

# Mécanique quantique 2 (2 hours)

Joaquín Bermejo Ortiz

## I. **L'intrication quantique: fondements et Applications:**

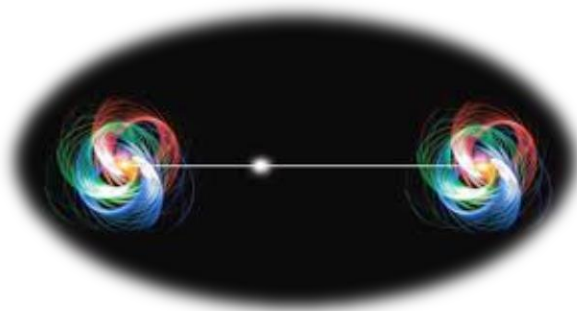
- Introduction à l'intrication quantique
- L'information quantique et la téléportation quantique
- La computation quantique: La nature résout la nature

## II. Matière quantique:

- Le graphène: la ruche quantique
- Les fermions de Weyl: les qubits chiraux

## Introduction à l'intrication quantique

- L'intrication quantique est un phénomène dans lequel deux particules (ou groupes de particules) forment un état lié
- Ce qui arrive à une particule a un effet immédiat sur l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare.
- Ce phénomène est l'un des plus surprenants de la mécanique quantique, et il a des implications profondes pour notre compréhension de l'univers.



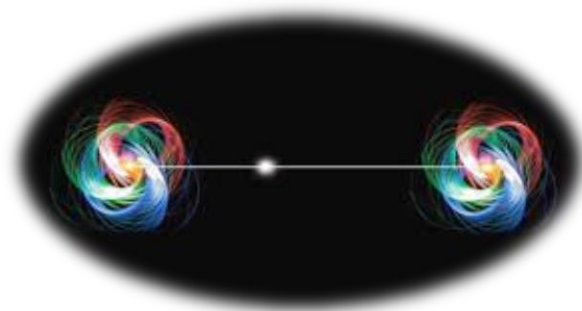
## Introduction à l'intrication quantique: Un exemple

- Imaginons deux particules quantiques A, et B en superposition

$$\psi_A = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_A + \mathbf{1}_A ) \quad \psi_B = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_B + \mathbf{1}_B )$$

- On a vu que la mesure d'une particule « effondre » son état

$$\psi_A = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_A + \mathbf{1}_A )$$



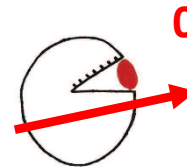
## Introduction à l'intrication quantique: Un exemple

- Imaginons deux particules quantiques A, et B en superposition

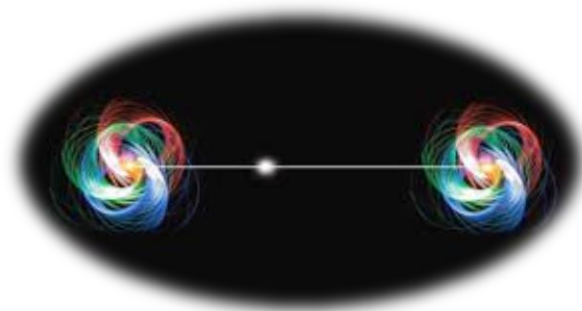
$$\psi_A = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_A + \mathbf{1}_A ) \quad \psi_B = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_B + \mathbf{1}_B )$$

- On a vu que la mesure d'une particule « effondre » son état

$$\psi_A = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_A + \mathbf{1}_A )$$



$$\psi_A = \mathbf{0}_A$$



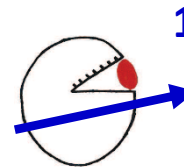
## Introduction à l'intrication quantique: Un exemple

- Imaginons deux particules quantiques A, et B en superposition

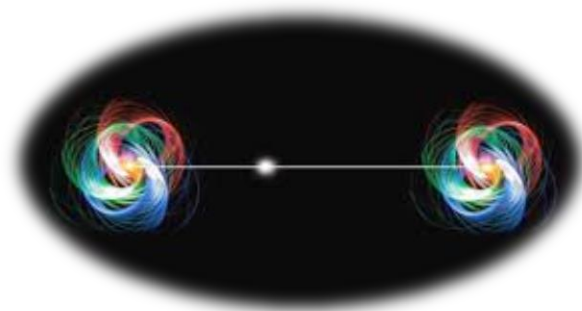
$$\psi_A = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_A + \mathbf{1}_A ) \quad \psi_B = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_B + \mathbf{1}_B )$$

- On a vu que la mesure d'une particule « effondre » son état

$$\psi_A = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_A + \mathbf{1}_A )$$



$$\psi_A = \mathbf{1}_A$$



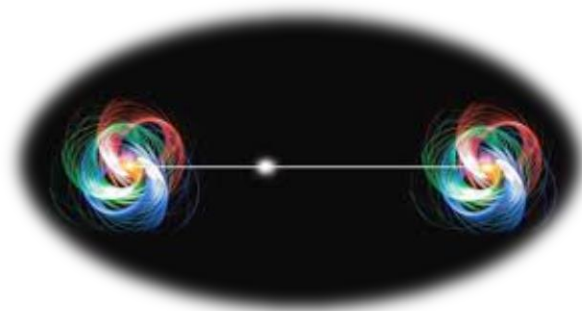
## Introduction à l'intrication quantique: Un exemple

- Imaginons deux particules quantiques A, et B en superposition

$$\psi_A = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_A + \mathbf{1}_A ) \quad \psi_B = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_B + \mathbf{1}_B )$$

- Imaginons que A et B sont intriqués  $\psi_{Intrication} = \psi_A \otimes \psi_B$

$$\psi_{Intrication} = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_A \otimes \mathbf{1}_B - \mathbf{1}_A \otimes \mathbf{0}_B )$$



Introduction à l'intrication quantique: Un exemple

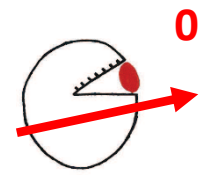
- Imaginons deux particules quantiques A, et B en superposition

$$\psi_A = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_A + \mathbf{1}_A )$$

$$\psi_B = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_B + \mathbf{1}_B )$$

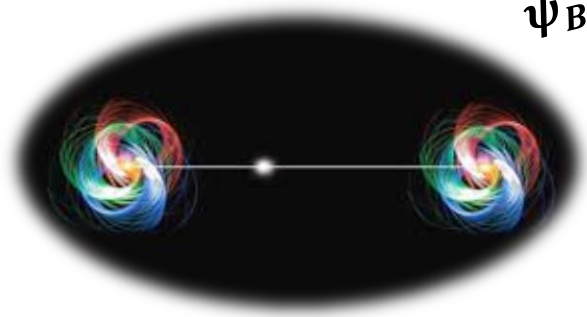
- Imaginons que A et B sont intriqués  $\psi_{Intrication} = \psi_A \otimes \psi_B$

$$\psi_{Intrication} = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_A \otimes \mathbf{1}_B - \mathbf{1}_A \otimes \mathbf{0}_B )$$



$\psi_{Intrication} = \mathbf{0}_A \otimes \mathbf{1}_B$   
 $\psi_A = \mathbf{0}_A$

$\psi_B$  est forcément dans l'état  $\mathbf{1}_B$  !!





Introduction à l'intrication quantique: Un exemple

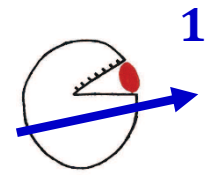
- Imaginons deux particules quantiques A, et B en superposition

$$\psi_A = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_A + \mathbf{1}_A )$$

$$\psi_B = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_B + \mathbf{1}_B )$$

- Imaginons que A et B sont intriqués  $\psi_{Intrication} = \psi_A \otimes \psi_B$

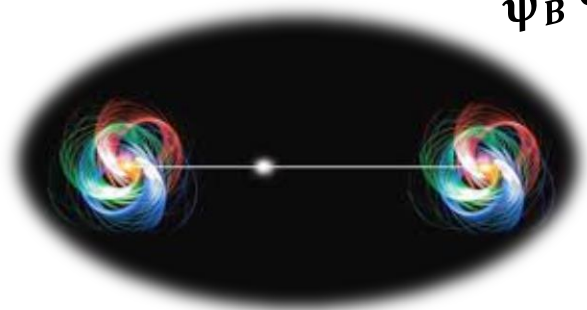
$$\psi_{Intrication} = \frac{1}{\sqrt{2}} ( \mathbf{0}_A \otimes \mathbf{1}_B - \mathbf{1}_A \otimes \mathbf{0}_B )$$



$$\psi_{Intrication} = \mathbf{1}_A \otimes \mathbf{0}_B$$

$$\psi_A = \mathbf{1}_A$$

**$\psi_B$  est forcément dans l'état  $\mathbf{0}_B$  !!**



Introduction à l'intrication quantique: Implications philosophiques

- Les états intriqués ont été observés en laboratoire (**Alain Aspect, Prix Nobel 2022**)

The slide content includes:

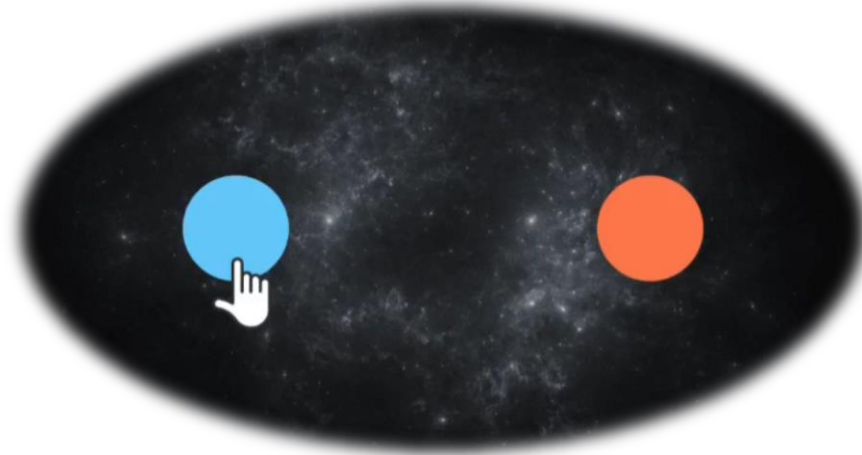
- Diagram:** An EPR experiment setup showing two particles, \$v\_1\$ and \$v\_2\$, originating from a source \$S\$. Particle \$v\_1\$ passes through a polarizer \$a\$ and is detected at \$+1\$ or \$-1\$. Particle \$v\_2\$ passes through a polarizer \$b\$ and is detected at \$+1\$ or \$-1\$. A 3D coordinate system with \$x\$, \$y\$, and \$z\$ axes is shown to the right.
- Text:** "For the entangled EPR state..."
- Equation:** 
$$|\Psi(v_1, v_2)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |x, x\rangle + |y, y\rangle \}$$
- Text:** "Quantum mechanics predicts results separately random ..."
- Equation:** 
$$P_+(a) = P_-(a) = \frac{1}{2}; P_+(b) = P_-(b) = \frac{1}{2}$$
- Text:** "but strongly correlated:"
- Equation:** 
$$P_{++}(0) = P_{--}(0) = \frac{1}{2}$$
- Equation:** 
$$P_{+-}(0) = P_{-+}(0) = 0$$

Alain Aspect à l'École polytechnique de Paris (9 novembre 2022)

## Introduction à l'intrication quantique: Implications philosophiques

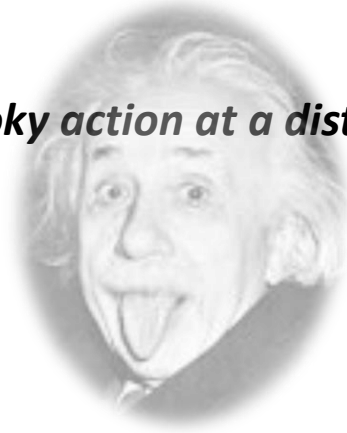
- Les états intriqués ont été observés en laboratoire (**Alain Aspect, Prix Nobel 2022**)
- Cette théorie est dite **non locale**

*Le principe de localité: des objets distants ne peuvent avoir une influence directe l'un sur l'autre .  
Un objet ne peut être influencé que par son environnement immédiat.*

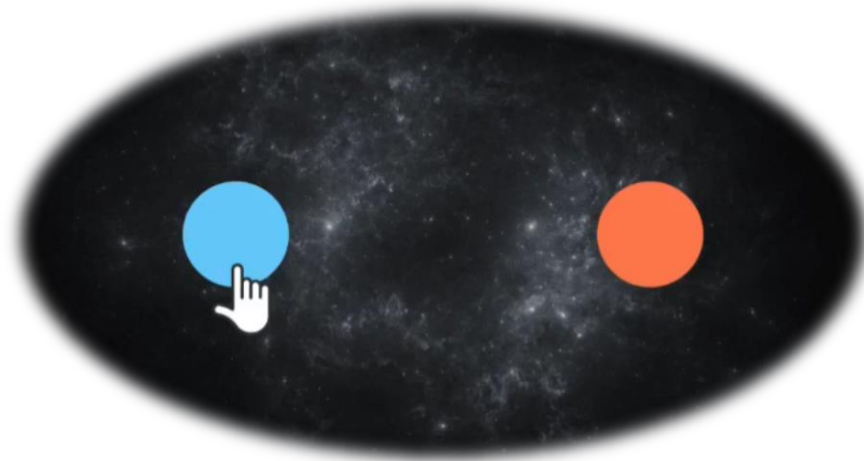


Idée pour exposé I: L'intrication quantique, le principe de localité et le principe de causalité

*Spooky action at a distance*



- L'intrication quantique est une théorie **non locale**, peut l'information voyager alors plus vite que la vitesse de la lumière ?
- Peut l'information voyager alors plus vite que la vitesse de la lumière ?



Idée pour exposé II

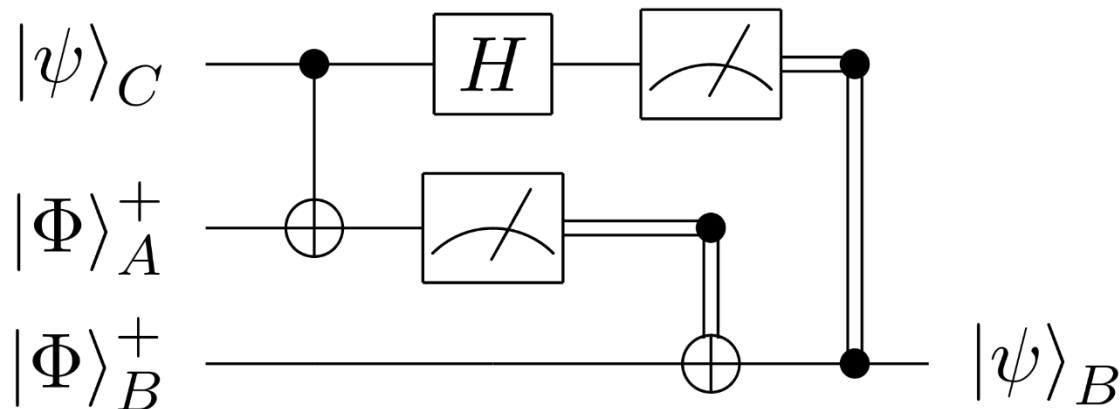
***Le Prix Nobel de physique 2022***

**La physique quantique accessible à tous**



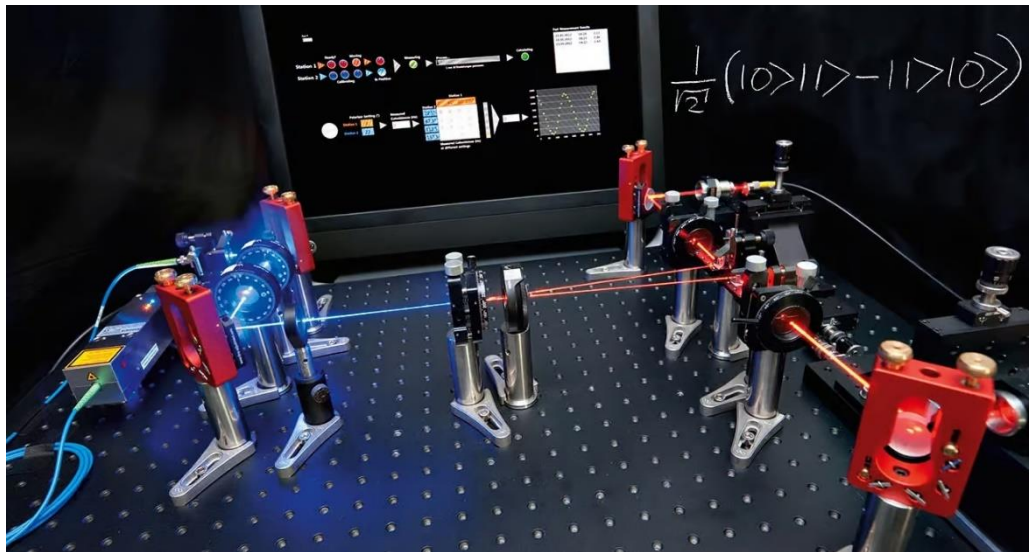
## La téléportation quantique

- La téléportation quantique c'est la transmission de l'état quantique d'une particule à une autre en utilisant l'intrication quantique, sans qu'il y ait de transfert physique
- Pour cela, on commence par créer deux particules intriquées. On mesure ensuite l'état quantique d'une des particules, ce qui détruit son état quantique.
- On utilise ensuite les informations obtenues par la mesure pour créer un état quantique identique sur la deuxième particule



## La téléportation quantique: une démonstration expérimentale

- La téléportation quantique a battu un nouveau record de distance : 1.200 km !!
- Les états quantiques ont été téléportés entre des paires de photons entre un satellite et deux sources au sol (à Ngari et au Tibet)
- Personne auparavant n'avait réalisé une téléportation quantique entre le sol et l'espace



Crédits: IQOQI Vienna, Austrian Academy of Sciences



## La téléportation quantique: une démonstration expérimentale



Une expérience d'intrication quantique

Crédits: Science Magazine



## L'informatique quantique

- L'informatique quantique est une technologie qui exploite les lois de la mécanique quantique pour résoudre des problèmes trop complexes pour les ordinateurs classiques



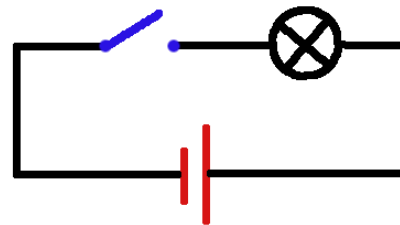
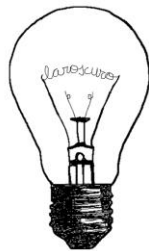
**IBM Q System One**

## L'informatique quantique: des Bits aux Qubits

- Les ordinateurs classiques stockent et traitent les informations à l'aide de bits, qui peuvent être soit 0 soit 1

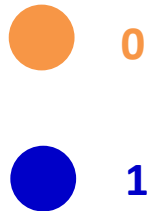
Contexte	Valeurs
Logique	Faux/Vrai
Numérique	0/1

- Quelques grandeurs physiques pour réaliser un bit: La polarisation magnétique, la charge électrique, le courant ou la tension électriques...

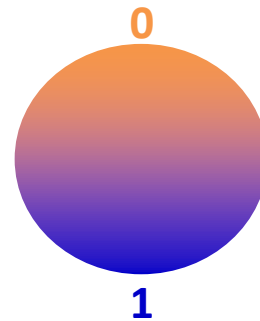


L'informatique quantique: des Bits aux Qubits

- Les bits quantiques (Qubits) peuvent exister dans des états de superposition et même être intriqués avec d'autres Qubits



$$\psi_{Bit} = 0/1$$



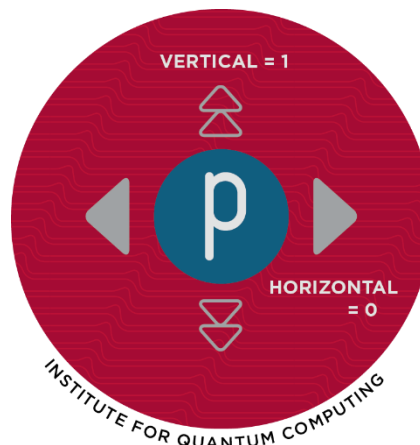
$$\psi_{Qbit} = \alpha 0 + \beta 1$$

- Quelques grandeurs physiques pour réaliser un Qbit:

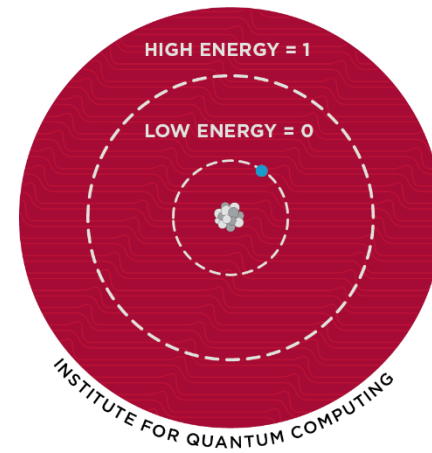
Spins



Photons

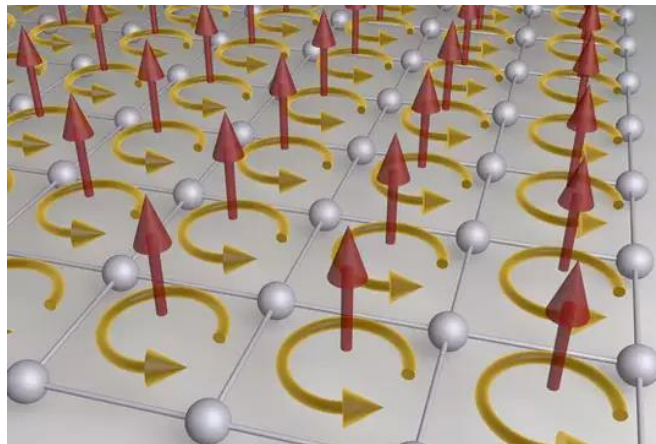


Atomes et ions piégés



## L'informatique quantique: ses avantages, complexité

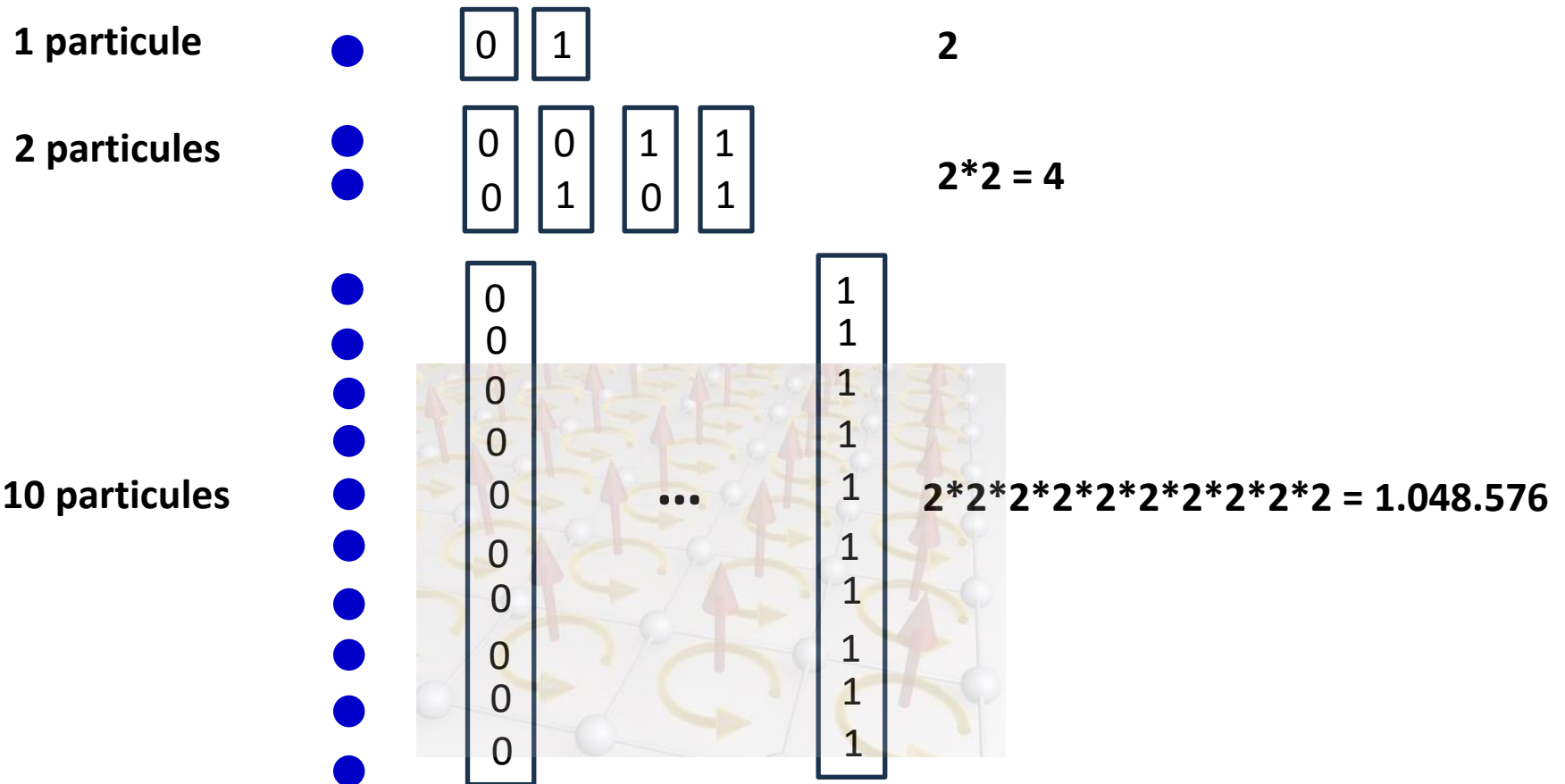
- Les ordinateurs quantiques ont le potentiel de résoudre des problèmes qui sont hors de portée des ordinateurs classiques
- Par exemple, un ordinateur quantique pourrait être utilisé pour simuler des systèmes chimiques/biologiques/physiques très complexes
- En physique: **Complexité**, système de nombreuses particules en **interaction**...



MAX PLANCK INSTITUTE OF QUANTUM OPTICS

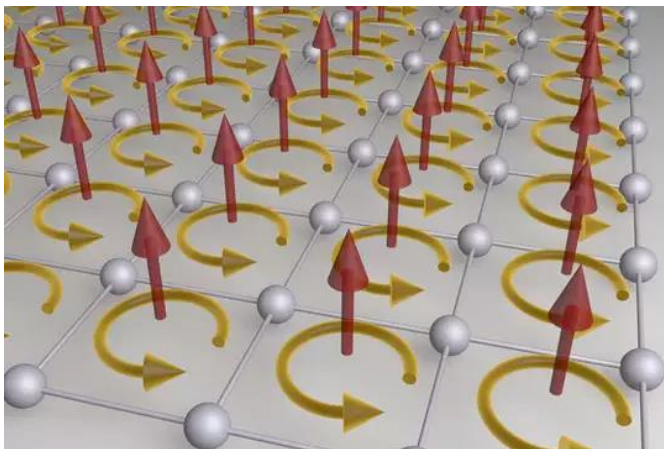
L'informatique quantique: ses avantages, complexité

- En physique: **Complexité**, système de nombreuses particules en **interaction**...

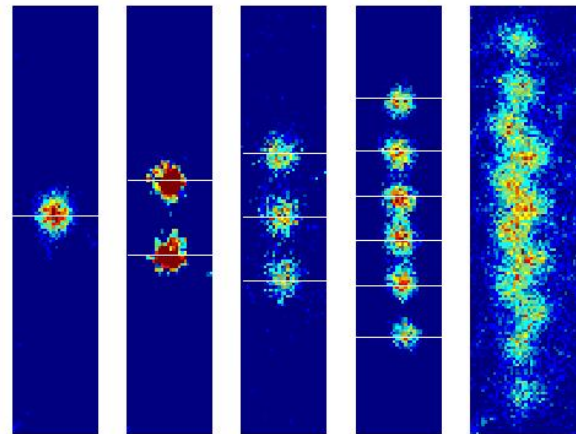


Idée pour exposé III: **La nature résout la nature...**

- Nous avons vu que les Atomes et les Ions piégés peuvent être utilisés comme Qbits...
- Il nous faut un grand nombre de Qbits intriqués pour que les algorithmes quantiques marchent... Mais la compréhension même de ce système de Atomes/Ions en **interaction** est très complexe...
- Peut un système d'atomes résoudre **ses propres équations**?
- **Les remarques de Feynman** sur l'informatique quantique: *Simulating physics with computers* (*International Journal of Theoretical Physics*, Vol 21, Nos. 6/7, 1982 )



MAX PLANCK INSTITUTE OF QUANTUM OPTICS



IONS MN PIÉGÉS

## I. L'intrication quantique: fondements et Applications:

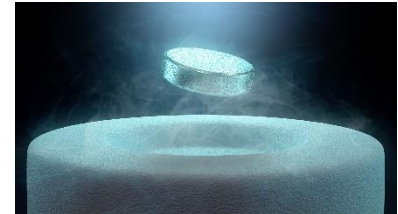
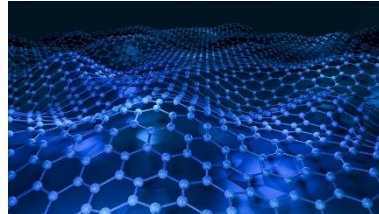
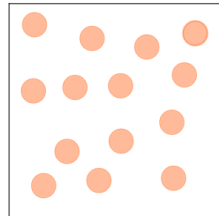
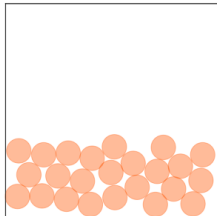
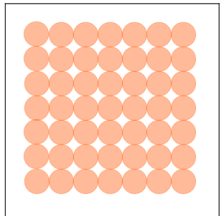
- Introduction à l'intrication quantique
- L'information quantique et la téléportation quantique
- La computation quantique: La nature résout la nature

## II. Matière quantique:

- Le graphène: la ruche quantique
- Superconductivité

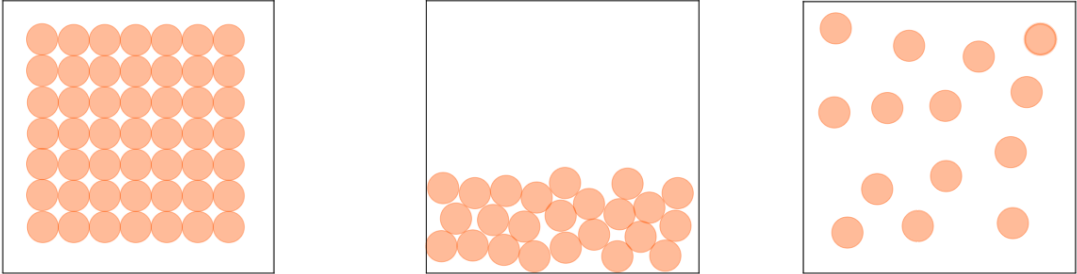
## Qu'est-ce que la matière quantique?

- La physique de la matière condensée étudie des systèmes composés d'un très grand nombre de particules dans un état **condensé**, comme **les solides ou les liquides**
- Le comportement d'un système contenant de nombreuses particules peut être très différent de celui des particules individuelles qui le composent
- Matière quantique Systèmes à plusieurs corps où les effets quantiques dominant pour donner naissance à des **états exotiques de la matière**
- Environ 50% des prix Nobel obtenus au cours de ces 50 dernières années





Les états traditionnels de la matière



Solide

Liquide

Gas



Basse temperatura

Basse temperatura

(État de symmétrie réduite)

(État de symmétrie parfaite)

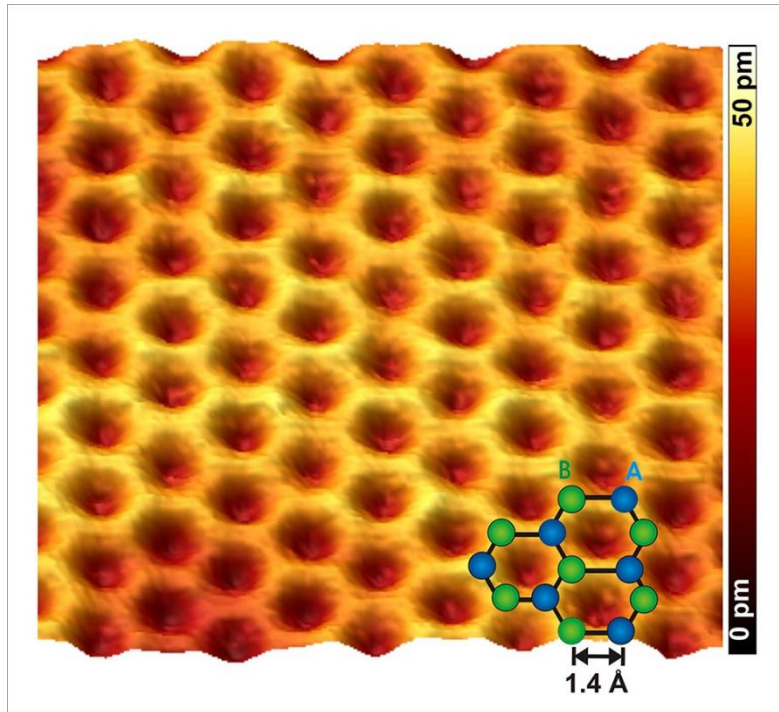
Brisure spontanée de symétrie

## Les états traditionnels de la matière

**Quelques états de la matière existent sans brisure de symétrie...**

## Phases exotiques de la matière: le graphène

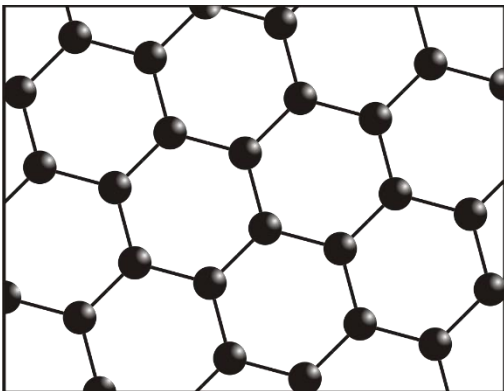
- Le graphène est un matériau constitué d'une seule couche d'atomes (bidimensionnel) de carbone disposés en une structure hexagonale –**en nid d'abeille**–



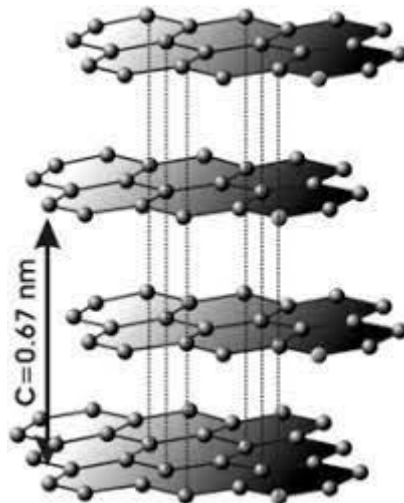
## Phases exotiques de la matière: le graphène

- Le graphène est un matériau constitué d'une seule couche d'atomes (bidimensionnel) de carbone disposés en une structure hexagonale –**en nid d'abeille**–
- L'apilement de plusieurs couches de graphène constitue le graphite

## GRAPHÈNE



## GRAPHITE



Le graphène: prix Nobel de physique 2010

*"For groundbreaking experiments regarding the two-dimensional material graphene "*

**" Pour leurs expériences révolutionnaires concernant le matériau bidimensionnel qu'est le graphène"**

**Andre Geim**



© The Nobel Foundation.  
Photo: U. Montan

**Konstantin Novoselov**

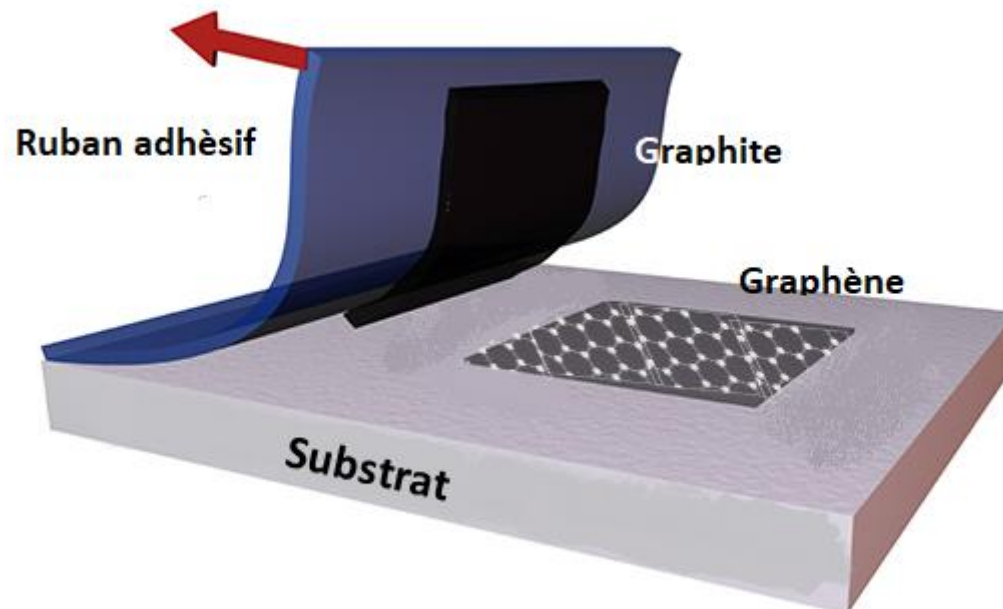


© The Nobel Foundation.  
Photo: U. Montan

## Le graphène: prix Nobel de physique 2010

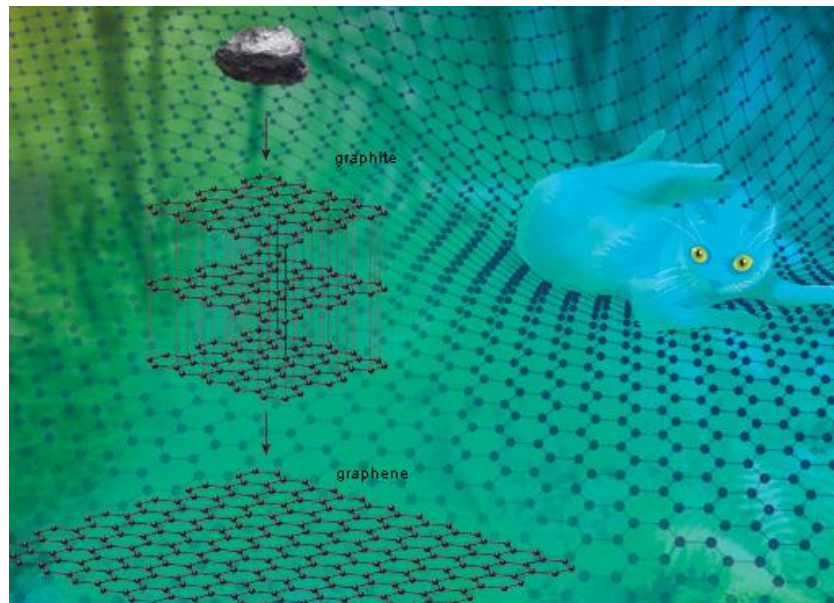
### Graphène exfolié: un prix Nobel avec ruban adhésif!

- Le principe consiste à arracher une très fine couche de graphite du cristal à l'aide d'un ruban adhésif, puis de renouveler l'opération une dizaine de fois sur les échantillons ainsi produits afin que ces derniers soient les plus fins possibles. Ils sont ensuite déposés sur une plaque de dioxyde de silicium où une identification optique permettra de sélectionner les échantillons constitués d'une unique couche



## Le graphène: propriétés extraordinaires

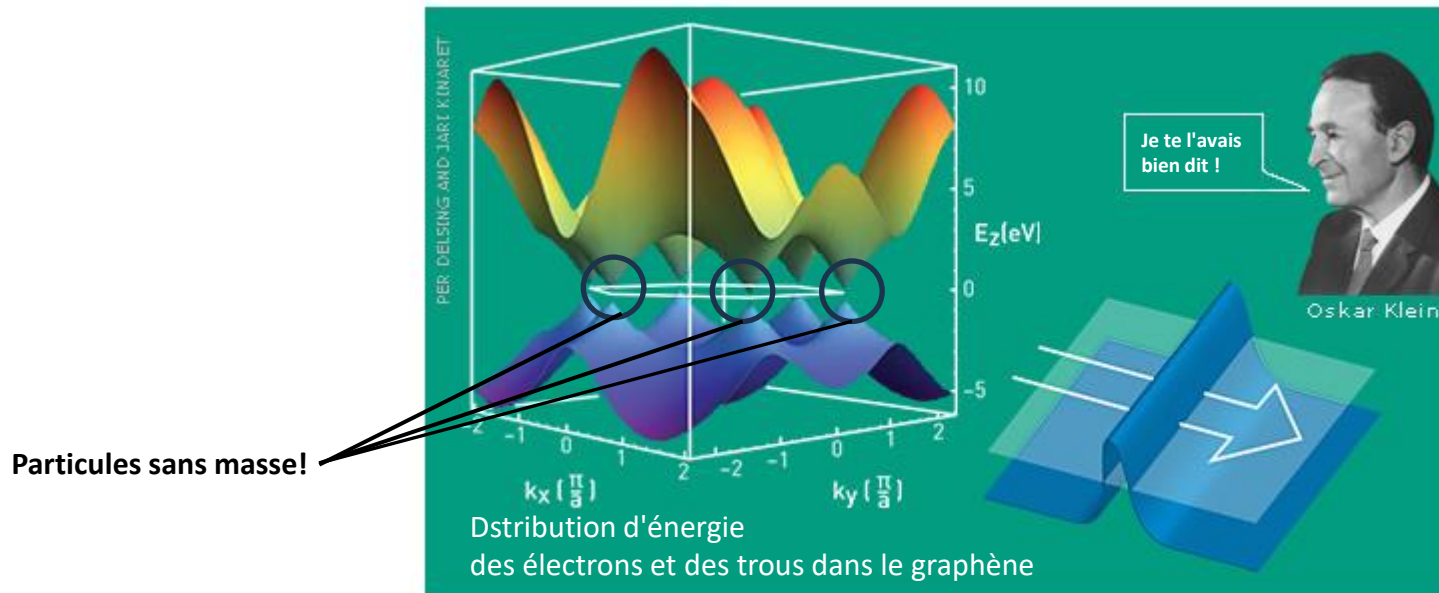
- Le matériau le plus mince qui n'ait jamais existé et le plus résistant
- Il est presque complètement transparent
- En tant que conducteur de chaleur, il surpasse les métaux bons conducteurs tels que l'argent et le cuivre.
- Il est si solide qu'un hamac de 1 m<sup>2</sup>, pas plus lourd qu'un poil de chat, pourrait supporter le poids d'un chat de taille moyenne sans se casser





## Le graphène: propriétés extraordinaires

- En tant que conducteur d'électricité, il performe aussi bien que le cuivre
- Il accueille des particules sans masse voyageant à une vitesse constante de 1/3 de la vitesse de la lumière !

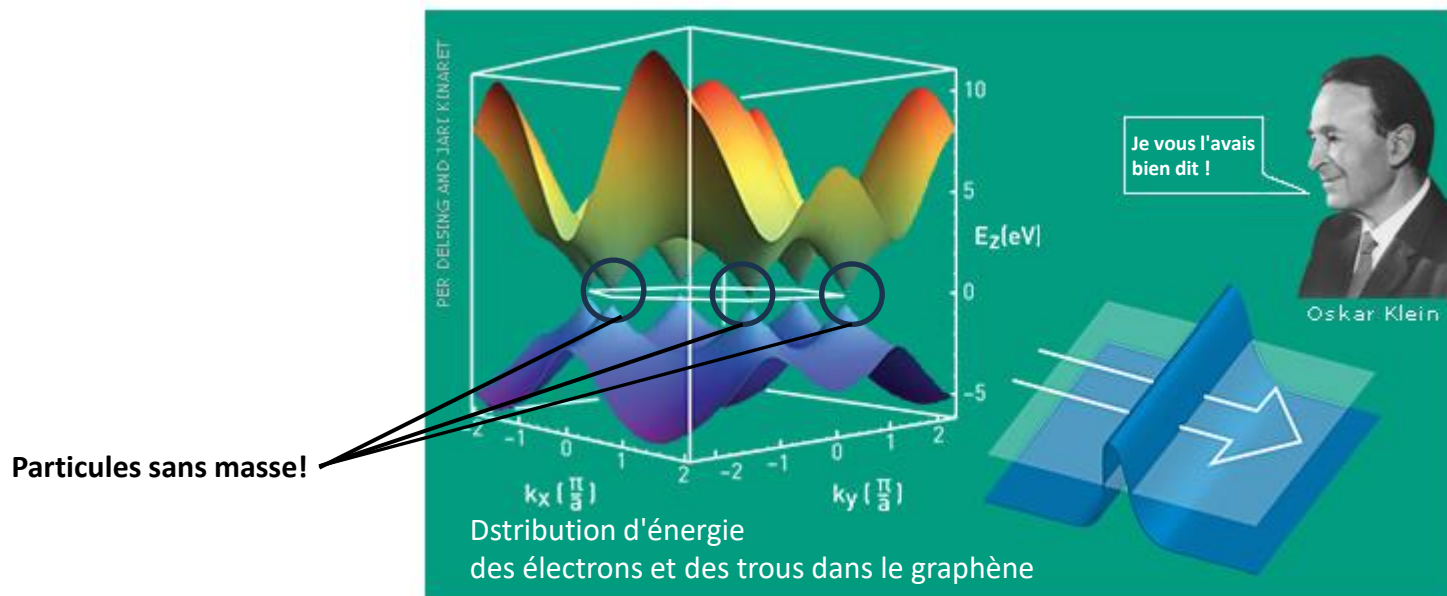


Adapté de <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/illustrated-information/>



## Le graphène: propriétés extraordinaires

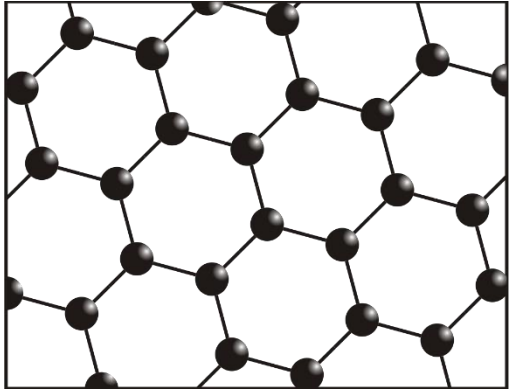
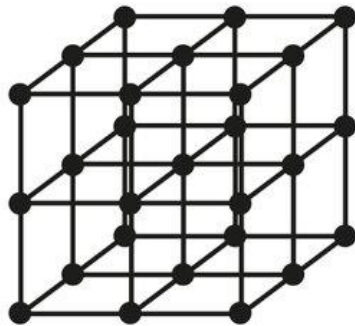
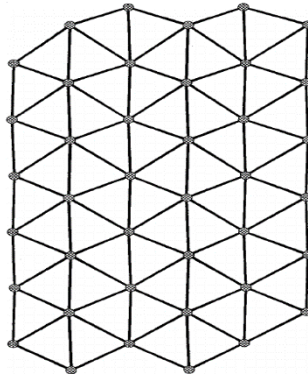
- En tant que conducteur d'électricité, il performe aussi bien que le cuivre
- Le graphène permet de vérifier expérimentalement quelques effets quantiques tels que l'effet tunnel de Klein, prédit en 1929



Adapté de <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/illustrated-information/>

Idée pour exposé IV: Pourquoi une structure hexagonale?

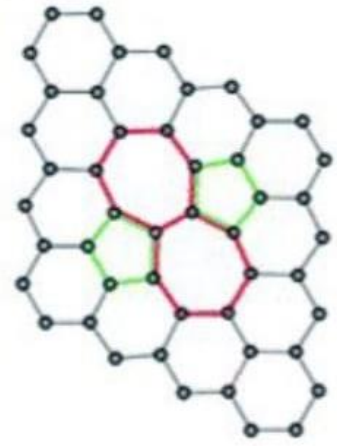
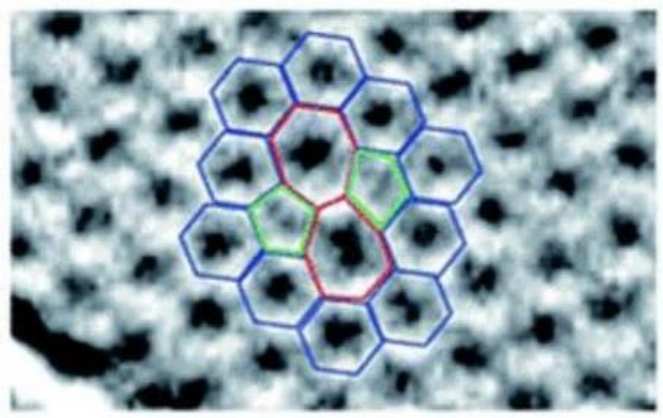
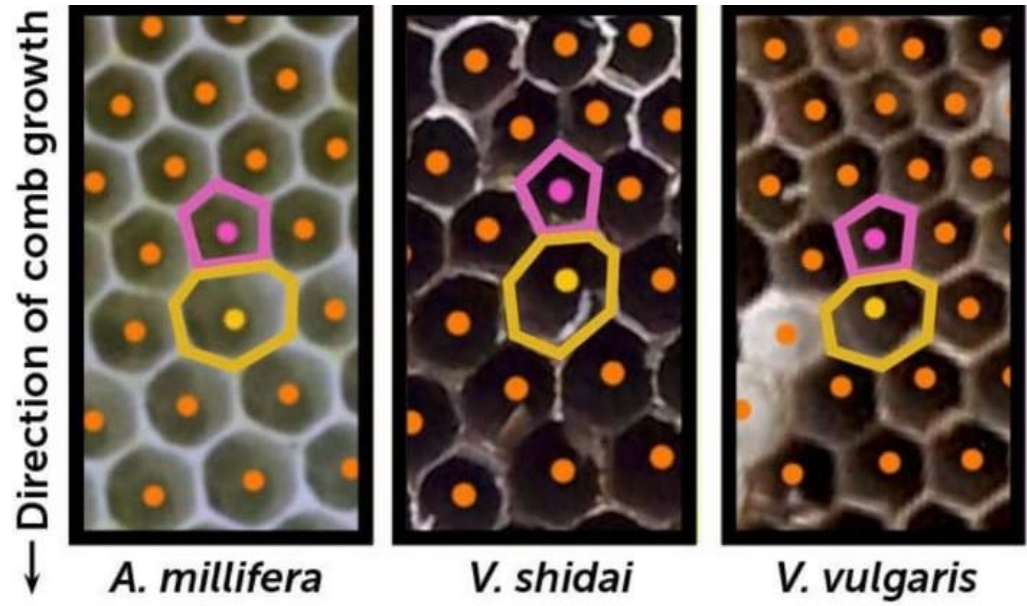
Similitudes entre le graphène et un nid d'abeille : une question de géométrie



Polygone	Are	Périmètre
Triangle équilatéral	1	$\frac{6}{\sqrt{3}} \approx 4.55$
Carré	1	4
Hexagone régulier	1	$6 \cdot \sqrt{\frac{2}{3 \cdot \sqrt{3}}} \approx 3.72$

Idee pour exposé IV: Pourquoi une structure hexagonale?

Similitudes entre le graphène et un nid d'abeille : une question de défauts



## La supraconductivité: La révolution froide

- Un matériau supraconducteur conduit le courant électrique sans aucune résistance

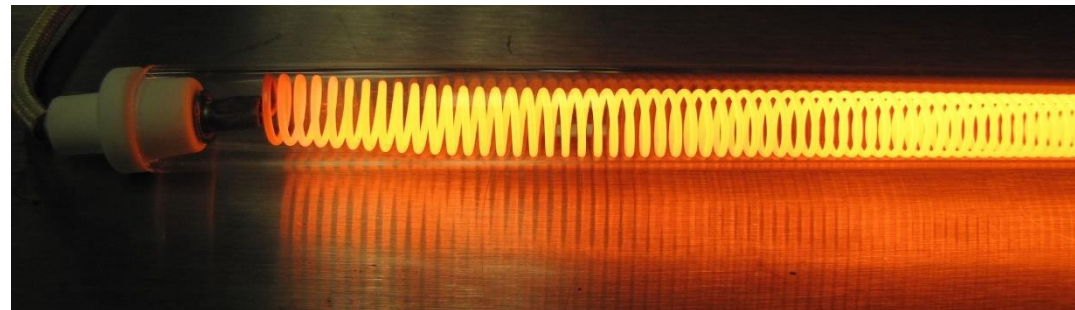
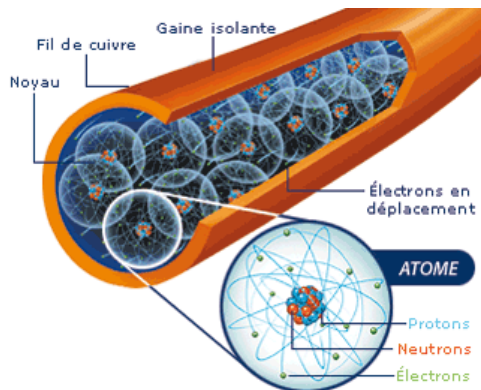


**Lévitation d'un aimant placé au-dessus d'une pastille de matériau supraconducteur refroidi dans de l'azote liquide à - 196 °C. Crédits: CNRS LE JOURNAL**

## La supraconductivité: La révolution froide

### Qu'est-ce que la résistance électrique?

- De manière générale, le courant électrique est assuré par le mouvement des charges
- Les charges en mouvement interagissent avec les atomes constitutifs du milieu — i.e. un câble électrique — ce qui constitue un frein, une résistance à leurs déplacements
- Pour transférer un courant, une puissance supplémentaire est nécessaire. Cette puissance supplémentaire est dissipée sous forme d'énergie thermique



Échauffement par effet Joule de la résistance d'un grille-pain



## La supraconductivité: La révolution froide

Une exception quantique: La danse supraconductrice des électrons

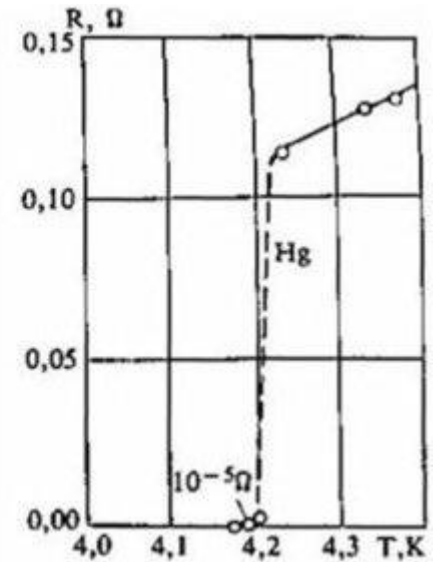
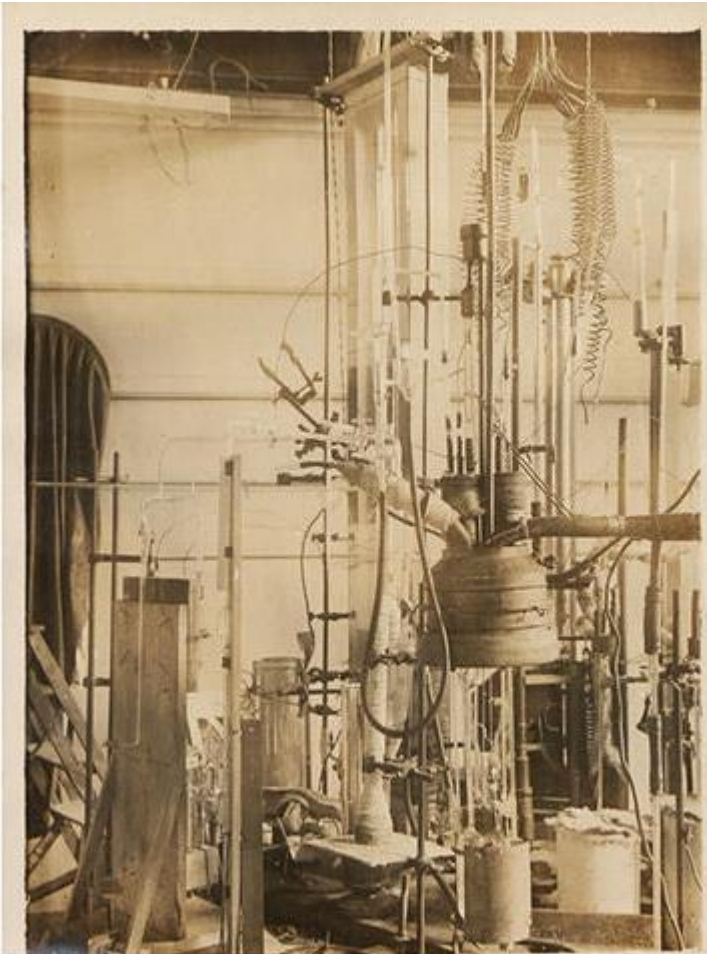
- À très basses températures, les électrons dans un supraconducteur forment des paires appelées paires de Cooper
- Ces paires se comportent comme une seule entité. Elles se déplacent sans aucune collision avec les atomes du milieu, i.e., il n'y a pas de résistance ni de dissipation.
- L'électricité peut circuler indéfiniment sans perte d'énergie.



Les électrons (-) qui se repoussent normalement peuvent former des paires grâce à un intermédiaire - les protons (+). Crédits: *Inside Science The Superconducting Dance Of Electron Pairs*

## La supraconductivité: La révolution froide

## Un peu d'histoire



En 1911, le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes découvre en refroidissant du mercure à  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$  grâce à de l'hélium liquide que la résistance électrique du métal devient nulle.

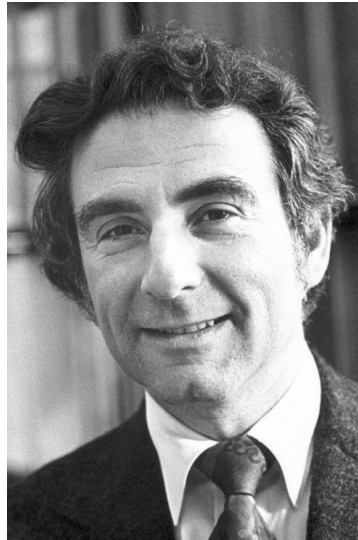
## La supraconductivité: La révolution froide

### Un peu d'histoire

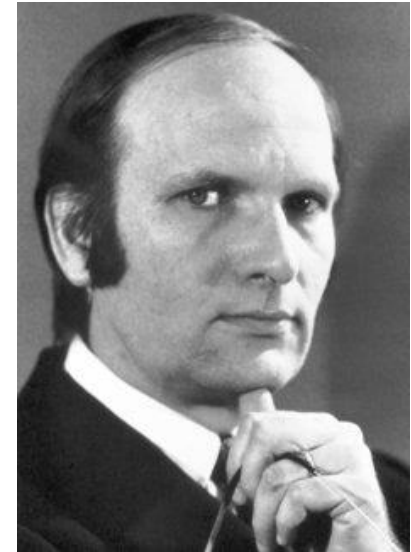
- En 1957 le phénomène est expliqué par trois physiciens américains qui proposèrent la théorie BCS



**John Bardeen**



**Leon Neil Cooper**



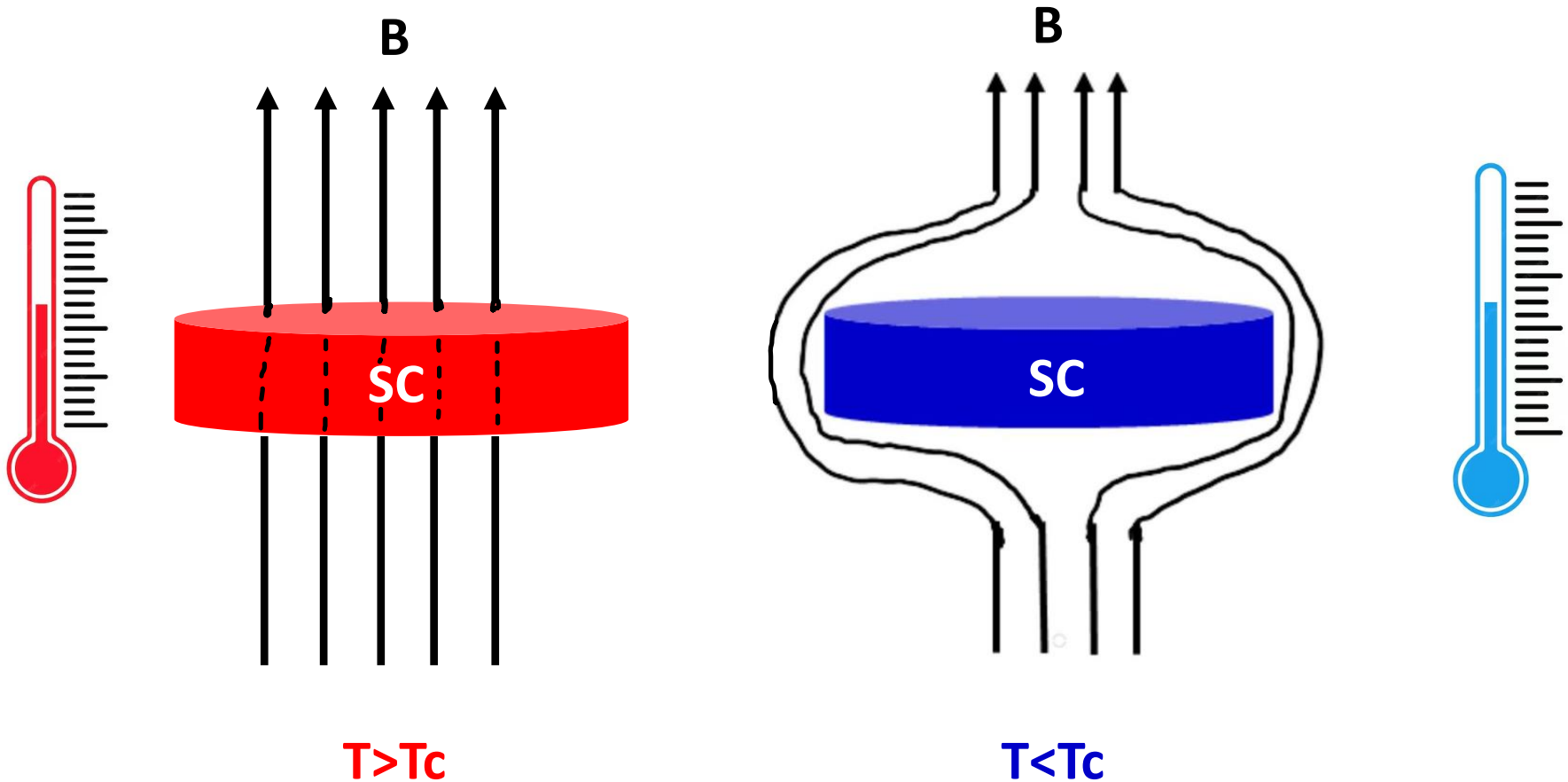
**Robert Schrieffer**



## La supraconductivité: La révolution froide

## L'effet Meissner: la lévitation magnétique

- Lorsqu'un supraconducteur est refroidi à une très basse température (en dessous de  $T_c$ ), le matériau expulse complètement les champs magnétiques de son intérieur



## La supraconductivité: La révolution froide



**Lévitacion d'un aimant placé au-dessus d'une pastille de matériau supraconducteur refroidi dans de l'azote liquide à - 196 °C. Crédits: CNRS LE JOURNAL**

## La supraconductivité: La révolution froide

### Applications de la lévitation magnétique



**Train à sustentation magnétique à Japon**

La supraconductivité: La révolution froide

Applications de la lévitation magnétique



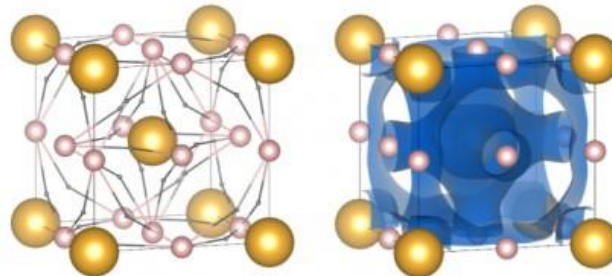
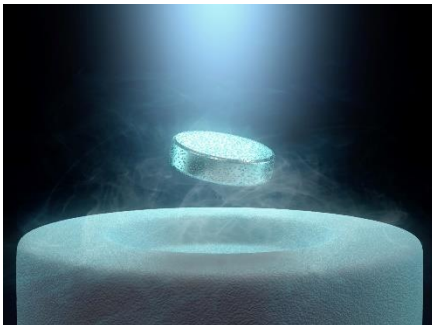
**L'imagerie par résonance magnétique**

## La supraconductivité: La révolution froide

Enjeux et futur: supraconductivité à haute température

Supraconducteurs  
classiquesSupraconducteurs  
à haute température

Température ambiante

  
 $-269\text{ °C}$  $-135\text{ °C}$  $0\text{ °C}$ 

## La lévitation d'une grenouille: Le prix Ig Nobel de physique 2010

**Andre Geim**



© The Nobel Foundation.  
Photo: U. Montan



Une grenouille en lévitation diamagnétique

La lévitation d'une grenouille: Le prix Ig Nobel de physique 2010



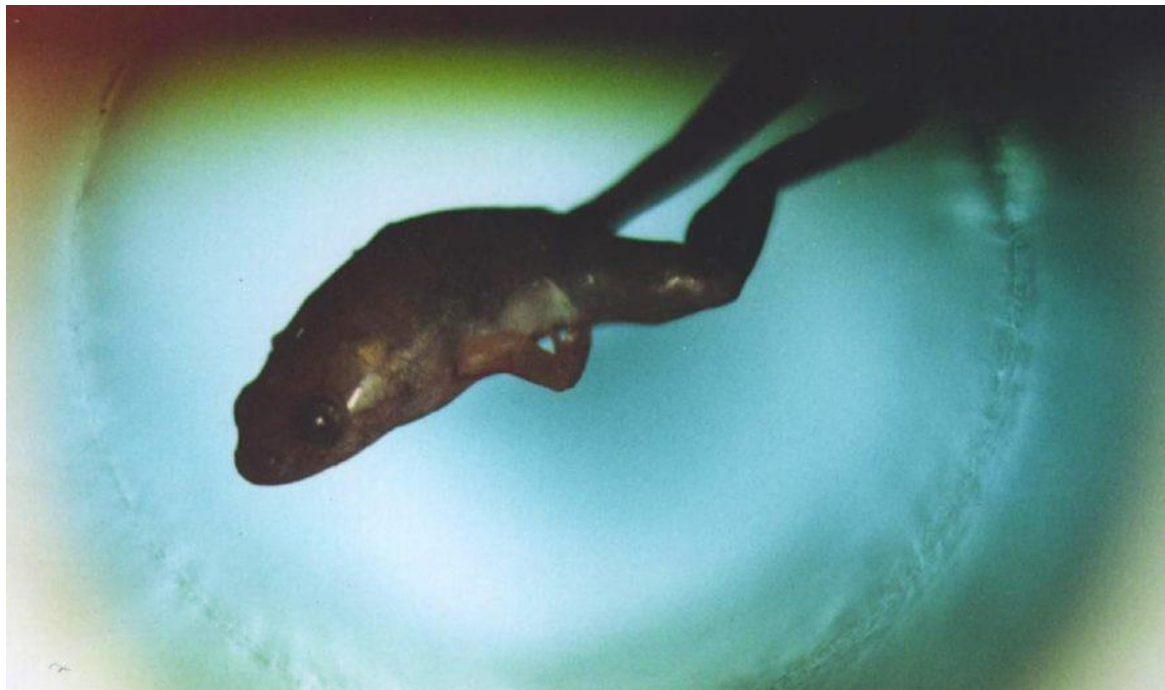
Crédits: AP Archive



## La supraconductivité: La révolution froide

**« La supraconductivité est l'une des rares manifestations à l'échelle macroscopique d'un effet de physique quantique »**

Cyril Proust



Une grenouille en lévitation diamagnétique