

# Physique quantique : un monde étrange au cœur de nouvelles technologies

*J.M. Raimond*

*Sorbonne Université*

*Laboratoire Kastler Brossel*

*Collège de France, ENS, CNRS, SU*



*“About your cat, Mr. Schrödinger—I have  
good news and bad news.”*

# Le XX<sup>ème</sup> siècle fut celui de la mécanique quantique

- L'exploration du monde microscopique a été la grande aventure scientifique du siècle dernier.
  - La théorie quantique nous a donné les clés de ce monde...
- La théorie physique avec le plus vaste champ d'applications
- La théorie physique la plus précise et la mieux vérifiée
- Mais au prix d'une description du monde microscopique contraire à l'intuition et au « bon sens »:
  - Les particules sont ici ET là
  - Les portes sont ouvertes ET fermées
  - Les chats sont morts ET vivants

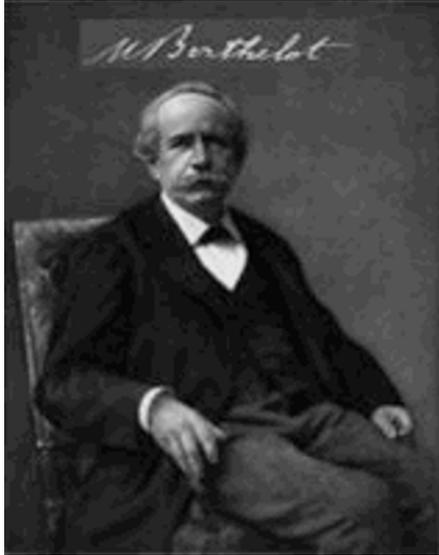
# Le XXI<sup>ème</sup> siècle sera quantique aussi

- Essor des technologies quantiques
  - Lasers, supraconducteurs, semi-conducteurs
  - Contrôle sans précédent de la matière et du rayonnement
- De nouvelles applications du quantique
  - En particulier mesures de haute précision, transmission et traitement quantiques d'information
- Une science extraordinairement active au niveau mondial
  - Au seuil de nouvelles applications industrielles

Parlons un peu de physique quantique

- **La première révolution quantique**
  - Un premier pas dans un monde étrange
- Les applications présentes de la physique quantique
  - Applications pratiques et science fondamentale
- La seconde révolution quantique
  - Physique quantique, mesure et information

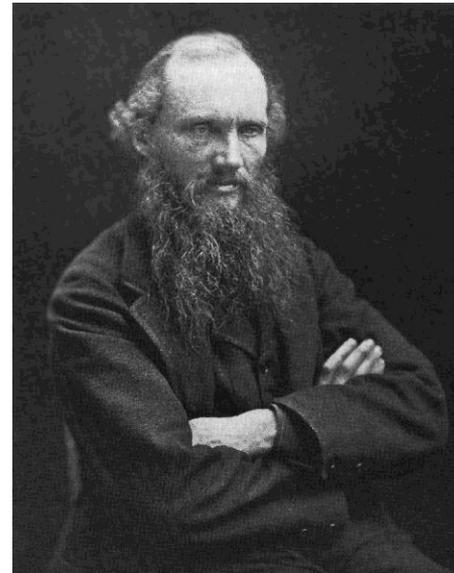
# Il y a 120 ans l'existence même des atomes était controversée



Marcellin  
Berthelot ne  
croyait pas aux  
atomes....



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



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

# Des nuages sur la physique classique

## Rayonnement du corps noir

Les corps chauffés émettent du rayonnement

Spectre continu universel



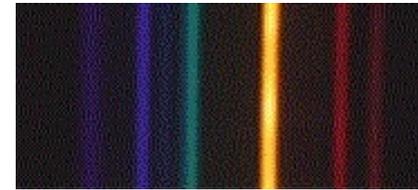
Impossible de prédire les propriétés de ce rayonnement par l'électromagnétisme et la thermodynamique (science de la chaleur) classiques

Puissance infinie et spectre absurde (diverge aux courtes longueurs d'onde)

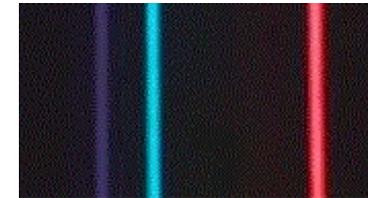
## Spectres atomiques

Les atomes émettent et absorbent des couleurs (longueurs d'onde) bien déterminées

Hélium



Hydrogène

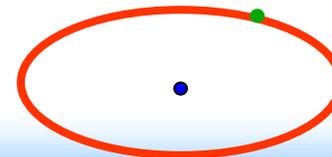


Des lois numériques simples (Balmer 1885)

Aucun modèle classique convaincant

Instabilité du modèle planétaire

Rien ne fixe les couleurs



# L'hypothèse de discontinuité quantique

Planck (1900) et Einstein (1905):

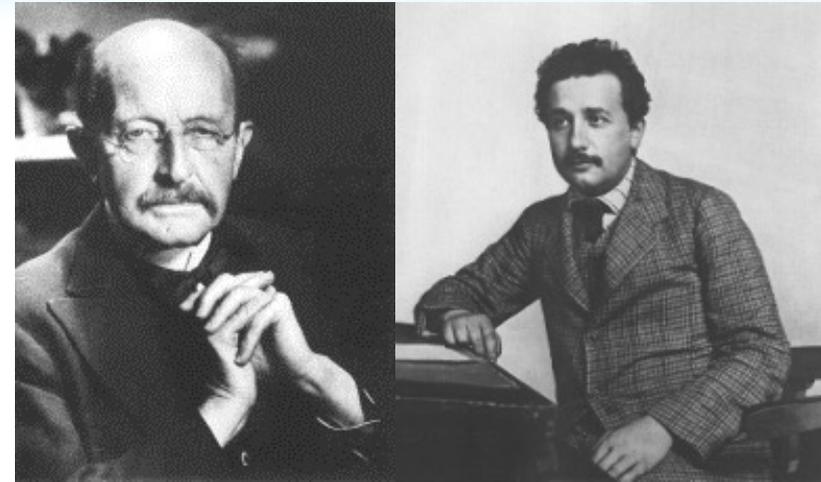
Quanta lumineux

Lumière faite de grains élémentaires  
(photons)

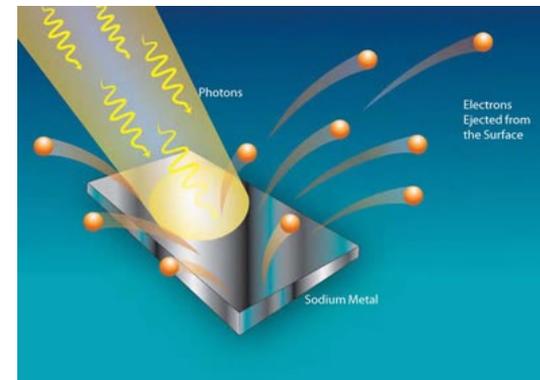
Energie  $h\nu$

$h$  constante de Planck

$6.62 \cdot 10^{-34}$  Js



Explique le corps noir et l'effet photoélectrique



Le tout début d'une aventure intellectuelle fascinante

# L'hypothèse de discontinuité quantique

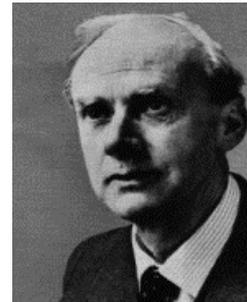
- **Modèle de Bohr (1913)**
  - $h$  dans la structure atomique: modèle simple
  - Explique les spectres atomiques simples (hydrogène)
- **Einstein (1917)**
  - Processus d'émission et d'absorption de photons
  - Émission stimulée au coeur du maser/laser (première réalisation plus de 40 ans plus tard..)
- **Mais pas encore de théorie cohérente, unifiée...**

# Copenhague

- 1925-1930

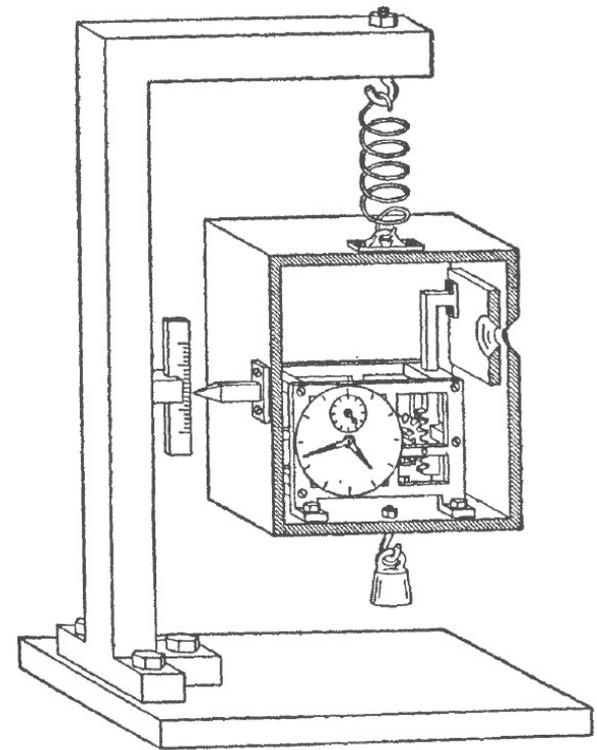


- Un petit noyau de physiciens autour de Bohr fonde le formalisme de la « mécanique quantique »
- Une base solide aux hypothèses heuristiques de Planck, Bohr et Einstein
- Un renouvellement complet de la physique et de notre vision du monde



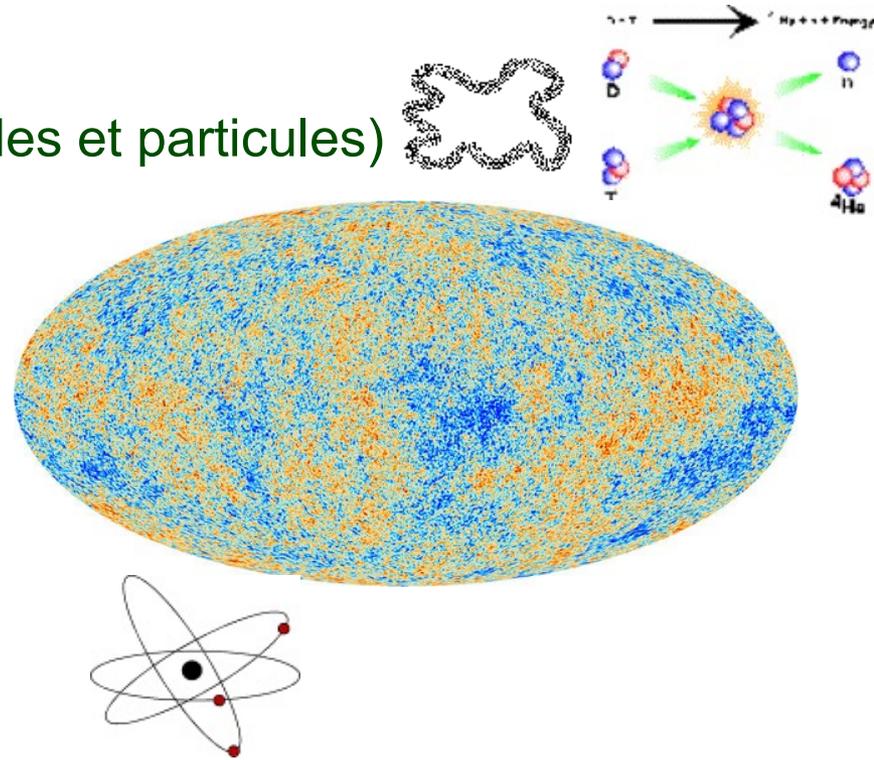
# Une nécessaire « interprétation » du formalisme

- Une des rares théories physiques où le lien entre objet mathématique et monde réel n'est pas intuitif
- Les expériences de pensée
  - Exagérer les comportements quantiques pour comprendre leurs conséquences logiques
    - Microscope de Heisenberg
    - Interféromètre à particule unique
    - Boîte à photons



# Une réussite théorique sans précédent...

- Un énorme champ d'applications
  - Des constituants élémentaires (cordes et particules)
    - $10^{-35}$  m à  $10^{-15}$  m
  - Aux structures cosmologiques
    - $10^{26}$  m
  - En passant bien sûr par les atomes
    - $10^{-10}$  m
- Des prédictions d'une précision extrême
  - Accord théorie-expérience sur 12 chiffres !
- Un cadre théorique universel
  - Toutes les interactions fondamentales de la nature dans un cadre unique (sauf la gravité)



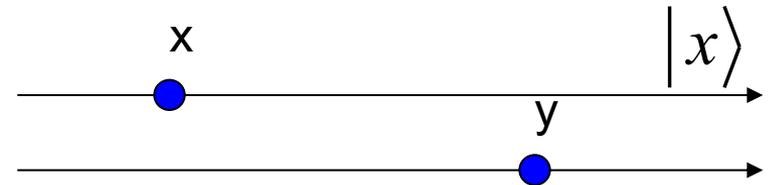
# Etrangeté quantique: superpositions d'états

- Etat quantique

- Un objet mathématique qui décrit toute l'information qu'on a sur le système

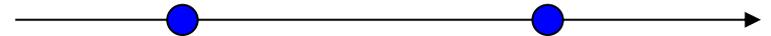
- Particule ponctuelle

- État « x »: particule localisée ici en x
- État « y »: particule localisée là en y



- La physique quantique est une théorie linéaire

- Toute somme d'états est un état possible
  - « x »+ « y » est un état possible

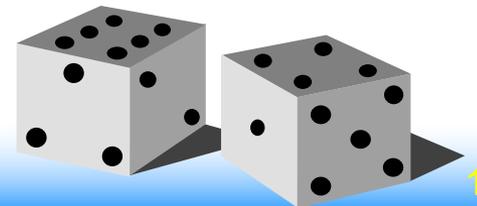


Une particule dans deux (une infinité d') endroits « *en même temps* » ???

Commode, mais choquant....

# Etrangeté quantique: superposition et mesure

- Etat « x » + « y »  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle + |y\rangle)$ 
  - On mesure la position de la particule.
    - Deux résultats possibles x ou y
    - Se manifestent de façon aléatoire avec des probabilités égales
      - Un cas sur deux, on trouve x, un cas sur deux y
- Un « pile ou face » fondamental. Rien ne permet de prédire le résultat d'une expérience quantique unique. Seules les probabilités d'occurrence sont prédictibles.
  - Renoncement au déterminisme classique
    - Einstein détestait cette physique où la Nature joue aux dés



# Etrangeté quantique: superposition et mesure

- Etat après la mesure

- Mesure x: état « x »  $|x\rangle$

– Ou

- Mesure y: état « y »  $|y\rangle$

- Une seconde mesure immédiatement après la première donne le même résultat

- La mesure modifie fondamentalement et irréversiblement l'état quantique.
- Une notion nouvelle par rapport à la physique classique (on peut mesurer une quantité physique aussi précisément que possible sans perturber le système)

# Intrication: une étrangeté encore plus étrange

- Plus que la somme des parties ?
  - Deux systèmes quantiques, après avoir interagi ne forment plus qu'un
    - Même si ils sont séparés par une distance arbitraire.
  - Aucun n'a de propriétés, d'état bien défini !
    - Seul l'état de l'ensemble a un sens
  - Mesurer l'un, c'est mesurer l'autre !
    - Quelle que soit leur distance mutuelle: non-localité quantique
    - Le cœur de la 'situation Einstein Podolsky Rosen' (EPR)
  - Des conséquences totalement contraires à l'intuition classique
    - Mais conformes à l'expérience (Aspect 82)

# Etrangeté quantique: les limites du quantique

- Pourquoi le quantique est-il étrange?
  - Parce que nous n’observons jamais ces comportements à notre échelle !
  - Absurdité du « chat de Schrödinger »

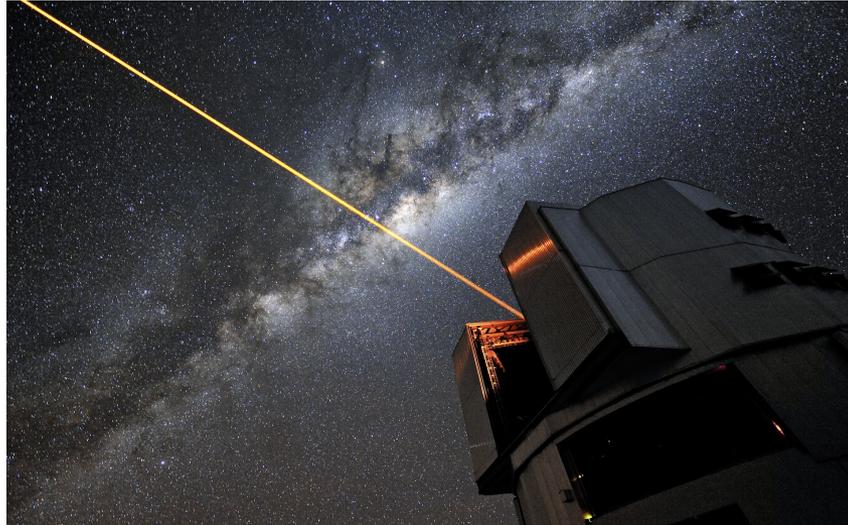


- Qu’est ce qui “voile” le quantique?
  - Couplage à l’environnement, décohérence
    - Fragilité extrême des états quantiques « paradoxaux » à l’échelle mésoscopique ou macroscopique

- La première révolution quantique
  - Un premier pas dans un monde étrange
- Les applications présentes de la physique quantique
  - Applications pratiques et science fondamentale
- La seconde révolution quantique
  - Physique quantique, mesure et information

# La physique quantique n'est pas qu'une curiosité pour chercheurs

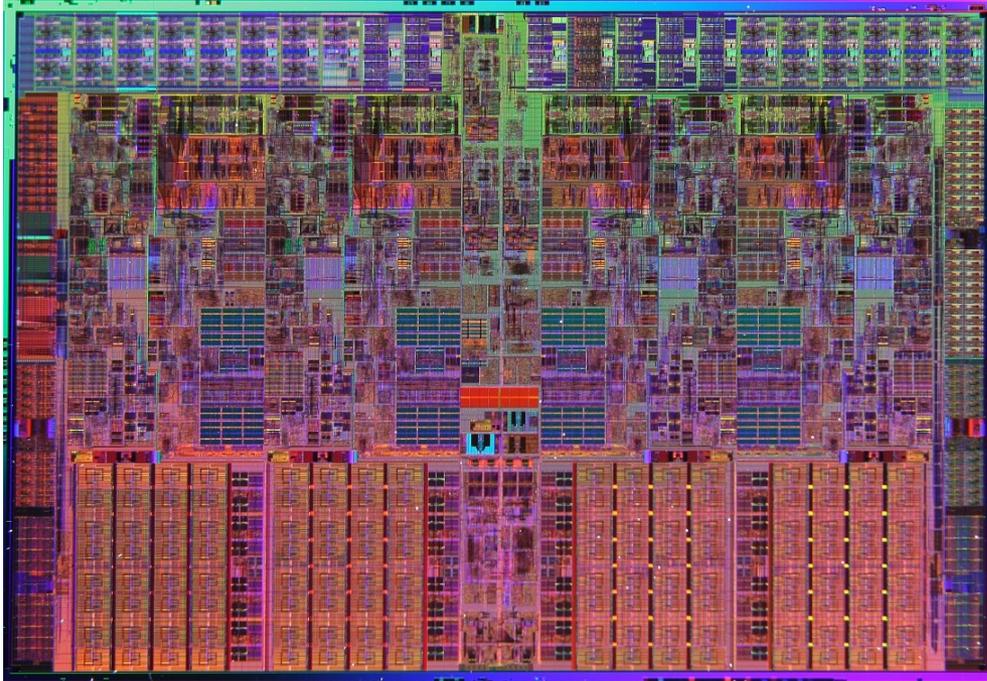
- Des applications sans nombre
  - Lasers



- L'essentiel de l'internet avec les fibres optiques
- Une infinité d'autres usages

# La physique quantique n'est pas qu'une curiosité pour chercheurs

- Des applications sans nombre
  - Circuits intégrés



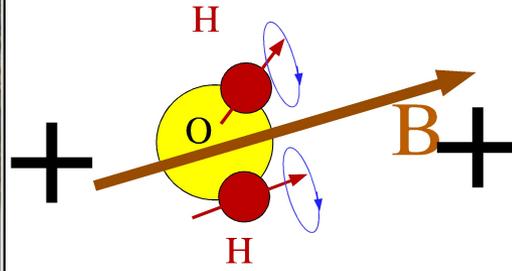
- Impossibles sans la compréhension quantique de la conduction dans le silicium
  - Sans cela, pas d'ordinateurs, de consoles ni de téléphones portables....

# La physique quantique n'est pas qu'une curiosité pour chercheurs

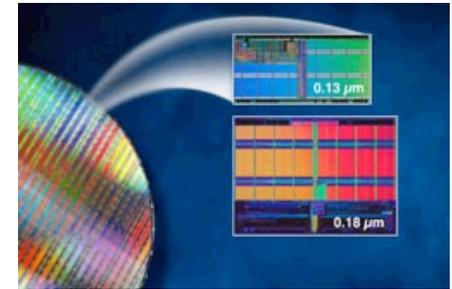
- Des applications sans nombre
  - Imagerie par résonance magnétique nucléaire



Aimants supraconducteurs

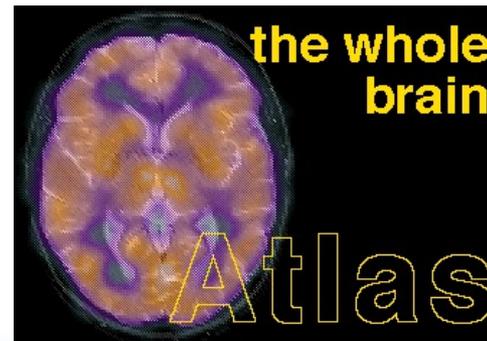


Résonance magnétique des protons dans un champ magnétique



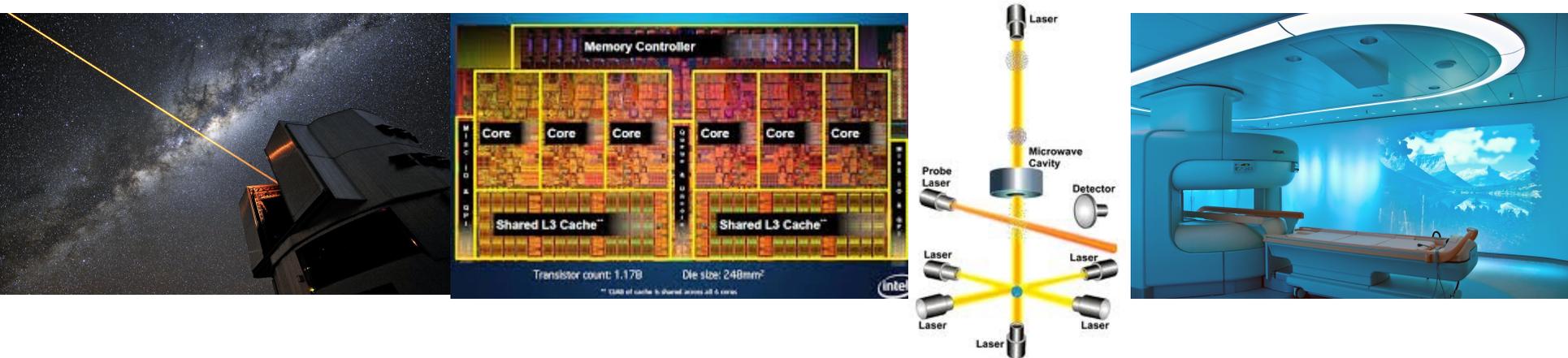
Circuits intégrés semi-conducteurs pour la reconstruction des images

- Une combinaison de technologies quantiques et un outil de diagnostic essentiel.



# Des applications sans nombre...

- 100 ans de physique quantique ont changé la société...
  - Lasers, électronique, horloges, imagerie par résonance magnétique...



- **Un impact sociétal et économique considérable (et mésestimé)**
  - Une grande partie du PIB résulte de technologies quantiques
    - Et aussi une part importante de notre espérance de vie!
  - Pas de société de l'information sans physique quantique
- **Un exemple remarquable de l'impact à long terme de la recherche fondamentale**
  - Une leçon pour nos systèmes de financement ?

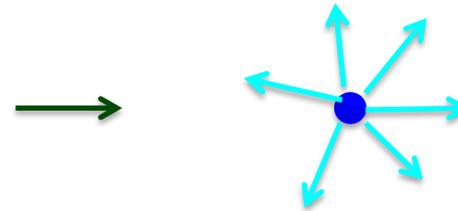
## ...et de nouveaux outils expérimentaux

- Lasers, ordinateurs nous permettent de manipuler des systèmes quantiques
  - La technologie quantique aide à explorer le monde quantique
  - Les expériences de pensée deviennent réelles
  - Nous pouvons enfin contredire 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.... »
  - Et la physique quantique passe le test!
    - Ce que nous observons est précisément ce que les pères fondateurs avaient eu l'exceptionnel talent et l'audace d'imaginer.
- Un renouveau considérable de la physique fondamentale
  - Avec un contrôle sans précédent sur la matière

# Quelques systèmes quantiques : Atomes froids

- Refroidir avec des lasers?

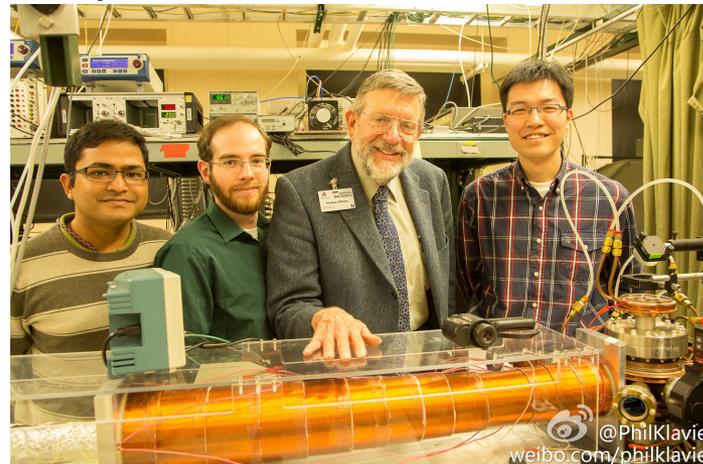
- Atome absorbe les photons d'un laser toujours dans la même direction et les réémet dans toutes les directions.



- Une force moyenne sur l'atome

- **Gigantesque. Accélération  $10^5$  g!**

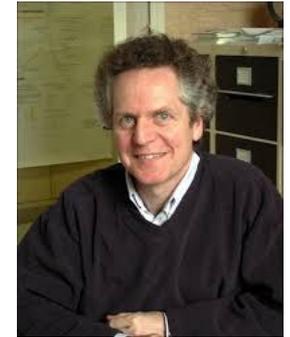
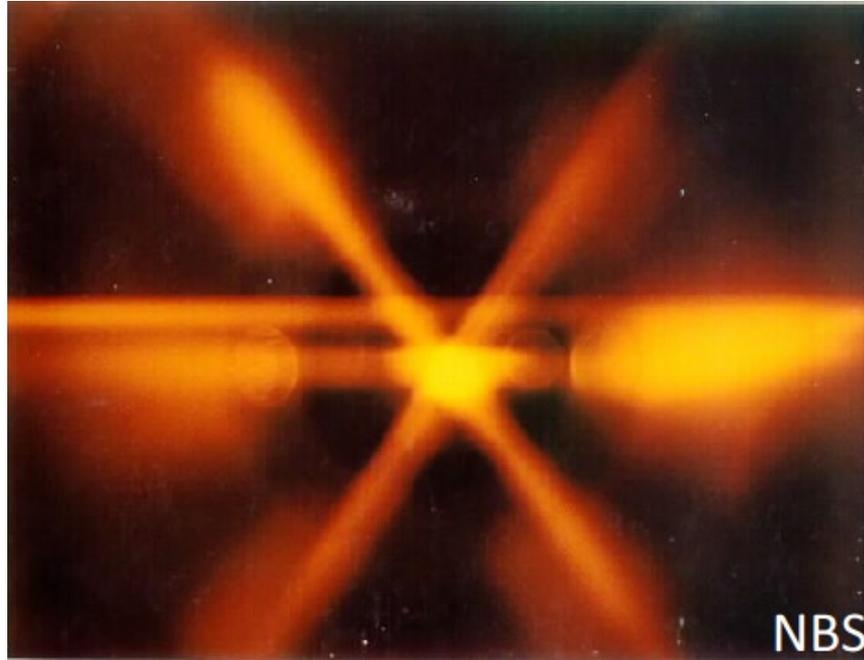
- On arrête un atome depuis la vitesse du son en quelques centimètres!



Steve Chu, Claude Cohen-Tannoudji, William Phillips, Nobel 1997

# Quelques systèmes quantiques : Atomes froids

- Diminuer la vitesse, c'est diminuer l'agitation thermique et donc refroidir !
  - Mélasses optiques, piège magnéto-optique

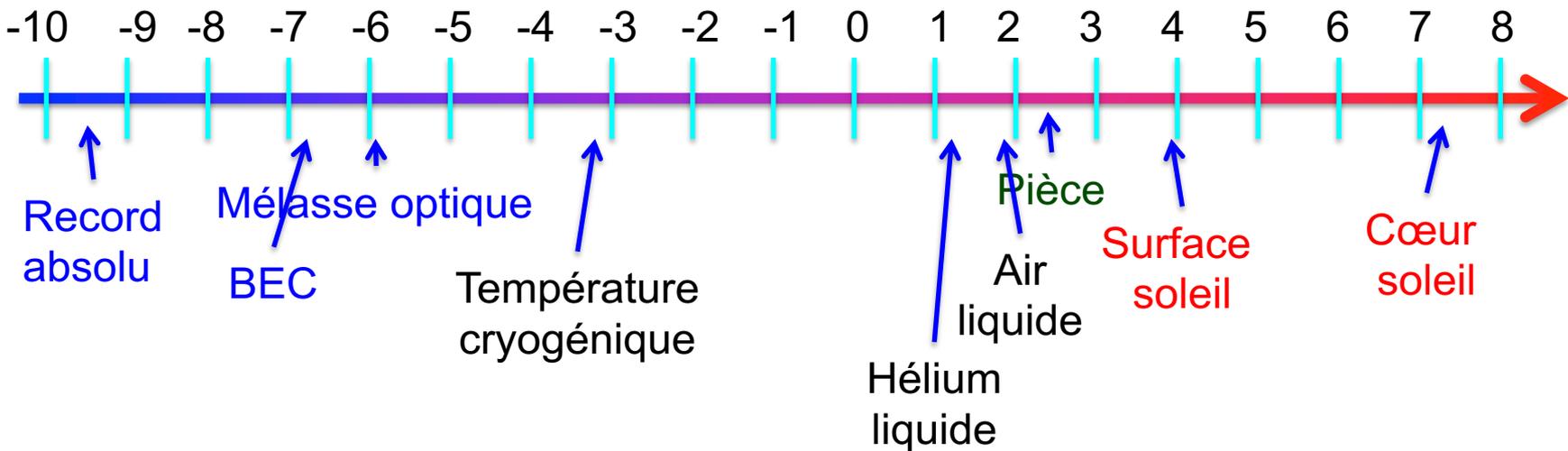


Jean Dalibard

- On piège et refroidit les atomes
  - Un effet prédit par Kastler dès les années 60
  - Un paradoxe avec des lasers, bien connus pour chauffer

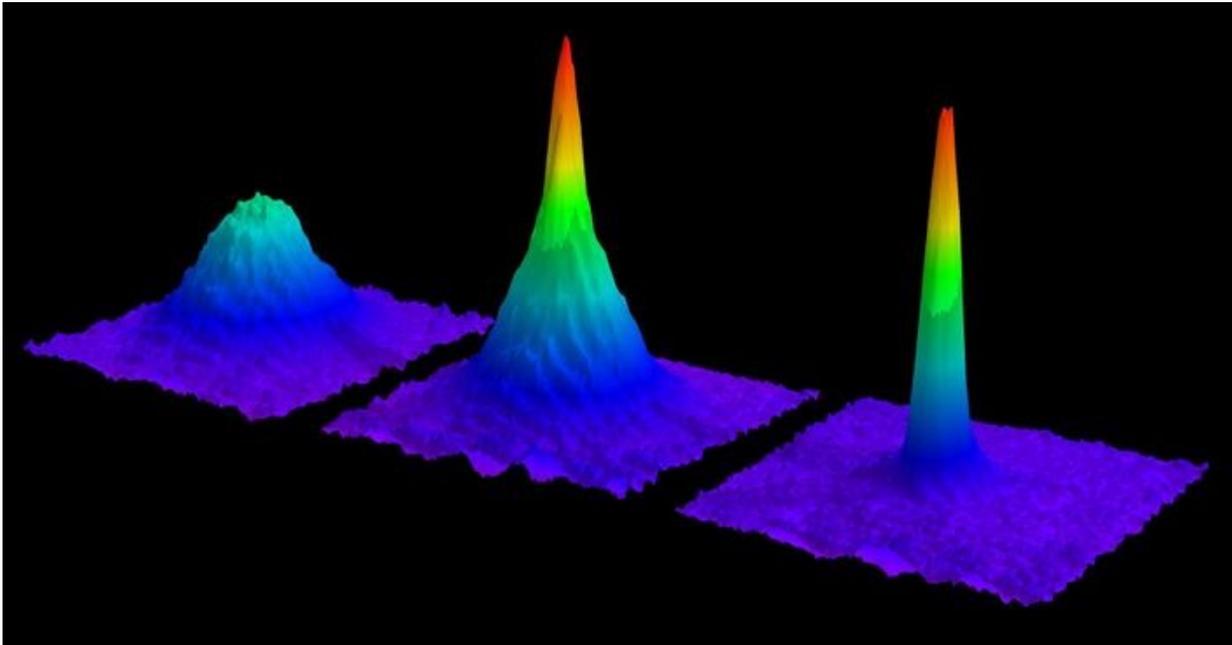
# Quelques systèmes quantiques : Atomes froids

- Les températures les plus basses au monde
  - Température absolue = température centigrade - 273.15
  - À 0 K ou -273.15° C plus rien ne bouge
    - Une limite inatteignable
    - Mais on en est terriblement proches
- Ordres de grandeur (en puissances de 10)



# Quelques systèmes quantiques : Atomes froids

- Si basses qu'il se passe quelque chose de tout à fait nouveau
  - Condensation de Bose Einstein

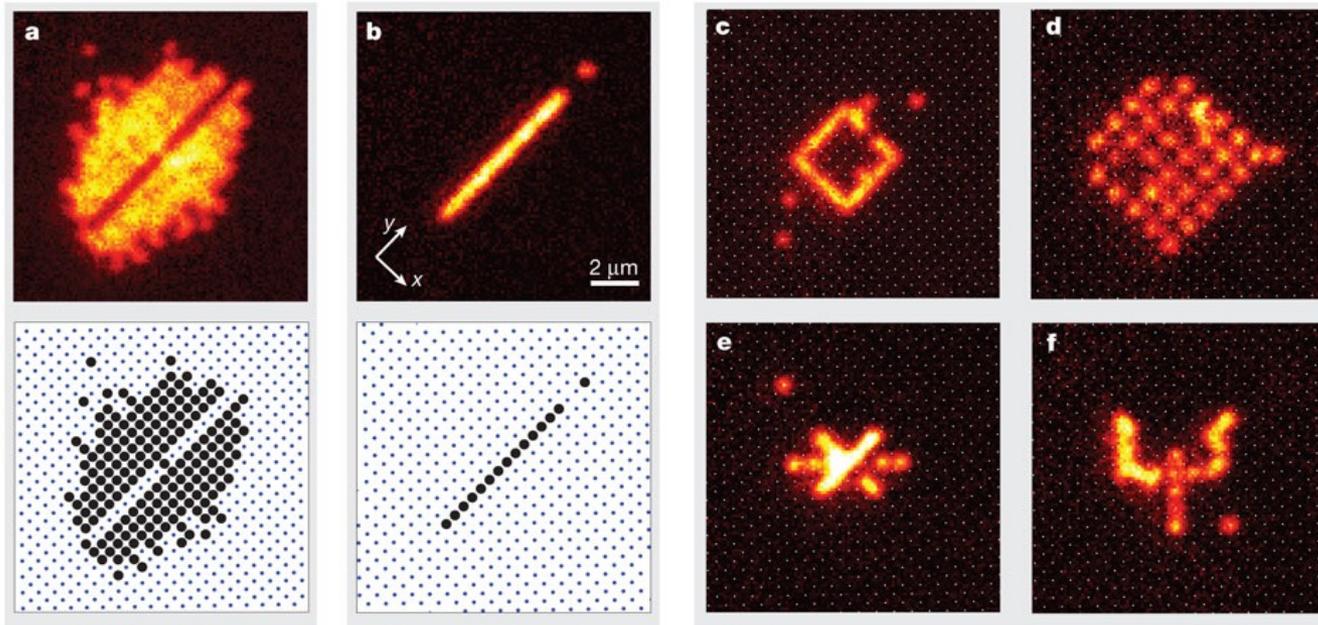


- Tous les atomes dans le même état quantique, tous dans l'état d'énergie la plus basse autorisée par la physique quantique

Eric Cornell, Carl Wieman, Wolfgang Ketterle, Nobel 2005

# Quelques systèmes quantiques : Atomes froids

- Ranger des atomes comme des œufs dans une boîte

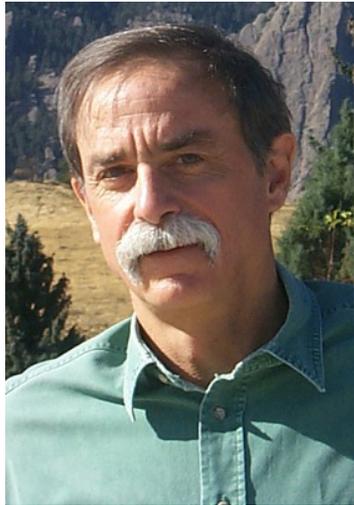


I. Bloch, Munich

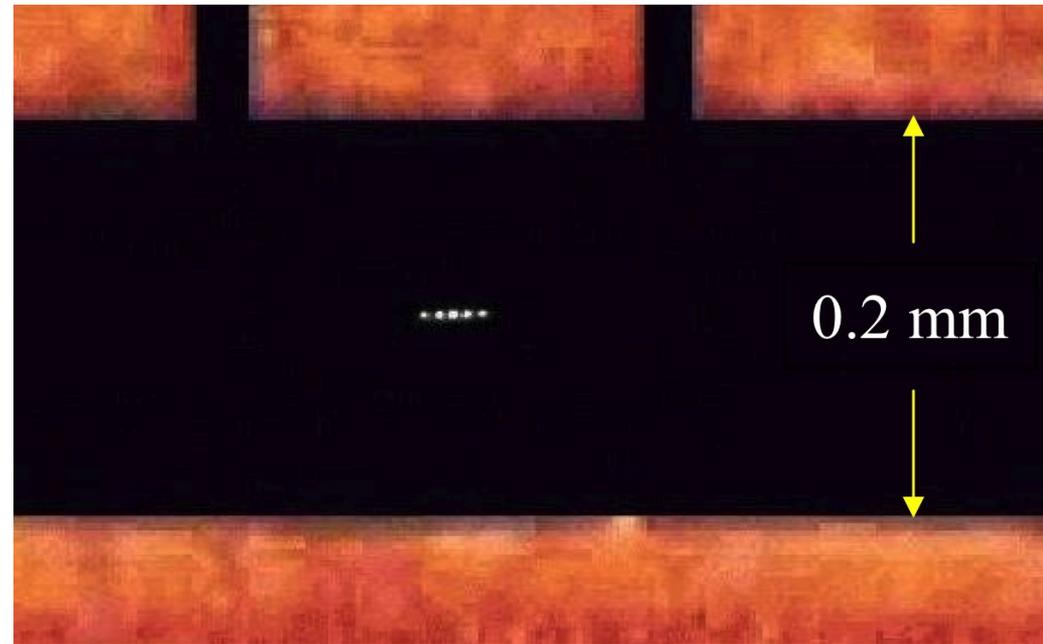


# Quelques systèmes quantiques : ions piégés

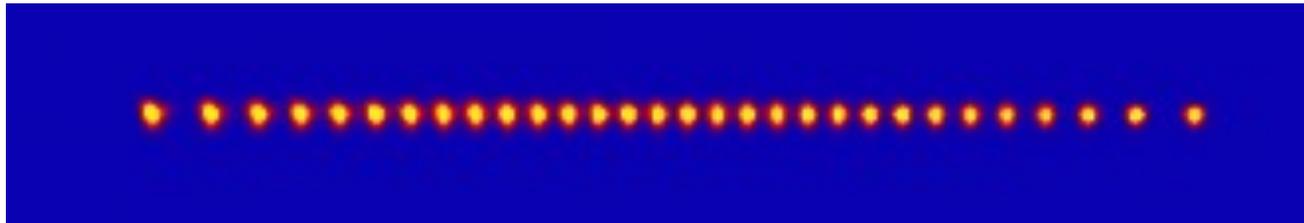
D.J. Wineland, Boulder



Nobel, 2012



R. Blatt, Innsbruck



30 ions individuellement manipulables et couplés

un système quantique à 1073741824 états

# Quelques systèmes quantiques : CQED

- S. Haroche, LKB, ENS

- Un atome et une cavité

- Des miroirs remarquables
- 1 milliard de réflexions

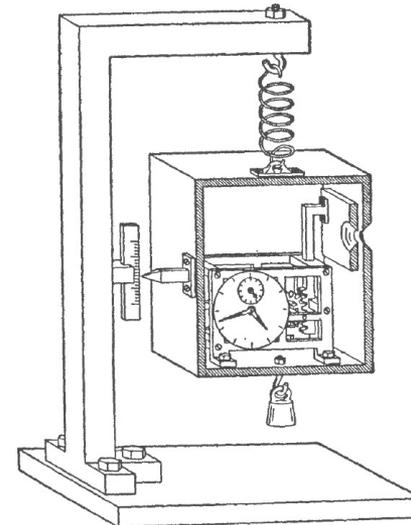


Nobel, 2012



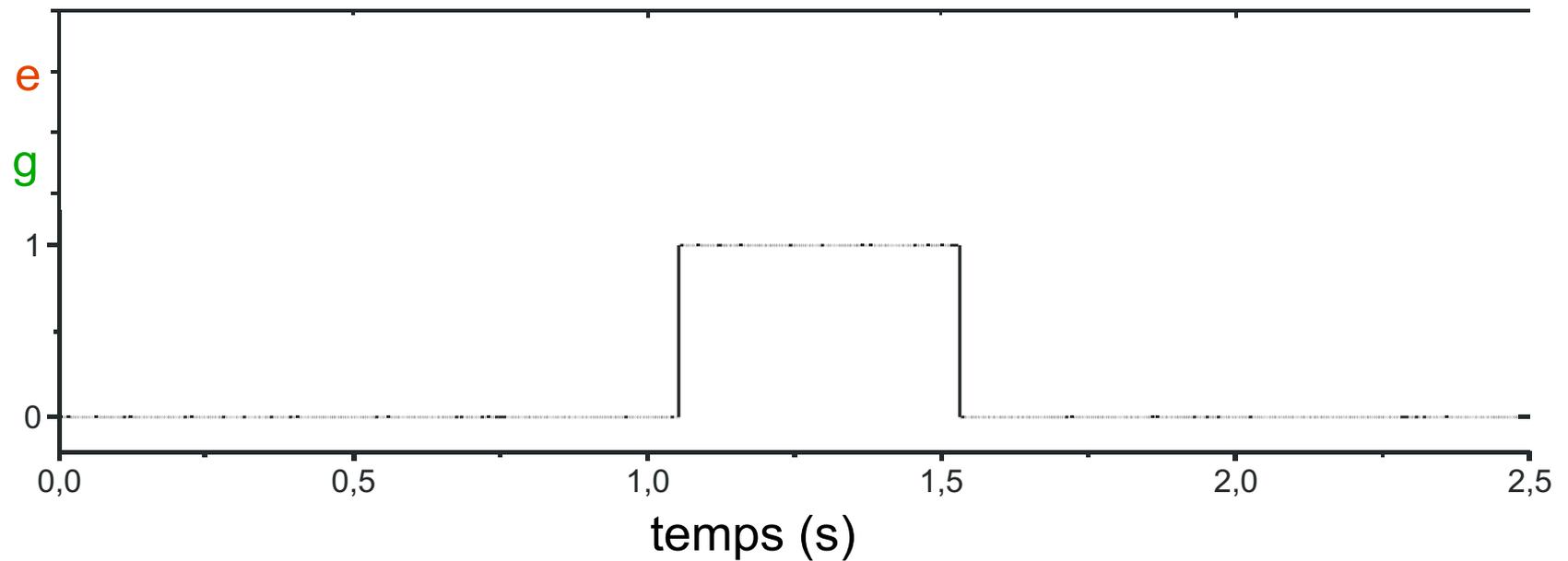
- Des expériences de pensée réalisées

- « peser un photon »
- Voir un photon sans le détruire



# Quelques systèmes quantiques : CQED

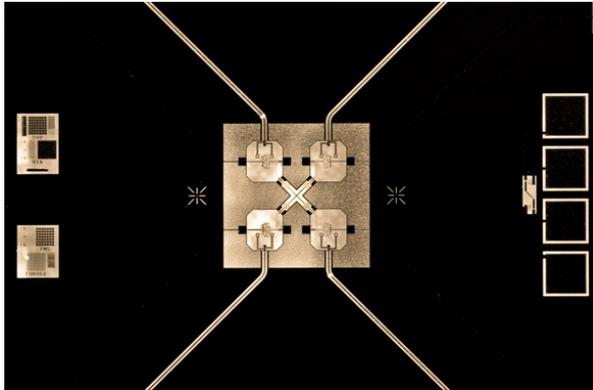
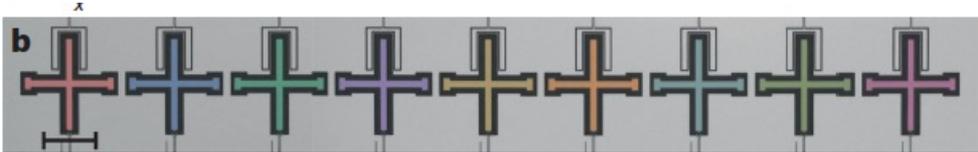
- Naissance, vie et mort d'un photon



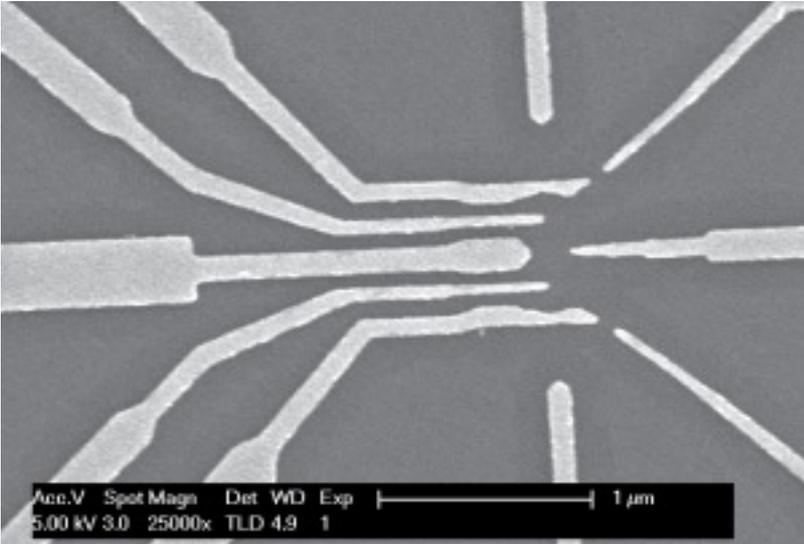
Gleyzes et al, Nature, **446**, 297 (2007)

# Quelques systèmes quantiques : atomes artificiels

- J. Martinis, Google, UCSB
  - Circuits supraconducteurs



- L. Vandersypen, TU Delft
  - Electrons individuels dans un semi-conducteur



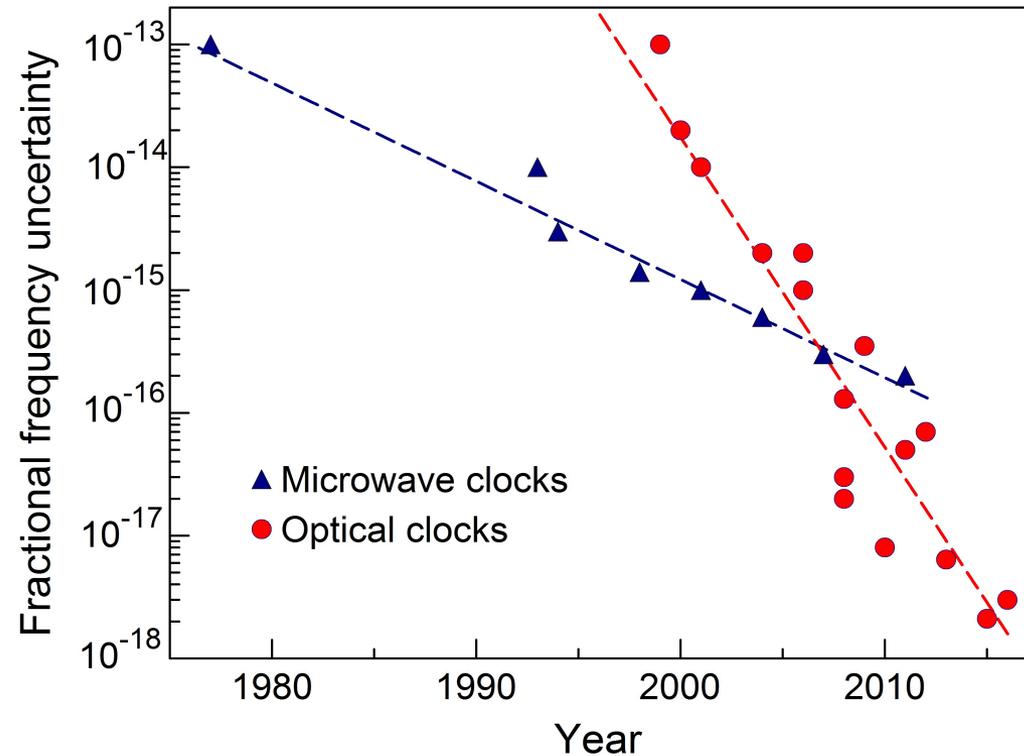
- La première révolution quantique
  - Un premier pas dans un monde étrange
- Les applications présentes de la physique quantique
  - Applications pratiques et science fondamentale
- **La seconde révolution quantique**
  - Physique quantique, mesure et information

# Vers un nouveau siècle quantique ?

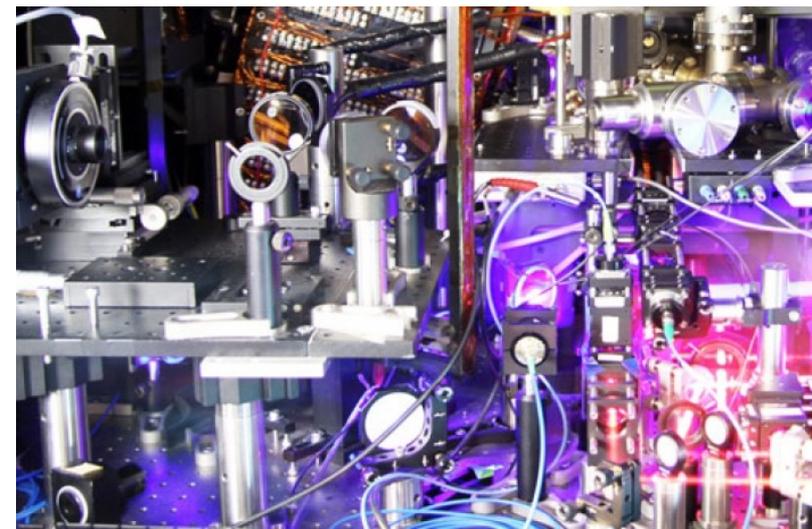
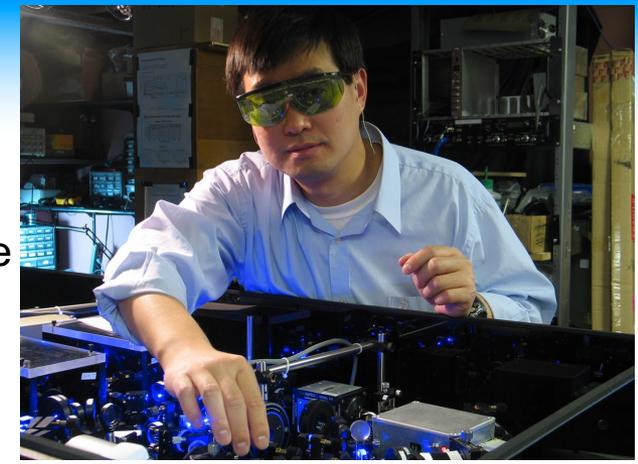
- Dompter l'étrangeté quantique pour de nouvelles applications:
  - Métrologie quantique
  - Communication quantique
  - Calcul quantique
  - Optimisation quantique
  - Simulation quantique

# Métrologie quantique

- Horloges atomiques



Jun Ye



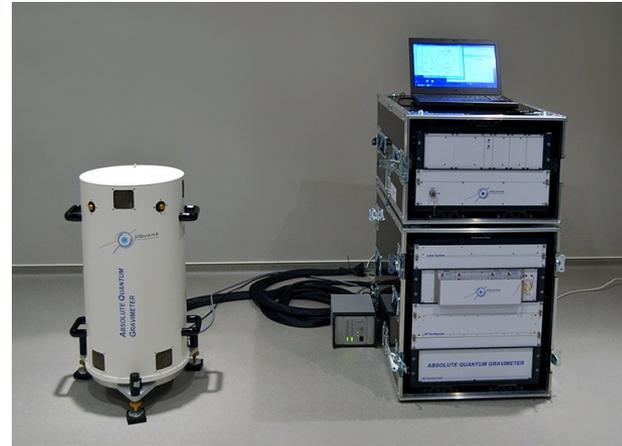
- Précision fantastique
  - $10^{-18}$  en valeur relative
  - 1s/âge de l'univers !!!!

# Méetrologie quantique

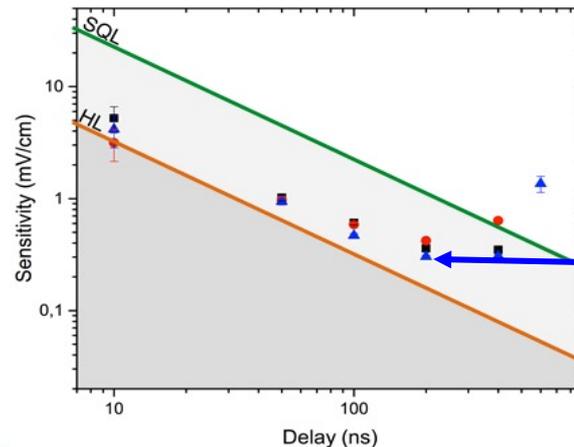
- Utiliser le quantique pour améliorer les mesures

- Gravimètres

- Muquans (Bordeaux)



- Gyromètres, électromètres, magnétomètres, ...



200  $\mu\text{V}/\text{cm}$  !

A. Facon et al., Nature, 535, 262 (2016)

# Cryptographie quantique

- Partager des clés secrètes

- One-time pad

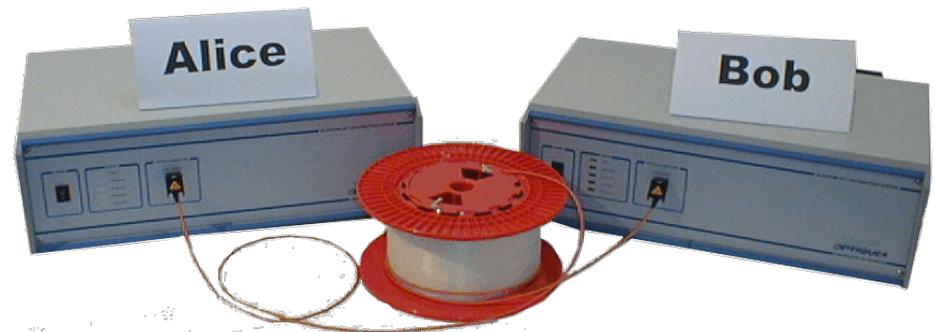
- Méthode de codage sûre
- Autant de clé que de message

- Transmission par un canal quantique

- Mesure (espion) change l'information
- Toute écoute décelable

- Déjà commercial

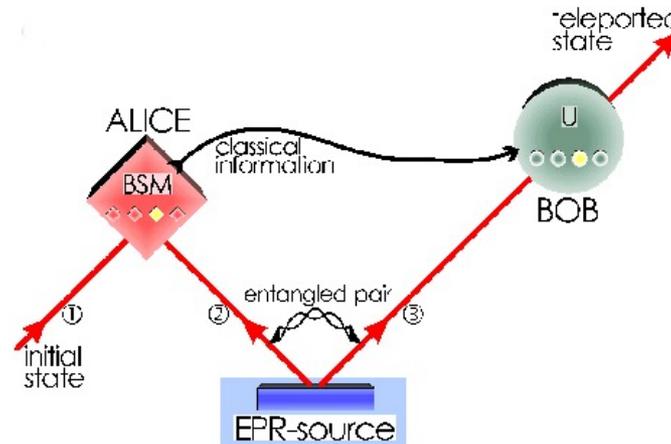
- Utile?



# Téléportation quantique

- Un fax quantique

- Transmet a distance, à la vitesse de la lumière, l'état quantique d'une particule



- Fonctionne avec des photons et des atomes

- Une superbe illustration de la non-localité quantique

- Un outil pour la communication quantique

- Pas une solution au problème des transports en commun

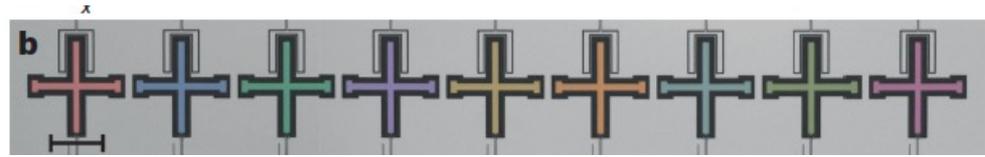
# Simulation quantique

- La formidable complexité du quantique
  - N systèmes à deux niveaux
    - $2^N$  états
  - Complexité exponentielle avec la taille du système
  - Calcul exact inaccessible pour un ordinateur classique dès que  $N > 42$
  - Seules des méthodes approchées sont possibles
- Feynman 1982: Explorer les propriétés d'un système complexe en le 'simulant' par un système contrôlable avec la même dynamique
  - A partir d'une quarantaine de composants, les résultats ne sont plus prédictibles avec des ordinateurs classiques.
  - Développement et ingénierie de nouveaux matériaux
    - Relativement 'facile': un domaine en pleine expansion
    - Des première réalisations impressionnantes

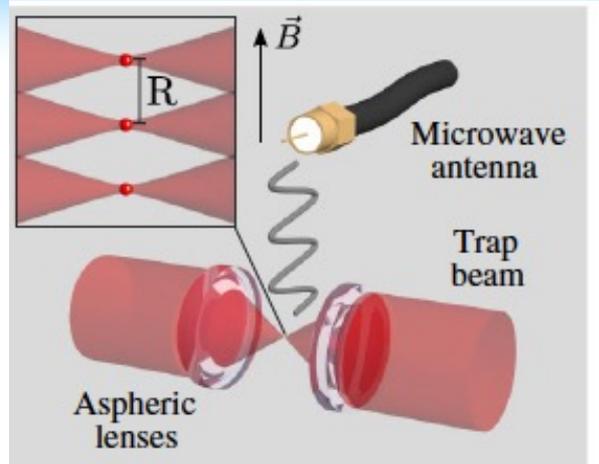


# Simulation quantique

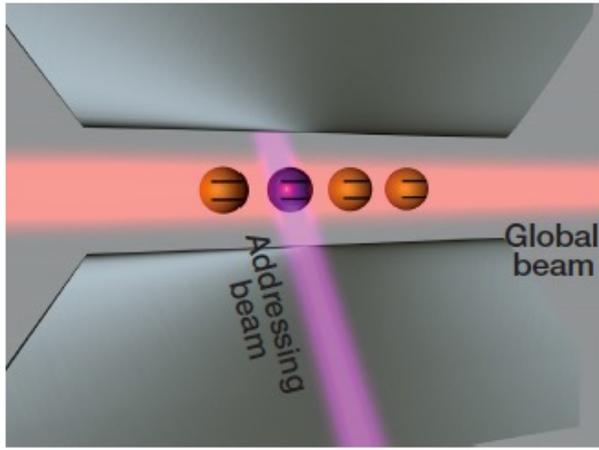
- Nombreuses réalisations



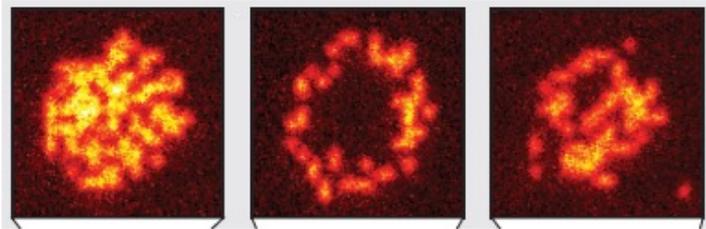
Circuits supraconducteurs Barends et al. Nature 534,222



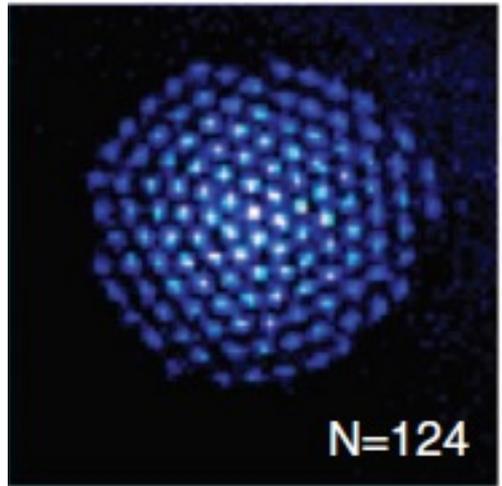
Atomes de Rydberg Barredo et al. PRL 114 113002



Ions piégés 1D Martinez et al. Nature 534 516



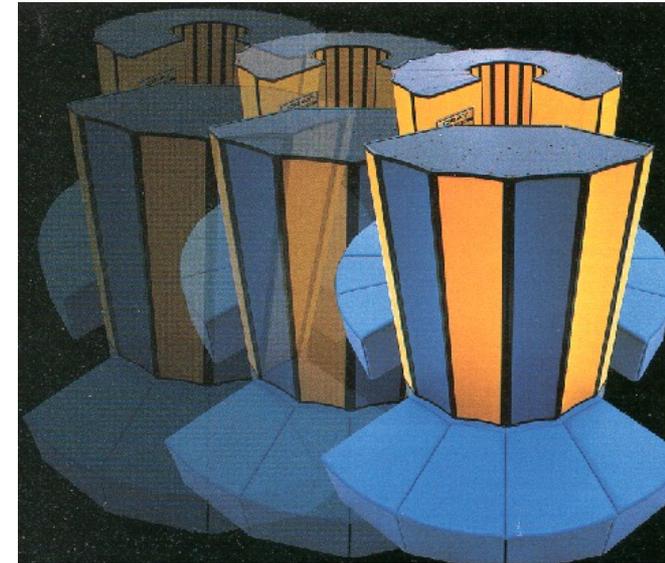
Réseaux atomiques Zeiher et al. Nat. Phys. 12,1095



Ions piégés 2D Bohnet et al., Science 352 1297

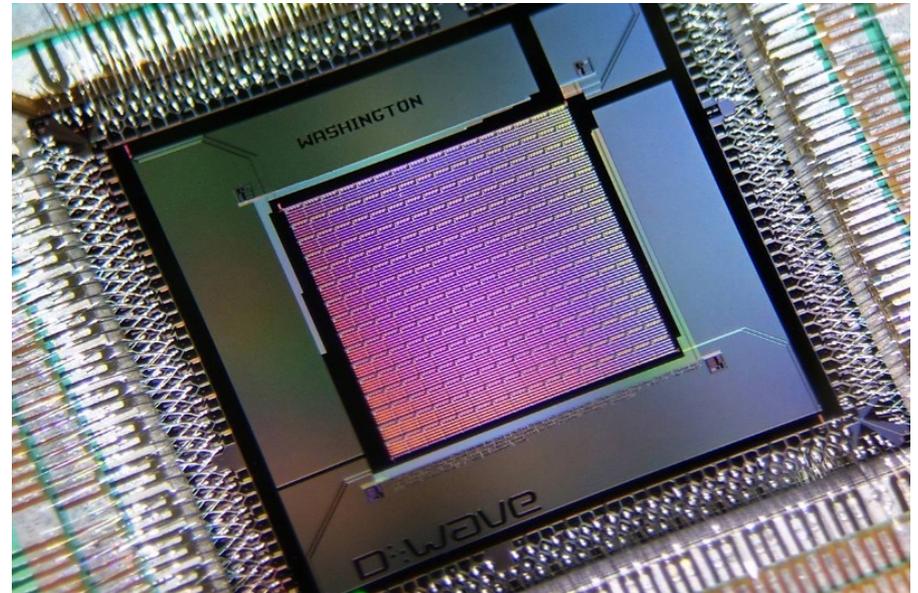
# Calcul quantique

- Un ordinateur dans une superposition quantique de tous les calculs possible
  - Manipule des qubits à la place des bits
  - Infiniment plus puissant que toute machine classique
  - Rend facile quelques problèmes difficiles
    - Factorisation (algorithme de Shor)
    - Optimisation, tri...
- Une importance considérable
  - Cryptographie
  - Chimie quantique
  - Simulation quantique (programmable)



# Calcul quantique

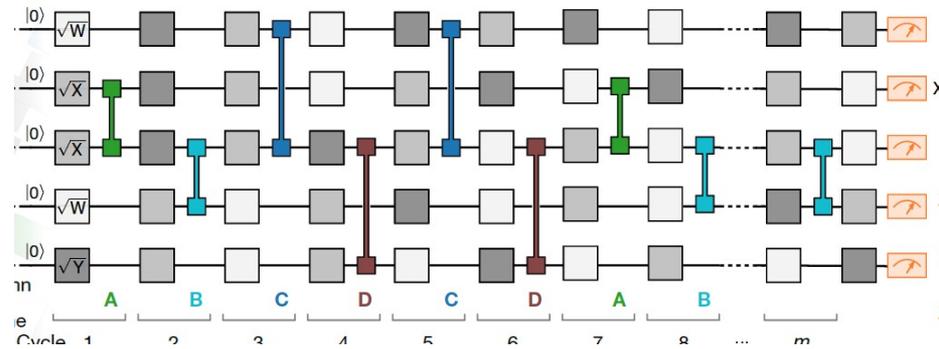
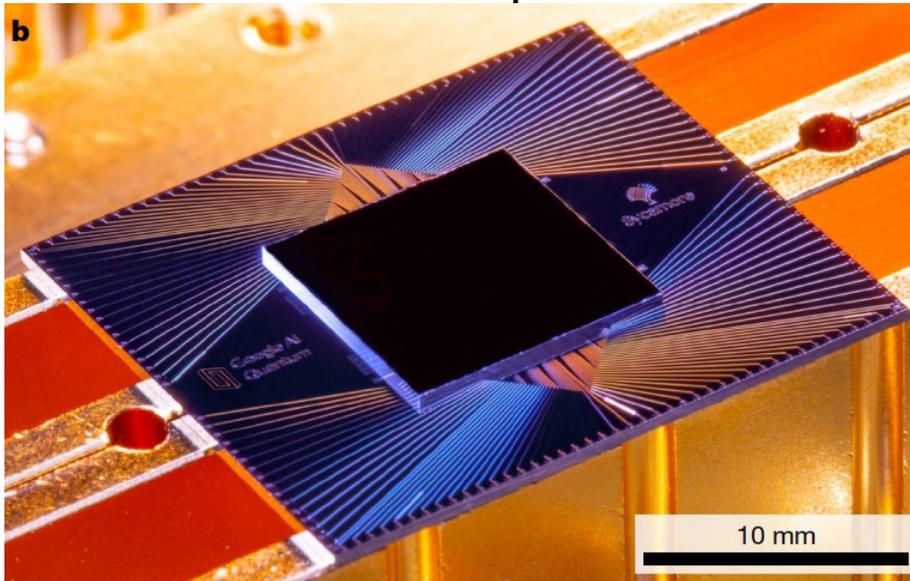
- Optimisation quantique : trouver l'état de plus basse énergie d'un système quantique peut résoudre un problème complexe
  - Optimisation, problème du VRP, machine learning et big data
  - Physique moléculaire



- Une machine (D-Wave) avec 2048 circuits supraconducteurs
  - Des démonstrations de principe
  - Très forte décohérence
    - Gain de rapidité encore en débat....

# Calcul quantique

- Le calcul quantique le plus complexe à ce jour
  - Processeur Sycamore (Google, UCSB)
  - 53 (=54-1) qubits cohérents
  - Des milliers d'opérations



- Un tour de force expérimental
- Un calcul sans intérêt, mais plus rapide qu'une machine classique
- On est encore loin d'un calcul utile

# Calcul quantique



- Pourquoi c'est si difficile?
  - Machine dans une superposition de tous les calculs est un exemple parfait de chat de Schrödinger: une superposition quantique macroscopique
  - **Décohérence redoutable (et exponentielle dans la taille du système)**
  - Peut être combattue par des codes correcteurs
    - Mais complexité additionnelle redoutable
- La réalisation d'un ordinateur quantique utile est encore un objectif lointain
  - **Mais la route est belle**

# Technologies quantiques: un effort majeur

- Flagship européen “quantum technologies”
  - 10 ans, 10 Milliards d’Euros.
  - Objectif à 10 ans: premières productions industrielles
  - Quatre piliers
    - Communication, simulation, calcul, mesure
- Plan quantique français
  - 1.8 milliard d’Euros sur 5 ans
- Programmes similaires dans de nombreux pays
  - UK, USA, Chine
- Intérêt et programmes majeurs des GAFA
  - Google, Microsoft, IBM, Alibaba...
- Fort intérêt de nombreuses grandes industries
  - EDF, Airbus, Atos, ...

# Technologies quantiques: un effort majeur

- Très nombreuses "Jeunes pousses"
  - En France : Muquans, CAILabs, Pasqal, Quandela, C12 quantum electronics, ...
- Un regain d'intérêt pour les technologies support
  - Cryogénie, laser, optique, électronique rapide et micro-onde...
- De nombreuses opportunités pour des chercheurs et ingénieurs bien formés à la physique quantique....

Le XXI<sup>ème</sup> siècle sera quantique, lui aussi

Merci pour votre attention...