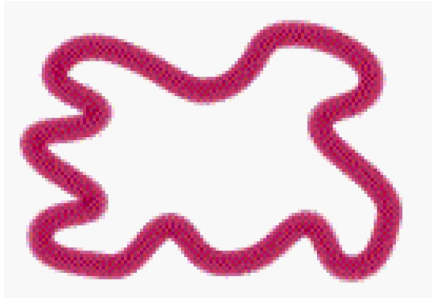
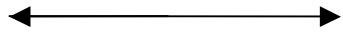


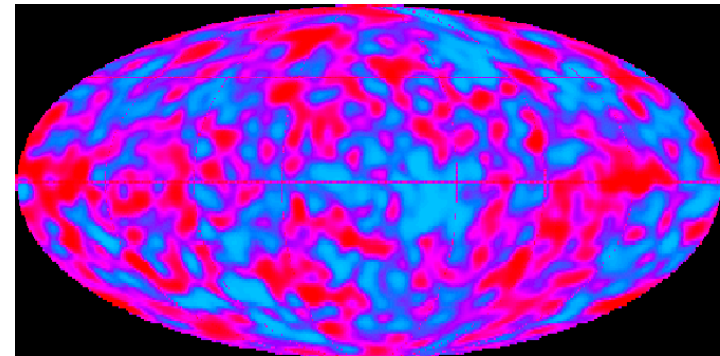
*La physique quantique couvre plus de
60 ordres de grandeur!*



10^{-35} Mètre



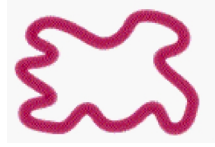
*Super cordes
(constituants
élémentaires
hypothétiques de
l'univers)*



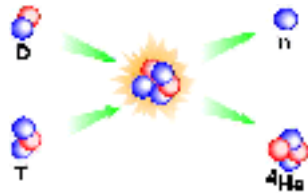
10^{+26} Mètre



*Carte des fluctuations du
rayonnement thermique micro-
onde de l'univers*

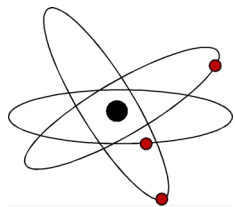


$10^{-35} M$

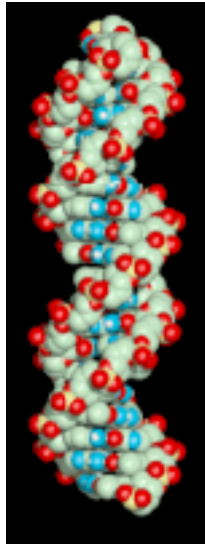


$10^{-15} M$

(noyaux, radioactivité
Énergie nucléaire)



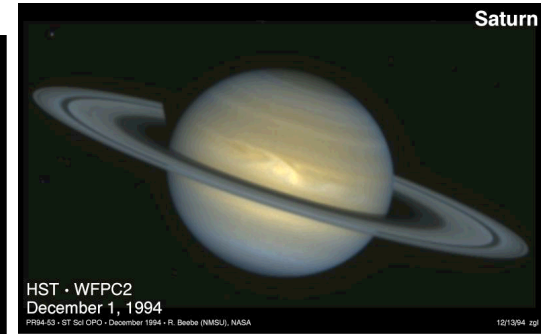
$10^{-10} M$
(atomes)



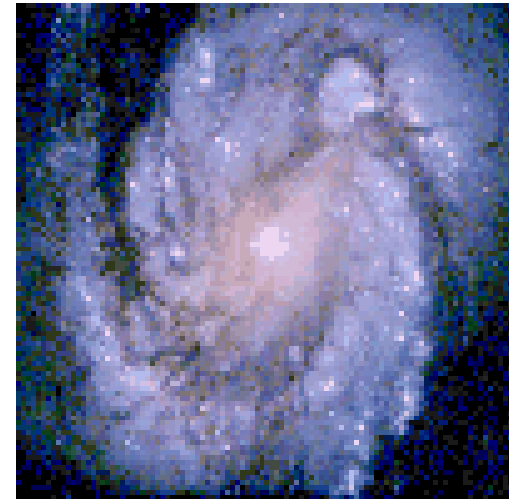
$10^{-8} M$
(molécules
biologiques)



$10^{-3} M -$
 $10 M$
(monde
macro-
scopique)



$10^{+8} - 10^{+10} M$
(planètes, étoiles)



$10^{+20} M$
(galaxies)

$10^{+26} M$
Univers

Quelques caractéristiques de la physique quantique:

- Sa précision (électrodynamique quantique):

➡ Moment magnétique de l'électron: $1,001159652188 \dots (q \hbar / m)$.

- Son unité:

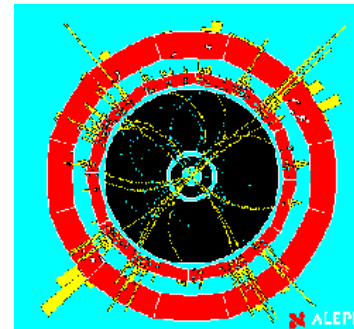
Unification dans le modèle standard de l'électromagnétisme et des interactions faible (radioactivité) et forte (énergie nucléaire)

Espoir d'inclure la gravitation (théorie des super-cordes?)

- Son universalité:

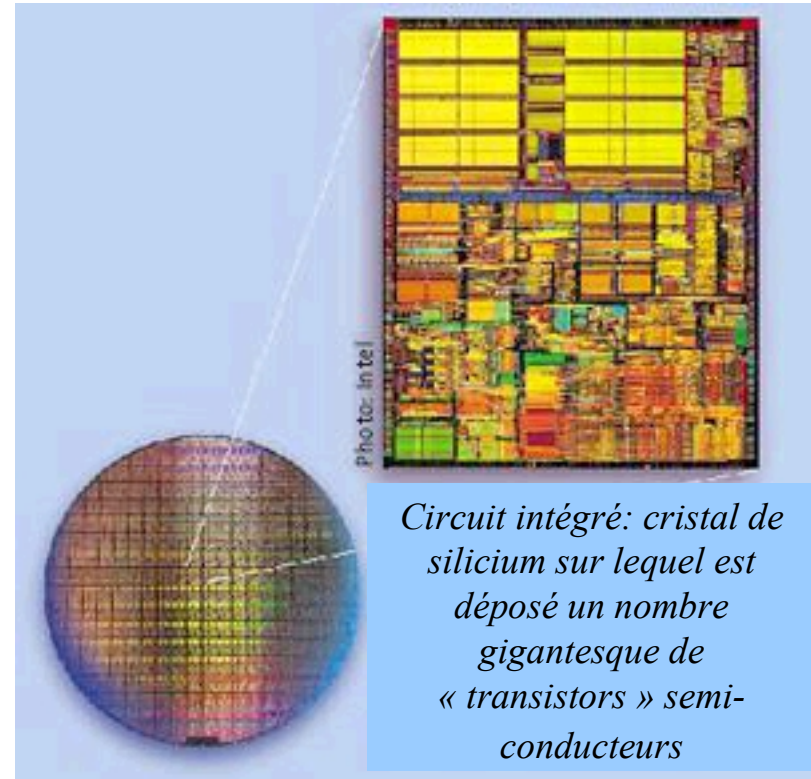
Les atomes, les molécules, les photons sont les mêmes partout dans l'Univers

- Relations entre infiniment petit et grand (cosmologie et particules)



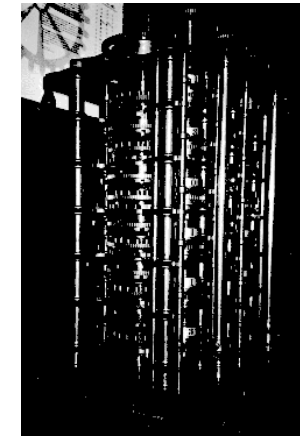
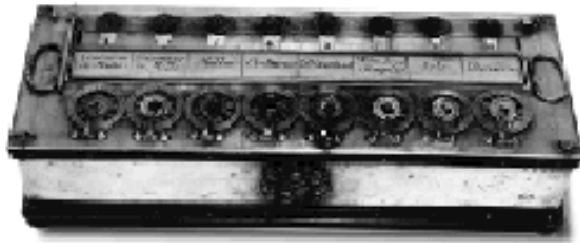


*L 'ordinateur moderne est un
résultat de l 'industrie du
« transistor intégré »*



*Circuit intégré: cristal de
silicium sur lequel est
déposé un nombre
gigantesque de
« transistors » semi-
conducteurs*

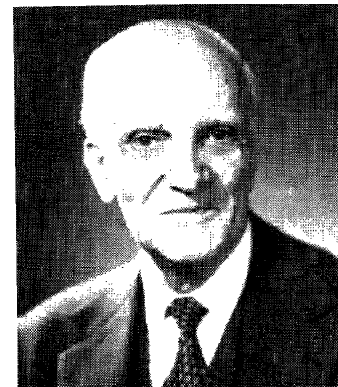
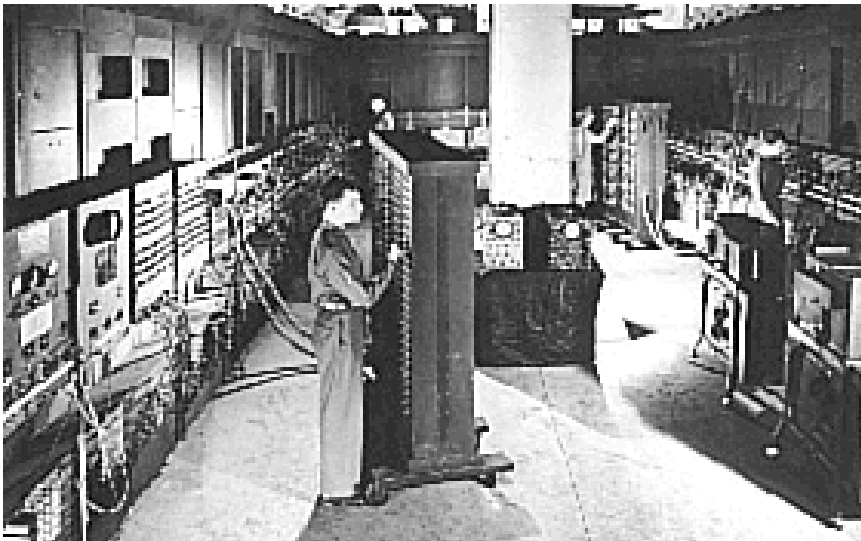
La technologie « classique » a conduit....



....de la machine mécanique de Pascal (1650)...

..à celle de Babbage (1840)...

..et au gigantesque calculateur électrique à lampes ENIAC (1948)....

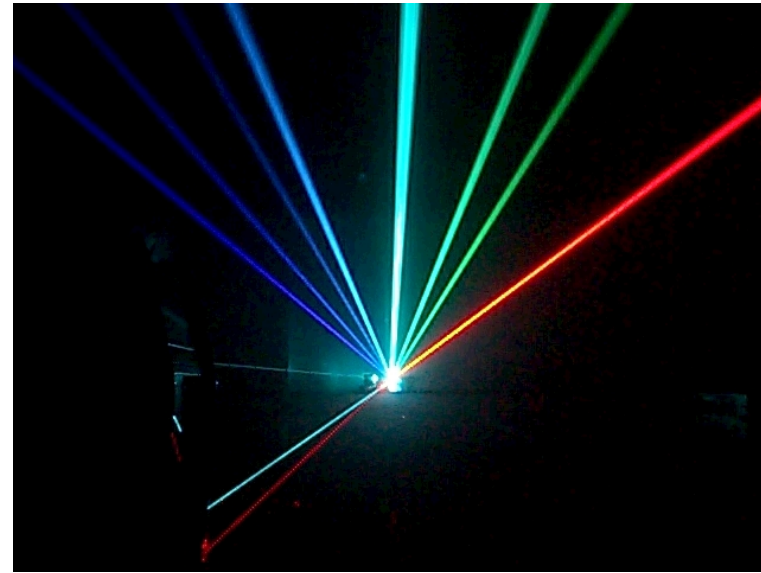


Léon Brillouin

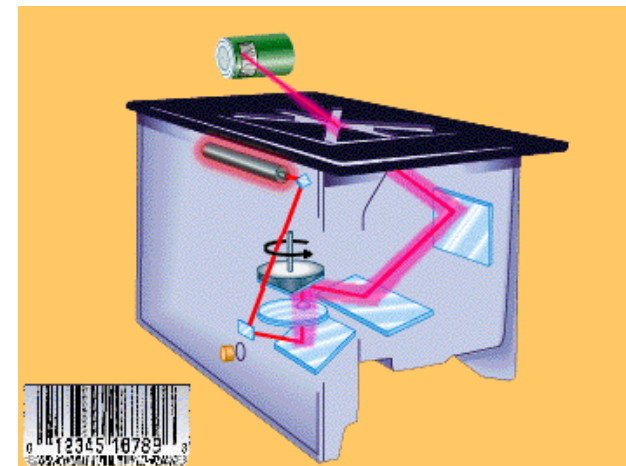
...atteignant une limite pratique que seule la technologie « quantique » du transistor intégré a permis de franchir



Le laser dont le principe remonte aux travaux d'Einstein sur l'émission stimulée (1917)...

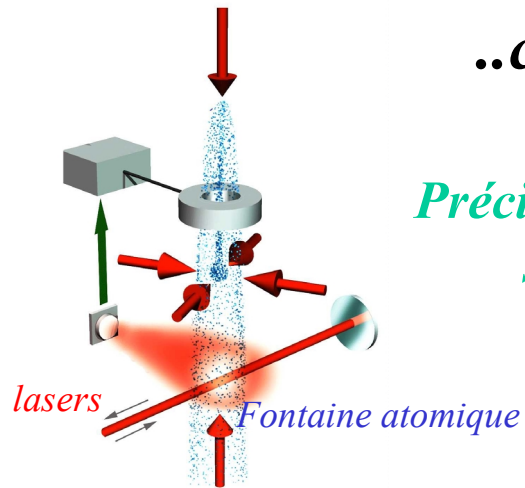


...a conduit à de très nombreuses applications...



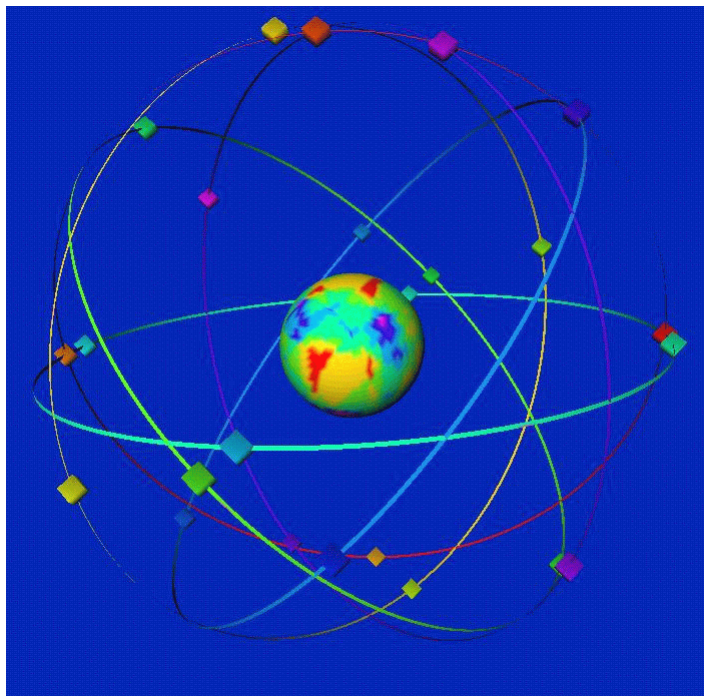
La mesure précise du temps, basée sur les principes de la physique quantique (horloges atomiques)...

..conduit à des applications pratiques importantes



*Précision d'une seconde
sur 10 Millions
d'années!*

*Système de navigation
GPS basé sur la
triangulation à l'aide de
satellites porteurs
d'horloges atomiques*

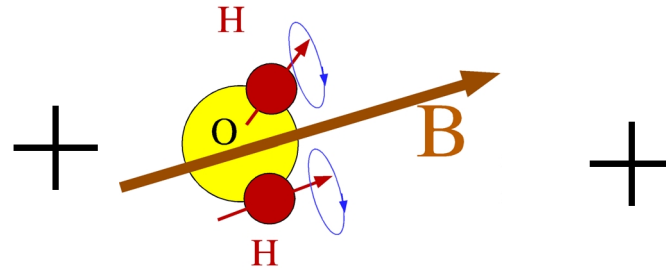


*Repérage possible
n'importe où à
quelques
centimètres près!*

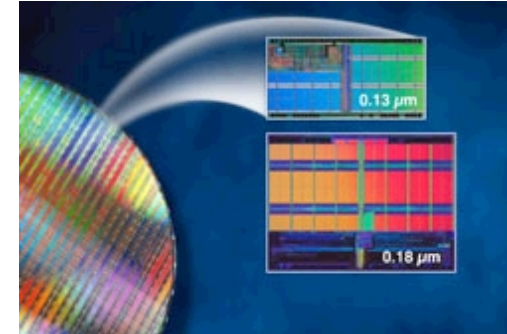
L'IRM est la combinaison de trois technologies à base quantique:



Aimants supraconducteurs

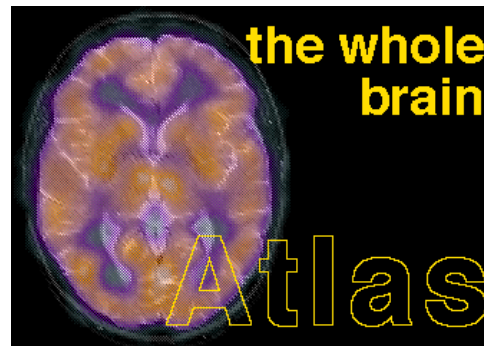


Résonance magnétique des protons (H) dans un champ magnétique B

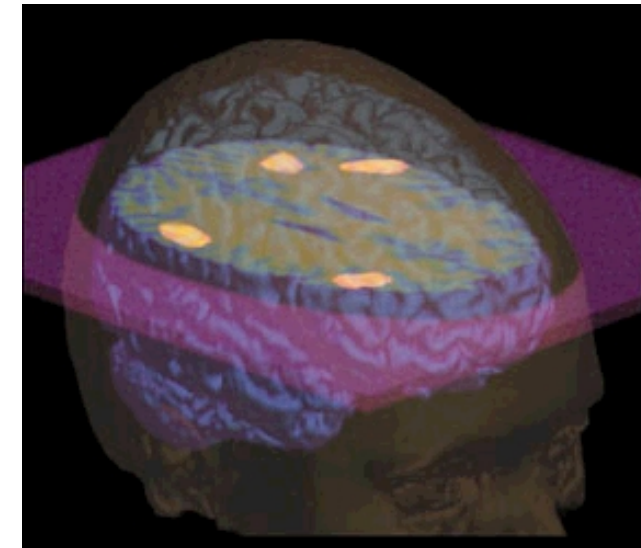


Circuits intégrés semi-conducteurs pour la reconstruction des images

→ *Imagerie par résonance magnétique (IRM)*

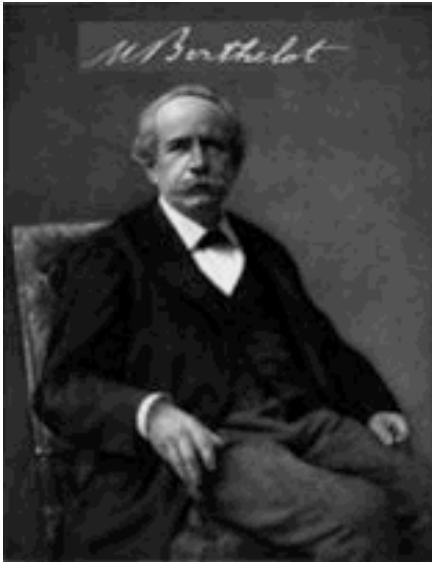


Images statiques...

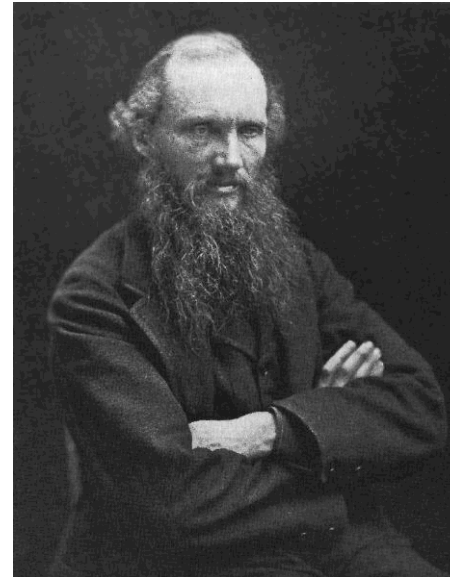


...ou dynamiques (le cerveau en action..)

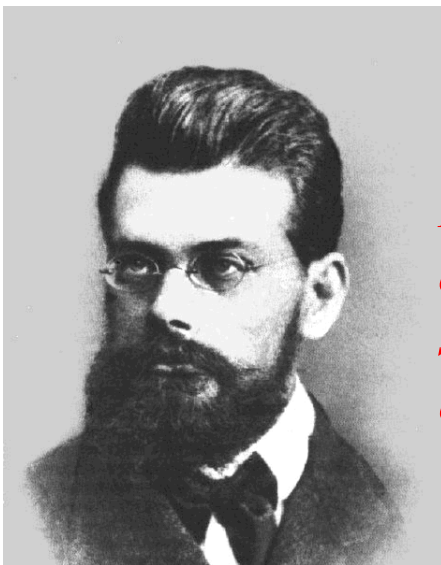
Il y a cent ans l'existence des atomes était controversée....



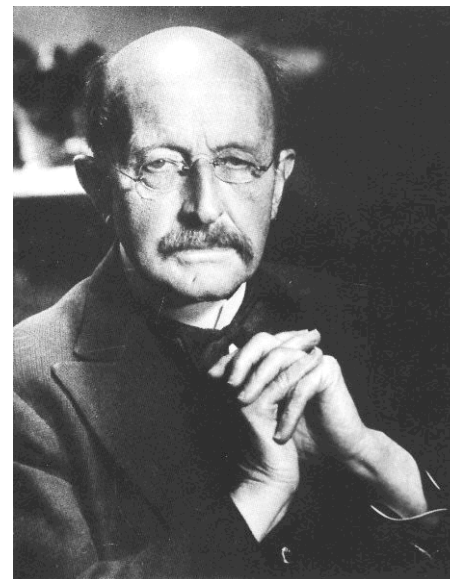
*Marcellin
Berthelot ne
croyait pas aux
atomes....*



*Lord Kelvin et
les « deux
petits nuages »
dans le ciel
bleu de la
physique de
1900*

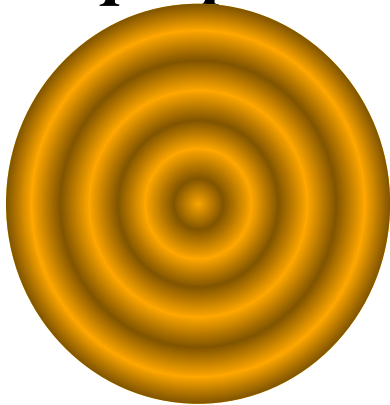


*Boltzmann, fondateur
de la thermodynamique
statistique était, lui, un
atomiste convaincu*



*Planck et la
quantification du
rayonnement
thermique (1900)*

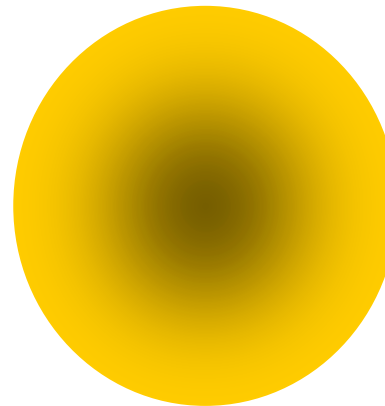
Superpositions d'états et fonction d'onde



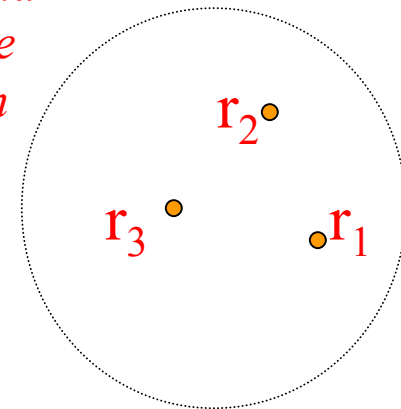
Dans l'atome d'H, l'électron est dans une superposition d'une infinité de positions possibles, à l'intérieur d'un volume sphérique dont le diamètre est de l'ordre de 1 Angström

$\Psi(r_1)$
 $\Psi(r_2)$
 $\Psi(r_3)$
.
.

Fonction d'onde Ψ obéissant à l'équation de Schrödinger



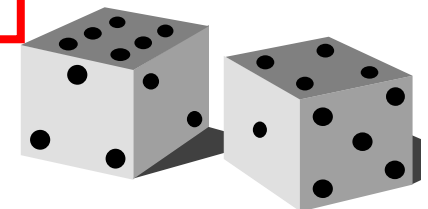
Mesure de la position de l'électron



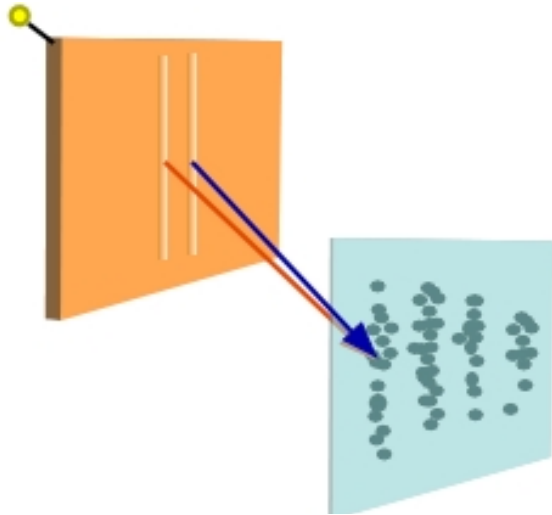
Résultat aléatoire

Probabilité $P(r) = |\Psi(r)|^2$

Dieu joue aux dés.... (Einstein n'aimait pas cela..)



Interférences quantiques : « quintessence de l'étrangeté quantique » (R.Feynman)

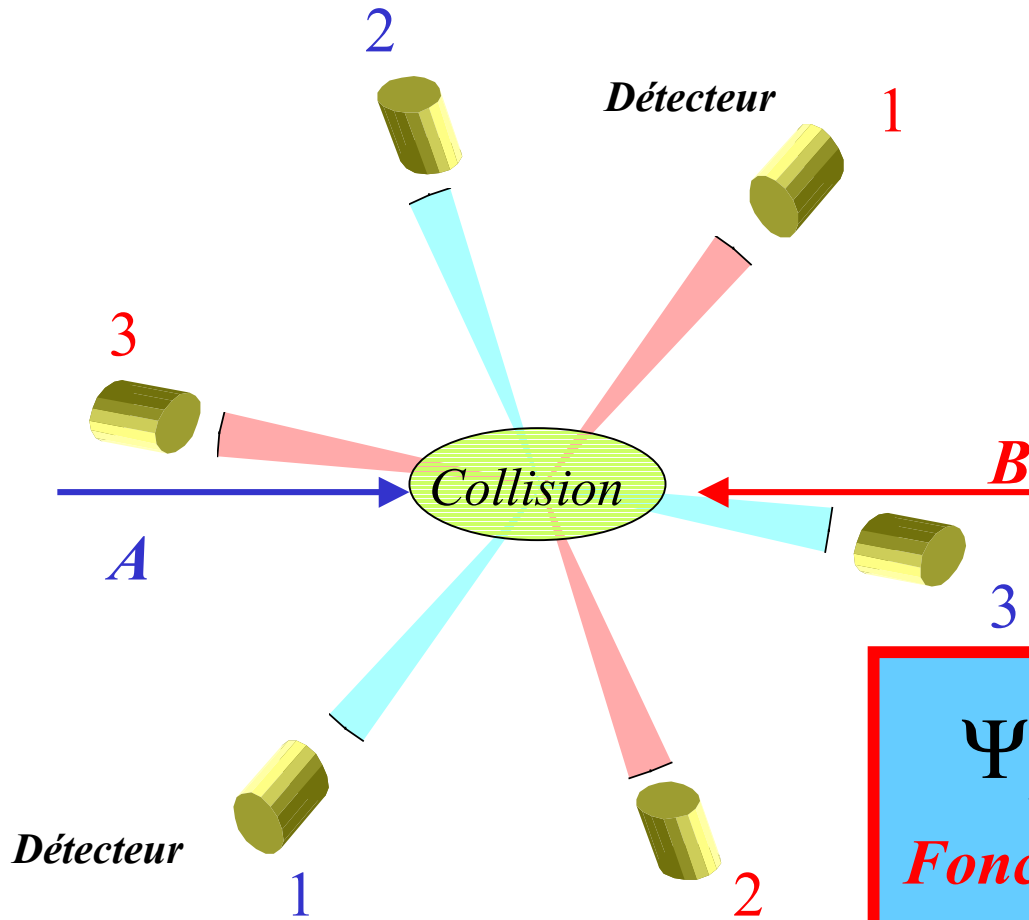


*Interféromètre d 'Young avec
photons, électrons, atomes...
traversant l 'appareil un à un*

*Interférences se
construisant atome
par atome
(expérience de
l ' Université de
Tokyo):
logique quantique
en action*

QuickTime™ et un décompresseur
sont requis pour visualiser
cette image.

Paradoxe EPR (Einstein-Podolsky-Rosen)



$$\Psi_{AB} = \Psi_A(1)\Psi_B(1) + \Psi_A(2)\Psi_B(2) + \Psi_A(3)\Psi_B(3)$$

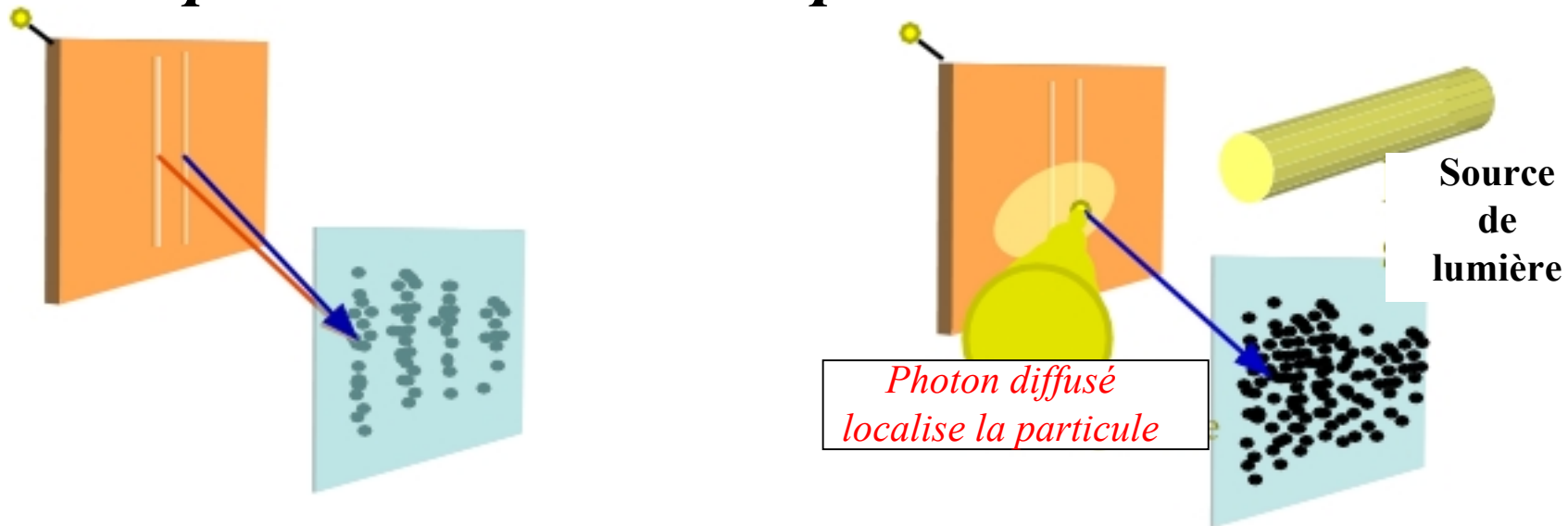
$$\Psi_{AB} \neq \Psi_A \cdot \Psi_B$$

***Fonction d'onde non-séparable:
pas de fonction d'onde
indépendante pour A ou B***

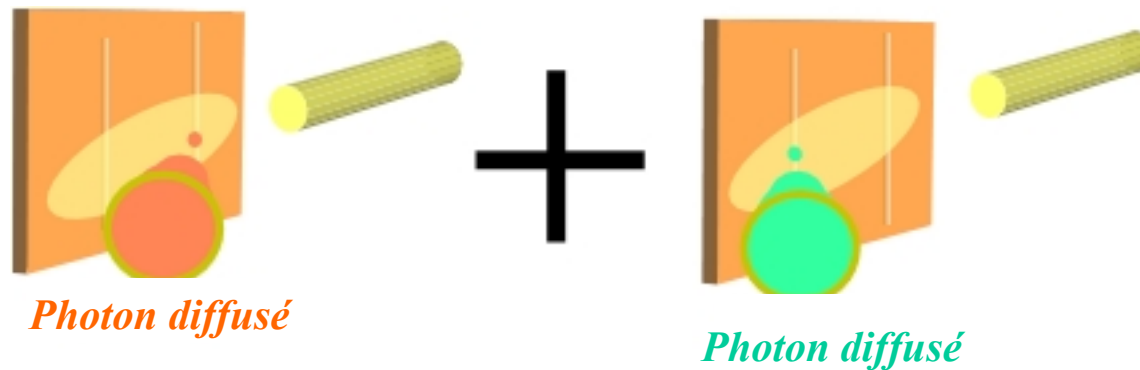
Intrication quantique et non-localité

Einstein n'aimait pas cela non plus....

Complémentarité onde-corpuscule....

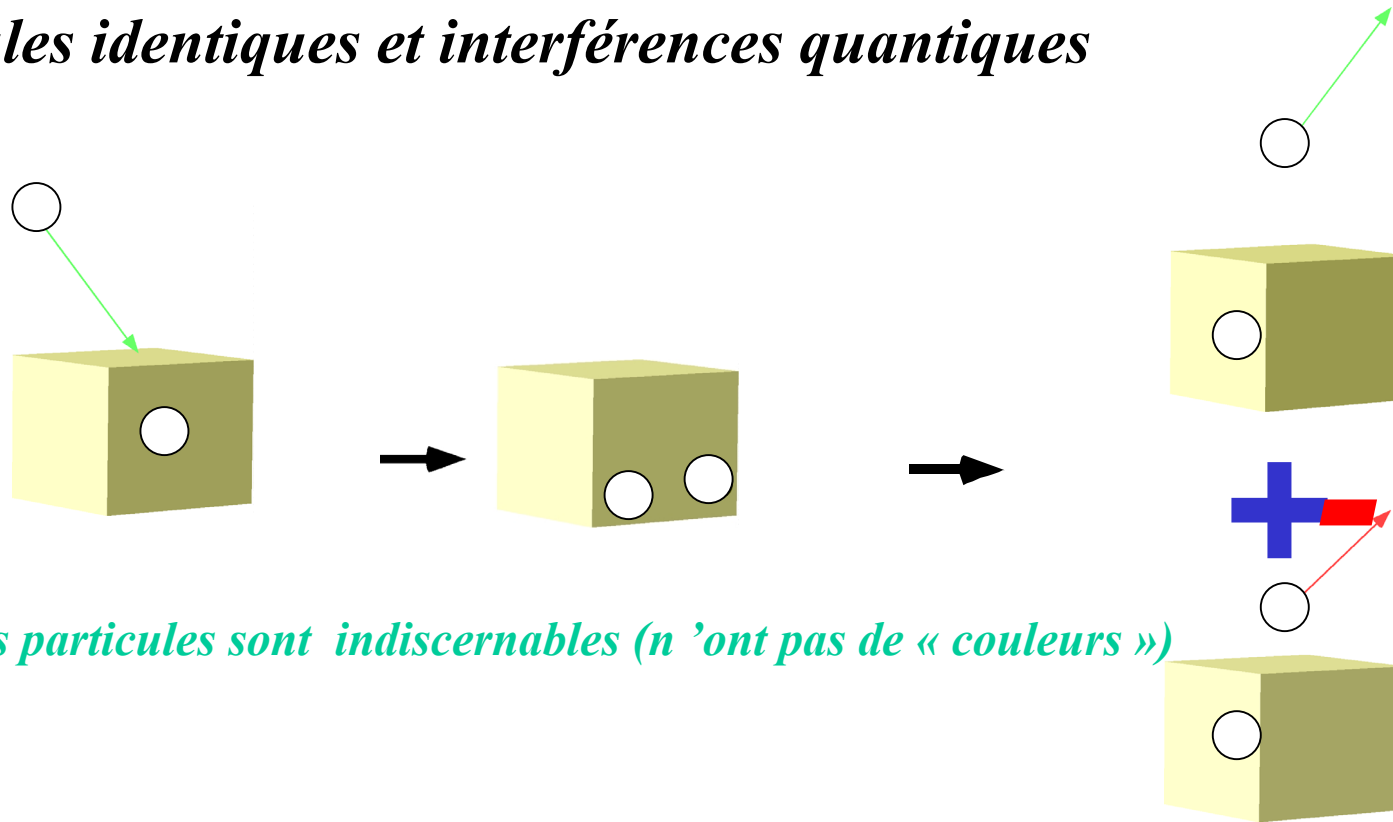


..et intrication entre la particule et le détecteur de trajectoire...



*L' intrication supprime l' interférence
(plus de fonction d' onde pour la particule seule...)*

Particules identiques et interférences quantiques

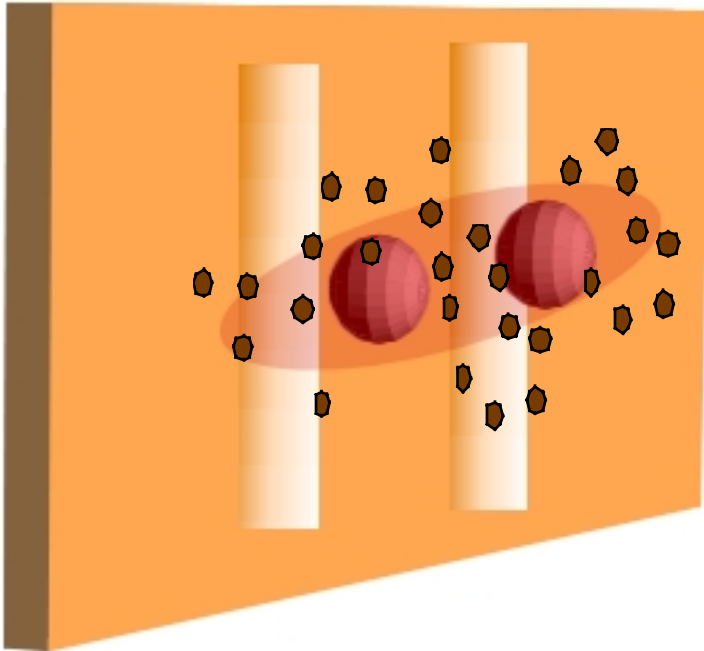


Attention: les particules sont indiscernables (n'ont pas de « couleurs »)

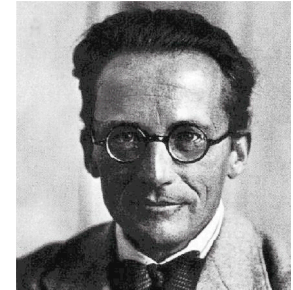
*Fermions: les deux amplitudes s'annulent (signe -): impossible de mettre les deux particules dans le même état dans la boîte: **Principe d'exclusion de Pauli***

*Bosons: les amplitudes s'ajoutent (signe +): Les particules ont tendance à s'accumuler de façon « grégaire » dans la boîte **Statistique de Bose-Einstein***

Pourquoi pas de superpositions d'objets macroscopiques?



Le paradoxe du Chat de Schrödinger

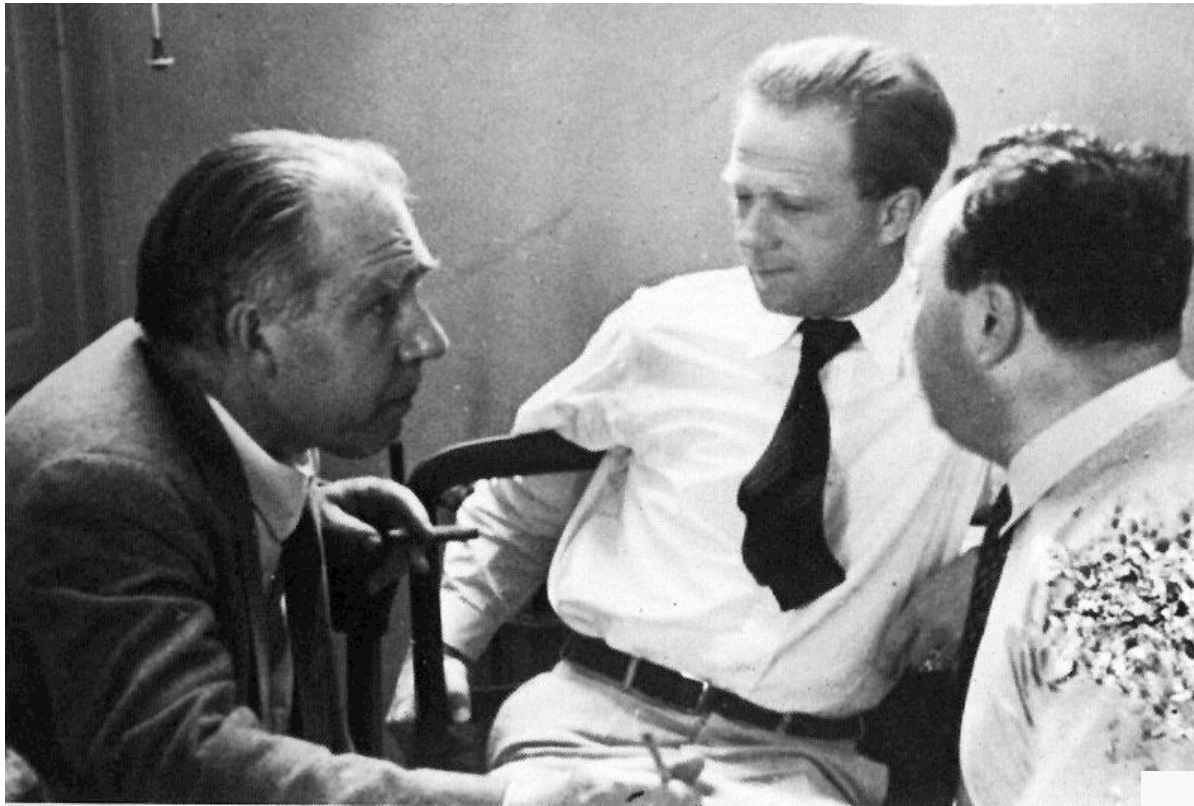


L'environment (molécules, photons thermiques..) s'intrique avec le système et détruit les superpositions quantiques

(analogue à l'observation du chemin de la particule dans un interféromètre)

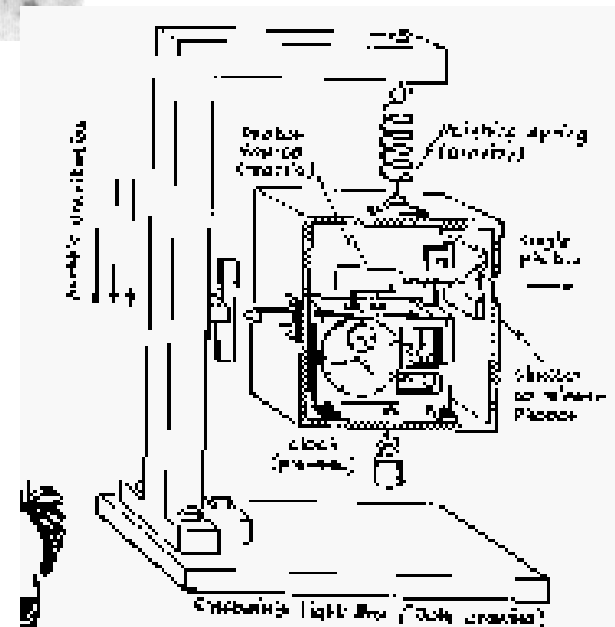
Décohérence d'autant plus rapide que le système est plus gros





*Discussion entre
Bohr, Heisenberg et
Pauli (1927)*

*Dessin d'une expérience de pensée
(boîte à photon) de Bohr*



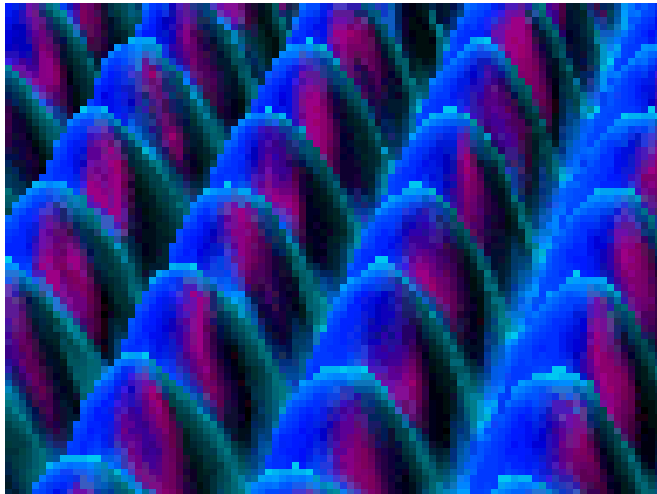
....Erwin Schrödinger, en 1952, estimait encore que la manipulation d 'objets microscopiques uniques était impossible....



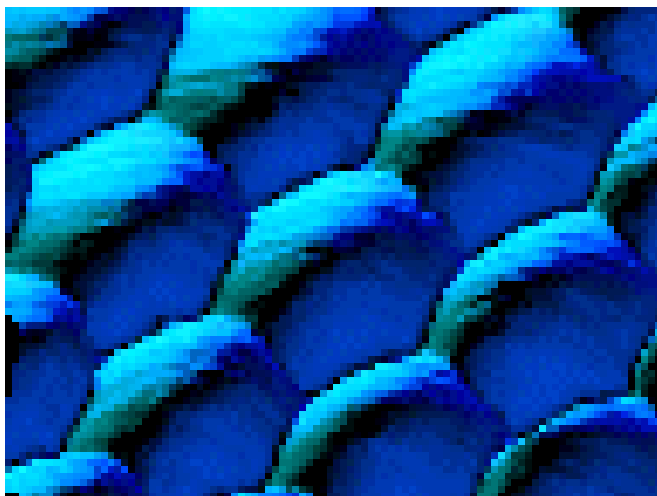
«we never experiment with just one electron or atom or (small) molecule. In thought-experiments we sometimes assume that we do; this invariably entails ridiculous consequences.... »

(British Journal of the Philosophy of Sciences, Vol 3, 1952)

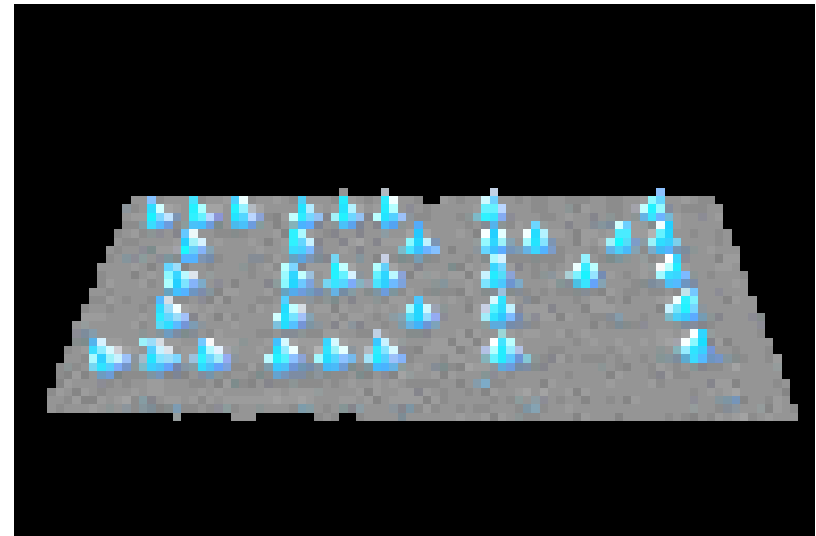
*Toucher les atomes par microscopie
à balayage par effet tunnel (STM)*



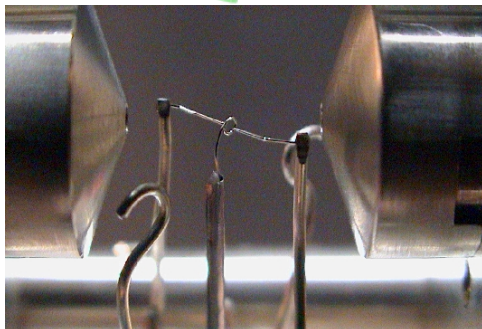
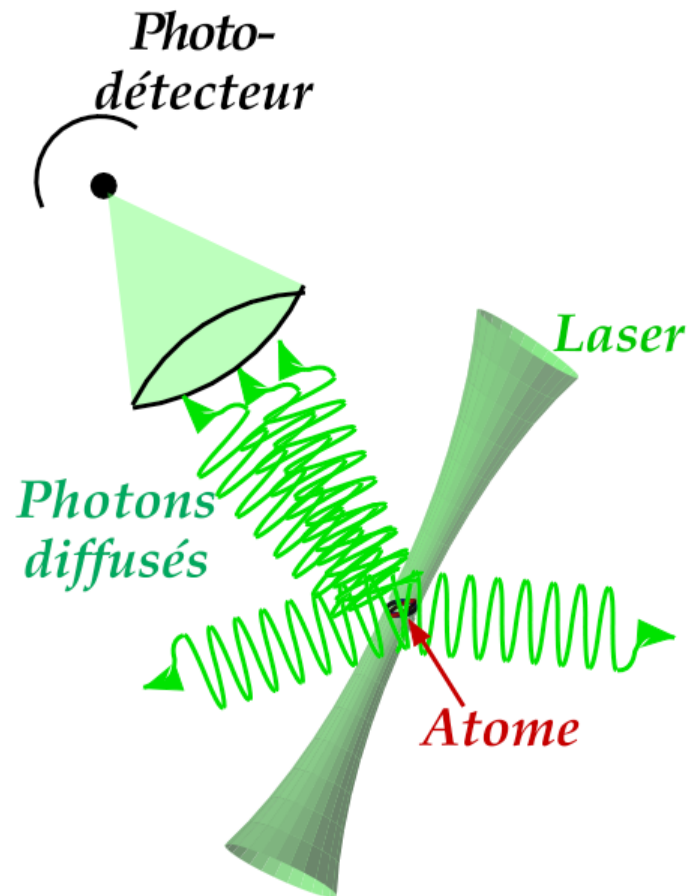
Nickel



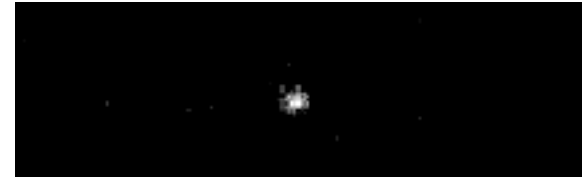
Platine



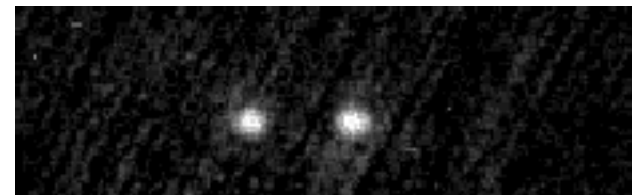
Voir des atomes piégés



1 atome



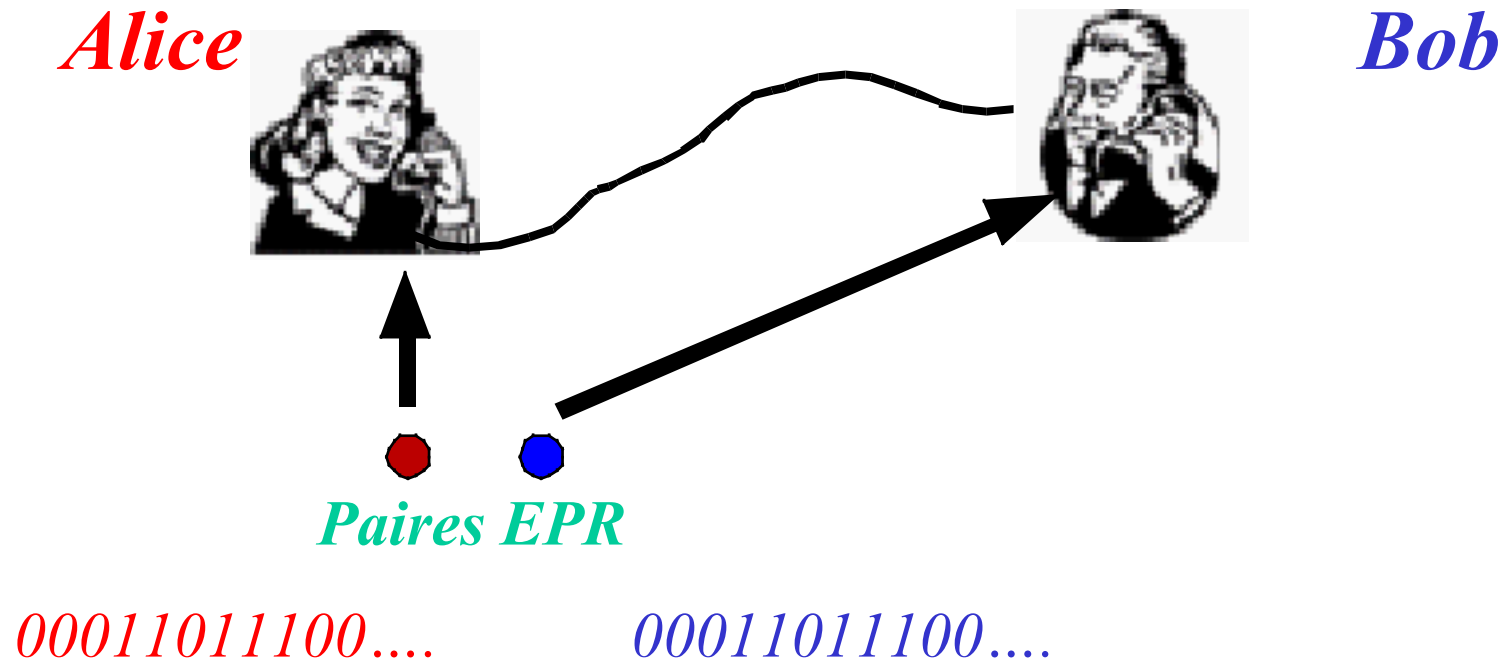
2 atomes



7 atomes en mouvement

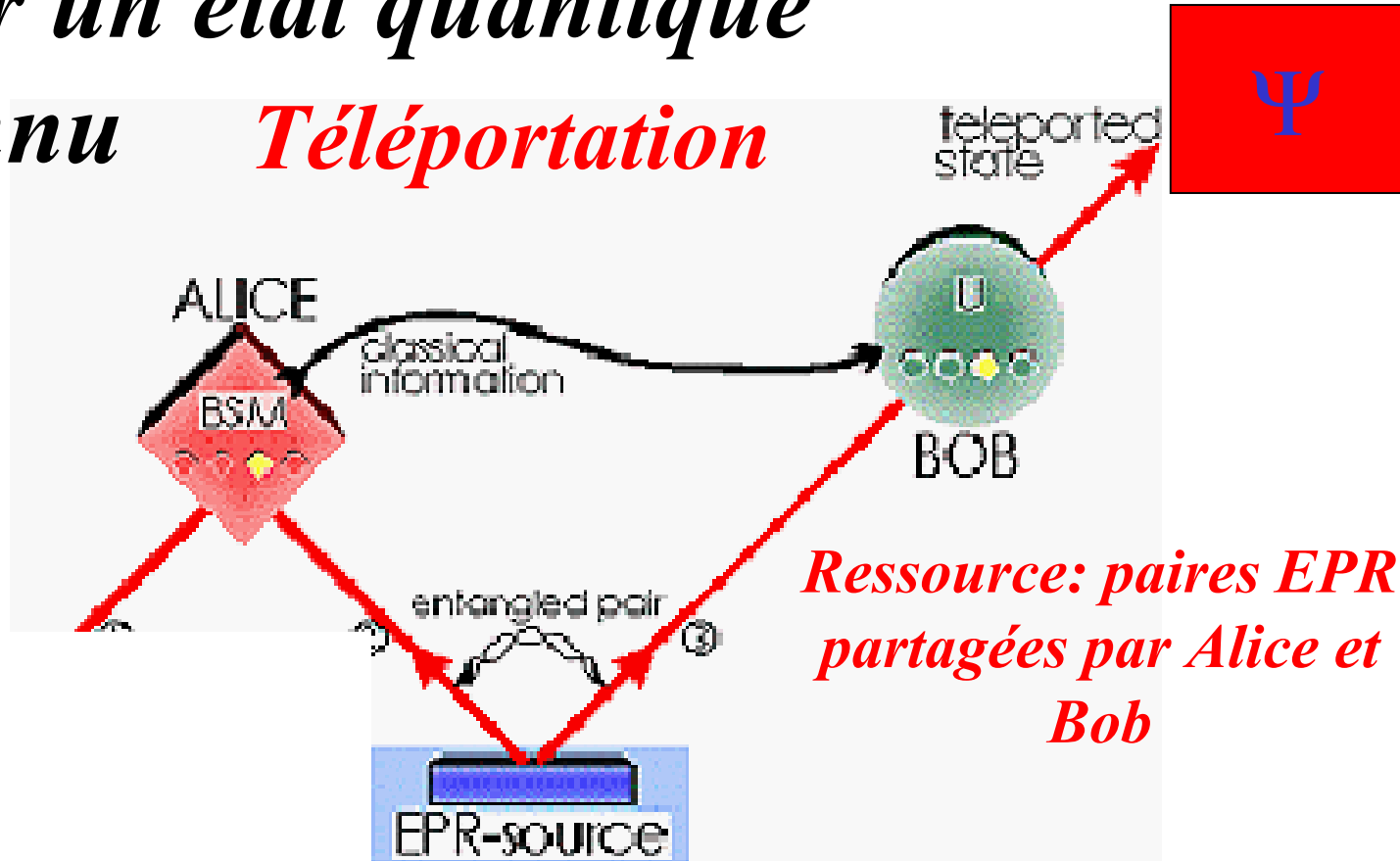
QuickTime™ et un décompresseur
GIF sont requis pour visualiser
cette image.

Cryptographie quantique



*Le partage de paires intriquées de particules par **Alice** et **Bob** leur fournit une « clé » aléatoire commune et **inviolable** pour coder et décoder des messages échangés de façon publique*

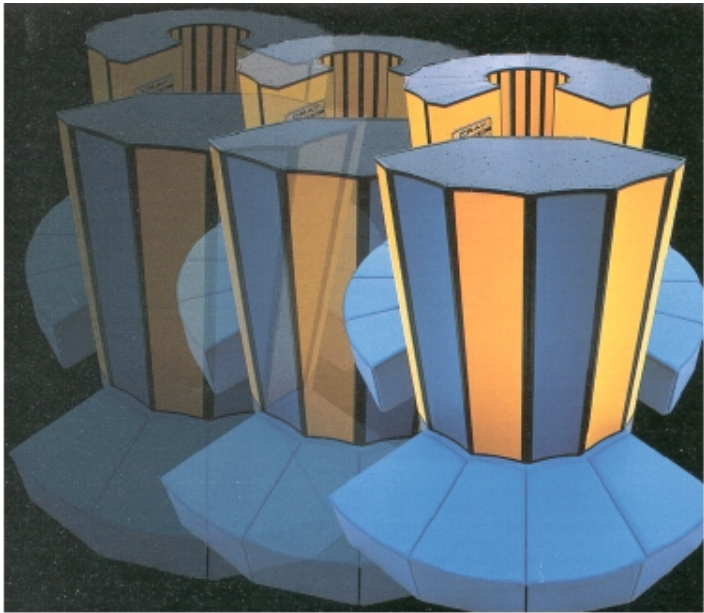
Faxer un état quantique inconnu **Téléportation**



*Ressource: paires EPR
partagées par Alice et
Bob*

*Alice couple son « partenaire » EPR avec la particule et fait une
mesure. Le « partenaire » EPR de Bob « réagit ». Si Bob reçoit
classiquement l'information obtenue par la mesure d'Alice, il peut
reconstituer l'état inconnu de la particule initiale*

Exploiter les superpositions et l'intrication quantique pour calculer?



Des ordinateurs qui calculent en parallèle, avec interférences de leurs sorties...

Algorithmes quantiques beaucoup plus rapides qu'en info. classique (factorisation)

Recherche expérimentale très active sur des systèmes de quelques atomes et photons, avec démonstrations d'opérations logiques élémentaires....

La réalisation d'ordinateurs quantiques macroscopiques se heurte au problème de la décohérence et reste largement utopique

Le traitement quantique de l'information est un domaine très actif sur le plan théorique et expérimental (description et exploitation de la complexité quantique)



A. Omont

F. Laloë

C. Cohen-Tannoudji

A. Kastler

S.H

J. Brossel



Arthur Schawlow (1921-1999)