DES SOURCES DE PHOTONS UNIQUES POUR LA NANOPHOTONIQUE QUANTIQUE

Jean-Pierre Hermier

GEMaC
Groupe d'Étude
de la Matière Condensée

UVSQ
université PARIS-SACLAY

cnrs

Plan de l'exposé

La mécanique quantique

- Les débuts (1900)
- Les années 1920 : la théorie quantique

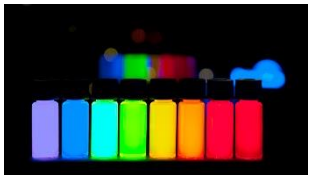
- La première révolution quantique (1950)

- La seconde révolution quantique (1980)

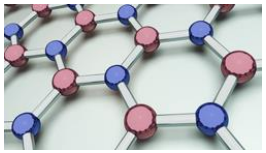
© Google / Rocco Ceselin

La nanophotonique quantique au GEMaC

- Les nanocristaux colloïdaux



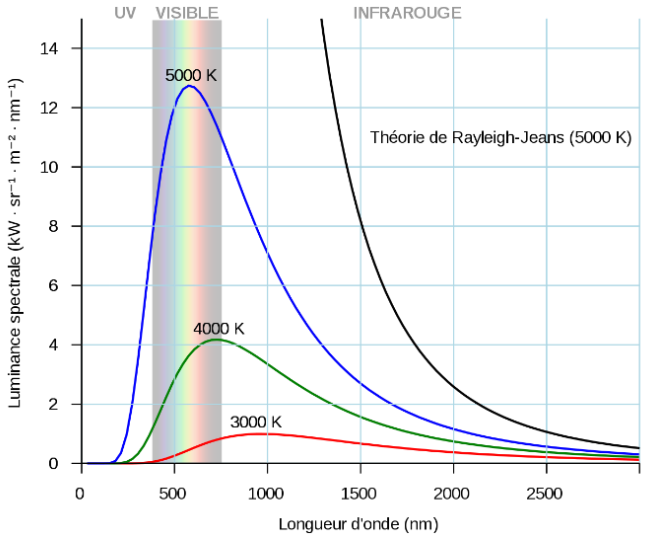
- Les centres colorés dans le



nitrure de bore hexagonal (hBN)

Un peu de mathématiques par-ci, par-là…

Les débuts



Loi de Planck (1900) : échange discret d'énergie entre le champ électromagnétique et la matière :

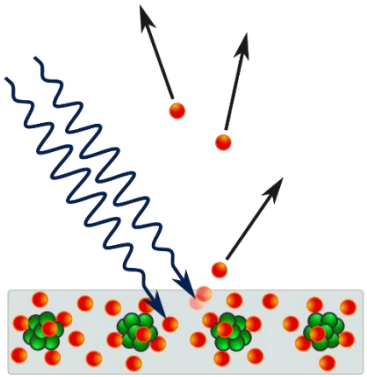
$$n\ h\nu$$

h : constante de Planck

Des spectres atomiques discrets

Spectre d'émission de l'hydrogène

Spectre d'absorption de l'hydrogène



Effet photo électrique :
Einstein introduit
le concept de photon (1905)

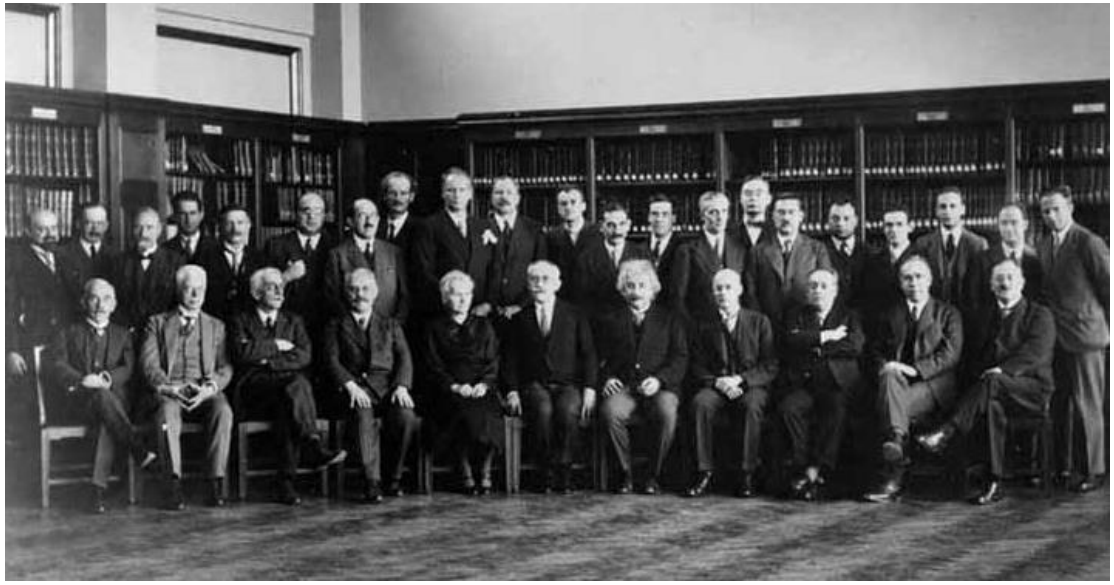
Un modèle empirique (N. Bohr, 1913)
quantification du moment cinétique

Les Années 1920 : élaboration de la théorie

De Broglie

Heisenberg

Schrödinger …



Conférence Solvay 1930

La physique quantique pour :

- la physique,
- philosopher

« Chat de Schrödinger »

« Dieu ne joue pas aux dés »

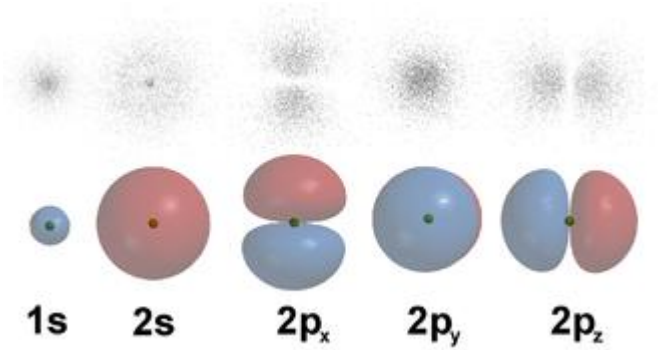
Description de l'état physique : une théorie fondamentalement probabiliste

la fonction d'onde : $\psi(\vec{r}, t)$

$$|\psi(\vec{r}, t)|^2$$

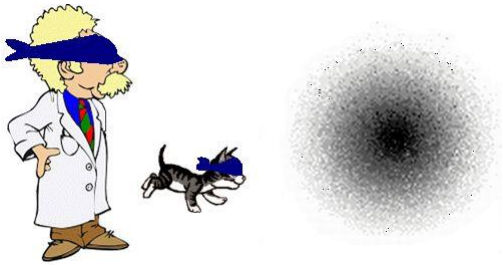
Densité de probabilité d'être à la position $\vec{r}$

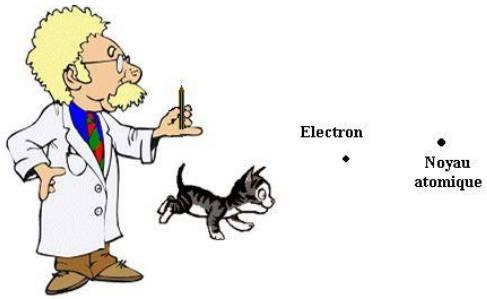
à un instant t



La mesure en physique quantique : projection de l'état.

La mesure modifie l'état quantique…

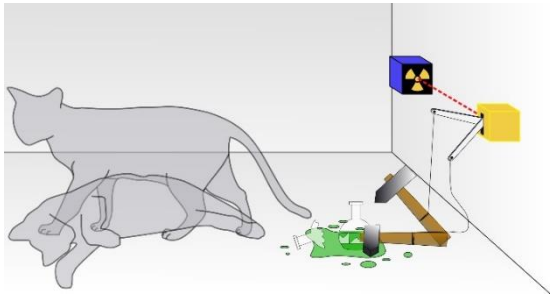




Gabrielle Bonnet (https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/Quantique.xml)

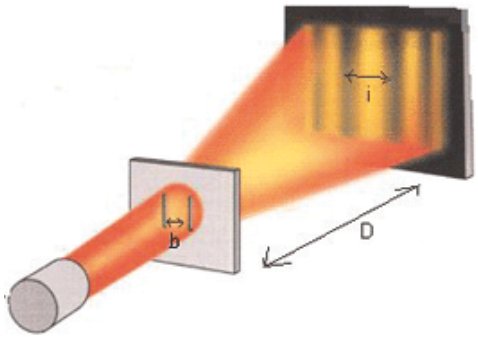
La Superposition en Mécanique Quantique

Espace des états : espace de Hilbert



$$|\text{état du chat}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\text{mort}\rangle + |\text{vivant}\rangle)$$

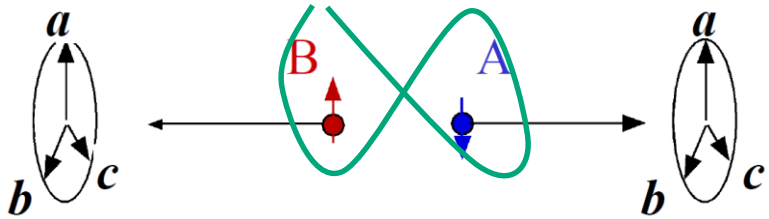
Illustration : les figures d'interférences



Avec la lumière… et des électrons, des atomes…

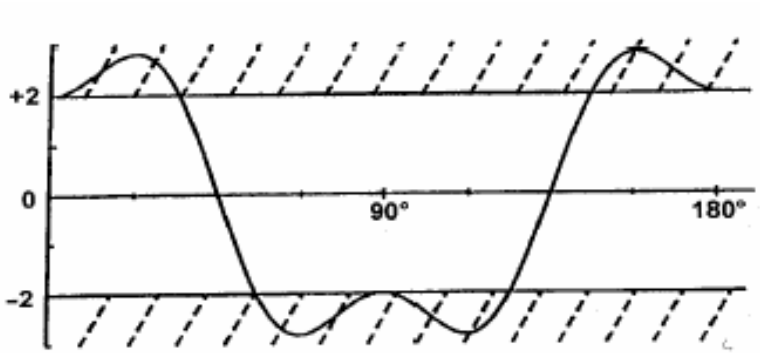
L'INTRICATION

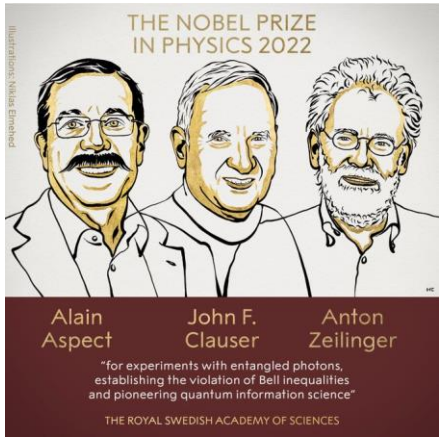
Paradoxe EPR (1935) : mécanique quantique incomplète ? David Bohm (1965) :



$$|\varphi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|A{:}\uparrow; B{:}\downarrow\rangle + |A{:}\downarrow\,; B{:}\uparrow\rangle\right)$$

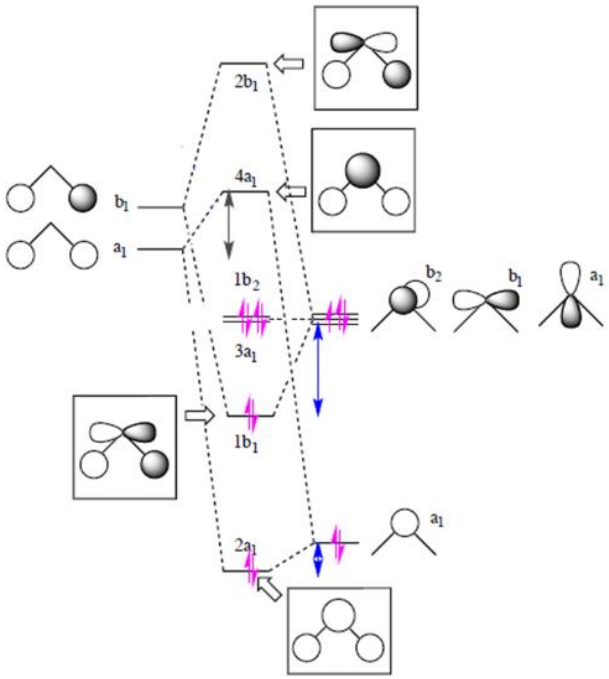
La physique quantique est une théorie **« non locale »**
Absence de variables cachées, pas de communication à distance instantanée

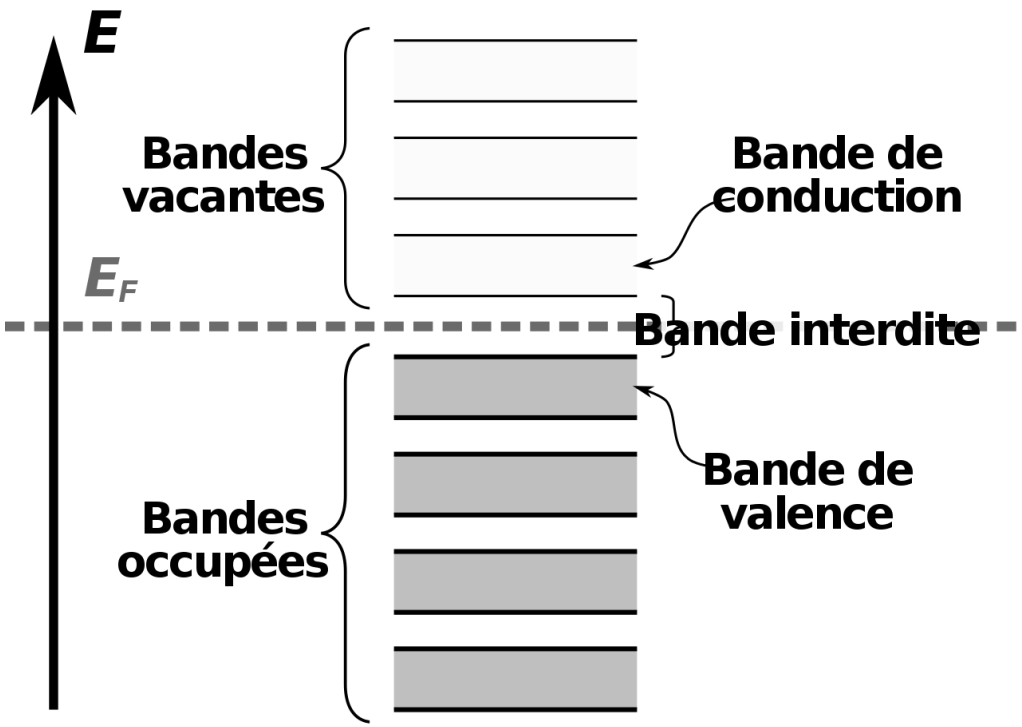




Une théorie qui va de succès en succès

Physique atomique, moléculaire, chimie quantique, matière condensée…

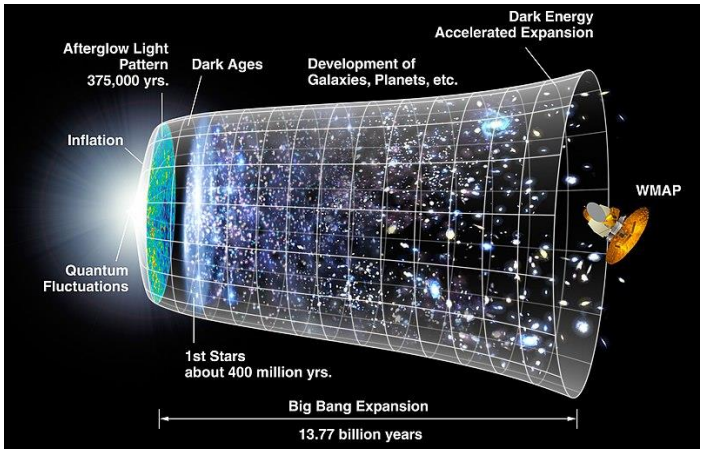


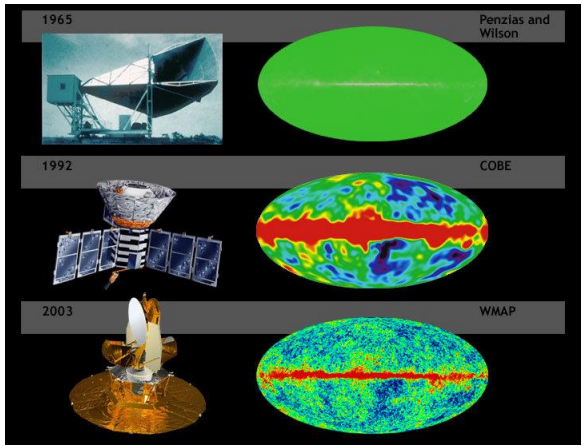


Chimie quantique : méthode LCAO

Théorie des bandes : conduction des matériaux

Physique théorique :

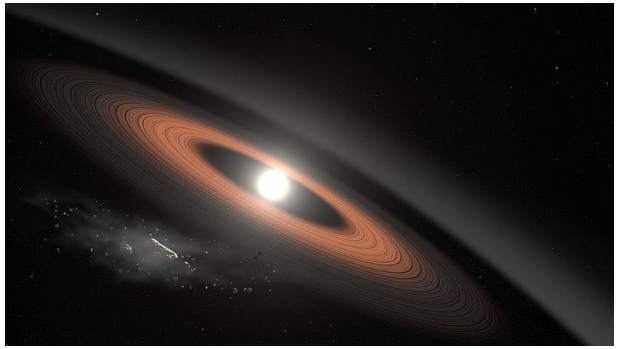




Inflation de l'Univers : x 10^{26} en 10^{-33} s

Rayonnement fossile

- Astrophysique : naines blanches (pression de Fermi)



Vue d'artiste d'une naine blanche

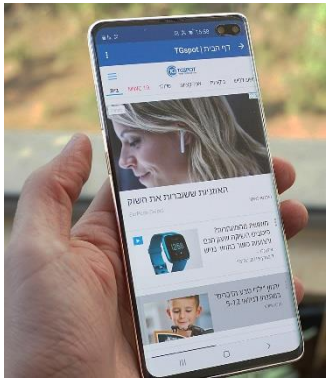
- supercordes, gravitation quantique à boucle…

A PARTIR DES ANNÉES 1950 : PREMIÈRE RÉVOLUTION QUANTIQUE

- Ordinateurs, micro électronique

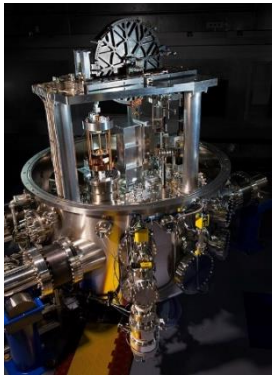
Transistor

Microprocesseur

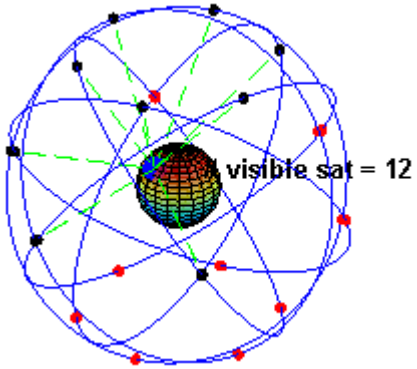


Ordinateurs, smartphones…

- Métrologie : redéfinition du kg (balance de Watt), horloges atomiques (GPS)



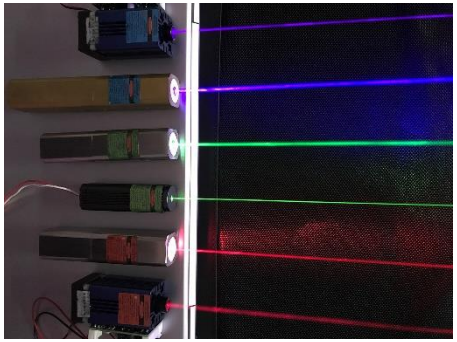
Balance de Watt (NIST)

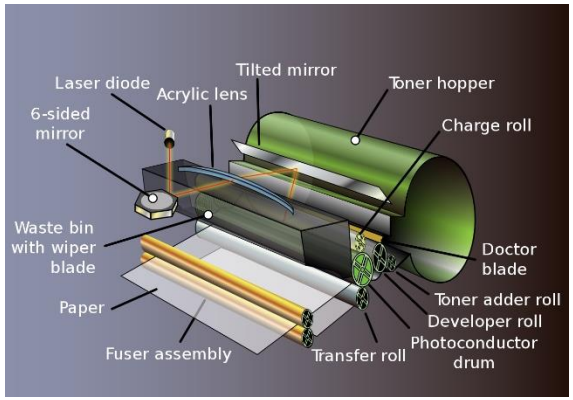


GPS

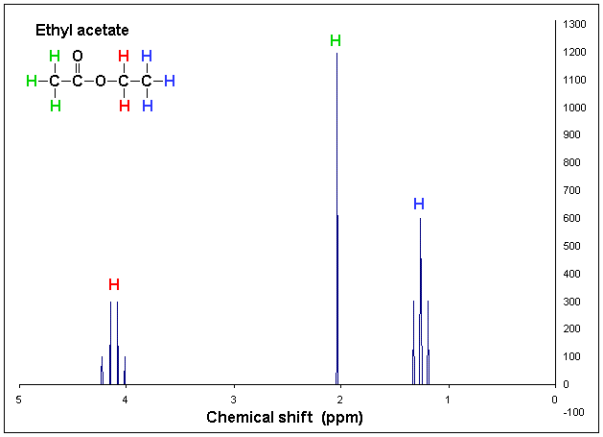
A PARTIR DES ANNÉES 1950 : PREMIÈRE RÉVOLUTION QUANTIQUE

- Laser, imprimante laser





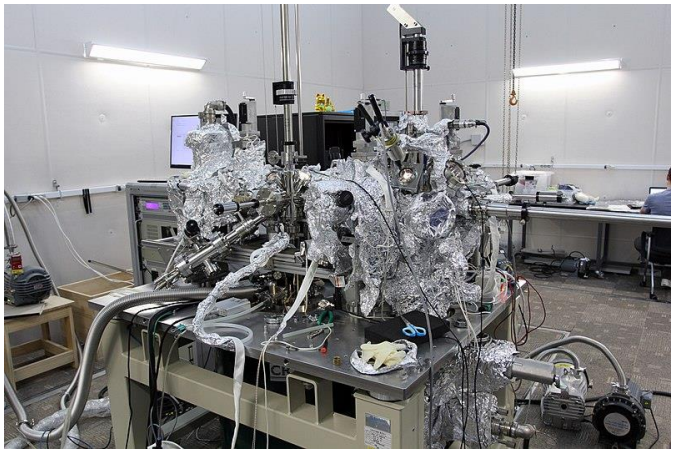
- Imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM)

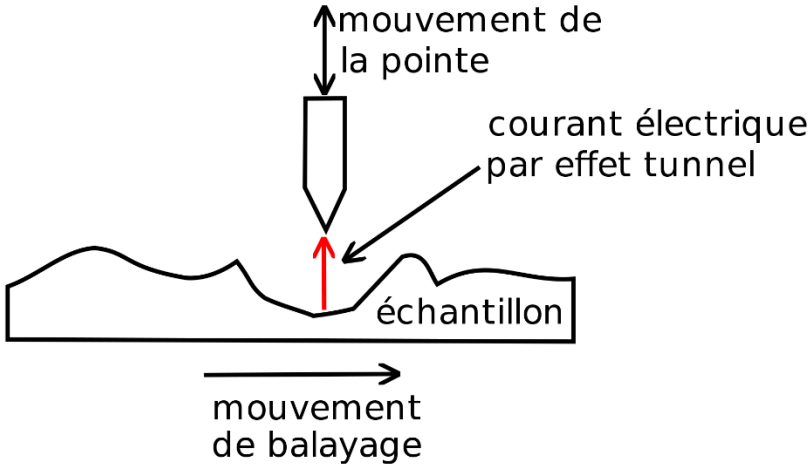


A PARTIR DES ANNÉES 1950 : PREMIÈRE RÉVOLUTION QUANTIQUE

Microscope électronique (résolution de l'ordre du nm)

Microscope à effet tunnel (résolution sub-atomique)





A PARTIR DES ANNÉES 1980 : SECONDE RÉVOLUTION QUANTIQUE

Phrase de Schrödinger : "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... we are not experimenting with single particles, any more than we can raise Ichthyosauria in the zoo"
[Brit. J. Phil. Sci. 3, 233 (1952)]

Manipulation d'objets quantiques individuels (ions, atomes…)

Pièges à ions : manipulation par des champs électriques de particules chargées

Académie des sciences de Pologne

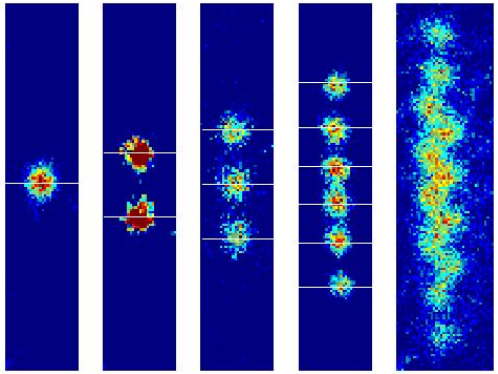
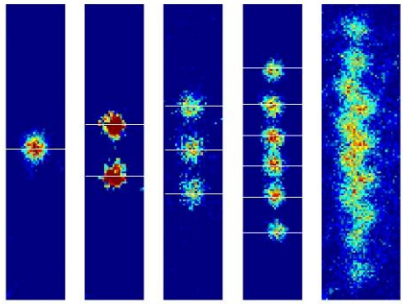
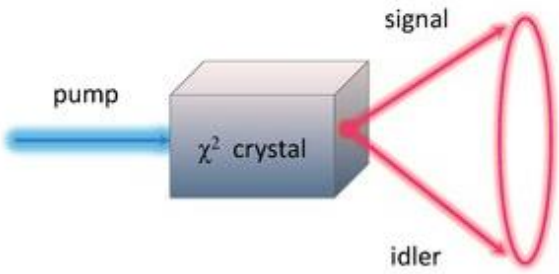


Image de fluorescence (NIST)

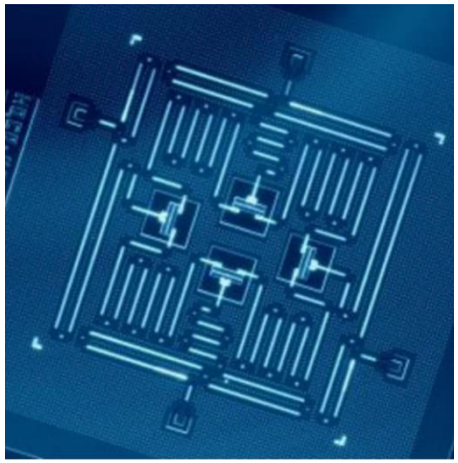
Ions piégés



Photons uniques



Circuits avec des supraconducteurs



Et bien d'autres depuis…

Les théoriciens de l'information quantique

Conférence au MIT (1981) : des physiciens, des informaticiens…

- Feynman : impossibilité de simuler un système quantique avec un ordinateur classique. Un ordinateur "quantique" ?

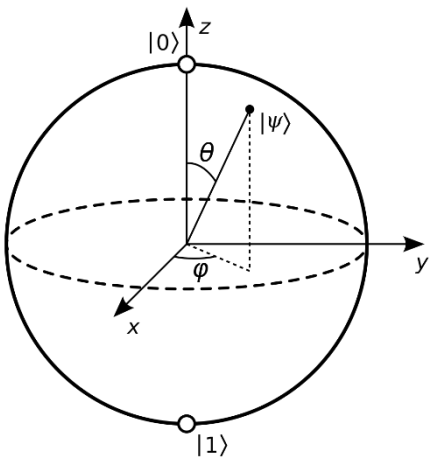
Liens étroits entre mécanique quantique et théorie de l'information

- Bennett, Brassard (1984): échanges de clés pour la cryptographie
- Deutsch (1985): le premier algorithme quantique
- Shor (1994): factorisation en nombres premiers (…RSA ?)
- Grover (1996): algorithme de recherche (abonné dont on connaît le numéro de téléphone et dont on cherche le nom dans un annuaire)

Bit vs Qubit

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + \sin\frac{\theta}{2}e^{i\varphi}|1\rangle$$



Quantité d'information pour N bits / N qubits ?

N=2 Bits : 2 nombres à définir

qubit : $\alpha_1|00\rangle + \alpha_2|01\rangle + \alpha_3|10\rangle + \alpha_4|11\rangle$ (4 nombres, α_i)

N=3 Bits : 3 nombres

qubit : $\alpha_1|000\rangle + \alpha_2|001\rangle + \alpha_3|010\rangle + \ldots \alpha_8|111\rangle$ (8 nombres, α_i)

N=4 Bits : 4 nombres

qubit : $\alpha_1|0001\rangle + \alpha_2|0010\rangle + \alpha_3|0100\rangle + \ldots \alpha_{16}|1111\rangle$(16 nombres, α_i)

Généralisation :

bits classiques : N / bits quantiques : 2^N

Importance des états intriqués

70 qubits : volume d'information équivalant à ce que toute l'humanité a produit

Les possibilités en termes d'algorithmique

La complexité :
Les problèmes « faciles », les calculs dont la résolution demande un temps à la croissance polynomiale n avec le nombre n de bits.
Les problèmes « difficiles », augmentation exponentielle avec n.

Calcul quantique permet de passer de « difficile » à « facile » pour certains algorithmes précis mais… terriblement importants :

- Trouver un numéro pour un abonné dans un annuaire à partir de son numéro (big data)
- Décomposition d'un nombre en facteurs premiers
- Problème du voyageur (FRET, électronique et effet Joule)

La logique quantique bénéficie du principe de superposition et de l'intrication de qubits

SIMULATION QUANTIQUE

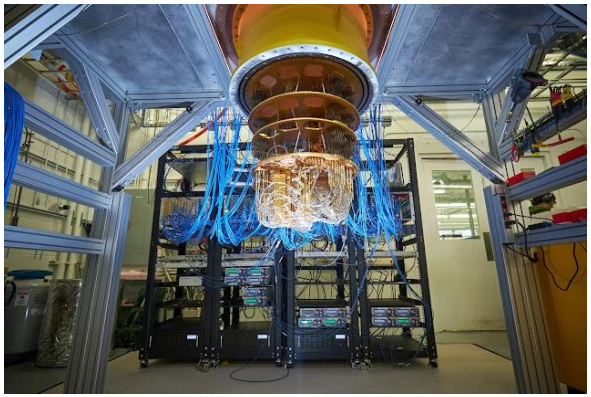
Un ordinateur quantique…. pour la physique quantique (Feynman 1981) !

L'ordinateur classique ne peut pas réaliser ces simulations (complexité exponentielle)

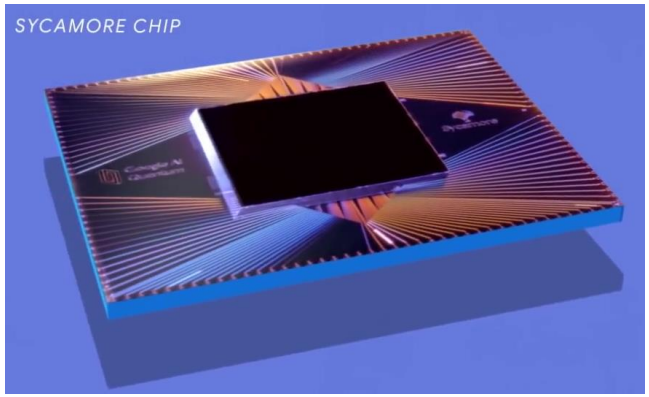
Perspectives :

- Chimie (fabrication d'engrais, piégeage du CO_2)
- Nouveaux matériaux
- Photovoltaïque

En 2019



© Google / Rocco Ceselin

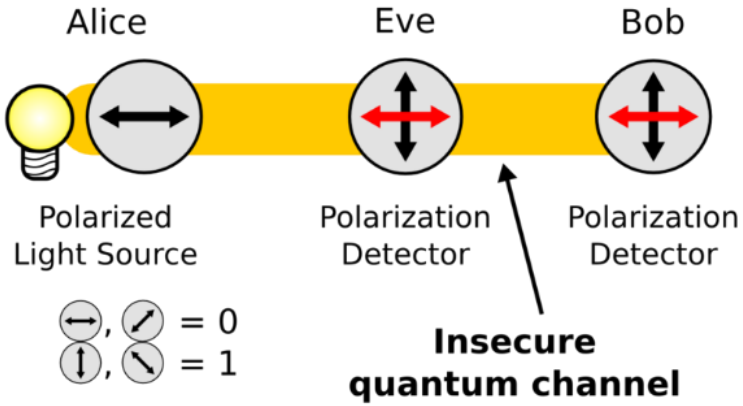


En 2019, Sycamore (Google) : en 200 secondes un calcul qui prendrait 10 000 ans à un supercalculateur à la pointe de la technologie (plutôt 2,5 jours selon IBM…) Nature 574, 505 (2019), 70 qubits !

En 2020, calcul de chimie quantique. Approche hybride ordinateur classique / Sycamore (Science 369, 1084 2020)

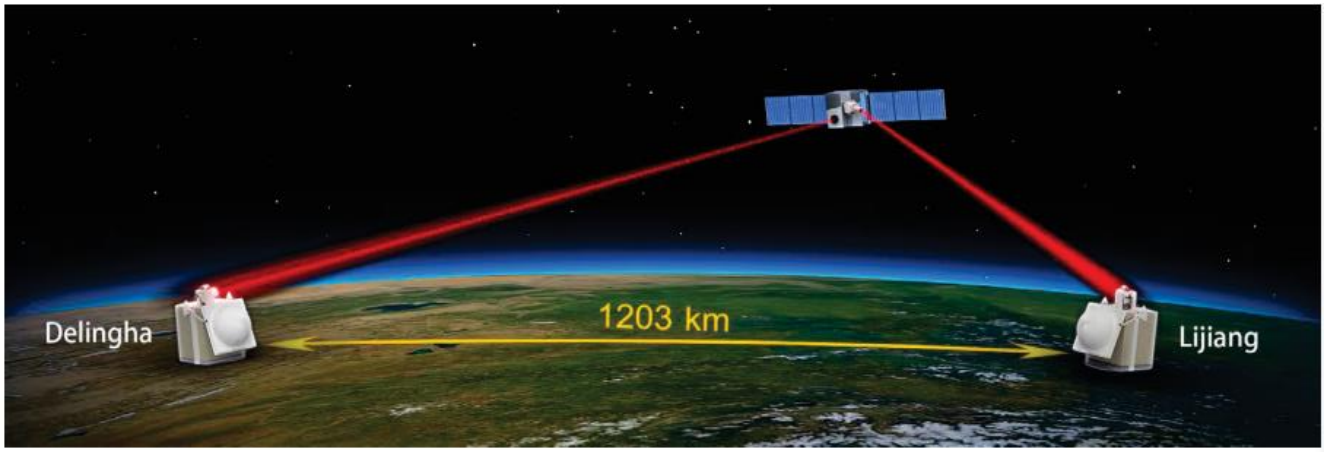
Suprématie quantique, avantage quantique…

Cryptographie quantique : échanger une clé privée en utilisant la physique quantique



Photons uniques

Echanges d'états intriqués et de clés pour la cryptographie, *Science 356, 1140 (2017)*



Canadian Journal of Soil Science 38, 604 (2018)

CAPTEURS QUANTIQUES

Des capteurs de très grande précision

Absolute Quantum Gravimeter
µQUANS

- Des atomes de rubidium piégés par des lasers (1 µK)
- En chute libre, accélération verticale mesurée par un dispositif d'interférométrie
- Incertitude : 10^{-9} sur g = 9,80 m/s^2
- Application : sismologie

Et aussi : magnétomètres, accéléromètres…

Mais…

Décohérence : interaction avec l'environnement

$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + \sin\frac{\theta}{2}e^{i\varphi}|1\rangle$$

$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + \sin\frac{\theta}{2}e^{????}|1\rangle$$

$$|\psi\rangle = |0\rangle$$

La limitation principale en pratique

Difficulté : on ne peut pas cloner les qubits classiquement

Possibilité de jouer sur l'intrication pour implémenter des codes correcteurs d'erreur (attention, on ne peut pas interrompre le calcul pour vérifier les bugs)

Mais 10 000 qubits par qubit utilisable…

Conclusion (première partie)

Un domaine en plein essor :

- plans des acteurs étatiques (enjeux économiques, stratégiques)
- entreprises très actives (IBM, Intel, Microsoft, Google, Atos…)

Délai pour y arriver / sommes dépensées ?

Il reste que :

- interdisciplinarité : physique, informatique, sciences de l'ingénieur (Photonique quantique intégrée)

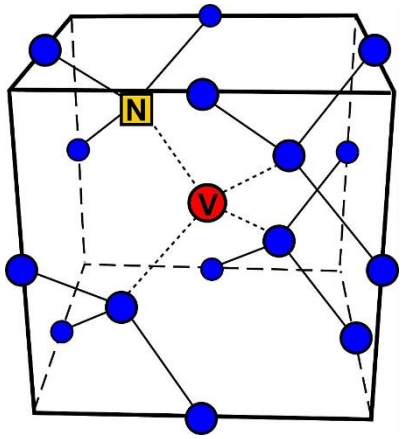
Et au GEMaC ?

Equipe « Nanophotonique quantique »

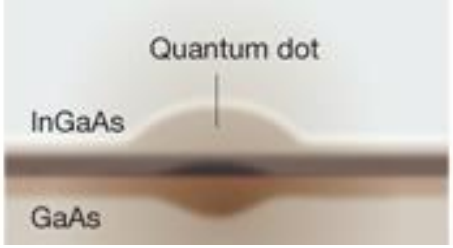
D'AUTRES SOURCES DE PHOTONS UNIQUES

Atomes artificiels

Défauts dans des cristaux (centres colorés)



Boîtes quantiques (semi-conducteurs)



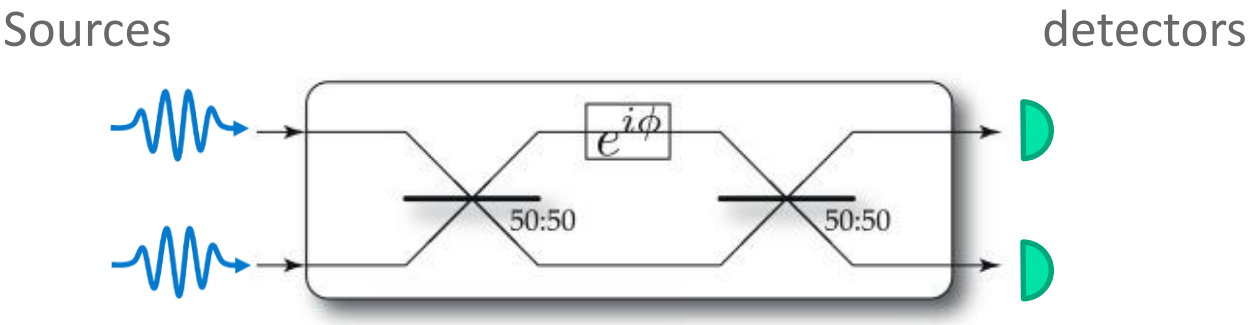
ETH Zurich

Le photon est bien protégé… mais difficile de les faire interagir !

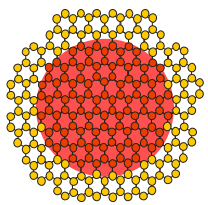
E. Knill, R. Laflamme & G. J. Milburn, Nature 409, 46 (2001)

Possibilité de réaliser des calculs quantiques (des portes logiques) à partir d'interférences quantiques entre photons (effet Hong-Ou-Mandel)

… en utilisant des lames semi-transparentes, des photons uniques, et le contrôle de la phase

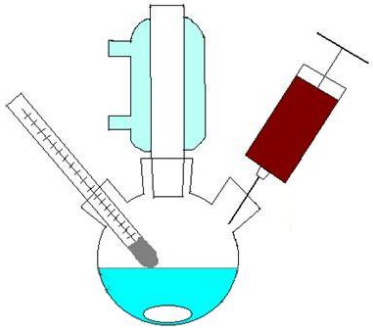


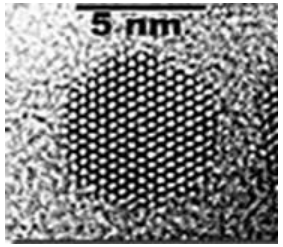
Les nanocristaux colloïdaux de CdSe

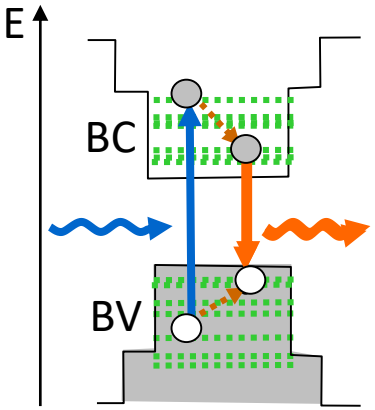


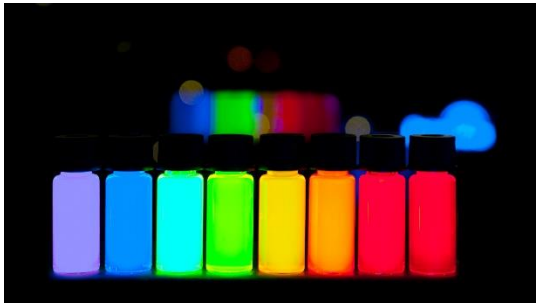
CdSe (2R ~ 5 nm)

ZnS, CdS (passivation)



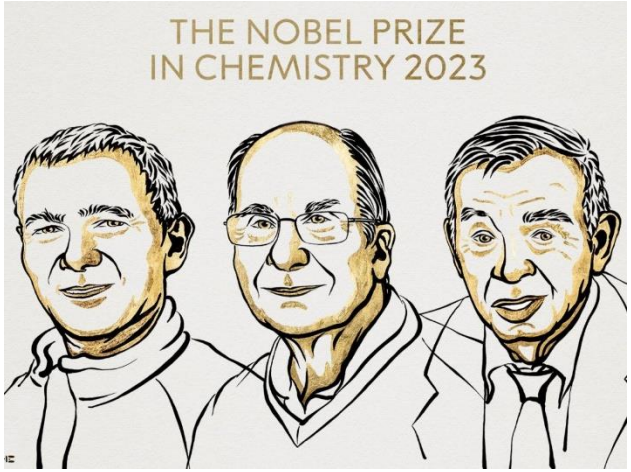






Confinement quantique : atome artificiel

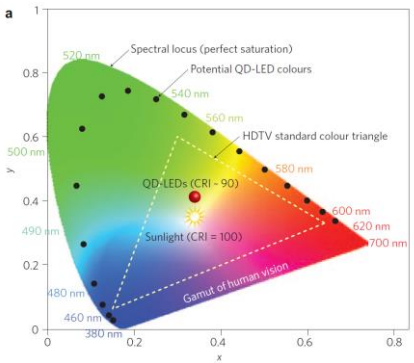
Couleur contrôlée par la taille



Les nanocristaux colloïdaux de CdSe

Ecrans, LED

Samsung Display Co.

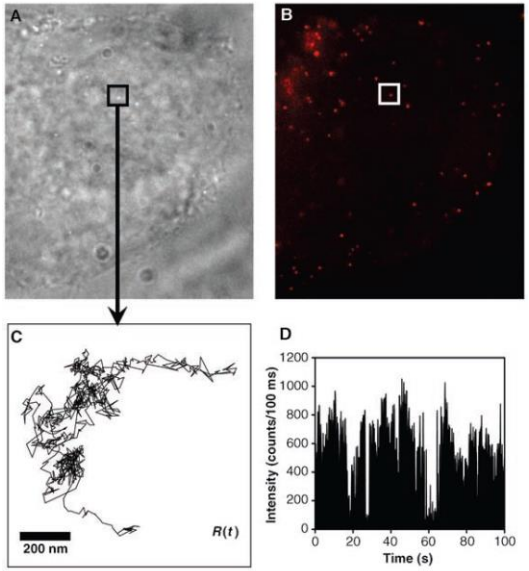


Opt. Expr. 23, 23680 (2015)

Nancoristaux pour la biologie

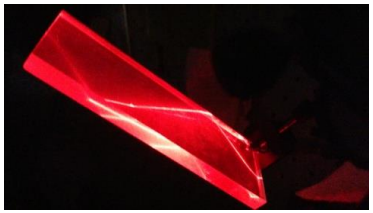
- ✓ Photostabilité
- ✓ Détection à l'échelle individuelle
- ✓ Pas chers

HeLa cells



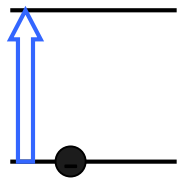
Science 317, 538 (2005)

Concentrateurs solaires

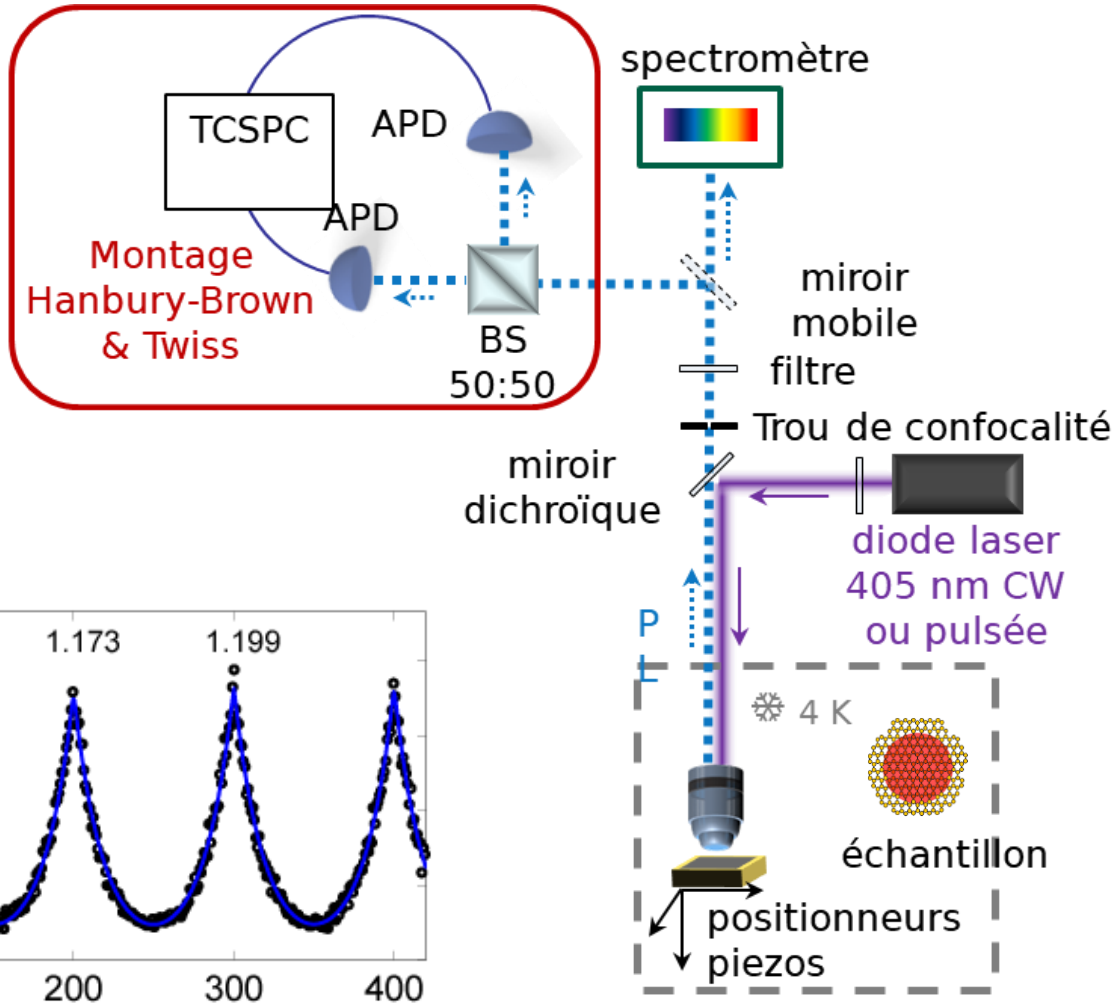


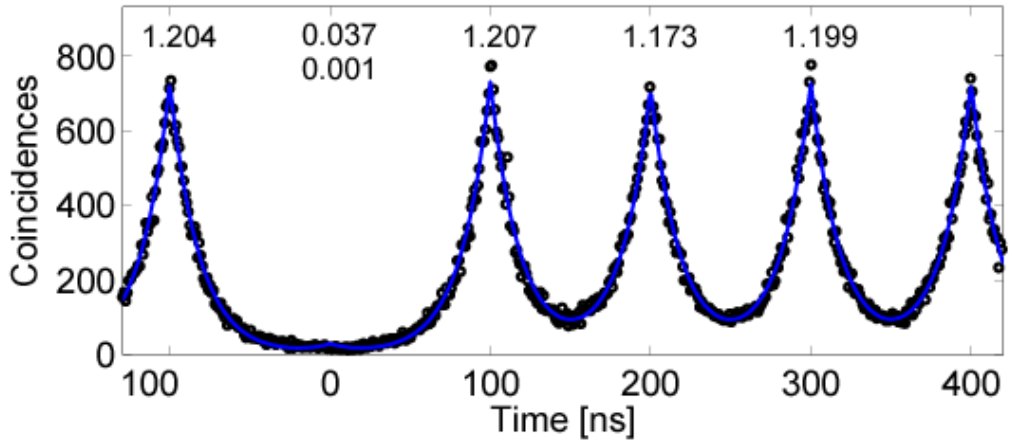
Nature Photonics 8,392–399 (2014)

Des sources de photons uniques (4 K)



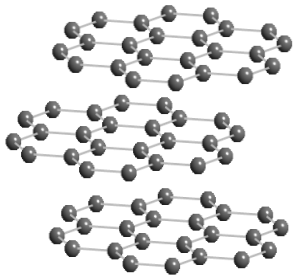
Système à deux niveaux





MATÉRIAUX BIDIMENSIONNELS (2D)

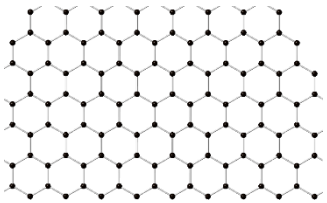
Forme 3D : le graphite



Exfoliation mécanique

Science 306, 666 (2004)

Forme 2D : le graphène



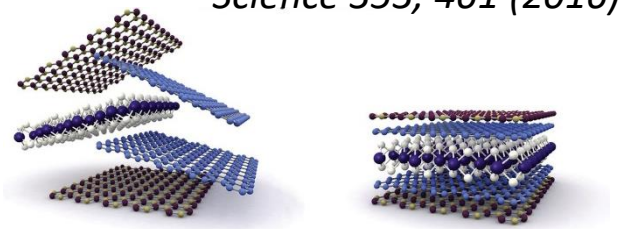
Prix Nobel 2010

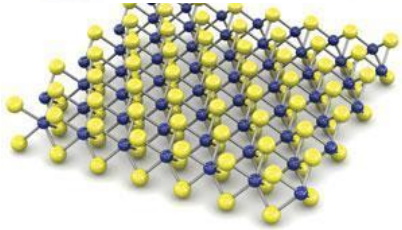
Geim, Novoselov

Science 353, 461 (2016)

Hétérostructures : empilement de matériaux 2D

Nouvelles perspectives de miniaturisation





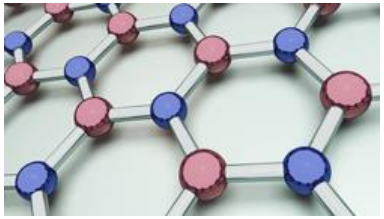
En 2015 : émetteurs de photons uniques découverts dans des matériaux 2D

Nat. Nano. 10, 491 (2015)
Nat. Nano. 10, 497 (2015)
Nat. Nano. 10, 503 (2015)
Nat. Nano. 10, 507 (2015)
Optica 2, 347 (2015)

CENTRES COLORÉS DANS HBN

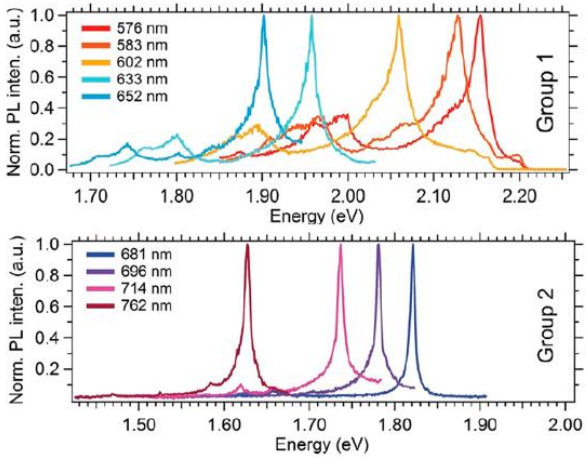
Découverte d'émetteurs de photons uniques dans hBN

- Centres colorés (CC)
- Plusieurs familles : UV, visible et proche infrarouge



Défauts dans le visible :

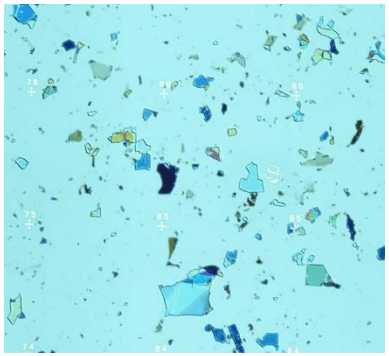
- ✓ Stables, brillants, émission à température ambiante
- ✓ Faible largeur de raie



ACS Nano 10, 7331 (2016)

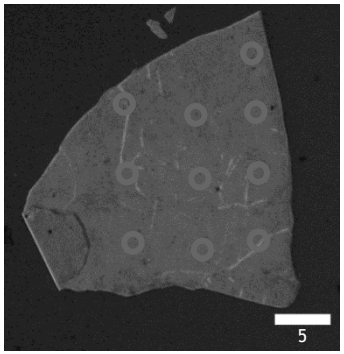
Centres colorés dans hBN

- Echantillons de hBN :
  - Exfoliation mécanique
  - Flakes de hBN : monocristaux 2D de quelques dizaines de nm d'épaisseur

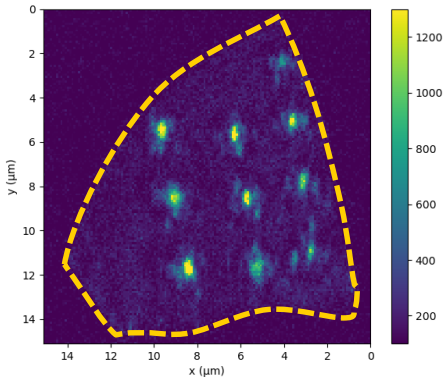


- Irradiation électronique :
  - Microscope électronique commercial
  - Faisceau e^- quasi focalisé
  - Positionnés de façon contrôlée

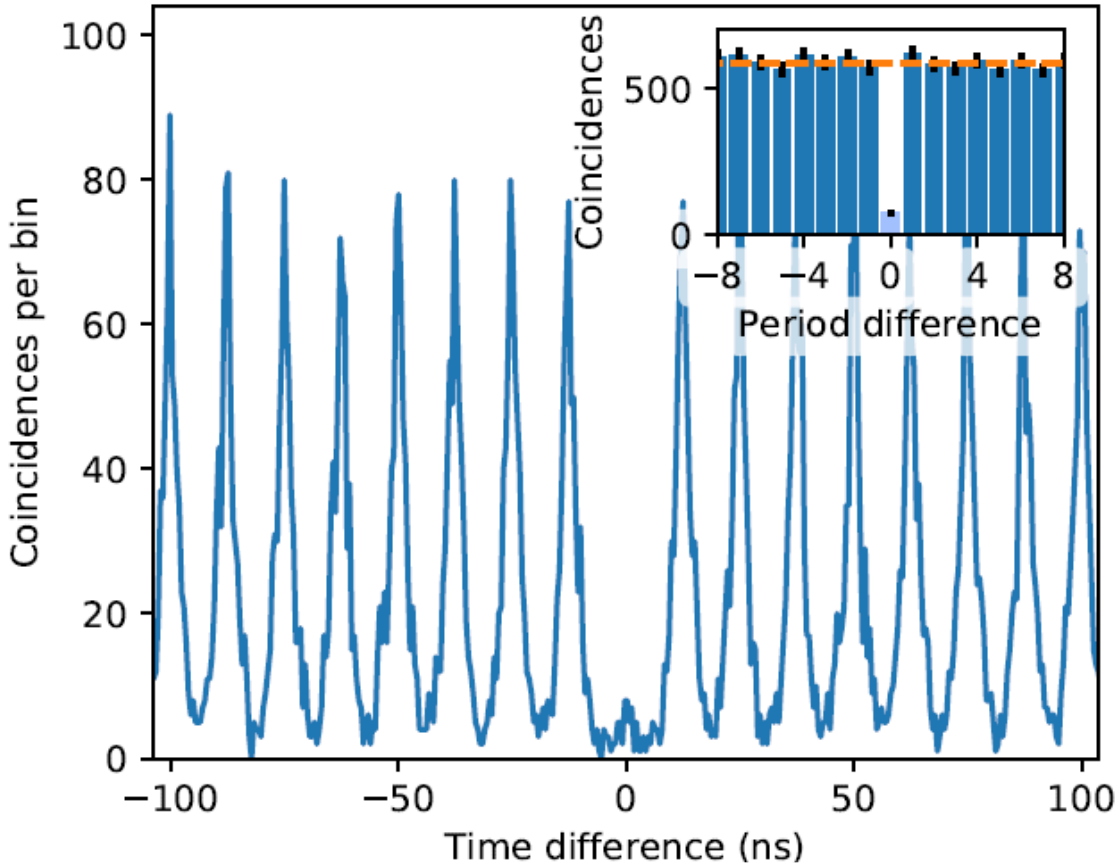
Image MEB



Fluorescence (4 K)



Des sources de photons uniques

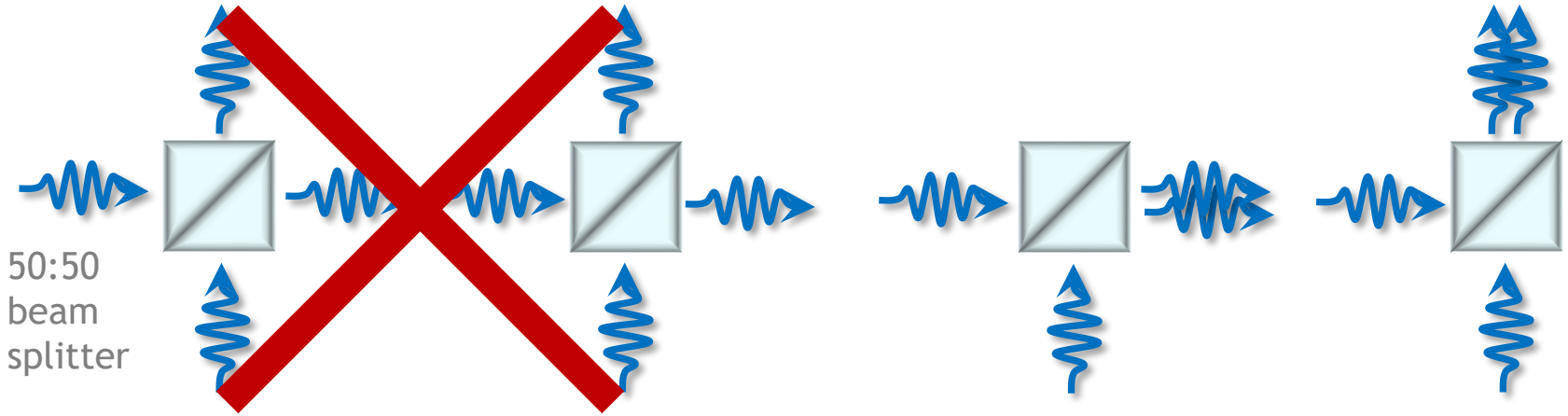


Nature Communications 12, 3779 (2021)

Des photons indiscernables

Deux photons **indiscernables** (polarisation, mode spatial, longueur d'onde…) arrivent au même moment sur une lame séparatrice 50% / 50 % :

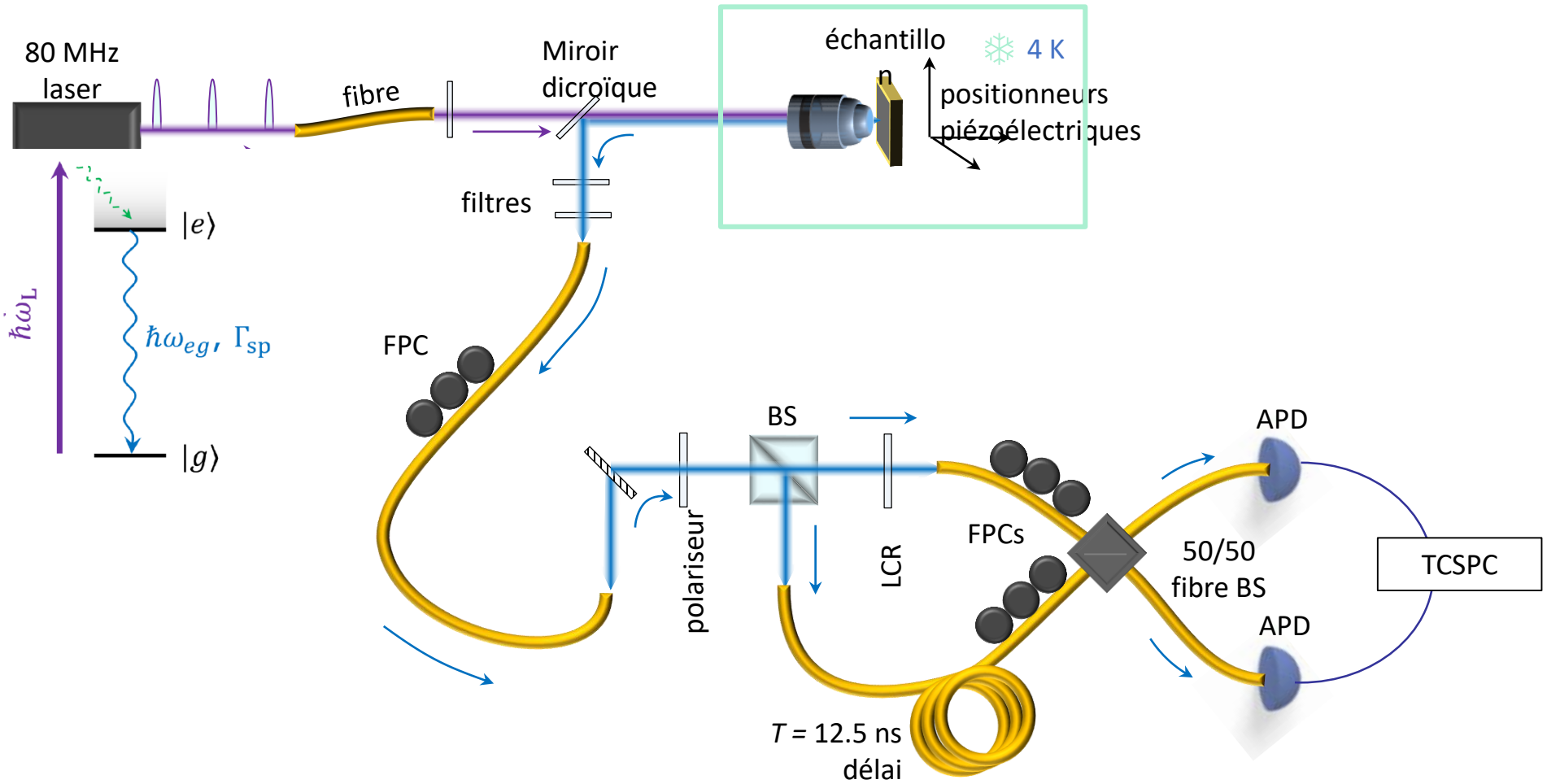
2 issues possibles uniquement



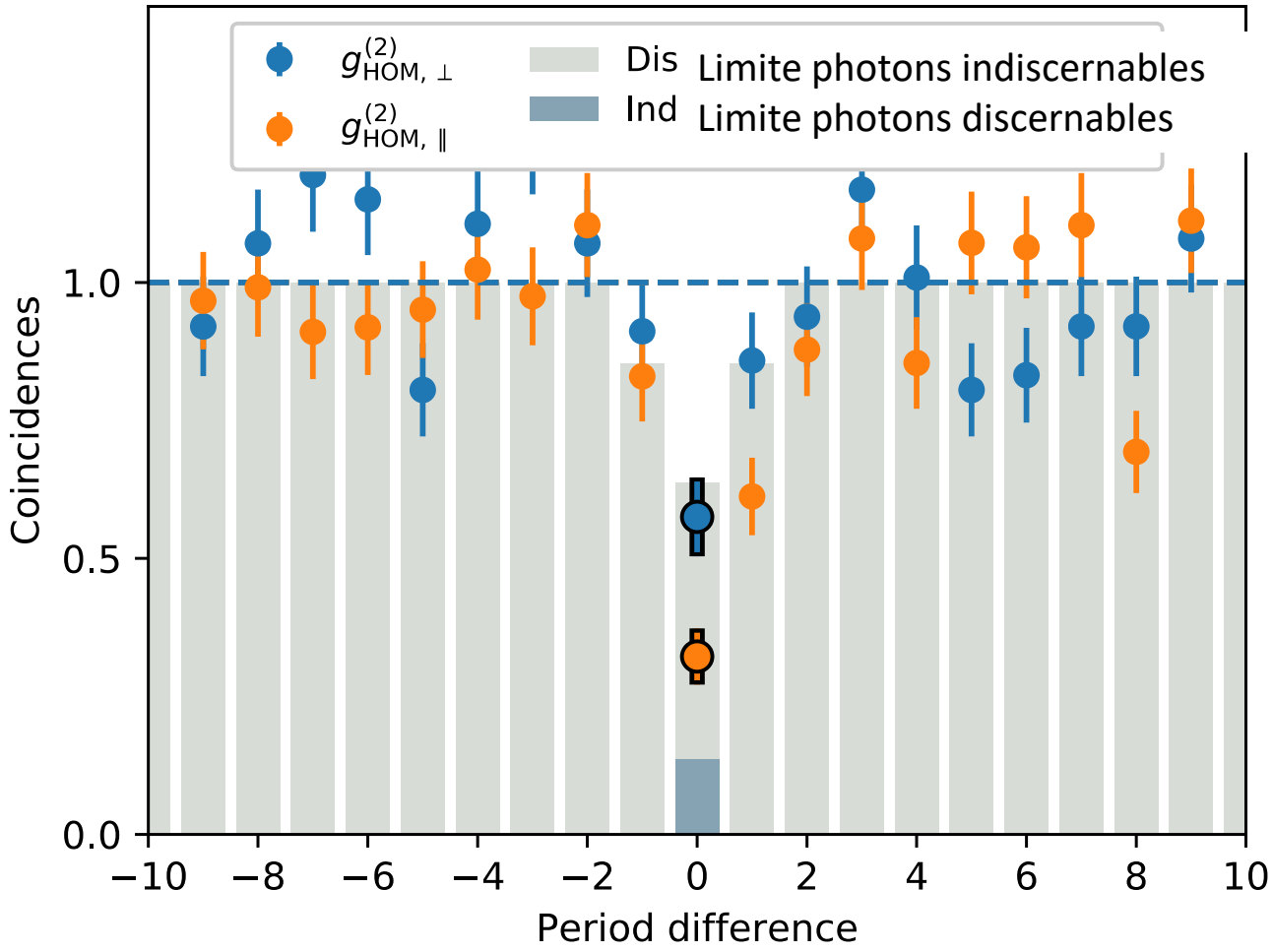
Effet **Hong-Ou-Mandel** : les photons sortent par le même port.

Le montage expérimental

Interféromètre de Mach-Zehnder retardé

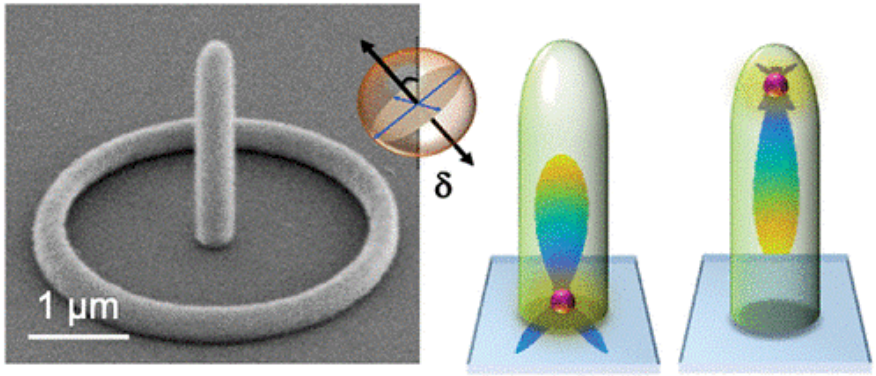


Interférences quantiques

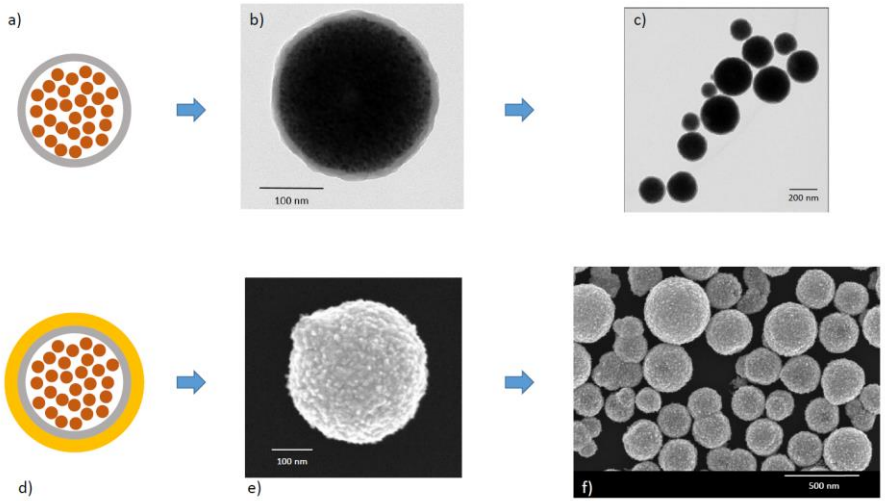


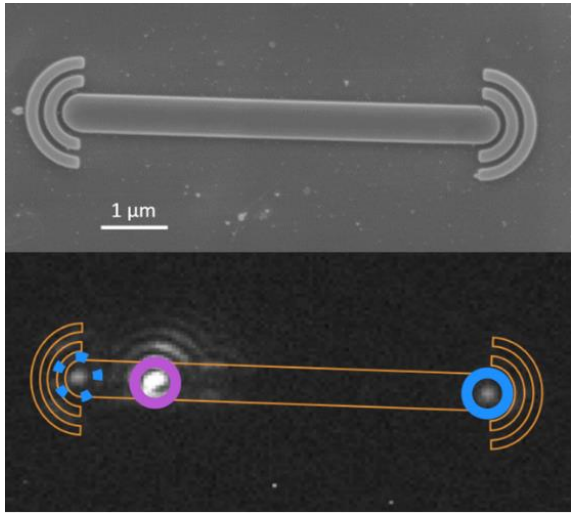
Couplage à des structures photoniques : contrôle de l'émission

Nanocristal / nanoantenne polymère



Emission cohérente de nanocristaux intégrés dans un nanorésonateur plasmonique





Guide d'onde gravé dans hBN / un centre coloré (hBN)

Conclusion Générale

La mécanique quantique

- Une théorie étonnante
- Aux implications considérables :
    - sur le plan fondamental
    - pour les applications (première et seconde révolutions quantiques)
    - avec des aller-retours vertueux (ex : lasers pour refroidir les atomes)
- Actuellement en plein essor avec la seconde révolution quantique
- Délais incompressibles (équations de Dirac / l'ordinateur, pas très « start-up ») ?
- Garder un esprit critique en particulier vis-à-vis des « arnaques quantiques »

Vidéos en ligne : Julien Bobroff ***Cours Serge Haroche au collège de France (2002)***

La nanophotonique quantique au GEMaC

- Les nanocristaux colloïdaux
- Les centres colorés dans le nitrure de bore hexagonal (hBN)

Vous êtes les bienvenu.es au GEMaC