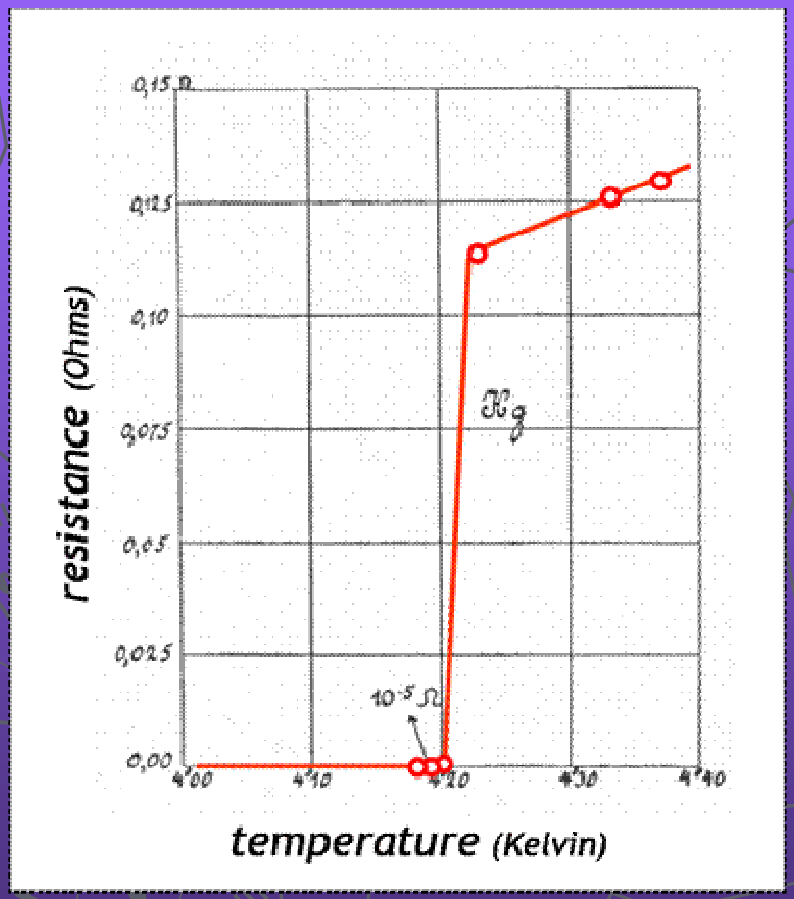
Lorsque les états de la matière deviennent supers : superfluidité et supraconductivité

Jean-Claude Soret

Groupe de Recherche en Matériaux, microélectronique, Acoustique, Nanotechnologies
GREMAN UMR 7347 CNRS

Les 100 ans de la supraconductivité



T_C = 4,15 K ⇔ - 269 C

1911 - Université de Leiden (Pays-Bas)

Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926)

Prix Nobel de Physique en1913

Gilles Holst

Cornelis Dorsman

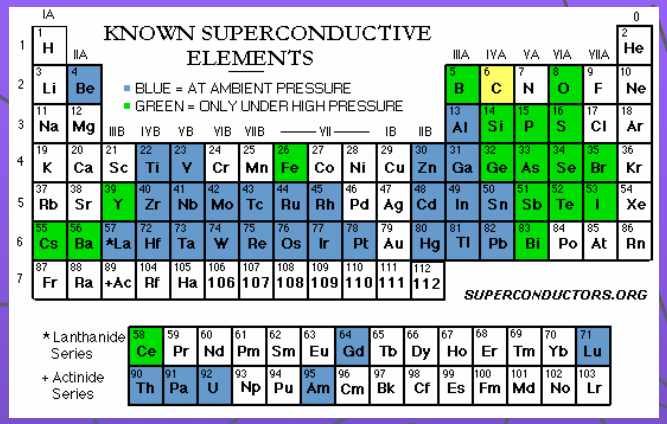
Gerit Flim

« Le mercure est passé dans un nouvel état, qui du fait de ses propriétés électriques extraordinaires pourrait être appelé ***état supraconducteur*** *»*

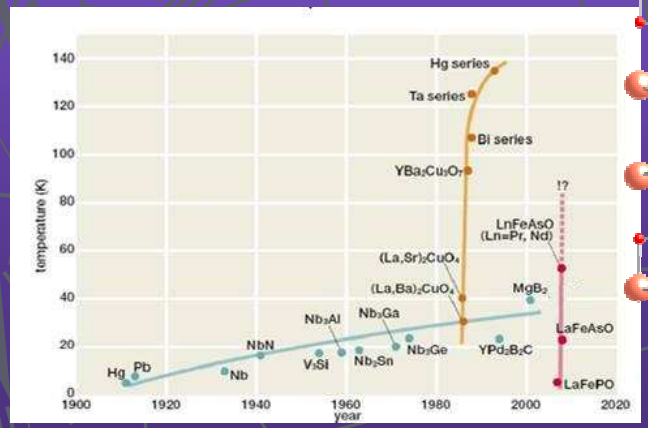
Matériaux supraconducteurs

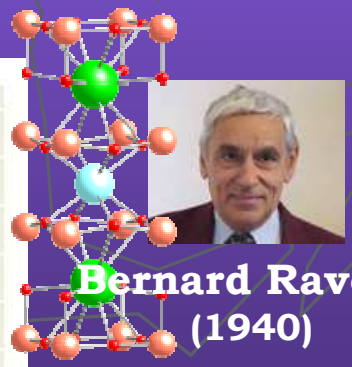
♦ **La supraconductivité est observée dans de nombreux éléments du tableau périodique.**

Les T_C varient entre 0,325 mK (rhodium) et 15 K (Carbone).



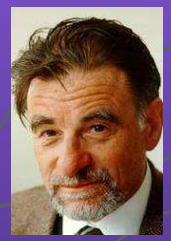
♦ **On connaît un nombre considérable de composés devenant supraconducteurs, y compris, les fameux *supraconducteurs à haute température critique*, dont le premier a été découvert par Bednorz et Müller en 1986, ce qui leur a valu le prix Nobel dès l'année suivante.**





Bernard Raveau (1940)

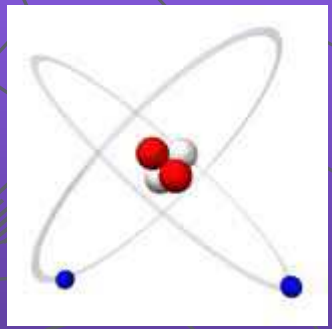
Georg Bednorz (1940)

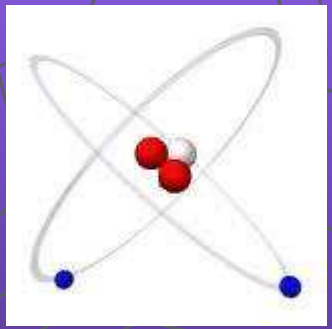


Alex Müller (1927)

L'hélium à basse température (1)

L'hélium possède 2 électrons et donc 2 protons dans son noyau
Deux isotopes naturels
Helium 4 99,9999% Helium 3 0,00001%

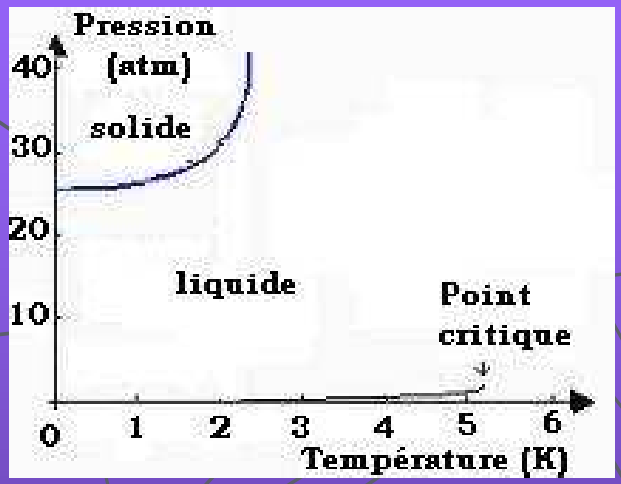




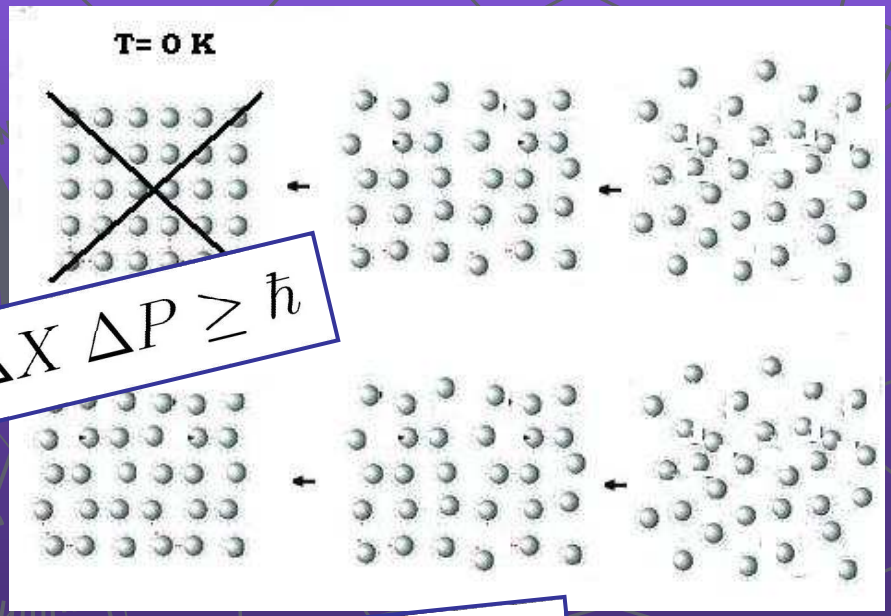
L'un et l'autre manifestent à basse température des propriétés très particulières

L'hélium à basse température (2)

Seul corps qui ne se solidifie pas sous la pression atmosphérique
Cette propriété remarquable est d'origine quantique

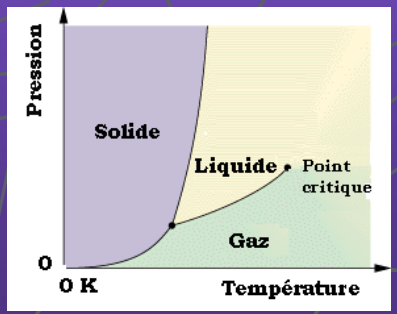


Zéro absolu ⇔ - 273,15 C



$$\Delta X \, \Delta P \geq \hbar$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,054 \times 10^{-34} \text{ joule seconde}$$



Corps pur autre que l'hélium

L'hélium à basse température (3)
Le point lambda

W. Keesom (Leiden 1927-1930) : La chaleur spécifique présente une anomalie en forme de λ à T_λ= 2,17 K (-270,98 C) à pression ordinaire

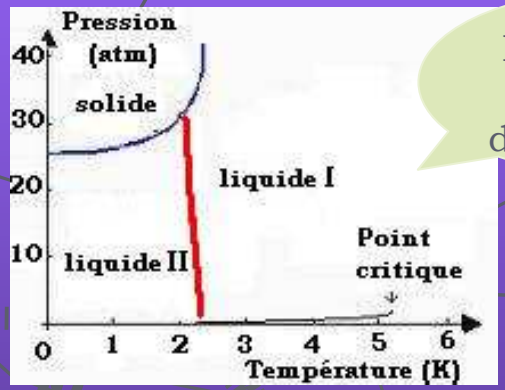
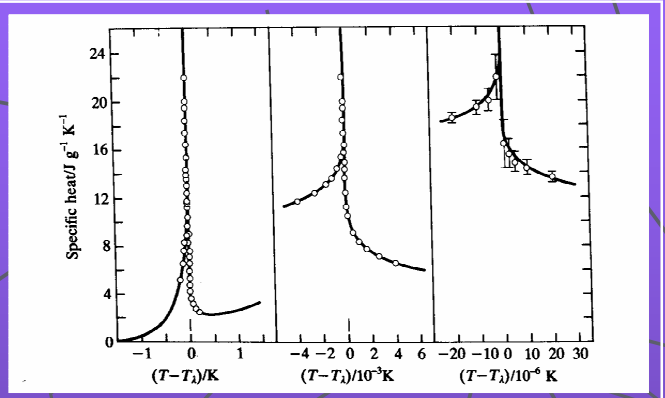


Diagramme de phase de l'hélium 4



L'hélium est inerte et monoatomique et présente pourtant deux états liquides différents : l'hélium I à $T>T_\lambda$ et l'hélium II à $T<T_\lambda$

La transition λ n'existe pas dans l'hélium 3 !

Pourquoi une telle différence ?

L'hélium 4 appartient au monde des « **grégaires** », alors que l''hélium 3 appartient à celui des « **individualistes** »

Que signifie cela ? Nous y reviendrons dans la suite …

La superfluidité – Hélium 4

Décembre 1937 - Janvier 1938 :

J.F. Allen et **A.D. Misener**, et **P. Kapitza**

découvrent la superfluidité de l'Hélium 4 liquide

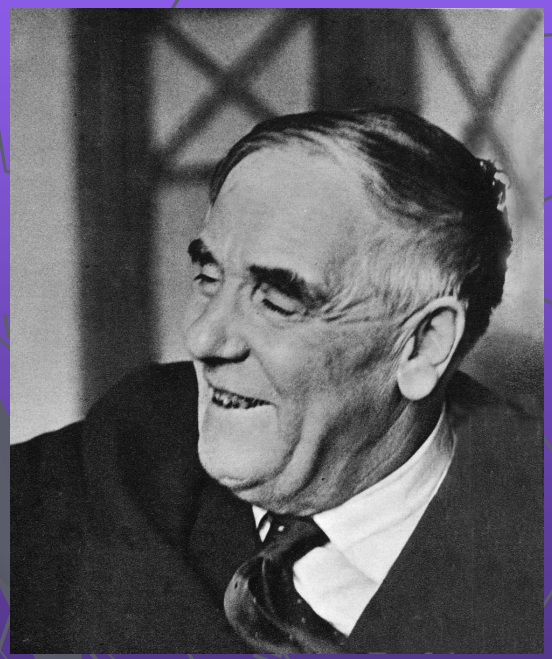
au-dessous du point lambda

L'hélium II semble s'écouler sans viscosité.

La résistance à l'écoulement et les phénomènes de dissipation associés paraissent avoir disparu !

La superfluidité – Hélium 4
L'intuition de P. Kapitza

Viscosity of liquid helium below the λ-point, Nature **141**, 74 (1938)



Piotr Kapitza (1894-1984)

P. Kapitza (Moscow, 3 décembre 1937) :

…« From the measurements we can conclude that the viscosity of the helium II is at least 1,500 times smaller than that of the helium I at normal pressure » …

…« The present limit is perhaps sufficient to suggest, by analogy with superconductors, that the helium below the λ-point enters a special state which might be called a 'superfluid' ».

La superfluidité – Hélium 4
une hydrodynamique non-classique

Flow of liquid helium II, Nature **141**, 75 (1938)

Capillary I		Capillary II			
$T = 1{\cdot}07°$ K.		$T = 1{\cdot}07°$ K.		$T = 2{\cdot}17°$ K.	
Velocity (cm./sec.)	Pressure (dynes)	Velocity (cm./sec.)	Pressure (dynes)	Velocity (cm./sec.)	Pressure (dynes)
13·9	183·5	8·35	402	0·837	36·6
11·5	154·5	6·92	218	0·757	31·3
10·3	127·7	6·88	143	0·715	26·1
9·0	105·0	6·30	101	0·685	21·1
8·2	83·5	6·05	56	0·655	16·4
7·5	65·7	5·55	30	0·609	12·1
6·9	49·3	4·70	11·3	0·570	8·3
6·1	34·1	4·39	9·2	0·525	4·3
5·2[5]	20·3	3·92	13·0	0·433	0·9
4·5[5]	15·2	2·88	7·2		

J. F. Allen et A.D. Misener (Cambridge, 22 décembre 1937) tirent trois conclusions essentielles :

« *The velocity of flow, q, changes only slightly for large changes in pressure head, p.*»

« *The velocity of flow, for given pressure head and temperature, changes only slightly* with a change of cross-section area of the order of 10^3. »

« *The velocity of flow, for given pressure head and* cross-section area, changes by a factor of about of 10 with a change of temperature from 1.07 °K to 2.17 °K.»

J.F. Allen
(1908-2001)

A.D. Misener
(1911-1996)

La superfluidité – Hélium 4
Des propriétés extraordinaires !

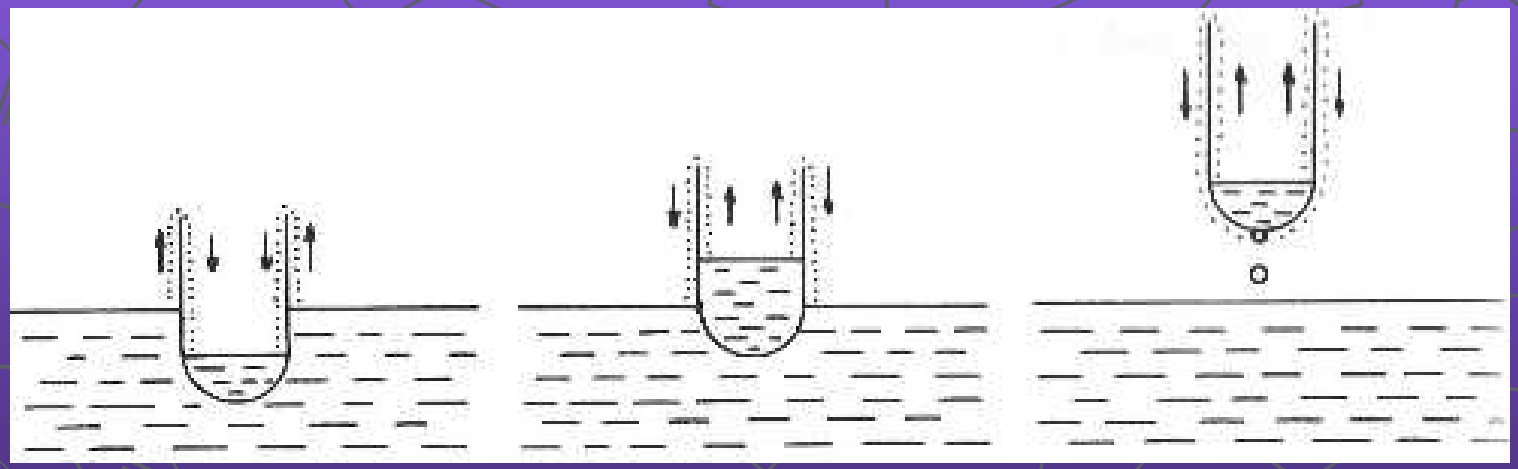
L'hélium superfluide déborde de son contenant.

L'hélium superfluide ne bout pas.

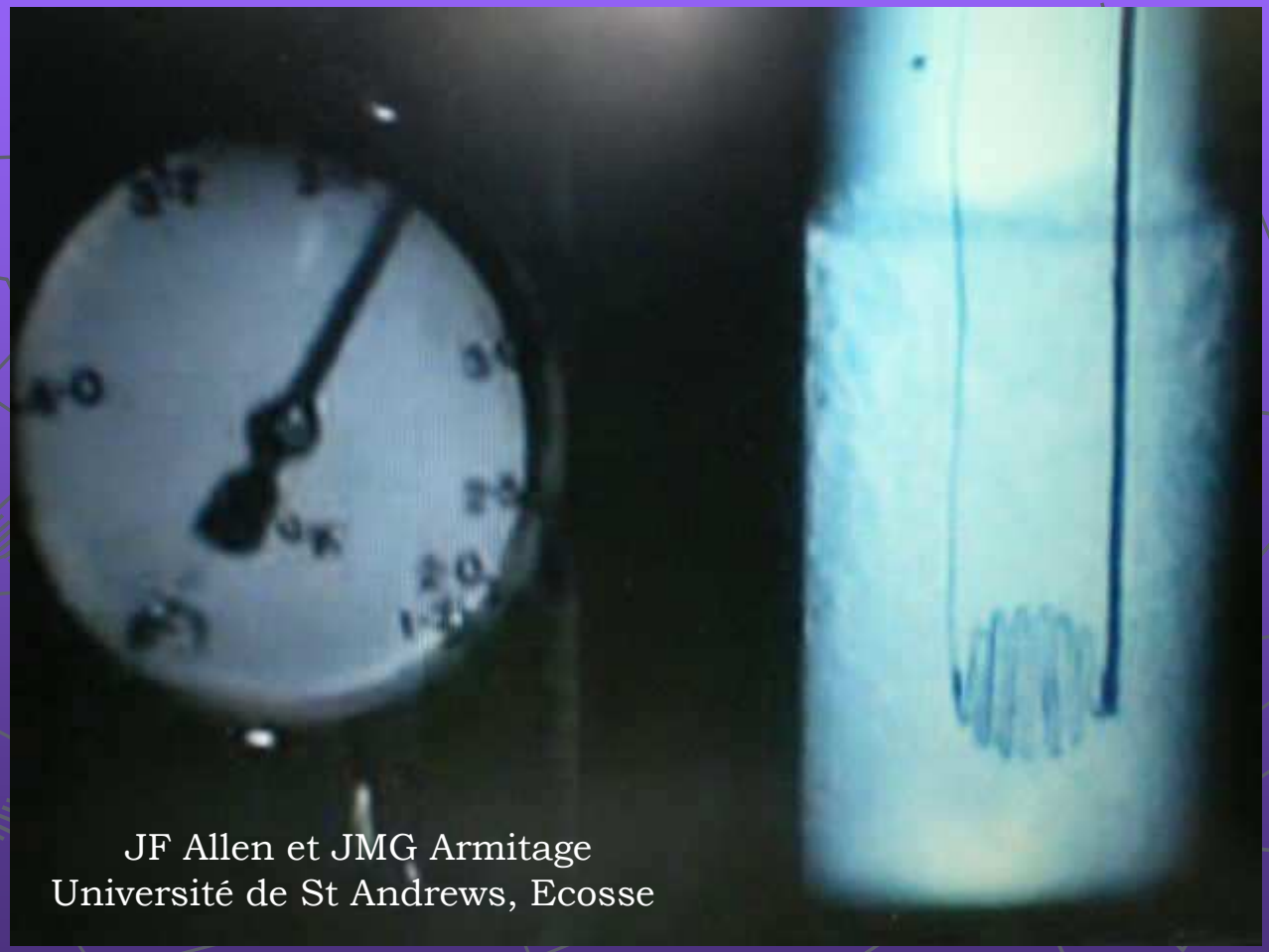
L'effet fontaine.

La superfluidité – Hélium 4
Le phénomène d'échappement

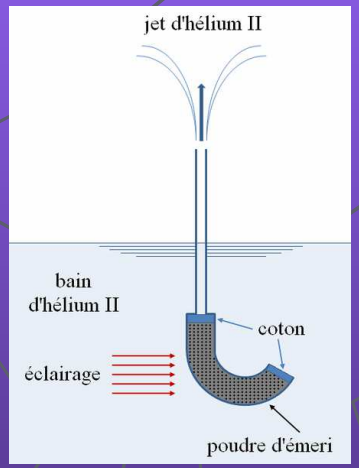
Un suprafluide peut s'écouler d'un contenant en grimpant tout seul sur la paroi et en retombant de l'autre côté, ce qui semble défier la gravité !



La superfluidité – Hélium 4
Un superfluide ne bout pas !

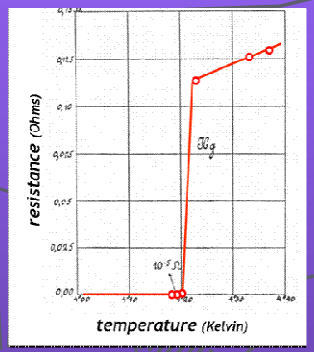


La superfluidité – Hélium 4
L'effet fontaine



Superfluidité et supraconductivité

En fait, la première évidence d'un comportement superfluide remonte à la découverte de la supraconductivité par Onnes en 1911 !

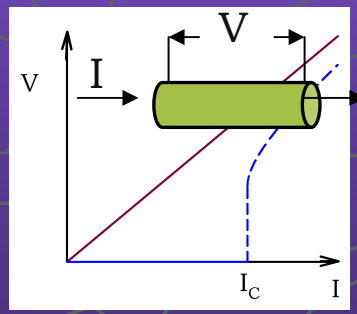


La disparition de la résistance du mercure en dessous de 4,2 K est la manifestation de la superfluidité du fluide formé par les électrons qui se déplacent dans le métal.

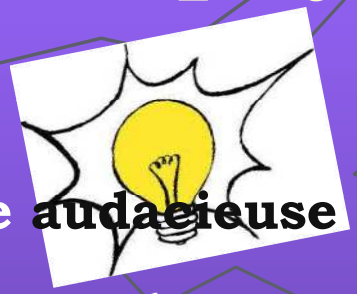
Tout phénomène dissipatif a disparu!

Par exemple, on peut faire circuler un courant dans une boucle supraconductrice : ce courant va circuler indéfiniment !

Comme pour tout superfluide, la superfluidité des électrons n'existe que si leur vitesse est inférieure à une certaine vitesse critique; d'où l'existence d'un courant critique au delà duquel la supraconductivité est détruite.



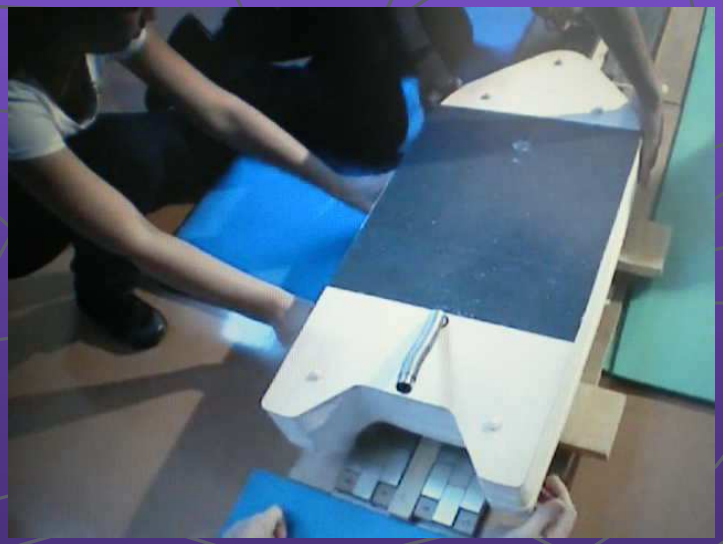
Superfluidité et supraconductivité : des manifestations macroscopiques de la physique quantique



Cette idée audacieuse a été proposée par F. London dès 1935 pour la supraconductivité

Frizt London (1900-1954)

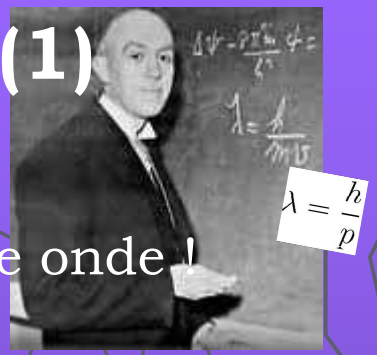
Walther Meissner (1882-1974)



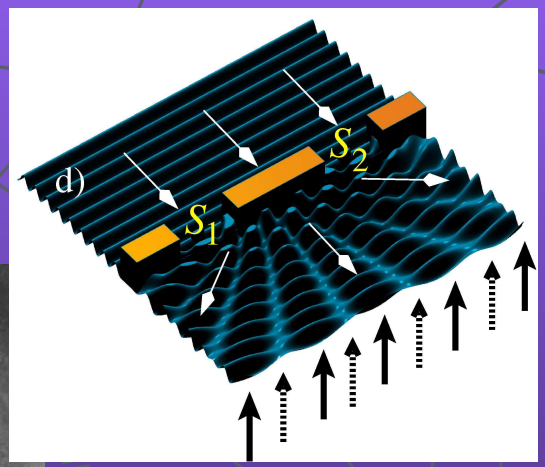
Skate à lévitation supra-conductrice construit à l'université Paris7.

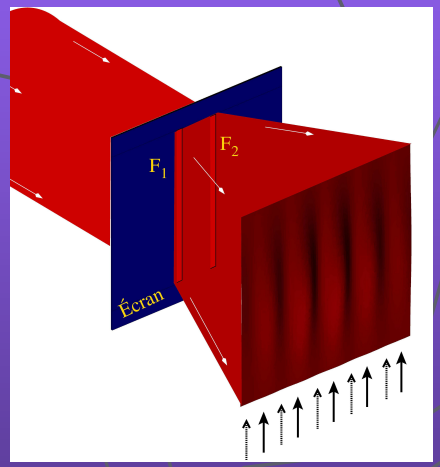
Quelques aspects de la physique quantique (1)

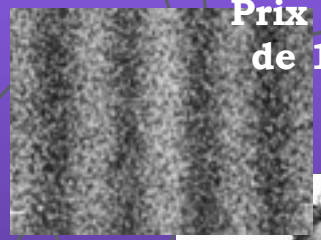
La dualité onde-particule : tout élément de matière doit être pensé comme étant *à la fois* une particule et une onde !



Louis de Broglie
(1892-1987)
Prix Nobel de 1929







Werner Heisenberg
(1901-1976)
Prix Nobel de 1932

Le formalisme mathématique de la physique quantique permet de décrire simultanément les deux aspects

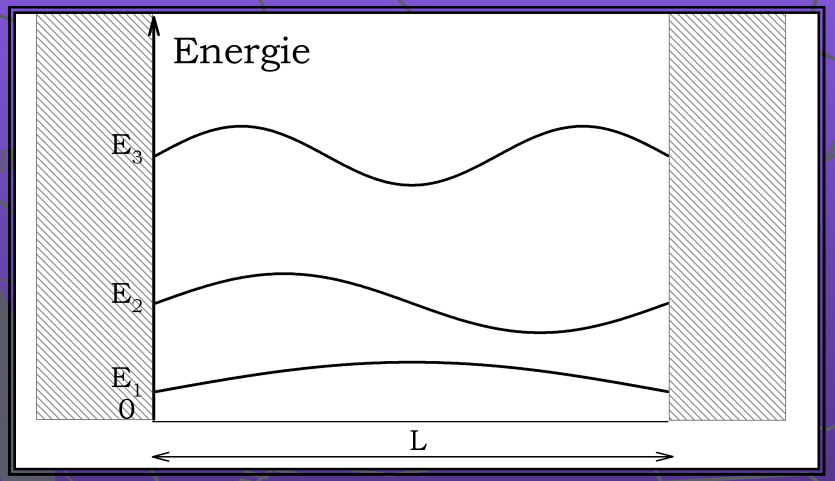
$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(\vec{r},t) = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi(\vec{r},t) + V(\vec{r},t)\,\Delta\psi(\vec{r},t)$$

Erwin Schrödinger
(1887-1961)
Prix Nobel de 1933

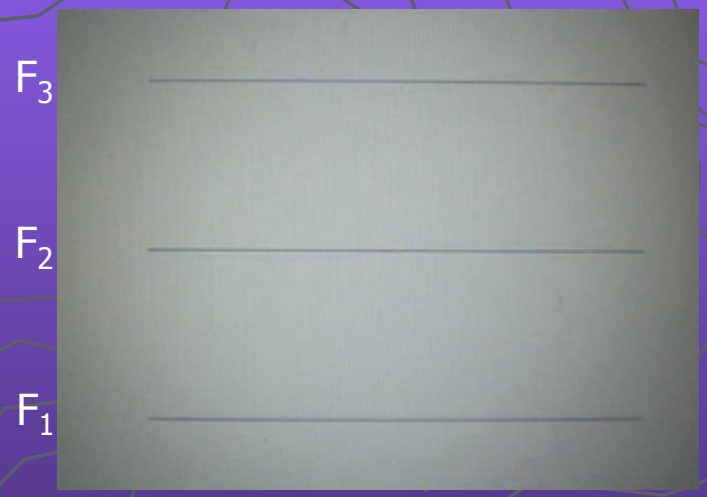
Quelques aspects de la physique quantique (2)

Existence d'états d'énergie bien déterminée (états stationnaires)

Une particule d'énergie bien déterminée ne peut avoir que certaines fonctions d'onde bien spécifiques



Particule confinée sur un segment de longueur L

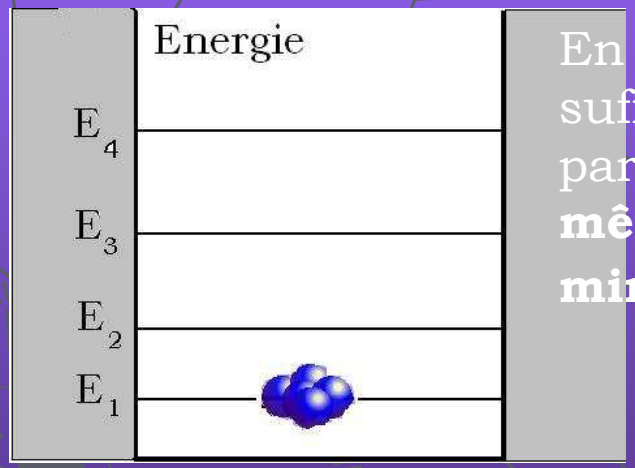


Modes de vibration d'une corde de longueur L

La condensation de Bose-Einstein

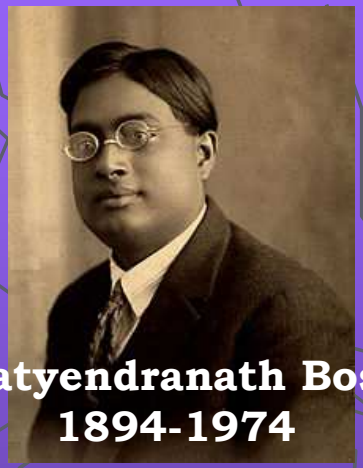
$$d = n^{-1/3} \approx \lambda$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{mk_BT}}$$

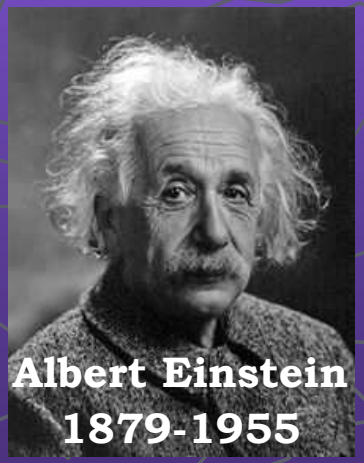


En dessous d'une température suffisamment basse, toutes les particules **s'accumulent** dans le **même état quantique d'énergie minimale** (l'état « fondamental »)

$$T_c = \left(\frac{n}{2.6124}\right)^{2/3} \frac{2\pi\hbar^2}{mk_B}$$



Satyendranath Bose
1894-1974



Albert Einstein
1879-1955

Le fait que toutes les particules d'un système puissent se retrouver dans le même état n'a rien d'évident !

Deux catégories de particules : les bosons et les fermions

Toutes les particules élémentaires connues à ce jour se classent en deux catégories

Les bosons
Gluons
$W^{\pm}$ Z^0, photon
Gravitons

Les fermions
Quarks
Leptons

Les particules constituées de particules élémentaires peuvent être des bosons ou des fermions
Par exemple: les **nucléons** qui sont formés de 3 quarks, sont des **fermions**

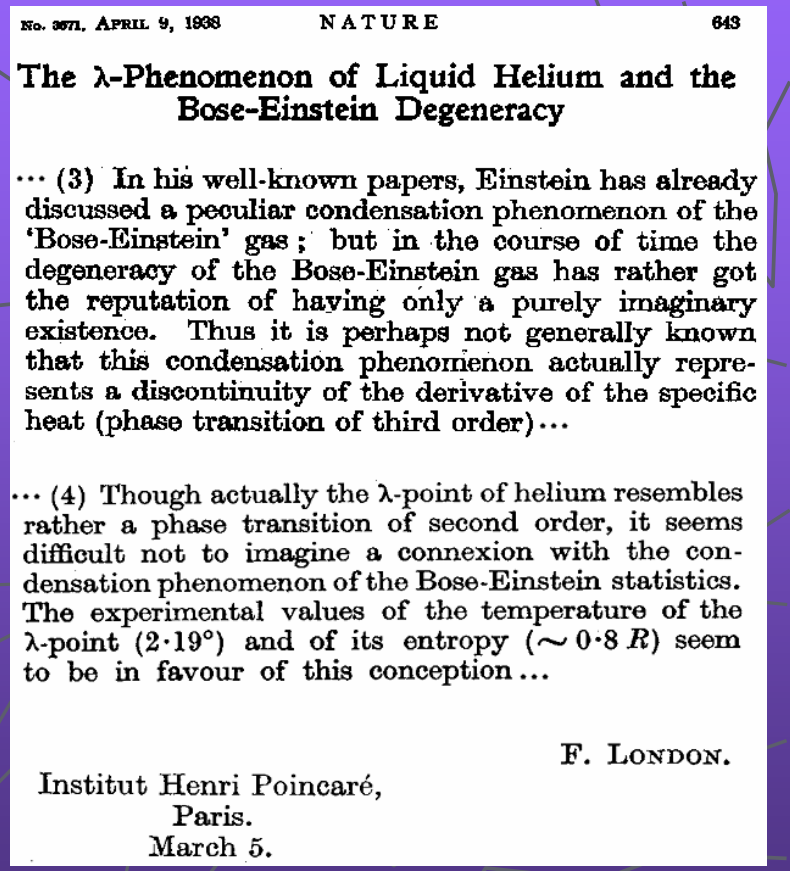
Les atomes peuvent être des bosons ou des fermions
Si leur nombre A de nucléons et leur nombre Z d'électrons ont la même parité, ils sont des bosons sinon des fermions
Par exemple : **l'hélium 4 est un boson** alors que **l'hélium 3 est un fermion**

La superfluidité et la condensation de Bose-Einstein

En reliant la superfluidité de l'hélium 4 à la condensation de Bose-Einstein de ses atomes, **Fritz London a vu juste !**

La propriété de superfluidité peut alors être comprise qualitativement

Lorsqu'un très grand nombre (10^{23}) de particules se trouvent dans la fonction d'onde correspondant à l'état fondamental, chacune suit le même mouvement associé à cette fonction d'onde. Il résulte une **cohérence totale** dans le mouvement de toutes les particules à **l'échelle macroscopique**, qui persiste **indéfiniment sans dissipation**.



No. 3671, April 9, 1938 NATURE 643

The λ-Phenomenon of Liquid Helium and the Bose-Einstein Degeneracy

··· (3) In his well-known papers, Einstein has already discussed a peculiar condensation phenomenon of the 'Bose-Einstein' gas; but in the course of time the degeneracy of the Bose-Einstein gas has rather got the reputation of having only a purely imaginary existence. Thus it is perhaps not generally known that this condensation phenomenon actually represents a discontinuity of the derivative of the specific heat (phase transition of third order)···

··· (4) Though actually the λ-point of helium resembles rather a phase transition of second order, it seems difficult not to imagine a connexion with the condensation phenomenon of the Bose-Einstein statistics. The experimental values of the temperature of the λ-point (2·19°) and of its entropy ($\sim 0{\cdot}8\,R$) seem to be in favour of this conception...

F. London.

Institut Henri Poincaré,
Paris.
March 5.

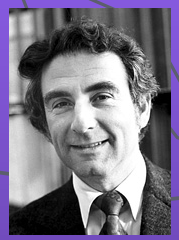
Origine de la superfluidité dans un supraconducteur

Comment des électrons qui sont des fermions peuvent conduire à la superfluidité qui apparaît dans un supraconducteur ?

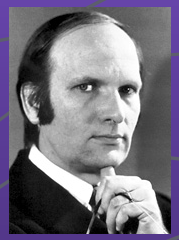
Cette énigme n'a été résolu qu'en 1957 lorsque **Bardeen**, **Cooper** et **Schrieffer** ont proposé leur théorie
(Prix Nobel de physique de 1972)

Dans cette théorie, les électrons s'arrangent par paires (**paires de Cooper),** qui sont des bosons. On peut alors comprendre que ces paires d'électrons subissent une condensation de Bose-Einstein, ce qui rend superfluide le gaz électronique.
La condensation apparaît dès que les paires de Cooper sont stabilisées, c.-à-d. lorsqu'elles ne sont plus détruites par l'agitation thermique. Cette condition détermine la température critique du supraconducteur.

John Bardeen
(1908-1991)



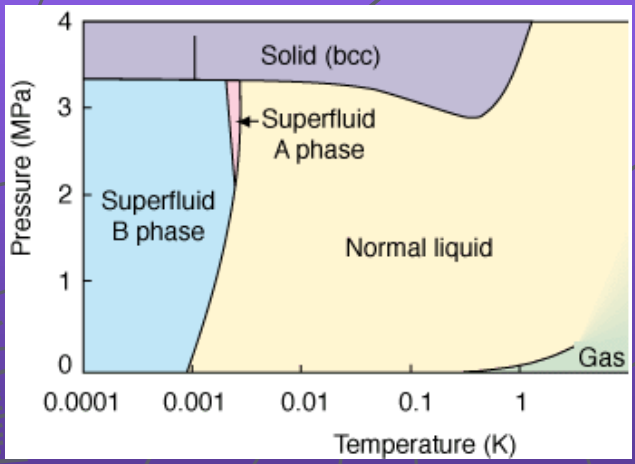
Leon Neil Cooper
(1930)



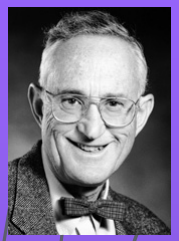
John R. Schrieffer
(1931)

Existence d'une superfluidité BCS dans l'hélium 3

La superfluidité de l'hélium 3 a été découverte en 1972 par **Lee**, **Osheroff** et **Richardson** (Prix Nobel de physique de 1996)



Comme les électrons dans un supraconducteur, les atomes d'hélium 3 peuvent s'apparier en paire de Cooper et l'ensemble de ces paires d'atomes se comporte comme un superfluide.



David M. Lee (1931)

Douglas D. Osheroff (1945)

Robert C. Richardson (1937)

Atomes ultra-froids

Claude Cohen-Tannoudji
(1933)

Steven Chu
(1948)

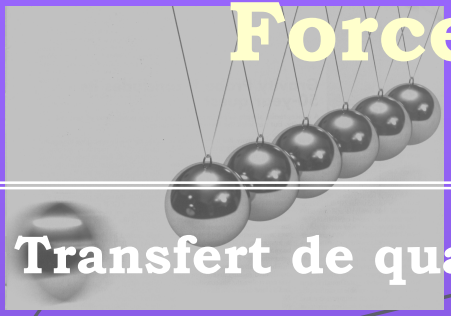
William Daniel Phillips
(1948)

Lauréats du Prix Nobel de Physique de 1997 pour leurs travaux sur le refroidissement et le piégeage d'atomes par laser

L'obtention d'atomes ultra-froids a été la percée scientifique essentielle pour la réalisation d'expériences qui n'étaient jusqu'à ces dernières années que des expériences possibles par la pensée.

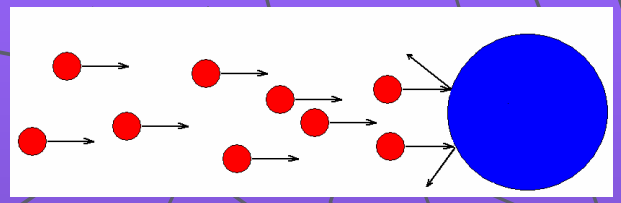
On peut maintenant obtenir des gaz d'atomes à des température de l'ordre du nanokelvin.
La matière la plus froide de l'univers !

Atomes ultra-froids
Forces exercées par la lumière sur la matière



Transfert de quantité de mouvement

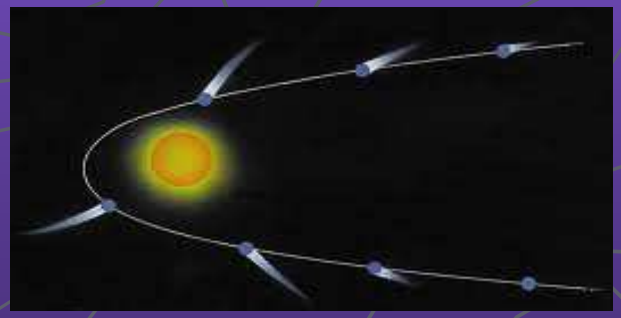
Un exemple simple: *une cible est poussée par des projectiles venant tous de la même direction.*



Pression de radiation

Le transfert d'impulsion de photons incidents diffusés sur un corps est à l'origine d'une pression sur ce dernier.

Par exemple, la queue des comètes est toujours dirigée dans la direction opposée au Soleil à cause de l'action de la pression de radiation exercée par ce dernier sur les poussières formant la queue.



Atomes ultra-froids
Le refroidissement par laser (1)

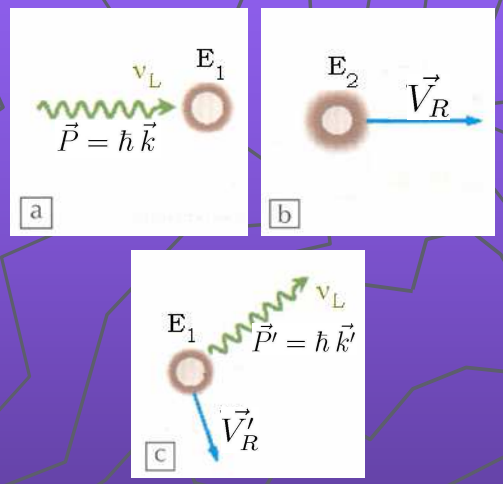
Ralentissement des atomes

L'atome subit lors de chaque cycle une diminution de vitesse moyenne de **10^{-2} m/s**.

Dans un faisceau laser résonnant, le nombre moyen de cycles est élevé, jusqu'à **10^{8} s^{-1}**.

La force de pression de radiation est alors considérable et produit sur l'atome une décélération moyenne de **10^{5} g**

Il est en principe possible d'arrêter un atome de vitesse initiale **1000 m/s** (jet atomique émis par un four à 800 K) sur une distance de **0,5 m** en moins de **10^{-3} s.**



Cycle absorption-émission d'un photon par un atome

En fait, cette force n'est vraiment intense que si la fréquence lumineuse ν_L est égale à la fréquence de la transition atomique $\nu_A=(E_2-E_1)/h$

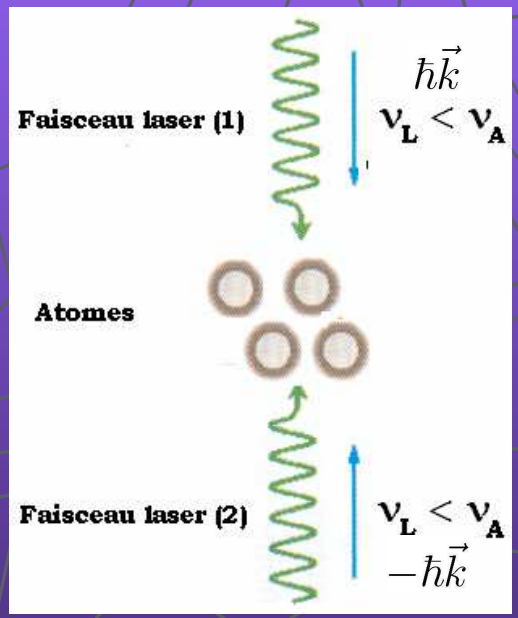
Atomes ultra-froids
Le refroidissement par laser (2)

Refroidissement laser Doppler

Un jet atomique est soumis à deux ondes laser se propageant dans des sens opposés, de fréquence ν_L légèrement inférieure à la fréquence de résonance ν_A.

♦ Si un atome est au repos, les deux forces de radiation qui agissent sur lui se compensent.

♦ Si un atome se déplace vers le bas, il devient plus résonant avec l'onde (2) qu'avec l'onde (1) à cause de l'effet Doppler. La force exercée par l'onde (2) est donc plus intense que celle produite par l'onde (1), et la force totale est opposée au mouvement de l'atome. Il en est de même s'il se déplace vers le haut.

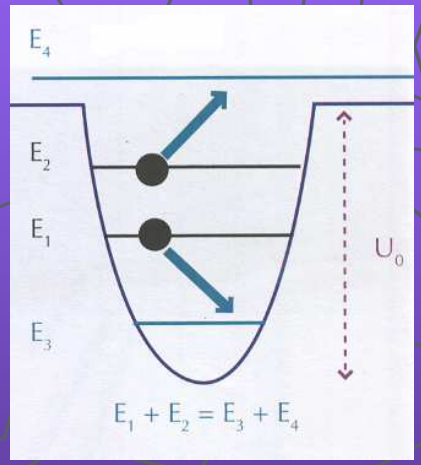


Le mouvement des atomes est toujours freiné, ce qui provoque un refroidissement permettant d'accéder vers le *microkelvin*.

Atomes ultra-froids
Le refroidissement évaporatif

Principe analogue à un liquide chaud qui se refroidit en émettant de la vapeur

- Les atomes sont confinés dans un piège magnétique de profondeur U_0.
- Suite à une collision élastique deux atomes d'énergie E_1 et E_2 ont respectivement pour énergie E_3 et E_4.
- Si E_4 est supérieure à U_0, l'atome d 'énergie E_4 est expulsé du piège. L'autre atome a une énergie E_3 beaucoup plus basse.

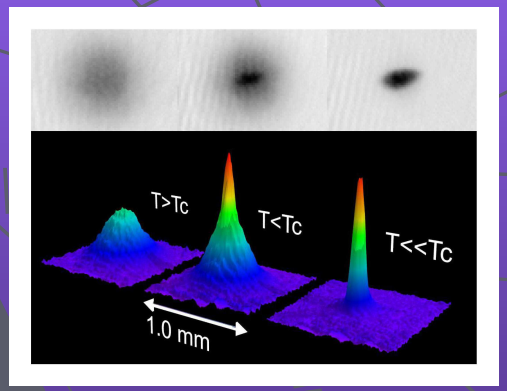


Après un retour à l'équilibre thermodynamique des atomes restant piégés, la température de l'ensemble diminue

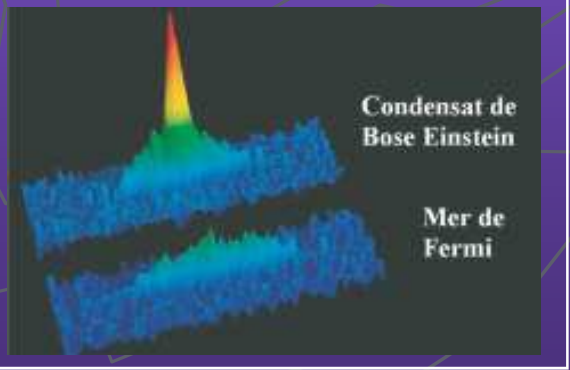
En abaissant progressivement U_0, on obtient un gaz dont la température peut atteindre de domaine du nanoKelvin

La condensation de Bose-Einstein dans les gaz atomiques ultra-froids

La CBE est à la base de tous les types de superfluidité connus.
Cela a été particulièrement mis en évidence avec la découverte en 1995 de la CBE de vapeurs alcalines par **Cornell**, **Ketterle** et **Wieman**
(Prix Nobel de Physique de 2001)



Evolution d'un nuage atomique de sodium (MIT).
La formation d'un pic de densité très étroit au centre du piège à $T_C \approx 2\ \mu K$ constitue une signature de la transition CBE.



Comparaison entre un nuage atomique de Lithium 7 en haut, et un nuage de Lithium 6 en bas.
$T=1{,}6\ \mu K$ $T_C \approx 1{,}8\ \mu K$
(Laboratoire Kastler-Brossel, ENS)

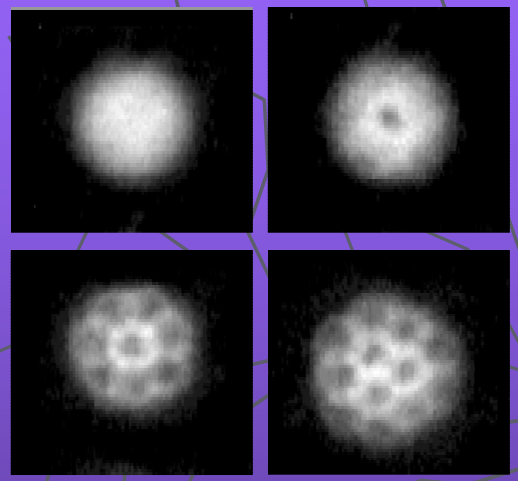
Carl Wieman (1951) Eric Cornell (1961)

Wolfgang Ketterle (1957)

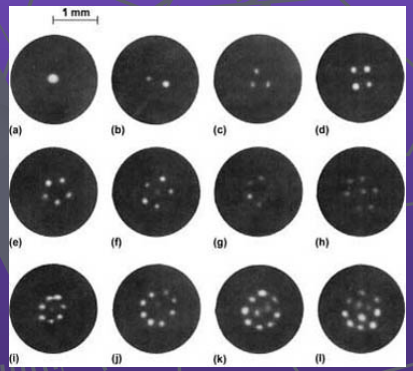
Réseau de tourbillons dans un condensat

Superfluidité

Condensat de Bose-Einstein de rubidium 87 confiné dans un piège magnétique à une température inférieure à 80 nK.
En mettant en rotation le condensat, on observe la formation de vortex au-dessus d'une vitesse de rotation critique.

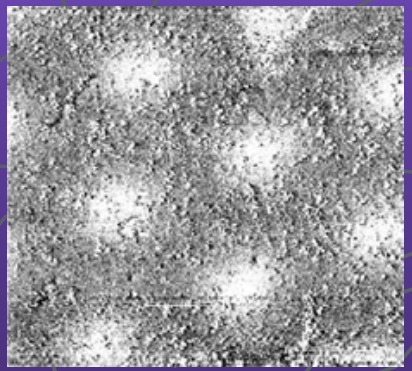


LKB ENS



Réseaux analogues

- dans l'hélium 4 superfluide mis en rotation (à gauche)
- dans un supraconducteur (à droite)



Conclusion

La superfluidité exige la condensation de Bose-Einstein

La superfluidité des atomes froids dilués est mieux comprise que celle de l'hélium liquide et des électrons dans les solides, systèmes en interaction forte

Bibliographie

- Présentation des idées à la base de la théorie quantique

L'étrange subtilité quantique – *Quintessence de poussières*
Amaury Mouchet
DUNOD

- Histoire de la supraconductivité et de la superfluidité

La guerre du froid
Jean Matricon et Georges Waysand
Seuil

La supraconductivité; 100 ans après
Stephen Blundell
Belin – Pour La Science

Bibliographie

- Quelques articles de vulgarisation
  - **Qui a découvert la superfluidité ?**
    Sébastien Balibar
    Bulletin de la SFP **128**, 2001
  - **Des gaz superfluides: la transition BEC-BCS dans les gaz atomiques ultrafroids**
    Roland Combesco
    Bulletin de l'UdPPC, **875,** 2005
  - **La condensation de Bose-Einstein en phase solide**
    Jacek Kasprazk et collaborateurs
    Images de la physique, CNRS, 2007
  - **Atomes froids: réseaux optiques et horloges**
    Michèle Leduc et Pierre Lemonde
    Reflets de la Physique, Revue de la SFP **21**, 2010