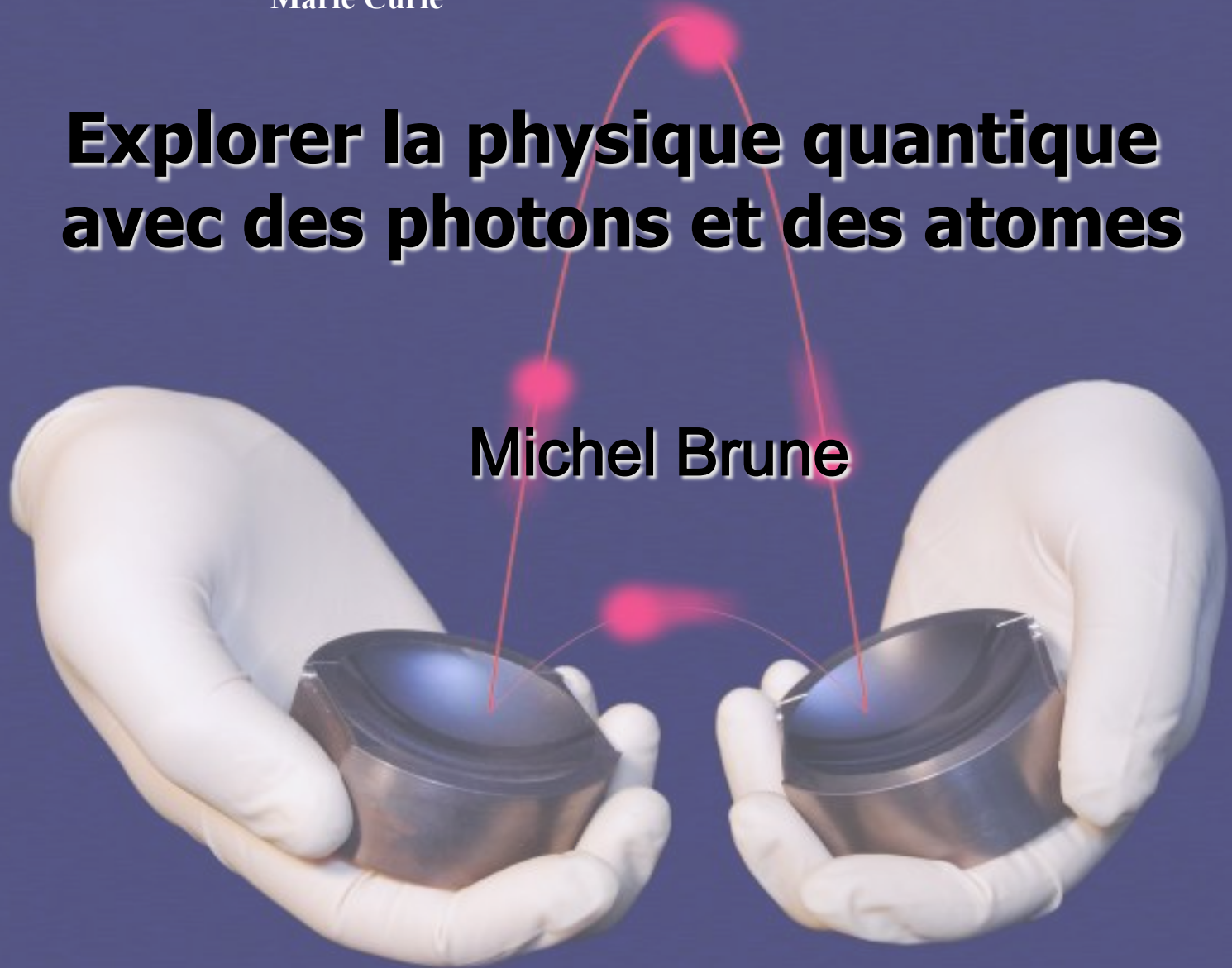




Explorer la physique quantique avec des photons et des atomes

Michel Brune



Paris, France



Nobel 2012: la physique quantique à l'honneur

Stockholm, 8 décembre 2012



Serge Haroche et David Wineland

I. Ondes et particules

De la physique classique
à la physique quantique

La lumière: onde ou particule? Bref historique

- Newton, 1672:
la lumière est faite de
particules



- Descartes 1638
La lumière est une onde



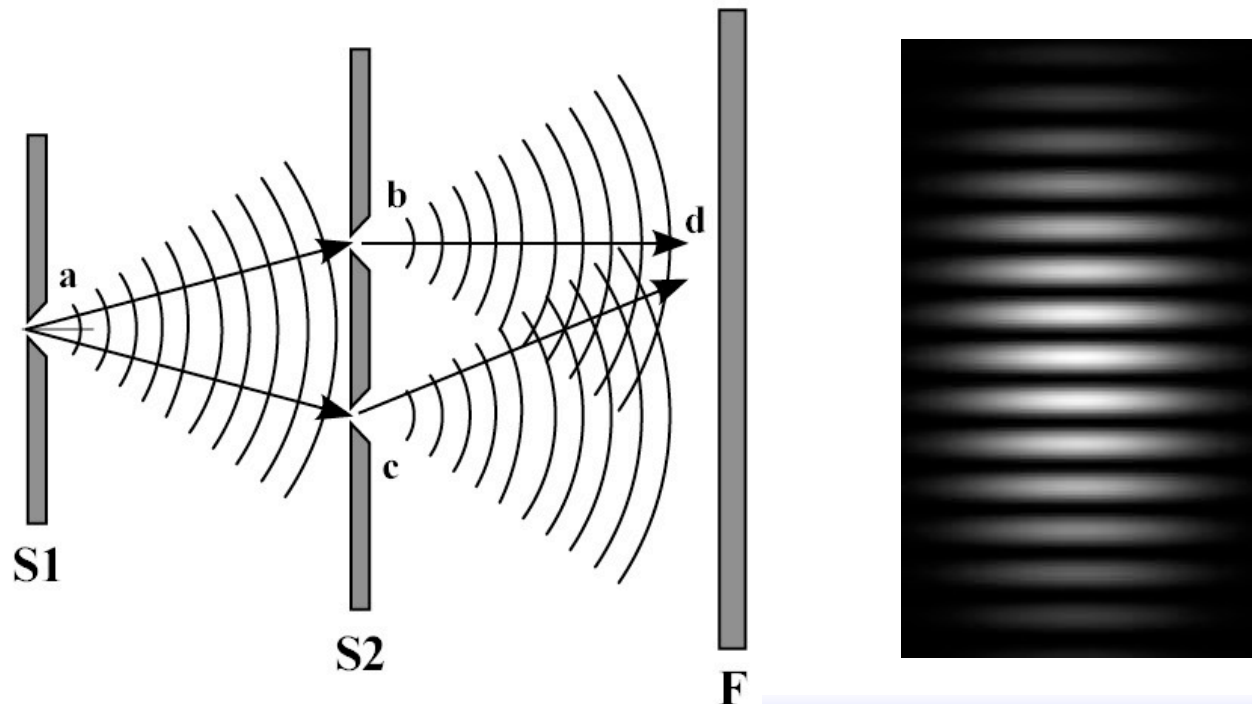
Un verdict expérimental:
Les fentes de Young (1804)

La lumière: onde ou particule?

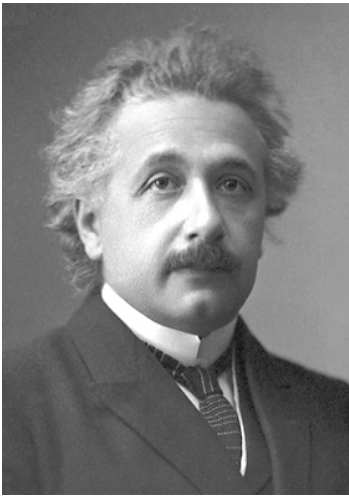
- L'expérience des fentes d'Young (1804):

Point de vue ondulatoire: chacun des deux trous émet une onde. Les deux ondes interfèrent dans la zone où elles se recouvrent

→ on observe des franges d'interférence:
la lumière est une onde



La lumière: onde ou particule?

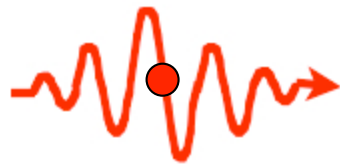


1879-1955

- Einstein 1905: explique l'effet photoélectrique en utilisant la notion de photon (Nobel 1921).

Lorsque la lumière interagit avec la matière, son énergie est quantifiée. Le plus petit quantum d'énergie est l'énergie d'un photon.

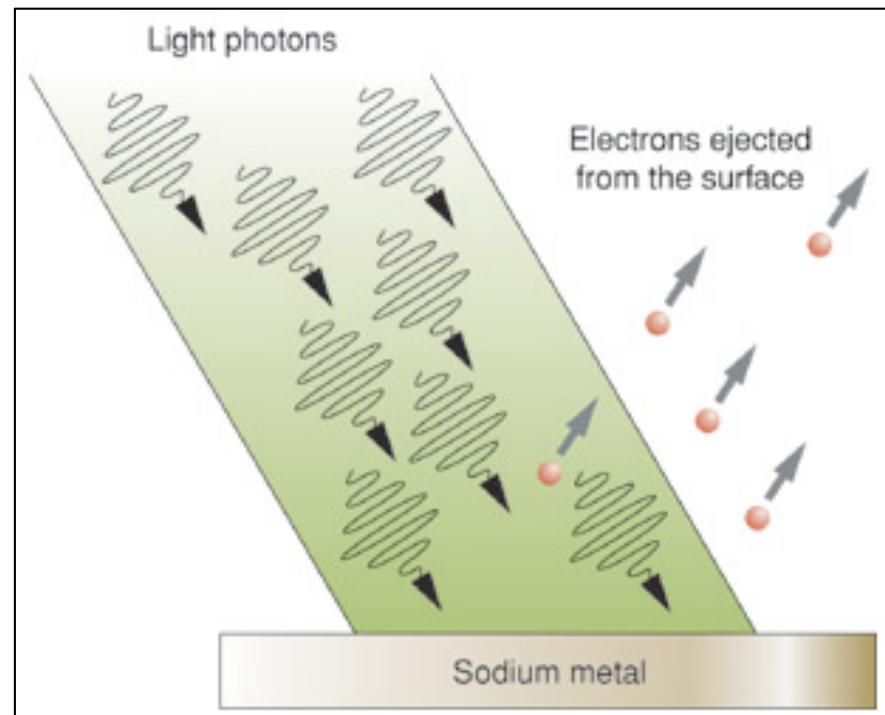
$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$



ν : fréquence de l'onde

λ : longueur d'onde

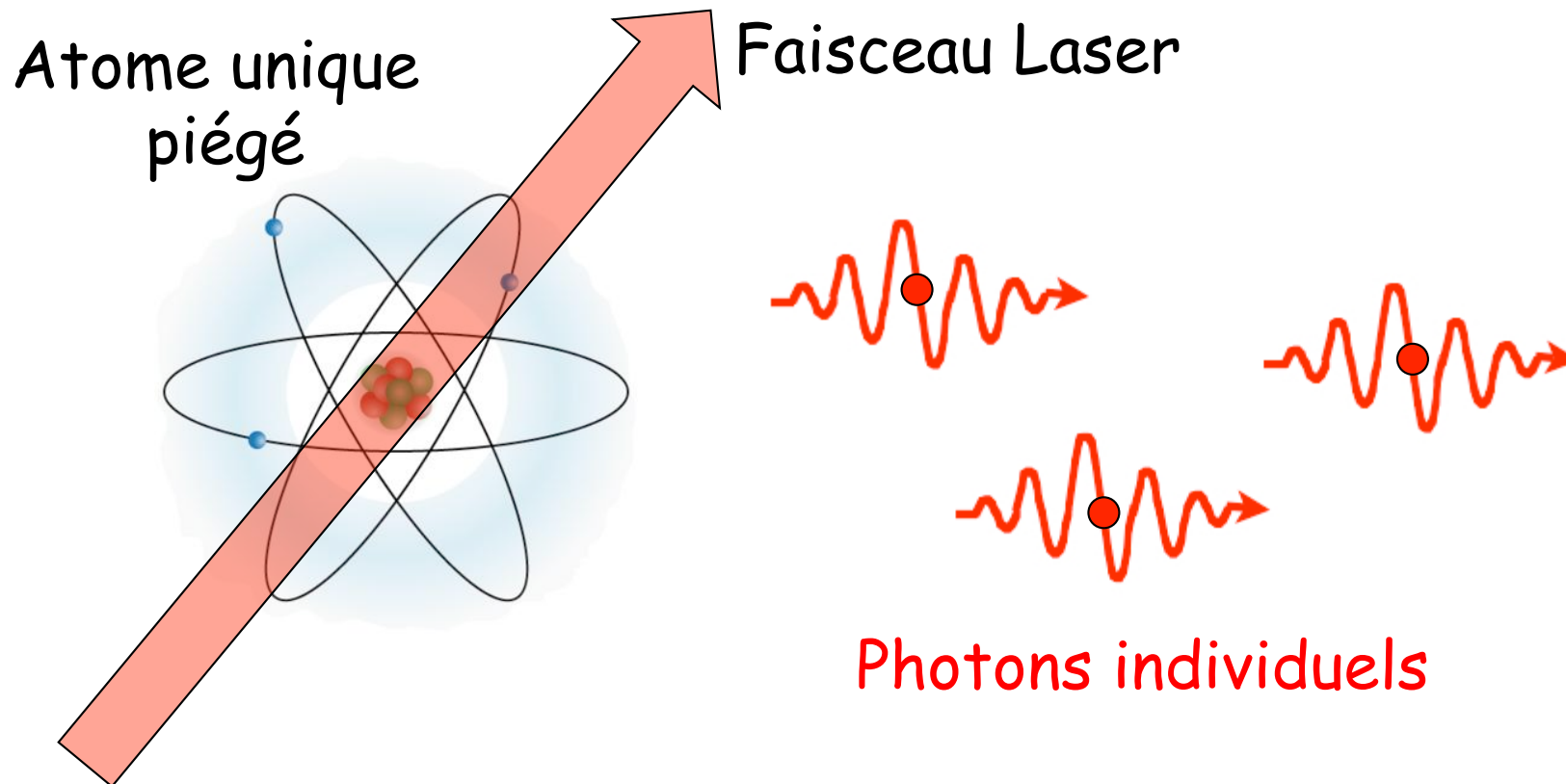
h : constante de Planck



→ La lumière est faite de particules: les photons

La lumière onde ou particule?

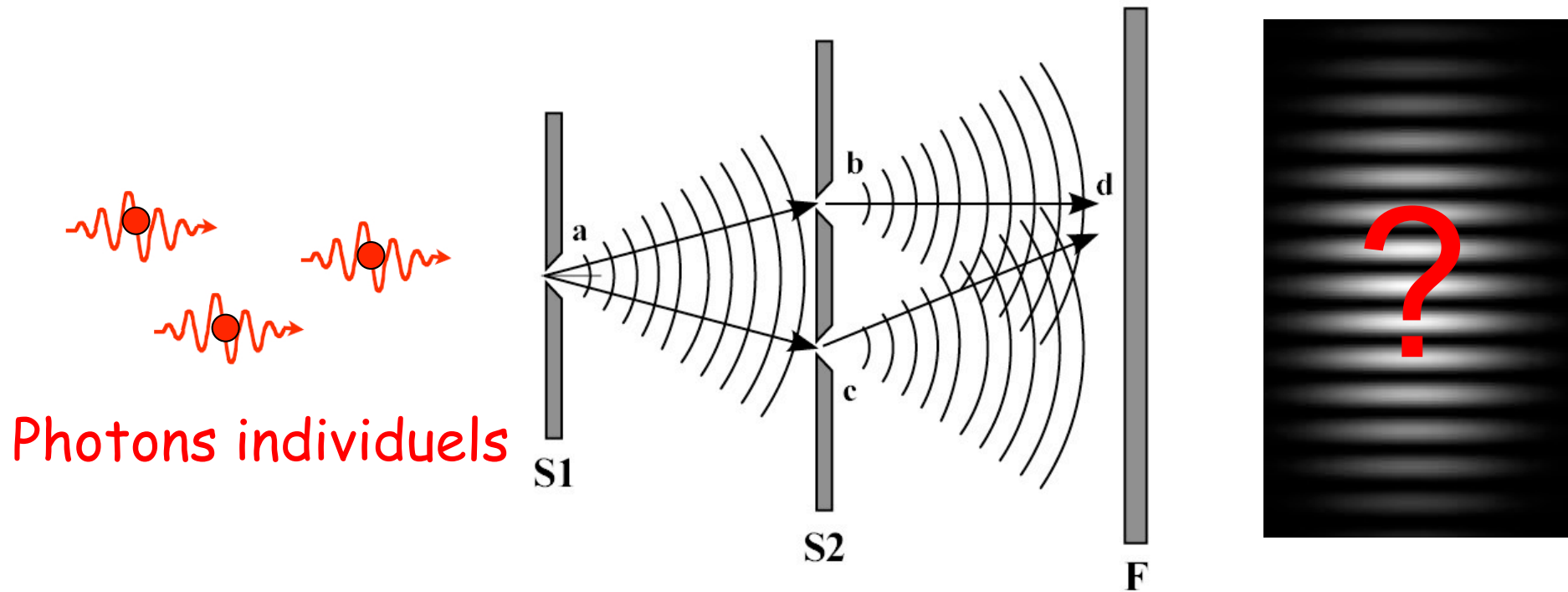
- un seul atome comme source de lumière:



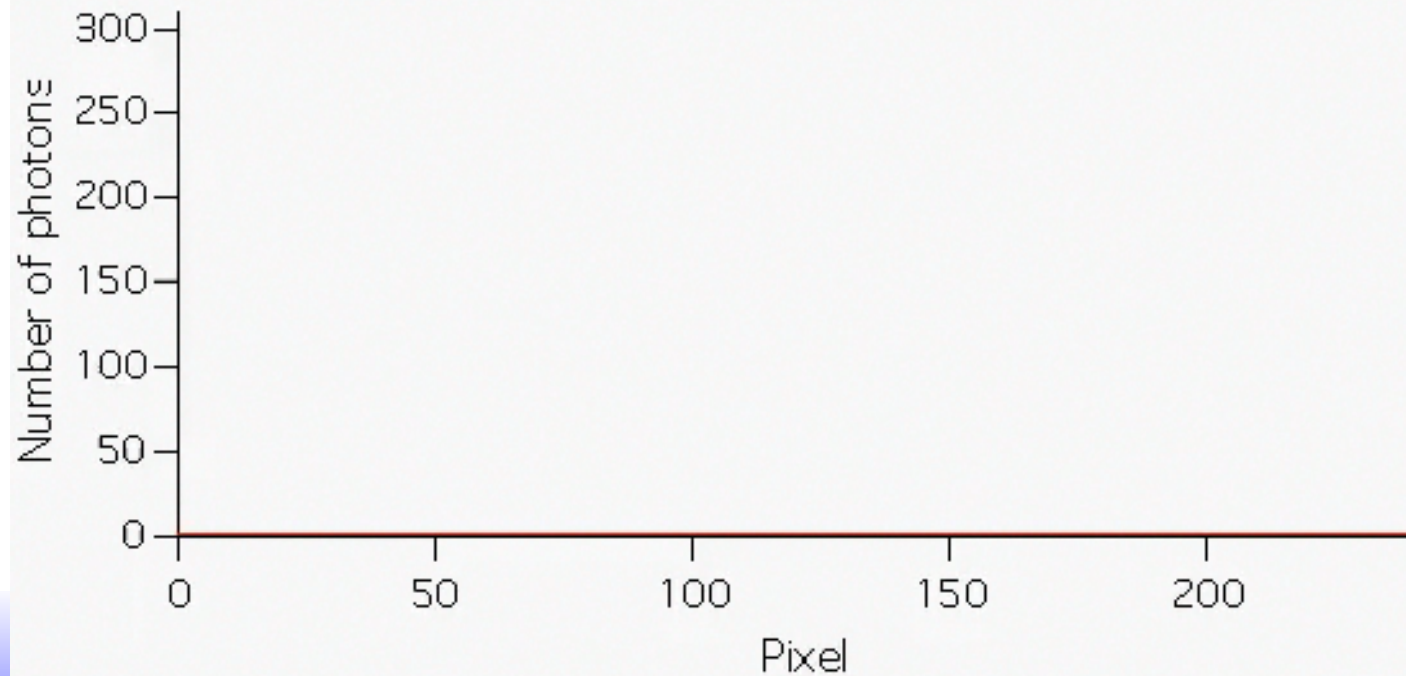
Un atome ne peut absorber qu'un seul photon à la fois
→ Un atome excité émet des photons un par un

La lumière onde ou particule?

- Retour sur l'expérience des fentes de Young

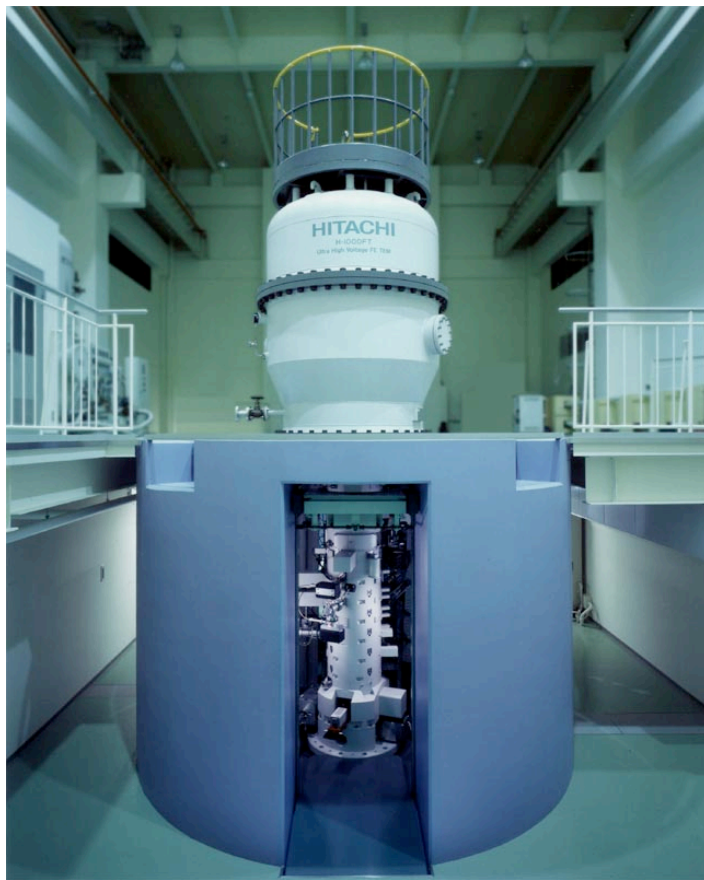


Interférences photon par photon

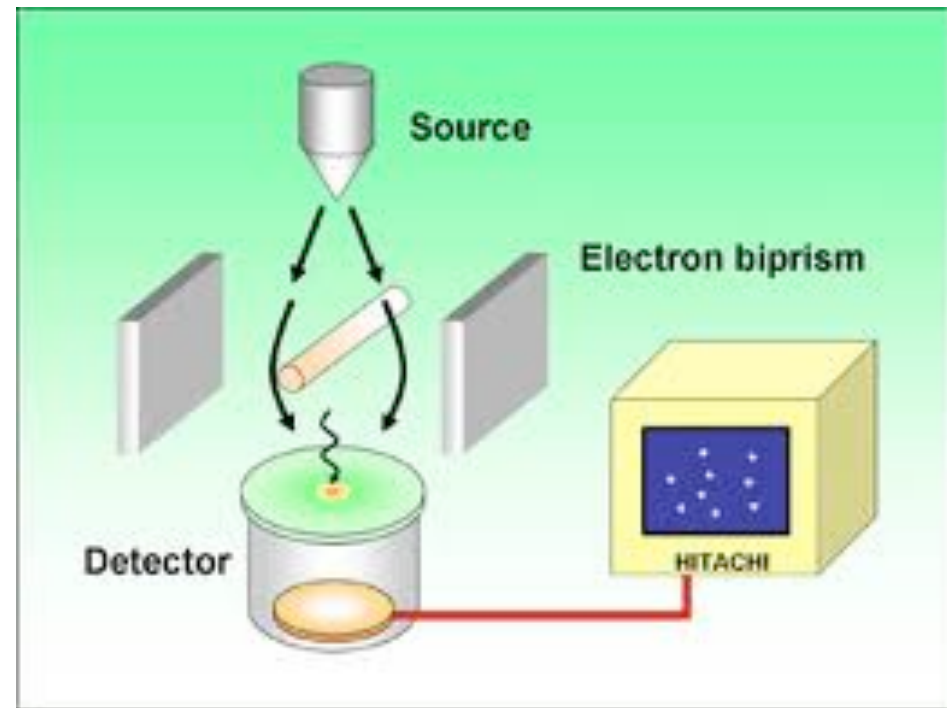


Onde ou particule, quid de la matière?

- L'expérience des fentes de Young avec de la matière:

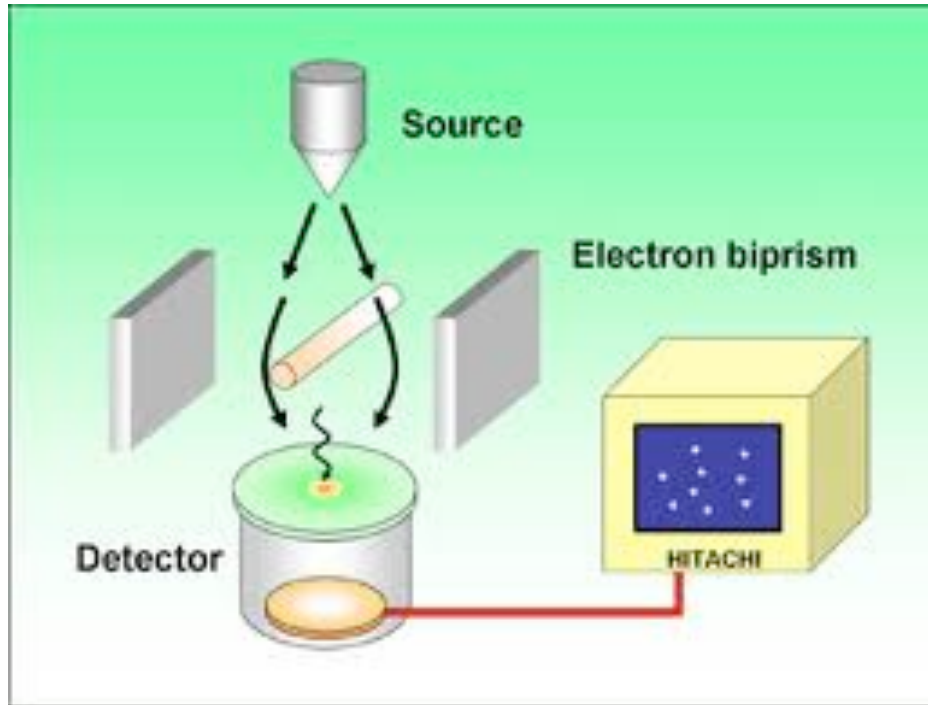


Microscope électronique
Tonomura, Hitachi, Japon



L'étrangeté quantique de la matière

- Chaque électron a une « trajectoire » aléatoire:



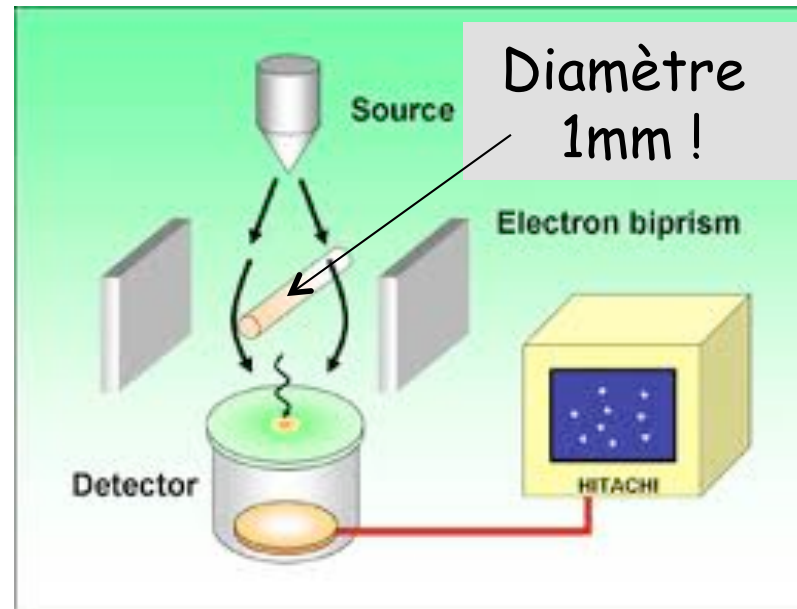
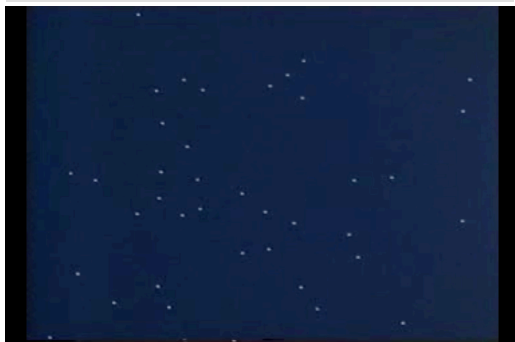
Pourtant, tous les électrons sont préparés exactement dans le même état initial: les événements « quantiques » sont fondamentalement impossible à prévoir exactement.

C'est la fin du « déterminisme » de la physique

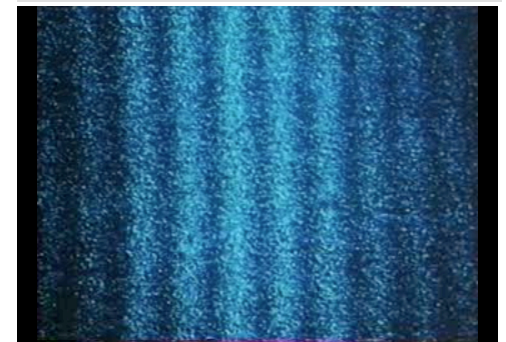
L'étrangeté quantique de la matière

- Chaque électron passe « à la fois » des deux côtés du fil:

Les électrons arrivent un par un.



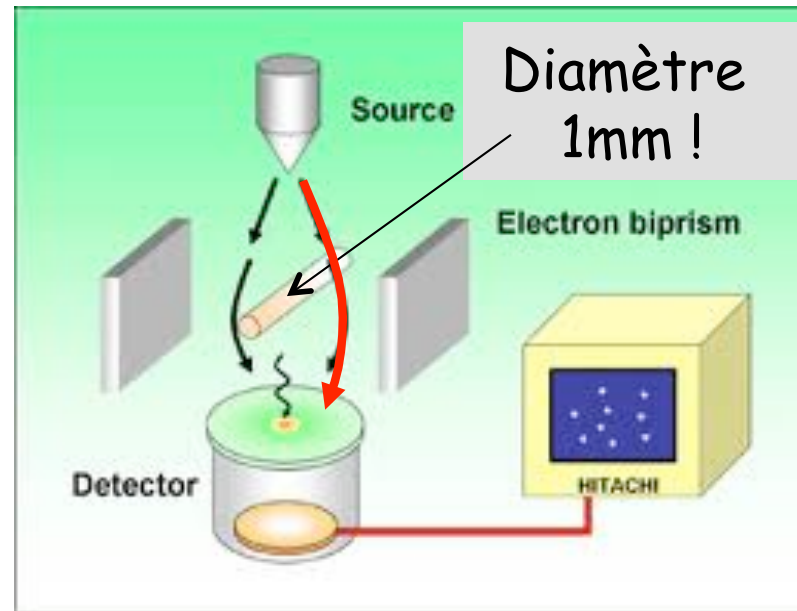
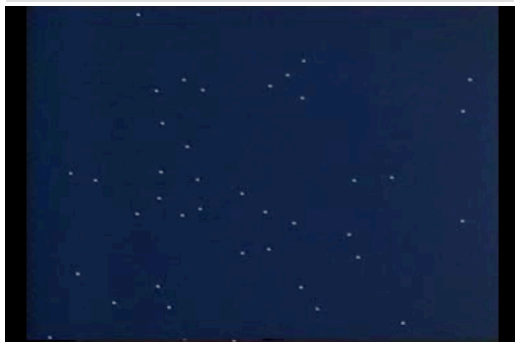
Il y a des interférences



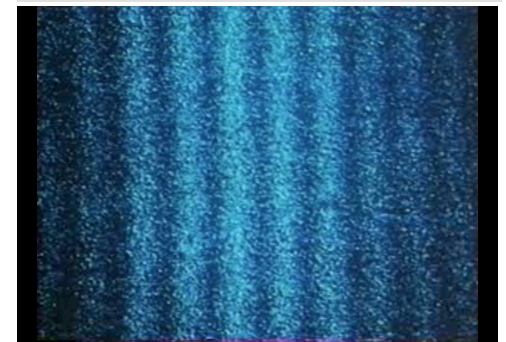
L'étrangeté quantique de la matière

- Chaque électron passe « à la fois » des deux côtés du fil:

Les électrons arrivent un par un.



Il y a des interférences

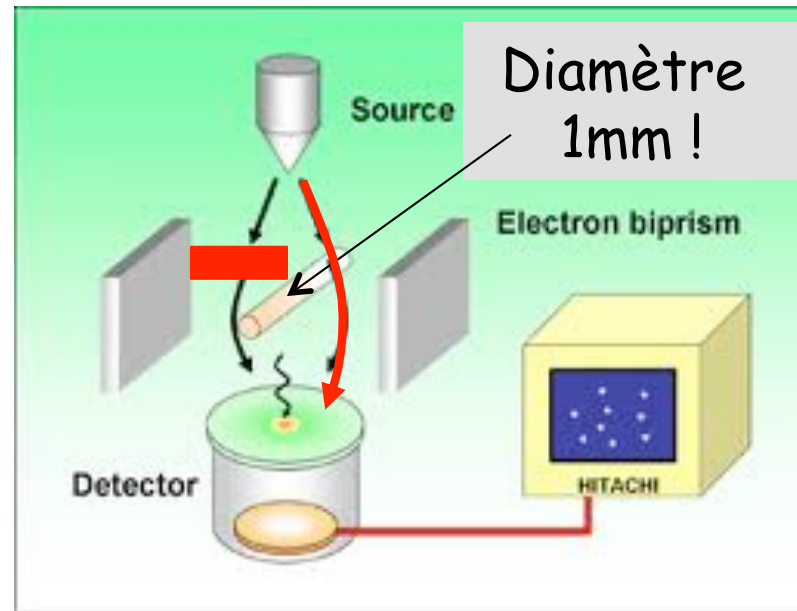
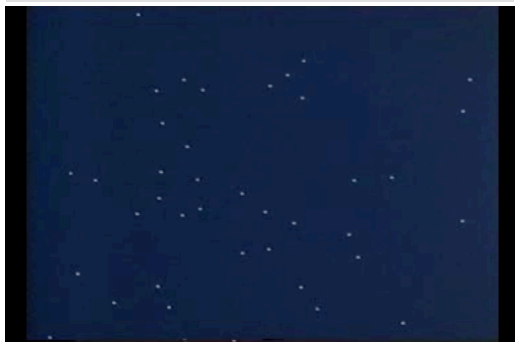


- Si un électron donné « passe à droite »: alors rien ne change pour lui si on ferme la voie de gauche .

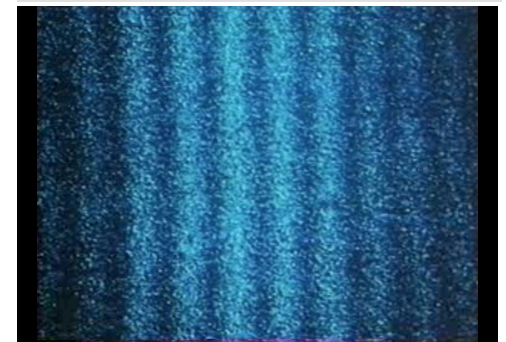
L'étrangeté quantique de la matière

- Chaque électron passe « à la fois » des deux côtés du fil:

Les électrons arrivent un par un.



Il y a des interférences

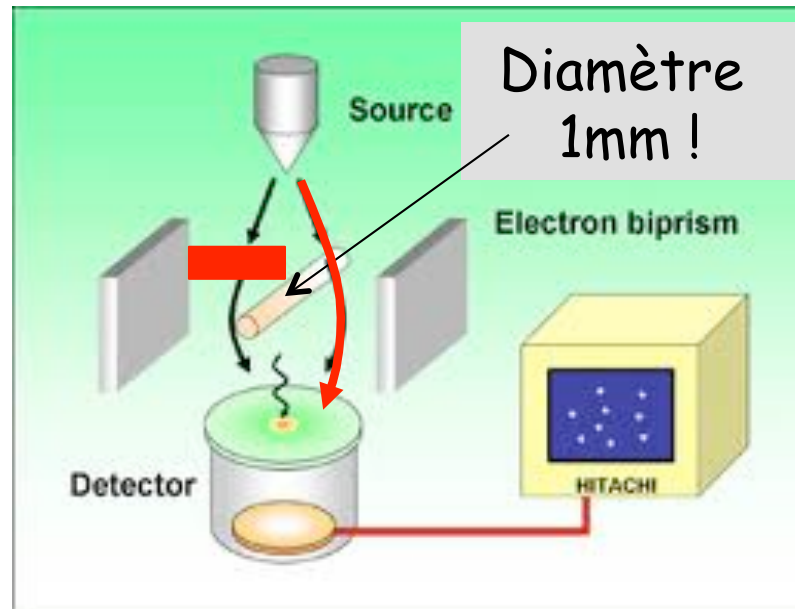
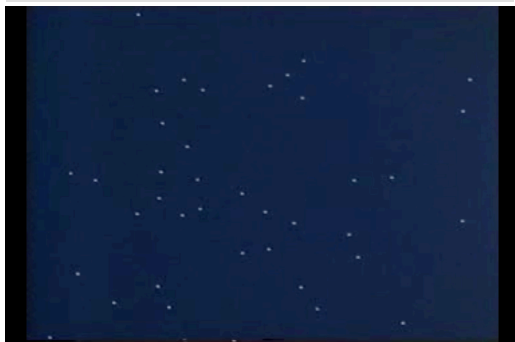


- Si un électron donné « passe à droite »: alors rien ne change pour lui si on ferme la voie de gauche .
- Si la voie de gauche est fermée: il ne peut pas y avoir d'interférences.

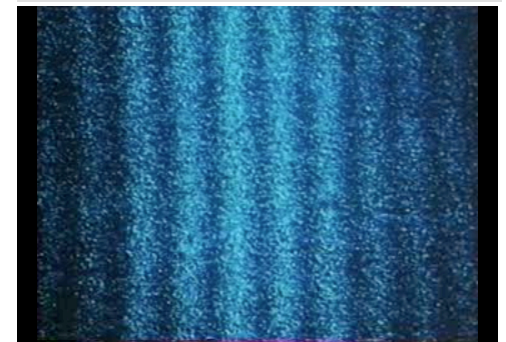
L'étrangeté quantique de la matière

- Chaque électron passe « à la fois » des deux côtés du fil:

Les électrons arrivent un par un.



Il y a des interférences



- Si un électron donné « passe à droite »: alors rien ne change pour lui si on ferme la voie de gauche .
- Si la voie de gauche est fermée: il ne peut pas y avoir d'interférences.

➔ Pour qu'il y ait des interférences il faut admettre que chaque électron passe « à la fois » à droite et à gauche !

Application des ondes de matière

- Ce microscope électronique sert (surtout) à voir l'infiniment petit



Tonomura, Hitachi, Japon

Imagerie à « ondes de matière »

Tête de mouche

Microscopie
à électrons

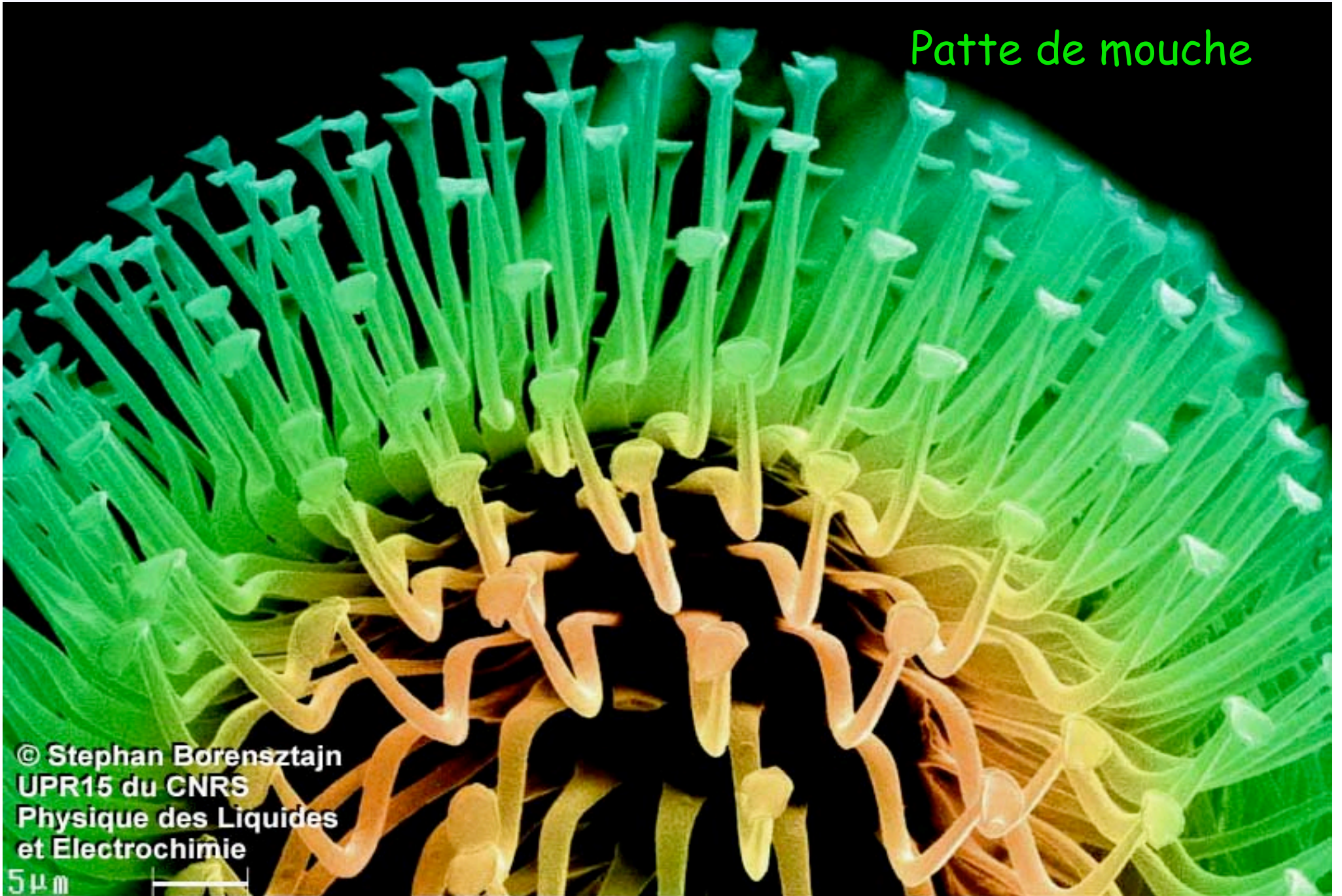
© Stephan Borensztajn
UPR15 du CNRS
Physique des Liquides
et Electrochimie

50 μ m



Imagerie à « ondes de matière »

Patte de mouche



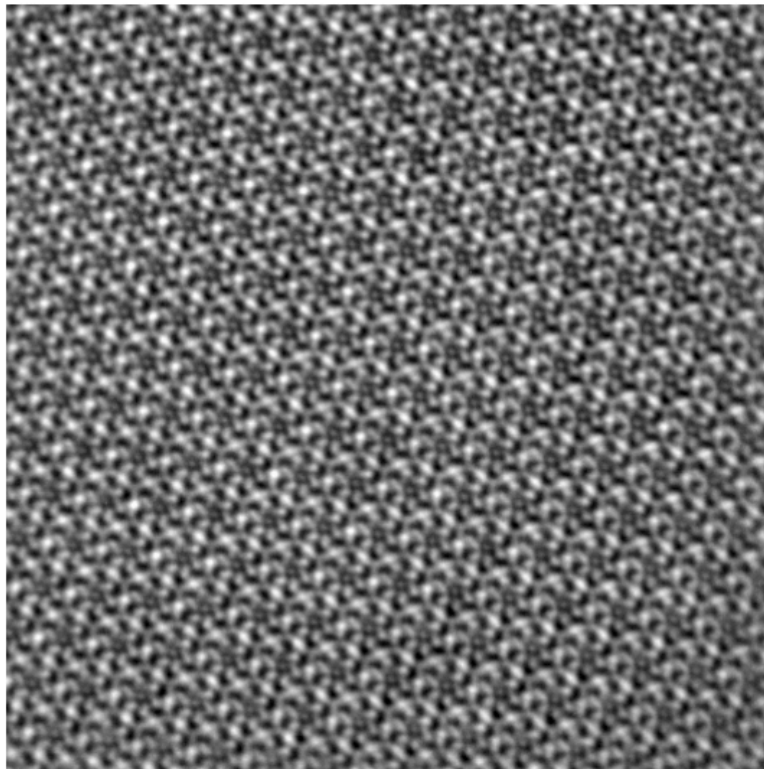
© Stephan Borensztajn
UPR15 du CNRS
Physique des Liquides
et Electrochimie

5 μ m

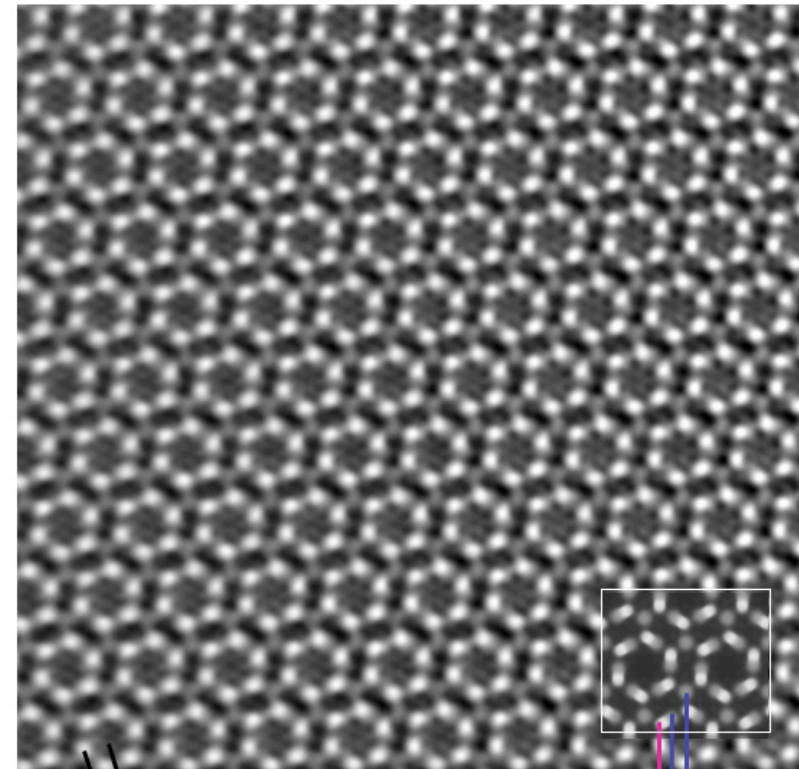
Imagerie à « ondes de matière »

Microscopie électronique:
voir une structure cristalline à l'échelle atomique

Lattice Image of silicon nitride:
0.27 nm, $f = -279$ nm, $t = 8$ nm



Reconstructed electron exit wave (phase)



0.18 nm

Simulation: Si N_{1,2}

L'étrangeté du monde quantique

- **Principe de superposition:** Une particule peut être « à la fois » en deux lieux différents.

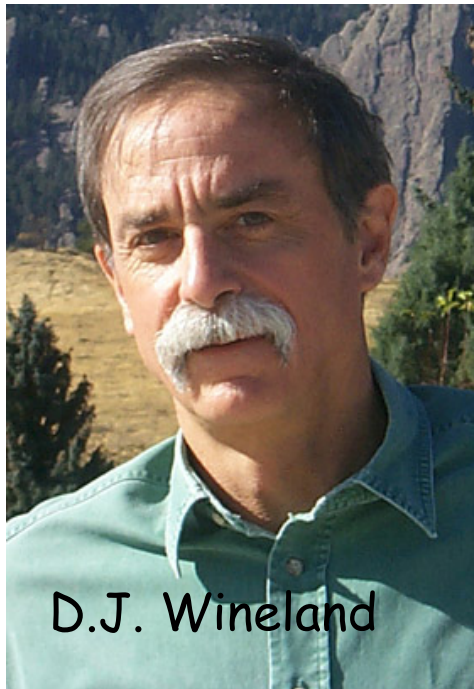
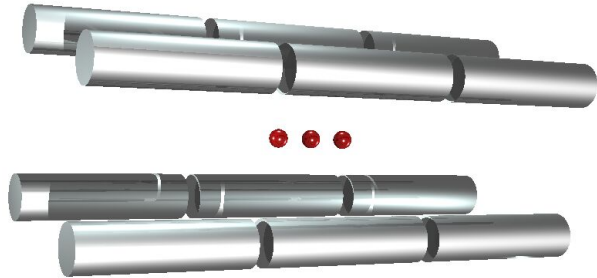
Si A et B sont deux états possibles alors « $A+B$ » est également possible

- **Non-déterminisme:**
 - les résultats de mesure sont aléatoires: la physique quantique ne prédit « que » les résultats possibles et leur probabilité de se produire.
- **Observer un état change cet état de façon aléatoire mais ne le détruit pas:**

Lorsqu'on l'observe, un état quantique doit « choisir » un des résultats possibles. Après mesure, il est dans cet état.

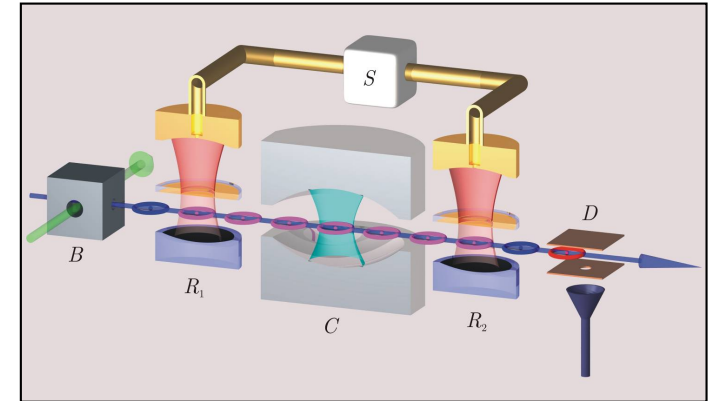
Piéger et mesurer un objet quantique individuel

- Ions piégés



D.J. Wineland

- Photons piégés

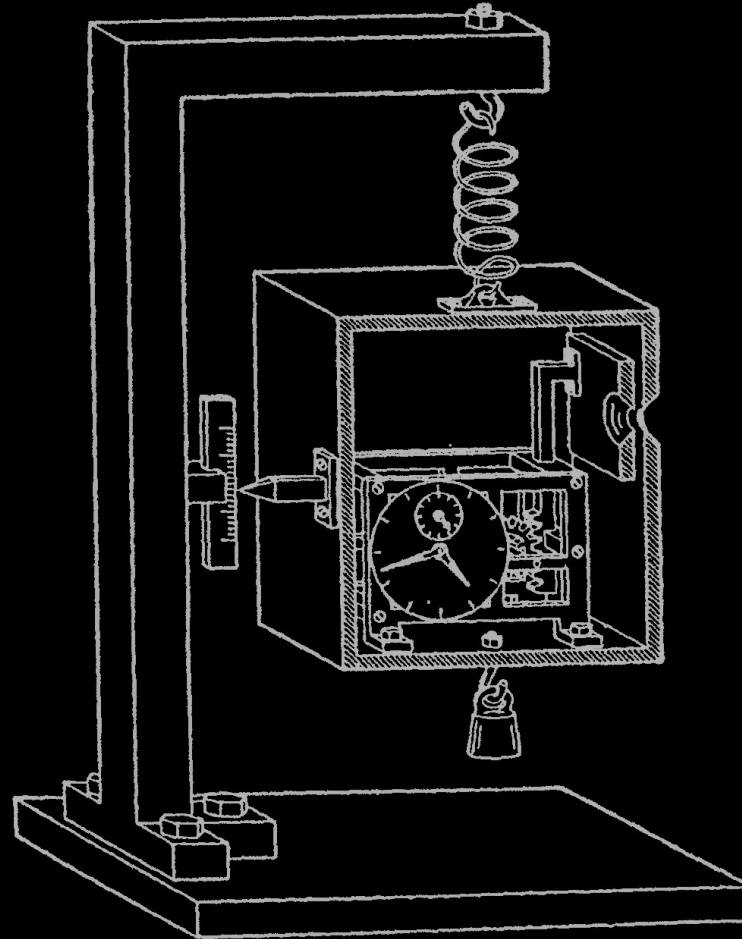


S. Haroche

Nobel 2012



Mesurer des photons piégés dans une boîte



La mesure quantique à l'épreuve de l'expérience:
Peut-on voir et revoir un même photon?

II. Compter des photons

« voir et revoir » un même photon

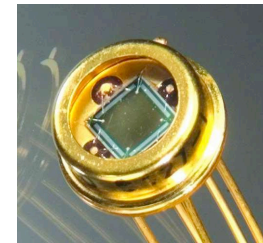
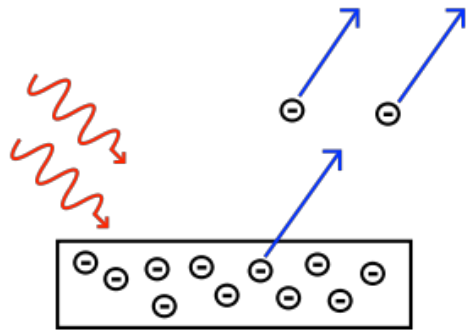
Détecter des photons

- C'est facile, mais toutes les méthodes « ordinaires » sont destructrices:

- Œil

- Photodétecteur:

photodiode, photomultiplicateurs



Tous ces détecteurs sont basés sur l'effet photoélectrique: un photon est absorbé pour mettre des charges en mouvement.

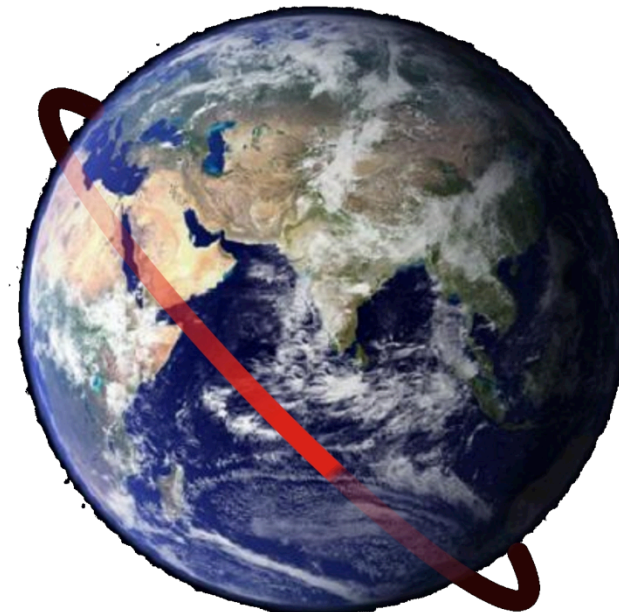
On est très loin d'une mesure quantique idéale!

La "boite" à photons

- Miroirs supraconducteurs

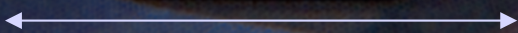
- Résonance : $f_{\text{cav}} = 51 \text{ GHz}$
- finesse = $4 \cdot 10^9$

$$T_{\text{cav}} = 0.13 \text{ s}$$



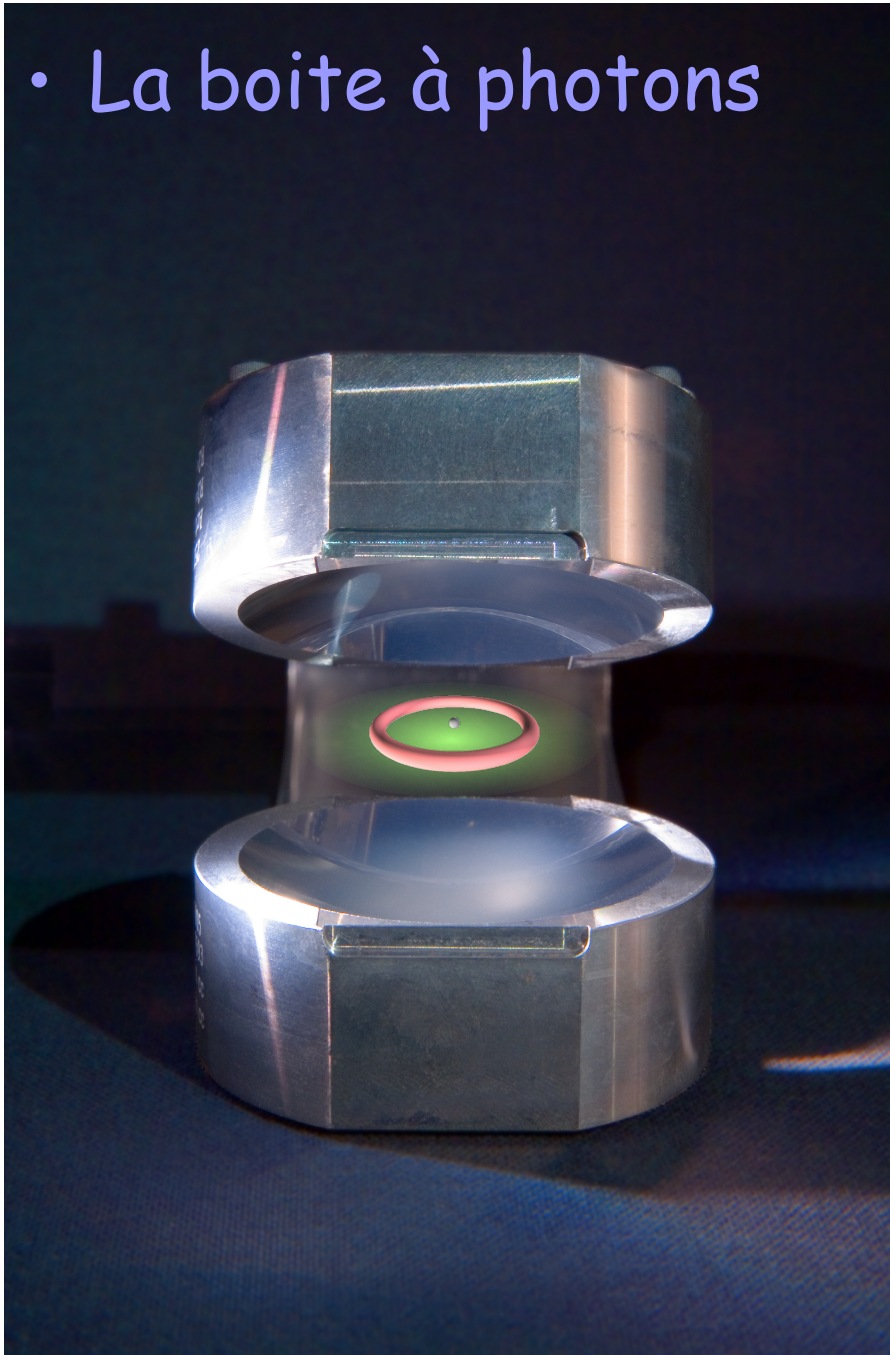
Les photons parcourent 40 000 km avant de disparaître!

5 cm



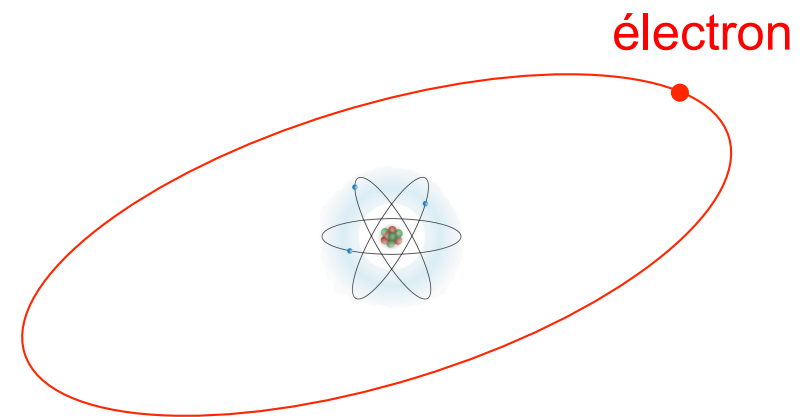
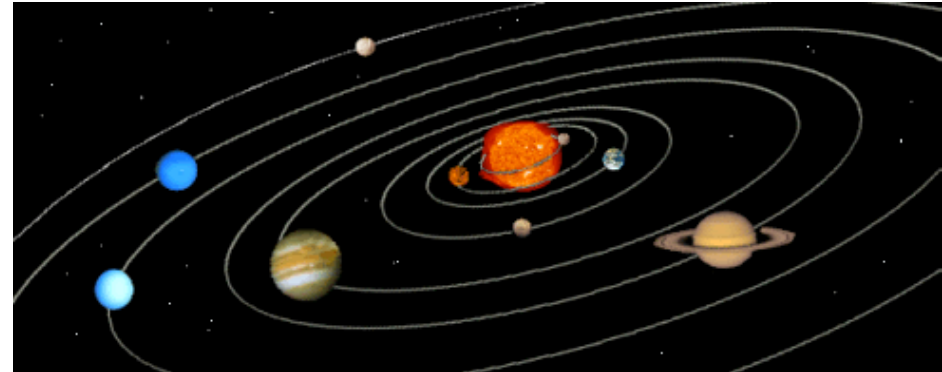
Les sondes: atomes "circulaires"

- La boîte à photons



Les atomes:

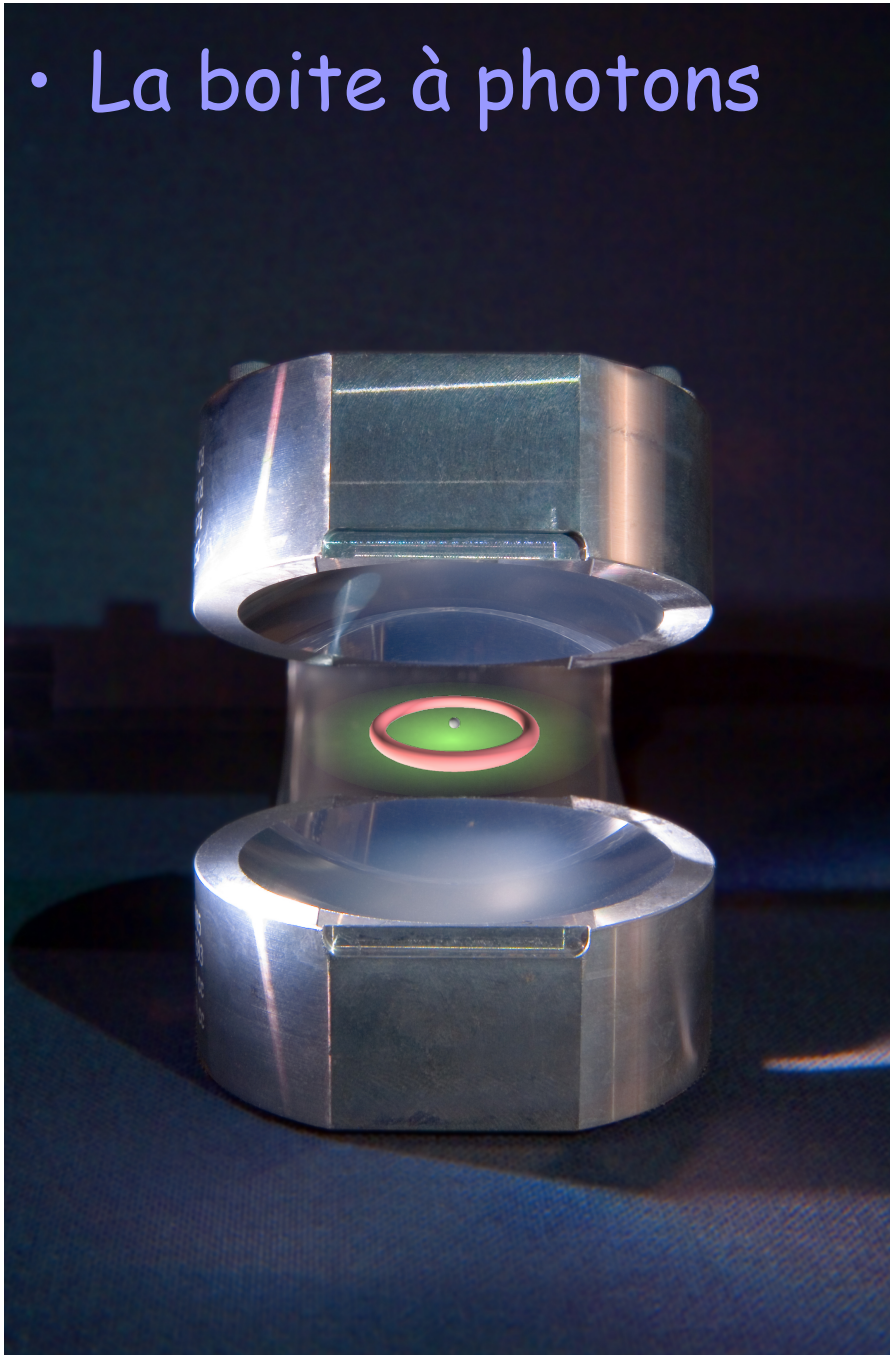
- Modèle planétaire:



Un électron est placé sur une orbite très éloignée

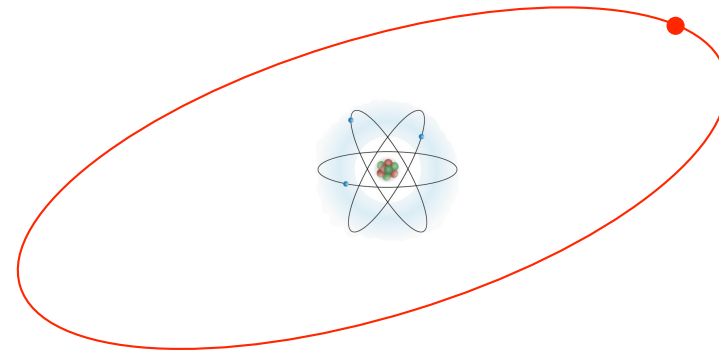
Les sondes: atomes "circulaires"

- La boîte à photons

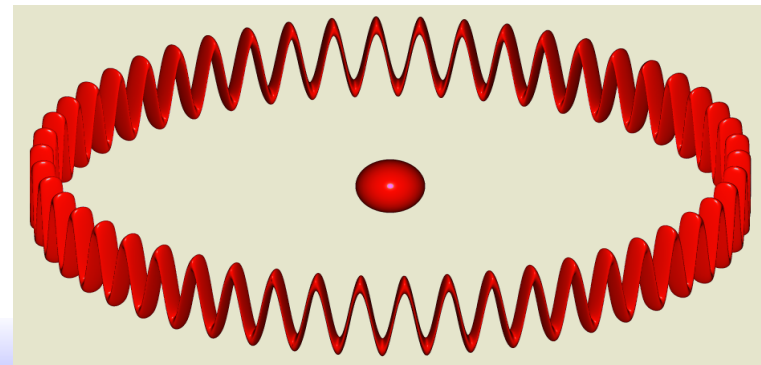


Les atomes:

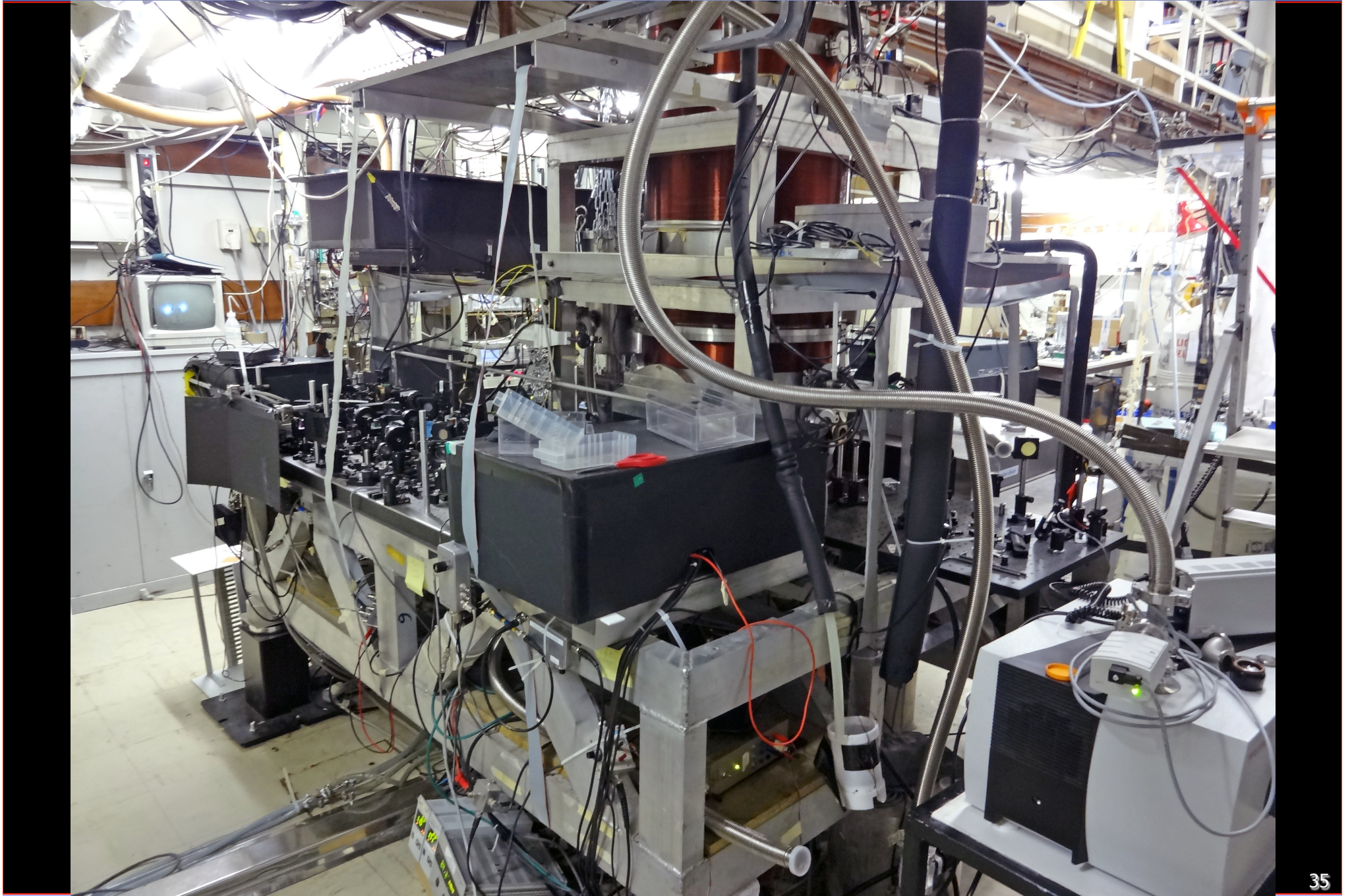
- Modèle planétaire:



- Modèle ondulatoire:
Une onde de matière stationnaire

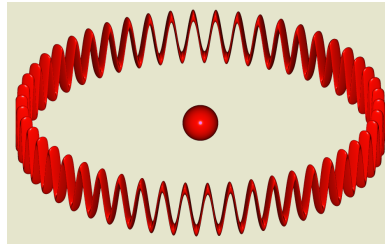


Le dispositif expérimental

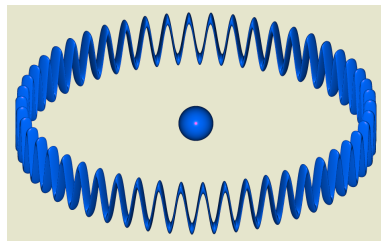


Les atomes utilisés comme « horloges »

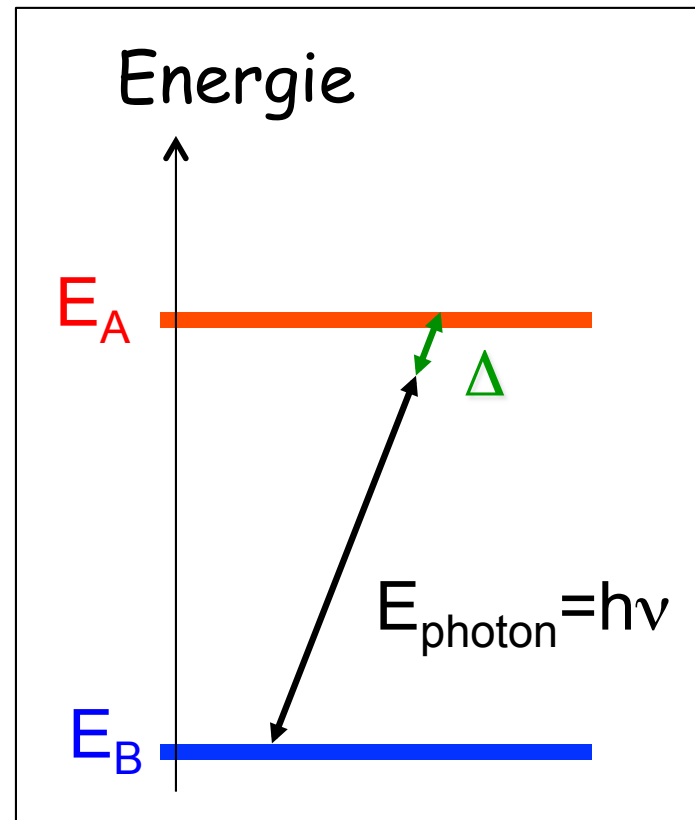
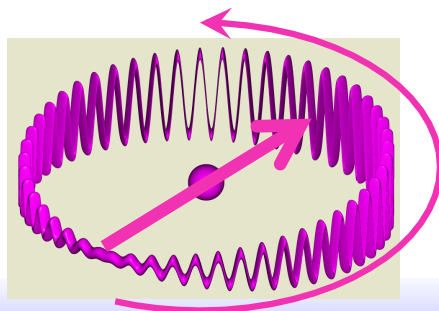
Etat A
 $n = 51$ ondes



Etat B
 $n = 50$ ondes

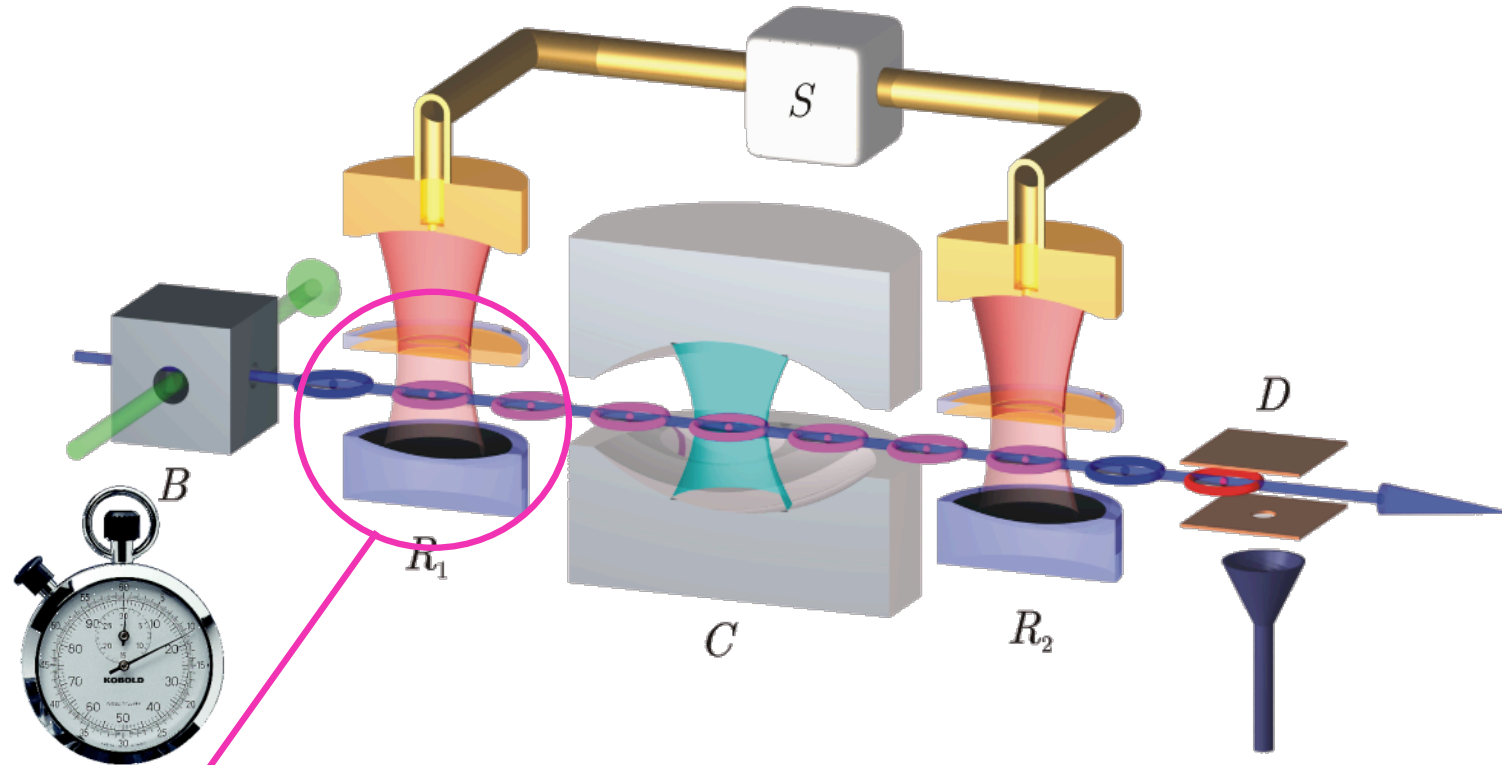


Etat
superposition
« A+B »

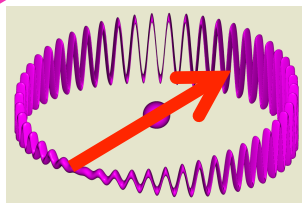


Etat électronique « localisé » qui tourne autour du noyau à une fréquence très précise, proche de la fréquence des photons

Détecter un photon sans le détruire

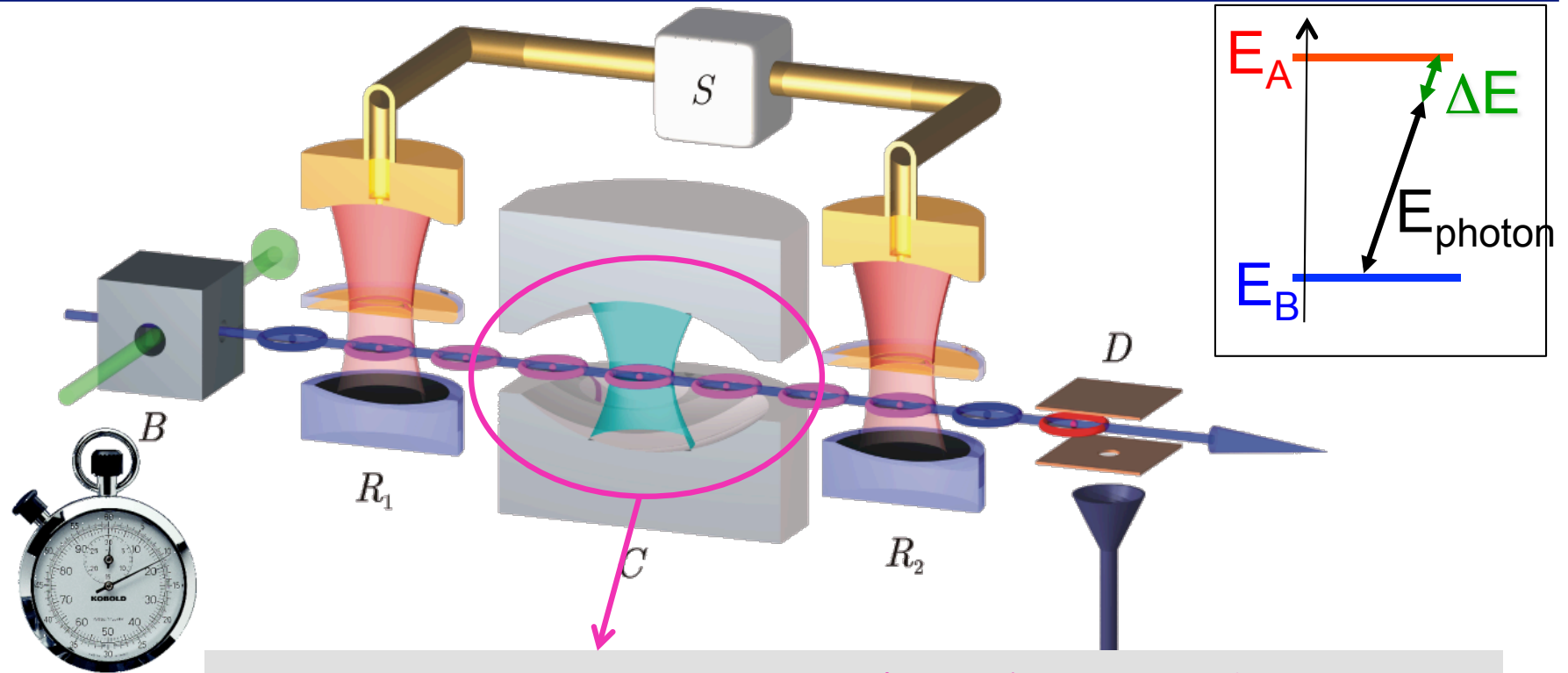


1- Préparation de A+B



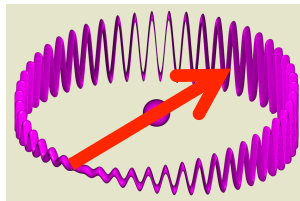
Etat
« A+B »

Détecter un photon sans le détruire



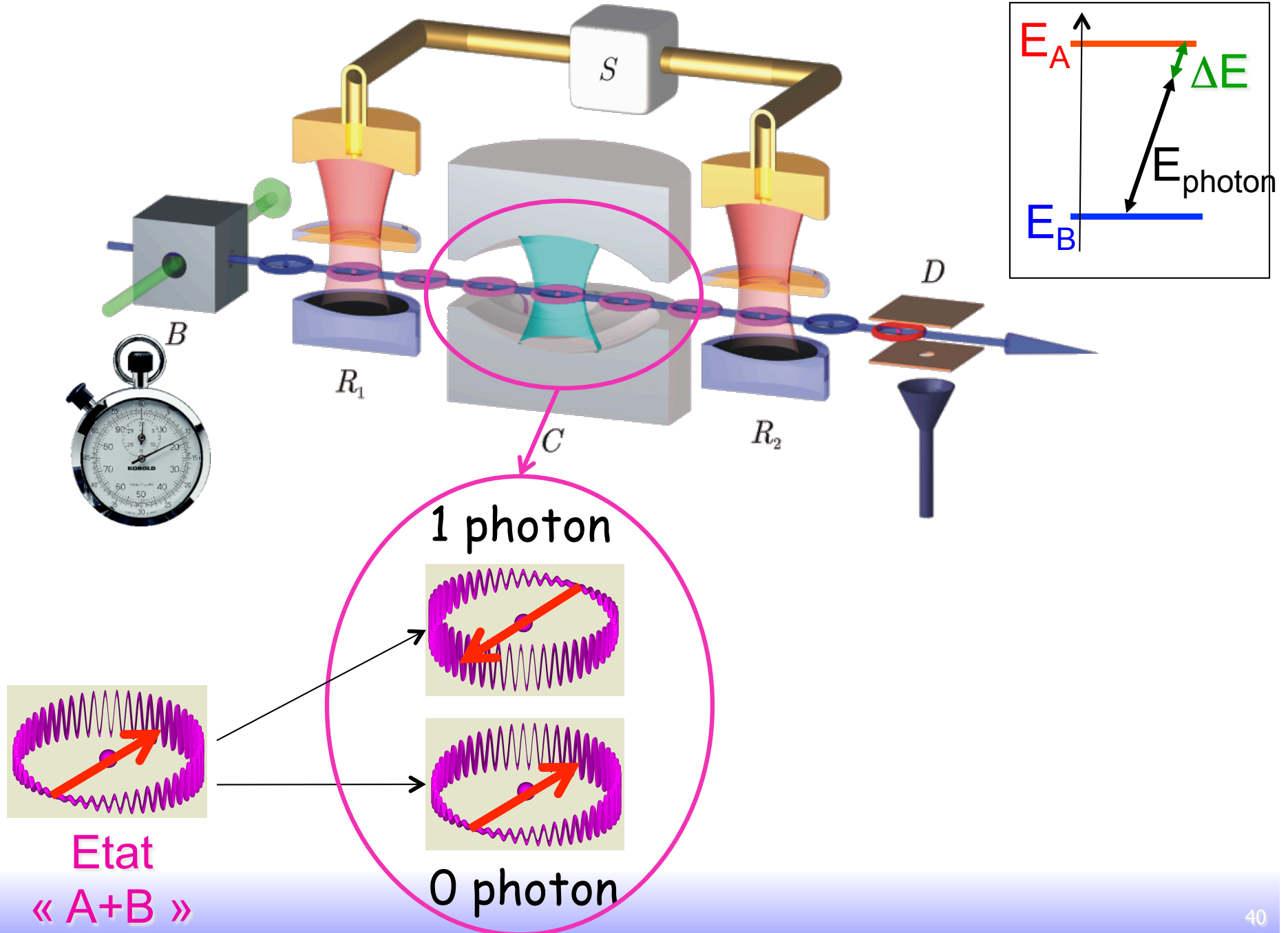
2- Interaction avec les photons dans C

- L'énergie d'un photon est insuffisante pour exciter l'atome: **un photon ne peut pas être absorbé** (ou émis)
- Un photon exerce une force sur l'électron que **retarde ou avance** son mouvement

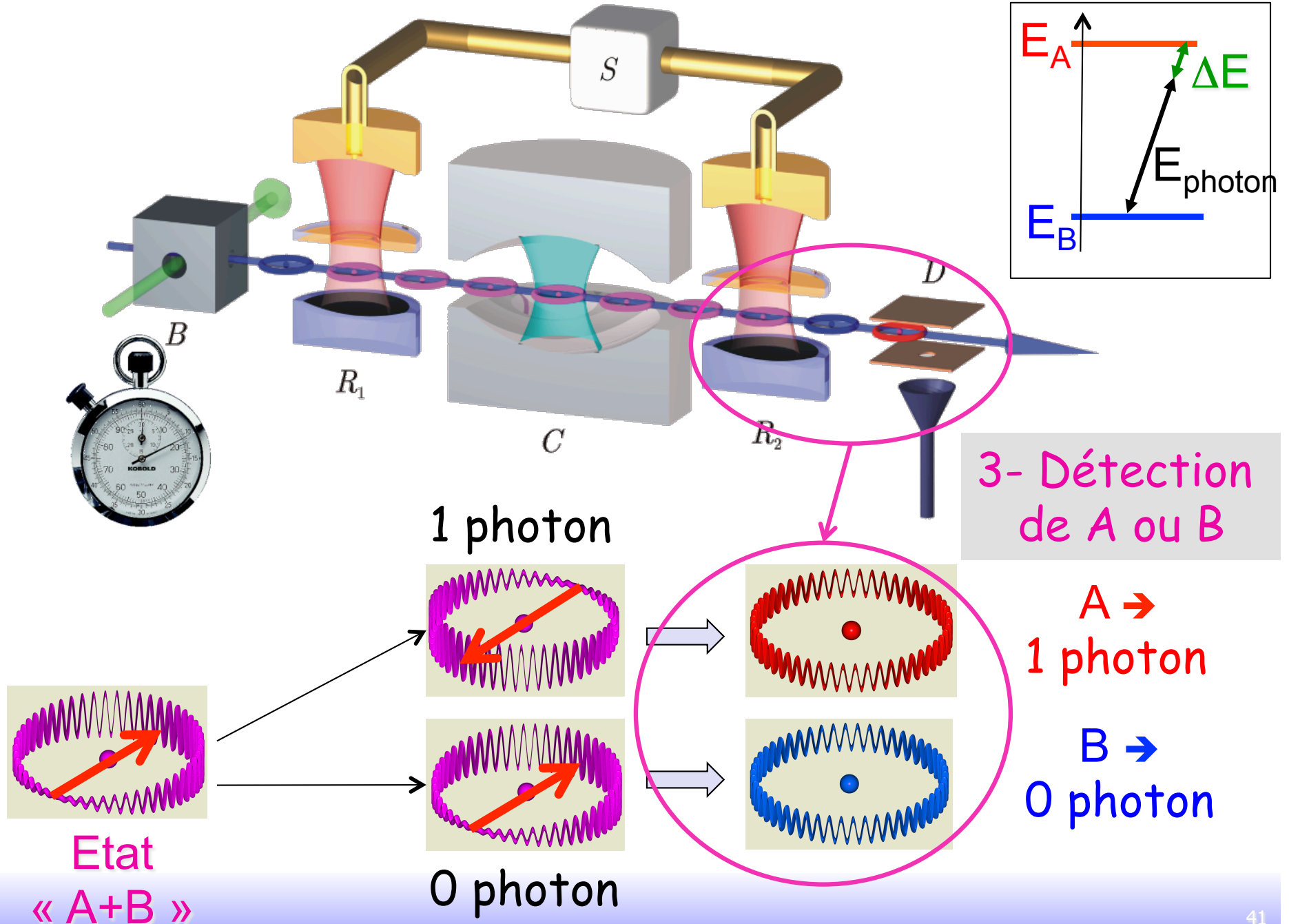


Etat
« $A+B$ »

Détecter un photon sans le détruire



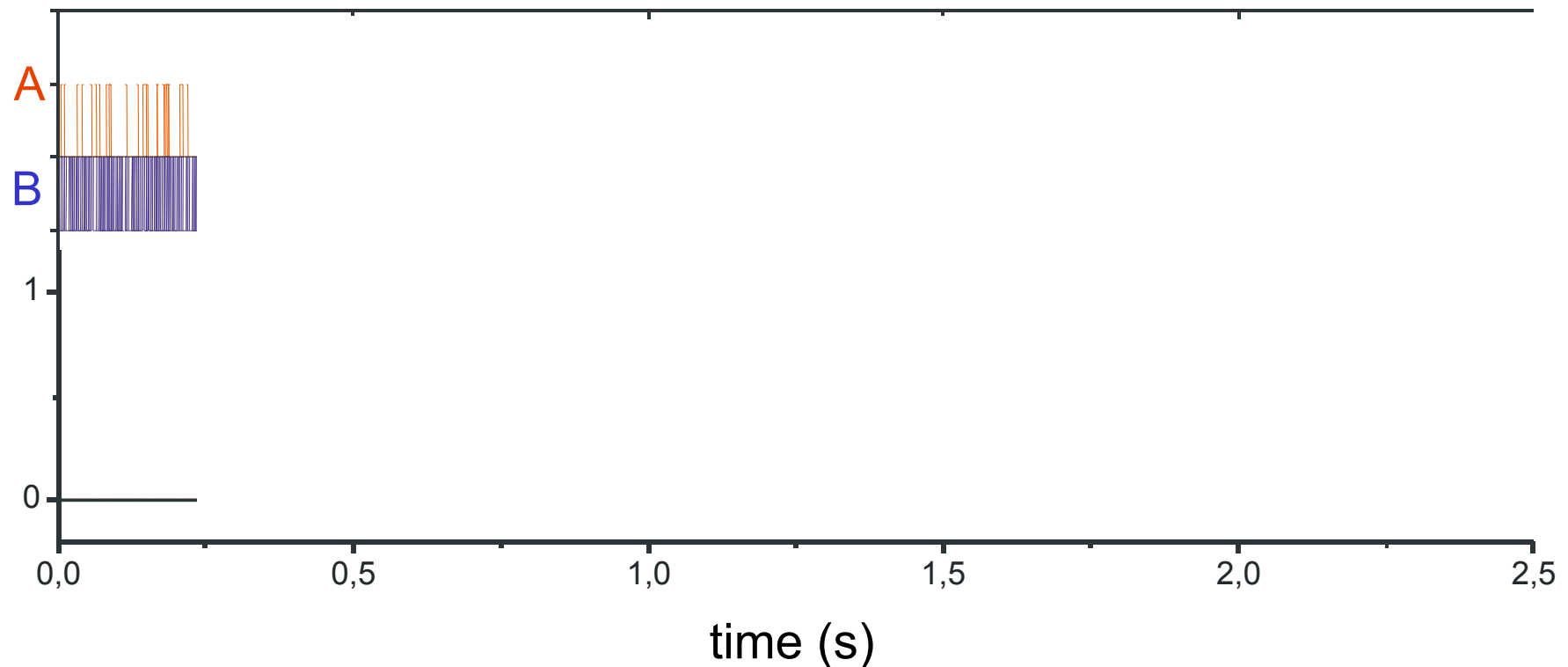
Détecter un photon sans le détruire



Détection non-destructive d'un photon

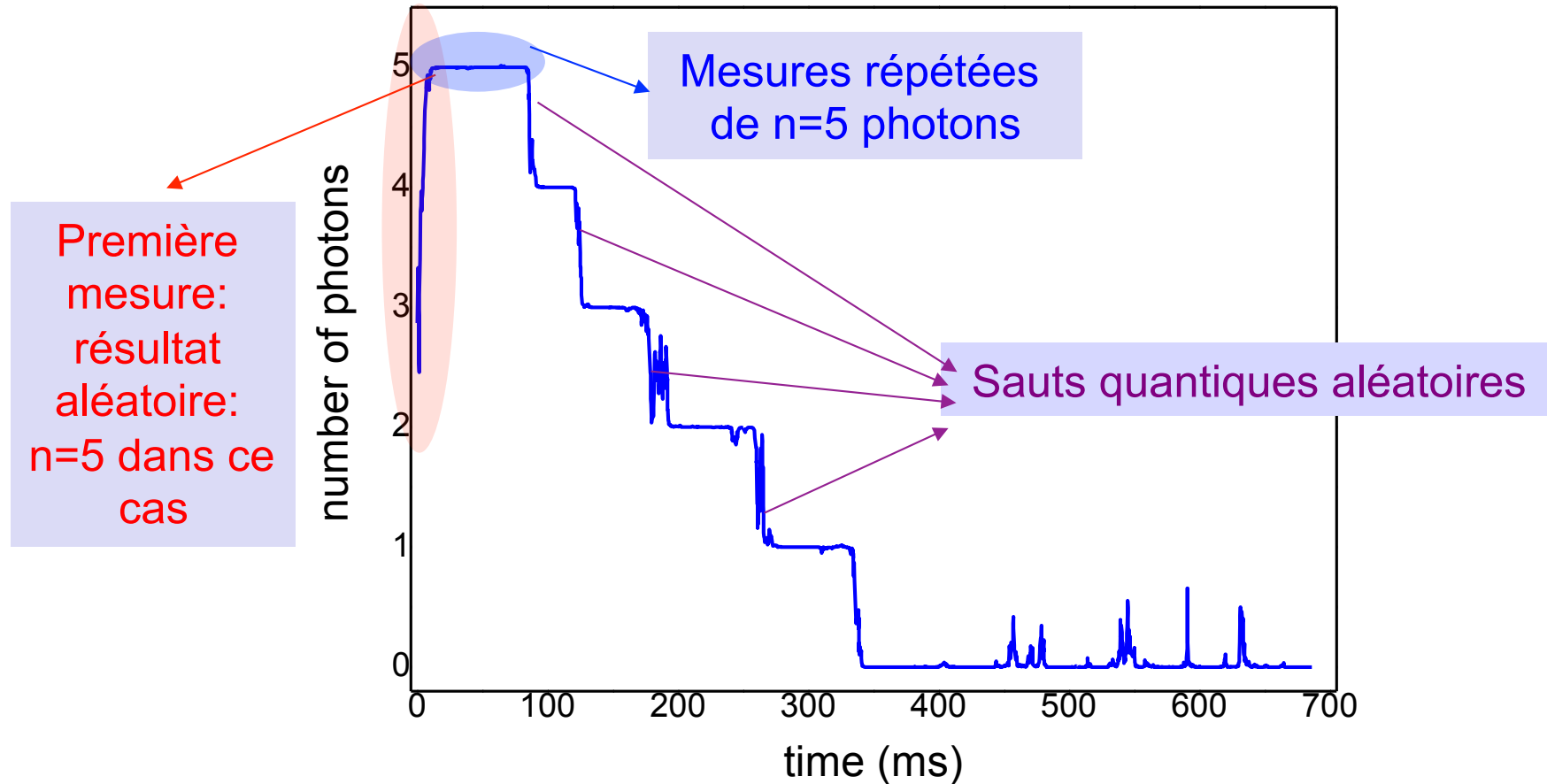
A → 1 photon

B → 0 photon



$T = 0.8 \text{ K} \rightarrow n_{th} = 0.05$ photons en moyenne

Voir et revoir plus d'un photon



L'évolution est due aux pertes de la cavité,
Pas à la mesure

L'évolution est discontinue: sauts quantiques, encore une
bizarrerie!

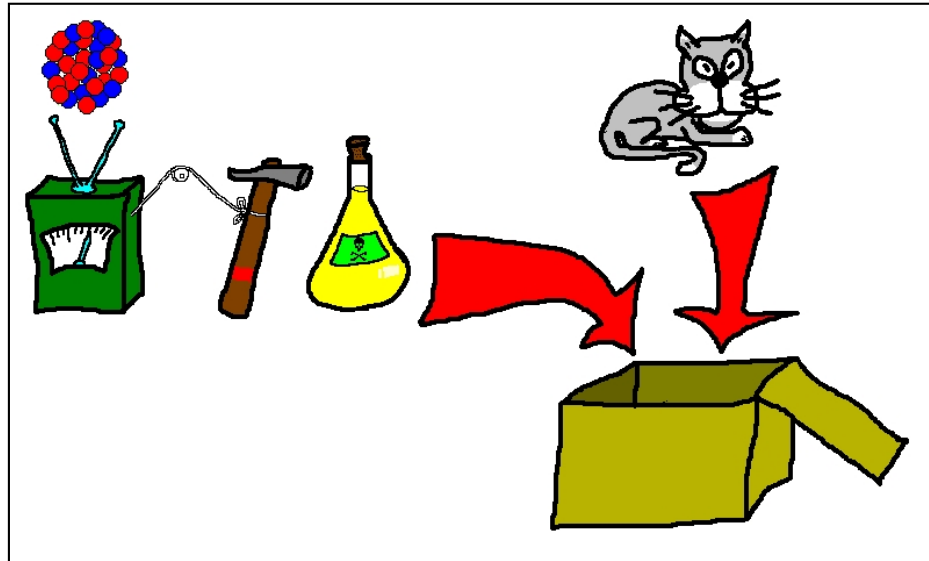
III. Mesure et principe de superposition

Le problème du chat de Schrödinger
(1935)



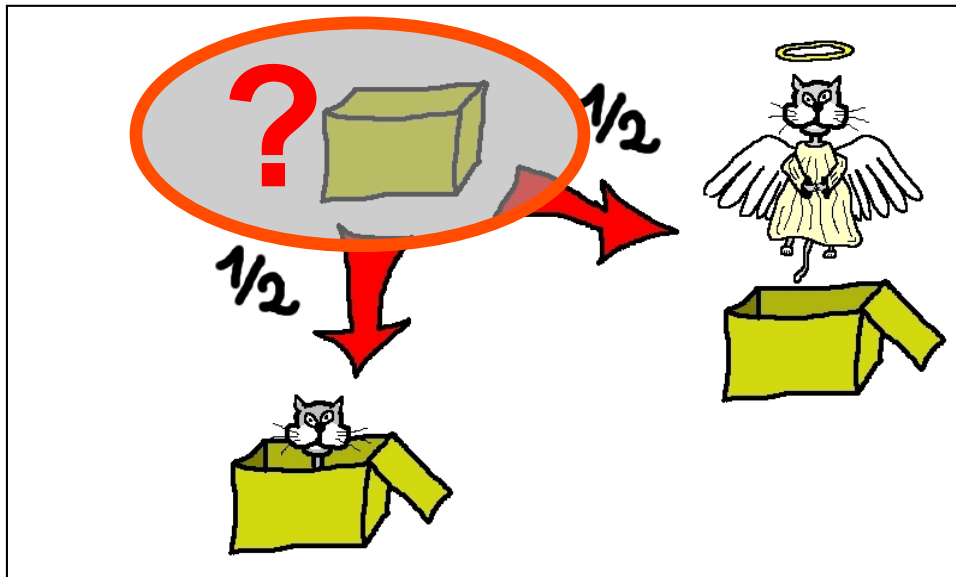
Erwin Schrödinger 1887-1961

Le problème du chat de Schödinger





On enferme dans une boîte un chat dont le destin dépend d'un processus quantique: la désintégration d'un atome radioactif

Le problème du chat de Schödinger





On attend que l'atome ait une probabilité $\frac{1}{2}$ de s'être désintégré: le chat a une chance sur deux de périr

Question: avant d'ouvrir la boîte (= mesurer le résultat), le chat est-il **mort, vif** ou dans une **superposition des deux**?
Est-ce le fait de « regarder » qui tue le chat?

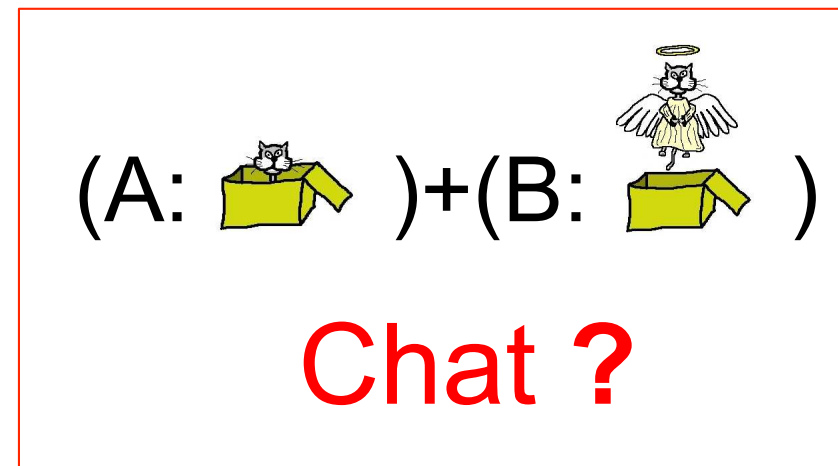
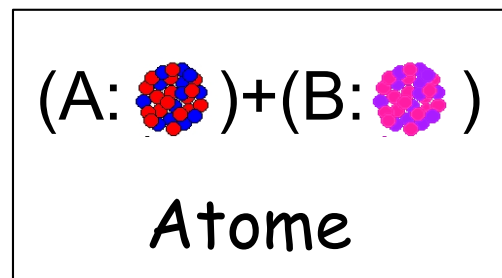
(A: ) + (B: )
Atome



(A: ) + (B: )
Chat ?

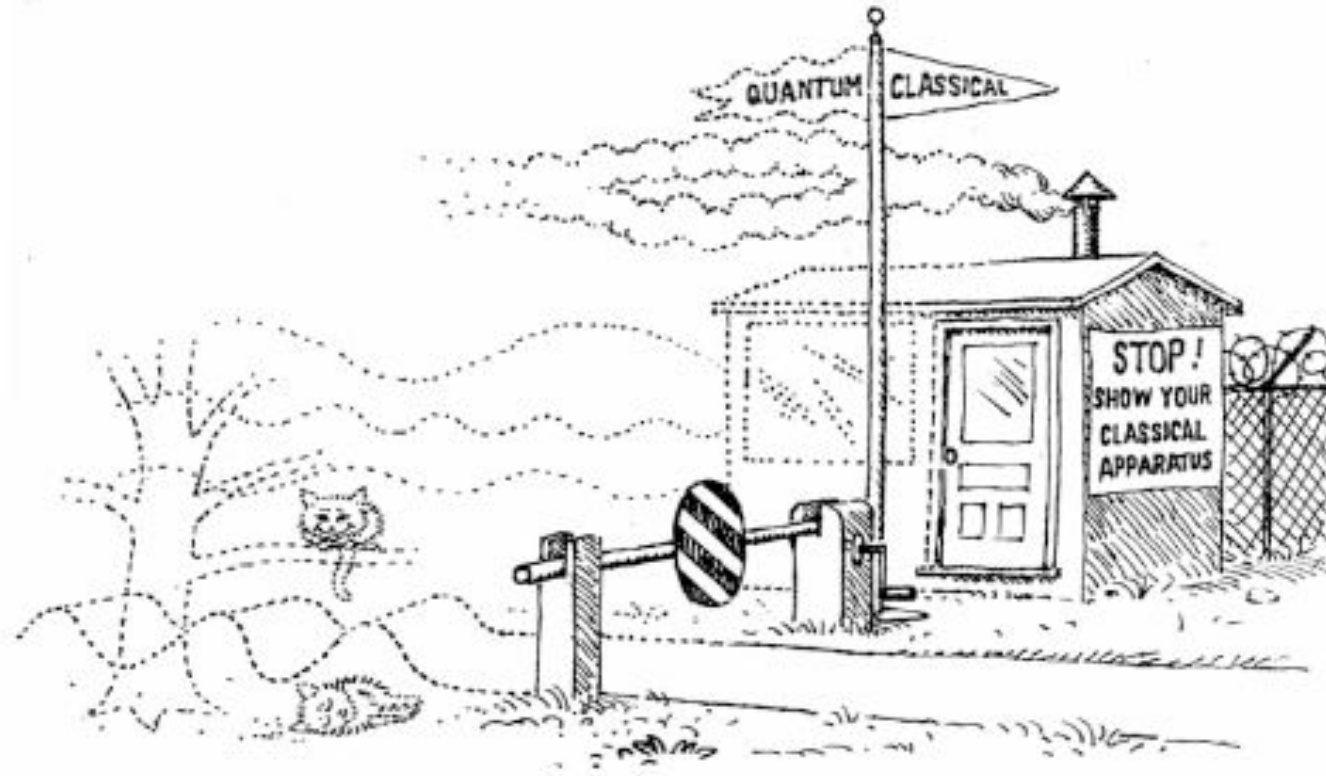
Le problème du chat de Schödinger

Question: avant d'ouvrir la boîte (= mesurer le résultat), le chat est-il mort, vif ou dans une superposition des deux?
Est-ce le fait de « regarder » qui tue le chat?



Réponse évidente: un chat est soit mort soit vif et pas dans une superposition des deux. Tout est joué avant d'ouvrir, ce n'est pas le fait de regarder qui tue éventuellement le chat

Le problème du chat de Schödinger

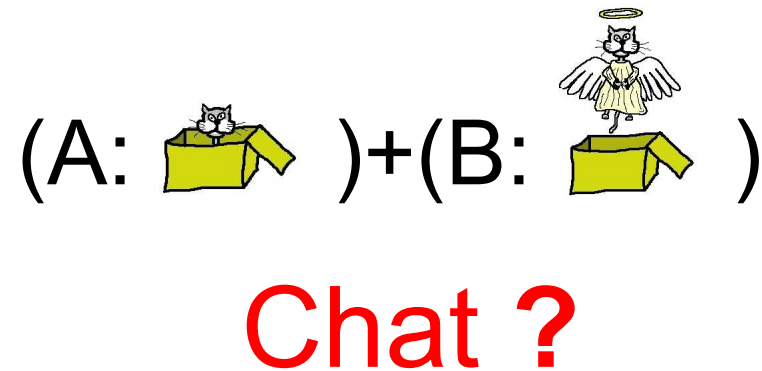
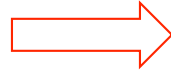
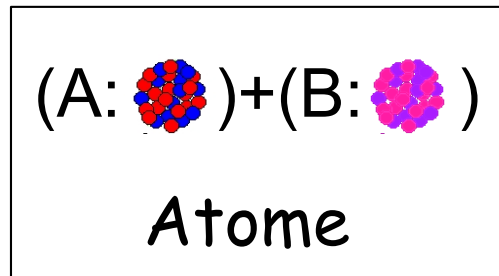


Delineating the border between the quantum realm ruled by the Schrödinger equation and the classical realm ruled by Newton's laws is one of the unresolved problems of physics. Figure 1

Zurek, *Physics Today* (1991)

C'est le problème de la frontière entre logique quantique et logique classique.

Le problème du chat de Schödinger



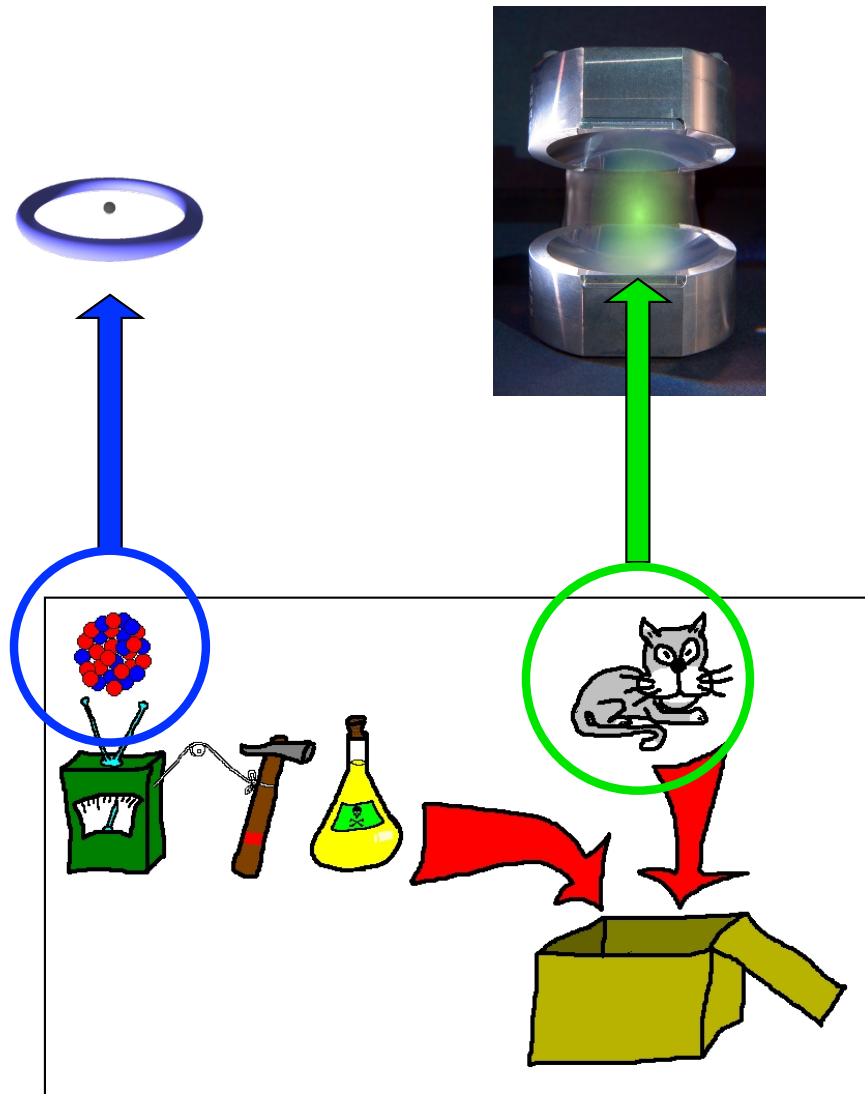
Question plus importante:

Jusqu'à quelle échelle de complexité peut-on observer des phénomènes quantiques?

Réponse : tout dépend de l'ingéniosité des expérimentateurs pour manipuler des objets quantiques de plus en plus complexes.

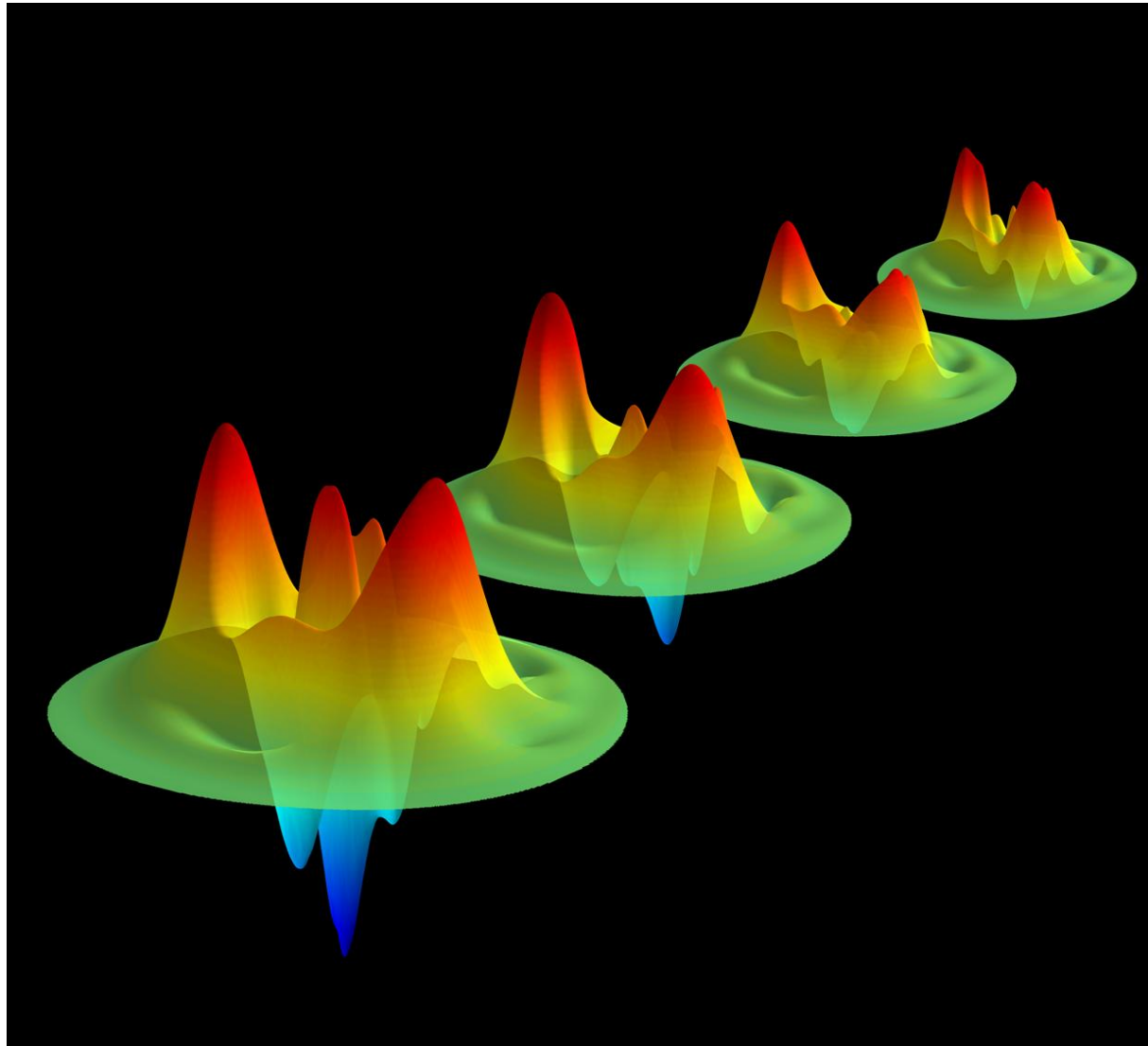
C'est aussi un enjeu pour les applications de la physique quantique: Aurons-nous un jour des ordinateurs quantiques capables de calculer avec des superpositions de 0 et 1?

Le chat de Schrödinger dans la boîte à photons?



Un champ d'une dizaine de photons peut « mesurer » l'état d'un atome.
C'est un chaton de Schrödinger

Vie et mort d'un "chaton de Schrödinger"



Observation de la transition vers une logique classique
(chat mort ou vif)
Sous l'effet de la "décohérence"

IV. Quelques remarques en guise de conclusion

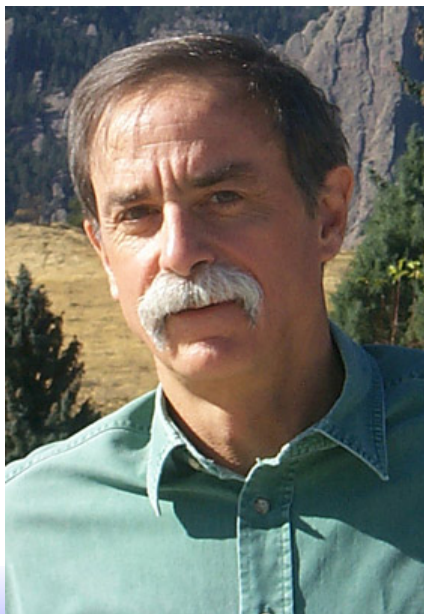
A quoi bon tout cela?

La physique quantique:

- ses succès
- ses applications
- Ses limites?

Le 20^{ème} siècle: le siècle de la physique quantique

- Une révolution conceptuelle
- Une théorie mature dès 1927 qui ne cesse de nous étonner et d'être vérifiée
- Des mesures incroyablement précises:
 - Prédiction vérifiées avec 12 chiffres significatifs
 - David Wineland:



Réalisations
d'horloges à un
atome avec une
précision de 10^{-17} .
**1s de retard à
l'échelle de l'âge de
l'univers!**

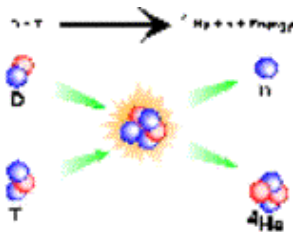


Le 20^{ème} siècle: le siècle de la physique quantique

Une Physique de l'infiniment grand à l'infiniment petit

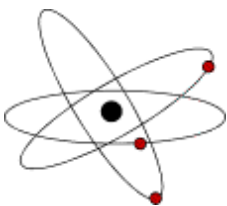


10^{-35} m

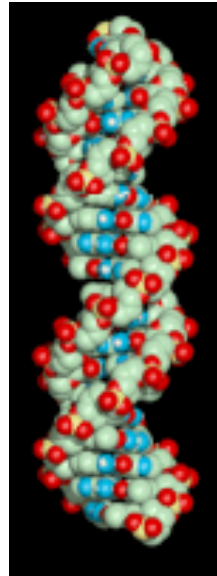


10^{-15} m

(noyaux, radioactivité
Énergie nucléaire)



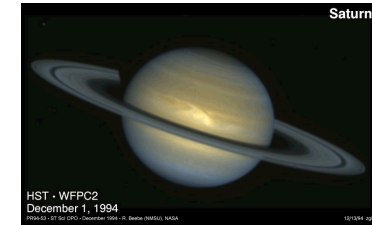
10^{-10} m
(atomes)



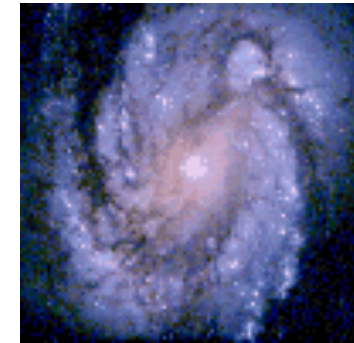
10^{-8} m
(molécules
biologiques)



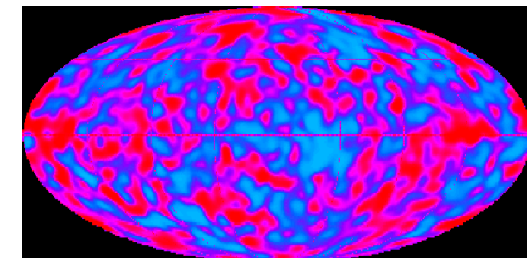
10^{-3} m
 10^6 m
(monde
macro-
scopique)



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



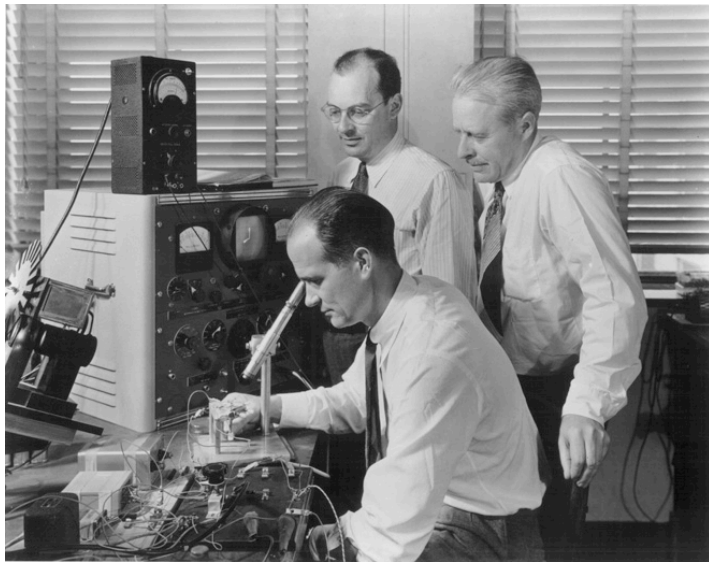
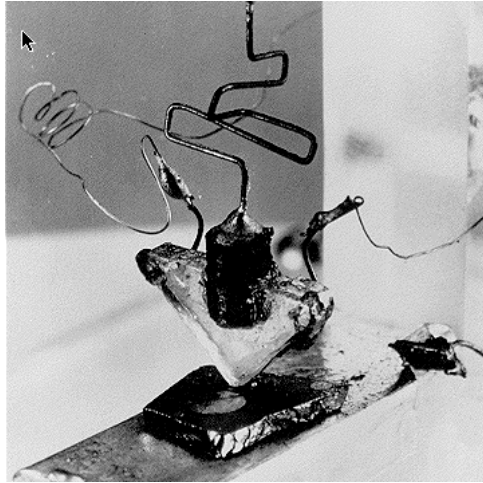
galaxies 10^{+20} m



Univers 10^{+26} m

Physique quantique et révolutions technologiques

Du premier transistor (1947)...



John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley (Nobel 1956)



... à la révolution du numérique

Physique quantique et révolutions technologiques

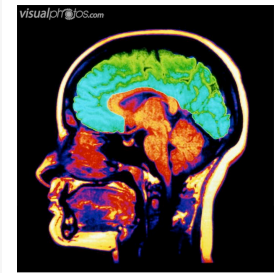
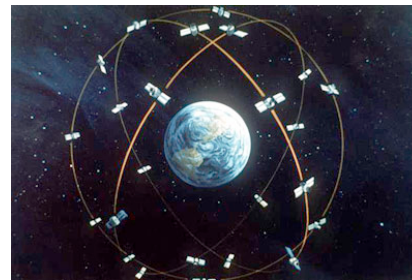
Du pompage optique...



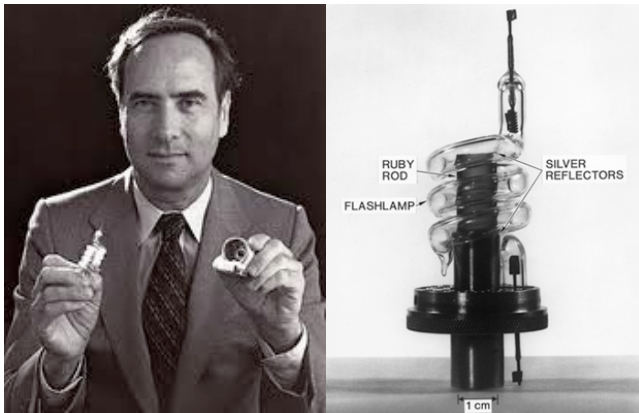
Jean Brossel- Alfred Kastler
Nobel 1966

En passant par:

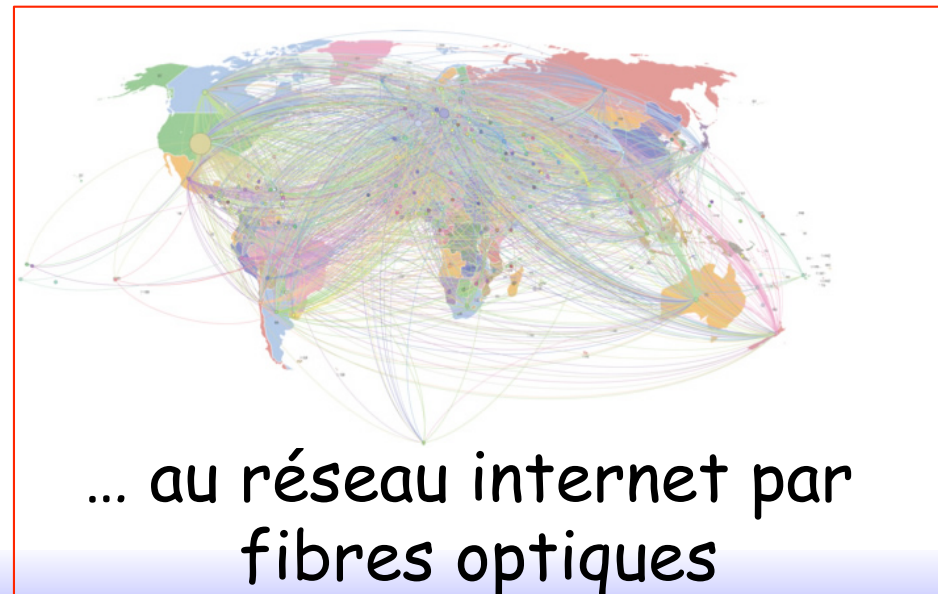
- Les horloges atomiques
- Le GPS
- L'IRM



...au laser: 1960...



Theodore Harold Maiman



... au réseau internet par
fibres optiques

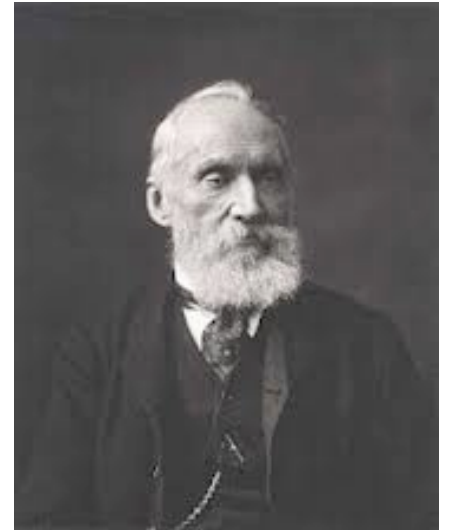
Les applications de demain?

- Difficile à deviner, mais:
 - Les applications de la physique fondamentale sont omniprésentes.
- Un exemple le laser:
 - une curiosité de laboratoire née de la compréhension de l'interaction entre photons et atomes au niveau quantique
 - Une idée développée sur la base de la curiosité et de la passion pour comprendre.
- Un fait: la curiosité finit par payer!

Les limites de la physique quantiques?

- Une théorie confirmée par toutes les observations
- Rien d'autre à découvrir?

27 avril 1900, Lord Kelvin: « La connaissance en physique est comme un grand ciel bleu à l'horizon duquel subsistent seulement deux petits nuages... »



Lord Kelvin 1824-1907

De ces deux nuages sont nées deux révolutions conceptuelles:

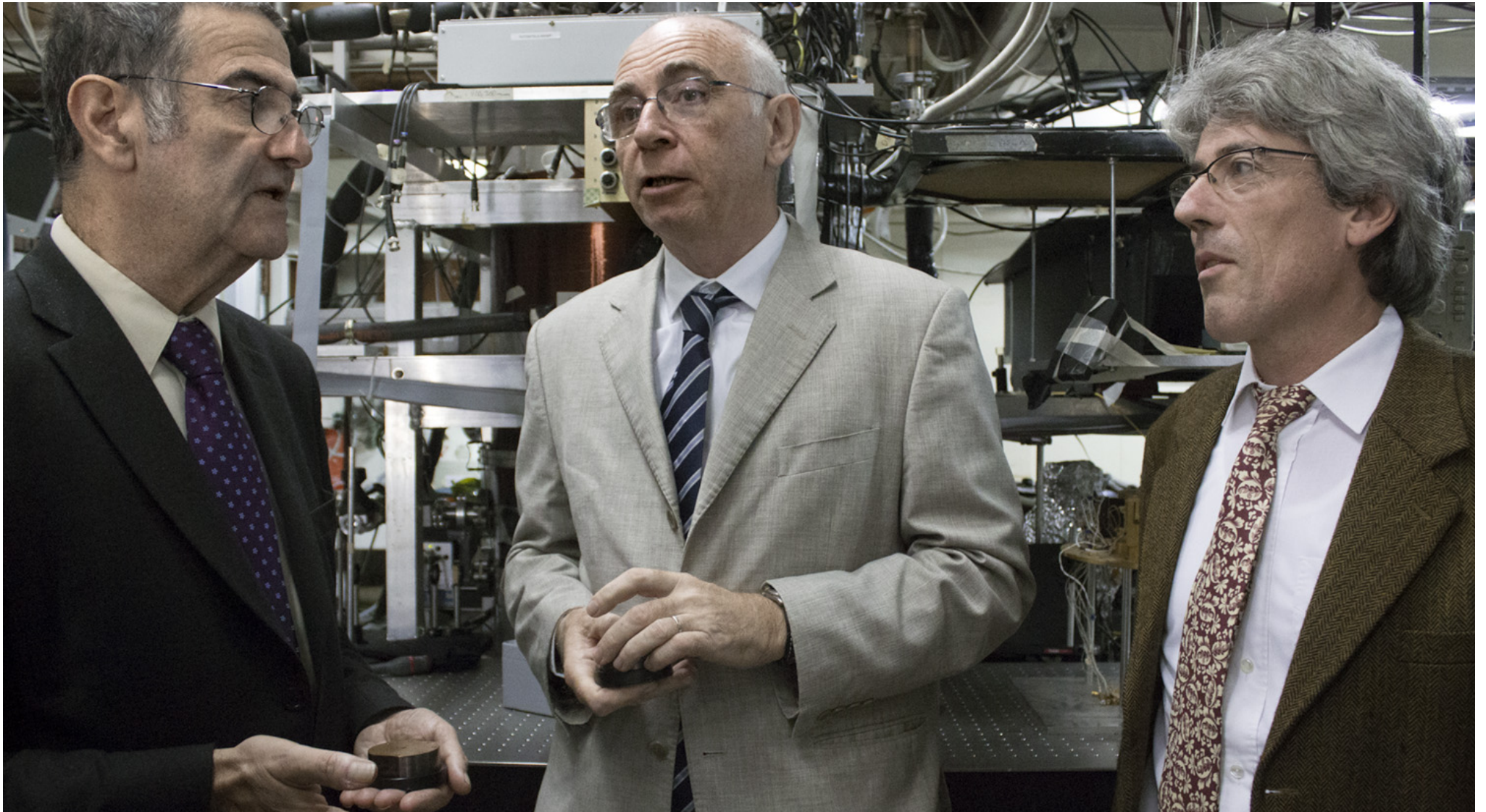
- La physique quantique
- La relativité



Notre « petit » nuage?

Ces deux théories sont pour l'instant inconciliables!
Un défi pour le futur

Nos expériences: un travail d'équipe depuis 1990

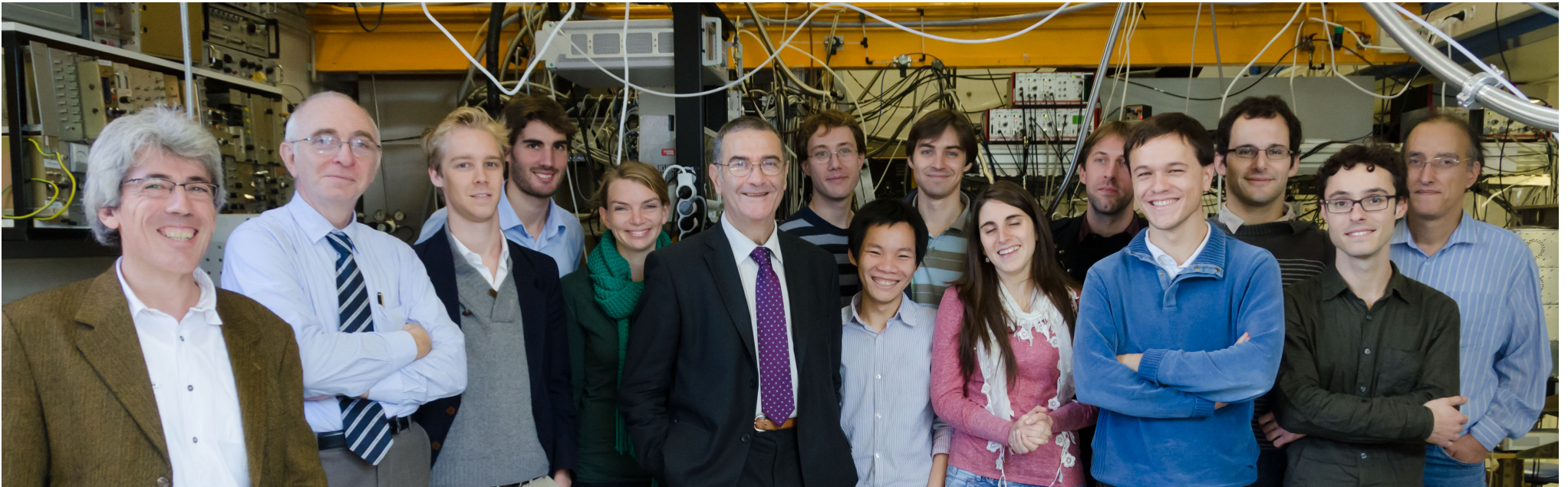


S. Haroche

J.M. Raimond

M. Brune

L'équipe actuelle



Permanents

- ❑ Serge Haroche
- ❑ Jean-Michel Raimond
- ❑ Michel Brune

- ❑ Sebastien Gleyzes
- ❑ Igor Dotsenko (senior ERC post-doc)

PhD and post-doc

- ❑ Bruno Peaudecerf
- ❑ Raul Teixeira
- ❑ Sha Liu (ERC post-doc)
- ❑ Theo Rybarczyk
- ❑ Carla Hermann
- ❑ Adrien Signolles
- ❑ Adrien Facon
- ❑ Eva Dietsche (ERC Diploma)
- ❑ Stefan Gerlich (ERC post-doc)
- ❑ Than Long Nguyen

