

Un colloquio di lavoro...



... con Richard Feynman!

Domanda: Quanto deve essere grande un computer che possa calcolare la dinamica (esatta) di un sistema quantistico multicorpo composto da 100 particelle?

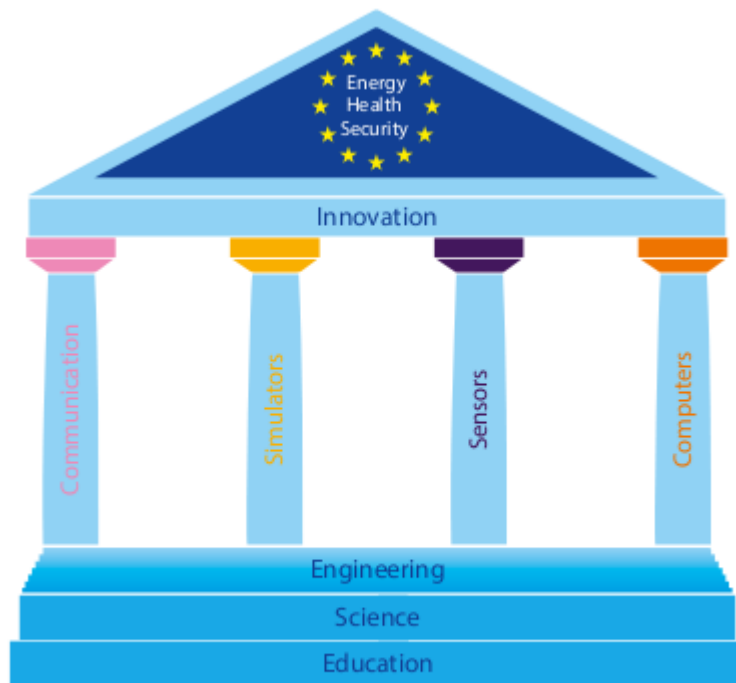


La visione di Feynman: dagli atomi freddi alle nuove tecnologie quantistiche

Oliver Morsch

INO-CNR e Dipartimento di Fisica, Pisa

Colloquio Dipartimentale, 11/10/2017



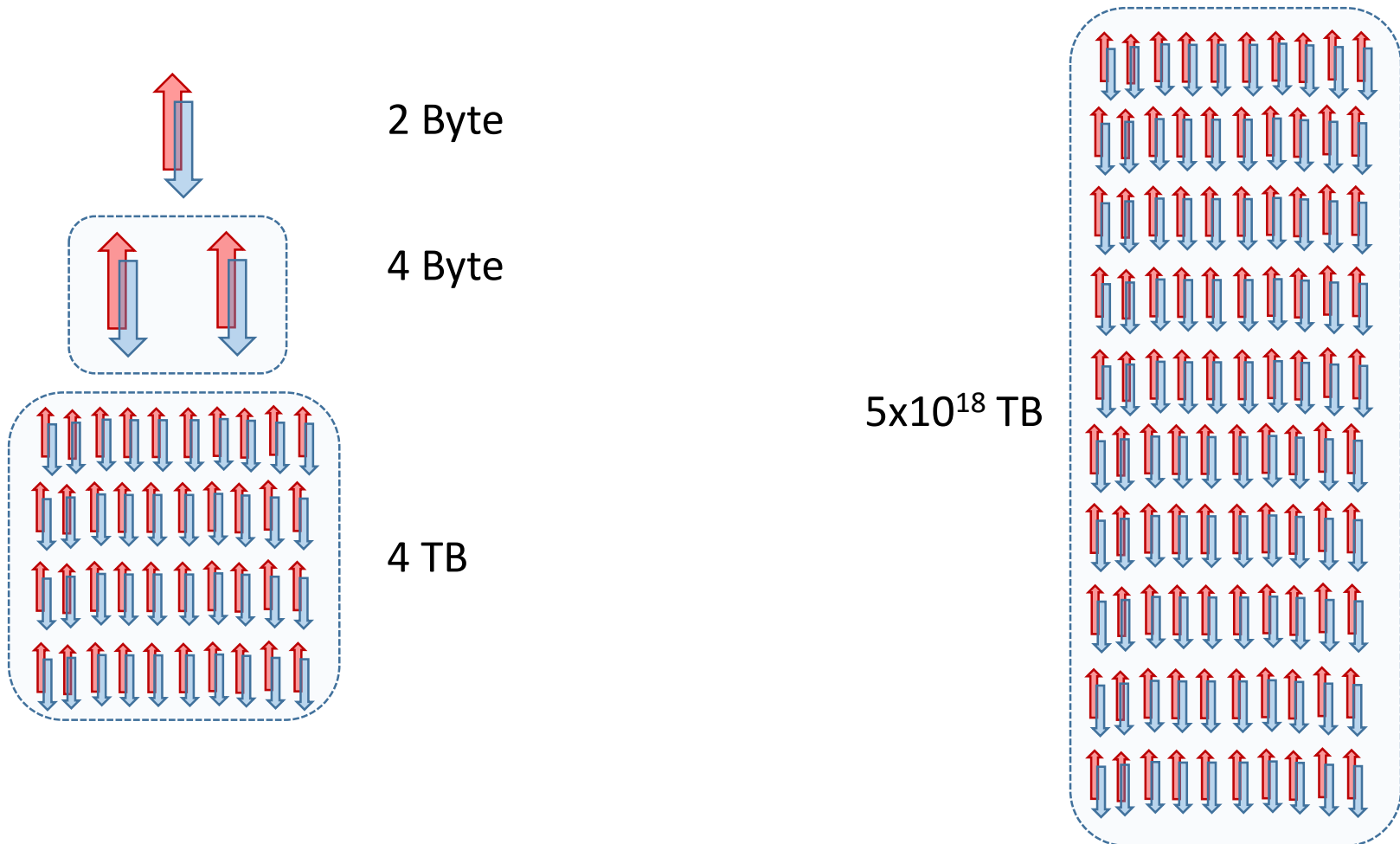
Dalla domanda del colloquio alla «visione» di Feynman

Che cosa c'entrano gli atomi freddi?

Che cosa facciamo a Pisa, e a cosa serve?

Nel futuro, quali nuove tecnologie saranno basate sulla fisica quantistica?

Le risorse necessarie crescono esponenzialmente



La visione di Feynman: i calcolatori devono essere quantistici

Simulating Physics with Computers

Richard P. Feynman

Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91107

Received May 7, 1981

“The first question is [...]: **Can physics be simulated by a universal computer?** “

“Nature isn’t classical dammit, and if you want to make a **simulation of nature, you’d better make it quantum mechanical**, and by golly it’s a wonderful problem, because it doesn’t look so easy.



Impariamo dal passato (ca. 1920)

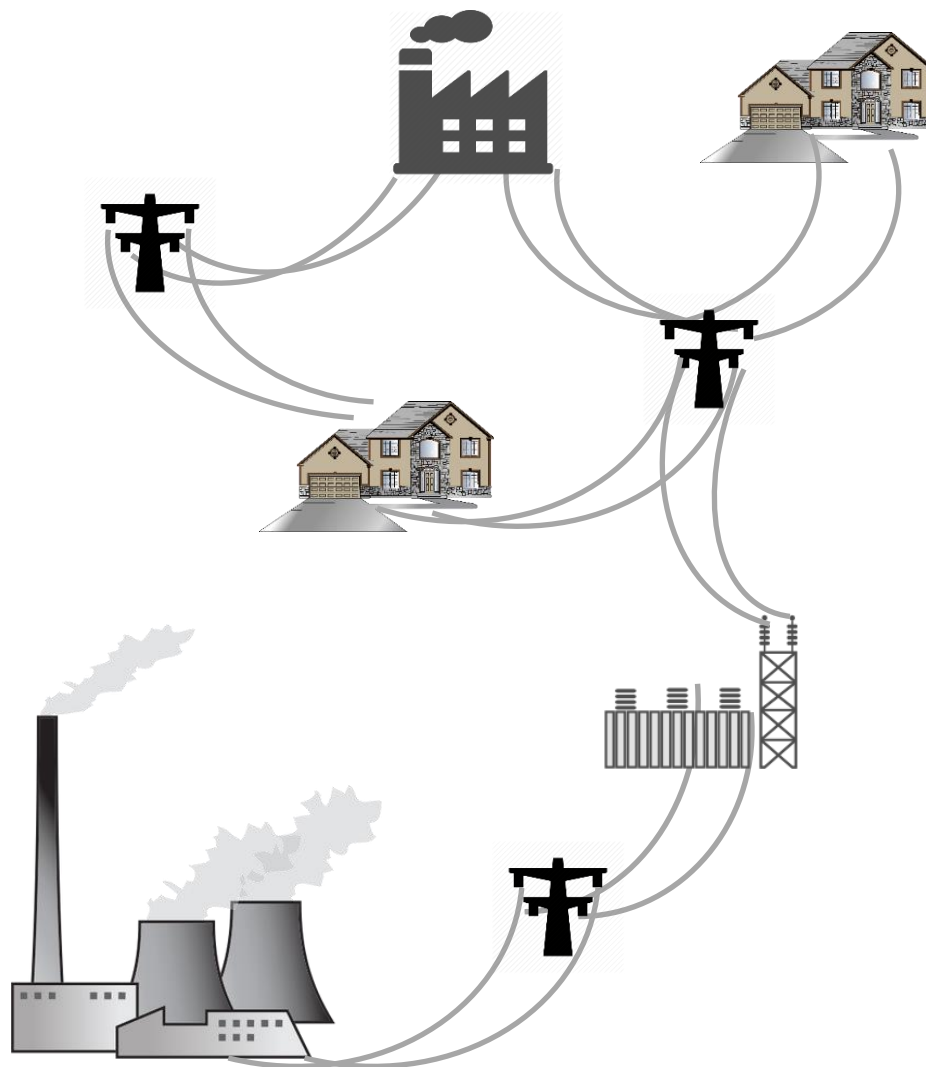
Il problema: calcolare il comportamento di una rete elettrica a corrente alternata

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

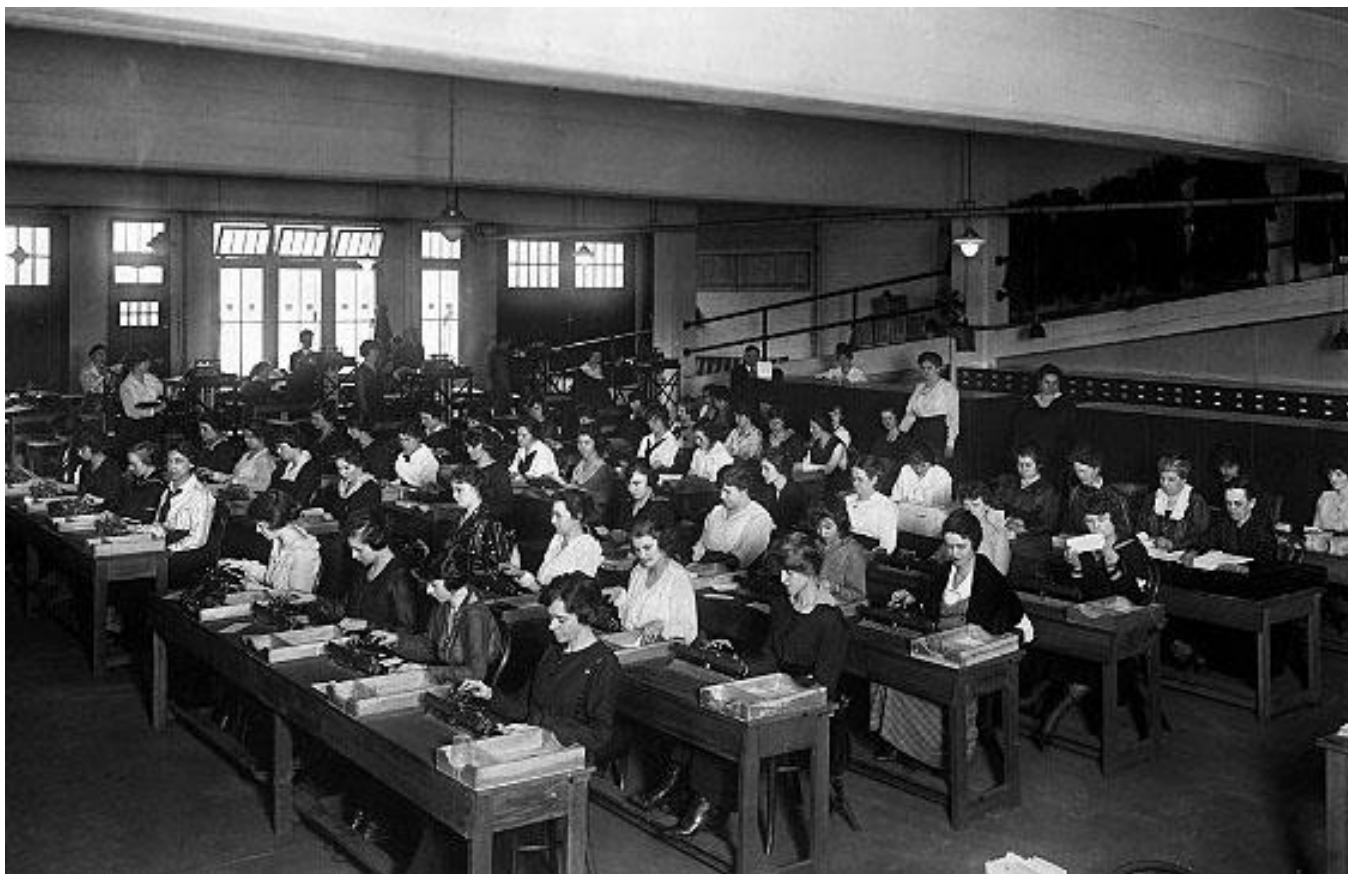
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$



Nel 1920 i «computer» erano così:



Allora come si fa?

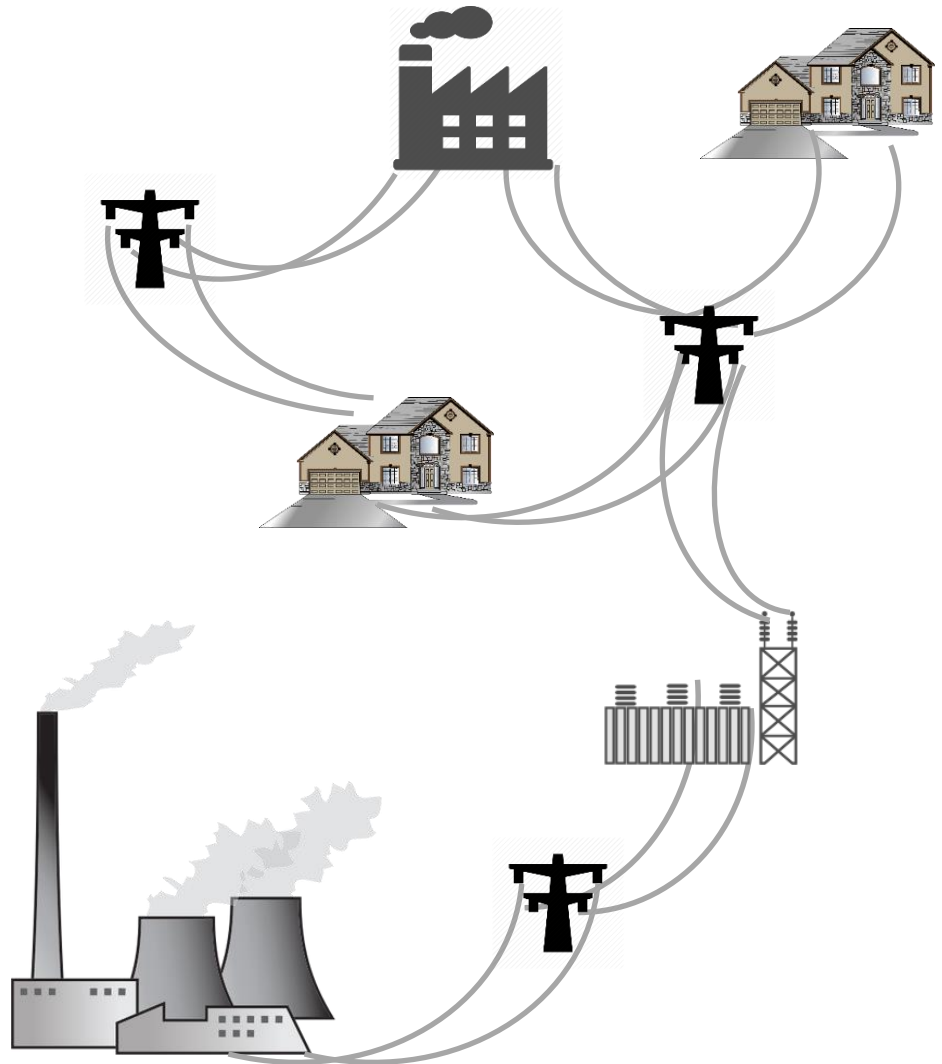
Il problema: calcolare il comportamento di una rete elettrica a corrente alternata

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$



Si costruisce un «simulatore»!

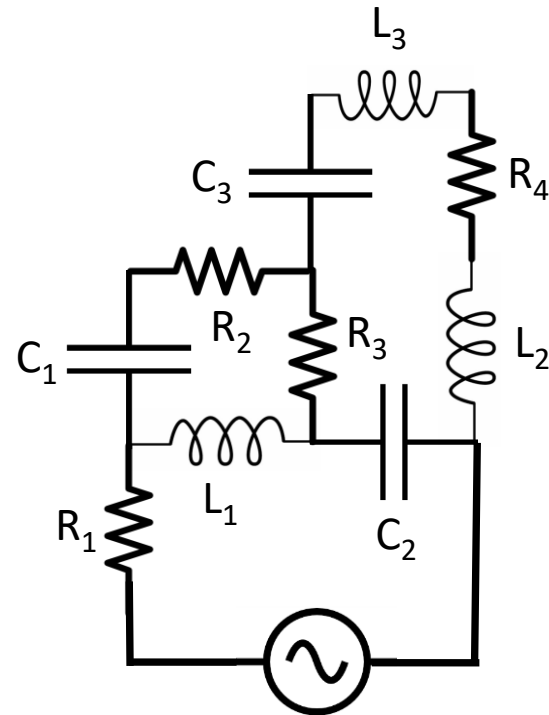
La soluzione: un modello su scala descritto dalle stesse equazioni = un «*computer analogico*»

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$



Si costruisce un «simulatore»!

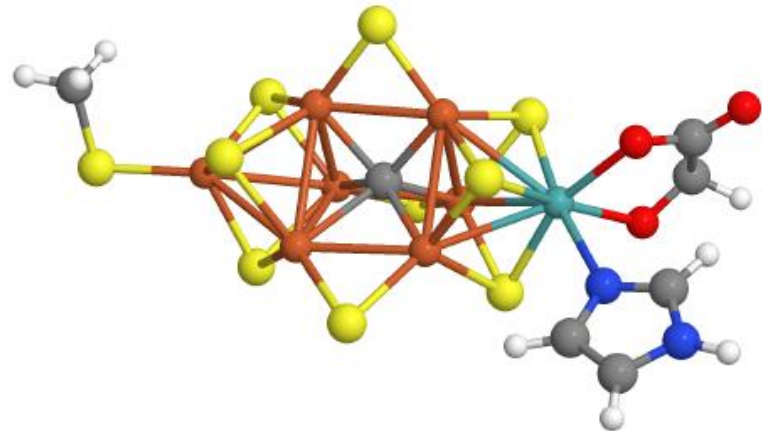
Network analyzer:

Usato fino agli anni 60
non solo per reti
elettriche, ma anche per
risolvere altre equazioni
differenziali (equazione
di Schrodinger etc.)



Se il calcolo è impossibile, si costruisce
un «simulatore quantistico»

$$\hat{H} = \sum_i \hat{H}_i + \sum_{j,k} \hat{U}_{jk} + \sum_l \hat{V}_l + \dots$$

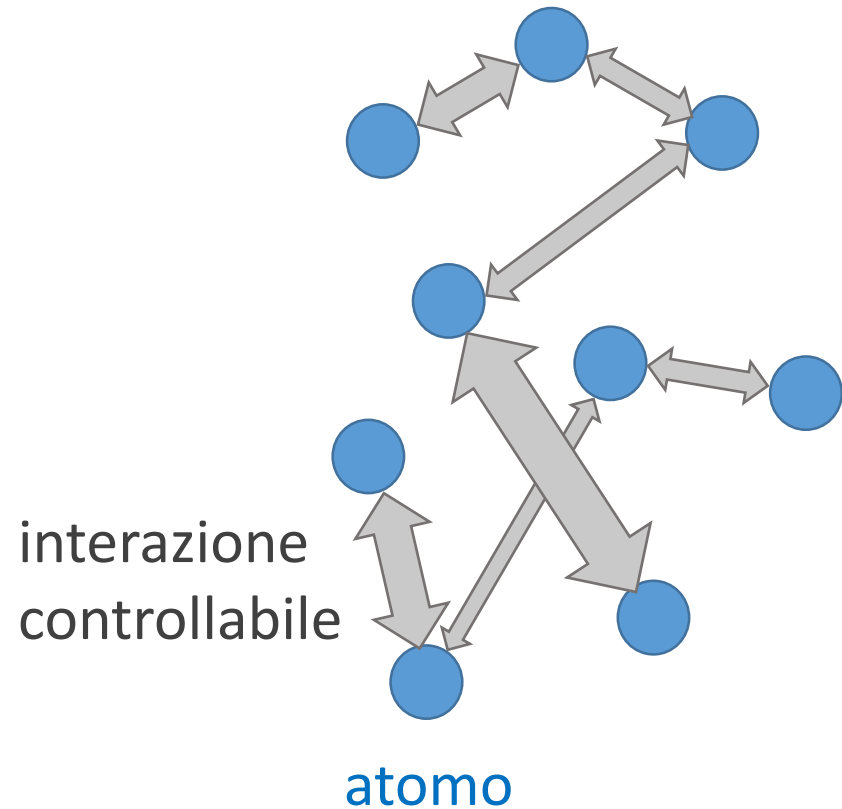


Iron molybdenum cofactor:

Fissa l'azoto a temperatura e
pressione ambiente (a differenza
del processo Haber-Bosch)

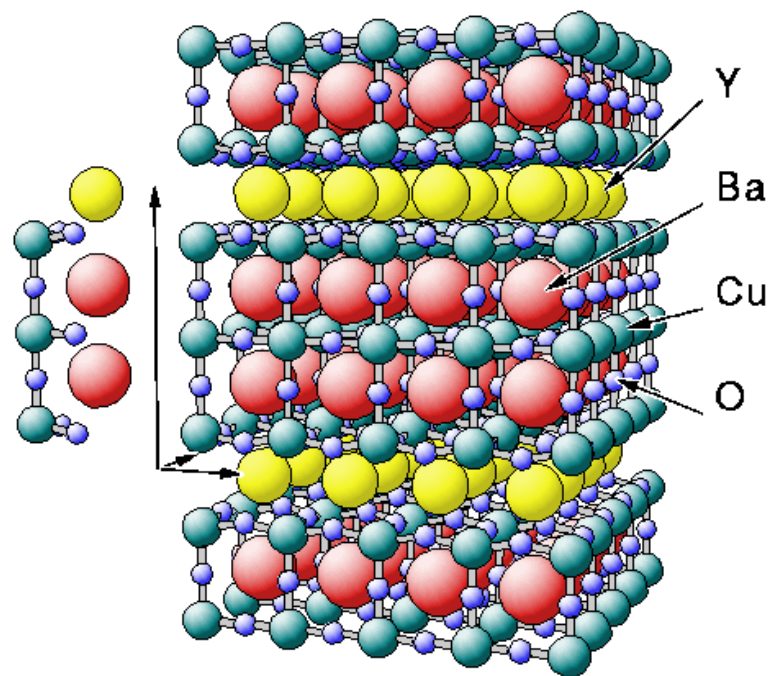
Se il calcolo è impossibile, si costruisce
un «simulatore quantistico»

$$\hat{H} = \sum_i \hat{H}_i + \sum_{j,k} \hat{U}_{jk} + \sum_l \hat{V}_l + \dots$$



Se il calcolo è impossibile, si costruisce
un «simulatore quantistico»

$$\hat{H} = \sum_i \hat{H}_i + \sum_{j,k} \hat{U}_{jk} + \sum_l \hat{V}_l + \dots$$



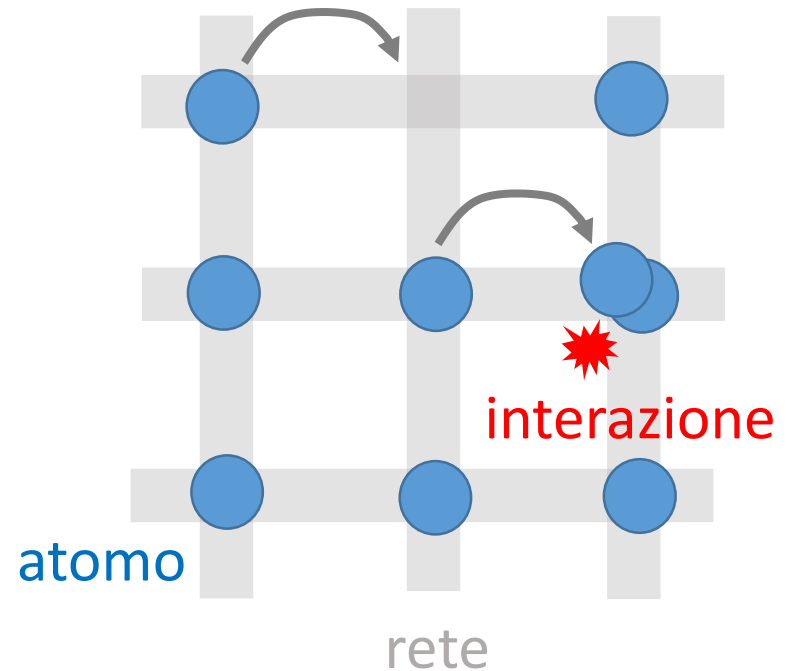
YBa₂Cu₃O₇ (.3) lattice

BALSA plot

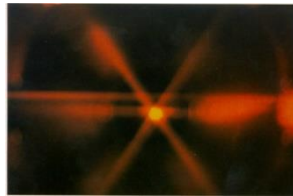
superconduttore ad alta
temperatura critica

Se il calcolo è impossibile, si costruisce
un «simulatore quantistico»

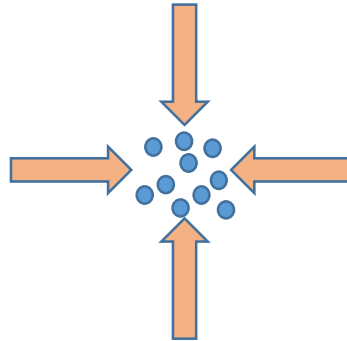
$$\hat{H} = \sum_i \hat{H}_i + \sum_{j,k} \hat{U}_{jk} + \sum_l \hat{V}_l + \dots$$



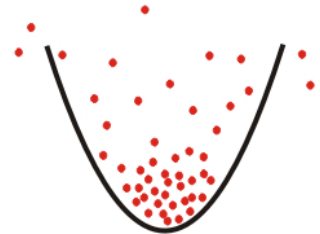
La luce laser permette di raffreddare atomi a temperature bassissime



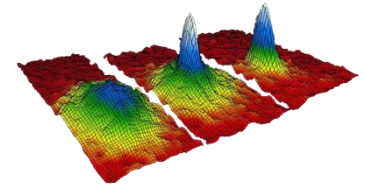
Laser: 1960



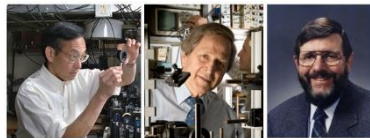
raffreddamento Doppler:
100 micro-Kelvin



raffreddamento
evaporativo:
100 nano-Kelvin



condensato di
Bose-Einstein



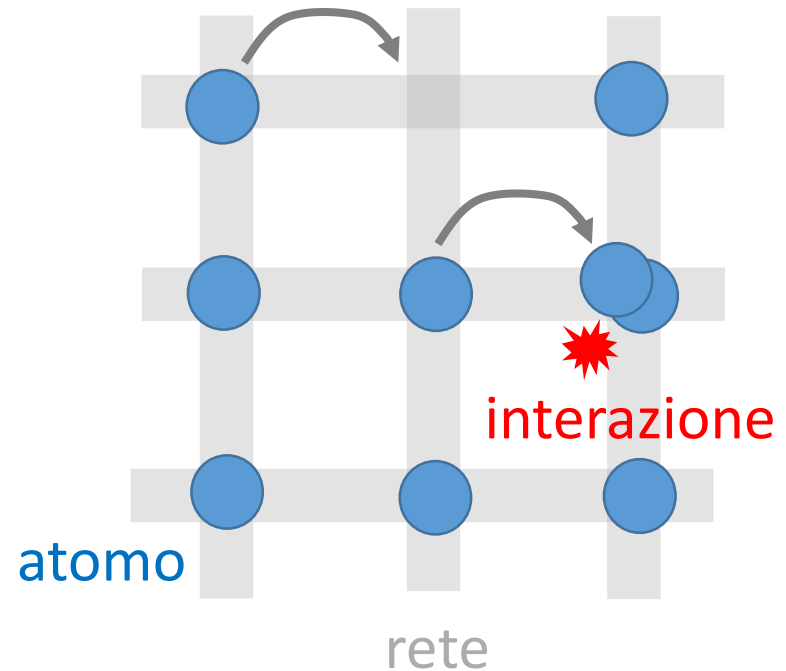
Premio Nobel 1997



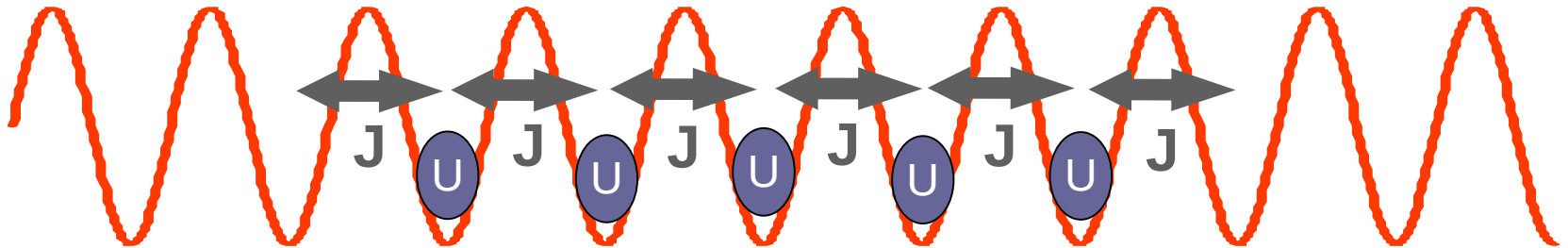
Premio Nobel 2001

La transizione di Mott si può simulare con gli atomi freddi

$$\hat{H} = \sum_i \hat{H}_i + \sum_{j,k} \hat{U}_{jk} + \sum_l \hat{V}_l + \dots$$

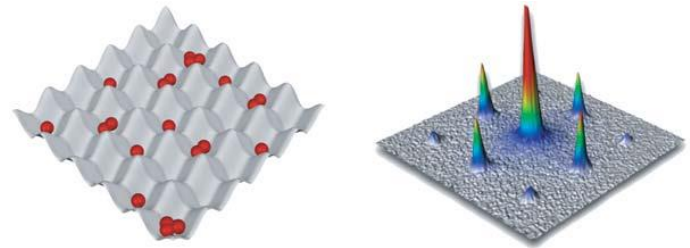


La transizione di Mott si può simulare con gli atomi freddi

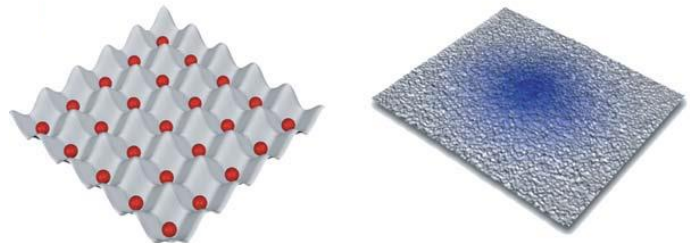


$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} (b_i^\dagger b_j + b_i b_j^\dagger) + U \sum_i N_i(N_i - 1) + \sum_i V_i N_i$$

$J \gg U$: superfluido (atomi liberi di muoversi, coerenza di fase globale)

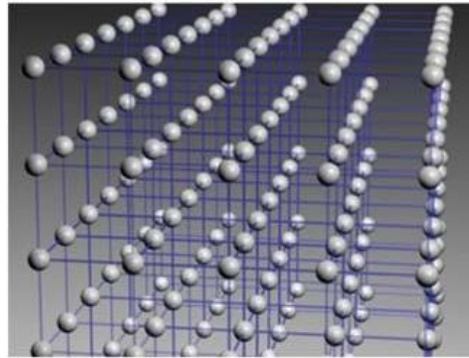
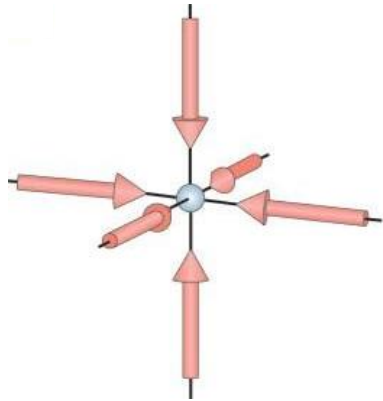


$J \ll U$: isolante di Mott (un atomo per sito, nessuna coerenza)



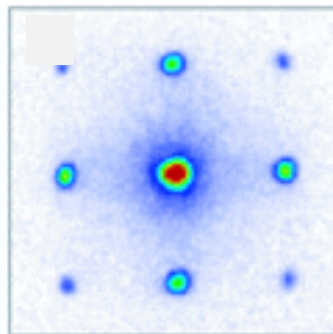
La transizione di Mott si può simulare con gli atomi freddi

«Physics on Friday»
3 novembre!

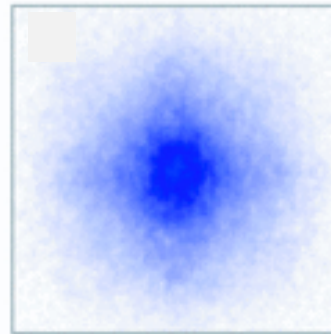


reticolo ottico tridimensionale

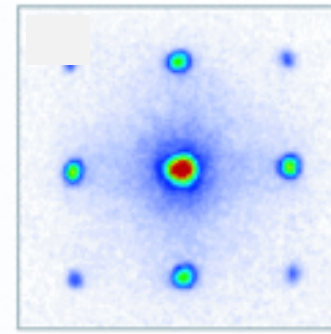
Immanuel Bloch



reticolo
poco profondo:
 $J \gg U$

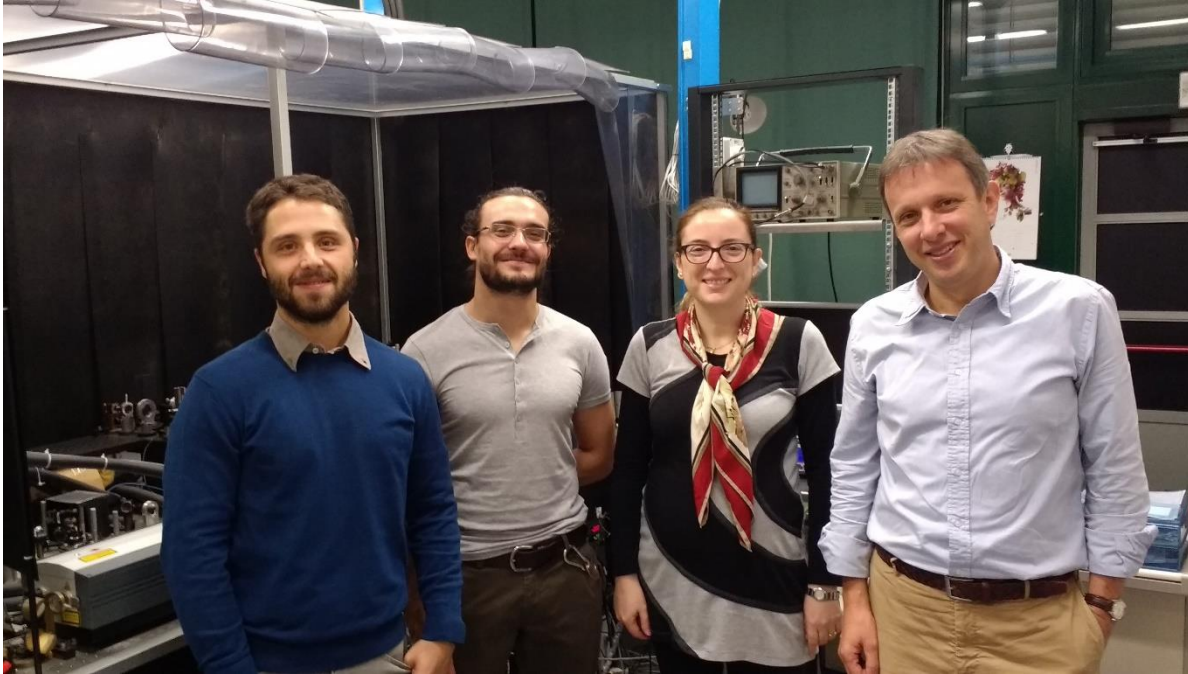


reticolo
molto profondo:
 $J \ll U$



reticolo
poco profondo:
 $J \gg U$

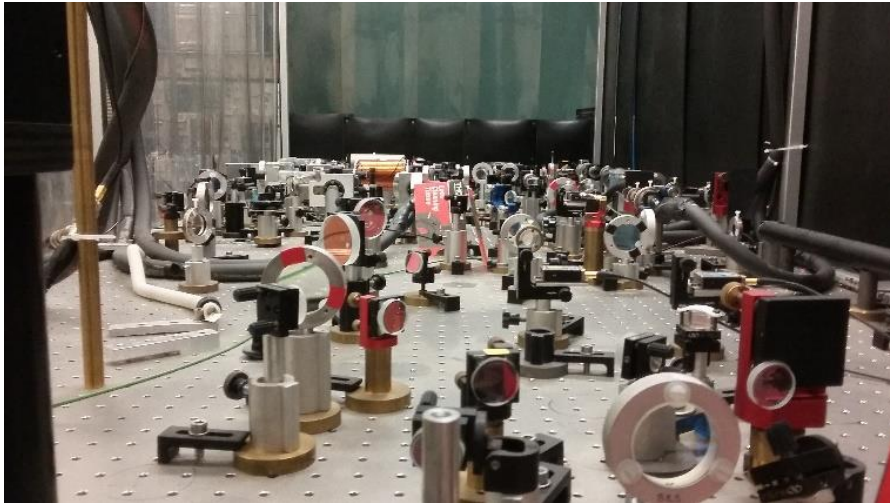
Che cosa facciamo a Pisa, e a che cosa serve?



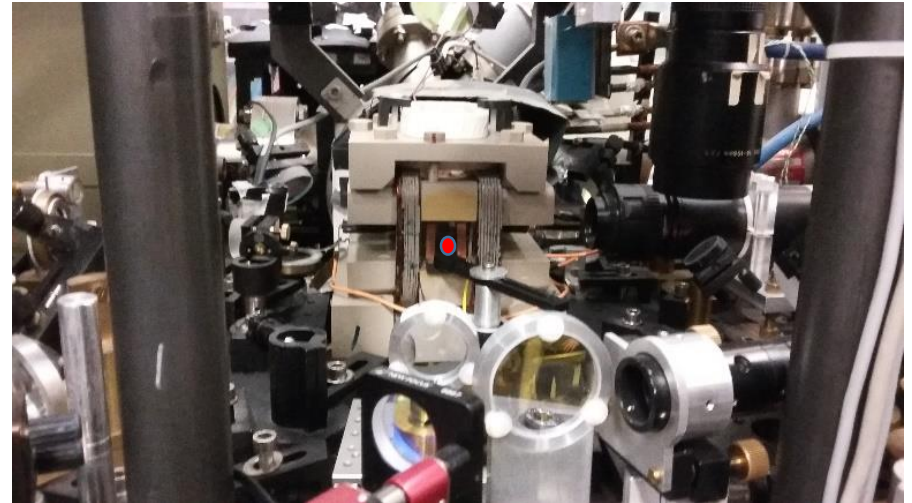
Cristiano Simonelli, Matteo Archimi, Ennio Arimondo, Donatella Ciampini, Oliver Morsch
Tecnici: Enrico Andreoni e Nicola Puccini

Nuova attività all'INO: condensato di disprosio (Fioretti, Gabbanini, Modugno)

Che cosa facciamo a Pisa, e a che cosa serve?

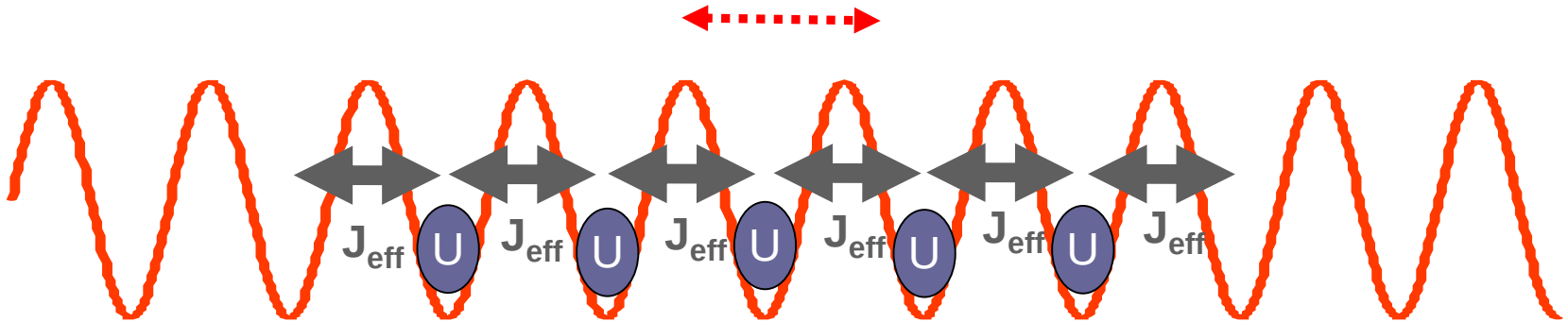


Tanta ottica per preparare la luce laser
(frequenza, polarizzazione, potenza...)

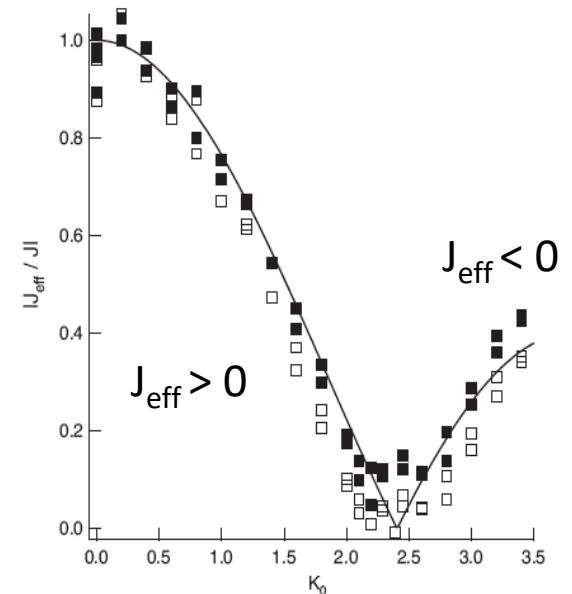
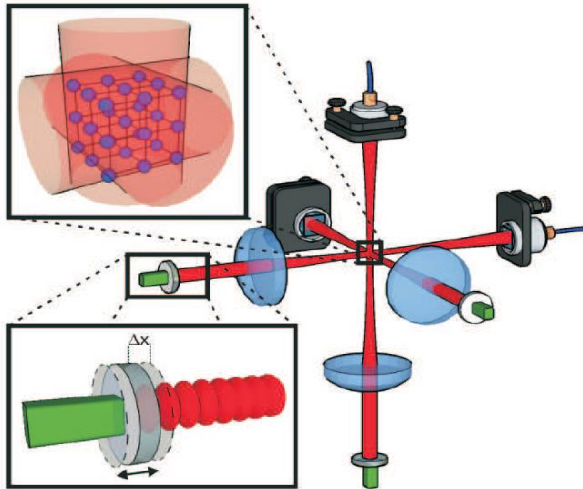


La nube atomica (disco rosso) contiene
gli atomi freddi dentro una cella a vuoto;
tutto si svolge in meno di un millimetro
cubo

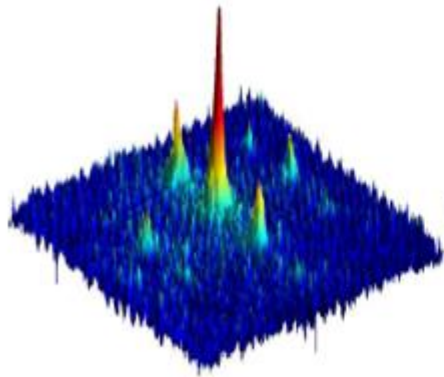
Possiamo controllare il tunneling e la sua fase agitando il reticolo



$$J_{\text{eff}} = J J_0(K/(\hbar\omega)),$$

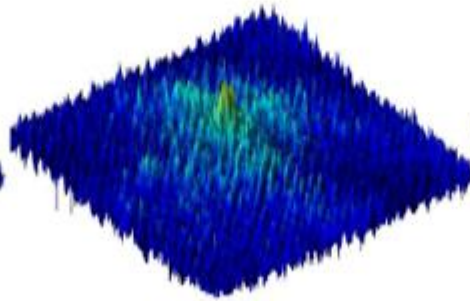


Possiamo indurre la transizione di Mott agitando il reticolo



agitazione debole:

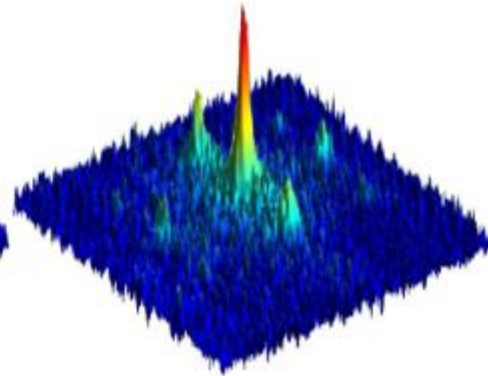
$$|J_{\text{eff}}| \gg U$$



agitazione forte:

$$|J_{\text{eff}}| \gg U$$

(e possibilmente $J_{\text{eff}} < 0$)



agitazione debole:

$$|J_{\text{eff}}| \gg U$$

Agitando il reticolo si realizza il modello di Haldane...

VOLUME 61, NUMBER 18

PHYSICAL REVIEW LETTERS

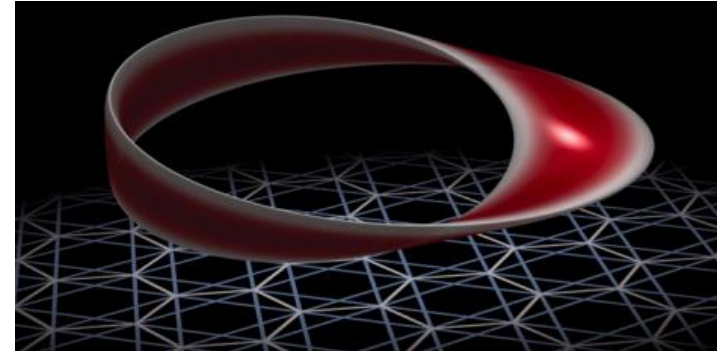
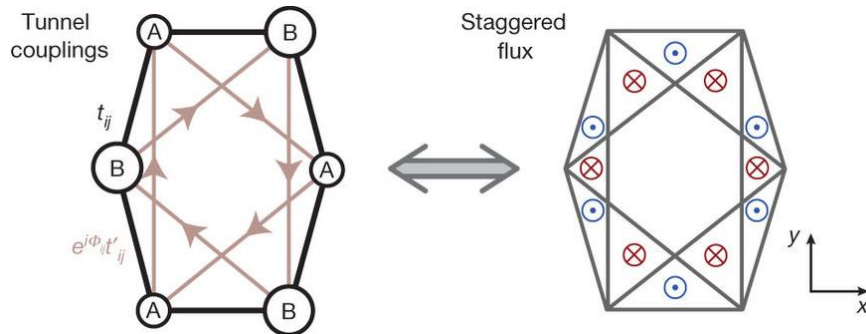
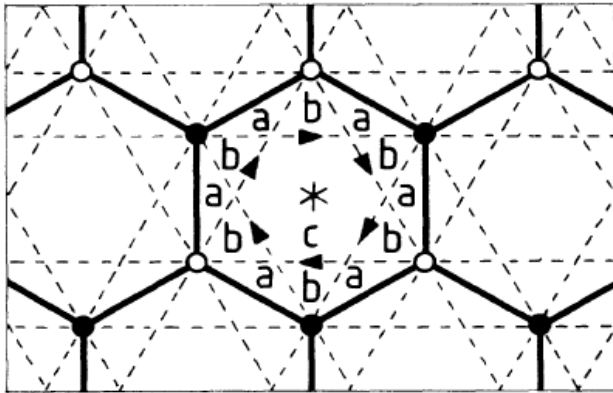
31 OCTOBER 1988

Model for a Quantum Hall Effect without Landau Levels: Condensed-Matter Realization of the "Parity Anomaly"

F. D. M. Haldane

Department of Physics, University of California, San Diego, La Jolla, California 92093

(Received 16 September 1987)



Tilman Esslinger



... che non si pensava fosse possibile
(ma con un simulatore lo è!)

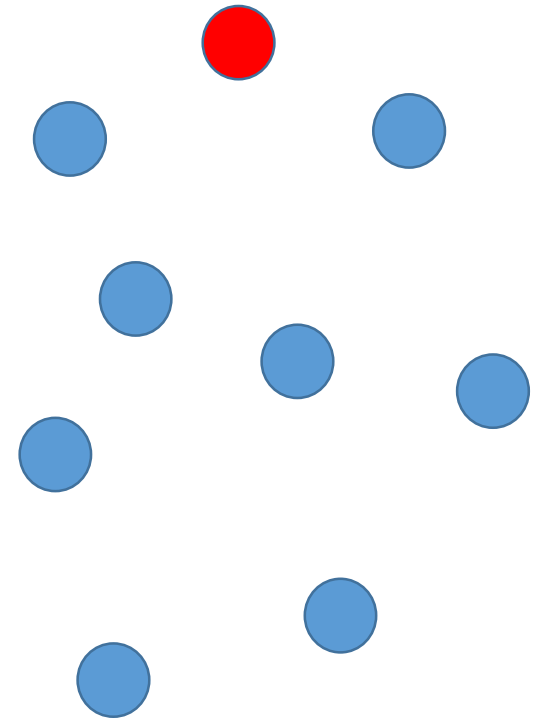


Thouless, Haldane, Kosterlitz: Premio Nobel 2016

The basic idea goes back to Feynman, who pointed out that one could hope to **solve very hard quantum problems by designing a quantum simulator**.[...] Cold atomic gases have turned out to provide a perfect platform for obtaining this. [...]. At the end of his paper Haldane wrote: **“While the particular model presented here, is unlikely to be directly physically realizable, it indicates . . . ”**. What he could not imagine was that **25 years later, new experimental techniques would make it possible to create an artificial state of matter that would indeed provide that “unlikely” realization.**

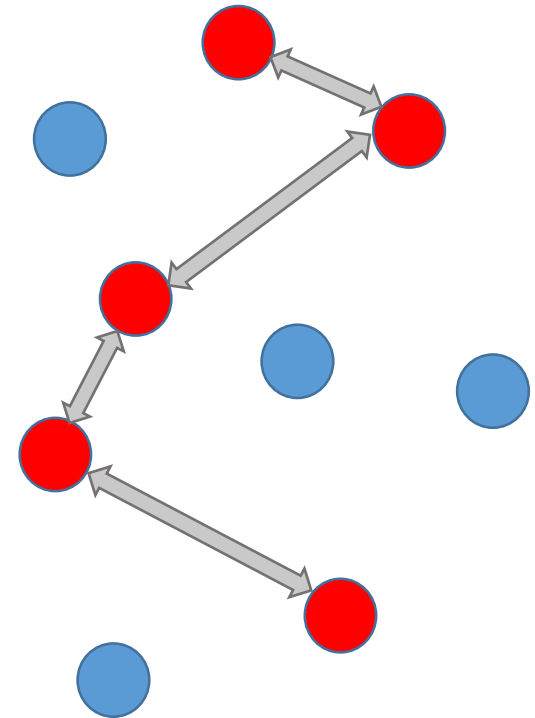
Vogliamo studiare la percolazione quantistica usando un simulatore

Un'eccitazione nel sistema può «percolare» o meno a seconda della probabilità di avere un legame tra i nodi della rete (= atomi)



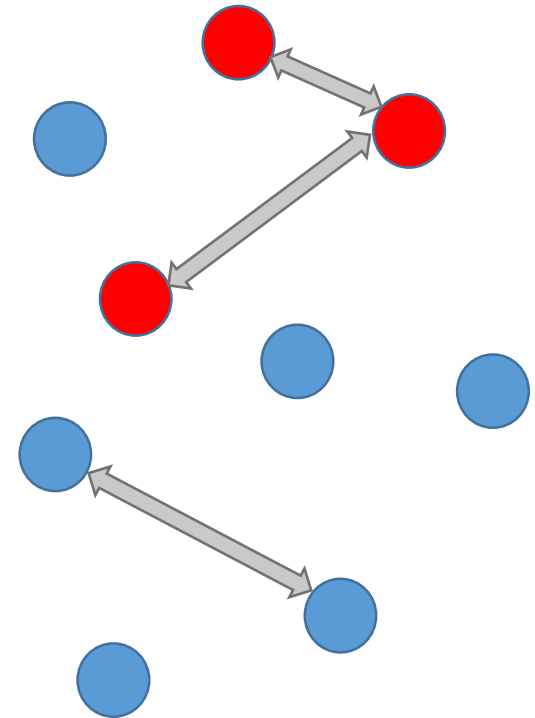
Vogliamo studiare la percolazione quantistica usando un simulatore

Un'eccitazione nel sistema può «percolare» o meno a seconda della probabilità di avere un legame tra i nodi della rete (= atomi)



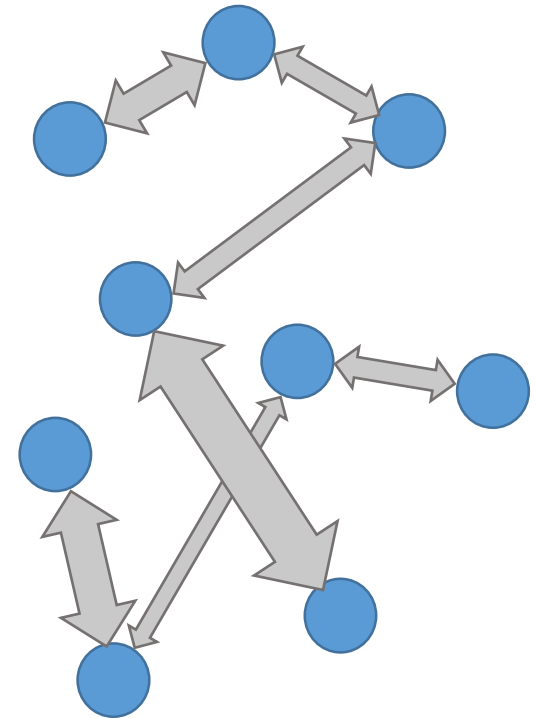
Vogliamo studiare la percolazione quantistica usando un simulatore

Un'eccitazione nel sistema può «percolare» o meno a seconda della probabilità di avere un legame tra i nodi della rete (= atomi)

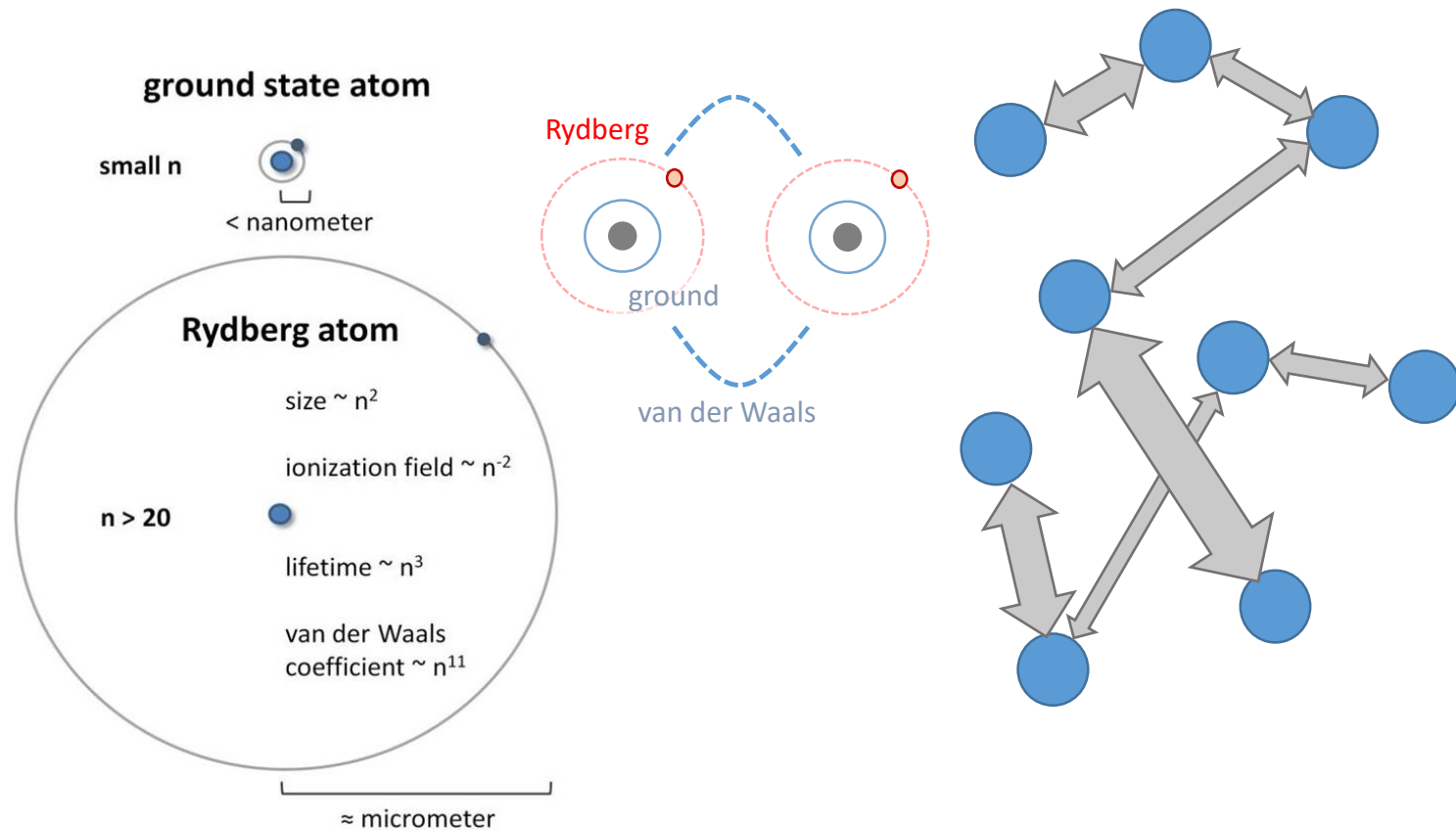


Vogliamo studiare la percolazione quantistica usando un simulatore

Quindi, abbiamo bisogno di creare una rete (disordinata) di atomi con interazioni (che creano i legami) controllabili



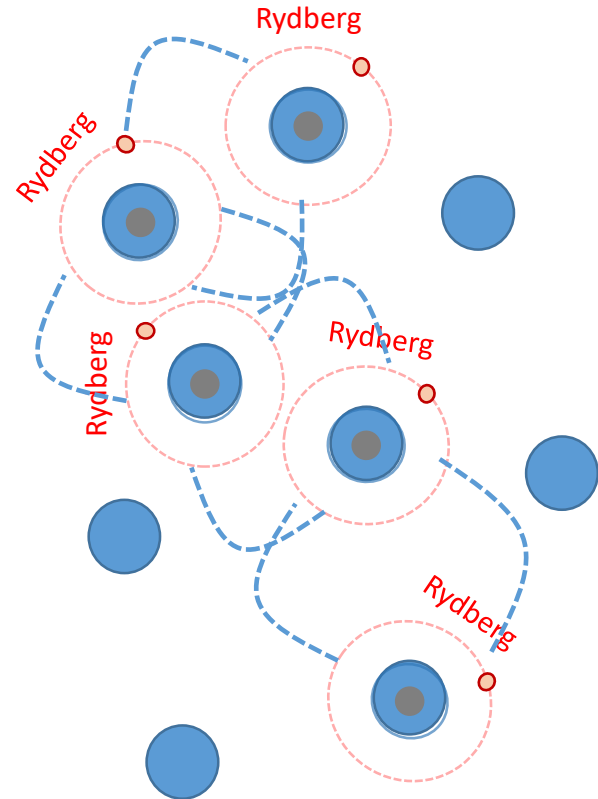
Usiamo gli atomi di Rydberg per creare un simulatore per la percolazione



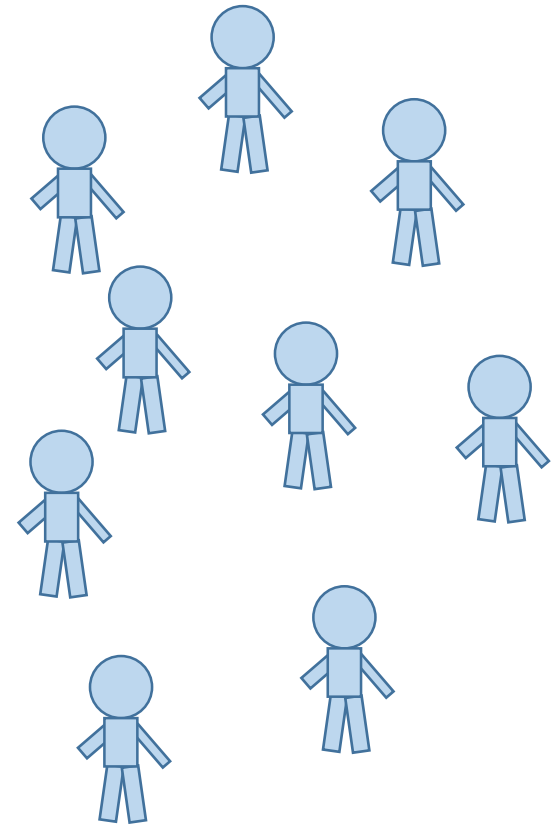
Usiamo gli atomi di Rydberg per creare un simulatore per la percolazione

Un atomo in uno stato di Rydberg «infetta» un atomo vicino tramite l'interazione di van der Waals -> l'eccitazione percola.

Nel caso quantistico, questa percolazione dipende dalle coerenze tra gli atomi ed è impossibile da calcolare per sistemi molto grandi.

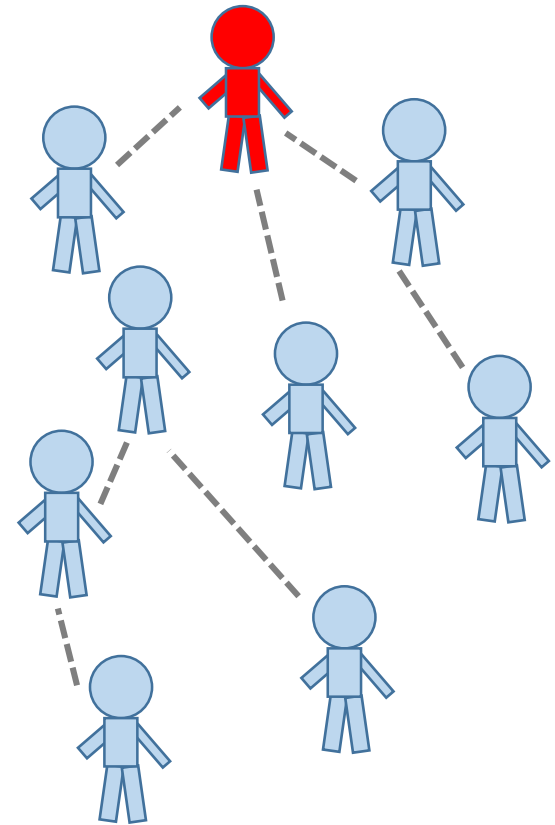


Studiamo prima un analogo classico: la diffusione di una malattia infettiva



Studiamo prima un analogo classico: la diffusione di una malattia infettiva

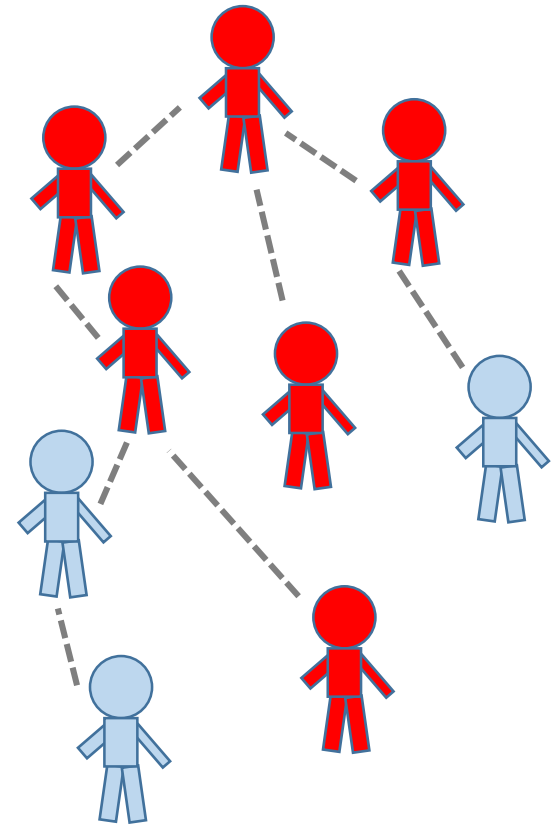
A seconda dei legami tra le persone e la velocità di guarigione, la malattia si può diffondere oppure no.



Studiamo prima un analogo classico: la diffusione di una malattia infettiva

A seconda dei legami tra le persone e la velocità di guarigione, la malattia si può diffondere oppure no.

Si parla di «percolazione diretta».

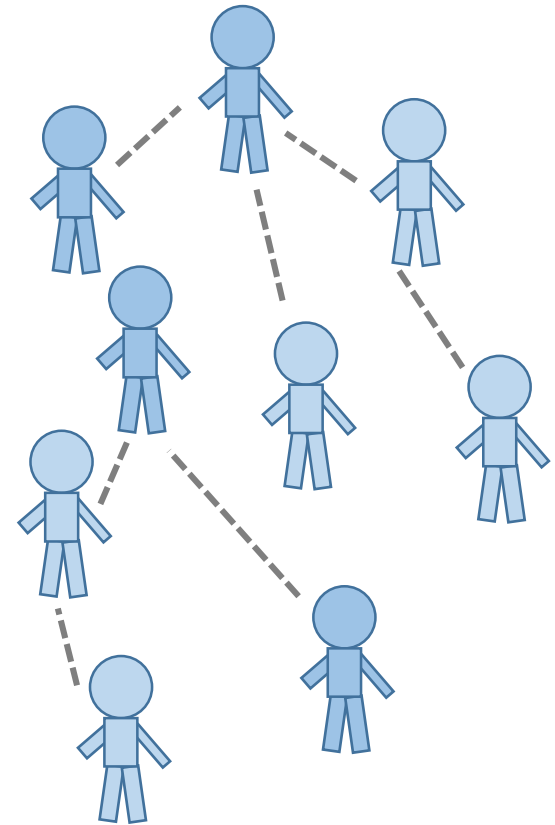


Stato «attivo»: la malattia si diffonde

Studiamo prima un analogo classico: la diffusione di una malattia infettiva

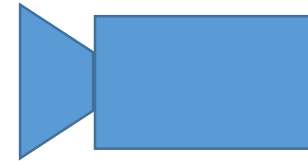
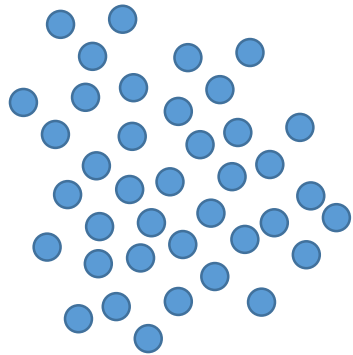
A seconda dei legami tra le persone e la velocità di guarigione, la malattia si può diffondere oppure no.

Si parla di «percolazione diretta».



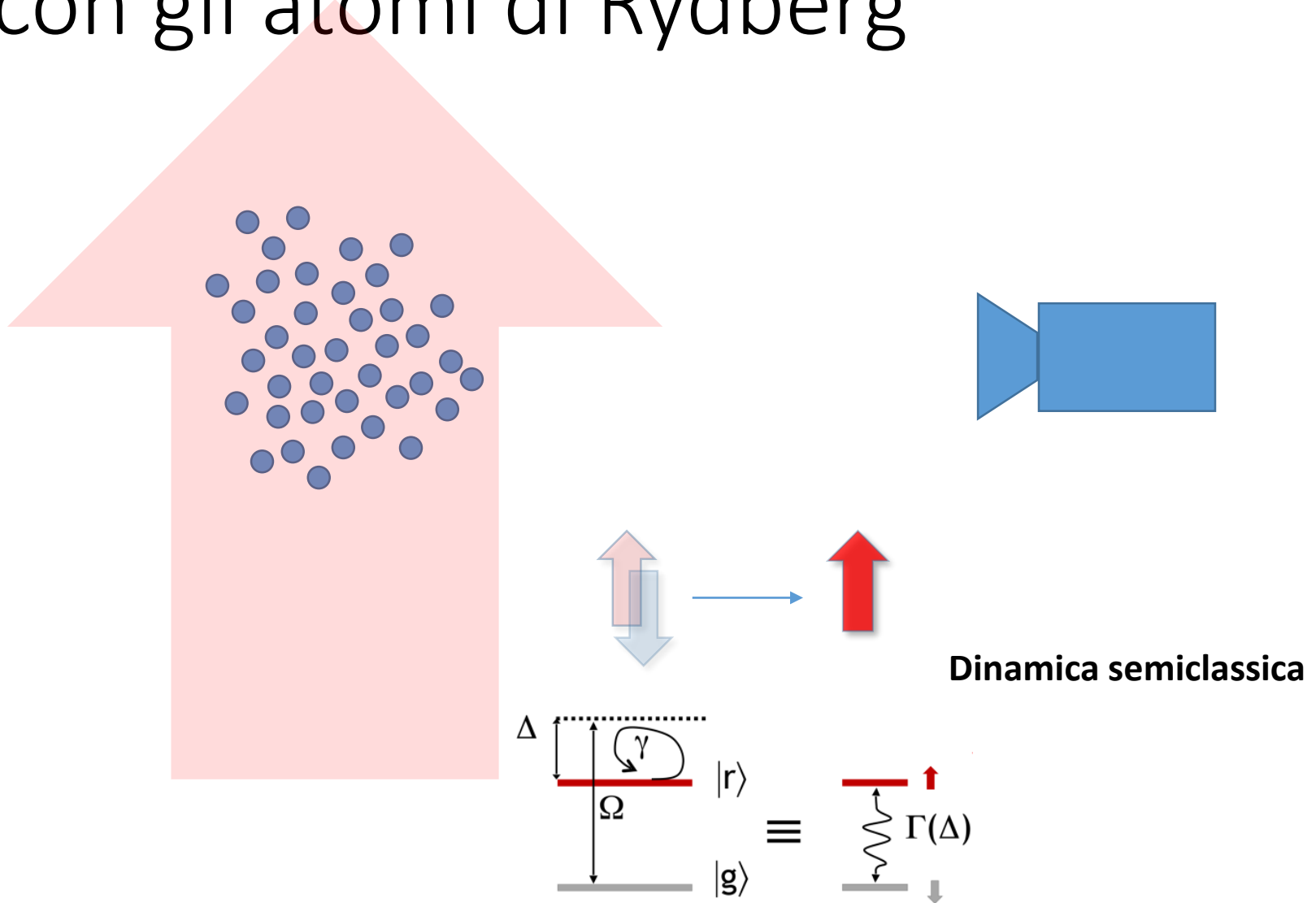
Stato «assorbente»: nessuna diffusione

Studiamo la percolazione diretta con gli atomi di Rydberg

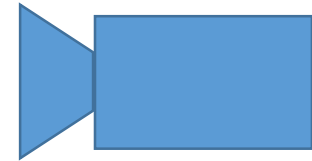
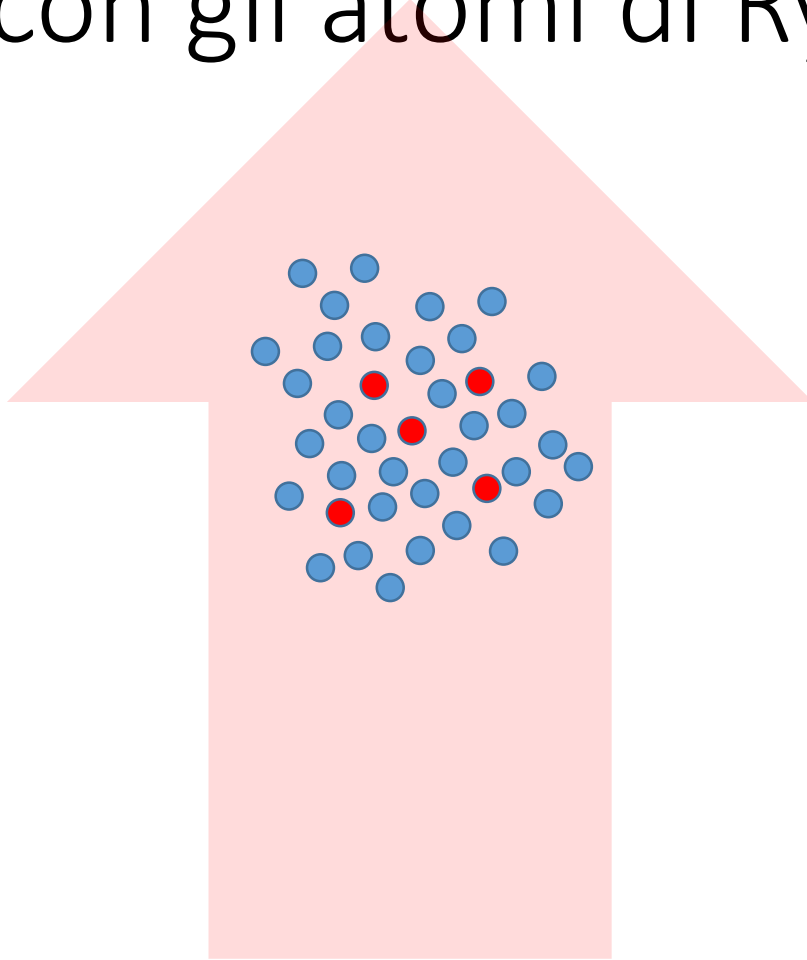


100 mila atomi di rubidio
a 100 micro-Kelvin in una nube
di 100 micrometri

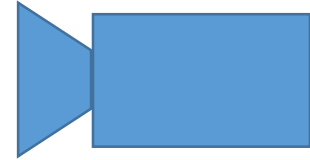
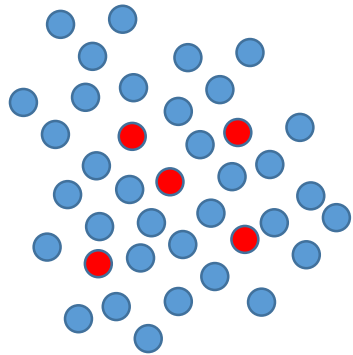
Studiamo la percolazione diretta con gli atomi di Rydberg



Studiamo la percolazione diretta con gli atomi di Rydberg

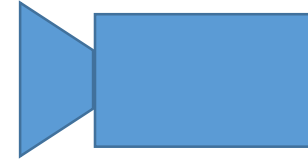
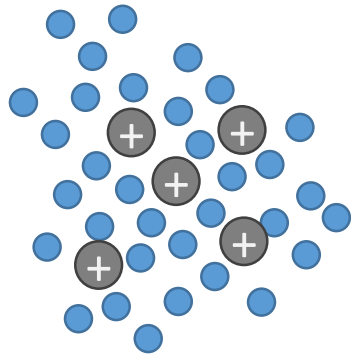


Studiamo la percolazione diretta con gli atomi di Rydberg



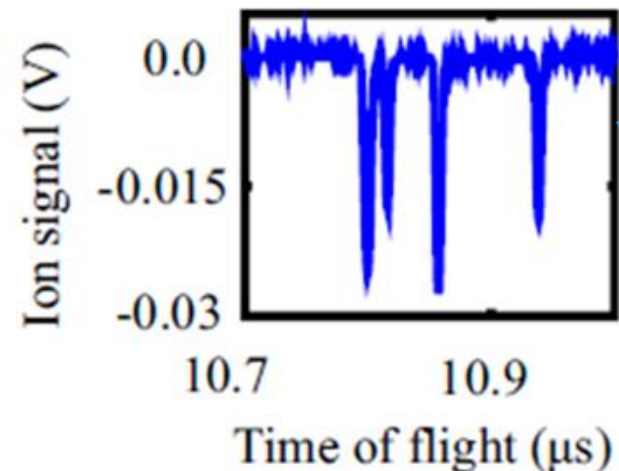
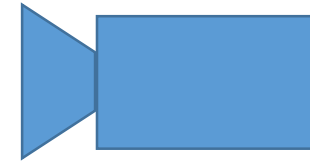
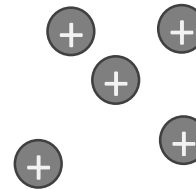
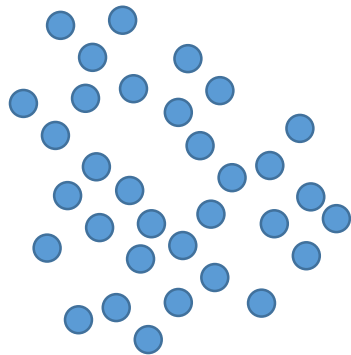
Studiamo la percolazione diretta con gli atomi di Rydberg

campo elettrico
→

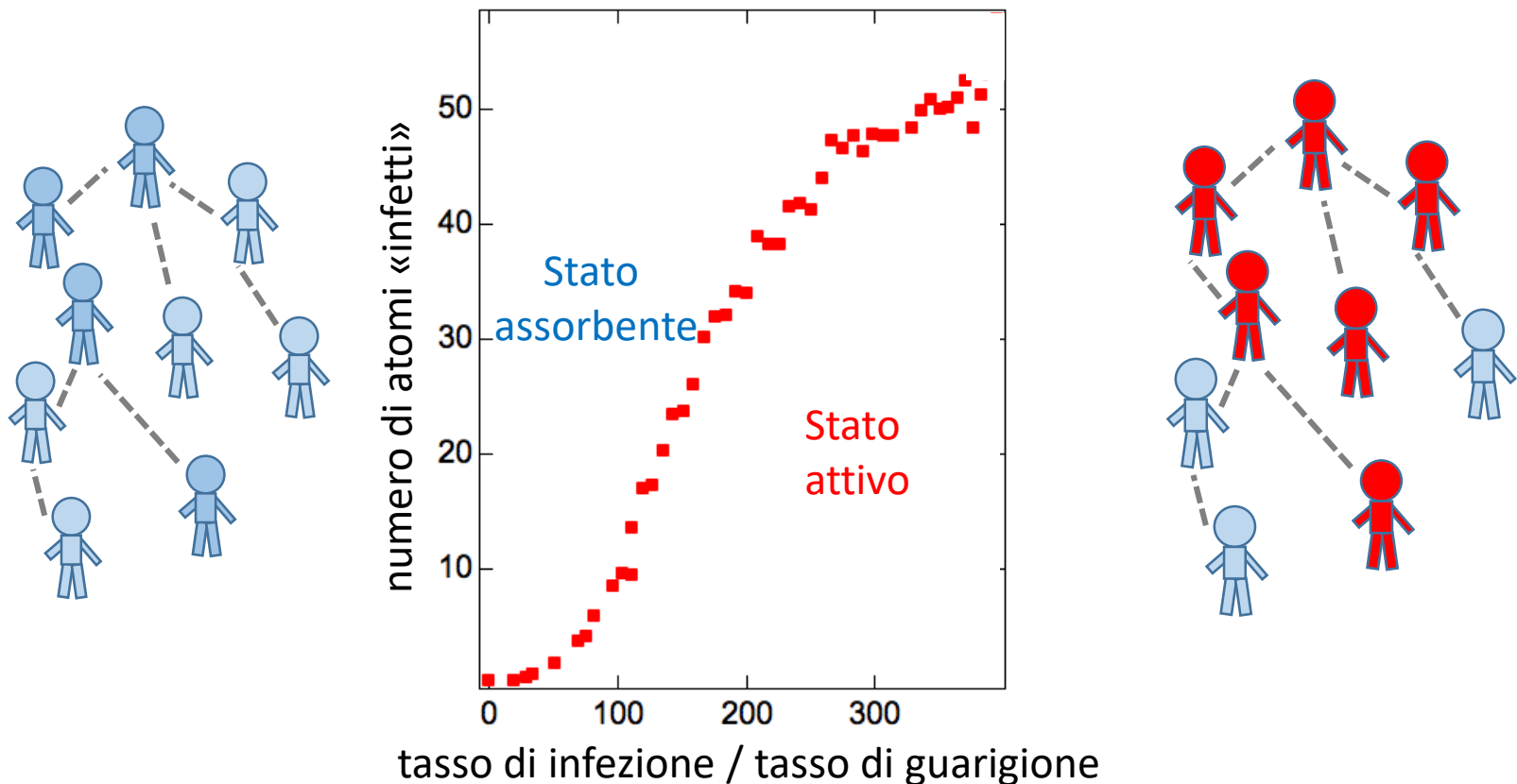


Studiamo la percolazione diretta con gli atomi di Rydberg

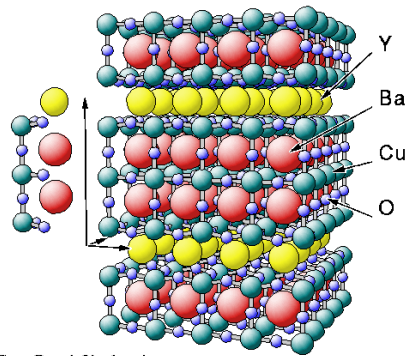
campo elettrico



Studiamo la percolazione diretta con gli atomi di Rydberg



Nel futuro speriamo di passare alla percolazione quantistica



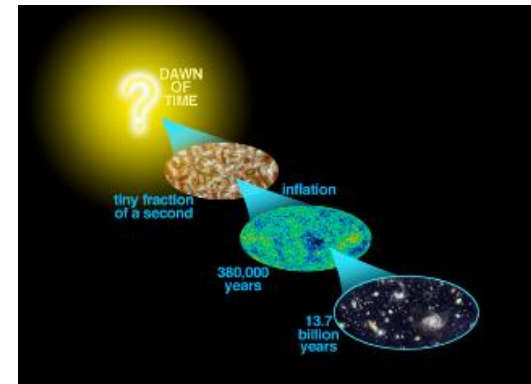
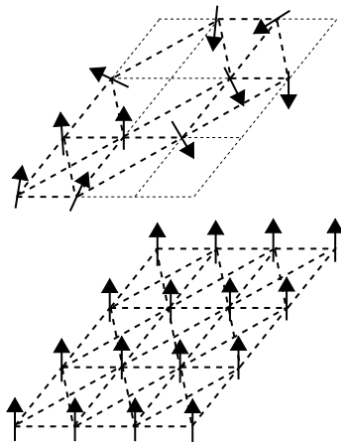
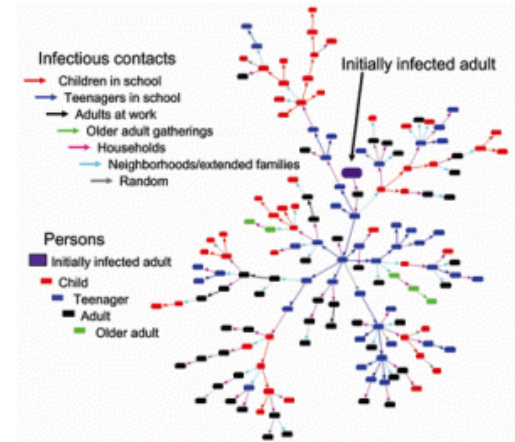
YBa₂Cu₃O₇ (.3) lattice

BALXAF plot

quantistica

Percolazione

classica



La «seconda rivoluzione quantistica» si basa su quattro colonne

