



UC | Chile

Introducción a los átomos ultrafríos

Felipe Isaule

Investigador Postdoctoral ANID
Instituto de Física, PUC

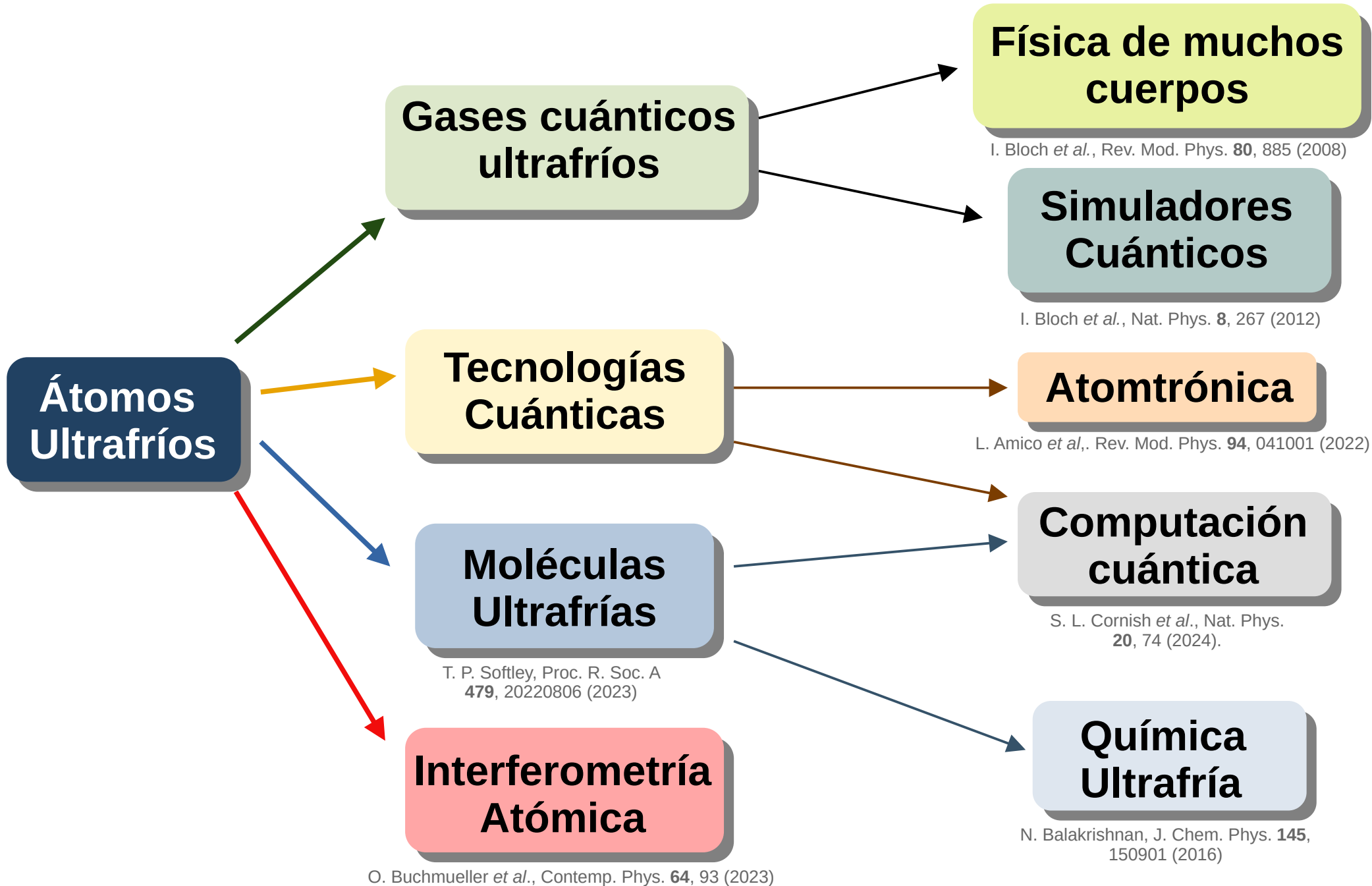
1ra Escuela Chilena de Átomos Ultrafríos
20/01/2025, PUC, Santiago, Chile

Literatura

- C. J. Foot, *Atomic physics* (Oxford university press, 2005).
- C. J. Pethick and H. Smith, *Bose-Einstein Condensation in Dilute Gases* (Cambridge University Press, Cambridge, 2008).
- I. Bloch, J. Dalibard, and W. Zwerger, *Rev. Mod. Phys.* **80**, 885 (2008).
- L. P. Pitaevskii and S. Stringari, *Bose-Einstein Condensation and Superfluidity* (Oxford University Press, Oxford, 2016).

¿Qué son los **átomos ultrafríos**? ¿Por qué se han vuelto tan **relevantes** en las últimas tres décadas? ¿Qué tipo de **sistemas físicos** se pueden estudiar?

¿Por qué enfriar átomos?



Los átomos ultrafríos son interdisciplinarios

**Física Atómica
y Molecular**

C. Foot, *Atomic physics* (Oxford university press, 2005).

**Óptica
cuántica**

I. Mekhov and H. Ritsch, *J. Phys. B* **45**, 102001 (2012)

**Materia
Condensada**

M. Lewenstein *et al.*, *Adv. Phys.*, **56**, 243 (2007)

**Simulaciones
Numéricas**

A. Minguzzi *et al.*, *Phys. Rep.* **395**, 223 (2004).

**Física
Nuclear**

N. T. Zinner and A. S. Jensen,
J. Phys. G **40**, 053101 (2013)

Historia: Enfriamiento y atrapamiento

- En los 80's se desarrollaron técnicas **experimentales** con láser de **enfriamiento y atrapamiento** de átomos e iones.

H. J. Metcalf and P. van der Straten, *Laser cooling and trapping*, Springer Science & Business Media (1999).

- Algunos hitos:

- 1975: Primeras propuestas para **enfriamiento Doppler**.

T. W. Hänsch and A. L. Schawlow, *Opt. Commun.* **13**, 68 (1975).
D. Wineland and H. Dehmelt, *Bull. Am. Phys. Soc.* **20**, 637 (1975).

- ~1980: **Desaceleramiento láser** de átomos neutros.

W. D. Phillips and H. Metcalf, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 596 (1982).

- 1985: **Molasas ópticas** para enfriar hasta los μK .

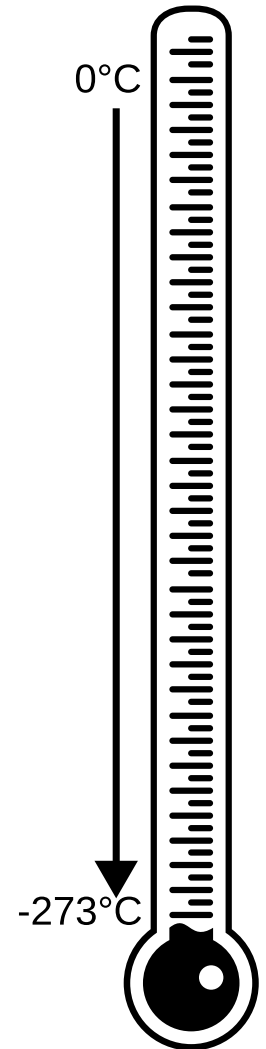
S. Chu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **55**, 48(1985).

- 1987: **Trampas magneto-ópticas (MOT)** y enfriamiento **sub-Doppler** para enfriar bajo los μK .

E. L. Raab *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 2631 (1987). Paul D. Lett *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 169 (1988).

- 1997: **Premio Nobel** a S. Chu, C. Cohen-Tannoudji y W. D. Phillips.

W. D. Phillips, *Rev. Mod. Phys.* **70**, 721 (1998).



¿Por qué enfriar átomos?: Mecánica Cuántica

- A **temperaturas ultrafrías** podemos observar **efectos cuánticos**.

Degeneración cuántica:

$$n\lambda_{\text{dB}}^3 \gg 1 \longrightarrow$$

Longitud de de Broglie es mucho más grande que la distancia entre partículas.

Longitud de de Broglie:

$$\lambda = \sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{mk_B T}}$$

n : densidad
 m : masa átomo
 T : Temperatura

- Un **gas** con una densidad “*típica*” de $n^{-1/3} \simeq 100\text{nm}$ y a una temperatura de $T=100\text{nK}$:

$$\lambda_{\text{dB}} \sim 1 \mu\text{m} \longrightarrow n\lambda_{\text{dB}}^3 \sim 10^3.$$

Condensación de Bose-Einstein

- Un **condensado de Bose-Einstein (BEC)** es un estado de la materia donde bosones ocupan **macroscópicamente el estado fundamental**.

S. N. Bose, *Zeitschrift für Physik* **26**, 178 (1924).

A. Einstein, *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften* **1**, 3 (1924)

- Es una manifestación **macroscópica de la mecánica cuántica**.

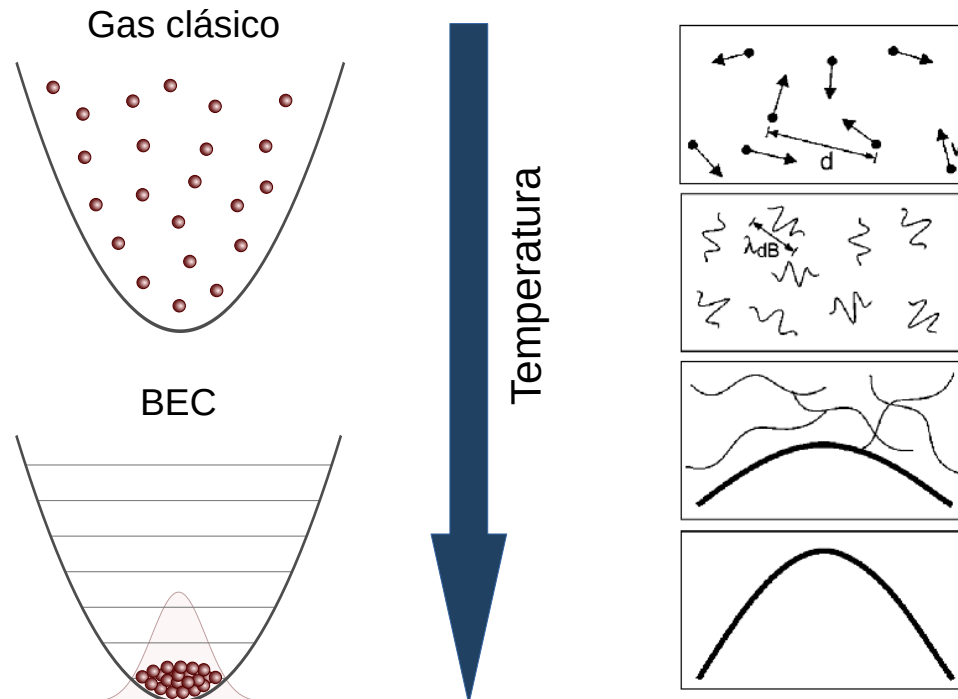


Figura tomada de W. Ketterle, *Rev. Mod. Phys.* **74**, 1131 (2002)

Historia: Gases cuánticos degenerados

- Las técnicas de enfriamiento y atrapamiento permitieron la realización de **gases cuánticos**.

- Algunos hitos:

- 1995: Realización experimental un **BEC**.

JILA (^{87}Rb): M. H. Anderson *et al.*, Science **269**, 198 (1995).

MIT (^{23}Na): K. B. Davis *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75**, 3969 (1995).

- 2001: **Premio Nobel** a E. Cornell y C. Wieman y W. Ketterle.

E. Cornell and C. E. Wieman, Rev. Mod. Phys. **74**, 875 (2002). W. Ketterle, Rev. Mod. Phys. **74**, 1131 (2002).

- 2001: **Gas degenerado de Fermi**.

JILA: B. DeMarco, S. B. Papp, and D. S. Jin, Phys. Rev. Lett. **86**, 5409 (2001).

- 2002: **Transición aislante-superfluido** de bosones en **redes ópticas**.

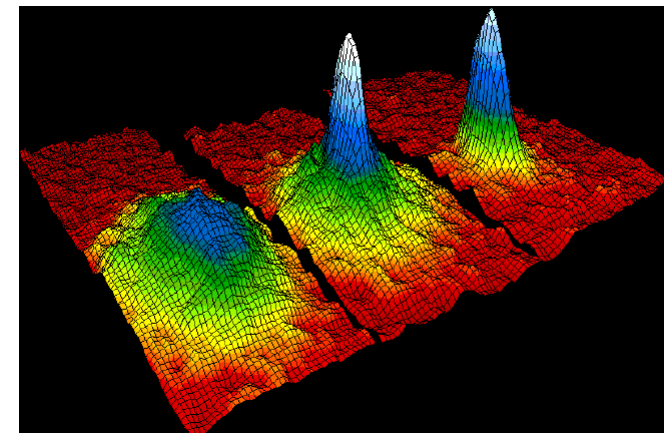
MPQ: M. Greiner *et al.*, Nature **415**, 39 (2002).

- 2017: **Supersólidos** en BECs.

MIT: J. R. Li *et al.*, Nature **543**, 91 (2017). ETH Zürich: J. Léonard *et al.*, Nature **543**, 87 (2017).

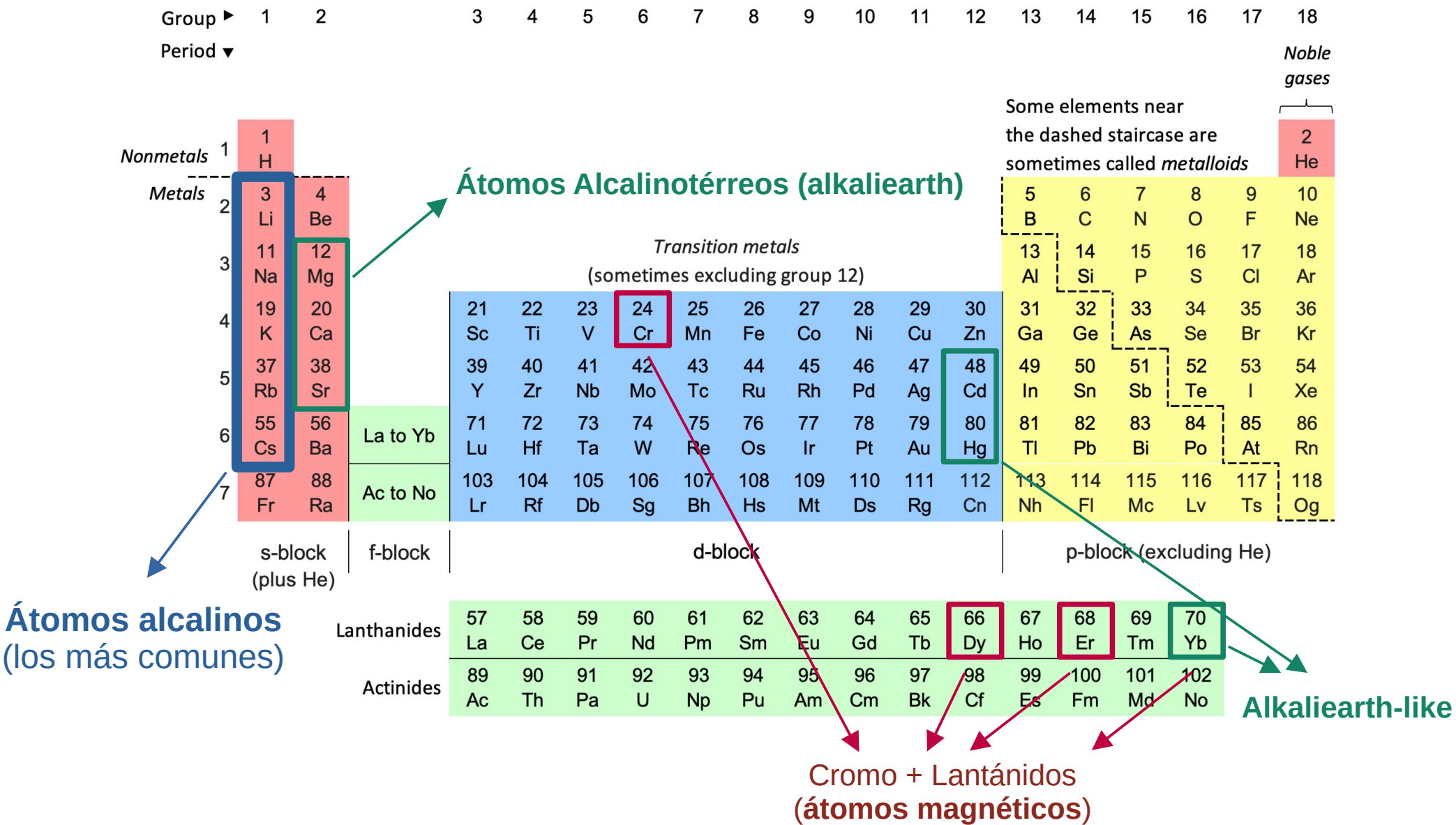
- 2023: Realización de un **condensado de moléculas polares**.

COLUMBIA: N. Bigagli *et al.*, Nature **631**, 289 (2024).



Distribución de velocidad de un gas de ^{87}Rb .

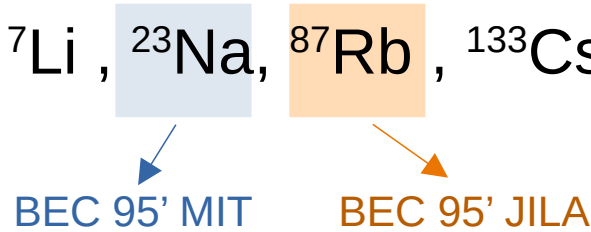
¿Cuáles átomos se enfrían?



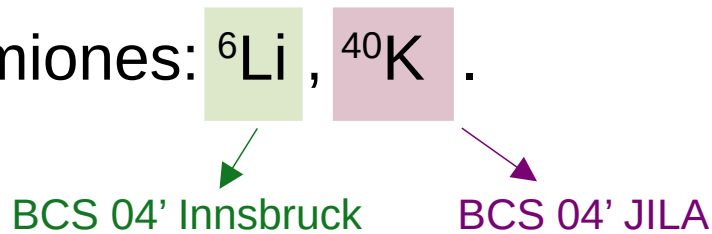
Estadística

- El isótopo dicta la estadística.

– Bosones: ${}^7\text{Li}$, ${}^{23}\text{Na}$, ${}^{87}\text{Rb}$, ${}^{133}\text{Cs}$.



– Fermiones: ${}^6\text{Li}$, ${}^{40}\text{K}$.



- Es decir, se puede escoger la estadística de las partículas.

Confinamiento

- En primera instancia, átomos ultrafríos son confinados en **trampas armónicas**:

$$V_{\text{ext}}(\vec{r}) = \frac{m}{2} (\omega_x^2 x^2 + \omega_y^2 y^2 + \omega_z^2 z^2).$$

- Las **frecuencias ω_i se pueden controlar**, permitiendo confinar gases de átomos en **geometrías quasi uno-dimensionales** (cuchufli) o **dos-dimensionales** (pizza).



Confinamiento

- Es también posible confinar átomos en **anillos**,

L. Amico, A. Osterloh and F. Cataliotti, Phys. Rev. Lett. **95**, 063201 (2005). O. Morizot *et al.*, Phys. Rev. A **74**, 023617 (2006).



cajas,

A. L. Gaunt, T. F. Schmidutz, I. Gotlibovych, R. P. Smith, and Z. Hadzibabic, Phys. Rev. Lett. **110**, 200406 (2013).



e incluso **cáscaras esféricas en microgravedad.**

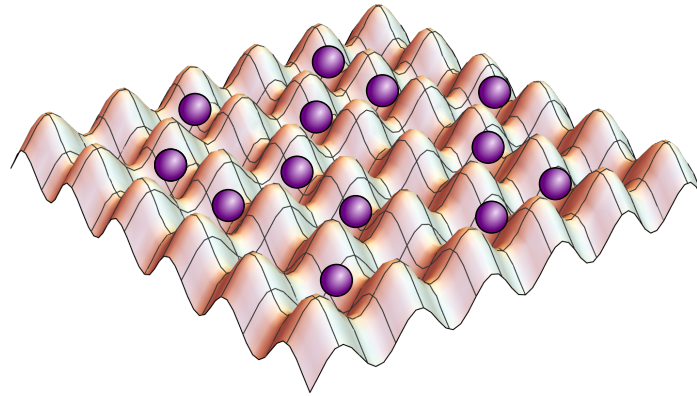
R. A. Carollo *et al.*, Nature **606**, 281 (2022). A. Tononi, and L. Salasnich, Phys. Rep. **1072**, 1 (2024).



Redes ópticas

- Es también posible confinar átomos en **redes ópticas**.

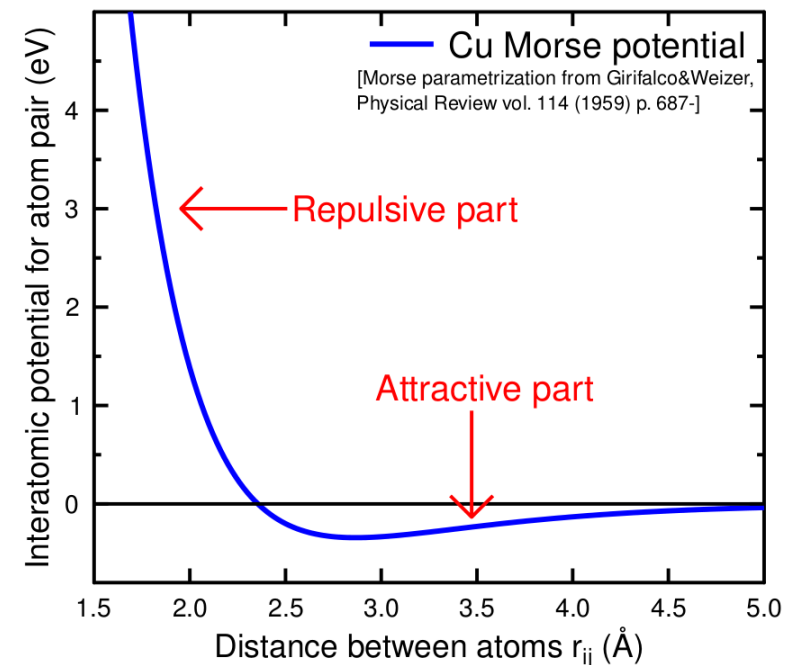
I. Bloch, Nat. Phys. 1, 23 (2005).



- Átomos ultrafríos en redes ópticas son ideales para **simular** sistemas de **materia condensada**.

Interacciones inter-atómicas

- La interacción inter-atómica es **repulsiva a corto alcance (Coulomb)**.
- Pero tiene una cola **atractiva de largo alcance (van der Waals)**.
- Para entender la interacción inter-atómica debemos analizar el problema de **scattering** entre **dos átomos**.



Interacciones inter-atómicas

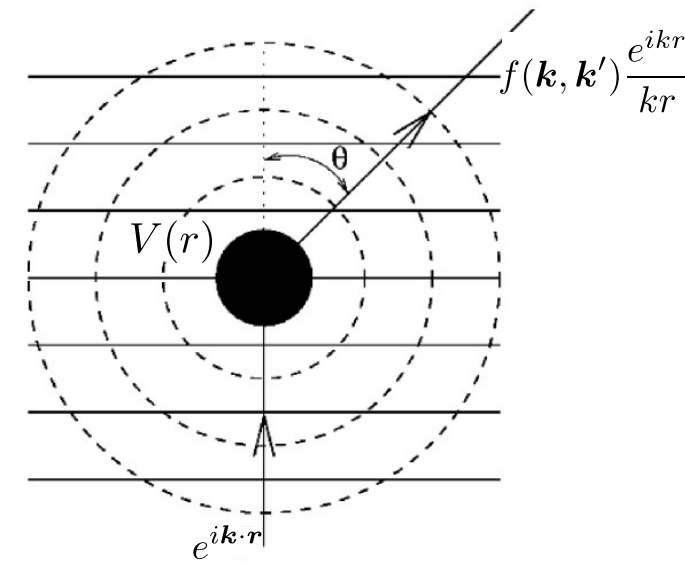
- Expansión en **ondas parciales**:

$$f(\mathbf{k}, \mathbf{k}') = \sum_{\ell=0}^{\infty} (2\ell + 1) f_{\ell}(k) P_{\ell}(\cos \theta).$$

Amplitud de scattering

$$1 + 2ikf_{\ell}(k) = e^{2i\delta_{\ell}(k)}$$

Phase shifts



- En experimentos se tiene que $kr_{\text{eff}} \ll 1$ (**bajas energías y corto alcance**).

Velocidad átomo: $v \sim 1\text{mm/s}$ (**ultralento**)

- Por tanto, la interacción es dominada por la **onda-s**.

$$f_0(k) = -\frac{1}{a^{-1} - k^2 r_{\text{eff}}/2 + ik}$$

a : longitud de scattering de onda-s
 r_{eff} : rango efectivo

$$a = -\lim_{k \rightarrow 0} \frac{\delta_0(k)}{k}$$

- La interacción está completamente definida por los observables a y r_{eff} .

Interacciones inter-atómicas

- Teóricamente, se puede utilizar cualquier potencial de corto alcance que recupere los mismos observables de scattering.
- Usualmente se utiliza un **potencial de contacto**.

$$\begin{array}{ccc}
 a & \longrightarrow & V(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) = g\delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2). \\
 \text{Longitud de scattering} & & \begin{array}{cc} \text{Potencial inter-atómico} & \text{Potencial de contacto} \\ \text{efectivo} & \end{array}
 \end{array}$$

- La longitud de scattering a (observable) define la constante de la interacción de contacto g (teoría).

$$\begin{array}{ccc}
 \mathcal{T}(k) = -\frac{4\pi\hbar^2}{m} f_0(k) & \longrightarrow & \text{Gases dilu\xeddos} \\
 \text{Matriz } T \text{ de scattering} & & n \sim 10^3 \frac{\text{atomos}}{\text{cm}^3} \quad r_{\text{eff}} \approx 0 \\
 & & \longrightarrow & g = \frac{4\pi\hbar^2 a}{m}
 \end{array}$$

Interacciones inter-atómicas

- La interacción se puede **controlar libremente** con técnicas de **resonancias de Feshbach**.

C. Chin *et al.*, Rev. Mod. Phys. **82**, 1225 (2010).

- Es decir, se puede **controlar la longitud de scattering a** .
- Este control no es posible en otros sistemas físicos.

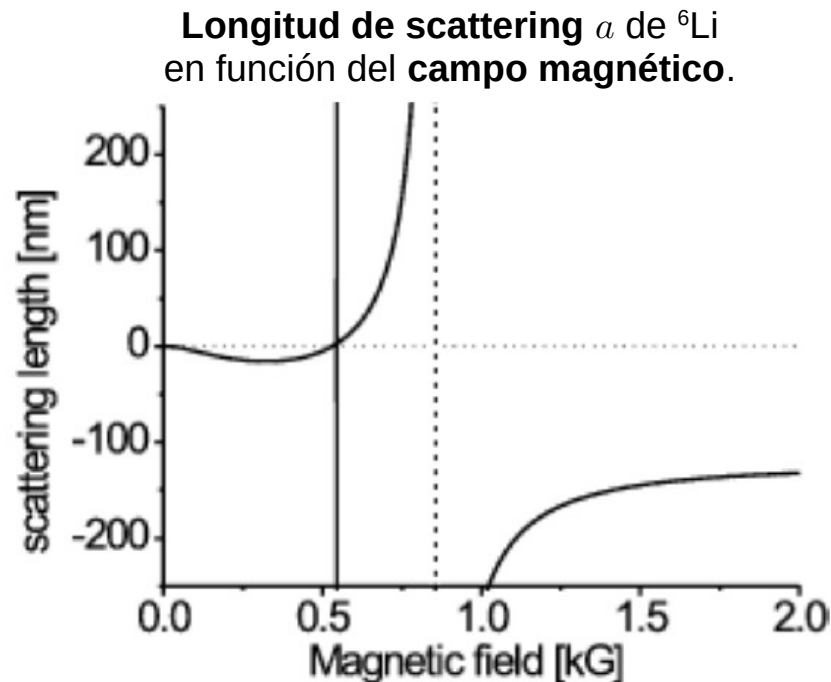


Figura tomada de: T. Bourdel *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 020402 (2003).

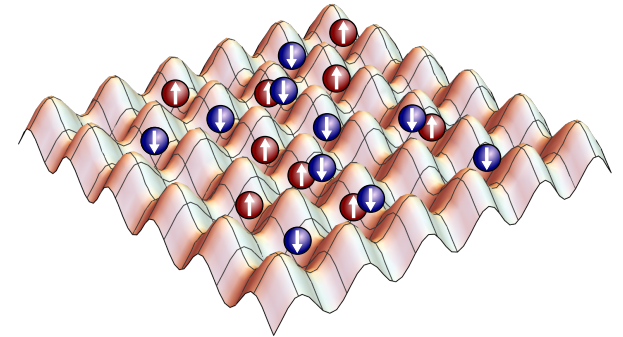
Simuladores cuánticos

- Sistemas de átomos ultrafríos pueden ser utilizados como **simuladores cuánticos** de otros sistemas físicos.

R. P. Feynman, Int. J. Theor. Phys. 21, 467 (1982).

- Ejemplo: Átomos fermiónicos de spin $\frac{1}{2}$ en una red óptica se modelan con un **modelo de Hubbard**.

D. Jaksch and P Zoller, Annals of physics 52, 315 (2005).



$$\hat{H} = -t \sum_{\sigma=\uparrow,\downarrow} \sum_{\langle i,j \rangle} \left(\hat{c}_{\sigma,i}^\dagger \hat{c}_{\sigma,j} + \text{h.c.} \right) + U \sum_i \hat{n}_{\uparrow,i} \hat{n}_{\downarrow,i}.$$

- Corresponde al **mismo Hamiltoniano** utilizado para describir **electrones en sólidos**.

J. Hubbard, Proc. R. Soc. Lond. A 276, 238 (1963).

- Sin embargo, con átomos ultrafríos la constante U se puede **controlar** con resonancias de Feshbach.

Sistemas de muchos cuerpos

- Sistemas de átomos ultrafríos permiten realizar **nuevos sistemas de muchos cuerpos y fases cuánticas.**
 - Condensados y superfluidos.
 - Supersólidos.
 - Aislantes de Mott.
 - Gotas y líquidos cuánticos.
 - Formación de pares y clusters.

Sistemas de muchos cuerpos

- Teóricamente, los sistemas de muchos cuerpos pueden ser **muy desafiantes de describir**.
- Sistemas **fuertemente interactuantes**, **transiciones de fase**, etc, suelen requerir ser descritos por técnicas sofisticadas.
 - Simulaciones de **Monte-Carlo**, **DMRG**, técnicas **diagramáticas**, **diagonalización exacta**, etc.
- No existe la mejor técnica.
- El método a utilizar depende del problema.
 - Sistema físico (**dimensión**, **estadística**, **interacciones**, etc.).
 - Qué se quiere describir (**estado fundamental**, **excitaciones**, **dinámica**, etc).



Conclusiones

- Los átomos ultrafríos es una de las ramas de la física que **más ha avanzado en las últimas tres décadas**.
- Se encuentran en la **intersección** de varias ramas de la física.
- Ofrecen un grado de **control** sin precedentes.
- Tienen potenciales **aplicaciones tecnológicas**.
- Pero también tienen un gran interés académico para entender **sistemas de muchos cuerpos**.
- Es un área tremendamente **activa**, con constante desarrollo **teórico y experimental**.