

# WYKŁAD 6

## Wstęp do optyki i fizyki materii skondensowanej

Optyka

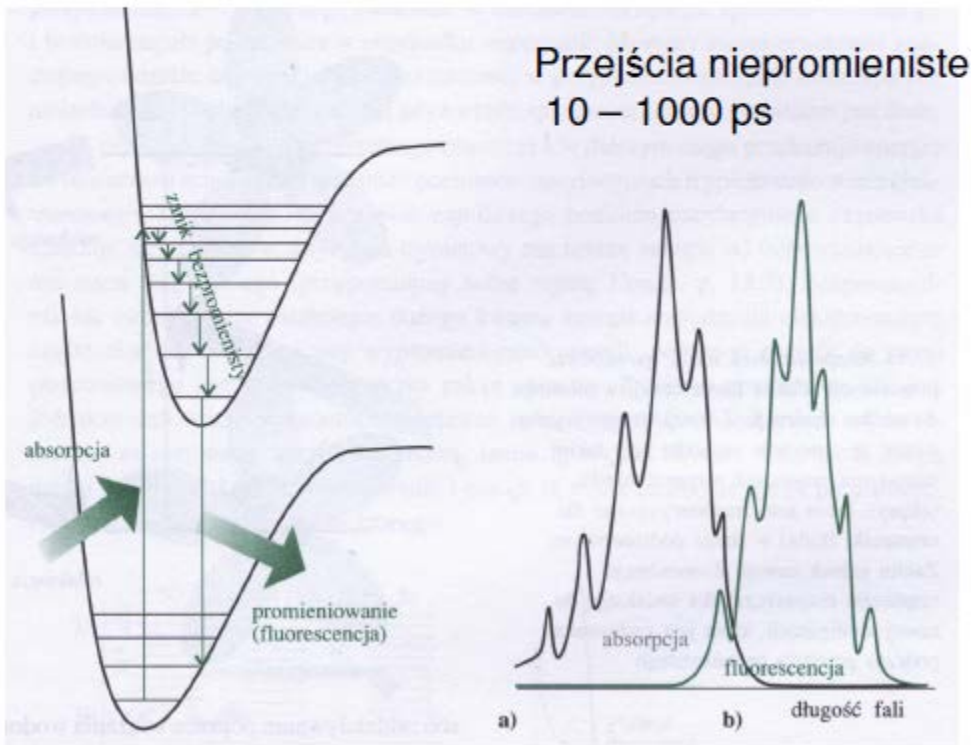
Mariusz Semczuk

[msemczuk@fuw.edu.pl](mailto:msemczuk@fuw.edu.pl)

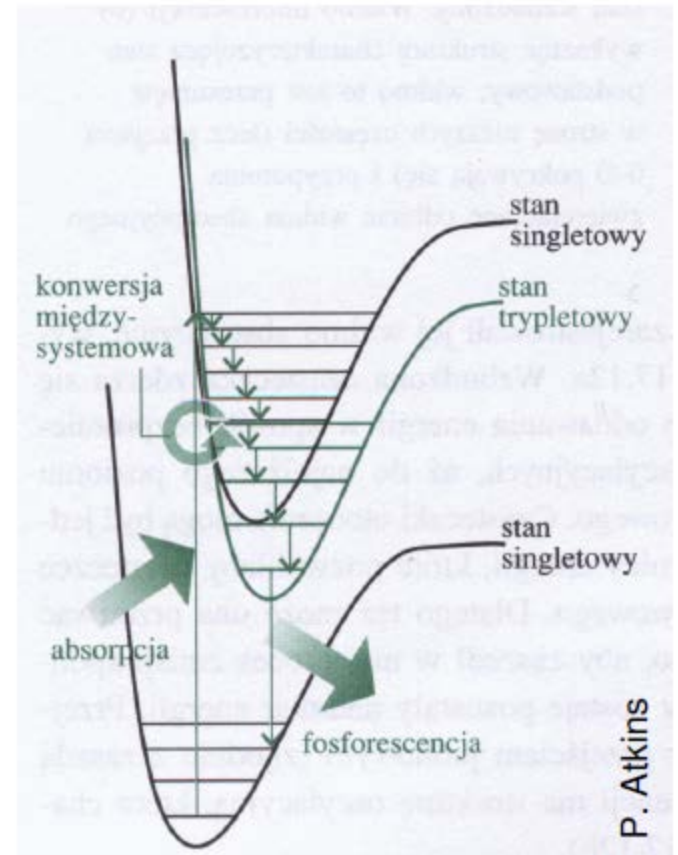
Fizyka materii skondensowanej:

Johannes Binder

# Fluorescencja



# Fosforescencja



Powolna emisja ze stanów trypletowych – przejścia wzbronione nawet godziny

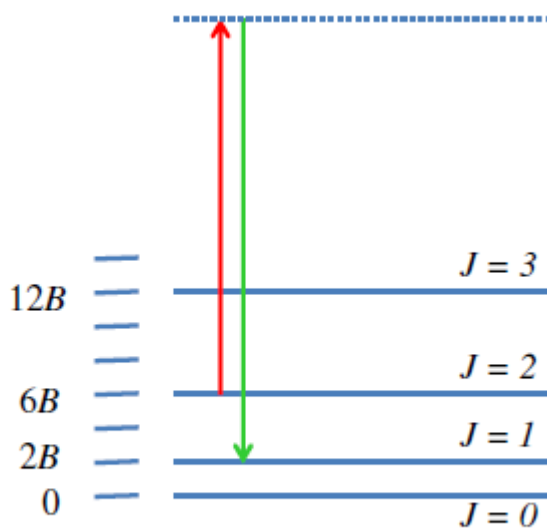
# Widma Ramanowskie

## Rotacyjne widma Ramanowskie

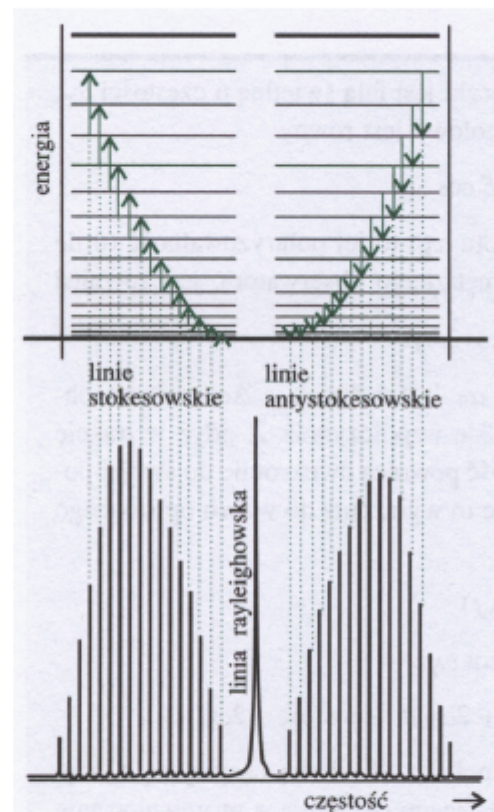
Ogólna reguła:

Polaryzowalność cząsteczki musi być anizotropowa.

Dla rotatorów liniowych oznacza to:  $\Delta J = 0, \pm 2$

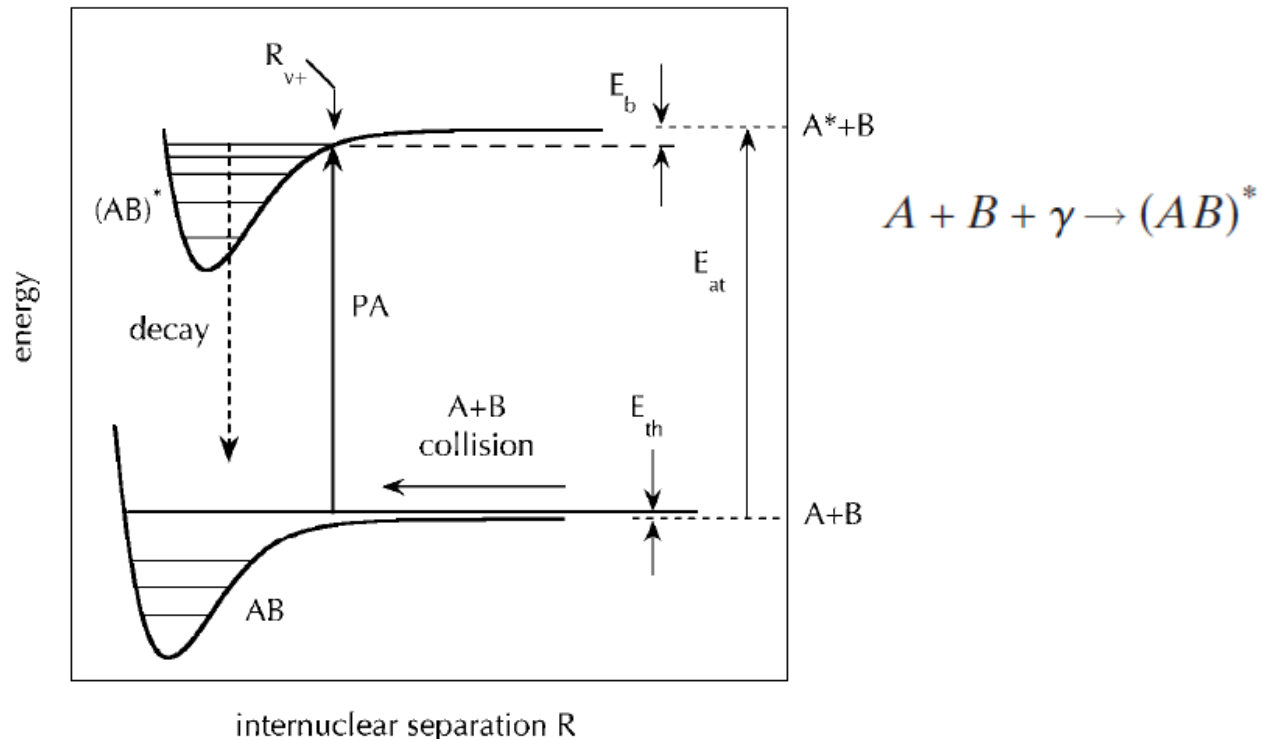


P. Atkins



16.27 Poziomy energii rotacyjnej rotatora liniowego oraz przejścia dozwolone przez ramanowską regułę wyboru  $\Delta J = \pm 2$ . Pokazano także typową postać rotacyjnego widma ramanowskiego

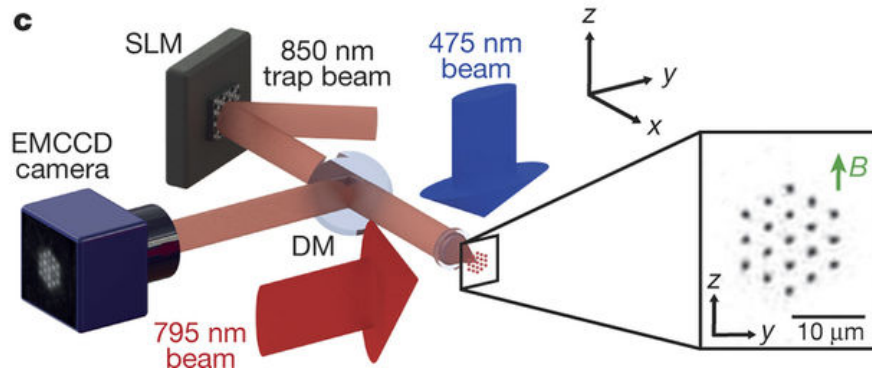
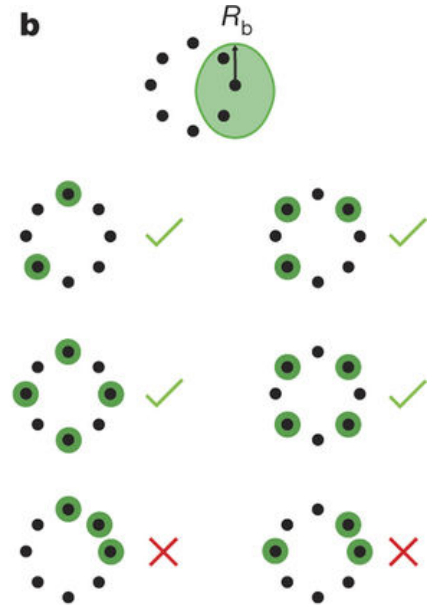
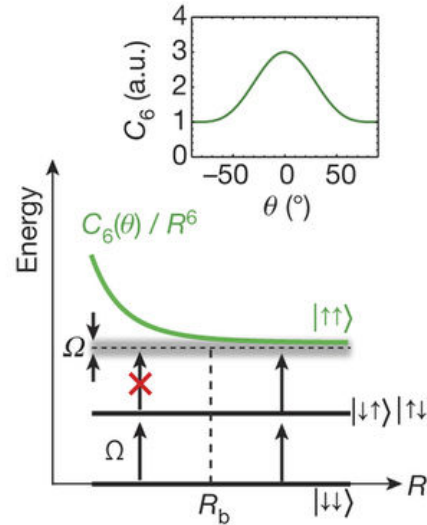
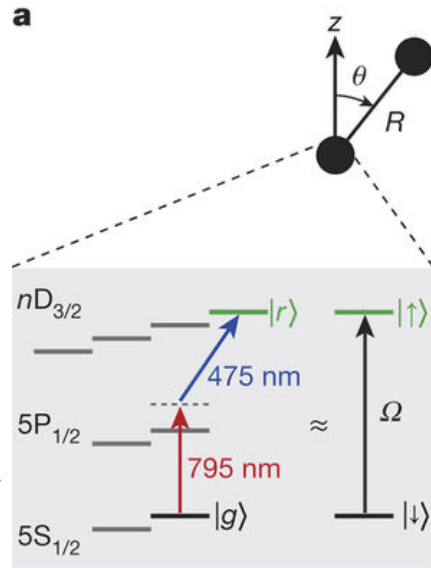
# Fotoasocjacja



## Rozpad



# Atomy rydbergowskie



## Rydberg Atom Scaling Laws

Radius $\sim n^2$	At $n=80$ : $r \sim .3\ \mu\text{m}$
Lifetime $\sim n^3-n^{4.5}$	$\tau \sim 600\ \mu\text{s}$
Dipole Moment $\sim n^2$	$\mu \sim 10^4 e a_0$
Polarizability $\sim n^7$	$\alpha \sim 10^3\ \text{GHz}/(\text{V}/\text{cm})^2$

10 YEARS OF PRL EDITORS' SUGGESTIONS

### Single Photon Transistor

In 2014, two groups separately realized a single-photon transistor using an ensemble of cold atoms. This goal, sought for decades, was achieved using Rydberg excitations to mediate interactions between individual photons. These papers additionally realize a system of strongly interacting particles that may have implications for many-body physics problems.

Single-Photon Transistor Mediated by Interstate Rydberg Interactions

H. Gorniaczyk, C. Tresp, J. Schmidt, H. Fedder, and S. Hofferberth

Phys. Rev. Lett. **113**, 053601 (2014)

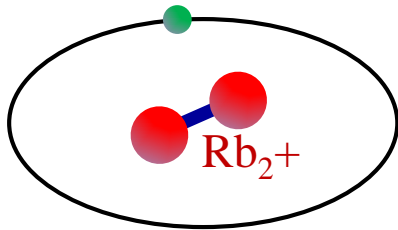
Single-Photon Transistor Using a Förster Resonance

Daniel Tiarks *et al.*

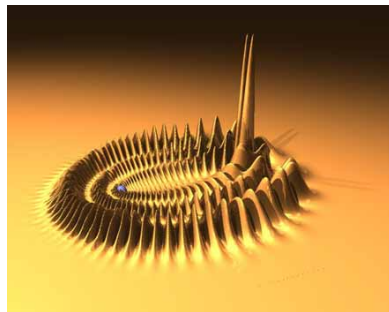
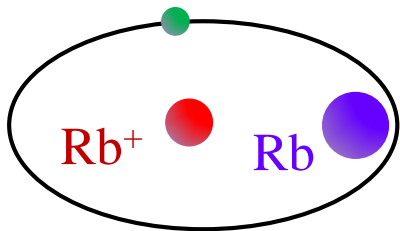
Phys. Rev. Lett. **113**, 053602 (2014)

# Cztery rodzaje cząsteczek rydbergowskich

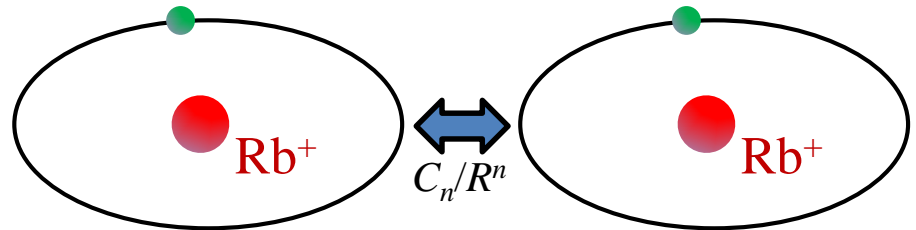
1. **Zwykłe cząsteczki.** Pojedynczy, wysokowzbudzony elektron oddziałuje z jądrem jonowym.



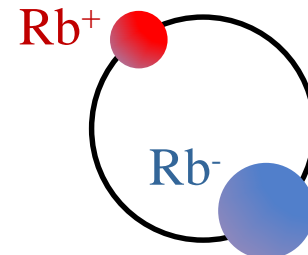
2. **Atomy w stanie podstawowym związane z atomami rydbergowskimi:** „trylobity”, „motyle” itp.



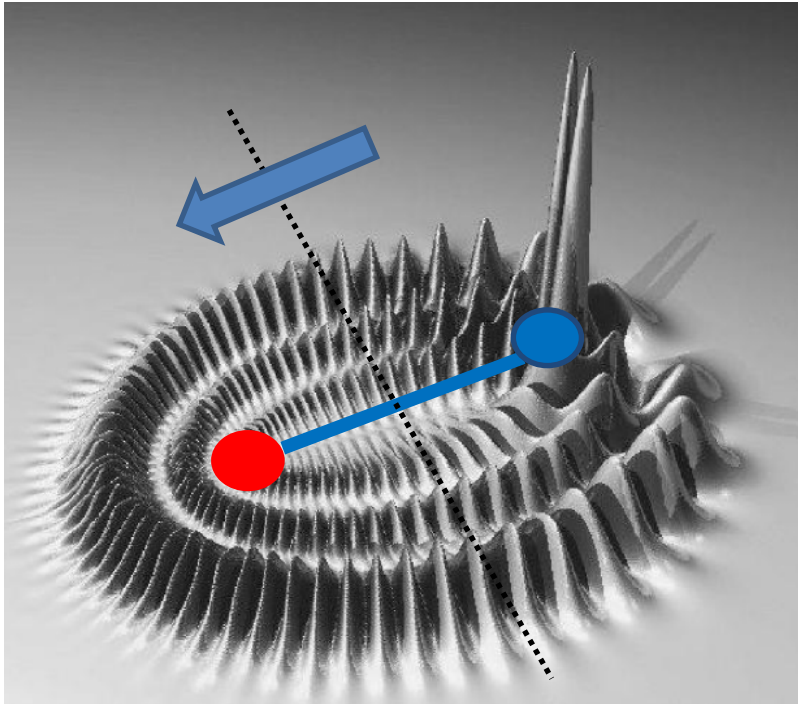
3. **„Makrodimery”, atomy rydbergowskie** związane w dalekiej odległości



4. **Ion-pair “heavy Rydberg” states.** Dla bardzo wysokich  $\nu$ , struktura wibracyjna zaczyna przypominać serię Rydbergowską

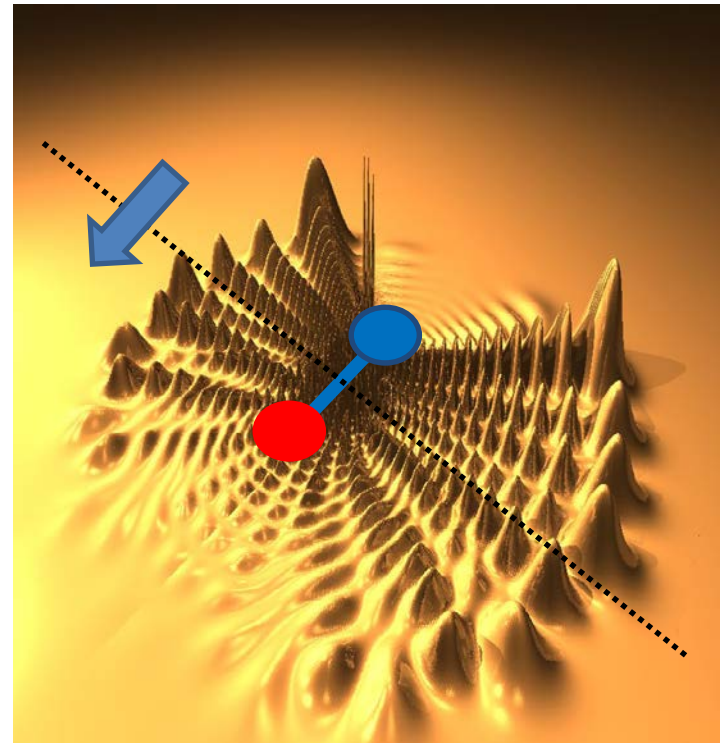


# Wiązanie dla $\ell \geq 1$



$$V(R) \cong 2\pi a_s(k) \sum_{\ell=\min}^{n-1} \frac{2\ell+1}{4\pi} |\Psi_{Ryd.}(R)|^2$$

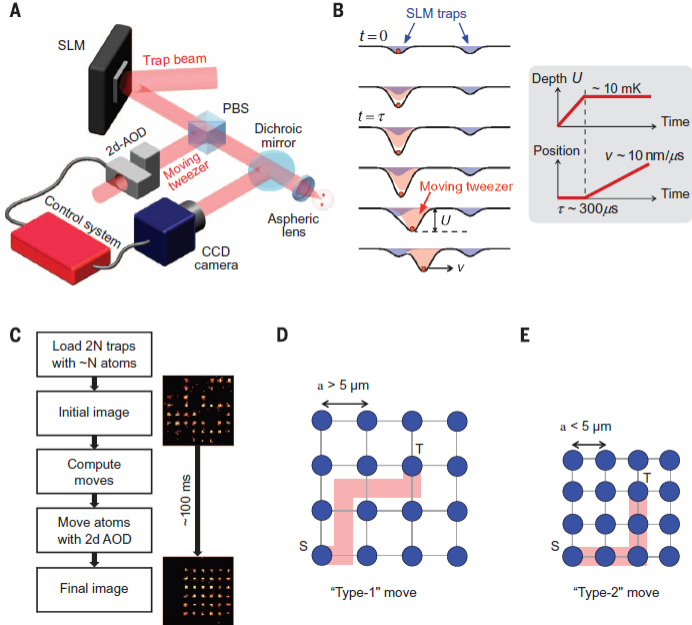
- **Stan trylobitowy** o wysokich  $\ell$  ma ekstremalnie duży moment dipolowy.



$$V(R) \cong 6\pi (a_p(k))^3 |\nabla \Psi_{Ryd.}(R)|^2$$

- **Stan „motyl”** dla oddziaływań w fali  $p$  w pobliżu  $5s+nl$ , dla dużych  $n$ .

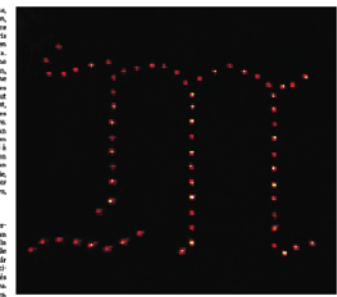
# Kwantowa IKEA – 2D



## Des atomes réglés comme des horloges

PHYSIQUE - Manipulant à volonté des atomes uniques, des chercheurs de l'Institut d'optique, à Palaiseau, ont constitué un simulateur du comportement quantique de la matière. Une étape vers de nouveaux calculateurs.

**A** u jour où de l'Institut d'optique, à Palaiseau, devant son amie, Vivienne Lesebar, en robe dans ce laboratoire, clique avec un souris sur les points d'une grille pour un autre variateur se voit et ferme la lettre «A». Puis il lance son programme. Mieux d'une seconde il faut sur les points de l'écran, sur fond noir, un «M» apparaît, fait d'une «évaluation de petits plans». A l'écran des données du mouvement, cette image doit paraître maladroite et d'un autre âge. Pourtant, c'est un réglage que mène avec une adresse égale dans le monde sont capables de faire. Chacun de ces petits points reculant sur l'écran est un effet l'éclairage d'un seul atome de rubidium en train d'être tiré de la horloge et positionné à quelques micromètres de ses voisins. La position de chaque atome est contrôlée à l'unité de seconde pour former un carré, un cercle, un triangle... «C'est à moi qui fait connaître japonais», dit en souriant Antoine Broweys, chercheur du CNRS et responsable de l'équipe.



Les chercheurs de l'Institut d'optique, à Palaiseau, ont reconstitué le «jeu d'échecs de journal» en manipulant à volonté des atomes uniques.

«Il nous est venu à l'esprit de manipuler, à Palaiseau, devant son amie, Vivienne Lesebar, en robe dans ce laboratoire, clique avec un souris sur les points d'une grille pour un autre variateur se voit et ferme la lettre «A». Puis il lance son programme. Mieux d'une seconde il faut sur les points de l'écran, sur fond noir, un «M» apparaît, fait d'une «évaluation de petits plans». A l'écran des données du mouvement, cette image doit paraître maladroite et d'un autre âge. Pourtant, c'est un réglage que mène avec une adresse égale dans le monde sont capables de faire. Chacun de ces petits points reculant sur l'écran est un effet l'éclairage d'un seul atome de rubidium en train d'être tiré de la horloge et positionné à quelques micromètres de ses voisins. La position de chaque atome est contrôlée à l'unité de seconde pour former un carré, un cercle, un triangle... «C'est à moi qui fait connaître japonais», dit en souriant Antoine Broweys, chercheur du CNRS et responsable de l'équipe.

**Méthodes des équilibres compliquées**  
Régler et déplacer n'est pas le but de son chercheur. Ce qu'il veut, c'est constituer un simulateur du comportement quantique de la matière, c'est-à-dire un outil permettant de résoudre les équations compliquées qui à partir de la connaissance des interactions entre particules, expliquent par exemple les propriétés magnétiques ou électroniques d'un matériau. Or, ces dernières résistent même aux théories. Même en simplifiant les situations, les physiciens échouent. Ils ont un grand nombre de particules agissant l'une sur l'autre. «On peut faire un calcul sur PC avec des atomes en tout que quelques-uns. Mais avec cinquante, ça devient vite compliqué. Puis une centaine, pendant quelques jours. Mais très vite ça s'emballe», explique Thierry Lahaye, autre chercheur du CNRS de l'équipe. Les dernières articles, mis en ligne sur ArXiv.org le 17 octobre, montrent une méthode, mais promise le résultat jusqu'à 25, au-delà de quoi les simulations peuvent échouer.

«Un simulateur est un jeu comme une horloge atomique de précision qui permet de prévoir les actions ou la position de plusieurs, sans résoudre les équations du mouvement», explique Thierry Lahaye. Résoudre cette tâche au niveau physique revient aux années 1970 et au célèbre physicien Richard Feynman, qui avait imaginé d'utiliser des systèmes d'atomes au lieu de ceux des ordinateurs analogiques pour résoudre les problèmes du monde. A la condition de pouvoir manipuler, contrôler et mesurer un seul atome. Or, en même temps, des expérimentateurs

viennent attendus à relever ce défi. Hans Dehmelt, qui reçut le prix Nobel en 1989, avait réussi à piéger un seul électron, pour mesurer précisément ses propriétés. En 2010, l'Institut d'optique, de l'Institut d'optique, réussit à manipuler avec un seul atome. Ensuite, ses collègues se sont fait une spécialité de déplacer et d'observer un seul atome de rubidium. Dans les années 1990, l'Institut avait réussi à contrôler des atomes de calcium disposés sur une surface à l'aide d'une pointe. Mais rien à voir avec le manipulateur de ces chercheurs. Ici, les atomes sont dans le vide, et interagissent entre eux et sont contrôlés par diverses horloges laser. On dispose de quelques millions d'atomes de rubidium au lieu d'un seul atome de calcium. Les chercheurs ont donc fait un pas de plus dans la manipulation des atomes uniques et agissent comme une pièce d'échecs, complète le mouvement plus efficace que celui des calculateurs classiques. Une pièce avance à l'avant, se déplace au-dessus de celle arrière, se déplace pour former la pièce suivante.

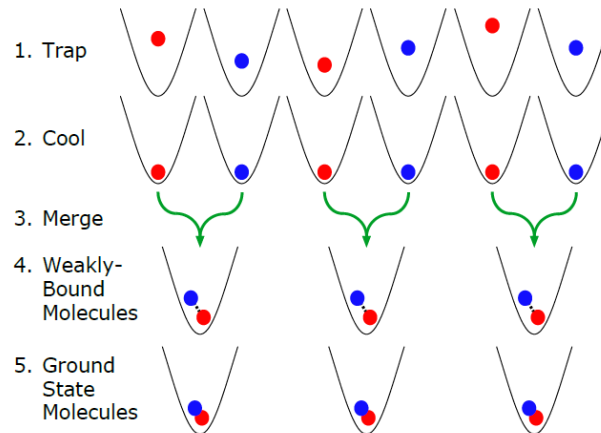
Mais ce n'est pas tout. A ce stade, les atomes sont certes bien positionnés, mais ils ne se «voient» pas, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas indépendamment de leurs voisins. Une situation bien différente de la réalité où, par exemple, l'attribution d'un site informatique est un voisin, conduisant, dans certains cas, à ce que tout un réseau d'ordinateurs dans une même direction. Les chercheurs utilisent alors un système d'horloge laser qui fait «avancer» les atomes en forçant un des électrons de la périphérie à crier tout jusqu'à 20000 fois plus vite du réseau. Cette déformation, réglable, injecte une charge négative du cœur électriquement positif et crée donc un dipôle. Une force incohérente, 100 milliards de fois plus grande que l'ion «voit» pas ses voisins, est ainsi créée entre deux atomes du réseau. La physique est enfin réglée.

«Plutôt de gens disent que ça ne marcherait pas et qu'il faut attendre quelques semaines, mais ça marche», rappelle Antoine Broweys. Puis, en 2013, ce qui commence à marcher, et nous avons maintenant réussi à amplifier notre expérience, jusqu'à atteindre environ 100 un réseau de contrôle individuel sur nos problèmes.

A partir de là, une expérience typique consiste à «mouvoir» et «explorer» un atome d'équilibre d'un champ magnétique ou électrique oscillant, et à observer comment il dévie. Pour l'instant, les différences réglées, à Palaiseau, à l'aide d'un laser de 1064 nm, permettent de réaliser leur simulateur dans des situations bien contrôlées. Mais elles compliquent l'interprétation «classique» des phénomènes observés. Dans leur vision, il y a la magnétisme linéaire de la pièce vers la, la composition des matériaux, accompagnés par le Nobel 2010 des lauréat de physique, construits pas à pas, mais toujours en leur cœur, ou l'exploration des matériaux magnétiques pour construire des configurations permettant à terme d'élaborer les simulateurs.

La plupart de ces simulations ont aussi été de ce genre de la horloge comme des calculateurs quantiques. C'est à dire calculer, non pas en ligne «classique», mais simultanément avec deux à six atomes ont en effet deux états internes et, seulement quatre côtés, pour venir se trouver dans une des deux directions. Bien sûr, ce n'est pas tout. Les chercheurs ont pu faire un pas de plus dans la manipulation des atomes uniques et agissent comme une pièce d'échecs, complète le mouvement plus efficace que celui des calculateurs classiques. Une pièce avance à l'avant, se déplace au-dessus de celle arrière, se déplace pour former la pièce suivante.

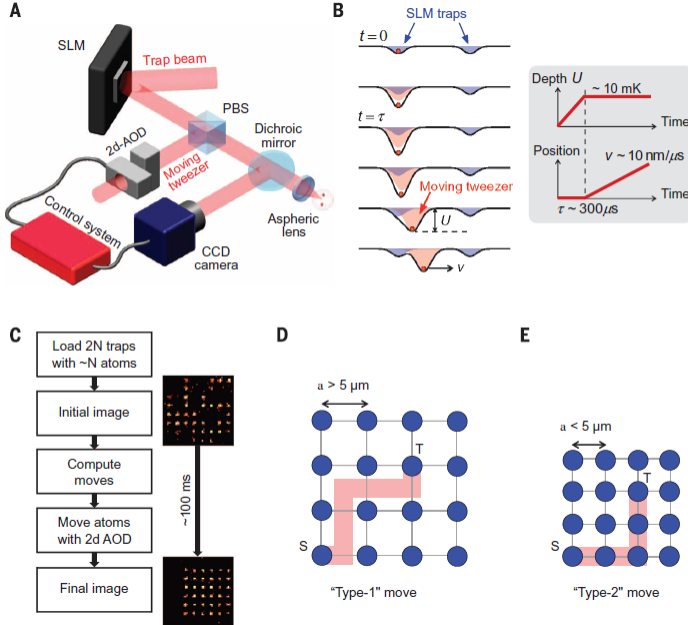
Barredo et al.,  
Science 35, 6315 (2016)



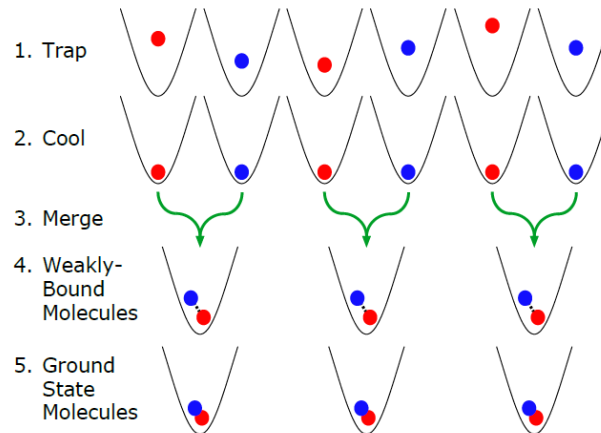
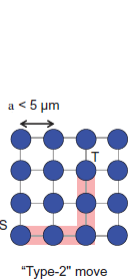
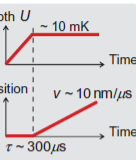
Rozszerzenie do cząstek?



# Kwantowa IKEA – 2D



Barredo et al.,  
Science 35, 6315 (2016)

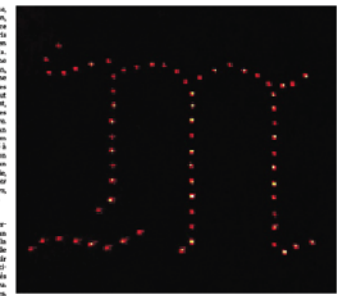


Rozszerzenie do cząsteczek?

## Des atomes réglés comme des horloges

PHYSIQUE - Manipulant à volonté des atomes uniques, des chercheurs de l'Institut d'optique, à Palaiseau, ont constitué un simulateur du comportement quantique de la matière. Une étape vers de nouveaux calculateurs

**A** Jusu est de l'Institut d'optique, à Palaiseau, devant son atelier, Vincent Lienhard, en robe dans ce laboratoire, clique avec un souris sur les points d'une grille pour un autre variateur se voit et ferme la lettre «A». Puis il lance son programme. Métra d'une seconde, il voit sur son écran de fibres, sur fond noir, un «M» apparaît, fait d'une «évaluation de pixels blancs». Thibault Desreumaux du numérique, cette image doit peut sembler modeste et d'un autre âge. Pourtant, c'est un réglage que seuls une dizaine d'atomes réglés dans le monde sont capables de faire. Chacun de ces petits points recitait sur fibres est un effet l'usage d'un seul atome de rubidium en trois fibres de la bande et positionné à quelques micromètres de ses voisins. La position de chaque atome est contrôlée d'un clic de souris pour fixer un atome, un corde, un réglage. «C'est à moi qui fait contrôler japonais», dit en souriant Antoine Browne, chercheur du CNRS et responsable de l'équipe.



Les chercheurs de l'Institut d'optique, à Palaiseau, ont reconstitué le «jeu d'échecs» de la matière.

**Méthodes des équilibres compliquées**  
Rites et données rituel pas le but de ses chercheurs. Ce qu'ils veulent, c'est contrôler un simulateur du comportement quantique de la matière, c'est-à-dire un outil permettant de résoudre les équations compliquées qui à partir de la connaissance des interactions entre particules, expliquent par exemple les propriétés magnétiques ou électroniques d'un matériau. Or ces dernières résistent contre nos tentatives. Même en simplifiant les situations, les physiciens échouent. Ils l'ont vu un grand nombre de particules agissent l'une l'autre. «On peut faire un calcul sur PC avec deux atomes en tout que quelques. Plus avec cinq ou six, pendant une heure. Mais plus vite c'est impossible», explique Thierry Lahaye, autre chercheur du CNRS de l'équipe. Les chercheurs ont mis en ligne sur ArXiv.org le 17 octobre, un article de préprint, mais pas le résultat jusqu'à 22, un article «Un simulateur est un jeu comme une horloge atomique de la matière qui permet de prédire les échecs ou la position de plusieurs, une minute les quantités de mouvement», explique Thierry Lahaye. Ensuite, une série de nouvelles physiques Richard Feynman, qui avait imaginé d'utiliser des systèmes d'atomes au lieu de ceux-ci des situations analogues aux molécules d'un gaz ou d'un solide. À la condition de pouvoir manipuler, contrôler et mesurer un seul atome. Or, en même temps, des expérimentateurs

visent à relever ce défi. Hans Dehmelt, qui reçut le prix Nobel en 1989, avait réussi à piéger un seul électron, pour mesurer précisément ses propriétés. En 2010, Philippe Charrier, du CNRS de l'équipe, réussit à isoler un seul atome. Depuis, ses collègues savent le faire avec précision. Mais comment faire de l'atome unique? Dans les années 1990, IBM avait montré comment écrire avec des atomes de déplacement sur une surface à l'aide d'une pointe. Mais lors de son déplacement de quelques dizaines de nanomètres, les atomes sont dans le vide, et interagissent gravement et sont contrôlés par divers faisceaux laser. Ça n'aide de quelques millions d'atomes de rubidium est d'abord assés au centre de l'expérience. Des faisceaux laser assés vers lui dans des directions opposées contrôlent le mouvement des particules et les font ralentir jusqu'à presque les figer vers à une distance de quelques dizaines de nanomètres de sites voisins. Ils bougent

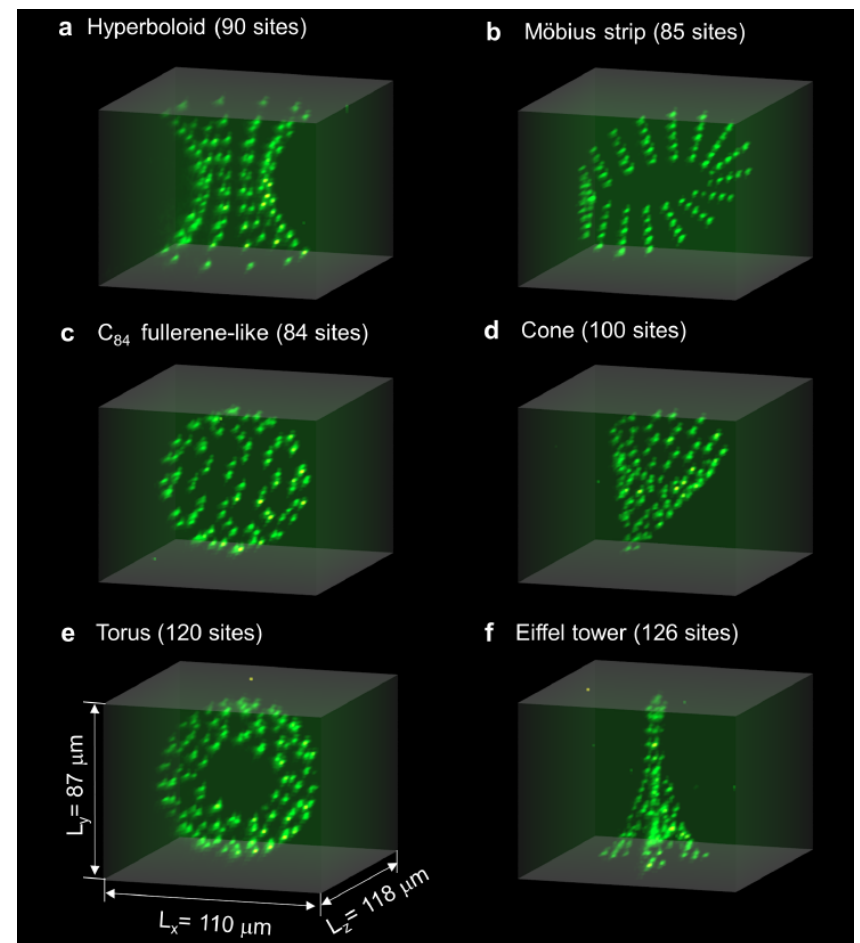
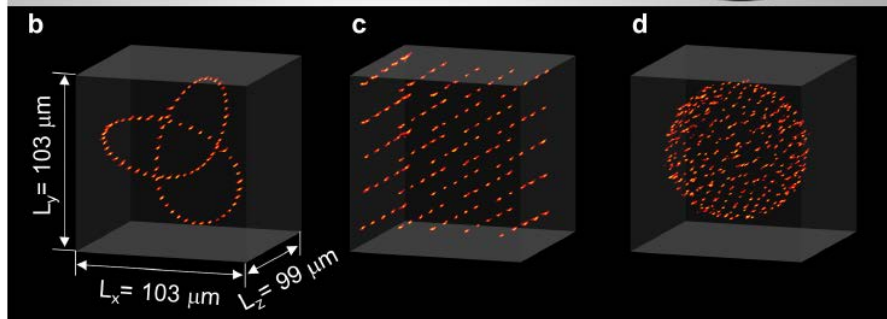
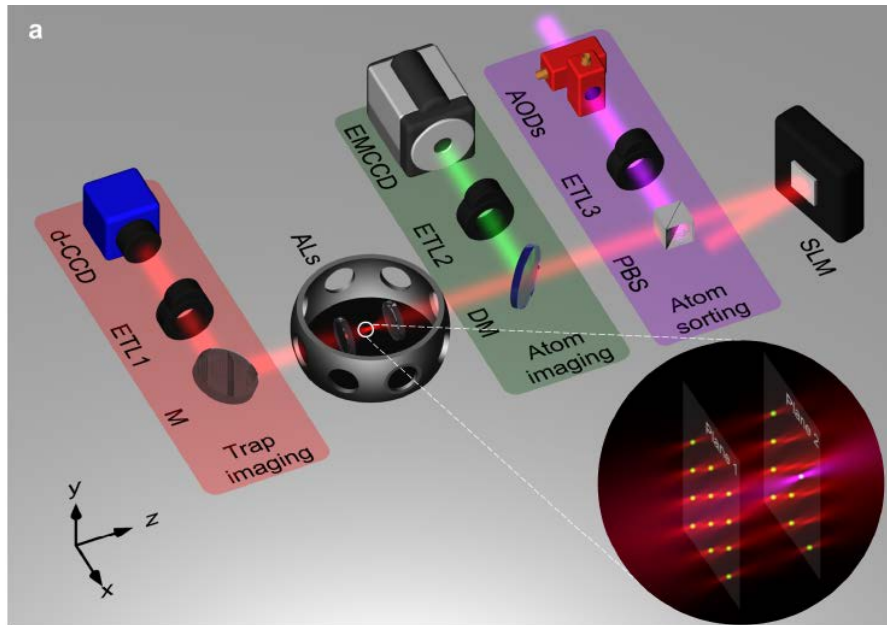
à volonté, enlevés ou déplacés pour former la matière désirée. Mais en fait pas tout. À ce stade, les atomes sont certes très positionnés, mais ils ne se «voient» pas, c'est-à-dire qu'ils vibrent indépendamment de leurs voisins. Une situation bien différente de la réalité où, par exemple, l'absorption d'un photon influence celle d'un voisin, conduisant, dans certains cas, à ce que tout un réseau de l'atome dans une même direction magnétique. Pour créer une force entre les atomes, les chercheurs utilisent dans un même faisceau laser qui fait «graver» les atomes en forçant un des électrons de la périphérie à critiquer jusqu'à 20000 fois plus vite du noyau. Cette déformation, réglable, injecte une charge négative du cœur électriquement positif et crée donc un dipôle. Une force incohérente, 100 milliards de fois plus grande que si l'on n'avait pas excité les atomes, est ainsi créée entre deux atomes du réseau. La physique est enfin réglée. «Plus de gens disent que ça ne marcherait pas et c'est, nous sommes convaincus, mais c'est, rappelle Antoine Browne. Puis, en 2013, je ai commencé à travailler, et nous avons mis plusieurs années à améliorer notre expérience, jusqu'à atteindre aujourd'hui un réseau de contrôle digital sur nos problèmes». À partir de là, une expérience typique consiste à mesurer et à analyser en détail l'équivalent d'un champ magnétique ou électrique artificiel, et à l'observer continuellement. Deux fois l'année, les données sont envoyées à Palaiseau, à Harvard et à l'université de Wisconsin, en vue de valider leur simulateur dans des situations bien connues. Mais elles compliquent l'interprétation «classique» des phénomènes observés. Dans leur vision, il y a la magnétique inexpliquée de l'électron spin, la composition des matériaux inconnus par le début 2010 des technologies constructives nous avons, mais isolés et leur contrôle, ou l'exploration des molécules magnétiques pour prédire les propriétés de configurations permettant à terme d'allier les atomes permanents. La plupart de ces simulations ont aussi été de se servir de nos logiciels comme des calculateurs quantiques. C'est à dire calculer, non pas en utilisant des ordinateurs, mais directement avec des bits et des portes. Ces atomes ont en fait deux états internes et, reliés par quatre côtés, par une ou deux dans ces deux états à la fois. Une situation qui est de créer des états encore plus étranges dans ce réseau, dans lequel les atomes sont très fortement corrélés entre eux. Une propriété permettant des calculs en parallèle, permettant plus efficacement que des calculateurs classiques. Une page enroulée à l'encre.

What AI can learn from the minds of babies pp. 842  
Leader-follower dynamics in white storks pp. 852 & 917  
Engineering bacteria to monitor disease pp. 856 & 923

Science  
115  
25 MAY 2018  
sciencemag.org  
MAAAS

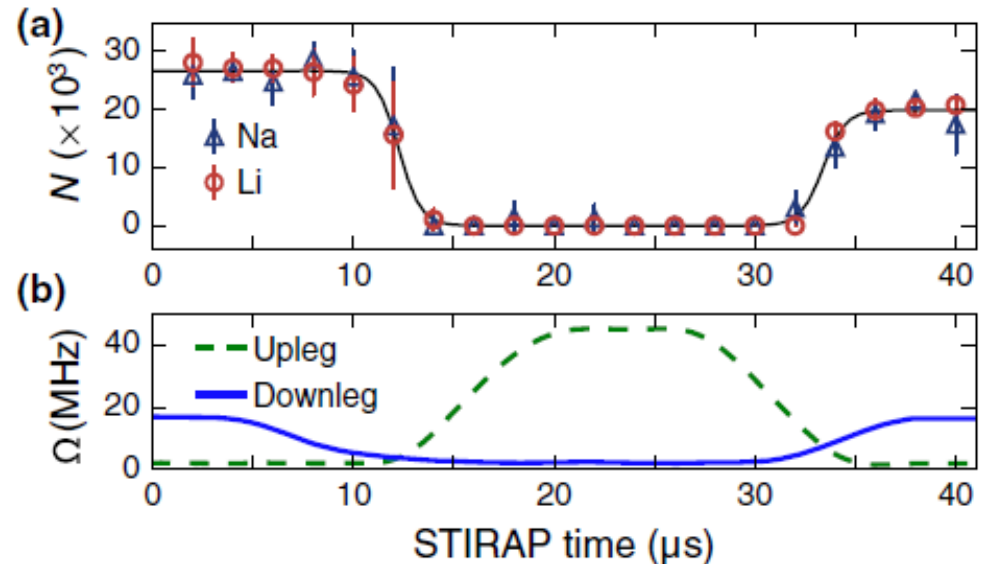
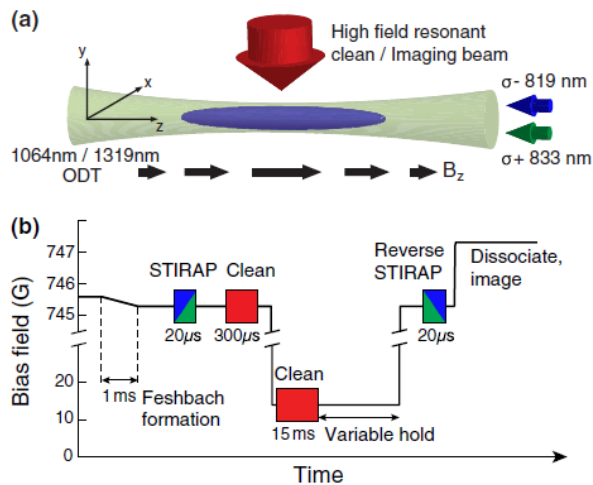
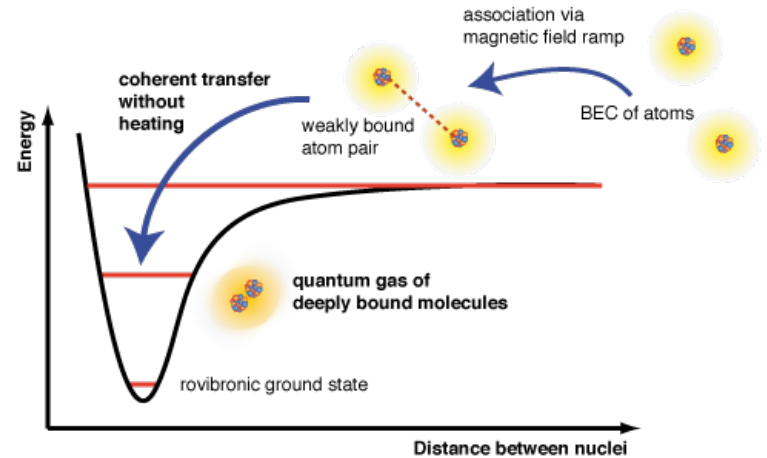
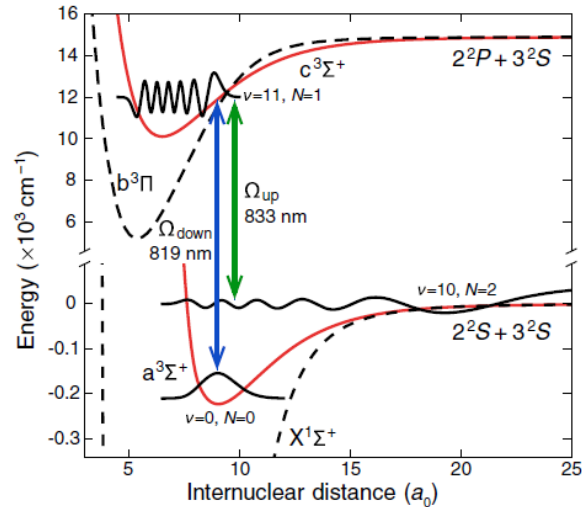
**SINGLE-MOLECULE MAKER**  
Optical tweezers assemble NaCl atoms by atom pp. 855 & 900

# Kwantowa IKEA – 3D

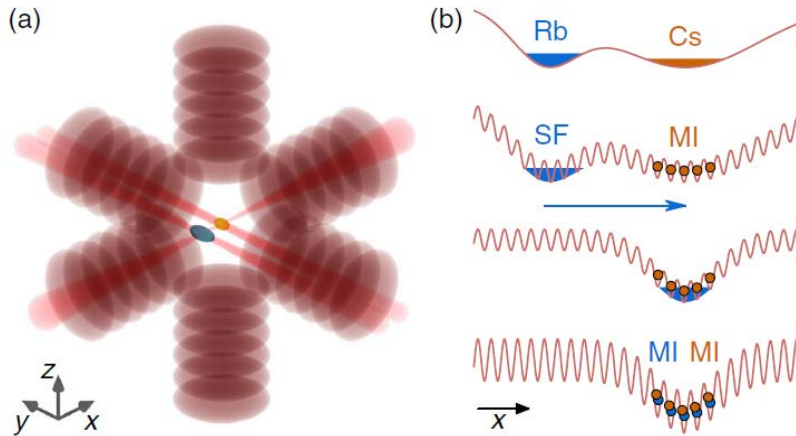


Barredo et al., Nature 561, 79 (2018)

# Cząsteczki z ultrazimnych atomów



# Cząsteczki z ultrazimnych atomów



Joint Quantum Centre  
Newcastle University Durham University

Home Members Research Publications News Events Recruitment About / Contact

Project Home  
Project Members  
Project Publications  
Project News

Themes:  
Cold and Ultracold Molecules

Fermionic Molecules of KCs

Outline

Ultracold polar molecules offer a wide range of exciting research directions owing to their long-range anisotropic dipole-dipole interactions. Proposed applications span the fields of ultracold chemistry, precision measurement, quantum simulation and quantum computation. The prospect of using quantum simulators to elucidate a range of intractable problems in condensed-matter physics has attracted particular attention. In many cases, the simulation protocol requires an ultracold gas of fermionic particles with long-range interactions confined in an optical lattice.

The goal of this project is to realise a gas of ultracold fermionic **KCs molecules** by associating pre-cooled atoms of **K and Cs**. This molecule has the advantage over other bi-alkali molecules of being stable against reactive collisions and offers both fermionic and bosonic isotopes. By confining the molecules in an array of two-dimensional pancake traps we will deliver a test platform for quantum simulation applications. This trap geometry is suited to the study of a large range of physical phenomena, including high-TC BCS-like interlayer superfluidity, quantum magnetism and topological superfluid phases. To achieve this ambitious objective we propose to combine state-of-the-art experiments in synergy with world leading theoretical support into a transformative program of research that stands to cement the UK's position at the forefront of an exciting international field.

This project is also part of QSUM (Quantum Science with Ultracold Molecules), see <https://www.qsum.org.uk> for more information.

Funding

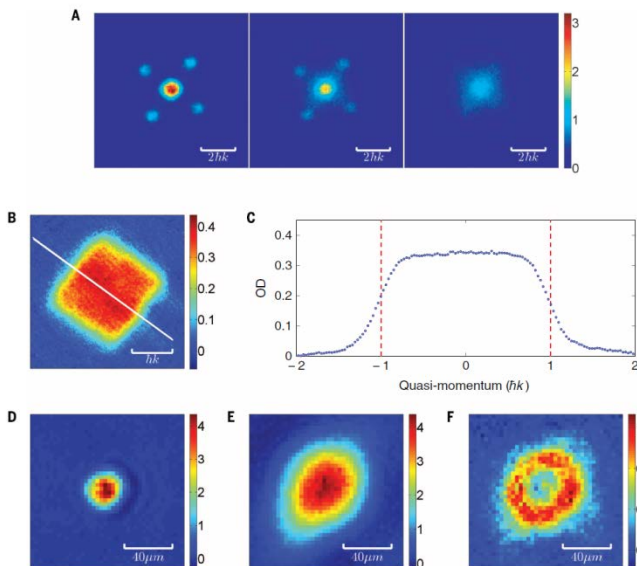
\*A Stable Quantum Gas of Fermionic Polar Molecules\* EPSRC EP/N007085/1 (January 2016 - December 2019)  
\*QSUM: Quantum Science with Ultracold Molecules\* EPSRC EP/P01058X/1 (June 2017 - May 2022)

Tweets by @QJQC

JQC Durham Newcastle @JQCDurham

Durham PhD graduate Michele Simmons named as Australian of the Year for her work on quantum technologies. @QJQC Durham @durham\_uk | [bit.ly/2wvewwz](http://bit.ly/2wvewwz)

Quantum physicist is Australian of the Year  
UK-born Prof Michele Simmons is lead.



ultracold.atoms and quantum gases  
University of Innsbruck and Austrian Academy of Sciences

**K-Cs** Fermionic quantum matter, quantum mixtures, and dipolar molecules under a microscope

ultracold.atoms  
Institut für Experimentalphysik,  
University of Innsbruck, and  
IQOQI  
Austrian Academy of Sciences,  
Innsbruck, Austria

The latest project in the research group of Prof. H.-C. Nägerl is aimed at studying quantum gas mixtures of cesium (Cs) and potassium (K). Mixed quantum gases offer a wealth of research opportunities, ranging from precision measurements to studies of various quantum many-body regimes. The research presently focuses on two main directions that both complement each other: Dipolar quantum matter and topological quantum matter. Within the first line of research, we aim to build a molecular quantum simulator based on ultracold polar KCs ground-state molecules. Our goal is to study novel types of dipolar quantum matter in optical lattice geometries under a high-resolution microscope that shall allow us to observe the molecules with single-site resolution. Within the second line of research, we aim at realizing exotic quantum many-body phases of fermionic and bosonic mixtures in lattice geometries with non-trivial band structures. Presently, we are focusing on ultracold bosons with tunable interactions loaded into two-dimensional Leno lattices. Such a system is particularly interesting because it features two dispersive bands that form a Dirac cone and a flat band that intersects the Dirac point. A topological state of matter that is exclusively driven by interactions is expected to form.

The Team

- Gregor Anich (PhD student)
- David Unoldstein (PhD student)
- Michael Gribner (Postdoc)
- Hanns-Christoph Nägerl (Principal investigator)

Photos: IQOQI/KW

Former Team Members

- Philipp Wissmann, 2013-2017, PhD student
- Miroslav Marzalek, 2013-2015, 2017, master thesis
- Peter Cles, 2015-2016, master thesis
- Emil Khrlov, 2012-2016, postdoc (now in the group of Prof. Rudolf Grimm)
- Benjamin Zornhördl, 2014-2015, master thesis
- Maximilian Segl, 2014-2015, master thesis

Scientific Output

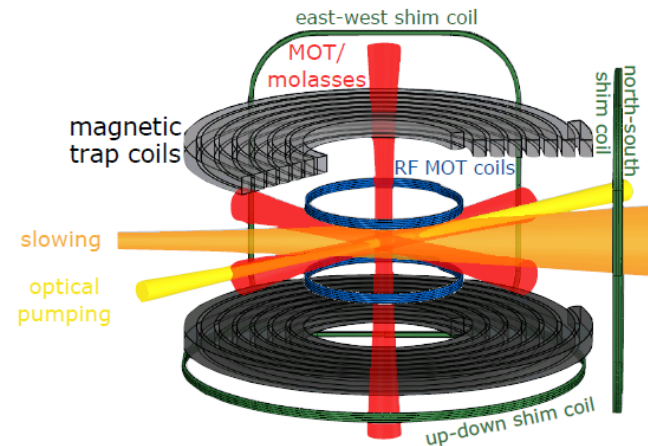
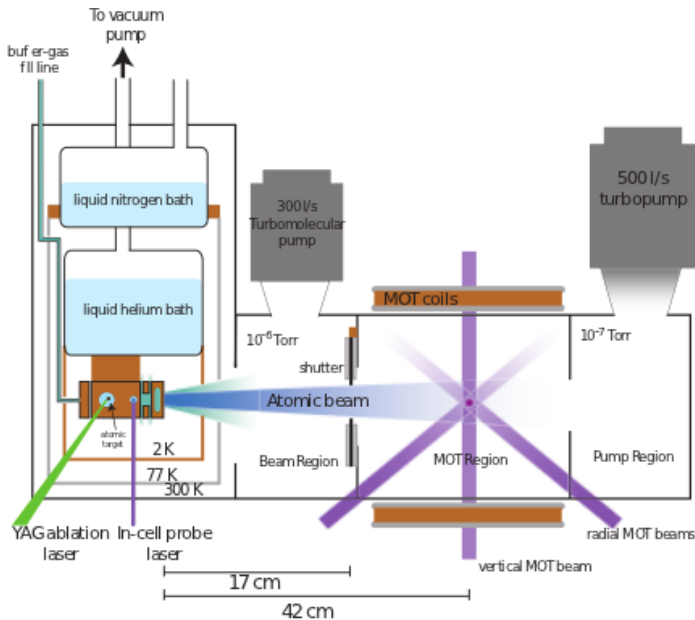
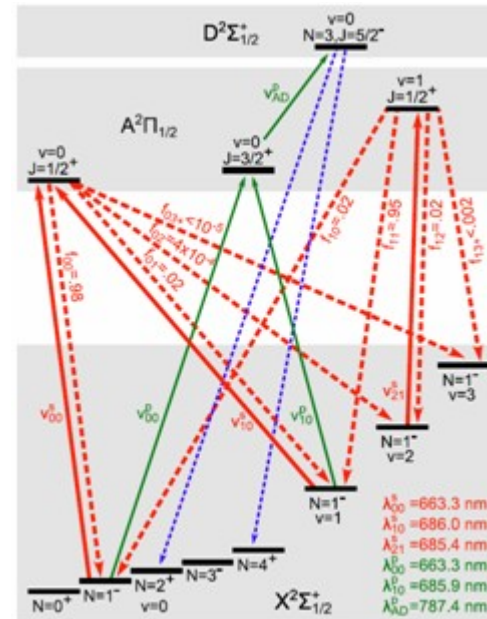
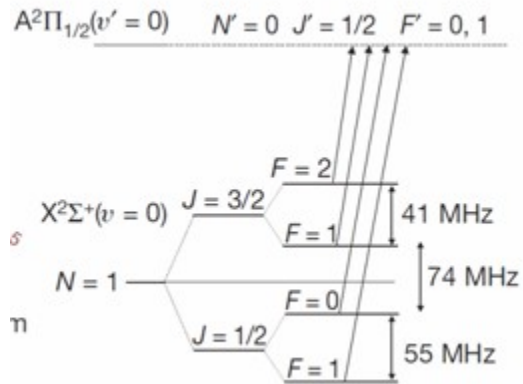
Degenerate Raman sideband cooling of  $^{39}K$

at [arXiv:1608.07001](https://arxiv.org/abs/1608.07001), [doi.org/10.1038/nphoton.2016.161](https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.161)

We report on a realization of sub-Doppler laser cooling of  $^{39}K$  atoms using degenerate three-dimensional Raman sideband cooling. We take advantage of the well-resolved excited hyperfine states on the D<sub>1</sub> optical transition to produce spin-polarized samples with  $1.4 \times 10^7$  atoms at temperatures of 1.8  $\mu K$ . The phase-space densities are  $\geq 10^4$ , which significantly improves the initial conditions for a subsequent evaporative cooling step. The presented cooling technique using the D<sub>1</sub> line can be adapted to other atomic species and is applicable to high-resolution imaging schemes in far off-resonant optical lattices.

Phys. Rev. A 95, 033412 (2017), arXiv:1612.02309

# Chłodzenie cząsteczek



# Jednorodne gazy kwantowe

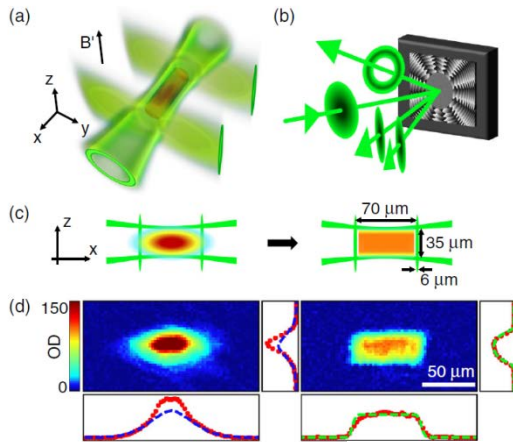
PRL 110, 200406 (2013)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
17 MAY 2013

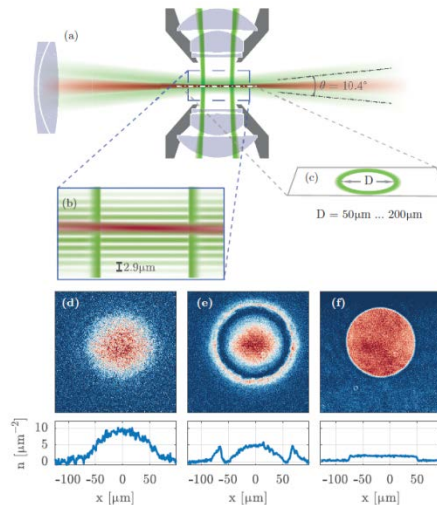
## Bose-Einstein Condensation of Atoms in a Uniform Potential

Alexander L. Gaunt, Tobias F. Schmidutz, Igor Gotlibovych, Robert P. Smith, and Zoran Hadzibabic  
*Cavendish Laboratory, University of Cambridge, J. J. Thomson Avenue, Cambridge CB3 0HE, United Kingdom*  
 (Received 14 March 2013; published 16 May 2013)



## Two-Dimensional Homogeneous Fermi Gases

Klaus Hueck,\* Niclas Luick, Lennart Sobirey, Jonas Siegl, Thomas Lompe, and Henning Moritz  
*Institut für Laserphysik, Universität Hamburg, Luruper Chaussee 149, 22761 Hamburg, Germany.*  
 (Dated: May 30, 2017)



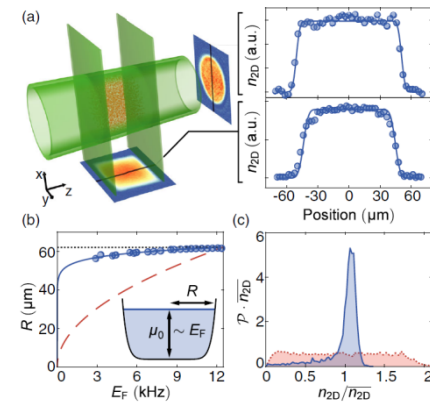
PRL 118, 123401 (2017)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
24 MARCH 2017

## Homogeneous Atomic Fermi Gases

Biswaroop Mukherjee,<sup>1</sup> Zhenjie Yan,<sup>1</sup> Parth B. Patel,<sup>1</sup> Zoran Hadzibabic,<sup>1,2</sup> Tarik Yefsah,<sup>1,3</sup>  
 Julian Struck,<sup>1</sup> and Martin W. Zwierlein<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>MIT-Harvard Center for Ultracold Atoms, Research Laboratory of Electronics,  
 and Department of Physics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA  
<sup>2</sup>Cavendish Laboratory, University of Cambridge, J. J. Thomson Avenue, Cambridge CB3 0HE, United Kingdom  
<sup>3</sup>Laboratoire Kastler Brossel, CNRS, ENS-PSL Research University, UPMC-Sorbonne Universités  
 and Collège de France, Paris 75005, France  
 (Received 31 October 2016; published 23 March 2017)



PHYSICAL REVIEW LETTERS

Highlights Recent Accepted Collections Authors Topics Search Press About

Abstracts

Two-dimensional homogeneous Fermi gases

Phys. Rev. Lett.

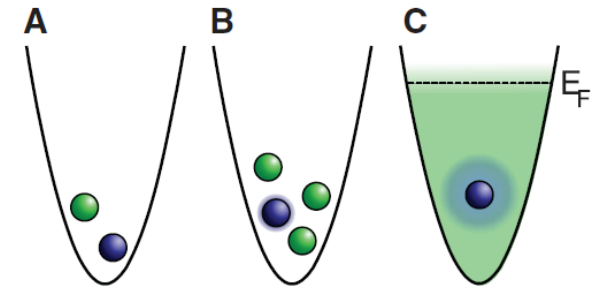
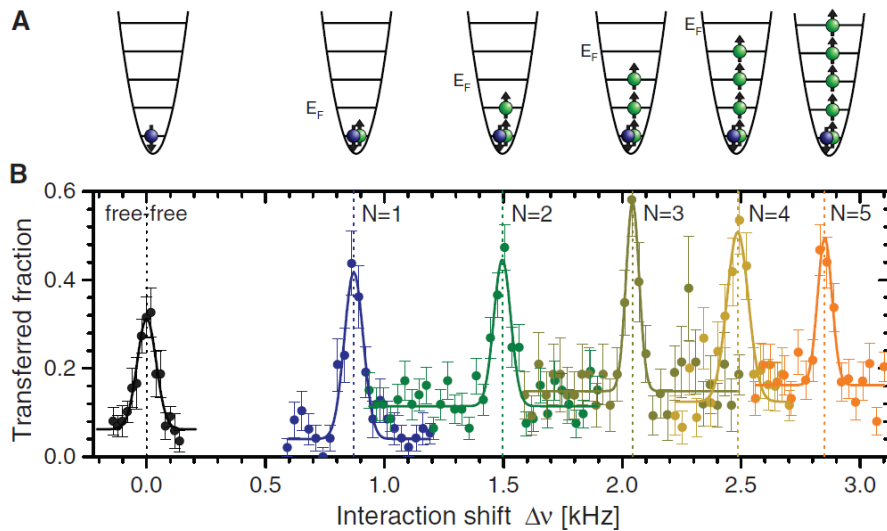
Klaus Hueck, Niclas Luick, Lennart Sobirey, Jonas Siegl, Thomas Lompe, and Henning Moritz

Accepted 3 January 2017

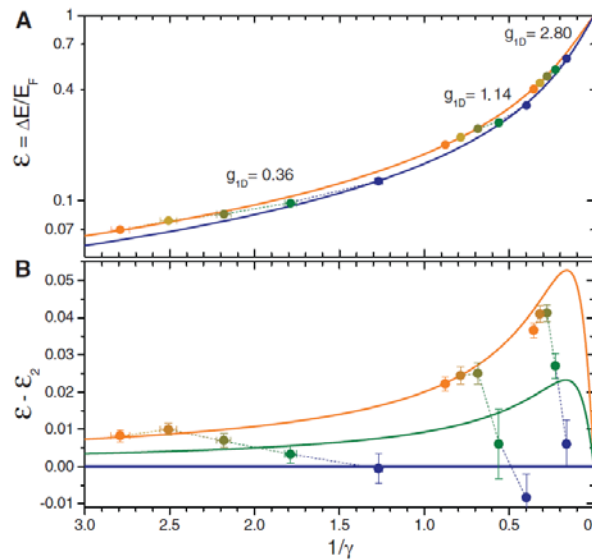
ABSTRACT

We report on the experimental realization of homogeneous two-dimensional (2D) Fermi gases trapped in a box potential. In contrast to harmonically trapped gases, these homogeneous 2D systems are readily suited to probe local as well as nonlocal properties of strongly interacting many-body systems. As a first benchmark experiment, we use a local probe to measure the density of a non-interacting 2D Fermi gas as a function of chemical potential and find excellent agreement with the corresponding equation of state (EoS). We then perform matter-wave focusing to extract the momentum distribution of the system and directly observe Fermi blocking in a near-only occupation of momentum states. Finally, we measure the momentum distribution of an interacting homogeneous 2D gas in the crossover between attractively interacting fermions and bosonic dimers.

# Kiedy zaczyna się fizyka wielociałowa? (dosyć wcześnie...)



**Fig. 1. From few to many.** A single impurity (blue) interacting with one, few, and many fermions (green) in a harmonic trapping potential. In the many-body case, the majority component can be described as a Fermi sea with a Fermi energy  $E_F$ .



Wenz, Science 342 (2013)