
Basses températures Et Mécanique quantique

David Guéry-Odelin

*Laboratoire Collisions, Agrégats, Réactivité
Université Paul Sabatier, Toulouse.*



midipyrenees.fr



Les transparents de cette présentation seront disponibles sur le site
<http://www.coldatomsintoulouse.com>

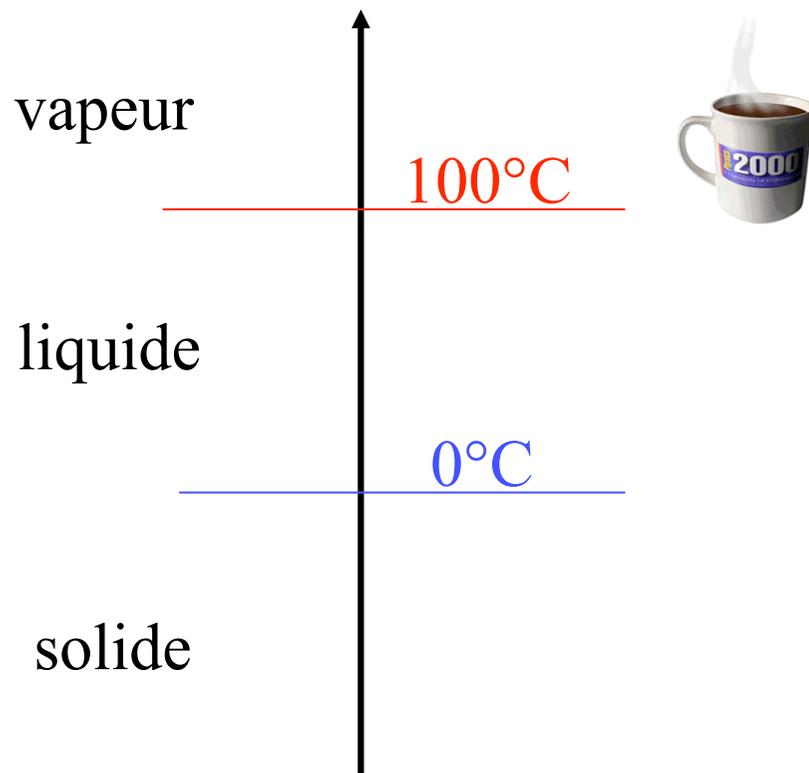
La température

Température : ordres de grandeur et échelle absolue

Eau (pression ordinaire) :

$$T(^{\circ}\text{K})=273,15+T(^{\circ}\text{C})$$

transitions de phase

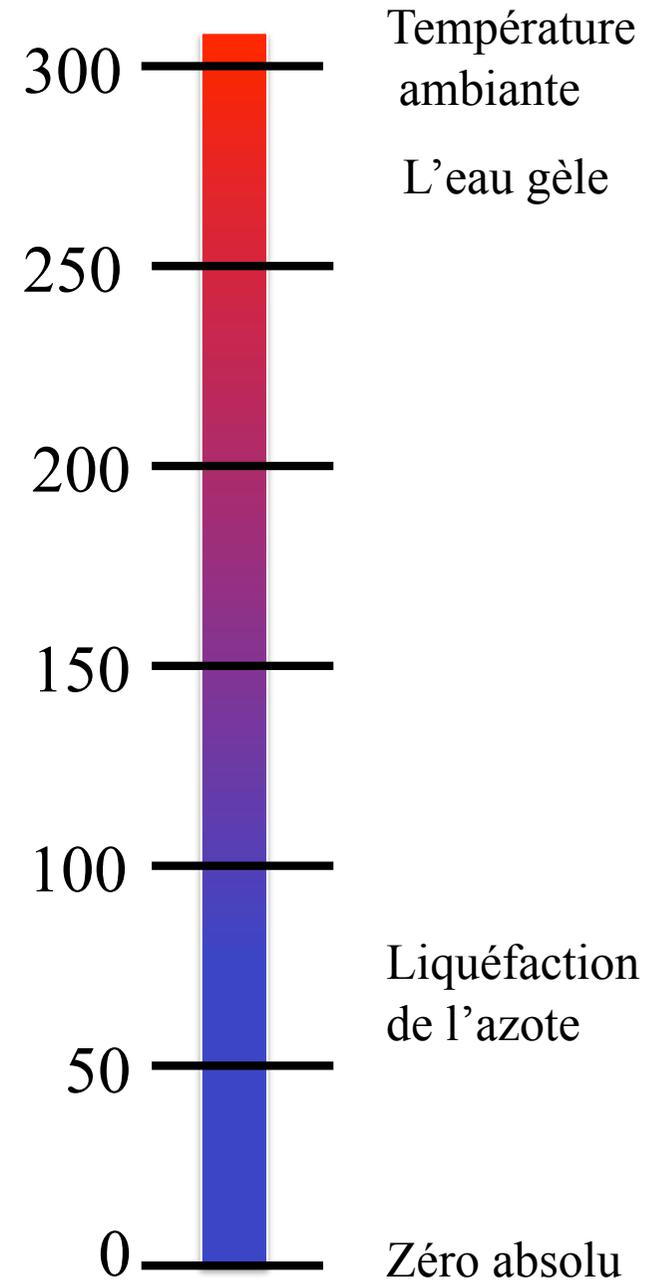
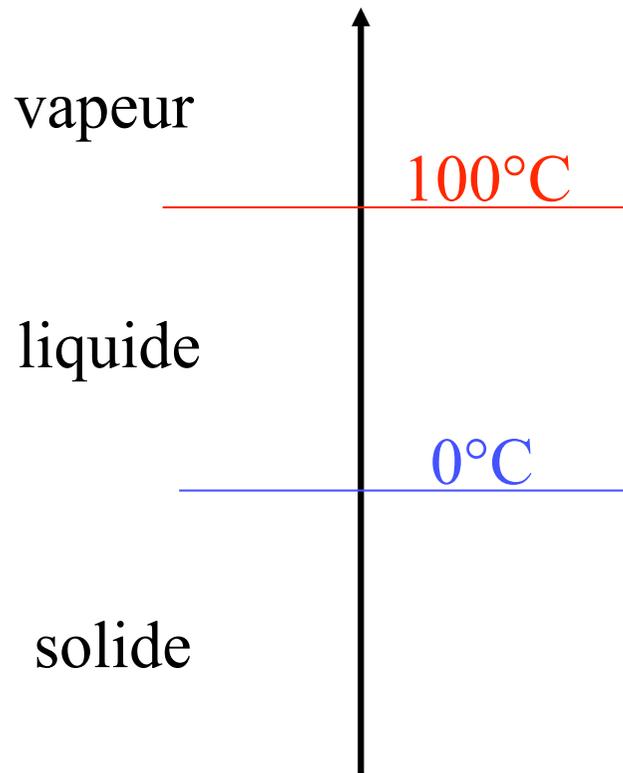


Plus la température est basse,
plus la phase est ordonnée

Température : ordres de grandeur et échelle absolue

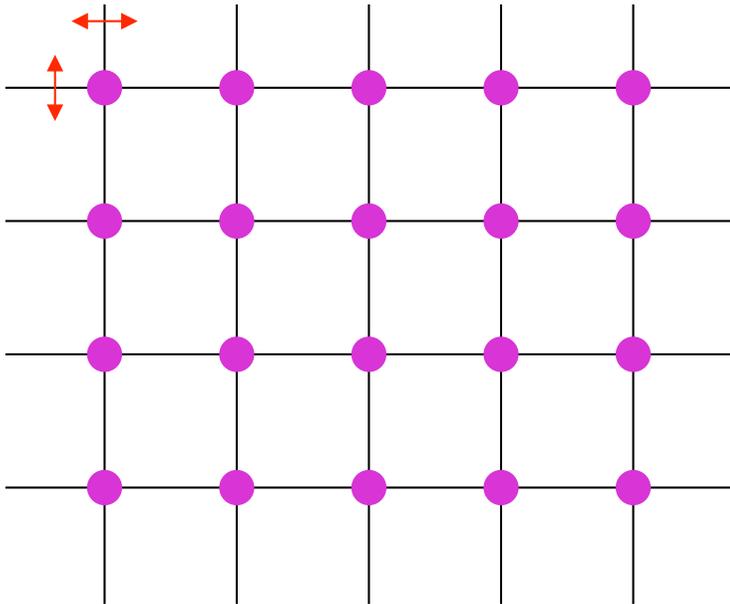
Eau (pression ordinaire) :

transitions de phase



Température : point de vue microscopique

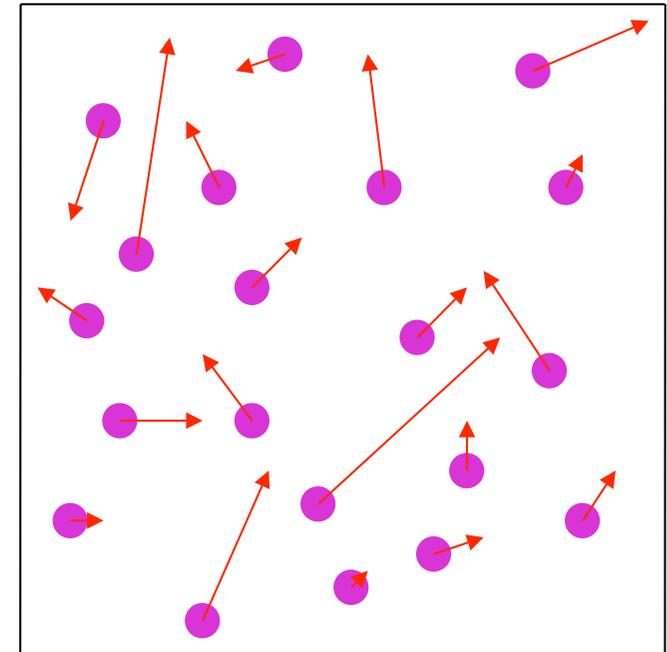
Solide



- atomes sur un réseau 3D

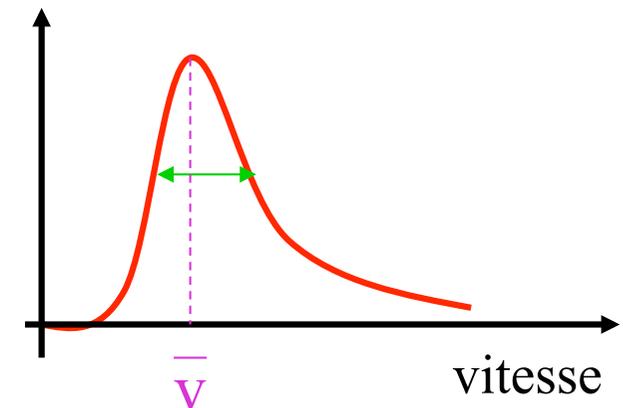
Température reliée à l'agitation autour des positions moyennes

Gaz

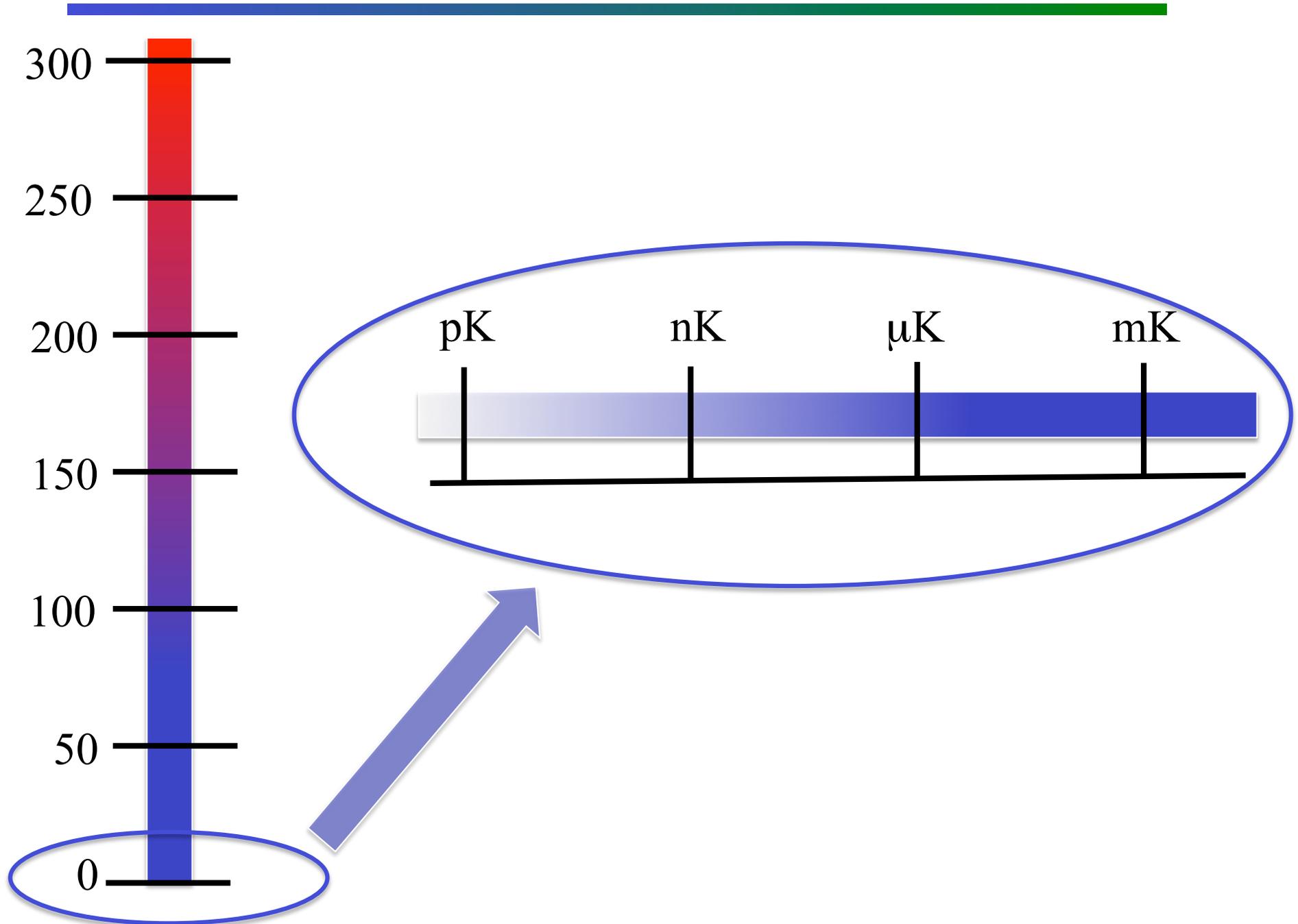


Température reliée à la dispersion des vitesses

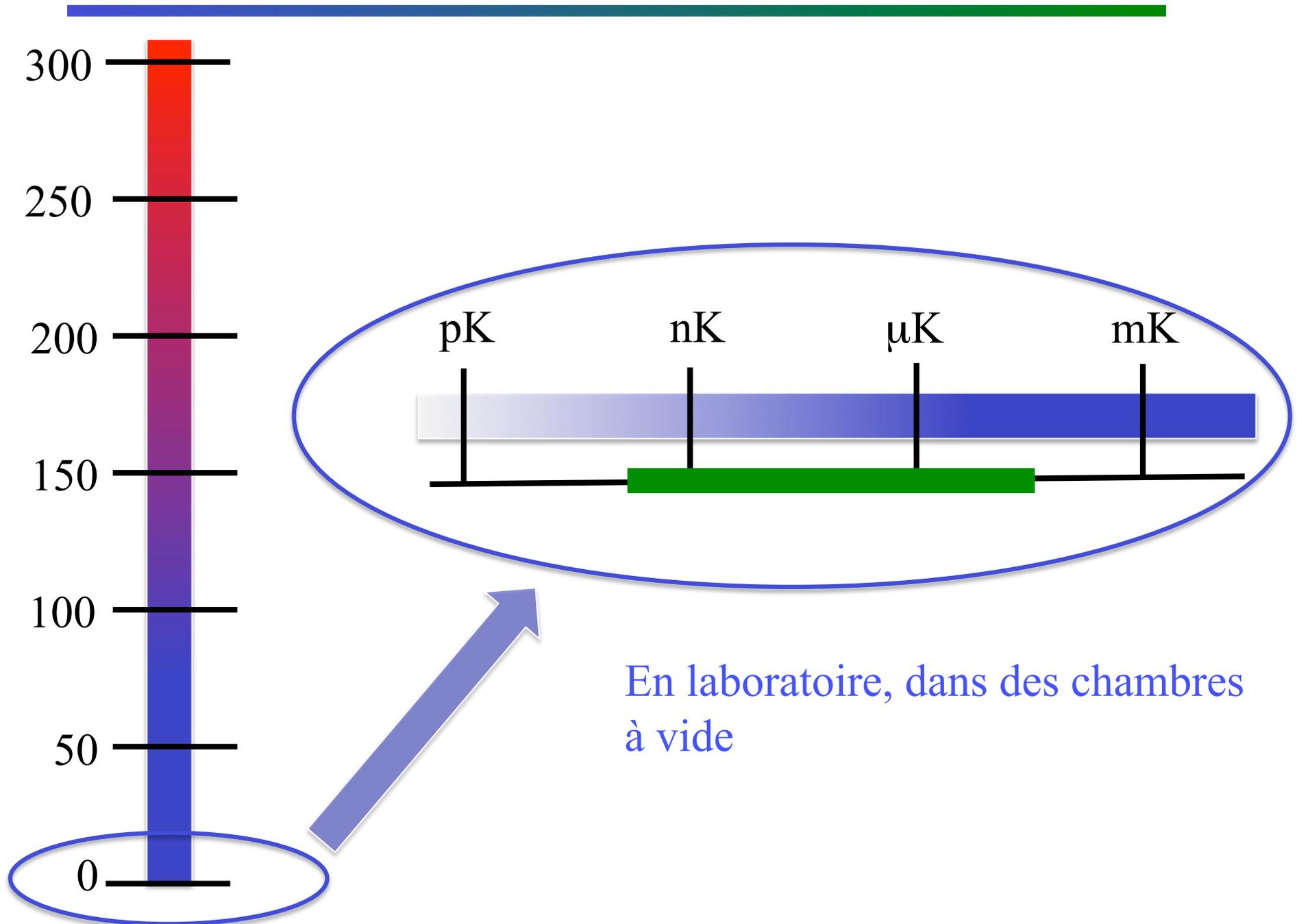
Nombre d'atomes



Gaz ultrafroids



Domaine étudié depuis les années 80

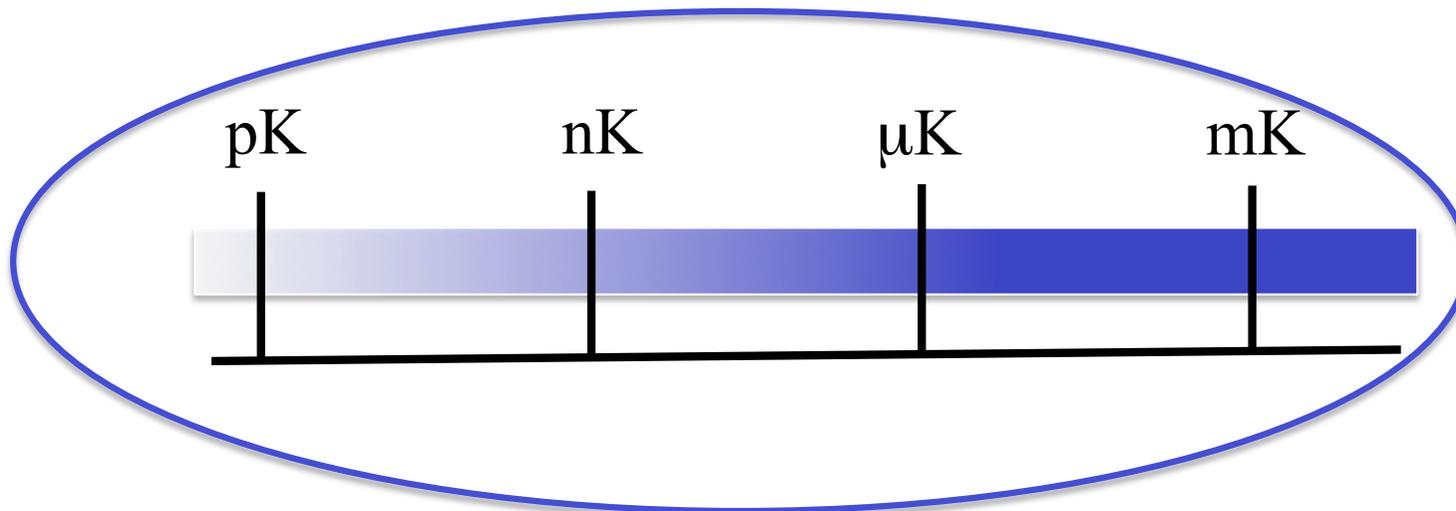


Questions

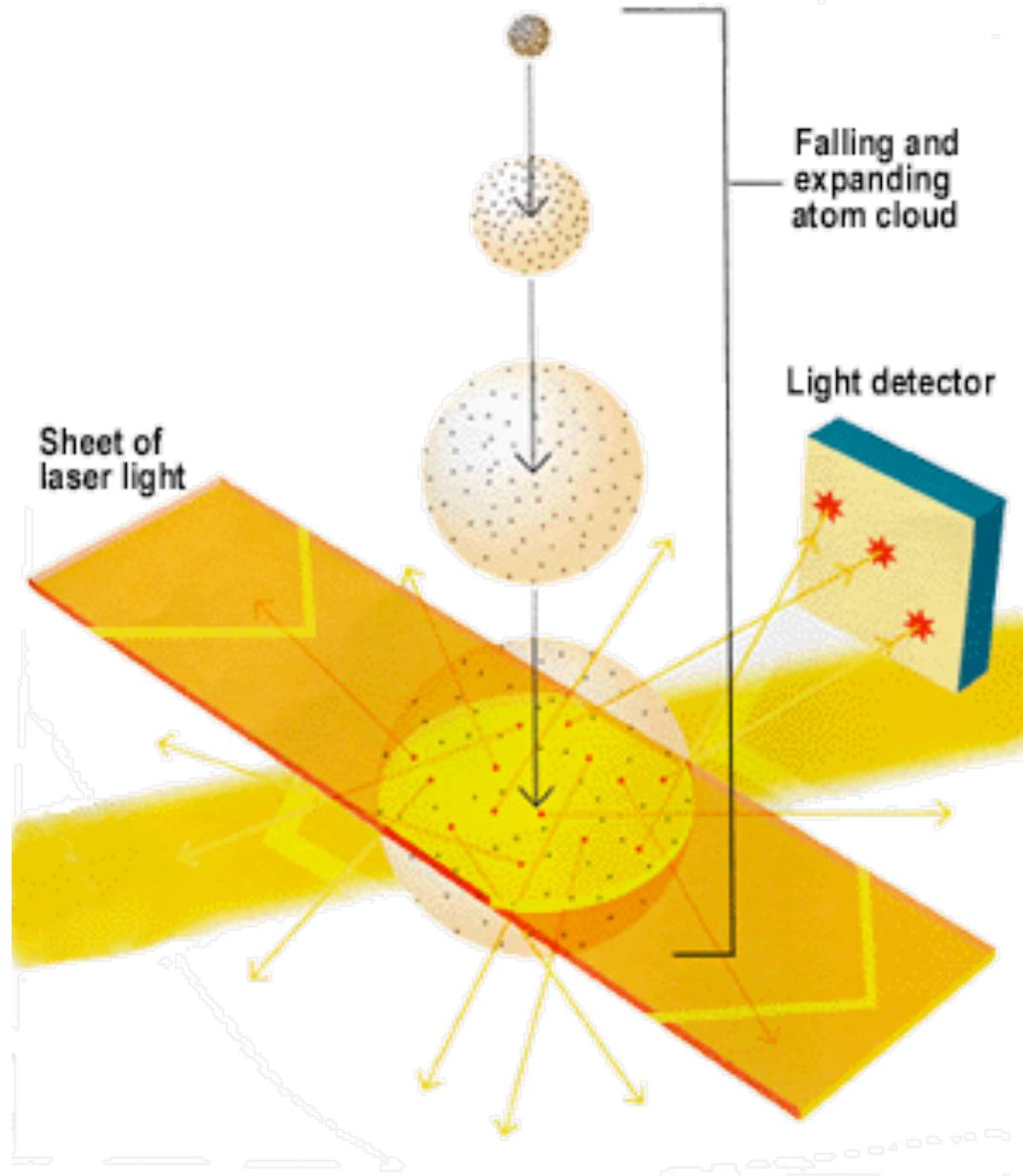
Comment mesure-t-on de telles températures ?

Quelle est la motivation ? Qu'apprend-on ?

Comment refroidir un gaz à ces températures extrêmes ?

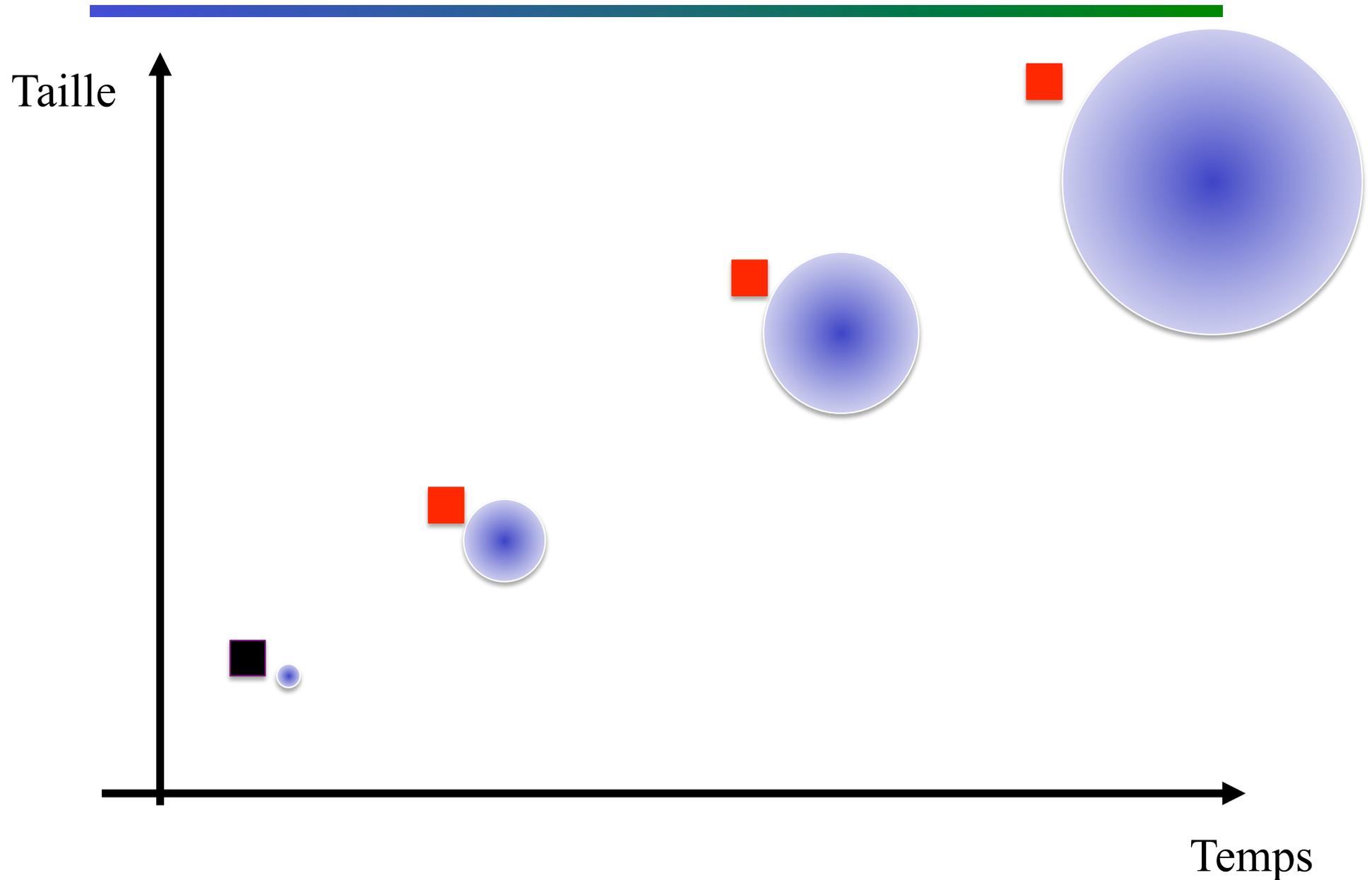


Mesurer la température : la méthode du temps de vol

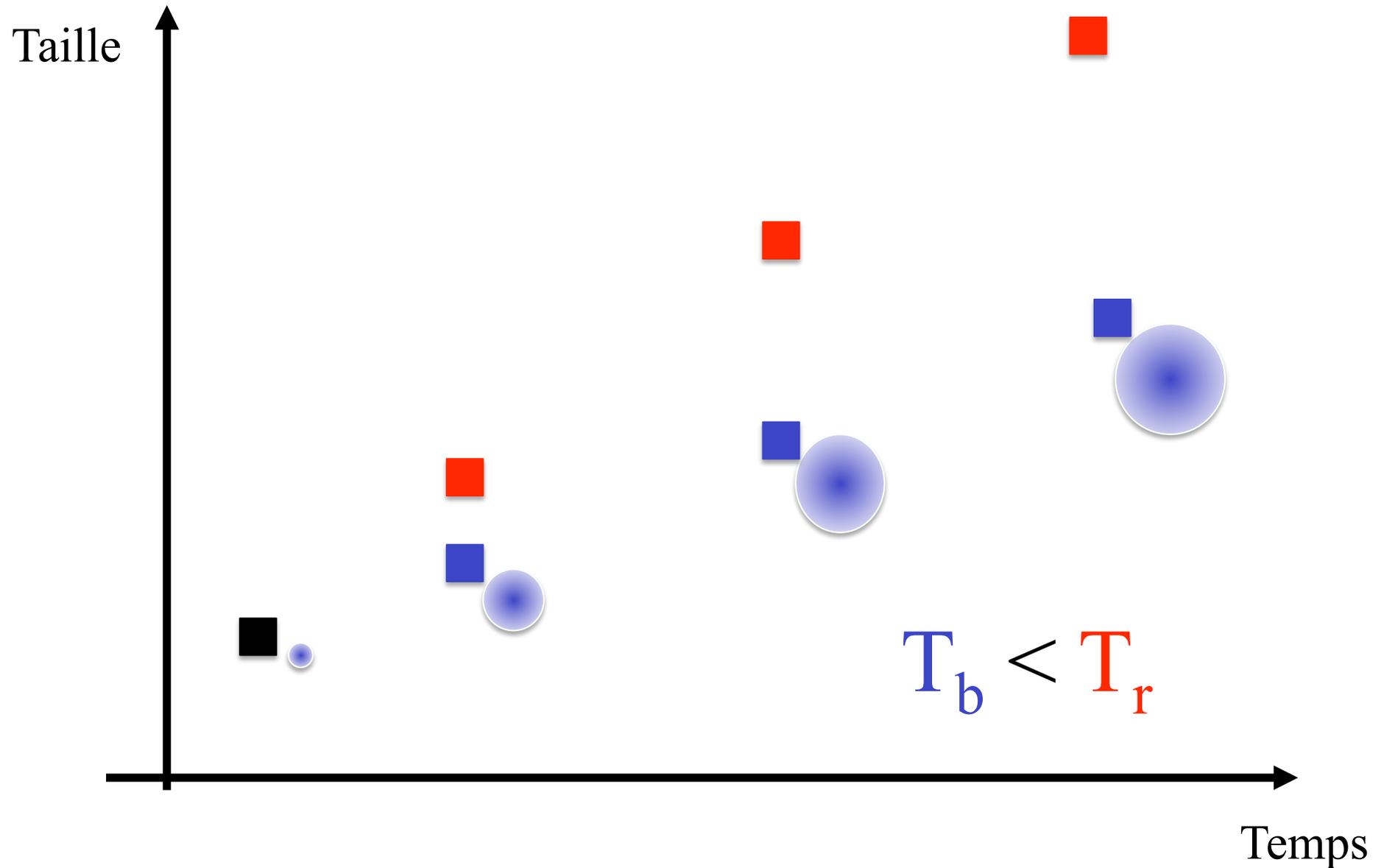


Le nuage atomique tombe sous l'effet de la gravité et rentre en expansion du fait des vitesses individuelles des atomes

Mesurer la température : la méthode du temps de vol



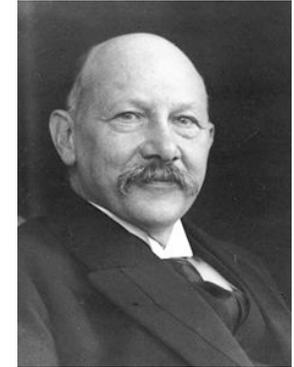
Mesurer la température : la méthode du temps de vol



Les motivations

Les basses températures : une histoire émaillée de surprises

1908 (Leiden): H. K. Onnes liquéfie
le gaz ^4He en dessous de 4.2 K.



1912 par le même groupe:
"On peut obtenir des conducteurs électriques de résistance nulle"

1927 W. H. Keesom découvre que
l'hélium liquide existe sous deux
formes différentes



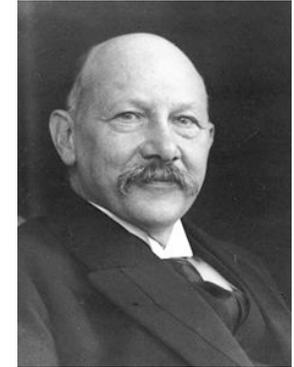
1927-1938 : en dessous de 2.17 K comportement
étrange disparition de la viscosité ?!!!, le liquide
ne bout plus ?!!!!

J. F. Allen, A. D. Misener and P. Kapitza



Les basses températures : une histoire émaillée de surprises

1908 (Leiden): H. K. Onnes liquéfie
le gaz ^4He en dessous de 4.2 K.



1912 par le même groupe:

"On peut obtenir des conducteurs électriques de résistance nulle"

SUPRACONDUCTIVITE

1927 W. H. Keesom découvre que
l'hélium liquide existe sous deux
formes différentes



SUPERFLUIDITE

1927-1938 : en dessous de 2.17 K comportement
étrange disparition de la viscosité ?!!!, le liquide
ne bout plus ?!?!?

J. F. Allen, A. D. Misener and P. Kapitza

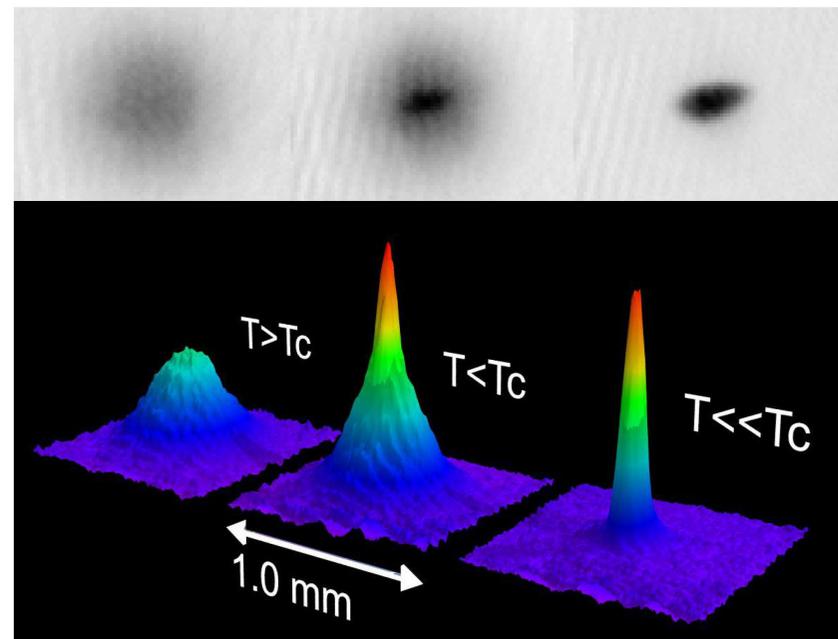


La mécanique quantique à l'échelle macroscopique

La **supraconductivité** et la **superfluidité** sont des manifestations spectaculaires de la mécanique quantique qui émergent à une échelle macroscopique

Autres exemples : les étoiles à neutrons,

les condensats de Bose Einstein



Einstein : « Il a soulevé une partie du voile »

Dualité onde-corpuscule (mécanique quantique)



Louis de Broglie (Nobel 1929)

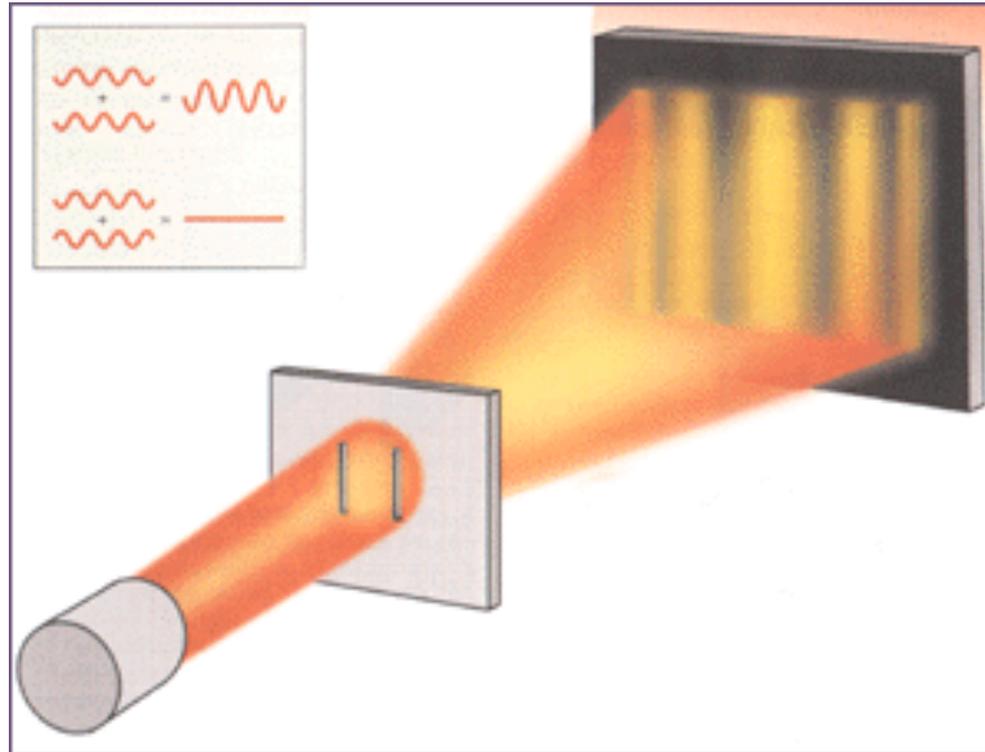
Exemple lumière : longueur d'onde λ (couleur)
corpuscule = photons

Pour une particule matérielle

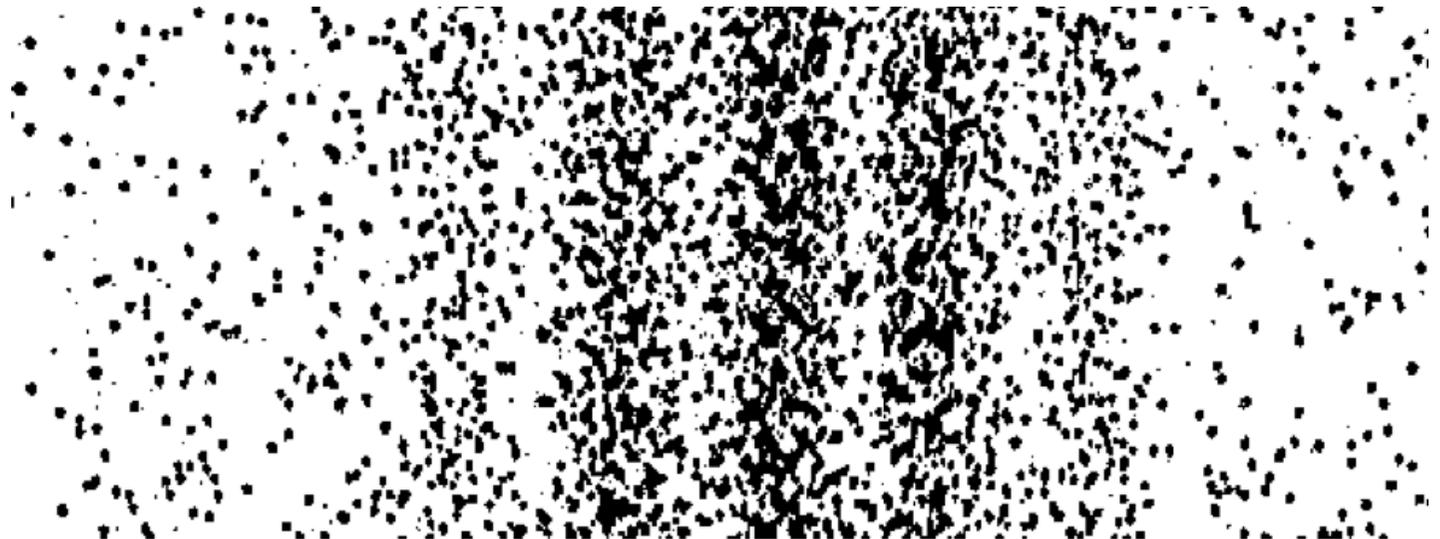
$$\lambda_{\text{dB}} = \frac{h}{p} \quad v \ll c \quad \approx \frac{h}{mv}$$

L'expérience des fentes d'Young

Avec de la lumière

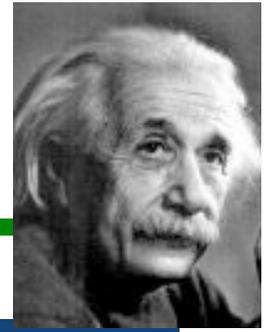


Avec des atomes





La prévision étonnante d'Einstein inspirée par les travaux de S. Bose



Dans un gaz il y a deux échelles de longueur :

la distance entre particules d

la longueur d'onde de de Broglie λ

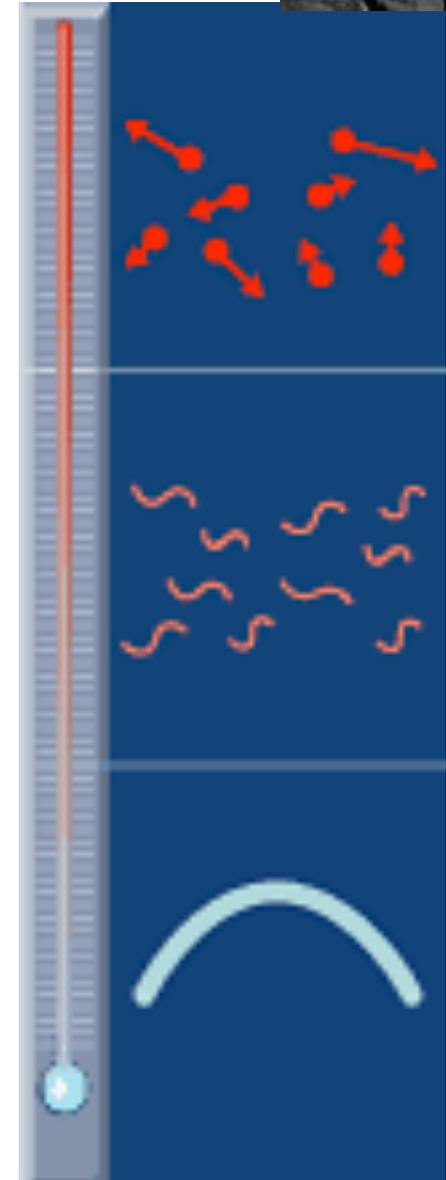
A température ordinaire : $\lambda \ll d$ i.e. comportement
« corpusculaire ».

Si T diminue, λ augmente

Einstein (1924) prévoit une transition de phase :
condensation de Bose Einstein quand $\lambda = d$

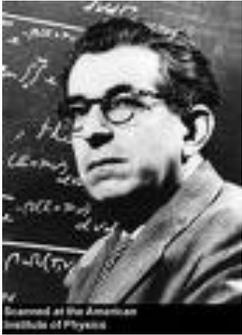
Einstein à Ehrenfest:

*"C'est une belle théorie, mais contient-elle une
vérité ?"*



Une intense activité théorique se développe pour essayer de comprendre les propriétés superfluides De l'hélium

1938

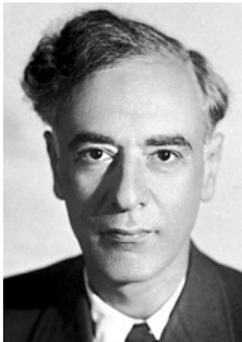


F. London propose d'établir un lien entre la superfluidité et la condensation de Bose Einstein



L. Tisza propose une approche phénoménologique à deux fluides

1941



Le physicien russe L. Landau établit un lien entre les propriétés superfluides et les excitations collectives du liquide.

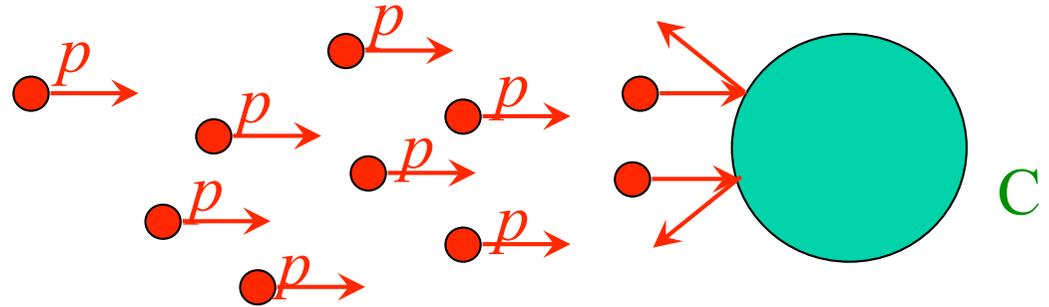
Le refroidissement laser

Forces exercées par la lumière sur les atomes

Un exemple simple

Cible C bombardée par des projectiles p venant tous de la même direction

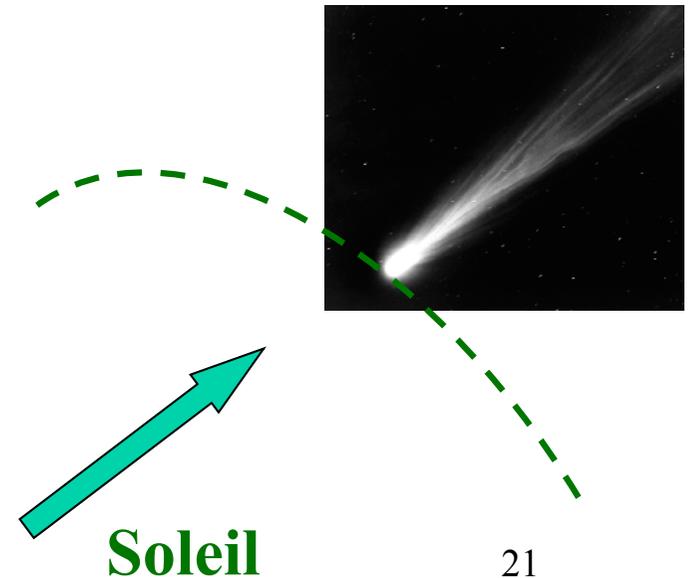
Par suite du transfert de quantité de mouvement des projectiles p à la cible C, la cible C est poussée



Atome dans un faisceau lumineux

Situation analogue, les photons incidents diffusés par l'atome C jouant le rôle des projectiles p

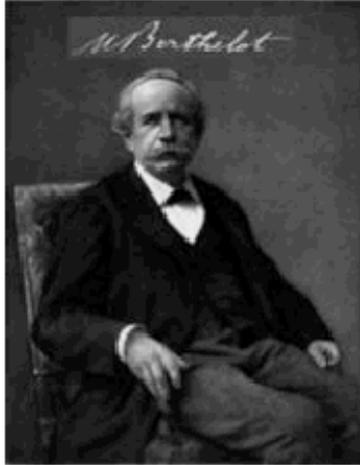
Explication de la queue des comètes



Refroidir un gaz avec des lasers : les dates clés

- 1975** T. W. Hänsch, A. Schalow : proposition refroidissement laser d'atomes neutres
W. Wineland, H. Dehmelt : proposition refroidissement laser d'ions
- 1976** W. C. Stwalley et L. H. Nosanow : l'hydrogène polarisé qui reste gazeux
- 1984** W. Phillips : Ralentissement d'un jet d'atomes
- 1985** S. Chu : Mélasse optique
- 1987** D. Pritchard & S. Chu: premier piège magnéto-optique (idée J. Dalibard)
- 1987** W. Phillips: Observation de température « anormalement basse »
- 1988** C. Cohen-Tannoudji : Refroidissement sub-recul
- 1989** C. Cohen-Tannoudji & J. Dalibard : Explication des mécanismes en jeu

Il y a cent ans l'existence des atomes était controversée ...

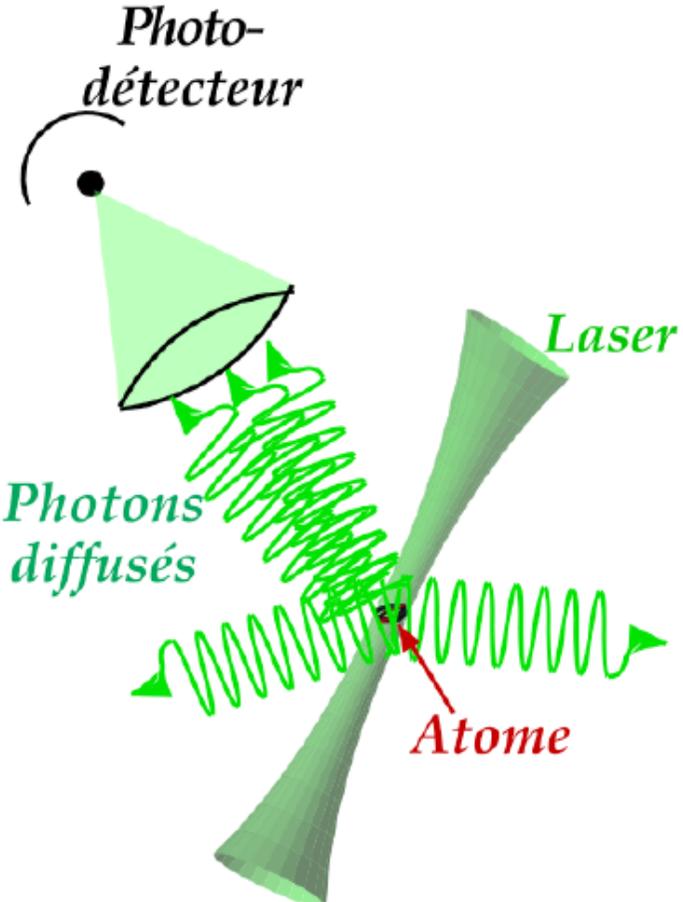


Marcellin Berthelot, chimiste,
professeur au collège de France,
ne croyait pas aux atomes ...

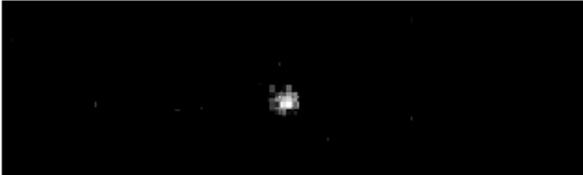


Boltzmann, fondateur de la
thermodynamique statistique
était, lui, un atomiste convaincu.

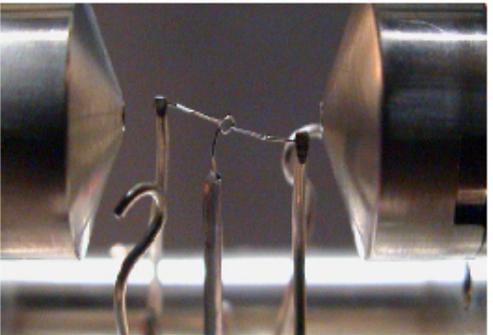
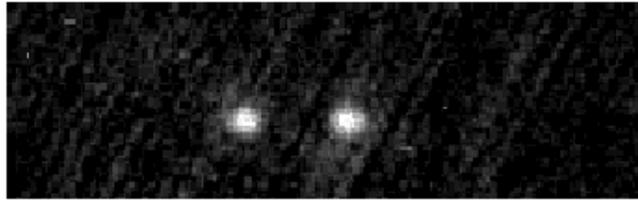
« Voir » les atomes



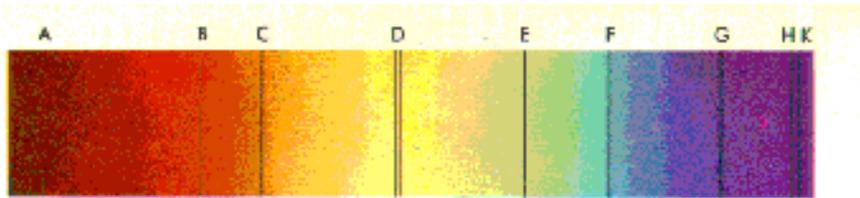
1 atome



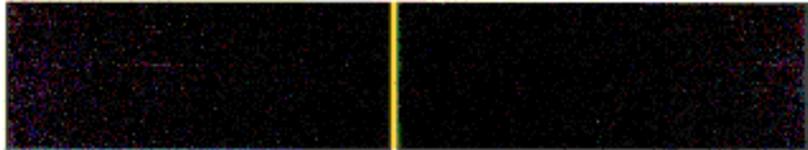
2 atomes



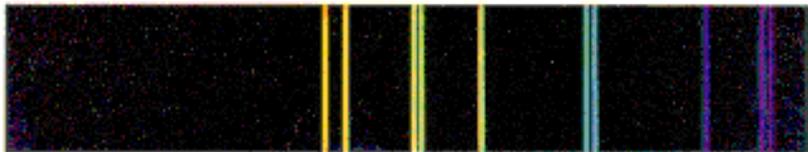
L'histoire de la mécanique quantique tire en partie son origine des études spectrales faites au XVIII et XIX ième siècle



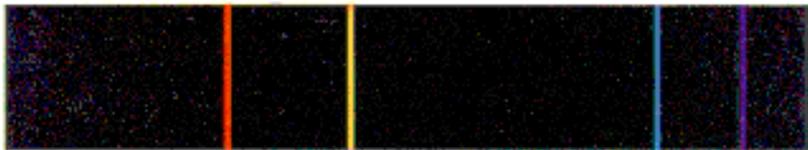
Spectre du soleil



Sodium



Mercure

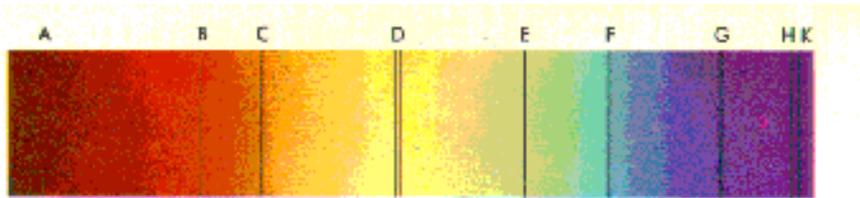


Lithium

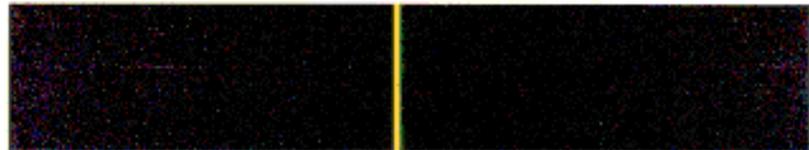


Hydrogène

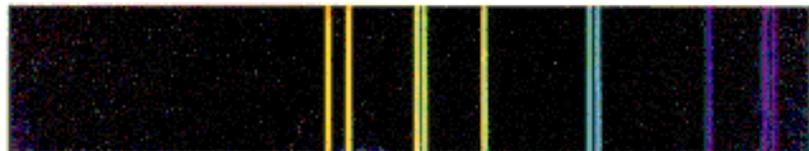
L'histoire de la mécanique quantique tire en partie son origine des études spectrales faites au XVIII et XIX ième siècle



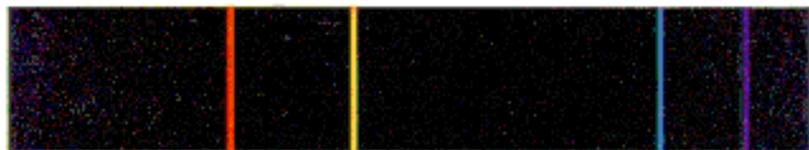
Spectre du soleil



Sodium



Mercure



Lithium



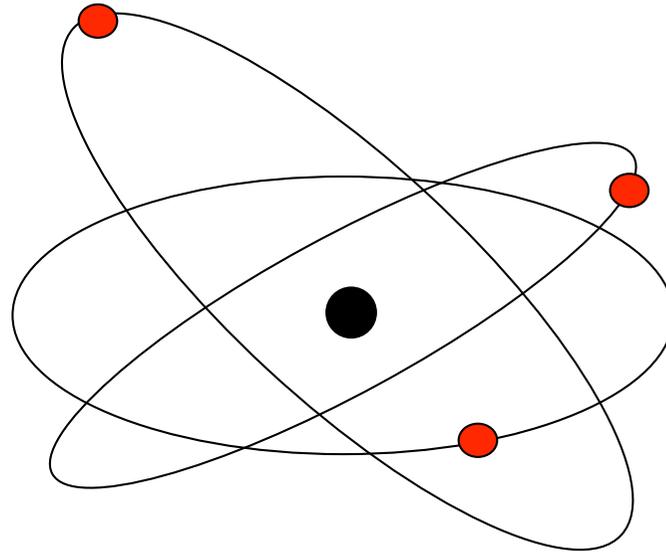
Hydrogène

Ex : lampes au sodium
(éclairage orangé des lampes de ville)



La conception de l'atome après les expériences de Rutherford

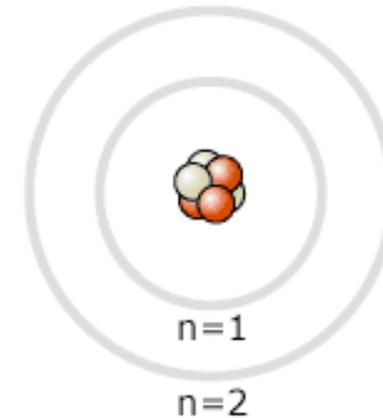
Bohr souligne le problème de l'instabilité du modèle planétaire proposé par Rutherford



Instabilité dynamique car les électrons se repoussent

Le modèle de Niels Bohr (1913)

Il n'existe que des orbites discrètes
(notion d'état stationnaire)



Le passage d'une orbite à une autre se fait
grâce à l'émission ou l'absorption d'un grain de
lumière, le **photon**

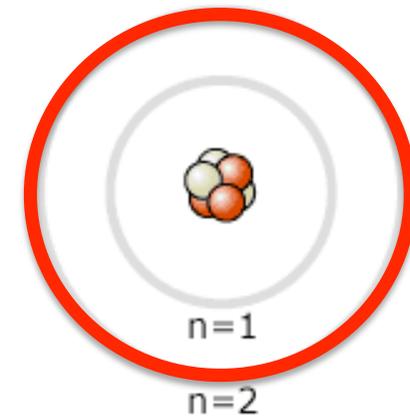
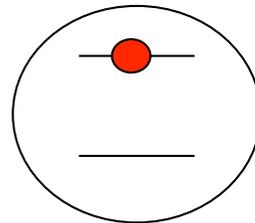
La théorie de Bohr propose une image
simple et convaincante des données spectrales

L'atome à deux niveaux

Les niveaux excités sont instables

Ex. : Rubidium 87 27 ns dans l'état excité

Bilan en énergie et quantité de mouvement

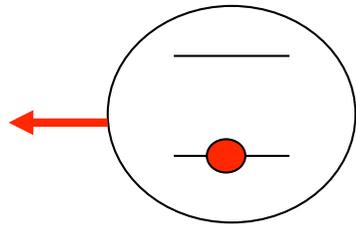


L'atome à deux niveaux

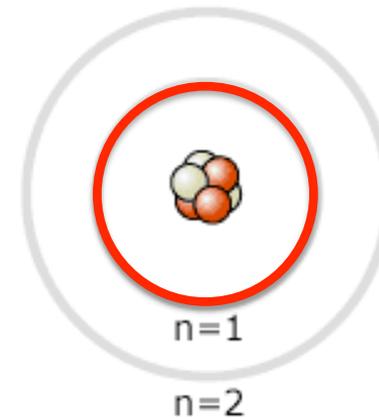
Les niveaux excités sont instables

Ex. : Rubidium 87 27 ns dans l'état excité

Bilan en énergie et quantité de mouvement

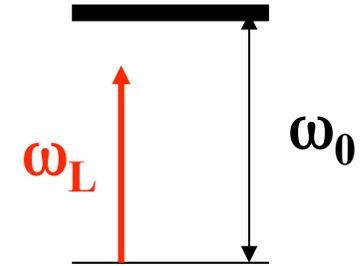
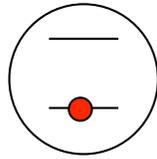


L'atome recule

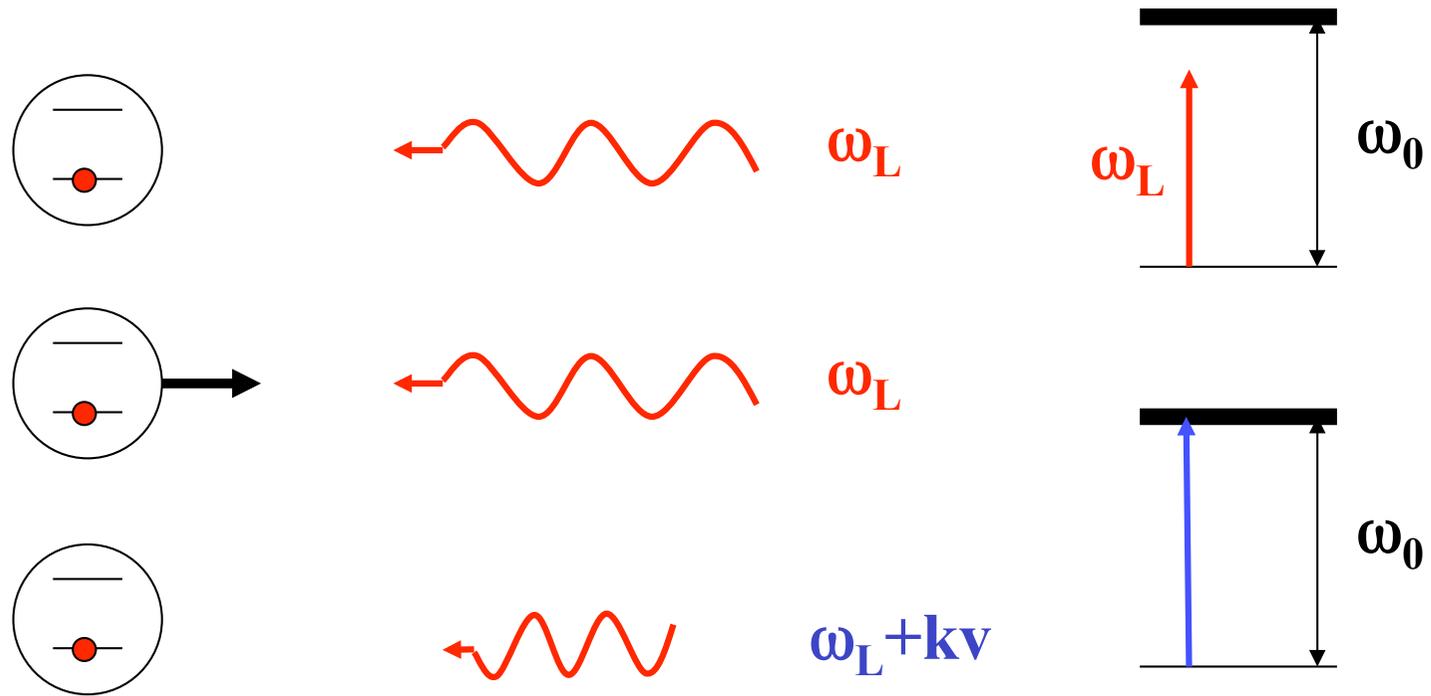


Rubidium, $v_{\text{rec}} = 6 \text{ mm / s}$

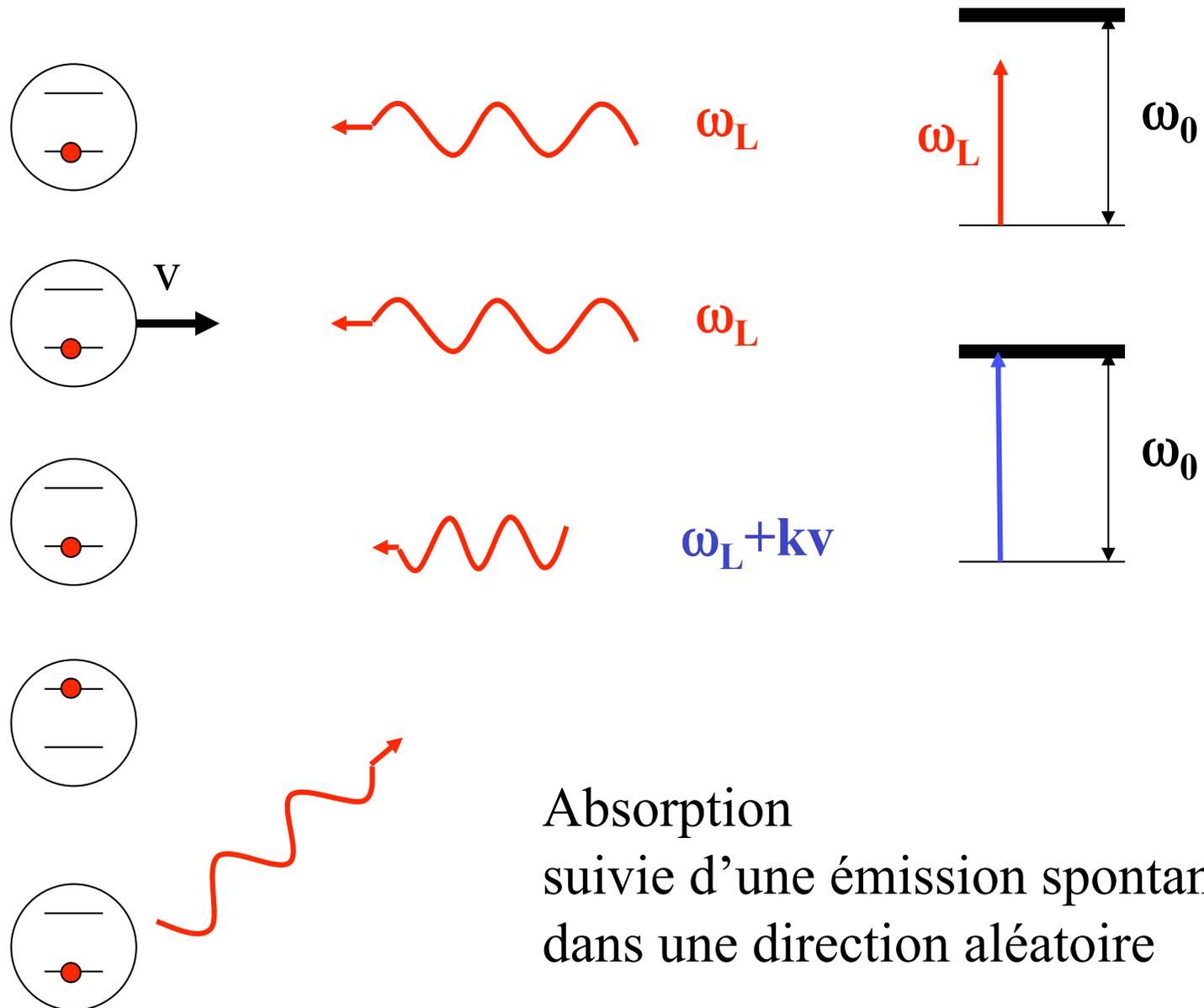
Un atome immobile en présence de lumière laser



Un atome en mouvement en présence de lumière laser : effet Doppler



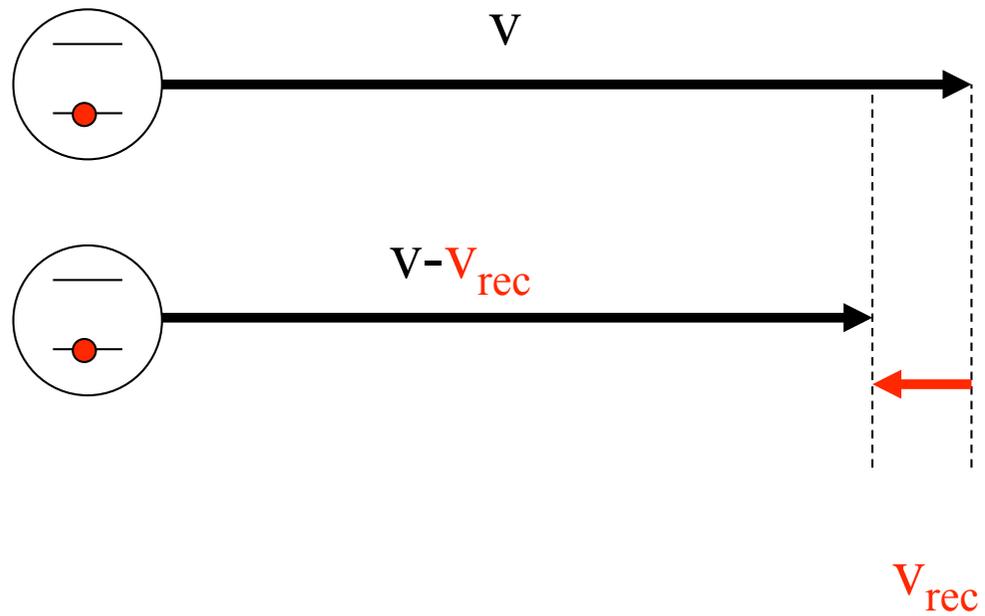
Un atome en présence de lumière laser



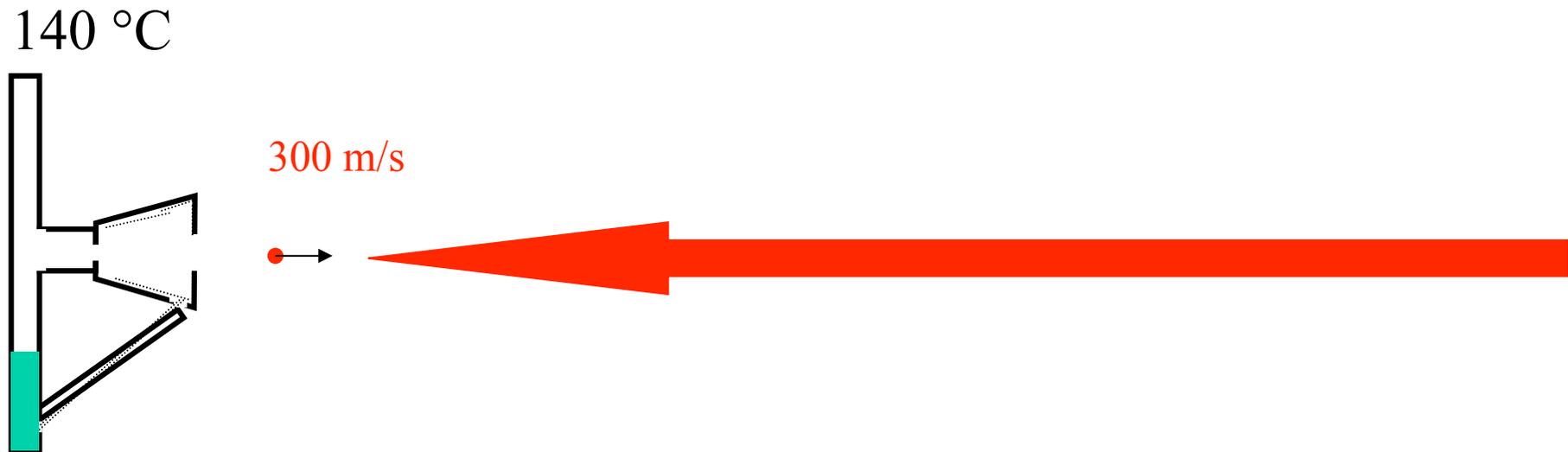
Absorption
suivie d'une émission spontanée
dans une direction aléatoire

Bilan sur la vitesse de l'atome

D'un cycle absorption – émission spontanée



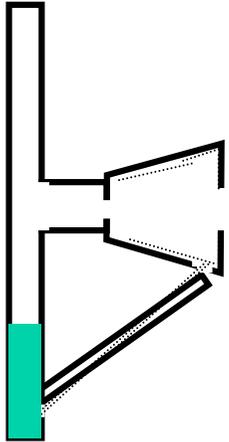
Le principe du ralentisseur à effet Zeeman



Le principe du ralentisseur à effet Zeeman (idée : W. Phillips)



140 °C

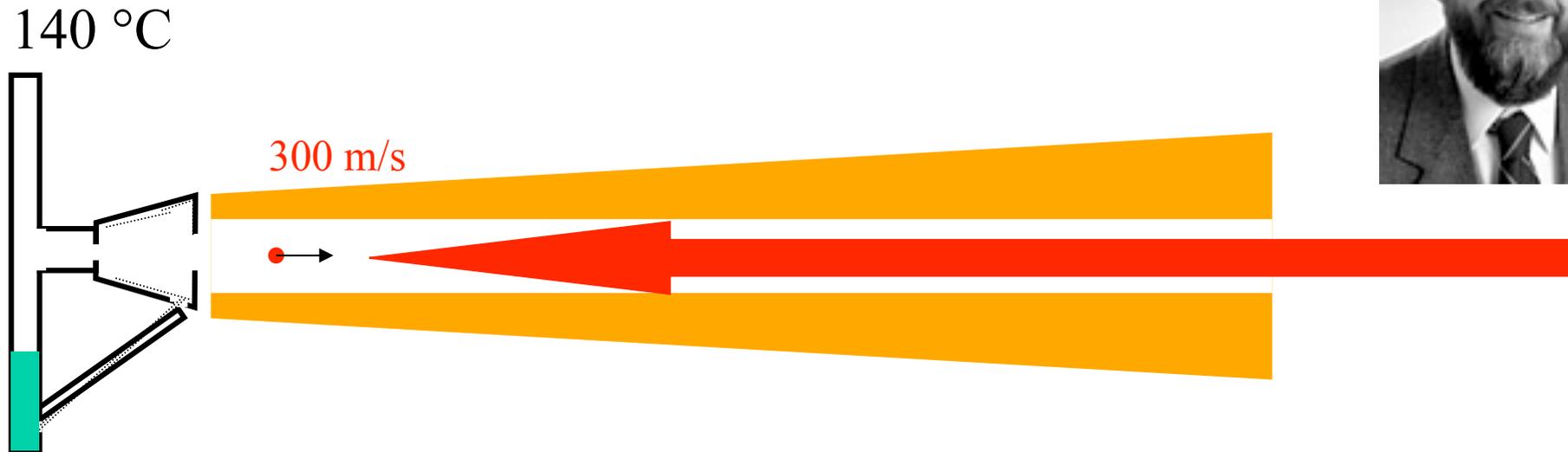


300 m/s



Effet Doppler compensé par des champs magnétiques

Le principe du ralentisseur à effet Zeeman (idée : W. Phillips)

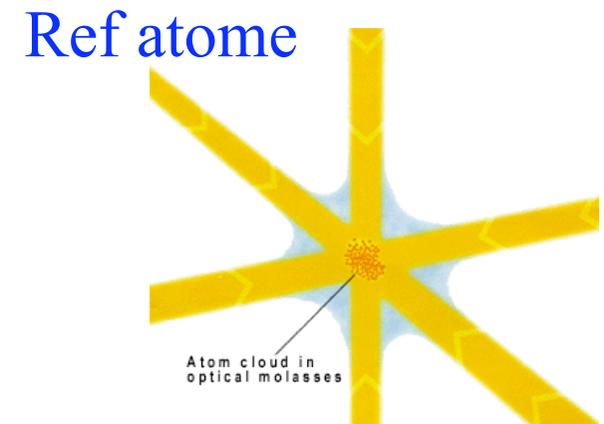
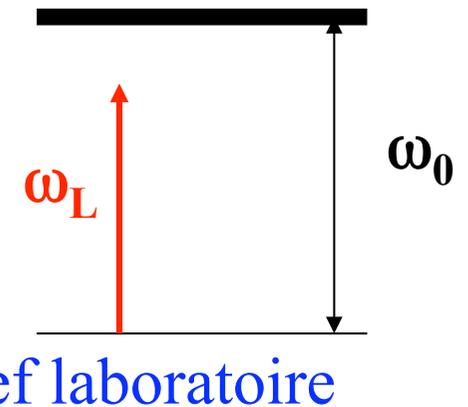
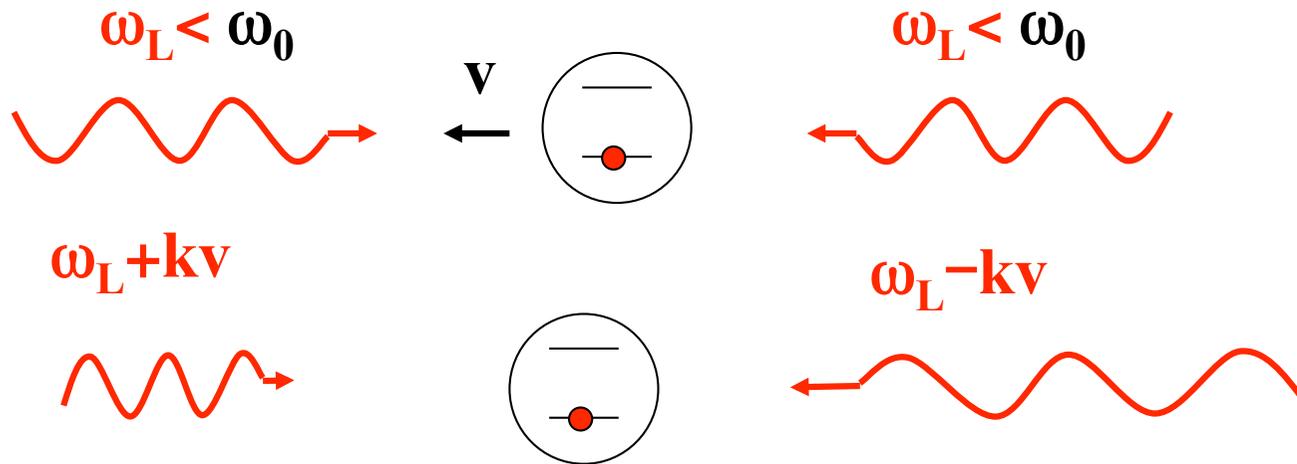


$$300 \text{ m/s} = 50000 \times 6 \text{ mm/s}$$

Les atomes sont arrêtés après 1 mètre d'interaction avec le laser
(décélérations de l'ordre de 10^5 g)

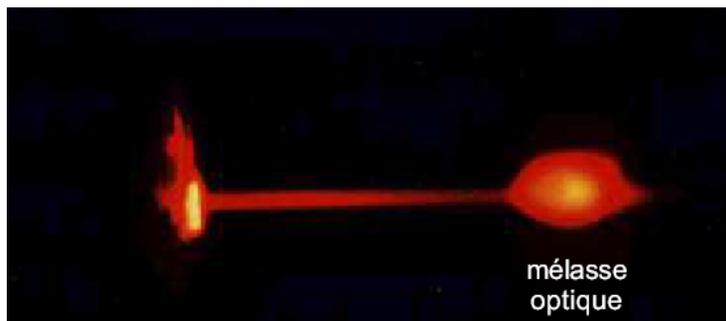
Effet Doppler compensé par des champs magnétiques

Principe du refroidissement laser



Absorption du photon $\omega_L + kv$, et réémission équiprobable dans deux directions opposées.

Bilan : force de friction



S. Chu

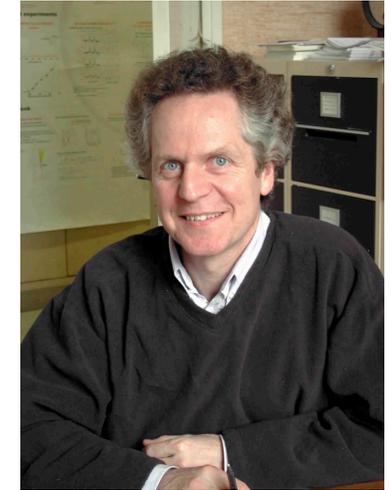
Explication des températures « anormalement basses » observées

C. Cohen-Tannoudji

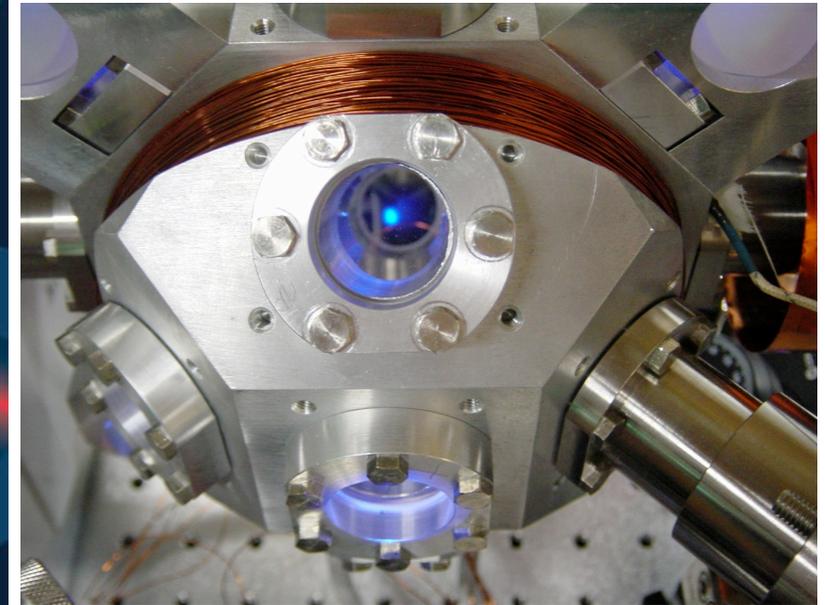
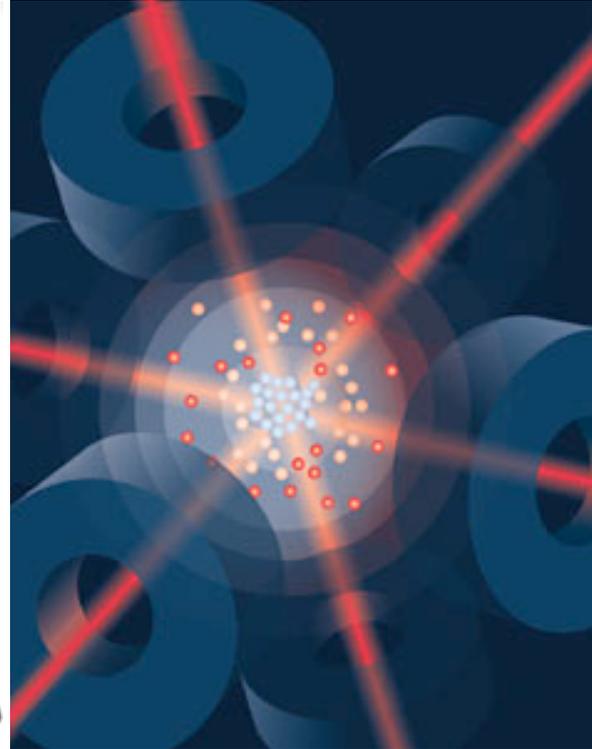


Piégeage avec en plus des champs magnétiques

Le piège magnéto-optique



J. Dalibard



Expériences réalisées dans des cellules sous ultravide.

Refroidissement d'atomes par laser

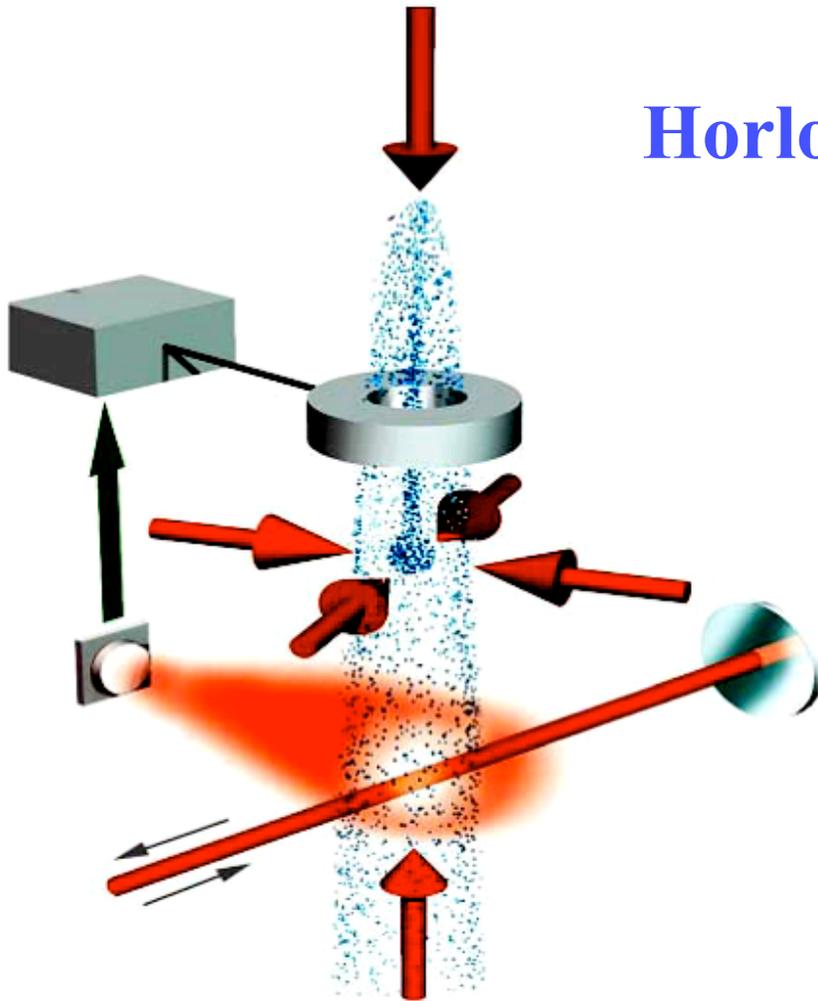


**Prix Nobel de physique 1997 attribué à
W. Phillips, S. Chu et C. Cohen-Tannoudji**

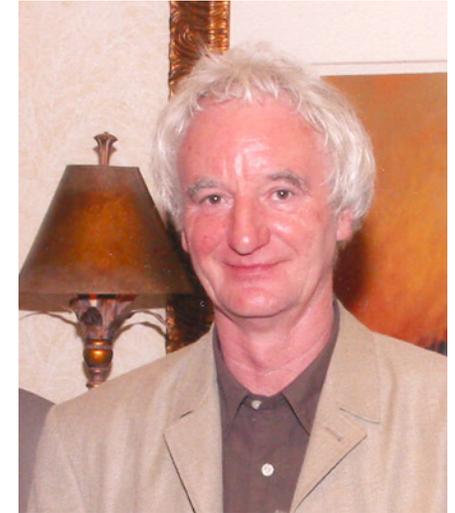


"for development of methods to cool and trap atoms
with laser light"

Horloges atomiques



Christophe
Salomon



André
Clairon

Stabilité de 10^{-16} : erreur inférieure à 1 seconde après 300 millions d'années

Recherche d'une variation éventuelle des constantes fondamentales

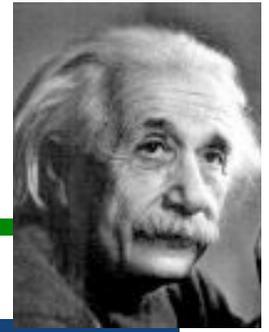
$$\nu_{Al^+} / \nu_{Hg^+} = 1.052871833148990438(55)$$

$$\dot{\alpha} / \alpha = (-1.6 \pm 2.3) \times 10^{-17} / \text{year}$$

La condensation de Bose Einstein



La prévision étonnante d'Einstein inspirée par les travaux de S. Bose



Dans un gaz il y a deux échelles de longueur :

la distance entre particules d

la longueur d'onde de de Broglie λ

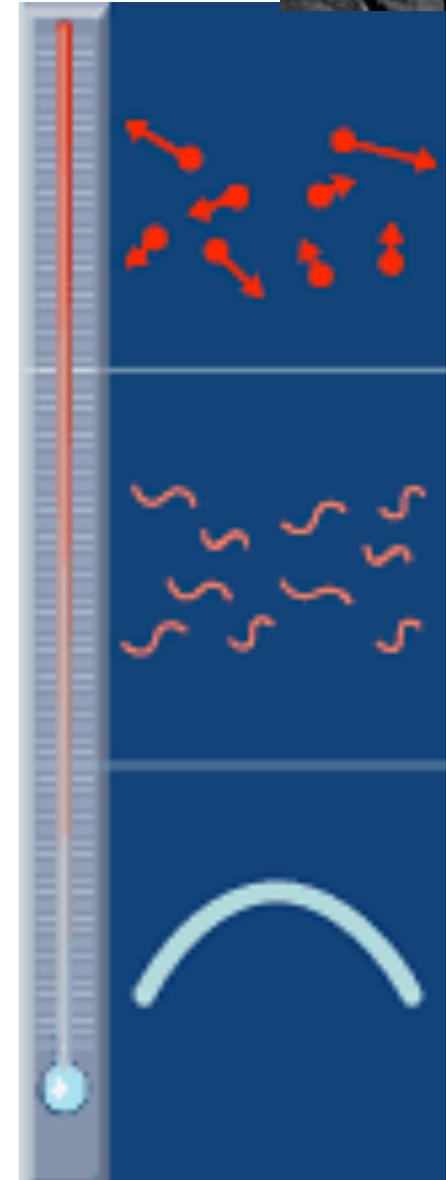
A température ordinaire : $\lambda \ll d$ i.e. comportement
« corpusculaire ».

Si T diminue, λ augmente

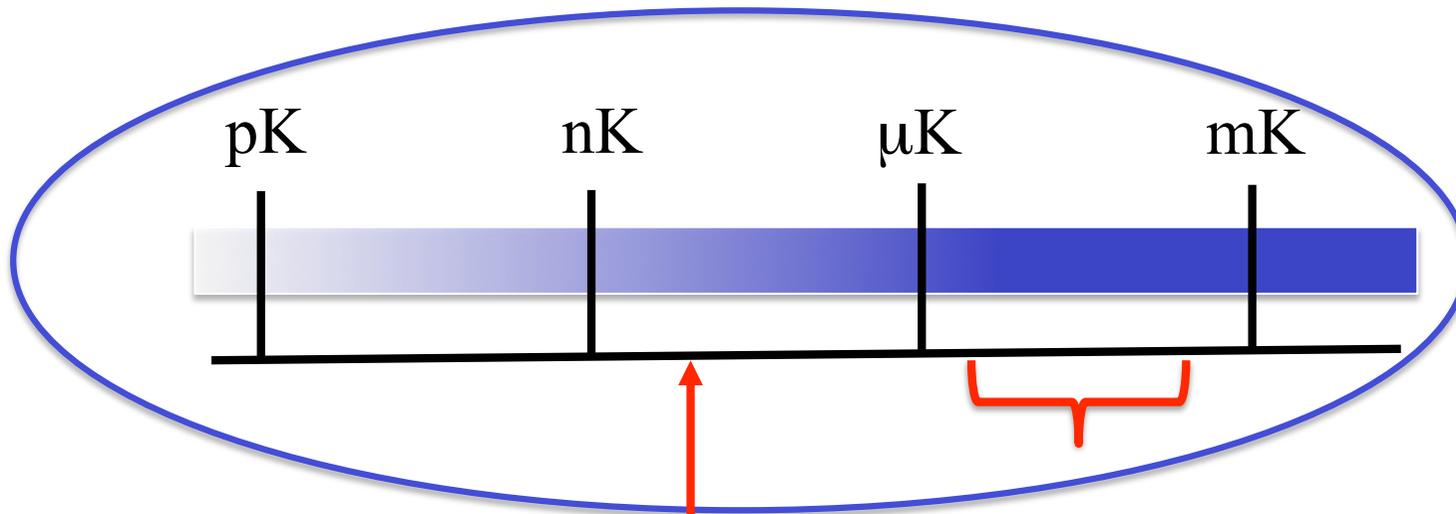
Einstein (1924) prévoit une transition de phase :
condensation de Bose Einstein quand $\lambda = d$

Einstein à Ehrenfest:

*"C'est une belle théorie, mais contient-elle une
vérité ?"*



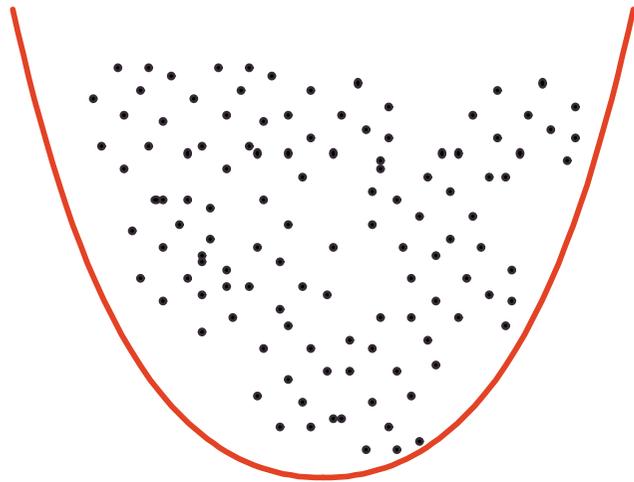
Echelle de température



Domaine du
refroidissement laser

Ordre de grandeur de la température
de condensation de Bose Einstein ...

Refroidissement par évaporation



$$N \longrightarrow N/100$$

$$T \longrightarrow T/1000$$



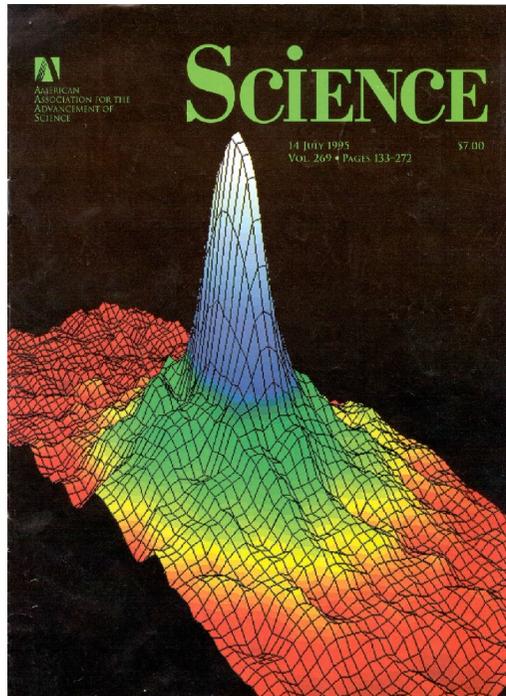
$$d \sim 100 \lambda$$

$$d \sim \lambda$$

Durée : 1 à 100 secondes, $N_f = 10^5$ à 10^7 atomes, $T_f = 0.2$ à $2 \mu\text{K}$

Condensation de Bose Einstein

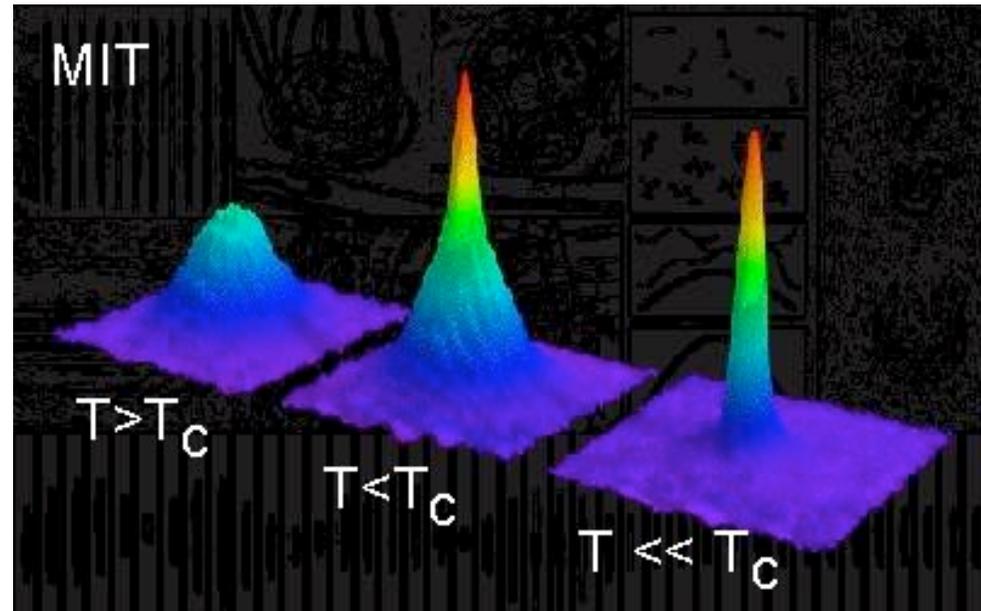
Taille $\sim 100 \mu\text{m}$!



Rubidium

C. Wieman et E. Cornell

Boulder, Colorado



Sodium

W. Ketterle

MIT

Condensation de Bose Einstein



**Prix Nobel de physique 2001 attribué à
E. Cornell, W. Ketterle et C. Wieman**

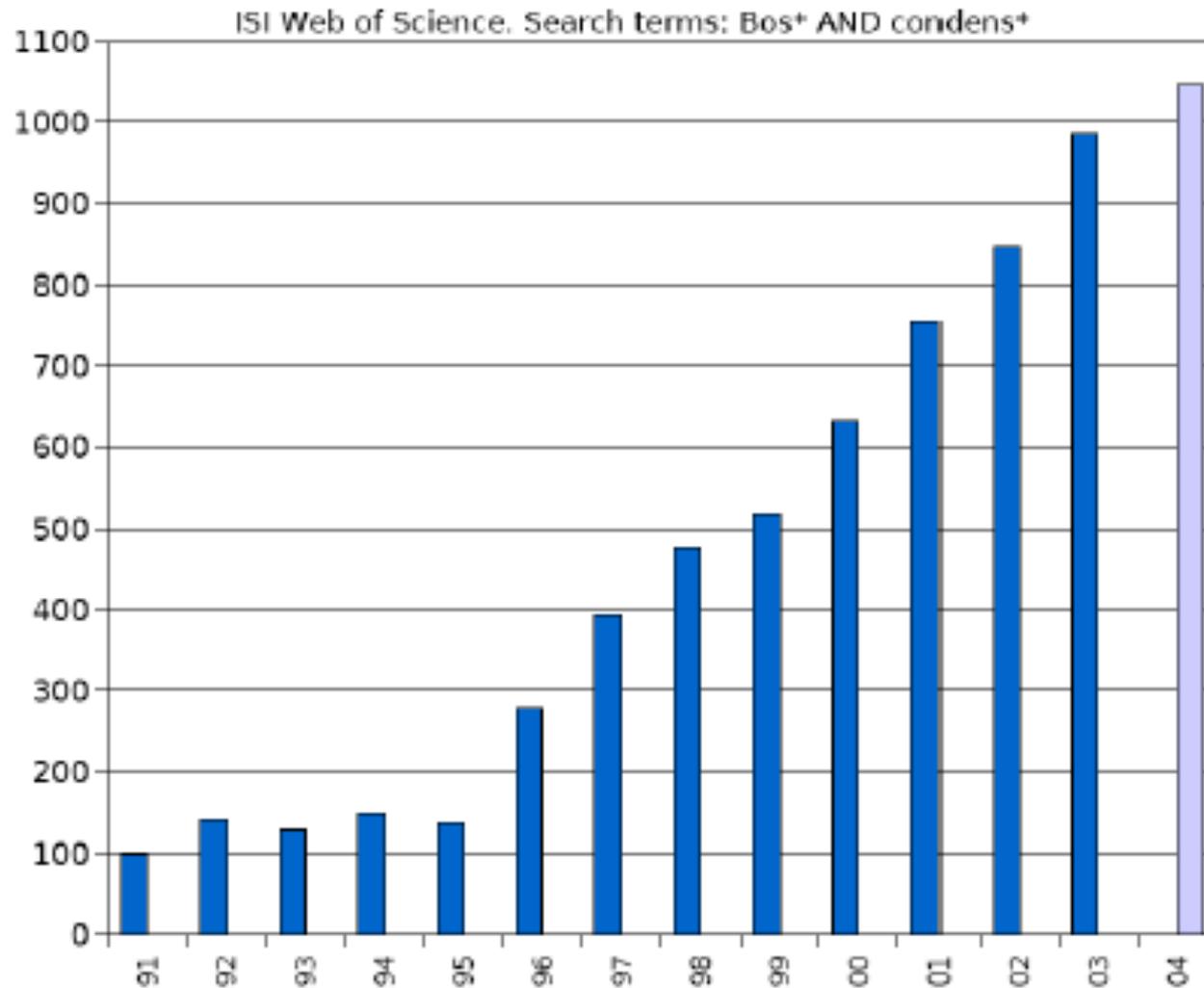


"for the achievement of Bose-Einstein condensation **in dilute gases of alkali atoms**, and for early fundamental studies of the properties of the condensates"

Un domaine en pleine expansion

Les atomes qui ont été condensés : H, He*, Li, Na, K, Rb, Cs, Yb, Cr, Ca...

Papers on BEC, years 1991-2004

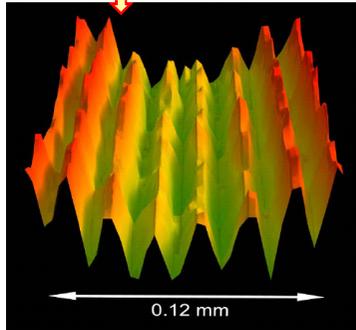


Exemple de propriétés quantiques des ondes de matière macroscopiques

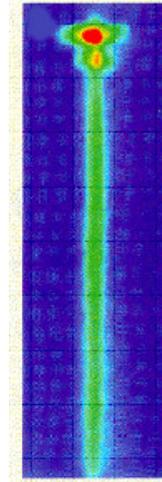
Cohérence

Interférences
entre 2 condensats

MIT



Munich



Lasers à atomes

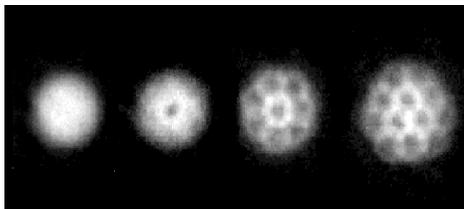
Faisceau cohérent d'ondes de de Broglie atomiques extraites d'un condensat de Bose Einstein

guidés optiquement



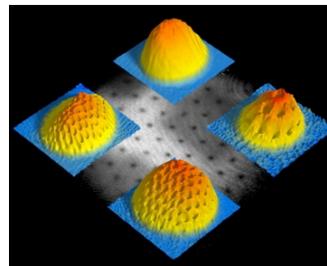
Orsay
Toulouse

Superfluidité

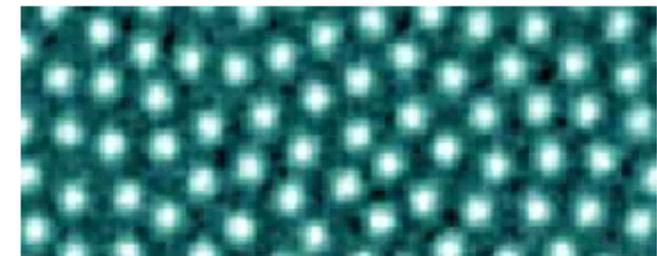


ENS

Réseau de tourbillons quantiques dans un condensat



MIT



Réseau analogue dans un supraconducteur⁴⁹

Simulateur quantique

Simulateur mécanique

L'horloge astronomique de Strasbourg

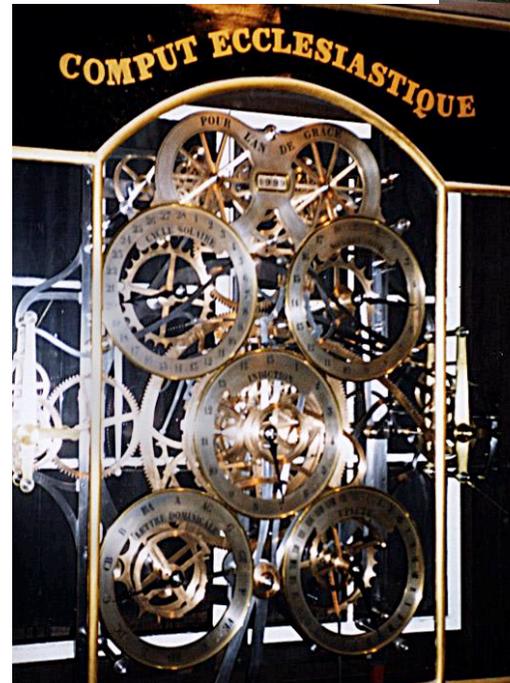
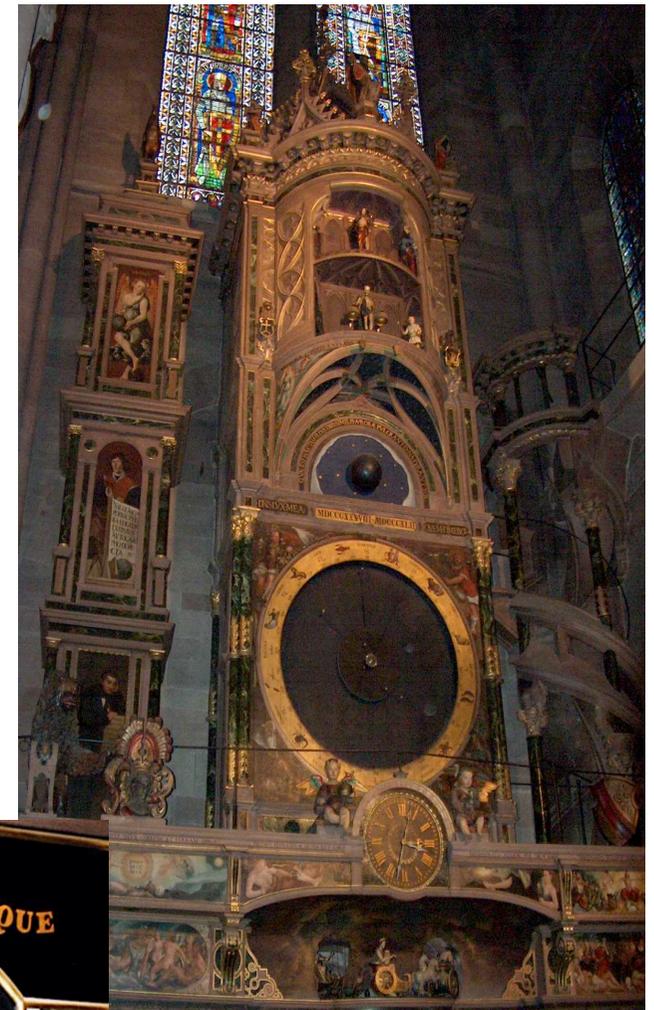
On identifie par l'observation les périodicités de passage des planètes



On les reproduit grâce à des engrenages



On peut rendre compte des conjonctions futures de planètes (**prédictif**)



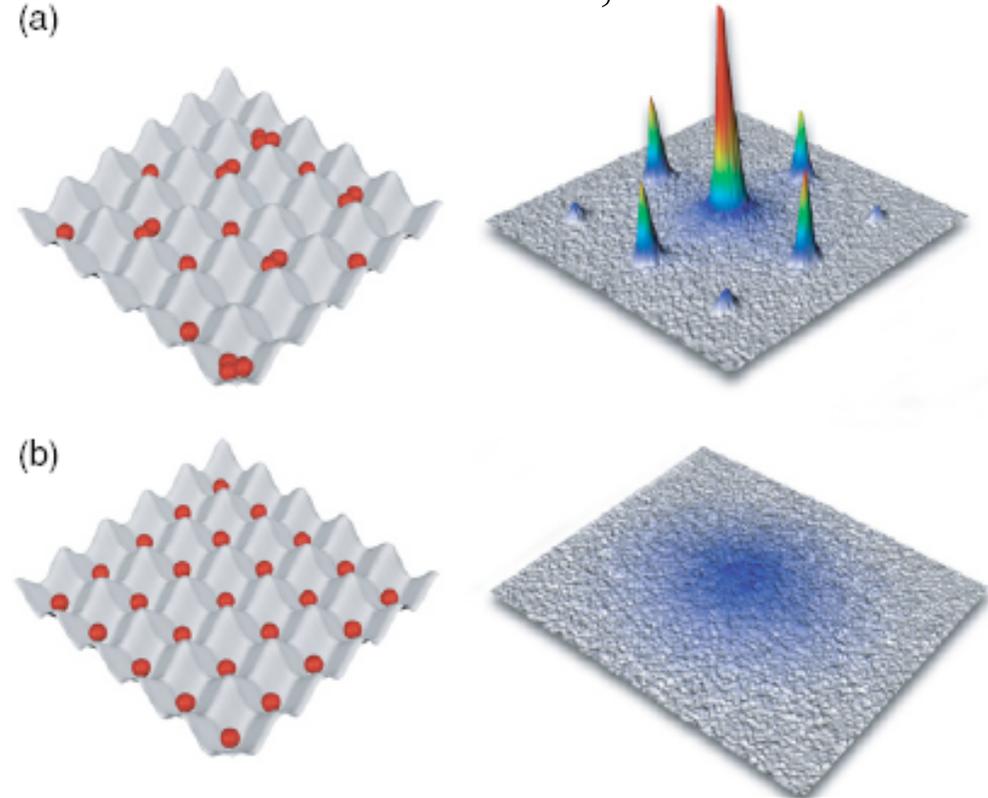
Transition métal-insolant

Phase superfluide : délocalisation des atomes sur tout le réseau avec une cohérence de phase globale.

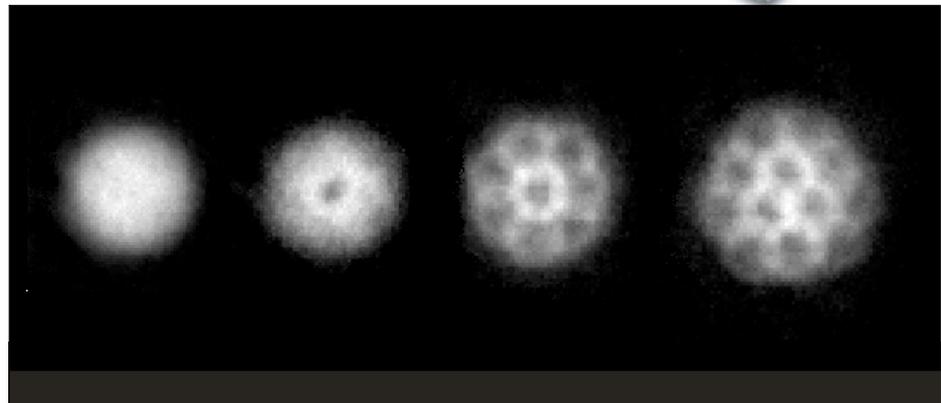
Phase isolante : les atomes sont localisés sur les sites du réseau, pas de cohérence de phase globale

Pour passer d'une phase à l'autre, on modifie la profondeur des puits de potentiel.

Nature **419**, 51 (2002)



Les tourbillons quantiques analogues à ceux des milieux supraconducteurs



Conclusion

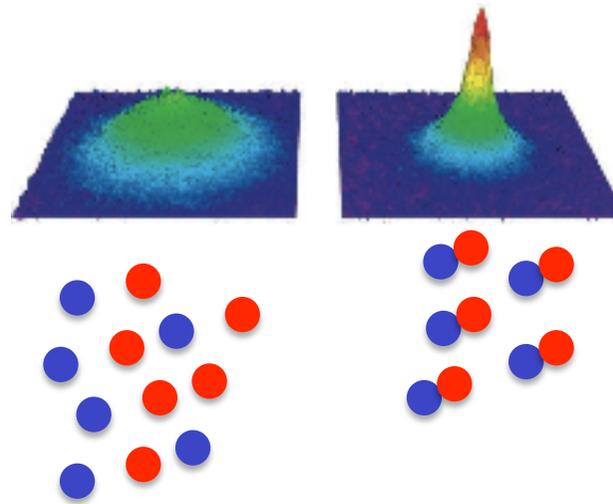
Mécanique quantique : échelle atomique

interaction avec les champs électromagnétiques

échelle mésoscopique

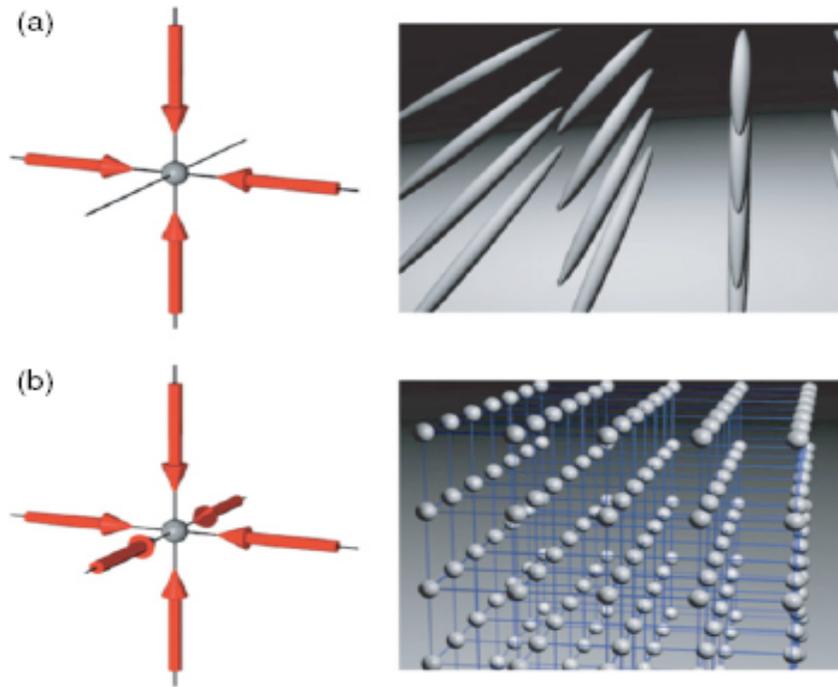
comportement quantique collectif

Réaction chimique contrôlée

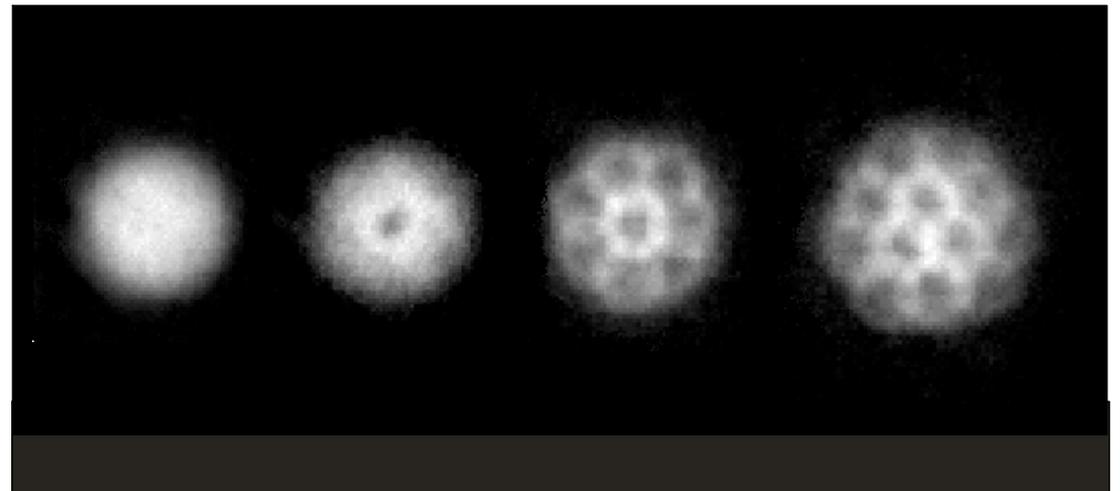


Possibilité de contrôler les interactions (attractives, répulsives)

Simuler des électrons dans un réseau périodique avec des atomes dans un cristal optique ...



Les tourbillons quantiques
analogues à ceux des
milieux supraconducteurs

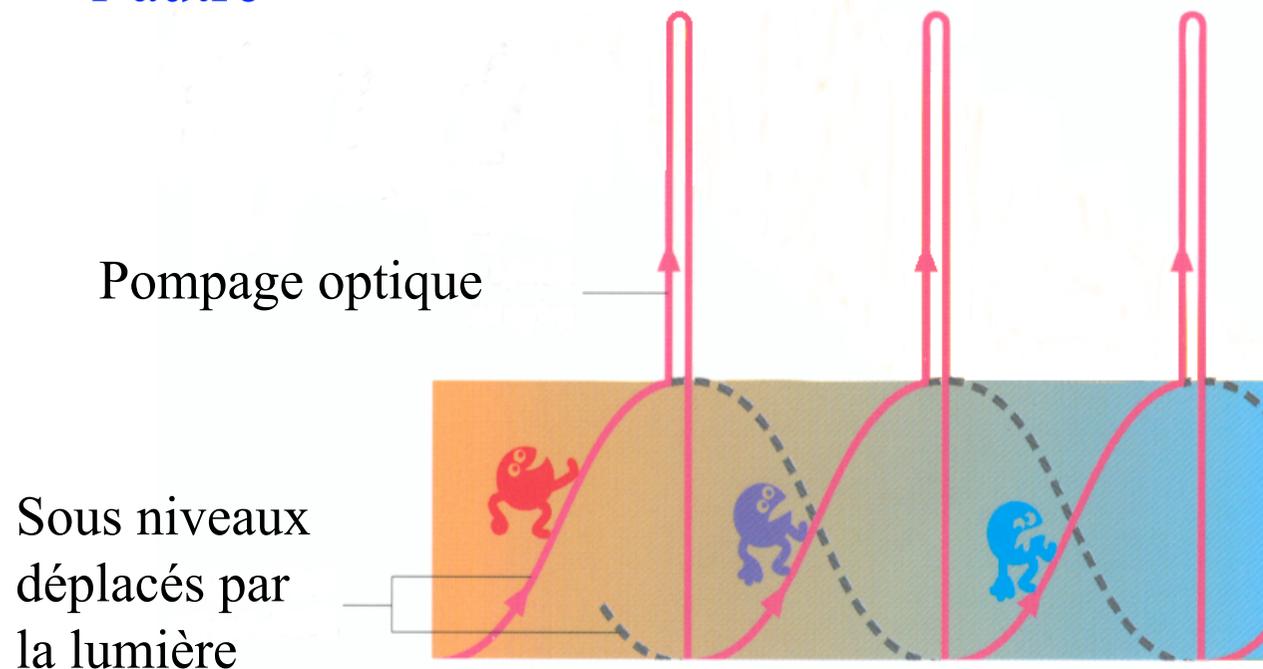


Refroidissement Sisyphe

J. Dalibard,
C. Cohen-Tannoudji

Effet combiné

- des déplacements lumineux des sous niveaux fondamentaux, proportionnels à l'intensité lumineuse et dépendant du sous niveau
- du pompage optique qui transfère les atomes d'un sous niveau à l'autre



Comme Sisyphe, l'atome gravit plus souvent des collines de potentiel qu'il n'en descend