

Cours 12

GAZ QUANTIQUES DÉGÉNÉRÉS (Suite)

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les condensats de Bose Einstein

Des objets fascinants consistant en un grand nombre d'atomes (de l'ordre du million) agglutinés tous dans le même état quantique.

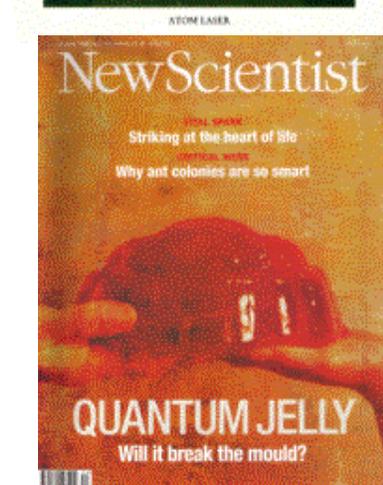
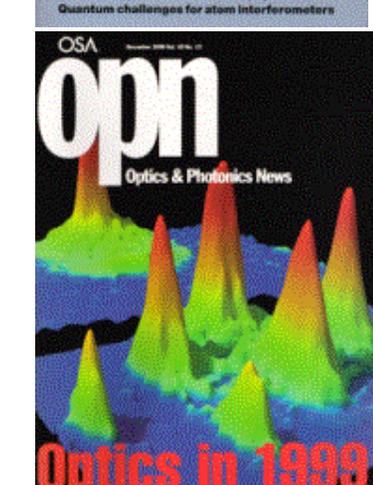
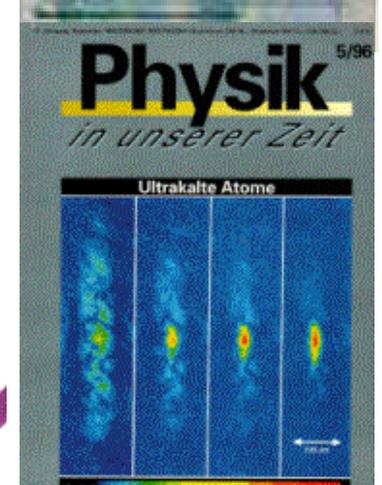
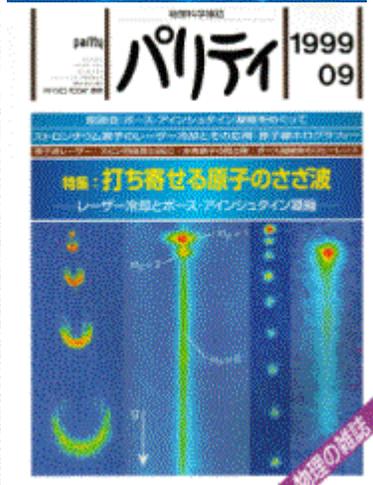
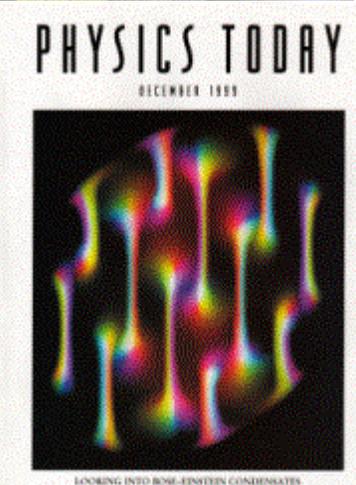
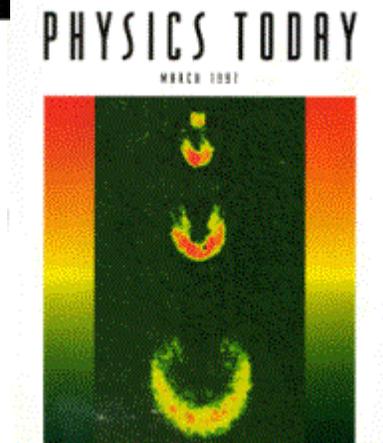
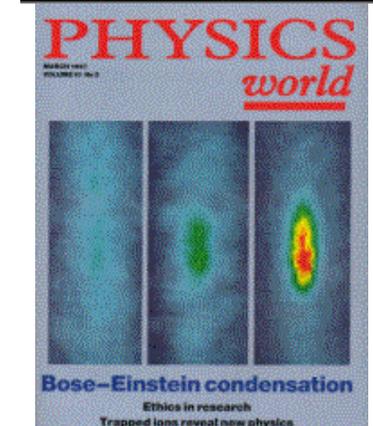
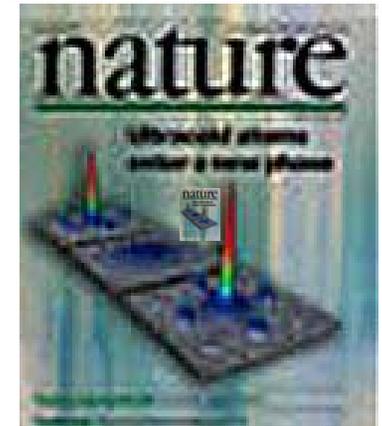
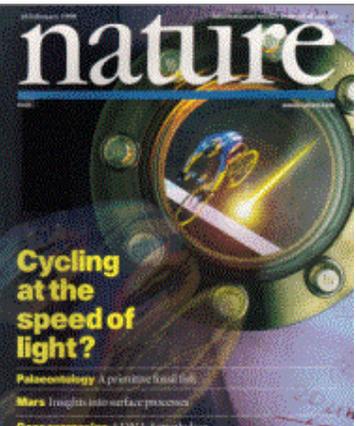
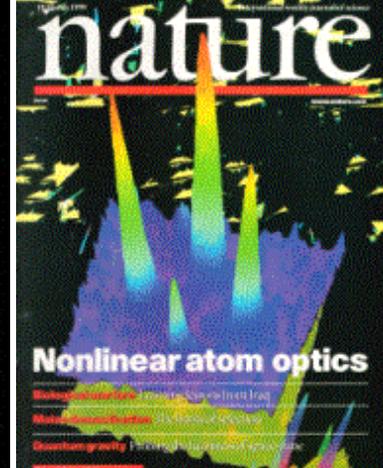
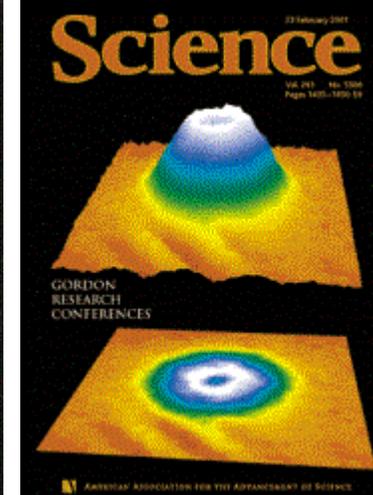
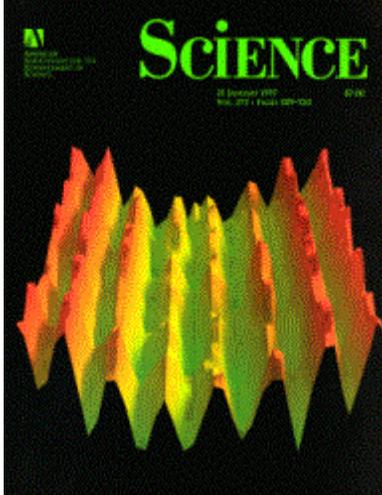
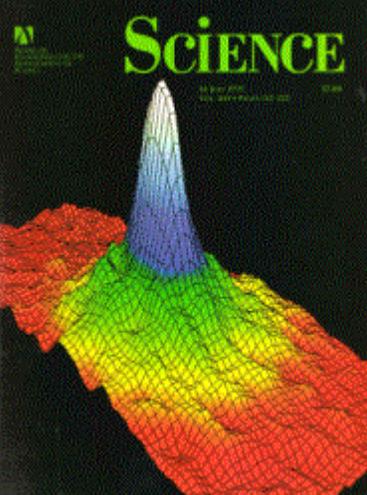
Des ondes de matière macroscopiques.

Les gaz de Fermi dégénérés

Des atomes empilés dans des états quantiques successifs, un atome par état comme les électrons dans un métal.

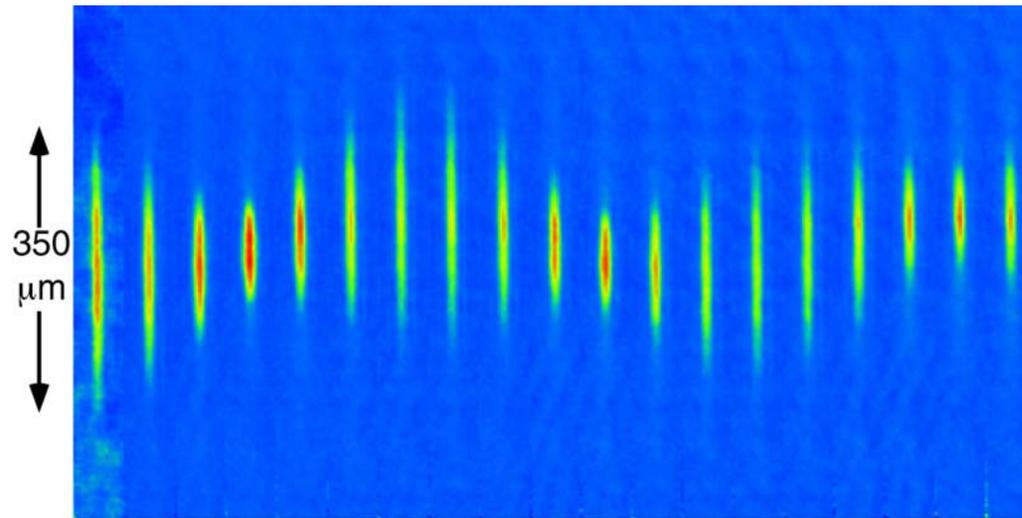
Explosion du nombre d'études sur ces systèmes

De l'ordre du millier de publications par an.



Oscillation du centre de masse et vibration d'un condensat

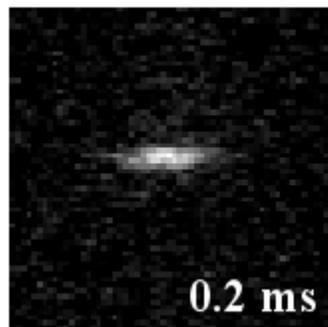
Na
MIT



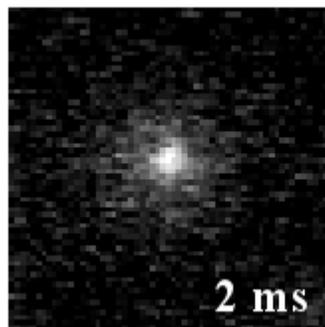
5 milliseconds per frame

Expansion balistique anisotrope

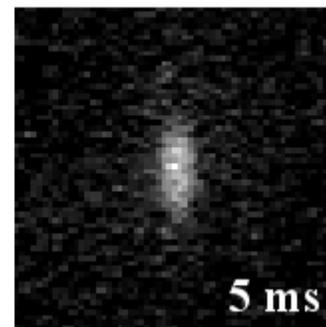
He*
Paris



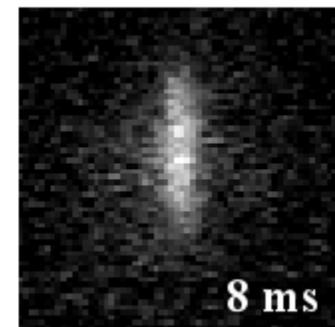
0.2 ms



2 ms



5 ms



8 ms

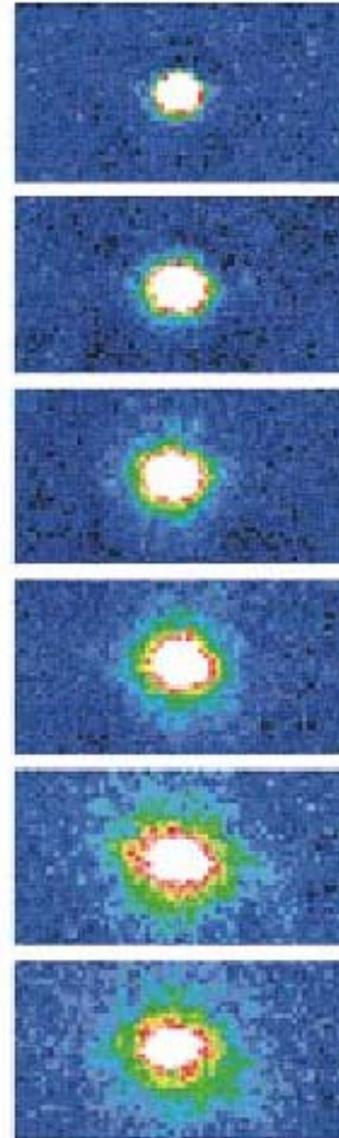
Cigare → Crêpe

Explosion d'un condensat de longueur de diffusion négative

Le condensat de peut être stable que si l'énergie cinétique de confinement est plus grande que l'énergie d'attraction entre bosons.

Au delà d'un nombre critique de bosons, le condensat subit un effondrement analogue à l'effondrement gravitationnel d'une supernova.

On commence par produire le condensat avec une longueur de diffusion a positive. Puis, en utilisant une résonance de Feshbach et en balayant le champ, on rend brusquement a négatif.



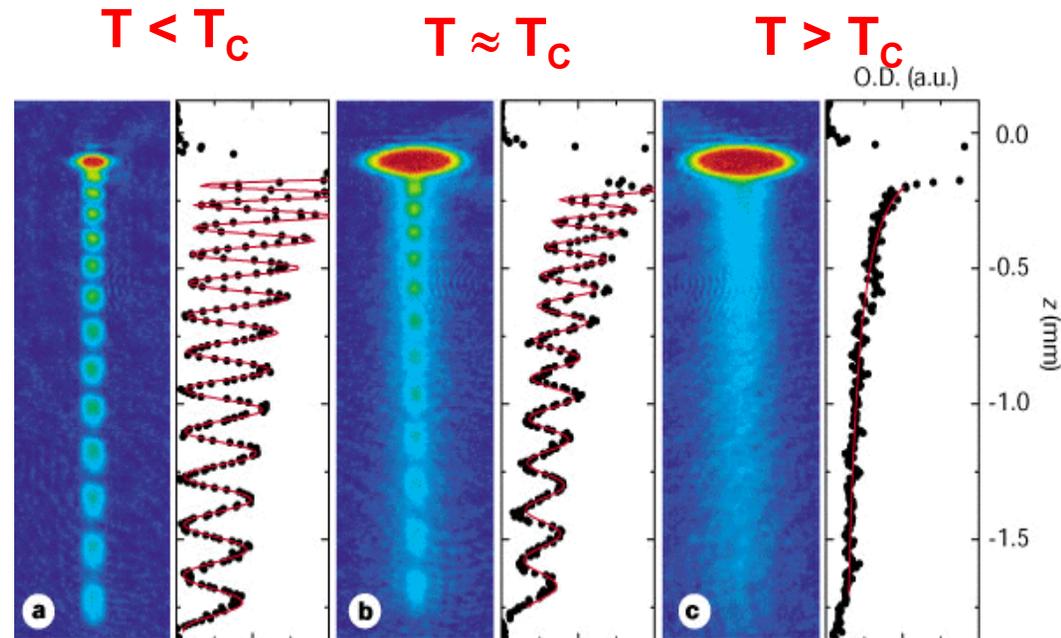
Rb⁸⁵
JILA

« Bosenova »

Interférences entre 2 ondes de matière extraites d'un condensat

Les 2 ondes sont extraites du condensat à 2 hauteurs différentes.

- Pour $T > T_C$, pas de battements. Les 2 ondes sont incohérentes.
- Pour $T < T_C$, battements de contraste 1. Les 2 ondes sont cohérentes.

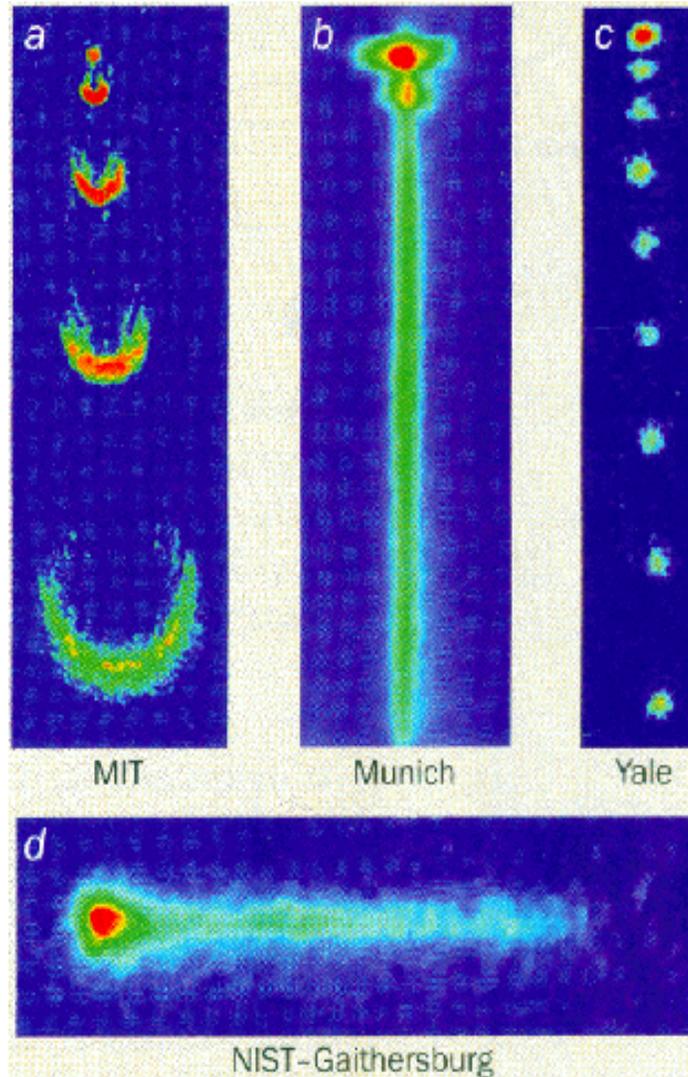


Munich

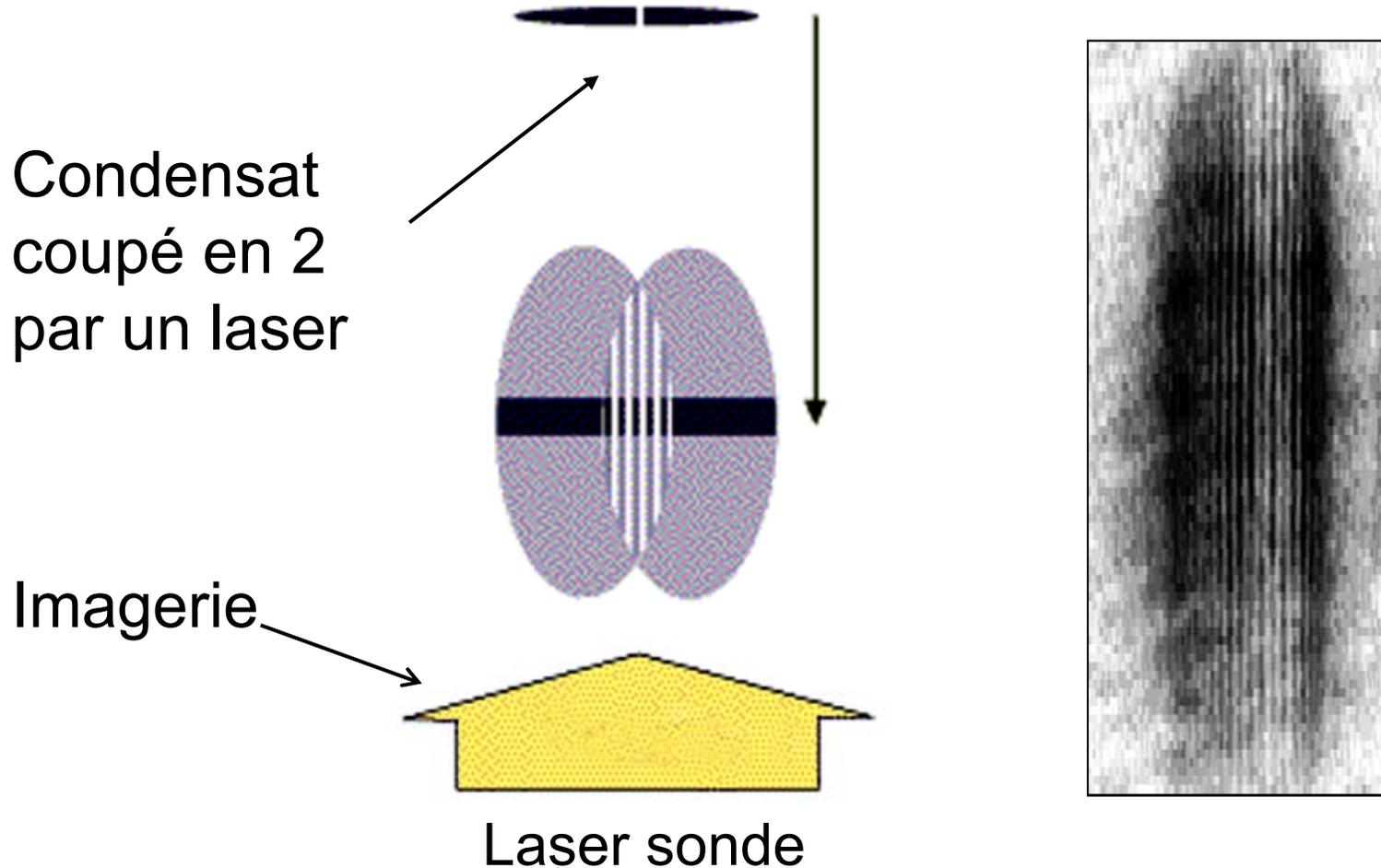
Mesure de la longueur de cohérence du condensat.

Plusieurs autres expériences (MIT, NIST) montrent aussi que la phase de l'onde de matière est la même sur toute l'étendue du condensat

Lasers à atomes



Interférence entre 2 condensats



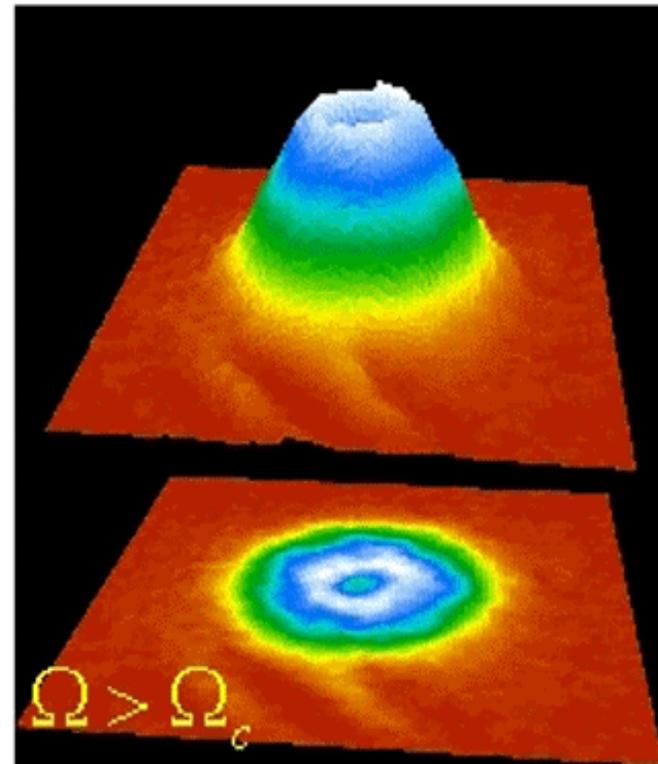
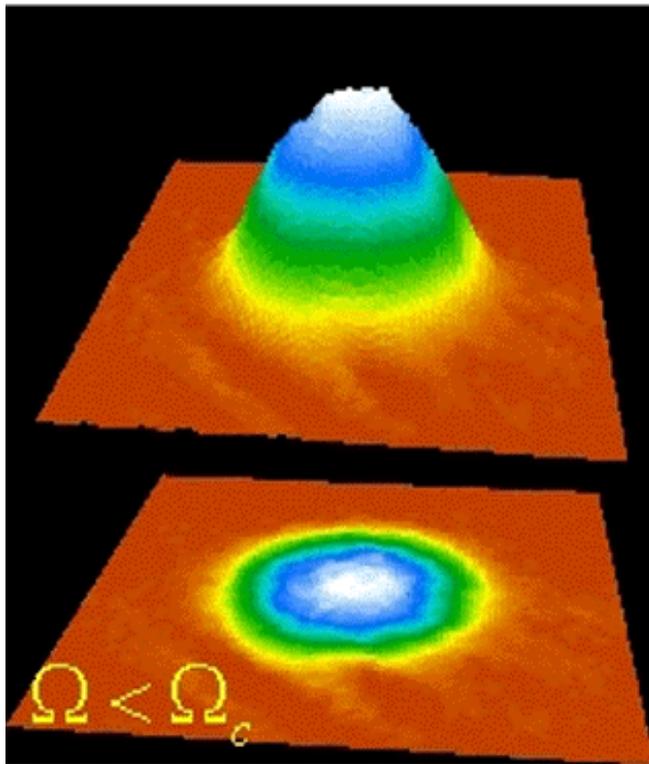
MIT

Analogie avec les interférences observées avec 2 faisceaux laser indépendants.

Problème de l'émergence d'une phase relative entre les 2 condensats.

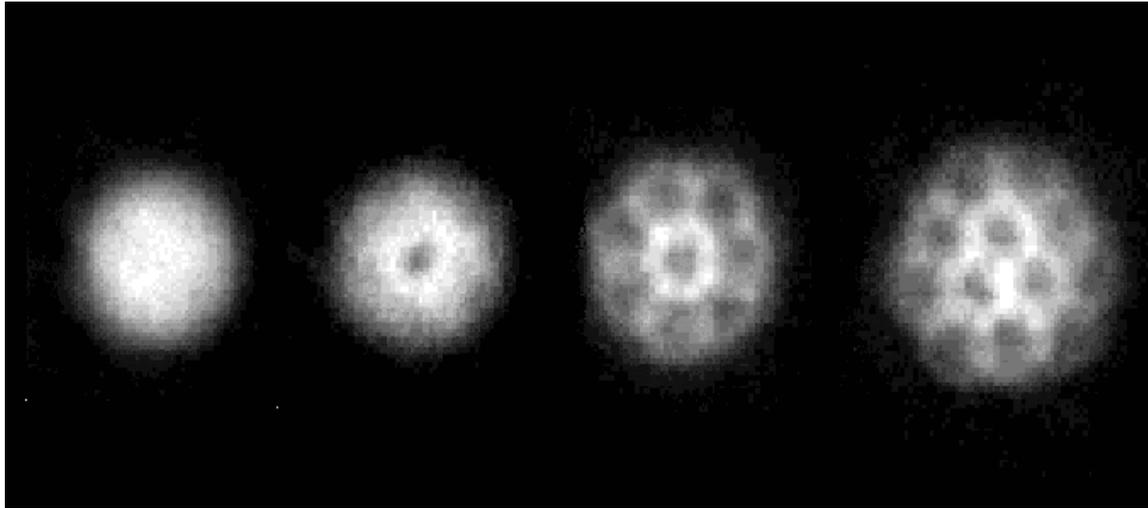
Tourbillon quantique dans un condensat de Rubidium 87

Paris

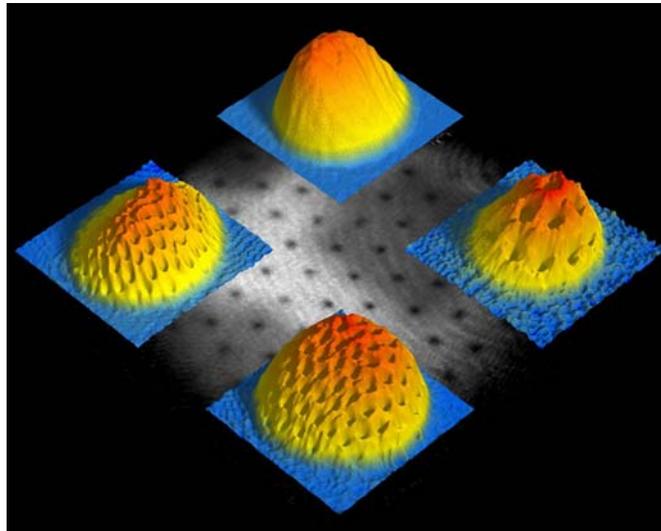


Réseau de tourbillons quantiques

Paris



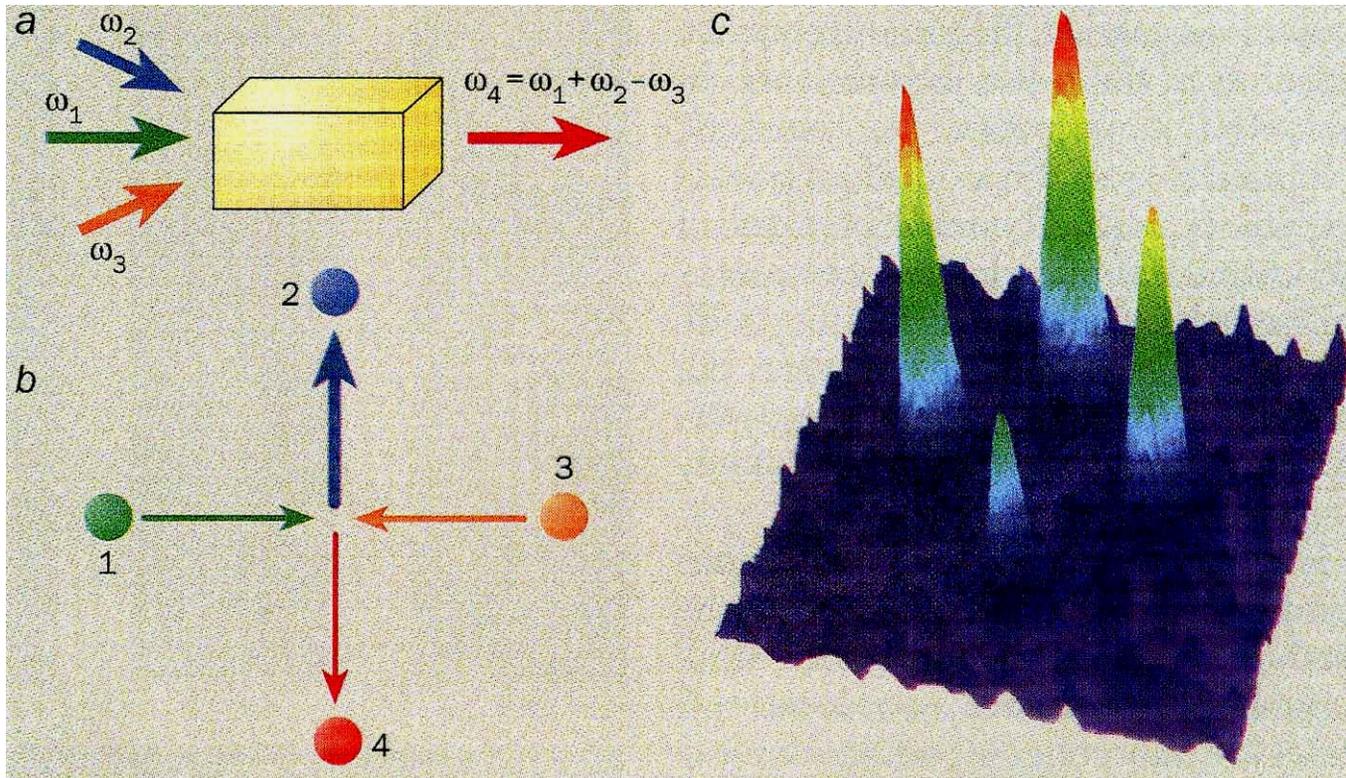
MIT



Analogie avec les réseaux d'Abrikosov
dans les supraconducteurs

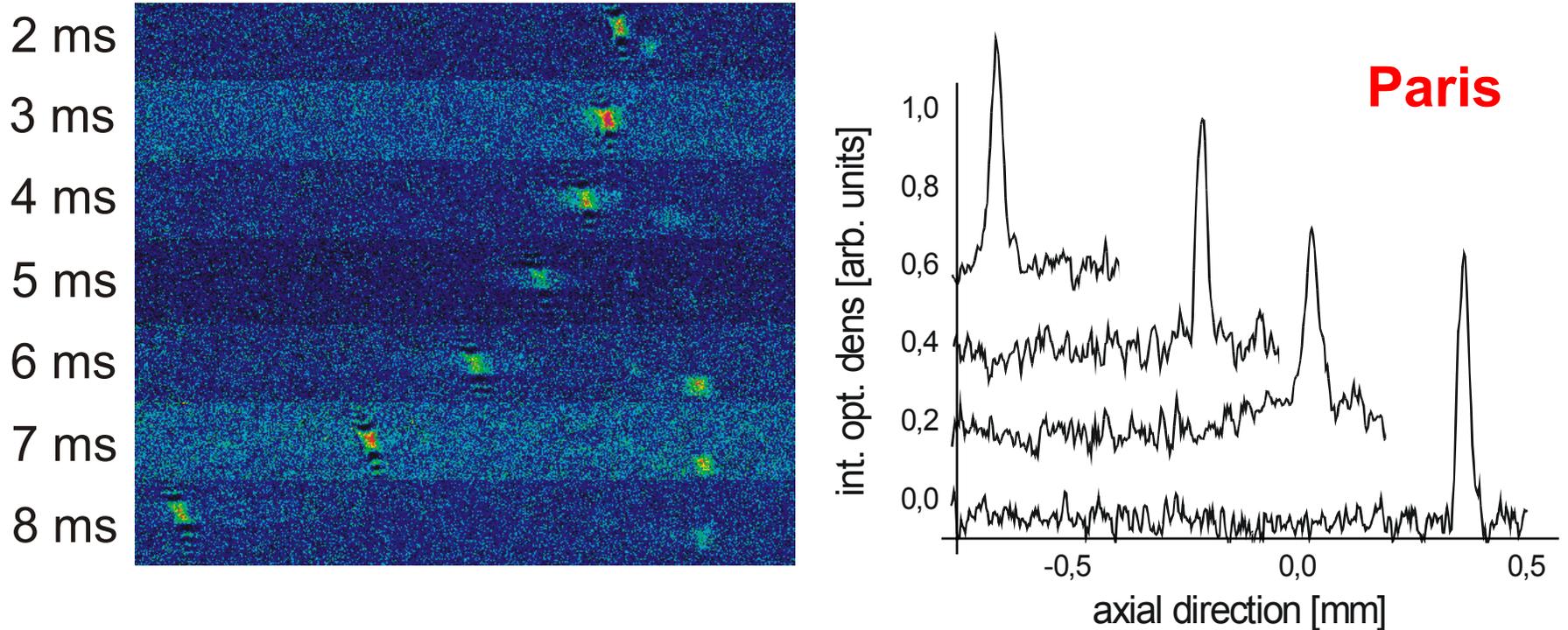
Optique atomique non linéaire

Mélange à 4 ondes



NIST

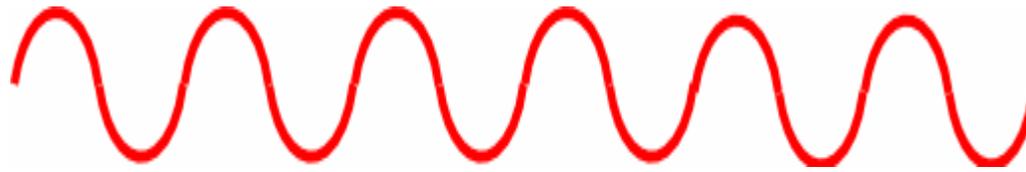
Soliton brillant



Propagation sans déformation du condensat pour une longueur de diffusion négative.

Compensation entre l'étalement dû à la dispersion des ondes de de Broglie et la contraction due à l'attraction effective entre atomes.

Condensat dans un réseau optique

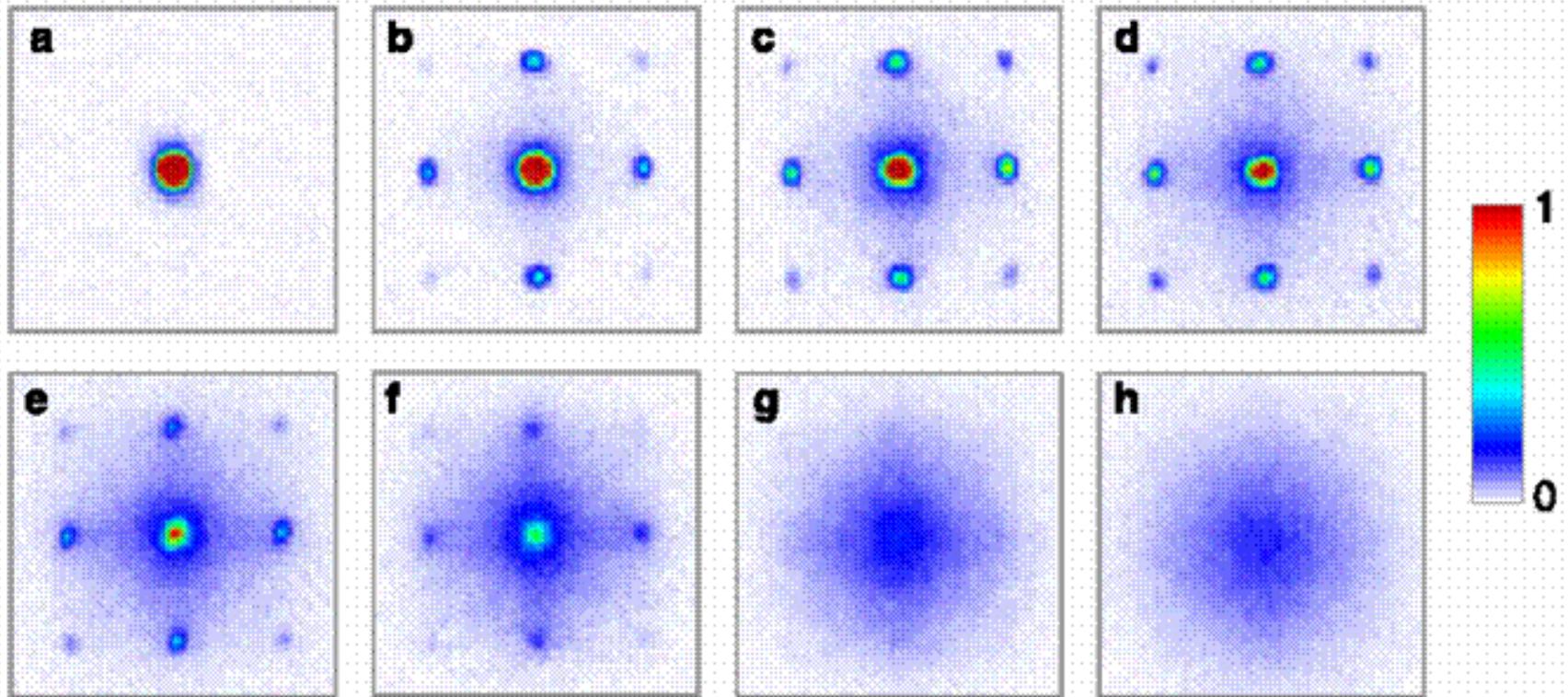


Compétition entre

- l'effet tunnel entre puits voisins qui tend à délocaliser les atomes sur l'ensemble du réseau, avec une cohérence de phase entre les ondes de matière dans les divers puits
- les interactions entre atomes dans un même puits qui tendent à égaliser les nombres d'atomes dans chaque puits et à détruire la cohérence de phase entre les ondes de matière dans les divers puits.

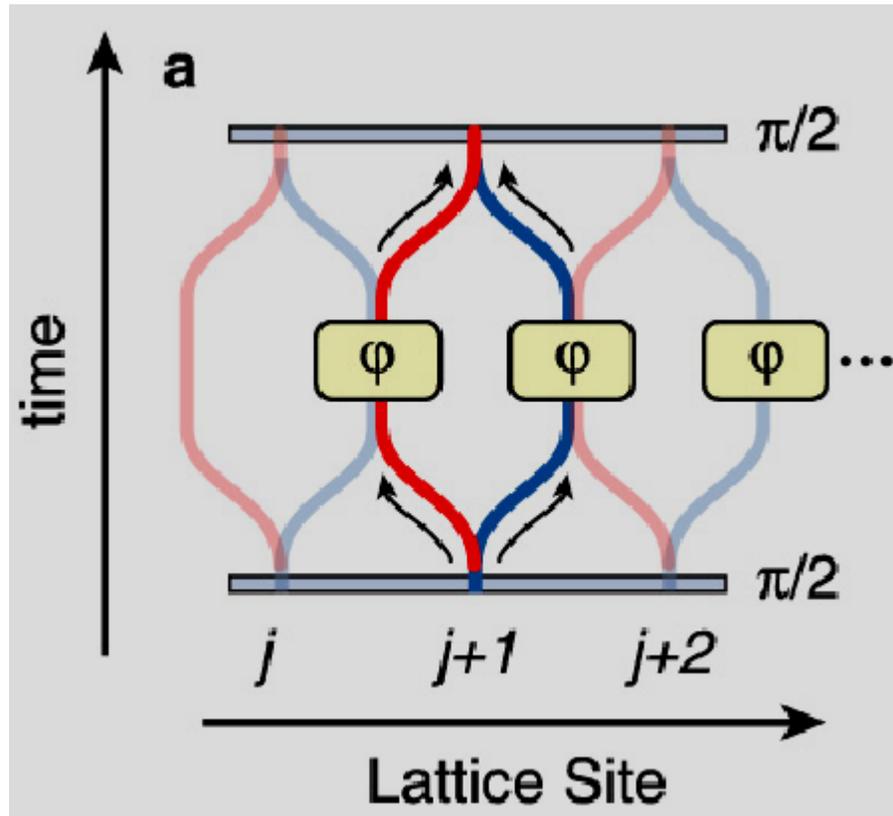
Augmentation progressive de la profondeur des puits et étude de la transition d'un régime à l'autre par observation du contraste des interférences entre les ondes de matière issues des divers puits après expansion balistique.

Transition superfluide-isolant de Mott



Munich

Intrication par transport cohérent

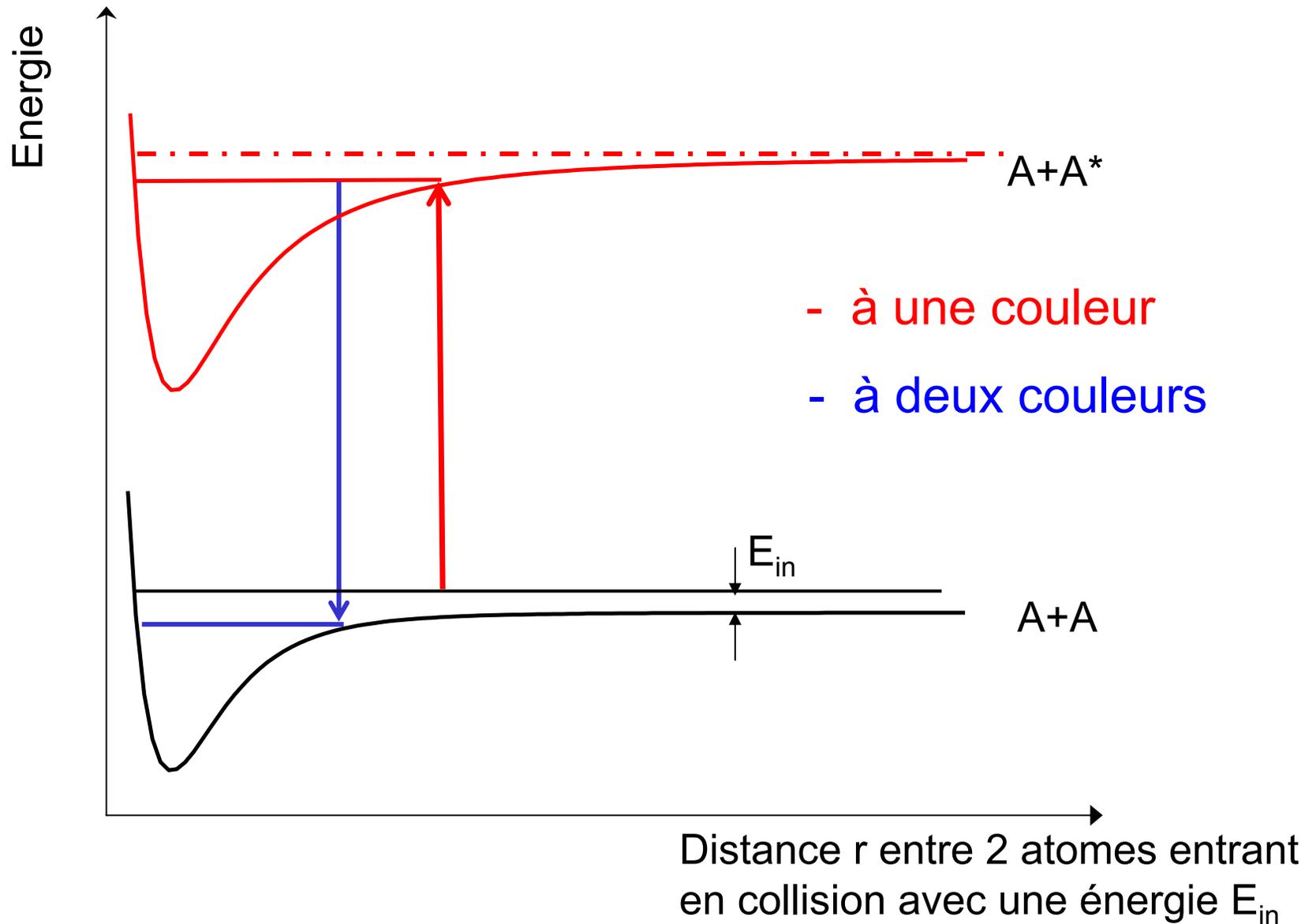


Munich

Avantage : parallélisme massif de l'intrication

Un système très prometteur pour l'information quantique

Photo-association d'atomes ultrafroids



Molécules ultrafroides

Production par photoassociation d'atomes ultrafroids

- Production de molécules ultrafroides de Cs (Labo Aimé Cotton)
- Production de molécules ultrafroides de Rb^{87} à partir d'un condensat par photoassociation à 2 couleurs (Rice).
- Production de dimères géants à partir de He^* (Paris).

Utilisation d'une résonance de Feshbach

Balayage du champ d'une région $a < 0$ vers une région $a > 0$ où existe un état lié dans le puits de potentiel d'interaction.

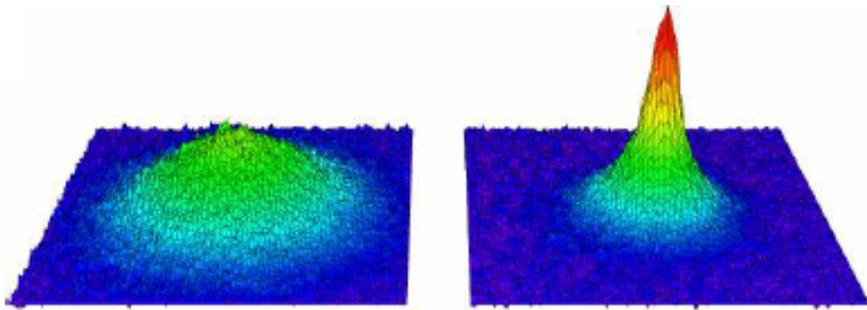
Production de molécules ultrafroides dans un tel état lié.

Molécules formées, soit à partir de 2 bosons, soit à partir de 2 fermions (JILA, Paris, Rice, Innsbruck, Stanford, Duke, ...)

Couplage cohérent entre les paires d'atomes entrant en collision et les molécules formées (JILA)

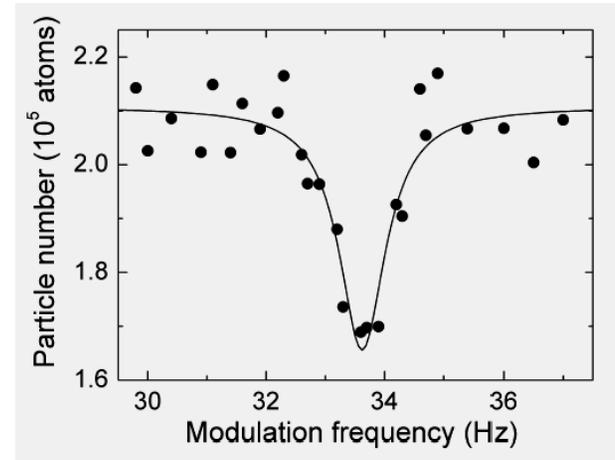
Condensats moléculaires ✗

Condensats moléculaires



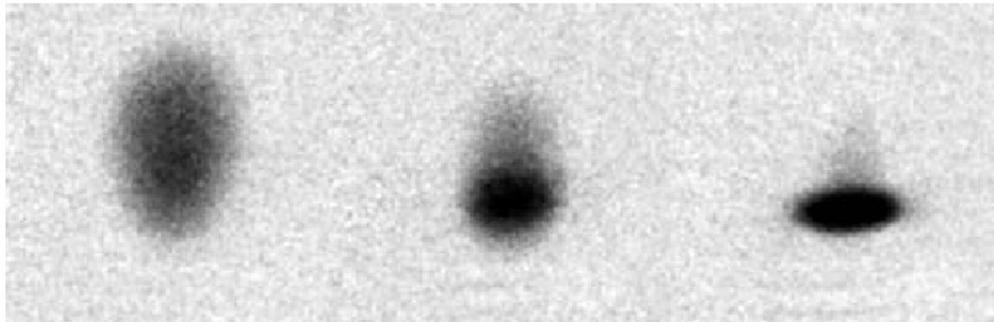
^{40}K

JILA



^6Li

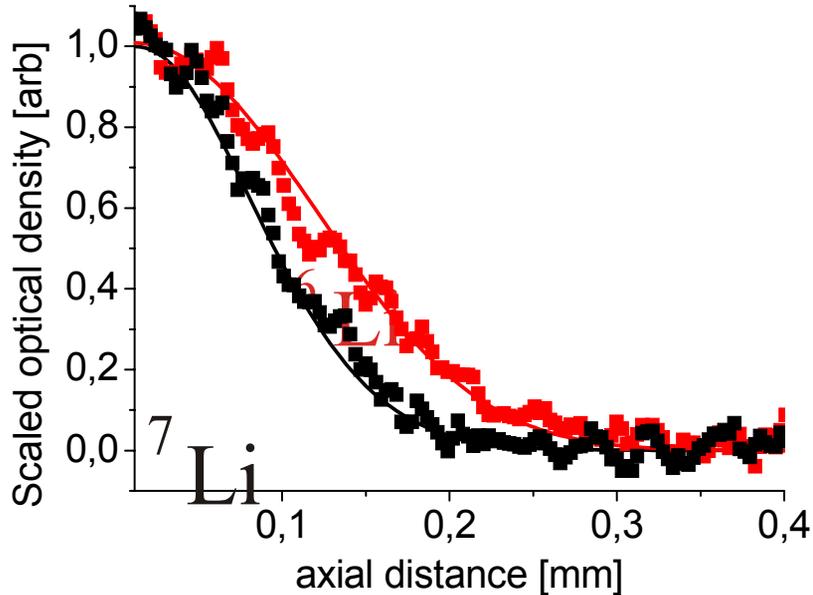
Innsbruck



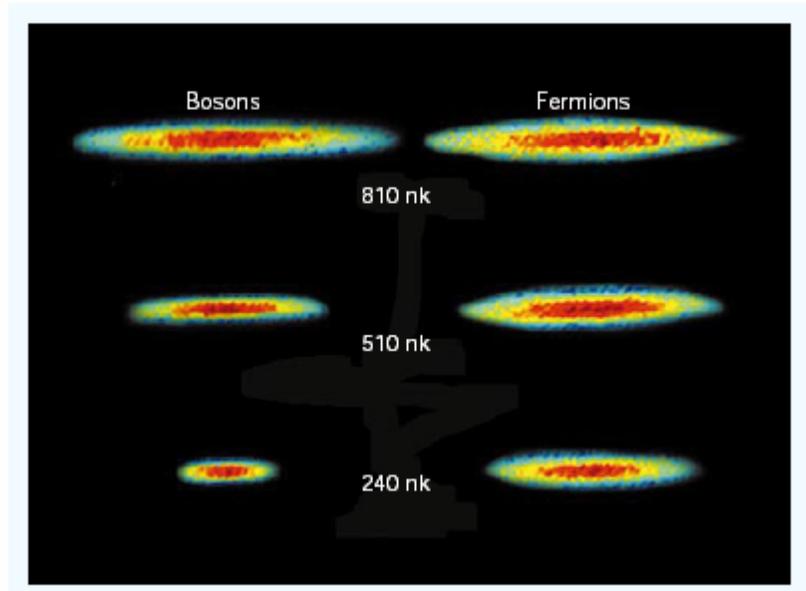
MIT

^6Li

Pression de Fermi



Paris

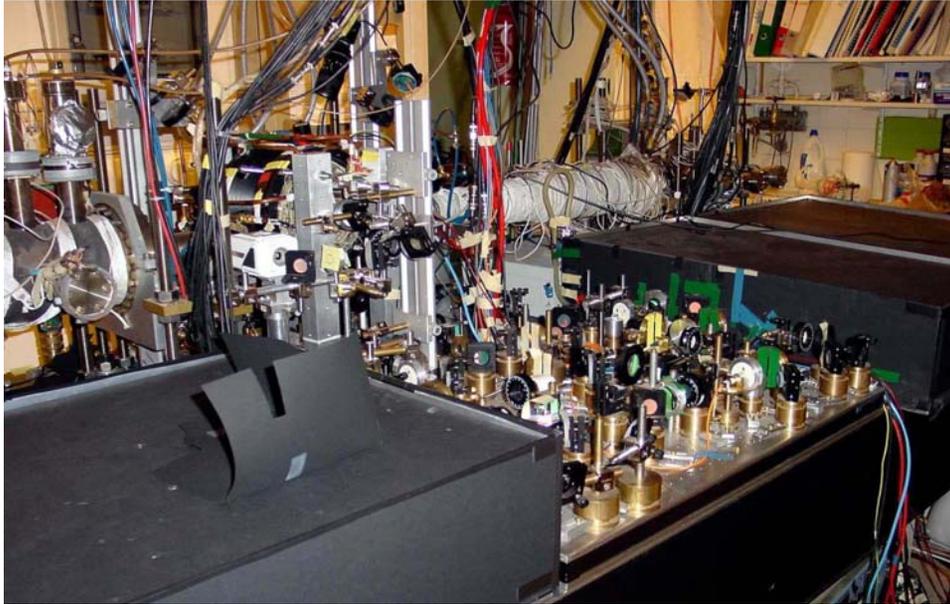


Rice

La distribution spatiale des fermions (Li^6) est plus large que celle des bosons (Li^7).

Vers une transition superfluide de type BCS (Bardeen Cooper Schrieffer) par formation de paires d'atomes analogues aux paires de Cooper en supraconductivité?

Une expérience typique d'atomes froids



Condensats sur des “puces”



Munich

Munich, Heidelberg, Tübingen,
Sussex, Harvard, JILA, Orsay...

CONCLUSION

COLLÈGE DE FRANCE

CHAIRE DE PHYSIQUE ATOMIQUE
ET MOLÉCULAIRE

LEÇON INAUGURALE

faite le Mardi 11 Décembre 1973

PAR

M. CLAUDE COHEN-TANNOUJJI

Professeur

Quelques thèmes possibles de cours

- Condensats dans des réseaux optiques.
- Transition superfluide de type BCS dans un gaz de Fermi.
- Molécules ultrafroides. Condensats moléculaires.
- Systèmes de dimensionnalité réduite.
- Limites ultimes des interféromètres atomiques.
- Les agrégats.
- Le chaos quantique.

Annonce de cours

La superfluidité

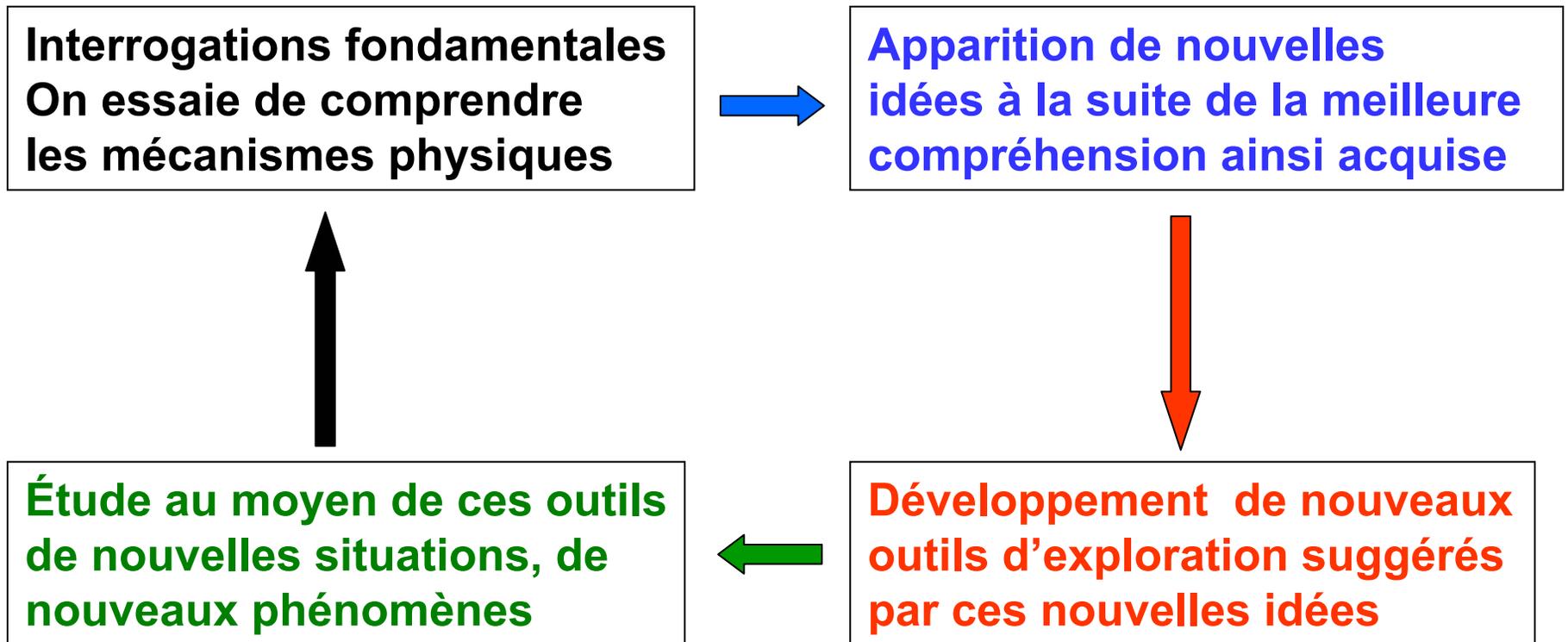
Sandro Stringari

Titulaire de la Chaire Européenne
du Collège de France
pour l'année 2004-2005

Peut-on comprendre l'origine de la vitalité dont ont fait preuve la physique atomique et moléculaire et l'optique au cours des dernières décennies?

Quelles sont les caractéristiques spécifiques et originales de ce domaine de recherche?

Un schéma général pour comprendre l'évolution d'un domaine de recherche



L'exemple du laser

- L'émission induite introduite par Einstein en 1917 pour expliquer la loi de Planck.
- Les situations hors d'équilibre et les manières de les réaliser (pompage optique, collisions,...).
- La possibilité d'amplifier le rayonnement par émission stimulée dans un milieu hors d'équilibre (Townes).
- Le développement de nouvelles sources de rayonnement (masers, lasers) de plus en plus performantes.
- Des nouvelles spectroscopies, des nouveaux champs de recherche, des nouveaux objets comme les condensats de Bose Einstein voient le jour.
- Des nouveaux problèmes, des nouvelles questions, surgissent à propos des ces nouveaux objets.
- Et ainsi de suite...

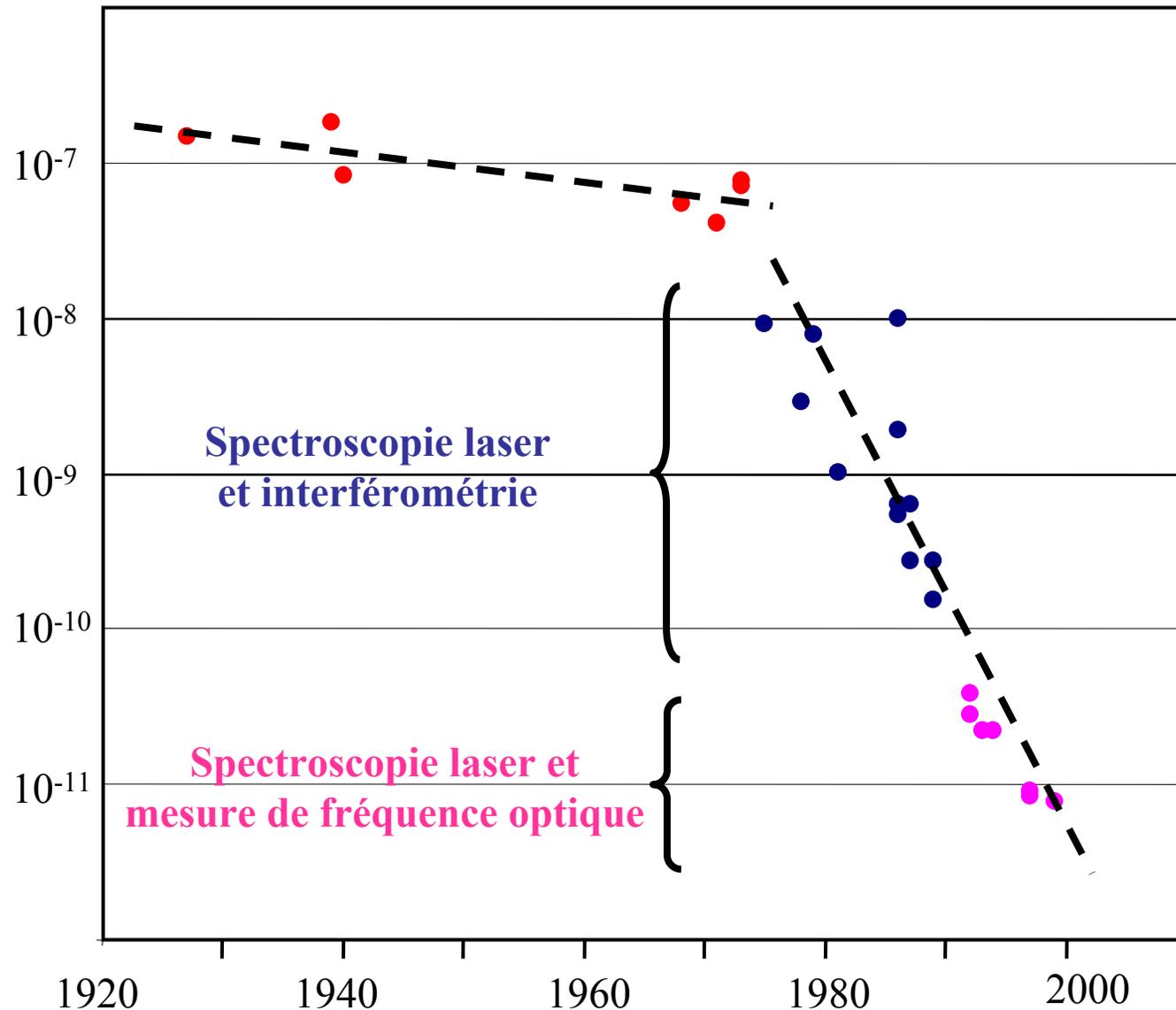
Caractère artificiel de la distinction entre recherche fondamentale et recherche appliquée.

Dangers d'un pilotage de la recherche sur des objectifs définis par des programmes prioritaires.

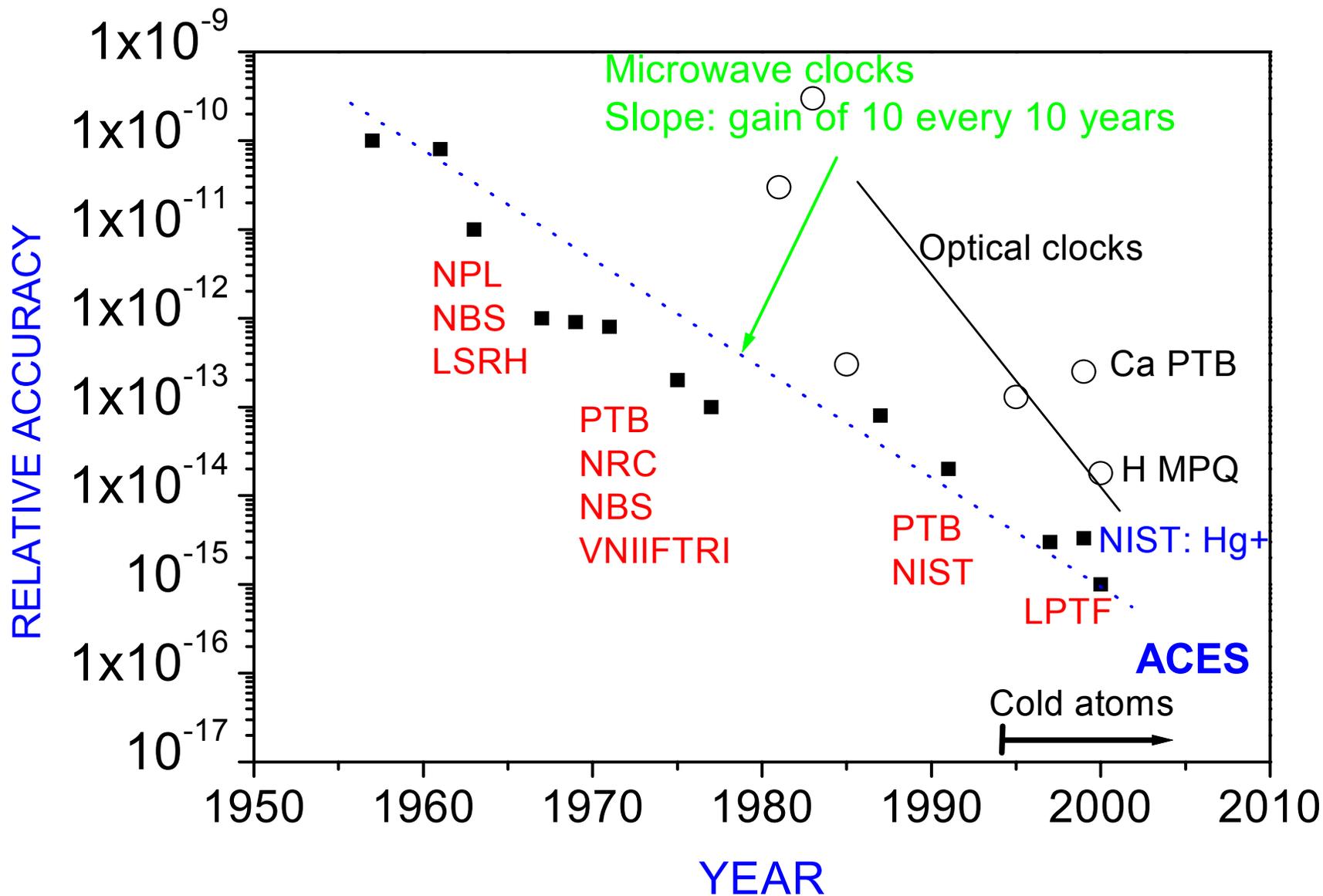
Importance des efforts à long terme

Importance des ruptures technologiques

Incertitude sur la constante de Rydberg



ACCURACY OF THE ATOMIC TIME



Une spécificité importante de ce domaine de recherche

Fournit des situations, des systèmes simples, contrôlables et manipulables avec une grande précision, servant de modèles pour approfondir des concepts et analyser des problèmes plus complexes.

Du système atomique unique (un seul électron, un seul atome, une seule molécule) à la matière condensée.

Du simple au complexe

Développement important d'interfaces avec d'autres domaines scientifiques.

Pourquoi les gaz quantiques dégénérés sont-ils si intéressants?

Les propriétés de ces gaz les apparentent à d'autres systèmes jusqu'ici rencontrés seulement en physique de la matière condensée (hélium superfluide, supraconducteurs).

L'élément nouveau est que ces propriétés apparaissent ici sur des systèmes gazeux extrêmement dilués, près de 100.000 fois plus dilués que l'air ambiant.

Les interactions entre atomes ont alors un effet beaucoup plus faible qui peut être évalué de manière très précise.

Ces interactions peuvent de plus être modifiées à volonté en grandeur et en signe (attraction ou répulsion) au moyen de « résonances de Feshbach ».

Systeme modèle idéal pour comprendre l'effet des interactions dans le problème à N corps.

Les agrégats

Comment, en étudiant avec des méthodes de physique atomique des systèmes formés d'un nombre croissant d'atomes, peut-on comprendre l'évolution progressive des propriétés du système.

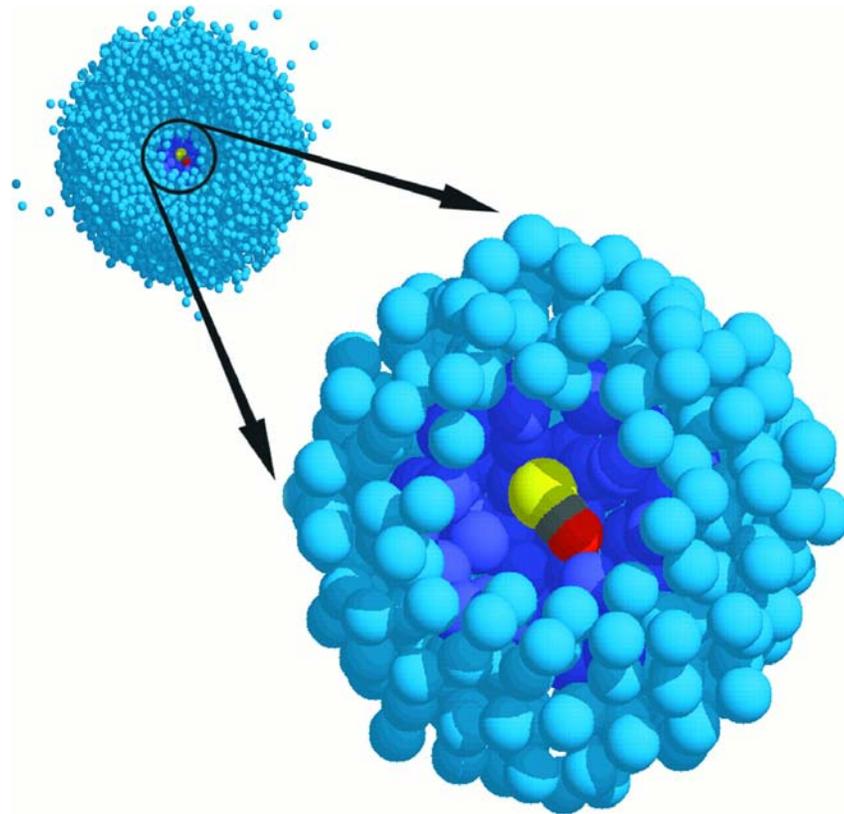
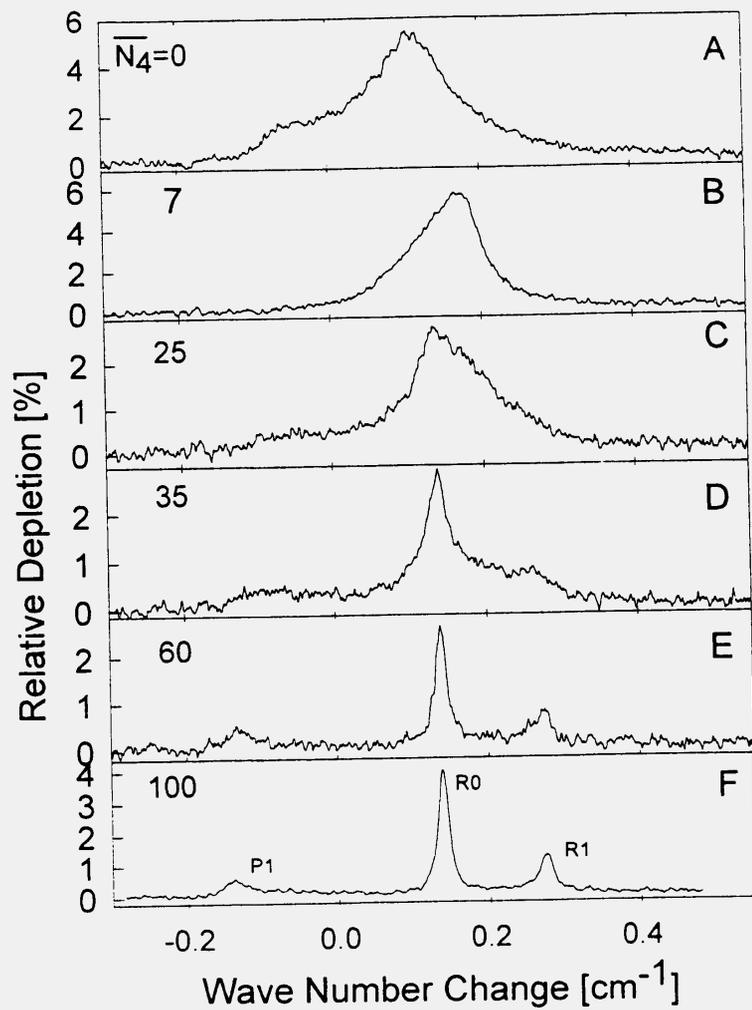
De l'atome isolé à la matière condensée?

Exemple

Molécule OCS dans une gouttelette de He³ dans laquelle on introduit un nombre croissant d'atomes de He⁴. Les atomes de He⁴ s'agglomèrent autour de la molécule OCS. Les raies du spectre de la molécule s'affinent et deviennent identiques à celles de la molécule libre quand environ 60 atomes de He⁴ entourent la molécule.

On peut ainsi étudier à partir de quel nombre d'atomes minimum d'atomes de He⁴ les propriétés de superfluidité (à l'origine de la rotation sans friction de la molécule) apparaissent.

Göttingen



Göttingen

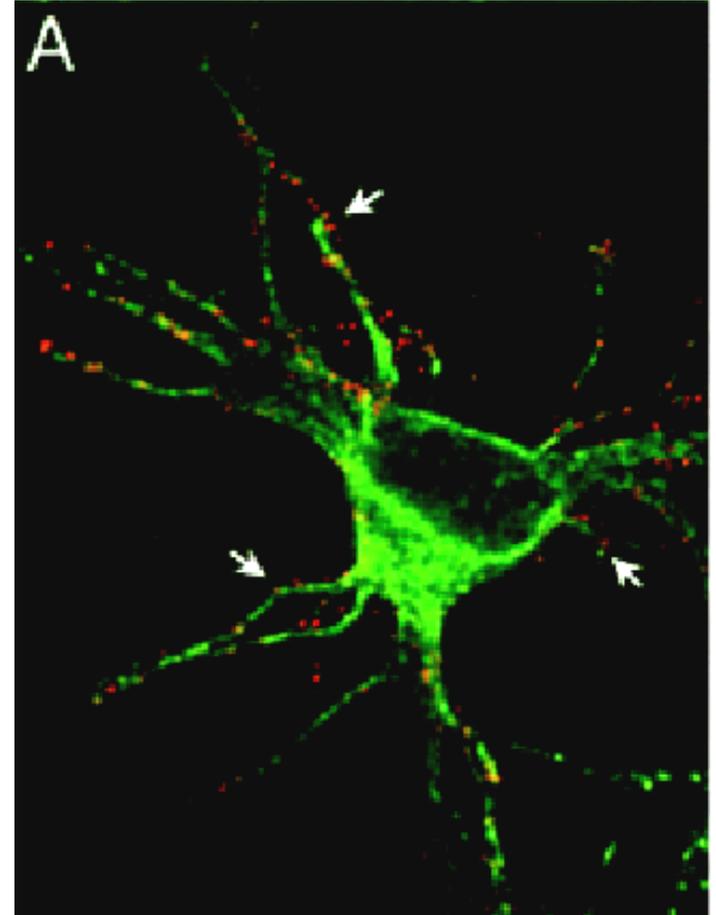
Nanocristaux semiconducteurs (atomes artificiels ou « quantum dots »)

Dimensions de l'ordre de 5 à 10nm
Noyaux de CdSe entourés d'une
coquille de ZnS

Observation de la fluorescence de
ces nanocristaux qui apparaît dans
le visible (confinement quantique).

Fluorophores inorganiques
brillants et photostables.

Etude grâce à cette fluorescence de
la dynamique des récepteurs impliqués
dans la transmission entre neurones.



M. Dahan, S. Lévi, C. Luccardini, P. Rostaing, B. Riveau, A. Triller
Science, 302, 17 Octobre 2003

Couplage théorie expérience

Équipes de recherche pas trop grosses permettant
des interactions efficaces

Couplage recherche enseignement

Un nouveau logo de l'ANPE pour... 2,4 millions d'euros

LE NOUVEAU LOGO de l'Agence nationale pour l'emploi (ANPE) n'orne pas encore les 870 agences du réseau que, déjà, il est vivement critiqué. Présenté aux personnels cette semaine, il sera rendu public à partir du 1^{er} décembre. Oublié l'ancien symbole – carré, jaune et bleu – qui date de près de trente ans, place au rouge pour « *la puissance, la solidité, la dimension institutionnelle* », au vert pour « *la modernité, la vivacité, l'adaptabilité* », explique Laurent Habib, directeur général d'Euro RSCG C & O. Le rond symbolise « *la rencontre, plus humaine, en douceur* » et les deux hémisphères racontent que l'agence doit « *rendre possible la rencontre entre l'offre et la demande* » ; « *anpe* » enfin, en minuscules, pour « *une posture plus modeste* » de l'agence.

Les détracteurs voient autre chose dans ces symboles : les deux parties indiquent la « *fracture sociale, infranchissable, inéluctable* ». Le vert concerne « *les chômeurs d'en haut (...), encore capables de répondre aux besoins de l'entreprise* ». Et le rouge est pour ceux



« *d'en bas, considérés comme "inemployables"* ». Syndicats et associations de chômeurs d'Ile-de-France devaient par ailleurs dénoncer, mardi 25 novembre, « *les orientations prises par le service public de l'emploi* ». « *L'ANPE va être une super-agence d'intérim* », explique Matthieu Dautreppe, du Mouvement national des chômeurs et précaires.

En fait, ces mouvements sont surtout choqués par la somme investie pour cette « *nouvelle identité visuelle* » : 2,4 millions d'euros. « *Ce n'est pas une dépense nouvelle, il s'agit d'un redéploiement interne, d'une économie faite sur le budget de communication 2003*, explique la direction de l'ANPE. *Nous avons demandé à Euro RSCG C & O de nous aider à réfléchir sur notre évolution.* » Résultat : plusieurs mois de consultation interne, 5 000 réponses sur Alice, l'intranet de l'entreprise, des tests auprès de trois « *cibles* », « *les chefs d'entreprise, les demandeurs d'emploi, les partenaires institutionnels* »... et un logo.

Rémi Barroux

Le Monde, 26 Novembre 2003

Symposium

16/01/04

**Collège de France,
Amphithéâtre Marguerite de Navarre**

Symposium dédié à la mémoire de Jean Brossel,
organisé en commun avec Serge Haroche (chaire
de physique quantique)

« Manipulation d'atomes et de photons »

Site WEB

où peuvent être trouvées les notes de cours des années précédentes de la chaire de physique atomique et moléculaire (à partir de 1973) et où sera déposé le cours de cette année.

<http://www.phys.ens.fr/cours/college-de-france/>