

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών

# Οπτικά πλέγματα με υπέρψυχρα ατομικά αέρια

*Optical lattices with ultracold atomic gases*

Στέφανος Κούρτης

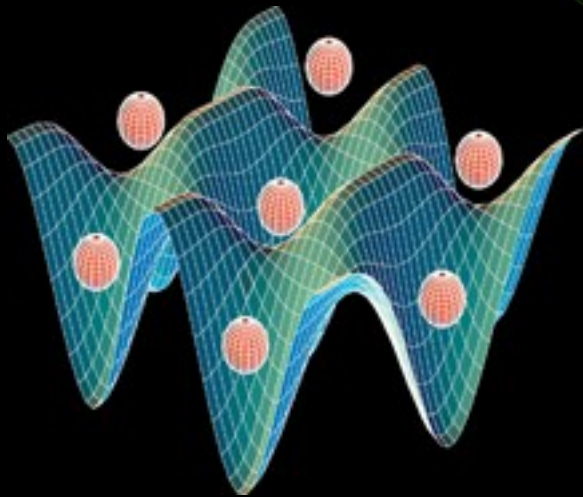
# Υπέρψυχρα ατομικά αέρια

Συνήθως μονοσθενή άτομα σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες ( $\sim 10^{-7} \text{ }^\circ\text{K}$ )

- Περιγραφή με κβαντική στατιστική
- Μετάβαση φάσης από κανονική σε συμπυκνωμένη κατάσταση
- Συμπύκνωμα Bose-Einstein ή Fermi-Dirac (*Bose-Einstein & Fermi-Dirac condensates*)

# Οπτικά πλέγματα

Δημιουργία δυναμικού που προκαλεί εικονική κρυσταλλική δομή στο χώρο και κατάληψη των “πλεγματικών θέσεων” από άτομα υπέρυχρων αερίων.



- Κατασκευή με οπτικές μεθόδους (laser)
- Μονοδιάστατα, δισδιάστατα ή τρισδιάστατα πλέγματα
- Τυπική πλεγματική σταθερά:  $\sim 400 \text{ nm}$  ( $\lambda/2$ ,  $\lambda$ : μήκος κύματος του laser)

# Οπτικά πλέγματα

## Ιδιότητες:

- ελεγχόμενη περιοδική δομή
- ελεγχόμενη αλληλεπίδραση μεταξύ ατόμων

*Δυνατότητα για μελέτη φαινομένων που είναι πολύ δύσκολο ή αδύνατο να μελετηθούν σε πραγματικά υλικά*

Για την υλοποίηση οπτικού πλέγματος χρειάζονται:

- ατομικό αέριο
- διάταξη ψύξης και παγίδευσης των ατόμων
- διάταξη από lasers για τη δημιουργία του πλέγματος

# Τυπική πορεία ψύξης - παγίδευσης

- ♦ Διάταξη ψύξης με laser
- ♦ Μαγνητο-οπτική παγίδα

Για υπέρψυχρα αέρια χρειάζονται ακόμα:

- ♦ Μαγνητική παγίδα
- ♦ Διάταξη ψύξης με  $^3\text{He}$

Για τη δημιουργία οπτικού πλέγματος:

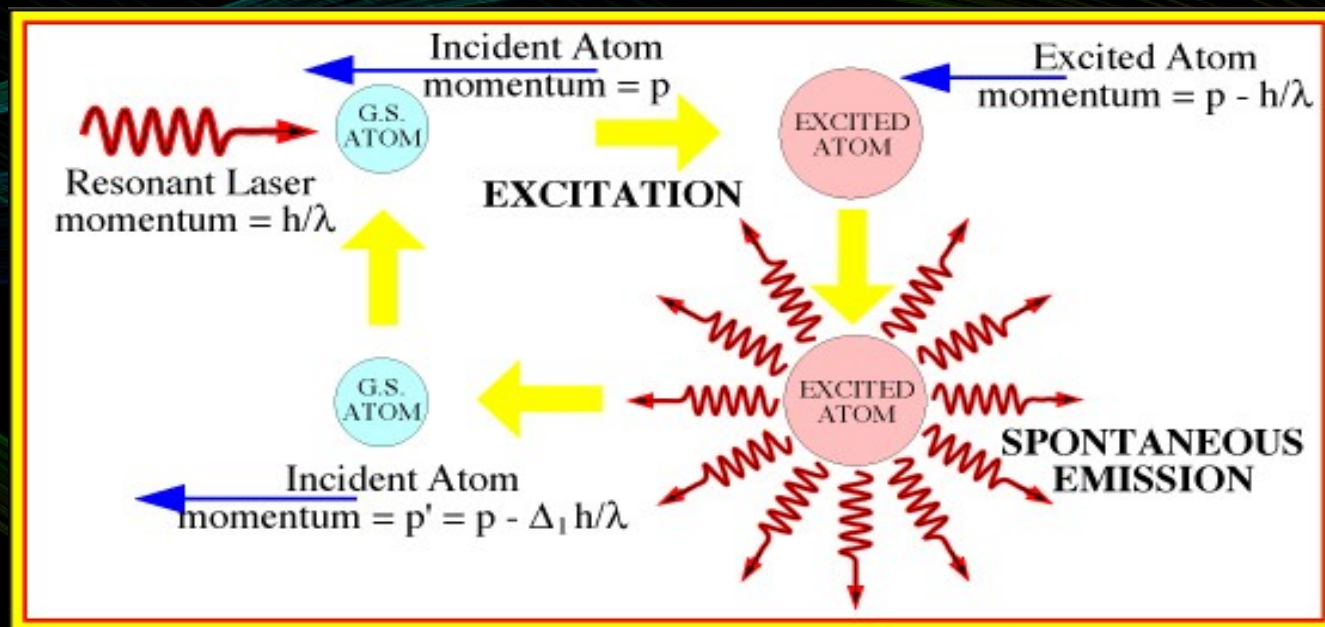
- ♦ Οπτική διπολική παγίδα

$10^{-5} \text{ } ^\circ\text{K}$

$10^{-7} \text{ } ^\circ\text{K}$

# Ψύξη με laser

- Η συχνότητα του laser είναι λίγο μικρότερη ή λίγο μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί στην ενέργεια διέγερσης του ατόμου



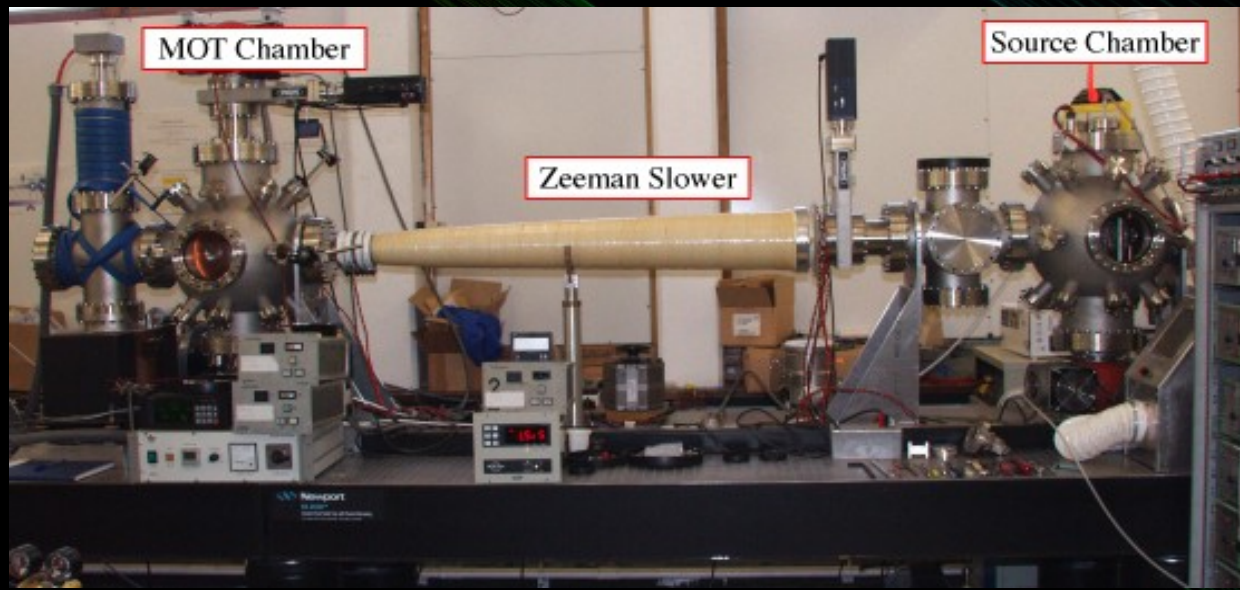
- Διεγείρονται μόνο τα άτομα που κινούνται στη διεύθυνση της δέσμης, αφού για αυτά η συχνότητα των φωτονίων γίνεται ακριβώς ίση με τη συχνότητα που αντιστοιχεί στην ενέργεια διέγερσης του ατόμου, λόγω του φαινομένου Doppler.

# Ατομικές παγίδες

Μέθοδοι για περιορισμό ουδέτερων ατόμων στο χώρο

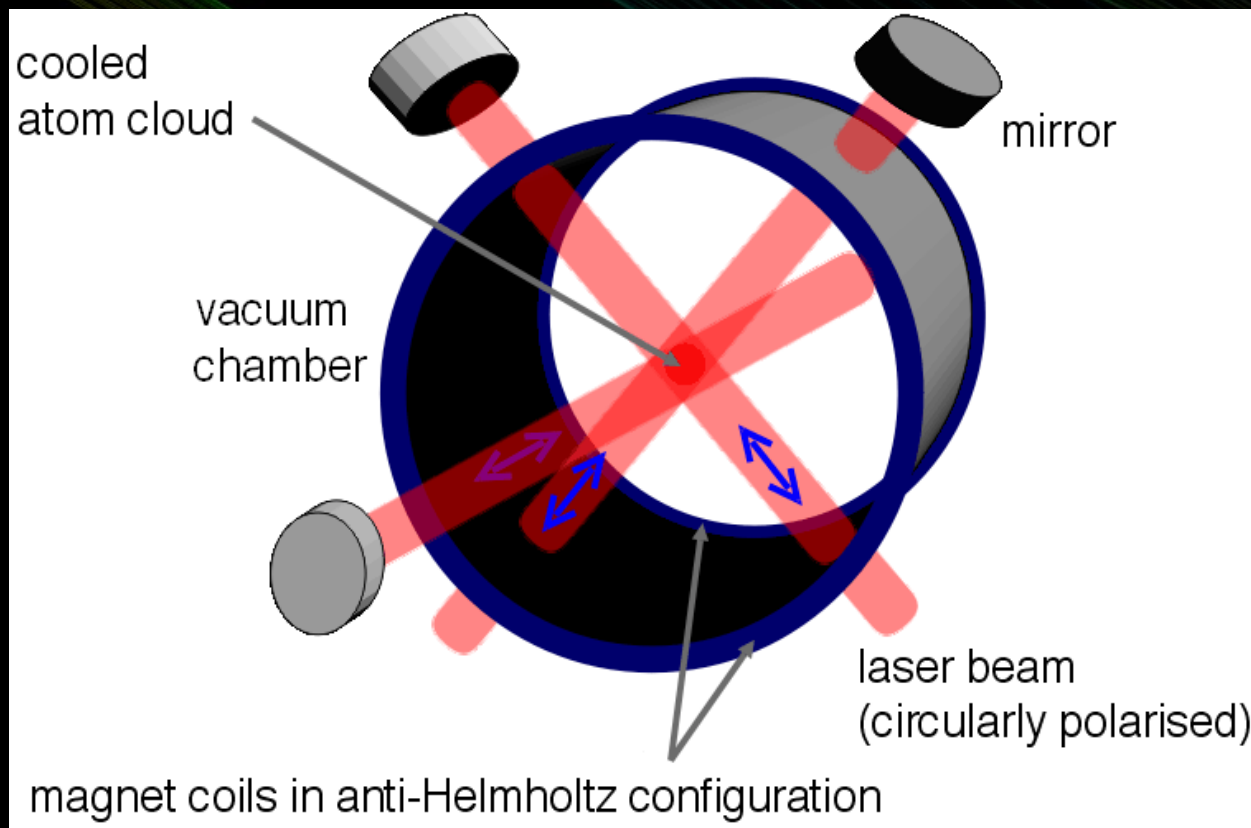
- Μαγνητικές παγίδες
- Παγίδες πίεσης ακτινοβολίας (*radiation-pressure traps*)
- Οπτικές διπολικές παγίδες (*optical dipole traps*)

Τα άτομα θα πρέπει να είναι “ψυχρά” για να είναι δυνατός ο περιορισμός με ατομικές παγίδες



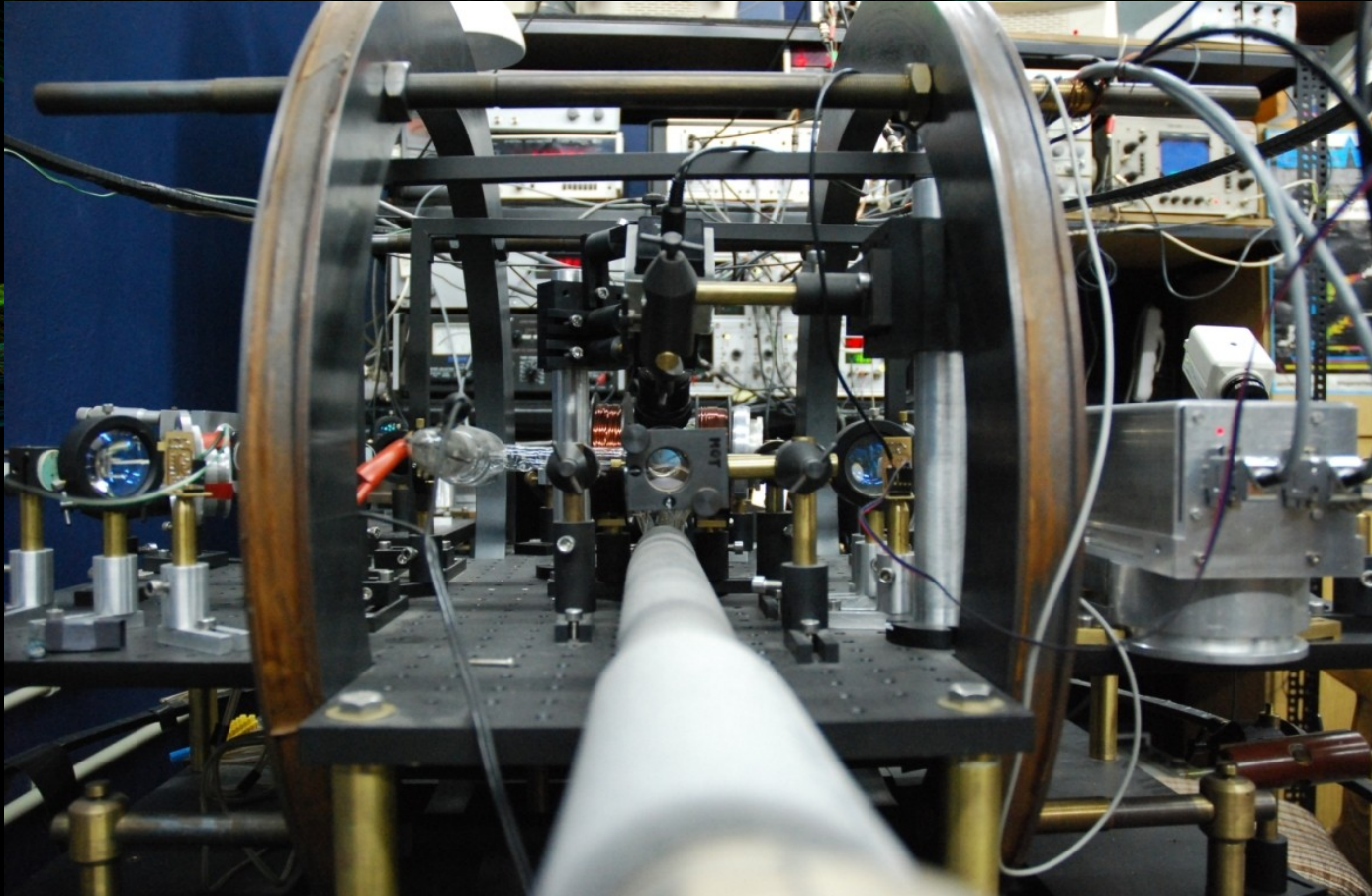
# Μαγνητο-οπτικές παγίδες

Οπτική λειτουργία ίδια με laser cooling. Επιπλέον μαγνητικό πεδίο με ελάχιστο στο κέντρο της παγίδας. Όσο τα άτομα απομακρύνονται από αυτό, το φαινόμενο Zeeman μετατοπίζει τις ενεργειακές στάθμες, ώσπου τα άτομα “συντονίζονται” με το laser και επιβραδύνονται.





# Μαγνητο-οπτικές παγίδες



- ✓ μικρότερες θερμοκρασίες από laser cooling ( $\sim 10^{-5} K$ )
- ✓ μεγάλο βάθος δυναμικού ( $\sim K$ )
- x όριο ψύξης (*Doppler limit*)
- x δεν φτάνουμε σε υπέρψυχρο αέριο

# Μαγνητικές παγίδες

Βασίζονται στη δύναμη που ασκείται στα άτομα λόγω της μαγνητικής διπολικής ροπής τους παρουσία μαγνητικού πεδίου:

$$\Delta E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}, \quad \Delta E \sim 100 \text{ mK}$$

- ✓ σταθερό σύστημα
- ✓ αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες για την επίτευξη BEC ( $\sim 10^{-7} \text{ K}$ ) σε συνδυασμό με evaporative cooling (*1<sup>η</sup> παρατήρηση BEC: E. Cornell & C. Wieman, 1995 – Nobel prize 2001*)
- x περιορισμένες επιλογές στη γεωμετρία

# Οπτικές παγίδες

- Δημιουργούνται από συμβάλλουσες δέσμες laser με συχνότητες που δεν προκαλούν ηλεκτρονικές μεταβάσεις των ατόμων (*far-detuned light*)
- Βασίζονται στο φαινόμενο Stark που είναι το αντίστοιχο του Zeeman για ηλεκτρικά πεδία
- 1<sup>η</sup> υλοποίηση: *S.Chu, 1986 - Nobel prize 1997*
- Παρείχαν τη δυνατότητα για δημιουργία φερμιονικών συμπυκνωμάτων (για 1<sup>η</sup> φορά το 2003 από *D.Jin*)

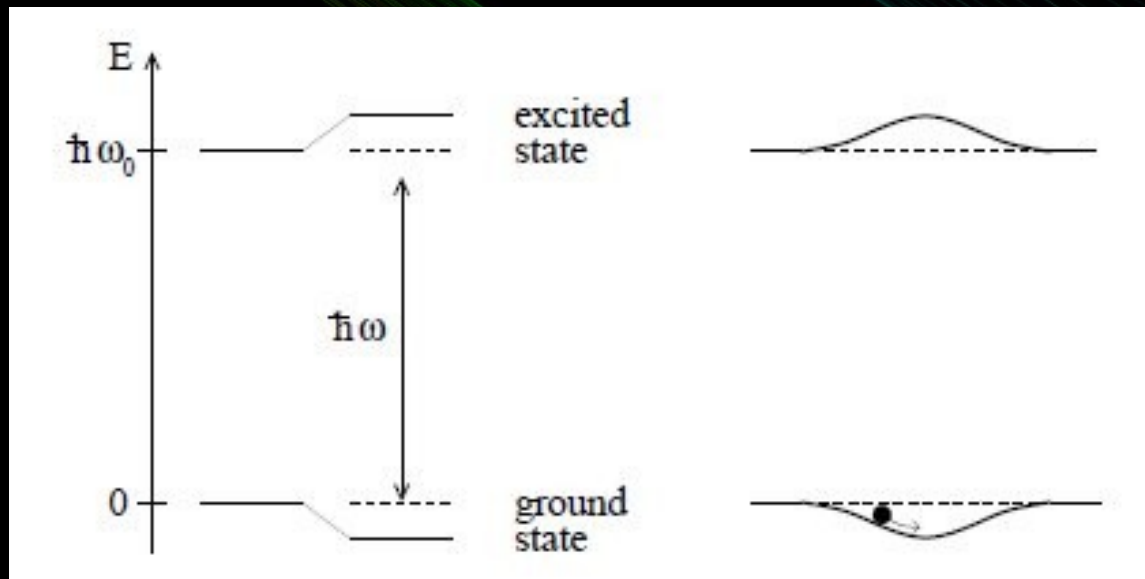
# Οπτικές παγίδες

Φαινόμενο Stark:

$$\vec{p} = \alpha \vec{E}$$

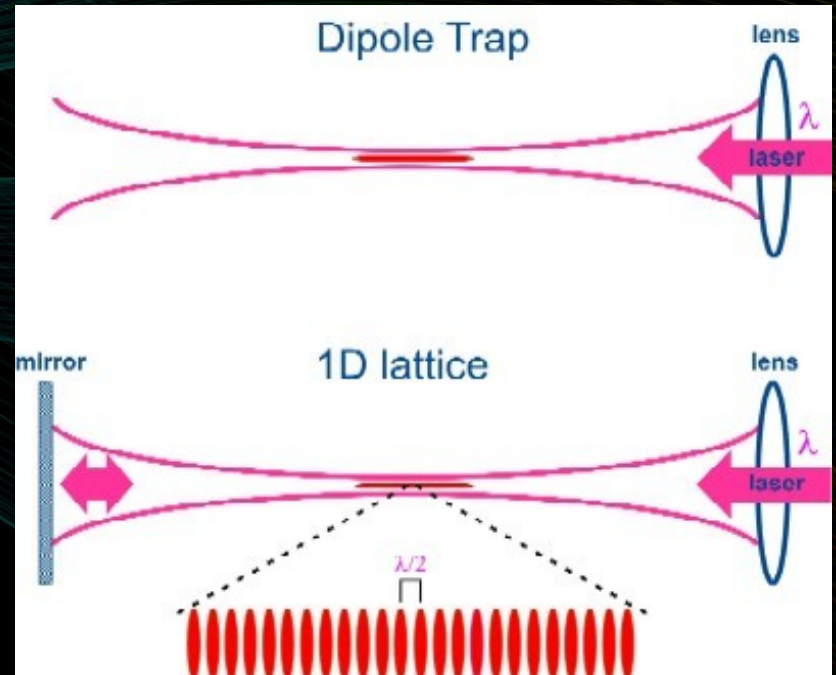
$$U_{at} = -\frac{1}{2} \langle \vec{p} \cdot \vec{E} \rangle = -\frac{1}{2 \epsilon_0 c} \Re(\alpha) I, \quad I = 2 \epsilon_0 c |E|^2$$

Θεωρία διαταραχών 2<sup>ης</sup> τάξης για τη Χαμιλτονιανή ενός ατόμου-διπόλου με 2 ενεργειακές στάθμες:



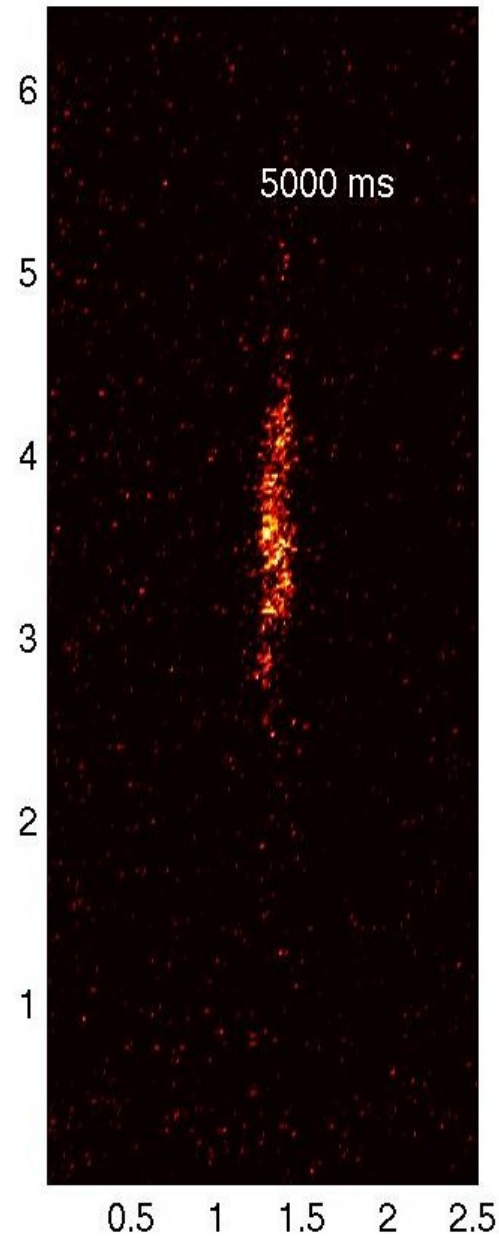
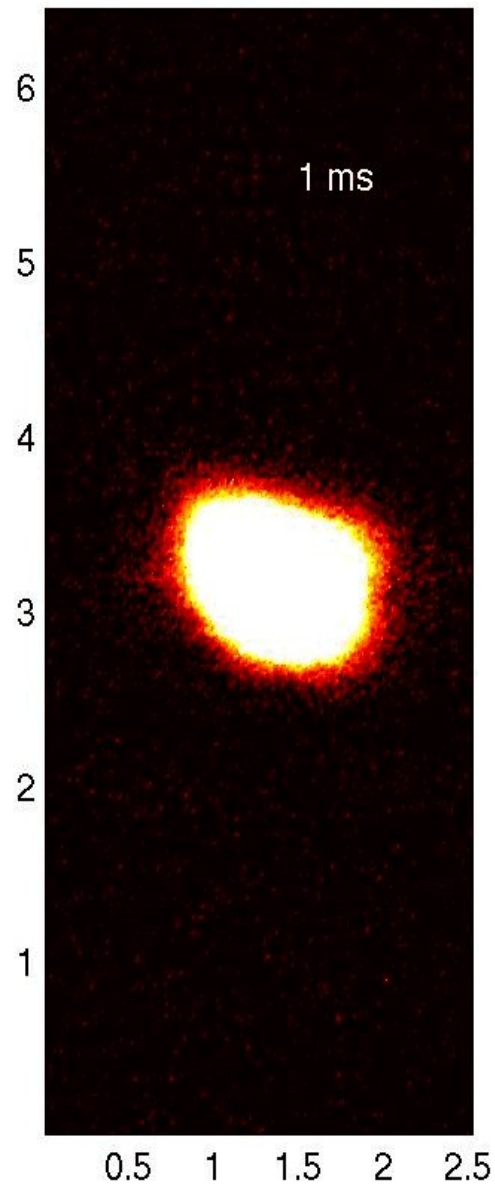
# Οπτικές παγίδες

- Συγκέντρωση ατόμων στις περιοχές υψηλής έντασης (εστίασης) της δέσμης
- Δημιουργία οπτικού πλέγματος με δύο ή περισσότερες δέσμες

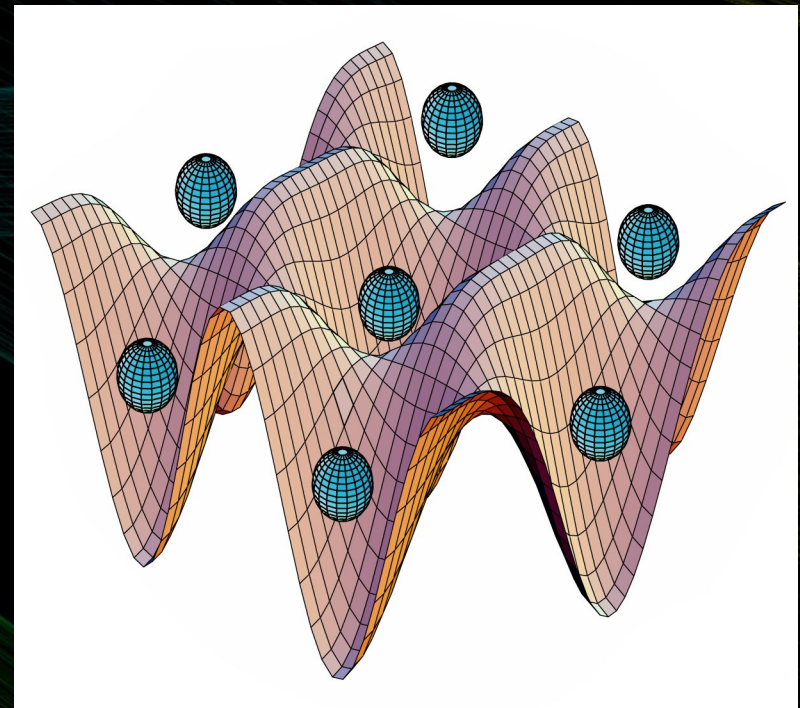
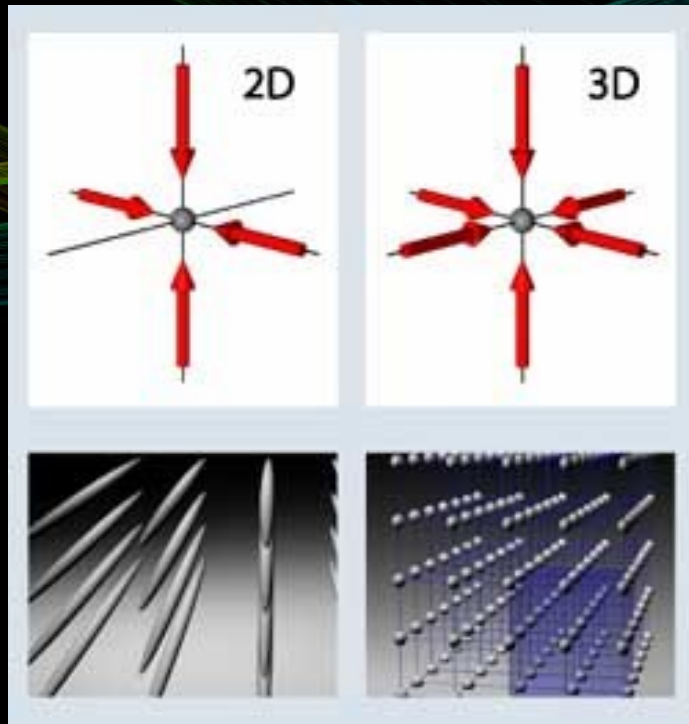


- ✓ Αμελητέα αλληλεπίδραση φωτονίων – ατόμων
- ✓ Μεγάλος χρόνος ζωής (πολλά δευτερόλεπτα)
- ✓ Μεγάλη ελευθερία σε επιλογή γεωμετρίας και μορφής δυναμικού, τα οποία είναι γνωστά με μεγάλη ακρίβεια
- ✓ Δυνατότητα για real-time έλεγχο παραμέτρων
- x Μικρό βάθος δυναμικού ( $< 1 \text{ mK}$ )
- x Ανάγκη για παγίδευση και ψύξη των ατόμων του αερίου

# ΟΠΤΙΚΕΣ ΠΑΓΙΔΕΣ



# Οπτικά πλέγματα



# Θεωρητική περιγραφή

Επίλυση προβλημάτων πολλών σωμάτων  
(*many-body problem*)

Αναλυτική λύση δυνατή σε λίγες περιπτώσεις

Κύριος τρόπος επίλυσης: θεωρίες μέσου πεδίου

πρόβλημα πολλών αλληλεπιδρόντων σωμάτων  
*ανάγεται σε:*

πρόβλημα ενός οιονεί-σωματίου σε εξωτερικό  
δυναμικό



# Θεωρητικά εργαλεία

Χρήση θεωρητικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν για μελέτη συστημάτων στερεάς κατάστασης

- Μοντέλο Hubbard (1963)

$$H = -t \sum_{\langle i, j \rangle, \sigma} (c_{i, \sigma}^\dagger c_{j, \sigma} + c_{j, \sigma}^\dagger c_{i, \sigma}) + U \sum_{i=1}^N n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}, \quad n_{i, \sigma} = c_{i, \sigma}^\dagger c_{i, \sigma}$$

- Μοντέλο Bose-Hubbard (BHM)

$$H = -t \sum_{\langle i, j \rangle} (b_i^\dagger b_j + b_j^\dagger b_i) + \frac{U}{2} \sum_{i=1}^N n_i (n_i - 1) + \sum_{i=1}^N \varepsilon_i n_i$$

Σε συστήματα στερεάς κατάστασης οι παράμετροι  $t$ ,  $U$  λαμβάνονται αυθαίρετα

# Απλή προσέγγιση οπτικού πλέγματος

Χαμιλτονιανή για μποζονικά άτομα, περιοδικό δυναμικό:

$$H = \int \psi^\dagger(x) \left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V_o(x) + V_T(x) \right] \psi(x) d^3x + \frac{2\pi\alpha_s \hbar^2}{m} \int \psi^\dagger(x) \psi^\dagger(x) \psi(x) \psi(x) d^3x$$

$V_o(x)$ : οπτικό περιοδικό δυναμικό της μορφής:

$$V_o(x) = \sum_{j=1}^3 V_{j0} \sin^2(k x_j), \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \text{όπου } \lambda: \text{μήκος κύματος laser}$$

$V_T(x)$ : δυναμικό παγίδευσης (αργά μεταβαλλόμενο)

Αποδεικνύεται ότι είναι μορφής BHM με:

$$U = \frac{4\pi\alpha_s \hbar^2}{m} \int |w(x)|^4 d^3x, \quad t = \int w^*(x-x_i) \left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V_o(x) \right] w(x-x_j)$$

$$\varepsilon_i = \int V_T(x) |w(x-x_i)|^2 d^3x \quad \text{όπου } w(x): \text{συνάρτηση Wannier}$$

# Βαθύτερη μελέτη

Ισχυρότερα θεωρητικά εργαλεία (όπως πχ δυναμική θεωρία μέσου πεδίου, *DMFT*) χρησιμοποιούνται για επίλυση πιο σύνθετων προβλημάτων σε ισχυρά συσχετισμένα συστήματα όπως:

- BCS-BEC crossover
- Συστήματα ισχυρά συσχετισμένων φερμιονίων
- Υπερστερεά κατάσταση

# Αναφορές

## Ultracold gases

- ♦ D.Jaksch, C.Bruder, J.I.Cirac, C.W.Gardiner, P.Zoller, *Phys.Rev.Lett.* **81**,3108 (1998)
- ♦ S.Giorgini, L.P.Pitaevskii, S.Stringari, *Rev.Mod.Phys.* **80**,1215 (2008)
- ♦ I.Bloch, J.Dalibard, W.Zwerger, *Rev. Mod. Phys.* **80**,885 (2008)
- ♦ V.I.Yukalov, *Laser Phys.* **19**, 1 – 110 (2009)

## Optical traps

- ♦ S.Chu, J.E.Bjorkholm, A.Ashkin, A.Cable, *Phys.Rev.Lett.* **57**,314 – 317 (1986)
- ♦ S.Friebel, C.D'Andrea, J.Walz, M.Weitz, T.W.Hänsch, *Phys.Rev.A* **57**, R20 – R23 (1998)
- ♦ R.Grimm, M.Weidemüller, Y.B.Ovchinnikov, *Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics Vol. 42*, 95 – 170 (2000)

Created with open-source software:



debian  
GNU / LINUX

