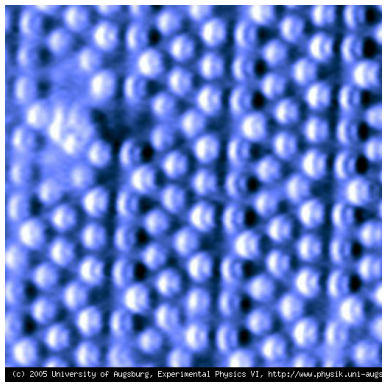
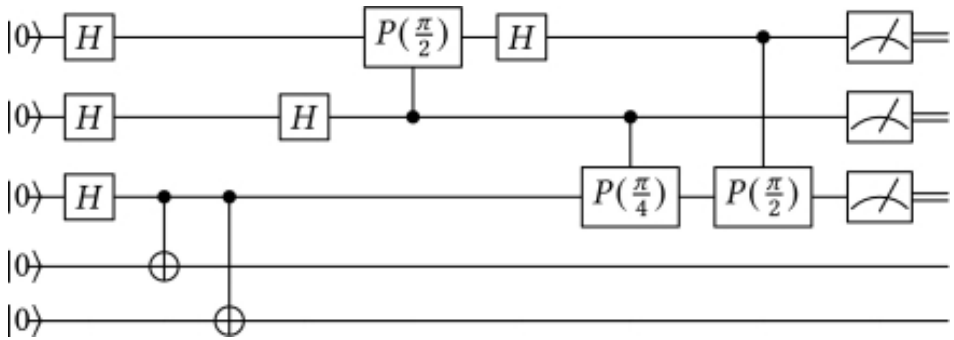
Une (ré)introduction à la Physique quantique
Les ordinateurs de demain seront-ils quantiques?

Jean-Marc Sparenberg

Physique nucléaire et Physique Quantique, École polytechnique de Bruxelles,
Université libre de Bruxelles, Belgium





Société européenne des Ingénieurs et des Industriels (SEII),
27 février 2026, château Sainte-Anne, Bruxelles

This presentation is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

1. Atomes
2. Photons
3. Spectroscopie
4. Fentes de Young pour une particule (de lumière ou de matière)
5. Ordinateurs quantiques

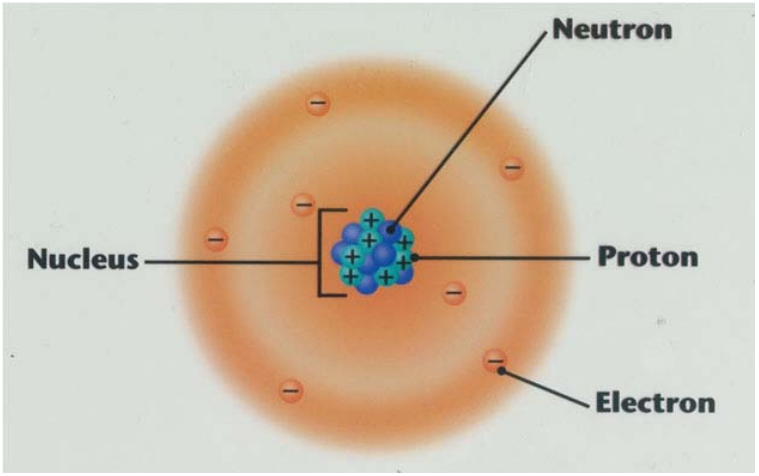
Quelle est la nature de la matière ?

- La matière est faite d'atomes !
  Plus petits ≪ grains de matière ≫ (1/10 nm)
- Vieux débat philosophique : matière continue ou discontinue ?
- Réponse actuelle : discontinue (atomes, quanta) mais comportement ondulatoire (équation de Schrödinger [1])
- États de la matière :
  - solides : atomes en contact et fixes, vibrations augmentent avec la température
  - liquides : atomes en contact et mobiles
  - gaz : atomes (molécules) séparés et mobiles
  - plasma : ≪ atomes ≫ pas si ≪ insécables ≫ que ça !

1. Pour une discussion récente des ambigüités concernant la moralité de Schrödinger, voir https://www.24heures.ch, 2026

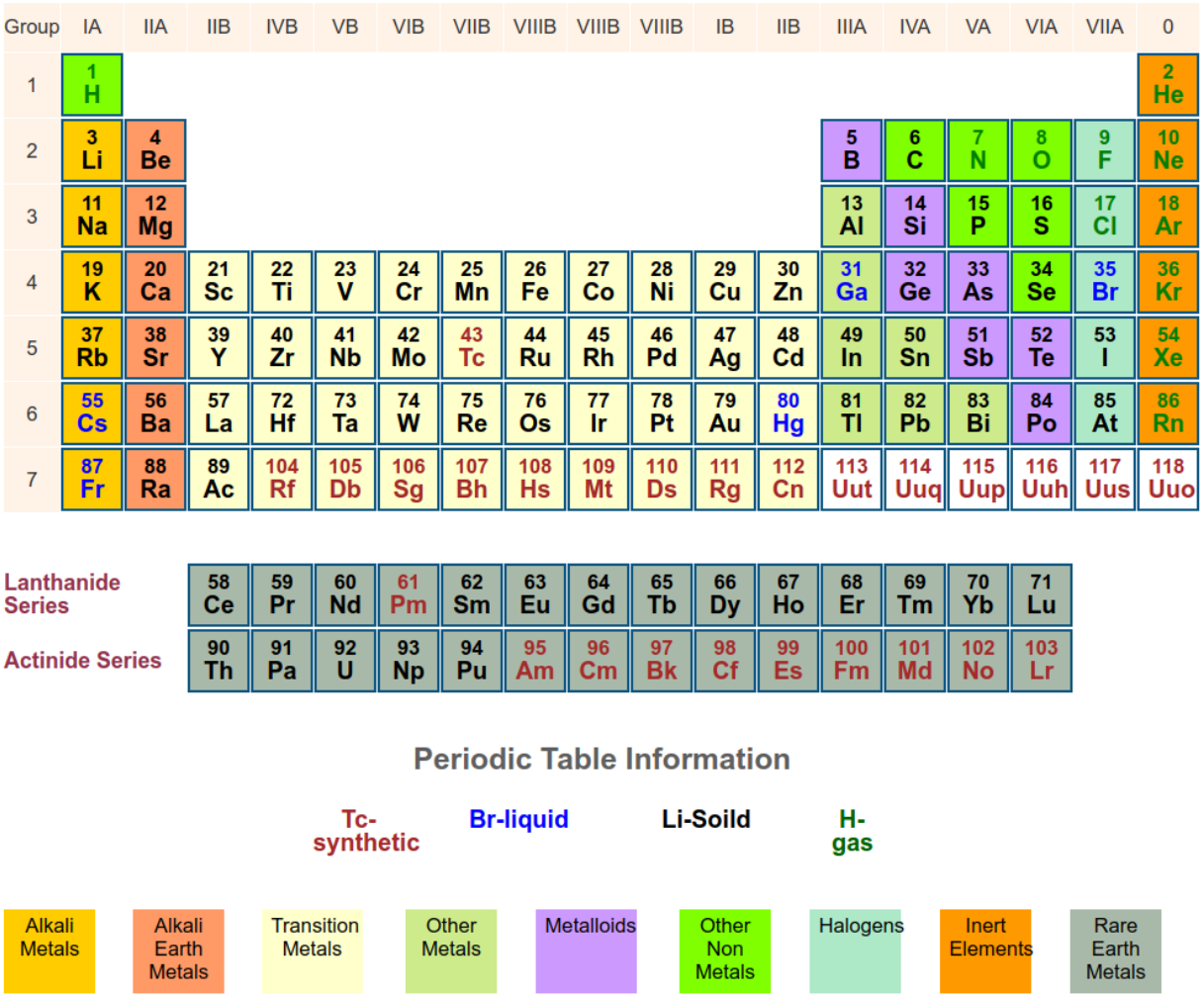
Quelle est la nature d'un « atome » ?

- Noyau
  - 100 000 fois plus petit !
  - neutrons n^0 (neutres !)
  - protons p^+ (charge électrique positive)
- Nuage électronique
  - électrons e^- (charge électrique négative)
  - structure en couches, d'énergie croissante



- Cohésion : force électrique, attraction entre charges positives et négatives
- Environ 100 types d'atomes ou éléments différents
- Peuvent s'assembler pour constituer des molécules

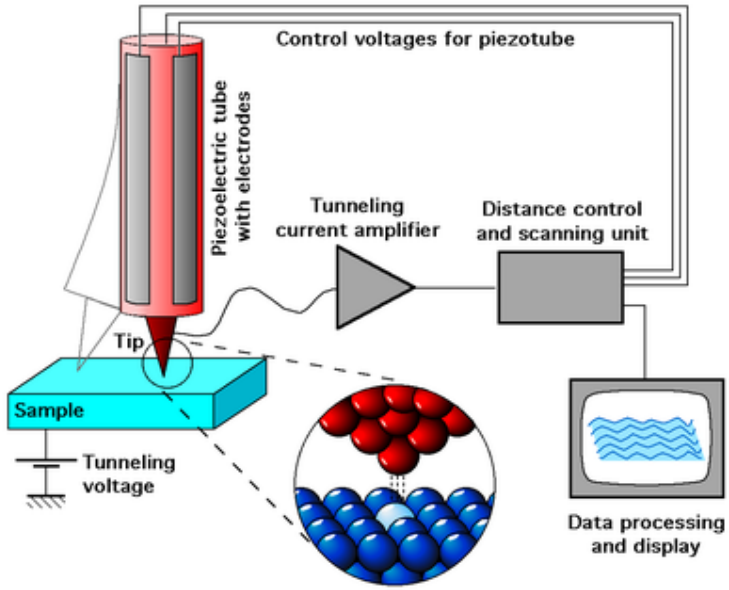
Les différents types d'atomes



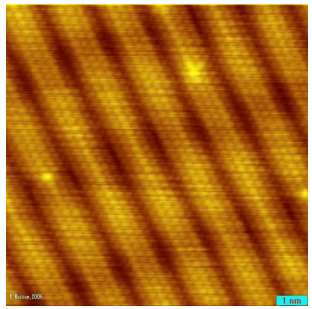
- Métaux : perdent facilement leur(s) électron(s) externe(s)

Peut-on voir les atomes ?

- Directement (œil nu, microscope...) : non
- Indirectement : oui, avec la bonne machine !
- Microscope électronique à effet tunnel, qui « sent » plutôt qu'il ne « voit »
- Pointe très fine, balaye l'échantillon (métallique)
- Mesure du courant, image reconstituée

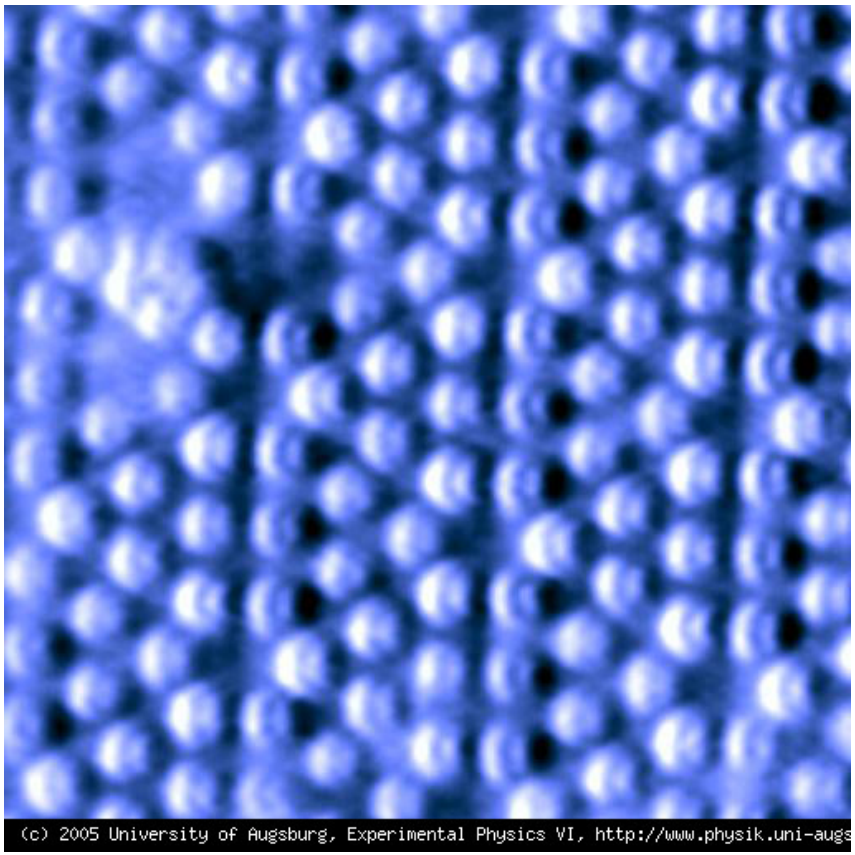


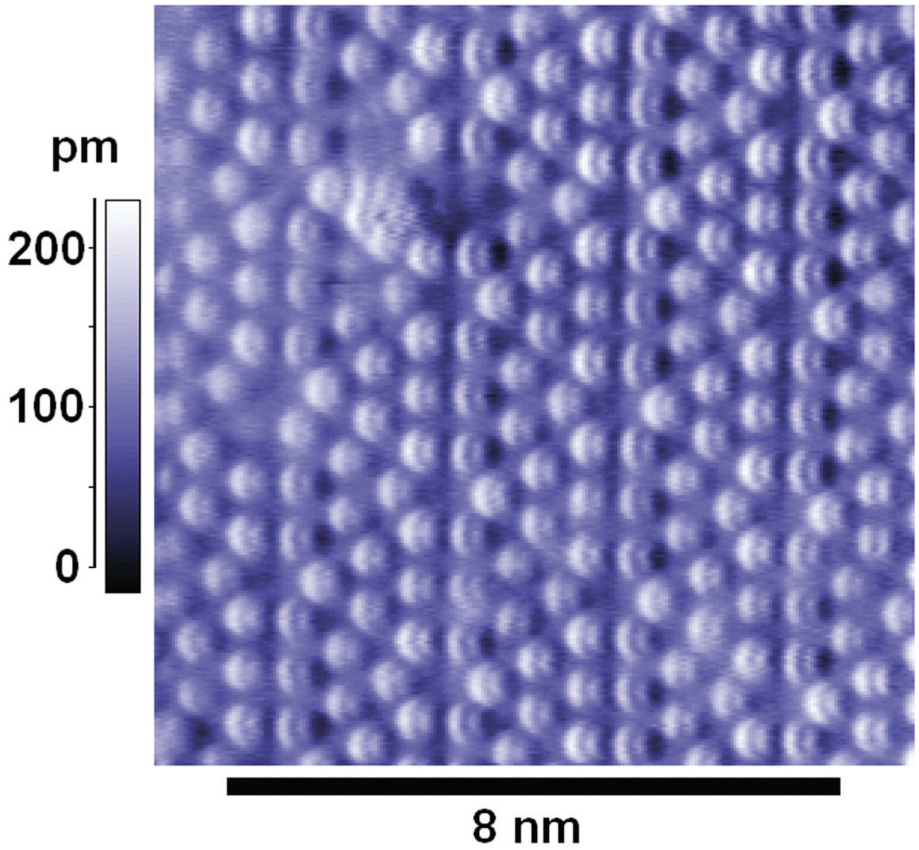
[Schmid, Wikipedia]



Atomes d'or [Rossen, Wikipedia]

Peut-on voir dans les atomes ?

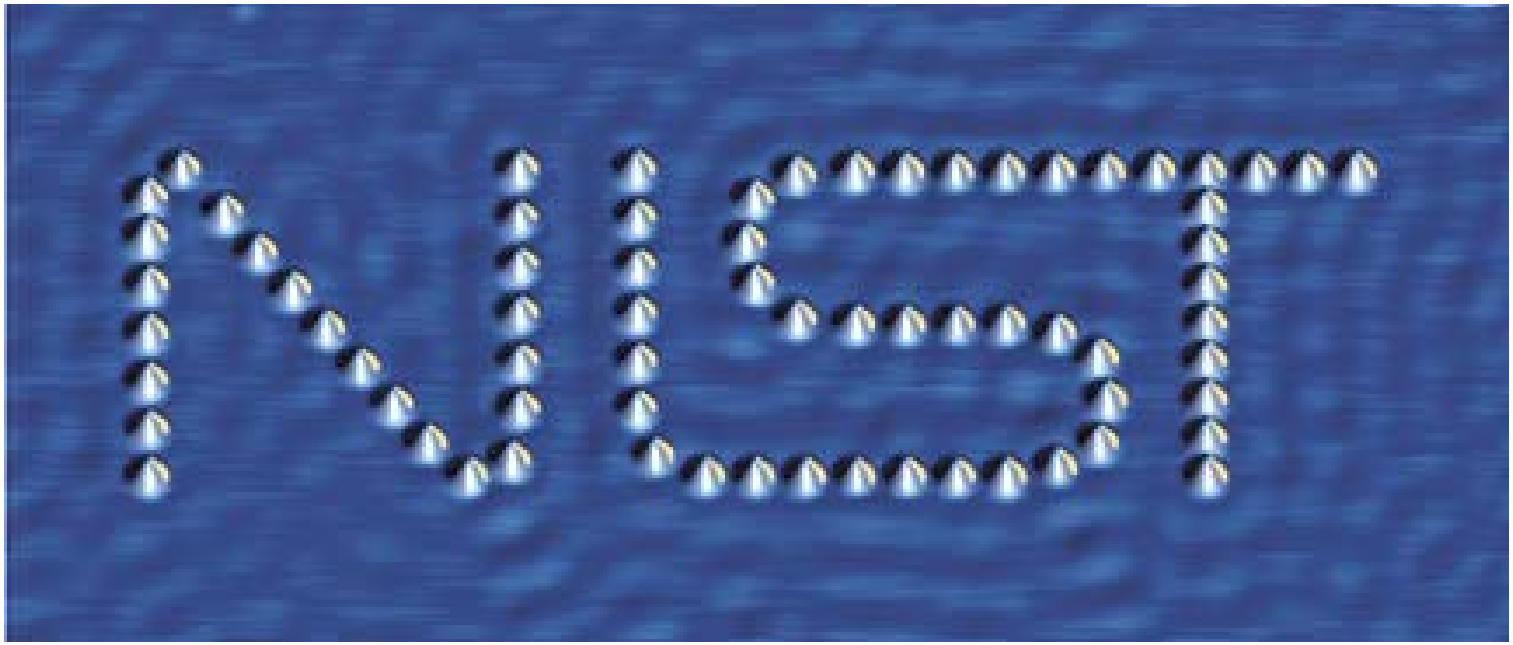




Silicium, microscope à force atomique

[Giessibl, Materials Today, 2005]

Peut-on manipuler les atomes ?



[Stroscio & Celotta, National Institute of Standards and Technology, 2004]

- Atomes de cobalt sur surface de cuivre
- Largeur logo : 40 nm
- Technologie : microscope électronique

$\Rightarrow$ approche bottom-up des nanotechnologies

1 Atomes

2 Photons

3 Spectroscopie

4 Fentes de Young pour une particule (de lumière ou de matière)

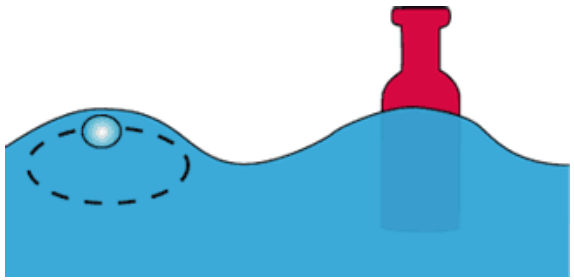
5 Ordinateurs quantiques

Quelle est la nature de la lumière ?

- Lumière = vibration/onde = phénomène répétitif
  - dans l'espace (longueur d'onde λ)
  - dans le temps (fréquence ν)
  - vitesse constante : $c = 299\,792\,458$ m/s

$$c = \lambda\nu$$

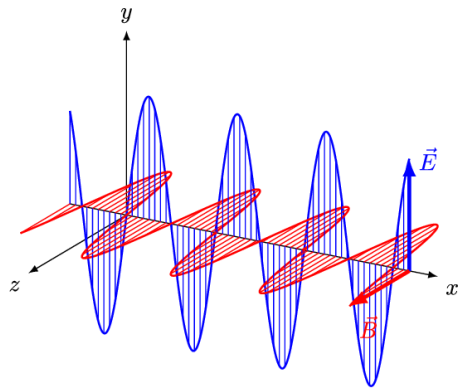
- Analogie : vagues



- Deux propriétés contradictoires
  1. vibration du champ électromagnétique
  2. vibration par quanta d'énergie minimale

Lumière : qu'est-ce qui vibre ?

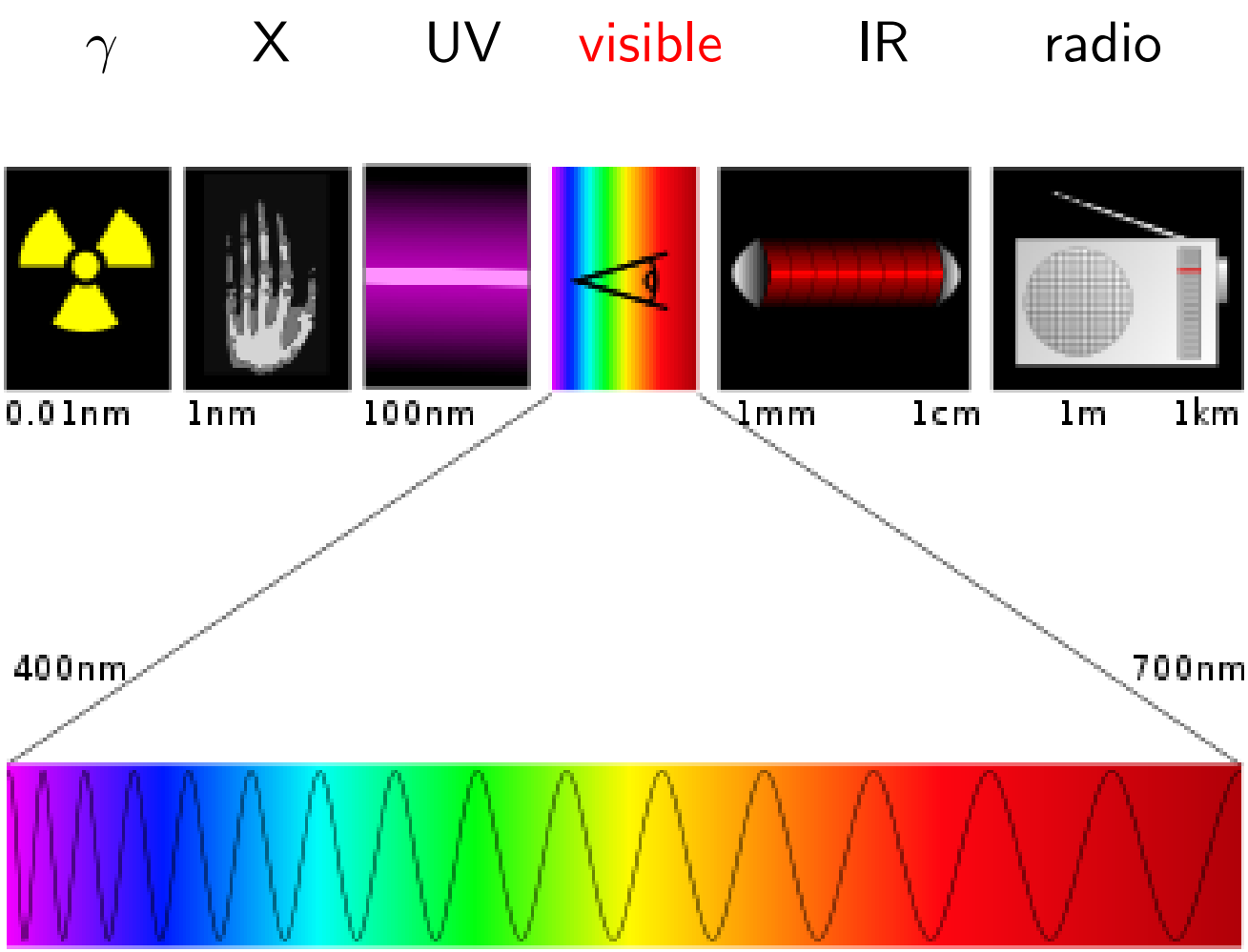
- Champs électrique et magnétique, toujours couplés : champ électromagnétique
- Existe dans le vide, sans support ($\neq$ vague)



[Wikimedia]

- Détection : forces associées qui mettent en mouvement les particules chargées (le plus souvent électrons)
- Production : mouvement de charges électriques (le plus souvent électrons)
- Exemples : yeux, caméra, Soleil, réflexion par un miroir...

Lumière = onde électromagnétique



[Wikimedia Commons, 2015]

Lumière = photons

- La vibration du champ électromagnétique ne peut exister que par « paquets » d'énergie minimale, les quanta
- Plus petits « grains de lumière » ou photons
- Énergie d'un photon (Einstein, Planck)

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

- Impulsion d'un photon (Einstein)

$$p = h/\lambda$$

$\Rightarrow$ dualité onde-particule avec constante de Planck

$$h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}\ \text{Js}$$

1 Atomes

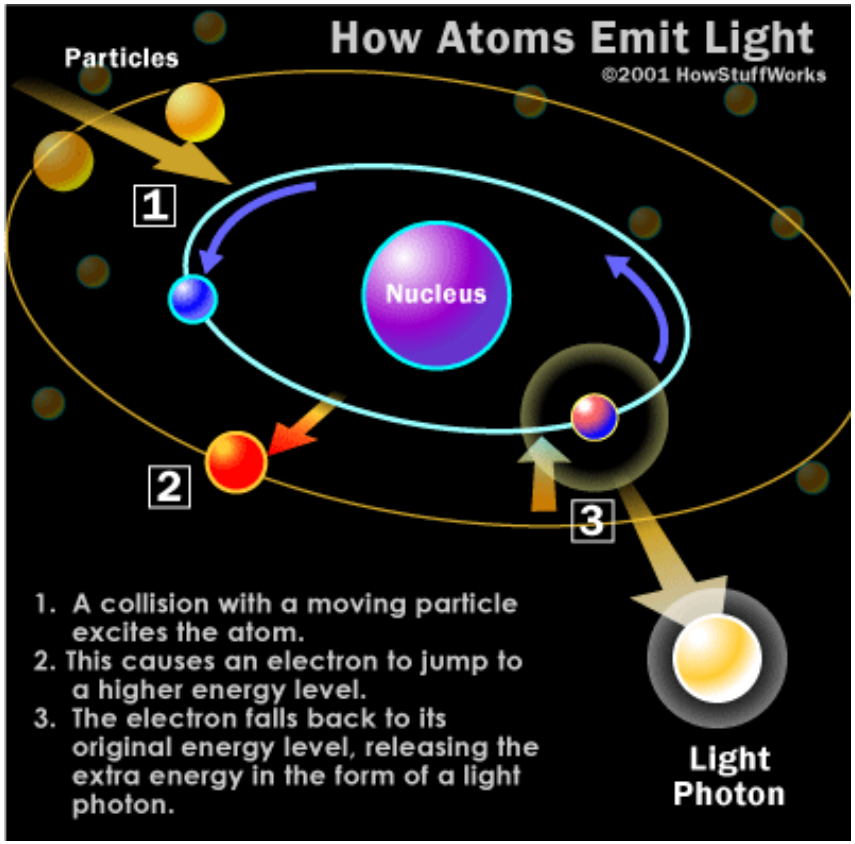
2 Photons

3 Spectroscopie

4 Fentes de Young pour une particule (de lumière ou de matière)

5 Ordinateurs quantiques

Émission d'un photon par un atome

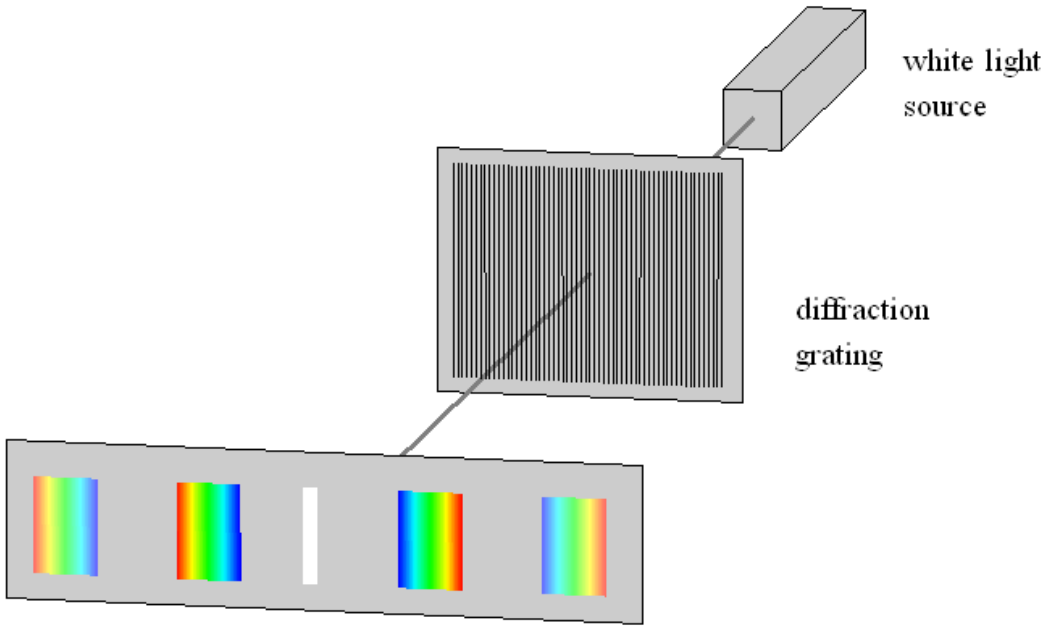


- Énergie photon = énergie perdue par électron lors du saut
- Énergies des couches = caractéristiques de l'atome
  $\Rightarrow$ λ photons = « carte d'identité » de l'atome

Décomposition de la lumière blanche

- Blanc = illusion, mélange
- Analyse : prisme, goutte (arc-en-ciel)...
- Réseau de diffraction (500 traits/mm)

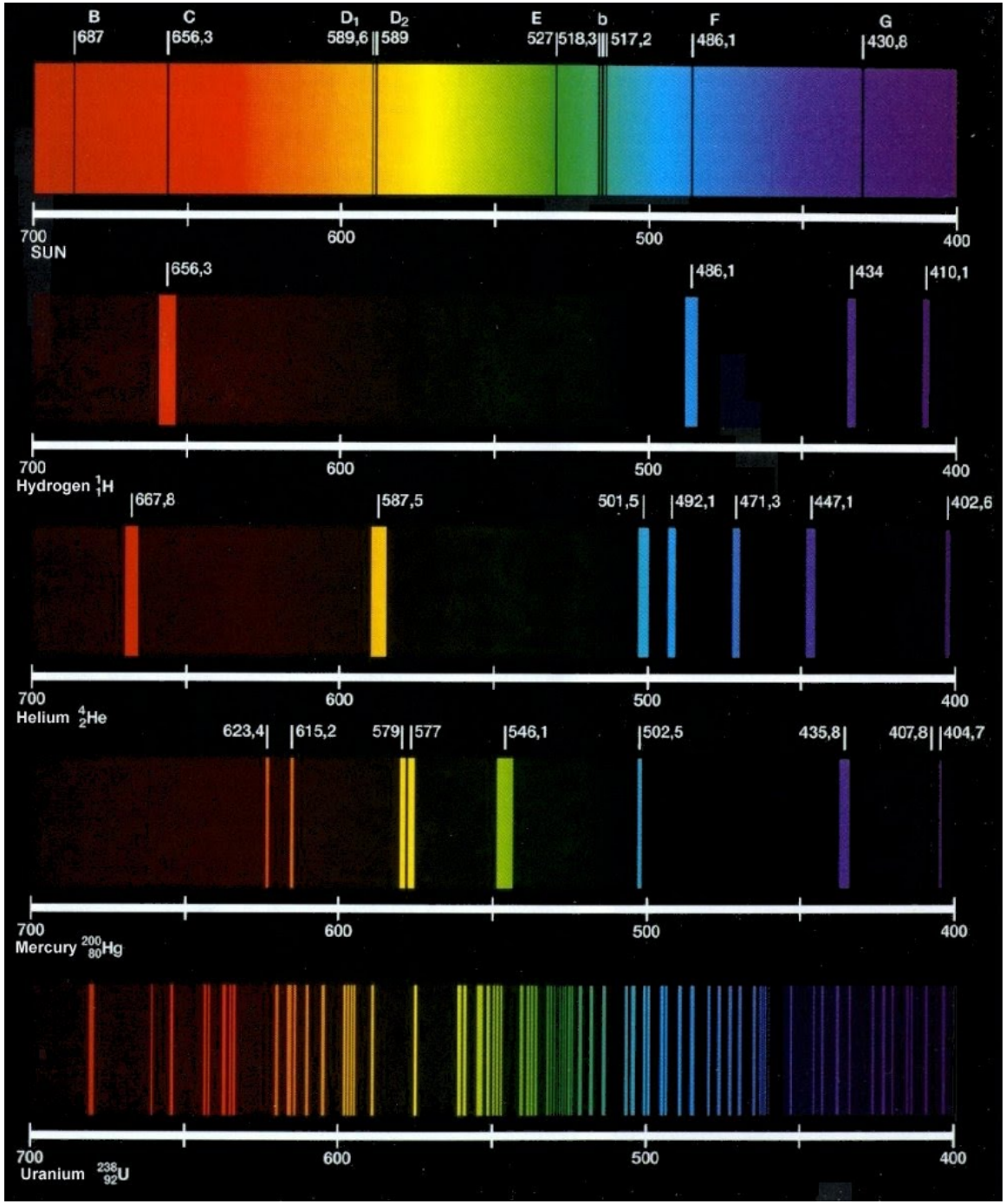




[Université de Trent]

- pas cher : film plastique, CD, lunettes !
- permet de distinguer vraie et fausse lumières blanches

Exemples de spectres atomiques



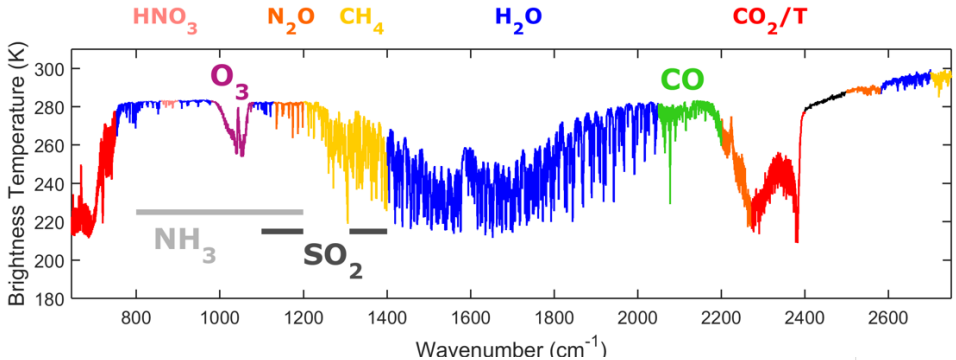
Une application brulante : impact COVID19 sur CO

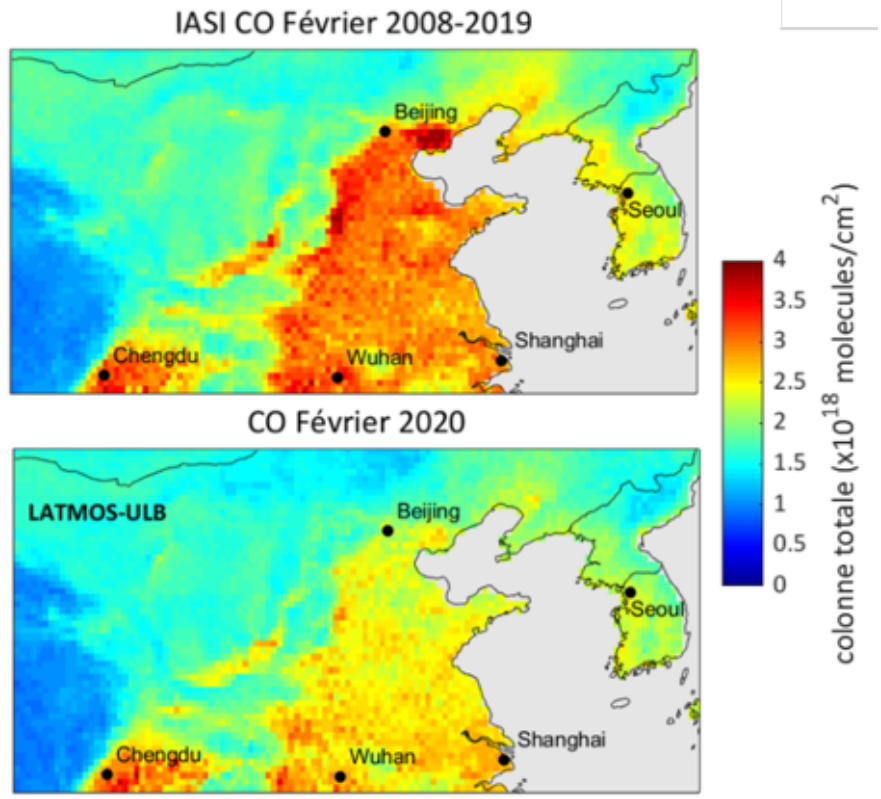
- Spectroscopie atmosphérique infrarouge : identification de chaque molécule par ses raies d'absorption

  [Maya George and Cathy Clerbaux (LATMOS/CNRS, ULB, 2016), Cathy Clerbaux and Pierre Coheur (The Conversation, 2020)]

- Exemple : mesure récente du CO en Chine

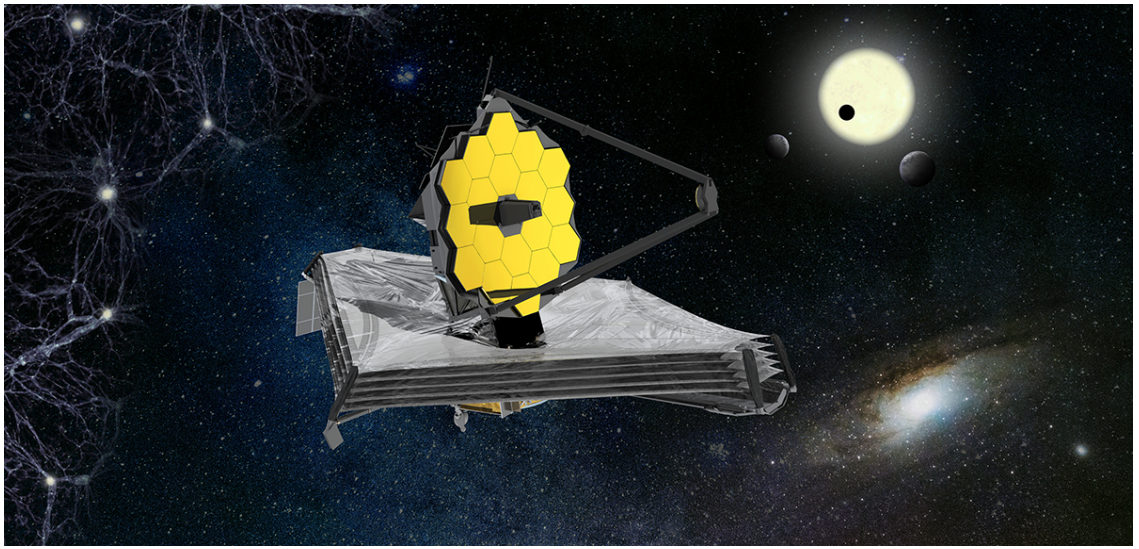
  [Satellite IASI, Maya George (LATMOS/CNRS, 2019)]



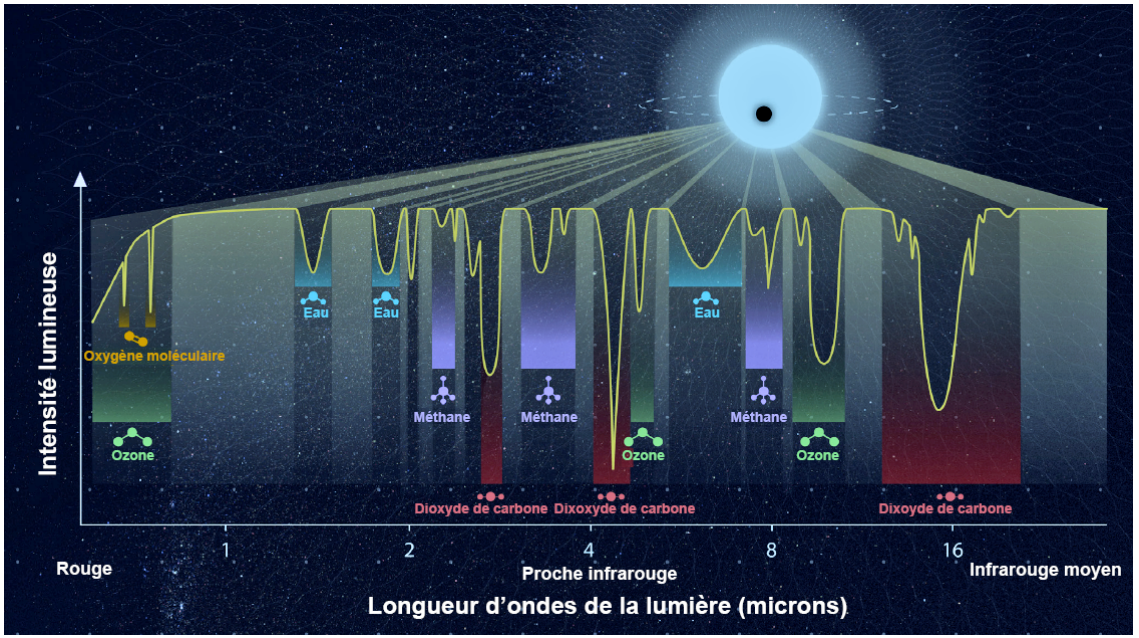


Une application fascinante : recherche de vie extraterrestre

- James Webb telescope
  [NASA 2022]



- Raies d'absorption des molécules caractéristiques de la vie lors du transfert de la planète devant l'étoile
  [webbtelescope.org, 2022]



1 Atomes

2 Photons

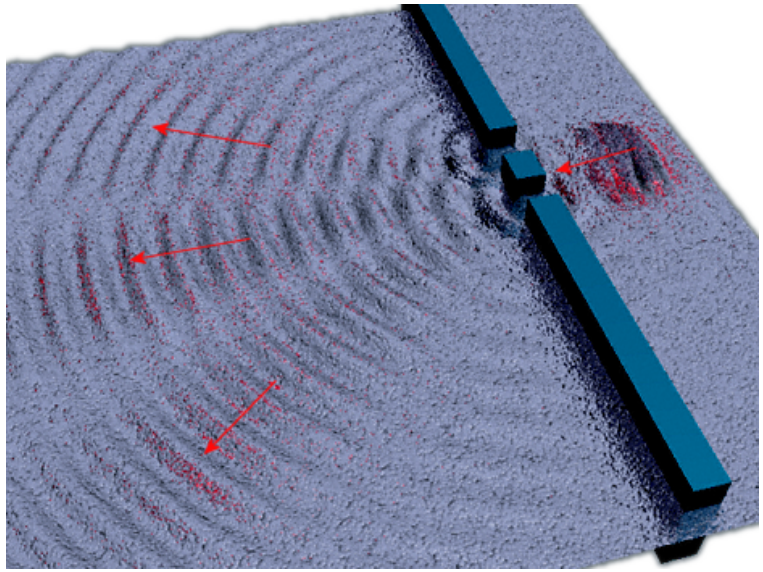
3 Spectroscopie

4 Fentes de Young pour une particule (de lumière ou de matière)

5 Ordinateurs quantiques

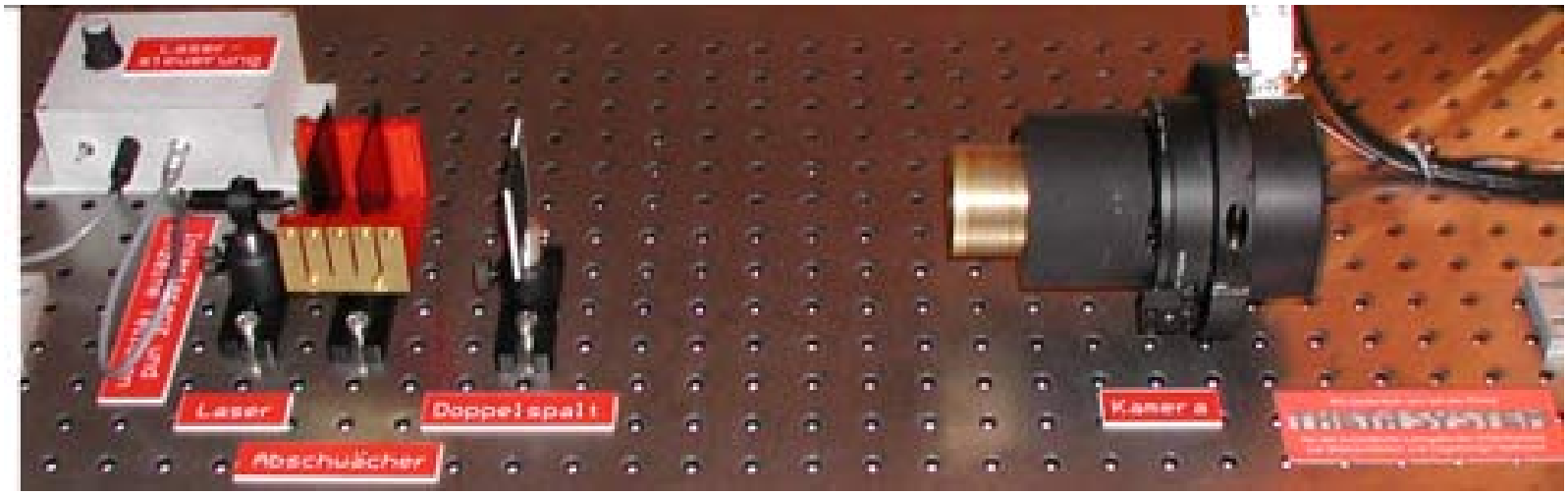
Expériences des deux fentes : interférences

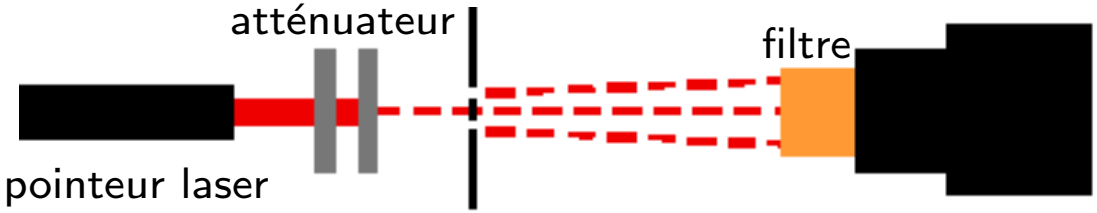
- Deux ondes peuvent se superposer de manière constructive ou destructive
- Exemples : sillage de deux bateaux, fentes de Young (1803)
- Interférences constructives dans l'≪ ombre ≫ de l'obstacle
- Même principe pour un réseau mais amplitude de l'onde plus élevée



[Queen Mary University of London]

Fentes de Young en lumière atténuée





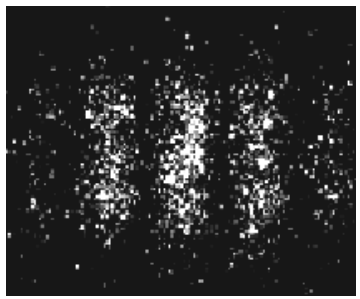
dia 2 fentes $(0,1$ mm) séparées de $0,25$ mm

intensificateur + caméra CCD

[Weis & Wynands 2003]

Dualité

- Impact individuel $\Rightarrow$ particule
  ($\ll$ photon $\gg$ = quantum de lumière)
- Interférences $\Rightarrow$ onde
  (passe par les 2 fentes à la fois)



Mesure pendant 2 s

Problème de la mesure quantique

- Caractère aléatoire des impacts individuels : reproductibilité ? déterminisme ?
- Observer les fentes fait disparaitre les interférences : influence de l'observateur ?
- Plutôt influence de l'appareil de mesure (macroscopique) (ici, la caméra) sur le système (microscopique) : décohérence, réduction de la fonction d'onde

Ondes de matière

- Phénomène identique pour des particules de matière : électrons, neutrons, atomes, molécules, bio-molécules...
- Longueur d'onde associée à une particule d'impulsion p

$$\lambda = h/p$$

  - hypothèse (révolutionnaire !) de de Broglie (1924)
  - confirmé expérimentalement pour les électrons par Davisson et Germer (1927)
  - même formule que pour les photons !

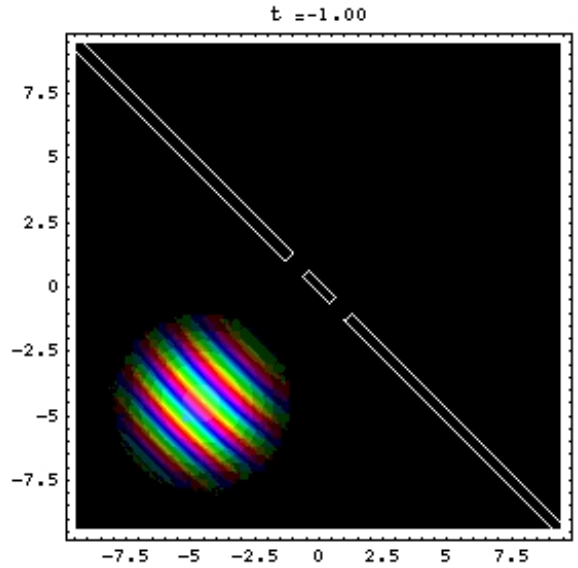
État d'une particule de matière : fonction d'onde

$$\underbrace{|\psi\rangle\,(t)}_{\ll\ \text{ket}\ \gg} \leftrightarrow \quad \psi(x, y, \not{z}, t)$$

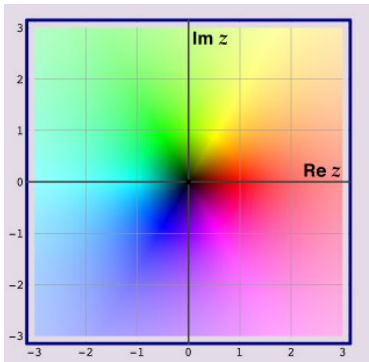
- Nature : nombre complexe

$$\psi = |\psi| e^{i\varphi}$$

- Représentation
  - module $|\psi|$ = luminosité
  - phase φ = couleur
- Interprétation : $|\psi(x, y, t)|^2 =$ probabilité de présence de la particule en (x, y, t)
- Probabilité totale = 100 %



[Visual Quantum Mechanics, Thaller 2000]



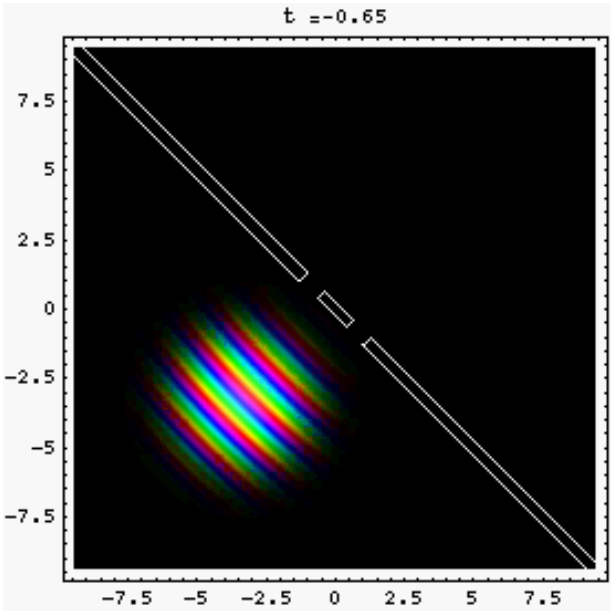
Évolution : équation de Schrödinger (1926)

$$i\hbar \frac{\partial |\psi(t)\rangle}{\partial(t)} = \hat{H} |\psi(t)\rangle$$

- Évolution déterministe
- Évolution unitaire
  (conservation de la probabilité totale)

$$|\psi(t)\rangle = \hat{U} |\psi(0)\rangle \equiv e^{-i\hat{H}t/\hbar} |\psi(0)\rangle$$

- $\hat{U}$ = opérateur d'évolution
- $\hat{H}$ = opérateur hamiltonien
- $\hbar = h/2\pi$ = cste de Planck réduite
- Équivalent classique : équations de Newton/Hamilton pour la position et la vitesse de la particule

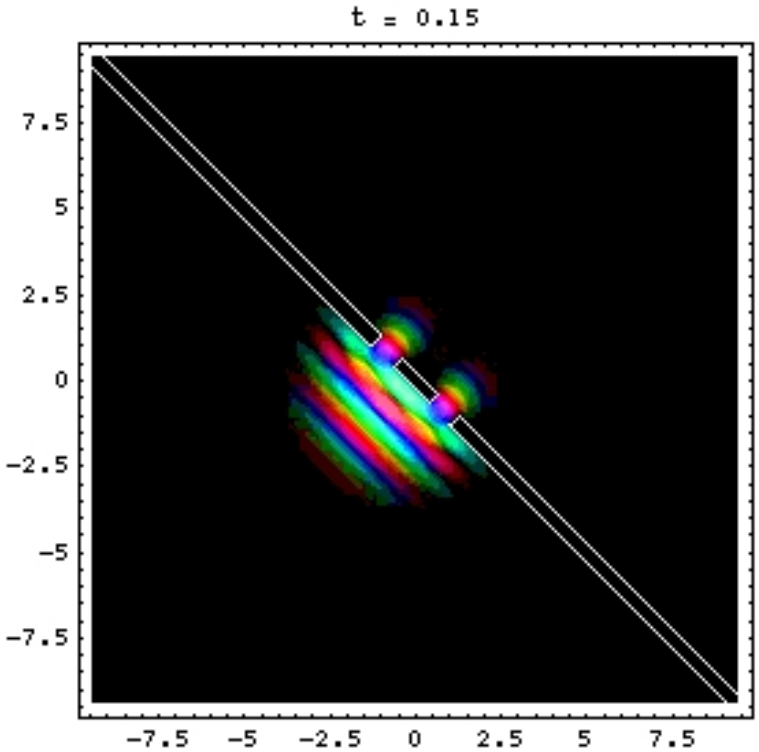


[Visual Quantum Mechanics, Thaller 2000]

Principe de superposition

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[|\psi_{\text{fente 1}}\rangle + |\psi_{\text{fente 2}}\rangle]$$

- Combinaison linéaire de solutions acceptables = solution acceptable
- Permis par la linéarité de l'équation de Schrödinger (cf équations de Maxwell)
- La particule est à la fois dans les deux fentes (sinon, pas d'interférence)
- État fragile : disparait dès qu'interaction avec système macroscopique complexe (environnement, appareil de mesure)
  ⇒ décohérence,
  réduction de la fonction d'onde

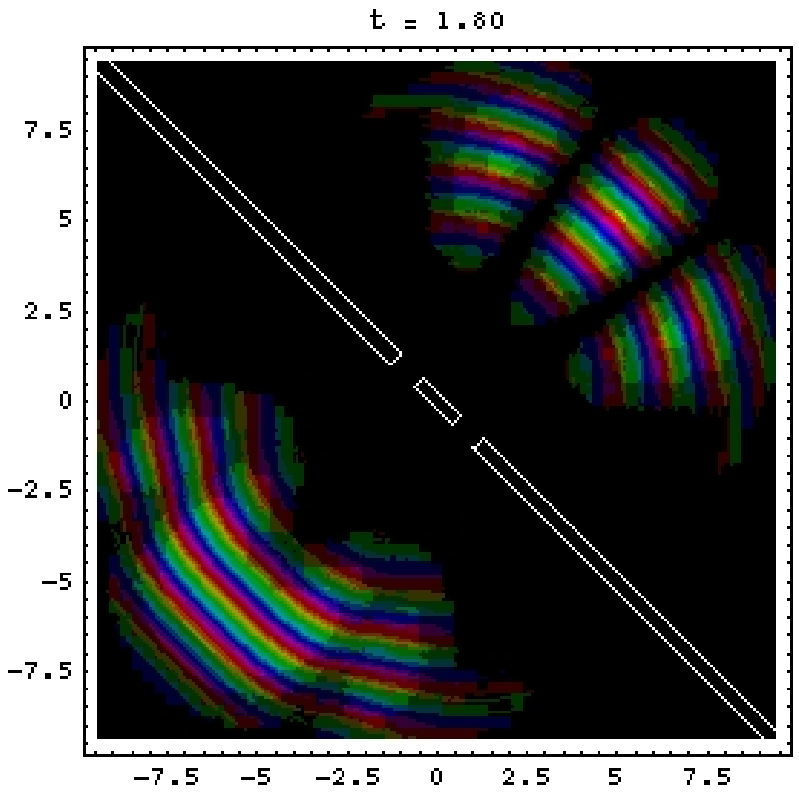


[Visual Quantum Mechanics, Thaller 2000]

Mesure et réduction de la fonction d'onde

- La particule apparait de manière aléatoire (suivant la loi de probabilité donnée par $|\psi|^2$) lorsqu'on la mesure
- Sens profond fonction d'onde : mathématique ou physique ?
- Nature de la mesure : conscience de l'observateur (paradoxe du chat de Schrödinger) ou phénomène physique (décohérence due à l'appareil de mesure) ?
- Cette réduction de la fonction d'onde est instantanée et non-locale
  $\Rightarrow$ compatibilité relativité restreinte ? (paradoxe EPR, expérience d'Aspect)

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[|\psi_{\text{reflechi}}\rangle + |\psi_{\text{transmis}}\rangle]$$



[Visual Quantum Mechanics, Thaller 2000]

1 Atomes

2 Photons

3 Spectroscopie

4 Fentes de Young pour une particule (de lumière ou de matière)

5 Ordinateurs quantiques

Le q-bit : au-delà du binaire

- Idée prometteuse (Feynman 1981) : "plenty of room at the bottom"
- Contrairement au bit classique (0 ou 1), combinaison linéaire des 2 états :

$$|\psi\rangle = \alpha\,|0\rangle + \beta\,|1\rangle\,,$$

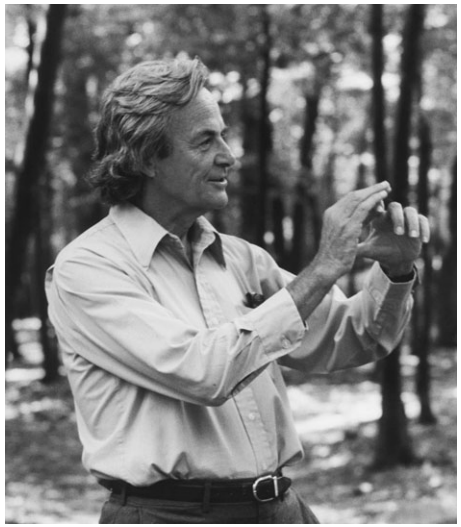
$$\alpha, \beta \in \mathbb{C}, \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

- Fabriqué par porte d'Hadamard unitaire
- 2 q-bits : superposition de 4 états

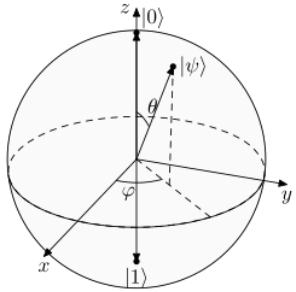
$$|\psi\rangle = \alpha\,|00\rangle + \beta\,|01\rangle + \gamma\,|10\rangle + \delta\,|11\rangle$$

- N q-bits : superposition de 2^N états
  $\Rightarrow$ croissance exponentielle !

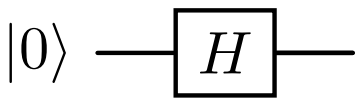
[Bobroff, La nouvelle révolution quantique 2018]



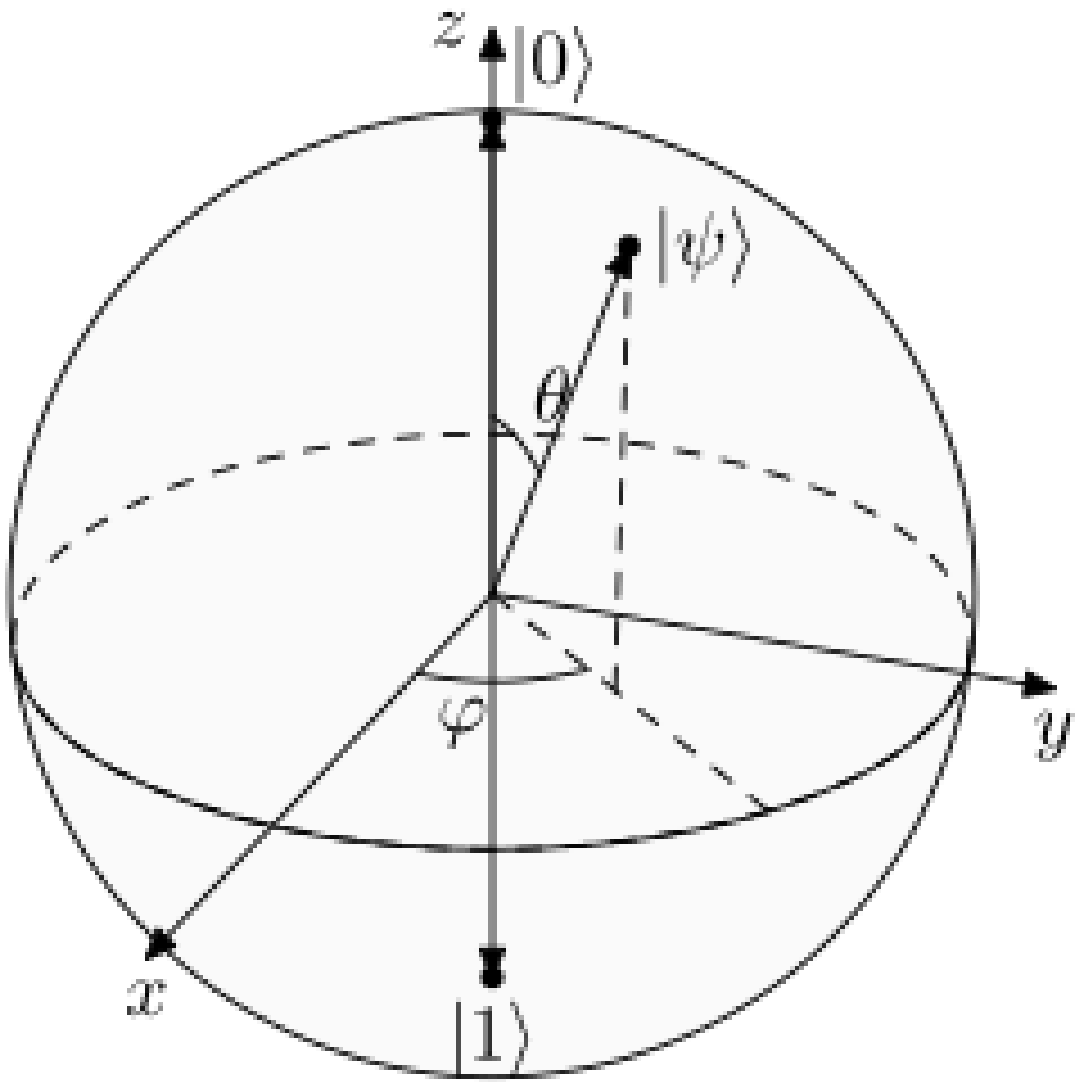
[Wikipedia] [The Conversation 2022]



Sphère de Bloch [Wikipedia]



Hadamard



Sphère de Bloch [Wikipedia]

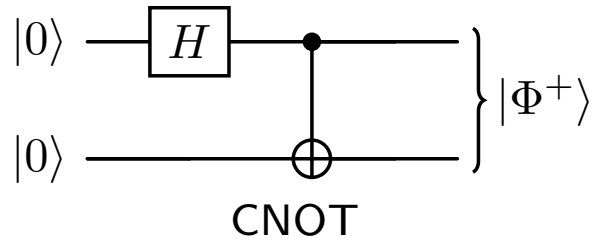
Algorithmes quantiques : pour quoi faire ?

- Idée prometteuse (Feynman 1981) : simuler des systèmes quantiques
- Ressources : non-localité, intrication
- États de Bell (exemple : photons)

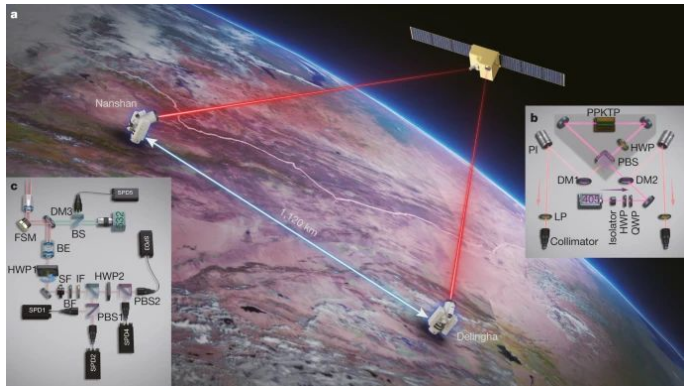
$$\left|\Phi^+\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

$\Rightarrow$ partage clés quantiques (satellite)

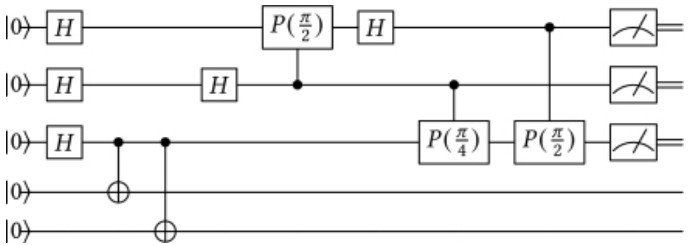
- Algorithmes clés, basés sur interférences
  - factorisation nombres premiers (transformée de Fourier quantique) [Shor, 1984] $\Rightarrow$ cryptographie
  - recherche parmi N éléments en temps $O(\sqrt{N})$ (amplification d'amplitude) [Grover, 1996] $\Rightarrow$ apprentissage IA
  - simulations quantiques (hybrides)



CNOT

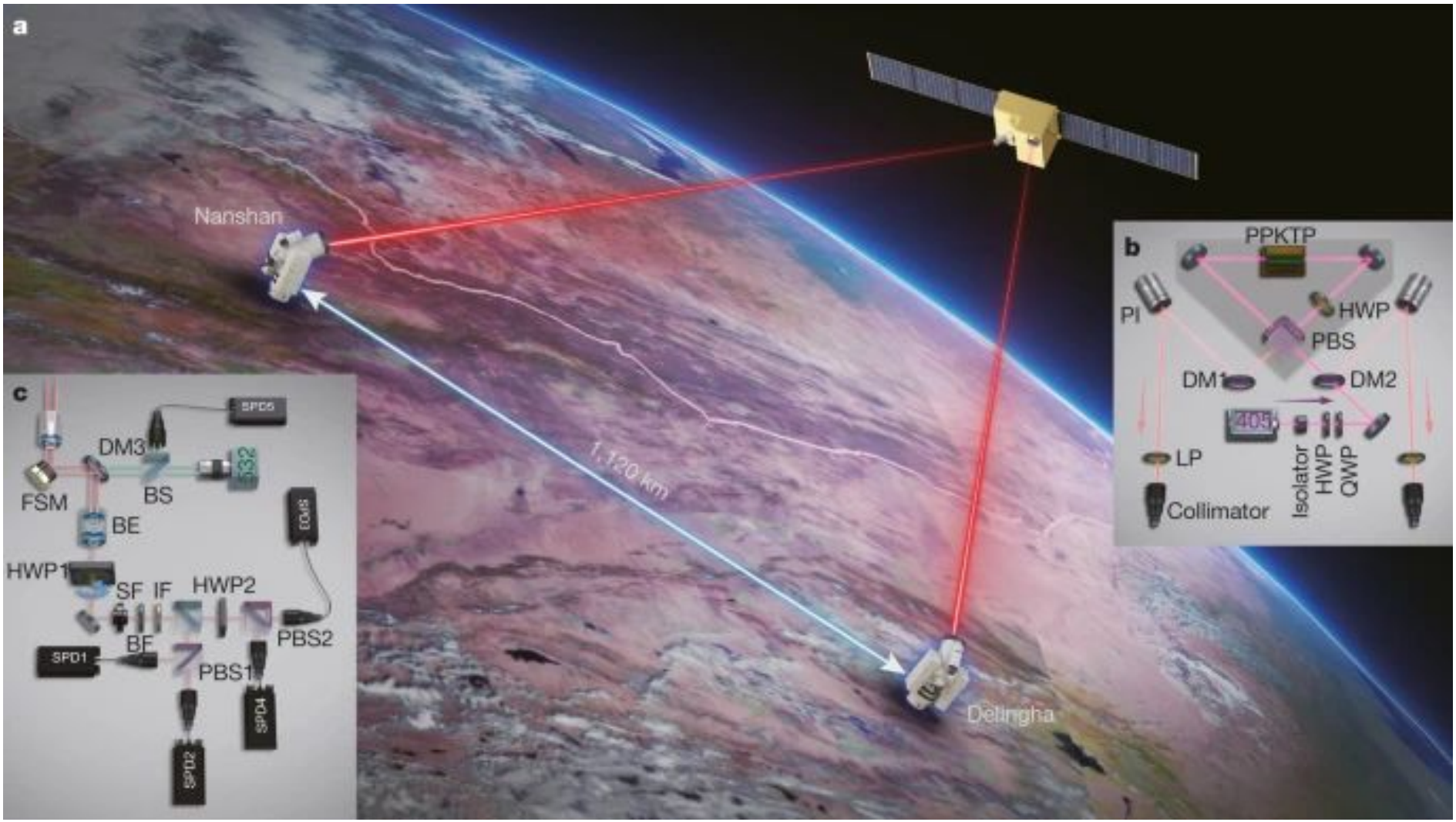


[Yin *et al.*, Nature 2020]

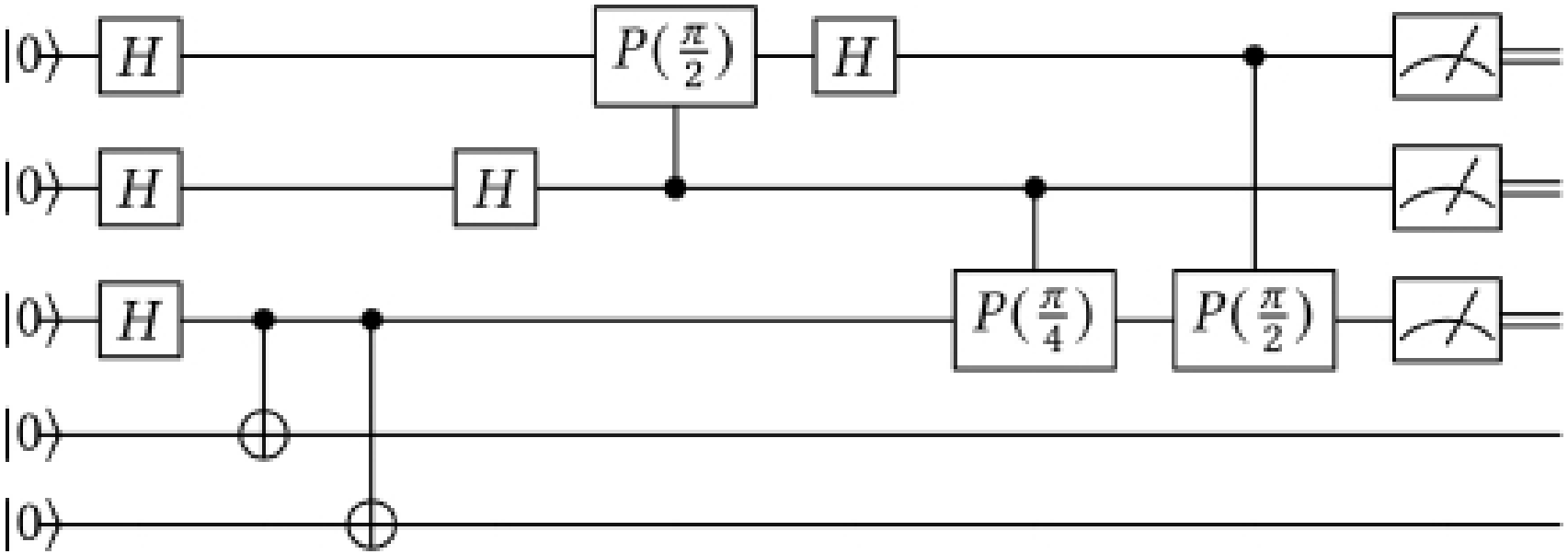


Shor ($15 = ?$) @ IBM

[Abhijith *et al.*, *ACMTQC 2022*]



[Yin *et al.*, Nature 2020]



[Abhijith *et al.*, *ACMTQC 2022*]

Ordinateurs quantiques : à quand la suprématie quantique ?

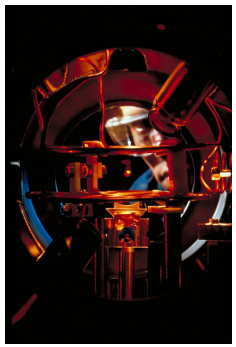
- Difficultés majeures et scepticisme [Spectrum, IEEE, 2023]
  - décohérence des q-bits : fragilité des superpositions quantiques ;
    $\Rightarrow$ les mesures ne sont pas toujours volontaires !
  - fiabilité des portes logiques à plusieurs bits (diaphonie)
  - vitesse manipulation q-bits, interactions, mesure
- Codes correcteurs d'erreur quantiques [Shor, 1995]
  - étape actuelle : processeurs quantiques bruités de taille intermédiaire (NISQ)
  - 1 q-bit logique $\Longleftrightarrow$ 5... à 1000 q-bits physiques !
- Quelle plateforme ? Critères de DiVincenzo (1996)
  - système physique évolutif avec des q-bits bien définis
  - possibilité d'initialiser les q-bits dans un état pur
  - temps de décohérence longs (bien supérieurs aux temps de porte)
  - ensemble universel de portes quantiques
  - dispositif de mesure spécifique au q-bit

$\Rightarrow$ aiguillage technologique très ouvert !

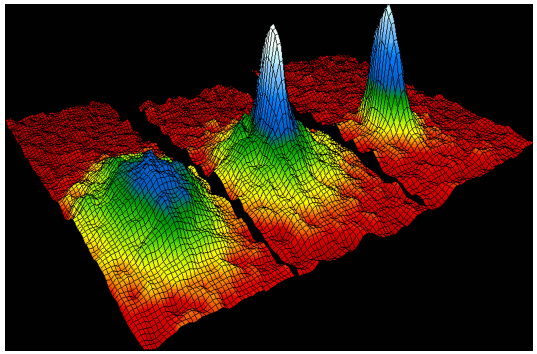
ULB

Ions et atomes piégés : les plus acrobatiques

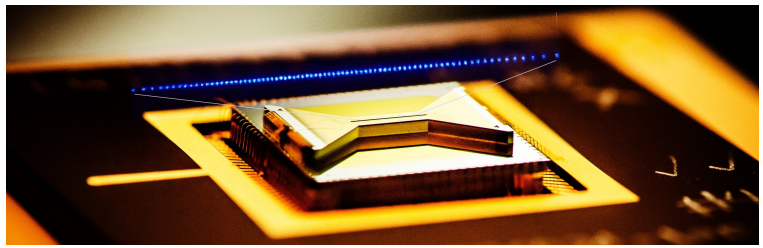
- Pièges électriques (Paul)/ magnéto-optiques (MOT)
- Aussi utilisés pour condensats de Bose-Einstein (BEC, 1925 $\rightarrow$ 1995) et horloges atomiques
- q-bits = états hyperfins ions (Yb)/ états Rydberg atomes (Rb)
- Quelques dizaines/centaines de q-bits
- Contrôle : lasers
- Avantages : T ambiante, précision et connectivité (ions), évolutivité (atomes)
- Défis : lasers ? vitesse portes ? évolutivité (ions) ? erreurs (atomes) ?
- Acteurs commerciaux : IonQ/Pasqal



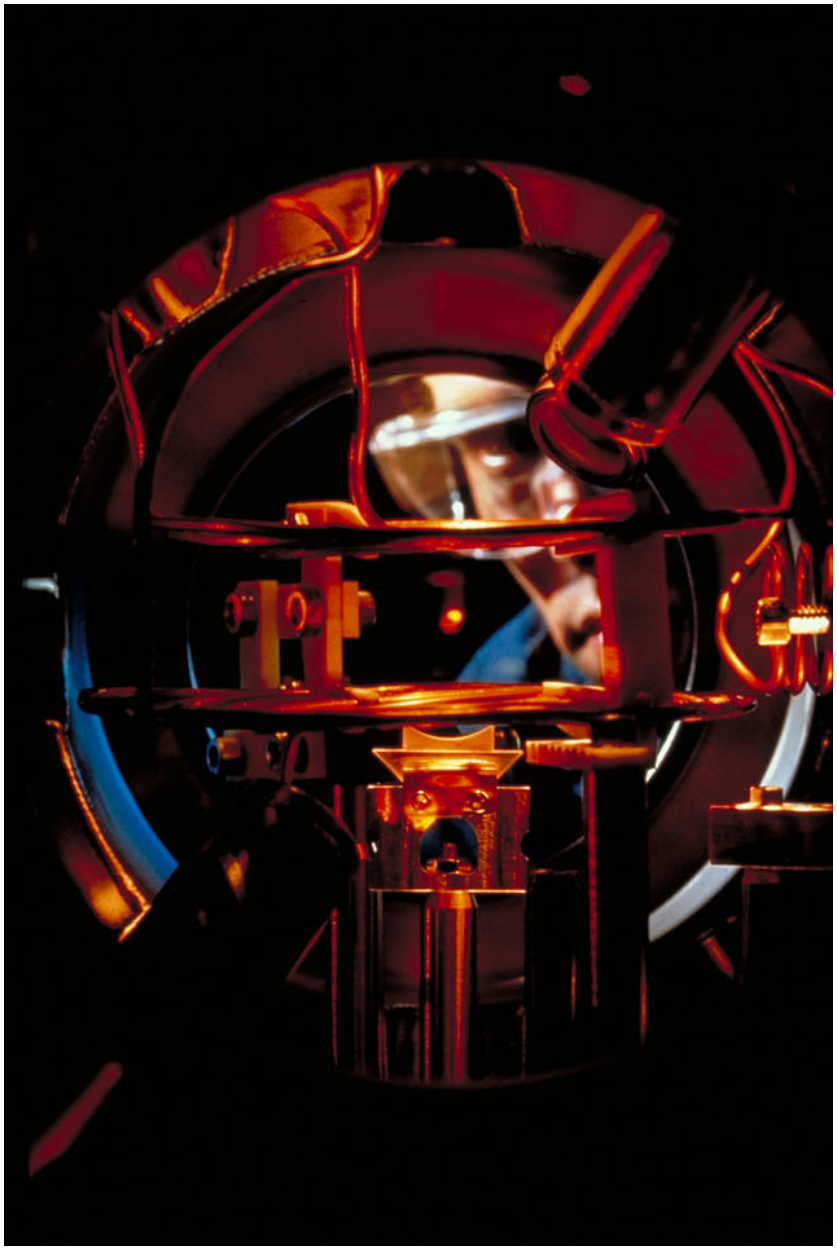
Na atoms [NIST, 1991]



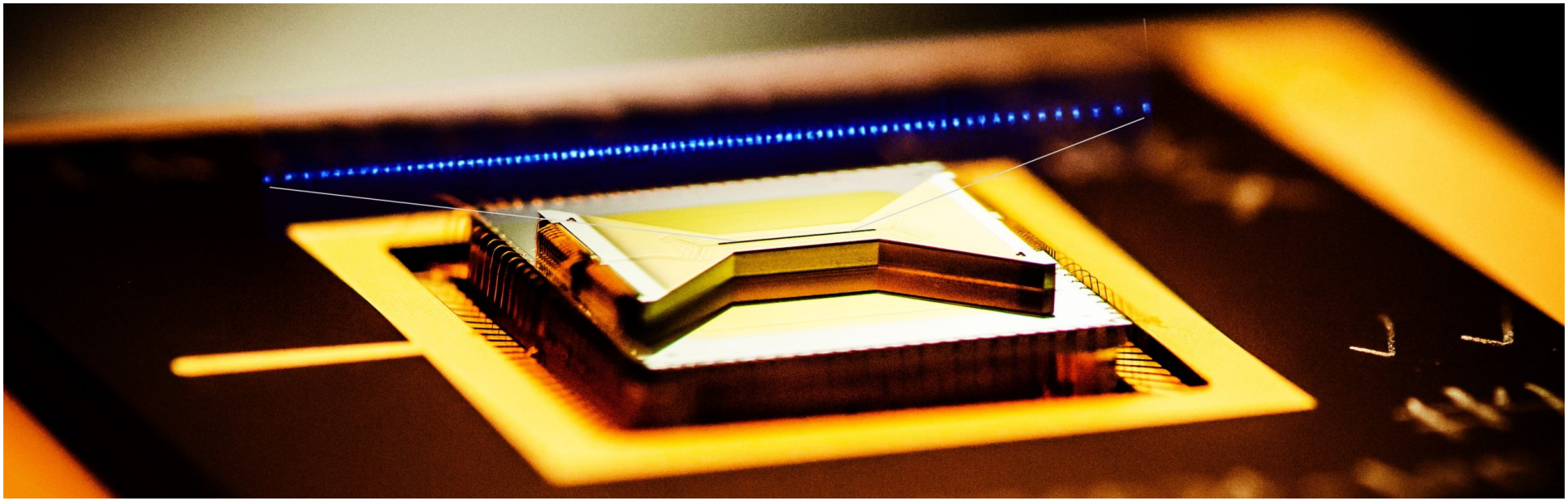
Rb BEC [NIST/JILA/CU-Boulder, 1995]



Yb ions [Duke U, 2022]



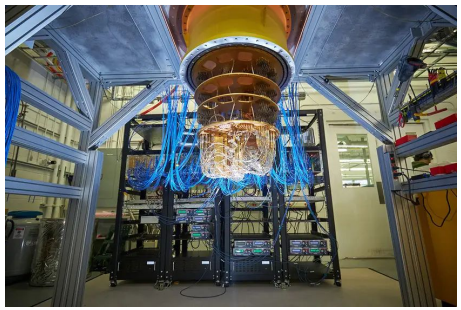
Na atoms [NIST, 1991]



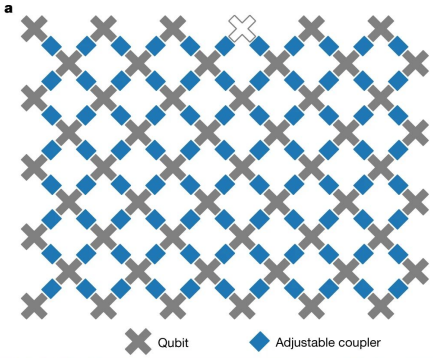
Yb ions [Duke U, 2022]

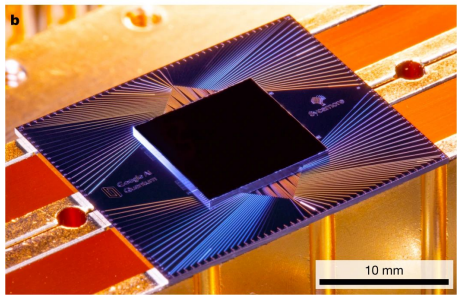
Supraconducteurs : les vainqueurs (du premier tour !)

- q-bits = transmons supraconducteurs (jonctions Josephson)
- Contrôle : microondes
- Avantages : systèmes quantiques "macroscopiques", maitrise technologique (microélectronique)
- Challenges : basses températures (20 mK), diaphonie
- Suprématie quantique atteinte en
  - 2019 par Google... mais pour un calcul totalement inutile !
  - 2025 par D-Wave... mais pour un algorithme très spécifique (recuit quantique)
- Acteurs commerciaux : IBM, SpinQ...



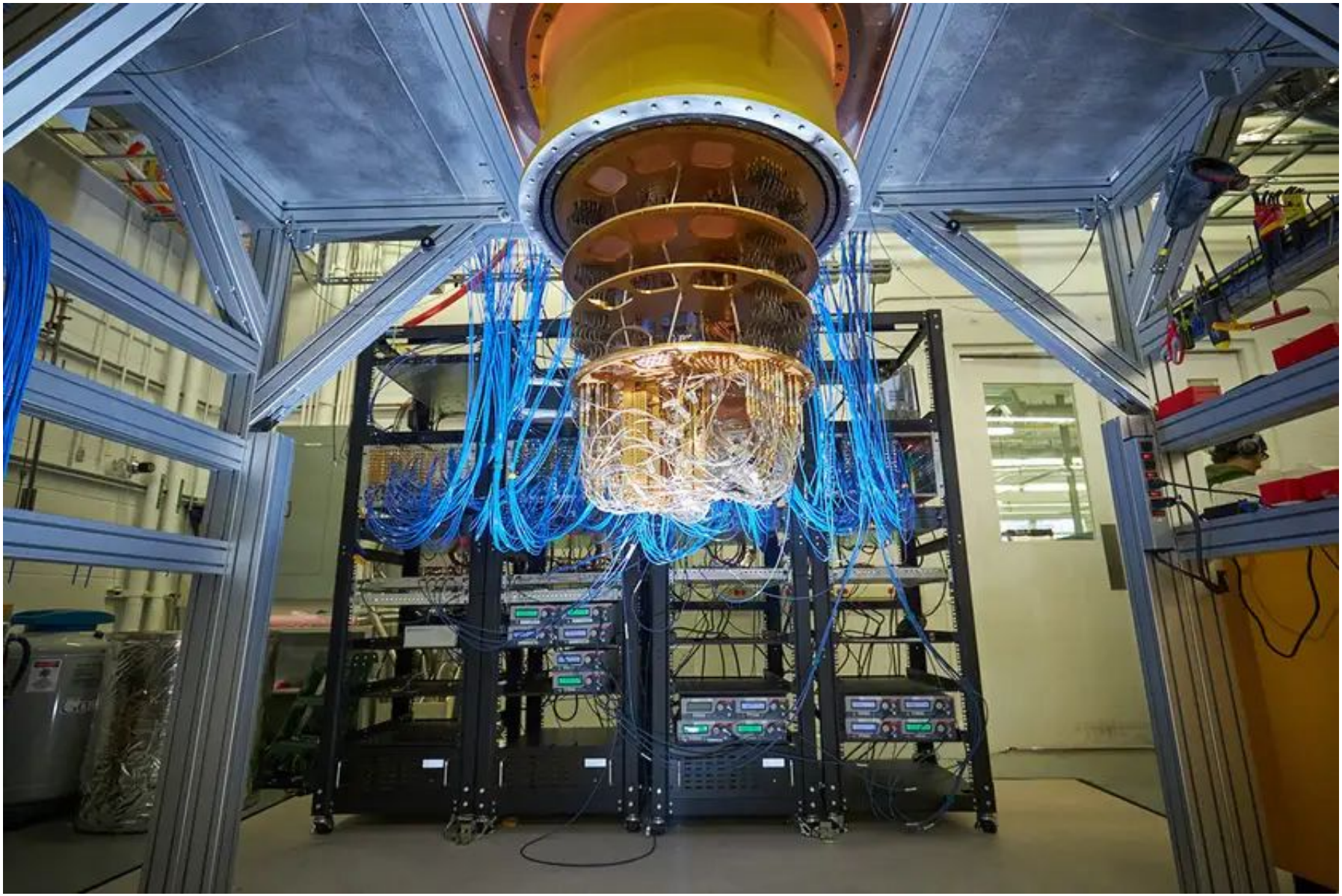
[New Scientist 2021]



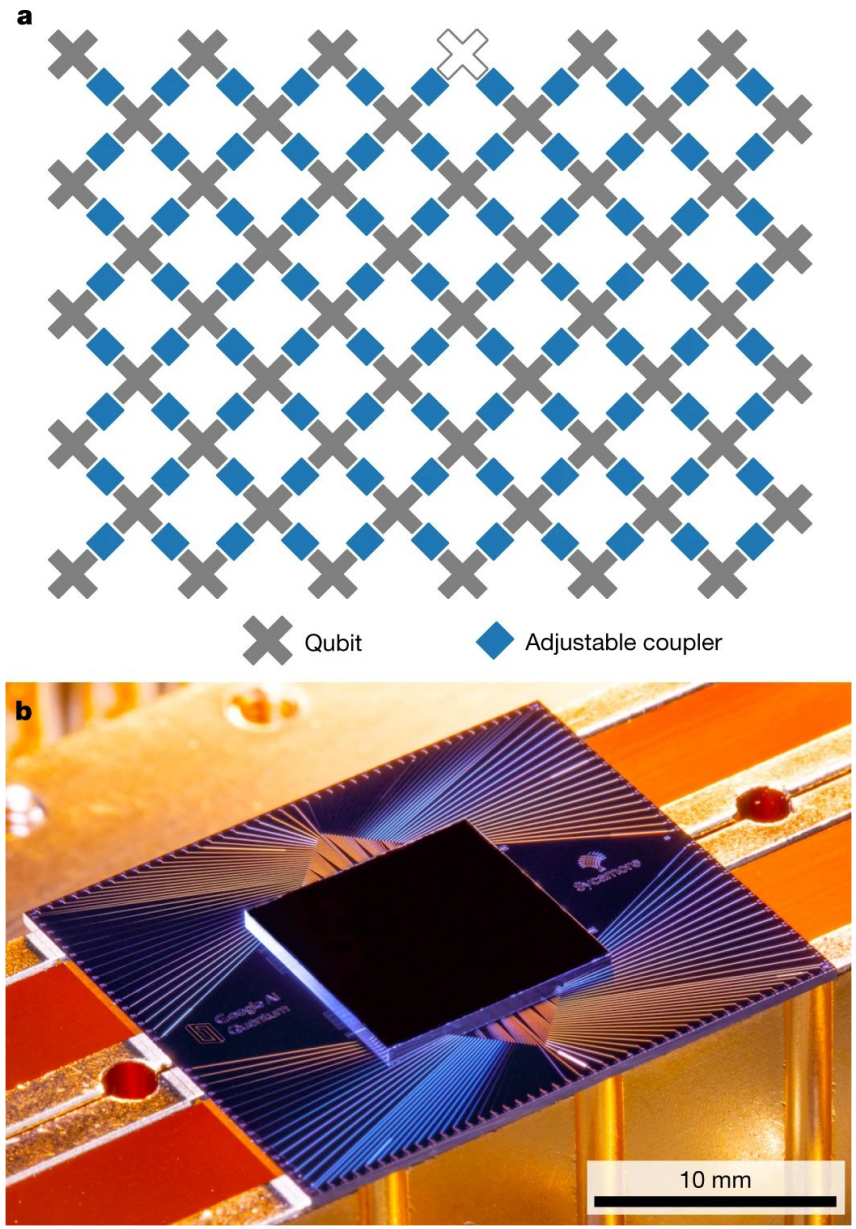


[Nature 2019]

Google Sycamore, 54 q-bits



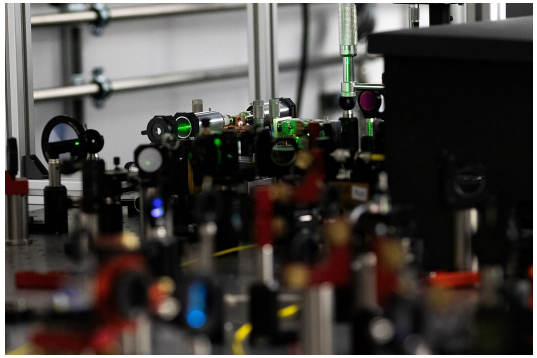
Google Sycamore [New Scientist 2021]



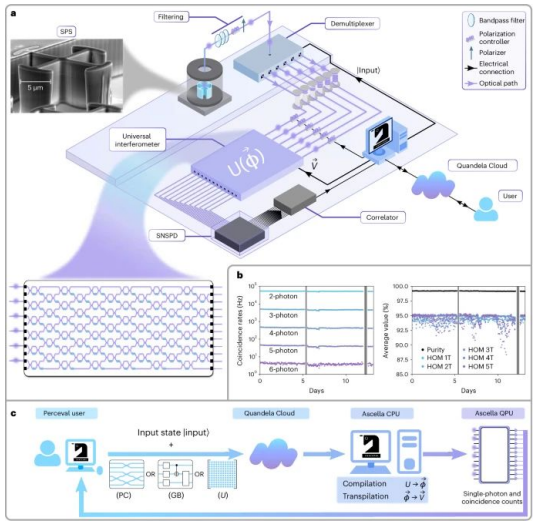
Google Sycamore [Nature 2019]

Photons : les plus versatiles

- q-bits=polarisation/nombre/ phase/chemin/temps-fréquence/ multipolarité...
- Avantages : cohérence, température ambiante, intégration sur puce, évolutivité, communication, rapidité
- Défis : fragilité photons, interactions entre photons, précision matériaux et lasers
- Acteurs commerciaux : PsiQuantum, Xanadu, QuiX Quantum, Quandela...

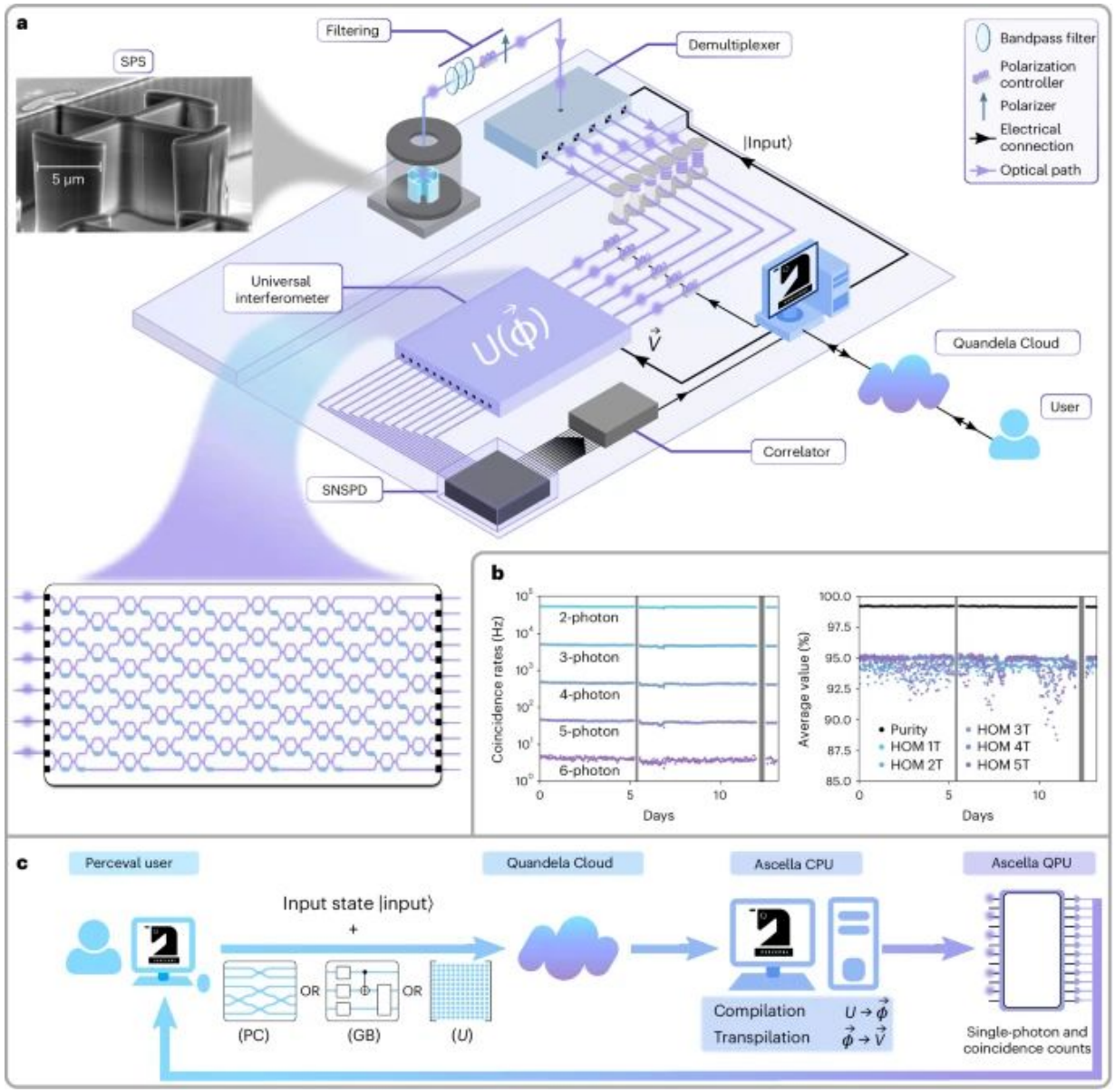


[Paderborn U 2024]



Quandela Ascella

[Nature Photonics 2024]



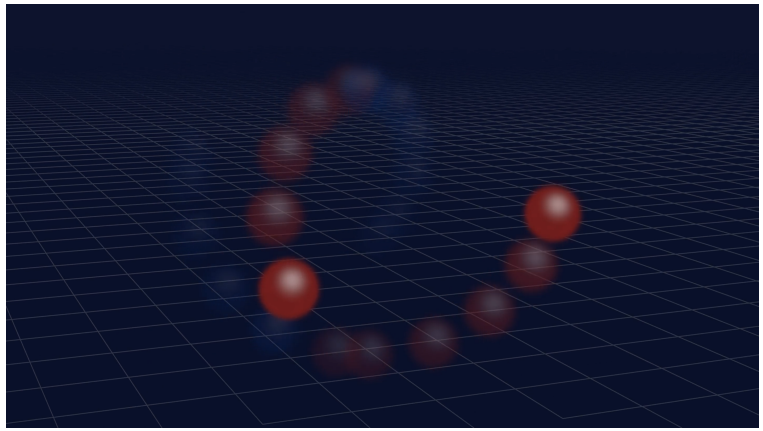
Quandela Ascella [Nature Photonics 2024]

Quelques autres candidats...

- Spin proton (RMN) : technologie éprouvée, stable, bon marché, mais faible nombre q-bits, lenteur ⇒ éducation (Spin Q)
- Anyons topologiques : quasiparticules particulièrement stables ⇒ forte réduction erreurs (Microsoft Majorana 2025)
- Points quantiques chargés : semiconducteurs, technologie éprouvée mais évolutivité/contrôle délicats (Intel, Université de Sidney)
- Spin électron : semiconducteurs, vacance azote (NV) dans diamant, molécules...



Spin Q Gemini/Triangulum



[Quanta Magazine 2022]

Conclusions

- Physique quantique
  - une centenaire révolutionnaire
  - extrêmement fructueuse (spectroscopie, lasers, semiconducteurs, supraconducteurs...)
  - qui laisse encore de nombreuses questions fondamentales ouvertes (déterminisme, problème de la mesure, sens physique de la fonction d'onde, non-localité...)
- Ordinateur (et information) quantique
  - révolution en marche
  - extrêmement ouverte d'un point de vue technologie, échelle... et temporalité !

Merci pour votre présence !

...

Et merci pour les lunettes
(sauf si utilisation ultérieure) !

