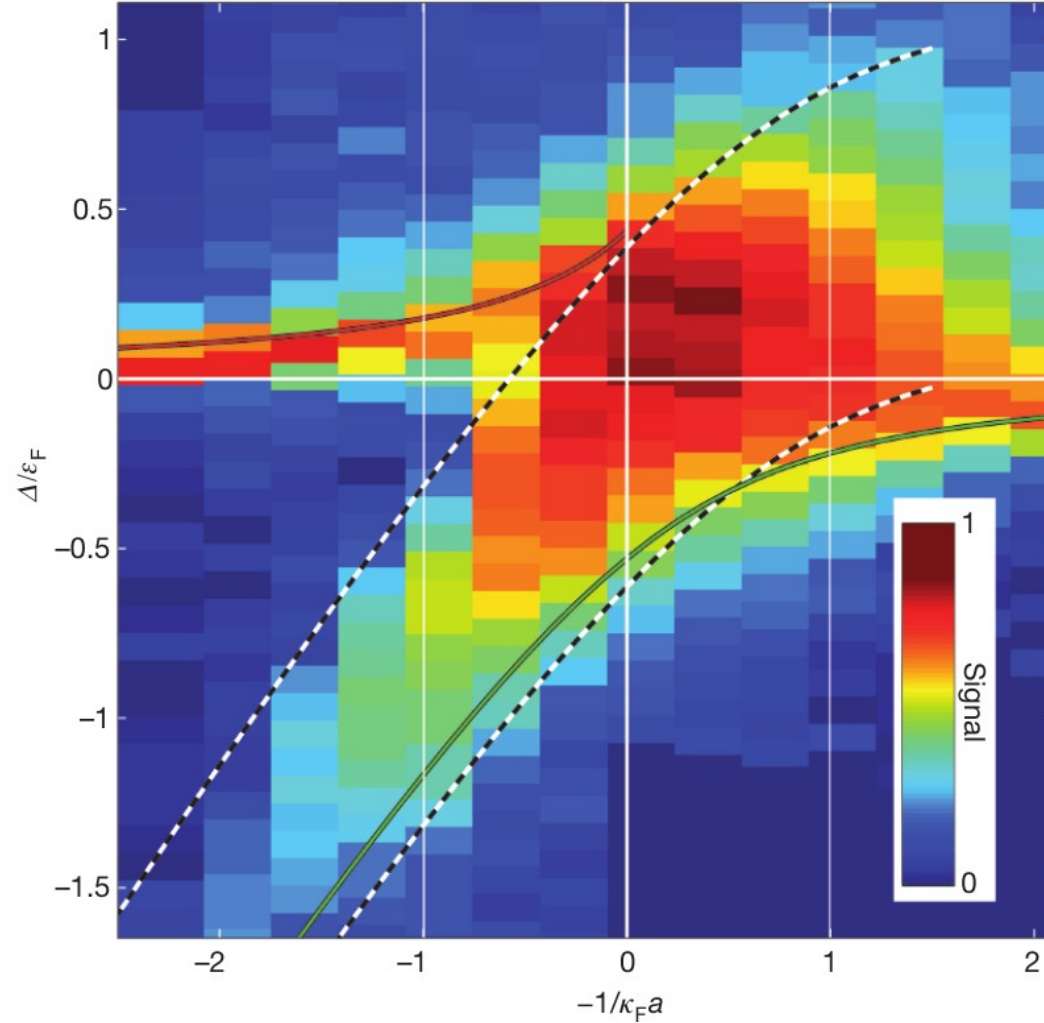
Polarón de Fermi

- En la rama **atractiva**, muestra una **fase polarón** y una **fase molécula** (dimerón).



Figuras tomadas de P. Massignan, M. Zaccanti and G. M. Bruun, Rep. Prog. Phys. **77**, 034401 (2014).

Polarón de Fermi

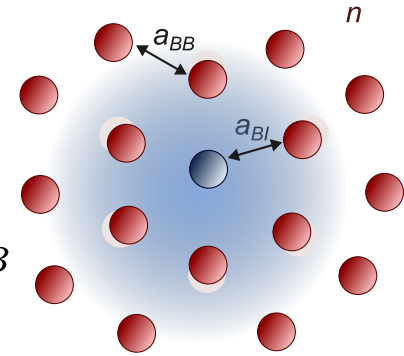


Respuesta espectral de impurezas de ^{40}K en un mar de Fermi de átomos de ^6Li .

Figura tomada de C. Kohstall *et al.*, Nature **485**, 615 (2012). [Innsbruck]

Polarón de Bose

- El polarón de Bose corresponde a una impureza inmersa en un gas de Bose



$$\hat{H} = \sum_{\mathbf{k}, \sigma=B, I} (\underbrace{\varepsilon_{\mathbf{k}, \sigma}}_{\text{Energía cinética}} - \underbrace{\mu_{\sigma}}_{\text{Potencial químico}}) \hat{a}_{\mathbf{k}, \sigma}^{\dagger} \hat{a}_{\mathbf{k}, \sigma} + \frac{U_{BB}}{2\mathcal{V}} \sum_{\mathbf{k}\mathbf{k}'\mathbf{k}''} \hat{a}_{\mathbf{k}, B}^{\dagger} \hat{a}_{\mathbf{k}', B}^{\dagger} \hat{a}_{\mathbf{k}'-\mathbf{k}'', B} \hat{a}_{\mathbf{k}'-\mathbf{k}'', B}$$

Interacción baño-baño

$$\varepsilon_{\mathbf{k}, \sigma} = \frac{k^2}{2m_{\sigma}}$$

$$+ \frac{U_{BI}}{\mathcal{V}} \sum_{\mathbf{k}\mathbf{k}'\mathbf{k}''} \hat{a}_{\mathbf{k}, B}^{\dagger} \hat{a}_{\mathbf{k}', I}^{\dagger} \hat{a}_{\mathbf{k}'-\mathbf{k}'', I} \hat{a}_{\mathbf{k}'-\mathbf{k}'', B}$$

Interacción baño-impureza

Parámetros: $n^{1/d} a_{BB}$
 $n^{1/d} a_{BI}$

U_{BI} : repulsivo o atractivo.
 $U_{BB} > 0$: repulsivo

- El polarón de Bose fue finalmente producido experimentalmente en **2016**.

MIT: M.-G. Hu *et al.*, PRL **117**, 055301 (2016). Aarhus: N. B. Jørgensen *et al.*, PRL **117**, 055302 (2016).

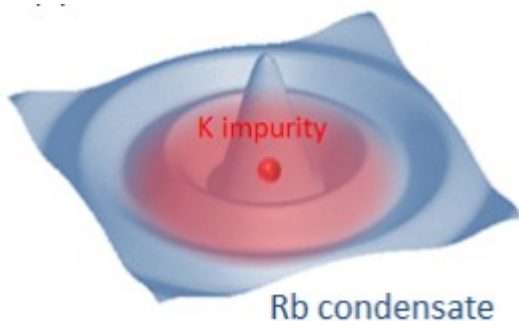
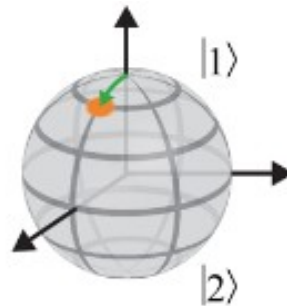


Ilustración del polarón de Bose
M.-G. Hu *et al.*, PRL **117**, 055301 (2016).



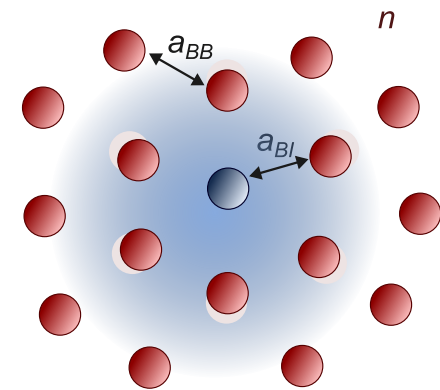
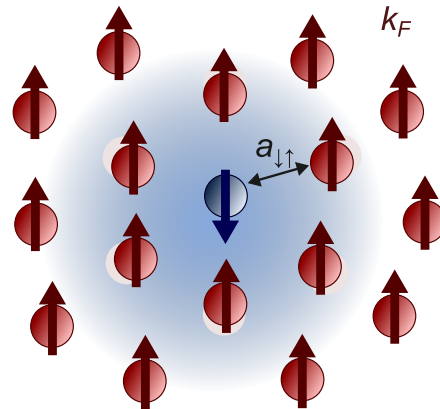
Pulsos de radio-frecuencia transfieren átomos de ^{39}K en el estado $|1\rangle$ al estado $|2\rangle$.
N. B. Jørgensen *et al.*, PRL **117**, 055302 (2016).

- Su descripción teórica ha probado ser desafiante.

F. Grusdt *et al.*, arXiv:2410.09413.

Polarones de Fermi y de Bose

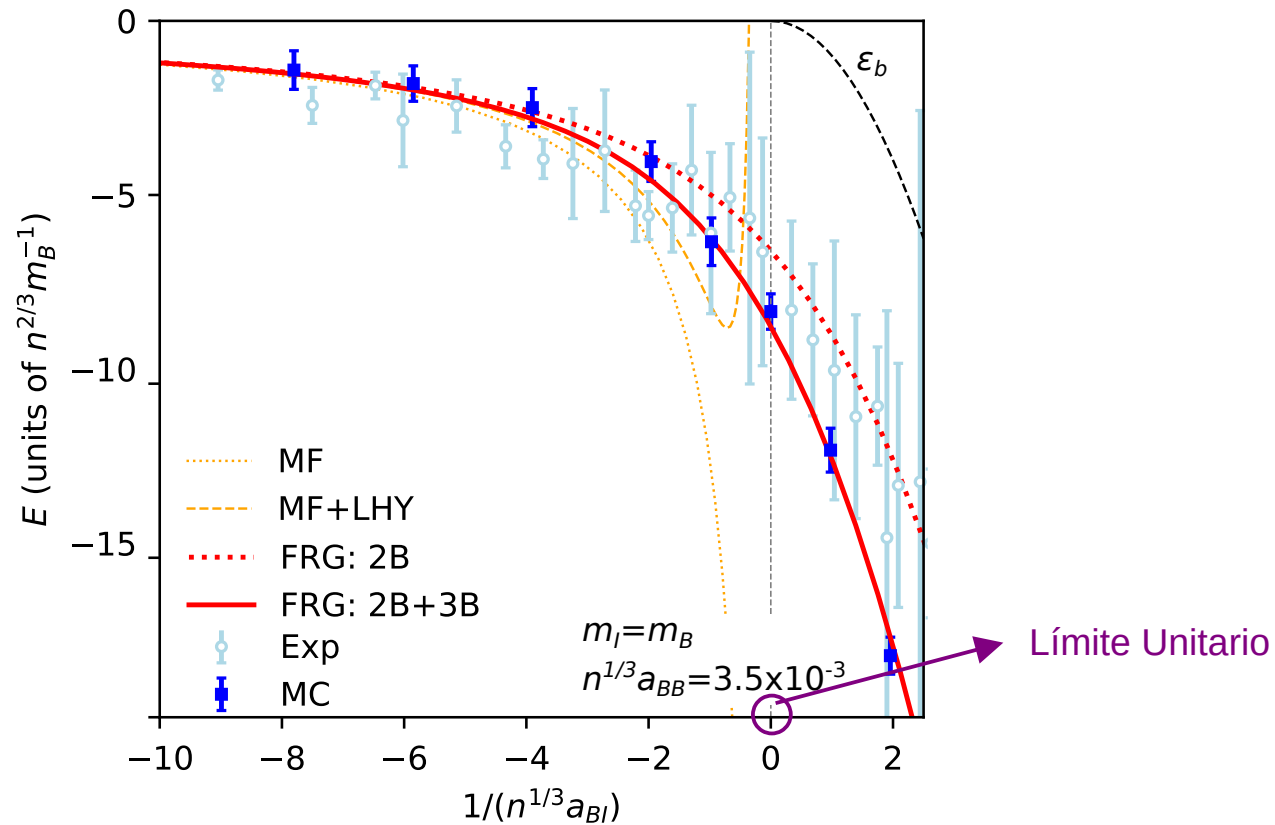
	Polarón de Fermi	Polarón de Bose
Baño	Mar de Fermi no interactuante	Gas de Bose superfluido
Estado fundamental	Transición polarón-molécula	Crossover polarón-molécula
Física de tres cuerpos	Despreciable	Importante



- Los polarones de Bose son más desafiantes que sus contrapartes fermiónicas. Sin embargo, ofrecen **más física!**
- Existen diversas técnicas teóricas para estudiarlos. QMC, técnicas variacionales, matriz- T , RG, entre otros.

F. Grusdt *et al.*, arXiv:2410.09413.

Polarón de Bose

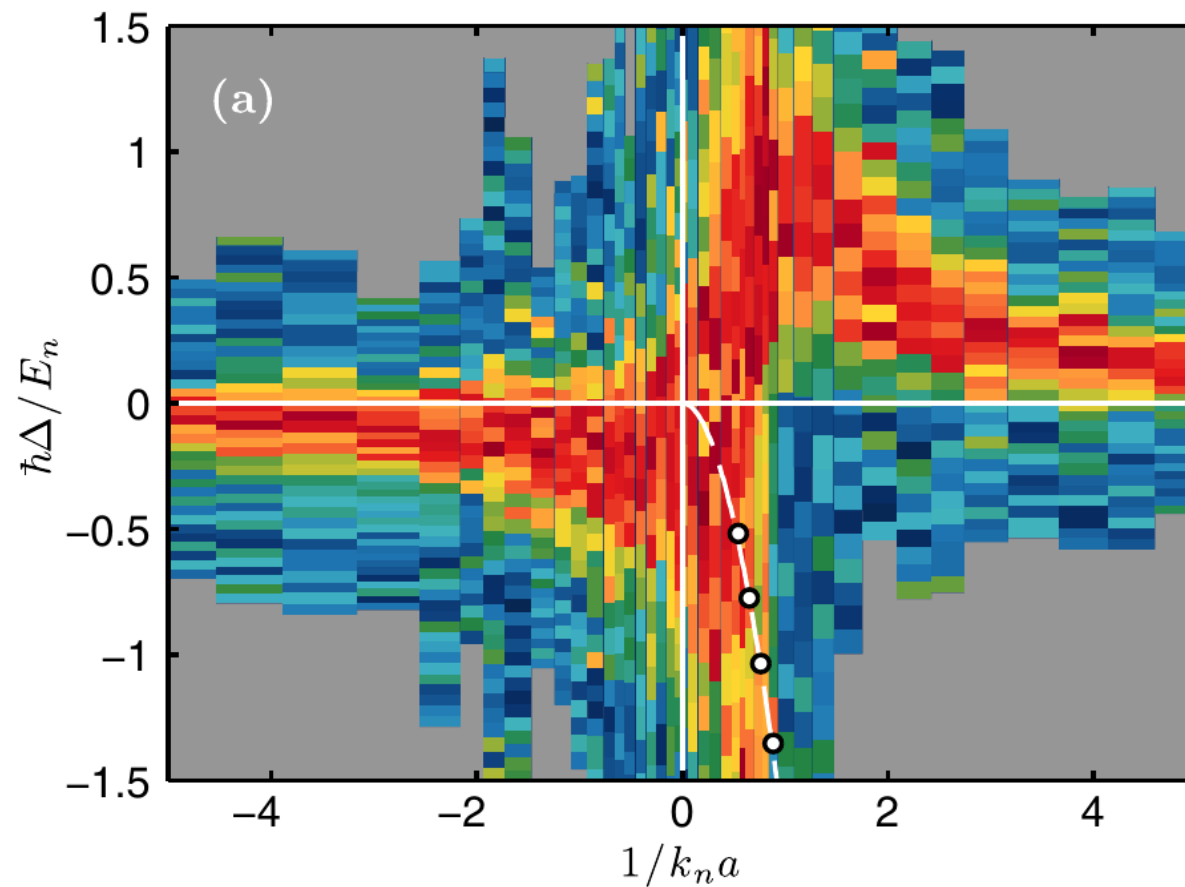


F. Isaule, I. Morera, P. Massignan, and B. Juliá-Díaz, Phys. Rev. A **104**, 023317 (2021).

n : Densidad del baño
 a_{BB} : longitud de scattering baño-baño
 a_{BI} : longitud de scattering baño-impureza

Exp (izquierda): N.B Jørgensen *et al.*, PRL **117**, 055302 (2016).
 QMC: L. Peña Ardila *et al.*, PRA **99**, 063607 (2019).

Polarón de Bose



Respuesta espectral de impurezas de $^{39}\text{K} |1,0\rangle$ en un condensado de $^{39}\text{K} |1,-1\rangle$.

Crossover entre polarones de Fermi y de Bose

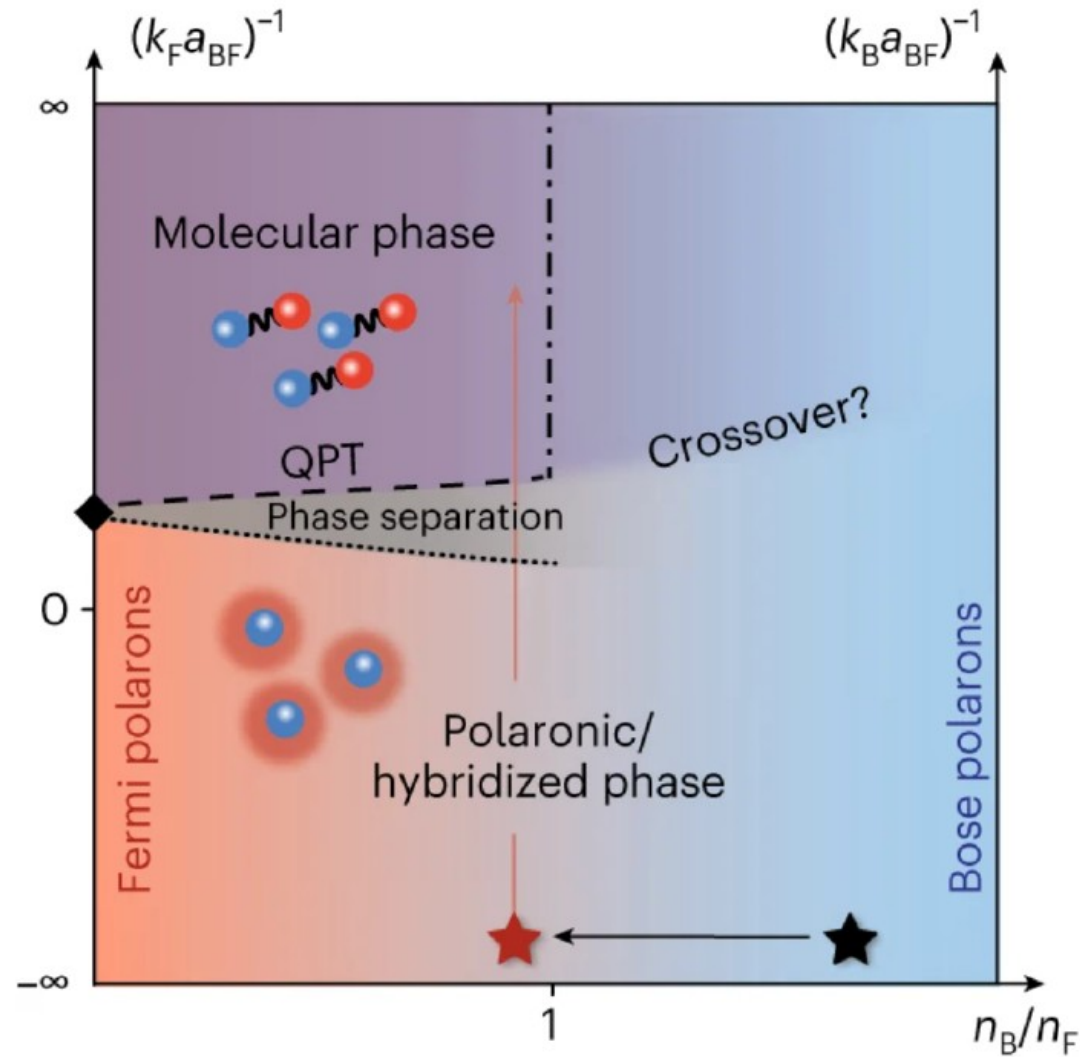
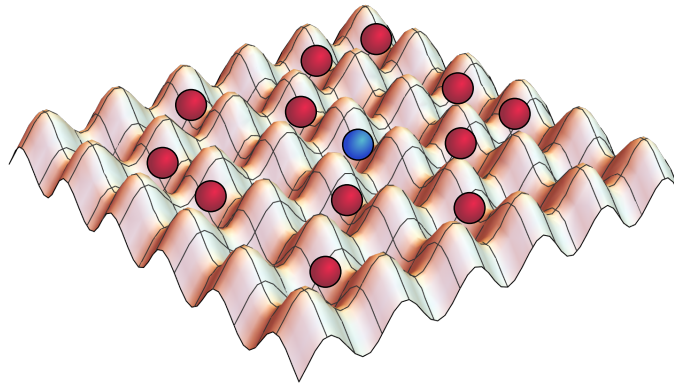


Figura tomada de F. Grusdt, N. Mostaan, E. Demler, L.A. Peña Ardila, arXiv:2410.09413 (2024).

Otros tipos de polarones

- Átomos en **redes ópticas** ofrecen un nuevo escenario para estudiar física de impurezas (**lattice polarons**).

V. E. Colussi, F. Caleffi, C. Menotti, and A. Recati Phys. Rev. Lett. **130**, 173002 (2023).



- Impurezas inmersas en **gases de Fermi de spin $\frac{1}{2}$** (**crossover polarons**) son el siguiente paso luego de entender polarones de Fermi y Bose.

H. Hu, J. Wang, J. Zhou, and X.-J. Liu, Phys. Rev. A **105**, 023317 (2022).

Conclusiones

- **Mezclas de varias especies** de átomos permiten estudiar **fases cuánticas exóticas**.
- Dentro de éstas, las **gotas cuánticas** han captado gran interés al ser un gran ejemplo de la importancia de las **fluctuaciones cuánticas**.
- Mezclas con una **gran diferencia de población** permiten realizar sistemas de **impurezas** y estudiar física de **polarones**.