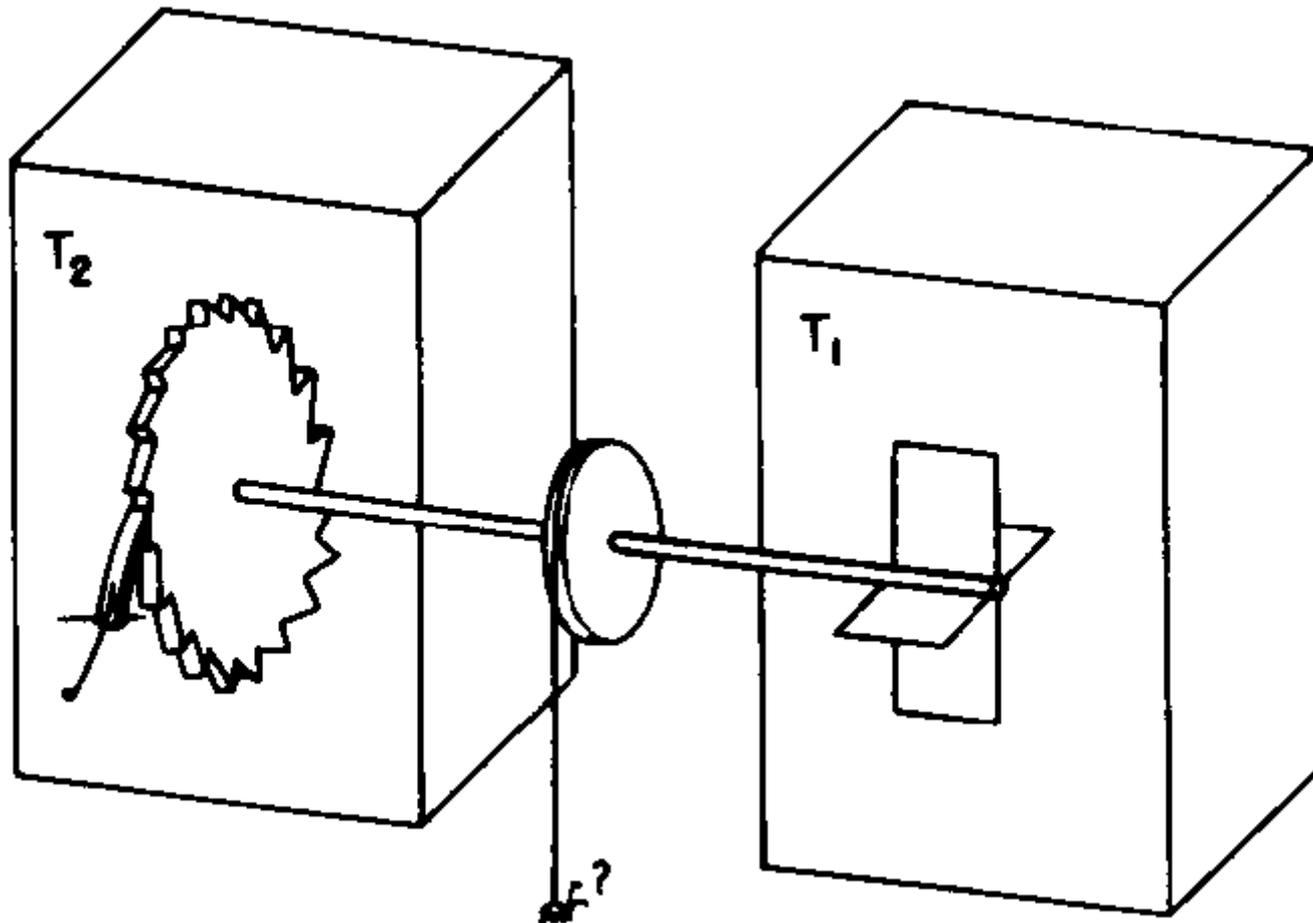


# Control y Estabilización del Movimiento de Átomos fríos en redes ópticas mediante fuerzas alternas

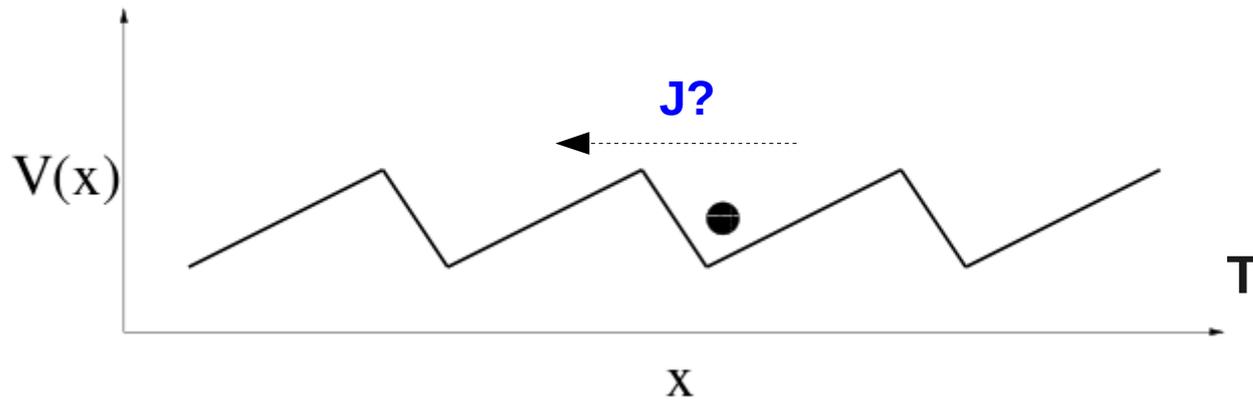
Alejandro B. Kolton  
Centro Atómico Bariloche

*Dynamics stabilization and transport coherency in a rocking ratchet for cold atoms,*  
A.B. Kolton, F. Renzoni, Phys. Rev. A 81, 013416 (2010)

# Ratchets

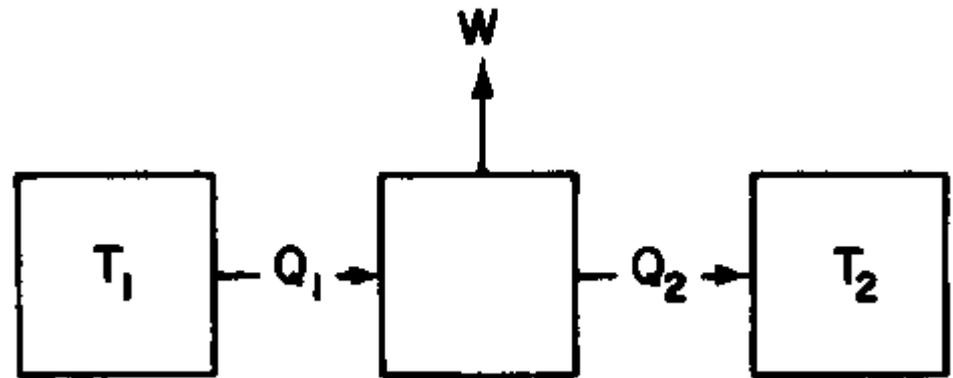
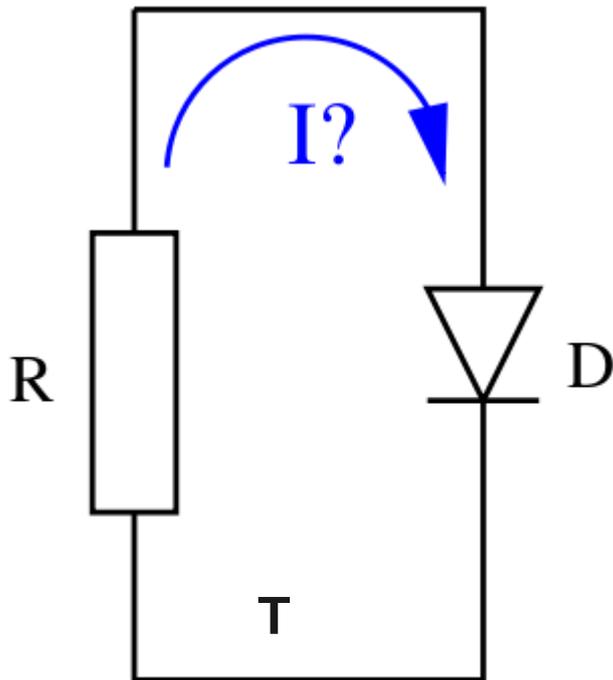


# Rectificación de fluctuaciones?



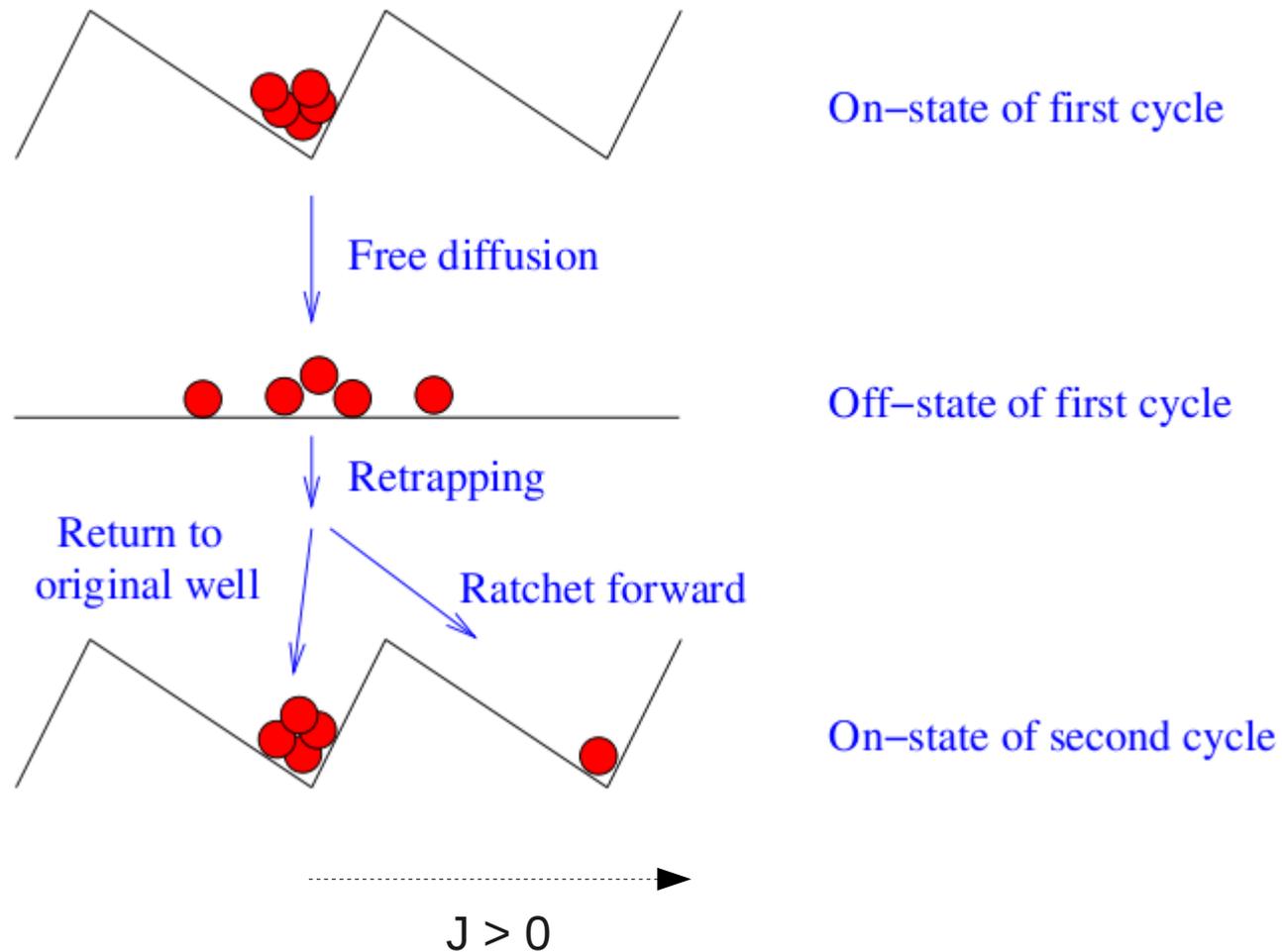
$$\gamma \dot{x} = -V'(x) + \eta_T(t)$$

$$P_{eq}(x) \sim e^{-\beta V(x)}$$



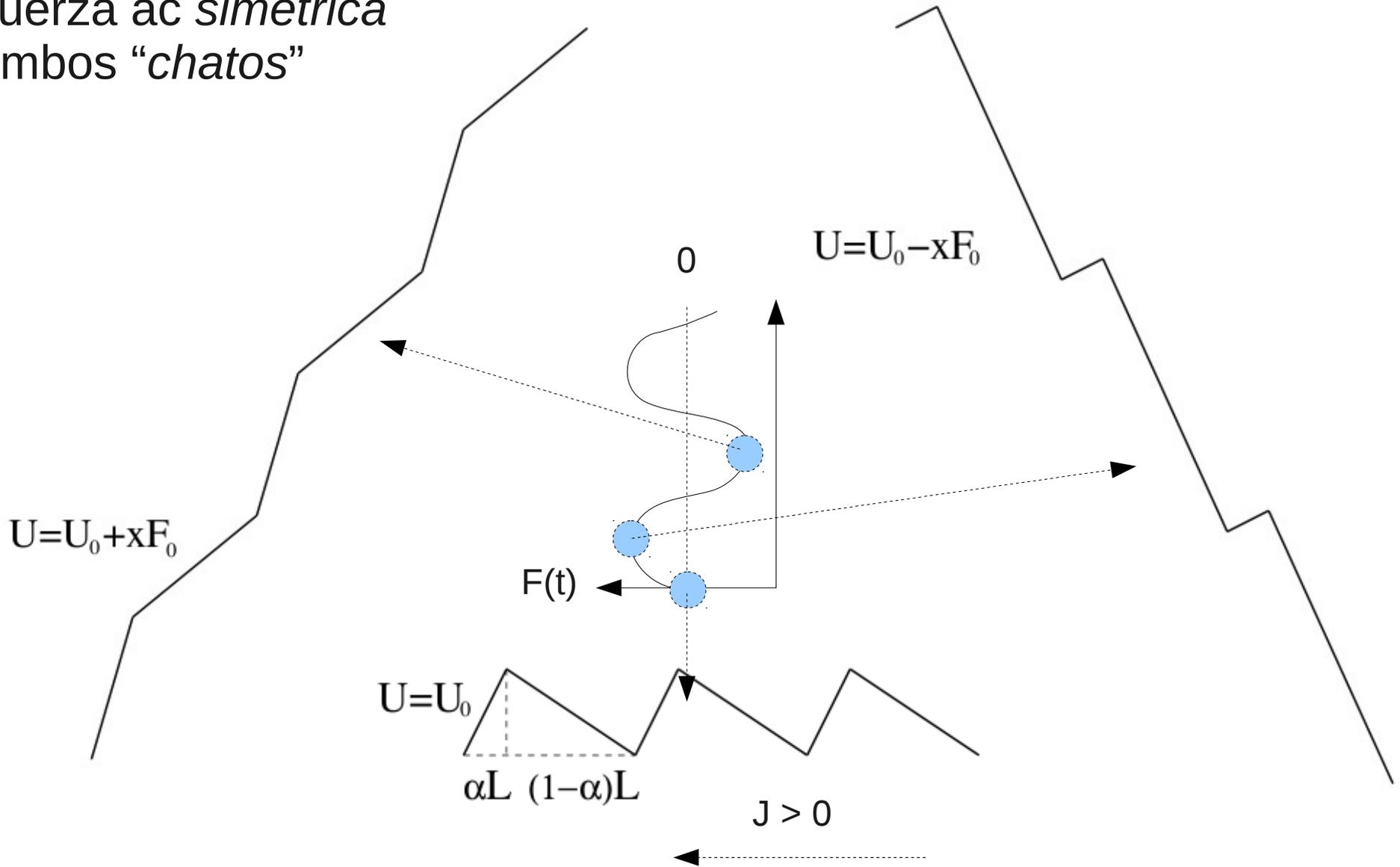
Equilibrio: 2da ley de la termodinámica

# Ratchets: rectificación de fluctuaciones fuera del equilibrio



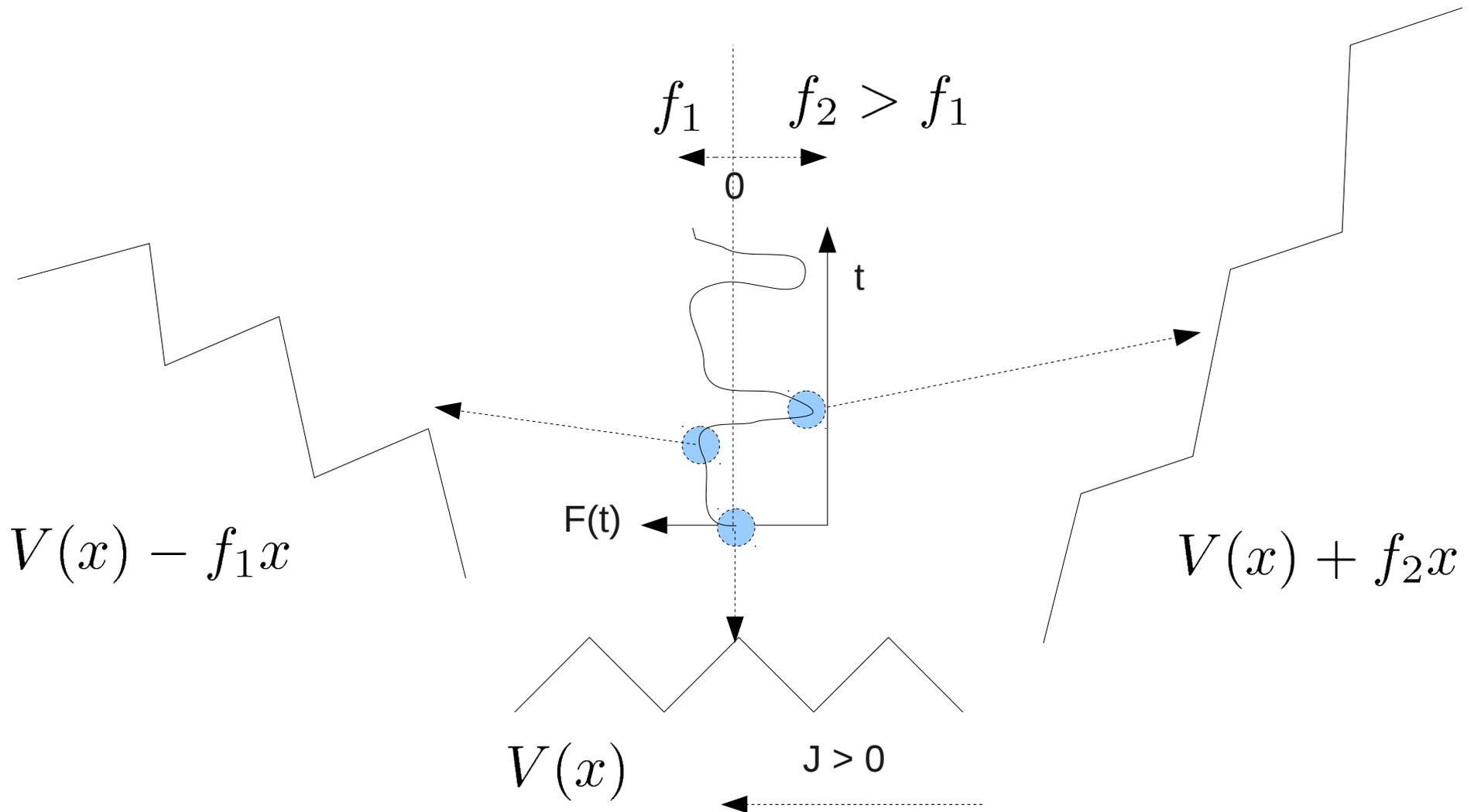
# Ratchets Forzados

- Potencial *asimetrico*
- Fuerza *ac simetrica*
- Ambos “*chatos*”

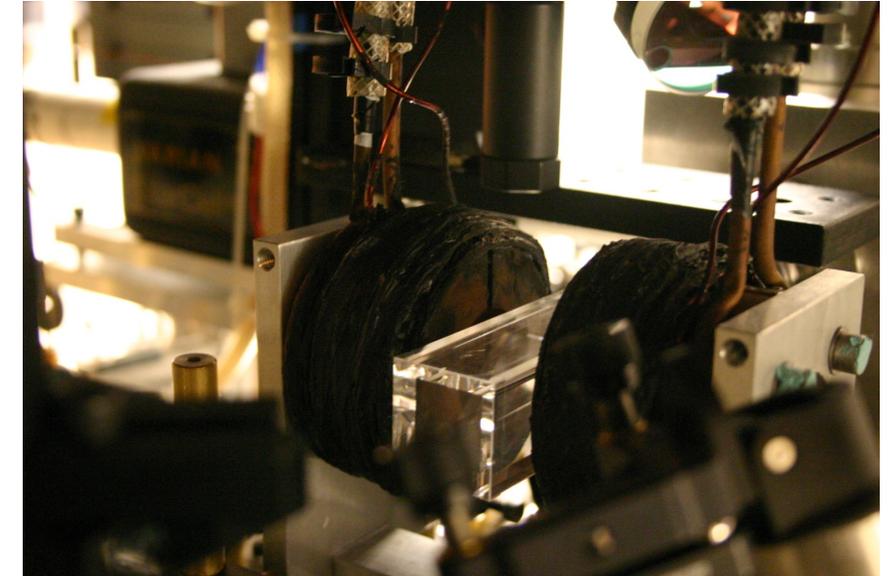
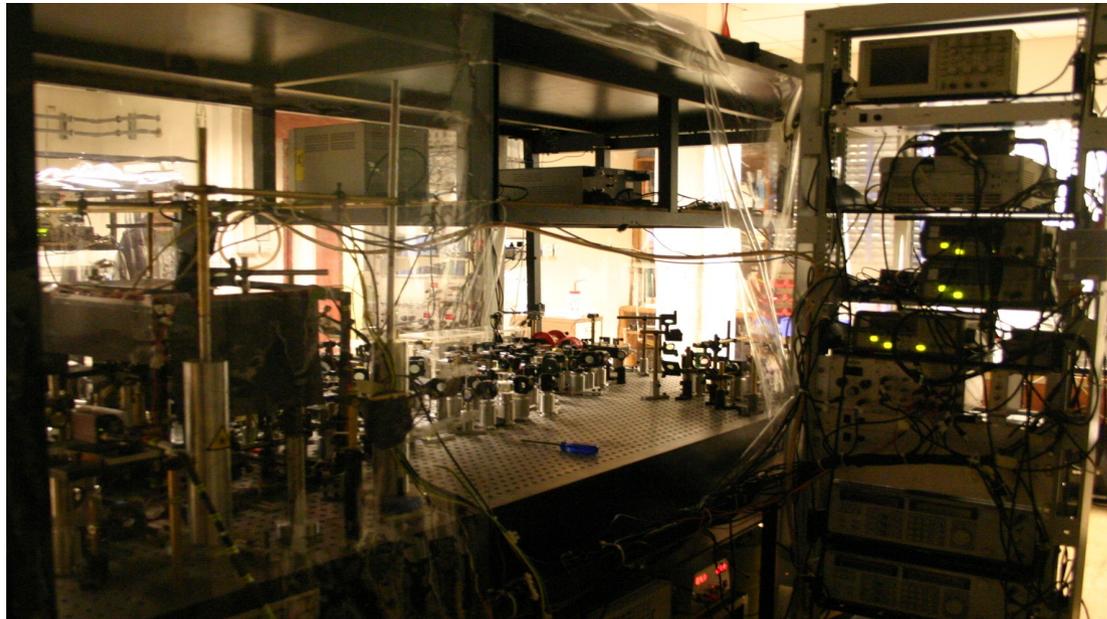
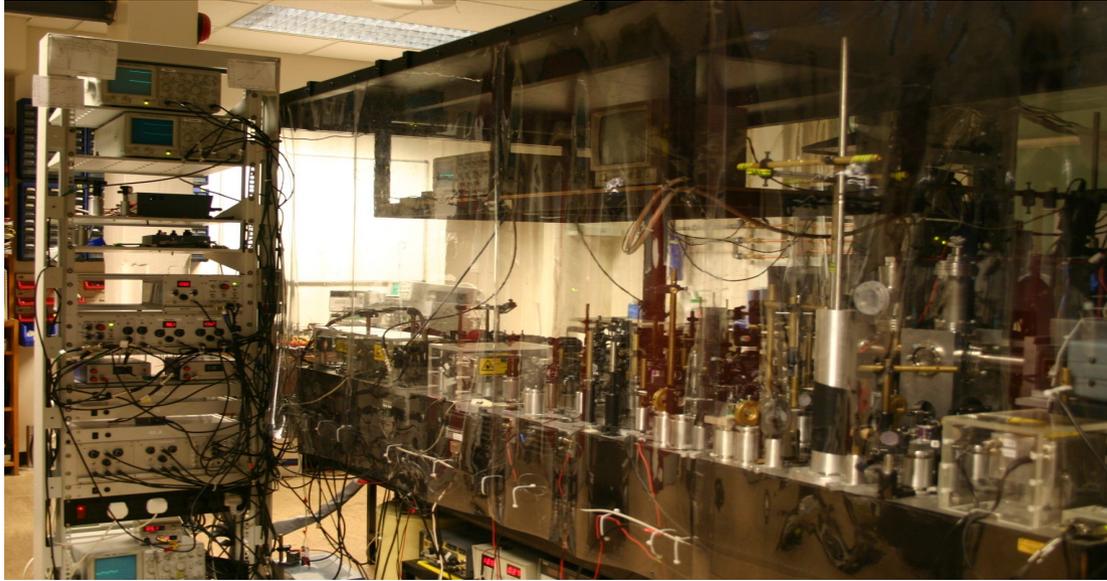


# Ratchets Forzados

- Potencial *simétrico*
- Fuerza ac *asimétrica*
- Ambos “*chatos*”

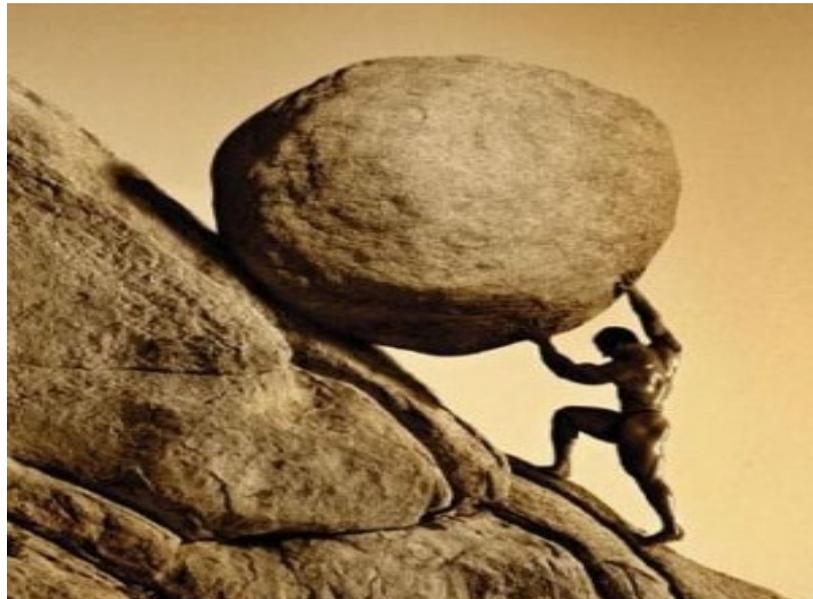


# Atrapar, enfriar y manipular átomos con lasers

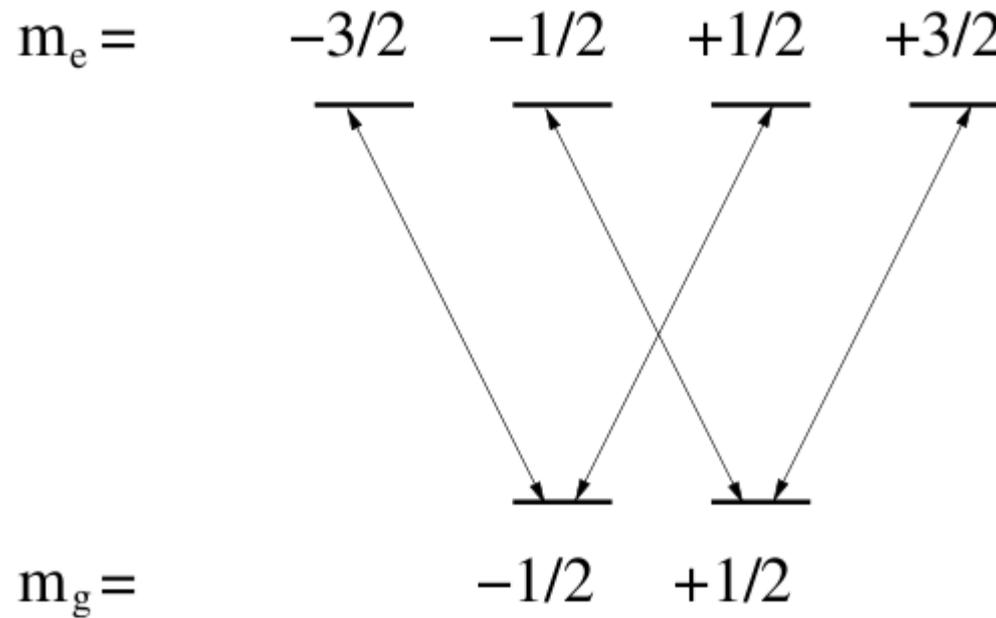


# Redes ópticas brillantes

- Interferencia de dos o mas haces de laser.
- Produce un potencial “periódico” para los átomos
- Produce un mecanismo de enfriamiento: *Sisyphus* cooling.
- Produce localización



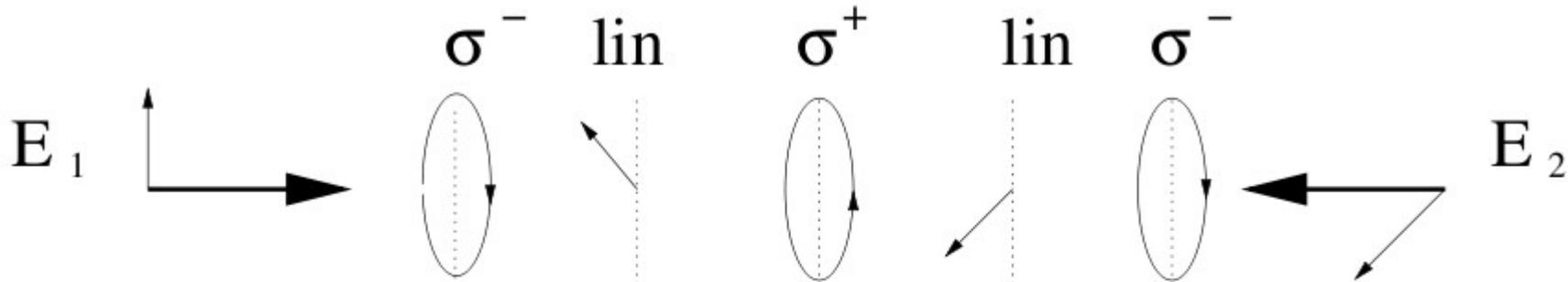
# Átomo



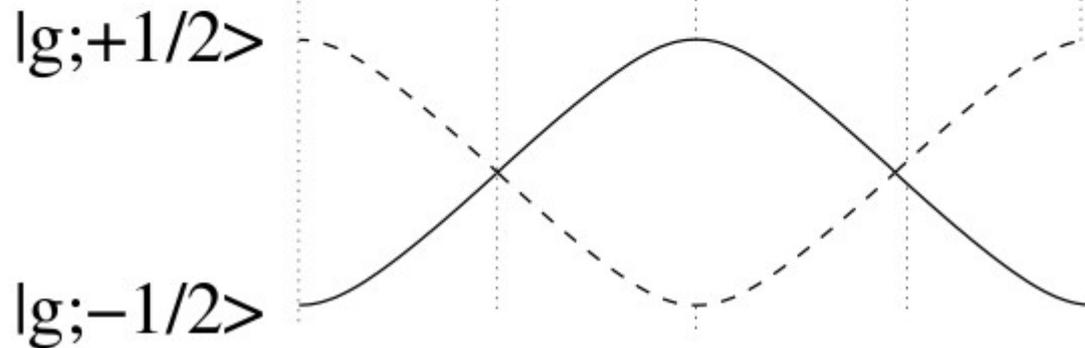
Estructura interna mas simple que tiene enfriamiento de Sisyphus

# Interferencia y potencial efectivo

(a)



(b)

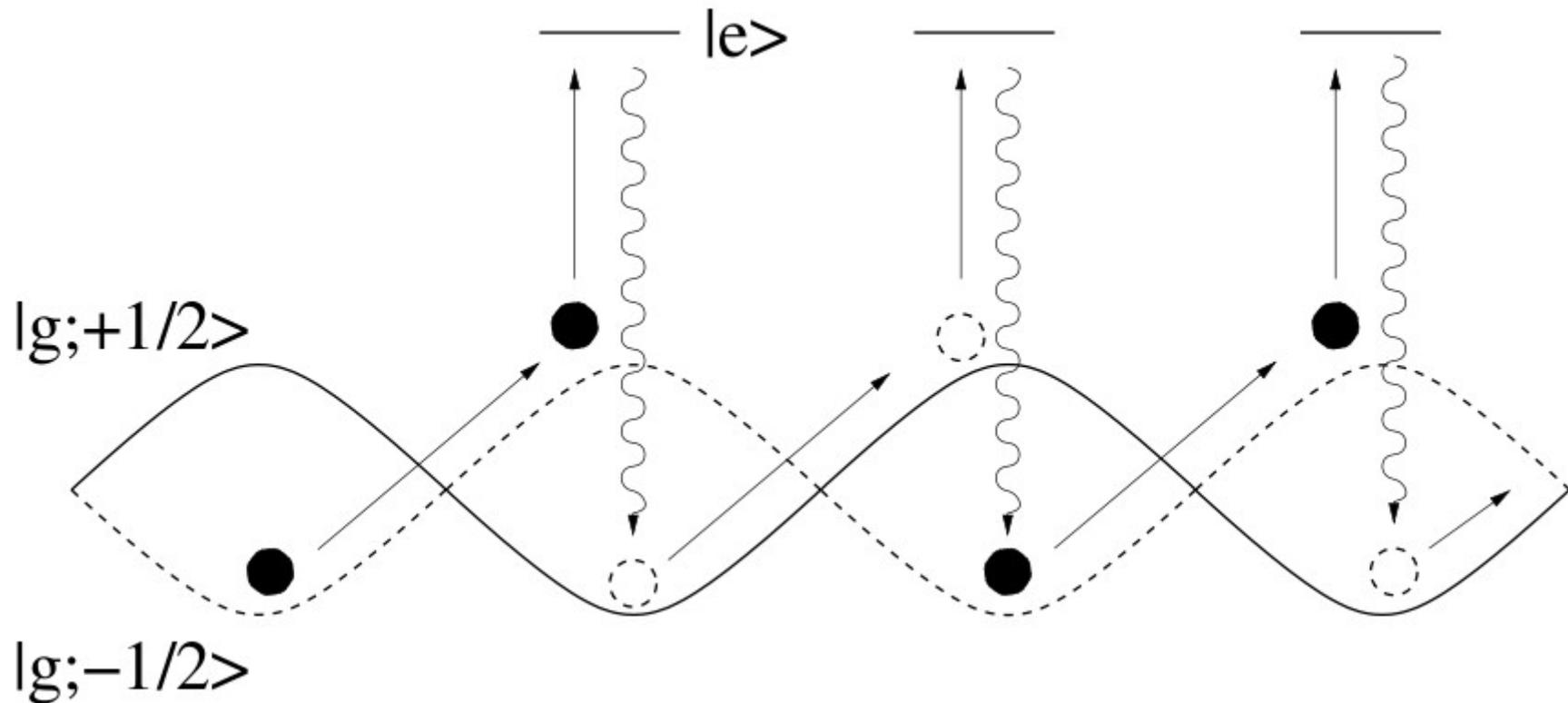


$$U_{\pm} = \frac{U_0}{2} [-2 \pm \cos kz]$$

$$U_0 \sim I/\Delta$$

Potencial efectivo controlado por la longitud de onda, la intensidad y el detuning de los lasers

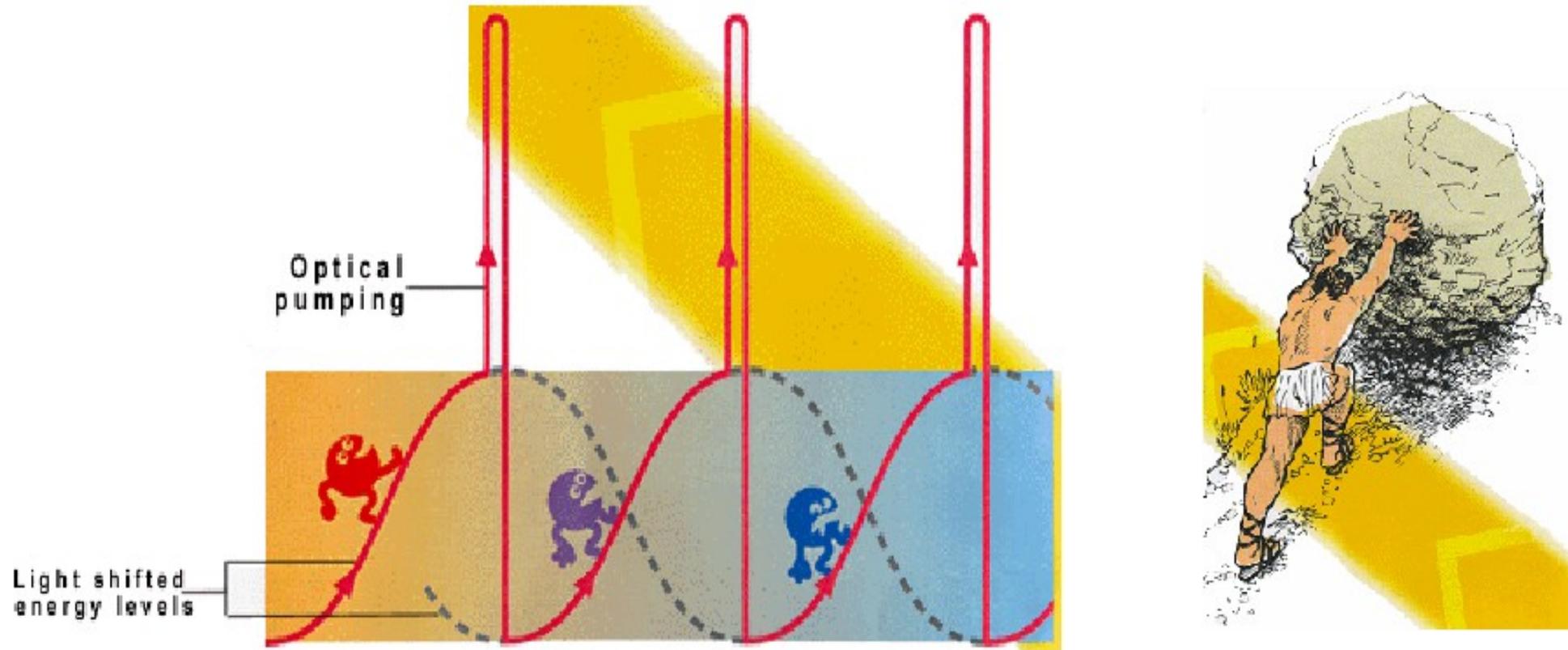
# Mecanismo de enfriamiento



Bombeo óptico:

- (1) Random pero con una tasa de transición bien definida
- (2) Emisión espontanea: random recoils de los átomos
- (3) Fuerza de fricción efectiva dependiente de la velocidad

# Sisyphus cooling

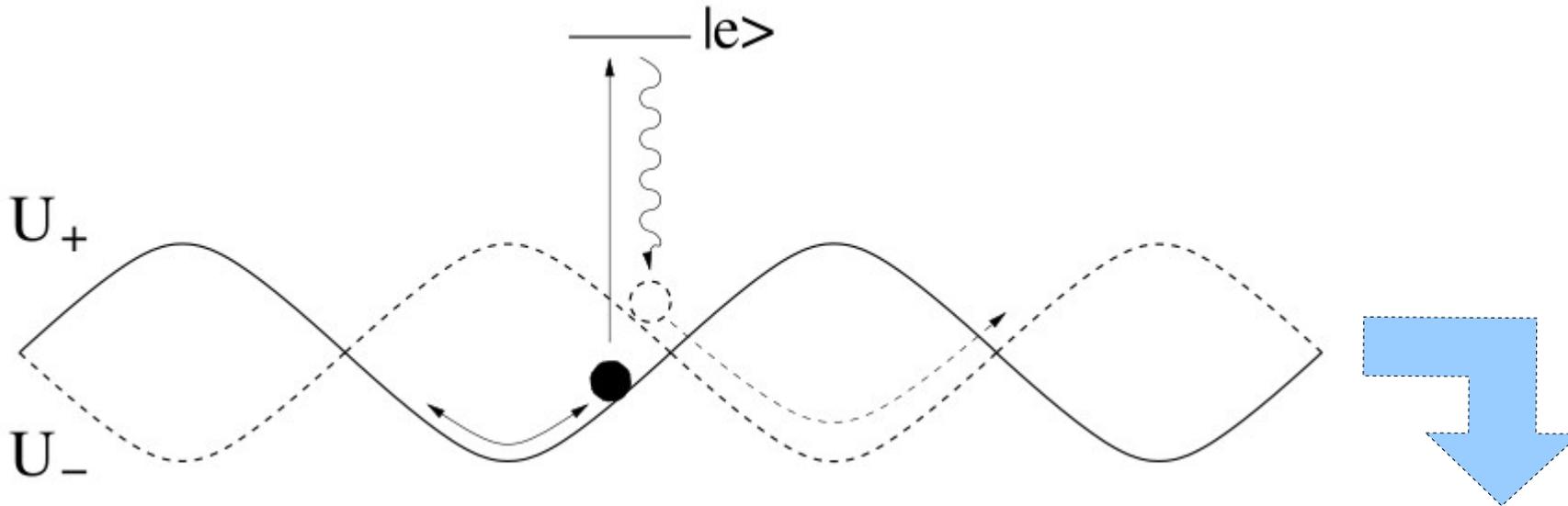


## The Nobel Prize in Physics 1997

Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji and William D. Phillips

for their developments of methods to cool and trap atoms with laser light.

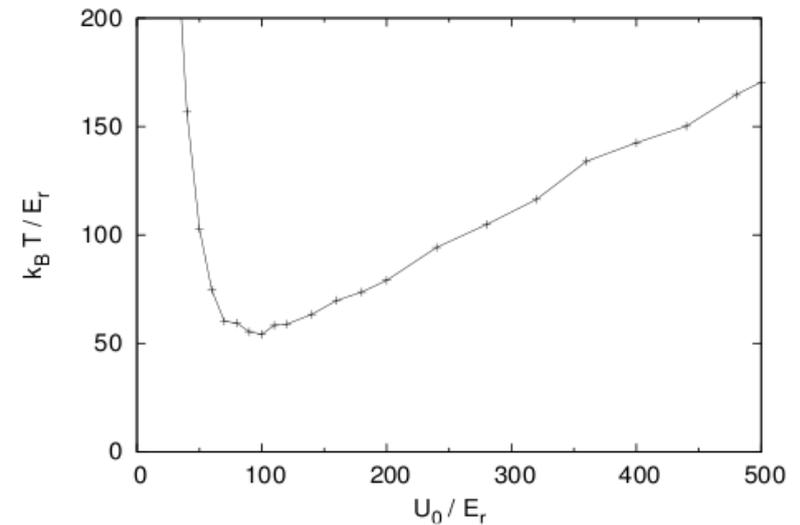
# Difusión



Bombeo óptico:

- (1) Random pero con una tasa de transición bien definida
- (2) Emisión espontánea: random recoils de los átomos
- (3) Fuerza de fricción efectiva dependiente de la velocidad

Limite de enfriamiento



# Realización experimental de un rocking ratchet

*lasers*

$$\frac{1}{2}E_0 \{ \vec{\epsilon}_x \exp[i(kz - \omega t)] + \vec{\epsilon}_y E_0 \exp[i(-kz - \omega t + \alpha(t))] \} + c.c.$$

*Potencial óptico en movimiento en S*

$$U[2kz - \alpha(t)]$$

*Marco de referencia acelerado, S'*

$$z' = z - \alpha(t)/2k$$

*Fuerza inercial en S'*

$$F = -ma = \frac{m}{2k} \ddot{\alpha}(t)$$

Se mide en el sistema de laboratorio S, se convierte a S', que corresponde al Sistema con potencial periódico estático mas fuerza dependiente del tiempo

# Realización experimental de un rocking ratchet

Diferencia de fases entre los lasers

$$\alpha(t) = \alpha_0 \left[ A \cos(\omega t) + \frac{B}{4} \cos(2\omega t - \phi) \right]$$

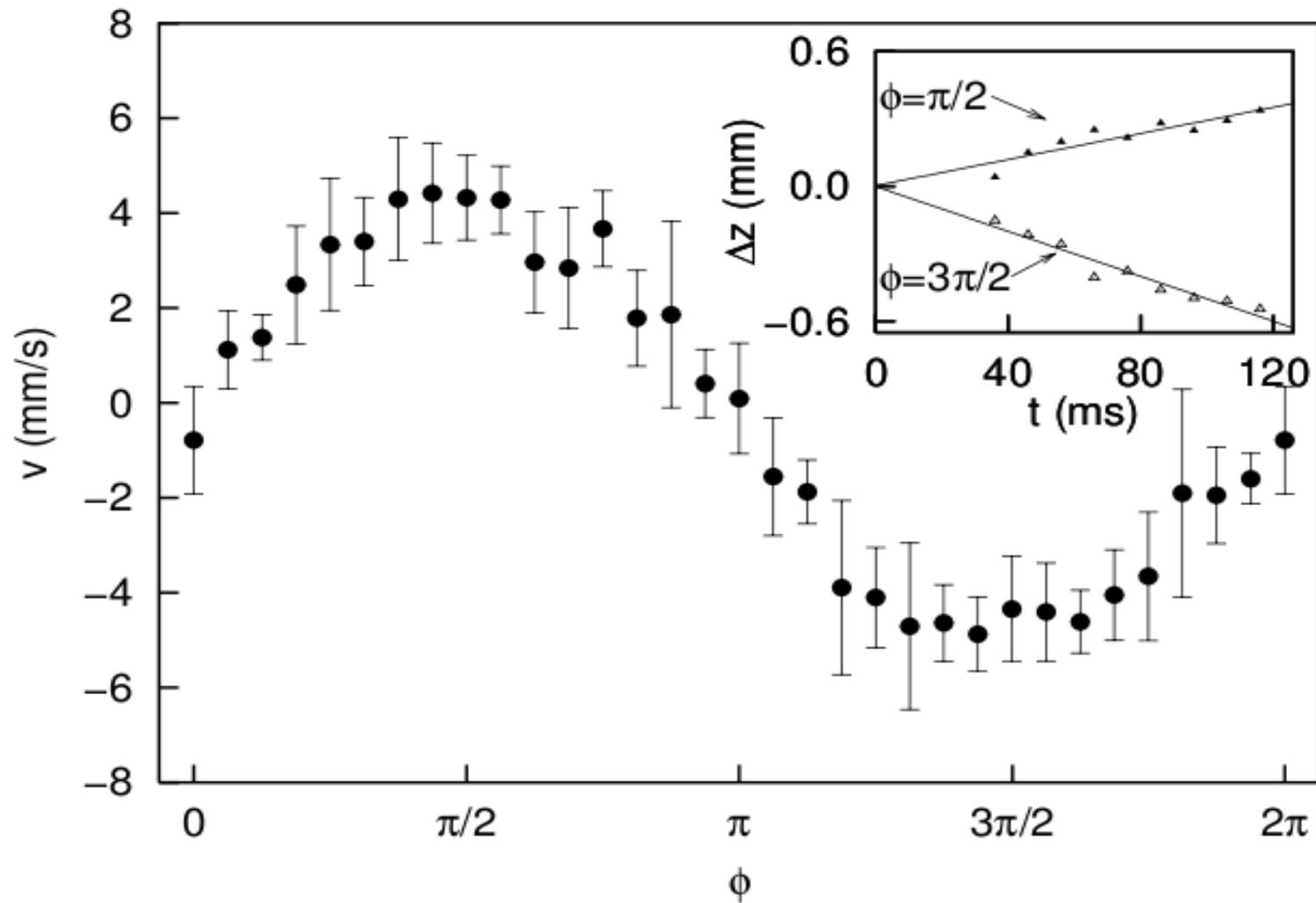
Fuerza alterna bi-armónica

$$F = \frac{m\omega^2\alpha_0}{2k} [A \cos(\omega t) + B \cos(2\omega t - \phi)]$$

Variable para controlar la simetría (A=B)

$$\phi$$

# Efecto Ratchet en redes ópticas



Schiavoni, M., Sanchez-Palencia, L., Renzoni, F., and Grynberg, G.,  
Phys. Rev. Lett., **90**, 094101 (2003).

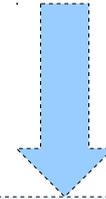
# Modelo y Simulaciones

(1) Cuántico

(2) *Semiclásico*

(3) Clásico

Movimiento difusivo en un potencial



$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + \frac{p}{m} \frac{\partial}{\partial z} - \frac{\partial U_{\pm}}{\partial z} \frac{\partial}{\partial p} - \frac{\hbar^2 k^2 \Gamma'}{90} (35 \pm 7 \cos 2kz) \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right) W_{\pm\pm} =$$

$$\mp \frac{\Gamma'}{9} (1 + \cos 2kz) W_{++} \pm \frac{\Gamma'}{9} (1 - \cos 2kz) W_{--} + \frac{\hbar^2 k^2 \Gamma'}{90} (6 \mp \cos 2kz) \frac{\partial^2 W_{\mp\mp}}{\partial p^2}$$

Transiciones entre estados con difusión asociada

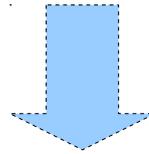
# Modelo y Simulaciones

Fokker Planck

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + \frac{p}{m} \frac{\partial}{\partial z} - \frac{\partial U_{\pm}}{\partial z} \frac{\partial}{\partial p} - \frac{\hbar^2 k^2 \Gamma'}{90} (35 \pm 7 \cos 2kz) \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right) W_{\pm\pm} =$$

$$\mp \frac{\Gamma'}{9} (1 + \cos 2kz) W_{++} \pm \frac{\Gamma'}{9} (1 - \cos 2kz) W_{--} +$$

$$\frac{\hbar^2 k^2 \Gamma'}{90} (6 \mp \cos 2kz) \frac{\partial^2 W_{\mp\mp}}{\partial p^2}$$



Monte-Carlo/Langevin

Sin cambio de ground-state

$$\Delta p = - \frac{dU_{\pm}(z)}{dz} \Delta t + \left( 2D_{\pm\pm}(z) \Delta t \right)^{1/2} N(0, 1)$$

Con cambio de ground-state

$$\Delta p = - \frac{dU_{\pm}(z)}{dz} \Delta t + \left( 2D_{\pm\mp}(z) / \gamma_{\pm\mp}(z) \right)^{1/2} N(0, 1)$$

$$D_{\pm\pm}(z) = \frac{\hbar^2 k^2 \Gamma'}{90} (35 \pm 7 \cos 2kz)$$

$$D_{\pm\mp}(z) = \frac{\hbar^2 k^2 \Gamma'}{90} (6 \mp \cos 2kz)$$

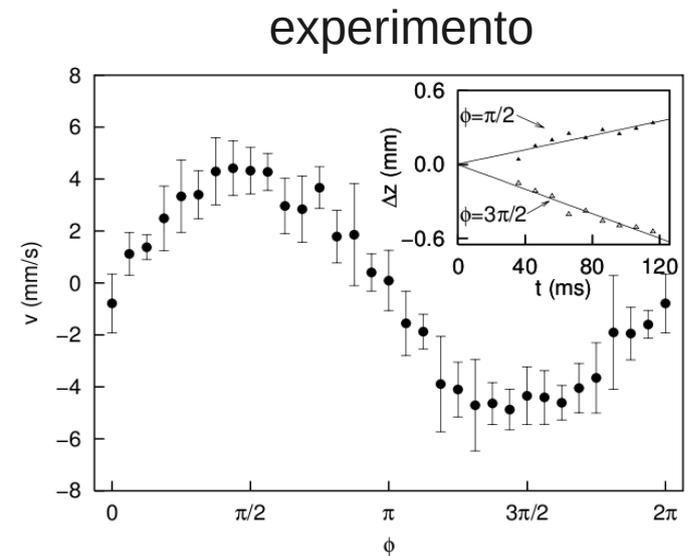
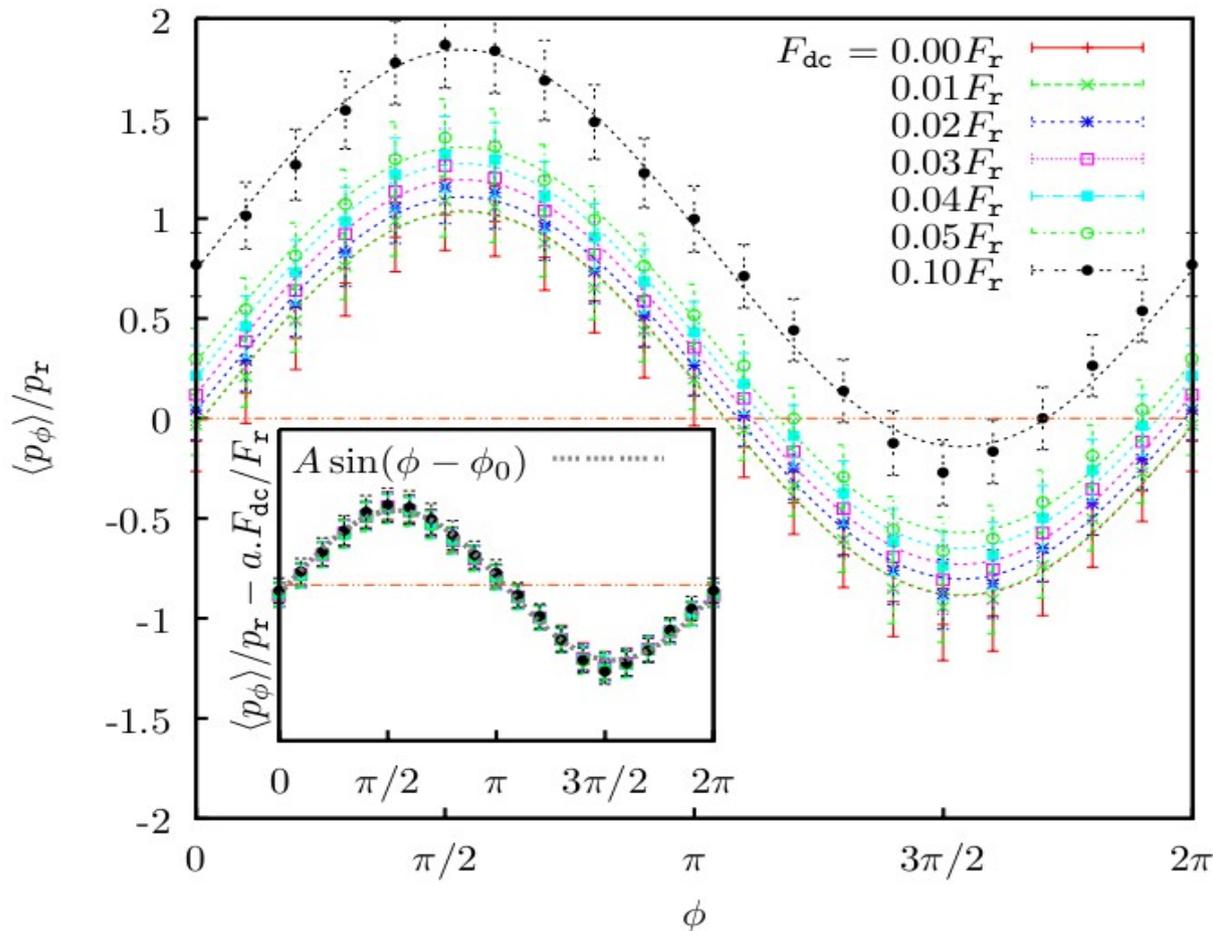
Probabilidades  
De transición

$$\gamma_{+-}(z) = \frac{2}{9} \Gamma' \cos^2 kz$$

$$\gamma_{-+}(z) = \frac{2}{9} \Gamma' \sin^2 kz$$

# Simulaciones: Respuesta

$$\frac{\langle p_\phi \rangle}{p_r} = \frac{m\omega_r \mu}{\cos \phi_0} F_{stall} \sin(\phi - \phi_0) + m\omega_r \mu F_{dc}$$

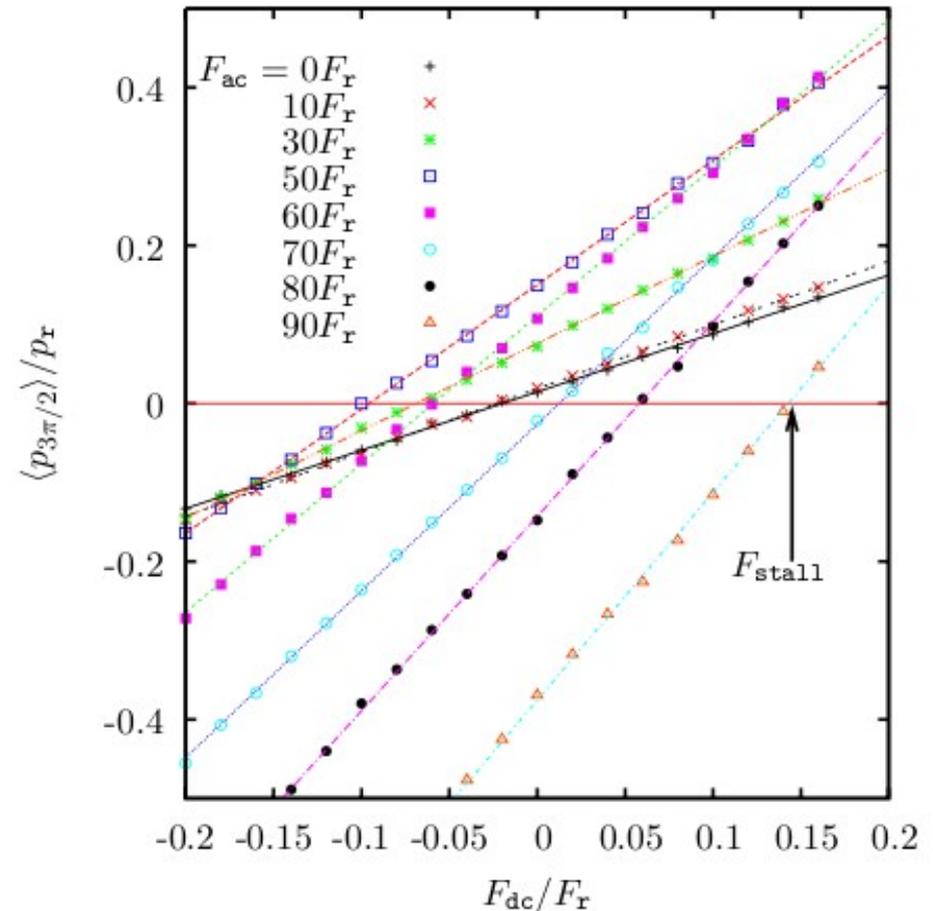
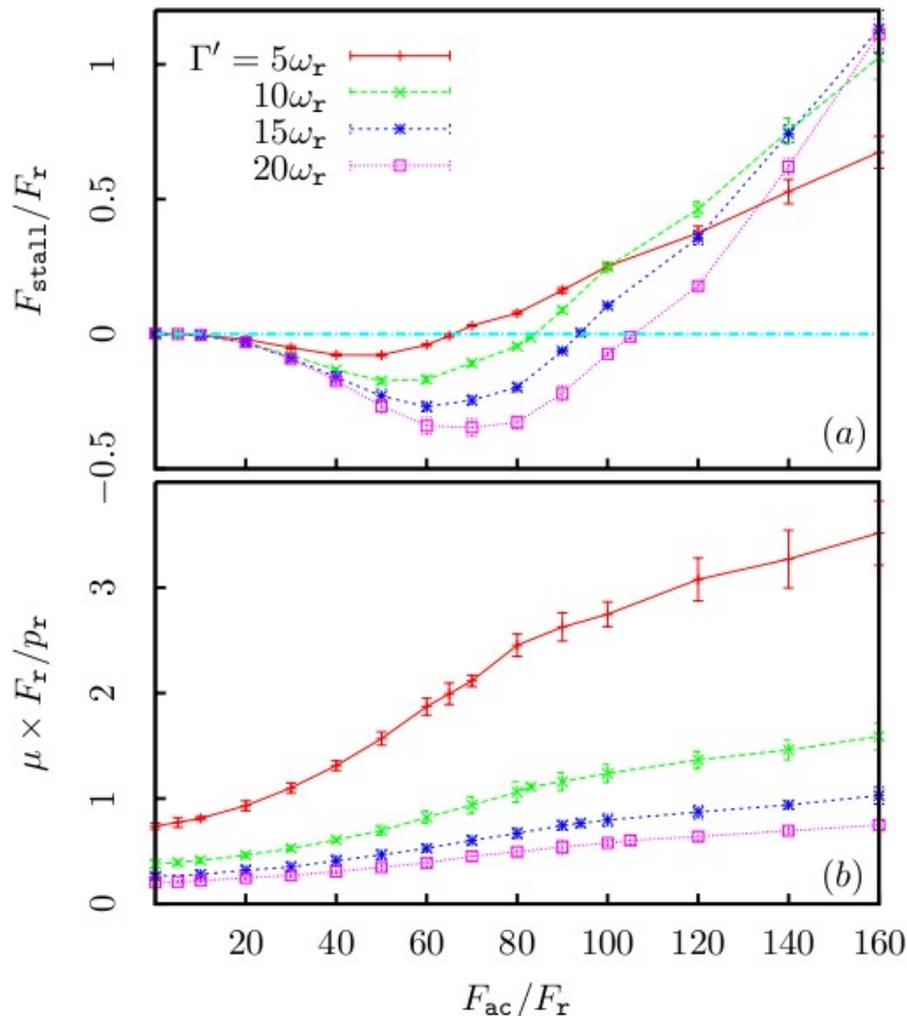


$$\mu, F_{stall}, \phi_0$$

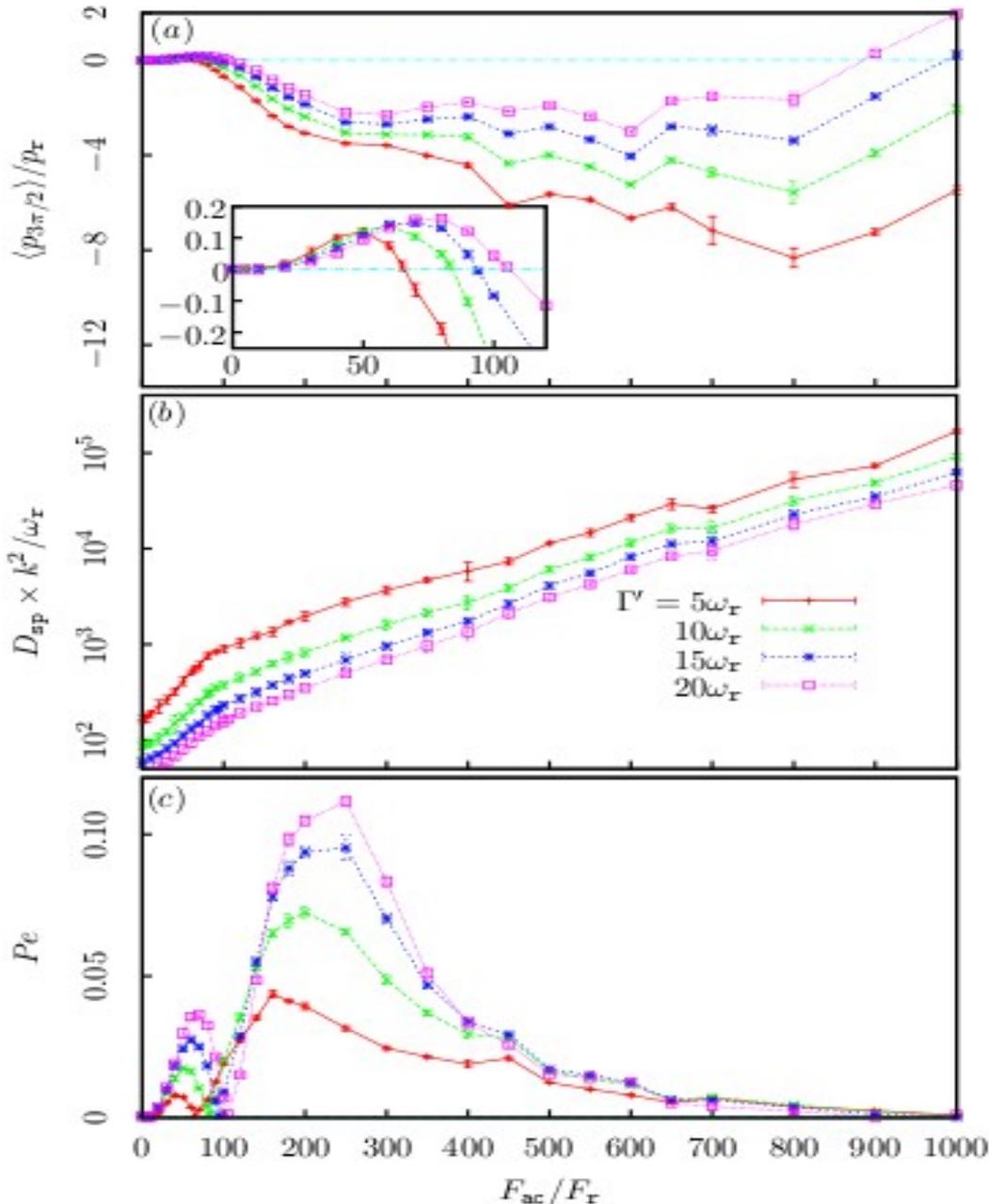
Funciones de la amplitud alterna,  
Y parametros de los lasers y atomos

# Caracterización como “motor”

$$\frac{\langle p_\phi \rangle}{p_r} = \frac{m\omega_r \mu}{\cos \phi_0} F_{stall} \sin(\phi - \phi_0) + m\omega_r \mu F_{dc}$$



# Eficiencia: transporte vs dispersión



Varias Inversiones de corriente  
En función de la amplitud alterna

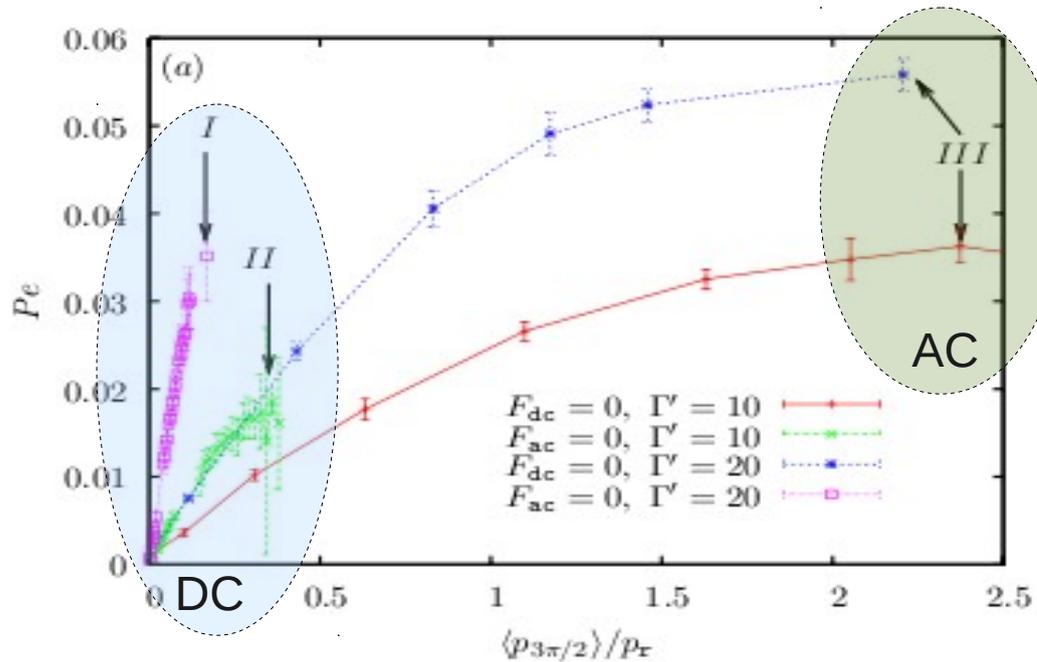
Dispersión

$$D_{sp} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\langle x^2(t) \rangle - \langle x(t) \rangle^2}{2t}$$

Peclet number

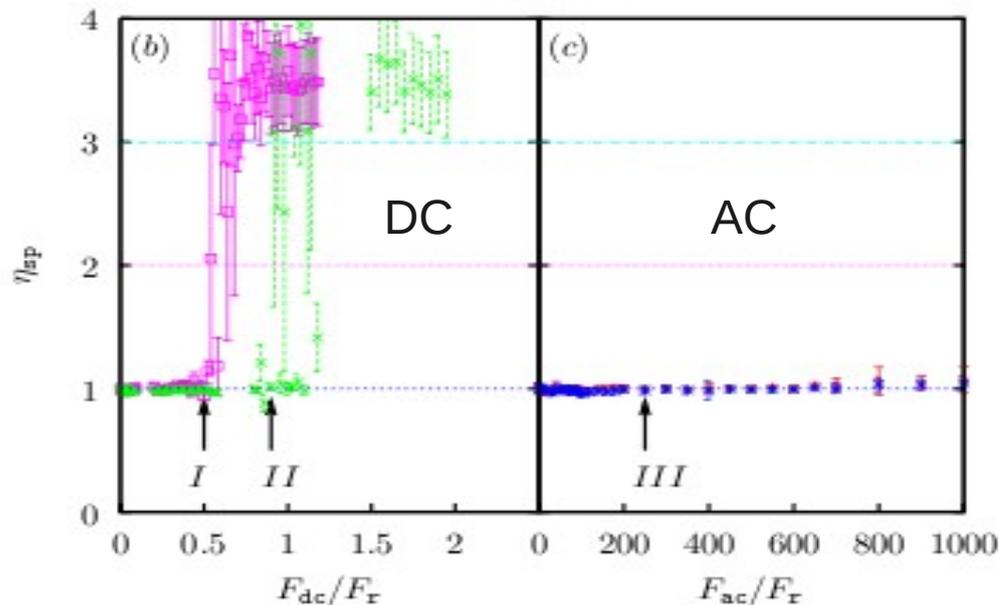
$$Pe = \frac{|v|l}{D_{sp}}$$

# Estabilización



La fuerza DC es mas eficiente para empujar a los átomos en una dada dirección, pero tiene un limite, mas allá del cual el movimiento deja de ser estacionario.

*Porque es estable con AC?*

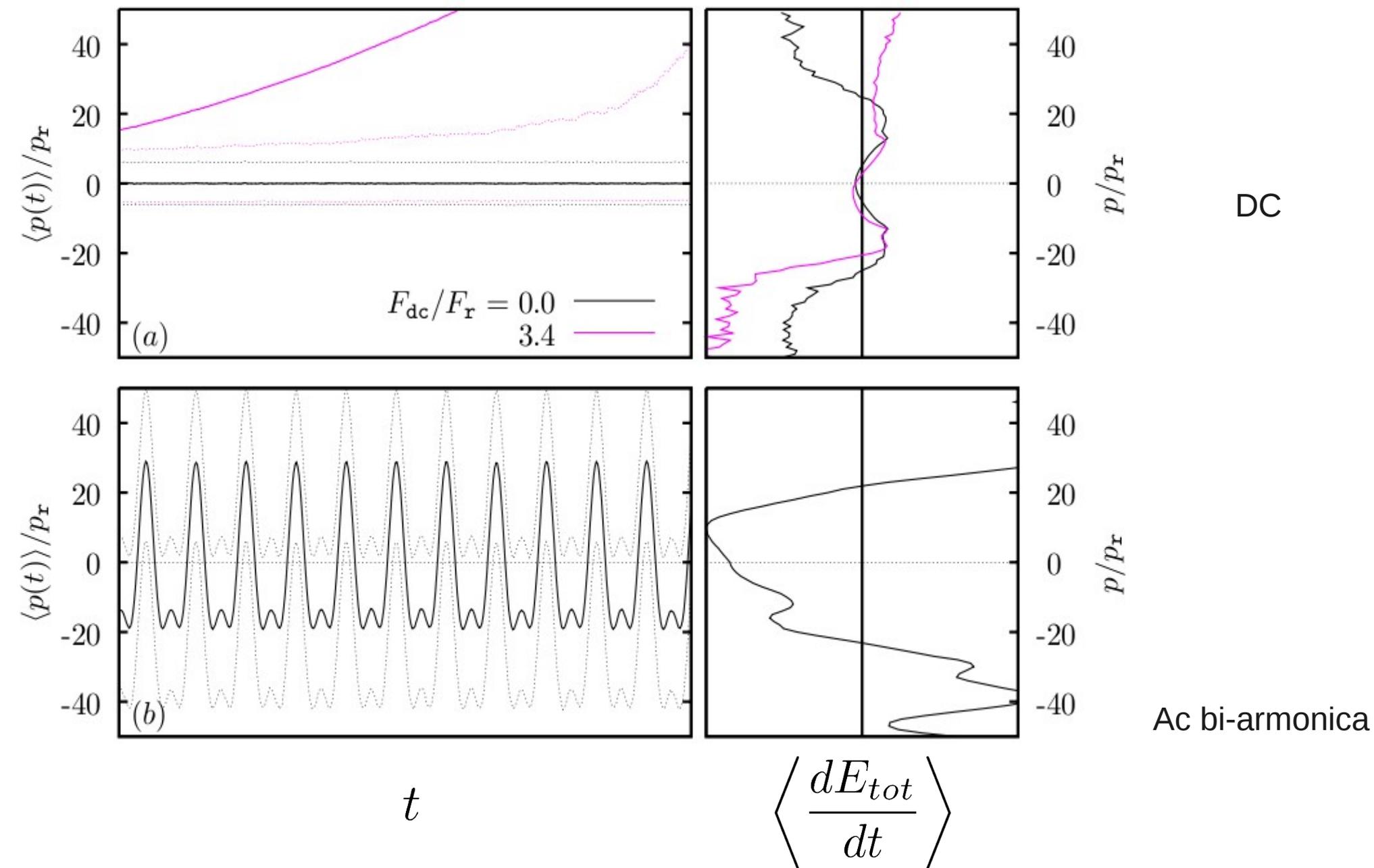


$$\langle x^2(t) \rangle - \langle x(t) \rangle^2 \sim t^{\eta_{sp}}$$

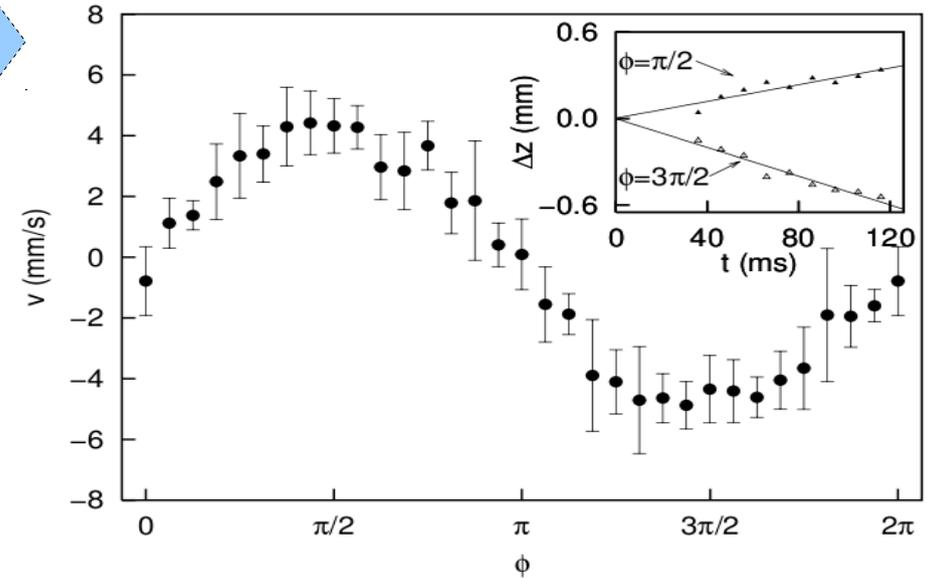
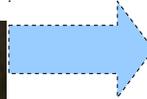
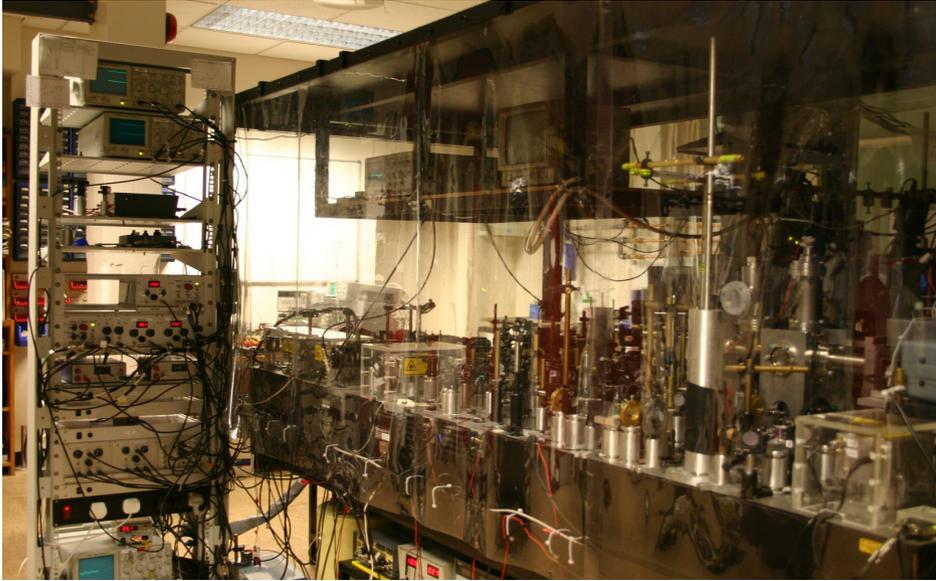
Estados acelerados

← Estado estacionario

# Disipación vs momentum

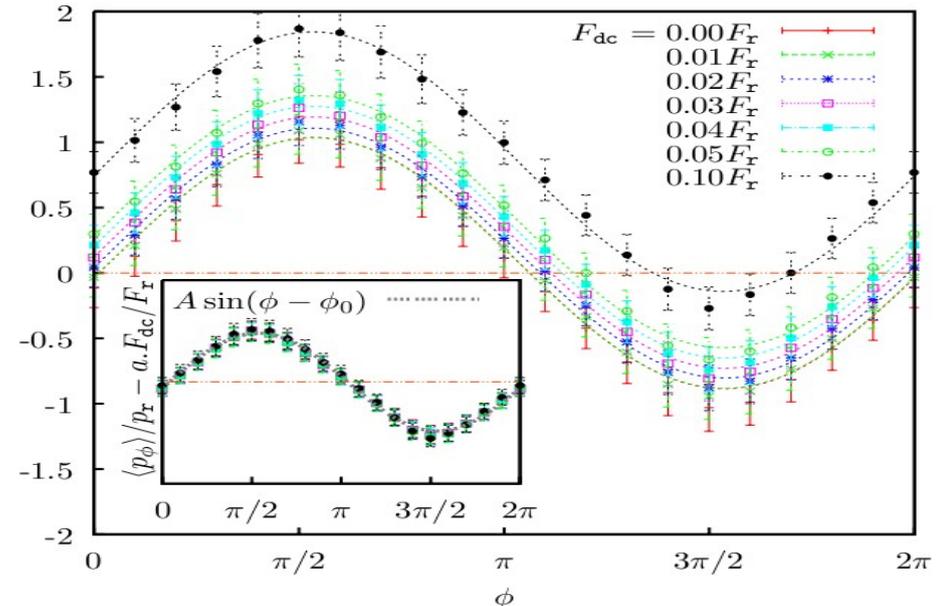


# Conclusiones: la magia de la física!



$$\Delta p = -\frac{dU_{\pm}(z)}{dz}\Delta t + \left(2D_{\pm\pm}(z)\Delta t\right)^{1/2} N(0, 1)$$

$$\Delta p = -\frac{dU_{\pm}(z)}{dz}\Delta t + \left(2D_{\pm\mp}(z)/\gamma_{\pm\mp}(z)\right)^{1/2} N(0, 1)$$



# Conclusiones

- Caracterización del cold-atom ratchet como motor
- El efecto ratchet tiene una ventaja sobre la impulsión directa para controlar el movimiento.
- Limite de frecuencias bajas?