

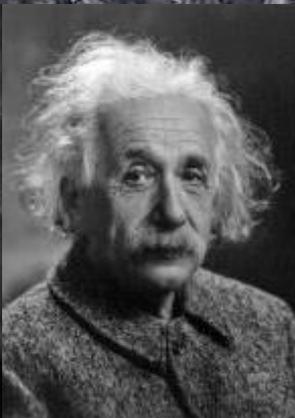
# Quelques célébrités au congrès de Solvay de 1927



En reconnaissez-vous ?



Planck



Einstein



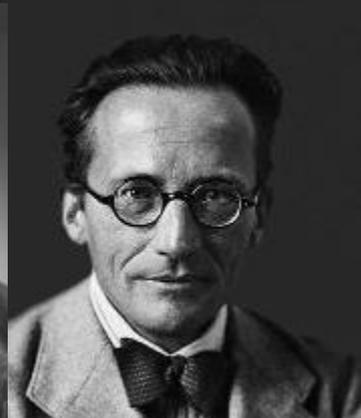
Bohr



De Broglie



Pauli



Schrödinger

**Ils sont à l'origine de la mécanique quantique**

**Ils ont tous reçu le prix Nobel**

# LA MECANIQUE QUANTIQUE

Le monde étrange des particules et quelques applications





# LA MECANIQUE QUANTIQUE

## Le monde étrange des particules et quelques applications

### 1. Qu'est-ce que c'est ?

- 1.1 Une description du comportement de l'atome et des particules
- 1.2 L'atome et les particules élémentaires
- 1.3 Pourquoi cette mécanique est-elle quantique ?

### 2. Pourquoi est-elle étrange ?

- 2.1 Une double identité
- 2.2 Des états insaisissables
- 2.3 Le mystère des particules jumelles

### 3. A quoi sert-elle ?

- 3.1 Le domaine de la mécanique quantique
- 3.2 Les applications dans notre quotidien
- 3.3 Les applications futures : la recherche



# 1. Qu'est-ce que c'est ?

## 1.1 Une description du comportement de l'atome et des particules

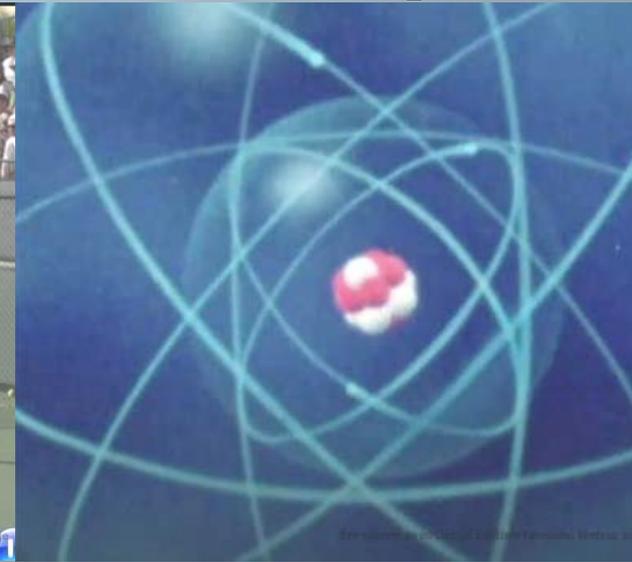


Les scientifiques ont élaboré des lois décrivant les phénomènes dans :

**L'Univers**

**Notre environnement**

**L'infiniment petit**



**La relativité générale**

Einstein

**La mécanique classique**

Galilée Newton

**La mécanique quantique**

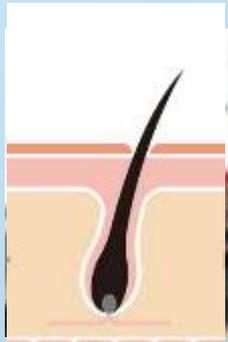
Planck Bohr Schrodinger...

**La mécanique quantique est nécessaire pour**

**Comprendre notre environnement: la matière, les couleurs, les étoiles, l'Univers...**

**Concevoir la technologie de pointe : communication, ordinateurs, lasers, diodes...**

**La mécanique quantique décrit le comportement des objets microscopiques, les particules élémentaires : atomes, électrons, photons... (taille moyenne : 1 millionième de mm)**



**Un cheveu :  
0,1 millimètre**



**1 micromètre  
0,001 mm**



**1 nanomètre  
0,000 001 mm**



**0,1 nanomètre  
0,000 000 1 mm**

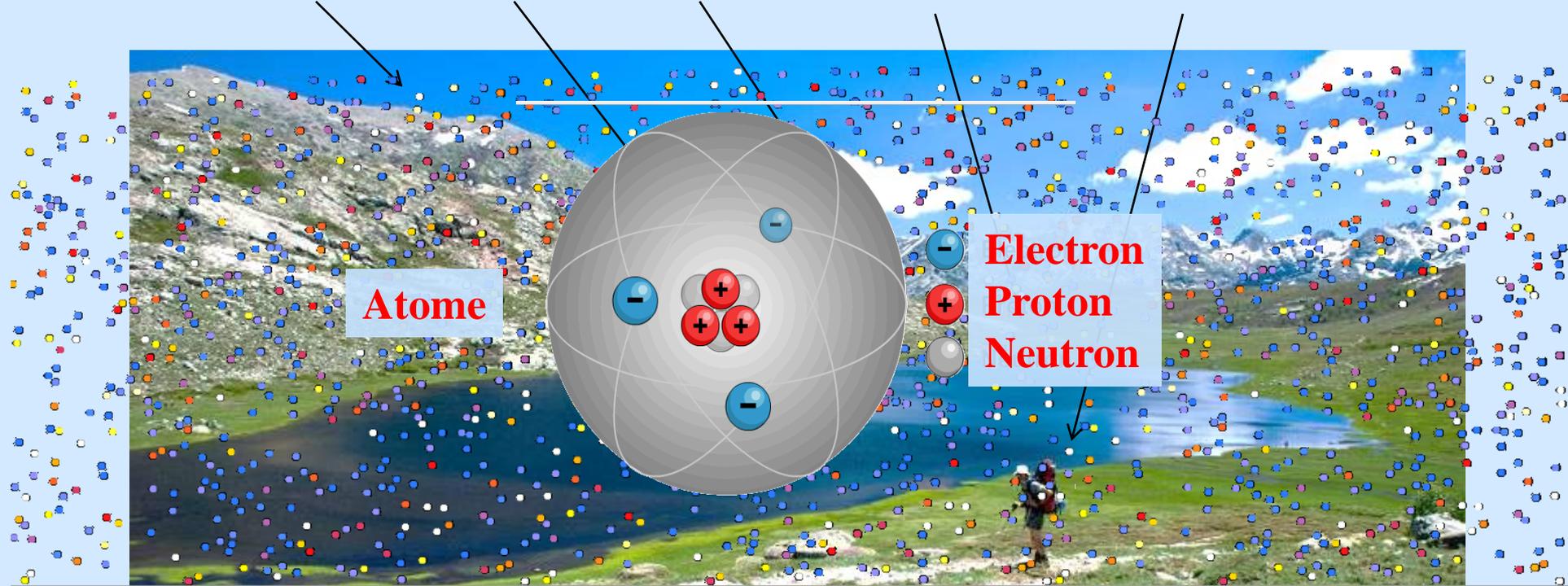
**Les propriétés des particules sont étranges, contre intuitives, probabilistes  
 Il est presque impossible de les voir et de se représenter leur comportement**

**Bohr : « Ceux qui ne sont pas choqués quand ils rencontrent pour la première fois la théorie quantique ne l'ont probablement pas comprise »**

## 1.2 L'atome et les particules élémentaires

🌸 Tout ce qui nous entoure est formé d'atomes, de **particules élémentaires**

L'atmosphère, l'eau, les roches, les végétaux, les animaux...



La lumière est aussi constituée de particules élémentaires : les **photons**



# L'atome est plein de « vide »

Echelle de  
grandeur



Une tête d'épingle

Noyau de l'atome : 2 mm    **X 100 000**    Zone de circulation des électrons : 200 m

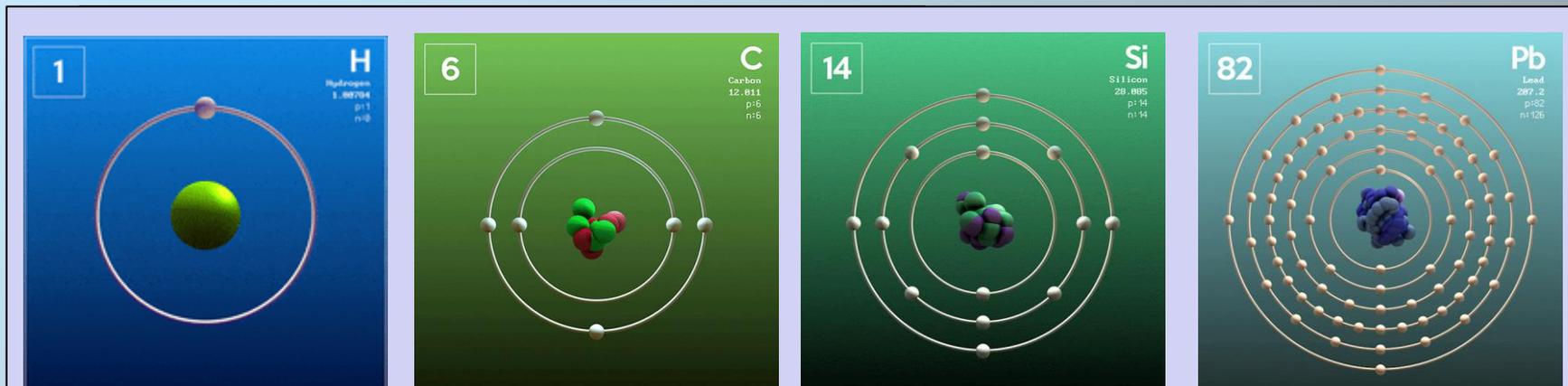
Donc les atomes sont pleins de vide !

Pourquoi n'est-il pas possible de  
« passer » à travers la matière ?



# 1.3 Pourquoi cette mécanique est-elle quantique?

 **Quanta (quantum) = petites quantités discontinues**



The image displays four simplified atomic models arranged horizontally. Each model shows a central nucleus (represented by a cluster of red and blue spheres) and several concentric circular orbits (shells) containing small white spheres representing electrons. The models are labeled with their atomic number in a white box in the top left corner and their chemical symbol and name in the top right corner. From left to right: Hydrogen (H, atomic number 1), Carbon (C, atomic number 6), Silicon (Si, atomic number 14), and Lead (Pb, atomic number 82). The background of each model is a gradient color: blue for H, green for C, dark green for Si, and light blue for Pb.

*Cette représentation de l'atome est simplifiée*

**Dans l'atome, les électrons se positionnent autour du noyau sur différents niveaux (d'énergie) bien définis**

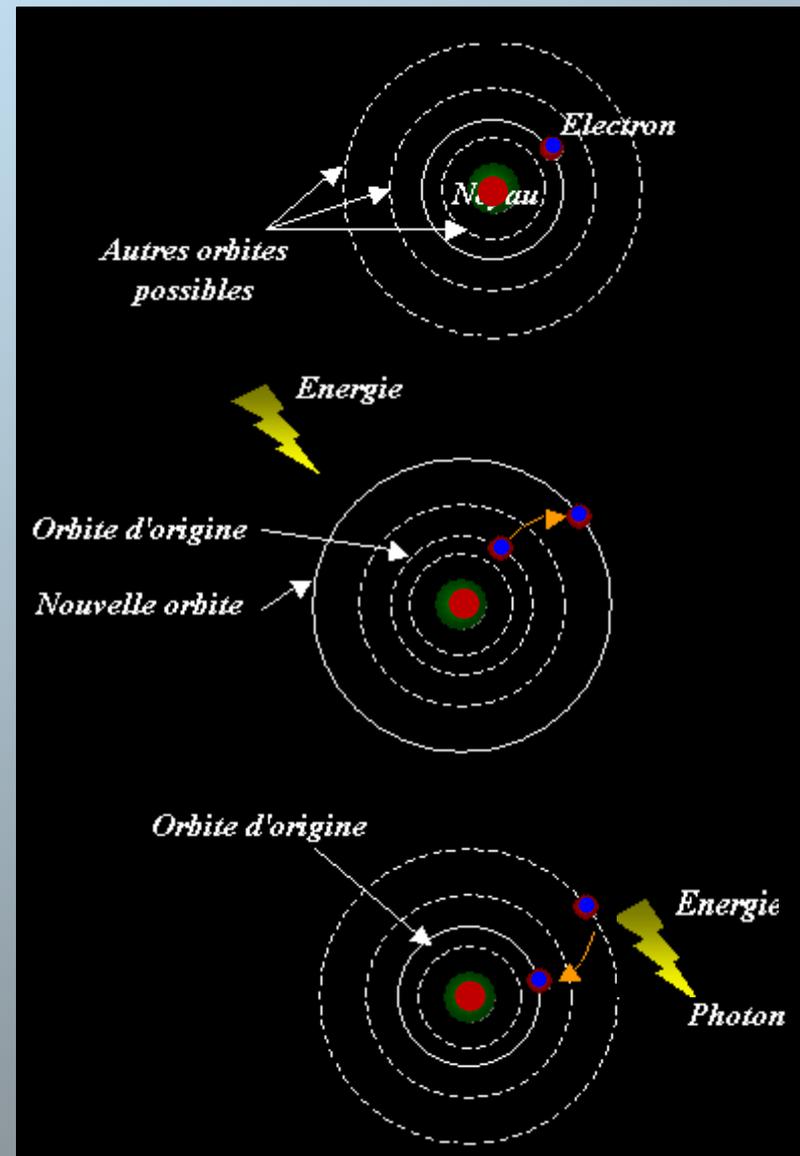
**Les électrons ne peuvent pas être entre 2 niveaux consécutifs  
Ils peuvent passer d'un niveau à un autre instantanément**

## L'atome quantique de Bohr

A l'état d'équilibre les électrons d'un atome circulent dans des zones précises, des positions discontinues d'équilibre

Apport d'**énergie** extérieur par un **photon** : l'électron **absorbera** juste la quantité nécessaire pour changer sa « trajectoire »

Retour de l'électron à son état initial : L'électron **émet** un **photon** ayant une énergie juste égale à celle absorbée (un quanta)



Changement de niveau = une **absorption** ou une **émission** d'un quanta d'énergie  
Chaque énergie est reliée à une longueur d'onde (une couleur dans le visible)

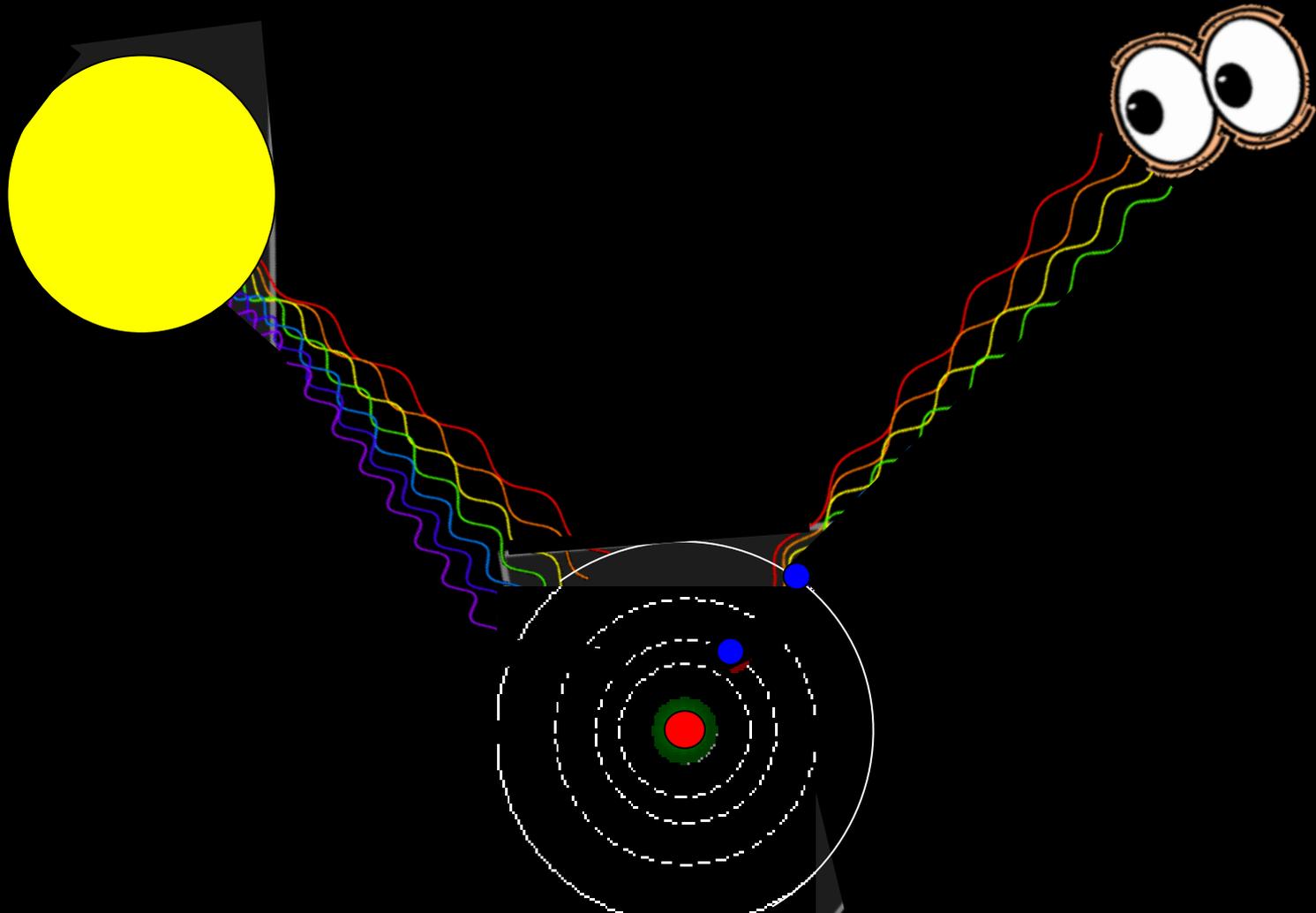
**Conséquence : nous voyons le monde en couleurs**

**La lumière du soleil est composée de plusieurs couleurs**

**Chaque couleur est caractérisée par une longueur d'onde (énergie)**

**Les objets sont constitués de différents atomes, avec des électrons**

**Selon l'atome, une énergie (couleur) sera absorbée par l'électron**



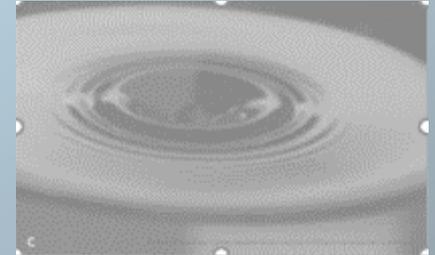
## 2.1 Une double identité : dualité onde-corpuscule

Deux domaines d'étude distincts en physique :

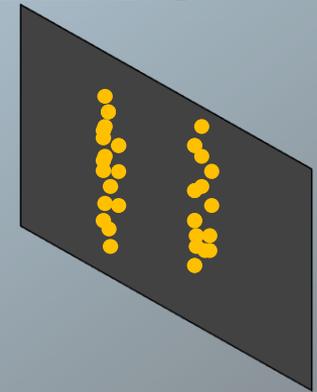
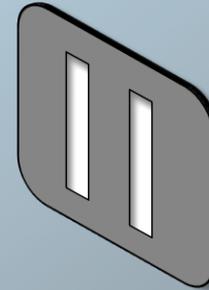
Les corps solides



Les ondes



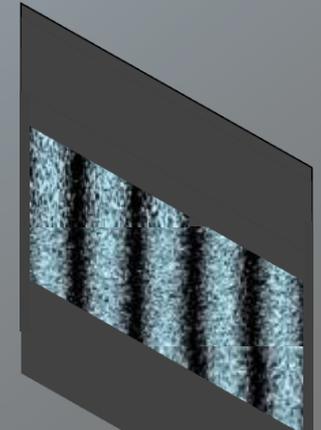
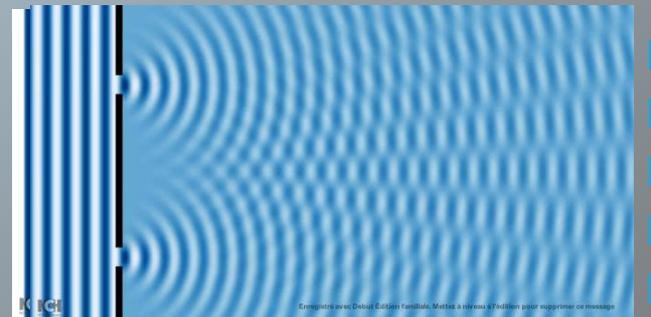
Expérience 1 : objets lancés sur un mur percé de deux fentes  
On obtient deux zones d'impact



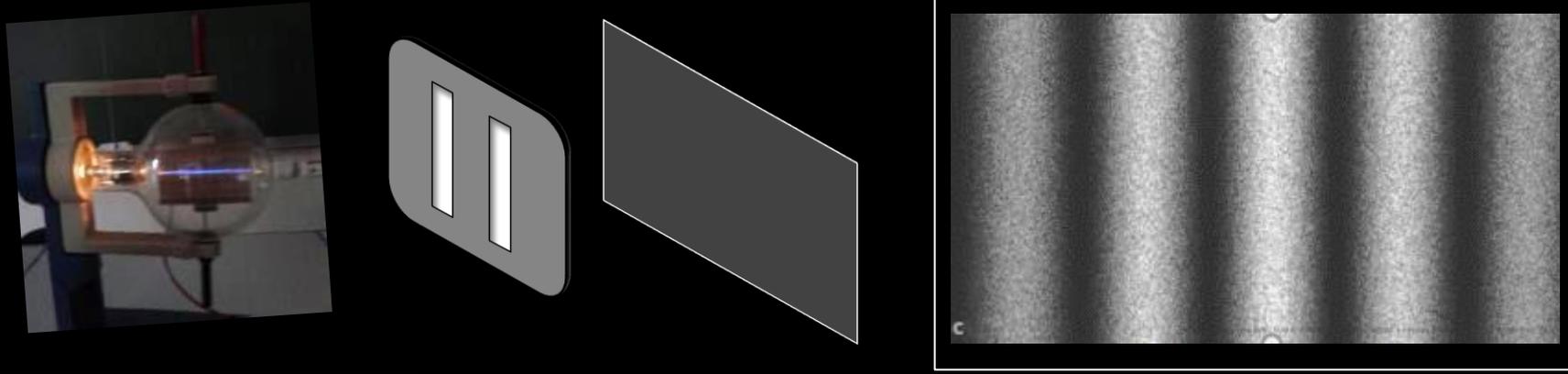
Expérience 2 : onde sur un mur comportant deux fentes

On observe une alternance :  
de zones d'intensité maximum  
de zones d'intensité minimum

On obtient des interférences

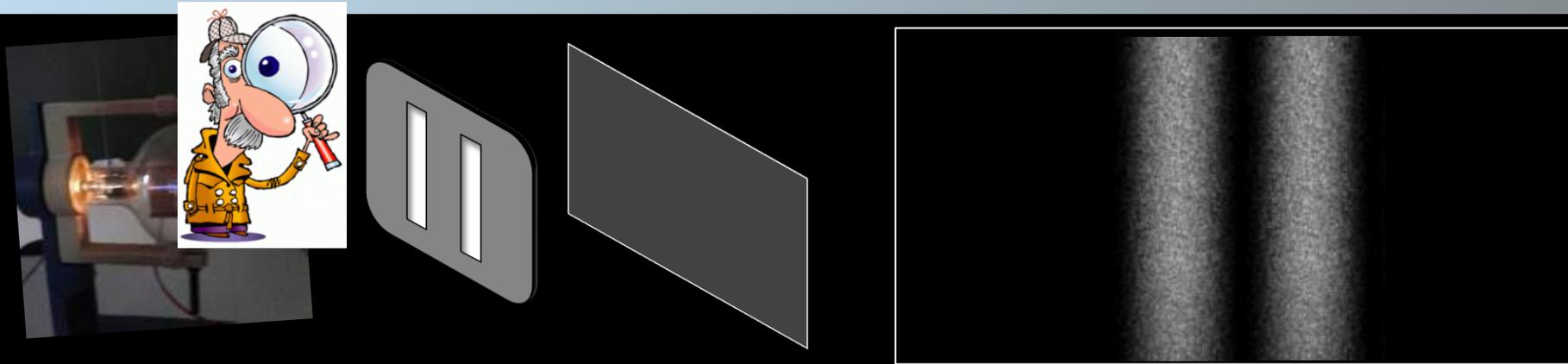


### Expérience 3 : électrons lancés un par un, par deux fentes, sur un écran



Les électrons (particules avec une masse) se comportent comme des ondes  
L'électron (onde) passe par les deux fentes à la fois puis interfère avec lui même

### Expérience 4 : même expérience mais en analysant le passage (mesure)



Chaque électron est « forcé » en particule et choisit une des fentes  
L'expérience a été réalisée avec des photons, des atomes, des molécules...

# Une nouvelle description des particules élémentaires



**Une particule est une onde (un nuage)**

**qui se « réduit » en une corpuscule**

**lorsqu'on l'analyse (mesure)**



**L'onde ou la « fonction d'onde »  
décrit la zone probable de présence de la particule  
lorsqu'elle se « matérialisera » en corpuscule**

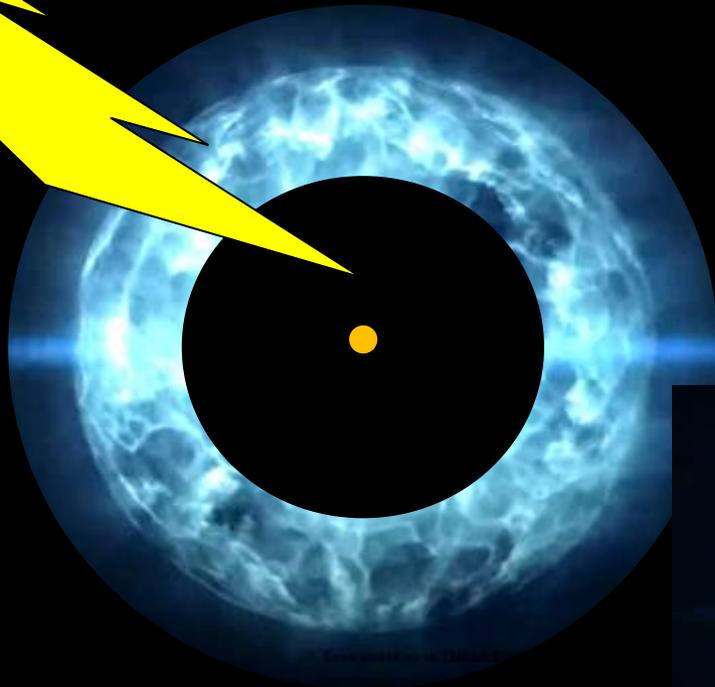




## L'atome quantique de Schrodinger

Atome : avec (fonction d')onde de présence d'un électron

Atome : avec deux niveaux d'énergie, deux ondes, d'un même électron



c

L'atome n'est pas exactement constitué de vide  
Il n'est pas possible de passer à travers la matière

## Analogie musicale :



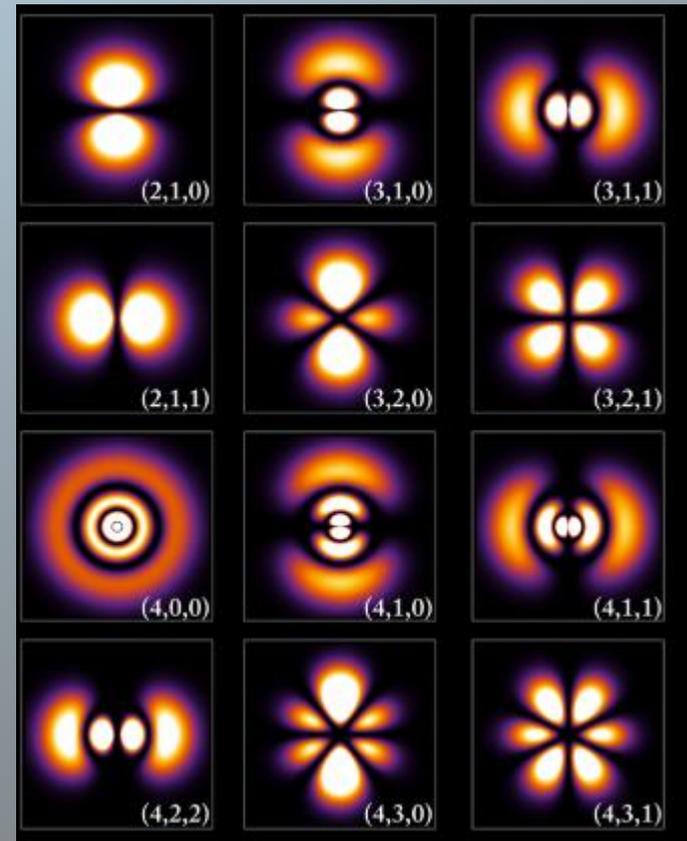
Pour une note donnée, la corde ne pourra vibrer que de manières particulières (harmoniques)

A l'intérieur de la guitare, chaque note aura une vibration précise décrite par une onde dont la forme dépendra du son

## L'atome quantique :

A l'intérieur des atomes, chaque électron aura une «vibration» précise décrite par une (fonction d') onde dépendant de son énergie

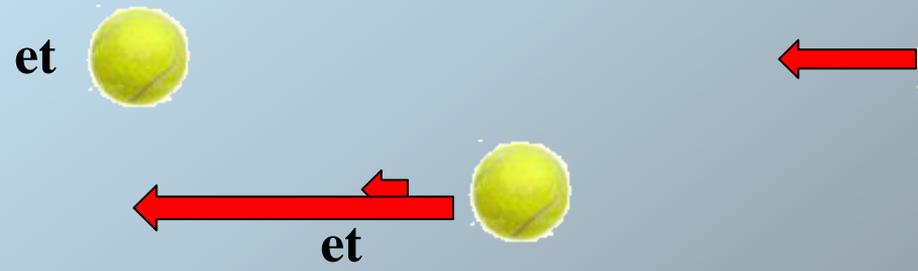
L'atome et ses couches d'électrons qui se superposent



## 2.2 Des états insaisissables : principe de superposition

### 🍷 Cas d'un objet classique : une balle de tennis

Une position, trajectoire, vitesse...  
Ces paramètres sont calculables, reproductibles  
Les mesures sont déterminées avec précision



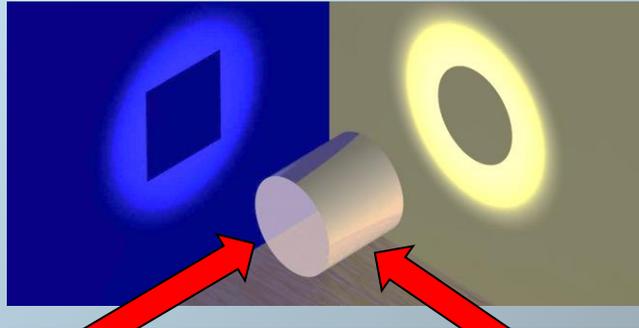
### 🍷 Cas d'un objet quantique : une balle de tennis quantique (particule, électron...)

Plusieurs positions en même temps, plusieurs « états » **à la fois**  
La superposition des états : position, vitesse, niveau d'énergie, sens...  
La superposition des états est une propriété fragile, facilement détruite

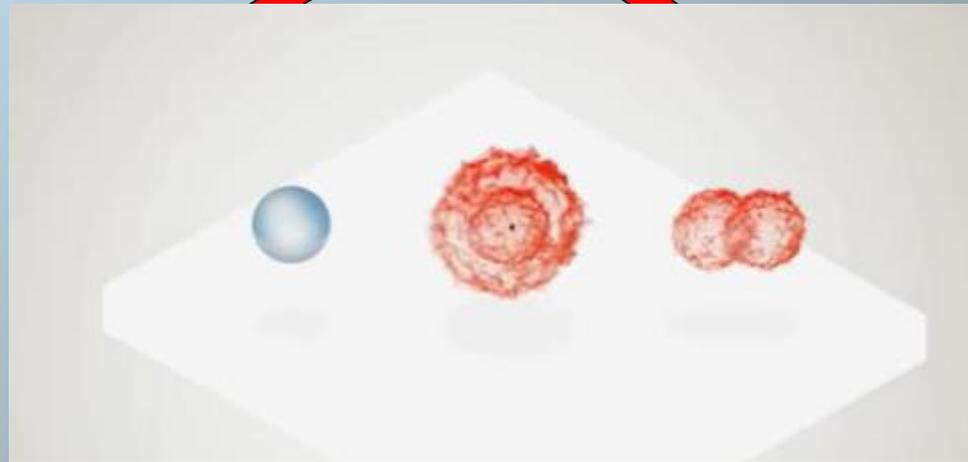
## La réduction des états quantiques

**En mécanique quantique : une particule peut avoir plusieurs états superposés**  
**Une mesure (observation) la figera, **au hasard**, dans un des états précédents**

**Une analogie :**



**Une particule :**



**Aspects superposés :**

**2 sens 2 niveaux d'énergie 2 positions**

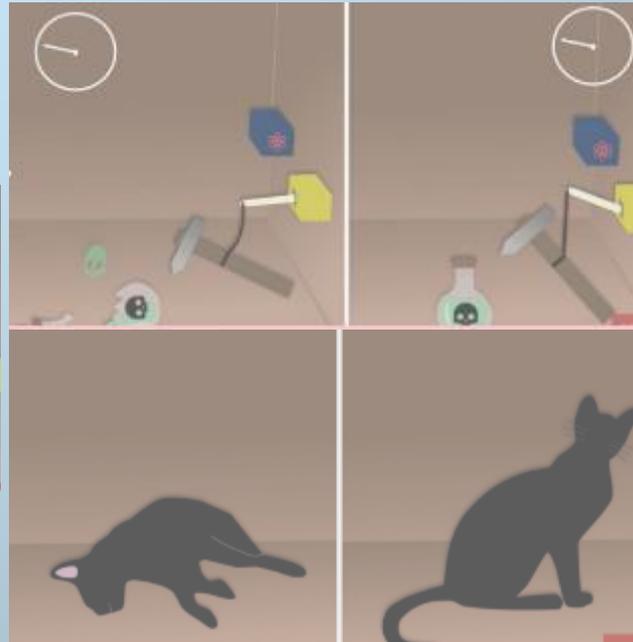
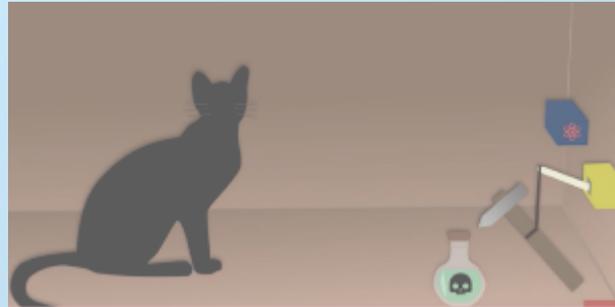
**La mesure, l'observation « réduit » l'état de l'objet quantique définitivement le force à choisir instantanément un état parmi ceux qui étaient superposés**

# Une illustration célèbre : le chat de Schrödinger

## Une histoire de (chat) mort-vivant



**Dispositif :**



**Tant que la boîte n'est pas ouverte,  
le chat est mort (et) vivant à la fois ?**



**Dans la réalité, le chat n'est pas dans les deux états à la fois !**



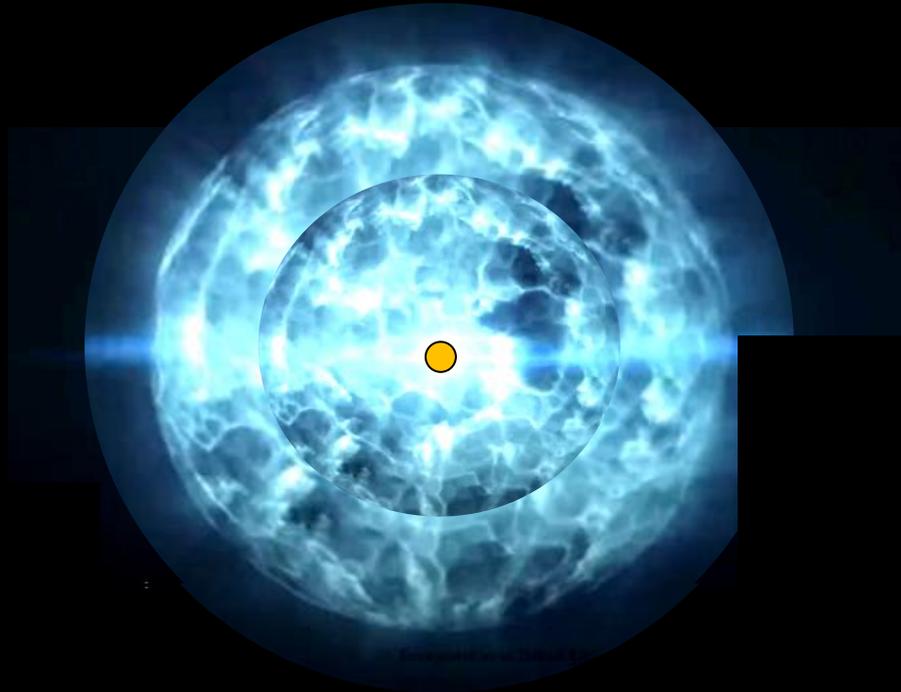


## L'atome quantique de Schrodinger

**Atome : avec (fonction d')onde de présence d'un électron**

**Atome : avec deux niveaux d'énergie, deux ondes, d'un même électron**

**Atome : avec une superposition de deux niveaux d'énergie, de deux ondes associées à deux états d'un même électron**



## 2.3 Le mystère des particules jumelles : l'intrication

**Il est possible de créer ensemble des paires de particules élémentaires « jumelles »  
Chacune ayant des propriétés quantiques : superposition d'états quantiques...  
Même très éloignées, ces particules « intriquées » forment une seule entité :**

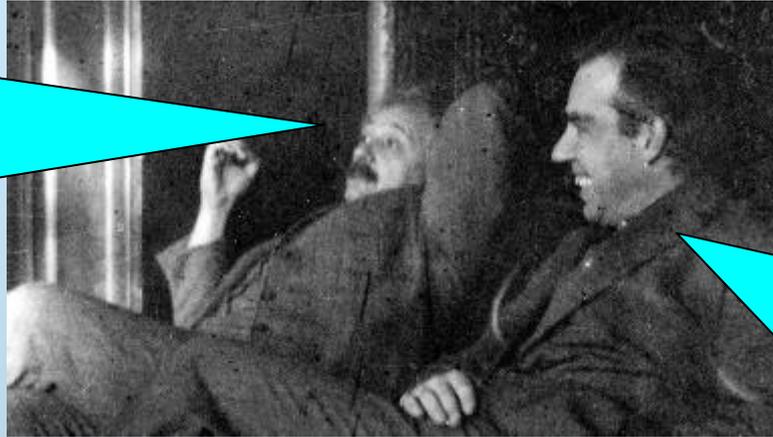


**Une mesure sur l'une fixe dans le même état quantique  
sa « jumelle », instantanément, sans délai, et à n'importe quelle distance**



**Pourquoi ? L'information peut-elle voyager plus vite que la lumière ?  
Einstein ne peut l'admettre car c'est en contradiction avec la relativité**

**Einstein : bof !  
Les particules  
transportent  
avec elles une  
information  
(variables cachées)**



**Bohr : non !  
C'est une  
propriété  
appartenant  
à ce type de  
particules intriquées**

**La problème subsistera pendant près de 50 ans**

**Alain Aspect réfute expérimentalement  
l'hypothèse d'Einstein (en 1982) :**



**le comportement de particules intriquées (photons) montre qu'elles sont  
directement reliées quelle que soit la distance qui les sépare**

**Cette expérience sera reproduite sur des distances de plus en plus grandes  
Avec d'autres particules, des atomes et même des molécules !**



## Conclusion : les particularités étranges de la mécanique quantique

**Dualité onde – corpuscule** : une particule est à la fois onde et corpuscule  
Cette (fonction d') onde traduit une zone probable de présence de la particule

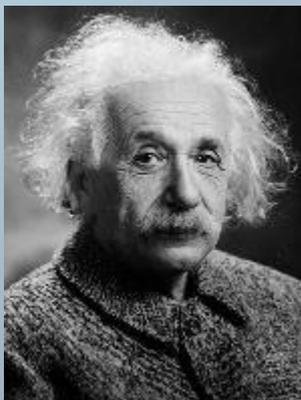
**Superpositions** d'états quantiques, sous certaines conditions :  
une particule peut avoir plusieurs états « à la fois » (position, vitesse, énergie...)

**Réduction** des états quantiques : si on effectue une mesure, le résultat sera unique. Il sera « choisi » instantanément, au hasard parmi ceux possibles

**Intrication** : deux particules intriquées peuvent se transmettre une information, un état, instantanément, quelle que soit la distance qui les sépare

Einstein : « *Dieu ne joue pas aux dés !* »

Bohr : « *Mais qui êtes-vous pour dire à Dieu ce qu'il doit faire* »



Affrontement de deux écoles



## 3. A quoi sert-elle ?

### 3.1 Le domaine de la mécanique quantique

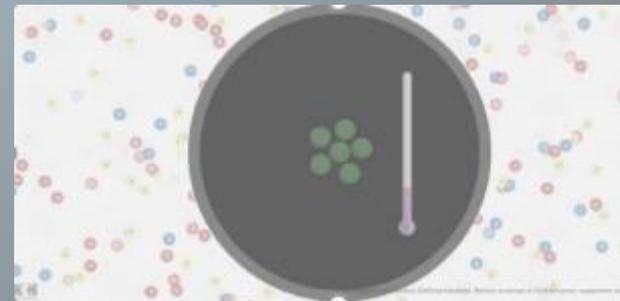
🔗 La décohérence ou la fragilité des états quantiques

La superposition des états quantiques est détruite par l'environnement



**Serge Haroche**  
Nobel 2012

En général la décohérence intervient très rapidement : quelques milliardièmes de s



Pour étudier les particules quantiques : augmenter le temps de décohérence il est nécessaire de réduire l'influence de ces paramètres perturbateurs :

Isoler de l'environnement

Abaisser la température



## L'utilisation abusive de la mécanique quantique

Elle ne s'applique pas au monde macroscopique



Elle ne s'applique qu'aux particules **microscopiques**

Le terme « quantique » est inapproprié pour :

### ➤ Les thérapies, les médecines quantiques

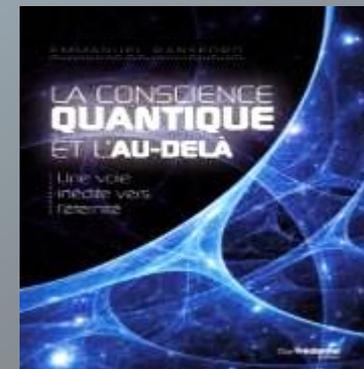
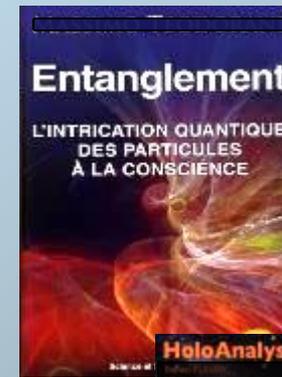
Dualité onde-particule → dualité corps esprit

Rôle de l'observateur → la conscience peut influencer la matière

### ➤ La voyance, le paranormal quantique

Intrication → tout système physique serait en relation avec tout l'Univers

→ Possibilité de capter des messages venus d'ailleurs, explication de la télépathie



## 3.2 Les applications actuelles

### La maîtrise des électrons

#### ➤ Certains matériaux sont conducteurs :

Le cuivre : 29 électrons sur différentes couches

1 électron dans la couche externe « électron libre »

Le courant électrique est une migration d'électrons

#### ➤ D'autres matériaux sont isolants :

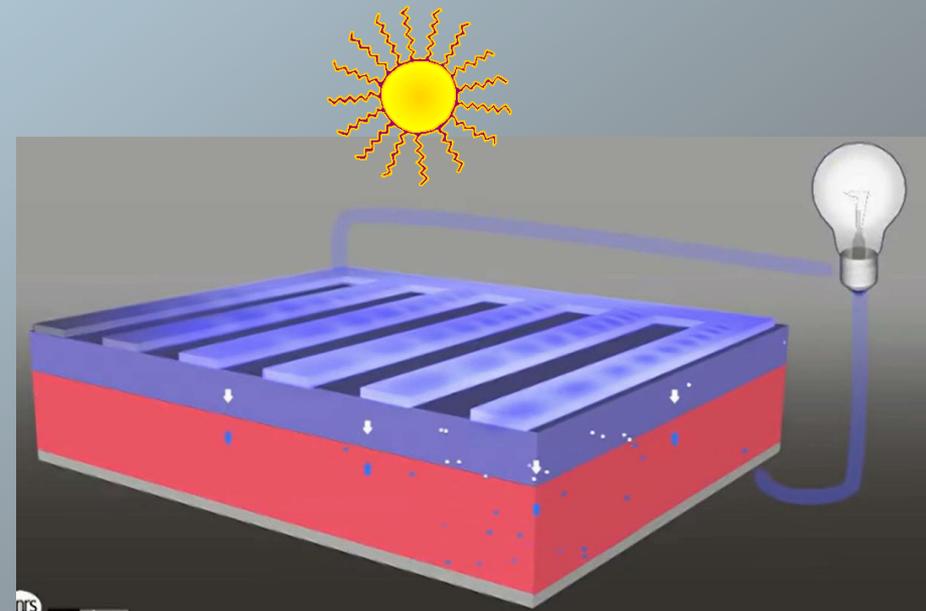
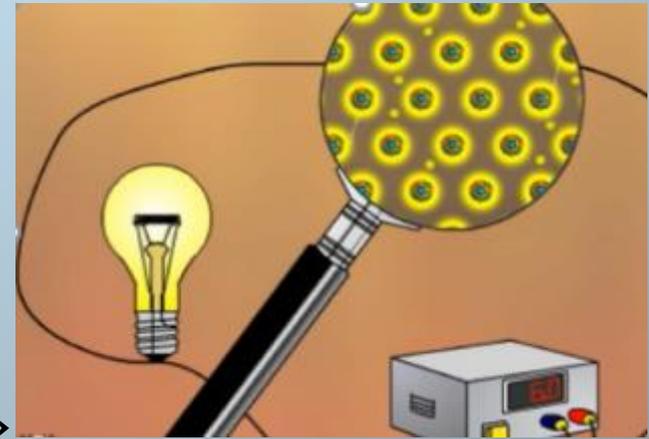
Les couches externes d'électrons  
sont « saturées »

#### ➤ D'autres sont semi-conducteurs :

Ils permettent de « manipuler »  
le passage des électrons

#### ➤ D'autres matériaux permettent de créer du courant :

L'effet photo électrique (les panneaux solaires)



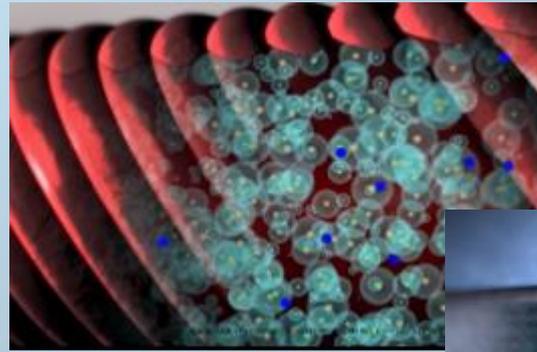
➤ D'autres matériaux peuvent devenir supraconducteurs

La circulation des électrons induit un échauffement (perte d'énergie) dans le conducteur classique

A très basse température ( $-269^{\circ}$ ) les supraconducteurs conduisent le courant sans aucune résistance : pas de pertes, pas d'échauffement

Il est alors possible de réaliser des électroaimants puissants sans échauffement

- Pour l'accélérateur du CERN
- Pour la technologie de l'IRM
- Pour la fusion nucléaire (ITER)...



➤ D'autres matériaux permettent de créer une lumière cohérente, le laser :  
les photons ont la même longueur d'onde (couleur) et la même direction



# Principe du laser :

les photons ont la même longueur d'onde (couleur) et la même direction

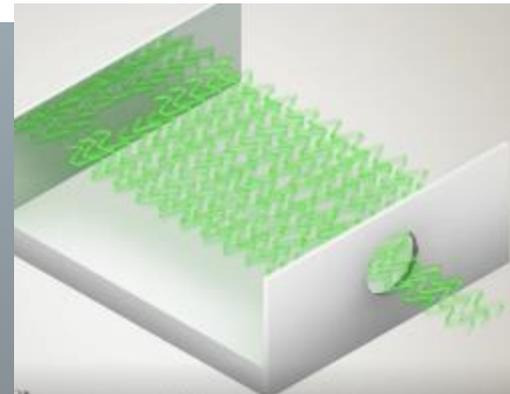
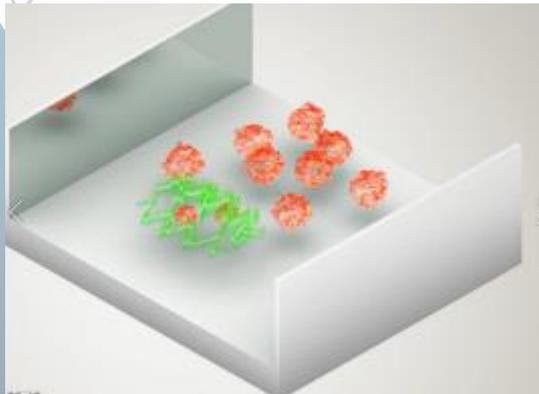
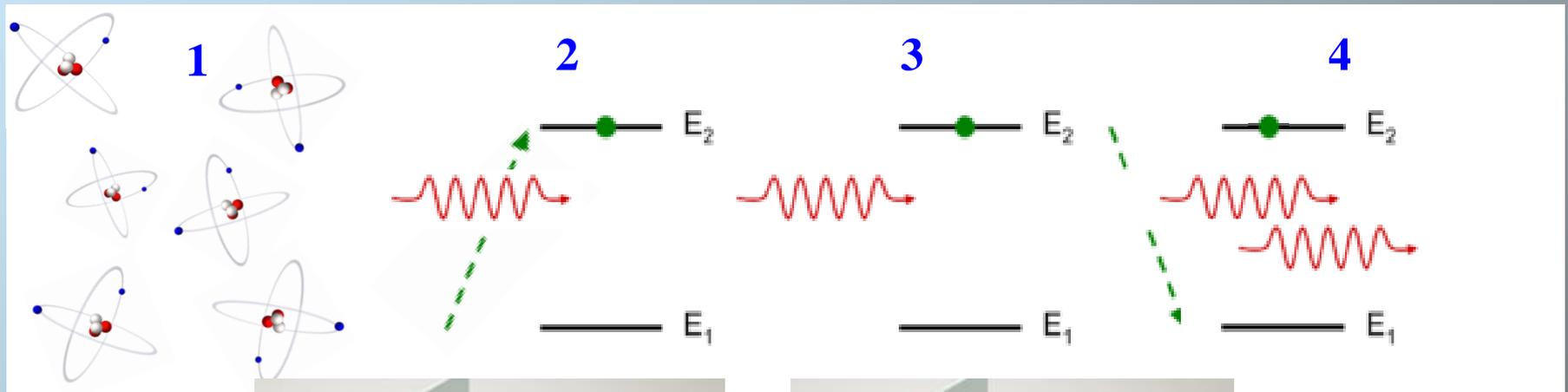
1 - Un milieu actif, des atomes : un gaz (CO<sub>2</sub>), un solide (Rubis), un liquide...

2 - Pompage : changement de niveau d'énergie, excitation des électrons

3 - Apport extérieur d'un photon pour une émission stimulée

4 - Retour d'un électron à son équilibre et émission d'un photon identique

Effet de réaction en chaîne par des miroirs : une cavité laser



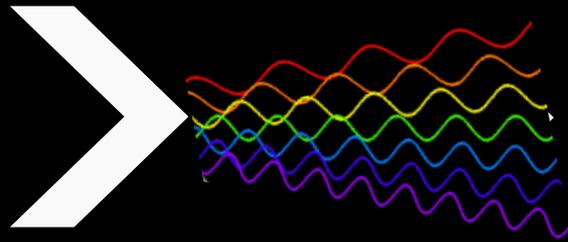


## La reconnaissance des atomes (spectroscopie)

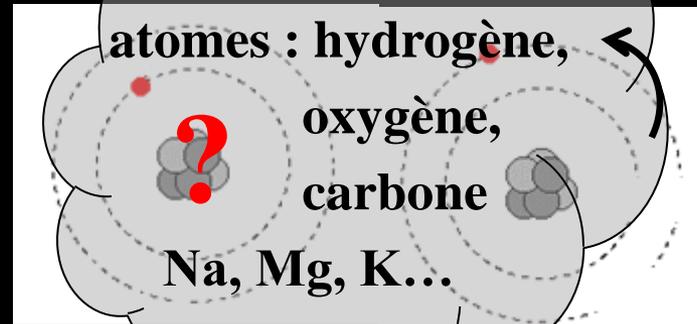
**Atome stable :**  
électron sur une  
couche de basse énergie

**Atome excité :**  
Électron absorbant  
une quantité d'énergie

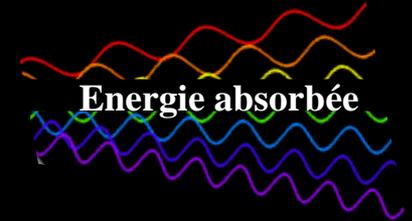
**Lumière**



**Rayonnement incident**



Atome de gaz ?



**Rayonnement sortant**

**Le « saut quantique » dépend de la nature de chaque atome**

L'analyse de la lumière permet de donner la composition chimique d'un gaz, d'une atmosphère, d'un matériau vaporisé : hydrogène, oxygène, azote, fer...

2  
He

6  
C

7  
N

Soleil



|  
Ionised Calcium  
3933 & 3968

|  
CH Band  
4300Å

|  
HB  
4861Å

|  
Neutral iron  
5270Å  
|  
Neutral magnesium  
5167, 5173, 5184

|  
Neutral sodium  
D1 & D2  
5890 & 5896

|  
H $\alpha$   
6563Å

|  
Terrestrial O<sub>2</sub>  
6867Å

|  
Terrestrial water vapour

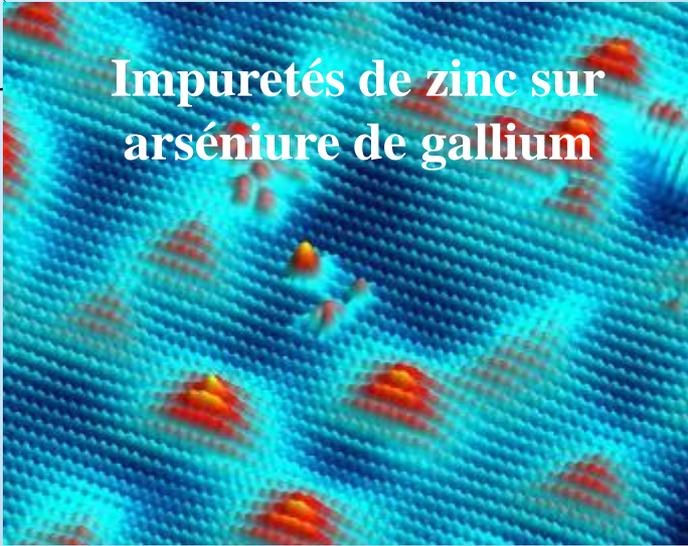
|  
Terrestrial O<sub>2</sub>  
7594Å

## La visualisation et la manipulation des atomes

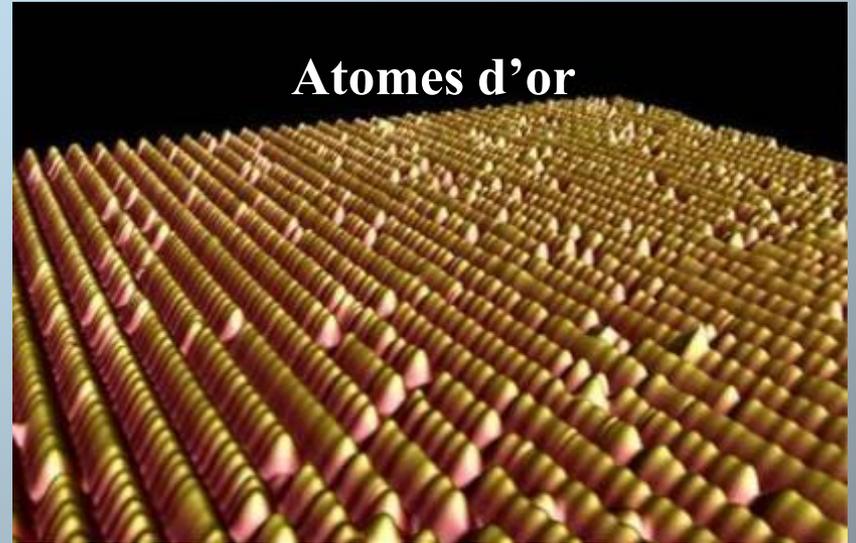


Les

Impuretés de zinc sur  
arséniure de gallium



Atomes d'or

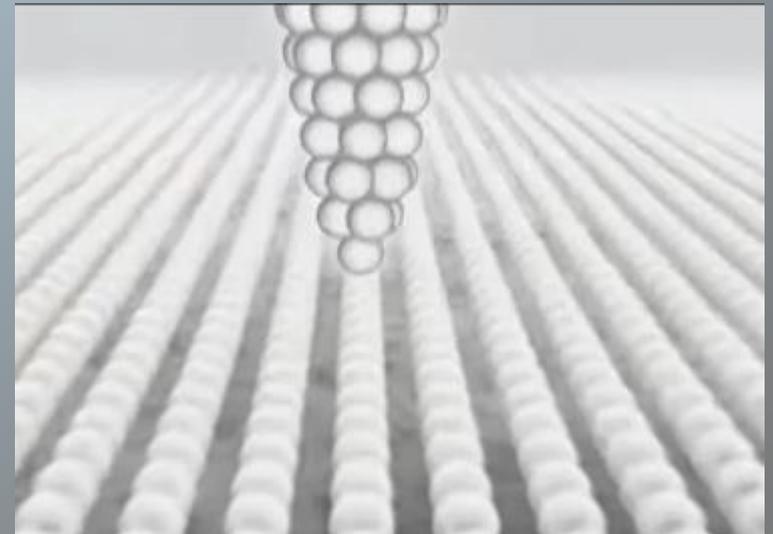


Une particule « onde » peut traverser un obstacle

L'électron « onde » peut traverser l'atome  
Ce phénomène s'appelle l'« effet tunnel »

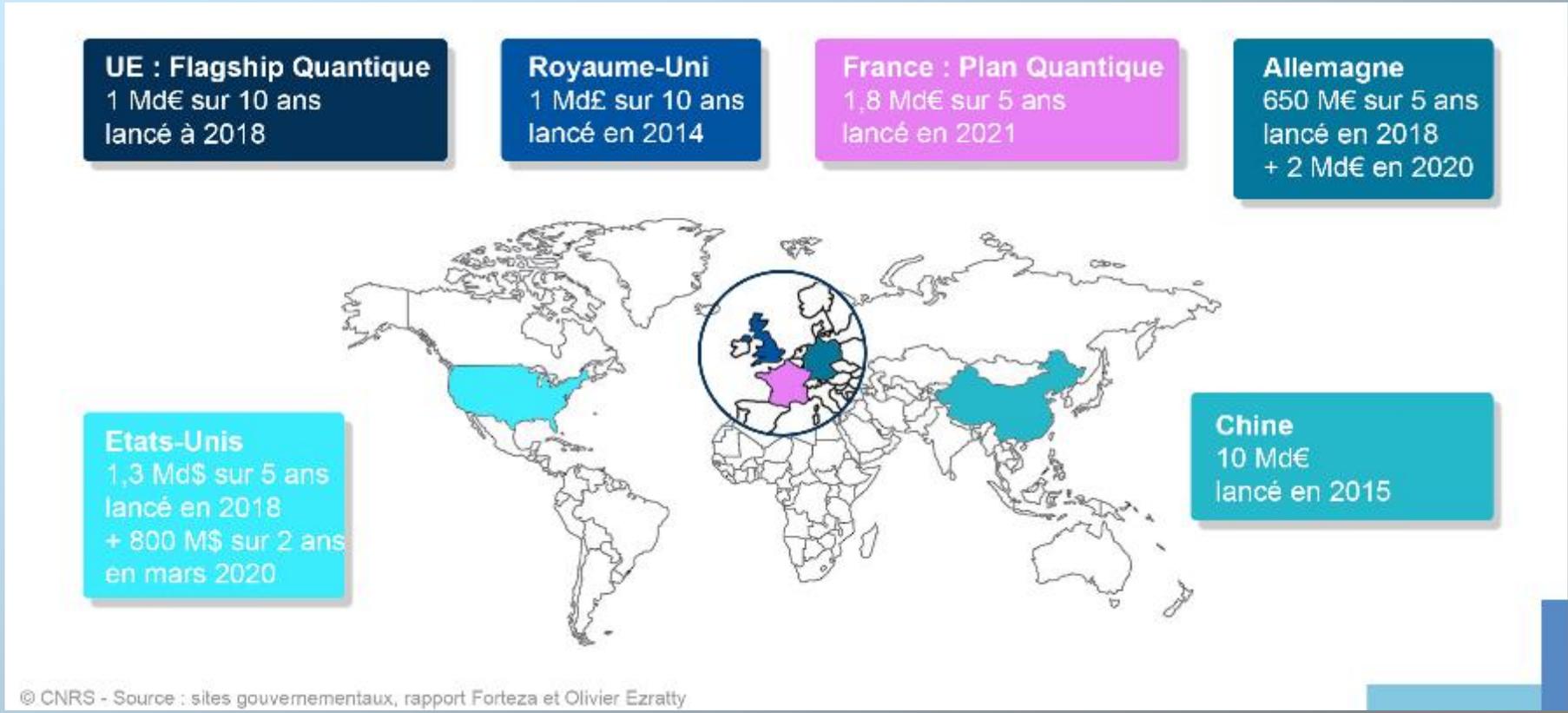
Par arrachement d'électron périphérique  
de chaque atome et mesure du courant...

... On peut reconstituer une image  
d'une surface atome par atome



## 3.3 Les applications futures : la recherche

### La quantique dans le monde : un investissement d'avenir



**France : 1,8 milliards € sur 5 ans**

**Investissements**  
**Recherches CNRS CEA...**  
**Formations de chercheurs**

**Partenariat avec le privé**

**Ordinateurs quantiques**  
**Cryptographie quantique**  
**Matériaux nouveaux et capteurs**

## 🍄 L'ordinateur quantique

**Principe de l'ordinateur classique :**

**Tout est codé en binaire : images, sons, calculs...**

**Bits = 2 états distincts possibles**

**Exemple : 2 bits    0    ou    1**

**Stockage : mémoires**

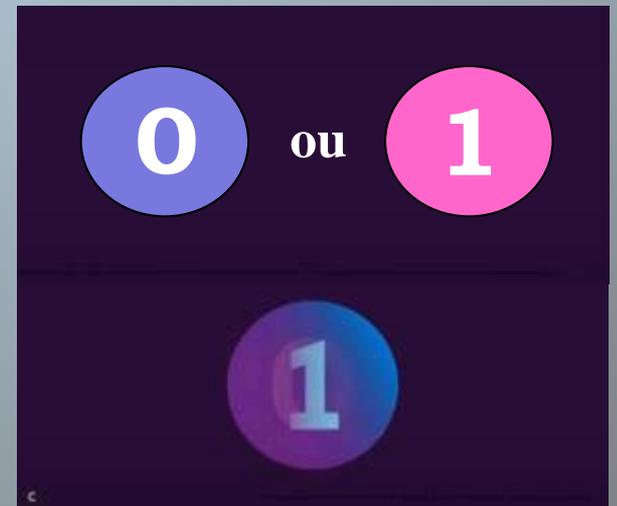
**Traitement : microprocesseurs**

**Principe de l'ordinateur quantique :**

**Utilise le principe de superposition**

**q-bits = 2 états superposés**

**Exemple : 2 q-bits    01    01**



**00    01    10    11**

**Le record actuel est de 53 q-bits soit :**

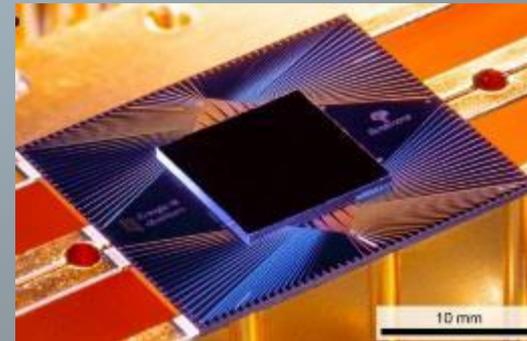
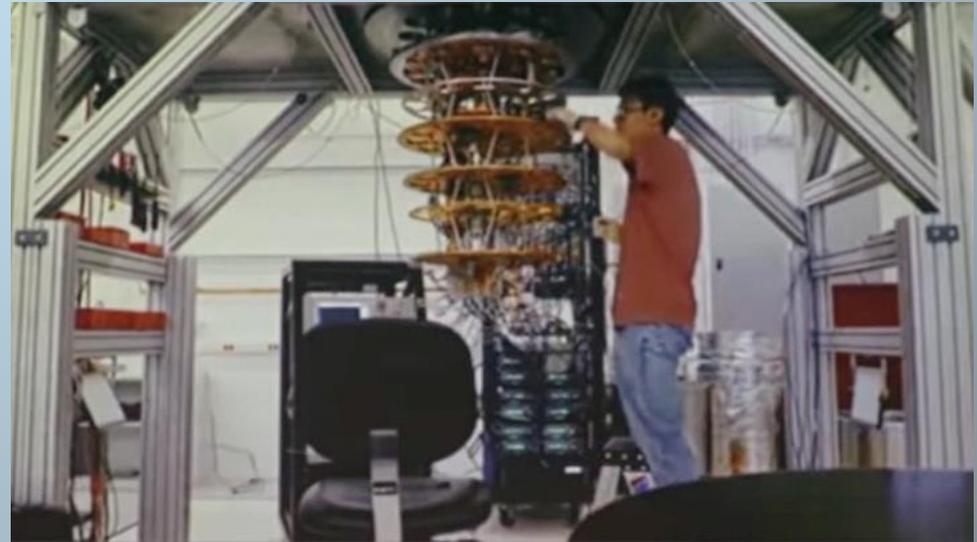
**$2^{53} =$  informations  
9 007 199 254 740 992**

## A quoi ça ressemble ?

**Un des plus gros calculateurs  
« classiques » actuels**



## **L'ordinateur quantique**



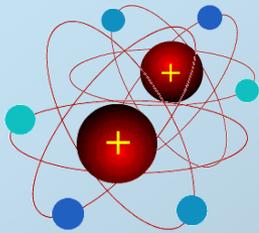
**L'ordinateur quantique est un instrument de laboratoire conçu pour résoudre des problèmes bien spécifiques. Il ne peut pas être utilisé comme un ordinateur classique, il ne peut pas stocker des informations.**

## Comment ça marche ?

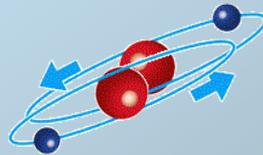
Pour réaliser un ordinateur quantique il faut :

➤ Réaliser des q-bits : deux états superposés sur une particule

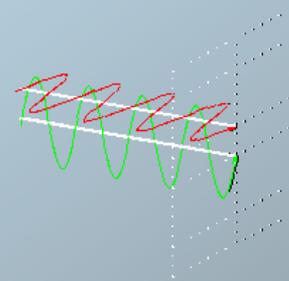
des ions+



des électrons ↑↓



des photons



des supraconducteurs



➤ Relier les q-bits : par un état d'intrication maintenu entre les q-bits ( 53 pour le Sycamore de Google)

➤ Ecrire des programmes adaptés à certains problèmes particuliers

## Quels sont les obstacles ?

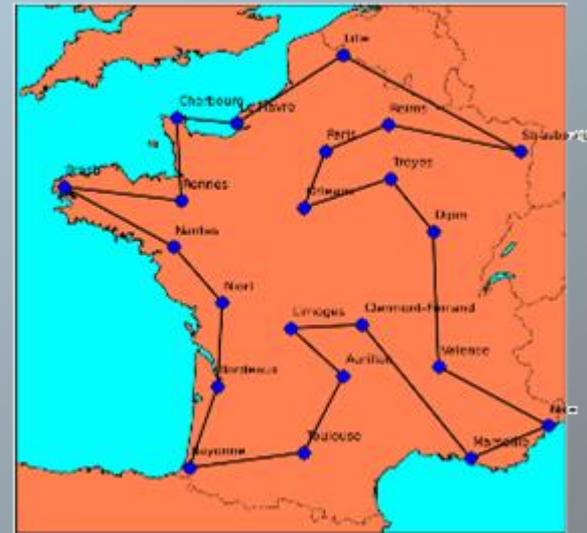
**Qubits sujets à décohérence : temps de fonctionnement limité (100 micro s)**

**Technologie complexe : nécessité de très basses températures, d'isolation**

**Non transportables car trop volumineux : service à la demande**

## Quels sont les avantages ?

**Capacité de calculs simultanés, effectués en même temps (et non successivement)**



## Quels sont les domaines d'utilisation ?

**Optimisation : gestion de flux, intelligence artificielle, systèmes multiples...**

**Problèmes complexes : météorologie, biologie, cosmologie...**

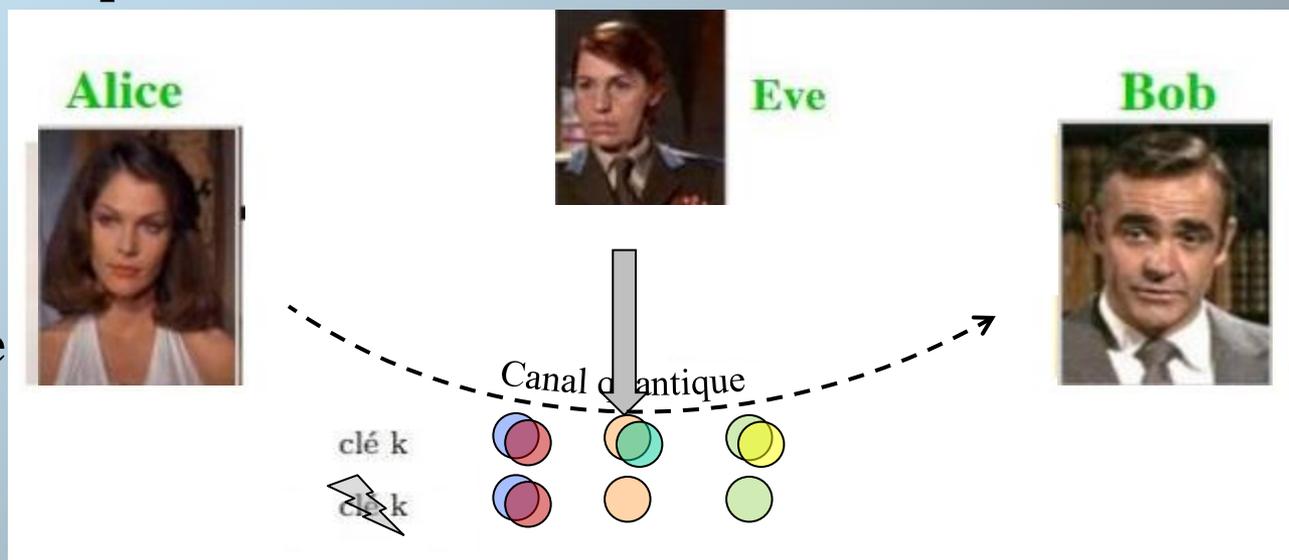
**Big data : traitement de grandes quantités de données très rapidement**

# 🌸 La téléportation quantique grâce à l'intrication

Il ne s'agit pas de téléporter de la matière :

Il s'agit d'un transfert d'informations (d'états quantiques) et non de matière

La cryptographie quantique :



La communication entre A et B peut être décryptée

Si la clé quantique est interceptée = destruction

La clé quantique ne peut être lue que par B

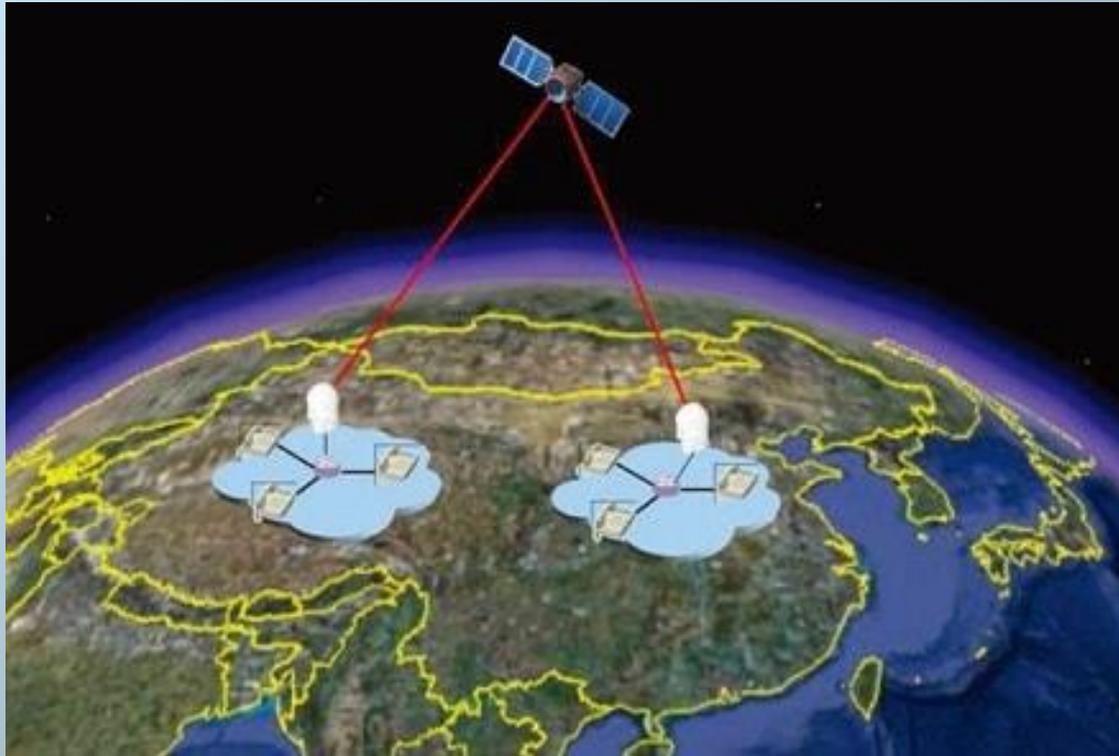
La communication est sécurisée par la clef



## Transmission par fibre optique

## Utilisation de réseaux existants

## Transmission par satellite



**En 2017 le satellite chinois MOZI assure la transmission d'une information quantique sur plus de 1200 km**

**Un premier pas vers un futur internet quantique sécurisé : 30 satellites sont prévus d'ici 2030 par le projet chinois QUESS**



# Les nouveaux matériaux du futur pour les supra conducteurs

**-269° : ils conduisent le courant sans résistance  
Mais obtenir cette température coûte cher**

**Recherches actuelles : créer un matériau  
supra conducteur à température ambiante**

**Autre propriété : un supra conducteur  
permet aussi de repousser un champ  
magnétique et de faire « léviter » un objet !**

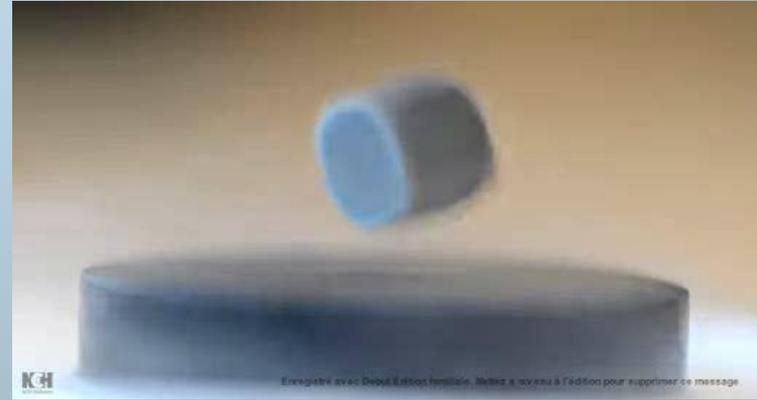
**Applications possibles :**

**Confort,**

**Beauté,**

**Déplacement**

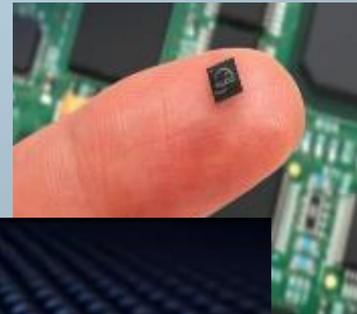
...



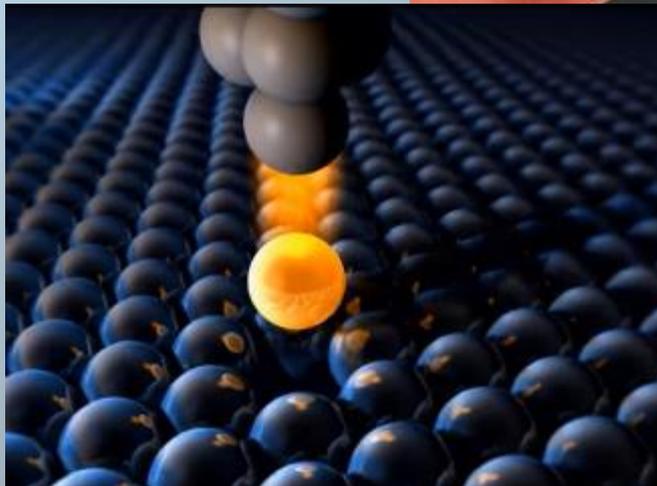
 **Les nouveaux matériaux du futur par la manipulation des atomes**

Grace à « l'effet tunnel » il est possible de créer

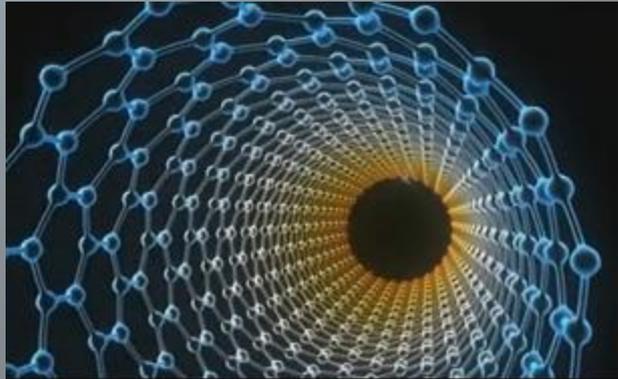
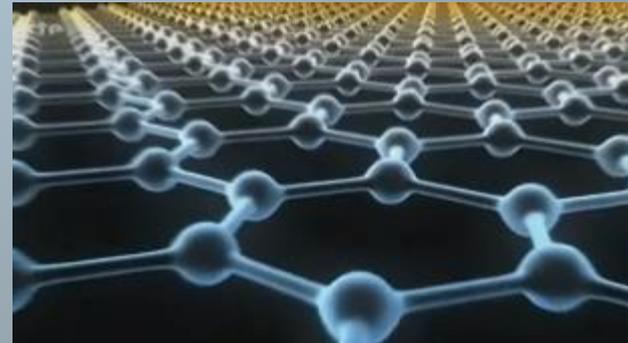
- **Des matériaux très conducteurs de taille nanométrique**  
**Micro électronique**



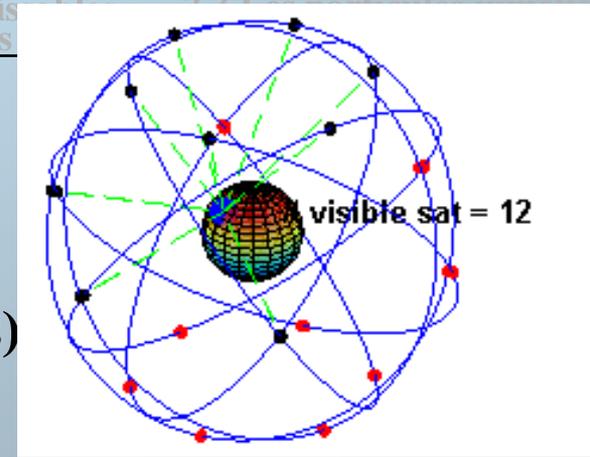
- **Des matériaux hyper résistants**  
**Matériel sportif, vêtements**



- **Des matériaux pouvant stocker ou générer du courant**  
**Batteries, revêtement...**

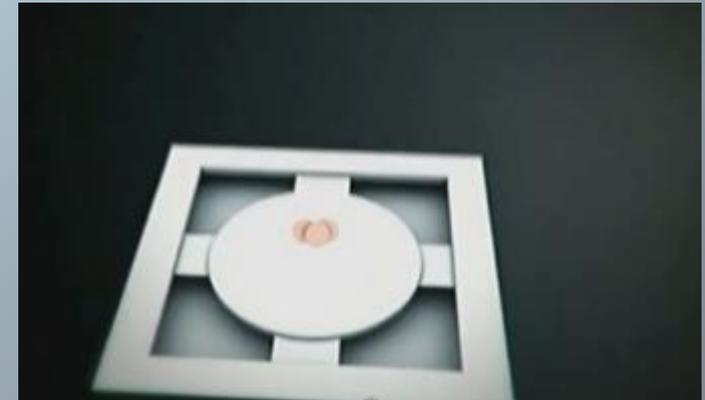


- **La maîtrise des atomes permet de réaliser des appareils de mesure de très grande précision**



**Horloge atomique : GPS (1s / 10 milliards d'années)**

**Nano balances : analyse chimique**



**Magnétomètre : imagerie médicale, étude du cerveau...**

**Gravimètre : prospection minière, tectonique des plaques...**

- **La maîtrise des atomes permet de développer la nanotechnologie**

## Conclusion

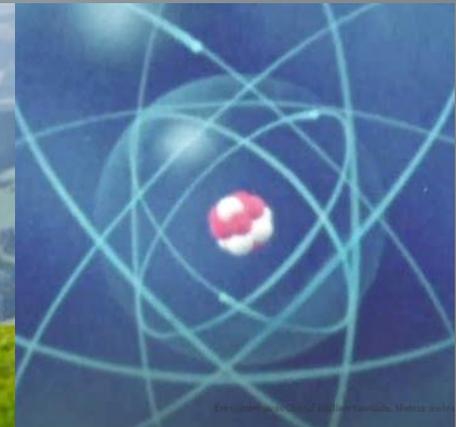
**L'homme a, depuis toujours, cherché à explorer et comprendre l'Univers immense qui l'entoure**

**Mais la découverte et la maîtrise progressive de l'univers des particules élémentaires sont en train de changer sa condition de vie**

**Travail, communication, déplacements, santé... tous ces domaines vont évoluer vers des changements étonnants grâce à la mécanique quantique,**

**Ces changements apporteront-ils une amélioration de la condition humaine ?**

**Quelle sera la place de l'homme entre ces deux infinis ?**



# Remerciements

**Pour des échanges et des apports scientifiques éclairés :**

**Bruno Puccinelli  
Thibault Debelhoir  
Vincent Rollet**

**Pour un apport de documents, et des corrections de qualité :**

**Jacques Sassoon  
Mélodie Boissel  
Laurence Marmonnier**

**Pour l'élaboration de la maquette intrication :**

**Jacques Werlé**

# Documentation

## Bibliographie

- |   |                               |   |
|---|-------------------------------|---|
| <b>MON GRAND MECANO QUANTIQUE</b>   | <b>Julien Bobroff</b>         | <i>Flammarion</i>                             |
| <b>LA QUANTIQUE AUTREMENT</b><br>GARARANTI SANS EQUATIONS                                       | <b>Julien Bobroff</b>         | <i>Flammarion</i>                             |
| <b>LA PHYSIQUE QUANTIQUE</b><br>(ENFIN) EXPLIQUEE SIMPLEMENT                                    | <b>Vincent Rollet</b>         | <i>Institut Pandore</i>                       |
| <b>LA PHYSIQUE QUANTIQUE POUR LES NULS</b><br>EN 50 MOTS CLEFS L'ESSENTIEL POUR TOUT COMPRENDRE | <b>Blandine Pluchet</b>       | <i>First éditions</i>                         |
| <b>FANTAISIES QUANTIQUES</b><br>DANS LES COULISSES DES GRANDES DECOUVERTES                      | <b>C D'oultremon M Solvay</b> | <i>Saint Simon</i>                            |
| <b>QUANTIQUE</b><br>LE NOUVEL AGE D'OR  |                               | <b>Science et vie hors série octobre 2020</b> |
| <b>PHYSIQUE QUANTIQUE</b><br>TOUT SAVOIR SUR LA   |                               | <b>Science et univers hors série N° 17</b>    |
| <b>QUANTIX</b> LA PHYSIQUE QUANTIQUE ET LA RELATIVITE EN BD                                     | <b>Laurent Schafer</b>        | <i>Dunod</i>                                  |

## Sites web

<https://toutestquantique.fr>

[Physique quantique : des surprises en perspective - Julien Bobroff - YouTube](#)

[Coup de froid sur les atomes | CNRS Images](#)

<https://www.youtube.com/watch?v=j6h6fUKnRAY>

<https://www.youtube.com/watch?v=SA1uzOa7K2c>

[La mécanique quantique en 7 idées - YouTube](#)

[Nanotechnologies - Veritable révolution - Vidéo Dailymotion](#)

[Théorie quantique et médecine : le point de vue d'un physicien Claude Aslangul](#)