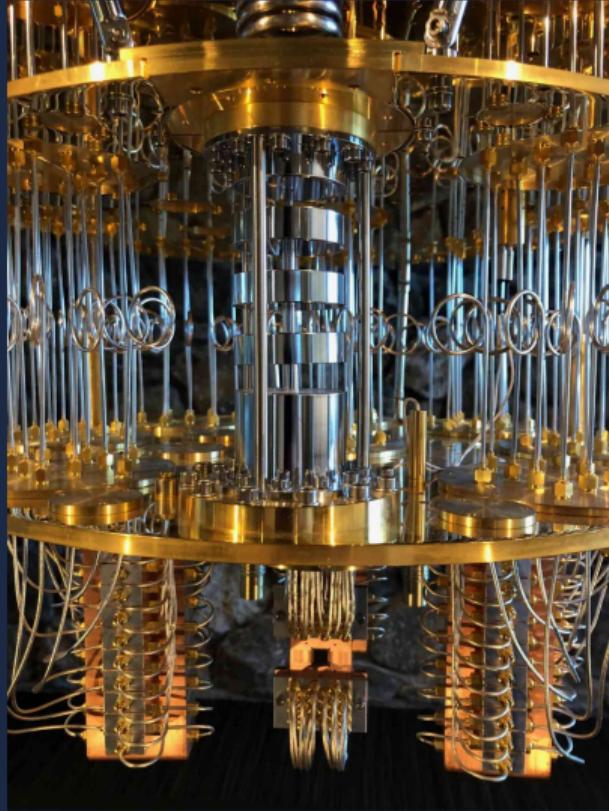


Voyage en Physique Quantique : L'intrication

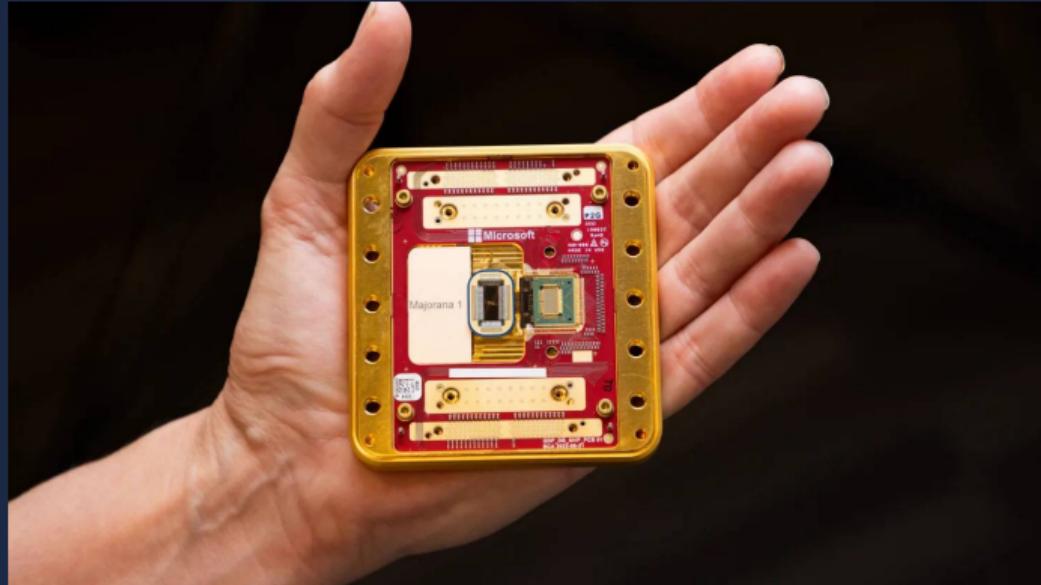
Paul Hilaire

27 Mai 2025

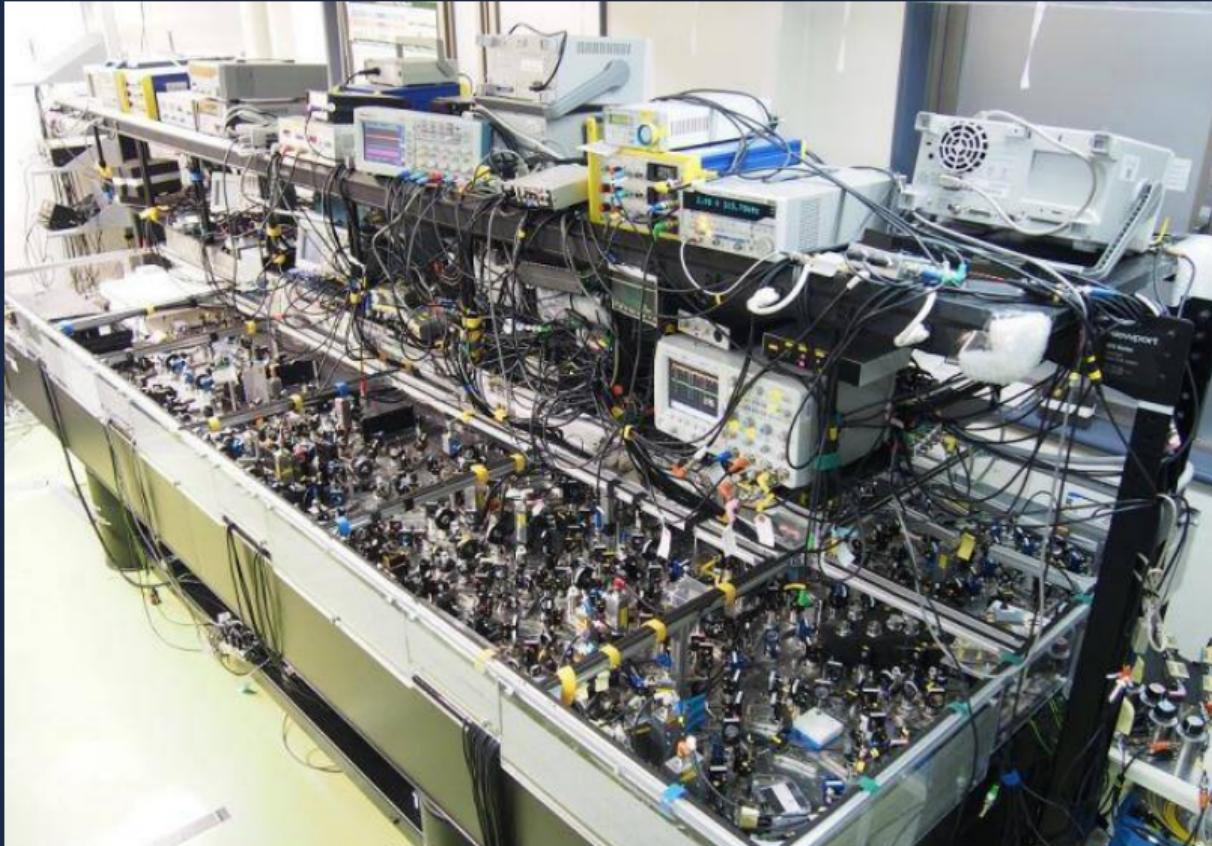
Qu'est-ce que c'est ?



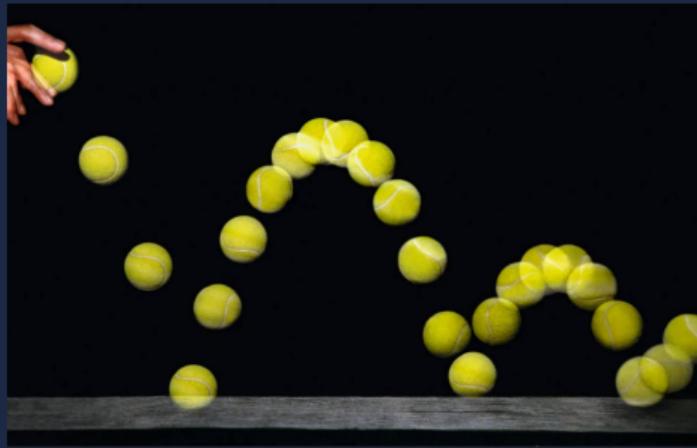
Qu'est-ce que c'est ?



Qu'est-ce que c'est ?



Physique classique



- Mécanique de Newton : $m\vec{a} = \sum \vec{F}$

Physique classique



- Mécanique de Newton : $m\vec{a} = \sum \vec{F}$
- Déterminisme : si on connaît les conditions initiales, on peut tout prédire.



- Mécanique de Newton : $m\vec{a} = \sum \vec{F}$
- Déterminisme : si on connaît les conditions initiales, on peut tout prédire.
- Hasard = manque d'information ? Exemple : double pendule.

Pourquoi la physique quantique ?

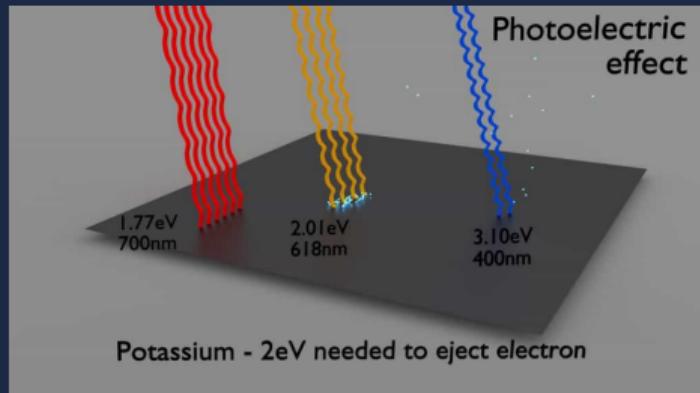
- Fin XIX^e : la physique semble "presque" complète.

Pourquoi la physique quantique ?

- Fin XIX^e : la physique semble "presque" complète.
- Mais certaines expériences ne collent pas avec les lois classiques :

Pourquoi la physique quantique ?

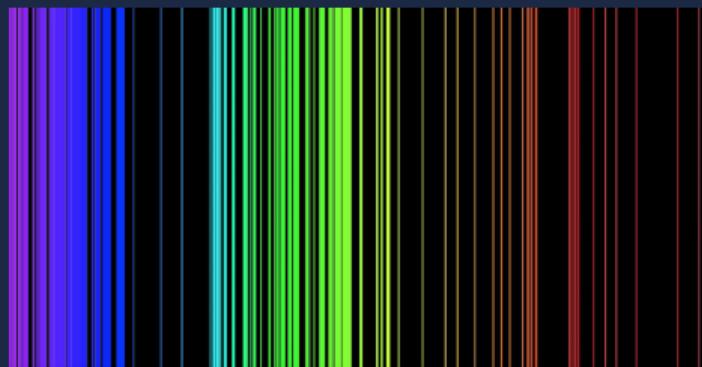
- Fin XIX^e : la physique semble "presque" complète.
- Mais certaines expériences ne collent pas avec les lois classiques :
 - L'**effet photoélectrique** : des électrons sont émis par une plaque métallique seulement si la lumière est au-dessus d'une certaine fréquence, pas en fonction de l'intensité !
 - Les **spectres de raies atomiques** : les atomes émettent/absorbent uniquement certaines couleurs précises, pas un spectre continu.



Effet photoélectrique – Einstein 1905

Pourquoi la physique quantique ?

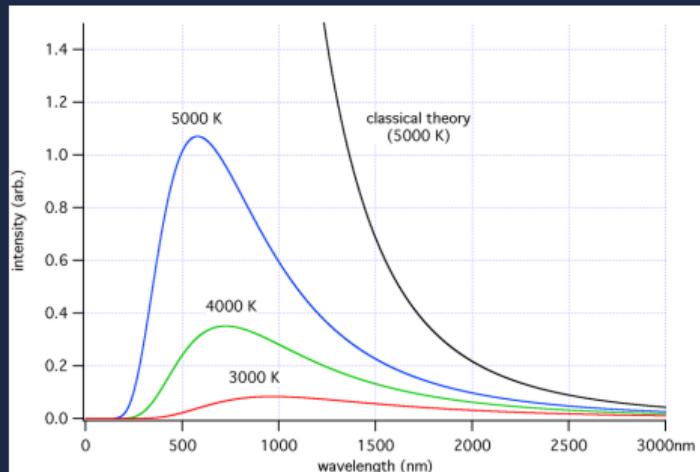
- Fin XIX^e : la physique semble "presque" complète.
- Mais certaines expériences ne collent pas avec les lois classiques :
 - **L'effet photoélectrique** : des électrons sont émis par une plaque métallique seulement si la lumière est au-dessus d'une certaine fréquence, pas en fonction de l'intensité !
 - **Les spectres de raies atomiques** : les atomes émettent/absorbent uniquement certaines couleurs précises, pas un spectre continu.



Spectre de raies d'émission

Pourquoi la physique quantique ?

- Fin XIX^e : la physique semble "presque" complète.
- Mais certaines expériences ne collent pas avec les lois classiques :
- La physique classique échoue : il faut un nouveau cadre → **la physique quantique**.



Corps noir – la loi de Planck remplace Rayleigh-Jeans

Conséquences surprenantes

- **Niveaux d'énergie discrets** Les électrons dans un atome ne peuvent exister que sur des orbites bien définies, pas entre deux.



*Le chat de Schrödinger, à la fois mort et vivant
(superposition quantique)*

Conséquences surprenantes

- Niveaux d'énergie discrets
- La dualité onde-corpuscule La matière semble avoir un comportement qui empreinte parfois à celui des ondes et parfois à celui des balles



*Le chat de Schrödinger, à la fois mort et vivant
(superposition quantique)*

Conséquences surprenantes

- Niveaux d'énergie discrets
- La dualité onde-corpuscule
- Principe d'incertitude (d'Heisenberg)
Impossible de connaître avec précision la position *et* la vitesse d'une particule.



*Le chat de Schrödinger, à la fois mort et vivant
(superposition quantique)*

Conséquences surprenantes

- Niveaux d'énergie discrets
- La dualité onde-corpuscule
- Principe d'incertitude
- **La mesure est un acte fondamental**

Observer un système quantique modifie son état. C'est ce qu'on appelle la "réduction du paquet d'ondes".



*Le chat de Schrödinger, à la fois mort et vivant
(superposition quantique)*

Conséquences surprenantes

- Niveaux d'énergie discrets
- La dualité onde-corpuscule
- Principe d'incertitude
- La mesure est un acte fondamental
- Superposition quantique



*Le chat de Schrödinger, à la fois mort et vivant
(superposition quantique)*

Conséquences surprenantes

- Niveaux d'énergie discrets
- La dualité onde-corpuscule
- Principe d'incertitude
- La mesure est un acte fondamental
- Superposition quantique
- Intrication quantique

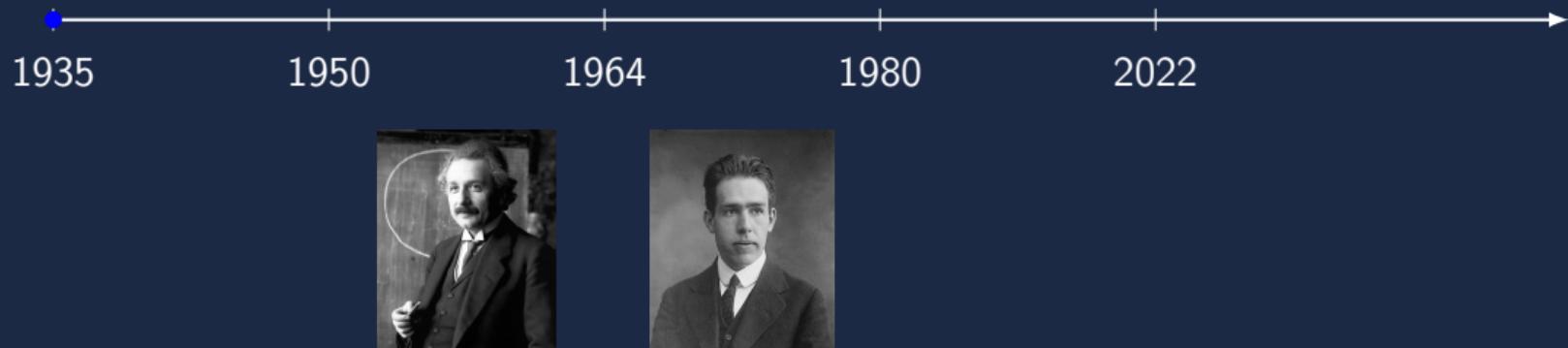


Des photons (particules de lumière) provenant d'un satellite, intriqués sur plus de 1000km

Discussion avec des pièces de monnaies

Débat (philosophique et physique) autour de l'intrication

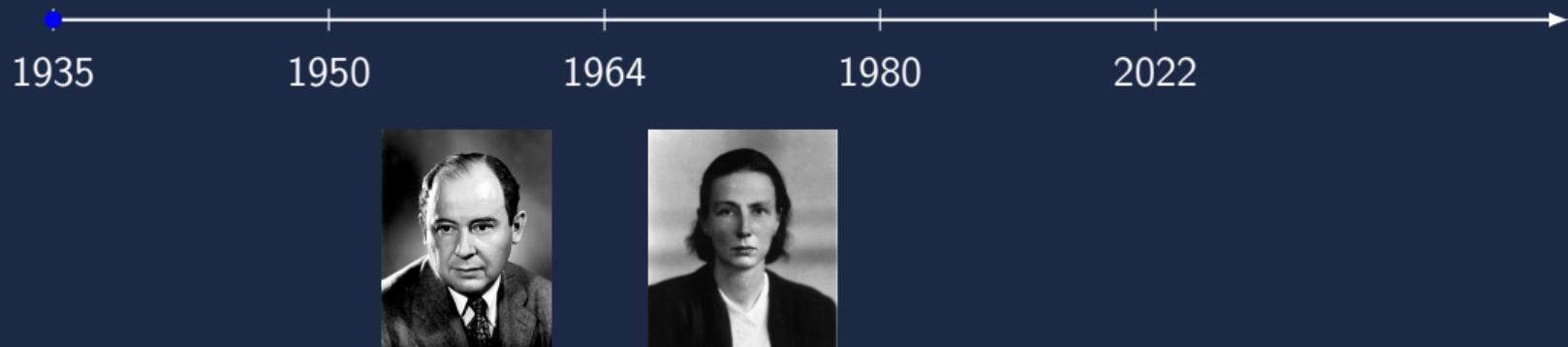
Le paradoxe EPR



- Albert Einstein débat avec Niels Bohr de la “complétude” de la physique quantique.
- Il n'est pas satisfait de son côté “aléatoire”.
- Il défend l'idée d'un modèle à variables cachées.

Débat (philosophique et physique) autour de l'intrication

Le paradoxe EPR



- John von Neumann “prouve” qu'un modèle à variables cachées est impossible.
- Grete Hermann démontre que cette preuve est fausse . . .
- Personne ne l'écoute. . .

Débat (philosophique et physique) autour de l'intrication



- Chien-Shiung Wu réalise la première expérience d'intrication de photons.
- Résultat peu reconnu... y compris aujourd'hui.
- ...

Débat (philosophique et physique) autour de l'intrication



- John Bell redécouvre l'erreur dans la preuve de von Neumann
- Il montre qu'une expérience peut trancher entre Einstein et Bohr.
- Ses inégalités de Bell rendent l'interprétation philosophique testable expérimentalement

Débat (philosophique et physique) autour de l'intrication

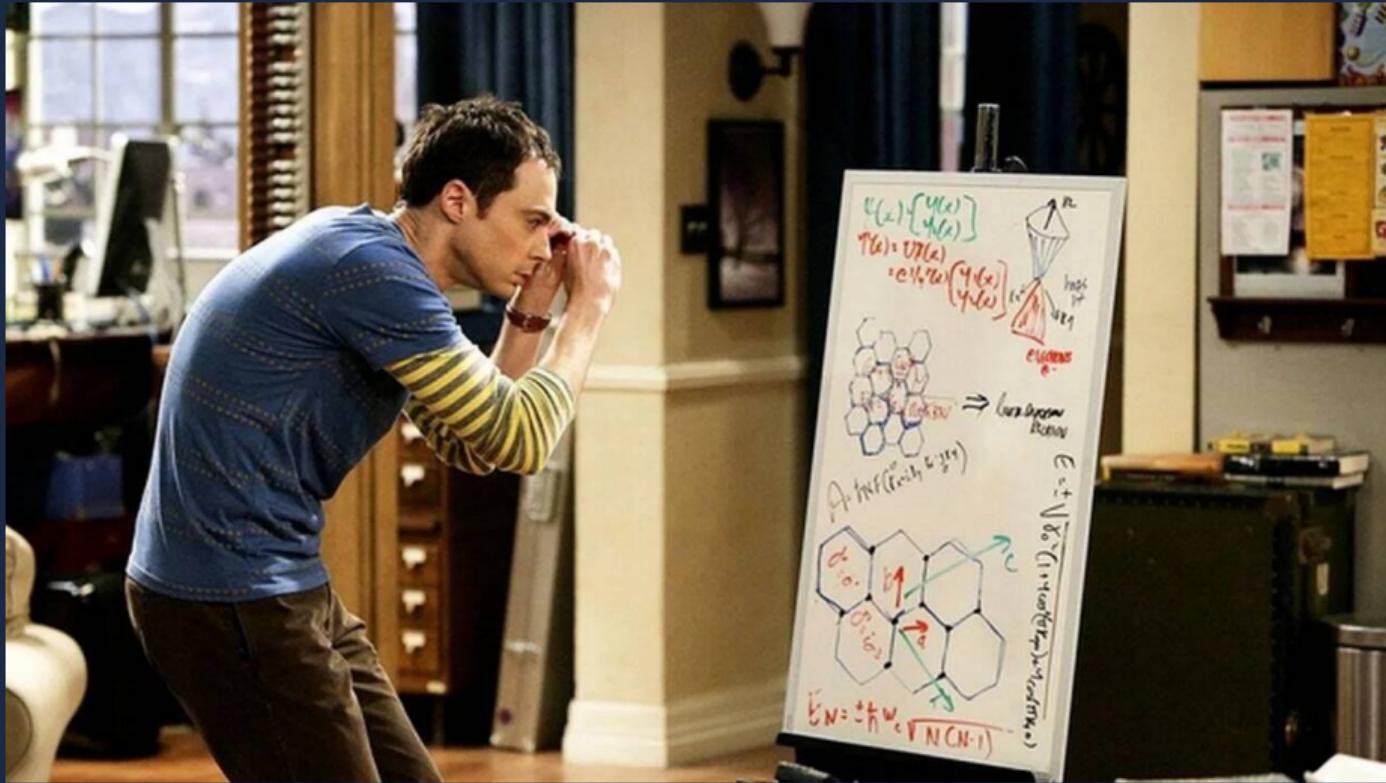


- Entre autres par John Clauser, puis Alain Aspect, puis Anton Zeilinger.
- Les modèles à variables cachées ne décrivent pas la réalité !
- Ces trois chercheurs ont reçu le prix Nobel en 2022.

Mon parcours

- Lycée
- En terminale
- Prépa scientifique.
- École d'ingénieur
- Thèse en physique quantique expérimentale, puis virage vers la théorie.
- Postdoc aux États-Unis
- Passage par l'industrie (Quandela).
- Aujourd'hui : enseignant-chercheur à Télécom Paris.

Caricature (un peu vraie) du théoricien



Être chercheur, c'est quoi ?

- Enseigner.
- Mon domaine : l'informatique quantique, et plus précisément, la correction d'erreurs quantiques.
- En pratique, mon travail se divise en trois grandes activités :
 - Me tenir à la page.
 - “Chercher”.
 - Diffuser.
- Encadrement de la recherche

Pour aller plus loin

Livres

- *Une brève histoire du temps* – S. Hawking (sur la phyQ)
- *Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur le blob* – A. Dussutour (sur la recherche)

Chaînes YouTube

- Science Étonnante
- Scilabus

Me contacter: paul.hilaire@telecom-paris.fr